

**T.C.
ADYAMAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**SEMENTASYON ÇELİĞİNİN KUTU BORLAMA YÖNTEMİYLE
KAPLANMASI MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

MURAT SARI

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ADYAMAN, 2019

**T.C.
ADYAMAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SEMENTASYON ÇELİĞİNİN KUTU BORLAMA YÖNTEMİYLE
KAPLANMASI MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Murat SARI

Yüksek Lisans Tezi

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu tez 18/07/2019 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından
oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Tanju TEKER
Danışman

Doç. Dr. Zuhâl KARAGÖZ GENÇ
Üye

Dr. Öğr. Üyesi Çağlar YÜKSEL
Üye

Prof. Dr. Murat KOCA
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu'ndaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SEMENTASYON ÇELİĞİNİN KUTU BORLAMA YÖNTEMİYLE KAPLANMASI MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Murat SARI

Adıyaman Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Doç. Dr. Tanju TEKER
Yıl : 2019, Sayfa sayısı: 99

Jüri : Doç. Dr. Tanju TEKER
: Doç. Dr. Zuhall KARAGÖZ GENÇ
: Dr. Öğr. Üyesi Çağlar YÜKSEL

Yüzey modifikasyon işlemlerinden biri olarak sayılan borlama yöntemi, kapladıkları malzemelerin servis sahasında özelliklerini geliştirerek daha uzun süre hizmet etmesini sağlar. Borlama, metal ve alaşımların yüzeyinin sertlik, aşınma direnci ve korozyon direncini artırırken aynı zamanda bu özellikleri yüksek sıcaklıklarda korumak ve erozyon direncini de arttırmak amacıyla da kullanılmaktadır. Bor, genellikle demir esaslı malzemelerde alaşım elementi veya yüzey sertleştirme amacı ile kullanılır. Borlama işleminin mekanizması, bor atomları ısı enerjisi etkisiyle metal yüzeyine yayınırlar ve esas metal atomlarıyla uygun borürler oluştururlar. Bor kaynağının fiziksel durumu katı, sıvı ya da gaz olabilir. Borlama işlemi genellikle 800-1100 °C sıcaklık aralığında, 1-12 saat süreyle yapılır. Dolgu malzemesi ve deoksidanlar borlama esnasında oksijeni tutarak redükleyici bir ortam oluştururlar. Borlama işlemi esnasında kullanılan yöntem, malzeme kompozisyonu, malzeme cinsi, işlem süresine ve işlem sıcaklığı elde edilen tabakaya etki eden faktörlerdir. Borlama ile yüksek sıcaklıklarda çelik malzeme yüzeyine, bor yayındırılarak, Fe₂B ve/veya FeB fazları içeren borür tabakaları elde edilir. Çeliklerde bor yayınımları ile elde edilen tabakaların sertlik ve aşınma dirençleri önemli miktarlarda artırılabilir. Bu çalışmada, sementasyon çeliği 850, 950 ve 1050 °C sıcaklıklarda 6, 8 ve 10 saat borlama işlemine tabi tutulmuştur. Borlama işlemi sonrası numunelerin yüzeyindeki mikroyapısal değişim optik mikroskop (OM), taramalı elektron mikroskopu (SEM), enerji dağılım spektroskopisi (EDS), X ışını kristalografisi (XRD), elementel yüzey haritalandırma analizi ve elektron geri saçılma kırınım analizi (EBSD) analizleriyle incelenmiştir. İşlem sonrası tüm numunelerin kaplamalarında testere dişi morfolojisi gözlenmiş olup yüzey pürüzlülüğü, mikrosertlik ve oluşan tabaka kalınlıkları her numune için ayrı ayrı ölçülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Borlama; Sementasyon Çeliği; Yüzey Pürüzlülüğü; Tabaka Kalınlığı.

ABSTRACT

MSc Thesis

THE INVESTIGATION OF MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF CEMENTATION STEEL BORONIZED BY PACK BORONIZING METHOD

Murat SARI

Adıyaman University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Metallurgical and Material Engineering

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Tanju TEKER
Year : 2019 , Number of pages: 99

Jury : Assoc. Prof. Dr. Tanju TEKER
: Assoc. Prof. Dr. Zuhall KARAGÖZ GENÇ
: Assist. Prof. Dr. Çağlar YÜKSEL

The boronizing method, which is considered as one of the surface modification processes, improves the properties of the materials they serve in the service area and enables them to serve for a longer period of time. While boronizing increases the hardness, abrasion resistance and corrosion resistance on the surface of metals and alloys, it is also used to protect these properties at high temperatures and develops the property of the erosion resistance. Boron is generally used for the purpose of alloying or surface hardening in iron based materials. Mechanism of boronizing process; boron atoms diffuses to the metal surface under the influence of heat energy and form borides with the metal atoms. During boronizing method, the physical condition of the boron source can be solid, liquid or gas. The boronizing is usually carried out at 800-1100 °C for 1-12 hours. The filler material and de-oxidants keep out the oxygen during the boronizing process by creating a reducing environment. The method used during the boring process, the composition of material, the type of the material, the processing time and the process temperature are the factors affecting the obtained coating layer. The boride layers containing Fe₂B and / or FeB phases are obtained with boronizing on the surface of the steel material at high temperatures. The hardness and abrasion resistance of the layers obtained by boron diffusion in steel can be increased significantly. In this study, the cementation steel was carried out at 850, 950 and 1050 °C for 6, 8 and 10 hours. The microstructure change on the surface of the samples after the boronizing process was investigated by optical microscope (OM), scanning electron microscope (SEM), energy dispersive spectroscopy (EDS), X-Ray diffraction analysis (XRD), elemental mapping analysis and electron backscatter diffraction (EBSD). Sawtooth morphology of all the samples were observed in the coatings and surface roughness, microhardness and layer thicknesses were measured separately for each sample.

Key Words: Boronizing; Cementation Steel; Surface Roughness; Layer Thickness.

DESTEKLER

Bu tez çalışması ADYÜBAP tarafından MÜFYL/2018-0002 numaralı proje ile desteklenmiştir.

BEYAN

“Sementasyon elięinin Kutu Borlama Yöntemiyle Kaplanması Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması” başlıklı tezimde, çalışmaların tamamen akademik kurallara ve etik değerlere sadık kalınarak yürütüldüğünü ve yazımda yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu ayrıca alıntılardan bilimsel etiğe uygun atıf yaparak yararlanmış olduğumu beyan ederim.

Murat SARI

imza

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasında ve uygulanmasında geniş bilgi birikimlerinden yararlandığım Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölüm Başkanı ve Danışman Hocam Sayın Doç. Dr. Tanju TEKER'e, projenin gerçekleştirilmesinde maddi destek sağlayan Adıyaman Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar ve Proje Birimine (ADYÜBAP), deneysel çalışmalarda yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Eyyüp Murat KARAKURT ve Veysel ÖZBAY'a teşekkürü borç bilirim.

Ayrıca hayatımın her anında yanımda olan aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	I
ABSTRACT.....	II
DESTEKLER.....	III
BEYAN.....	IV
TEŞEKKÜR.....	V
İÇİNDEKİLER	VI
ÇİZELGELER DİZİNİ	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
RESİMLER DİZİNİ.....	X
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	XI
1. GİRİŞ	1
1.1. Difüzyon Tabanlı Kaplama Yöntemleri	2
1.1.1. Karbürleme.....	2
1.1.2. Nitrürleme	3
1.2. Borlama	3
1.2.1. Bor Minerali Hakkında Genel Bilgi	4
1.2.1.1. Bor Elementinin Doğada Bulunuşu	6
1.2.1.2. Borun Elde Edilmesi	7
1.2.2. Demir Bor Denge Diyagramı	7
1.2.3. Metal Bor İlişkisi.....	8
1.2.4. Metal Bor Yayınımı	10
1.2.5. Çeliklerde Alaşım Elementi Olarak Bor	11
1.2.6. Çeliklerde Borür ve Bor Karbürler.....	11
1.2.7. Borlama Yöntemleri.....	12
1.2.7.1. Kutu Borlama	12
1.2.7.2. Sıvı Ortamda Borlama.....	14
1.2.7.3. Pasta (Macunlama) İle Borlama.....	14
1.2.7.4. Gaz Ortamında Borlama	15
1.2.7.5. Plazma (İyon) Borlama	15
1.2.8. Borür Tabakasının Özellikleri.....	16
1.2.9. Bor Tabakasının Özelliklerine Etki Eden Faktörler.....	18
1.2.9.1. Borlayıcı Ortamın Bileşimi ve Konsantrasyonun Etkisi.....	18
1.2.9.2. Alaşım Elementlerinin Etkisi	19
1.2.9.3. İşlem Sıcaklığı.....	21
1.2.10. Borür Tabakasının Çeşitleri	22
1.2.11. Borlu Tabakanın Kalınlığı	23
1.2.12. Borlama Sonrası Özelliklerin Geliştirilmesi.....	24
1.2.13. Borlu Tabakanın Karakteristik Özellikleri	24
1.2.13.1. Sertlik.....	24
1.2.13.2. Aşınma	26
1.2.13.3. Korozyona Karşı Direnç	26
1.2.14. Alaşım Elementinin Kutu Borlamaya Etkisi	27
1.2.15. Borür Tabakasındaki Kalıntı Gerilmeler	29
1.2.16. Borlanabilen Malzemeler.....	30

1.2.17. Borlu Malzemelerin Isıl İşlemi	30
1.2.18. Borlama İşleminin Avantajları.....	31
1.2.19. Borlamanın Dezavantajları	33
1.2.20. Borlama İşleminin Uygulama Alanları.....	33
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	36
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	39
3.1. Çalışmanın Amacı	39
3.2. Borlama Öncesi Yapılan Karakterizasyon İşlemleri	39
3.2.1. Deneyde Kullanılacak Numunenin Özellikleri	39
3.2.2. Numunelerin Kesilmesi.....	39
3.2.3. Zımparalama ve Parlatma.....	40
3.3. Borlama İşlemi	41
3.4. Borlama Sonrası Yapılan Karakterizasyon İşlemleri	43
3.4.1. Borlanmış Numuneleri Ortadan İkiye Kesme	43
3.4.2. Optik Görüntü Analizi.....	44
3.4.3. Yüzey XRD Analizleri	45
3.4.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizleri	45
3.4.5. Enerji Dağılım Spektroskopisi (EDS) ve Elementel Haritalandırma (Mapping) Analizleri.....	46
3.4.6. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Analizi	47
3.4.7. Kesitten Mikrosertlik Ölçümü Analizi.....	47
3.4.8. Elektron Geri Saçılım Difraksiyonu (EBSD) Analizi	48
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	50
4.1. Makro Fotoğrafların Değerlendirilmesi	50
4.2. Optik, SEM ve EDS Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi	51
4.3. Mikrosertlik Test Sonuçları.....	77
4.4. XRD Faz Analizi	81
4.5. Kaplamaların Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Sonuçları	84
4.6. Elementel Haritalandırma (Mapping) Analiz Sonuçları ve İrdelenmesi.....	88
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	92
KAYNAKLAR	95
KİŞİSEL BİLGİLER.....	99

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1 Borlama yönteminin diğer kaplama yöntemleri ile karşılaştırılması.....	4
Çizelge 1.2 Bor elementinin özellikleri	4
Çizelge 1.3 Kristal borun yapısı ve kafes parametreleri	4
Çizelge 1.4 Dünya üzerindeki bor rezervleri	5
Çizelge 1.5 Önemli bor mineralleri	6
Çizelge 1.6 Dünyadaki bor mineralleri	6
Çizelge 1.7 Türkiye’deki bor mineralleri.....	6
Çizelge 1.8 Fe-B faz diyagramındaki önemli noktalar	8
Çizelge 1.9 Borür ve karbo-borürlerinin sınıflandırılması.....	9
Çizelge 1. 10 Bazı metal borürlerin fiziksel özellikleri ve kristal yapısı	10
Çizelge 1.11 Katı ortamda verilen bazı bor kaynakları	13
Çizelge 1.12 Sıvı ortamda borlama yönteminde kullanılan esas bor kaynakları ve özellikleri.....	14
Çizelge 1.13 Gaz halindeki bor bileşikleri ve bazı özellikleri	15
Çizelge 1.14 FeB ve Fe ₂ B’nin tipik özellikleri	17
Çizelge 1.15 C45 çeliğinin farklı sıcaklıklarda borlanması sonucunda meydana gelen kaplama kalınlıklarının karşılaştırılması.	21
Çizelge 1.16 Farklı cins çeliklerin borlanması sonucunda oluşan mikrosertlik farklılıkları	25
Çizelge 1.17 Çeşitli malzemelerin borlanması işleminde meydana gelen farklı borlu fazların mikrosertlik ve ergime noktaları	25
Çizelge 1.18 Farklı malzemelerin borlama işlemi önceki ve sonraki sürtünme katsayıları	26
Çizelge 1.19 Belirli malzemelerin mikrosertlik sonuçları	32
Çizelge 3.1 Ekabor borlama tozlarının özellikleri	42

