



**TERMOKİMYASAL İŞLEMLERİN 16MnCr5  
SEMENTASYON KANGAL ÇELİKLERİNİN  
FARKLI ÇAPLARDAKİ MEKANİK  
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**Ali Yağız ŞAHİN**

**2022  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı  
Doç. Dr. Muhammet Emre TURAN**

**TERMOKİMYASAL İŞLEMLERİN 16MnCr5 SEMENTASYON KANGAL  
ÇELİKLERİNİN FARKLI ÇAPLARDAKİ MEKANİK ÖZELLİKLERİNE  
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**Ali Yağız ŞAHİN**

**T.C.  
Karabük Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında  
Yüksek Lisans Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı  
Doç. Dr. Muhammet Emre TURAN**

**KARABÜK  
Eylül 2022**

Ali Yağız ŞAHİN tarafından hazırlanan “TERMOKİMYASAL İŞLEMLERİN 16MnCr5 SEMENTASYON KANGAL ÇELİKLERİNİN FARKLI ÇAPLARDAKİ MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Muhammet Emre TURAN .....

Tez Danışmanı, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Metalürji ve Malzeme Mühendisliğinde Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 15/09/2022

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Doç. Dr. Fatih AYDIN ( KBÜ) .....

Üye : Doç. Dr. Muhammet Emre Turan ( KBÜ) .....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Muhammed ELİTAŞ ( BŞEÜ) .....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ .....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

Ali Yağız ŞAHİN

## ÖZET

**Yüksek Lisans Tezi**

### **TERMOKİMYASAL İŞLEMLERİN 16MnCr5 SEMENTASYON KANGAL ÇELİKLERİNİN FARKLI ÇAPLARDAKİ MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**Ali Yağız ŞAHİN**

**Karabük Üniversitesi**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı:**

**Doç Dr. Muhammet Emre TURAN**

**Eylül 2022, 62 sayfa**

Bu tez çalışmasında iki farklı çapta (11 mm ve 15 mm)16MnCr5 sementasyon çeliklerine dört farklı parametre kullanılarak borlama ve tek parametreyle nitrasyon ısıl işlemleri uygulanmıştır. Isıl işlemsiz ve ısıl işlemlili numunelerin mikroyapı, mekanik ve aşınma performansları kıyaslanmıştır. Borlama işlemi kutu borlama tekniğiyle iki farklı sıcaklık ve sürelerde gerçekleştirilmiştir. Optik mikroskop, X ışını cihazı ve taramalı elektron mikroskopu (SEM) kullanılarak mikroyapılar analiz edilmiştir. Sertlik, çekme ve aşınma testleri hem ısıl işlemsiz sementasyon çeliğine hem de borlanmış, nitrasyon işlemine tabi tutulmuş numunelerin hepsine uygulanmıştır. Borlama işlemleri neticesinde 1000 °C ve 16 saat borlanmış numunede ısıl işlemsiz numuneye göre 4 kat sertlik artışı gözlemlenmiştir. 900 °C ve 8 saat süreyle borlanmış numunede sertlik ve aşınma performansında gelişmeler gözlemlense de kaplama kalınlığı diğer numunelere kıyasla daha düşük çıkmıştır. Nitrasyon işlemi neticesinde sertliklerde 4 kat artış elde edilmiş ve 40-50 mikron

aralığında kaplama tabakası gözlemlenmiştir. Borlama ve nitrasyon ısıl işlemleriyle sementasyon çeliklerinin aşınma hızında önemli ölçüde azalma meydana gelmiştir. Akma ve çekme dayanımlarında çapa bağlı olarak kayda değer bir değişim gözlemlenmemiştir. Fakat termokimyasal işlemlerin etkisiyle mekanik dayanımda düşüşler görülmüştür. Borlama ve nitrasyon ısıl işlemlerinin optimum parametrelerle uygulanması neticesinde yüzey sertliğinde ve buna bağlı olarak aşınma performansında gelişmeler sağlanmıştır.

**Anahtar Sözcükler :** Borlama, Nitrasyon, Sementasyon Çeliği, Aşınma, Mekanik özellikler

**Bilim Kodu** : 91530

## **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

### **INVESTIGATION EFFECT OF THERMOCHEMICAL PROCESSES ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF DIFFERENT DIAMETERS 16MnCr5 CARBURIZING STEELS**

**Ali Yağız ŞAHİN**

**Karabük University**

**Institute of Graduate Programs**

**Department of Metallurgical and Materials Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Doç. Dr. Muhammet Emre TURAN**

**September 2022, 62 pages**

In this thesis, two different diameters (11 mm and 15 mm) of 16MnCr5 cementation steels were subjected to boriding and nitriding heat treatments. Microstructure, mechanical and wear performances of non-heat-treated and heat-treated samples were compared. The boriding process was carried out at two different temperatures and times. Microstructures were analyzed using an optical microscope, X-ray device, and scanning electron microscope (SEM). Hardness, tensile, and wear tests were applied both to the untreated cementation steel and to all the boronized, nitrated specimens. As a result of the boriding processes, a 4-times increase in hardness was observed in the sample boronized at 1000°C and 16 hours compared to the sample without heat treatment. Although improvements were observed in the hardness and wear performance of the sample boronized at 900°C and 8 hours, the coating thickness was lower than the other samples. As a result of the nitration process, a 4-times increase in hardness was achieved and a coating layer in the range of 40-50 microns was observed.

With the boriding and nitration heat treatments, the wear rate of the cementation steels decreased significantly. Although no significant change was observed in yield and tensile strengths for different diameter of samples. Improvements in surface hardness and, accordingly, wear performance was achieved as a result of the application of boriding and nitration heat treatments with optimum parameters.

**Key Word** : Boronizing, Nitriding, Cementation Steel, Wear, Mechanical properties

**Science Code** : 91530



## TEŞEKKÜR

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

Her türlü imkanı sunarak çalıőmamın tamamlanmasını sağlayan baőta KARDEMİR AŞ'ye, Ar-Ge Müdürü Mücahit SEVİM'e, Ar-Ge Baőmühendisi Aysun IŐIKGÜL'e, Ar-Ge Mühendisi Fatih ESİN'e ve bana yardımcı olan diğer tüm mesai arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Her daim yanımda olan Sevgili Eőim Asuman NAMAL şAHİN'e, eğitim hayatımın başladığı ilk günden itibaren bana maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen sevgili babam Selçuk şAHİN'e, sevgili annem Ümran şAHİN ve sevgili kardeőim Yiğit şAHİN'e tüm kalbimle teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xv
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 .....	3
SEMENTASYON ÇELİKLERİ .....	3
2.1. SEMENTASYON ÇELİKLERİNİN ÖZELLİKLERİ.....	4
BÖLÜM 3 .....	6
BOR ELEMENTİ VE BORLAMA İŞLEMİ.....	6
3.1. BOR ELEMENTİ.....	6
3.2. BORLAMA İŞLEMİ.....	8
3.2.1. Borlama İşleminin Avantajları .....	9
3.2.2. Borlama İşleminin Dezavantajları .....	10
3.3. BORLAMA YÖNTEMLERİ.....	11
3.3.1. Kutu Borlama .....	11
3.3.2. Pasta Borlama .....	13
3.3.3. Sıvı Borlama .....	14
3.3.3.1. Elektriksiz Sıvı Ortamda Borlama.....	14
3.3.3.2. Elektrolizle Sıvı Borlama .....	15
3.3.4. Gaz Borlama .....	15
3.3.5. Plazma Borlama.....	17

	<u>Sayfa</u>
3.4. BORÜR TABAKASININ ÖZELLİKLERİ .....	17
BÖLÜM 4 .....	20
NİTRASYON .....	20
4.1. NİTRASYON ÇEŞİTLERİ.....	20
4.1.1. Gaz Nitrasyon .....	21
4.1.2. Plazma Nitrasyon.....	21
4.1.3. Sıvı Nitrasyon .....	22
BÖLÜM 5 .....	23
AŞINMA.....	23
5.1. AŞINMANIN SINIFLANDIRILMASI .....	24
5.1.1. Adhesiv Aşınma .....	25
5.1.2. Abrasiv Aşınma .....	26
5.1.3. Korozif Aşınma .....	27
5.1.4. Yorulma Aşınması.....	27
5.1.5. Eroziv Aşınma.....	28
BÖLÜM 6 .....	30
DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	30
6.1. DENEYDE KULLANILAN MALZEMELER.....	30
6.2. NUMUNELERİN HAZIRLANIŞI .....	32
6.3. NUMUNELERİN BORLAMA İŞLEMİ .....	32
6.4. NİTRASYON İŞLEMLERİ.....	36
6.5. KARAKTERİZASYON ÇALIŞMALARI .....	36
6.5.1. Metalografik Hazırlık .....	36
6.5.2. Mikroyapı İncelemeleri .....	37
6.6. SERTLİK ÖLÇÜMLERİ .....	39
6.7. ÇEKME DENEYLERİ .....	40
6.8. AŞINMA DENEYLERİ.....	40
BÖLÜM 7 .....	42
DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME .....	42

	<b><u>Sayfa</u></b>
7.1. MİKROYAPI ANALİZ SONUÇLARI .....	42
7.2. MEKANİK TEST SONUÇLARI .....	48
7.3. AŞINMA TEST SONUÇLARI.....	52
BÖLÜM 8 .....	56
GENEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME.....	56
KAYNAKLAR .....	58
ÖZGEÇMİŞ .....	62

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 3. 1. Kutu borlama yönteminin şematik görüntüsü .....	12
Şekil 3. 2. Borür tabakasının şematik gösterimi . .....	17
Şekil 3. 3. Borür tabaka tipleri .....	18
Şekil 5. 1. Aşınmayı oluşturan unsurlar. ....	23
Şekil 5. 2. Aşınma çeşitleri . .....	25
Şekil 6. 1. Spectro marka spektrometre cihazı. ....	31
Şekil 6. 2. Numune kesme ve parlatma cihazı. ....	32
Şekil 6. 3. Isıl işlem fırını. ....	33
Şekil 6. 4. Numunelerin seramik pota içerisine yerleşimi ve üzerinin toz ile kapanması. ....	33
Şekil 6. 5. Fırın içerisine yerleştirilen seramik pota. ....	34
Şekil 6. 6. Soğumaya bırakılan seramik potalar. ....	34
Şekil 6. 7. Numunelerin pota içerisindeki yerleşimi. ....	35
Şekil 6. 8. Bakalite alma cihazı ve hazırlanan bakalitler. ....	37
Şekil 6. 9. Optik mikroskop. ....	37
Şekil 6. 10. SEM cihazı. ....	38
Şekil 6. 11. Rigaku X-Ray cihazı. ....	39
Şekil 6. 12. Mikrosertlik cihazı. ....	39
Şekil 6. 13. Aşınma test cihazı. ....	41
Şekil 6. 14. Çekme test cihazı. ....	40
Şekil 7. 1. 16MnCr5-Ø11 mm 200X büyütme mikroyapı görüntüsü. ....	42
Şekil 7. 2. 16MnCr5-Ø11 mm 500X büyütme mikroyapı görüntüsü. ....	43
Şekil 7. 3. 16MnCr5-Ø15 mm 200X büyütme mikroyapı görüntüsü. ....	43
Şekil 7. 4. 16MnCr5-Ø15 mm 500X büyütme mikroyapı görüntüsü. ....	43
Şekil 7. 5. Borlama numunelerine ait XRD sonuçları. ....	44
Şekil 7. 6. Nitrasyon işlemi sonrası XRD sonuçları. ....	45
Şekil 7. 7. 900°C-8 saat borlanmış numuneye ait optik mikroskop görüntüsü. ....	46
Şekil 7. 8. 1000°C-16 saat borlanmış numuneye ait optik mikroskop görüntüsü. ....	46

## Sayfa

Şekil 7. 9. 1000°C-16 saat borlanmış numuneye ait SEM EDS analiz görüntüsü. ...	47
Şekil 7. 10. Nitrasyon işlemine tabi tutulmuş numuneye ait optik mikroskop görüntüsü. .....	48
Şekil 7. 11. Nitrasyon işlemine tabi tutulmuş numuneye ait SEM görüntüsü. ....	48
Şekil 7. 12. 11 mm akma ve çekme değerleri. ....	49
Şekil 7. 13. Termokimyasal işlemler sonrası çekme test sonuçları a) Borlama sonrası b) Nitrasyon sonrası .....	49
Şekil 7. 14. Numunelerin sertlik ölçümleri. ....	50
Şekil 7. 15. Borlama sonrası sertlik sonuçları.....	51
Şekil 7. 16. Nitrasyon sonrası sertlik sonuçları.....	51
Şekil 7. 17. Borlama yapılmış numunelerin 5N yük altında aşınma hızı değerleri. ..	53
Şekil 7. 18. Borlama yapılmış numunelerin 10N yük altında aşınma hızı değerleri.	53
Şekil 7. 19. Nitrasyon yapılmış numunelerin 5N yük altında aşınma hızı değerleri.	54
Şekil 7. 20. Nitrasyon yapılmış numunelerin 10N yük altında aşınma hızı değerleri. .....	54
Şekil 7. 21. Isıl işlemsiz, nitrasyon işlemleri ve 1000°C-16 saat borlanmış numunelere ait aşınma sonrası SEM görüntüleri (11 mm). ....	55

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

Çizelge 2. 1. Sementasyon çeliklerinin kimyasal içeriği [8].....	5
Çizelge 3. 1. Dünya bor rezerv dağılımı. ....	7
Çizelge 3. 2. Bor madeni kullanım alanları.....	8
Çizelge 3.3. Borlanmış çelikler ve sert malzemelerin sertlik değerlerinin karşılaştırılması. ....	10
Çizelge 3. 4. Ekabor bor ürünleri. ....	13
Çizelge 3. 5. Fe <sub>2</sub> B ve FeB yapılarının tipik özellikleri.....	19
Çizelge 5. 1. Çarpma açısının malzeme türlerine etkisi.....	29
Çizelge 6. 1. Deneyde kullanılan 16MnCr5 çeliklerinin kimyasal bileşimleri. ....	31
Çizelge 6. 2. Ekabor malzemeleri [17].....	31
Çizelge 6. 3. Borlama deney programı.....	35
Çizelge 6. 4. Borlama deney programı.....	36
Çizelge 7. 1. 16MnCr5 çeliklerin kimyasal kompozisyonları.....	42

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

Al	: alüminyum
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	: alüminyum oksit
B	: bor
B <sub>4</sub> C	: bor karbür
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	: boron trioksit
C	: karbon
°C	: santigrat
cm	: santimetre
Co	: kobalt
CO <sub>2</sub>	: karbon dioksit
Cr	: krom
FeB	: demir borür
Fe <sub>2</sub> B	: demir (II) borür
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	: demir (III) oksit
g	: gram
GPa	: giga paskal
HV	: vickers sertlik birimi
KBF <sub>4</sub>	: potasyum flouborat
kg	: kilogram
kj	: kilo joule
KPa	: kilo paskal
mm	: milimetre
mm <sup>2</sup>	: milimetre kare
Mn	: mangan
Mo	: molibden
MPa	: mega paskal
N	: azot



NaF	: sodyum florür
NH <sub>3</sub>	: amonyak
Ni	: nikel
O	: oksijen
P	: Fosfor
ppm	: milyonda bir
S	: kükürt
Si	: silisyum
SiC	: silisyum karbür
Ti	: titanyum
TiB <sub>2</sub>	: titanyum diborür
TiC	: titanyum karbür
TiN	: titanyum nitrür
V	: vanadyum
W	: volfram
WC	: tungsten karbür
ZrO <sub>2</sub>	: zirkonyum dioksit
Ø	: çap
%	: yüzde
+	: artı
-	: eksi
±	: tolerans
~	: yaklaşık

## **KISALTMALAR**

- AISI : American Iron and Steel Institute (Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü)
- ASTM : The American Society for Testing and Materials (Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri)
- CVD : Kimyasal buhar biriktirme kaplama yöntemi
- DIN : Deutsches Institut für Normung (Alman Standardizasyon Enstitüsü)
- EN : European Norm (Avrupa Normu)
- Ekabor: Katı borlama kullanılan patentli bor alaşım tozu
- ISO : International Organization for Standardization (Uluslararası Standardizasyon Örgütü)
- PVD : Fiziksel buhar biriktirme kaplama yöntemi
- SEM : Taramalı elektron mikroskobu
- TS : Türk Standardı
- TSE : Türk Standartları Enstitüsü

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Dünyada bilim ve teknoloji alanı, değişkenlik göstererek hızlı bir şekilde gelişmektedir. Teknolojinin gelişimi ile malzemeler üzerindeki beklentiler de aynı oranda artmaktadır. Makine, teçhizat ve sürekli çalışan sistemlerde kullanılan ekipmanlar dayanıklı, uzun süre kullanılabilir, nitelikli ve yüksek mekanik özelliklere sahip olmalıdır. Endüstrinin birçok dalında ekonomik kayıplara sebep verebilecek aşınma mekanizmaları önemli bir konu olarak mutlaka irdelenmelidir. Sektörde aşınma sebebi ile birçok ürün hurdaya ayrılırken birçok duruş, montaj demontaj süresi ve üretim kayıpları yaşanmaktadır.

Aşınma, malzeme kaybını ve parçanın çalışma ömrünü buna bağlı olarak performansını etkileyeceği için ekonomik açıdan büyük önem taşımaktadır. Endüstriyel cihazlarda malzeme kayıplarının en büyük sebebi olan aşınmayı faktörünü önlemek için dayanımlı malzeme kullanımı gerekmektedir. Malzemelerin yüzeyinde meydana gelen aşınma kayıpları sistemin verimli çalışmasını engellemektedir. Malzemelerin yüzeyinde kütleli kayıp makine ekipmanlarının da zarar görmesine ve ciddi hasarlanmalara yol açmaktadır.

Son yıllarda hızla gelişen yüzey geliştirme yöntemleri ekipmanların sertlik, yorulma gibi mekanik özellikleri ile oksidasyon, korozyon, aşınma ve sürtünme özelliklerini pozitif yönde etkilemektedir. Malzemelerin yüzey sertliğinin artırma için nitrasyon, karbürizasyon, sementasyon ve borlama gibi yöntemler kullanılmaktadır. Borlama demir esaslı, demir dışı malzemeler gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılan yüzey sertleştirme işlemidir. Malzemelerde yüzeylerin sürtünmeyi en aza indirecek şekilde sert ve aşınmaya dayanıklı olması istenirken iç yapısının da yumuşak ve tok olması beklenmektedir. Borlama yöntemi sayesinde sert yüzeyli, sürtünme katsayısı düşük, yüksek sıcaklıklarda mukavemet özelliği iyi olup aşınmalara karşı dirençli malzeme

elde edilmektedir. Bu sebeple en çok bor kullanılan alanlarda biri de demir elik sekt6r6d6r.

Bu çalışmanın 6zg6n değeri, sementasyon çeliklerine termokimyasal işlemler uygulanarak ısıl işlem 6ncesi ve sonrası numunelerin mekanik 6zelliklerinin incelenmesi ve aşınma davranış performansları araştırılmasıdır. Numuneler optik mikroskop, elektron mikroskobu, X işını kullanarak analiz edilmiştir. Isıl işlem 6ncesi ve ısıl işlem uygulanmış numunelerin sertlik değerleri kıyaslaması yapılmıştır.

## BÖLÜM 2

### SEMENTASYON ÇELİKLERİ

Çelik, hayatımızda dünyanın en önemli mühendislik ve inşaat malzemesi olarak yer almaktadır. Araçlarda ve inşaat ürünlerinde, buzdolaplarında ve çamaşır makinelerinde, kargo gemilerinde ve tıp sektörü gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Ayrıca kayıp olmadan ergitilerek tekrar tekrar geri dönüştürülebilmektedir. Dünyada pek çok farklı fiziksel, kimyasal ve çevresel özelliğe sahip 3.500'den fazla çelik türü bulunmaktadır [1].

