



**ÖZGÜN BİR KİMYASAL BİLEŞİM KULLANILARAK
TERMOKİMYASAL BORLAMA İŞLEMİ YAPILAN 1018 ÇELİKLERİNİN
TRİBOLOJİK VE KOROZYON ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Feyyaz Furkan AKPUNAR

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2025

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Feyyaz Furkan AKPUNAR

07/07/2025

ÖZGÜN BİR KİMYASAL BİLEŞİM KULLANILARAK TERMOKİMYASAL
BORLAMA İŞLEMİ YAPILAN 1018 ÇELİKLERİNİN TRİBOLOJİK VE KOROZYON
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Feyyaz Furkan AKPUNAR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2025

ÖZET

Borlama işlemi, demir esaslı veya demir dışı malzemelerin yüzeyine çeşitli bor kaynaklarından bor elementinin difüze edilmesiyle yüksek mekanik özellikler göstermesine dayanan bir yüzey sertleştirme (difüzyon kaplama) prosesidir. Yöntem sağladığı 1700-2300 HV sertlik değeri, testere ağzı mikro yapısı, yaklaşık 75-200 µm difüzyon tabaka kalınlığı, aniden azalmış sertlik gradyeni, çift fazlı (FeB+Fe₂B) ve tek fazlı (FeB) yapısı gibi özellikleri ile ön plana çıkmaktadır. Yapıda oluşan borür tabakasının yüksek sertlik ve kimyasal stabilizasyonu sayesinde yüksek aşınma ve korozyon direnci sağlanmaktadır. Borlama işlemi araç şanzıman dişlileri, tren ray çelikleri ve petro-kimya kazı ekipmanları gibi birçok uygulama alanına sahiptir. Tez çalışmasında, 1018 düşük karbonlu çeliğine yeni bir macun bileşimi ile 1000 °C ve 4 saat süreyle borlama işlemi uygulanmıştır. İşlem sonucu oluşan yapıların X-Ray difraktometre (XRD) ile faz analizi, Mikro ve nano sertlik analizleri, alan emisyonu taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) ve Optik mikroskop ile mikroyapısal karakterizasyon işlemleri uygulanmıştır. Malzemelerin aşınma ve sürtünme gibi tribolojik özelliklerinin yanı sıra korozyon davranışlarının karakterizasyonu da potansiyodinamik ölçümler aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. X-Ray difraktometre pikleri incelendiğinde tek fazlı (Fe₂B) ve çift fazlı (FeB ve Fe₂B) yapılar tespit edilmiştir. Mikroskobik incelemelerde ortalama çift fazlı yapıda toplam 264 µm, tek fazlı yapıda 200 µm ve difüzyon tavlama ile 325 µm difüzyon tabaka kalınlığı elde edilmiştir. Sertlik ölçümlerinde işlem görmemiş çelik yaklaşık 261 vickers sertlik sunarken borlama işlemi sonrası çift fazlı yapı ortalama 1926 HV, tek fazlı yapı ortalama 1908 HV ve difüzyon tavllanmış yapı ile 2123 HV sertlik elde edilmiştir. Tribolojik analiz sonrası işlem görmemiş çelik, çift fazlı, tek fazlı ve difüzyon tavllanmış yapılar için sürtünme katsayıları sırasıyla 0,55, 0,58, 0,60 ve 0,65 yaklaşık olarak ölçülmüştür. %3,5 NaCl ile yapılan elektrokimyasal korozyon testi sonucu tafel eğrileri incelendiğinde borlamanın korozyon dayanımını geliştirildiği tespit edilmiştir.

Bilim Kodu : 91541

Anahtar Kelimeler : Termokimyasal borlama, borlama, macun borlama

Sayfa Adedi : 75

Danışman : Prof. Dr. Bülent BOSTAN

İkinci Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Taha Alper YILMAZ

INVESTIGATION OF THE TRIBOLOGICAL AND CORROSION PROPERTIES OF
1018 STEELS THERMOCHEMICALLY BORIDED USING A NOVEL CHEMICAL
COMPOSITION

(M. Sc. Thesis)

Feyyaz Furkan AKPUNAR

GAZI UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2025

ABSTRACT

Boriding is a thermochemical surface hardening process in which boron atoms diffuse into the surface of ferrous or non-ferrous materials, forming hard boride layers that significantly enhance mechanical and chemical properties. The process typically results in high surface hardness values (1700–2300 HV), a characteristic saw-tooth microstructure, a steep hardness gradient, and diffusion layers with thicknesses ranging from 75 to 200 μm . Depending on the treatment conditions, either single-phase (Fe_2B) or dual-phase ($\text{FeB} + \text{Fe}_2\text{B}$) structures may form. These features provide superior wear and corrosion resistance, making boriding suitable for applications such as transmission gears, railway steels, and petrochemical excavation tools. In this study, 1018 low-carbon steel was borided at 1000 $^{\circ}\text{C}$ for 4 hours using a newly developed boron-containing paste. The resulting layers were characterized by X-ray diffraction (XRD) for phase analysis and by field emission scanning electron microscope (FE-SEM) and optical microscopy for microstructural evaluation. Microhardness and nanohardness measurements were performed, along with tribological tests to assess friction and wear behavior. Corrosion resistance was evaluated through potentiodynamic polarization in a 3.5% NaCl solution. XRD analysis revealed both single-phase (Fe_2B) and dual-phase ($\text{FeB} + \text{Fe}_2\text{B}$) structures. The average diffusion layer thicknesses were measured as 264 μm for the dual-phase layer, 200 μm for the single-phase layer, and 325 μm for the diffusion-annealed structure. Vickers hardness values were 1926 HV (dual-phase), 1908 HV (single-phase), and 2123 HV (annealed), compared to 261 HV for untreated steel. Friction coefficients were obtained approximately 0.55, 0.58, 0.60 and 0.65 for untreated steel, dual phase, single-phase and diffusion annealed structures respectively. Corrosion tests indicated that boriding significantly improved the material's resistance to electrochemical degradation.

Science Code : 91541

Key Words : Thermochemical boriding, boriding, paste boriding

Page Number : 75

Supervisor : Prof. Dr. Bülent BOSTAN

Co-Supervisor : Assist. Prof. Dr. Taha Alper YILMAZ

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca her türlü konuda bana destek olan, çalışmalarımın her aşamasında bana yol gösteren, deneyimlerinden ve bilgi birikiminden yararlandığım Danışman hocam Prof. Dr. Bülent BOSTAN'a ve ikinci Danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Taha Alper YILMAZ'a teşekkür ederim. Yüksek Lisans tez çalışmam kapsamında gerekli deneyleri ve analizleri bünyesinde gerçekleştirmiş olduğum Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu-Bor Araştırma Enstitüsüne teşekkür ederim. Tez çalışmasına katkı için Ekabor ticari borlama tozunu temin eden Vezneli A.Ş.'ye teşekkür ederim. Yüksek lisans tez çalışmasında bilgisi ve öngörülerini ile yön veren Muhammet Nasuh ARIK Hocam'a, teşekkür ederim. Deneysel çalışmalar süresince desteğini ve yardımını esirgemeyen sevgili çalışma arkadaşlarım; Cihan ESEROĞLU, Özden ACAR'a, Nasibe ARSLAN'a teşekkür ederim. Katkılarından dolayı değerli arkadaşlarım Yüksek Mühendis Kerem USLU ile Esra BABÜR'e ve Öğr. Gör. Dr. Ufuk TAŞÇI hocama teşekkür ederim. Hayatımın her aşamasında yanımda olan desteğini, sevgisini ve yardımını esirgemeyen, tüm sıkıntılarımı birlikte aştığımız Annem Hayriye AKPUNAR'a ve Babam Dursun AKPUNAR'a teşekkür ederim. Son olarak yine desteğini esirgemeyen ablalarım Fatma YARDIM ve Firdevs YENER'e teşekkür ediyorum.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR	xvii
1. GİRİŞ	1
2. TEORİK BİLGİLER	5
2.1. Borlama Prosesi	5
2.1.1. Borlama prosesinin tanımı	5
2.1.2. Borlama prosesinin avantaj ve dezavantajları.....	5
2.2. Borlama Yöntemleri.....	7
2.2.1. Katı ortam borlama	8
2.2.2. Sıvı ortam borlama.....	10
2.2.3. Gaz ortam borlama.....	13
2.3. Multikomponent borlama.....	15
2.4. Alaşım elementlerin etkisi.....	16
3. LİTERATÜR TARAMASI	19
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	31
4.1. Kullanılan malzemeler ve cihazlar.....	31
4.2. Deneysel yöntem.....	33
4.2.1. Borlama deneylerine hazırlık	33

	Sayfa
4.2.2. Macun borlama deneyleri.....	35
4.3. Deneylerin Karakterizasyonu.....	36
4.3.1. Optik mikroskop	36
4.3.2. X-ışınları kırınımı (XRD) analizi.....	37
4.3.3. Elektrokimyasal Korozyon Testi	38
4.3.3. Nanosertlik analizi	39
4.3.5. Mikrosertlik analizi	40
4.3.6. Aşınma analizi.....	40
4.3.7. Alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu	42
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	43
5.1. Mikroyapısal Analizler.....	43
5.2. Sertlik Analizleri	46
5.3. Faz Analizi	50
5.4. Aşınma Analizi.....	51
5.5. Elektrokimyasal Korozyon Testi.....	58
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	65
KAYNAKLAR.....	67
ÖZGEÇMİŞ	74

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Çeşitli malzemelerin sertlik değerleri	6
Çizelge 2.2. Çeşitli multikomponent borlama çalışmaları	16
Çizelge 4.1. AISI 1018 çeliğinin kimyasal kompozisyonu.....	31
Çizelge 4.2. Macun oluşturmak için kullanılan tozlar	32
Çizelge 4.3. Kullanılacak macun kompozisyonu oranları	34
Çizelge 5.1. İşlem görmemiş, çift fazlı, tek fazlı ve difüzyon tavllanmış yapıların sürtünme katsayıları.....	53
Çizelge 5.2. Aşınma oranı ve yüzey verileri.....	53
Çizelge 5.3. Borlama uygulanmamış çelik korozyon sonucu elde edilen parametreler .	58

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Borlama yöntemleri	7
Şekil 2.2. Kutu borlama düzeneği şematik çizimi	9
Şekil 2.3. Rezistans fırında ergimiş borat banyosu.....	12
Şekil 2.4. Alaşım elementlerinin borür tabakasının büyümesindeki etkisi.....	17
Şekil 5.1. Tek fazlı yapıların çeliklerin yüzeyden merkeze mikrosertlik analizi.....	47
Şekil 5.2. Çift fazlı yapıların yüzeyden merkeze mikrosertlik analizi.....	47
Şekil 5.3. Difüzyon tavllanmış çeliklerin yüzeyden merkeze mikrosertlik analizi	48
Şekil 5.4. Çift faz ve tek fazlı yapıların X-ışınları difraktometresi analizleri.....	50
Şekil 5.5. Difüzyon tavlama sonucu oluşmuş Tek fazlı (Fe_2B) yapı	51
Şekil 5.6. Çift faz, tek faz ve difüzyon tavllanmış yapıların sürtünme katsayıları	52

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. İşlem öncesi hazırlanmış borlama macunu.....	10
Resim 4.1. AISI 1018 düşük karbon çelikleri.....	31
Resim 4.2. Kullanılmış paslanmaz çelik borlama kabı ve kullanılmamış paslanmaz çelik borlama kabı (Pota-Retort).....	32
Resim 4.3. Kamara tipi fırın	33
Resim 4.4. Silisyum karbür rezistanslı tüp fırın	33
Resim 4.5. Ayna görünümü sağlanmış çelikler	34
Resim 4.6. Borlama işlemi için hazırlanmış macun örnekleri	34
Resim 4.7. Üzeri macunlanmış ve toz içerisine gömülmüş numuneler içeren kap	35
Resim 4.8. (a) Kurutma işlemlerinde kullanılan etüv (b) Borlama işleminde kullanılan kamara tipi fırın	35
Resim 4.9. Borlama sonrası çıkan numune ve ultrasonik ile temizlenmiş numune	36
Resim 4.10. Nikon eclipse Lv100nd marka ve modelli optik mikroskop	37
Resim 4.11. Panalytical empyrean XRD cihazı.....	37
Resim 4.12. (a) İşlemde kullanılan sıvı ve ekipmanlar (b) palmSens4 potansiyostat-galvonastat cihazı (c) Elektrotlar ve numunenin olduğu korozyon düzeneği.....	38
Resim 4.13. AntonPaar NHT ³ nano indentasyon cihazı	39
Resim 4.14. Shimadzu HVM-G mikro sertlik ölçüm cihazı.....	40
Resim 4.15. Anton Paar TRB ³ tribometresi	40
Resim 4.16. Hitachi SU5000 FE-SEM cihazı.....	42
Resim 5.1. (a) İşlem görmemiş çelik (AISI 1018) optik görüntüsü (b) Difüzyon tavlama sonrası tek fazlı (Fe ₂ B) çeliğin FE-SEM mikro yapısı (c) Borlama sonrası çift fazlı (Fe ₂ B + FeB) çeliğin FE-SEM mikro yapısı (d) Borlama sonrası tek fazlı (Fe ₂ B) çeliğin FE-SEM mikro yapısı.....	44
Resim 5.2. (a) Çift Fazlı yapıda FE-SEM 10000x ile çatlak oluşumunun ölçüldüğü bir bölge (b) Çift Fazlı yapıda FE-SEM ile 1000x çatlak oluşumunun ölçüldüğü bir diğer başka bölge	45

Resim	Sayfa
Resim 5.3. (a) Çift fazlı ($\text{Fe}_2\text{B} + \text{FeB}$) FE-SEM mikro yapısı (b) Mikro yapıda difüzyon tabakası sonrası taban malzemeden alınan spektrum (c) Difüzyon tabakasındaki Fe_2B mikro yapısından alınan spektrum (d) Difüzyon tabakasında FeB yapısından alınan spektrum.....	45
Resim 5.4. Tek Fazlı (Fe_2B) demir borür yapısının haritalama EDS analizi sonucu	46
Resim 5.5. Çift fazlı yapıdan ($\text{Fe}_2\text{B} + \text{FeB}$) alınan nanosertlik ölçümü	48
Resim 5.6. Tek Fazlı yapıdan (Fe_2B) alınan nanosertlik ölçümü	49
Resim 5.7. İşlemsiz 1018 çelikten alınan nanosertlik ölçümü.....	49
Resim 5.8. AISI 1018 işlem görmemiş çeliğin aşınmış yüzey FE-SEM mikro yapıları (a) 1000x aşınma mekanizmaları (b) 5000x aşınma mekanizmaları (c) Aşınma iz kalınlığı	54
Resim 5.9. Borlama sonucu tek fazlı yapı olmuş çeliğin aşınmış yüzey SEM mikro yapıları (a) 1000x aşınma mekanizmaları (b) 5000x aşınma mekanizmaları (c) Aşınma iz kalınlığı	55
Resim 5.10. Borlama sonucu çift fazlı yapı olmuş çeliğin aşınmış yüzey SEM mikro yapıları (a) 1000x aşınma mekanizmaları (b) 5000x aşınma mekanizmaları (c) Aşınma iz kalınlığı	56
Resim 5.11. Difüzyon tavlamanmış çeliğin aşınma yüzey SEM mikro yapıları (a) 1000x aşınma mekanizmaları (b) 5000x aşınma mekanizmaları (c) Aşınma iz kalınlığı	57
Resim 5.12. İşlem görmemiş (1018) çelik, Borlama işlemi sonrası tek fazlı (Fe_2B), çift fazlı ($\text{FeB} + \text{Fe}_2\text{B}$) yapılar ve difüzyon tavlamanmış numunelere ait tafel eğrileri.....	58
Resim 5.13. İşlem görmemiş (1018) çeliğin (a) korozyon sonucu oluşan yüzeyin görüntüleri (b) korozyona uğratılmamış yüzeyi	59
Resim 5.14. Tek Fazlı (Fe_2B) yapının (a) korozyon sonucu oluşan yüzeyin görüntüleri (b) korozyona uğratılmamış yüzeyi	60
Resim 5.15. Çift Fazlı ($\text{FeB} + \text{Fe}_2\text{B}$) yapının (a) korozyon sonucu oluşan yüzeyin görüntüleri (b) korozyona uğratılmamış yüzeyi	61
Resim 5.16. Difüzyon tavlamanmış yapının (a) korozyon sonucu oluşan yüzeyin görüntüleri (b) korozyona uğratılmamış yüzeyi	62
Resim 5.17. Difüzyon tavlamanmış yapının korozyona uğratılmamış yüzeyi ve korozyon sonucu oluşan yüzeyinin kimyasal kompozisyonu.....	63

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
°C	Celcius
µm	Mikrometre
HV	Vickers Sertlik
mA/cm ²	Miliamper/santimetrekare
g	Gram
HK	Knoop sertlik
mN	Mili Newton
K	Kelvin
GPa	Gigapascal
Kj/Mol	Kilojoule/mol
N	Newton
nm	Nanometre
ml	Mililitre
mm	Milimetre
cm/s	Santimetre/saniye
°	Derece
I _{corr} , R _p	Akım yoğunluğu ve polarizasyon direnci
ρ	Yoğunluk
d	İz derinliği
w	İz genişliği
L	İz uzunluğu
V	Hacim
β _a , β _b	Anodik ve Katodik tafel eğimleri
E _{corr}	Korozyon potansiyeli
μ	Sürtünme Katsayısı

Kısaltmalar**Açıklamalar**

AISI	Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
Al₂O₃	Alümina
B₄C	Bor karbür
B₂O₃	Bor oksit
BCl₃	Bor Triklorür
B₂H₆	Diboran
Durborid	Ticari borlama tozu ve macunu
DTA	Diferansiyel Termal Analiz
EDS	Enerji Dağıtıcı Spektroskopi
EA	Eşdeğer ağırlık
EKABOR	B ₄ C, KBF ₄ ve SiC kompozisyonuna sahip ticari toz
EDX	Enerji Dağıtıcı X-ışını
FeB	Demir monoborür
Fe₂B	Demir diborür
GDOES	Glow-deşarj optik emisyon spektroskopisi
H₃BO₃	Borik Asit
KBF₄	Potasyum tetrafloraborat
Nd₂O₃	Neodymium oksit
Na₂B₄O₇	Boraks
NaF	Sodyum Florür
NH₄Cl	Amonyum klorür
OCP	Açık devre potansiyeli
PH	Faz homojenizasyonu
PDCPB	Pulsed DC Toz Paket Borlama
SAE	İnternasyonal Otomotiv Mühendisleri Topluluğu
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
SiC	Silisyum karbür
TGA	Termogravimetrik analiz
Turbonit	Ticari nitrürleme tozu
WC	Tungsten karbür
XRD	X ışınları difraktometresi

1. GİRİŞ

Yüzey sertleştirme teknikleri, malzemelerin dış katmanını olan yüzeyini sertleştirerek içyapısı sünek, dış tabakası yüksek sertlikte malzemelerin üretimine olanak tanımaktadır. Bu teknikler, yeni bir katmanın kontrollü bir şekilde oluşturulması ya da mevcut yüzeye eklenmesini içeren katman ekleme yöntemleri ile, parça boyutlarında belirgin bir artış olmaksızın yüzey veya yüzey altı özelliklerinin değiştirilmesini amaçlayan temel malzeme ısıtma işlemleri şeklinde sınıflandırılabilir. Katman eklemeye; sert yüzey kaplama işlemlerinin yanı sıra ince film, elektrokimyasal kaplama gibi kaplamalar örnek verilebilirken alttaşı ısıtma işlemine; borlama, karbürleme gibi difüzyon yöntemleri ve indüksiyonla sertleştirme gibi seçici yüzey sertleştirme işlemleri örnek verilebilir. Difüzyon yöntemleri, karbon, azot veya bor gibi sertleştirme türleriyle yüzeyin kimyasal bileşiminin değiştirilmesi olarak tanımlanır. Difüzyon yöntemleri, bir parçanın tüm yüzeyinin etkili bir şekilde sertleştirilmesine olanak tanır ve genellikle çok sayıda parçanın yüzeyinin sertleştirilmesi gereken yerlerde kullanılır. Bu işlem, bir malzemenin yüzey ve yüzey altı bölgelerine ısı ile kimyasal kompozisyonun değiştirilmesini içerdiğinden termokimyasal teknikler olarak adlandırılmaktadır [1].

Borlama 19. yy. sonlarından bu zamana uygulanan bir yüzey işlemidir. İlk olarak 1985 yılında Moissan tarafından çeliğe bor difüze edilerek sert borür katmanına sahip yüzey elde edilebileceği keşfedilmiş ve borlama çalışmaları başlamıştır [2]. Borlama, Nitrürleme, Karbürleme gibi diğer yöntemler ile gelişme göstererek günümüze kadar ulaşmıştır. Borlama çeşitli malzemelerin yüzeyine bor difüze edilerek yüzeyden çekirdeğe doğru sert, aşınmaya ve korozyona dayanıklı borür tabakası elde etmek olarak tanımlanabilir. En çok demir alaşımları özellikle çelikler 850-1200 °C sıcaklıkta belirli bir süre ile borlanır. Genelde iğnemsî ya da başka bir tanımla testere ağzı benzeri bir mikro yapı elde edilir. Oluşan yapı yüzeyde Fe₂B ve FeB olmak üzere çift fazlı ya da Fe₂B olarak tek fazlı borür yapısı olarak çekirdeklenir. Bu özellikler sıcaklık, zaman, taban malzeme ve borlama toz bileşimine bağlı olarak deney şartlarına göre değiştirilebilmektedir. Termokimyasal Borlama; Nitrürleme, Karbürleme gibi diğer yöntemlere kıyasla daha yüksek sertlik, yüksek aşınma direnci sağlamaktadır. Ayrıca borlama, yüksek sıcaklıkta yüzey sertliğini korumakta, asit ve alkali çevre koşullarına da yüksek korozyon ve erozyon direnci sağlamakta, sıvı metal etkilerine karşı yüksek direnç ve 3-10 kat daha uzun dayanım süresi gibi avantajları ile öne çıkmaktadır [3,4].

Borlama ilk başlarda malzeme yüzeyine termal enerji ve kimyasal reaksiyon ile yüksek oranda bor emdirilmesi olarak sadece termokimyasal yöntem ile tanımlanmaktaydı. Gelişen teknoloji ile yeni yöntemler ortaya çıkmış ve temelde termokimyasal ve fiziksel borlama olarak iki şekilde sınıflandırılmaktadır. Fiziksel borlama proseslerine; deşarj şartları altında kızdırma, bor iyon implantasyon ve yüksek enerji tekniği örnek verilebilir. Termokimyasal yöntem ise katı, sıvı ve gaz ortamlarında borlama olarak sınıflandırılabilir. Sanayide kolaylığı ve uygun maliyetli olması gibi nedenler ile sıklıkla uygulanan yöntem katı ortamda kutu borlama ve macun borlama olarak karşımıza çıkmaktadır [3].

Termokimyasal borlama demir esaslı malzemelerden; çelikler ve dökme demirden karbon ve alaşımlı türlerine uygulanmaktadır. Sıklıkla düşük ve orta karbonlu çeliklerin yanı sıra düşük alaşımlı çeliklere uygulandığı literatürde görülmektedir [5–7]. Demir dışı alaşımlardan ise titanyum, nikel, kobalt alaşımları ve nikel tabanlı süper alaşımlar için borlama yapılabilmektedir. Ayrıca molibden, tungsten, niyobyum ve sinterlenmiş karbürlerde borlama uygulanabilmektedir [5,8–12]. Borlama işlemi uygulanmış malzemeler çeşitli endüstrilerde kullanılmaktadır. Borlama işlemi diş implantları, burç, cıvata ve nozullar, dişli tahrikler, pompa milleri, çekme kalıpları, külçe ve ekstrüzyon kalıpları, konik ve vida dişlileri, şaft milleri gibi birçok makine elemanlarında ve yüksek mukavemetli çeliklerle radyasyon kalkını özelliklerinin geliştirilmesi gibi birçok kullanım alanına sahiptir [4]. Ek olarak Petrol doğal gaz kuyularında kazı ekipmanlarında ve buhar türbinlerinin kanat, nozul, rotor, vanalar ve buhar türbin yataklarında kullanımının yanı sıra tren ray çelikleri gibi birçok kullanım alanı göze çarpmaktadır [13,14].

Yapılan çalışmalar borür tabakasının gösterdiği kırılganlığı azaltmak ve borür tabakasından taban malzemeye geçişte sertlik gradyanını ayarlamak ve FeB fazını azaltmak ya da ortadan kaldırmak adına eş zamanlı ya da sırasıyla borlama prosesini Karbürleme, Nitrürleme gibi diğer yöntemlerle birleştirilmek suretiyle borokarbürleme, boronitrürleme ve borokarbonitrürleme isimleriyle metal olmayan çok bileşenli borlamalar yapılmaktadır. Titanyum, krom, nikel gibi metallerin bor elementi ile difüzyonuyla borotitanyumlama (borotitanizing) gibi metal içeren çok bileşenli difüzyon kaplamalarda yapılmaktadır [3,4,15,16]. Ayrıca Termokimyasal katı ortam borlama işleminde ticari toza katkılar ve yeni toz çalışmaları söz konusudur. Ticari tozun satışının bulunması ve kolay uygulanabilirliği ile dünyada yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak Türkiye de ticari borlama tozu ya da tozun bir bileşeni yurtdışından tedarik edilmesi kullanımını sınırlamaktadır.

Bu çalışma iyi mekanik özelliklere sahip, uygun maliyetli ve yaygın bir şekilde bulunan ticari AISI 1018 düşük karbon çeliğinin borlama ile kuru aşınma direnci, korozyon direnci ve sertlik özelliklerinin geliştirilmesini amaçlamaktadır. Ayrıca kolay yapışan, düşük poroziteli ve kolay temizlenen, yeni kompozisyona sahip bir borlama macunun geliştirilmesi planlanmıştır. Bu tez kapsamında ticari 1018 düşük karbon çeliğinin termokimyasal macun borlama yöntemiyle borlanması ve yüzeylerinde endüstriyel olarak tercih edilen daha çok tek fazlı (Fe_2B) ve çift fazlı ($\text{FeB} + \text{Fe}_2\text{B}$) tabakalarının büyütülmesi hedeflenmiştir. Bu şekilde yüzeyleri modifiye edilen düşük karbon çeliklerinin daha uzun süre kullanılabilir hale gelmesi ve zorlu çalışma koşullarına daha dirençli nihai ürün haline gelmesi hedeflenmiştir.



2. TEORİK BİLGİLER

2.1. Borlama Prosesi

2.1.1. Borlama prosesinin tanımı

Borlama bir makine parçasının yüzeyinin sertlik ve aşınma direnci gibi mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla uygulanan daha çok termokimyasal bir yüzey sertleştirme ya da difüzyon kaplama işlemidir. Yöntem, Termal enerji ve kimyasal reaksiyon ile çeşitli bor kaynaklarından gelen bor atomlarıyla malzemelerin yüzeylerinin borca zenginleştirilerek yüzeyde Me_xB_y fazlarının oluşturulması olarak ifade edilebilir. Borlama işlemi çelik ve dökme demir gibi demir esaslı malzemelerden titanyum, nikel, kobalt ve alaşımları gibi demir dışı malzemelerin yanı sıra sinterlenmiş karbürler gibi birçok seramik ve süper alaşım malzemelere uygulanmaktadır [17–19].

Borlama işlemi, yüzeyi temizlenmiş ve/veya zımparalanmış parçalara, bor içeren katı, sıvı ya da gaz ortamlarında 850-1000 °C işlem sıcaklığı ve 1-12 saat işlem süresi aralıklarında tutulması ile gerçekleştirilir. Toz ya da macun borlama şekli ile indüksiyon fırınında kısa sürede borlama çalışmaları da yapılabilmektedir. Ayrıca Termokimyasal yöntem ile borlanması zor veya yapılamayan malzemeler için bor iyon implantasyon, yüksek enerji tekniği ve kızdırma altında deşarj gibi fiziksel borlama yöntemler de geliştirilmiştir [3,20–22].

Genellikle proses yüzeyden çekirdeğe doğru iğne benzeri ya da testere ağzı bir mikro yapı oluşturmalarının yanı sıra yapı; deney parametreleri, taban malzeme ve kimyasal kompozisyona bağlı olarak tek faz (Fe_2B) ya da çift fazlı (FeB ve Fe_2B) bileşime sahip olmaktadır [3,4].

2.1.2. Borlama prosesinin avantaj ve dezavantajları

Borlama prosesi Karbürleme, Nitrürleme gibi diğer yüzey sertleştirme yöntemlerine kıyasla daha yüksek (yaklaşık 2000 HV) sertlik sağlaması ve yüksek yüzey sertliği ile düşük sürtünme katsayısının kombinasyonu ile adezyon, tribooksidasyon ve abrasyon bakımından aşınma direnci özellikleriyle ön plana çıkmaktadır (Çizelge 2.1). Borlanmış malzemeler

yüksek sıcaklıklarda yüzey sertliğini sürdürebilmenin yanı sıra 850 °C'ye kadar hafif oksidasyon direncine sahiptir. Proses çeşitli metal ve alaşımlarına uygulanabilmektedir. Demir esaslı malzemelerde alkali ve seyreltik asit solüsyonlarda önemli ölçüde korozyon direncini artırmaktadır. Ayrıca borlama, yorulma ömrü ve kullanım ömrünü uzatması ile bilinmektedir [3,4,17].