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 Fe-B ikili denge diyagramı	8
Şekil 1.2 Kutu borlama yönteminde iş parçasının potaya yerleştirilmesi	13
Şekil 1.3 Plazma borlama işleminin şematik gösterimi	16
Şekil 1.4 Tek ve çift fazlı borür tabakaları	18
Şekil 1.5 Borür tabakasının morfoloji çeşitleri	22
Şekil 1.6 Borür tabaka kalınlığının tanımlanması	23
Şekil 1.7 Borlanmış malzemelerin yüzeyinde meydana gelen bor tabakasındaki elementlerin şematik olarak gösterimi	27
Şekil 1.8 Alaşım elementlerinin borür tabakasına etkisi	28
Şekil 1.9 Çeliklerde difüzyon proseslerinden elde edilen sertlik aralıkları çeliklerin yüzeylerine farklı difüzyon prosesleri sonucunda elde edilen değişik kaplamaların sertlik değer aralıkları	31
Şekil 3.1 Numuneni potaya diziliş şekli.....	43
Şekil 4.1 850 °C’de borlanan sementasyon çeliğinin farklı işlem sürelerine bağlı olarak numunelere ait sertlik-mesafe eğrilerindeki değişim.....	78
Şekil 4.2 950 °C’de borlanan sementasyon çeliğinin farklı işlem sürelerine bağlı olarak numunelere ait sertlik-mesafe eğrilerindeki değişim	79
Şekil 4.3 1050 °C’de borlanan sementasyon çeliğinin farklı işlem sürelerine bağlı olarak numunelere ait sertlik-mesafe eğrilerindeki değişim	80
Şekil 4.4 850 °C işlem sıcaklığında 6 saat sürede borlanan sementasyon çeliğinin XRD analizi.....	81
Şekil 4.5 950 °C işlem sıcaklığında 8 saat sürede borlanan sementasyon çeliğinin XRD analizi.....	82
Şekil 4.6 1050 °C işlem sıcaklığında 10saat sürede borlanan sementasyon çeliğinin XRD analizi.....	83
Şekil 4.7 850 °C işlem sıcaklığında 6, 8 ve 10 saat işlem sürelerinde borlanan sementasyon çeliğinin yüzey pürüzlülük analiz sonuçları	85
Şekil 4.8 950 °C işlem sıcaklığında 6, 8 ve 10 saat işlem sürelerinde borlanan sementasyon çeliğinin yüzey pürüzlülük analiz sonuçları	86
Şekil 4.9 1050 °C işlem sıcaklığında 6, 8 ve 10 saat işlem sürelerinde borlanan sementasyon çeliğinin yüzey pürüzlülük analiz sonuçları	87

RESİMLER DİZİNİ

Resim 3.1 Kesme cihazı.....	40
Resim 3.2 Zımparalama ve parlatma makinesi	41
Resim 3.3 Dijital kontrollü fırın.....	41
Resim 3.4 Hassas kesme cihazı.....	44
Resim 3.5 Optik mikroskop	44
Resim 3.6 XRD cihazı.....	45
Resim 3.7 Deneylerde kullanılan taramalı elektron mikroskobu (SEM).....	46
Resim 3.8 EDS deneyinde kullanılan taramalı elektron mikroskobu	46
Resim 3.9 Yüzey pürüzlülük test cihazı.....	47
Resim 3.10 Mikrosertlik test cihazı	48
Resim 3.11 Elektron geri saçılım difraksiyon (EBSD) cihazı	49
Resim 4. 1 Borlama işlem öncesi tüm numunelerin makro görüntüleri	50
Resim 4.2 Borlama işlem sonrası numunelerin makro görüntüleri	51
Resim 4.3 850 °C’de borlanan numunelerin optik görüntüleri.....	52
Resim 4.4 850 °C’de borlanan numunelerin SEM görüntüleri.....	53
Resim 4.5 850 °C 6 saat işlem proseslerinde borlanan numunenin EDS analiz noktalarını gösteren SEM görüntüsü.....	53
Resim 4.6 850 °C 6 saat işlem proseslerinde borlanan numunenin EDS analiz grafikleri ve sonuçları.....	58
Resim 4.7 950 °C’de borlanan numunelerin optik görüntüleri.....	61
Resim 4.8 950 °C’de borlanan numunelerin SEM görüntüleri.....	62
Resim 4.9 950 °C 8 saat işlem proseslerinde borlanan numunenin EDS analiz noktalarını gösteren SEM görüntüsü.....	62
Resim 4.10 950 °C 8 saat işlem proseslerinde borlanan numunenin EDS analiz grafikleri ve sonuçları	67
Resim 4.11 1050 °C’de borlanan numunelerin optik görüntüleri.....	69
Resim 4.12 1050 °C’de borlanan numunelerin SEM görüntüleri.....	70
Resim 4.13 1050 °C 8 saat işlem proseslerinde borlanan numunenin EDS analiz noktalarını gösteren SEM görüntüsü.....	70
Resim 4.14 1050 °C 8 saat işlem proseslerinde borlanan numunenin EDS analiz grafikleri ve sonuçları.....	75
Resim 4.15 950 °C işlem sıcaklığında 8 saat sürede borlanan sementasyon çeliğinin elementel haritalandırma analizi.....	89
Resim 4.16 1050 °C işlem sıcaklığında 8 saat sürede borlanan sementasyon çeliğinin elementel haritalandırma analizi	90

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

B	: Bor
BaCO ₃	: Baryum Karbonat
BaO	: Baryum Oksit
B ₄ C	: Borkarbür
CO ₂	: Karbon Dioksit
Fe	: Demir
FeB	: Demir Borür
Fe ₂ B	: Demir Diborür
HV	: Vickers Sertlik Değeri
NaCl	: Sodyum Klorür
NH ₃	: Amonyak
TiC	: Titanyum Karbür
TiO ₂	: Titanyum Dioksit
WC	: Tungsten Karbür
µm	: Mikrometre
°C	: Santigrat Derece

Kısaltmalar

AISI	: Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü (American Iron and Steel Institute)
EBSD	: Elementel Haritalandırma Analiz
EDS	: Enerji yayımlımlı X-Işını Analizi (Energy Dispersive Spectroscopy)
HRC	: Rockwell C Sertlik
OM	: Optik Mikroskop
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskop (Scanning Electron Microscope)
XRD	: X Işını Kristalografisi (X-Ray Diffraction)

1. GİRİŞ

Yüzey, maddenin kendisine ait olmayan bir ortamla temasta olan kısmı olarak tanımlanır. Ayrıca, maddeyi çevreler ve geometrisini oluşturur. Maddelerin ortamla olan bütün etkileşimleri, yüzey üzerinden gerçekleşmektedir. Bu yüzden malzemelerin yüzeyleri büyük önem arz etmektedir.

Malzeme yüzeyleri tarafından belirli özellikler belirlenebilir. Bu özellikler:

- Aşınma dayanımı
- Sürtünme dayanımı
- Korozyon dayanımı
- Optik özellikleri
- Yorulma dayanımı
- Difüzyon özellikleri
- Dış görünümüdür.

Malzemelerin yüzey davranışı, yukarıda verilen özelliklerin belirlenmesinde rol oynar. Bu yüzden malzemelerin özelliklerinin arttırabilmek için sadece yüzey kalitesinin iyileştirmek yeterli olabilmektedir. Bunu örneklendirmek istersek malzemelerin korozyona karşı korunmasında ve yüzey görünüm kalitesinin arttırmak için boya kullanılabilir.

Zaman zaman malzemedan istenen özellikler yetersiz kalır ve daha yüksek kaliteli daha iyi nitelikli malzemelere gereksinim duyulur. Böyle durumlarda, malzemeyi değiştirmek yerine sadece yüzey özelliklerini geliştirmek maddi açıdan büyük bir avantaj sağlar. Buna örnek olarak altın kaplama verilebilir. Bu kaplama sayesinde malzemenin altından yapılması yerine malzemenin sadece yüzeyinin altınla kaplanması büyük bir ekonomik avantaj sağlar.

Bazen malzeme yüzeyinden istenen özellikler, malzemedan istenilen özelliklerin tersi olabilir. Örnek vermek istersek; aşınma dayanımının yüksek olması istenilen yerlerde malzemenin sert olması gereklidir. Fakat bu durum, malzemenin kırılma direncinin yüksek olması anlamına gelmektedir. Makina dişlilerinde bu durum görülmektedir. Aşınma, yüzeyle ilgili olduğu için malzemenin yalnızca yüzey aşınma dayanımının arttırılması malzemenin bütününe bu özelliği kazandırmaktadır.

Malzemenin iç kısmının ise yumuşak kalması sağlanarak malzemenin kırılma tokluğunun yüksek olması sağlanır.

Bazı durumlarda yüksek özellikli malzemeyi üretmek teknolojik veya ekonomik açıdan mümkün değildir. Fakat aynı malzemeyi kaplama yöntemleri uygulayarak istenilen özelliklerdeki malzemeyi elde edebiliriz.

Verilen örneklerde olduğu gibi malzeme yüzeylerinde yapılan iyileştirmeler sadece malzeme yüzeyinde yapıldığı için hem teknolojik hem ekonomik hem de zaman açısından bize ne kadar önemli olduğunu vurgulamaktadır [1].

1.1. Difüzyon Tabanlı Kaplama Yöntemleri

Borlama, karbürleme, nitrüleme vb. kaplama yöntemleri termokimyasal bir difüzyon işlemidir. Kaplama yöntemlerinin amacı malzeme yüzeyinin istenilen özellikleri sahip olması için istenilen element atomlarının malzeme yüzeyine difüze edilmesidir. Bunun sonucunda elde edilen tabakada istenilen amaca uygun özellikler elde edilmiş olur. Termokimyasal yöntemlerle malzemelerin aşınma dayanımları, sürtünme dayanımları, korozyona karşı dirençleri, yüzey pürüzlülüğü, sertlik, yorulma dayanımları ve difüzyon özellikleri önemli ölçüde geliştirilebilir. Ayrıca kaplama işlemlerinden sonra altlık malzemesi ile tabaka arasında elementel bir etkileşim olduğundan dolayı aralarında güçlü bağlar oluşur [2].

1.1.1. Karbürleme

Karbürleme, demir esaslı malzemelerin yüzeyine karbon yayındırılması işlemidir. Karbürlenen parçalar sertleştirildikten sonra yüzeyde sert bir tabaka (kabuk), iç kısımda ise yumuşak ve tok bir yapı elde edilir. Bu özellik, dişli çark gibi yorulma kırılması ve temas yorulması dayanımı ile aşınma direnci istenen makine elemanlarında tercih edilmektedir. Çeliklerde, sertleşme sınırı olarak kabul edilen 50 HRC sertliğe ulaşabilmek için çeliğin karbon oranı ($>0.2\%$) olması gerekir [3]. Komple sertleşebilen çeliklerde, yüksek karbon oranları sertlik ve dayanımda artış sağlarken ısıtılma işlemi esnasında çatlama riskini artırmakta ve toklukta azalma meydana getirmektedir. Çeliğin sadece yüzeyinin sertleştirilmesi, aşınma dayanımını ve

yorulma dayanımını (eğme zorlamalarında) arttırmakta ve tokluk özellikleri de tatmin edici düzeyde olmaktadır. Bu özelliklerinden dolayı dişli çarkların yapımında genellikle sementasyon çelikleri kullanılmaktadır [4].

1.1.2. Nitrürleme

Nitrürleme, çelik yüzeyine azot emdirilerek yüzeyde sert maden nitrür bileşimlerinin oluşması esasına dayalı termokimyasal bir difüzyon işlemidir. Mantık olarak karbürleme işlemine benzemekle beraber azot verici gazın bileşimi ve ısıl işlemin gerçekleştirildiği sıcaklık farklıdır. Nitrürleme işlemi 450-590 °C sıcaklıkları arasında yapıldığından bu süreç ferritik termokimyasal bir olaydır. Aynı zamanda ısıl işlem sıcaklığı düşük olduğu için ve sonrasında ani soğutma yapılmadığı için parçada oluşan ısıl çarpılmalar, gerginlikler ve oksidasyon minimum seviyededir. Nitrürleme işleminde ortamda bulunan azot gazı atomları, çelik atomlarına kıyasla çok küçüktür ve çeliğin derinliklerine doğru ilerler. Bu esnada çelik yüzeyinde ve difüzyon tabakasında demir nitrür, alüminyum nitrür, krom nitrür gibi sert bileşikler oluşur ve çeliğin sertliği artar. Ayrıca bu nitrür tabakanın korozyon direnci yüksektir. Bu yüzden parçanın korozyon mukavemetini de artırır. Nitrürleme sırasında çelik yüzeyinde oluşan beyaz bir tabaka, oluşan bu tabakanın altında ise difüzyon tabakası olarak adlandırılan yapılar oluşmaktadır [5].