Sementasyon çelikleri ise bu çelikler arasında yer alan yüzeyleri sert, aşınmalara dayanıklı, çekirdeklerinde ise yumuşak ve tok bir yapıya sahip, farklı darbe kuvvetlerine dayanıklı malzemelerin üretiminde kullanılan düşük karbonlu alaşımlı ve alaşımsız çeliklerdir [2].

Alaşımsız veya düşük alaşımlı çelikler kaliteli çelik sınıfında bulunurlar. Elektrik ark ocaklarda, oksijenle çalışan konverterlerde, Siemens Martin ocaklarında dökülerek haddeleme, presleme, dövme yöntemleriyle sıcak olarak imal edilir. Sementasyon çelikleri sektörde sıcak haddelenmiş mamul veya blum, kütük, slab, round bar, lama şeklinde veya filmaşın, sıcak çubuk, saç, dikişsiz boru şeklinde piyasaya sunulmaktadır. Sıcak olarak şekillendirilebilen çeliklerin ısıtma işlemi sonrası sonrasındaki yapısı ferritik-perlitiktir [3].

Sementasyon çelikleri proseste aynı sertlik dayanımını yakalayacak karbon oranı yüksek çeliklerin kullanımına göre avantajları [4];

- Isıtma işlemi parçanın nihai haline uygulanabildiği için işlem oldukça kolaydır.

- Parçanın istenmeyen bölgelerinde ve sonradan işlenecek alanlar var ise bu bölgeler özel koruyucu ekipman ile kaplanarak korunur. Böylece ısı işlem sonrasında bu bölgelerde talaş kaldırma yapılabilir.
- İşlem sonrasında malzemenin çekirdek bölgesi yumuşak olacağından çarpılma kusuru ihtimali oldukça azdır.
- Maliyetleri, yüzeyde aynı sertlik değerini verebilecek yüksek karbonlu çeliklerden daha uygundur.

Sementasyon çelikleri güç iletiminin sağlandığı tüm alanlarda kullanılmaktadır. Hidroelektrik santrali, rüzgar enerjisi santrali, denizcilik sektörü gibi alanlarda sadece yüksek basınçlara dayanmak için değil sürekli çalışabilen bir çelik olduğu için tercih edilmektedir. Otomotiv sektöründe birinci öncelik güvenlik olması sebebi ile piston pimleri, dişli çarklar, motor milleri, dişliler gibi kritik ekipmanlarda sementasyon çelikleri kullanılmaktadır [5].

## **2.1. SEMENTASYON ÇELİKLERİNİN ÖZELLİKLERİ**

Sementasyon çeliklerinde karbon miktarı % 0,10 ila 0,20 arasında yer almaktadır. Sementasyon çelikleri alaşimsız veya düşük alaşımlı olabilirler. Alaşimsız kaliteler P, S % oranları 0,045 maksimum değerini geçmemektedirler. Alaşımlı çeliklerde ise Mn, Mo, Cr ve Ni elementleri bulunmaktadır. Bazı sementasyon çeliklerinde molibden yerine V, Ti, W alaşım elementleri de kullanılmaktadır [6]. Ancak bazı çeliklerde karbon % 0,25' lere kadar çıkabilmektedir. Çelikler alaşimsız ya da düşük alaşımlı olabilirler [7].

En yaygın kullanılan sementasyon çelikleri C10, C15, 17Cr3, 16MnCr5, 20MnCrS5, 20MoCr4, 17CrNi6, 20NiCrMo2'dir. Demir çelik sektöründe soğuk şişirme ve soğuk ekstrüzyon proseslerinde kullanılacak çubuk ve filmaşın üretimi için TS EN 10263-3 standardı kullanılmaktadır [8]. Çizelge 2.1.'de TS EN 10263-3'te yer alan başlıca sementasyon çeliklerinin kimyasal bileşimleri yer almaktadır.

Çizelge 2. 1. Sementasyon çeliklerinin kimyasal içeriği [8].

Çelik Adı	% C	Si Maks.	% Mn	P Maks.
C10	0,08-0,12	0,30	0,30-0,60	0,025
C15	0,13-0,17	0,30	0,30-0,60	0,025
17Cr3	0,14-0,20	0,30	0,60-0,90	0,025
16MnCr5	0,14-0,19	0,30	1,00-1,30	0,025
20MnCrS5	0,17-0,22	0,30	1,10-1,40	0,025
20MoCr4	0,17-0,23	0,30	0,70-1,00	0,025
17CrNi6	0,14-0,20	0,30	0,50-0,90	0,025
20NiCrMo2	0,17-0,23	0,30	0,65-0,95	0,025

## BÖLÜM 3

### BOR ELEMENTİ VE BORLAMA İŞLEMİ

#### 3.1. BOR ELEMENTİ

Bor, periyodik elementler tablosunun IIIA grubunda yer bulunan, B sembolü ile belirtilen ve atom numarası 5, atom ağırlığı ise 10,81, özgül ağırlığı 2.30-2.46 olan elementtir. Genellikle ametal olarak kabul edilse de, metalik özelliklerde taşımaktadır. Kimyasal özellikleri ise periyodik tabloda bulunduğu grubun elementleri ile benzerlik göstermemekle birlikte silisyum ve karbona benzer özellikleri taşır. Bor elementinin kristalize olmaya toz hali koyu kahverengi renktedir. Ancak sert yapılı kristal hali ise sarımsı kahverengi rengindedir. Borun oksijene olan afinitesi çok yüksektir. Metaller ve ametaller arasında yarı iletken özellik taşıyan borun ergime sıcaklığı  $2190 \pm 20$  °C'dir [9].

Dünyada elmas madeninden sonra en sert ikinci madenidir. Bor doğada saf halde bulunmamakta diğer elementler ile yaptığı bileşikler şeklinde görülmektedir. Ülkemizde kullanılan bor alaşımlarının en yaygın olanları sodyum içeriği bulunan tinkal, kalsiyum içeriği bulunan kolemanit, sodyum ve kalsiyum içeriği bulunan üleksittir [10].

Dünyada büyük önem taşıyan bor rezervleri Türkiye'de, ABD'de, Kaliforniya'da, Güney Amerika'da ve Orta Asya'da bulunmaktadır. Çizelge 3.1.de Türkiye %73 civarındaki payı ile dünyanın en büyük bor maden yataklarına sahip ülke konumundadır. Ayrıca ülkemizde bulunan bor madenlerinin aşırı derinlerde olmaması kolay işlenebilirlik avantajı sağlamaktadır [11].



Çizelge 3. 1. Dünya bor rezerv dağılımı [11].

Ülke	Toplam Rezerv Milyon ton	%
Türkiye	952	73,2
ABD	80	6,1
Rusya	100	7,7
Çin	47	3,6
Şili	37	2,8
Sırbistan	24	1,8
Peru	22	1,7
Kazakistan	15	1,2
Bolivya	15	1,2
Arjantin	9	0,7

Endüstride yaygın olarak kullanılan bor bileşiklerinin kullanım alanları yaygınlık göstermekte ve önemi günden güne artmaktadır. Piyasada bor rafine olarak kullanıldığı gibi yoğunlaştırılmış şekilde de direkt olarak tüketilmektedir. En fazla bor kullanılan sektör cam sektörüdür. Cam sektöründe ara mamül akışkanlığı arttırmakta ve nihai ürünün yüzey sertliği ve dayanımını yükseltmektedir. Seramik sektöründe sır için katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bor silisin ergitilmesini ve seramik yüzeyde kolayca yayınımlı sağlamaktadır. Ayrıca emaye kaplamaların setliğini, dayanımını ve parlaklığını arttırmak amacıyla kullanılır. Temizlik sektöründe bakteri giderici ve yumuşatıcı özelliği sayesinde deterjan imalatında kullanılmaktadır. Tarım sektöründe kullanılan yeşil bitkilerin olgunlaşması için bora ihtiyaç vardır. Demir çelik sektöründe cüruf oluşturu ve ergime hızlandırıcı olarak kullanılmaktadır. Çeliğin sertleşmesi için 50 ppm'e kadar bor kullanılabilir. Özel uygulamalarda çelik yüzeyleri bor ile sertleştirilmektedir. Yüksek fırınlarda boratlar ile asidik ortam azaltılarak refrakter ömürlerinde artış sağlanmaktadır [12]. Sanayide ise birçok alanda bor madeninin kullanıldığı Şekil 3.1 gösterilmektedir.

Çizelge 3. 2. Bor madeni kullanım alanları [13].

<b>Sektör</b>	<b>Kullanım Alanı</b>
Savunma Sanayii	Zırhlı Araçlar
Cam Sektörü	Yüksek Dayanımlı Camlar(Uçak, Otomotiv)
Enerji	Yenilenebilir Enerji Depolanması
Demir Çelik	Cüruf Yapıcı, Alaşım Elementi, Kaplama ve Sertleştirme
Otomotiv	Hidrolik Ekipman, Koruyucu Ekipman(Hava Yastığı), Ses Yalıtımı
Uzay ve Havacılık	Sıcaklık ve Aşınmaya Dayanıklı Malzemeler

### 3.2. BORLAMA İŞLEMİ

Borlama endüstride son derece sert ve aşınmalara karşı dayanıklı yüzeyler elde edilebilmesi için yaygın olarak kullanılan güvenilir ve işlevsel bir yüzey sertleştirme yöntemidir. Termal enerji ile bor atomlarının malzeme yüzeyinde yayılması ve iş parçası ile borürlerin oluşması işlemidir. Metalin yüzeyinde bor atomunun difüzyonu olarak da isimlendirilmektedir. Borlama işlemi, temperlenmiş çelikler, sıcak iş takım çelikleri, yapı çelikleri, paslanmaz çelikler, dökme demirler, metal tozlara, karbürlere, nikel, molibden, titanyum, krom, niyobyum, kobalt gibi demir dışı metallere ve bu metallerin yapmış olduğu alaşımlara uygulanabilmektedir [13] .

Borlama işlemi yapılacak malzeme 700 – 1200 °C sıcaklık değerleri arasında yaklaşık olarak 1-12 saat zaman zarfında katı, sıvı, gaz ve macun bir madde ile temas edilerek gerçekleştirilir. Diğer birçok yüzey sertleştirme işleminin aksine birçok metal ve mühendislik çeliklerinin gelişmiş fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip sert borür tabakası oluşturur. Borür tabakaları 2000 HV ve TiB<sub>2</sub> ile yapılan bileşiklerde 3370 HV'ye kadar sertlik değerleri elde edilebilir. Sertlik değerlerinin yüksek olmasına rağmen yüzey sürtünme katsayıları düşüktür [14].

Borlanmış ürünler çok çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılmıştır ve malzemelerde oluşan yüksek sertlik, özellikle aşındırıcı parçacıkların neden olduğu

hasarlanmalara karşı dayanıklı olmalarını sağlamaktadır. Borlanmış çeliklerin mekanik ve kimyasal davranışını etkileyen bor tabakasının kalınlığına borlama işlemi sıcaklığı, proses süresi ve numunenin yüzeyini kaplayan bor yoğunluğu etki etmektedir. Karbon oranı ile alaşım oranı düşük çelikler için ortalama borür katman kalınlığı 50 ile 250 mm aralığında, alaşım oranı yüksek çelikler için ortalama borür katman kalınlığı 25 ile 76 mm arasında değişmektedir. Ayrıca borür tabakasının kalınlığı da borlama işlemine tabi tutulan malzemelerin boyutlarına ve yüzey pürüzlülüğüne doğrudan etki etmektedir. [15].

### **3.2.1. Borlama İşleminin Avantajları**

Borür katmanının yüksek sertlik ve erime sıcaklığı kazanması borlama yönteminin en belirgin avantajıdır. Düşük karbonlu çeliklerin yüzeyinde oluşan borür tabaka sertliği, geleneksel sertleştirme yöntemleri nitrasyon ve sementasyona göre oldukça yüksektir. Bu sertlikler takım çelikleri ve krom kaplamaların değerlerinden çok daha yüksek, tungsten karbür değerlerinin ise eşdeğeridir. Elde edilen sertlik yüksek sıcaklıklarda (550-600 °C) borür tabakasının sertliği korunabilmektedir [16]. Sert metaller ile bor kaplanan çeliklerin yer aldığı tablo çizelge 3.2’de verilmektedir. Yüksek sertlik ve düşük sürtünme katsayısı aşınma mekanizmalarının meydana çıkmasının önlenmesinde fayda sağlamaktadır. Bu sebeple kalıp imalat sektöründe takım çeliklerinin yerine daha üstün özelliklere sahip kolay işlenen borlanmış çeliklerin kullanımı mümkün olmuştur. Bunun etkisiyle takım yağlayıcı kullanımında da azaltmalar gerçekleşmiştir. Borlama prosesi, demir içerikli parçaların seyrelmiş asitli ortamlarda korozyon direncini arttırmaktadır [17]. Borlanmış malzemelerin yorulma ömürleri aşındırıcı ortamlarda yüksektir. Katı ortamda malzeme yüzeyleri temiz olarak çıkmakta temizlik işlemine ihtiyaç bulunmamaktadır.

Çizelge 3.3. Borlanmış çelikler ve sert malzemelerin sertlik değerlerinin karşılaştırılması [13].

<b>Malzeme</b>	<b>Mikrosertlik (Kg/mm<sup>2</sup> veya HV)</b>
Borlanmış yumuşak çelik	1600
Borlanmış AISI H13 kalıp çeliği	1800
Borlanmış AISI A2 çeliği	1900
Su verilmiş çelik	900
Su verilmiş ve temperlenmiş H13	540-600
Su verilmiş ve temperlenmiş A2 çeliği	630-700
Yüksek hız çeliği BM 42	900-910
Nitrülenmiş çelik	650-1700
Sementasyonlu düşük alaşımlı çelik	650-950
Sert krom kaplama	1000-1200
Sementit karbürler, WC+Co	1160-1820(30kg)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +ZrO <sub>2</sub> seramikler	1483(30kg)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +TiC+ZrO <sub>2</sub> seramikler	1730(30kg)
Sialon seramikler	1768(30kg)
TiN	2000
TiC	3500
SiC	4000
B4C	5000
Elmas	~10000

### 3.2.2. Borlama İşleminin Dezavantajları

Borlama işleminde dezavantajları ve bazı sınırlamaları bulunmaktadır. Borlama teknikleri esnek bir yapıya sahip değildir. Gaz atmosferinde sementasyon ve plazma nitrüleme gibi farklı sertleştirme yöntemlerine nazaran işletme maliyetleri yüksektir. Esnek gaz ortamında sementasyon ve plazma nitrüleme işlemleri, kısa zamanda ve az çabayla borlama işlemine göre avantajlar sağlar. Bununla birlikte, yüksek sertlik ve

sürekli olarak yüksek aşınma-korozyon direnci istendiği koşullarda borlama prosesi tercih edilir. Borlama, ucuz iş gücünün olduğu yerlerde kullanılan bir prosestir.

İşlem gören ekipmanların bor yüzey kalınlığının %5 ile %20 oranında boyutsal olarak arttığı gözlemlenmektedir. Kalınlıktaki artış, malzemenin cinsine ve ortam koşullarına bağlıdır. Bu artış hassas yüzeylerde çalışılması gerektiğinde kaplamanın işlenmesi gerekmektedir. Elmas takımlarla işleme yapılmadı durumlarda yüzeyde kaplamada kırılmalar meydana gelmekte ve kalitesinin etkilenmesine sebep olmaktadır [18].

Birçok çelikte borlanma sırasında korozyon dayanımında bir artış gözlemlenmesine rağmen, ters eğilme mukavemetinde çok küçük bir artış elde edilir. Karbürleşmiş ve nitrürlenmiş çelik alaşımlarına göre yorulma dayanımları yüksek basınç altındaki yüzeylerde (2000 N) zayıflık göstermektedir. Bu nedenle vidalar ve dişli parçaların borlama işlemi oldukça sınırlıdır [19].

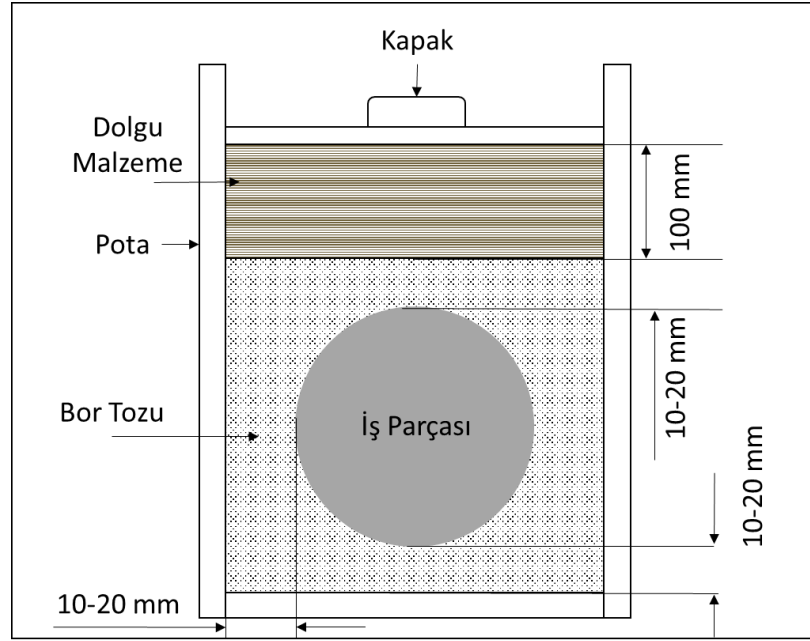
### **3.3. BORLAMA YÖNTEMLERİ**

Borlama, termokimyasal ve fiziksel yöntemler olarak iki ana başlık altında uygulanmaktadır. Yöntemler arasında en fazla tercih edileni termokimyasal metodlardır. Bor atomunun sıcaklığın etkisi ve metal difüzyonu prensibine dayanan kaplama yöntemidir. Bunlar kutu, pasta, sıvı, plazma ve gaz ortamında borlama yöntemleridir. Kimyasal olmayanlar ise fiziksel buhar biriktirme yöntemi (PVD), kimyasal buhar biriktirme (CVD), plazma ile iyon biriktirme yöntemleri de son dönemde yaygın olarak kullanılmaktadır [13].

#### **3.3.1. Kutu Borlama**

Bu borlama yöntemi, malzemenin borlayıcı ortamda bor atomlarının iş parçası yüzeyinde yüksek sıcaklık etkisiyle difüzyona uğratma işlemidir. Borlama işlemi malzeme yapısında kimyasal özelliklerin değişimine sebep olmaktadır [20]. Borlanacak malzeme yüzeyinin çevresi 10-20 mm borlama tozu ile kaplanır. Tozun üst kısmına yaklaşık 100 mm SiC veya benzeri dolgu malzeme koyulur ve kapak ile arasında hava girişi engellenmiş olur. İşlemin sementasyona benzemesi, prosesin

basitliği, kolay temizlenebilirliği ve ekonomik yönden ucuz olması gibi sebepleriyle pek çok alanda tercih edilen bir yöntemdir. Kutu olarak paslanmaz elik veya alaşımsız elik potalar, alümina kutular tercih edilmektedir. İşlem sırasında homojen bir ısı dağılımlı sağlanmalı sağlanması önemlidir. Şekil 3.1.'de kutu borlama prosesi gösterilmektedir [21].



Şekil 3. 1. Kutu borlama yönteminin Şematik görüntüsü [29].