Çizelge 2.1. Çeşitli malzemelerin sertlik değerleri [17]

Malzeme	Mikrosertlik kg/mm ² veya Vickers (HV)
Borlanmış Yumuşak Çelik	1600
Borlanmış AISI H13 Çeliği	1800
Borlanmış AISI A2 çeliği	1900
Su verilmiş Çelik	900
Sertleştirilmiş ve Temperlenmiş H13 Çeliği	540-600
Sertleştirilmiş ve Temperlenmiş A2 Çeliği	630-700
BM42 Yüksek Hız Çeliği	900-910
Nitrürlenmiş Çelik	650-1700
Karbürlenmiş Düşük alaşım çeliği	650-950
Sert Krom Kaplama	1000-1200
Semente Karbürler, WC + Co	1160-1820 (30kg)
Al ₂ O ₃ + ZrO ₂ seramik	1483 (30kg)
Al ₂ O ₃ + TiC + ZrO ₂ seramik	1738 (30 kg)
Titanyum Nitrür (TiN)	2000
Titanyum Karbür (TiC)	3500
Silisyum Karbür (SiC)	4000
Bor Karbür (B ₄ C)	5000
Elmas	>10.000

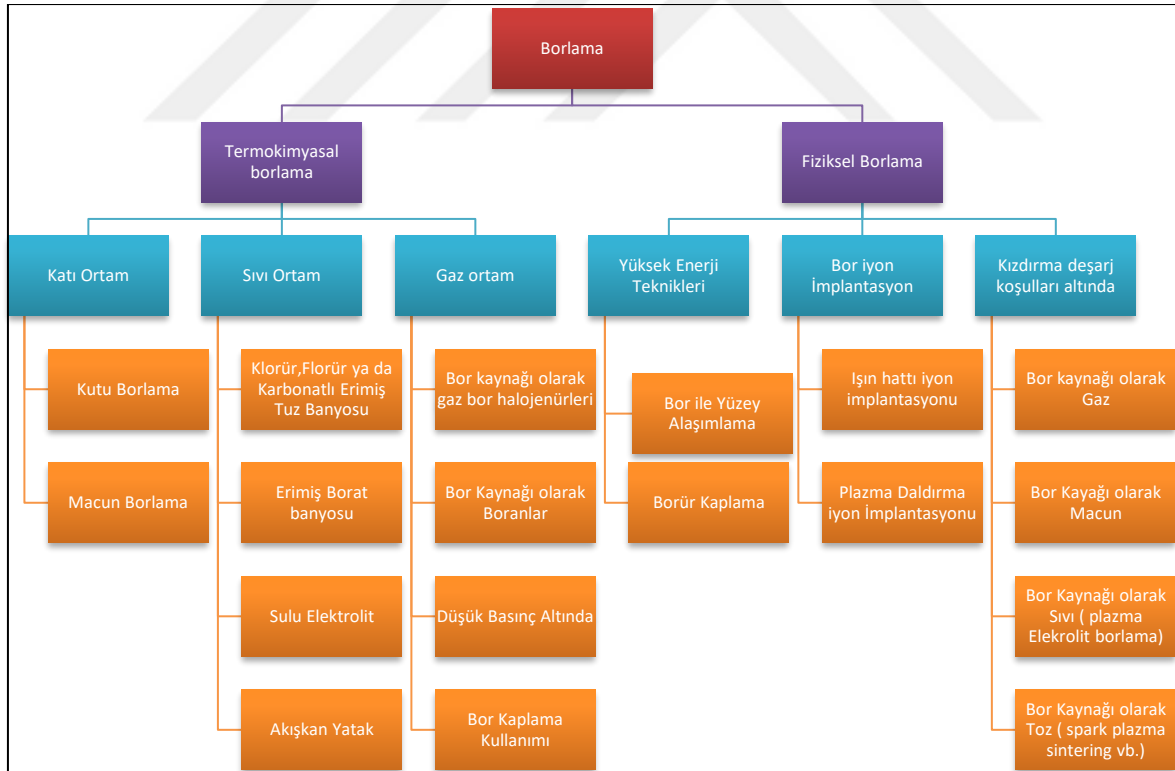
Difüzyon borlama katı, sıvı ve gaz olmak üzere çeşitli ortamlarda yapılmakta ve her ortamın kendine göre avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Kutu (toz paket) Borlama (powder-pack boriding) ticari tozun bulunması ve uygulama kolaylığı gibi nedenlerle en sık uygulanan yöntemdir. Ancak büyüme kinetiği dikkate alındığında kutu borlamada atmosfer sabit olmadığı, taban malzeme kompozisyonuna göre oluşan fazın değişim gösterdiği ve bor difüzyonu değişkenlik gösterdiği için kaplama kalınlığı üzerinde doğrudan bir kontrol sağlanamamaktadır. Ayrıca çift fazlı borür kaplamalarda Fe₂B ile FeB ara yüzeyinde sertlik farkından dolayı çatlak oluşumu meydana gelebilmektedir. Ek olarak çift fazdaki ayrışmadan dolayı parçalanma veya mekanik gerilme ve termal şok kaynaklı başka çatlakların oluşumu söz konusudur [4,16,23,24].

2.2. Borlama Yöntemleri

Geçmişten günümüze borlama prosesi için çeşitli sınıflandırmalar yapılmıştır. Yapılan sınıflandırmalarda aşağıda belirtilen dört kriter dikkate alınmıştır:

- 🚧 Doymuş bor atomları üretim mekanizması
- 🚧 Faz oluşumu, yapı ve özellikleri
- 🚧 Proses sıcaklığı ve kullanımı
- 🚧 Teknolojik yönü

Teknolojik yönü bilinen tüm teknikler ve onların özelliklerini metot, borlama yolları ve onların tipleri kapsamında ele almıştır. Bu yönde Przybyłowicz (2000) tarafında yapılan sınıflandırma Michal Kulka (2019) tarafından genişletilerek trend yöntemler olarak literatüre girmiştir. Aşağıdaki Şekil 2.1'de borlama yöntemlerinin sınıflandırılması gösterilmiştir [5,24].



Şekil 2.1. Borlama yöntemleri [5]

Termokimyasal yöntemde termal enerji ve kimyasal reaksiyon yoluyla bor atomları yüzeye adsorbe edilir ve çekirdeğe doğru taban malzemenin atomlarıyla borür oluşturmak için

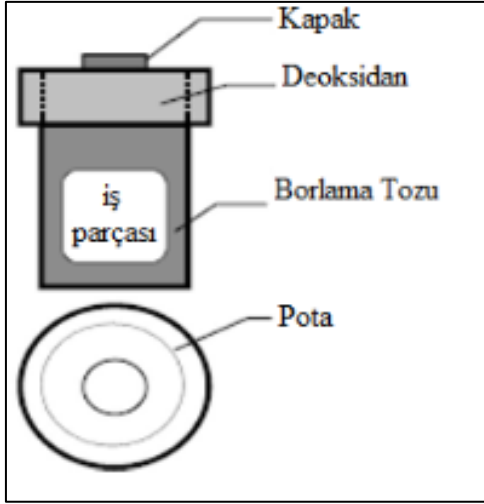
difüze olur. Kullanılan bor sağlayıcı bileşiklerin durumuna göre katı, sıvı ve gaz ortamlarında yüzey sertleştirme işlemleri yapılmaktadır. Termokimyasal borlama işlemi bazı çelikler ve diğer metalik malzemelere uygulanamaması sonucunda fiziksel borlama yöntemlerinin gelişmesine yol açmıştır. Lazerle bor alaşımı, zaman ve enerji açısından daha verimli bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır. Bu gibi fiziksel yöntemler sayesinde korozyona kolayca uğrayabilen yüksek alaşımlı çelikler veya titanyum ve alaşımlarında da borür tabakası elde edilmesine imkân sağlanmıştır [3,23]. Termokimyasal yöntemlere ilişkin detaylı açıklamalara aşağıda yer verilmiştir.

2.2.1. Katı ortam borlama

Kutu (toz paket) borlama

Bu yöntemde borlama işlemi; bor kaynağı, aktivatör ve seyreltici (deoksidant) karışımı bileşime sahip toz ile yapılmaktadır. Kullanılan bor kaynaklarına Bor karbür (B_4C), Elementel Bor, Ferrobor, metalotermik redüksiyon ile bor oksit (B_2O_3), kalsine kolemanit ($2CaO.3B_2O_3$) ve borik asit (H_3BO_3) gibi örnekler verilebilir. Aktivatör, toz karışımından borun serbest kalması ve malzeme yüzeyine taşınmasını hızlandıran ajanlardır. Ek olarak bor atomları gaz fazında taşınmaktadır. Kullanılan aktivatörlere $NaCl$, NaF , KF , AlF_3 , $NaCl$, KBF_4 , KHF , $Na_2B_4O_7$ örnek verilebilir. Seyreltici ya da deoksidant maddeler toz karışımında bor potansiyelini azaltmanın yanı sıra oksitlenmeyi, sinterlenmeyi engellemek için kullanılan inaktif (dolgu) maddeleridir. SiC , Al_2O_3 , Mg_2O_3 , öğütülmüş şamot ve kaolin örnek verilebilir [25–27].

Kutu Borlama yapılacak temizlenmiş malzeme ya da iş parçası yeterli miktarda toz karışımı içine gömülerek ve üzerine dolgu malzemesi koyularak silindirik şekilli kap (pota, retort veya kutu) içerisine yerleştirilir. Kap sıcaklığa dayanıklı çelik, seramik kroze ve yaygın bir şekilde paslanmaz çelik malzemeden kullanılmaktadır. Bu kap Kamara Fırın gibi çeşitli fırınlarda atmosferik koşullarda $850-1000\text{ }^{\circ}C$ gibi borlama proses sıcaklığına ısıtılır ve yeterli süre bekletilir. İşlem sonrası soğutmaya bırakılarak süreç tamamlanır. Kutu borlama işleminin şematik bir çizimi Şekil 2.2’de verilmiştir [28,29].



Şekil 2.2. Kutu borlama düzeneği şematik çizimi [29]

Macun borlama

Macun borlama genellikle katı ortam borlaması olarak sınıflandırılır. Yöntem sadece seçili yüzeylerin borlanması gerektiği durumlarda, sıcaklık kontrollü herhangi bir fırında, malzemenin işlem sonrası direk soğutulabilmesi ve enerji tasarrufu gibi özellikleri ile öne çıkmaktadır. Macun borlamada B_4C ile kriyolit (Na_3AlF_6) toz karışımı ya da kutu borlamada kullanılan ticari toz karışımın (B_4C - SiC - KBF_4 ya da çeşitli varyasyonlar) bir bağlayıcıyla (Genellikle hidrolize edilmiş etil silikat ya da sodyum silikat) birlikte kullanılır. Ticari Durborid macun borlamada ise kompozisyon; Bor kaynağı, aktivatör, inert tutucu, su ve yardımcılar ile refrakterik genişletici kullanılarak elde edildiği ifade edilmiştir. İlk olarak hazırlanmış macun karışımı malzemenin yüzeyine sürülerek kaplanır. Macun kaplanmış malzemeye etüv ya da fırında kurutma işlemi uygulanır. Kaplama sonrası kurutulmuş numune borlama sıcaklığına ısıtılır ve belirli bir süre bu sıcaklıkta bekletilir. Macun genellikle termokimyasal işlemden hemen sonra gerçekleştirilen soğutma sırasında malzeme yüzeyinden kopar ya da yıkamak suretiyle numune temizlenir. Burada uygun birleşimde karışım kullanmak numunenin kolay temizlenmesine, malzeme yüzeyinde leke vs. bırakılmamasına ve numunenin korozyona uğratılmamasında yardımcı olacaktır. Resim 2.1’de borlama işlemi için kullanılan macun gösterilmiştir [27,30,31].



Resim 2.1. İşlem öncesi hazırlanmış borlama macunu

2.2.2. Sıvı ortam borlama

Sıvı ortamda gerçekleştirilen borlama işlemleri, kullanılan ortamın türüne ve bor kaynağına göre çeşitli yöntemlerle sınıflandırılmaktadır. Bu yöntemler arasında; klorür, florür veya karbonat içeren ergimiş tuz banyolarında, bor içeren redüktanlarla yapılan borlama; ergimiş borat banyolarında hem bor içeren hem de bor içermeyen redüktanların kullanıldığı borlama işlemleri; ergimiş borat banyosu içinde sulu elektrolit destekli borlama ve akışkan yataklı sistemlerde uygulanan borlama yöntemleri yer almaktadır [27].

Ergimiş tuz banyosu

Bu yöntemde kullanılan kompozisyon vb. deney koşulları ısıtılmalı katı borlama yöntemlerine benzerdir. Banyo klorür, florür ve karbonat tuzları (BaCl_2 , NaCl , KCl , CaCl_2 , NaF , LiF , KF , Li_2CO_3 , K_2CO_3 , Na_2CO_3) ile Potasyum tetrafloroborat, Ferrobor, Amorf bor ve Bor karbür gibi bor içeren redüktant ajanlarından oluşmaktadır. Proses genellikle 850-1050 °C sıcaklıklarda çelik, grafit ya da Al_2O_3 gibi seramikten yapılmış pota ya da kap içerisinde 1-8 saat süreyle yapılmaktadır. Proses komplike bir hazırlama sürecine sahip olması, tuz ve indirgeyici maddelerin yoğunluğundaki önemli fark nedeniyle bileşenlerin ayrılma eğiliminde olması ve indirgenin yanına takviyelerin gerekmesi gibi nedenlerle yaygınlaşamamıştır [27,31,32].

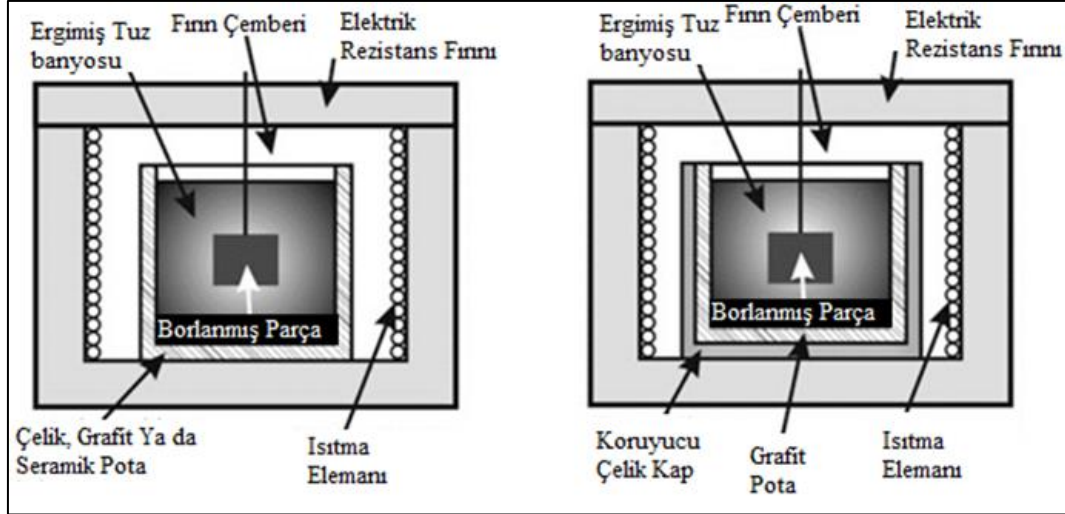
Ergimiş borat banyosu

Yöntem ergimiş tuz banyosunda bor içeren redüktant maddeler kullanılarak yapılan borlama ve bor içermeyen indirgen maddeler kullanılarak yapılan borlama olarak ikiye ayrılmaktadır. Ergimiş borat banyolarında yapılan borlamanın boraks (sodyum tetraborat- $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) kullanılarak yapılan varyasyonu daha sık tercih edilmektedir.

İlk olarak 1955'te bor içeren indirgen maddelerle yapılan borlama yöntemi önerilmiştir. Bu yöntem, boraks (sodyum tetraborat- $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) banyosuna %40 bor karbür (B_4C) eklenmesiyle işlem yapmanın yanı sıra bor ile doygunluk sağlama hızının yüksek olmasıyla bilinmektedir. Yüksek viskozite nedeniyle bor karbür miktarı genellikle %30'a düşürülmektedir. İşlem boraks ile bor karbür'ün oda sıcaklığında karıştırılması ve borlama işleminin genellikle 850-1050 °C sıcaklıklarında 0,5-8 saat arasında çelik, grafit veya seramikten imal edilmiş kap ya da pota içerisinde yapılmaktadır. Koruyucu atmosfer kullanılarak kapalı seramik kaplar da tercih edilebilmektedir. Borlama yönteminin en yaygın kullanılan şekli, genellikle kapalı olmayan bir kap ile yapılan işlemdir. Ek olarak demir alaşımları özellikle çelik ve dökme demir için etkili bir şekilde kullanılabilirken demir dışı malzemelere nadiren uygulanmaktadır [27,33,34].

Bor içeren pahalı indirgen maddeler (bor karbür veya amorf bor) yerine, Ferro alaşımlar ve silisyum karbür gibi kimyasal olarak aktif metaller veya alaşımlar kullanılmaya başlanmıştır. Bu nedenle bor içermeyen indirgen maddelerle yapılan borlama işlemi, elektrokimyasal yöntem dışında sıvı ortamda en popüler yöntem haline gelmiştir. Bor içermeyen ergimiş borat banyosunda borlama işlemi 800-1100 °C sıcaklıklarda 0,5-8 saat süre ile grafit, seramik ve çelik potalarda uygulanmaktadır. Borat banyosu hazırlamak için alkalin elementlerin tetra boratları (Li, Na, K) kullanılmaktadır. Yaygın olarak boraks ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) tercih edilmektedir. İndirgen maddelerin oksijene karşı kimyasal bağlanma eğilimlerinin (afinite) bordan daha yüksek olması gerekmektedir. Bu durum bor atomlarının serbest bırakılmasını sağlar ve borlama işlemini tetikler. Bazı indirgen maddelerin yüksek kimyasal afiniteleri nedeniyle boraksla karıştırılmadan önce koruyucu atmosfer ortamında kullanılması gerekmektedir. Ferro alaşım (Ferro mangan Fe-Mn veya Ferro silikon Fe-Si) indirgen maddesi olarak kullanıldığında indirgenin hızlı oksitlenmesini engellenmiş olur ve borlama kapasitesi artırılır. Silisyum Karbür (SiC) kullanıldığında koruyucu atmosfer gerekmeden oda sıcaklığında hazırlıklar yapılabilir ve koruyucu atmosfer olmadan ortam

atmosferinde açık kap veya pota ile borlama yapılabilir. Ancak alüminyum indirgen maddesi kullanıldığında boraksla karıştırılmadan önce koruyucu atmosfer gereklidir. Ayrıca Fe-Si ve $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 + \text{H}_3\text{BO}_3$ karışımıyla yapılan borlama popüler ve genellikle kapalı olmayan bir pota veya kapta gerçekleştirilmektedir [35–38].



Şekil 2.3. Rezistans fırında ergimiş borat banyosu [27]

Elektrokimyasal ve akışkan yataкта borlama

Son yıllarda sıvı ortamda en etkili ve popüler borlama yöntemi haline gelmiştir. İşlem daha düşük sıcaklıklarda ve daha kısa sürelerde borür tabakası oluşturma avantajına sahiptir. Elektroliz (Doğru akım (DC)) kullanılarak reaksiyonun tetiklenmesiyle yapılan bu işlem genellikle bor atomlarının yüzeye adsorpsiyonunu ve difüzyonunu içerir. Bu nedenle elektrokimyasal borlama terimi daha doğru bir tanım olarak kabul edilmiştir. Elektrokimyasal borlamada borür tabakalarının tek fazlı olmasını sağlamak için faz homojenizasyonu (PH) işlemiyle modifiye edilmiştir. Bu süreç bor olmayan sıvı tuz banyolarında veya boraks içeren banyolarda gerçekleştirilebilmektedir. Boraks banyosunda işlem genellikle 700-1000 °C sıcaklıklarında ve 0,5-8 saat arasında yapılmaktadır. Katodik akım yoğunluğu genellikle 200-300 mA/cm² arasında tutulur. Ayrıca boraks banyosu genellikle 500-650 °C arasında boraksın kurutulmasının ardından elektrolizle saflaştırılması gibi hazırlık için özel prosedürler gereklidir. Elektrokimyasal borlama genellikle bir doğru akım kaynağı bir tuz banyosu içeren grafit kap ya da pota ve borlanacak parça ile yapılmaktadır. Elektrokimyasal Borlama 700-1000 °C sıcaklıklarda anot olarak kullanılan grafit pota ve katot olarak davranan borlanacak parça ile yapılmaktadır. Elektrokimyasal

borlama süresi için geniş ölçekte çalışmalar yapılmıştır. 30 saniyeden 8 saate kadar süreler söz konusu olmuştur. Fakat en kısa süre 10 dakika olmuştur. Katodik ark yoğunluğu bir diğer önemli parametredir ve 5-1120 mA/cm² arasında değerler kullanılmaktadır. Ancak pratik uygulamalar için 200-300 mA/cm² tavsiye edilmektedir [27,39,40].

Akışkan yatakta borlama

Akışkan yatakta borlama yarı sıvı bir yöntem olarak ifade edilir ve katı yöntemle güçlü bağları vardır. Bu yöntemde bor karbür, katı halojen ve Al₂O₃ gibi çeşitli kompozisyonlarda ince parçacıklara sahip akışkan bir yatak söz konusudur. Akışkan yatak retort boyunca yaygın olarak argon gazının özel difüzörler ile geçirilmesiyle oluşturulmaktadır. Proses 800-1050 °C sıcaklık ve 0,5-6 saat sürelerde gerçekleştirilir. Akışkan yataklı retort fırın gaz yataklı ve elektrikli ısıtma gibi fırınlar ısıtma işlemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [27].

2.2.3. Gaz ortam borlama

Bor kaynağı olarak bor halojenürleri

Bor triklorür ve daha az kullanılan bor triflorür ile gaz borlama işlemleri uygulanmaktadır. Özellikle bor triklörür (BCl₃) kullanarak yapılan gaz borlama işlemi bor halojenleri kullanarak yapılan gaz borlamada en yaygın uygulamadır. Bor triklorür, renksiz, keskin kokulu ve zehirli bir gaz olup havada dumanlanma eğilimindedir. Yüksek ısıda özellikle hidrojen varlığında BCl₃'den uygun indirgenler ve reaksiyon koşullarında diboran ve hidroklorik asit elde edilir. 1000 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda bor (B) ve hidroklorik asite (HCl) ayrışır. Ayrıca BCl₃ yüksek sıcaklıklarda metallerle reaksiyona girerek uçucu klorür oluşturmaktadır [27].

Gaz borlama sürecinde numune temizlenip elektrikli dirençli fırının bir odasında uygun sıcaklığa ısıtılmasıyla başlar. Bu işlemde oksidasyonu önlemek amacıyla koruyucu atmosfer (argon veya azot) kullanılır. Numune borlama atmosferinde belirli bir sıcaklıkta tutulduktan sonra borlama gazının akışı başlatılır. Kullanılan borlama atmosferi genellikle bor triklörür (BCl₃) ve taşıyıcı gaz olarak Hidrojen veya bazen ise Argon ve Azot karışımı kullanımı söz konusudur. Numune belirli bir süre proses sıcaklığında tutulduktan sonra gaz akışı kesilir.

Borlama tamamlandıktan sonra numune koruyucu gaz altında soğutulur. Borlama sıcaklıkları genellikle 550 °C ile 1000 °C arasında değişmektedir ve işlem süresi 1 ile 6 saat arasında olabilir. Bu parametreler borlanacak malzeme türüne ve kullanılan atmosfer türüne bağlı olarak değişkenlik göstermektedir [41,42].

Bor kaynağı olarak boranlar

Boran kullanılarak yapılan gaz borlama işlemi, tarihsel olarak bor triklorür içeren atmosferlere kıyasla daha az kullanılmaktadır. Kullanılan Bor kaynaklarına diboran (B_2H_6), trimetil boran ($(CH_3)_3B$), trietil boran ($(C_2H_5)_3B$) ve trimetil borat ($(OCH_3)_3B$) örnek olarak gösterilebilir. Diboran; oda sıcaklığında renksiz, kimyasal olarak dengesiz ve kendi kendine tutuşabilen bir gazdır. Bu gaz havayla kolayca patlayıcı karışımlar oluşturabilmenin yanı sıra nemli havada kendiliğinden yanma eğilimindedir. 500 °C üzerinde bor (B) ve hidrojen (H) olarak tamamen aşağıdaki reaksiyona göre ayrışmaktadır [27].



Diğer boranlar, özellikle plazma borlama işlemlerinde daha yaygın kullanılmaktadır. Trimetil borate ($(OCH_3)_3B$) de bu tür gazların arasında sayılabilir. Diboran (B_2H_6) kullanılarak yapılan gaz borlama işlemi için kullanılan ana ekipmanları arasında ısıtma cihazı (elektriksel dirençli fırın veya yüksek frekanslı indüksiyon fırını), bor kaynağı olarak diboran, hidrojen ve argon gazlarının bulunduğu gaz silindirleri, gaz yıkama sistemi (scrubber) ve sıcaklık ölçüm sistemi yer almaktadır. Gaz borlama yöntemiyle yapılan çalışmalar elektriksel dirençli fırın, yüksek frekanslı indüksiyon fırınları gibi ısıtma cihazlarında farklılık göstermektedir [43–45].

Diğer boranlar, özellikle plazma borlama işlemlerinde daha yaygın kullanılmaktadır. Trimetil borate ($(OCH_3)_3B$) de bu tür gazların arasında sayılabilir. Diboran (B_2H_6) kullanılarak yapılan gaz borlama işlemi için kullanılan ana ekipmanları arasında ısıtma cihazı (elektriksel dirençli fırın veya yüksek frekanslı indüksiyon fırını), bor kaynağı olarak diboran, hidrojen ve argon gazlarının bulunduğu gaz silindirleri, gaz yıkama sistemi (scrubber) ve sıcaklık ölçüm sistemi yer almaktadır. Gaz borlama yöntemiyle yapılan çalışmalar elektriksel dirençli fırın, yüksek frekanslı indüksiyon fırınları gibi ısıtma cihazlarında farklılık göstermektedir [43–45].

Düşük basınç altında gaz borlama

Düşük basınçta yapılan gaz borlama işleminde bor kaynağı olarak boran trietilamin kompleksi ($\text{BH}_3\text{-N}(\text{C}_2\text{H}_5)_3$) kullanılmaktadır. Bor kaynağı, taşıyıcı gaz (argon veya argon-hidrojen karışımı) ile birlikte bir evaporatör aracılığıyla taşınır. Ekipman olarak vakum pompası, ısıtma cihazı olarak yüksek frekanslı indüksiyon fırını kullanılır [45].

Bor kaplama kullanımı

Bor kaplama kullanarak yapılan gaz borlama yöntemi, bor içeren kaplama kaynağının kullanılmasıyla yapılan bir işlemdir ve gaz borlama ile paket ya da kutu toz borlama arasında bir ara teknik olarak kabul edilmektedir [42]

2.3. Multikomponent borlama

Çeşitli malzemelerin yüzeylerine bor ile birlikte bir veya birden fazla metalik elementin eş zamanlı ya da sırasıyla difüze edilmesiyle altta malzemenin yüzeyinde demir borür fazının yanında metal borür fazı oluşturmak amacıyla yapılan bir yüzey sertleştirme işlemidir. Bu işlem, farklı malzemelerin özelliklerinden faydalanarak geleneksel borlamayla elde edilen aşınma, korozyon ve oksidasyondan daha iyi özelliklere sahip yüzeylerin elde edilmesi doğrultusunda geliştirilmiştir. Proses 850-1050 °C sıcaklıklarda toz paket, macun ve elektrolitik tuz banyosu gibi yöntemlerle uygulanmakta ve alüminyum, krom, titanyum, tungsten gibi çeşitli metallerin difüzyonu yapılmaktadır. Multikomponent borlama eş zamanlı, borlama sonrasında metalleme ve metalleme sonrası borlama olarak üç şekilde sınıflandırılabilir. Bazı Multikomponent borlama sistemleri Çizelge 2.2’de gösterilmiştir [2,46,47].

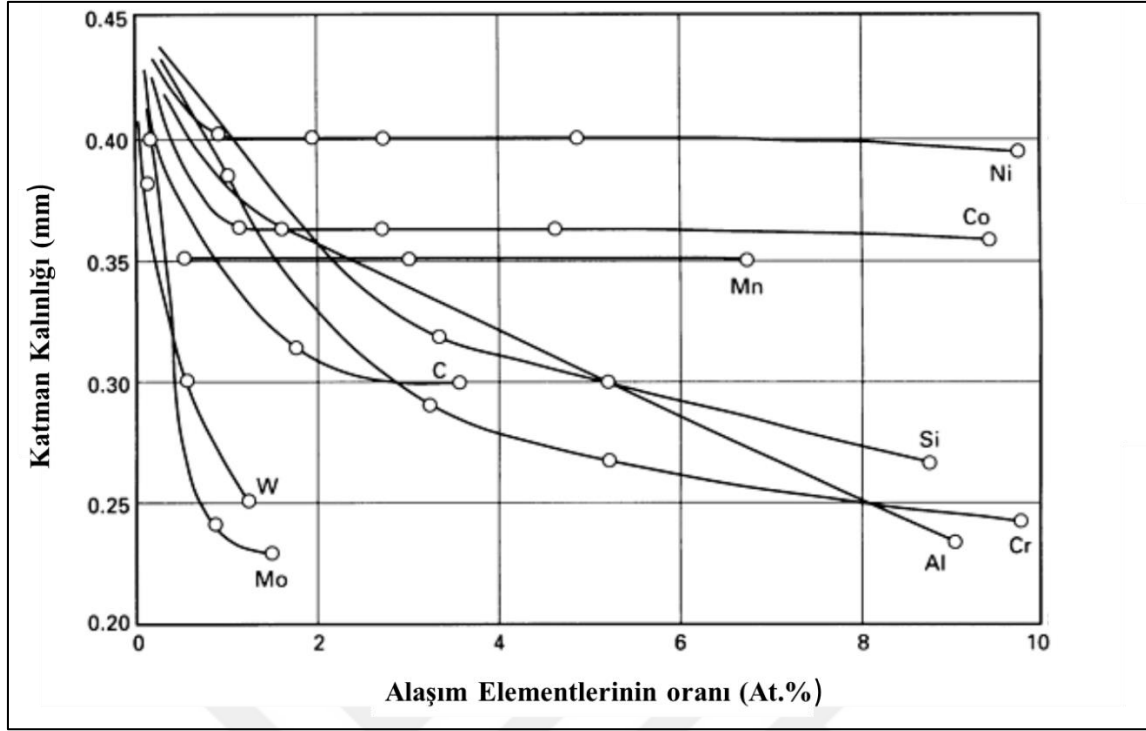
Boroalüminyumlama ile iyi bir aşınma ve korozyon direnci sağlanmanın yanı sıra Borosilisyumlama ile yüzeyde oluşan demir silisyum (FeSi) fazıyla korozyon, yorulma direnci geliştirilmiş ve Borokromlama ile Boroalüminyumlama dan daha iyi oksidasyon direnci sağlanmıştır. Borovanadyumlama ve borokromvanadyumlama ise yük altında parçalanmanın azaltılmasına yardımcı olmuş ve kaplama katmanında süneklik sağlamıştır [20,47].