1.2. Borlama

Borlama, metallerin yüzeyine bor atomlarının difüzyonu ile borür tabakası oluşturması esasına dayanır. Borlama, metalik malzemelere 700-1150 °C sıcaklıkta ve 1-12 saat süreyle yüzeyi temizlenmiş parçalara katı, sıvı, pasta, gaz vs. gibi çeşitli ortamlarda uygulanır.

Borlama işlemi; metal ve alaşımlarının yüzeylerinde aşınma dayanımı, sürtünme dayanımı, sertlik, korozyona karşı dayanımı, erozyon direncini ve aynı zamanda da yüksek sıcaklıklara karşı dayanımını da arttırmaktadır. Endüstriyel olarak genellikle borlama işlemi demir esaslı alaşımlara uygulanır [6-9]. Çizelge 1.1’de borlama yönteminin diğer kaplama yöntemleri ile karşılaştırılması verilmiştir.

Çizelge 1.1 Borlama yönteminin diğer kaplama yöntemleri ile karşılaştırılması
(Verilen değerler yüksekte düşüğe doğru sıralanmıştır.)

Sertlik	Kırılgenlik	Ergime Noktası	Serbest Enerji (-ΔG)	Termal Genleşme Katsayısı	Alt Metale Yapışma
Borür	Nitrür	Karbür	Nitrür	Nitrür	Borür
Karbür	Karbür	Borür	Karbür	Karbür	Karbür
Nitrür	Borür	Nitrür	Borür	Borür	Nitrür

1.2.1. Bor Minerali Hakkında Genel Bilgi

Bor 3A grubunda bulunan metaller ile ametaller arasında yer alan yarı metal ve yarı iletken bir elementtir. Bor doğada saf olarak bulunmayıp genellikle bileşiği olan boraks şeklinde bulunur. Bor elementinin kâşifleri Louis Joseph Gay-Lussac ve Louis Jacques Thénard'dır. Çizelge 1.2'de bor elementinin özellikleri verilmiştir.

Çizelge 1.2 Bor elementinin özellikleri

Sembolü	B
Atom Numarası	5
Atom Kütlesi	10.811 g/mol
Elektron Sayısı	5
Element Hali	Yarı Metal
Periyodik Tablodaki Grubu	3A
Yoğunluk	2.34 g/cm ³
Erime Noktası	2076 °C
Kaynama Noktası	3927 °C
Oda Koşulundaki Hali	Katı
Görünümü	Siyah-Kahverengi

Element halde bulunan bor kristalleri, yaklaşık olarak elmas kadar serttir. Yarı iletken olan bor, yüksek sıcaklıkta elektrik iletkenliğini yaklaşık 100 kat arttırabilir. Çizelge 1.3'de kristal borun yapısı ve kafes parametreleri verilmiştir.

Çizelge 1.3 Kristal borun yapısı ve kafes parametreleri [10]

Kristal Şekli	Kafes Parametreleri (Å)	
	a	b
Tetragonal	8.13	8.57
Hegzagonal	9.54	11.98

Bor elementi, kovalent bağ oluşturur. Kristalize haldeki bor elementi kimyasal açıdan aktif değildir. Bor elementi, amorf durumu dışında tüm durumlarda florür ve klorür asitleri ile tepkimeye girmez. Erimiş haldeki bulunan sodyum hidroksiti çok yavaş bir biçimde etkilerken derişik haldeki erimiş olan sodyum peroksiti hızlı bir şekilde etkir. Düzensiz halde bulunan bor elementi, kimyasal tepkimeye açıktır ve kolay bir şekilde tepkimeye girer.

Bor, yer kabuğunun bileşimine giren elementler içinde nadir olup doğada daha çok boratlar halinde bulunur. Tabiatta 60 kadar bor minerali bulunmasına rağmen bunlardan sadece Kolemanit ($\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), Tinkal ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$) ve Üleksit ($\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) cevherlerinden ekonomik olarak bor ürünleri elde edilebilmektedir.

Dünyadaki bor rezervlerinin çoğu Türkiye’de bulunmaktadır [10]. Çizelge 1.4’de dünyadaki bor rezervlerinin dağılımları ve yüzdelik payları verilmektedir. Günümüzde bor üretiminin %70’ini ABD, %18’ini Türkiye ve %12’sini diğer ülkeler sağlamaktadır. Üretilen bor ve ürünlerin %30’unu ABD, %70’ini ise Avrupa, Japonya ve Rusya tüketmektedir [11]. Çizelge 1.5’de önemli bor mineralleri verilmiştir.

Çizelge 1.4 Dünya üzerindeki bor rezervleri [10]

Ülkeler	Rezerv (Milyon Ton)	(%) Pay
Türkiye	803	63.0
A.B.D	209	17.1
Rusya	136	11.5
Şili	41	3.2
Çin Halk	36	2.8
Peru	19	1.5
Bolivya	9	0.7
Arjantin	~1	~0.2
Toplam	1254	100.0

Çizelge 1.5 Önemli bor mineralleri [12]

Mineralin Adı	Formülü	% B ₂ O ₃	% H ₂ O
Tinkal	Na ₂ O2B ₂ O ₃ 10H ₂ O	36.6	47.2
Tinkalkonit	Na ₂ O2B ₂ O ₃ 5H ₂ O	47.8	30.9
Kermit	Na ₂ O2B ₂ O ₃ 4H ₂ O	51.10	26.4
Üleksit	Na ₂ O2CaO5B ₂ O ₃ 16H ₂ O	43.0	35.6
Meyyerhofferit	2CaO3B ₂ O ₃ 7H ₂ O	46.7	30.58
Kolemanit	2CaO3B ₂ O ₃ 5H ₂ O	50.58	22.28
Katoite	Mg ₃ (BO ₃) ₂	36.5	-
Pandermit	4CaO5B ₂ O ₃ 7H ₂ O	50.0	18.1
Fluoborite	Mg ₃ (BO ₃)Fe(OH) ₃	17.2-19	-
Danburite	CaB ₂ SiO ₈	28.7	-
Borasit	5MgOMgCl ₂ 7B ₂ O ₃	62.2	-
Hidroborasit	4CaOMgO3B ₂ O ₃ 6H ₂ O	50.50	26.1
Kurnakovit	2MgO3B ₂ O ₃ 15H ₂ O	37.3	51.52
İnyoit	2CaO3B ₂ O ₃ 13H ₂ O	37.6	45
Aşarit	2MgOB ₂ O ₃ H ₂ O	41.4	11.53

1.2.1.1. Bor Elementinin Doğada Bulunuşu

Dünyadaki bor rezervi yaklaşık olarak 500 milyon ton olduğu tahmin edilmektedir. Çizelge 1.6’da dünyadaki bor mineralleri verilmiştir. Çizelge 1.7’de ise Türkiye’deki bor mineralleri verilmiştir. Bunlar:

Çizelge 1.6 Dünyadaki bor mineralleri

Türkiye	ABD	Rusya	Çin ve Hindistan
% 60	% 25	% 5-10	% 5-10

Çizelge 1.7 Türkiye’deki bor mineralleri

Boraks	Kolemanit	Kolemanit-Üleksi	Pandermit
Eskişehir (Kırka)	Kütahya (Emet)	Balıkesir (Bigadiç)	Bursa (Mustafa Kemalpaşa)

Şehirlerinde bulunmakta olup Türkiye’deki en önemli bor minerali kolemanittir. Eski dönemlerde bor mineralleri işlenmemiş olarak ihraç edilirken günümüzde Etibank tarafından kurulan Bandırma’daki Eti Maden İşletme tarafından işlenmiş bor olarak ihraç edilmektedir.

1.2.1.2. Borun Elde Edilmesi

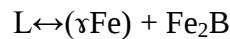
Bor elementinin saf halde bulunması önemsizdir. Ancak borik asit ve bor tri-oksitin saf olarak bulunması çok önemlidir. Bu yüzden bor minerallerini işleyip boraks, borik asit ve bor tri-oksit elde etmeyi amaçlarız. Boraks elde etmek için sodyum borat minerallerine arıtma işlemi uygulanır. Elde ettiğimiz boraks mineraline kızdırma işlemi uyguladığımızda susuz boraks, sülfat asidiyle işleme tabi tuttuğumuzda borik asit, borik asidi ise kızdırılmasıyla da bor tri-oksit minerali elde etmiş oluruz. En yaygın bulunan bor mineralleri şunlardır:

- Turmalin $[\text{Na}(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Li}, \text{Al}, \text{Mn})_3\text{Al}_6(\text{BO}_3)_3\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{OH}, \text{F})_4]$,
- Boraks $[\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_5 (\text{OH}) 4.8\text{H}_2\text{O}]$,
- Kernit $[\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_5 (\text{OH}) 4.2\text{H}_2\text{O}]$ 'dir.

1.2.2. Demir Bor Denge Diyagramı

Fe-B ikili denge diyagramı Şekil 1.1'de görülmektedir [13]. İkili Fe-B denge diyagramı incelendiğinde, içerisinde iki bileşenli intermetalik Fe_2B , FeB ve Fe_3B bileşikler yer almaktadır. Bunlardan Fe_3B bileşiği 1150-1250 °C gibi dar bir sıcaklık aralığının üzerinde eriyebildiğinden dolayı bu sıcaklıkların aşağısında yarı kararlı bir faz özelliği gösterir. Fe_3B fazı $\text{Fe}_{76}\text{B}_{24}$ sıvısının hızlı soğutulması sonucunda ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, Fe_3B fazı buradaki diyagram içerisinde yer almamaktadır.

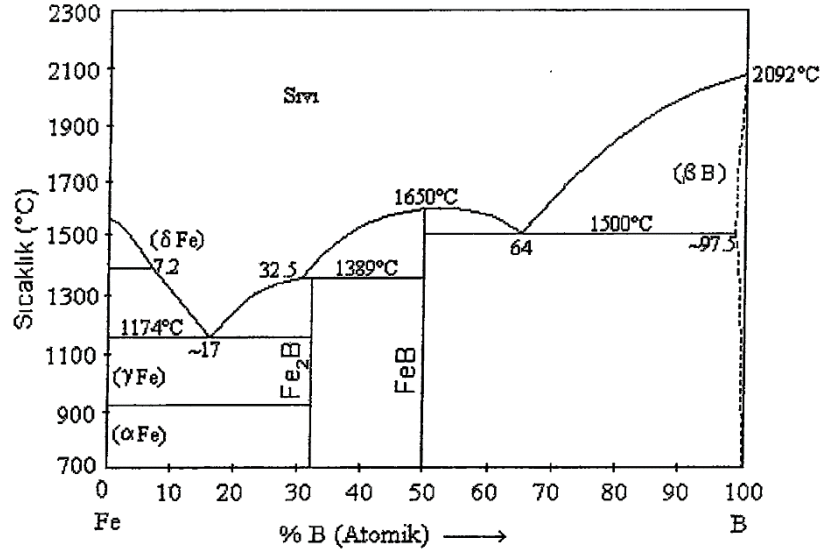
İkili Fe-B denge diyagramı gereğince demir ile bor arasında ağırlık olarak % 8.83 bor oranında Fe_2B ve % 16.23 bor oranında FeB bileşiği oluşmaktadır. 1174 °C sıcaklıkta ise ağırlıkça % 3.8 bor oranında,



bileşik ve fazından teşekkül eden bir ötektik reaksiyon meydana gelmektedir [13].

Ötektik reaksiyon $(\gamma)\text{Fe}$ tane sınırlarında ve/veya Fe_2B 'da başlamaktadır. Ötektiğin yapısı ve özellikleri bileşimine ilaveten sıvı tabakanın soğuma hızına bağlıdır. Soğuma hızının ani olması ince mikroyapıyı, yüksek sertliği ve en iyi tokluğu beraberinde getirmektedir [14].

Çizelge 1.8’de Fe-B faz diyagramında bulunan önemli noktalar verilmiştir [13].



Şekil 1.1 Fe-B ikili denge diyagramı [13]

Çizelge 1.8 Fe-B faz diyagramındaki önemli noktalar [13]

Reaksiyon	Bileşim B (%At.)			Sıcaklık (°C)	Reaksiyon Tipi
$L \leftrightarrow (\delta Fe)$		O		1535	
$(\delta Fe) \leftrightarrow (\gamma Fe)$		O		1392	
$(\gamma Fe) \leftrightarrow (\alpha Fe)$		O		911	
$(\delta Fe) \leftrightarrow (\gamma Fe) + L$	≈O	≈0.5	7.2	1392	Metatektik
$(\gamma Fe) \leftrightarrow (\gamma Fe) + Fe_2B$	≈O	≈O	33.3	911	Peritektoid
$L \leftrightarrow (\gamma Fe) + Fe_2B$	≈17	≈O	33.3	1174	Ötektik
$L + FeB \leftrightarrow Fe_2B$	325	50	33.3	1389	Peritektik
$L \leftrightarrow FeB$		50		1650	Normal ergiyen
$L \leftrightarrow FeB + (\beta B)$	64	50	98.5	1500	Ötektik
$L \leftrightarrow (\beta B)$		100		2092	

1.2.3. Metal Bor İlişkisi

Birçok metal, bor ile tepkimeye girmesi sonucunda metal borürler oluşmaktadır. Meydana gelen borür yapısının oluşmasında atom çapı valans faktöründen daha etkilidir. Bu olay bor atom boyutlarının diğer bileşiklerindeki atomlar ile kıyaslandığında daha büyük olmasındandır. Yapıda yeteri kadar bor

bulunması sonucunda B-B bağları meydana gelir. Meydana gelen bağın konfigürasyonu borür fazının kristal yapısını kontrol eder.