Literatürde yer alan katı borlama bileşimleri % ağırlıkları [13];

- %5 B<sub>4</sub>C, %90 SiC, %5 KBF<sub>4</sub>
- %20B<sub>4</sub>C + %5 KBF<sub>4</sub> + %75 Grafit
- %50 B<sub>4</sub>C, %4 5SiC, %5 KBF<sub>4</sub>
- %(40-80) B<sub>4</sub>C + %(20-60) Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
- %60 B<sub>4</sub>C + %5 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + %5 NaF + %30 Demir Oksit
- %84 B<sub>4</sub>C, %16 Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>
- %85 B<sub>4</sub>C, %15 Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>
- %100 B<sub>4</sub>C
- %50 Amorf bor +%1 NH<sub>4</sub>F.HF + %49 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
- %95 Amorf bor, %5 KBF<sub>4</sub>
- Amorf bor (%95-97)

Borlama işleminde yaygın olarak bor karbür ( $B_4C$ ), amorf bor ve ferro bor kullanılmaktadır. Bu kaynaklar yüzeyde kalın bir tabaka oluştururlar. Ayrıca piyasada Bortec firmasının patentli Ekabor ürünleri, hassas borlama işlemlerinde çokça kullanılmaktadır. Çizelge 3.4.'de sektörde birçok alanda kullanılan Ekabor ürünlerinin özellikleri gösterilmektedir. Ekabor HM en yüksek borlayıcı etkiye sahip ticari üründür. Özellikle yüksek alaşımlı, düşük alaşımlı ve alaşımsız çeliklerin borlanması için kullanılmaktadır [22].

Çizelge 3. 4. Ekabor bor ürünleri [18].

Borlama Ürünü	Tane Boyutu	Yoğunluğu ( $gr/cm^3$ )	Ürün Özelliği
Ekabor <sup>®</sup> 1	<150 $\mu m$	1,90	Yüzey kalitesi yüksek, parça yüzeyine yapışmaya yüksek eğilim.
Ekabor <sup>®</sup> 2	<850 $\mu m$	1,70	Yüksek yüzey kalitesi, işlem sonrası yüzeyden kolay ayrılma
Ekabor <sup>®</sup> 3	<1400 $\mu m$	0,95	Yüzey kalitesi çok iyi, işlem sonrası toz ayrılma yüksek
Ekabor <sup>®</sup> HM	<150 $\mu m$	0,95	Çok iyi yüzey kalitesi, sert metaller, ve kalın parçalar için
Ekabor <sup>®</sup> Pasta	-	1,90	Fırçayla sürme ile püskürtme yöntemleri ile kullanım
Ekabor <sup>®</sup> Ni	<150 $\mu m$	-	Nikel bazlı alaşımlar için
EKrit <sup>®</sup>	$\leq 420 \mu m$	1,55	Dolgu malzemesi

### 3.3.2. Pasta Borlama

Kutu borlama yönteminin zor ve maliyetli olduğu zamanlarda süre kaybının önlenmesi için tercih edilen bir yöntemdir. Bu yöntem son zamanda yaygın olarak kullanılmaktadır [23]. Kritik alanlarda kullanılan karmaşık şekilli ekipmanların tüm yüzeylerini veya istenilen kısmi yüzeylerin hızlı bir şekilde borlanması olanak sağlamaktadır. Borlama işleminde %45  $B_4C$  (0,127- 0,0635 mm tane boyutu) veya yaygın olarak tercih edilen borlama karışımı  $B_4C + SiC + KBF_4$  iyi bir bağlayıcı ile

(Bütül asetat, selüloz çözeltisi veya hidrolize etil silikat) kullanılmaktadır. İşlem malzeme üzerine fırça yardımı veya püskürtme ile 1-2 mm civarında tabaka oluşturacak şekilde tekrar tekrar uygulanır. Demir esaslı malzemeler, 800-1000 °C fırın sıcaklık aralığında 4-6 saat sürede ısıtılmaktadır. Macun borlama işleminde mutlaka koruyucu atmosfer (argon, NH<sub>3</sub>, ve N<sub>2</sub>) kullanılması gerekmektedir. Koruyucu atmosfer borlayıcı ürünün davranışına büyük oranda etki etmektedir. İşlemden argon ve NH<sub>3</sub> en başarılı sonuçları vermektedir. Bu yöntem ile 1000 °C sıcaklıkta 20 dakika borlama sonrasında 50 µm yüzey katman kalınlığına ulaşılmaktadır [15]. İşlem sonrasında macun yıkama, fırçalama ve püskürtme yöntemleri ile kolaylıkla temizlenebilmektedir.

### **3.3.3. Sıvı Borlama**

Bu işlemde bor verici ortam sıvı akışkandır. İşlem uygulanacak malzemenin 900 °C ve üzeri sıcaklıklarda 2-6 saat aralığında sıvı akışkan içerisinde bekletilerek gerçekleştirilir. Elektrolizle sıvı borlama ve elektriksiz sıvı ortamda borlama olmak üzere iki yöntemi bulunmaktadır.

Malzemeler, işlem sırasında borlayıcı sıvı akışkan yüzdürüldüğü ve akışkandan ayrıldığı zaman termal şoka maruz kalabilir, bunun etkisiyle çatlama ve deformasyon hasarı oluşabilir [24].

#### **3.3.3.1. Elektriksiz Sıvı Ortamda Borlama**

Bu işlem, ısı ve kütle transferini mümkün kılan bir seviyeye düşürmek için gerekli olan 900-950 °C sıcaklıklarda erimiş boraksın (Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>) ergimesi ile gerçekleşir. Boraksın SiC ile bileşiği borlama banyosunun viskozitesini arttırdığı için pratikte kullanılmamaktadır. Bunun yerine, genellikle %30 oranında B<sub>4</sub>C ilaveleri tercih edilir. Ferrotitanyum ve alüminyum ilaveli boraks içeren banyoların, yüksek kaliteli katmanlar üretmek için düşük maliyetlerle tatmin edici bir şekilde kullanılabilir. B<sub>4</sub>C'nin %20 oranında daha etkili bir indirgeyici olan ferroalüminyum ile değiştirilmesiyle borlama işlemi daha da geliştirildiği gözlemlenmiştir [14]. Bununla birlikte, %55 boraks, %40-50 ferroboron ve %4-5



ferroalüminyum içerikli bir tuz banyosu karışımı, borlamada üstün sonuçlar vermektedir. Tuz banyosu sıcaklığının 850 °C altına düşmesi banyo içerisindeki boraksın viskozitenin artmasına sebep olmaktadır. Bu da sistemin en önemli dezavantajlarından biridir [20].

### 3.3.3.2. Elektrolizle Sıvı Borlama

Bu yöntem en eski ticari borlama tekniğidir. Genel olarak grafit bazlı bir kaptan, katot için demir bazlı iş parçası anot için grafit elektrot, elektrolit için de boraks ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ) kullanılır. İşlem 900 ile 950 °C sıcaklıkta ve 4 ile 6 saat aralığında 0,15 ile 0,20  $\text{A}/\text{cm}^2$  akım ile gerçekleşir. Elektroliz sırasında parça üzerinde homojen bir kaplama sağlanması için döndürme işlemi yapılır. Yüksek akım kullanılır ise düşük alaşımlı çeliklerin çok ince kaplamaları çok kısa sürede yapılabilir. Yüksek alaşımlı özel çeliklerde ise düşük akım kullanılarak uzun süreli borlama işlemi uygulanır. Borür yüzey tabakası kalınlığı, borlama zamanına, borlama çalışma sıcaklığına ve akım işlemi yoğunluğundaki yükselişe bağlı olarak arttığı tespit edilmiştir [24]. Ergimiş durumdaki tetraborat iyonları nötr hale gelerek borik aside indirgenir ve oksijen serbest hale gelir. Elektroliz sıvı borlamada gerçekleşen reaksiyonlar ;



Oksijen, grafit anot ile reaksiyona girerek  $\text{CO}_2$  oluşturur. Sodyum iyonları katot bölgesinde nötr hale gelir ve borik asit ile reaksiyona girer. Bu şekilde katot çevresinde yüksek bir borlama potansiyeli ortaya çıkmış olur [25].

### 3.3.4. Gaz Borlama

Gaz borlama prosesinde bor hidrürler ve bor halojenlerdir gazları kullanılmaktadır. Gaz borlama işleminde kullanılan ortamlar [27];

- Diborane ( $\text{B}_2\text{H}_6$ ) ve  $\text{H}_2$  gazları,
- Boron Halid ve  $\text{H}_2$  veya (75:25  $\text{N}_2$  ve  $\text{H}_2$ ) gazları,

- $(\text{CH}_3)_3$  ve  $(\text{C}_2\text{H}_5)_3\text{B}$  organik bileşikler.

Gaz atmosferinde borlama prosesi için karmaşık ekipman ihtiyacı vardır. Buna karşın gaz borlama prosesi oldukça basittir. Her işlemin olduğu gibi bu tekniğinde avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Avantajları [20];

- Gaz borlama işleminden sonra yüzeyde homojen bir bor tabası kalınlığı sağlaması ve işleminden sonra temizlemeye gerek duyulmamaktadır,
- Bor potansiyelinin ayarlanabilir olması sebebi ile bor tabakasının tek tabaka halinde olması,
- Karmaşık geometriye sahip parçaların kolaylıkla borlanabilmesi.

Dezavantajları ise;

- Gübre sektörü, dezenfektan sektörü, tekstil ve boya sanayisi, fotoğrafçılık sektörü, gümüş temizliği gibi birçok alanda kullanılan fakat bir o kadarda tehlikeli sınıfta bulunan hidrojen siyanür zehirlilik limiti 10 ppm, borlama işleminde kullanılan diboran zehirlilik limiti 0,1 ppm'in altındadır,
- Diboranın maliyeti hidrojen kullanılarak seyreltilse bile çok fazladır [16].

$(\text{B}_2\text{H}_6)$ - $\text{H}_2$  karışımı, yüksek toksik ve patlayıcı doğası sebebi ile ticari olarak borlama işlemine uygun değildir. Organik bor bileşikleri kullanıldığı zaman yüzeyde karbür ve borür tabakaları aynı anda oluşmaktadır. Bor tribromid ( $\text{BBr}_3$ ) pahalı oluşu ve su ile reaksiyona girmesi sebebi ile işlenmesinin zorluğu, bor triflorür ( $\text{BF}_3$ ) yüksek indirgeme sıcaklığı ve hidrojen florür ( $\text{HF}$ ) gazı ortaya çıkarması sebebi ile en çok  $\text{BCl}_3$  tercih edilmektedir [26].

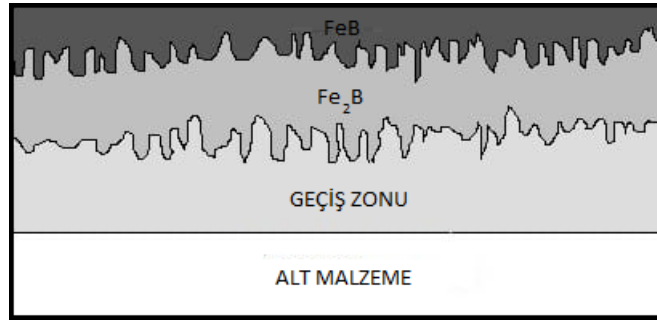
İşlem uygulanacak malzeme 1:15  $\text{BCl}_3+\text{H}_2$  gaz içerisinde 700 °C ile 950 °C ortam sıcaklığında, 67 KPa (0,67 bar) yük altında borlanmaktadır. Güncel çalışmalarda ise hidrojen yerine 75:25 oranında aozt ve hidrojen kullanıldığını ve sonucunda FeB katmanının azaldığı gözlemlenmiştir. Böylelikle iyi kalitede bor katmanlarının elde edildiği ve titanyum alaşımlarında da uygulanabildiği tespit edilmiştir [28].

### 3.3.5. Plazma Borlama

$B_2H_6-H_2$  ve  $BCl_3-H_2Ar$  bileşikleri plazma ile borlama yönteminde kullanılmaktadır. Proseste kutu borlama veya sıvı ortamda borlama işlemlerinin mümkün olmadığı ve  $600\text{ }^\circ\text{C}$  gibi düşük sıcaklıklarda yüzeyde bor tabakası oluşturmak için kullanılmaktadır. [28]. Plazma borlama yönteminin, geleneksel olarak kullanılan borlama çeşitlerine göre yüksek avantajları bulunmaktadır. Plazma borlama prosesinde oluşan enerji, diğer borlama işlemlerine nazaran düşük sıcaklıklarda oluşabilmekte ve parçada oluşan şekil bozukluk seviyesini düşürmektedir. Geleneksel borlama yöntemlerinde bu sıcaklıklarda çalışmak mümkün değildir. [30, 31].

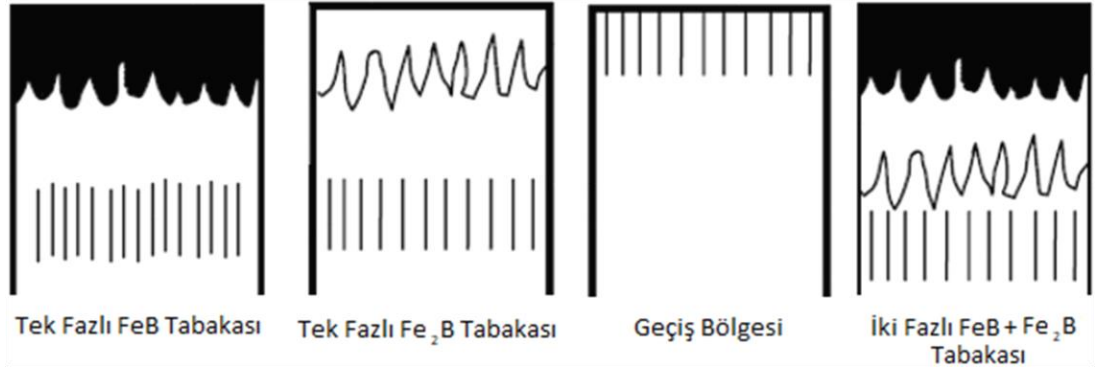
### 3.4. BORÜR TABAKASININ ÖZELLİKLERİ

Borür tabakası, borlama işlemine tabii tutulacak malzemenin kimyasal yapısına, borlayıcı ortama, borlama yöntemine, borlama süresine ve ortam sıcaklığına bağlı olarak düz bir görünümde veya parmaksı (dişli) bir yapıda bulunabilir. Borlama işlemi sonrasında yapıda Şekil 3.2’de görülen borür tabakası ve geçiş zonu meydana gelmektedir [32].



Şekil 3. 2. Borür tabakasının şematik gösterimi [33].

Borür tabakalarının yapısı ve görünüşleri incelenerek geliştirilmiş olan tanılama sistemi ise Şekil 3.3’te verilmektedir. Bor kaplanmış bir malzemenin metalografik incelemeler sonrasında borür tabaka kalınlığı, dişli veya düz görsel yapısı ve gözeneklilik yapısı tespit edilebilmektedir.



Şekil 3. 3. Borür tabaka tipleri [33].

Bor tabakasının tiplerinin görüntüsünde, yüzey kaplama yapısı özellikleri tespit edilemezken, malzeme yüzeyinde meydana gelen dişli yapı tabakanın yapısı hakkında bilgi vermektedir. Bor tabakası tipleri arasında yer alan tek fazlı ( $Fe_2B$ ) yapı, endüstriyel uygulamalar arasında en çok tercih edilen yapıdır. Tek fazlı  $Fe_2B$  borür tabaka yapısının  $FeB$  fazına göre daha dayanıklı olması, işlem sonrasında ısıl işlem uygulanabilme eğilimi en belirgin avantajları arasında yer almaktadır [33].

Dişli bir görünüşü bulunan tek fazlı  $Fe_2B$  borür tabakası, çift fazlı  $Fe_2B+FeB$  tabakalarına nazaran daha fazla tercih edilme sebebidir. Yapı içerisinde bulunan  $FeB$  ve  $Fe_2B$  fazları temas ettiği noktalarda çekme ve basma gerilim kuvveti uygulamaları sonucu yüzeye paralel ve dik ilerleyen kılcal çatlaklar meydana gelmektedir. Yapı içerisindeki  $FeB$  çekme,  $Fe_2B$  ise basma etkisi yaratmaktadır. Bu sebeple termal şok veya mekanik işlemler sırasında yüzey katmanında kopmalar meydana geldiği için minimum  $FeB$  yapısına sahip yüzey kaplamaları elde edilmesi istenmektedir. Çift fazlı yapılarda yüzeyin altında gözenekli yapı görülmektedir. Bor kaplı yüzeylerde borür tabakasının ince olması, kaplamanın kopmasının ve gözenekli olma riskinin düşük olduğu gözlemlenmiştir.  $Fe_2B+FeB$  çift fazlı yapısı tuz banyosu ve vakum ortamında uzun süre  $800\text{ }^{\circ}C$  çalışma ortamında tutulur ise tek fazlı  $Fe_2B$  yapısı elde etmek mümkün olacaktır [34, 35].

Çelik kimyasal yapısında bulunan elementler,  $FeB$  ve  $Fe_2B$  tabakalarının bor yayınımları sırasında yapı içerisindeki karbon ve silisyum borür katmanından malzemenin merkezi yönünde ilerletilirler. Bu işlem sonrasında borür tabakası ile malzeme arasında geçiş

bölgesi olarak isimlendirilen yapı elde edilmiş olur. Bölgenin mikroyapısı, malzemenin yapısı ile değişiklik gösterir ve borür tabakasına göre daha kalındır [36].

Borür faz yapılarının oluşumu, borlayıcı ortamın bor karışımına bağlı olarak, yapının kristal yapısında çizgi şeklinde görülen dislokasyon bölgelerinde ve tane sınırı benzeri mikro hatalı, yüzey kusurları ve pürüzlülük benzeri makro hatalı alanlarda meydana gelmektedir. [13]. Çizelge 3.5'te Fe<sub>2</sub>B ve FeB yapılarının tipik özellikleri gösterilmektedir.

Çizelge 3. 5. Fe<sub>2</sub>B ve FeB yapılarının tipik özellikleri [13].

Özellik	Fe <sub>2</sub> B	FeB
Kristal Yapı	Hacim Merkezli Teragonal Yapı	Ortorombik Yapı
Latis Parametresi	a=5,078 c=4,28	a=4,053 b=5,495 c=2,946
Bor İçeriği (%)	8,83	16,23
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	7,43	6,75
Elastisite Modülü (GPa)	280-295	590
Mikrosertlik (GPa)	18-20	19-21
Ergime Sıcaklığı (°C)	1389-1410	1540-1657
Oluşum Entalpisi (kJ/mol)	-71,13	-71,13
Gibbs Serbest Enerjisi (kJ/mol)	-71,75	-69,47
Termal Genleşme Katsayısı (ppm/°C)	(200-600°C) 7,65 (100-800°C) 4,25	(200-600°C) 23
Termal İletkenlik (W/m.°K)	(20°C) 30,1	(20°C) 12,0
Elektriksel Direnç (10 <sup>-6</sup> Ω.cm)	38	80
Renk	Gri	Gri

## BÖLÜM 4

### NİTRASYON

Piyasada, sertleştirilmiş parçaların diğer parçalara göre daha yüksek seviyede aşınma direnci sağladıkları görülmektedir. Bu sebeple günümüzde kullanılan birçok iş parçası, istenilen sertliğe ulaşabilmesi amacıyla ısıtılma işlemi prosesine tabii tutulmaktadır. Bunun için kullanılan en yaygın yüzey sertleştirme yöntemlerinden biri de nitrasyondur. Parça yüzeyinin azot ile zenginleştirilerek sertlik elde edildiği termokimyasal bir yöntemdir.