Çizelge 2.2. Çeşitli multikomponent borlama çalışmaları [2]

Multikomponent Borlama Tekniği	Borlama Ortamı	% Ortam kompozisyonu	Proses Şekli	Taban Malzeme	Sıcaklık
Boroalüminyumlama	Elektrolitik Tuz banyosu	Boraksta 3-20% Alüminyum	Eş Zamanlı	Sade karbonlu çelik	900°C
Boroalüminyumlama	Toz Paket	1)84% B ₄ C +16% Boraks 2)97%Ferroalüminyum + 3% NH ₄ Cl	Eş zamanlı ve Sırasıyla	Sade karbonlu çelik	1050°C
Borokromlama	Toz Paket	1) 5%B ₄ C+ 5%KBF ₄ + 90%SiC 2)78% Ferrokrom +2% NH ₄ Cl+ 20% Al ₂ O ₃	Eş zamanlı ve Sırasıyla	Sade karbonlu çelik	Borlama 900°C ve kromlama 1000°C
Borosilisyumlama	Toz Paket	1) 5% B ₄ C + 5% KBF ₄ + 90% SiC + 2) 100% Si	Sırasıyla	0.4% C çeliği	900-1000°C
Borovanadyumlama	Toz Paket	1)5% B ₄ C + 5% KBF ₄ + 90% SiC 2)60%Ferrovanadyum +37%Al ₂ O ₃ + 3%NH ₄ Cl	Sırasıyla	1 % C çeliği	Borlama 900°C ve Vanadyumlama 1000°C

2.4. Alaşım elementlerinin etkisi

Borlanmış malzemelerin mekanik özellikleri borür katmanının bileşimi ve yapısına güçlü bir şekilde bağlıdır. Saf demir, alaşım içermeyen düşük karbonlu çelikler ve düşük alaşımlı çeliklerde borür difüzyon kaplamasının karakteristik testere dişi yapısı baskındır ve alaşım elementi ve/veya karbon içeriği arttıkça borür ile alt katman arayüzünün düzensiz gelişimi engellenir ve yüksek alaşımlı çeliklerde düzgün bir arayüz oluşur. Alaşım elementleri, bor atomlarının difüzyonunu engelleyerek borür tabakasının büyümesini yavaşlatmakta ve tabaka kalınlığının azalmasına neden olmaktadır. Bu durum bir difüzyon bariyerinin oluşmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 2.4'te çelikteki alaşım katkılarının borür katmanı kalınlığı üzerindeki etkisi gösterilmektedir [2].



Şekil 2.4. Alaşıım elementlerinin borür tabakasının büyümesindeki etkisi [19]

Karbon, borür tabakasında önemli ölçüde çözünmediği için borür tabakasına difüze olmaz ve matris ile borür tabakası arasında difüze olurken bor ile $\text{Fe}_3(\text{B},\text{C})$ ve $\text{Fe}_3(\text{B}_{0.67}\text{C}_{0.33})$ gibi sementit fazları oluşturur. Silisyum ve alüminyum da borür tabakasında çözünmediği için bor tarafından karbon gibi matrise doğru itilir. Borür tabakası ile matris arasında $\text{FeSi}_{0.4}\text{B}_{0.6}$ ve Fe_5SiB_2 gibi demir silisyum borür fazları oluşturur. Yüksek oranda bu elementleri içeren çeliklere borlama işlemi uygulanmaz. Çünkü bu elementler borür tabakası altında önemli ölçüde daha yumuşak ferrit fazı oluşturur ve borür tabakasının aşınma dayanımını azaltıcı etki oluştururlar. Krom, demir borürlerin yapısını ve özelliklerini önemli ölçüde değiştirir. Krom içeriği arttıkça Bor açısından zengin reaksiyon ürünlerinin oluşumu, borür derinliğinde azalma ve kaplama ile alt katman arayüzünün düzleşmesi veya pürüzsüzleşmesi gibi etkilerde kademeli iyileşmeler gözlemlenir. Ek olarak Fe-12Cr-C çeliklerinde karbon içeriği arttıkça borür kaplama kalınlığının azaldığı da gözlemlenmiştir. Mangan, tungsten, molibden ve vanadyum elementleri karbon çeliğinde borür katmanının kalınlığını azaltmakta ve dişli morfolojisini düzeltmektedir [19,47].



3. LİTERATÜR TARAMASI

Ayvaz (2023), çalışmasında AISI 1050 karbon çeliği numunelerini Ekabor 2 ticari borlama tozu kullanılarak 875 °C sıcaklıkta 2, 4 ve 6 saat sürelerle kutu borlama tekniği ile borlama işlemi uygulamıştır. Süre artışı ile borür tabaka kalınlığı artmış ve 2, 4 ve 6 saatlik borlama sonrası baskın olarak Fe₂B fazından oluşan 30,6, 40,0 ve 71,8 µ kalınlığında borür tabakaları elde etmiştir. Borür tabakaları testere diş morfolojide ve 1543,8 HV maksimum yüzey sertliğinde olduğu tespit etmiştir. Yapılan borlama işlemi ile AISI 1050 çeliğinin özgül aşınma kaybı 421,25 mm³/Nm x10⁻⁶'dan 17,67 mm³/Nm x10⁻⁶'ya düşürülmüş, aşınma direnci ise yaklaşık 24 kat arttırıldığını çalışmalarında belirtmiştir [48].

Meriç, Sahin ve Yılmaz (2000) yaptıkları çalışmada 4 grup ve hepsi farklı tane boyutlarına sahip borlama tozları kullanmış ve tozun tane boyutunun etkisini incelemişlerdir. AISI 1020,1030, 1040 ve 1050 taban malzemelerini Ekabor Hm ticari borlama tozu ile 900 °C sıcaklıkta 2,3,4,5 saat süreler ile 4 farklı tane boyutuna sahip toz için borlama işlemi yapmışlardır. Mikro yapı, sertlik ve kaplama kalınlıkları araştırmışlardır. Borlamada kullanılan tozların parçacık boyutunun önemli bir parametre olduğu ve tozun parçacık boyutu azaldıkça borür tabaka kalınlığının arttığı tespit etmişlerdir. Ek olarak karbon içeriğine ters orantılı şekilde borür kaplama kalınlığı artmakta veya azalmakta olduğu ayrıca mikro sertlik değerinin yine karbon oranıyla doğru orantılı olarak arttığı sonucuna varmışlardır. Isıl işlem süresinde artış ile de kaplama kalınlığı arttığı tespit etmişlerdir. Parçacık boyutunun azalması sonucunda taban malzemesiyle temas yüzeyi arttığı için difüzyon sürecinin kolay olacağı ve borür tabakasının daha hızlı oluşacağını ifade etmişlerdir [49].

Çimenoglu, Atar ve Motallebzadeh (2014) çalışmalarında 750 °C, 800 °C, 850 °C ve 900 °C sıcaklıklarda 12 saat süre ile 4140 çeliğine kutu borlama (toz paket) işlemi uygulamış ve yüksek sıcaklık tribolojik davranışlarını incelemişlerdir. 750 °C ve 800 °C sıcaklıklarda tek fazlı yapı (Fe₂B), 850 °C ve 900 °C sıcaklıklarında ise çift fazlı (Fe₂B ve FeB) yapıların oluştuğu tespit etmişlerdir. Testere ağzı şeklinde mikro yapı oluştuğu ve sıcaklık artışı ile borür tabakası tabaka kalınlığı arttığı ancak taban malzemenin mikro yapısında büyümeye sebep olduğu anlaşılmıştır. Borür tabaka kalınlığı 700 °C sıcaklıkta 22 µ dan 900 °C'de 170 µ ye yükseldiğini ifade etmişlerdir. Sertlik profili incelendiğinde ise çift fazlı yapının tek fazlı yapıya göre 0-2000 g yük aralığında yüksek olduğu ve yük taşıma kapasitesinin

daha iyi olduğunu görmüşlerdir. Alümina topraklar ile yapılan aşınma testi sonucu tek faz ve çift faz neredeyse aynı tribolojik performans sergilemiştir. Ek olarak oda sıcaklığında üstün aşınma direnci sağlandığı tespit edilmiştir. Sıcaklığın artırılması ile borür katmanı faz yapılarına bağlı olarak farklı aşınma dirençleri göstermiştir. Özellikle 300 °C sıcaklıkta çift fazlı yapı tek fazlı yapıdan daha iyi aşınma dayanımı sağladığını tespit etmişlerdir [50].

Türkmen ve Yalamaç (2018) çalışmalarında bor kaynağı olarak borik asit (H_3BO_3) içeren alternatif borlama tozu hazırlamış ve SAE 1020 çeliğinin toz paket (kutu borlama) yöntemiyle borlama işleminde kullanmıştır. Toz %22,5 H_3BO_3 , %5 KBF_4 ve %72,5 SiC bileşiminde hazırlamışlardır. Borlama işlemi 850 °C, 900 °C ve 950 °C sıcaklıklarda 4,8 ve 12 saat süre ile uygulamışlardır. Elde edilen borür tabakasını SEM, XRD gibi çeşitli karakterizasyonu işlemlerine tabi tutmuşlardır. Olası kimyasal reaksiyonları tahmin etmek için TGA ve DTA analizleri yapmış ve H_3BO_3 ile KBF_4 'ün ayrışma reaksiyonlarının proste baskın olduğu tespit etmişlerdir. Borür tabakasının büyüme kinetiği araştırmışlardır. Parabolik büyüme kuralına uyduğu ve borlama parametrelerinin bir fonksiyonu olarak tabakanın büyüdüğü görülmüşlerdir. Deneyisel ve teorik borür tabaka kalınlığı kıyaslanmış ve iyi bir uyum tespit etmişlerdir. Ek olarak ortalama borür tabaka kalınlığı 950 °C ve 12 saatte 214,56 μm , 850 °C de 4 saate ise 43,04 μm olarak ölmüşlerdir. Testere ağzı mikro yapıya sahip kompakt ve homojen tek faz (Fe_2B) yapı olduğu tespit etmenin yanı sıra geçiş bölgesi ve çelik matrisinde çözülmemiş karbon ve silikon atomlarından dolayı tane büyümesi olduğunu belirlemişlerdir [51].

Bayça (2021) patentinde Borlama işleminde kullanılan bor karbür yerine daha ucuz bor kaynağı olarak kolemanit ($2CaO.3B_2O_3.5H_2O$)'in kullanılmasını amaçlamıştır ve katı borlama yönteminde kullanılmak üzere bir borlama ajanı geliştirmiştir. Kullanılan borlama bileşimi Kalsine edilmiş %1-40 kolemanit ($2CaO.3B_2O_3.5H_2O$), %1-30 potasyum tetrafloroborat (KBF_4) ve %40-95 Silisyum karbür (SiC)'nin yanı sıra %1-30 nişasta olarak ifade etmiştir. Öğütülmüş kolemanit 590-650 °C sıcaklıkta 150-180 dakika kalsine ederek yapısında %40-50 oranında B_2O_3 içermesi sağlamıştır. Karışım haline getirilen borlama tozu 20-50 rpm de 120-240 dakika karıştırmıştır. Borlama işlemi 950 °C ve 4 saat süre ile borlama kabının içerisine numuneyi gömecek şekilde karışımın koyulması ve üzerine deoksidant malzeme eklenmesi ile yapılmıştır. 4 saat sonrasında kamara fırın içerisinde kabı soğutmaya bırakmıştır. Söz konusu borlama tozu ile yapılan sertleştirme işlemi sonrasında mevcut borlama tozuna göre sertlik ve aşınma değerleri daha yüksek

olduğunu tespit etmiştir. 1010 çeliği için 900 ile 950 °C ve 4 saat süreli deney sonucu ortalama sertlik 2138HV ve 950 °C sıcaklık 4 saat süre ile tabaka kalınlığı 160-188 µm olarak bulmuştur. AISI 1010 çeliğinin borlanmamış sertliği 262 HV ve borlama sonucu 2277 HV olarak bulması ile sertlik değerinin 8,5 kat arttığını ifade etmiştir [52].

Jelis, Suwattananont ve Petrova (2005) yaptıkları çalışmada Ti-6Al-4V alaşımına Bor karbür, potasyum tetrafloraborat ve alümina ile 850-900 ve 950 °C de borlama işlemi uygulamışlardır. Borlama işlemi sonucu olarak Titanyum borür fazı, yaklaşık 2-9 µm katman kalınlığı ve 500-800 HK sertlik değeri bulmuşlardır. Borlama; tabakanın homojenliği ve güçlü yapışmasından dolayı aşırı efektif olduğu bu sebepten yüksek sertlik ve aşınma dayanımı gerektiren biyomedikal implant uygulamalarında kullanılabileceğini ifade etmişlerdir [53].

Compos Silva vd. (2013) çalışmalarında düşük karbon çeliğini 1273 K sıcaklığında 4, 6 ve 8 saat süre ile borlamış ve oluşan demir borür (Fe₂B) yapısının indentasyon özelliklerini değerlendirmişlerdir. Vickers indentasyon testi yüzeyden 50 mikron uzaklıktaki mesafeye kadar uygulamışlardır. Yük 0,0981 ile 9,81 N aralığında seçmişlerdir. Sertlik derinlik profili, elastisite modülü ve indentasyonun elastikiyet ve plastik çalışması Fe₂B derinlik çalışması boyunca 250 mN sabit yük altında Berkovich indentasyon testi ile tahmin etmişlerdir. Vickers sertlik analiz sonucu indentasyon boyut efekt olduğunu yani borür tabakasının sertliği orantısal örnek direnci ve dislokasyon bant modeli ile tahmin edileceğini ifade etmişlerdir. Borür tabaka derinliği boyunca yapılan sertlik çalışması ile termal kalıntı gerilmeleri ve sertlik dağılım parametreleri borlama sıcaklığı ve maruz kalma süresinin fonksiyonu olarak değerlendirmişlerdir. Elastik deformasyon katsayısının yüzeye yakın kısımlarda yüksek olduğu ve çekirdeğe doğru azaldığını, plastik deformasyon katsayısında ise tam tersi bir durum olduğunu tespit etmişlerdir [54].

Lu, Liang, Gao, An ve Yang (2011) çalışmalarında borlama tozuna %5 Nd₂O₃ katalizörü takviye ederek sırası ile 2 ve 5 saat süre ile 1213 K ve 1350 K sıcaklıklarda borlama işlemi uygulamışlardır. XRD, SEM ve Optik mikroyapı incelemesi sonrası sonuçları değerlendirmişlerdir. Nd₂O₃'ün borlama işlemi üzerinde zıt etkilere sahip olduğunu yani yüksek sıcaklıklarda ilerlemeye veya düşük sıcaklıklarda difüzyona engel olduğu tespit etmişlerdir. Ancak Nd₂O₃ eklemek yüksek sıcaklıkta borür tabakasının büyümesi için gerekli aktivasyon enerjisini önemli ölçüde düşürdüğünü görmüşlerdir. AISI 1045 çeliğinde

büyüyen tabaka çift fazlı Fe_2B ve FeB fazları olmasından ziyade Nd_2O_3 takviyesi ile 1053-1093 K de borür tabakasının büyümesi geciktirdiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca 1133-1213 K sıcaklıkta borür tabaka kalınlığı artırılabilirliği ifade etmişlerdir. Ek olarak yüzeye difüze olan Nd atomları minik yuvarlaklar oluşturmuş ve borlama prosesinde uniform dağılımı sağladığı sonucuna SEM ve EDS çalışması sonuçlarıyla varmışlardır [55].

Galiottoa vd. (2019) çalışmalarında Ekabor ve Turbonit ticari borlama ve nitrürleme tozlarının karışımı ile düşük karbon çeliği üzerine toz paket (powder-pack) işlemi uygulamıştır. Deney serisi 0/100;25/75;50/50;75/25;100/0 oranlarında 1000 °C ve 1100 °C sıcaklıkta 2 ve 10 saat süre ile uygulamışlardır. Deney sonucunda düşük karbon çeliği üzerine toz paket yöntemiyle farklı toz karışımları ile bor nitrür tabakasının geliştirilebileceğini göstermişlerdir. Mikro yapı, faz analizi, sertlik profili vb. özellikleri incelenmişlerdir. Sertlik profili aynı sıcaklık ve sürede değiştiğini bulmuşlardır. Ek olarak Sadece borlama ve nitrürlemeden daha yüksek sertlik profili elde etmişlerdir. Pürüzlülük ölçümleri yapılmış ve önceki ısıtılmış hali ile kıyaslamışlardır. Optik mikroskop incelenmesi sonucu ise yüzeyden merkeze tabaka, derinlik ve difüzyon bölgesi, mikro yapı durumu incelemiş ve tabaka kalınlığının aynı kaldığını tespit etmişlerdir [56].

Petrova, Suwattananont ve Samardzic (2008), termokimyasal toz paket (kutu borlama) yöntemiyle 850 °C ve 950 °C de 4 saat süre ile borlanmış metalik alaşımların korozyon, oksidasyon ve aşınma direnç özelliklerini araştırmışlardır. Faz oluşumu taban malzemeye bağlı olduğu ve alaşım elementlerinin hem mikro yapıyı değiştirdiği hem de alaşım elementinin artışı ile kaplama kalınlığının azaldığı ifade etmişlerdir. Testere ağzı mikro yapı ve düzgün bir arayüz görmüş ve kaplama boyunda indentasyon işlemi yapmışlardır. Yüksek sıcaklık oksidasyon direnci araştırmasında borür tabakası demir esaslı alaşımlarda 800 °C'ye kadar dayanabildiğini tespit etmişlerdir. Korozyon direncinin borlama ile geliştiği ve korozyon oranı borlanmış ve borlama yapılmamış örnek için hesaplamışlardır. Aşınma testi 3 Astm standartlarına göre yapmışlar ve borlama işlemi metalik alaşımların önemli ölçüde aşınma, korozyon ve oksidasyon dirençlerini geliştirdiğini bulmuşlardır. Borlanmamış numuneye göre korozyon direnci düşük karbon çeliğinin yaklaşık 100 kat, yüksek dayanımlı alaşım çelikleri için 2,5 kat, östenitik çelikler için 10 kat arttığını görmüşlerdir. Borür tabakası önemli ölçüde spesifikasyonlarda gelişim sağladığı için şanzıman, valfler, diskler, nozullar, pompa şaftları vb. yerlerde kullanılacağı ifade etmişlerdir [57].

Pertek ve Kulka (2002), çalışmalarında gaz yöntem ile kombine borlama ve karbürleme işlemini düşük karbon krom ve nikel çeliklere uygulamışlardır. Mikro yapı, bor içeriği ve karbon profili incelemişlerdir. Demir borür ve karbürize mikro yapı incelemesi yapmış ve demir borür için mikro sertlik 1500-1800 HV olarak bulmuşlardır. Tabaka kalınlığı 70-125 mikron olarak ölçülmenin yanı sıra karbon içeriği %1,2 ve 1,94 olarak bulmuşlardır. Ek olarak karbür fazı demir borür yapısı altında 700-950 HV olarak tespit etmişlerdir. Sertlik gradyanının sadece borlama yapılmış numuneye göre azaldığını da karakterize etmişlerdir. Yüzeyden uzaklaştıkça karbürize bölgede sertlik ve karbon içeriğinin azaldığı ve Borokarbür yapısının aşınma direncine pozitif etki sağladığını belirlemişlerdir. Ek olarak borokarbürize tabakasının aşınma direnci diğer karbürize ve borlanmış yapıdan daha iyi olduğunu tespit etmişlerdir [58].

Makuch, Kulka, Keddarn ve Piasecki (2022) yaptıkları çalışmada açık otoklavda X165CrV12 çeliğine toz paket (kutu) borlama işlemi uygulamıştır. Prosesi 1123, 1173, 1223 K sıcaklıklarda 3,6 ve 9 saat süre ile gerçekleştirmişlerdir. Malzemenin yapısında yüzeye yakın en üst kısımda FeB tabakası, altında Fe₂B tabakası ve çekirdek ile tabaka arasında geçiş bölgesi olduğunu tespit etmişlerdir. Borlama parametrelerine göre tabaka kalınlığı 12,45 ile 78,76 µm olarak değişmesinin yanı sıra sıcaklık artışı ve uzun süreli maruz kalma ile FeB fazı dahil toplam tabaka (katman) kalınlığının arttığını gözlemlemişlerdir. X165CrV12 çeliğinin toz paket (kutu) borlama işlemi sonucu oluşan tek faz (Fe₂B) veya çift faz (Fe₂B ve FeB) katman büyümesinin evrimini kinetik olarak tanımlamak amacıyla bütünlük bir difüzyon modeli uygulanmışlardır. Fe₂B oluşumu için gerekli aktivasyon enerjisi FeB için gerekenden yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Çeliğin yapısında bulunan krom borlama sonrası krom borür oluşumunu sağlamıştır. Sertlik profili yüksek karbon olması durumunda borlama süresi ve sıcaklığı gibi değerlere bağlı olarak alaşım çeliklerinde taban malzemeye (kullanılan çelik)'e bağlı olduğunu ifade etmişlerdir. Geçiş bölgesinde krom ve karbon içeriği biriktiği ve ince perlit (ikincil karbür) yapılarına ek olarak ledeburit yapılarını görmüş ve yapıdaki krom borür malzemenin aşınma direncinde de önemli ölçüde artış sağladığını tespit etmişlerdir. Toz Paket (kutu) borlanmış çelik 4 kat daha düşük kütle aşınma, yoğunluk faktörü ve 9 kat daha düşük kütle kaybı uzunluğu olduğunu tespit etmişlerdir [59].

Swadźba (2019) çalışmasında C103 Nb tabanlı alaşımın paket sementasyon yöntemiyle önce borlama ve sonra silikonlama işlemi (silico-boronized) sonrası yüksek sıcaklık oksidasyon

ve kaplama oluşumlarını incelemiştir. Borlama işlemi bor kaynağı olarak bor karbür, aktivatör olarak amonyum klorür kullanarak 1100 °C 6 saat süre ile silisyum difüzyonu ise elementel silisyum ve Amonyum klorür ile 1050 °C ve 4 saat süre ile argon atmosferinde uygulanmıştır. İç kısımda NbB₂ dış kısımda NbSi₂ katmanı olduğu tespit edilmiştir. Alaşım 1100 °C 100 saat süre ile izotermal oksidasyon testine maruz bırakılmış ve yüksek sıcaklık oksidasyon direncini ölçmüştür. İşlem sırasında NbB₂ ve NbSi₂ arasında Nb₅Si₃ fazı oluştuğunu görmüş ve oksidasyon prosesinin oksitli ve borosilikat yapılarını içeren mix oksitin ön kısmında oksidasyonun engellendiği ifade etmiştir [60].

Singhal (1977) çalışmasında demir esaslı malzemelerin sert yoğun bir tabaka oluşturulabileceği yöntem olan paket sementasyondan bahsetmiş ve elementel bor, amonyum biflorür ve alümina ile işlem uygulamıştır. Katmanın tutunumu ya da parçalanmaması taban malzeme ve katman kalınlığına bağlı olduğunu ifade etmiştir. Daha büyük katman kalınlığı ve daha fazla alaşım elementi ile parçalanmaya dayanım artarak genellikle daha iyi bağlanma sağlanacağını belirtmiştir. Borür katmanı hafif asidik suda iyi bir korozyon direnci ve akışkan basınçlı suda erozyona tungsten karbür vb. göre daha iyi bir direnç sağlamıştır. Oluşturulan borür katmanı Fe₂B ve FeB fazlarından oluşmasının yanı sıra işlem sırasında borun BF₃ ile yüzeye taşındığını ifade etmiştir. Oluşturulan katman aşırı derece sert ve taban malzemeye iyi bir yapışkanlığı sahip olduğunu tespit etmiştir [61].

İpekoğlu ve Çavdar (2023), çalışmalarında borlama işleminin ısı işleminden ziyade indüksiyon ile yapılabileceğini matematiksel modelleme örneği ile ele almışlardır. Bu metot yüksek etkinlik ve kesinliğe ek olarak düşük enerji tüketimi gibi özellikleri ile endüstriyel uygulamalara adapte olabileceğini ifade etmişlerdir. Bu proseste bobin tarafından üretilen yüksek frekans, metal parçalarına nüfuz eder ve iç dirençten dolayı ısınmaya neden olur. Bu ısınmanın istenilen yüzey sertliği, dayanıklılık ve spesifikasyonları sağlayacağını belirtmiştir. Sonuç ısı işlem ile borlama 2-8 saat ve 850-1000 °C değerlerinde yapılırken indüksiyon ile daha hızlı gerçekleştirilmesinin yanı sıra kısa sürede beklenen difüzyon tabaka kalınlığının ve sertlik değerinin sağlanmasını beklemiştir. Ek olarak İndüksiyonla borlama prosesinde Fe₂B katmanının frekansla kontrol edilebileceği ve indüksiyonla borlamanın geniş bir endüstri yelpazesinde kullanılabileceği otomotiv, havacılık, enerji, tıp ve metalürji gibi sektörlerde çeşitli uygulama alanları bulması beklenmiştir [62].

Chad Harris (2024) tezinde jet motorlarında kullanılan nikel tabanlı süper alaşımların kompleks soğutma sistemleri ve termal bariyer kaplamalara rağmen süper alaşımın ergime sıcaklığına çok yakın sıcaklıklarda çalıştığını ve bu sıcaklıkların daha üstüne çıkılması gerektiğini ifade etmiştir. Ek olarak türbine su buharı saldırısı da bıçaklarının deformasyonunda temel etken olduğunu belirtmiştir. Bu türbin bıçakları 1150 °C’de çalışmakta ve ergime sıcaklığının neredeyse %90’dır. Soğutma sistemi olmadan 1300 °C’den daha yüksek sıcaklıklarda çalışabilecek malzemeler geliştirilmelidir. Refrakter metal silislerin potansiyel aday olduğu ve molibden, vanadyum, vanadyum alaşım taban malzeme üzerine molibden silisyum bor üçlü kaplama yapılmıştır. Harris kaplamayı toz paket (powder-pack ya da pack sementasyon) yöntemiyle elementel silisyum, bor, sodyum florür (NaF) ve alümina (Al_2O_3) kimyasal kompozisyonu ile yapmıştır. Ek olarak Mo-Si-B kaplamaya buhar saldırısına dayanımı geliştirmek için alüminyum eklemiştir. MoB ve $MoSi_2$ fazlarını tespit etmiştir. Ayrıca kaplamanın büyüme kinetiğini difüzyon davranışı ile öngörmüştür. Oksidasyon direncinde artış olmasının yanı sıra su buharı saldırısında yaklaşık %36 artış (2560 saat) gözlemlemiştir. Al eklenmesiyle 1450 °C’de 2589 saat dayanım bulunduğu ifade etmiştir [63].

Aras ve ark. (2021) çalışmalarında Eu-152 ve Co-60 enerjilerinde kütle zayıflama katsayısı ve yarı değer katmanı veya yarı değer kalınlığı değerlerini kullanarak kutu borlama (powder-pack) ile yapmış AISI 304L paslanmaz çeliğinin zayıflama katsayısını ölçmüşlerdir. Kutu borlama 950 °C’de 2, 4, 6 ve 8 saat süre ile kolemanit tabanlı Baybora tozu ile yapmışlardır. Yaygın kullanılan Ekabor ticari toza göre bu tozun daha uygun maliyetli olduğunu ifade etmişlerdir. Radyasyon azaltma üzerine borlanmış malzemedeki borür tabaka kalınlığının etkisi gama ışını geçirimiyle değerlendirmiş ve borür tabaka kalınlığının artışı ile AISI 304L çeliğinin zayıflama katsayısı değerinde artış olduğunu tespit etmiştir. Difüzyon kaplama kalınlığındaki artış ile aynı enerjideki absorbasyon katsayısının yavaş bir şekilde arttığı bu yüzden borlanmış malzemenin gama ışını absorbasyonu için daha uygun olduğunu ifade etmiştir. Ayrıca borlanmış çeliğin koruma özellikleri standart beton ve paslanmaz çelik ile kıyaslanmış ve borlanmış çeliğin diğerlerine göre daha iyi koruma sağladığı ve borlama ile çeliğin radyasyon koruma özelliğinin geliştirilebileceğine ek olarak borlanmış çeliğin kurşun ve cerrobond gibi malzemelerin yerine gama ışını koruma amacıyla kullanılma şansı olabileceği sonucuna varmıştır [64].