Meydana gelen bor konsantrasyonunun artması ve kendisine göre daha büyük metal atomlarının seçilmesiyle yapı içerisindeki bor atomları önce çiftler daha sonra zik-zak zincirler, çift zincirler, hegzagonal sınırlar ve en sonunda ise üç boyutlu kafes yapıları oluşturur. Aynı tip kristal yapılar, aynı bileşim oranına sahip borürler tarafından meydana gelir. Çizelge 1.9’da çeşitli metal elementlerinin oluşturduğu metal-borürlerin sınıflandırılması verilmiştir. Çizelge 1.10’da ise bazı borür bileşiklerin fiziksel ve kimyasal özellikleri verilmiştir.

Çizelge 1.9 Borür ve karbo-borürlerinin sınıflandırılması

Element	Borür Tipi Ve Yapısı					
	M ₃ B Ortorombik	M ₂ B Tetragonal	M ₃ B ₂ Tetragonal	MB Ortorombik	M ₃ B ₄ Ortorombik	MB ₂ Hegzagonal
Demir	Fe ₃ (CB)	Fe ₂ B	-	FeB	FeMo ₂ B ₄	-
Nikel	Ni ₃ B	Ni ₂ B	-	NiB	NiMo ₂ B ₄	-
Krom	Cr ₃ B	Cr ₃ B	-	CrB	Cr ₃ B ₄	CrB ₂
Manganez	-	-	-	MnB	Mn ₃ B ₄	MnB ₂
Titanyum	-	-	-	TiB	-	TiB ₂
Molibden	-	-	Mo ₃ B ₂	MoB	FeMo ₂ B ₄	MoB ₂
Niyobyum	-	-	Nb ₃ B ₂	NbB	Nb ₃ B ₄	NbB ₂
Vanadyum	-	-	V ₃ B ₂	VB	V ₃ B ₄	VB ₂

Çizelge 1.10 Bazı metal borürlerin fiziksel özellikleri ve kristal yapısı

Metal Borür Bileşiği	Teorik Yoğunluk (g/cm ³)	Ergime Noktası (°C)	Isıl İletkenlik (J/m.s.K)	Sertlik (RC)	Elastik Modülü (GPa)
Mo₂B	9.23	2280	-	24.5	-
MoB₂	7.99	2375	-	11.8	-
Mo₂B₅	7.45	2140	50 (20 °C)	23	672
Fe₂B	7.34	1410	17.4	13.1-17.7	284
FeB	6.73	1650	12 (20 °C)	16.2-18.6	343
Co₃B	8.13	1110	17	11.3	-
Co₂B	8.05	1260	14	11.3	-
CoB	7.32	-	17	11.3	-
Cr₂B	6.58	1870	10.9 (20 °C)	13.2	-
Mn₂B	7.18	1580	6.6	17.7	-
MnB	6.36	1890	7.7	20.1	-
NbB	7.57	2917	15.6 (27 °C)	21.5	-
NbB₂	7.00	3036	23.5 (1027 °C)	25.5	637
Ni₃B	8.20	1175	41.8	11.7	-
Ni₂B	8.05	1225	54.8	14	-
NiB	7.17	1590	21.9	15.2	-
TiB	4.56	2190	-	22.7	-
TiB₂	4.52	3225	64.4 (27 °C)	25.5-33	551
VB	5.60	2570	-	-	-
VB₂	5.07	2742	42.3 (27 °C)	20.6-27.5	268
W₂B	17.09	2670	-	23.7	-
WB	-	2665	-	36.3	-
W₂B₅	13.17	2365	52 (20 °C)	26.1	775

1.2.4. Metal Bor Yayınımı

Demir esaslı alaşımlarda alaşım elementlerinin genellikle farklılık gösteren atom çaplarıyla ilişkili olarak yer alan veya ara yer atomu olarak esas metal içerisinde ergiyebildiği belirtilmiştir. Bor, bu prensibe yakın olarak α -Fe'de yer alan ve ara yer katı eriyik oluşumuna uygun bir pozisyonda yer almaktadır. Bor elementinin atom çapı, demirin atom çapına göre %25 daha küçüktür. Bu yüzden metaller içerisinde kolay çözünebilmektedir.

Bor elementi, demir ile tam olarak yer alan ya da ara yer katı eriyiği yaptığı kesin olarak belli değildir. Bor elementinin atom çapı demir içerisinde bulunan arayer ve yer alan katı eriyik oluşumuna uygundur. Daha önce yapılan X-ışınları çalışmalarıyla kafes parametre ölçüleri sonucunda bor'un α -Fe'de yer alan katı eriyik

oluşturduğu ileri sürülmüştür. Yapılan difüzyon çalışmalarında bu durum α -Fe'de bor yayılımı için gerekli olan aktivasyon enerjisi değerlerinin yer alan katı ergiyik oluşumuna uygun olduğu gözlenmiştir.

1.2.5. Çeliklerde Alaşım Elementi Olarak Bor

Az alaşımlı çeliklerde bulunan bor, malzemelerin sertleşmesine neden olur. Bu olay östenitin dönüşümünü yavaşlattığı için meydana gelir. Alaşımlı çeliklere göre bor içerikli çelikler, iyi darbe dayanımı ve iyi sertleşme kabiliyeti gibi üstünlükler sağlar. Fakat bu durum, temperleme yapılacak olan malzemelerde bir dezavantaj oluşturur. Bunun neden ise yumuşamaya karşı gösterdiği dirençtir. Alaşım içerisindeki bor miktarının artması ile birlikte malzeme sertliğinin artması sonucunda darbe dayanımında azalma meydana gelmektedir. Bu özelliklerden dolayı kullanılacak olan malzemenin hangi amaçlarda kullanılacağı göz önüne alınarak bor miktarı kullanılacak amaca uygun halde seçilmelidir.

1.2.6. Çeliklerde Borür ve Bor Karbürler

Bor karbür çeliklerdeki alaşım elementlerine bağlı olarak oluşur. Atom çapı faktörü bileşiklerin oluşumunda valans faktöründen daha etkindir. Bunun nedeni atom çapının diğer ara yer atomlarından (C, H, N) daha büyük olması ile açıklanır. Çelik içerisindeki bor miktarı yeterli seviyelerde ise B-B bağı meydana gelir.

Elektrik-Elektronik alanında önemli kullanım alanı olmasına sebep olan ferrobör 1975 yılında alaşımların manyetik özelliklerinin keşfi ile olmuştur. Özellikle amorf metaller (metalik cam) olarak sac haline getirilip trafolarda kullanılmıştır. Kullanılan bu malzemeler özellikle %3 B, % 5 Si içeren demir esaslı alaşımlardır. Bu durum yaklaşık olarak 1/3 oranında ana malzeme kayıplarını azaltmıştır.

Bor 1980'li yıllar itibariyle bilinen Fe-R-B (R= nadir toprak metal) mıknatıslanabilen malzemelerin önemli bileşenlerindendir. Mıknatıslanabilen malzemelerin üretilmesinde ferrobör kullanılır.

% 0.04-42 B içeren ferrobör bileşikler, oksitlenmeye karşı atmosfer koşullarında ve aşırı sıcaklıklarda (800-1000 °C) dayanıklıdır.

1.2.7. Borlama Yöntemleri

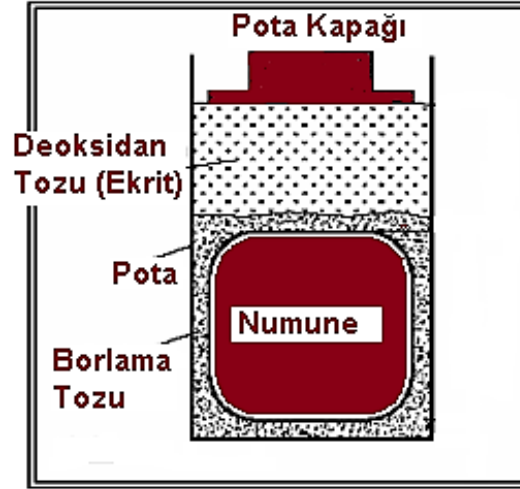
Borlama işlemi termo-kimyasal bir difüzyon işlemidir. Termo-kimyasal borla kaplama yöntemi zaman ve sıcaklık parametrelerine bağlı olarak malzeme yüzeylerine bor atomlarının difüzyonu prensibine dayanır.

Bu yöntemler:

- Kutu borlama
- Sıvı ortamda borlama
- Pasta borlama
- Gaz ortamda borlama
- Plazma (İyon) borlama'dır.

1.2.7.1. Kutu Borlama

Borlama işlemi uygulanacak numuneyi ilk olarak istenilen boyuta getirip daha sonra ise zımparalama işlemi uygulanarak yüzeyi pürüzsüz hale getirilir. Bu işlem için ilk olarak ısıya dayanıklı pota içerisine Ekabor tozu ilave edilir. Ekabor tozu içerisine ise borlanacak numune gömülür. Daha sonra pota içerisine ilk olarak ekrit tozu eklenip üzerine alümina tozu eklenir. Borlama işlemi için hazırlanmış potanın ağzı kapatılarak fırına atılır. Borlama işlemi 700-1150 °C sıcaklıkta ve 1-10 saat arasında uygulanır. İstenilen sıcaklıkta ve istenilen sürede hazırlanan numune işlem bitiminde fırından çıkartılıp soğumaya bırakılır. Soğuma işlemi tamamlandıktan sonra pota içerisinden borlanan numune çıkartılır. Şekil 1.2'de kutu borlama yönteminde kullanılan iş parçasının potaya yerleştirilmesi gösterilmiştir.



Şekil 1.2 Kutu borlama yönteminde iş parçasının potaya yerleştirilmesi [15]

Borlama işleminde eğer normal atmosfer altında yapılacaksa kapağının sıkıca kapatılması gerekir. Ayrıca uygulanan bu yöntem koruyucu gaz atmosferi şartları altında da yapılabilir. Uygulanan bu yöntem kolay bir şekilde yapılabilir ve ekonomik açıdan uygundur.

Borlama işleminin ana bileşenleri bor karbür, ferrobör ve amorf bördür. Aralarında en uygunu bor karbüdür. Amorf bor ve ferrobörün pahalı olmasından ve endüstriyel olarak çok zor işlem süreçlerinden geçmesinden dolayı bunların kullanılmasının azalmasına neden olmuştur. Bu durum bor karbüde amorf bor ve ferrobörden nazaran daha ucuzdur ve böylelikle de endüstriyel ortamlarda daha çok kullanılmasını sağlamıştır. Çizelge 1.11’de borlama işleminde gerekli olan bazı bor kaynaklarının özellikleri verilmiştir.

Çizelge 1.11 Katı ortamda verilen bazı bor kaynakları [16]

Malzeme	Formül	Molekül Ağırlığı (g/mol)	Teorik Bor Oranı (%)	Ergime Sıcaklığı (°C)
Bor Karbür	B ₄ C	55.29	77.2	2450
Amorf Bor	B	10.82	95-97	2050
Ferro Bor	Fe-B	--	17-19	-

1.2.7.2. Sıvı Ortamda Borlama

Bu borlama işlemi sırasında ortam akışkandır. Borlama yapılacak malzeme 2-6 saat ve 700-1000 °C arasındaki sıcaklıklarda akışkan ortamda borlama işlemine tabi tutulur. Bu borlama işleminde malzeme elektrolitli, elektrolitsiz ve derişik çözeltilerde yapılabilir. Çizelge 1.12’de bazı sıvı borlama yönteminde kullanılan bor kaynakları ve özellikleri verilmektedir.

Çizelge 1.12 Sıvı ortamda borlama yönteminde kullanılan esas bor kaynakları ve özellikleri [17]

Malzeme	Formül	Molekül Ağırlığı (g/mol)	Teorik Bor Ağırlığı (%)	Ergime Sıcaklığı (°C)
Boraks	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	381.42	11.35	-
Susuz Boraks	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	201.26	21.50	741
Metabor Asidi	HBO_2	43.83	24.69	-
Sodyum Bor Forid	NaBF_4	109.81	9.85	-
Borik Oksit	B_2O_3	69.64	31.07	450
Bor Karbür	B_4C	55.29	78.28	2450

1.2.7.3. Pasta (Macunlama) İle Borlama

Borlama işlemine başlamadan önce kullanılacak tozlar macunumsu hale getirilip borlama uygulanacak malzemenin üzerine sürülür ve gerekli durumlarda tekrar malzeme üzerine sürülebilir. Sürülen macunumsu yapının 150 °C’de kurutulması gerekir. Bu borlama yöntemi kısaca: ilk olarak parçalar macunla kaplanıp önceden ısıtılmış olan fırın içerisine konur, daha sonra fırın ağzı kapatılarak istenilen sıcaklıkta ve istenilen sürede borlama işlemine tabi tutulur. İşlem bittikten sonra malzeme dışarıya alınır ve soğumaya terk edilir. Son olarak, malzeme yüzeyindeki artık macun temizlenerek borlama işlemi tamamlanmış olur.