1900 yıllarında başında bulunan en eski termokimyasal proseslerden biri olan nitrasyon birçok endüstriyel alanda hala kullanılan bir uygulamadır. Nitrasyon temel olarak 500-600 °C derece aralığında yani ferrit faz bölgesinde uygulanan bir yöntemdir. İşlem esnasında çelik malzemenin yüzey bölgesine azot atomlarının ara yer atomu olarak yerleşmesi prensibine dayanmaktadır [37].

Nitrasyon uygulaması, sementasyon ve borlama işlemlerine göre daha düşük sertleştirme sıcaklıklarda yapılmaktadır. Östenit sıcaklığına çıkılmadığı için nitrasyon işlemi sonrasında parçanın çekirdek bölgesi herhangi bir faz değişimine uğramaz. İşlemden amonyak gazı kullanılmaktadır.  $NH_3$  sıcaklığın etkisiyle azot ile hidrojen atomlarına ayrışmakta ve oluşan reaksiyonlar sonrasında metal üzerinde metal nitrit tabakaları oluşmaktadır [38].

#### 4.1. NİTRASYON ÇEŞİTLERİ

Nitrasyon işlemi gaz, plazma ve sıvı şeklinde sınıflandırılmaktadır. Plazma nitrasyon yöntemleri arasında en hızlısı olan gaz nitrasyon işlemi diğer yöntemlere göre daha uzun sürmektedir.

#### 4.1.1. Gaz Nitrasyon

Gaz nitrasyon, atmosfer kontrollü bir fırın içerisinde belirlenen bir süre ve sıcaklıkta çelik parçanın yüzeyine azot atomlarının difüze olması ile gerçekleşmektedir. NH<sub>3</sub>, 500-600 °C'de azot ve hidrojene ayrışmaktadır. Serbest kalan azot atomları ise çelik yüzeyine difüze olmaktadır. Hidrojen ise reaksiyona girmeyerek fırın atmosferine atılmaktadır. Gaz nitrüleme, karmaşık şekilli parçaların nitrülenmesi için en elverişli yöntemdir. Proseste nitrüleme süresi arttıkça parça yüzey sertliği azalmaktadır [39].

Fırın içerisinde oluşan reaksiyonlar;



#### 4.1.2. Plazma Nitrasyon

Bu yöntemde gaz nitrasyonda prosesine göre farklı bir donanım kullanılmaktadır. Proses çok iyi bir şekilde vakumlanmış soğuk bir kaplama ünitesinde gerçekleştirilmektedir. Çalışma parçası negatif yüklü, kaplama ünitesi ise pozitif yüklü olarak görev yapmaktadır. Sisteme önce hidrojen ardından ise hidrojen ve azot gazı karışımı ilave edilir. Hidrojen gönderme işlemi parçanın yüzeyini ısıtarak (350 - 600 °C) temizler. Sisteme azotun ilavesi ile nitrüleme prosesi başlar ve işlem süresince devam etmektedir.

Plazma nitrasyonda, diğer yöntemlerde önemli olan süre ve sıcaklık dışında gaz birleşimi ve akım yoğunluğu önemli bir etkidir. Parça üzerinde ölçüsel ve şekilsel bir değişiklik meydana gelmemektedir [37].

### 4.1.3. Sıvı Nitrasyon

Sıvı nitrasyon, ergimiş potasyum siyanür ve sodyum tuzları kullanılarak  $570 \pm ^\circ\text{C}$  sıcaklıklarda yapılmaktadır. Bu yöntemde azot ile beraber siyanürün içerisinde karbonun bir miktarı az da olsa çeliğe difüze edebilmektedir. Bu yöntemde gaz nitrürleme yönteminde görülen temperleme tehlikesi bulunmamaktadır. Süreye bağlı olarak yüzeyde boşluk oluşumunun önlenmesi için hava ile kontrol sağlanmaktadır [38].

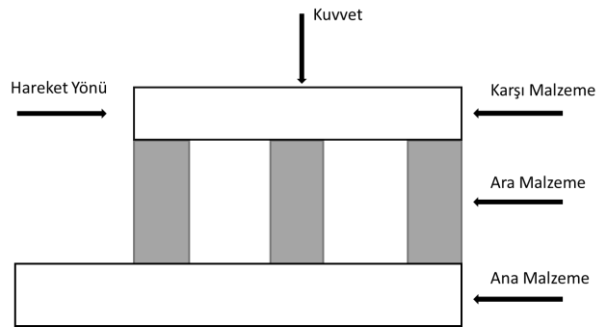


## BÖLÜM 5

### AŞINMA

Günümüzde birbirleri ile temas halinde bulunan malzemelerin, sürtünme sonucu oluşan aşınma makine ve imalat sektöründe çok büyük ekonomik kayıplara sebebiyet vermektedir. Aşınma, mekanik hareketler ile malzeme yüzeyinde kopma veya parçalanmaya sebep olan hasarlanma olarak tanımlanabilir. Aşınma sadece mekanik değil kimyasal olarak da oluşabilmektedir. Katı yüzeyler temas ederek 3 farklı şekilde malzeme kaybı ortaya çıkmaktadır. Bunlar kimyasal çözünme, kimyasal erime ve yüzeyden fiziksel ayrılmalardır [40].

Aşınma işleminde 5 ana unsur bulunmaktadır. Bunlar, aşınan ana malzeme, aşındırıcı karşı malzeme, ara malzeme, yük ile harekettir. Sıcaklık faktörü de işlem esnasında önemli bir faktörü olan unsurlardan biridir. Aşınan ana malzeme ve aşındırıcı karşı malzemeler aşınma çifti şeklinde adlandırılır. Aşınma çifti ve ara malzeme aşınma kombinasyonunu oluşturur. Ara malzeme sert tanecik yapıları sıvı, gaz ve buhar halinde kullanılabilir. Bu unsurların oluşturduğu sisteme ise “Tribolojik Sistem” ismi verilmiştir [41]. Aşınma sistemini oluşturan yapılar Şekil 5.1’de verilmektedir.



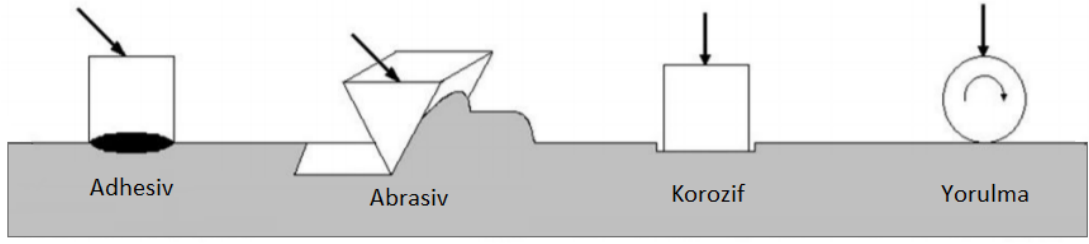
Şekil 5. 1. Aşınmayı oluşturan unsurlar.

Temas halinde olan malzemelerin yüzeyleri yağlayıcı kullanılarak korunsa ve oksit filmler ile kaplan bile mekanik yük altında iki yüzey doğrudan birbirleri ile temas halinde kalabilir ve aşınmaya sebep olabilir. Oluşan hasarlar yağlama, malzeme seçimi, uygun tasarım ile en aza indirgenebilir. Aşınmaya etki eden faktörler dört ana grupta sınıflandırılmaktadır [40].

1. Ana malzemeye bağlı olan faktörler;
  - Malzemenin sertliği
  - Kristal yapısı
  - Deformasyon davranışı
  - Elastisite modülü
  - Yüzey pürüzlülüğü
  - Malzeme boyutu
2. Karşı malzemeye bağlı olan faktörler ile aşındırıcı etkisi
3. Ortam şartları;
  - Sıcaklık
  - Nem
  - Atmosfer
4. Servis şartları;
  - Basınç
  - Hız
  - Kayma yolu

### **5.1. AŞINMANIN SINIFLANDIRILMASI**

Birçok endüstriyel alanda karşılaşılan aşınma problemi, temas alanlarında meydana gelen fiziksel ve kimyasal değişiklikler sebebi ile kendi arasında birden fazla çeşide ayrılmaktadır. Genel olarak aşınma çeşitleri adhesiv, abrasiv, erozif , korozif aşınma ve yorulma, kayma aşınması şeklinde sınıflandırılmaktadır.



Şekil 5. 2. Aşınma çeşitleri [47].

### 5.1.1. Adhesiv Aşınma

Adhezyon, birbirinden farklı iki madde arasında meydana gelen ve bu maddelerin atomlarının birbirlerine yapışmasını sağlayan moleküler çekim kuvvetidir. İki metal, bu kuvvet etkisi altında iken yüzeyde bulunan parçacıkları birbirlerine yapışır. Metallerin hareketine devam etmesi ile parçacık oluşumu ve kopmalar meydana gelir. Adhesiv aşınma en yaygın olarak karşılaşılan aşınma türüdür. Malzemelerin birbirleri ile sürtünmeleri sonucunda oluşan metal-metal aşınma olayı olarak da tariflenir. Temas halindeki iki yüzeye bir yük uygulandığında, malzeme yüzeyinde bir kaplama olsa dahi aşınma meydana gelme olasılığı bulunmaktadır [44].

Kuru veya uygun yağlanmamış yataklarda, kesici takımlarda, tel çekme ve soğuk çekme kalıplarda, dişlilerde ve pistonlarda sıkça adhesiv aşınma görülmektedir. En fazla karşılaşılan aşınma türü olmasına rağmen çoğunlukla hasarın büyümesine ve hızlıca parçada yayılmasına sebep olmamaktadır [45].

Adhesiv aşınmayı önlemek için [46];

- Seçilen malzemelerin birbirleri ile benzer olmaması ve kolay alaşım yapabilen malzeme olmamasına dikkat edilmelidir. Ayrıca malzemelerin seçilirken biri sert diğeri yumuşak olacak şekilde seçilmesi aşınma etkisini azaltmaktadır.
- Metal yüzeyler arasında kimyasal yüzey kaplamaları aşınma oluşumunu engellemektedir.
- İşlem esnasında uygun yağlama sisteminin kullanılması sürtünme kuvvetini azaltarak oluşacak ısıyı engelleyecektir. Yüzeyde oluşacak parça kaynaması önlenerek aşınma süreci yavaşlatılmaktadır.

- Malzemelerin yüzeylerin mümkün olduğunca pürüzsüz olması aşınma oluşumunu önlemektedir [47].

### 5.1.2. Abrasiv Aşınma

Abrasiv aşınma, katı bir yüzeyde hareket eden sert parçacıklar veya sert çıkıntılardan kaynaklanan aşınma olarak tanımlanır. Metallerde abrasiv aşınma çoğunlukla metalik olmayan malzemeler sebebiyle görülmektedir. Ancak metalik parçacıklar da aşınmaya neden olabilir. Genel olarak, bir malzeme yalnızca kendisinden daha sert bir malzeme tarafından ciddi şekilde aşınır veya çizilir. Abrasiv aşınma özellikle tarım, madencilik, maden işleme, hafriyat gibi endüstriyel alanlarda ve esas olarak toz, kaya ve minerallerin işlendiği her yerde karşılaşılmaktadır. Örnekler arasında cevher yükleme/taşıma kovaları, kırıcılar ve damperli kamyon yatakları verilebilir [42].

Aşınmaya malzemenin kimyasal içeriği, sertliği, yüzey pürüzlülüğü, şekli ve bulunduğu ortam önemli oranda etki etmektedir. Yüzeyde sürtünme sebebi ile oluşacak ısınma, malzemenin mekanik ve kimyasal yapılarında değişime neden olacaktır. Genellikler aşınma bölgesinde oluşan sıcaklık artış, malzeme yüzeyinde sertliğin düşürür, oksidasyona oluşmasını sağlar ve plastik deformasyonu kolaylaştırdığı için aşınma miktarı artacaktır. Ortamdaki nem oranı aşınmayı etkileyen faktörler arasında yer alır. Bağlı nem oranı arttıkça sürtünme katsayısı azalacaktır. Buna bağlı olarak aşınma miktarı da azalma eğilimi gösterecektir. [47].

Abrasiv aşınmayı önlemek için;

- Malzeme yüzeyleri, kaplama uygulamaları veya ısıl işlem ile sertleştirme uygulaması abrasiv aşınma oluşum hızını azalmaktadır.
- Çevresel ortamda malzeme yüzeyleri arasına dışarıdan sert parçacıkların girmemesi için işleme uygun seçimi yapılan sızdırmazlık kullanılmalıdır.
- Ekipmanlar sık sık talaş ve çapakta temizlenmelidir.

Abrasiv aşınmayı önlemek için malzeme yüzeyine uygulanan kuvvet azaltılarak aşınma oluşum hızı düşürülebilmektedir. Bu uygulama ile malzeme yüzey içerisinde

parçacıkların daha az batması ve çapak batması sağlanmış olacaktır. Aşınma hızı, her bir yüzeyin özelliklerine, yüzeyler arasında aşındırıcı maddelerin varlığına, temas hızına ve diğer çevresel koşullara bağlıdır. Proseste kullanılan malzeme seçimi yapılırken ısıtma işlemi uygulanmış ve kaplanmış malzeme kullanımı abrasiv aşınma oluşum hızını azaltmak mümkündür [13].

### **5.1.3. Korozif Aşınma**

Kimyasal malzemelerin, katı malzeme yüzeyleri ile etkileşime girerek parçada kütleli kayıp oluşturmaya korozif aşınma denir. Korozif aşınma esnasında adhesiv ve abrasif aşınma görülebilir. Sistemde değişen çevre koşulları sırasında malzemelerin yüzeyleri arasında titreşimlerin sebep olduğu oksit tabakası gibi bazı kimyasal reaksiyonlar görülmektedir. Oluşan oksidasyon tabakası yüzeyden sürtünme etkisi ile ayrılarak yapışma yani abrasiv aşınma oluşum hızını artırır. Yüzeyden korozif aşınma yolu ile ayrılan oksit parçaları aktif duruma geçerek bölgede tekrar oksitlenme işlemi meydana getirir ve süreç bu şekilde tekrarlanır [47].

Çeliklerde malzeme kimyasal içeriğinde alaşım elementi miktarına göre değişkenlik gösterecek şekilde yüzeylerde 0,1 mikron doğal oksit tabakası bulunmaktadır. Malzemeler, bulunan oksit tabakası sayesinde korozif ortamlara karşı bir direnç göstermektedir [48].

### **5.1.4. Yorulma Aşınması**

Birbirleri ile sürekli temasta olan parçalarda temas yüzeylerinde oluşan basınç, yüzey altında değişken büyüklükte kayma gerilmesine sebep olmaktadır. Bu gerilmeler neticesinde, parçada yorulma başlamış olur. Değişken tekrarlı yüklemelerin olduğu malzemelerde, plastik bozulma ve dislokasyona nedeniyle ufak boşluklar oluşur. Oluşan boşluklar, yüzeye yönünde hareket ederek büyür ve küçük çukurların ortaya çıkmasına neden olur. Buna yorulma aşınması ismi verilmektedir. Yorulma aşınması, titreşim zorlanmaları ile oluşan termodinamik bir kombinasyondur. Malzeme yüzeyinde, yüksek tekrar veya düşük tekrara göre yüksek çevrimli ve düşük çevrimli yorulma aşınması sistemleri oluşmaktadır [49].

Endüstride kullanılan, dönen bir shaft, mil yatağı, tekerlek göbeği, pres bağlantıları gibi dönme ve kayma temasında bulunan birçok ekipmanda oluşan tekrarlı gerilmeler aşınma hasarına sebep olmaktadır. Teğetsel yüzey gerilmesinin olmadığı durumda malzeme yüzeyinin bir miktar altında yırtılma oluşmaya başlar. Yüzey her ne kadar kusursuz olsa da malzeme içeriğinde bulunan inklüzyonlar, çatlaklar, gözenekli yapılar hasarın oluşmasına etki eden malzeme kaynaklı faktörlerdir.

Yorulma aşınmasını önlemek için [49];

- Proseste çalışan parçaların birbirleri ile olan hızları denk olacak şekilde dizayn edilmelidir.
- Malzeme yüzeyinde sistemde uygulanabilecek şekilde pürüzlülük bırakılmalıdır.
- Yüzeyde kumlama ile basma gerilmeleri oluşturulmalıdır.
- Malzemede karbüleme, nitrürleme gibi yüzey sertleştirme işlemleri uygulanmalıdır.

### **5.1.5. Eroziyon Aşınma**

Eroziyon aşınma, sıvı içerisindeki katı parçaların bir yüzeye çarpması sonucu oluşan aşınma olarak adlandırılır. Parçacıklar genel olarak bir sıvı akışkan içerisinde taşınmaktadır. Hava araçlarına çarpan yağmur damlacıkları, pompalar, hızlı akışkan aktarımı yapan ekipmanlar, türbinler eroziyon aşınma oluşan sistemlere örnektir.

Sıvı içerisinde bulunan aşındırıcıların yüzeye çarpma momentumu ve kinetik enerjisi aşınma yüzeyini etkileyen faktörler arasındadır. Ayrıca akışkan içerisinde yer alan parçacıkların yüzeye çarpma açısı, malzemeden kopan parçanın hızına etki ettiği tespit edilmiştir [50]. Aşınma hızı düşükse, malzeme yüzeyinde plastik deformasyon oluşmazken ve yüzeyde plastik deformasyon görülür. Yüksek hızlarda ise malzemede plastik deformasyon gözlemlenir. Çok yüksek hızlarda, yüzey altı kırılmalar ve yüzeyde erimeye kadar varan aşınmalar oluşmaktadır. Önemli bir faktör arasında yer alan parçacık boyutu artarsa aşınmada aynı oranda artacaktır. Akışkan içerisinde

bulunan parçaların sert ve yuvarlak yapısı olduğunda aşınma oluşma ihtimali düşük olacaktır [51]. Tablo 5.1’de çarpma açısının malzeme türlerine etkisi gösterilmektedir.

Çizelge 5. 1. Çarpma açısının malzeme türlerine etkisi [49].

Malzeme Türü	Çarpma Açısı		
	<20°	45°	90°
Elastik	Etkisi yoktur	Görülebilir bir etkisi yoktur	Malzeme yüzeyi deforme olur
Sünek	Abrasiv aşınma görülür	Her iki aşınma görülür	Deformasyon aşınması görülür
Gevrek	Düşük erozyon aşınması görülür	İleri aşama erozyon aşınması görülür	Maksimum erozyon aşınması görülür

## BÖLÜM 6

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Çalışmada 16MnCr5 sementasyon çeliklerinin ısıl işlem öncesi çekme, aşınma ve sertlik gibi mekanik özellikleri incelenmiştir. Daha sonra sementasyon çeliklerine borlama ve nitrasyon termokimyasal işlemler ayrı ayrı uygulanmış ve karakterizasyonları yapılmıştır.

Borlama işlemi, Ekabor 2 tozu kullanılarak 900 °C ve 1000 °C sıcaklıklarda 8 ile 16 saat süre zarfında gerçekleştirilmiştir. Nitrasyon işlemi, 550 °C’de nitrokarbür yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Borlanan malzemeler metalografik incelemelere tabi tutulmuştur. Yüzeyde oluşan borür ve nitrür tabakalarının incelenmesi için aşınma mikroyapı ve sertlik testleri uygulanmıştır.

Bu çalışmanın amacı farklı çaplardaki sementasyon çeliklerine uygulanacak farklı ısıl işlemlerin (borlama ve nitrasyon), malzemenin mekanik ve aşınma özelliklerine etkisini incelemektir. Ayrıca ticari olarak kullanılan 16MnCr5 sementasyon çeliklerinin aşınma ve yüzey sertliğinin geliştirilmesi hedeflenmiştir.