Yılmaz, Aktaş, Çalık ve Aytar (2019), çalışmalarında hardox 450 ve hardox HiTuf çeliğinin borlama sonucu sergilemiş olduğu radyasyon koruma özelliklerini çalışmışlardır. Kütle zayıflatma katsayısı (MAC) gibi bazı radyasyon koruma parametreleri borlama öncesinde ve sonrasında ölçmüşlerdir. Ayrıca borlama sıcaklığının radyasyon koruma özellikleri üzerine etkisini ölçmek için 800, 900 ve 1000 °C sıcaklıklarda çalışmalar yapmışlardır. Deneysel sonuç WinXCom programı sayesinde elde edilen teorik sonuç ile kıyaslanmış ve sıcaklık artışı ile kütle zayıflama katsayısı (MAC) arttığını tespit etmişlerdir. En iyi absorbasyon 1000 °C de elde etmişlerdir. Sonuç olarak gama ışınlarının çelik numunelerinde borlama işlemi ile daha etkili bir şekilde korunduğunu göstermiş ve borlama yönteminin radyasyon emilimine yönelik alternatif malzemelerin (cam, alaşım, organik bileşik vb.) üretiminde önemli bir işlem olduğunu ifade etmişlerdir [65].

Genel (2006) çalışmasında AISI H13 çeliğinden yapılmış parçalarda borlama işleminin servis ömrünü artırmak amacıyla uygulandığı ve bu işlemle elde edilen borür tabakalarının özelliklerinin yanı sıra kinetiğini incelemiştir. Ekabor-I tozları kullanılarak 1073, 1173 ve 1273 K işlem sıcaklıklarında, 1-5 saat süreyle yapılan deneyler sonucunda, çelik alt tabakasında FeB ve Fe₂B borür fazlarının varlığı optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile doğrulamıştır. Elde edilen borür tabakasının morfolojisi düzgün ve kompakt olup, sertliği 1650-2000 HV arasında bulmuştur. Sert borür kaplama ile matris arasındaki geçiş bölgesinin, alt tabakadan daha yumuşak olduğunu gözlemlemiştir. Borlama kinetiği, tabaka kalınlığı ile işlem süresi arasında parabolik bir ilişki olduğunu ve işlem için hesaplanan aktivasyon enerjisinin 186,2 kJ/mol olduğunu göstermektedir. Ayrıca, borlama parametresi yalnızca borür tabakası kalınlığı ve aktivasyon enerjisine bağlı bir parametre olarak önermiş ve bu parametre ile borlama süresi ve sıcaklık arasındaki ilişki kullanılarak tabaka kalınlığının tahmin edilmesini amaçlamıştır. Bu bulgular, AISI H13 çeliği dışında diğer takım çelikleri, düşük alaşımlı çelikler ve Armco üzerinde yapılan deneylerde de benzer sonuçlar göstermiştir [66].

Kondul ve Çetin (2022), çalışmalarında borlanmış ray çeliklerinin metalografik yapısı ve farklı yükler ile kayma hızı koşullarında aşınma davranışını incelemişlerdir. Sonuç olarak borlama sıcaklığı arttıkça borür tabakasının kalınlığı ve sertlik değerinin arttığını bulmuşlardır. Başlangıçta yaklaşık 300 HV olan ray çeliğinin sertliği, sırasıyla 700°C, 800 °C ve 900 °C'de 1886, 2145 ve 2590 HV'ye ulaşmıştır. Borlanmış ray çeliğinin aşınma davranışı incelendiğinde, borlanmamış çeliğe kıyasla aşınma direncinde belirgin bir artış

olduğunu tespit etmişlerdir. Topografik görüntüler, borlanmış örneklerin daha düzgün bir yüzey yapısına sahip olduğunu, borlanmamış örneklerin ise derin vadiler ve yoğun dalgalanmalara sahip olduğunu göstermiştir [67].

Campos-Silva vd. (2021), çalışmalarında alternatif bir yöntem olan Pulsed-DC toz-paket borlama işlemini (PDCPB) kullanmışlardır. PDCPB'nin ana bileşenleri toz karışımına yerleştirilmiş numuneyi içeren bir metal kutu, iki elektrot arasında yerleştirilen ve bir DC güç kaynağına bağlanan elektrotlar ile işlem sırasında kutup değişimlerini üreten programlanabilir bir elektronik kontrol cihazını içermektedir. AISI 316 L paslanmaz çelik ve Inconel 718 süper alaşımı yüzeylerinde 5A sabit akım girişi ile 10 saniyelik kutup değiştirme döngüleri uygulanarak çeşitli borlama işlemi gerçekleştirmişlerdir. PDCPB işleminden sonra borür tabakaları optik mikroskop, X-ışını difraksiyonu, taramalı elektron mikroskobu ve enerji-dispersif X-ışını spektroskopisi (EDX) ile karakterize etmişlerdir. Borür tabakalarının büyüme kinetiği, büyüme arayüzlerindeki kütle dengeleme denklemlerini dikkate alan bir difüzyon modeli kullanılarak belirlemişlerdir. Elektrotlardaki kutup değişim işlemi bor akışının homojen olmasını sağlamış ve Pulsed-DC alana maruz kalan malzemenin yüzeylerinde benzer tabaka kalınlıkları elde etmişlerdir. Pulsed-DC alanının borür tabakalarının büyüme hızını artırdığını ve borlanmış malzemelerdeki bor aktivasyon enerjilerinin geleneksel toz-paket borlama işlemine kıyasla önemli ölçüde azalttığını tespit etmişlerdir [68].

Ivanov vd. (2022), çalışmalarında önceden sertleştirilmiş 30 KhGSA çeliğinin yüzeyinde oluşan çok bileşenli difüzyon borür tabakalarının mikro yapısı ve mikro sertlik değerlerini incelemişlerdir. Difüzyon tabakaları, bor, krom, titanyum ve silisyum ile eşzamanlı difüzyon doygunluğu ile elde etmişlerdir. 30 KhGSA çeliğinin önceden sertleştirilmesi, kompleks bor-krom-titanyum silikonlama işlemine göre daha yüksek mikro sertlik değerlerinin elde edilmesini sağlamıştır. Isıl işlem altında difüzyon tabakasının yüzey mikro sertlik değerini 1980 HV0.1'den 1160 HV0.1'e düşerken, difüzyon tabaka kalınlığı 3 kat artmaktadır [69].

Guryev, Ivanov, S.G., Guryev, Mei ve Quan (2021) tarafından yapılan çalışmada 1045 çeliğinin bor, krom, titanyum ve silisyum ile doymunlaştırılması sonucu oluşan difüzyon tabakasının oluşumu üzerine çalışmalar sunmuşlardır. Bor, krom, titanyum ve silisyum ile eşzamanlı difüzyon doygunluğu uygulanan 1045 çeliği üzerinde yapılan aşındırıcı aşınma testlerinin sonuçlarını değerlendirmişlerdir. Ayrıca hardox 600 çeliği ve difüzyon

doğunluğu uygulanmış 1045 çeliği ile üretilen kurşun-asit bataryalarını parçalama bıçaklarının servis ömrünü karşılaştırmışlardır. Sonuçlarda bor, krom, titanyum ve silisyum ile eşzamanlı güçlendirme işleminin kurşun-asit bataryalarını parçalama bıçaklarının operasyonel dayanıklılığını 2 ile 4 kat artırmayı sağladığını tespit etmişlerdir. Ayrıca basit karbon çeliğinden üretilmiş ürünlerin sertleştirilmiş alaşım çeliğinin yerine yüksek verimli bir şekilde kullanılabileceğini göstermişlerdir [70].

Campos-Silva vd. (2010), çalışmalarında AISI 4140 çeliğinin macun borlama işlemi sonrası yüzey özelliklerini incelemişlerdir. Fe₂B sert kaplamalarının, 1123–1273 K sıcaklık aralığında farklı maruz kalma süreleri ile bor karbür macun tabakası kullanılarak materyal yüzeyinde oluşumunu sağlanmışlardır. İlk olarak AISI 4140 çeliklerinin yüzeyindeki borür tabakalarının büyüme kinetiğini değerlendirmişlerdir. İkinci olarak, Fe₂B fazındaki alaşım elementlerinin varlığı ve dağılımı Glow Discharge Optik Emisyon Spektrometresi (GDOES) tekniğiyle ölçülmüşlerdir. Ayrıca borlanmış yapıda oluşan termal gerilmeler için ve faz analizi için değerlendirmeler yapmışlardır. AISI 4140 çeliklerinin borlama sonucu oluşan demir borür tabakasının çatlama direnci yüzeyden 25 mm uzaklıkta Vickers mikro indentasyon testiyle ölçmüşlerdir. Çatlama direncinin kuvvet kriteri indentatör izlerini uçlarında paralel ve dik yönlerde oluşan kırılma hatlarının büyüklüğüne göre belirlemişlerdir. Palmqvist çatlak modeliyle elde edilen çatlama direnci değerlerini borlama işleminin farklı yükler ve parametreleri için $KC(p/2) > KC > KC(0)$ şeklinde ifade etmişlerdir [71].

Uluköy vd. (2015), çalışmalarında AISI D3 çeliğine dekarbürizasyon sonrası borlama ve sertleştirme ısıtma işlemlerinin etkilerini incelemişlerdir. Dekarbürizasyon işlemi, %60 NaCl ve %40 NaCO₃ içeren bir tuz banyosunda 850 °C’de 1 ve 3 saat süreyle gerçekleştirmişlerdir. Borlama ise yine tuz banyosunda %70 boraks ve %30 silisyum karbür içeren bir sıvı ortamda 980 °C’de 5 saat süre ile uygulamışlardır. Difüzyon katmanlarının mikro yapıları optik mikroskopla incelemiş, sertlik profilleri ise Vickers cihazı ile ölçmüşlerdir. Dekarbürizasyonun ardından borlama yapılan çeliğin sertliğinin, yalnızca borlama yapılan çeliğe kıyasla %10 daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca 3 saatlik dekarbürizasyon sonrası borlama işlemi ile geçiş bölgesinin kalınlığı yaklaşık 4,5 mm’ye ulaştığını ifade etmişlerdir [72].

Pertek ve Kulka (2003), çalışmalarında orta karbonlu 41Cr4 çeliği üzerinde borlama ve karbürleme ile yüzey sertleştirme işlemi uygulamışlardır. Karbürleme ve ardından borlama işlemleriyle elde edilen borokarbürize tabakaların mikro yapısı, karbon profilleri ve seçilen özellikleri incelemişlerdir. Bu iki aşamalı işlem "borokarbürizasyon" olarak adlandırılmaktadır. Borokarbürize tabakalarda iki bölge gözlemlenmiştir: Demir borürler (FeB ve Fe₂B) ve karbürize tabaka. Demir borür bölgesinin derinliği 100-125 µm, mikrosertliği ise 1450-1900 HV arasında tespit etmişlerdir. Demir borür bölgesinin altında, karbon içeriği %0,94–1,41 ve mikro sertlik 950 HV olarak bulmuşlardır. Borokarbürize tabakada sertlik gradyanı, sadece borlanan tabakaya kıyasla daha az ve yüzeyden uzaklaştıkça karbon içeriği ve mikrosertliğin azaldığını ifade etmişlerdir. Borlanan, karbürlenen ve borokarbürize tabakaların karbon ve sertlik profilleri karşılaştırmışlardır. Borokarbürizasyonun aşınma direncini olumlu yönde etkilediği ve borokarbürize tabakanın aşınma direncinin yalnızca borlanan veya karbürlenen tabakalara göre daha yüksek olduğu belirlemişlerdir [73].

Iwabuchi ve Kobayashi (2012), tarafından geliştirilen borlama sürecini metali yüksek frekanslı indüksiyon ocağı ile ısıtarak, boraks ve karborundumdan (silisyum karbür) oluşan tuzu eritmeye dayandırmışlardır. Bu süreç, çeşitli çelik türleri üzerinde uygulanarak özellikleri incelemişlerdir. Çalışma, çeliklerin kimyasal bileşiminin ve tuzların, borür tabakasının özellikleri üzerindeki etkisini incelemek için uygulamışlardır. Karborundum içeren tuz kullanılarak kalın bir borür tabakası elde etmişlerdir. Çeliklerdeki krom içeriğinin artması, borlama işlemini engellediği ve bu da iğne benzeri borür tabakasının düzgün bir yapıya dönüşmesine yol açtığını tespit etmişlerdir. İndüksiyonla ısıtılma işlem yöntemi, geleneksel yönteme kıyasla daha kalın borür tabakaları sağladığı sonucuna varmışlardır [21].



4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışmasında; borlama tozları ve macunlaştırıcı katkıları ile malzemeye iyi tutunan, işlem sonrası kolay temizlenen ve düşük florür emisyonuna imkân sağlayan macun hazırlanmıştır. Taban malzemesi olarak kullanılan 1018 düşük karbon çeliğinin yüzeyi bir dizi metalografik işlemler ile parlatılmıştır. Hazırlanan bor karbür tabanlı borlama macunu malzemenin tüm yüzeylerine sürülmüştür. Taban malzemedeki deoksidasyon sağlamak amacıyla altına ve üstüne SiC tozu yerleştirilmiştir. Macun ve SiC tozu içerisinde gömülen numune, etüvde kurutulduktan sonra 1000 °C sıcaklıkta ve 4 saat süreyle sabit koşullarda borlama işlemine tabi tutulmuştur. Soğumuş ve temizlenmiş numuneler XRD, FE-SEM, Optik Mikroskop, Mikro ve Nanosertlik, Tribolojik Analiz ve korozyon testine tabi tutulup elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Borlama işlemi sonrasında ortaya çıkması beklenen özelliklerin tespit edilmesi ve laboratuvar koşullarında yüzey sertleştirme işleminin en yüksek verimle gerçekleştirilmesini sağlayacak optimum parametrelerin belirlenmesi amaçlanmıştır.

4.1. Kullanılan malzemeler ve cihazlar

Deneysel çalışmalarda taban malzemesi olarak kullanılan çeliklerin makro yapısına ilişkin görsel Resim 4.1’de sunulmuş, bu çeliklerin kimyasal bileşimi ise Çizelge 4.1’de verilmiştir.



Resim 4.1. AISI 1018 düşük karbon çelikleri

Çizelge 4.1. AISI 1018 çeliğinin kimyasal kompozisyonu

Çelik	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Cu	%B
1018	0,17	0,17	0,66	0,014	0,019	0,08	0,08	0,22	0,0001

Macun uygulanmış çeliklere borlama işlemi yapılırken kullanılan; fırın içindeki sıcaklıkta şeklini koruyabilen, işlem sıcaklığına dayanıklı ve sonrasında içerisindekileri kolay bir şekilde bırakabilen paslanmaz çelik kaplar aşağıda Resim 4.2’de gösterilmiştir.



Resim 4.2. Kullanılmış paslanmaz çelik borlama kabı ve kullanılmamış paslanmaz çelik borlama kabı (Pota-Retort)

Macunu oluşturmak için kullanılan; bor kaynağı, aktivatörler ve dolgu maddesi gibi borlama toz bileşimi ve düşük porozite, korozyonu engelleme gibi çeşitli özellikler için kullanılan macunlaştırıcı katkıları içeren kompozisyonun bileşiminde kullanılan tozların bilgileri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Macun oluşturmak için kullanılan tozlar

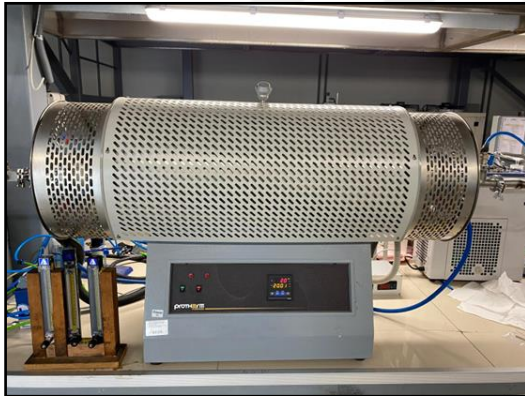
Kullanılan Kimyasallar	Marka ve Teknik Özellikler
Bor Karbür (B_4C)	Sigma Aldrich, %99,5 Saflık, 325 Mesh
Potasyum Tetrafloraborat (KBF_4)	Sigma Aldrich, %96 Saflık
Silisyum Karbür (SiC)	Sigma Aldrich, %99,5 Saflık, 325 Mesh
Sodyum Nitrit ($NaNO_2$)	Isolab, ≥ 99.0 Saflık
Kalsiyum Karbonat ($CaCO_3$)	Adaçal Endüstriyel Mineraller, %98 Saflık
Potasyum Karbonat (Li_2CO_3)	Aladdin Biochemical Technology, ≥ 99.0 Saflık
Nano kil	Nanografi, %99,9 Saflık, -800 nm
Boraks Dekahidrat ($Na_2B_4O_7 \cdot 10 H_2O$)	Etimaden- Teknik saflık
Sodyum Florür (NaF)	Süber Cam Laboratuvar Ürünleri ve Kimyasalları, %98 Saflık

Deoksidant silisyum karbür içerisine gömülmüş ve macunlanmış numunelere ısıtma işlemi uygulamak için kullanılan 1100 °C sıcaklığa çıkabilen kamara tipi fırın Resim 4.3’te gösterilmiştir. Borlama işlemi sonucu çift fazlı yapı ($Fe_2B + FeB$) olarak çıkan

numuneleri tek faza (Fe_2B) çevirmek için kullanılan SiC rezistanslı, alümina tüplü, vakum motoruna sahip ve argon gibi çeşitli koruyucu gazların içeriye beslenmesine imkân sağlayan 1600 °C sıcaklığa çıkabilen tüp fırın Resim 4.4'te gösterilmiştir.



Resim 4.3. Kamara tipi fırın



Resim 4.4. Silisyum karbür rezistanslı tüp fırın

4.2. Deneysel Yöntem

4.2.1. Borlama deneylerine hazırlık

AISI 1018 düşük karbon çeliği yüzeyine borlama işlemi için ayna görünümü kazandırmak adına bir dizi metalografik yüzey hazırlama işlemi uygulanmıştır. 500, 800 ve 1200 grid SiC zımpara kâğıdı ile 30 N yük ve su altında zımparalama işlemleri uygulanmıştır. Parlatma işlemi ise Struers Md-Dac keçe ve Akasel Diadoublo Mono 3 mikron tane boyutlu süspansiyon sonrasında Aka-Chemal sentetik köpük keçe ile 50 nm koloidal silika

süspansiyon kullanarak oksit parlatma işlemi uygulanmıştır. Resim 4.5'te parlatılmış çelikler gösterilmiştir.



Resim 4.5. Ayna görünümü sağlanmış çelikler

Borlama macunu hazırlama işlemi sırasında toplamda 1 numune için 20-25 gram macun hazırlanmıştır. Macun formuna 4-6 ml su kullanılarak çevrilmiştir. Macun kompozisyonu Çizelge 4.3'te ve macun örnekleri Resim 4.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. Kullanılacak macun kompozisyonu oranları

Kullanılan Tozlar	Miktar (%)
B ₄ C	7.5
KBF ₄	5
NaF	9
SiC	45
CaCO ₃	1
Li ₂ CO ₃	1
NaNO ₂	0.3
Borax	0.4
Nanokil	0.8



Resim 4.6. Borlama işlemi için hazırlanmış macun örnekleri

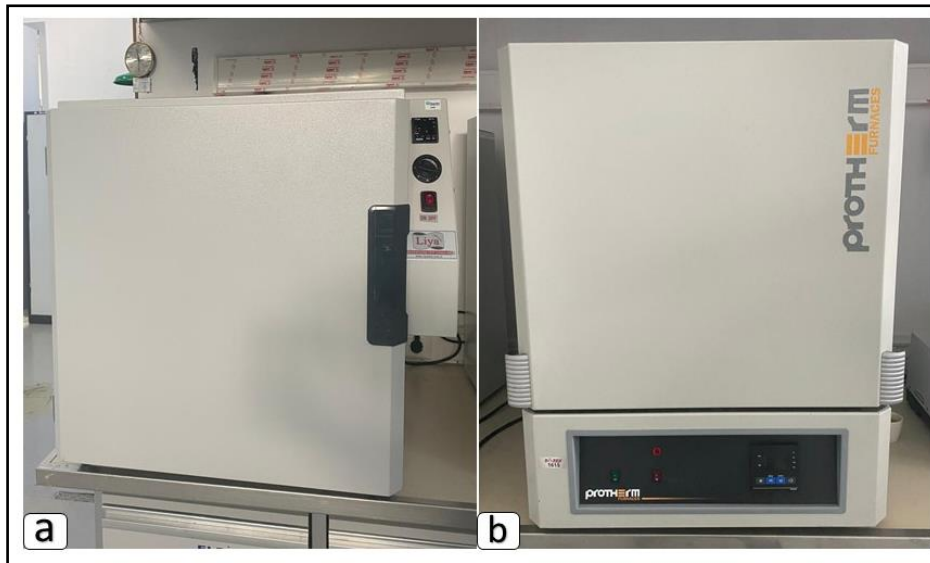
4.2.2. Macun borlama deneyleri

Borlama deneyleri iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada hazırlanan macun, malzemenin tüm yüzeylerine sürülerek kap içerisine yerleştirilmiştir. Macunlanmış numunenin alt ve üstü silisyum karbür tozu ile koruma altına alındıktan sonra 100 °C sıcaklık ve 120 dakika süre ile Etüvde kurutma işlemine bırakılmıştır. Macunlanmış numune ve kap Resim 4.7’de gösterilmiştir.



Resim 4.7. Üzeri macunlanmış ve toz içerisine gömülmüş numuneler içeren kap

Çalışmanın ikinci aşamasında etüvde kurutulmuş numune, kapağı kapalı bir şekilde 1000 °C sıcaklıkta ve 4 saat süreyle kamara tipi fırında borlama işlemine tabi tutulmuştur. Kullanılan etüv ve kamara tipi fırın Resim 4.8’de gösterilmiştir.



Resim 4.8. (a) Kurutma işlemlerinde kullanılan etüv (b) Borlama işleminde kullanılan kamara tipi fırın

Borlama işlemi sonrasında numuneler fırın içerisindeki ortam atmosferinde soğutulmaya bırakılmıştır. Oda sıcaklığına gelen numuneler, Resim 4.9'da gösterildiği gibi yüzeylerindeki kurumuş macunlar hafif bir mekanik işlem ve su ile kolaylıkla temizlenmiştir. Yüzeyi kuru macundan temizlenen numuneler etanol ile ultrasonik banyoda yıkanılarak kılcal kirlilikler temizlenmiş ve kurutulmuştur.



Resim 4.9. Borlama sonrası çıkan numune ve ultrasonik ile temizlenmiş numune

4.3. Deneylerin Karakterizasyonu

Borlama işlemi uygulanmış numunelere optik mikroskop, X-ışınları kırınımı (XRD), elektrokimyasal korozyon testi, nano sertlik analizi, mikro sertlik analizi, aşınma analizi ve alan emisyonlu taramalı elektron mikroskopu (FE-SEM) ile karakterizasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir.

4.3.1. Optik mikroskop

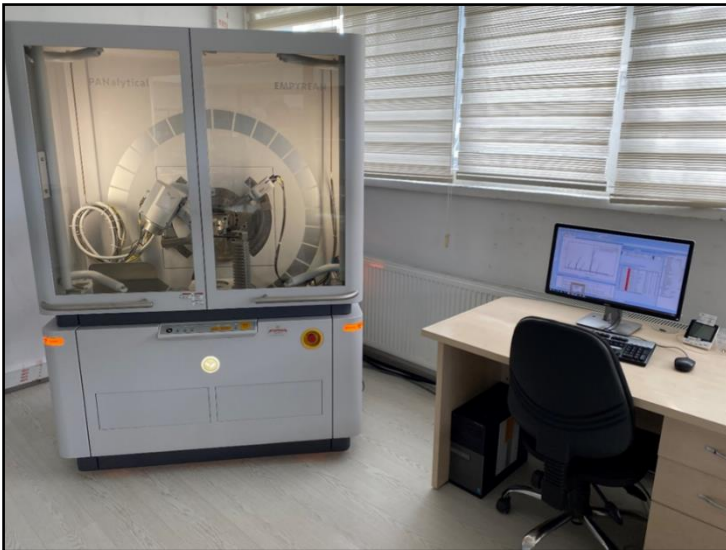
Işık mikroskopu olarak bilinen optik mikroskop küçük objeleri büyütme için görünür ışık ve bir lens sistemi kullanan görüntüleme cihazıdır. Tez kapsamında borlama sonrası taban malzemenin yüzeyinden merkeze doğru oluşan testere ağzı mikro yapıyı gözlemlemek, difüzyon tabaka kalınlığını ölçmek gibi amaçlarla optik mikroskop kullanılmıştır. Analizlerde Resim 4.10'da gösterilen TENMAK-BOREN altyapısında bulunan Nikon Eclipse Lv100nd markalı mikroskop kullanılmıştır.



Resim 4.10. Nikon eclipse Lv100nd marka ve modelli optik mikroskop

4.3.2. X-ışınları kırınımı (XRD) analizi

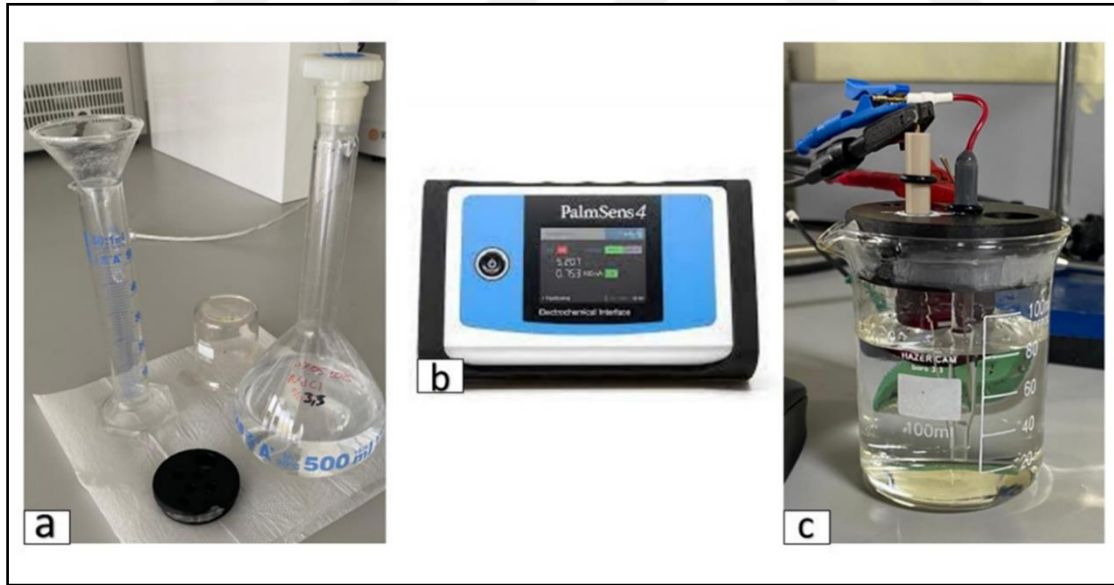
Borlama işlemi sonrası malzemede oluşturulan difüzyon tabakasının faz kompozisyonu ve kristal yapısını belirlemek için X ışınlarını kırınımı (XRD) analizi yapılmıştır. Kırınım paterni Resim 4.11'deki TENMAK-BOREN altyapısında bulunan Panalytical Empyrean XRD cihazı ile karakterize edilmiştir. Cihaz 40 kV jeneratör voltajı ve 40 mA akımda Co K α radyasyonu kullanılarak Bragg-Brentano modunda kullanılmıştır. Elde edilen patern X-Pert High Score Plus yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Borlanmış numunenin faz analizi ve kristal yapılarının analizi için ölçüm 10-90° açıları arasında gonio modunda gerçekleştirilmiştir.



Resim 4.11. Panalytical Empyrean XRD cihazı

4.3.3. Elektrokimyasal korozyon testi

Borlama prosesinin sağladığı korozyon direncini test etmek için elektrokimyasal (potasyodinamik polarizasyon) korozyon testi uygulanmıştır. Test; Borlama uygulanmamış çelik, borlama işlemi sonrası tek fazlı (Fe_2B), çift fazlı ($\text{FeB}+\text{Fe}_2\text{B}$) yapılar ve difüzyon tavllanmış yapı olmak üzere 4 adet numuneye uygulanmıştır. Bu testin amacı numunelerin korozyon oranı gibi korozyon kinetik verileri ile borlamanın korozyon direnci üzerine etkisini tespit etmektir. Testler TENMAK-BOREN bünyesindeki Resim 4.12’de görülen kompakt PalmSens 4 potansiyostat ve Galvonastat cihazında Ag/AgCl referans elektrot, platin karşı elektrot ve çalışma elektrotuna sırasıyla bağlanan 4 adet numune ile %3,5 NaCl içerisinde daldırılarak bir beher içerisinde oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Her potasyodinamik ölçüm öncesi potansiyelde dalgalanmayı azaltmak ve stabilizasyonu sağlamak amacıyla 3600 sn OCP (Açık Devre Potansiyeli) uygulanmıştır. Daha sonra -0,2 V'luk bir başlangıç potansiyeli ile 0,2 V'luk bir son potansiyel arasında 0.0001V tarama oranı ile 0.25 cm² alan için potasyodinamik tarama gerçekleştirilmiştir.