Bu yöntemin kesinlikle gaz ortamında uygulanması gerekir. Ortamda koruyucu amaçla bulunan ve kullanılan gazlar; Argon, Formier gazı, NH_3 ve saf Azottur. Aksi takdirde oluşan borür tabakası istenilen seviyede ve yeterlilikte olmaz. Pasta ile borlama yöntemi ile kısmi borlama işlemi de yapılabilir.

1.2.7.4. Gaz Ortamında Borlama

Bu borlama yönteminde borlama işlemine etki eden faktörler: gaz ortamının bileşimi, basıncı ve gazın sistemden çıkan hızı borlamaya etki etmektedir. Bor halojenleri, diboran (B_2H_6) ve borun organik bileşikleri eğer gaz ortamında borlama işlemi yapılacaksa kullanılmalıdır. BF_3 , BCl_3 , BBr_3 saf veya su ile B_2H ile su ve $(CH_3)B/(C_2H_5)_3B$ bor verici olarak kullanılmaktadır. Eğer herhangi biri ile diboran kullanılırsa çok iyi sonuçlar elde edilir. Ancak, diboran patlayıcı ve zehirleyicidir. Diboran yaklaşık olarak $150\text{ }^{\circ}C$ sıcaklıklarda ayrışır. Bununla birlikte diboranın hidrojen ile inceltilmesi çok pahalıdır. Bu yüzden dolayı işlem karışık haldedir. Bütün bu dezavantajlara rağmen birçok araştırmacı gaz ortamda borlamayı yapmışlardır.

Bortrimetil ve bortrietil organik bileşikleri fazla oranda karbon elementi içermesinden dolayı, borlama işleminden sonra borür tabakası ile fazla oranda karbonlu bor tabakası da oluşturmuş olur. Bundan dolayıdır ki oluşan karbon tabakası bor tabakasının oluşumunda olumsuz sonuçlara yol açar. Çizelge 1.13'de gaz halindeki bor bileşikleri ve bazı özellikleri verilmiştir.

Çizelge 1.13 Gaz halindeki bor bileşikleri ve bazı özellikleri [17]

Malzeme	Formül	Molekül ağırlığı (g/mol)	Teorik Bor Miktarı (%)	Donma Noktası ($^{\circ}C$)
Bor Triflorid	BF_3	67.82	15.95	-128.8
Bor Triklorid	BCl_3	117.19	9.23	-107.3
Bor Tribromid	BBr_3	250.57	4.32	-46
Di-Boran	B_2H_6	27.69	39.08	-165.5
Bor Trimetil	$(CH_3)_3B$	55.92	19.35	-161.5
Bor Trietil	$(C_2H_5)_3B$	98.01	11.04	-95

1.2.7.5. Plazma (İyon) Borlama

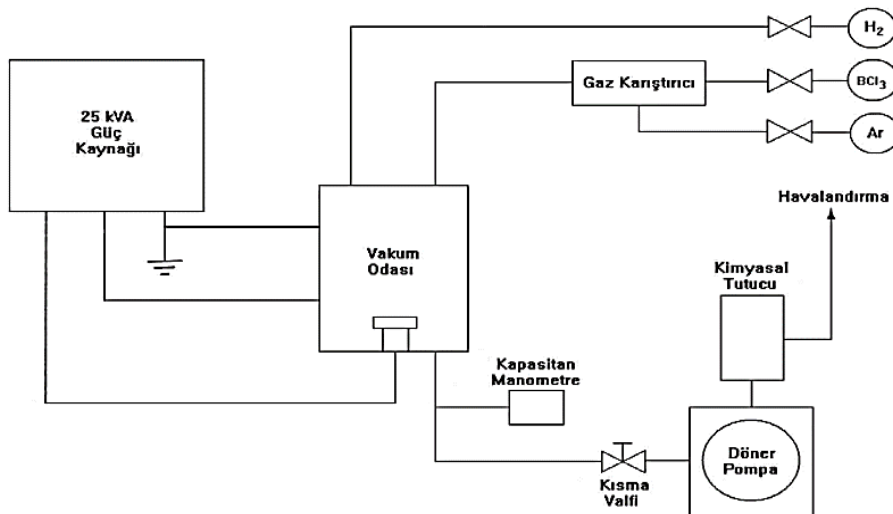
Borlama işlemi gaz ortamında yaklaşık olarak 250-750 Pa basınçla yapılabilir. Plazma yöntemi diğer borlama yöntemlerine göre daha düşük işlem sıcaklıklarında daha az borlama süresinde yapılmaktadır. Daha iyi sonuçlar elde

edebilmek ve reaktif gazı daha iyi kullanmak için atmosferde mevcut olan BCl_3 miktarı minimum seviyeye indirilir.

Kimyasal emilme ve yüzey difüzyonu gibi yüzey işlemlerinin yüksek enerjisinden dolayı yüzeyde oluşan kimyasal reaksiyonlar hızlanır. Meydana gelen bu olay sonucunda elektronlar ve iyonlar elektrik alanına etki eder. Bu elektron ve iyonlar tarafından sistemi besleyen enerji iletilir. Bu enerji sonucunda iyonlar ve elektronlar gaz moleküllerinin ortalama enerjisinden daha fazla bir enerji elde ederler. Bu moleküllerin ve elektronların çarpışması sonucunda moleküllerin belirli bir kısmının enerjisi aktarılır.

Gaz ortamda termik aktiflenme sonucu meydana gelen kimyasal reaksiyonlar, aktiflenmiş malzeme yüzeyinin katalitik etkisi sonucunda hızlanır. Meydana gelen bu olay hidrojenin meydana getirdiği gaz karışımı ile BCl_3 buharı karışımı ile yapılmaktadır. Hidrojen ve BCl_3 buharından meydana gelen atmosfer içirişindeki plazma (iyon) borlama esnasında bor tabakasının oluşumunda önemli bir rol oynar.

$\text{BCl}_3\text{-H}_2\text{-Ar}$ gazlarının karışımında meydana gelen plazma borlamanın BCl_3 konsantrasyonunun daha iyi kontrol edilmesi, kalıntı gerilmenin minimum seviyeye indirilmesi ve borlu film tabakalarının daha fazla mikrosertliği gibi olumlu özellikler gösterdiği bildirilmektedir. Şekil 1.3’de plazma borlama işlemi şematik olarak anlatılmıştır.



Şekil 1.3 Plazma borlama işleminin şematik gösterimi

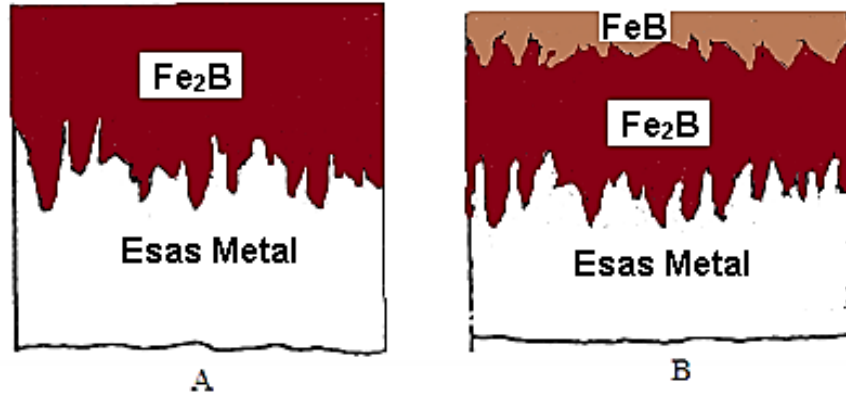
B-Fe denge diyagramı bakıldığında ağırlıkça %16.23 bor bileşiminde FeB ve %8,83 bor bileşiminde Fe₂B fazları oluşur. FeB fazı Fe₂B fazından daha gevrek olduğu için uygulamada tek faz olarak Fe₂B yapısı tercih edilir. Oluşan yapıdaki gevrekliğin önlenmesinin tek yolu daha düşük sıcaklıklarda ve en uygun borlama bileşimlerinde borlama yapılmasıdır. Çizelge 1.14’de FeB ve Fe₂B’nin tipik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 1.14 FeB ve Fe₂B’nin tipik özellikleri

Özellik	FeB	Fe ₂ B
Elastisite Modülü	590 GPa	285-295 GPa
Yoğunluk	6.75 gr/cm ³	7.43 gr/cm ³
Bileşimi	% 16.23 B (ağırlıkça)	% 8.83 B (ağırlıkça)
Erime Noktası (°C)	1550	1390
Isıl İletkenlik Katsayısı (W/M.K)	12.0 (20 °C)	30.1 (20 °C)
Özdirenç (20 °C de µohm. cm)	80	38
Curie Sıcaklığı (°C)	325	742
Isıl Genleşme Katsayısı (K ⁻¹)	23.10 ⁶ (200-600 °C)	7.85.10 ⁶ (200-600 °C)
Mikrosertlik	19-21 GPa	18-20 GPa
Serbest Enerji (Kj/Mol 298 K’de)	-69.47	-71.75

Alaşımsız çeliklerde Fe₂B fazı oluşumu için ortamda bulunan bor miktarı çok ise sıcaklığın ve zamanın da uygun olması durumunda borür tabakasında FeB fazı da oluşur [18]. Alaşımsız çeliklerde bu durum ise alaşım elementlerine bağlıdır. Alaşımsız çeliklerde Cr₂B, TiB₂, NiB₂, CoB gibi bileşiklerden biri ya da birkaçı oluşur.

Borlama sonrasında meydana gelen iki fazlı borür tabakalarının kendilerine ait farklı genleşme katsayıları olduğundan dolayı göz ardı edilemeyecek seviyede iç gerilmeler meydana gelir. Borlama işlemi tamamlandıktan sonra FeB fazında çekme gerilmesi meydana gelirken Fe₂B fazında basma gerilmesi meydana gelir. Bu basma ve çekme gerilmelerinden dolayı mekanik zorlamalarda malzemede çatlakların oluşmasına neden olur [20]. Şekil 1.4’te tek ve çift fazlı borür tabakaları şematik olarak verilmiştir.



Şekil 1.4 Tek ve çift fazlı borür tabakaları [19]

A: Tek fazlı bor tabakası

B: Çift fazlı bor tabakası

Borür tabakası testere dişli bir görünüme sahiptir. Borlamaya, alaşım elementlerinin ve karbon oranının azalması bor difüzyonunu arttırmasına neden olur ve dolayısıyla borür tabakasında ve kalınlığında artış meydana gelirken aynı zamanda da malzeme ara yüzeyinde meydana gelen testere dişli görüntünün daha belirgin olmasını sağlar [15].

1.2.9. Bor Tabakasının Özelliklerine Etki Eden Faktörler

1.2.9.1. Borlayıcı Ortamın Bileşimi ve Konsantrasyonun Etkisi

Bor esnasında atmosferde bulunan bor miktarının fazla olması bor tabaka kalınlığının artmasına neden olur. Eğer borlama esnasında ortamda yeteri kadar bor bulunmazsa malzeme yüzeyinde oluşan bor tabaka kalınlığı istenilen seviyede olmaz ve bor tabaka oluşumunun durmasına neden olur. Borlama esnasında malzeme yüzeyinde borlamanın meydana gelebilmesi için B_4C den B'nin uzaklaştırılması için atmosferde reaksiyonu oluşturacak madde bulunması gerekmektedir. Örneğin SiC ile B_4C etkileşiminden elementel haldeki bor elde edilir. Elde edilen elementel borun ortamda bulunan oksijenle etkileşimi çok fazladır, oksijenle B_2O_3 oluşturur.

Meydana gelen bu olayı engelleyebilmek amacıyla ortamda yeteri kadar SiC bileşiğinin olmasına dikkat etmemiz gerekir.

Demir ile SiC'in reaksiyona girmesi sonucunda bor atomları serbest hale gelir ve böylelikle demir yüzeyine difüze eder ve böylelikle tabaka yüzeyinde FeB ve Fe₂B tabakaları meydana gelir.

1.2.9.2. Alaşım Elementlerinin Etkisi

Karbonlu çeliklerin istenilen özellikleri sağlayamaması durumunda çeliklere alaşım elementi veya alaşım elementleri katılarak istenilen özellikleri sağlaması amaçlanmaktadır. Çeliğe katılan bu alaşım elementleriyle birlikte oluşan bu çeliğe alaşımlı çelikler denir. Çeliğe uygulanan alaşım elementlerinin etkisi diğer metallere göre daha etkilidir.