#### 6.1. DENEYDE KULLANILAN MALZEMELER

Deneylerde, filmaşın olarak üretilen ve takım tezgahları, dişli çarklar, mil, burç, pim üretiminde kullanılan 16MnCr5 kalite sementasyon çeliği kullanılmıştır. Malzemelerin kimyasal analizleri Kardemir Çelik – Pik OES Laboratuvarlarında bulunan Spektro marka spektrometre cihazı ile tespit edilmiştir (Şekil 6.1). 16MnCr5 kalite malzemelerin kimyasal analizleri Çizelge 6.1’de verilmektedir.





Şekil 6. 1. Spectro marka spektrometre cihazı.

Çizelge 6. 1. Deneyde kullanılan 16MnCr5 çeliklerinin kimyasal bileşimleri.

	C	Si	Mn	P	S	Cr
Ø 11 mm	0,18	0,21	1,12	0,012	0,013	0,896
Ø 15 mm	0,16	0,22	1,13	0,015	0,015	0,849

Borlama işlemi için Türkiye Manisa Salihli’de faaliyetlerini sürdüren Vezneli firmasından Ekabor 2 tozu tedarik edilmiştir. Ekabor borlama malzemelerinin tane boyutu ve yoğunlukları Çizelge 6.2’de gösterilmektedir.

Çizelge 6. 2. Ekabor malzemeleri [17].

Borlama Ürünü	Tane Boyutu	Yoğunluğu (gr/cm <sup>3</sup> )
Ekabor 1	<150µm	1,90
Ekabor 2	<850 µm	1,70
Ekabor 3	<1400 µm	0,95
Ekabor HM	<150 µm	0,95
Ekabor Pasta	-	1,90
EKrit	≤420 µm	1,55

## 6.2. NUMUNELERİN HAZIRLANIŞI

Tedarik edilen filmaşinlerin boyutlarının büyük olması sebebi ile öncelikle borlama ve nitrasyon işlemi uygulanabilecek boyutlara getirilmiştir. Ø11 mm ve Ø15 mm çapındaki malzemeler Şekil 6.2’de gösterilen Metkon Metacut 251 manuel metalografik numune kesme cihazı ile yaklaşık 15 mm ölçüsünde kesilmiştir. Kesilen numuneler, Şekil 6.2’de yer alan Metkon Accura 102 otomatik zımparalama parlatma cihazında 54 µ zımparadan geçirilerek borlamaya elverişli yüzey elde edilerek hazır hale getirilmiştir.



Şekil 6. 2. Numune kesme ve parlatma cihazı.

## 6.3. NUMUNELERİN BORLAMA İŞLEMİ

Yöntemler arasından kutu borlama yöntemi tercih edilmiştir. Borlama işleminde Şekil 6.3’de gösterilen Protherm marka 1200 °C sıcaklığa çıkabilen kamara tipi fırın kullanılmıştır. Fırın mikro işlemci kontrollü rezistanslar ve iç yapısı sayesinde homojen bir ısıtma imkânı sağlamaktadır.

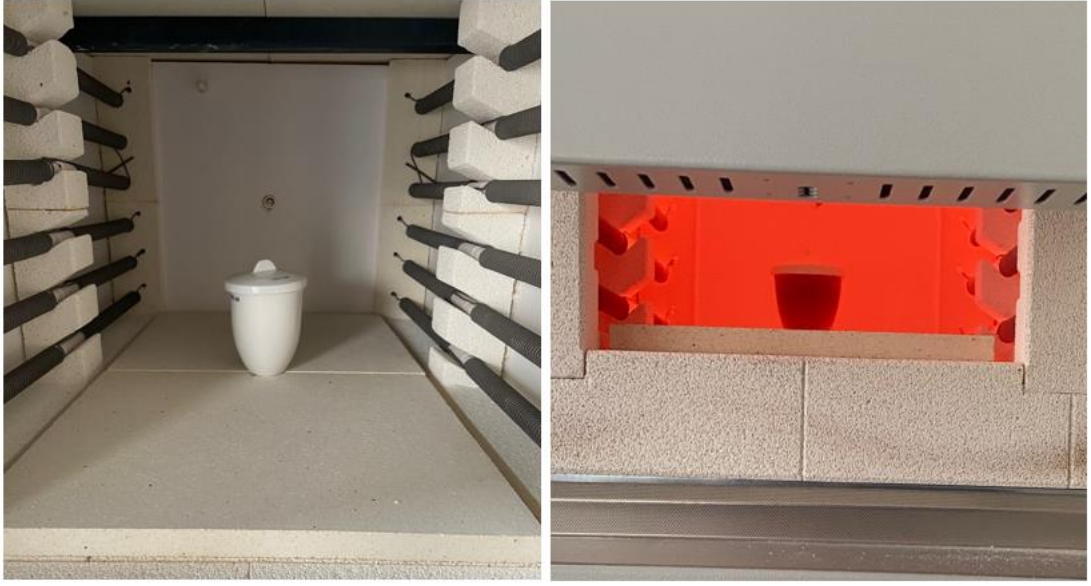


Şekil 6. 3. Isıl işlem fırını.

Borlama işlemi için yüksek sıcaklığa dayanıklı seramik pota tabanına, yaklaşık 25 mm Ekabor 2 tozu yerleştirilmiştir. Numuneler, kendi arasında ve pota yan yüzeyi arasında 10 mm boşluk olacak şekilde seramik pota içerisine konumlandırılmıştır (Şekil 6.4). Potanın geri kalan kısmı ise toz ile doldurularak kapak kapatılmış ve fırın içerisine yerleştirilmiştir (Şekil 6.5).

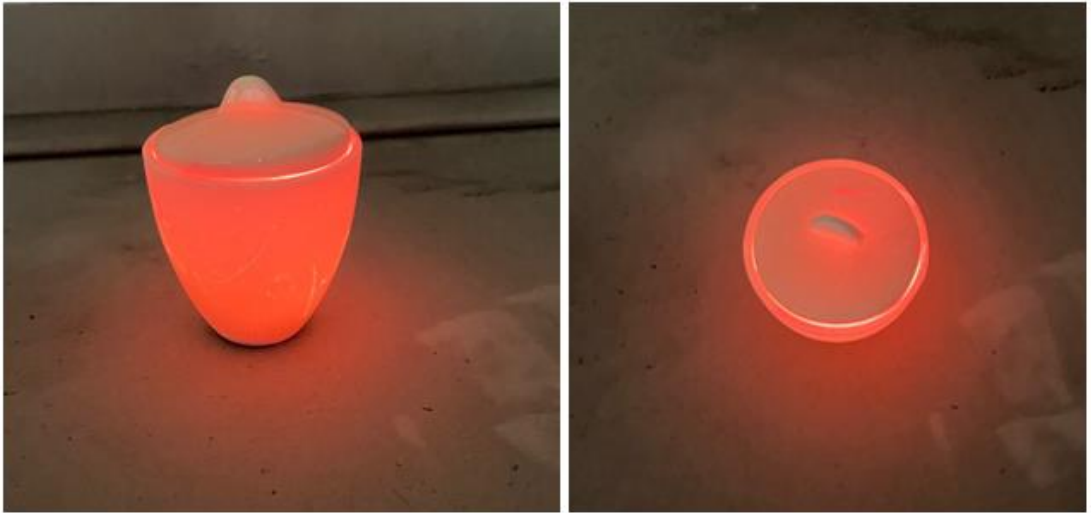


Şekil 6. 4. Numunelerin seramik pota içerisine yerleşimi ve üzerinin toz ile kapanması.



Şekil 6.5. Fırın içerisine yerleştirilen seramik pota.

Numune yerleştirilen seramik potalar, istenen sıcaklığa ulaşmış fırın içerisine yerleştirilmiş ve borlama işlemi yapılmıştır. İşlem sonrasında pota fırın dışarısına alınmış ve oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır (Şekil 6.6).



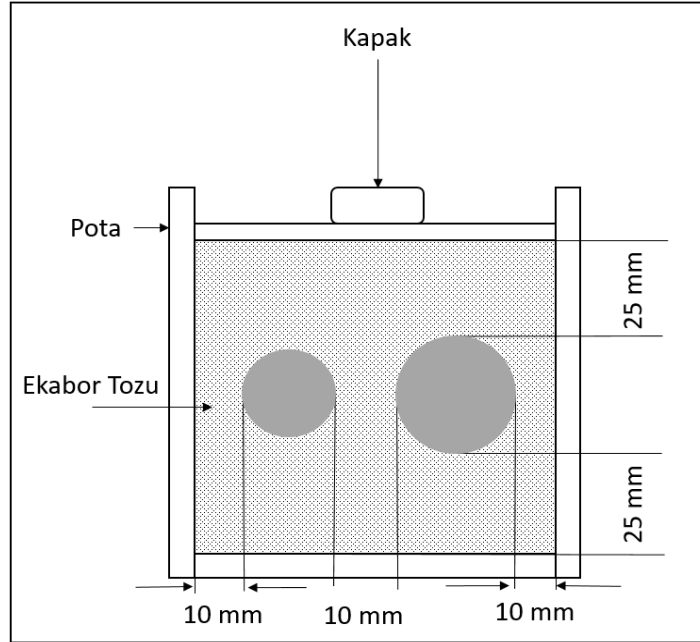
Şekil 6. 6. Soğumaya bırakılan seramik potalar.

16MnCr5 sementasyon çeliklerinde borlama etkisinin incelenmesi amacı ile farklı sıcaklık ve zamanlarda numuneler hazırlanmıştır. Borlama işlemi için hazırlanan numunelere uygulanan deney programı Çizelge 6.3.'de gösterilmektedir.

Çizelge 6. 3. Borlama deney programı.

Numune	Borlama Sıcaklığı (°C)	Borlama Süresi (Saat)
Numune No 1	900	8
Numune No 2	900	16
Numune No 3	1000	8
Numune No 4	1000	16

Borlama işlemi için hazırlanan 11 mm ve 15 mm çapındaki 16MnCr5 numuneler, Şekil 6.7'de gösterilen temsili şekildeki gibi yerleştirilmiştir. Seramik potalar deney programına göre numaralandırılarak fırın içerisinde sırası ile ısıtılmıştır. Deneyde belirtilen süre fırın istenilen sıcaklığa ulaştıktan sonra başlatılmıştır. İşlem sonrasında numuneler potalar içerisinde çıkartılarak incelemeleri yapılmak üzere temizlenmiştir.



Şekil 6. 7. Numunelerin pota içerisindeki yerleşimi.

## 6.4. NİTRASYON İŞLEMLERİ

Nitrasyon işlemi için numuneler uygun boyutlarda kesilerek işleme uygun hale getirilmiştir. Çeliklerin nitrasyon işlemleri nitrasyon fırını aracılığı ile gerçekleştirilmiştir.

Numunelere amonyak ve karbondioksit ortamında 550 °C sıcaklıkta nitrasyon işlemi uygulanmıştır. İşlemden önce 1,5 saat süresince nitrasyon, 6 saat süresince de nitrokarbür işlemi uygulanmıştır. Fırın içerisine 4 m<sup>3</sup>/saat NH<sub>3</sub>, 0,4 m<sup>3</sup>/saat CO<sub>2</sub> ilavesi yapılmıştır. İşlem sonrasında fırın içerisinde bekletilerek soğutulmuştur.

Çizelge 6. 4. Nitrasyon deney programı.

Numune	Nitrasyon Sıcaklığı (°C)	Nitrasyon Süresi (Saat)	Karbonitrasyon Süresi (Saat)
16MnCr5 - 11 mm	550	1,5	6
16MnCr5 - 15 mm	550	1,5	6

## 6.5. KARAKTERİZASYON ÇALIŞMALARI

### 6.5.1. Metalografik Hazırlık

Borlama ve nitrasyon işlemi uygulanan numuneler mikro yapılarının incelenebilmesi için Şekil 6.8' de gösterilen QATM marka bakalite alma cihazında 30 mm kalıplar kullanılarak bakalite alınmıştır. Bakalitler, zımparalama parlatma cihazında sırasıyla 54 µ ve 18 µ tane boyutlu elmas zımparalar kullanılarak parlatmaya temiz bir yüzey elde edilmiştir. Zımparalama işleminden sonra 9µ, 3µ ve 1µ çuhalar ile parlatma işlemi yapılmıştır.



Şekil 6. 8. Bakalite alma cihazı ve hazırlanan bakalitler.

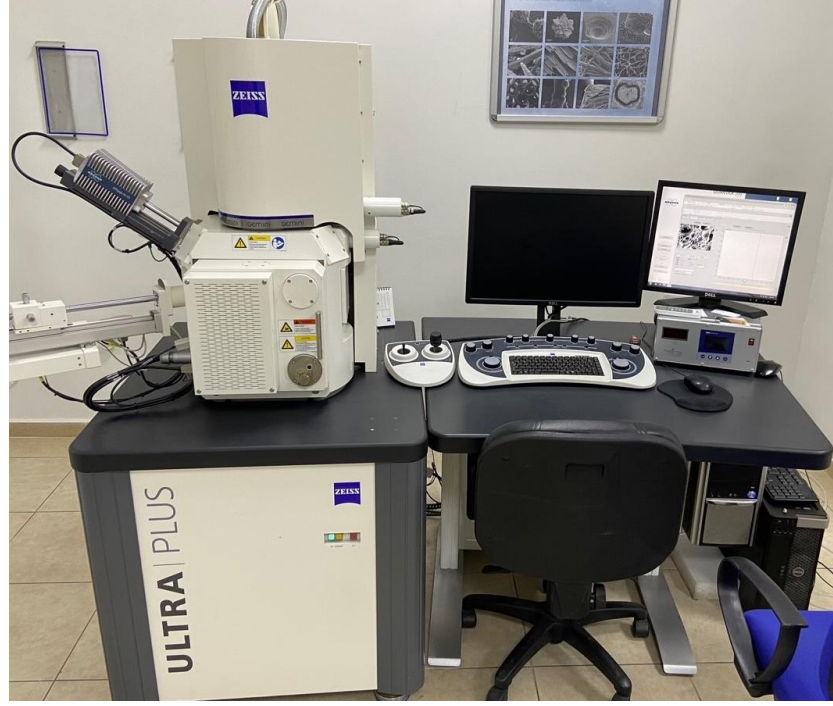
### 6.5.2. Mikroyapı İncelemeleri

Mikroyapı incelemeleri optik mikroskop ve SEM cihazında incelenmiştir. Şekil 6.9’da gösterilen Nikon marka optik mikroskopta borür ve nitrasyon tabaka kalınlık ölçümleri yapılmıştır.



Şekil 6. 9. Optik mikroskop.

Şekil 6.10’de gösterilen Zeiss marka SEM cihazında da, farklı büyütmelerde mikroyapı incelemeleri yapılarak daha detaylı görüntüler elde edilmiştir. Çizgi EDX yapılarak elementlerin ısıtılma bölgeleri üzerindeki dağılımları incelenmiştir.



Şekil 6. 10. SEM cihazı.

Şekil 6.11’de gösterilen Rigaku marka X ışını cihazıyla ısıtılmalı ve ısıtılmamış numunelerin faz analizleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümler Rigaku Ultima IV cihazı ile Cu K $\alpha$  radyasyonu kullanılarak (tarama açısı: 20°-90°, akım: 30 mA tarama hızı: 2° /dk ve voltaj: 40 kV) yapılmıştır.





Şekil 6. 11. Rigaku X-Ray cihazı.

## 6.6. SERTLİK ÖLÇÜMLERİ

Numunelerin sertlik ölçümleri, QNESS Q10 marka mikro sertlik cihazı vasıtasıyla alınmıştır. 0.5 kg. yük 15 saniye süreyle uygulanarak sertlik ölçümleri tamamlanmıştır. Mikro sertlik işleminde kaplama bölgesinde ölçümler alınmış ve sertlik değişimi belirlenmiştir. Numunelerde sertlik ölçümü aritmetik ortalamalar alınarak tespit edilmiştir.



Şekil 6.12. Mikrosertlik cihazı.

## 6.7. ÇEKME DENEYLERİ

Çekme testleri oda sıcaklığında termokimyasal işlem uygulanmış numunelere 0.032 mm/sn hız ile Şekil 6.13'te verilen MTS marka çekme cihazı ile yapılmıştır.



Şekil 6.13. Çekme test cihazı.

## 6.8. AŞINMA DENEYLERİ

Aşınma testleri Şekil 6.14'te gösterilen cihazda, oda sıcaklığında ve kuru ortamda, 5N ve 10 N yük ve 24 mm/sn hız ile ısıtılmış işlem öncesi ve sonrası tüm numuneler için uygulanmıştır.



Şekil 6.14. Aşınma test cihazı.

## BÖLÜM 7

### DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

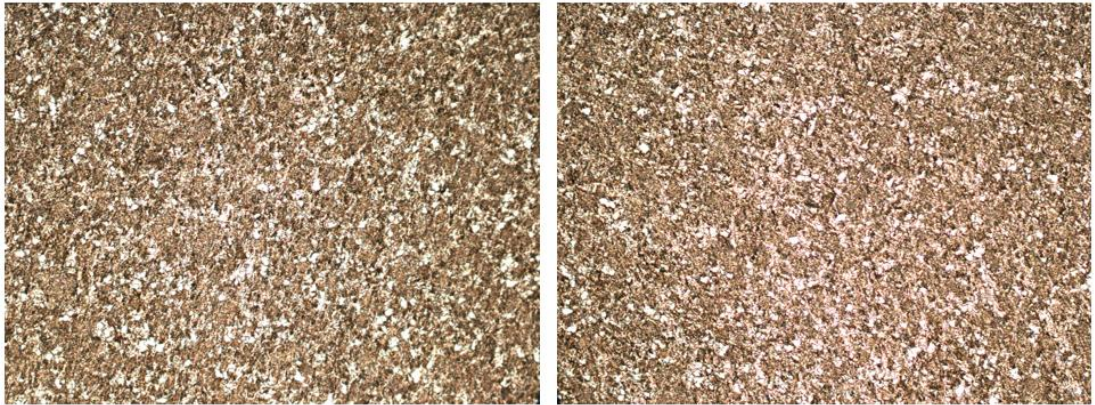
Deneysel çalışmalarda kullanılan sementasyon çeliğinin kimyasal kompozisyonu spektral analiz cihazında incelenmiş ve sonuçları Çizelge 7.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 7. 1. 16MnCr5 çeliklerin kimyasal kompozisyonları.