Resim 4.12. (a) İşlemden kullanılan sıvı ve ekipmanlar (b) palmSens4 potansiyostat-galvonastat cihazı (c) Elektrotlar ve numunenin olduğu korozyon düzeneği

Elektrokimyasal korozyon testleri, özellikle Tafel eğrileri üzerinden elde edilen veriler yardımıyla, metal yüzeylerin korozyon davranışlarını nicel olarak değerlendirmek için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Tafel eğrileri, anot ve katot reaksiyonlarının potansiyel-logaritmik akım yoğunluğu ilişkilerini göstererek, korozyon potansiyeli (E_{corr})

ve korozyon akım yoğunluğu (I_{corr}) gibi temel parametrelerin belirlenmesini sağlar. Bu parametreler, uygun eğri uydurma yöntemleri ile elde edildikten sonra korozyon oranı (corrosion rate) Faraday yasasına dayalı olarak hesaplanabilmektedir. Korozyon oranı genellikle aşağıdaki Eşitlik 4.1 ile ifade edilir [74].

$$\text{Korozyon Oranı} \left(\frac{\text{mm}}{\text{yıl}} \right) = \frac{(0.00327 \times I_{corr} \times EA)}{\rho} \quad (4.1)$$

I_{corr} : $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ cinsinden korozyon akım yoğunluğu

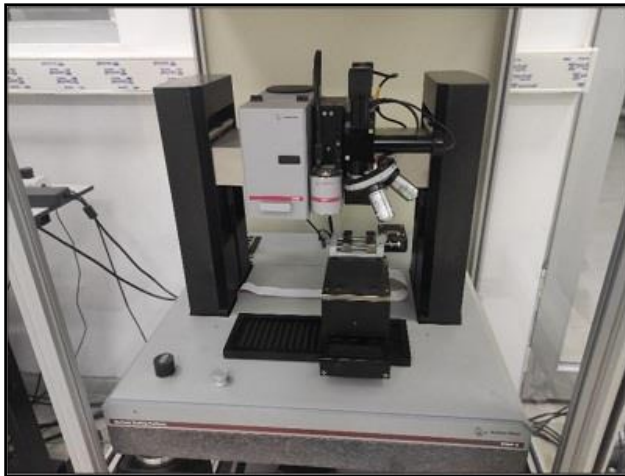
EA : Metalin eşdeğer ağırlığı [$EA = W$ (Moleküler Ağırlık) / n (oksitlemek için gerekli elektron sayısı- valans)]

ρ : Metalin yoğunluğu

0,00327: Birim dönüşüm sabiti (elektrik yükü, zaman ve hacim birimleri arasındaki dönüşüm)

4.3.4. Nanosertlik analizi

Sertlik, yüzey sertleştirme ya da difüzyon kaplamaların önemli bir özelliğidir. Sertlik testi sayesinde kaplamaların elastiklik modülü, Poisson oranı gibi birçok mekanik özellik analiz edilebilmektedir. Bu çalışmada borlanmış tabakanın mekanik özellikleri TENMAK BOREN bünyesinde bulunan Resim 4.13'teki Berkovich tipi elmas indenter kullanan AntonPaar NHT³ Nano indentasyon cihazı ile analiz edilmiştir.



Resim 4.13. AntonPaar NHT³ nano indentasyon cihazı

4.3.5. Mikrosertlik analizi

Çalışmada borlanmış tabakanın parlatılmış kesit sertlik ölçümü için TENMAK-BOREN altyapısında bulunan Resim 4.14'teki Shimadzu HMV-G Mikro Sertlik Ölçüm Cihazı kullanılmıştır.



Resim 4.14. Shimadzu HMV-G mikro sertlik ölçüm cihazı

4.3.6. Aşınma analizi

Çalışmada borlanmış numunelerin aşınma testleri Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi alt yapısında bulunan Resim 4.15'teki Anton Paar TRB³ tribometre ile oda sıcaklığında, yağsız ortamda ve %55 nemlilik ile yapılmıştır. 6 mm çapında Al₂O₃ bilya kullanılmıştır. Testler 20N yük ile 500m mesafede linear modda (reciprocating) gerçekleştirilmiştir.



Resim 4.15. Anton Paar TRB³ tribometresi

Aşınma testleri sonrasında elde edilen iz geometrilerine bağlı olarak, malzeme yüzeyinden uzaklaştırılan hacimsel kaybın belirlenmesi amacıyla aşınma oranı Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi alt yapısında bulunan Profilm 3d Optik Profilometreden elde edilen veriler ile hesaplanmıştır. Bu kapsamda aşınma izinin yaklaşık olarak yarım elips formuna sahip olduğu kabul edilerek iz derinliği (d), iz genişliği (w) ve iz uzunluğu (L) ölçülmüştür. Aşınan hacim (V), aşağıdaki Eşitlik 4.2 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$V = 4 \pi \cdot d \cdot w \cdot L \quad (4.2)$$

Burada;

V: Aşınma hacmi (mm³)

d: İz derinliği(mm)

w: iz genişliği (mm)

L: iz uzunluğu (mm)

olarak tanımlanmıştır.

Toplam aşınma oranı (W), elde edilen aşınma hacminin uygulanan normal yük (F) ve toplam sürtünme mesafesi (s) ile orantılandırılmasıyla belirlenmiş ve aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır.

$$W = V \frac{V}{F \cdot s} = \frac{4\pi \cdot d \cdot w \cdot L}{F \cdot s}$$

Burada;

W: Aşınma oranı (mm³/N·m)

F: Uygulanan normal yük(N)

s: Sürtünme Mesafesi (mm)

olarak ifade edilmektedir [75].

Ek olarak aşınma sonrasında elde edilen yüzeyin morfolojisini değerlendirmek ve aşınma mekanizmalarını anlamak için FE-SEM ile malzeme yüzeyi detaylı bir şekilde incelenmiştir.

4.3.7. Alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu

Taramalı elektron mikroskopy (SEM), odaklanmış elektron demetiyle malzemelerin yüzeylerini tarayarak görüntü elde etmek için kullanılan gelişmiş bir elektron mikroskobudur. Elektronlar, numunedeki atomlarla etkileşime girerek numune yüzeyinin topografyası ve bileşim hakkında bilgi içeren farklı sinyaller üretir. Öte yandan, FE-SEM analiziyle 10x ile 300.000x büyütmelerde numune hakkında topografik ve elementel bilgiler elde edilebilmektedir. SEM ve FE-SEM karşılaştırıldığında, FE-SEM daha yüksek çözünürlükle daha net görüntüler verir ve daha az elektrostatik olarak bozulmuş görüntüler sunmaktadır. Bu Araştırmada Resim 4.16'da gösterilen Ankara-Yıldırım Beyazıt Üniversitesinde bulunan HITACHI SU5000 FE-SEM cihazı ile analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde difüzyon tabakalarının kalınlıkları, yüzey morfolojisinin yanı sıra tribolojik analizler sonucunda bütün numunelerin aşınma izlerinin boyutu ve morfolojisi belirlenmiştir.



Resim 4.16. Hitachi SU5000 FE-SEM cihazı

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

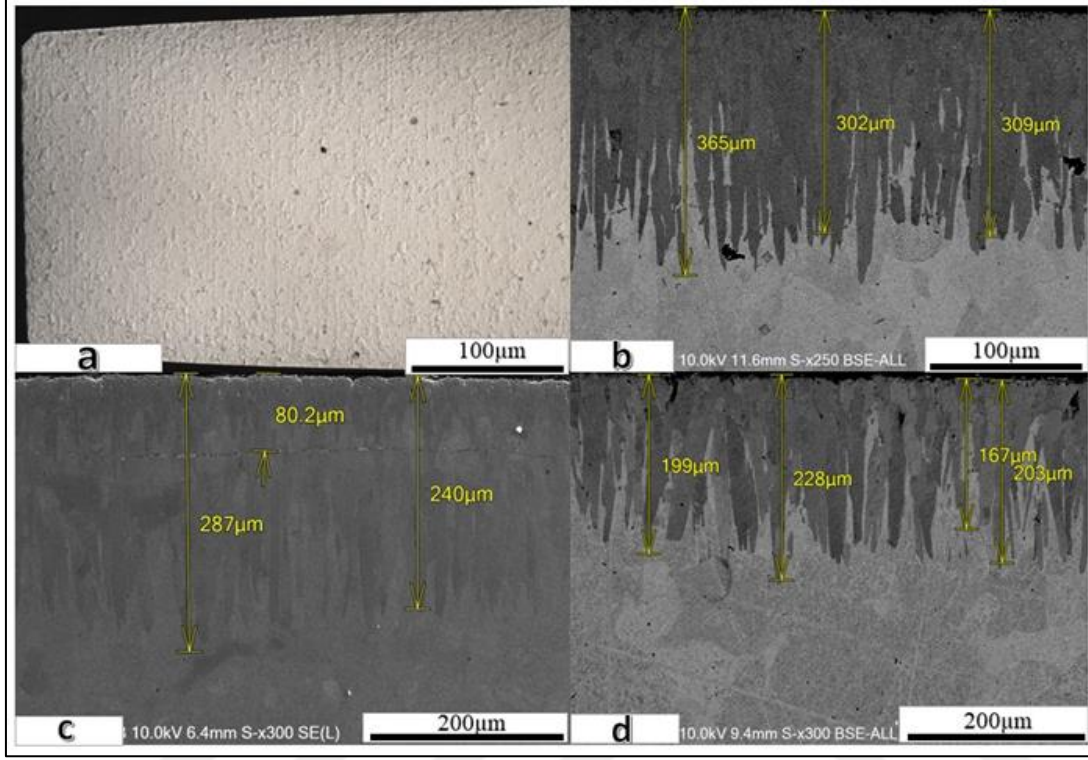
Bu çalışma, 1018 düşük karbon çeliğinin 1000 °C ve 4 saat sabit süre ile düşük poroziteli, yüksek difüzyon tabakalı, kolay yapışan, kolay temizlenen borlama macununun kullanılması ve borlama işleminin uygulanmasının yanı sıra çift fazlı ve tek fazlı yapıların elde edilmesi ve karakterizasyonu üzerine odaklanmıştır. Macun borlama prosesinde Mikro yapısal Analiz, Faz Analizi, Tribolojik Analiz, Sertlik Analizi ve korozyon testi olmak üzere 5 test uygulanmıştır. Gerçekleştirilen beş deneysel teste ait görüntüler, elde edilen veriler ve analiz edilen grafikler doğrultusunda değerlendirmeler yapılacak ve ilgili açıklamalar sunulacaktır.

5.1. Mikroyapısal Analizler

Resim 5.1(a)'da yüzeyi parlatılmış 1018 düşük karbon çeliğinin mikroyapısı görülmektedir. Borlanmış 1018 çeliğin çift fazlı ve tek fazlı mikroyapıları dikkate alındığında borlama uygulanmamış çeliğe kıyasla faz oluşumu ve tane morfolojilerinin farklı olduğu görülmektedir. Singhal [76], borlama işlemi sonrası yapıda meydana gelen testere ağzı ya da iğnemi mikroyapının borür katmanının anizotropik kristallerdeki kristalografik yöndeki bor atomlarının hareketleri sonucu oluştuğunu ifade etmiştir. Ayrıca Fe_2B ve FeB fazlarında [002] kristalografik yön boyunca borür katmanlarının büyümesinin de diğer yönlere kıyasla daha fazla olduğunu belirtmiştir. Tercihli yönde büyüyen bu yapıların testere ağzı biçiminde şekiller oluşturduğuna vurgu yapmıştır. Oluşan bu testere ağzı yapıların taban malzeme ile çok iyi adezyon özellik gösterip tabakanın (difüzyon kaplama) kalitesini artırdığını belirtmiştir. Termokimyasal Macun Borlama sonrası parlatılmış çift fazlı (Fe_2B + FeB) ve tek fazlı (Fe_2B) numunelerin FE-SEM görüntüleri ve Optik Mikroskop görüntüsü Resim 5.1'de gösterilmiştir.

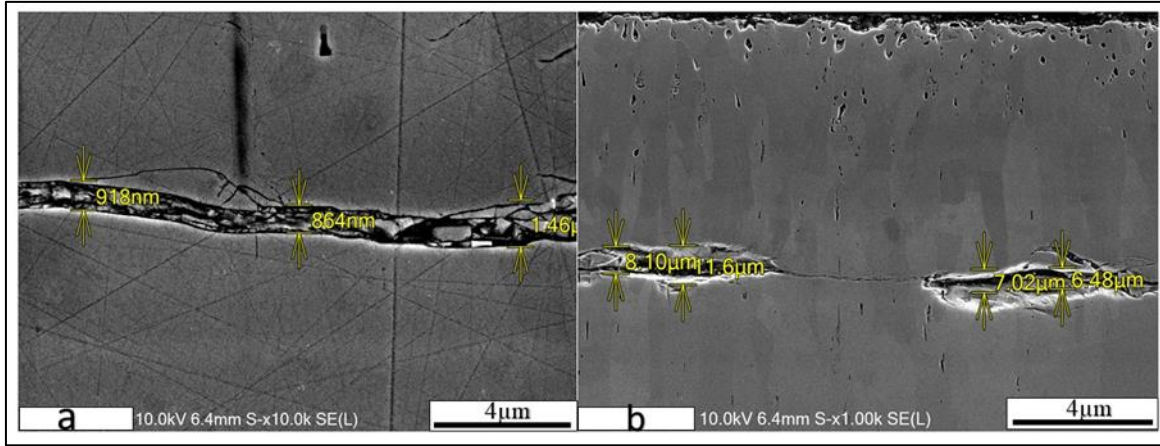
Borlama sıcaklık ve süreye bağlı difüzyon kontrollü bir prosestir. 1. Fick Kanunu gereği sıcaklık ve süre arttıkça oluşan tabaka kalınlığı artmaktadır. Sonuç olarak sıcaklık ve süredeki değişim ile tabaka kalınlığında farklılıklar görülmektedir. Çift fazlı yapının incelenmesinde toplam difüzyon tabaka kalınlığı ortalama 264 μm olarak elde edilirken difüzyon tavlama ısı işlemi sonucunda elde edilen tek fazlı yapıda ortalama 325 μm boyutunda tabaka kalınlığı elde edilmiştir. Borlama ısı işlemi sonucu tek fazlı olarak elde edilen yapı için ortalama tabaka kalınlığı 200 μm olarak ölçülmüştür. Literatürde R. Carrera-ve ark. yapmış oldukları çalışmada, bu tezde yapılan çalışmaya benzer olarak çift

fazlı yapı için 1273 °K ve 6 saat süre de yaklaşık 215 µm toplam tabaka kalınlığı elde etmişlerdir [77].



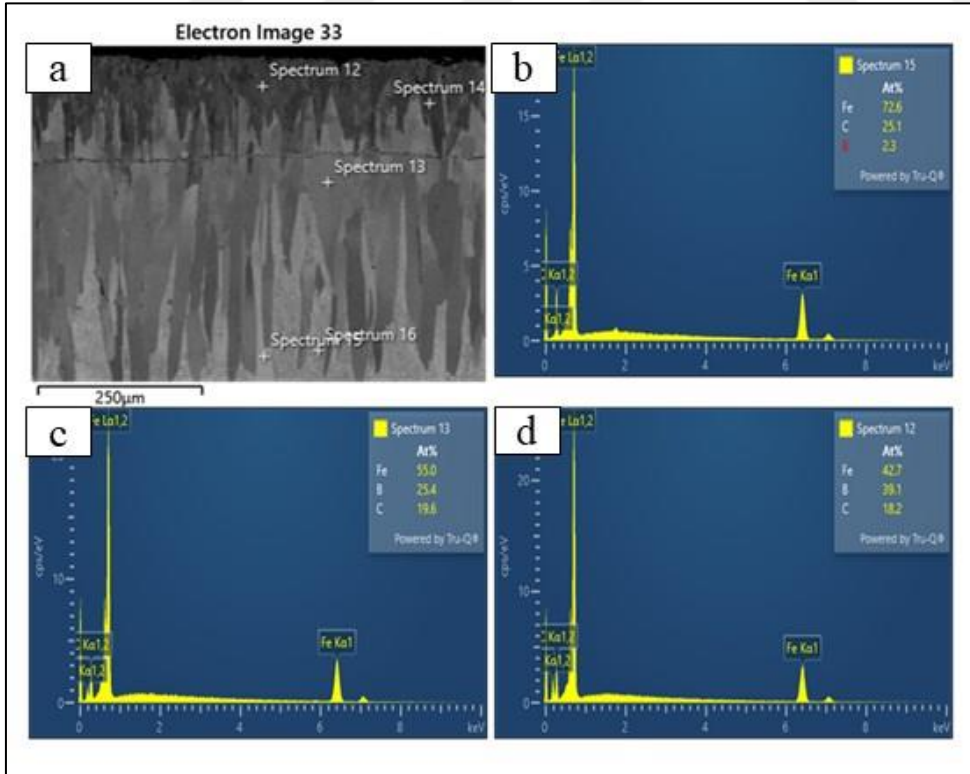
Resim 5.1. (a) İşlem görmemiş çelik (AISI 1018) optik görüntüsü (b) Difüzyon tavlama sonrası tek fazlı (Fe_2B) çeliğin FE-SEM mikro yapısı (c) Borlama sonrası çift fazlı ($\text{Fe}_2\text{B} + \text{FeB}$) çeliğin FE-SEM mikro yapısı (d) Borlama sonrası tek fazlı (Fe_2B) çeliğin FE-SEM mikro yapısı

Tez kapsamında yapılan çalışmada çift fazlı yapıda istenmeyen faz olan FeB fazı 80.2 µm olarak ölçülürken sertlik farkından dolayı FeB ile Fe_2B fazları arasında çatlak oluşumu görülmüş ve çatlak en düşük 864 nm en yüksek 8 µm olarak ölçülmüştür. Kartal ve ark. çift fazlı borür katmanları, yüzeydeki borür katmanından alt tabakaya doğru kademeli olarak azalan sertlik profili nedeniyle bazı tribolojik avantajlar sunduğu ancak borlama sonucu çift fazlı çeliğin mikroyapıda üst kısımdaki FeB fazı daha yüksek bor içeriğine sahip olduğundan dolayı mekanik ve tribolojik uygulamalar için ideal olmayabileceğini ifade etmişlerdir. Çok sert bir faz olan FeB üst tabakası fazlasıyla kırılgandır ve önemli ölçüde farklı bir termal genleşme katsayısına sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Resim 5.2’de oluşan mikro ve nano çatlaklar gösterilmiştir. Borlama işlemi sonrası soğumaya bırakılan numunelerde çift fazlı yapılarda FeB fazında yüksek çekme gerilmeleri gelişirken Fe_2B fazında basınç gerilmeleri olduğu ve sonuç olarak borlanmış yüzey katmanlarına paralel olarak mikro ve makro çatlakların geliştiği ifade edilmiştir [78].



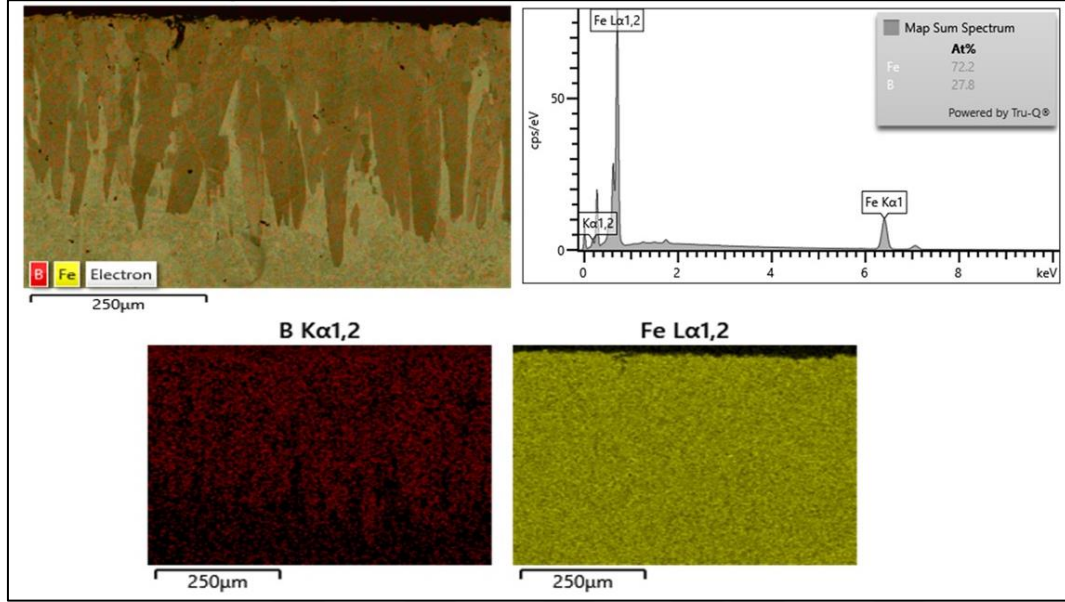
Resim 5.2. (a) Çift Fazlı yapıda FE-SEM 10000x ile çatlak oluşumunun ölçüldüğü bir bölge (b) Çift Fazlı yapıda FE-SEM ile 1000x çatlak oluşumunun ölçüldüğü bir diğer başka bölge

Resim 5.3'te verilen kimyasal kompozisyon analizi ile çift fazlı yapı ($\text{Fe}_2\text{B} + \text{FeB}$) için 5 noktadan alınan analiz sonucunda FeB fazındaki bor oranı yüzde atomik 38-39 olarak ölçülürken Fe_2B fazında yüzde atomik 25 olarak ölçülmüştür. Dişlerin bitiminden sonrasında bor oranı yüzde atomik 2,3 olarak görülmüştür.



Resim 5.3. (a) Çift fazlı ($\text{Fe}_2\text{B} + \text{FeB}$) FE-SEM mikro yapısı (b) Mikro yapıda difüzyon tabakası sonrası taban malzemeden alınan spektrum (c) Difüzyon tabakasındaki Fe_2B mikro yapısından alınan spektrum (d) Difüzyon tabakasında FeB yapısından alınan spektrum

Resim 5.4'te tek fazlı yapı (Fe_2B) için tabaka mikro yapısından alınan haritalama FE-SEM EDS analizinde yüzde atomik olarak 72,2 oranında demir ve 27,8 oranında bor olduğu tespit edilmiştir.



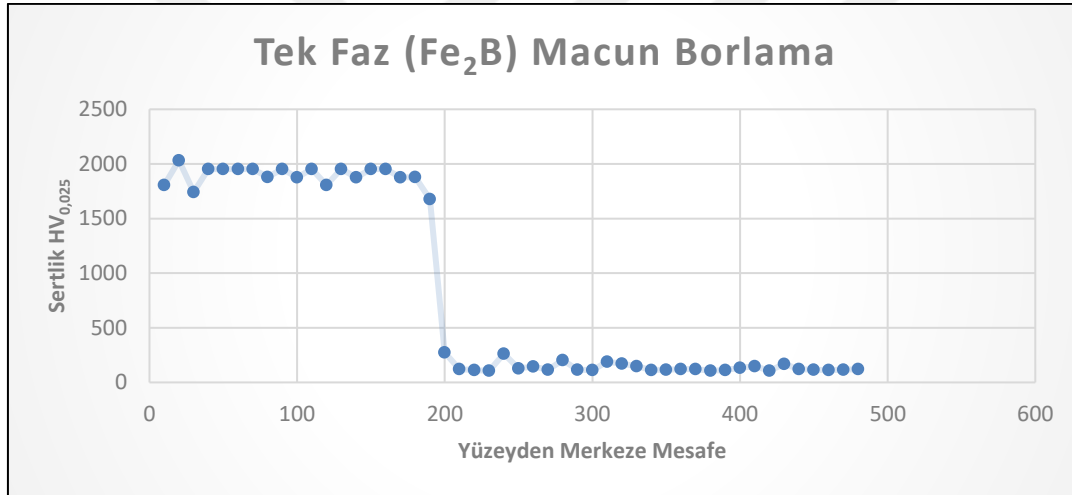
Resim 5.4. Tek Fazlı (Fe_2B) demir borür yapısının haritalama EDS analizi sonucu

5.2. Sertlik Analizleri

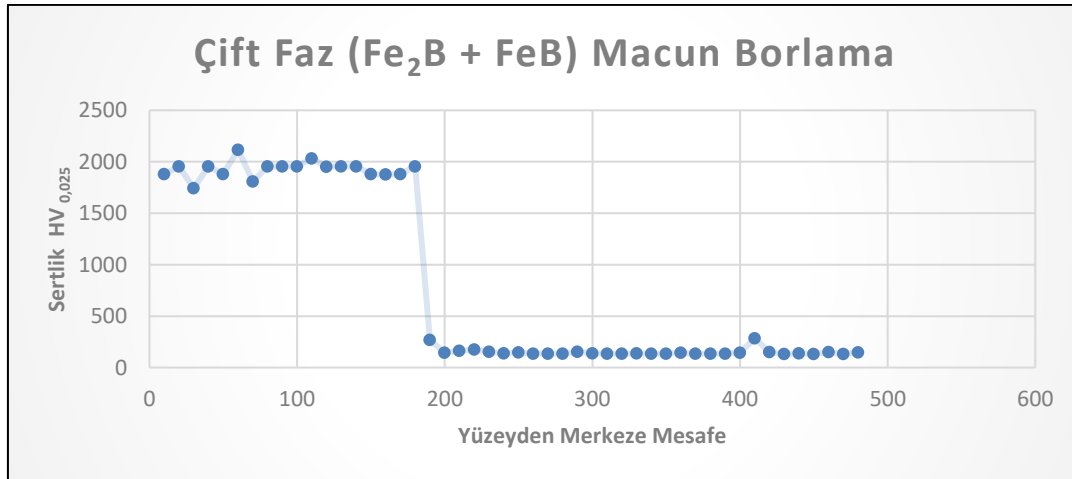
Macun borlama işlemi sonucunda elde edilen çift fazlı, tek fazlı ve difüzyon tavlama sonucu oluşmuş tek fazlı demir borür yapılarının sertlik analizleri mikro sertlik ve nano sertlik cihazları ile yapılmıştır. Oluşturulan borür tabakasının sertlik analizi için uygun bir borür tabakası ele alınmıştır.

Mikro sertlik ölçümleri yüzeyden merkeze doğru 10 µm aralıklar ile 10 µm dan 480 µm'ye kadar ölçüm alınarak Şekil 5.1, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'teki grafikler elde edilmiştir. Elde edilen veriler ışığında 180 µm difüzyon tabakası dikkate alındığında tek fazlı yapı için sertlik değeri ortalama 1908 HV iken çift fazlı yapı için ortalama 1926 HV olarak ölçülmüştür. Merkeze doğru ilerledikçe çekirdek bölgesi sertlik değeri ortalama tek fazlı yapı için 142 HV, çift fazlı yapı için 146 HV olarak ölçülmüştür. İşlem görmemiş 1018 çeliğinde ise yaklaşık 261 HV sertlik tespit edilmiştir. Çift fazlı yapının 1000 °C ve 4 saat difüzyon tavlama işlemi sonrası oluşan yaklaşık 330 µm'lik tabakadan alınan sertlik ölçümünde ortalama 2123 HV çıkarken çekirdek bölgesi sertliği ortalama 176 HV olarak ölçülmüştür.