Çeliklerin alaşımlandırılması sonucunda yüksek sıcaklık dayanımı, çekme dayanımı, sertlik, elastisite modülü, akma sınırı gibi özelliklerinde olumlu katkı sağlarken çentik darbe dayanımı, kopma uzaması, kesit daralması gibi özelliklerinde dezavantaj oluşturmaktadır.

Çelik için en etkili element karbondur. Çelik üretim işlemi sırasında karbon çelik içerisinde temel alaşım elementi olarak yerini alır. Karbon elementinin etkisi çeliklerin mekanik özelliklerinin önemli derecede etkilemektedir. Çelik içerisindeki karbon miktarının oranının artması durumunda çeliğin sertliği ve dayanımında önemli bir artış meydana getirmektedir. Karbonun çelik üzerinde dezavantajı ise çeliğin akma ve çekme dayanımlarını, yüzde uzama, kaynak kabiliyetini ve şekillendirilebilirlik üzerinde olumsuz bir etki yapmaktadır. Çeliklerde işlenebilir olması açısından karbon miktarının yeteri seviyelerde tutulması gerekmektedir. Çeliklerin dayanım değerlerinin fazla olması gereken yerlerde ise çelik içerisinde ihtiva eden karbon elementinin yüksek olması gerekmektedir.

Alaşım elementleri ara yüzeyin kristallografik yapısını, kaplamayı ve oluşan bor tabakasının kalınlığını etkilemektedir. Saf malzemelerin borlanması sonucunda kaplama kalınlığı alaşımlı malzemelerin kaplama kalınlığından daha iyidir. Alaşım

elementleri borlama esnasında difüzyonu olumsuz şekilde etkilemekte olup matris ve kaplama özelliklerini kötü yönde etkilemektedir.

Borlanma sonrasında meydana gelen borür tabakalarına alaşım elementlerinin tercihli olarak ilerleme yetenekleri, bor ile tepkimeye girmeleri ve kararlı bileşikler oluşturmaları gibi özelliklerine etki etmektedir. Borür tabakasında çözünen elementler (Cr, Ni, Mo, Mn, V) ve çözünemeyen elementler (C, Si, Al, Cu) olarak belirlenmiştir.

Karbon, borlama esnasında borür tabakasından matrise doğru ilerlemektedir. Karbon oranının artması ile birlikte, malzeme sertliğinde karbon oranına bağlı olarak bir artış meydana geldiği tespit edilmiştir. Karbonun borla yaptığı B_4C en sert bileşikler arasında yer almaktadır. Malzemede meydana gelen sertlik artışı % 0,4 karbon oranına kadar devam eder. Çünkü FeB, Fe_2B , (Fe, Cr, Ni)B, (Fe, Cr, Ni)₂ B bileşiklerinin belli bir orandan fazla karbon içermesi zor olmaktadır. Borlama esnasında malzemenin karbon oranının fazla olması durumunda, borür tabaka kalınlığının azaldığı ve bununla birlikte Fe_2B fazının matris ara yüzeyinin oldukça düzenli olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte malzemede bulunan karbon oranının artması ile birlikte malzemede oluşan Fe_2B fazının stabilizesinde bir artış, FeB fazının stabilizesinde bir azalma olduğu tespit edilmiştir.

Silisyumun etkisi karbona benzemektedir. Borlama esnasında bor tabakası içerisinde çözünmezler. Borlama esnasında bor atomları tarafından malzeme yüzeyinden içeriye doğru itilirler. Fazla oranlarda Si bulunduran çelik malzemeler borlama işlemi için uygun değildirler. Bunun nedeni ise bor tabakasının altında ferritik bir yapı oluştururlar ve böylelikle malzemenin mukavemetinin azalmasına neden olur, bu da bizim için istenmeyen bir durumdur.

Krom, çeliklerin borür tabakasının derinliğine hem de morfolojisine etki etmektedir. Yani malzeme içerisindeki krom oranı arttıkça malzemenin bor tabakasını ve morfolojisini olumsuz yönde etkilemektedir.

Krom, mangan elementleri demirin atom numarasından daha düşük olduğu için borlanan maddenin yüzeye doğru ilerlemektedir. Manganın kırılma tokluğuna avantaj oluştururken krom ise kırılma tokluğuna dezavantaj oluşturur.

Vanadyum bor ile kararlı bileşik yapar (VB ve V_2B_3 gibi). Vanadyum içeren malzemenin borlanması sonucunda malzemelerde ergime sıcaklığı, sertlik ve aşınma dayanımı üzerinde yüksek özellikler sağlamasına yardımcı olmaktadır.

Molibden ise çeliklere alaşım elementi olarak katıldığında bor tabakasının kalınlığında bir azalma ve borlanma sonucunda oluşan testere tipli yapının daha düz bir yapıya dönüşmesine etki etmektedir.

1.2.9.3. İşlem Sıcaklığı

Borlama işleminde zaman ve sıcaklık arttıkça malzemede oluşan borür tabakasını arttırmaktadır. Örnek vermek istersek C45 çeliğinin borlanması sonucunda zamanın ve sıcaklığın etkisi görülmektedir. Çizelge 1.15'de C45 çeliğinin farklı sıcaklıklarda borlanması sonucunda meydana gelen kaplama kalınlıklarının karşılaştırılması.

Çizelge 1.16 C45 çeliğinin farklı sıcaklıklarda borlanması sonucunda meydana gelen kaplama kalınlıklarının karşılaştırılması.

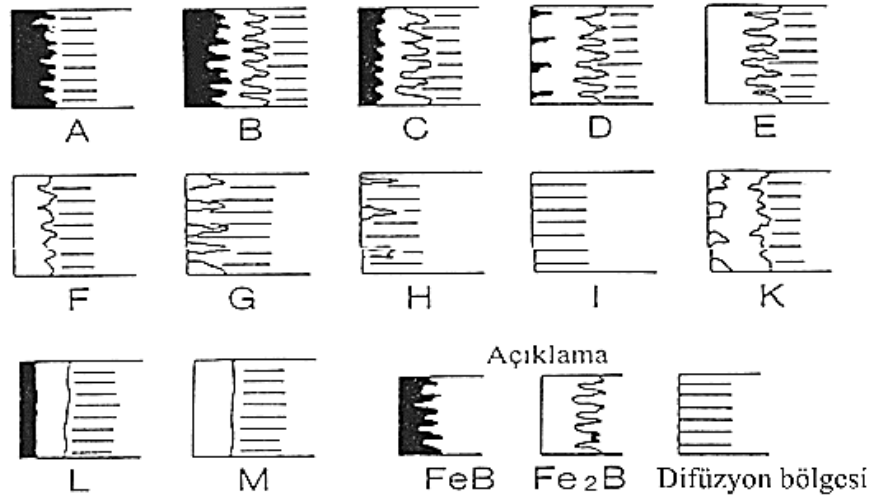
Sıcaklık (°C)	700	750	800	850	950	1000
Tabaka Kalınlığı (µm)	2	12	17	30	46	59

Borlama işleminde işlem sıcaklığının Fe-B ikili alaşımın denge diyagramındaki ötektik noktasının (1149 °C) altındaki sıcaklıklarda olması gerekmektedir. Bu sıcaklığın üzerinde malzemede bölgesel olarak ergimeler meydana gelmektedir ve bu durumda malzeme yüzeyinin bozulmasına neden olmaktadır. Borlama sonucunda malzeme yüzeyindeki borür tabakası artar ve böylelikle de kırılganlık artar. Yani borlama sıcaklığının artması tabaka kalınlığının da artmasına neden olur, buna ek olarak poroziteyi de arttırarak tabakanın gevrekleşmesine daha seramik hale gelmesine neden olur.

1.2.10. Borür Tabakasının Çeşitleri

Borlama tabakası; işlem yöntemine, borlama işleminde kullanılacak olan malzemenin içeriğine, yapılacak borlama işleminin atmosferine, uygulanacak olan işlem sıcaklığına ve zamana bağlı olarak değişmektedir. Borlama işleminde borlama süresi fazlalaştıkça meydana gelen borür tabakasında oluşan maksimum ve minimum kalınlıklar arasındaki boyut farkları da artar.

Borlama işleminde 14 farklı borür tabakası elde edilir. Bu farklı tabakalar aşağıda gösterilmiştir:



Şekil 1.5 Borür tabakasının morfoloji çeşitleri [21]

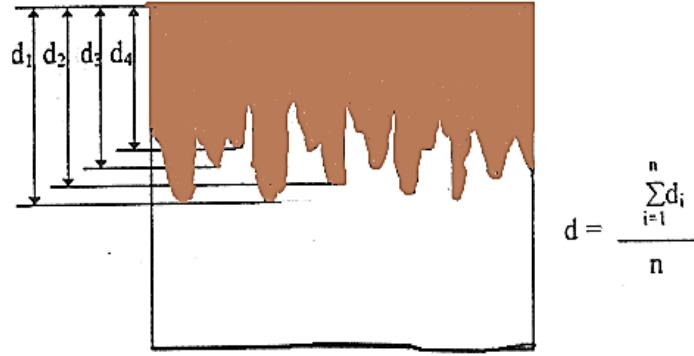
- A: Özellikle FeB 'nin yoğun olduğu tek fazlı tabaka.
- B: Fe_2B ve FeB fazlı iki tabaka.
- C: İki fazlı tabaka, tabaka B'den daha ince FeB tabakası.
- D: İki fazlı, izole FeB dış şeklindeki tabaka.
- E: Tek fazlı tabaka, özellikle Fe_2B ağırlıklı.
- F: Tek fazlı tabaka, özellikle Fe_2B ağırlıklı.
- G: Fe_2B dış yapısı.
- H: Çok izole Fe_2B dış yapısı.
- I: Difüzyon bölgesi.
- K: Dejenere olmuş tabaka.

L: Çift fazlı Fe₂B ve FeB tabakası.

M: Tek fazlı Fe₂B ve FeB tabakası.

1.2.11. Borlu Tabakanın Kalınlığı

Borlama tabakaları değişken bir yapıda oldukları için oluşan tabaka yapıları hakkında farklı tanımlamalar yapılmaktadır ancak literatürde oluşan tabaka kalınlığının testere dişli yapısı, düzlemlerle kıyaslanarak oluşan testere dişli yapı bu belirlenen düzleme göre oranı alınarak belirlenir. Şekil XXX borür tabaka kalınlığının tanımlanması verilmiştir.



Şekil 1.6 Borür tabaka kalınlığının tanımlanması [22]

n: Bor diş sayısı, d: Tabaka kalınlığı

Fe-B denge diyagramındaki ötektik noktasının (1174 °C) altındaki sıcaklıklarda sıcaklığın artması durumunda oluşan tabaka kalınlığı artar. Bu sıcaklığın üzerindeki sıcaklıklara yani 1174 °C sıcaklığının üzerine çıkılması durumunda malzeme yüzeylerinde bölgesel olarak ergimeler meydana gelerek malzeme yüzeyinin bozulmasına neden olur. Fakat kalınlığın artması durumunda malzeme gevrek hale gelir ve buna bizim için istenmeyen bir durum olarak karşımıza çıkar. Malzemelerin gevrek olmaması için alaşımlı çelikler için 100 µm alaşımsız çelikler için ise bu durum 150-200 µm kalınlık da olmalıdır [15].

1.2.12. Borlama Sonrası Özelliklerin Geliştirilmesi

Çeliklerde bor yayınımla çok sert, aşınma ve korozyona karşı dirençli yüzeyler elde edilir. Gevreklik ve borlama sonrası ısıtma işlemlerin uygulanabilirliği yönünden endüstride tercih edilmektedir.

Borlama yöntemlerindeki temel problem, borür tabakaların kırılganlığıdır. Kırılganlığı azaltmak için veya gidermek için yöntem ve teknikler geliştirilmiştir.

Vakum termal difüzyon yöntemi ise yüksek sıcaklık ve koruyucu atmosfer olan vakum altında işlem ile demir borürlerin yapısını değiştirmek, geliştirmek mümkündür. Yüksek sertlik ve kırılganlığa sahip FeB fazını düşük sertlik ve kırılganlıktaki Fe₂B fazına dönüştürür.

Su verme işlemi vasıtasıyla demir borür tabakası ile altlık malzemenin matrisinin arasındaki sertlik farkını azaltarak daha düzenli sertlik geçişini sağlamak mümkündür. Böylece kırılganlık azalır ve borür tabakası ile matrisin yapışma kuvveti de artar [23].

1.2.13. Borlu Tabakanın Karakteristik Özellikleri

Borlama malzemelerin akma ve kopma dayanımını %10-20, yorulma dayanımını %25, korozyona karşı dayanımını %200 arttırmasına karşılık malzemenin süneklik özelliklerini azaltıp malzemenin gevrek olmasını neden olur. Bor alanında ki çalışmalar genellikle sertlik, aşınma ve korozyon özelliklerine yöneliktir.