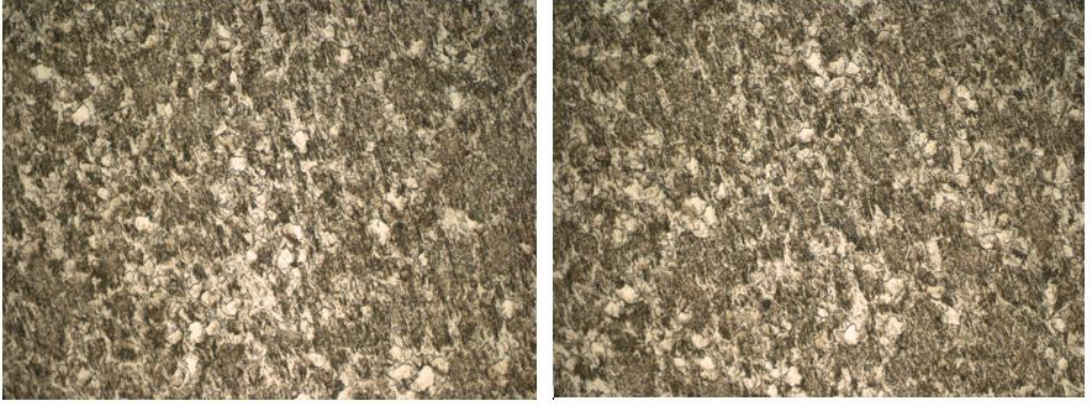
Kalite	Numune Çapı	%C	%Mn	%Si	%S	%P	%Cr	%Cu
16MnCr5	Ø 11 mm	0,18	1,12	0,21	0,013	0,012	0,896	0,037
	Ø 15 mm	0,16	1,13	0,22	0,015	0,015	0,849	0,065

#### 7.1. MİKROYAPI ANALİZ SONUÇLARI

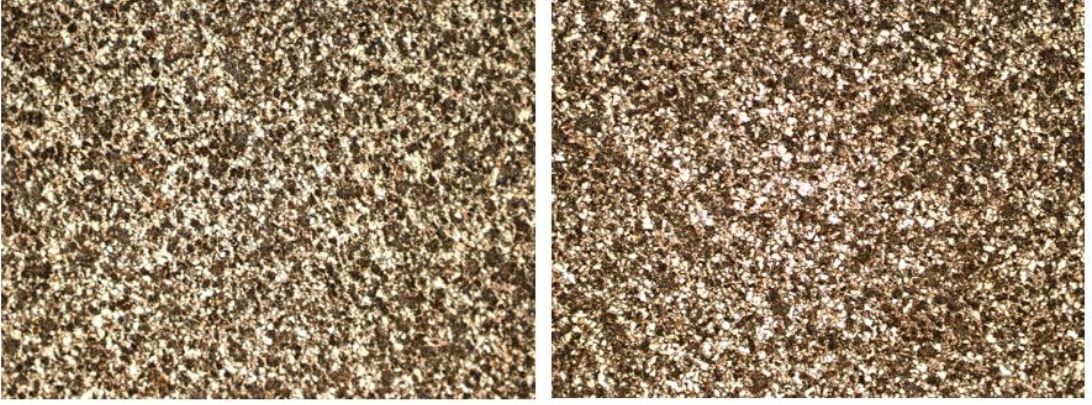
16MnCr5 kalitesine ait 11 ve 15 mm ebatlarındaki malzemelerin işlem öncesi 200X ve 500X büyütülerek mikroyapı görüntüleri alınmış ve Şekil 7.1-7.4’te gösterilmiştir.



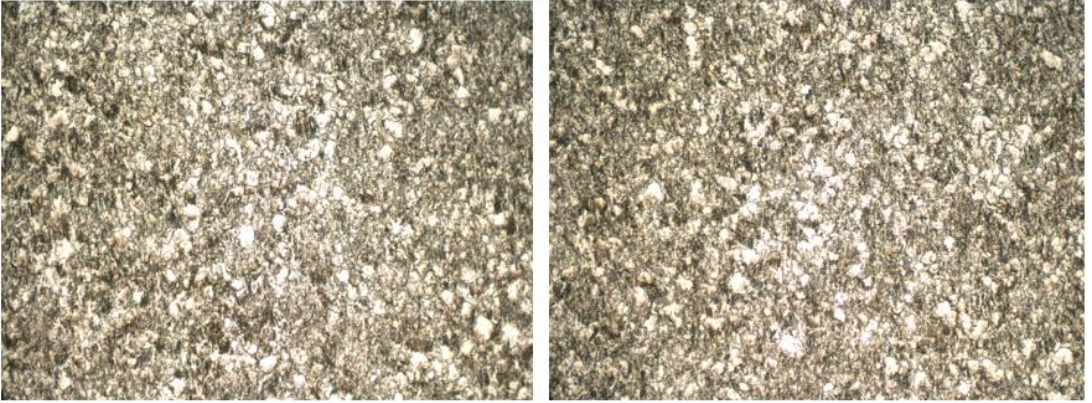
Şekil 7. 1. 16MnCr5-Ø11 mm 200X büyütme mikroyapı görüntüsü.



Şekil 7. 2. 16MnCr5-Ø11 mm 500X büyütme mikroyapı görüntüsü.



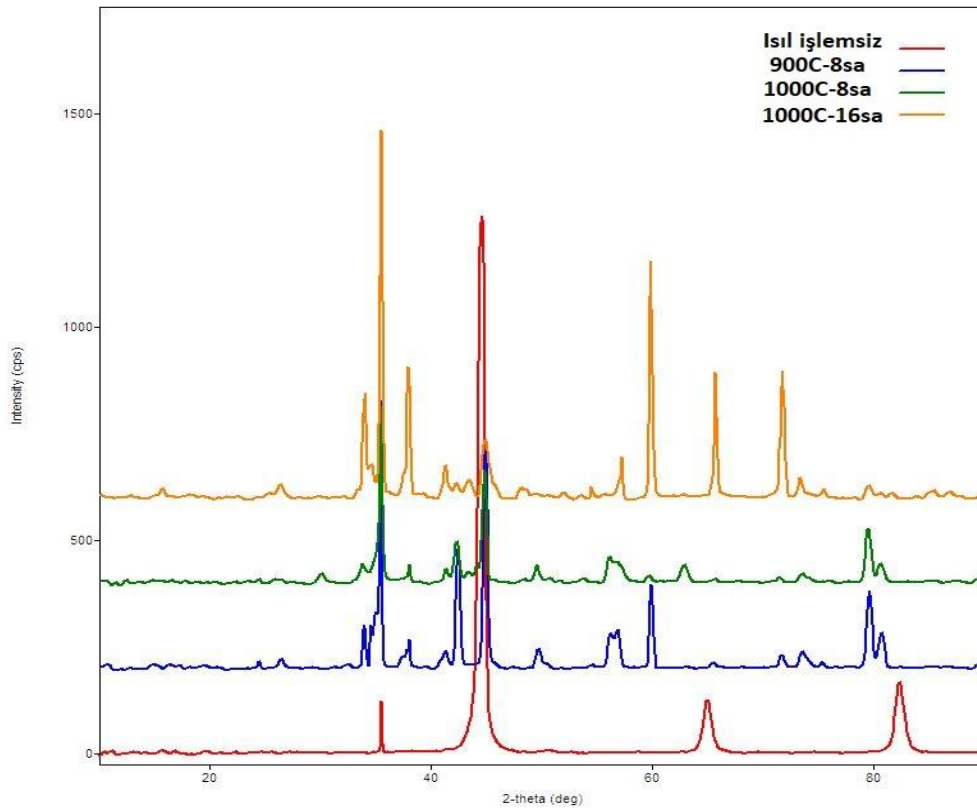
Şekil 7. 3. 16MnCr5-Ø15 mm 200X büyütme mikroyapı görüntüsü.



Şekil 7. 4. 16MnCr5-Ø15 mm 500X büyütme mikroyapı görüntüsü.

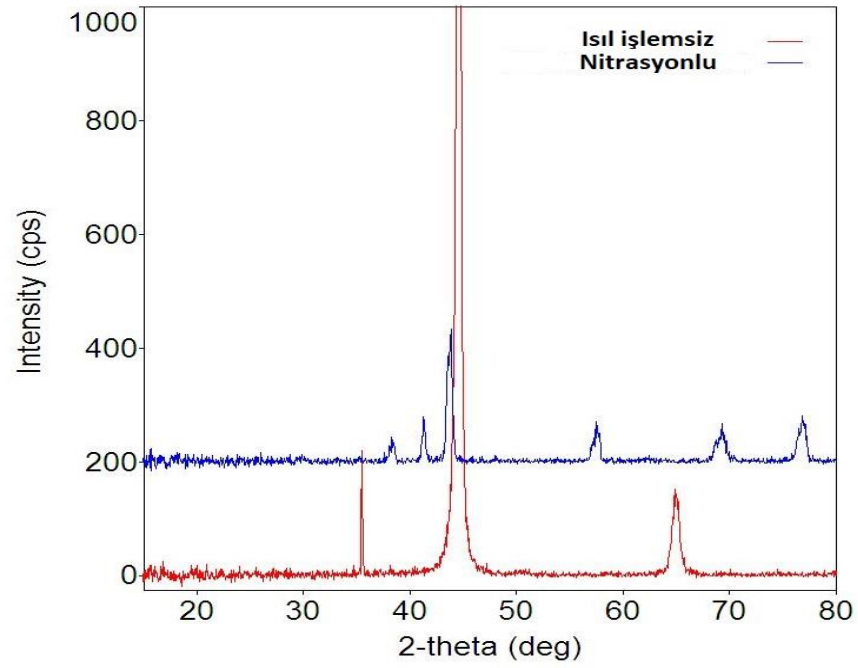
11 mm çapa sahip olan sementasyon çeliklerine yapılan borlama ve nitrasyon ısı işlemleri neticesinde meydana gelen fazlar Xrd ölçümüyle tespit edilmiş ve Şekil 7.5 ve Şekil 7.6'da gösterilmiştir. Borlanmış numunelerin borür tabakaları incelendiğinde

ekstra pikler gözlemlenmiştir. Farklı sıcaklık ve farklı süreler ele alındığında, öncelikle Fe<sub>2</sub>B fazının oluştuğu tespit edilmiştir. 900°C - 8 saat borlanmış numunede tek fazlı Fe<sub>2</sub>B yapısı mevcutken, sıcaklığın artmasıyla Fe<sub>2</sub>B yoğunluğu azalmış ve çift fazlı Fe<sub>2</sub>B ve FeB fazlarının oluştuğu görülmüştür. FeB fazı 1000 °C ve 16 saat borlanmış numunede özellikle 2θ açısının 37.8 derece olduğu bölgede daha belirgin bir hal almıştır. Ayrıca demire ait şiddetli pik borlama neticesinde demir-bor bileşik oluşumuna bağlı olarak borlanmış numunelerde kayda değer bir azalma göstermiştir.



Şekil 7. 5. Borlama numunelerine ait XRD sonuçları.

Isıl işlemsiz numune ve nitrasyon işlemine tabii tutulmuş numunelerin Xrd sonuçları irdelendiğinde, demir piklerinin nitrasyonlu numunede etkisinin azaldığı ve 2θ açısının 38.42, 41.30, 43.77, 57.61, 69.29 ve 77.01 olduğu kısımlarda Fe<sub>3</sub>N yapısının oluştuğu gözlemlenmiştir. Tespit edilen bu tabaka yüzeyde koruyuculuk sağlayarak altlık malzemenin sertliğine olumlu yönde katkı sunmuştur.



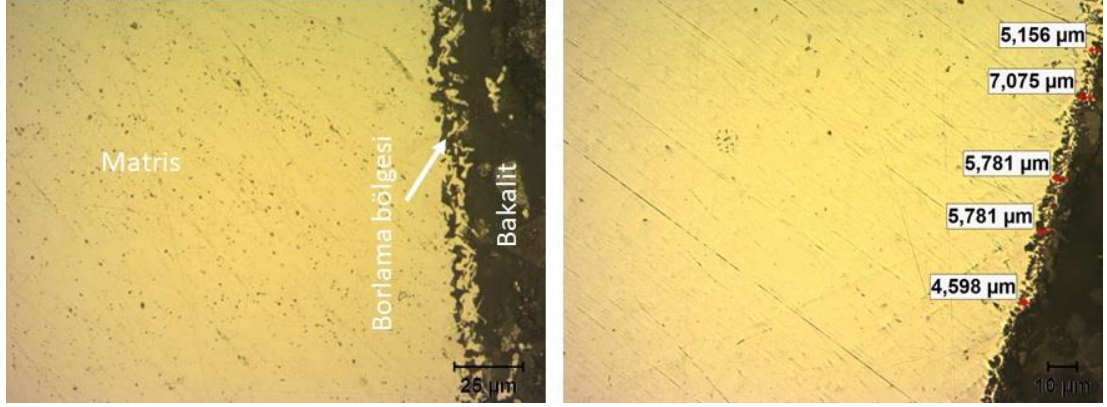
Şekil 7. 6. Nitrasyon işlemi sonrası XRD sonuçları.

Farklı borlama parametreleri neticesinde numune yüzeylerinde meydana gelen mikroyapısal değişimler optik mikroskop ve taramalı mikroskop cihazlarıyla incelenmiştir.

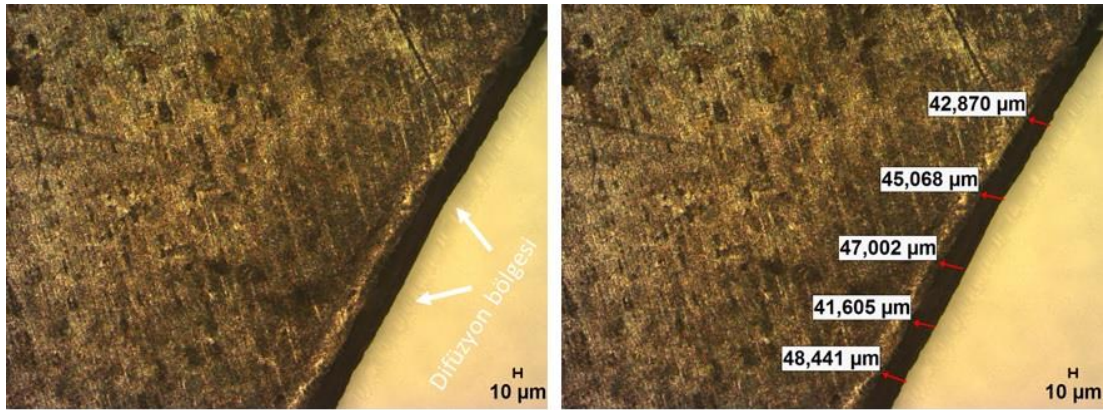
Şekil 7.7 ile Şekil 7.8’de sırasıyla 11 mm çapa sahip olan malzeme için 900 °C - 8 saat ve 1000 °C - 16 saat borlanmış numunelere ait optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. 900 °C - 8 saat borlanmış numunenin mikroyapısı incelendiğinde borlama tabakasında çatlak ve boşlukların olduğu ve testere dişi benzeri görünüme sahip olduğu anlaşılmıştır. Borlama süresi ve sıcaklığın yetersiz kalmasıyla bor atomları yüzeyde yayılımı yeterli düzeyde sağlayamamış ve ortalama 6 mikronluk bir kaplama elde edilmiştir. Ayrıca bu kaplamada düzensiz olup homojenlik gözlemlenememiştir.

1000 °C - 16 saat borlanmış numunede ise kaplama homojen ve süreklilik göstermiştir. Ayrıca kaplama kalınlığı ise ortalama 45 mikronlara kadar ulaşmıştır. Bu durum borlama için yeterli süre ve sıcaklığın sağlandığını göstermiştir. Numunede aynı zamanda geçiş bölgesinin varlığı diğer numuneye göre daha net bir şekilde anlaşılmıştır. Şekil 7.9’da aynı numuneye ait SEM görüntüsü verilmiştir. Matris ve borür tabakası arasındaki mavi hat boyunca elementlerin dağılımı EDS analiziyle incelenmiş ve kaplama bölgesine geçiş yapıldığında çelikteki karbon miktarında

azalma ve demir ile bor arasında oluşan bileşiklerden dolayı piklerde değişim tespit edilmiştir.

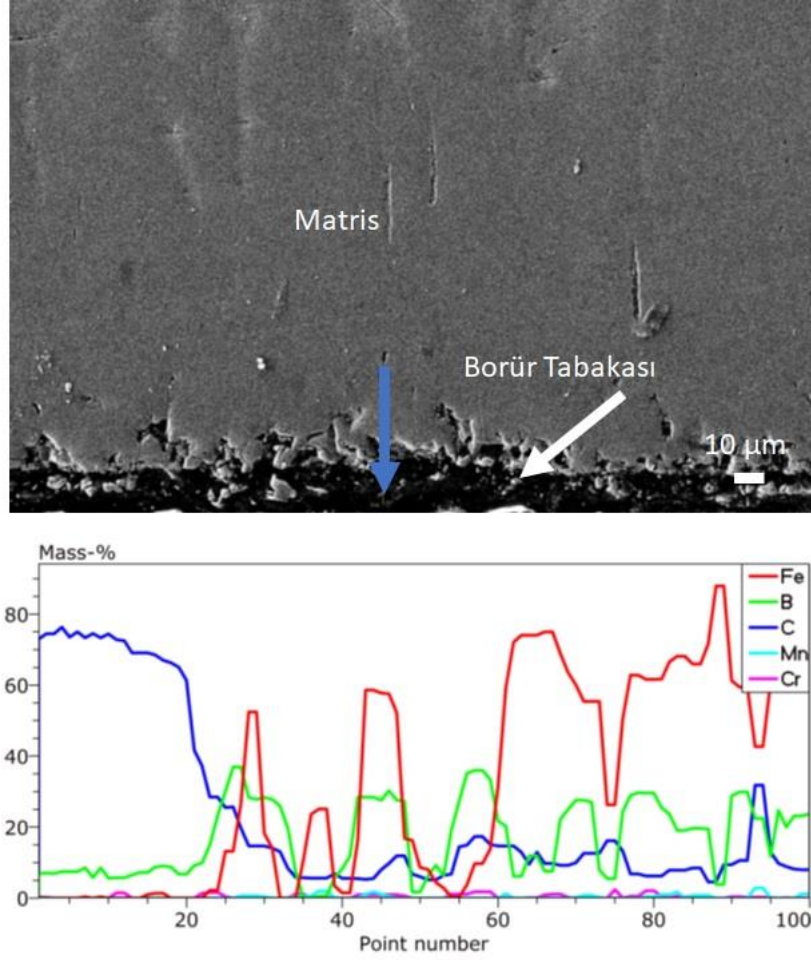


Şekil 7. 7. 900°C-8 saat borlanmış numuneye ait optik mikroskop görüntüsü.



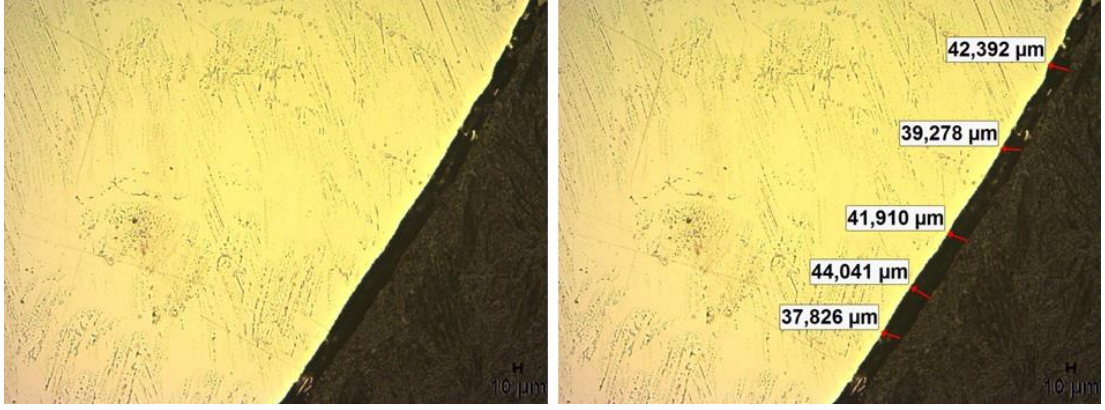
Şekil 7. 8. 1000°C-16 saat borlanmış numuneye ait optik mikroskop görüntüsü.