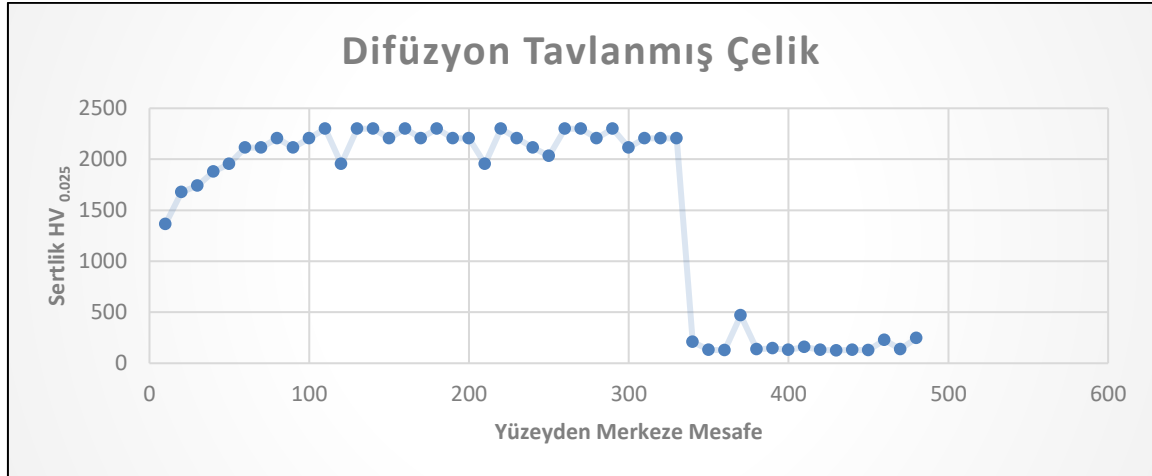
Çekirdekteki sertlik profilindeki değişim uygulanan ısıtıl işleminden kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Literatürde Hernández-Ramírez ve ark. [79] 1018 düşük karbon çeliği üzerine 950 °C’de borlama ve borlama sonrası difüzyon tavlama olarak yaptıkları çalışmalarında, her iki işlem için sırasıyla 23 GPa (2345 HV) ve 19 GPa (1937 HV) sertlik değerlerinin yanı sıra difüzyon tavlama ile tabaka kalınlığındaki artışı tespit etmişlerdir. Ek olarak çekirdek için sertlik değeri yaklaşık 2.5 GPa (255 HV) olarak belirtmişlerdir. Tez kapsamında yapılan çalışmalar ile yakın sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Ayrıca tez kapsamında yapılan çalışmalarda borlama işlemi sonrası çekirdeğin sertliği işlem öncesi haline göre daha düşük kaldığı anlaşılmıştır. Bu durumun borlama işlemi sırasında ulaşılan yüksek sıcaklık (1000 °C) nedeniyle malzemenin tavllanmış olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 5.1. Tek fazlı yapıların çeliklerin yüzeyden merkeze mikrosertlik analizi

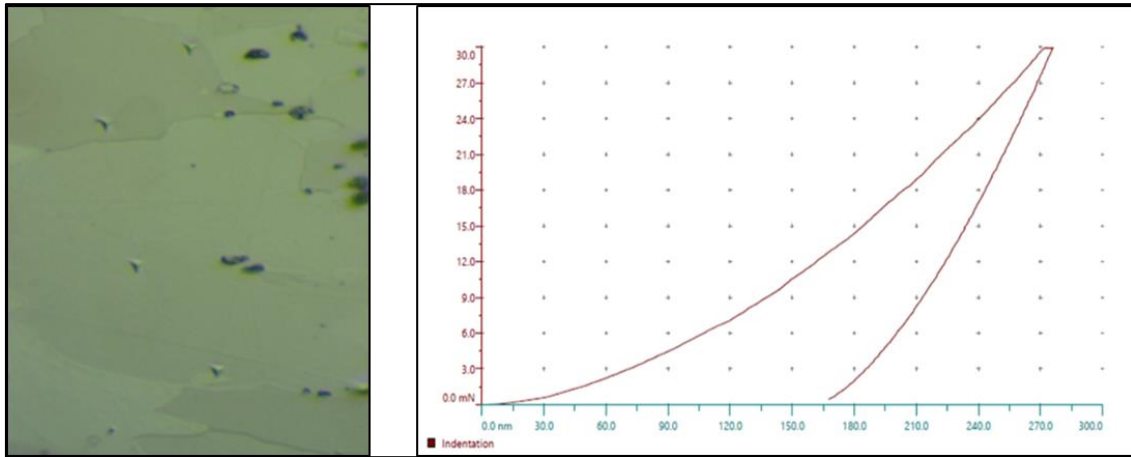


Şekil 5.2. Çift fazlı yapıların yüzeyden merkeze mikrosertlik analizi



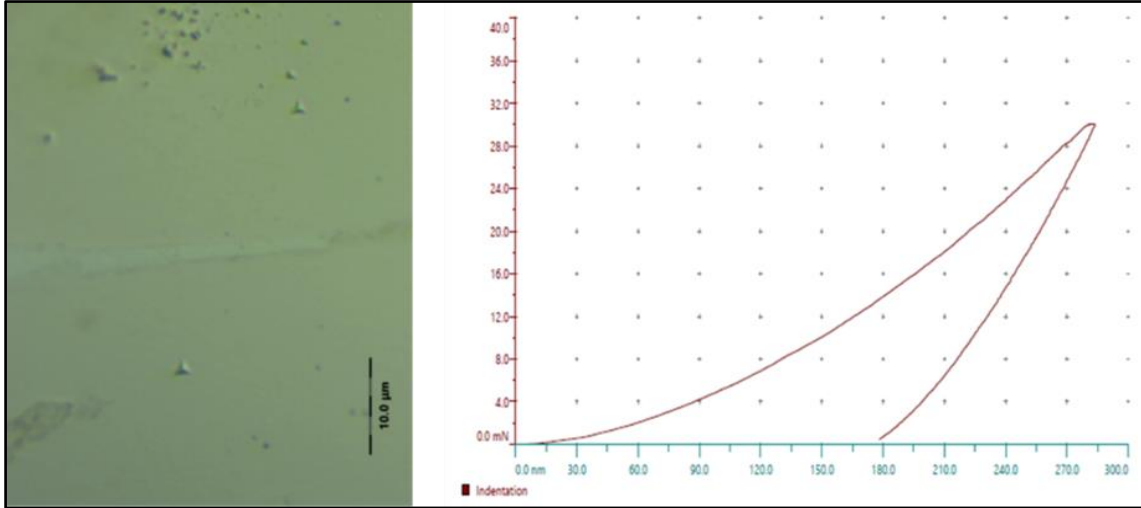
Şekil 5.3. Difüzyon tavllanmış çeliklerin yüzeyden merkeze mikrosertlik analizi

Oliver ve Pharr yöntemi kullanılarak elde edilen nanosertlik analizlerinde 30 mN yük ile alınan ölçüm ile çift fazlı yapıda; FeB fazından alınan ölçümlerde ortalama 1984 Vickers sertlik ile 376 GPa elastise modülü elde edilirken Fe₂B fazından alınan ölçümlerde ise 1909 Vickers sertlik ile 371 GPa elastise modülü elde edilmiştir. Resim 5.5'te çift fazlı yapıdan alınan ölçümün bir fotoğrafı ve uygulanan yüke karşı batma derinliği grafiği gösterilmiştir.



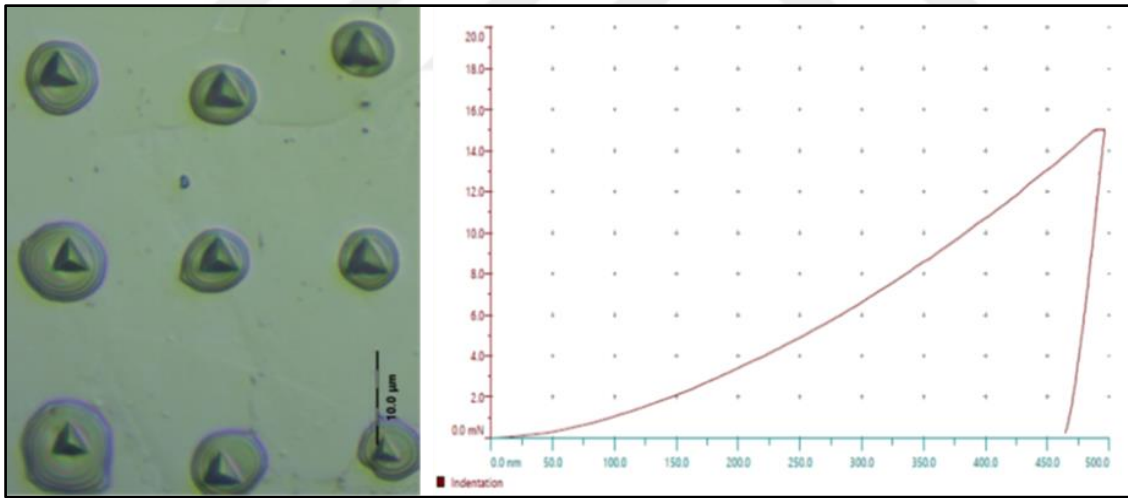
Resim 5.5. Çift fazlı yapıdan (Fe₂B+FeB) alınan nanosertlik ölçümü

Tek fazlı yapı için 30 mN yük ile Fe₂B tabakadan alınan nano sertlik ölçümünde ortalama 1919 Vickers sertlik değeri ile 356 GPa elastiklik modülü elde edilmiştir. Resim 5.6'da tek fazlı yapıdan alınan ölçümün bir fotoğrafı ve uygulanan yüke karşı batma derinliği grafiği gösterilmiştir. Difüzyon tavlama sonrası elde edilen tek fazlı yapının ise 30 mN yük ile Fe₂B tabakasından alınan nano sertlik ölçümünde ortalama 2257 HV sertlik ve 417 GPa elastiklik modülü ölçülmüştür.



Resim 5.6. Tek Fazlı yapıdan (Fe_2B) alınan nanosertlik ölçümü

İşlem görmemiş 1018 düşük karbon çeliğinden 30 mN yük ile sapmalar elimine edilerek alınan ölçümlerde 246 Vickers sertlik değeri ile 255 GPa elastiklik modülü elde edilmiştir. Resim 5.7’de işlem görmemiş çelikten alınan ölçüm gösterilmiştir.

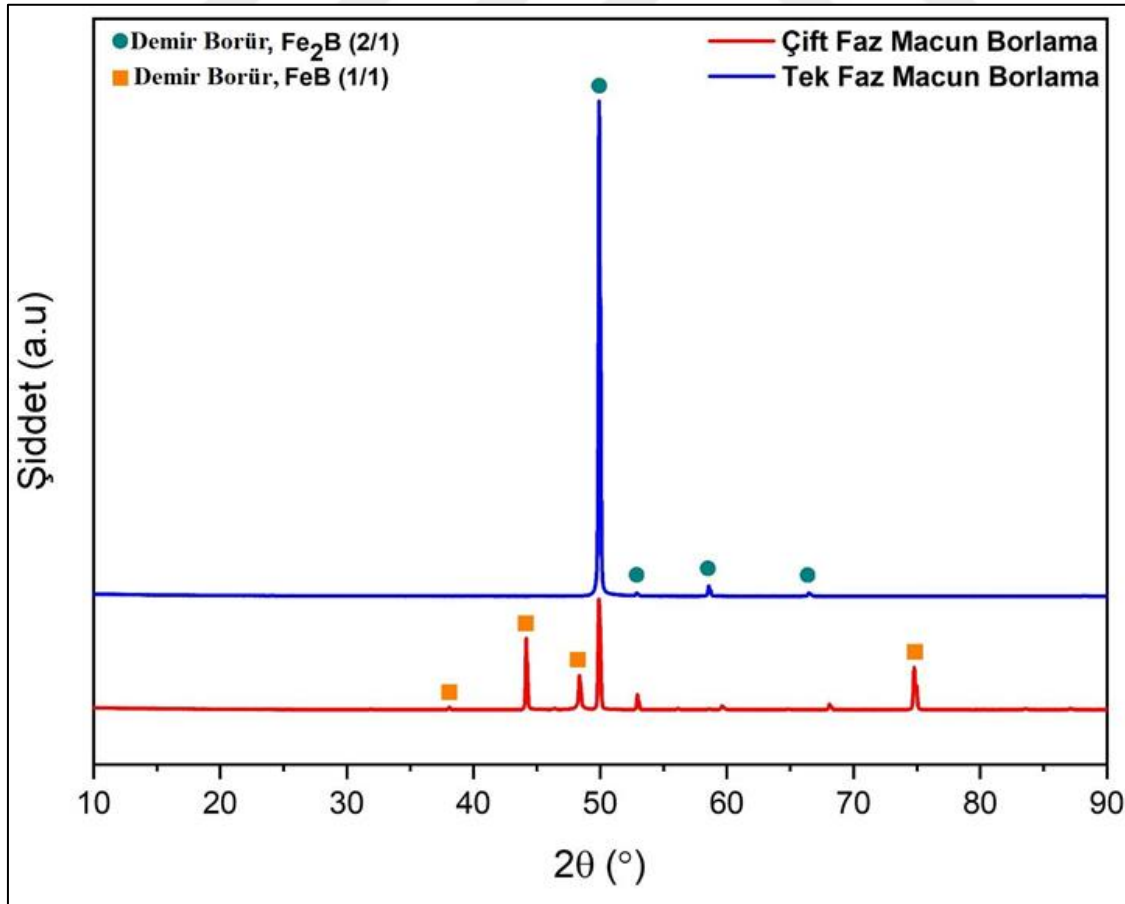


Resim 5.7. İşlemsiz 1018 çelikten alınan nanosertlik ölçümü

Sertlik sonuçları doğrultusunda tek fazlı ve çift fazlı yapılar için 1018 çeliğinin sertliği yaklaşık 7 kat artırılmıştır. Literatürde Hernández-Ramírez ve ark. 1018 düşük karbon çeliği üzerine borlama ve borlama sonrası difüzyon tavlama çalışmalarında tez kapsamında yapılan çalışma ile benzer sonuçlar elde etmiştir [79]. Elastiklik modülü literatürde FeB fazı için 590 GPa Fe_2B fazı için 295 GPa değerleri ile ifade edilmektedir. Çalışmanın FeB fazı literatürden düşük kalırken Fe_2B fazı için yüksek ölçülerek elastik özelliğin geliştirildiği tespit edilmiştir [20,80].

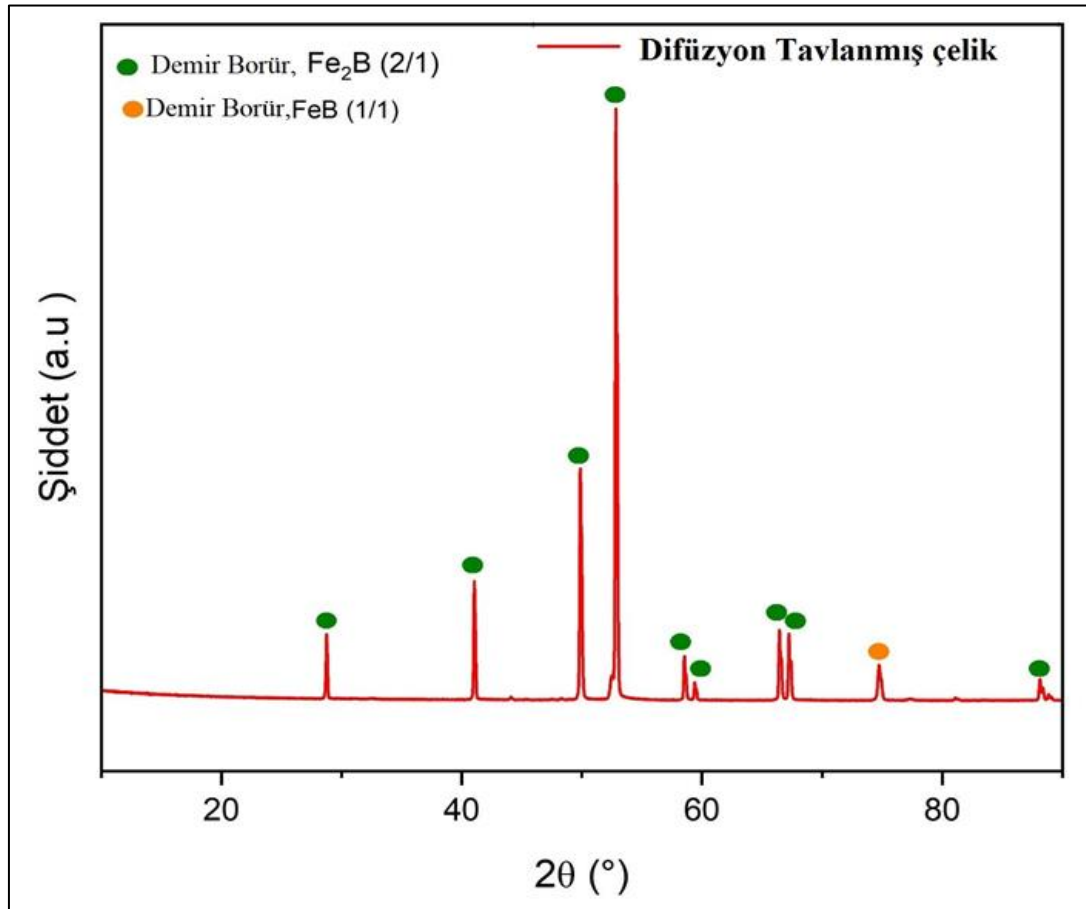
5.3. Faz Analizi

Macun borlanmış numunelerden alınan çift fazlı ve tek fazlı XRD analiz sonuçları Şekil 5.4'te gösterilmiştir. Tek fazlı yapıda Fe_2B fazı 50° 'de şiddetli pik verirken çift fazlı yapıda 50° 'nin şiddeti azalmış ve FeB fazına ait yeni piklerin oluştuğu tespit edilmiştir. Sabit sıcaklık ve sürelerde numunede çift fazlı ya da tek fazlı yapıların elde edilmesi numune yüzeyine sürülen macunla ilişkilendirilebilmektedir. Campos ve ark. yaptıkları çalışmada tek fazlı ya da çift fazlı demir borür yapılarının büyüme kinetiğinin malzeme yüzeyine sürülen macunla alakalı olduğunu ifade etmişlerdir [81]. Macun kalınlığındaki artış ile sabit işlem sıcaklığı altında her iki fazda daha yüksek bor hareketliliğine ve aktivasyon enerjisinin azalmasına neden olması ve işlem sırasında tercihli büyümenin Fe_2B tarafında olacağından dolayı FeB fazı oluşumu için daha yüksek aktivasyon enerjisinin gerekeceğini ifade etmişlerdir. Ayrıca işlem sonrası temizlenen macun incelemesinde macunda sodyum borür olduğu tespit edilmiş ve borun hareketliliğinden kaynaklı olarak fazlasının sodyuma bağlandığı düşünülmektedir.



Şekil 5.4. Çift faz ve tek fazlı yapıların X-ışınları difraktometresi analizleri

Endüstriyel kapsamda daha çok Fe_2B olarak tek fazlı yapı tercih edilmektedir. Oluşan çift fazlı yapıları tek faza dönüştürmek için uygulanan difüzyon tavlama sonucu oluşan yapının XRD analizi aşağıda Şekil 5.5’de gösterilmiştir. Difüzyon tavlama sonrası yapıda eser miktarda FeB fazının olduğu ve yapının yüksek oranda Fe_2B şeklinde tek faza dönüştüğü tespit edilmiştir. Literatürde Hernández-Ramírez ve ark. 1018 düşük karbon çeliği üzerine borlama ve borlama sonrası difüzyon tavlama uygulamış ve yapıyı bu tez kapsamındaki çalışma ile aynı doğrultuda Fe_2B olarak tek faza çevirdiklerini ifade etmişlerdir [79].

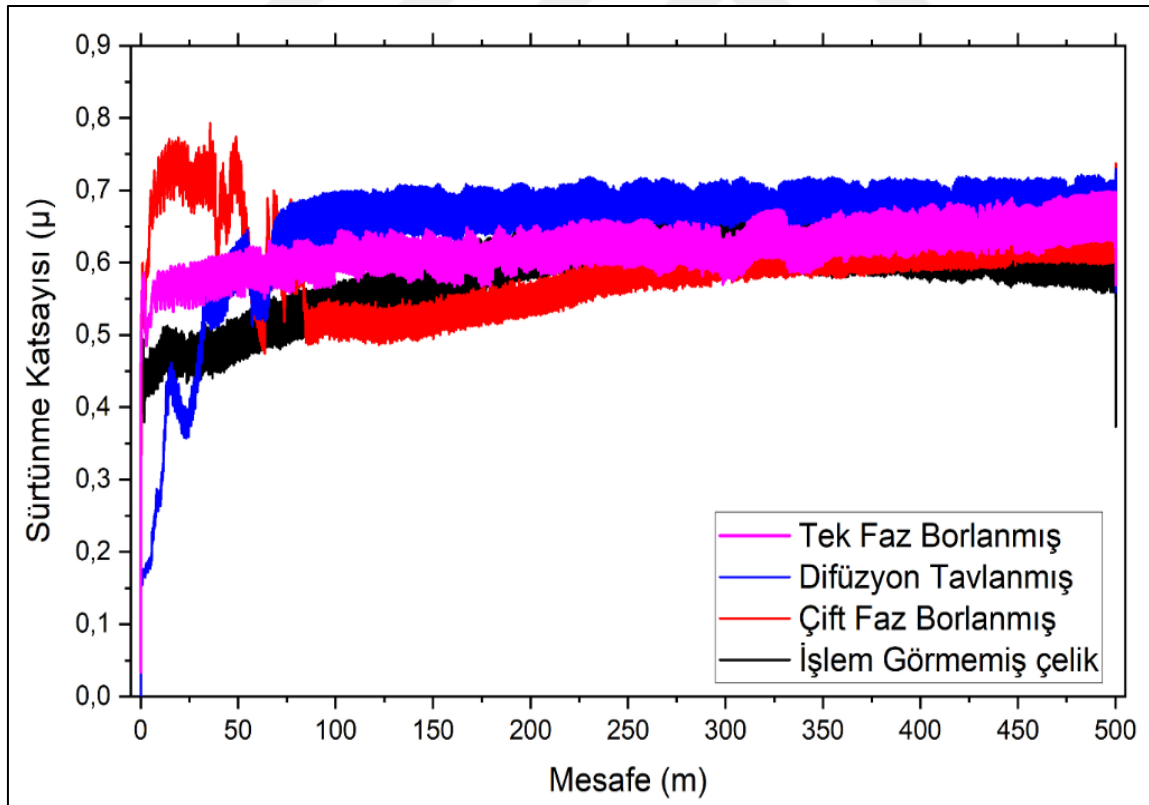


Şekil 5.5. Difüzyon tavlama sonucu oluşmuş tek fazlı (Fe_2B) yapı

5.4. Aşınma Testi

İşlem görmemiş çelik, çift fazlı ve tek fazlı yapıların yanı sıra çift fazlı yapıların tek faza çevrilmesi için ikinci bir işlem olarak difüzyon tavlama uygulanmış çeliklerin sürtünme performansı ve aşınma oranları numunelerin %55 nemlilik, %10 sıcaklık, 6mm bilye ile 20N yük altında 500 m mesafeden ölçümler alınarak elde edilmiştir. İşlem görmemiş çelik, borlama işlemi sonucu çift fazlı, tek fazlı ve çift fazlı yapı tespiti sonrası difüzyon tavlama

uygulanmış çeliklerin sürtünme katsayıları Şekil 5.6 ve Çizelge 5.1’de verilmiştir. Tek fazlı borlamada elde edilen Fe_2B fazı çift fazdaki FeB fazına göre daha elastik bir fazdır ve taban yumuşaklığından dolayı bilye sert bir bölge bulana kadar atlama yaptığı için başlangıçta sürtünme katsayısı düşük çıkmış sonrasında sert bir bölge ile yolunu bununca değerlerin birbirine yakınlığı düşünülmektedir. Çift fazlı ($\text{Fe}_2\text{B} + \text{FeB}$) yapıda bilye ile yüzeyin hızlı bir şekilde etkileşime geçmesi başlangıçtaki dalgalanmaya neden olduğu düşünülmektedir. Yüzeye yakın olan FeB fazının yüksek bor oranı ile kırılgan olmasında bir diğer olası sebep olarak düşünülmüştür. Difüzyon tavllanmış numunede ise sürtünme katsayısının diğer çalışmalara kıyasla yüksek çıkması iki sefer ısıtılma maruz kalması sonucu mikroyapısal değişikliğin olması ve sertlik profili dikkate alındığında sert noktaların daha aşağılarda başlamasından kaynaklı olarak bilyenin o kadar derinlere inememesiyle yumuşak yüzeyde sürtünmesi sonucu sürtünme katsayısının yüksek çıktığı düşünülmektedir [79]. Literatürde Çimenoglu ve ark. yaptıkları çalışmalarda yaklaşık olarak benzer sonuçlar elde etmişlerdir [50].



Şekil 5.6. Çift faz, tek faz ve difüzyon tavllanmış yapıların sürtünme katsayıları

Çizelge 5.1. İşlem görmemiş, çift fazlı, tek fazlı ve difüzyon tavllanmış yapıların sürtünme katsayıları

Malzeme	Sürtünme Katsayısı (μ_{ort})
İşlem görmemiş çelik	~ 0.55
Çift Fazlı ($Fe_2B + FeB$) yapı	~ 0.58
Tek Fazlı (Fe_2B) yapı	~ 0.6
Difüzyon tavllanmış	~ 0.65

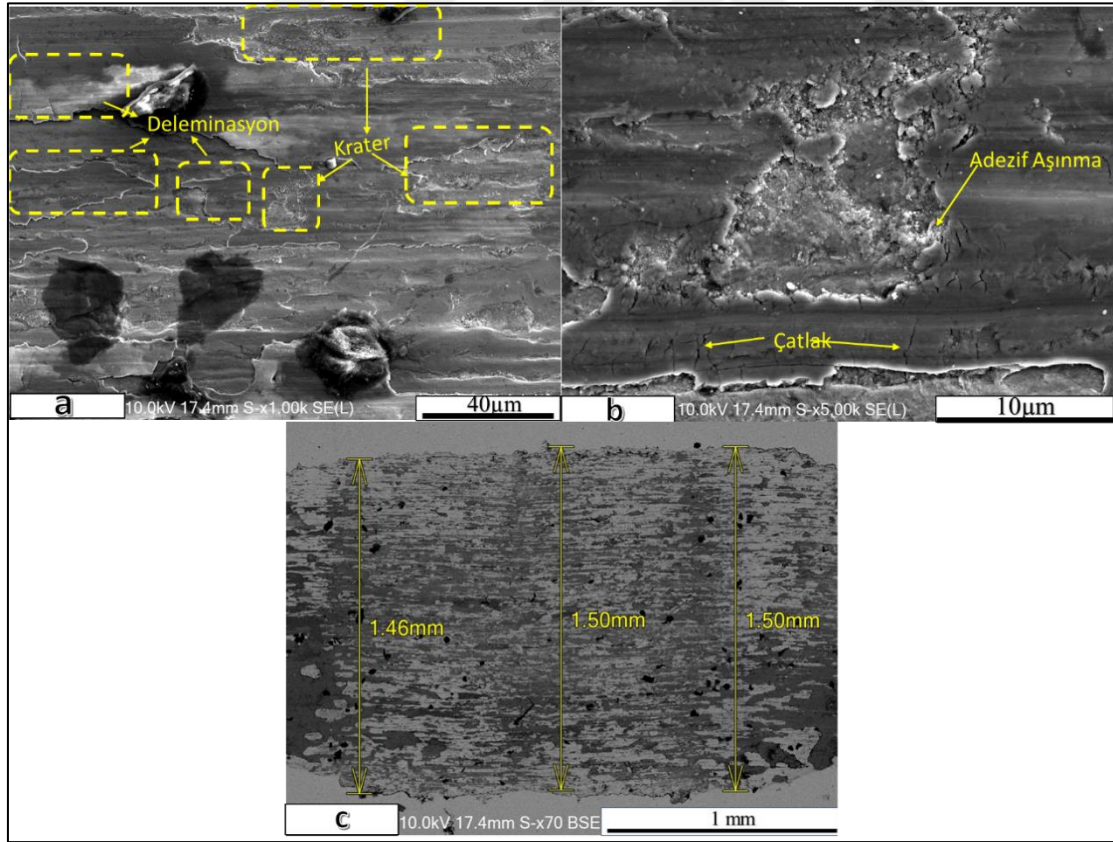
Aşınma analizi ile elde edilen yüzeyin 3D profilometrik ölçüm sonuçları Çizelge 5.2’de verilmiştir. Elde edilen aşınma hacmi ve aşınma oranı sonuçları, numunelerin tribolojik performanslarını kıyaslamada belirleyici olmuştur. Aşınma oranları açısından düşükten yükseğe sıralama yapıldığında difüzyon tavllanmış, tek fazlı yapı, çift fazlı yapı ve işlem görmemiş çelik şeklinde gerçekleşmiştir. Bu sonuçlar işlem görmemiş çeliğe kıyasla borlanmış yüzeylerin yaklaşık 10-15 kata kadar daha düşük aşınma oranına sahip olduğunu ve işlem görmemiş çelik numunedeki yüksek aşınma oranı yüzey sertleştirme işlemlerinin tribolojik performansı iyileştirmede kritik olduğunu ortaya koymaktadır [77].

Çizelge 5.2. Aşınma oranı ve yüzey verileri

Yüzey	Derinlik (μm)	Genişlik (μm)	Hacim (mm^3)	Aşınma Oranı ($mm^3/N \cdot m$)
İşlem görmemiş çelik	82	1403	5.7458	5.746×10^{-4}
Difüzyon tavllanmış borlama	11	717.4	0.35610	3.561×10^{-5}
Çift faz borlama	15	669.7	0.54860	5.486×10^{-5}
Tek faz borlama	12	651.6	0.39463	3.946×10^{-5}

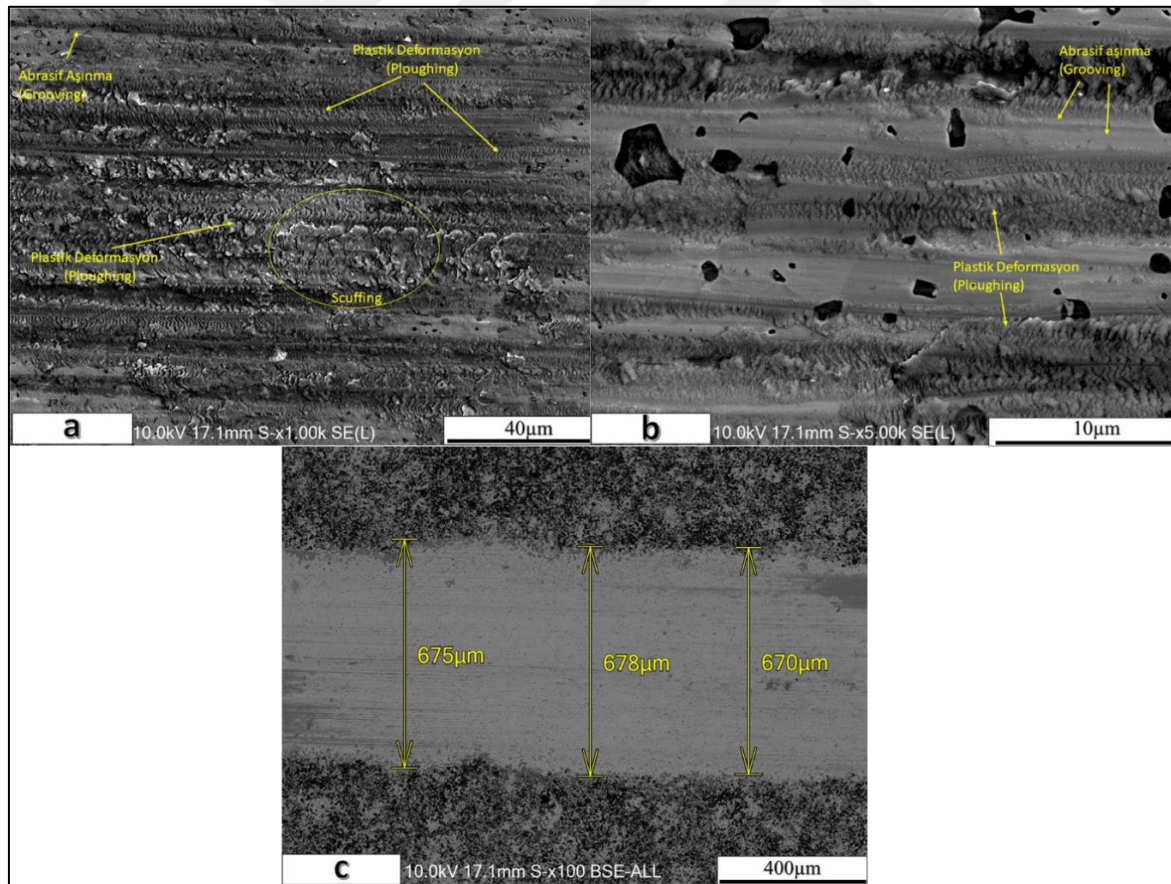
Borlama işlemi uygulanmış çelikler ve uygulanmamış çeliğin %55 nemlilik, %10 sıcaklık, 6 mm bilye ile 20 N yük altında 500 m mesafede aşınma testi sonrası yüzeylerinde oluşan aşınma mekanizmaları FE-SEM görüntüleri aşağıda tartışılmıştır.