1.2.13.1. Sertlik

Borlama işleminin en önemli özelliği sertlik üzerinedir, borlanacak malzemenin elementel olarak içeriğine ve yüzeyinde oluşan fazlara bağlıdır. Meydana gelen bu fazlardan FeB fazı Fe₂B'den daha sert ve gevrek [24]. Çizelge 1.16'da ise farklı cins çeliklerin borlanması sonucunda meydana gelen mikrosertlik farklılıkları verilmiştir.

Çizelge 1.17 Farklı cins çeliklerin borlanması sonucunda oluşan mikrosertlik farklılıkları [15]

Malzeme	Mikrosertlik (HV)
Bor Alaşımli Karbon Çeliği	1600
Bor Alaşımli AISI H13 Çeliği	1800
Bor Alaşımli AISI A2 Çeliği	1900

Borlama işleminden sonra malzemelerin mikrosertlik ölçümleri Vickers ve Knoop sertlik deneyi yöntemleri ile yapılır [17]. Genel olarak 10-200 gram'lık yüklerle ölçüm yapılır, ölçüm esnasında malzemelerin yüzeyinin deformasyona uğramamasına dikkat edilmelidir [25]. Borlama işleminin en büyük avantajlarından biri de ısıtma işlemi uygulandıktan sonra malzemelerin sertliğini korumaya devam etmesidir [26]. Çeşitli malzemelerin borlanması sonucunda meydana gelen farklı bor fazlarının mikrosertlik ve ergime noktaları Çizelge 1.17'de gösterilmiştir [27].

Çizelge 1.18 Çeşitli malzemelerin borlanması işleminde meydana gelen farklı borlu fazların mikrosertlik ve ergime noktaları [27]

Esas Malzeme	Borlu Tabakadaki Faz Bileşimleri	Tabakanın Mikrosertliği (HV)	Ergime Noktası (°C)
Fe	FeB	1900-2000	1390
	Fe ₂ B	1800-2000	...
Co	CoB	1850	...
	Co ₂ B	1500-1600	...
	Co ₄ B	700-800	...
Co-27.5 Cr	CoB	2200	...
	Co ₂ B	1550	...
	Co ₄ B	700-800	...
Ni	Ni ₄ B ₃	1600	...
	Ni ₂ B	1500	...
	Ni ₃ B	900	...
Mo	Mo ₂ B	1660	2000
	MoB ₂	2330	2100
	Mo ₂ B ₅	2400-2700	2100
W	W ₂ B ₅	2600	2300
Ti	TiB	2500	1900
	TiB ₂	3370	2980
Ti-6Al-4V	TiB ₂	3000	...
Nb	NbB ₂	2200	3050
Ta	TaB ₂	2500	3200

1.2.13.2. Aşınma

Borlama işlemlerinden sonra malzemelerden yüksek aşınma dayanımı, düşük sürtünme katsayısı özelliklerine sahip olması istenir [28]. Borlama işlemi bu özellikleri önemli ölçüde sağlar. Bor elementinin oksijene karşı olan afinitesi fazla olduğundan yüzeyde ince bir oksit tabakası meydana getirir, bu oksit tabakası sürtünme katsayısını minimuma indirip, yüzeylerin birbirine temasını engellemektedir. Malzemelerin borlama işleminden önceki ve sonraki sürtünme katsayıları Çizelge 1.18’de verilmiştir.

Çizelge 1.19 Farklı malzemelerin borlama işlemi önceki ve sonraki sürtünme katsayıları [15]

Malzeme	Sürtünme Katsayısı	
	Borlu	Borsuz
Düşük Karbonlu Çelik	0.17-0.19	0.585-0.595
Takım Çeliği	0.07-0.04	0.16-0.18
WC + Co Sinter Malzeme	0.1939-0.2335	0.2617-0.2773

Borlanan malzemelerin aşınma dayanımları diğer kaplama yöntemleri olan karbürleme, nitrürleme gibi yöntemlerden daha yüksektir. Borlanmış malzemelerin yüzey tabakaları 900-1000 °C sıcaklıklara kadar sertliğini korur ve aşınma dayanımını aşırı sıcaklıklarda da korumaktadır [25].

1.2.13.3. Korozyona Karşı Direnç

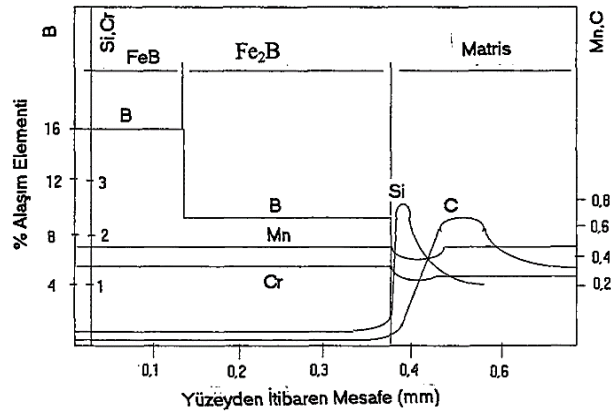
Borlama sonucunda malzemelerin atmosfere ve suya karşı dayanımları borlama işleminden önce ile kıyaslandığında borlama sonucunda malzemenin korozyon dayanımlarının arttığı görülmüştür. Bununla birlikte bazı asitlere karşı dayanımları da artmıştır. Özellikle HCl ve H₃PO₄ gibi asitlere karşı dayanımı daha yüksektir [17]. Borlama işlemi uygulanmış ve borlama işlemi uygulanmamış Ck 45 çeliğinin asidik ortamdaki korozyona karşı dayanımı şekilde gösterilmiştir.

Malzemede elementel halde bulunan yüksek karbon içeren çeliklerin borlanması sonucunda tabakada krom oksit yerine daha az koruyucu olan krom borür

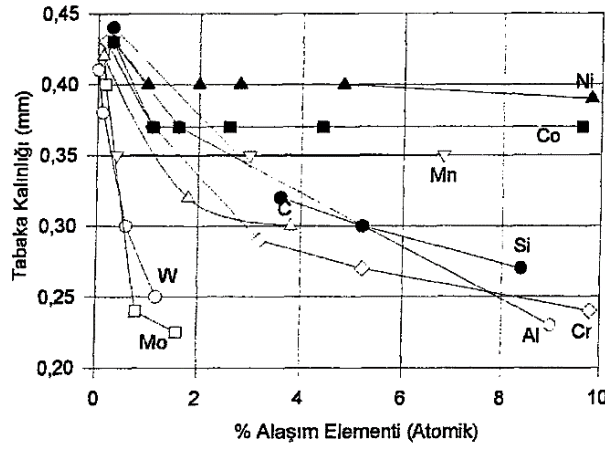
meydana gelir buda malzemeni korozyona karşı dayanımının azalmasına neden olur. Bu yüzden yüksek alaşımlı malzemelerin borlama işlemine tabi tutulması korozyona karşı dayanımının azalması açısından dezavantaj oluşturur [16].

1.2.14. Alaşım Elementinin Kutu Borlamaya Etkisi

Tabaka kalınlığını bütün alaşım elementleri düşürdüğü tespit edilmiştir [17]. Alaşım elementleri ana malzeme ve borür tabakasının özelliklerinin yanı sıra bor difüzyonunu da azaltmaktadır [18]. Şekil 1.7’de borlanmış malzemelerin yüzeyinde meydana gelen bor tabakasındaki elementlerin şematik olarak gösterimi verilmiştir. Şekil 1.8’de alaşım elementlerinin borür tabakasına etkisi şematik olarak verilmiştir.



Şekil 1.7 Borlanmış malzemelerin yüzeyinde meydana gelen bor tabakasındaki elementlerin şematik olarak gösterimi [30]



Şekil 1.8 Alaşım elementlerinin borür tabakasına etkisi [17]

Alaşım elementleri borür tabakasının sertliğini arttırmasının yanı sıra Fe-B denge diyagramında ötektik noktasının yaklaşık olarak 50 °C düşürmektedir [32].

Çelik içerisindeki C ve Si elementlerinin miktarının artması FeB stabilizesini azaltmakla birlikte, % 1,2-1,25 C içeren çeliklerde FeB tamamen yok olmaktadır. Bunların yanı sıra Si, P, N, Ti, V, Nb, Ta'da karbonun gösterdiği etkiyi gösterir [15].

Alaşım elementleri borlama işleminde tabaka kalınlığını azaltır. Ayrıca borlama sonrasında oluşan borür tabakasının geometrik şeklini de değiştirir.

Malzemede karbon oranının azalması borür tabakasında testere dişli yapıyı kuvvetlendirirken yüzeyde meydana gelen iç gerilmelerde daha geniş bir alana yayılmasını sağlar. Alaşım elementleri özellikle karbon, krom, nikel gibi tabaka geometrisinin değiştirir ve borür tabakası ile ana metal arasındaki yüzeyi düzleştirir [33].

Borlanacak olan malzemenin içerisindeki karbon oranının artması oluşan borlama tabakasının kalınlığını azaltmaktadır. Karbon, FeB ve Fe₂B fazlarında çözünmediğinden karbon oranının fazla olması durumunda meydana gelen borür tabakasının altında difüzyon bölgesi meydana gelir [48]. Meydana gelen bu bölgede karbon; Fe₃C, Cr₃C, Fe₆C₃ gibi karbürler oluşturur ve bu durum borlama mekanizmasını etkiler ve böylece oluşan borür tabakasını daha sert ve sıkı yapar. Borlanacak malzeme içerisindeki krom miktarının artması sonucunda tabaka

kalınlığında ve testere dişli yapıda bir azalma meydana gelir. %4 Cr içeren çeliklerde 65-95 μm kalınlıkta borür tabakası oluşurken, %12 Cr içeren çeliklerde 65 μm , %26 Cr içeren çeliklerde ise bu oluşan borür tabakasının kalınlığı 5 μm 'yi aşmamaktadır. Bu durumda artan Cr oranı malzeme yüzeyinde oluşan borür tabaka kalınlığını olumsuz şekilde etkiler.

Borlama tabakasına manganez ve nikel tabakada meydana gelen artışa fazla etki etmemektedir [17]. Fakat çelik içerisinde bulunan nikel oranı artması sonucunda oluşan borür tabakasının kolonsal yapısı azaltarak mekanik özelliklerinde dezavantaj oluşturur [15].

Silisyum meydana gelen borür tabakasının sertliğine etki etmez fakat geçiş bölgesinin sertliği çelik içerisindeki Si oranının artması ile birlikte artar. Böylece silisyum borür tabakasının sertliğinin aşırı derecede arttırılması sonucunda malzeme gevrek duruma gelir bu yüzden çelik içerisindeki silisyum oranı %1'in üzerinde uygun değildir [35].

1.2.15. Borür Tabakasındaki Kalıntı Gerilmeler

Kalıntı gerilmeler, borür tabakasında meydana gelen mekanik özellikleri ile ilgilidir. Uygulanan ısı işlem, malzemenin içeriğine, borlamada işlem sıcaklığına ve zamanına, atmosfer şartlarına, borür tabakasına ve ana-ara yüzeyinde meydana gelen iç gerilmeler dikkate alınarak yapılmalıdır. Borlama sonucunda oluşan borür tabakası; çift fazlı Fe_2B , FeB ve tek fazlı FeB parça geometrisi ise testere dişli ve düz oluşu malzemede meydana gelen iç gerilmeler tabakada yapacağı hasara etki etmektedir. Borlama sonucunda ideal olarak oluşan Fe_2B fazıdır. Borlama sonucunda istenen parça geometrisi ise testere dişli görüntüdür. Bunun nedeni ise malzemede meydana gelen iç gerilmeleri daha geniş bir alana yaymasıdır. Tabakanın Fe_2B ile birlikte FeB fazlarının bulunmasının sakıncası malzeme yüzeyinde meydana gelen iç gerilmelerin farklı yönlerde olmasındandır. Bu oluşan iç gerilmeler malzeme yüzeyinde Fe_2B basma ve FeB ise çekme gerilmesi şeklinde olup bu tip gerilmeler malzeme yüzeyinin çatlamasına neden olur. Bu meydana gelen iç gerilmelerin

nedeni ise FeB, Fe₂B ve ana malzemenin termal uzaman katsayılarının farklılıklarından meydana gelmektedir [15].

1.2.16. Borlanabilen Malzemeler

Borlama işlemi hem toz hem de diğer yöntemlerle üretilen ferro alaşımlara uygulanabilir. Borlama işlemi refrakter metaller olan Zr, Ta, Nb, Hf, Mo, W alaşımlara uygulanabilir. Titanyum ve alaşımlarına borlama yapılması sonucunda (TiB₂) aşınmaya dayanıklı tabaka elde edilmiştir [15]. Ayrıca yeni gelişen yöntemlerle Cu ve alaşımlarına borlama işleminde uygulanabilmektedir. Ancak Al gibi metallere borlama işlemi uygulanamaz bunun nedeni ise düşük ergime sıcaklığına sahip olmasından kaynaklanmaktadır.