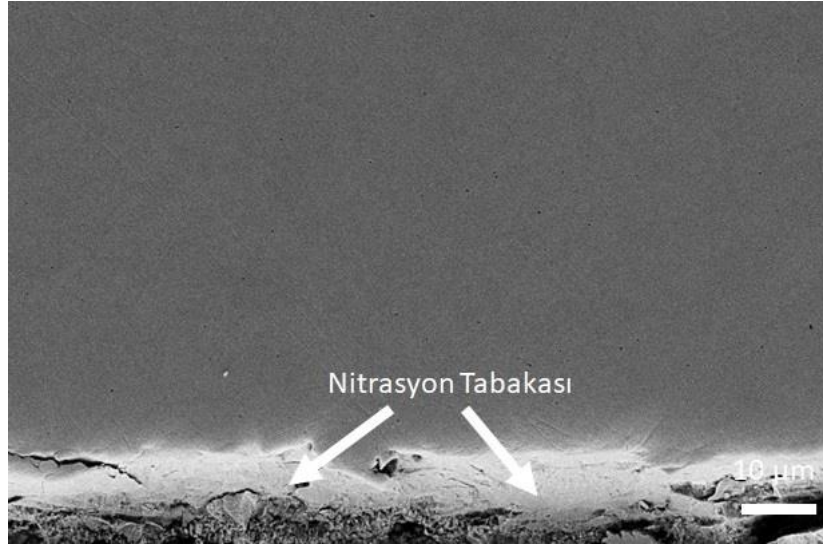


Şekil 7. 9. 1000°C-16 saat borlanmış numuneye ait SEM EDS analiz görüntüsü.

Şekil 7.10’da nitrasyon işlemine tabi tutulmuş 11 mm çapındaki 16MnCr5 çeliğine ait optik mikroskop görüntüsü verilmiştir. Gaz ortamında nitrasyon işlemi neticesinde önemli ölçüde kaplamanın homojenliğinin sağlandığı ve ortalama 42 mikron seviyesinde kaplama kalınlığının elde edildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca Şekil 7.11’de bu numuneye ait nitrasyon tabakasının daha net anlaşıldığı SEM görüntüsü verilmiştir.



Şekil 7. 10. Nitrasyon işlemine tabi tutulmuş numuneye ait optik mikroskop görüntüsü.

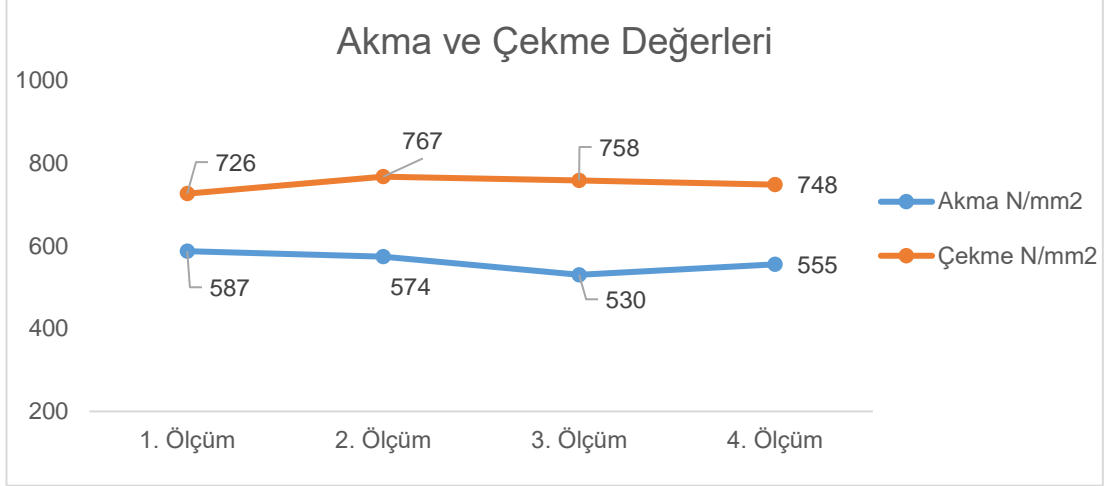


Şekil 7. 11. Nitrasyon işlemine tabi tutulmuş numuneye ait SEM görüntüsü.

## 7.2. MEKANİK TEST SONUÇLARI

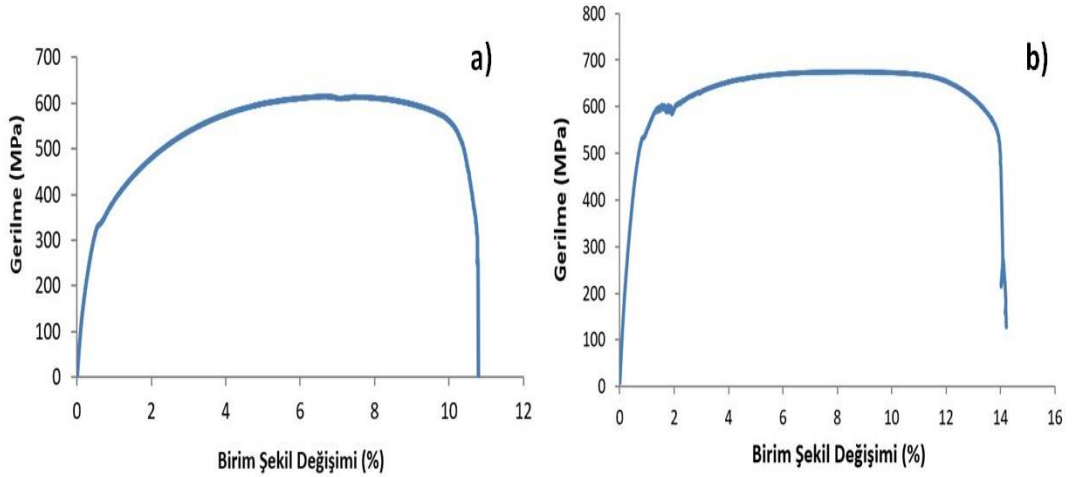
Isıl işlem öncesi numunelere yapılan çekme testleri neticesinde, elde edilen akma ve çekme mukavemet değerleri Ø 11 mm'lik numune için Şekil 7.12'de gösterilmektedir.

Ölçüleri 11 mm ve 15 mm olan numunelerde %36'lık bir çap farkının mekanik özelliklere belirgin bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. Literatürde daha büyük çap farklılıklarında kesit daralmasında %10'a varan mekanik dayanım değişkenliklerinin yaşandığı tespit edilmiştir [52].



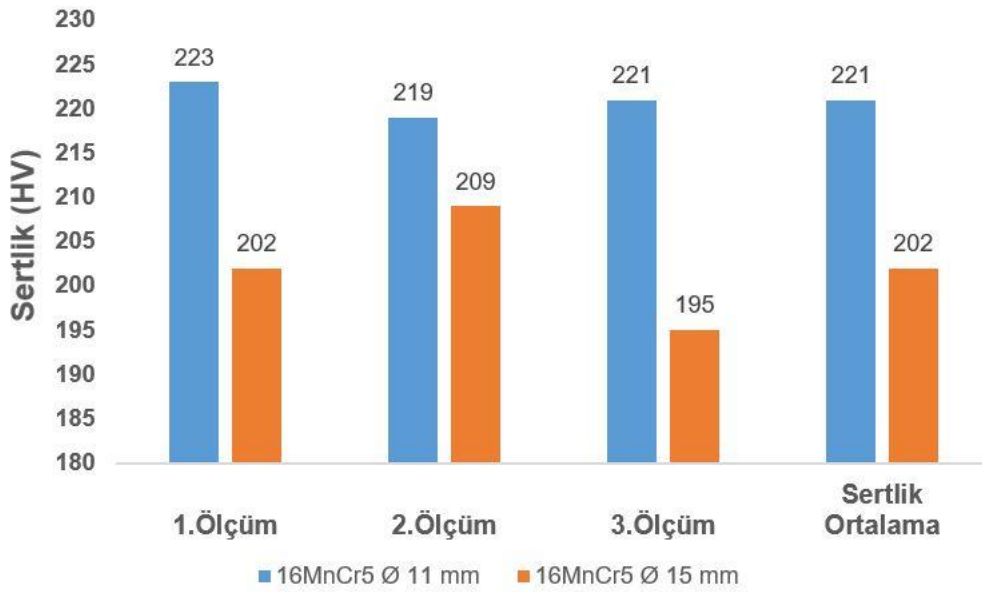
Şekil 7. 12. 11 mm akma ve çekme değerleri.

Şekil 7.13'te 11 mm çapa sahip nitrasyon ve borlama işlemlerine (1000 °C-16 saat) tabii tutulmuş numunelerin akma ve çekme mukavemet değerleri grafik halinde verilmiştir. Isıl işlem öncesi numunelere kıyasla, özellikle borlanmış numune de akma ve çekme mukavemet değerlerinde önemli düşüşler gözlemlenmiştir. Bu azalmanın, uzun süreli ve yüksek sıcaklıklarda malzemelerin ısıya maruz kalması ve akabinde yavaş soğumasıyla tane büyümelerinin gerçekleşmesinden dolayı kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 7. 13. Termokimyasal işlemler sonrası çekme test sonuçları a) Borlama sonrası b) Nitrasyon sonrası

Şekil 7.14'te ısıtıl işlem öncesi numunelerin sertlik değerleri sunulmuştur. Mekanik özellikler açısından çap farklılığında kayda değer bir fark gözlemlenmezken, yüzey sertliğinde düşük çaplı numunede sertlik değerleri daha yüksek çıkmıştır. Bunun sebebi, kesit alanı farklılığı neticesinde hadde sonrası soğuma hızı farklılığından kaynaklanmaktadır. Ayrıca 500X'teki optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde 15 mm. çapa sahip numunede yumuşak faz olan ferritik yapının daha yoğun olduğu gözlemlenmiştir.

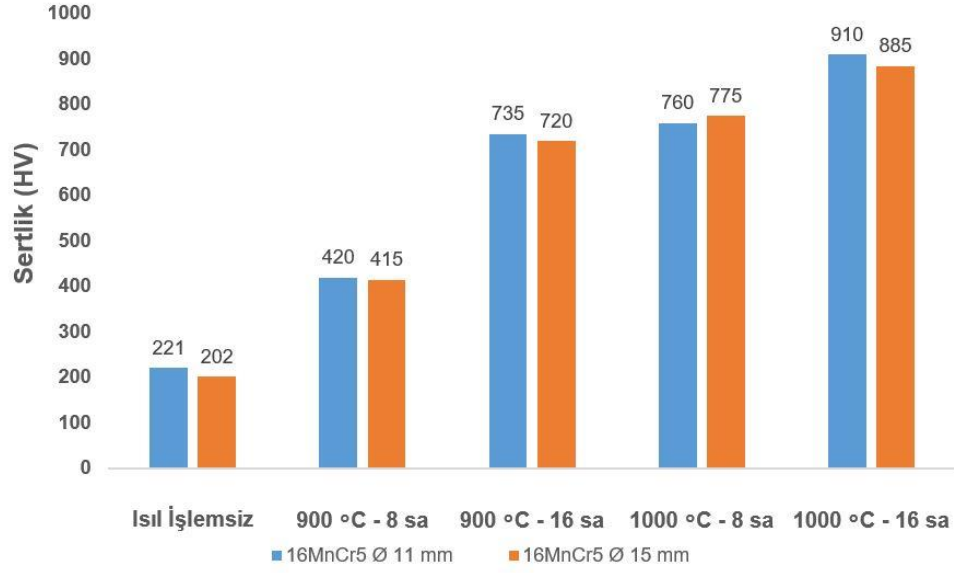


Şekil 7. 14. Numunelerin sertlik ölçümleri.

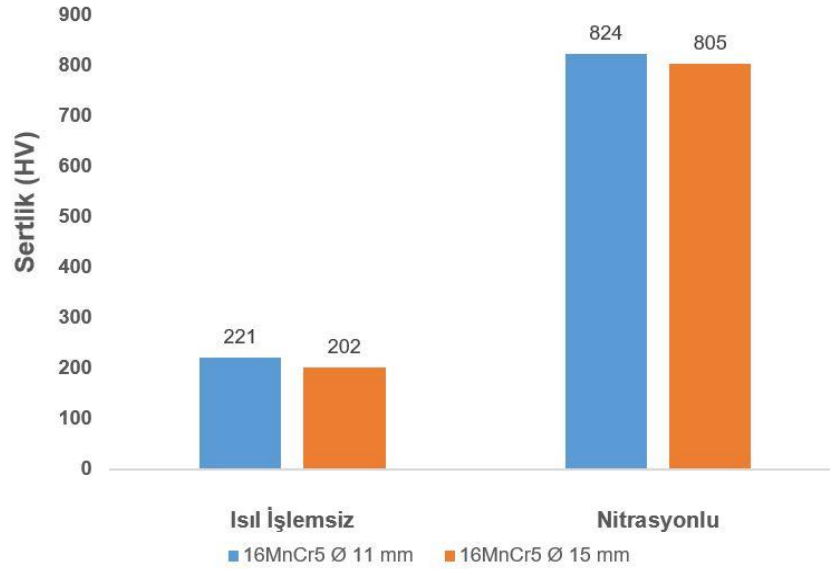
Borlama ve nitrasyon ısıtıl işlemleri neticesinde numunelerin kaplama tabakalarından (yüzeyin kenarından, üç ölçüm) alınan ortalama sertlik ölçüm sonuçları Şekil 7.15' ve Şekil 7.16'de gösterilmiştir.

Borlama ve nitrasyon ısıtıl işlemleri neticesinde, çelik yüzeyine azot ve bor atomlarının ara yer atomu olarak geçmesi neticesinde yüzeyde sert bir tabaka oluşmaktadır. Bu tabakanın homojenliğine ve kalınlığına bağlı olarak malzemenin sertliğinde artış gerçekleşmektedir. Bu çalışmada uygulanan farklı borlama parametresiyle yaklaşık 2 ila 4 kat aralığında sertlikte artışlar elde edilmiştir. Nitrasyon işlemi tek parametreyle uygulanıp, 4 kat sertlikte iyileşme sağlamıştır. Borlama ve nitrasyon gibi difüzyon kontrollü işlemlerle yüzeyde oluşan borürlü ve nitrürlü yapıların ısıtıl işlemsiz

yüzeydeki demir karbon bileşimlerine göre çok daha sert olduğu için sertlikte artışlar gözlemlenmiştir. Kaplama yüzeyinde mikro çatlaklar ve homojensizlik ne kadar az ise sertlikteki artış o derece yüksek olabilmektedir.



Şekil 7. 15. Borlama sonrası sertlik sonuçları.

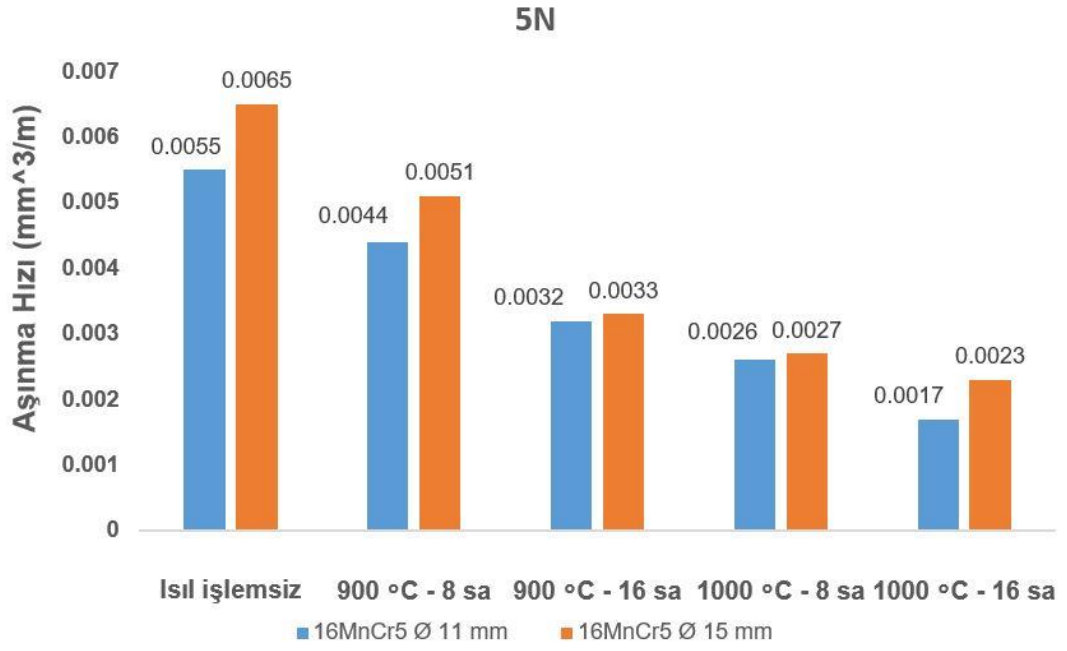


Şekil 7. 16. Nitrasyon sonrası sertlik sonuçları.

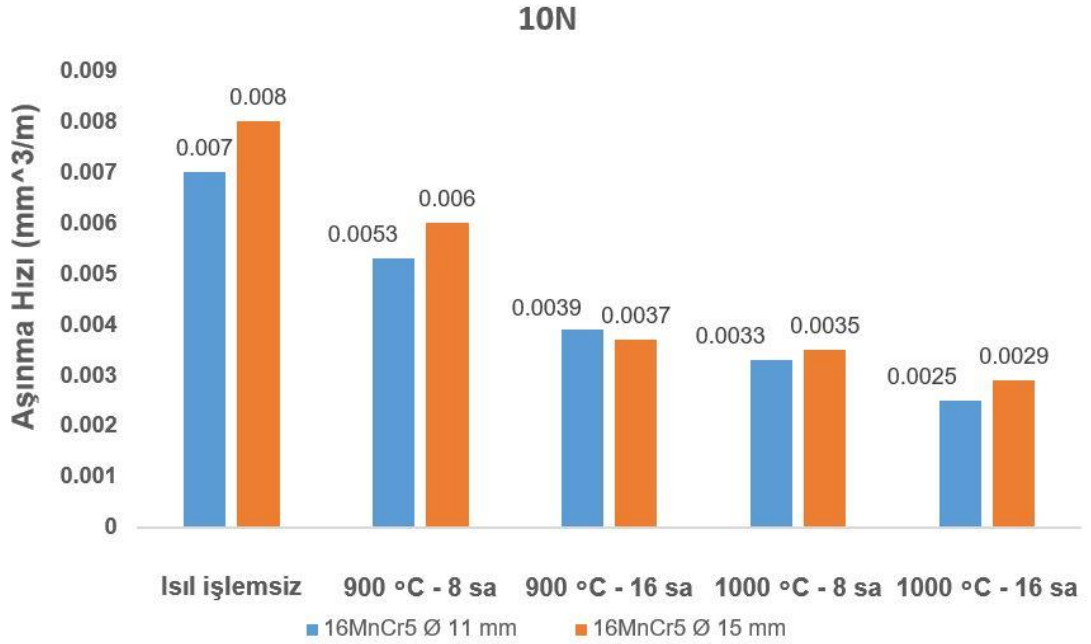
### 7.3. AŞINMA TEST SONUÇLARI

Şekil 7.17 ile Şekil 7.18 arasında iki farklı yük altında ısıtılmış ve ısıtılmamış numunelere ait aşınma hızı grafikleri verilmiştir. Aşınma hızları kayma mesafesi boyunca meydana gelen hacimsel kayıptan yola çıkılarak hesaplanmıştır. Aşınma genişliği, uzunluğu ve derinliği hesaba katılmış ve bu değer kayma mesafesine bölünmüştür. 11 mm. çapındaki numunede borlama işlemiyle 5N yük altında 3 kat, 15 mm. çapındaki malzeme için ise 2.5 kat gelişme sağlanmıştır. Borlama sıcaklığı ve süresinin artmasıyla, Fe<sub>2</sub>B fazına ek olarak FeB fazının oluşması ve şiddetinin artması yüzeyi daha sert hale getirmektedir. Archard prensibine göre sertlikteki artış malzeme yüzeyinden daha az aşınmanın gerçekleşmesine olanak sağlamaktadır [53]. Dolayısıyla borlama işlemleriyle yüzey daha sert hale gelmekte ve aşınma dayanımı artmaktadır. Uygulanan yük arttıkça, yüzeydeki kaplama kalınlığı daha kısa sürede kalkmakta ve bu da aşınmanın daha fazla olmasına sebebiyet vermektedir. Tüm numunelerde artan yüke bağlı olarak, aşınma hızı artmıştır.