Resim 5.8’de işlem görmemiş 1018 çeliğine ait aşınma sonrası FE-SEM görüntüsü verilmiştir. Yüzey morfolojisinde gözlenen belirgin yüzey deformasyonları, krater yapıları ve delaminasyon bölgeleri, aşınmanın baskın olarak adeziv mekanizmayla gerçekleştiğini göstermektedir. Yüzeyde oluşan yerel mikro kaynaklanma ve kopmalar, karşı yüzeye olan temas sonucu malzeme transferine ve yüzeyde plastik deformasyon izlerine neden olmuştur. Delaminasyon bölgeleri, yüzeyin altında oluşan gerilmeler nedeniyle ayrılımlar meydana geldiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca krater yapıları malzeme yüzeyinden parçacıkların kopması sonucu oluşmuş ve bu da ilerleyen aşınma sürecini hızlandırmıştır. Elde edilen bulgular neticesinde, düşük karbonlu çeliklerin seçilen parametreler doğrultusundaki tribolojik davranışının adeziv mekanizma olduğu tespit edilmiştir. Şekil c’de karşılıklı temas sonrası yüzeyin genel deformasyon derinliği 1,46 ile 1,50 mm aralığında ölçülmüş bu da yüzey deformasyonunun geniş bir ölçülerde olduğunu göstermektedir. Arizmendi-Morquecho ve ark. yaptıkları çalışmada 1018 çeliği için benzer aşınma mekanizmalarını tespit etmiştir [82].



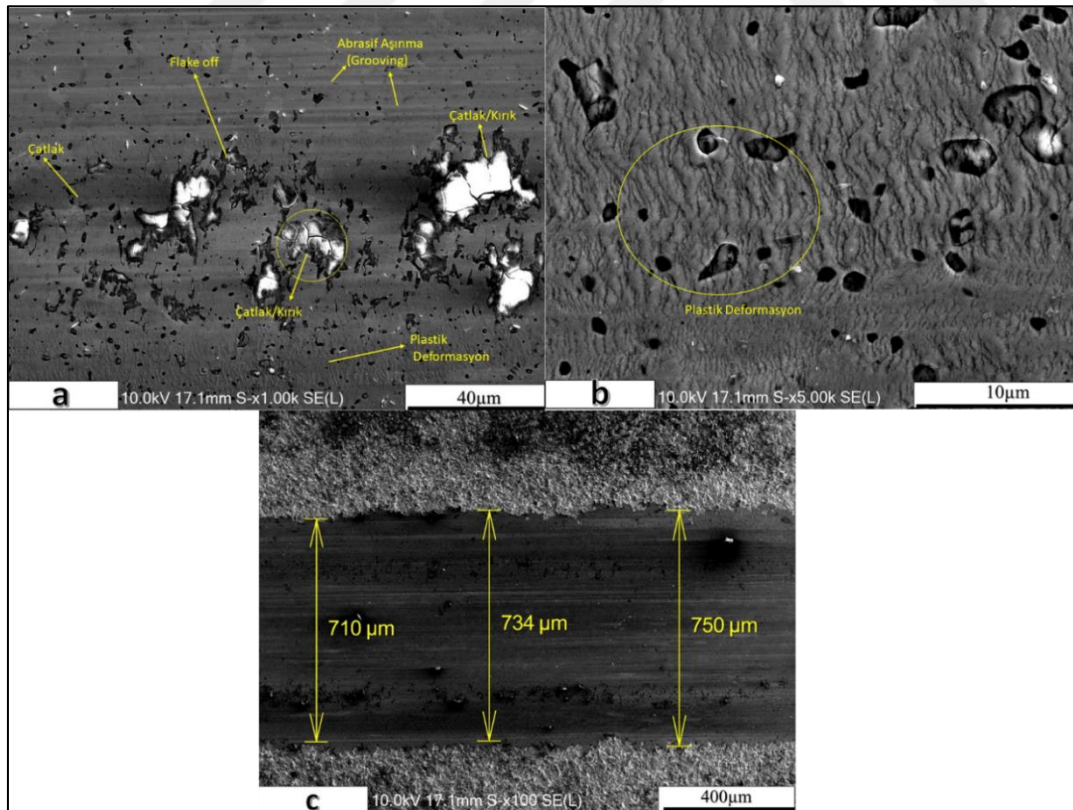
Resim 5.8. AISI 1018 işlem görmemiş çeliğin aşınmış yüzey FE-SEM mikro yapıları (a) 1000x aşınma mekanizmaları (b) 5000x aşınma mekanizmaları (c) Aşınma iz kalınlığı

Şekil 5.9’da verilen FE-SEM görüntüleri incelendiğinde tek fazlı borlanmış numunenin aşınma yüzeyinde abrasif aşınma, plastik deformasyon ve kazıma aşınması (scuffing) mekanizmalarının birlikte etkili olduğu tespit edilmiştir. Abrasif aşınma, karşı yüzeyden koparak temas bölgesine taşınan sert parçacıkların oluşturduğu çizik izleriyle kendini göstermiştir. Plastik deformasyon ise yüzeyde akma çizgileri şeklinde belirgin morfolojik izlerle ortaya çıkmıştır [83]. İki yüzey arasındaki temas esnasında meydana gelen mikro kaynaklanma, plastik yorulma ve yüzey yırtılması sonucunda gözlemlenen deformasyon morfolojisi kazıma aşınmasının (scuffing) oluştuğunu göstermektedir [84]. Fe₂B fazının sertliği, adeziv aşınma mekanizmasını büyük ölçüde sınırlandırmış olsa da bazı lokal bölgelerde yüzey yapışmasına bağlı pul pul kopmalar tespit edilmiştir. Baskın mekanizmanın ise plastik deformasyon olduğu tespit edilmiştir [85]. Literatürde Hernández-Ramírez ve ark. [79] yapmış oldukları çalışmada benzer aşınma mekanizmalarını tespit etmişlerdir.



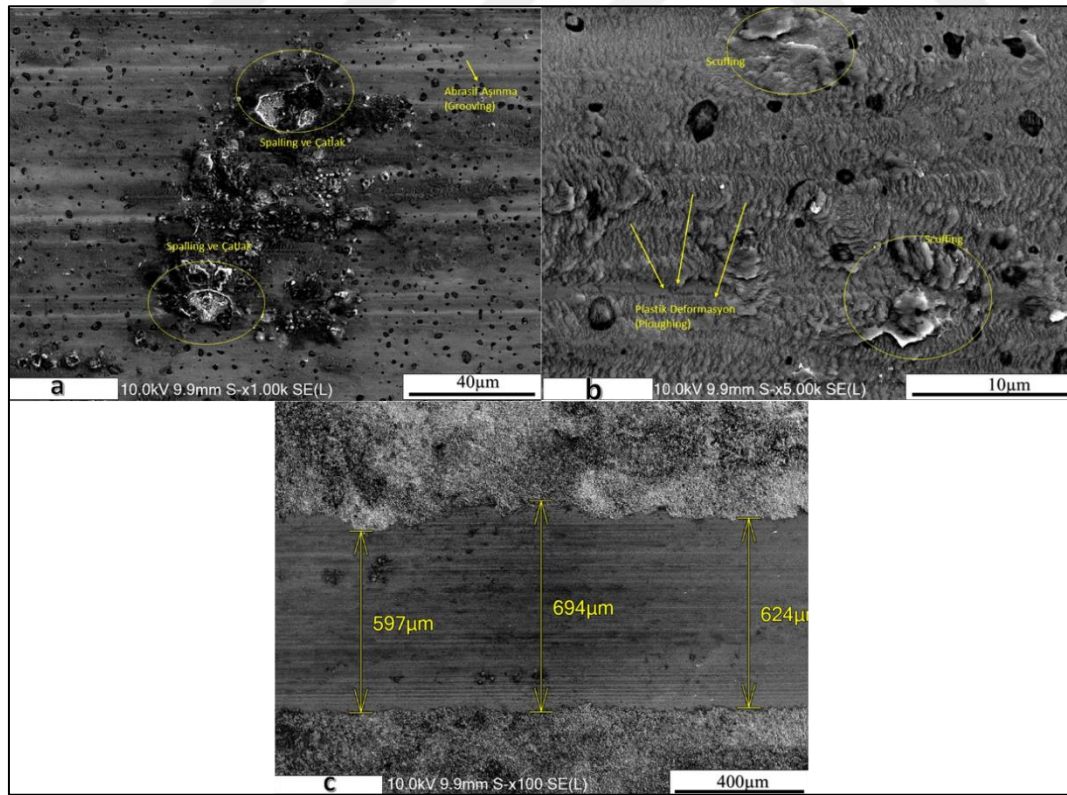
Resim 5.9. Borlama sonucu tek fazlı yapı olmuş çeliğin aşınmış yüzey SEM mikro yapıları (a) 1000x aşınma mekanizmaları (b) 5000x aşınma mekanizmaları (c) Aşınma iz kalınlığı

Şekil 5.10'da verilen FE-SEM görüntülerinde çift fazlı yapıya sahip numunenin aşınma yüzeyinde birden fazla aşınma mekanizmasının etkili olduğu belirlenmiştir. Görüntülerde özellikle pul pul malzeme kopması ile ince tabakalar halinde yüzeyden ayrılma şeklinde tanımlanan flake-off mekanizmasının meydana geldiği açıkça gözlemlenmiştir. Ayrıca yüzeyde çatlak ve kırık oluşumları da dikkat çekici bir şekilde görülmektedir. Bunun yanı sıra abrasif aşınmaya işaret eden belirgin oluklanma (grooving) izleri tespit edilmiştir. Plastik deformasyon izleri incelendiğinde yüzeyin tekrar eden yükleme altında akmaya maruz kaldığını göstermektedir [50,77]. Resim 5.10. (c)'de aşınma izlerinin genişliği değişkenlik göstermekte olup 710 ile 750 μm arasında ölçülmüştür. Tüm bulgular doğrultusunda baskın mekanizmanın abrasif aşınma ile çatlak/kırık oluşumları olduğu görülmüştür. Bu bulgular, literatürde düşük karbonlu çeliklerin borlanmış yüzeylerinde bildirilen çoklu aşınma davranışı ile tutarlıdır [79]. B. Selçuk ve ark. [86] tarafından borlanmış ve karbürleşmiş düşük karbonlu çeliklerde yapılan çalışmada adeziv ve abrasif aşınmanın birlikte görülmesi ve bu durumu borür tabakası ile azaltılacağı çalışmanın bulgularıyla örtüşmektedir.



Resim 5.10. Borlama sonucu çift fazlı yapı olmuş çeliğin aşınmış yüzey SEM mikro yapıları (a) 1000x aşınma mekanizmaları (b) 5000x aşınma mekanizmaları (c) Aşınma iz kalınlığı

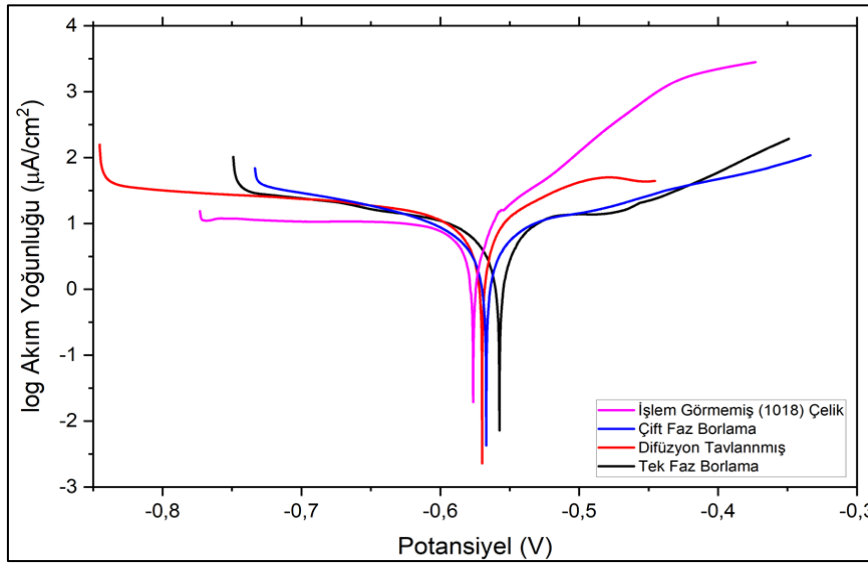
Resim 5.11'deki FE-SEM görüntülerinde difüzyon tavllanmış 1018 çeliğin aşınma testleri sonrası yüzeyinde çeşitli aşınma mekanizmalarının birlikte etkili olduğu gözlemlenmiştir. Resim 5.10(b)'de açıkça gözlenen plastik deformasyon alanları, malzemenin yüzeyinin tekrarlı mekanik yükler altında lokal akmaya uğradığını ortaya koymaktadır [85]. Ayrıca plastik yorulma kaynaklı kazıma aşınması (scuffing) da görülmüştür. Resim 5.10(a)'daki oluklanmalar (grooves) tipik abrasif aşınma karakteri sergilemektedir. Malzeme yüzeyinde veya yüzey altı bölgelerde yorulma etkisiyle çatlak oluşumu gözlenmiş ve bu çatlakların üzerinden sert bir cismin geçmesiyle malzeme yüzeyinden küçük parçalar koparak ayrılmıştır. Bu durum dökülme (spalling) mekanizmasının gelişmesini desteklemektedir. Dökülme oluşumunu difüzyon tavlama sürecinin desteklediği de düşünülmektedir. Bu gözlemler, çift faz borlama sonrası tek faza dönüştürmek adına yapılan difüzyon tavlama işlemi ile yapısal yumuşama sonrası çok modlu aşınma davranışı sergilendiği ve plastik deformasyon ile kazıma aşınmasının yoğun olduğunu ortaya koymaktadır. Aşınma iz genişliği ise 597 ile 624 μm aralığında ölçülmüştür. Literatürde Campos Silva ve ark. [87] yaptıkları çalışmalarda benzer mekanizmaları tespit etmiştir.



Resim 5.11. Difüzyon tavlamanmış çeliğin aşınma yüzey SEM mikro yapıları (a) 1000x aşınma mekanizmaları (b) 5000x aşınma mekanizmaları (c) Aşınma iz kalınlığı

5.5. Elektrokimyasal Korozyon Testi

Borlama prosesinin sağladığı korozyon direncini test etmek üzere elektrokimyasal (potansiyodinamik polarizasyon) korozyon testleri uygulanmıştır. Resim 5.12’de işlem görmemiş çelik (1018), borlama işlemi sonrası tek fazlı (Fe_2B), çift fazlı ($\text{FeB}+\text{Fe}_2\text{B}$) yapılar ve difüzyon tavllanmış numunelere ait potansiyodinamik polarizasyon eğrileri gösterilmiştir. Çizelge 5.3’te sırasıyla borlama uygulanmamış çelik, borlama işlemi sonrası tek fazlı (Fe_2B), çift fazlı ($\text{FeB}+\text{Fe}_2\text{B}$) yapılar ve difüzyon tavllanmış numunelere ait elde edilmiş elektrokimyasal korozyon sonuçları gösterilmiştir.



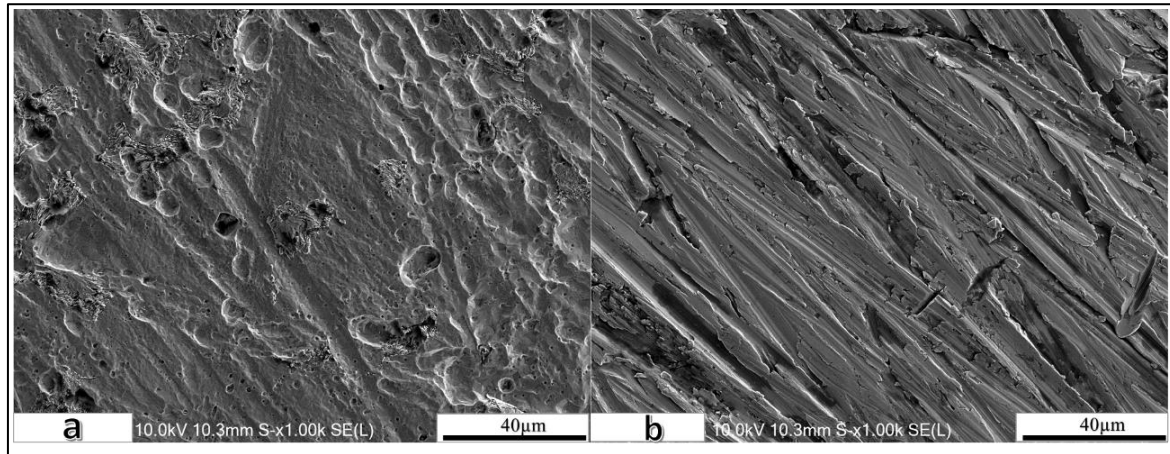
Resim 5.12. İşlem görmemiş (1018) çelik, Borlama işlemi sonrası tek fazlı (Fe_2B), çift fazlı ($\text{FeB}+\text{Fe}_2\text{B}$) yapılar ve difüzyon tavllanmış numunelere ait tafel eğrileri

Çizelge 5.3. Borlama uygulanmamış çelik korozyon sonucu elde edilen parametreler

	İşlem Görmemiş Çelik Tafel Eğimi	Tek Fazlı Yapının Tafel Eğimi	Çift Fazlı Yapının Tafel Eğimi	Difüzyon Tavllanmış Yapının Tafel Eğimi
E_{corr} , V	-0.577	-0.557	-0.568	-0.569
I_{corr} , μA	9.715	7.750	6.561	14.42
I_{corr} /A/ cm^2	3.886E^{-5}	3.100E^{-5}	2.625E^{-5}	5.768E^{-5}
R_p , Ω	2866	6057	6473	3660
Tafel β_a , V/on yıl	0.066	0.180	0.195	0.149
Tafel β_c , V/ on yıl	2.280	0.271	0.197	0.652
Korozyon oranı, mm/yıl	0.466	0.219	0.149	0.322

E_{corr} , çalışma elektrotu (metal yüzeyi) ile referans elektrot arasındaki ölçülen sabit durum potansiyeli olarak ve malzemenin korozyona yatkınlığı ile ilgili verdiği bilgi ile tanımlanır. Daha negatif bir E_{corr} malzemenin korozyona uğrama olasılığının daha yüksek olduğunu gösterirken daha pozitif bir değer korozyon direncinin yüksek olduğunu ifade etmektedir. Polarizasyon eğrileri, işlem görmemiş çelikte $-0.577 E_{corr}$, tek fazlı yapıda $-0.557 E_{corr}$, çift fazlı yapıda $-0.568 E_{corr}$ ve difüzyon tavlanmış yapıda $-0.569 E_{corr}$ ölçülmüştür. Bu değerler dikkate alındığında borlanmış çeliklerin korozyona karşı daha dirençli olduğu tespit edilmiştir. Korozyon oranı, borlanmış numuneler ile önemli ölçüde azaldığı ve çift fazlı elde edilmiş yapı ile en düşük değerde olduğu görülmüştür. Tavakoli ve Mousavi Khoie [88] yapmış oldukları çalışmada borlama prosesi sonucu elde edilen demir borür tabakasının ağırlıkça %3 sodyum klorür (NaCl) çözeltisindeki klor iyonlarının etkisinden numunelerin yüzeyini etkili bir şekilde koruduğunu ifade etmiştir.

Elektrokimyasal (potansiyodinamik polarizasyon) korozyon sonucu malzeme yüzeyinin morfolojisi FE-SEM ile incelenmiştir. Yüzeyler korozyona uğratılmamış yüzeyler ve korozyona uğratılmış yüzeyler olarak işlem görmemiş çelik, tek fazlı yapı, çift fazlı yapı ve difüzyon tavlanmış yapılar olmak üzere sırasıyla değerlendirilmiştir.

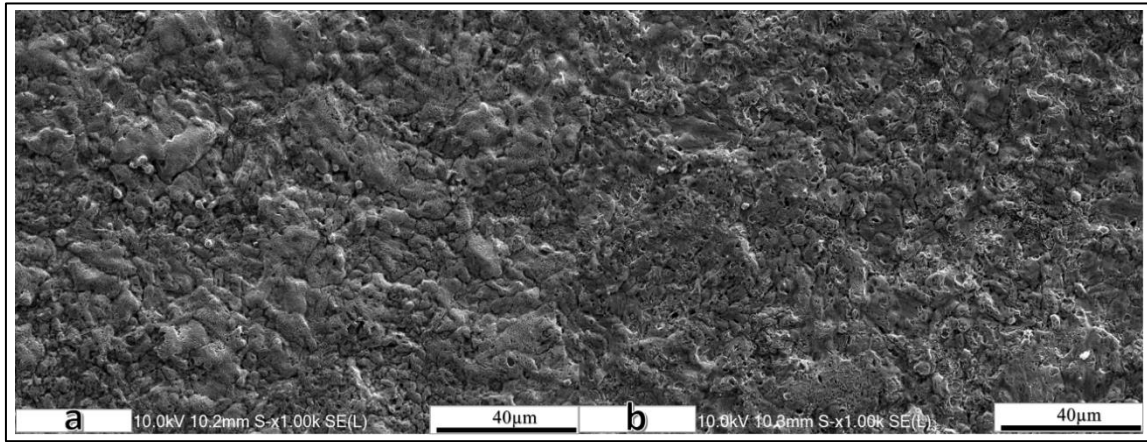


Resim 5.13. İşlem görmemiş (1018) çeliğin (a) korozyon sonucu oluşan yüzeyin görüntüleri (b) korozyona uğratılmamış yüzeyi

İşlem görmemiş çeliğe %3 NaCl çözeltisinde potansiyodinamik korozyon testi uygulanmasının ardından elde edilen FE-SEM görüntüleri çeliğin tuzlu ortamlardaki elektro-kimyasal kararsızlığını açık bir şekilde ortaya koymaktadır. Resim 5.13'teki FE-SEM görüntüsünde yüzeyin düzensiz bir şekilde bozulduğu, çok sayıda çukurcuk yapısının oluştuğu ve bu oyukların rastgele dağılım gösterdiği görülmektedir. Bu yapı,

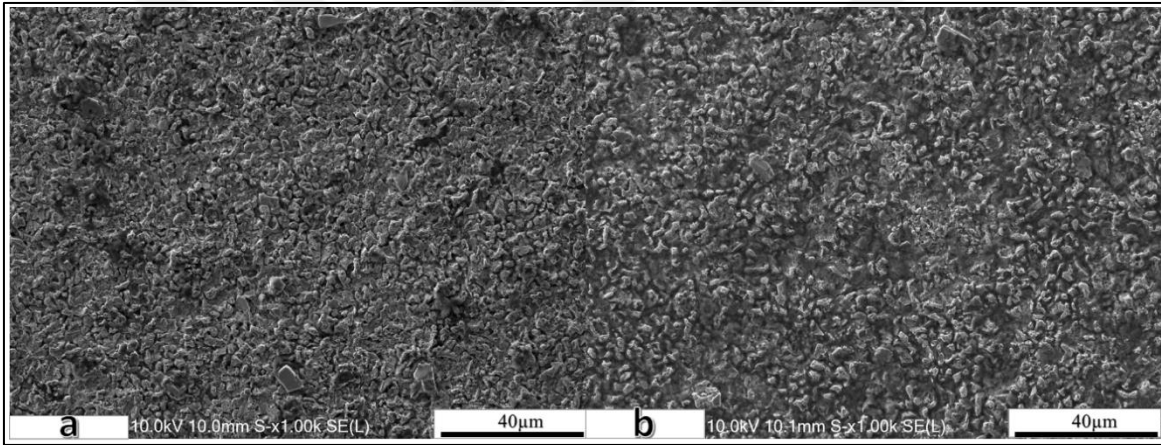
karakteristik olarak çukurcuk korozyonuna (pitting corrosion) işaret etmektedir. Bazı bölgelerde metalik çözünmeden kaynaklı oksit ürünlerinin veya çökelti artıklarının birikmiş olduğu görülmüştür. Bu morfolojik yapı, pasif filmin lokal olarak kırıldığı alanlarda anot-katot hücrelerinin oluşmasıyla birlikte metalin hızla çözünmesi sonucunda meydana geldiği düşünülmektedir.

Resim 5.14'te tek fazlı yapıda korozyon testi uygulanmamış numunenin FE-SEM görüntüleri incelendiğinde, yüzeyin belirgin şekilde homojen bir morfolojiye sahip olduğu, gözenekliliğin minimal düzeyde olduğu ve yüzeyde çukurcuk veya çatlak oluşumlarının gözlenmediği tespit edilmiştir. Bu durum, borlama işlemi sonucunda oluşan borür tabakasının düzgün, kompakt ve bütünlüklü bir yapı oluşturduğunu göstermektedir. Mikroporozite oranının düşük olması ve yüzeyin nispeten yoğun görünmesi, tek fazlı (Fe_2B) tabakanın oluştuğunu desteklemektedir. Buna karşın, potansiyodinamik korozyon testine tabi tutulan numunenin SEM görüntülerinde lokal çukurcuk oluşumları, düzensiz pürüzlenmeler ve yüzeyde mikro boyutta bozulmalar gözlenmiştir. Bu değişimler, NaCl çözeltisi içerisinde gerçekleşen anodik ve katodik reaksiyonlara bağlı olarak yüzeyde metalik çözünmelerin başladığını göstermektedir. Her iki yüzeydeki karşılaştırmalı analiz sonucunda, borlanmış yapının korozyon testine karşı yüksek direnç gösterdiği, ancak yine de uzun süreli maruziyetlerde bazı lokal zayıflık noktalarının oluşabileceği anlaşılmaktadır. Bu durum, borür tabakasının homojenliğinin ve kalınlığının, korozyon direnci üzerindeki belirleyici rolünü vurgulamaktadır.



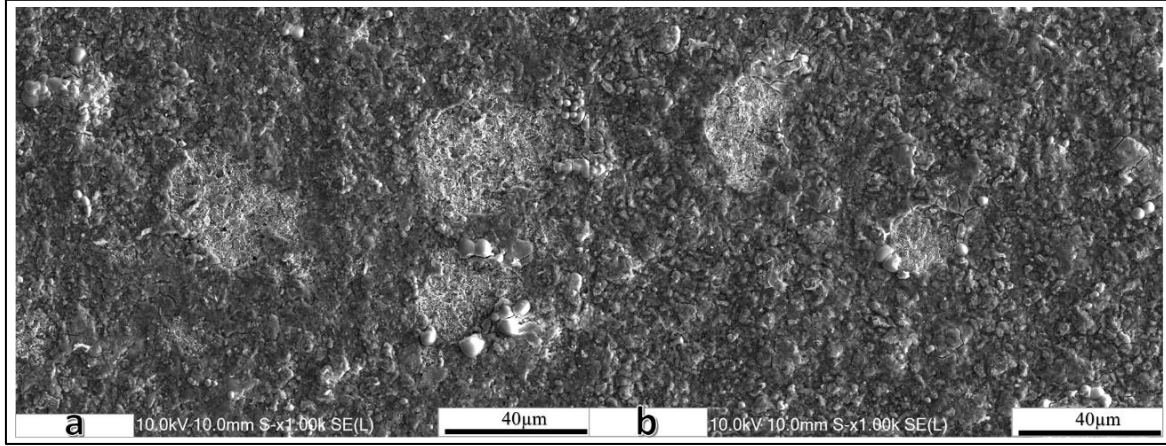
Resim 5.14. Tek Fazlı (Fe_2B) yapının (a) korozyon sonucu oluşan yüzeyin görüntüleri (b) korozyona uğratılmamış yüzeyi

Resim 5.15'te çift fazlı yapının FE-SEM görüntüleri incelendiğinde yüzeyde granüler ve kristalimsi yapıların birlikte bulunduğu morfolojik olarak heterojen bir yapı gözlemlenmiştir. Bu durum FeB ve Fe₂B fazlarının birlikte oluştuğunu göstermektedir. Korozyon testi sonrası yapılan incelemelerde ise yüzeyde mikro düzeyde çöküntüler, kırılmalar ve düzensizlikler oluştuğunu ve özellikle bazı alanlarda parçalanmış yapılar ile oyukların geliştiği belirlenmiştir. Bu bozulmalar genellikle daha gevrek ve borca doygun olan FeB fazına ait bölgelerde yoğunlaşmıştır. Buna karşılık Fe₂B fazının daha kompakt ve stabil yapısı sayesinde yüzeyin bazı bölümlerinde koruyucu etki sağladığı düşünülmektedir. Elde edilen bu sonuçlar çift fazlı borlama ile elde edilen sertliğin ve yapısal bütünlüğün korozyon dayanımı açısından her zaman yeterli olmadığını özellikle FeB fazının korozyon direncini zayıflatıcı etkide bulunduğunu ortaya koymaktadır.



Resim 5.15. Çift Fazlı (FeB+Fe₂B) yapının (a) korozyon sonucu oluşan yüzeyin görüntüleri (b) korozyona uğratılmamış yüzeyi

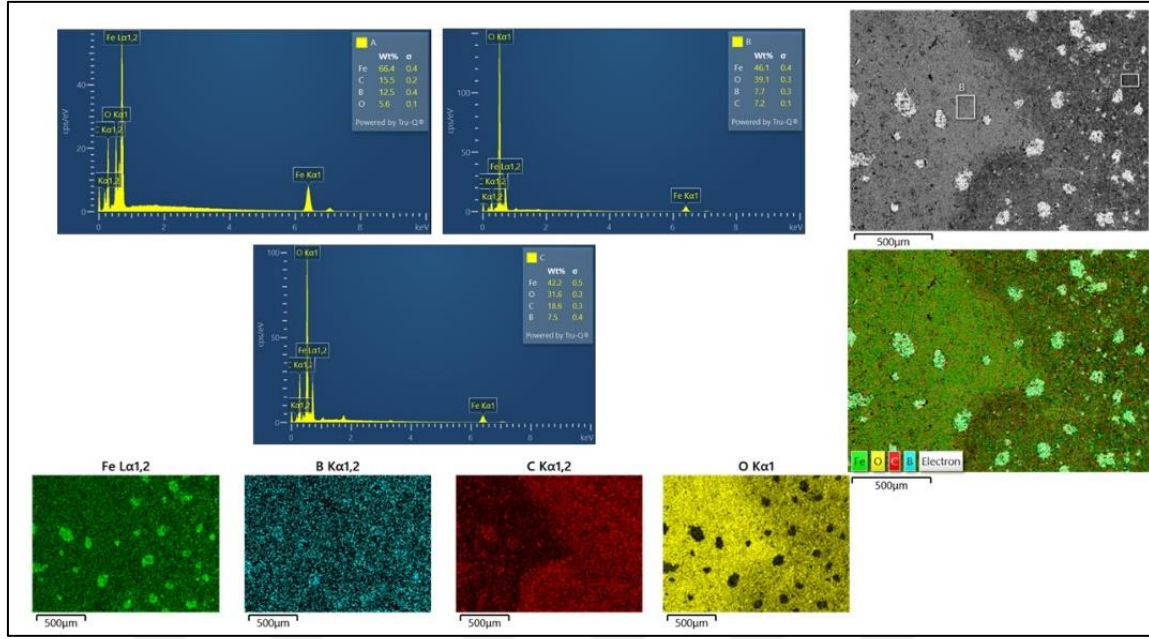
Resim 5.16' da difüzyon tavllanmış çeliğin korozyon öncesi FE-SEM görüntülerinde yüzeyin gözenekli, parçacıklı ve düzensiz bir morfolojiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Yer yer belirgin şekilde küresel yapılar, boşluklar ve yüzeyden farklı kontrasta sahip alanlar görülmektedir. Bu durum en üst yüzeyde bor dağılımının homojen olmadığını ve yapının mikroyapı açısından tam anlamıyla kararlı bir faza ulaşmadığını düşündürmektedir. Korozyon testi sonrasında elde edilen FE-SEM görüntülerinde yüzeyin belirgin biçimde bozulduğu ve özellikle tavlama ile oluşan gevrek yapıların çatlaklar, çöküntüler ve yüzey ayrışmaları gösterdiği görülmektedir. Ayrıca mikroyapının yer yer parçalanarak pasif film davranışının bozulduğu anlaşılmaktadır. Bu durum difüzyon tavlama ile oluşturulan yapının çift ve tek fazlı numunelere kıyasla daha düşük bir korozyon direnci sunduğunu göstermektedir.



Resim 5.16. Difüzyon tavlama sonrası yapının (a) korozyon sonucu oluşan yüzeyin görüntüleri (b) korozyona uğratılmamış yüzeyi

Resim 5.17’de difüzyon tavlama sonrasında korozyona uğratılmış ve uğratılmamış yüzeyin kimyasal kompozisyon verilerini içeren EDS analizleri gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde yüzeyde demir (Fe), bor (B), karbon (C) ve oksijen (O) elementlerinin dağılımı tespit edilmiştir. Elde edilen nokta analizlerine göre, demir elementi matris fazını temsil ederken, bor elementi borlama işlemi sonrasında oluşan borür fazlarının varlığını teyit etmektedir. Karbon elementi muhtemelen çelik matrise ait karbon veya çevresel kaynaklı kontaminasyondan kaynaklanmaktadır. Oksijen varlığı ise yüzeyde kısmi oksitlenme veya difüzyon tavlama sonrası kalan oksijenli bileşiklere işaret etmektedir.

Element dağılım haritalarında demirin matris boyunca homojen şekilde dağıldığı, borun ise lokal bölgelerde yoğunlaşarak borür fazlarının bulunduğu alanları açıkça ortaya koyduğu görülmektedir. Karbonun dağılımı düzensiz bir yapıda olup korozyon uygulanan bölgede azaldığı görülmektedir. Bu durum kirlilik kaynaklı yüzeyde karbon olduğunu doğrular niteliktedir. Oksijenin korozyon uygulanan bölgede yoğunlaşması korozyon sonrası demir oksit oluşturduğunu düşündürmektedir. Bu analizler doğrultusunda, difüzyon tavlama sonrası 1018 çelik yüzeyinde Fe, B, C ve O elementlerinin homojen olmayan bir dağılım gösterdiği, özellikle bor elementinin lokalize bölgelerde yoğunlaştığı ve borür fazlarının varlığını koruduğu tespit edilmiştir.



Resim 5.17. Difüzyon tavllanmış yapının korozyona uğratılmamış yüzeyi ve korozyon sonucu oluşan yüzeyinin kimyasal kompozisyonu

4 farklı yüzey dikkate alındığında tek fazlı yapı ile çift fazlı yapıda hem mikroyapısal bütünlük hem de korozyon direnci açısından iyi bir performansı sergilemiştir. Difüzyon tavllanmış yapı bor dağılımındaki düzensizlik ve pasif film oluşumundaki yetersizlik nedeniyle diğer yapılardan düşük korozyon direncini göstermiştir. İşlem görmemiş çelik yüzeyinde pasif film oluşturma yeteneğinin zayıf olması nedeniyle potansiyodinamik korozyon testine karşı düşük direnç göstermiş yüzeyde yaygın ve derin çukurcuk korozyonu oluşarak mikroyapısal bütünlük ciddi şekilde bozulmuştur. Literatürde N. Suwattananont ve ark. yapmış oldukları galvonastik korozyon testi sonrası benzer yüzeyler elde etmiş ve korozyon dayanımının borlama ile geliştiğini tespit etmiştir [89].



6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu yüksek lisans tezi kapsamında düşük maliyetli ve birçok uygulamada kullanılan 1018 düşük karbon çeliği Termokimyasal macun borlama yöntemiyle borlama işlemine tabi tutulmuştur. Yapılan deneylerde sıcaklık ve süre sabit tutulup yeni bir macun kompozisyonu ile taban malzemesi üzerinde tek fazlı (Fe_2B) ve çift fazlı (Fe_2B ve FeB) borür tabakası ile difüzyon tavlama sonucu tek fazlı yapı oluşturulmuştur. Farklı karakterizasyon yöntemleri kullanılarak borür tabakalarının kalınlığı, kimyasal bileşimi, faz analizleri, sertlik değerleri, korozyon ve aşınma özellikleri incelenmiştir. Yapılan karakterizasyon işlemlerinin sonuçları aşağıda verilmiştir.

- 1000 °C ve 4 saat süreli ısıtma işlem sonrasında tek fazlı (Fe_2B) ve çift fazlı (Fe_2B ve FeB) yapıların oluşturulduğu tespit edilmiştir.
- 1000 °C ve 4 saat süreli borlama işlemi sonrasında çift fazlı yapının incelemesinde toplam difüzyon tabaka kalınlığı ortalama 264 μm olarak ve FeB fazı ise 80,2 μm olarak ölçülürken tek fazlı yapı için ortalama toplam tabaka kalınlığı 200 μm olarak ölçülmüştür. Difüzyon tavlama sonucu oluşmuş tek fazlı yapıda ise ortalama 325 μm olarak ölçülmüştür.
- Borlama işlemi yapılmamış 1018 düşük karbon çeliği nano sertlik ile yaklaşık 246 Vickers sertlik değeri ve 255 GPa elastiklik modülü elde edilmiştir.
- 180 μm difüzyon tabakası dikkate alındığında tek fazlı yapı için sertlik değeri ortalama 1908 HV elde edilirken çift fazlı yapı için ortalama 1926 HV olarak ölçülmüştür. Merkeze doğru ilerledikçe sertlik değeri ortalama tek fazlı yapı için 142 μm , çift fazlı yapı için 146 μm olarak ölçülmüştür.
- Difüzyon tavlama yapı için yaklaşık 330 μm 'lik tabakadan alınan sertlik ölçümünde ortalama 2123 HV sertlik ölçülürken çekirdek bölgesi sertliği ortalama 176 HV olarak ölçülmüştür.
- Çift fazlı yapı için elastiklik modülü ortalama 373 GPa, tek fazlı yapı için 356 GPa olarak ölçülmüştür.

- FE-SEM ile yapılan EDS analizinde çift fazlı yapı için 5 noktadan alınan analiz sonucunda FeB fazındaki bor oranı yüzde atomik olarak 38-39 ölçülürken Fe₂B fazında yüzde atomik 25 olarak ölçülmüştür. Dişlerin bitiminden sonrasında bor oranı 2,3 olarak tespit edilmiştir.
- FE-SEM ile yapılan EDS analizinde tek fazlı yapı için yüzde atomik 72,2 oranında demir ve yüzde atomik 27,8 oranında bor ihtiva ettiği görülmüştür.
- Tribolojik analiz sonrası işlem görmemiş çelik, çift fazlı, tek fazlı ve difüzyon tavllanmış yapılar için sürtünme katsayıları sırasıyla yaklaşık olarak 0,55, 0,58, 0.6 ve 0,65 olarak ölçülmüştür.
- Tribolojik analiz sonrası en yüksek 1,48 mm aşınma izine sahip borlama uygulanmamış çelikten aşınma izi çift fazlı yapı ile ortalama 731,3 µm genişliğine, difüzyon tavllanmış yapı ile 638,3 µm düşürülmüş ve yaygın uygulanan tek faz için ise 674.3 µm'ye düşürüldüğü tespit edilmiştir
- Tribolojik analizler sonucu aşınma mekanizmaları değerlendirildiğinde borlama işlemi ile tek fazlı yapılarda yaygın olarak plastik deformasyon mekanizmalarının geliştiği görülürken çift fazlı yapıda plastik deformasyon mekanizması azalmış ve abrasif izler ile çatlak/kırık oluşumu meydana çıktığı tespit edilmiştir.
- Elektrokimyasal korozyon ölçümü sonucu korozyon oranları; işlem görmemiş çelik 0,466, tek fazlı yapı 0,244, Çift fazlı yapıda 0,149 ve difüzyon tavllanmış yapıda 0,322 mm/yıl olarak ölçülmüştür. Borlama işlemi ile 1018 düşük karbon çeliğinin korozyon dayanımı geliştirilmiştir.

KAYNAKLAR

1. Lampman, S. (1991). Heat treating. (4.Baskı). *ASM handbook*. Ohio: ASM International, 607–625.
2. Dearnley, P. A. and Bell, T. (1985). Engineering the surface with boron based materials. *Surface Engineering*, 1(3), 203-217.
3. Kulka, M. (2019). Introduction. *Current trends in boriding*. Cham: Springer, 1–4.
4. Suwattananont, N. (2010). *Multi-component boron coatings on low carbon steel AISI 1018*. Doktora Tezi, New Jersey Institute of Technology, New Jersey, 1-45.
5. Kulka, M. (2019). Classification of boriding techniques. *Current trends in boriding*. Cham: Springer, 5–8.
6. Hernández-Sanchez, E., Rodriguez-Castro, G., Meneses-Amador, A., Bravo-Bárcenas, D., Arzate-Vazquez, I., Martínez-Gutiérrez, H. and Campos-Silva, I. (2013). Effect of the anisotropic growth on the fracture toughness measurements obtained in the Fe₂B layer. *Surface and Coatings Technology*, 237, 292-298.
7. Li, C., Shen, B., Li, G. and Yang, C. (2008). Effect of boronizing temperature and time on microstructure and abrasion wear resistance of Cr₁₂Mn₂V₂ high chromium cast iron. *Surface and Coatings Technology*, 202(24), 5882-5886.
8. Yu, L. G., Khor, K. A. and Sundararajan, G. (2006). Boride layer growth kinetics during boriding of molybdenum by the Spark Plasma Sintering (SPS) technology. *Surface and Coatings Technology*, 201(6), 2849-2853.
9. Ribeiro, R., Ingole, S., Usta, M., Bindal, C., Ucisik, A. H. and Liang, H. (2006). Tribological characteristics of boronized niobium for biojoint applications. *Vacuum*, 80(11-12), 1341-1345.
10. Usta, M., Ozbek, I., Ipek, M., Bindal, C. and Ucisik, A. H. (2005). The characterization of borided pure tungsten. *Surface and Coatings Technology*, 194(2-3), 330-334.
11. Johnston, J. M., Baker, P. and Catledge, S. A. (2016). Improved nanostructured diamond adhesion on cemented tungsten carbide with boride interlayers. *Diamond and Related Materials*, 69, 114-120.
12. Calik, A., Karakaş, M. S., Ucar, N. and Ünüvar, F. (2014). Boriding kinetics of pure cobalt. *Kovove Materialy*, 52(2), 107-112.
13. Zimmerman, C., Bugliarello-Wondrich, N. and Hemmer, J. (2021). *Boronizing powder compositions for improved boride layer quality in oil country tubular goods and other metal articles*. World Patent, 169827A1.
14. Pham, G. K., Segletes, D. S., Walter, S. and Van der Laag, N. (2017). *Boronizing composition and method for surface treatment of steels*. U.S. Patent, 0225834A1.

15. Kusmanov, S. A., Silkin, S. A., Smirnov, A. A. and Belkin, P. N. (2017). Possibilities of increasing wear resistance of steel surface by plasma electrolytic treatment. *Wear*, 386, 239-246.
16. Kulka, M., Makuch, N., Pertek, A. and Piasecki, A. (2012). An alternative method of gas boriding applied to the formation of borocarbured layer. *Materials Characterization*, 72, 59-67.
17. Yüce, H. (2022). *Takım çeliğinin krt-d-bor yöntemi ile borlanması ve süreçlerinin optimizasyonu*. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1-31
18. Kartal, G. (2011). *Katodik redüksiyon-termal difüzyon yöntemi ile metallerin borlanması (KRTD-BOR) ve süreçlerin optimizasyonu*. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1-29.
19. Sinha, A. K. and Division B. P. (1991). Heat treating. (4. Baskı). *ASM handbook*. Ohio: ASM International, 978–1000.
20. Ortiz-Domínguez, M., Morales-Robles, Á. J., Gómez-Vargas, O. A., & de Jesús Cruz-Victoria, T. (2023). Analysis of Diffusion Coefficients of Iron Monoboride and Diiron Boride Coating Formed on the Surface of AISI 420 Steel by Two Different Models: Experiments and Modelling. *Materials*, 16(13), 4801.
21. Iwabuchi, Y. and Kobayashi, I. (2012). Application of induction heating to boriding. *Advanced Materials Research*, 586, 64-68.
22. Kumar, S. V., Raj, G. S. and Prince, M. (2022). Effects of pack boriding and induction boriding on the dry sliding wear behavior of high speed steel. *Materials Today: Proceedings*, 59, 1105-1110.
23. Kulka, M., Dziarski, P., Makuch, N., Piasecki, A. and Miklaszewski, A. (2013). Microstructure and properties of laser-borided Inconel 600-alloy. *Applied Surface Science*, 284, 757-771.
24. Gómez-Vargas, O. A., Solis-Romero, J., Figueroa-López, U., Ortiz-Domínguez, M., Oseguera-Peña, J. and Neville, A. (2016). Boro-nitriding coating on pure iron by powder-pack boriding and nitriding processes. *Materials Letters*, 176, 261-264.
25. Ertürk, L. and Selçuk, B. (2024). Investigation of the effect of different activators on borosintering process. *Journal of Novel Engineering Science and Technology*, 3(01), 12-16.
26. Kul, M., Yılmaz, Y., Oskay, K. O. and Kumruoğlu, L. C. (2022). Effect of chemical composition of boriding agent on the optimization of surface hardness and layer thickness on AISI 8620 steel by solid and liquid boriding processes. *Advances in Materials Science*, 22(3), 14-22. (3).
27. Kulka, M. (2019). Trends in thermochemical techniques of boriding. *Current trends in boriding*. Cham: Springer, 17–98.

28. Campos-Silva, I., Martínez-Trinidad, J., Doñu-Ruíz, M. A., Rodríguez-Castro, G., Hernández-Sánchez, E. and Bravo-Bárceñas, O. (2011). Interfacial indentation test of FeB/Fe₂B coatings. *Surface and Coatings Technology*, 206(7), 1809-1815.
29. Özbek, İ. (1999). *Borlama yöntemiyle (AISI M50, AISI M2) yüksek hız çeliklerinin ve AISI W1 çeliğinin yüzey performanslarının geliştirilmesi*. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 1-69.
30. Baudis, U. and Wigger, S. (2003). *Boronizing agent in paste form*. U.S. Patent, 0036030A1.
31. Kuznetsov, S. A., Kuznetsova, S. V., Rebrov, E. V., Mies, M. J. M., De Croon, M. H. J. M. and Schouten, J. C. (2005). Synthesis of molybdenum borides and molybdenum silicides in molten salts and their oxidation behavior in an air–water mixture. *Surface and Coatings Technology*, 195(2-3), 182-188.
32. Kuznetsov, S. A., Rebrov, E. V., Mies, M. J., de Croon, M. H. and Schouten, J. C. (2006). Synthesis of protective Mo–Si–B coatings in molten salts and their oxidation behavior in an air–water mixture. *Surface and Coatings Technology*, 201(3-4), 971-978.
33. Simonenko, A., Shestakov V. A. and Poboinya, V. A. (1982). Liquid boriding in induction salt baths. *Metal science and heat treatment*, 24, 360–361.
34. Simonenko, A. N., Poroshin, V. V. and Antia, P. K. (1985). Aging of salt baths with electrolysis-free liquid boriding. *Metal science and heat treatment*, 27, 13–16.
35. Allaoui, O., Bouaouadja, N. and Sainderran, G. (2006). Characterization of boronized layers on a XC38 steel. *Surface and Coatings Technology*, 201(6), 3475-3482.
36. Mertgenc, E., Kesici, O. F., Kayali, Y., Anzawa, Y., Koyama, S. and Shohji, I. (2017). The effect of boriding on wear resistance of cold work tool steel. *Journal of Physics: Conference Series*, 843, 12064.
37. Mariani, F. E., Takeya, G. S., Casteletti, L. C., Lombardi Neto, A. and Totten, G. E. (2015). Boroaustempering treatment on alloyed ductile irons. *Heat Treat 2015: 28th Heat Treating Society Conference*, Michigan, 686–691.
38. Bindal, C. (1991). *Az alaşımlı ve karbon çeliklerinde borlama ile yüzeye kaplanan borürlerin bazı özelliklerinin tesbiti*, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1-36.
39. Huang, Y. G., Chen, J. R., Zhang, M. L., Zhong, X. X., Wang, H. Q. and Li, Q. Y. (2013). Electrolytic Boronizing of Titanium in Na₂B₄O₇-20%K₂CO₃. *Materials and Manufacturing Processes*, 28(12), 1310–1313.
40. Kartal, G. and Timur, S. (2013). Growth kinetics of titanium borides produced by CRTD-Bor method. *Surface and Coatings Technology*, 215, 440-446.
41. Kulka, M., Pertek, A. and Makuch, N. (2011). The importance of carbon concentration–depth profile beneath iron borides for low-cycle fatigue strength. *Materials Science and Engineering: A*, 528(29–30), 8641–8650.

42. Lyakhovich, L. S., Dolmanov, F. V. and Isakov, S. A. (1982). Boriding of steels in gaseous media. *Metal Science and Heat Treatment*, 24(4), 260-263.
43. Casadesus, P., Frantz, C., and Gantois, M. (1979). Boriding with a thermally unstable gas (diborane). *Metallurgical Transactions*, 10(11), 1739–1743.
44. Zhigach, A. F., Antonov, I. S., Pchelkina, M. A., Yukin, G. I., Dobrodeev, A. S., and Matveev, V. N. (1959). Surface impregnation of steel with boron from the gas phase. *Metal Science and Heat Treatment of Metals*, 1(4), 47–50.
45. Küper, A., Qiao, X., Stock, H. and Mayr, P. (2000). A novel approach to gas boronizing. *Surface and Coatings Technology*. 130(1), 87-94.
46. Franco, E., Costa, C., Milan, J. and Tsipas S. A. (2020). Multi-component boron and niobium coating on M2 high speed steel processed by powder metallurgy. *Surface and Coatings Technology*. 384, 125306.
47. Domec, B. S. (2017). *Development, characterization, and resultant properties of a carbon, boron, and chromium ternary diffusion system*. Doktora Tezi, University of Louisiana at Lafayette, Lafayette, 1-51.
48. Ayvaz, S. (2023). Investigation of the effect of boriding on the wear behaviour of AISI 1050 carbon steel. *International Advanced Researches and Engineering*, 7(1), 1-7.
49. Meriç, C., Sahin, S. and Yilmaz, S. (2000). Investigation of the effect on boride layer of powder particle size used in boronizing with solid boron-yielding substances. *Materials Research Bulletin*, 35(13), 2165-2172.
50. Cimenoglu, H., Atar, E. and Motallebzadeh, A. (2014). High temperature tribological behaviour of borided surfaces based on the phase structure of the boride layer. *Wear*, 309(1–2), 152-158.
51. Türkmen, İ. and Yalamaç, E. (2018). Growth of the Fe₂B layer on SAE 1020 steel employed a boron source of H₃BO₃ during the powder-pack boriding method. *Journal of Alloys and Compounds*, 744, 658-666.
52. Bayça, S. U. (2018). *Bir katı borlama ajanı*. Türk Patent, TR2021/007143.
53. Jelis, E., Suwattananont, N. and Petrova, R. S. (2005). Boronizing of Ti-6Al-4V Eli by powder pack method for biomedical application. *IEEE Annual Northeast Bioengineering Conference (NEBEC)*, Hoboken, 193–194.
54. Campos-Silva, I. and Hernández-Sánchez, E. (2013). A study of indentation for mechanical characterization of the Fe₂B layer. *Surface and Coatings Technology*, 232, 173-181.
55. Lu, X., Liang, C., Gao, X., An, J. and Yang, X. (2011). Catalysis of rare earth element Nd on boriding of AISI 1045 steel. *ISIJ International*, 51(5), 799–804.
56. Galiotto, A., Rosso, A., Almeida, E. and Krelling, A. (2019). Characterization of different surface layers produced by solid boron-nitro-carburizing thermochemical treatment on AISI 1020. *Material Research*, 22(5), 1-10.

57. Petrova, R. S., Suwattananont, N. and Samardzic, V. (2008). The effect of boronizing on metallic alloys for automotive applications. *SpringerRS Petrova, N Suwattananont, V SamardzicJournal of Materials Engineering and Performance*, 17(3), 340–345.
58. Pertek, A. and Kulka, M. (2002). Characterization of complex (B+C) diffusion layers formed on chromium and nickel-based low-carbon steel. *Applied Surface Science*, 202(3–4), 252–260.
59. Makuch, N., Kulka, M., Keddam, M. and Piasecki, A. (2022). Growth kinetics, microstructure evolution, and some mechanical properties of boride layers produced on X165CrV12 tool steel. *Materials*, 16(1), 26.
60. Swadźba, R. (2019). High temperature oxidation behavior of C103 alloy with boronized and siliconized coatings during 1000 h at 1100° C in air. *Surface and Coatings Technology*, 370, 331–339.
61. Singhal, S. (1977). A hard diffusion boride coating for ferrous materials. *Thin Solid Films*, 45(2), 321–329.
62. İpekoğlu, U. and Çavdar, U. (2023). Comparison of boriding heat treatment and induction boriding method. *International Scientific and Vocational Studies Journal*, 7(2), 224–228.
63. Harris, C. (2024). *Mo-Si-B based coatings for the suppression of high temperature water vapor attack*. Doktora Tezi, University of Wisconsin, Wisconsin, 1–119.
64. Araz, S. O., Gumus, H., Bayca, S. U. and Aydin, A. (2021). Investigation of gamma-ray attenuation coefficients for solid boronized 304L stainless steel. *Applied Radiation and Isotopes*, 170, 109605.
65. Yılmaz, D., Aktaş, B., Çalık, A. and Aytar, O. B. (2019). Boronizing effect on the radiation shielding properties of Hardox 450 and Hardox HiTuf steels. *Radiation Physics and Chemistry*, 161, 55–59.
66. Genel, K. (2006). Boriding kinetics of H13 steel. *Vacuum*, 80(5), 451–457.
67. Kondul, B. and Cetin, M. H. (2022). Increasing the wear resistance of railway switches with boron coating and analysis of tribological performance by ANOVA method. *Wear*, 488, 204132.
68. Campos-Silva, I., Hernández-Ramirez, E. J., Contreras-Hernández, A., Rosales-Lopez, J. L., Valdez-Zayas, E., Mejía-Caballero, I. and Martínez-Trinidad, J. (2021). Pulsed-DC powder-pack boriding: Growth kinetics of boride layers on an AISI 316 L stainless steel and Inconel 718 superalloy. *Surface and Coatings Technology*, 421, 127404.
69. Ivanov, S. G., Guryev, A. M., Guryev, M. A., Sentyabov, I. V. and Chernykh, E. V. (2023). Structure and properties of multicomponent diffusion boride coatings formed on a hardened 30KhGSA steel surface. *Technical Physics Letters*, 49(8), 87–91.
70. Guryev, A. M., Ivanov, S. G., Guryev, M. A., Mei, S., and Quan, Z. (2021). Complex diffusion saturation of carbon steel 1045 with boron, chromium, titanium and silicon. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1100(1), 012048.

71. Campos-Silva, I., Ortiz-Domínguez, M., López-Perrusquia, N., Meneses-Amador, A., Escobar-Galindo, R. and Martínez-Trinidad, J. (2010). Characterization of AISI 4140 borided steels. *Applied Surface Science*, 256(8), 2372-2379.
72. Uluköy, A., Kaplan, Y., Onar, V., Yıldız, M., Armağan, E., Çarık, O., and Can, A. Ç. (2015). *The microstructure and hardness analysis of decarburization followed by boronizing AISI D3 tool steel*. International Conference on Engineering and Natural Science (ICENS), Skopje, 1–7.
73. Pertek, A. and Kulka, M. (2003). Two-step treatment carburizing followed by boriding on medium-carbon steel. *Surface and Coatings Technology*, 173(2-3), 309-314.
74. ASTM International. (2023). *Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements*. ASTM G102-23.
75. ASTM International. (2017). *Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus*. ASTM G99-17.
76. Singhal, S. C. (1977). A hard diffusion boride coating for ferrous materials. *Thin Solid Films*, 45(2), 321-329.
77. Carrera-Espinoza, R., Figueroa-López, U., Martínez-Trinidad, J., Campos-Silva, I., Hernandez-Sánchez, E. and Motallebzadeh, A. (2016). Tribological behavior of borided AISI 1018 steel under linear reciprocating sliding conditions. *Wear*, 362, 1-7.
78. Kartal, G., Timur, S., Sista, V., Eryilmaz, O. L. and Erdemir, A. (2011). The growth of single Fe₂B phase on low carbon steel via phase homogenization in electrochemical boriding (PHEB). *Surface and Coatings Technology*, 206(7), 2005–2011.
79. Hernández-Ramírez, E. J., Guevara-Morales, A., Figueroa-López, U. and Campos-Silva, I. (2020). Wear resistance of diffusion annealed borided AISI 1018 steel. *Materials Letters*, 277, 128297.
80. Oliver, W. C. and Pharr, G. M. (1992). An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *Journal of Materials Research*, 7(6), 1564–1583.
81. Campos, I., Torres, R., Bautista, O., Ramírez, G. and Zúñiga, L. (2006). Effect of boron paste thickness on the growth kinetics of polyphase boride coatings during the boriding process. *Applied Surface Science*, 252(6), 2396-2403.
82. Arizmendi-Morquecho, A., Campa-Castilla, A., Leyva-Porras, C., Aguilar Martinez, J. A., Vargas Gutiérrez, G., Moreno Bello, K. J. and López López, L. (2014). Microstructural Characterization and Wear Properties of Fe-Based Amorphous-Crystalline Coating Deposited by Twin Wire Arc Spraying. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014(1), 836739.
83. Lu, J., Song, Y., Zhou, P., Lin, J., Dean, T. A. and Liu, P. (2021). Process parameters effect on high-temperature friction and galling characteristics of AA7075 sheets. *Materials and Manufacturing Processes*, 36(8), 967-978.

84. Podgornik, B. (2022). Adhesive wear failures. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 22(1), 113-138.
85. Türkmen, İ., Yalamaç, E. and Keddām, M. (2019). Investigation of tribological behaviour and diffusion model of Fe₂B layer formed by pack-boriding on SAE 1020 steel. *Surface and Coatings Technology*, 377, 124888.
86. Selcuk, B., Ipek, R., Karamiş, M. B. and Kuzucu, V. (2000). An investigation on surface properties of treated low carbon and alloyed steels (Boriding and carburizing). *Journal of Materials Processing Technology*, 103(2), 310-317.
87. Campos Silva, I. E., Günen, A., Karakaş, M. S. and Delgado Brito, A. M. (2023). The boriding process for enhancing the surface properties of high-temperature metallic materials. *Coatings for High-Temperature Environments: Anti-Corrosion and Anti-Wear Applications*. Cham: Springer International Publishing AG, 221–259.
88. Tavakoli, H. and Khoie, S. M. (2010). An electrochemical study of the corrosion resistance of boride coating obtained by thermo-reactive diffusion. *Materials Chemistry and Physics*, 124(2-3), 1134-1138.
89. Suwattananont, N. and Petrova, R. S., Zunino, J. L. ve Schmidt, D. (2005). *Surface treatment with boron for corrosion protection*. 2005 Tri-Service Corrosion Conference, Orlando 1, 11.



Gazili olmak ayrıcalıktır