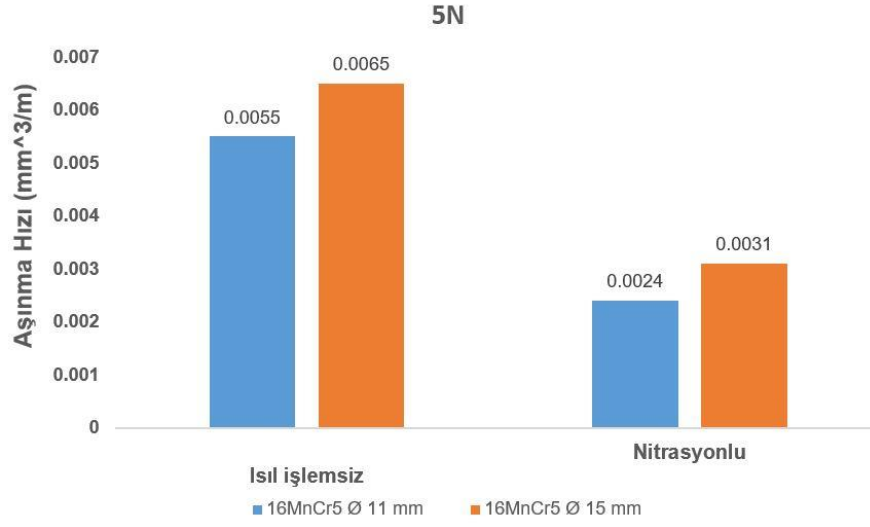
Benzer durum nitrasyon işlemine tabii tutulmuş malzemeler içinde geçerlidir. Optik mikroskop sonuçlarına göre 40 mikron civarında nitrasyon tabaka kalınlığı kısa mesafede de olsa aşınmayı zorlaştırmış ve yüzeydeki sertlikle daha az aşınmaya imkân tanımıştır. Hem 5N hem de 10 N yük altında, ısıtılmış uygulanmamış numuneye göre iki kata varan aşınma performansı gelişimine katkı sağlamıştır (Şekil 7.19 ve Şekil 7.20)



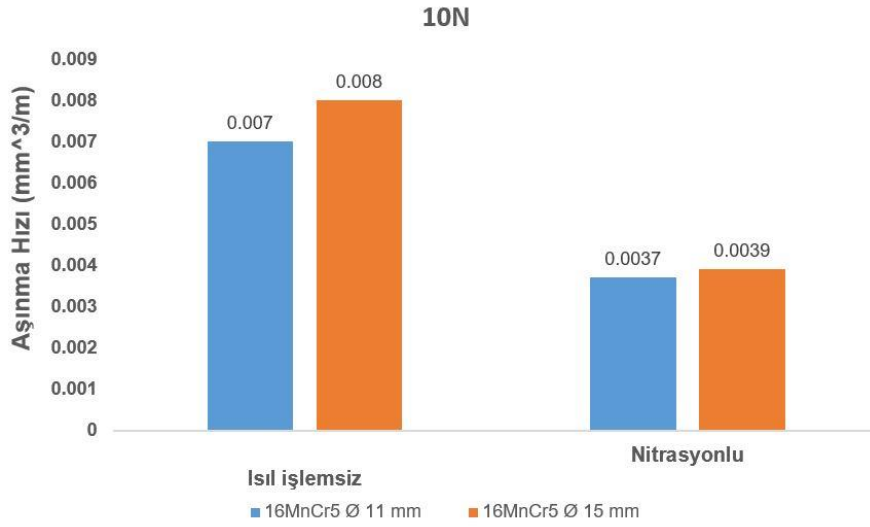
Şekil 7. 17. Borlama yapılmış numunelerin 5N yük altında aşınma hızı değerleri.



Şekil 7. 18. Borlama yapılmış numunelerin 10N yük altında aşınma hızı değerleri.



Şekil 7. 19. Nitrasyon yapılmış numunelerin 5N yük altında aşınma hızı değerleri.

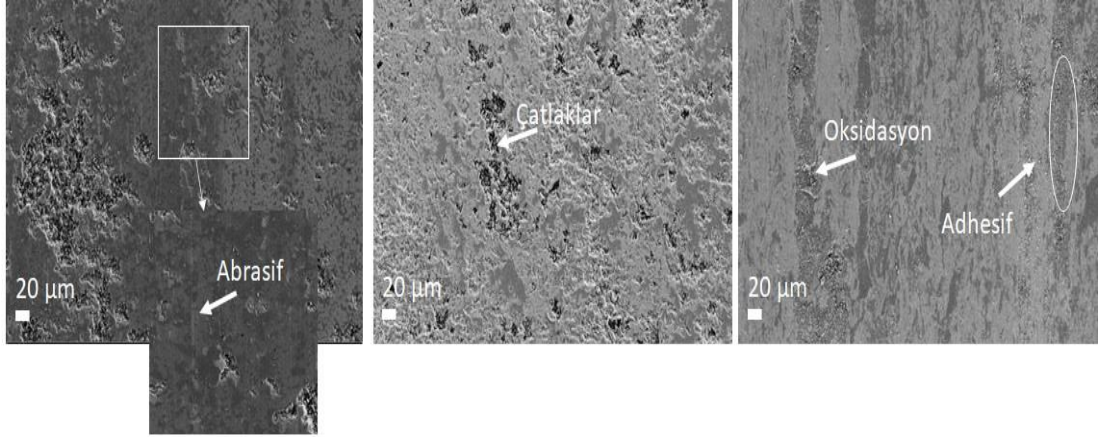


Şekil 7. 20. Nitrasyon yapılmış numunelerin 10N yük altında aşınma hızı değerleri.

Şekil 7.21’de 500X büyütmede 10N yük altında sırasıyla ısıtılmış, nitrasyon işlemli ve borlama işlemine tabii tutulmuş numunelerin aşınma sonrası mikroyapı görüntüleri sunulmuştur. Isıl işleme uğramamış çelikte daha fazla oyuklar ve çatlaklar görülmekte ve daha yüksek büyütmede abrasif aşınma mekanizmasının varlığı görülmektedir. Kayma yönünde aşınma izleri mevcuttur. Nitrasyonlu numune de bu çatlaklar daha da azalmış ve daha az kayma izleri görülmüştür. En sağdaki numunede



ise aşınma performansı açısından en iyi özellik gösteren borlama numunesine (1000° C - 16 saat) ait görüntü verilmiştir. Yüzeydeki borür tabakası aşınma açısından koruma sağlamış ve tutunmalarla birlikte Adhesif aşınma mekanizmasının varlığını göstermiştir. Ayrıca bu numune de sürtünme ve tekrarlı yüklemelerden kaynaklı, oksidatif parçacıklarda tespit edilmiştir.



Şekil 7. 21. Isıl işlemsiz, nitrasyon işlemlili ve 1000°C-16 saat borlanmış numunelere ait aşınma sonrası SEM görüntüleri (11 mm).

## BÖLÜM 8

### GENEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu tez çalışmasında deney malzemeleri olarak farklı çaplarda 16MnCr5 sementasyon çelikleri kullanılmıştır. Bu malzemelere ikisi sıcaklık ikisi süre olmak üzere toplamda 4 farklı borlama prosesi uygulanmıştır. 16MnCr5 sementasyon çeliğine ayrıca tek parametrede nitrasyon işlemi yapılmıştır. Isıl işlemsiz ve prosese tabii tutulmuş numunelere yapılan mikroyapı, sertlik ve aşınma testleri neticesinde aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

- Borlama sıcaklığı ve süresi arttıkça, borür tabakasının homojenliği ve kaplama kalınlığı artmıştır.
- Tüm borlama parametreleri neticesinde sertlik ve aşınma performanslarında iyileşmeler gözlemlenmiştir.
- Nitrasyonlu numunede kaplama kalınlığı 40 mikron civarındayken, 1000° C-16 saat borlanmış numunede 45 mikronlara ulaşılmıştır.
- Borlama prosesinde sertlikte %330'lara, nitrasyon prosesinde sertlikte %290'lara varan artışlar gözlemlenmiştir.
- Numunelerin aşınma performansları nitrasyon işlemiyle 2 kat, optimum borlama prosesiyle ise 3 kat arttırılabilmektedir.
- Akma ve çekme dayanımlarında yüzey ısıl işlemleri neticesinde muhtemel ısıl işlem sıcaklığı, süresi ve soğuma hızından kaynaklı düşüşler gözlemlenmiştir.
- Numunelerde, abrasif, delaminasyon, oksidatif ve adhezyon aşınma mekanizmaları aktif olmuştur.

Sonuç olarak yüzeyde sert ve aşınmaya karşı direnç istenen dişli çark, miller ve pim gibi uygulamalarda kullanılabilen 16MnCr5 kalite özel alaşımlı çeliklerin performansları optimum borlama ve nitrasyon işlemleriyle rahatlıkla geliştirilebilmektedir. Difüzyona olanak sağlayacak sürede ve sıcaklıkta borlama ve

nitasyon proseslerinin yapılmasıyla daha homojen kaplamalara, daha yüksek sertlik, aşınma ve yorulma performanslarına ulaşmak mümkündür. Diğer yandan özellikle ısı işlem süresi ve işlem sonrası soğuma koşulu açısından optimizasyon sağlandığı sürece mekanik özelliklerde olumsuz bir durum ortaya çıkmayabilir. Bu proseslerin ekonomik bir şekilde uygulanabilirliği, bu çelik gurubuna veya benzer alaşımlara performans açısından ciddi avantajlar sağlayacaktır.

## KAYNAKLAR

1. WSA, The white book of steel, *World Steel Association*, Brussels, 13-20 (2012).
2. İnternet: Cömert Çelik, “Sementasyon Çelikleri”, <http://www.comertcelik.com/en/cementation-steels> (2020).
3. Tabur, M., “Farklı Isıl İşlemlerdeki 8620 Sementasyon Çeliğinin Abrasiv Aşınma Davranışı”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 53-58 (2003).
4. Yılmaz, A.N., “Kutu Sementasyonunda Karbürleme Süresi, Karbürleme Sıcaklığı Ve Aktivatör Oranının Etkili Sementasyon Derinliğine Etkileri”, Yüksek Lisans Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı*, Trabzon, 4-9 (1985).
5. Dew Stahl, Case hardening steel carbodur, *Swiss Steel Group*, Witten 4-8 (2016).
6. Baydoğan M., “Çeliklerin Sınıflandırılması” *Metalürji Mühendisleri Odası Sempozyumu*, İstanbul, 75-77 (2003).
7. İnternet: Alp Steel, “Sementasyon Çelikleri”, <https://www.alpsteel.com.tr/segmentasyon-celikleri> (2018).
8. Türk Standartları Enstitüsü, “TS EN 10263-3 2017”.
9. Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, “Bor Sektör Raporu” *Eti Maden Strateji Geliştirme Dairesi Başkanlığı*, 3-6 (2021).
10. Tombal, D. T., Özkan, G. Ş., Ünver, K. İ., Osmanlıoğlu, A. E., “Bor Bileşiklerinin özellikleri, üretimi, kullanımı ve nükleer reaktör teknolojisinde önemi”, *Bor Dergisi*, 1(2): 86-95 (2016).
11. Yünlü, K., “Bor 2. Baskı”, *Ankara* 11-13 (2019).
12. Ediz, N. ve Özdağ, H., “Bor Mineralleri ve Ekonomisi”, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2: 133-151 (2001).
13. Erdemir Yayınları, “Çelik Yüzeylerin Kaplanması”, *Erdemir Bilim ve Teknoloji Serisi*, 9-158 (2006).
14. Casteletti, L. C., Lombardi, A. N., Totten, G. E., “Boriding”, *Encyclopedia of Tribology*, *Springer Science*, New York, 249-259 (2013).

15. Davis, J. R., Surface “Boriding”, Hardening Of Steels, *ASM International*, 213-226 (2002).
16. Sinha, A. K. and Division, B. P., “Boriding (Boronizing)”, ASM Heat Treating, Volume 4, *ASM International*, 437-447 (1991).
17. Aydın, S. E., “Erw Boru Üretim Makinelerinde Kullanılan Kalibre Makaralarının Aşınma Direncinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü*, Hatay, 20-22 (2017).
18. İnternet: Bortec, “Boronizing”, <https://bortec.de> (2022).
19. Dearnley, P. A. and Bell, T., “Engineering The Surface With Boron Based Materials”, Surface Engineering, *Institute of Materials, Minerals & Mining*, 1:3, 203-217 (1985).
20. Öztürk, K., “Plastik Kalıp Çeliklerinin Korozyona Karşı Korunmasında Kutu Borlama İşleminin Etkileri”, Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 33-52 (2021).
21. Albayrak, M. G., “Düşük Karbonlu Yüksek Mukavemetli Çeliklerde Borlama”, Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 34-43 (2021).
22. Fırtına, Ö., “Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Borik Asit Esaslı Alternatif Borlama Karışımı ile Borlanması Ve Karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*” Manisa, 15-19 (2019).
23. Kulka, M., “Current Trends İn Boriding: Techniques eBook”, *Springer Engineering Materials*, Poland, 30-35 (2019).
24. Moore, J., “High Temperature Coatings”, Intermettalic and Ceramic Coatings, Dahotre N.B., and Sudarshan T.S., *Marcel Dekker*, New York, (1999).
25. Samsonov, G. V., and Epik A.P., “Coatings Of High - Temperature Materials”, Coatings Of High - Temperature Materials, Hausner H. H., *Springer Science*, New York, 7-35 (1966).
26. Krukovich, M. G., Prusakov B. A., Sizov I. G., “Plasticity Of Boronized Layers”, *Springer Series in Materials Science*, Switzerland, 237: 111-184 (2016).
27. Yorulmaz, M. A., “An Investigation Of Boriding Of Medium Carbon Steels”, Bitirme Tezi, *Marmara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi*, İstanbul, 25-42 (2007).
28. Suwattananont, N., “Multi-Component Boron Coatings On Low Carbon Steel AISI 1018”, Doktora Tezi, *New Jersey Teknoloji Enstitüsü*, New Jersey, 35-42 (2010).

29. Aşgın, A. M., “Borlanmış Tungstenin Aşınma Davranışının İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyon, 3-18 (2018).
30. Özer M, “Üç Farklı Çeliğe Katı Borlama İşlemi Yapılmasının İçyapı ve Sertlik Üzerine Etkisinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir, 13-23 (2011).
31. Güneş, İ. ve Taktak, Ş., “Kutu ve Plazma Borlanmış 21NiCrMo2 Çeliğinin Yüzey Karakterizasyonu”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 27 (1): 99-108 (2012).
32. Ekmekçiler, E., “Borlanmış Demir Aluminat (FeAl) Malzemenin Kinetik Ve Mekanik Özellikleri”, Yüksek Lisans Tezi, *Gebze Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü*, Gebze, 15-18 (2006).
33. Tabur, M., “Bor Karbür Kaplanmış AISI 8620 Ve Hardox 400 Çeliklerinin Abrasiv Aşınma Davranışlarının İncelenmesi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 40-55 (2008).
34. Boztepe, M. H., “Effect Of Boronizing Temperature And Time On Abrasion and Corrosion Resistance of AISI 1050 Steel”, Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı*, Adana, 9-13 (2014).
35. Fichtl, W., “Boronizing and Its Practical Applications”, *Materials In Engineering*, Vol 2: 276-286 (1961).
36. Bozkurt, N., “Bor Yayınımla Çeliklerde Yüzey Sertleştirme”, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 25-28 (1984).
37. Pye D., “Practical Nitriding and Ferritic Nitrocarburizing”, *ASM International*, Ohio, 9-26 (2003).
38. Sezgin, C. T., “Nitrasyon ve Borlama Yapılan Yüksek Manganlı Çeliğin Korozyon ve Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, *Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Karabük, 26-32 (2022).
39. Bostan, B., “Yüksek Hız Takım Çeliklerinin Yüksek Sıcaklık Aşınma Dayanımına Nitrasyon İşleminin Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 26-35 (2015).
40. Holmberg, K. and Matthews A., “Coatings Tribology 28nd ed”, Dowson, D., *Elsevier Science*, Amsterdam, 45-54 (1998).
41. Buckley, D. H., Surface Effects In Adhesion Friction, Wear and Lubrication 5 ed”, Scott D., *Elsevier Science*, Amsterdam 245-313 (1981).

42. Davis, J. R., "Surface Engineering For Corrosion And Wear Resistance", *ASM International*, USA, 54-87 (2001).
43. Stachowiak, G. and Batchelor, A. W., "Engineering Tribology 2nd ed", *Butterworth-Heinemann*, 483-590 (2000).
44. Chattopadhyay, R., "Surface Wear Analysis, Treatment and Prevention 1st ed", *ASM International*, 55-126 (2001).
45. Stachowiak G. W., "Wear Materials, Mechanisms And Practice", *John Wiley & Sons*, England, 10-15 (2005).
46. Şenol, E. ve Ölüç, S., "Şeffaf Camların Erozyon Karakteristiğinin Deneysel Olarak İncelenmesi", Bitirme Çalışması, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi*, Trabzon, 2-34 (2018).
47. Cengiz, M. H., "Hardox 400 Çelik Yüzeyinin Plazma Transferli Ark Kaynak Yöntemiyle Alaşımlandırılması ve Taguchi Metoduyla Değerlendirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 23-32 (2017).
48. Aksoy, T., "Farklı Oranlarda Bor İlavesinin 4140 Çeliğinin Korozyon Aşınma Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 19-22 (2019).
49. Sarıca, B., "Farklı Kalite Çeliklere Uygulanan Yüzey Kaplama İşlemlerinin Aşınma Davranışlarına Etkisi", Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 25-39 (2005).
50. Behera, B. B. and Prasad, N. V., "Erosion Wear Of Materials", *Department Of Metallurgical And Materials Engineering National Institute Of Technology Rourkela*, Rourkela, 4-13 (2007).
51. Erdem, V. E., Arısoy, C. F., Başman, G., Şeşen, M. K., "SAE 1060 Çeliğinin Erozif Aşınma Özelliklerinin Aşınmaya Dirençli Ticari Çelik Plakalarla Karşılaştırılması", *MMO*, 1-6.
52. Kohli, A. and Poirier, D.R., "Correlation of Mechanical Properties with Diameter and Cooling Rate of 1080 Wire-Rod", *JMEP*, 26: 5871-5876 (2017).
53. Bilgehan K, "Borlama ile Yüzeyi Sertleştirilmiş Ray Çeliğinin Aşınma Davranışının İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2020).

## ÖZGEÇMİŞ

Ali Yağız ŞAHİN, ilk ve orta öğretimini Karabük'te tamamladı. 2010 yılında Karabük Demir Çelik Lisesi'nden mezun oldu. 2011 yılında başladığı Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Raylı Sistemler Mühendisliği bölümünü 2017 yılında bitirmiştir. 2017 yılında demir çelik sektöründe özel firmada çalıştıktan sonra 2017 yılında KARDEMİR AŞ'de yatırım mühendisi olarak göreve başladı ve 2019 yılında Ar-Ge mühendisi olarak halen aynı fabrikada çalışmaya devam etmektedir. 2020 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim dalı yüksek lisans eğitimine başlamıştır.