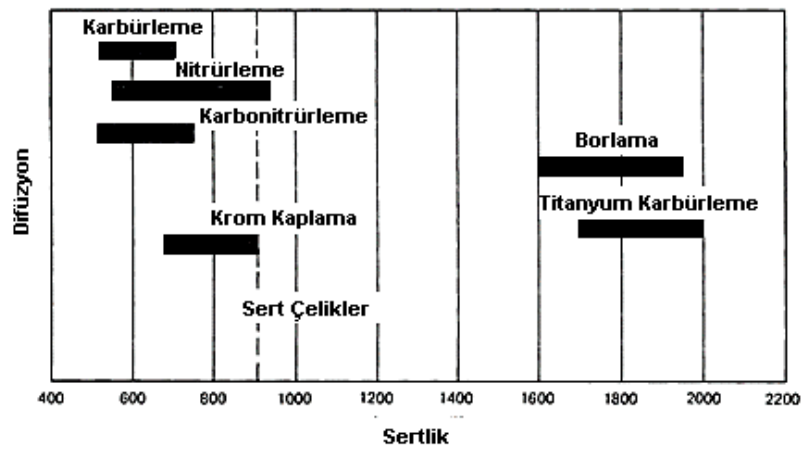
1.2.17. Borlu Malzemelerin Isıl İşlemi

Borlama sonucunda malzeme yüzeyinde oluşan borür tabası olan Fe₂B genleşme katsayısı çelik malzemenin genleşme katsayısına yakındır. Bu yüzden ısıtım işlemi bu tür malzemelere rahatlıkla uygulanabilir [36]. Borlama işleminden sonra yüksek basınç altında kullanılacak olan malzemeler ısıtım işlemine tabi tutulması gereklidir. Borlama sonrasında basınç altında çalışacak olan malzemelerinin borlu tabakalarının altı yumuşaksa malzemeler de bölgesel olarak tabaka çökmesi ve dökülmesi meydana gelebilir.

Difüzyon yöntemlerinde meydana gelen hacim artışı borlama sonrasında meydana gelen borür tabakasında da meydana gelmektedir. Meydana gelen hacim artışı malzemeye ve tabaka kalınlığına borlama sıcaklığına ve zamanına bağlı olarak değişmektedir. Meydana gelen borür tabaka kalınlığı yaklaşık % 20'si boyut artışı kadardır [37]. Alaşımlı malzemelerde ise bu durum farklılık gösterip yaklaşık olarak %80 değerlerine kadar çıkmaktadır.

1.2.18. Borlama İşleminin Avantajları

Sertleştirme işlemine tabi tutulan malzemelerin tabakaları ile borlanma sonucunda meydana gelen borür tabakası karşılaştırıldığında karakteristik olarak birçok avantaja sahiptir. Borlama sonucunda oluşan tabakaların en büyük avantajı yüksek ergime sıcaklığına ve oluşan fazların aşırı derecede sertlik değerine sahip olmasıdır. Sert malzemeler ile borlama işlemine tabi tutulmuş çeliklerin yüzey sertlik değerleri bakımından karşılaştırılması şekilde gösterilmiştir. Bu şekilde borlanma sonucunda meydana gelen borür tabakasının diğer yüzey sertleştirme işlemlerinden daha iyi neticeler olduğu açıkça gösterilmiştir. Borlu tabakaların sertliği, sertleştirme işlemine tabi tutulmuş takım çelikleri ve sert krom ile kaplanmış metallerin sertliğinden daha fazladır ancak tungsten karbürün sertliğine eşittir [27]. Şekil 1.1’de çeliklerde difüzyon proseslerinden elde edilen sertlik aralıkları çeliklerin yüzeylerine farklı difüzyon prosesleri sonucunda elde edilen değişik kaplamaların sertlik değer aralıkları verilmiştir. Çizelge 1.19’da diğer malzemeler ile borlama işlemi uygulanmış çelikler karşılaştırılmıştır. Yüzey sertliği, düşük sürtünme katsayısı aşınma mekanizmalarını (sürtünme, oksidasyon, aşınma, yapışma gibi) borlanma sonucunda etkisiz hale getirir.



Şekil 1.9 Çeliklerde difüzyon proseslerinden elde edilen sertlik aralıkları çeliklerin yüzeylerine farklı difüzyon prosesleri sonucunda elde edilen değişik kaplamaların sertlik değer aralıkları [27]

Çizelge 1.20 Belirli malzemelerin mikrosertlik sonuçları [27]

Malzeme	Mikrosertlik (HV)
Borlu Yumuşak Çelik	1600
Borlanmış AISI H13 Takım Çeliği	1800
Borlanmış AISI A2 Çeliği	1900
Sertleştirilmiş ve Temperlenmiş A2 Takım Çeliği	630-700
Yüksek Hız Çeliği BM 42	900-910
Nitrasyon Çelikleri	650-1700
Karbürleşmiş Düşük Alaşımlı Çelikler	650-950
Sert Krom Kaplama	1000-1200
B ₄ C	5000
SiC	4000
TiC	3500
Elmas	10000

Borlama işleminin önemli avantajlarından biri de borlama işlemine tabi tutulan malzemenin ömrünü arttırmaktadır. Malzemelerin borlama işlemine tutulması ile birlikte maliyeti fazla olan iş parçalarının yerine daha maliyeti düşük olan ve daha iyi performans gösteren malzemeler elde edilir. Bu işlem sonucunda hem maddi olarak avantaj sağlarken hem de orijinal parçaların yerine borlanmış parçalar kullanılarak parça bulma sorununu ve zaman sorununu çözmektedir. Bu sayede büyük kazançlar sağlamaktadır [38].

Borlama yöntemiyle çelik ve demir dışı alaşımlardan istenen özelliklerde parça üretmek mümkündür. Ayrıca borlama işlemi ile malzemelerin sertliğinde önemli derecede bir artış meydana gelir ve bu özelliklerin yanı sıra sürtünme katsayısında önemli avantaj sağlar [38].

Borlama işleminin diğer avantajları aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Yüksek sıcaklıklarda borlama sonucunda meydana gelen bor tabakasının sertliği değişmemektedir.
- Borlama işlemi birçok çeliğe uygulanabilir.
- Korozyona karşı direnci yüksektir.
- Borlama sonucunda yüzeyler oksidasyona karşı dirençlerini 850 °C'ye kadar korurlar.
- Ergimiş metallere karşı direnci yüksektir.

- Borlanma sonucunda yorulma dayanımını, korozif-oksitleyici ortamlar altında kullanım ömürleri uzundur.
- Aşınma dayanımı önemli olduğu için borlanma sonucunda meydana gelen borlama tabakasının sertliği yüksek olması açısından üstünlük sağlar [39].
- Karmaşık geometriye sahip malzemelere uygulanması bir avantaj oluşturur [40].

1.2.19. Borlamanın Dezavantajları

- Borlama işlemleri çalışma şartları oldukça zordur.
- Borlama işlemi diğer difüzyonla kaplama yöntemleri olan karbürleme ve nitrürleme gibi yöntemlerden maliyeti daha fazladır. Gaz karbürleme ve plazma nitrürleme işlemleri esnek sistemlerdir hem de bakım masrafları düşüktür. Ayrıca, diğer işlemler daha kısa zamana ihtiyaç duyarlar bu yüzden yüksek sertlik ve borlu tabakalarda aşınma ve korozyon dayanımı istenmesi bakımından mühendislik parçalarına uygundur [27].
- Borla kaplanmış malzemelerde eğme işlemleri kısıtlıdır.
- Borlama işlemi uygulanmış alaşımlı çeliklere haddeleme temas yorulma özellikleri, yüksek temas yüklerinde karbürü ve nitrürlü çeliklerde karşılaştırıldığında çok düşüktür.
- Borlama işleminin homojen bir şekilde yapılabilmesi için koruyucu atmosferlerde yapılması gereklidir.
- Borlama için tesis maliyetleri ve bazı kimyasal maddeler oldukça yüksektir.
- Borlama işlemi için yüksek sıcaklıklara çıkmak gereklidir.

1.2.20. Borlama İşleminin Uygulama Alanları

Borlama işlemi sonucunda meydana gelen bor kaplanmış parçalar çeşitli uygulama alanlarında kullanılmaktadır. Borlanma sonucunda meydana gelen parçalar çeşitli uygulama alanlarında kullanılmaktadır. Borlanma sonucunda malzemelerin ömründe büyük artışlar meydana gelmiştir. Endüstride borlama işlemi yaygın olarak kılavuz kanalları, kesici takımlar, dişli, çarklar, kalıplar vb. birçok yerde

kullanılmaktadır [35]. Öğütme disklerinde ve öğütme bıçakları borlama işlemine tabi tutularak kullanılmaktadır. Tekstilde iplik kılavuz fırçalarında kullanılmaktadır.

Aşağıda borlanmış malzemelerin kullanım alanları verilmiştir [41].

1. Makine Sanayisi

Sürekli olarak aşınmaya, korozyona, difüzyona ve sürtünmeye maruz kalan tüm numunelerde kullanılmaktadır. Genellikle aşınmaya maruz kalan disklerde, kalıplarda, çarklarda, dişlilerde kullanılmaktadır.

2. Otomobil Sanayisinde

Transmisyon parçaları, kumanda kolları, supaplar, vites kutuları, yağ pompası dişlilerinde, stirling motoru pistonları gibi birçok yerde kullanılmaktadır.

3. Sentetik Madde ve Tekstil Sanayisinde

Enjektör meme plakları, memeler (ağızlıklar), iplik kılavuzları, ince borular, silindirler, sonsuz dişlilerde kullanılmaktadır.

4. Kimya Sanayisinde

Pompa muhafazaları, pompa gömlekleri (asitlere karşı), vida gövdeleri gibi birçok yerde kullanılmaktadır.

5. Metalurji Sanayisinde

Demir dışı metallerin (hafif metaller, çinko, kalay, kurşun ...) dökümündeki yataklar, taraklar, döküm ağızları, dökme boruları, döküm maşaları, kütük kalıplar, karıştırıcı gibi birçok yerde kullanılmaktadır.

6. Seramik Sanayisinde

Delikli plakalar, baskı halkaları, baskı zımbaları, ince borular, kesme mastarları, cıvata başları, cıvata dişleri, somun gibi birçok yerde kullanılmaktadır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Aich, S. ve diğ., (2012), yapmış oldukları çalışmada; saf halde bulunan titanyum üzerine kutu borlama işlemi uygulamışlardır. Yapılan deney aşamaları sonucunda, düzensiz haldeki bor, susuz sodyum karbonat ve aktive edilmiş olup işlem parametreleri 800–1000 °C işlem sıcaklıklarında ve 1–24 işlem sürelerinde borlama işlemi tamamlanmıştır. Borlama işlemi sonucunda 218 µm kaplama kalınlığı ve TiB₂ ve TiB fazları elde edildiği sonucuna varmışlardır [42].

Yang, Y.L. ve diğ., (2010), yapmış oldukları çalışmada; kutu borlama yöntemi ile borlanmış N80 çelik boruların mikroyapı ve buna bağlı çekme testi sonuçlarını dört farklı soğuma koşullarına göre incelemiştir. Soğutma hızı yavaştan hızlıya; tavlama, normalizasyon, vantilatörle soğutma ve vantilatörle birlikte bor içerisine daldırılmış grafit çubuk olarak sıralanmıştır. N80 çeliğinin borlanması sonucu Fe₂B ve FeB dişli borür tabakalarını 1220-1600 HV sertlik aralığında bulmuşlardır. Borlanmış numunelerin çekme mukavemetlerinin orijinal malzemeye göre daha düşük, uzama 28 miktarlarının daha fazla olduğunu belirtmişlerdir. Elde edilen sonucu borür tabakasının kırılgan ve 479 MPa gerilime ulaştığında çatlamaya başlamasıyla açıklamışlardır. Soğutma hızının mekanik özellikler üzerine etkisini incelerken soğutma hızı arttıkça akma ve çekme mukavemetlerinin fark edilebilir şekilde arttığını bulmuşlardır. Bunun sebebi olarak soğutma hızı arttıkça borür tabakası kalınlığı ve tane boyutunun düşmesi ve çok daha yüksek mukavemete sahip perlit oranının artmasıyla çekme özelliklerinde artış olduğuna vurgu yapmışlardır [43].

Gidikova, N., (2011), yapmış olduğu çalışmada; 1200 °C işlem sıcaklıklarında ve 11 saat işlem süresinde çeliklerin yüzeyine vanadyumun termal difüzyonunu sağlayarak ardından B₄C, Na₂B₄O₇, NaCl, NH₄Cl ve aktivatör olarak kloritler ilave edip toz ortamında 900-1000 °C’de 5 ve 9 saat işlem sürelerinde borlama işlemini gerçekleştirmiştir. Yapılan bu çalışma sonucunda numunenin yüzey kısmında 26000 MPa sertlik değerlerine ulaşılmıştır. Ayrıca yapılan tabaka kalınlığı ölçüm sonuçlarında ise yaklaşık olarak 400 µm kalınlıkta bir difüzyon tabakası elde edilmiştir [44].

Xu, C.H. ve diğ., (2015), yapmış oldukları çalışmada; süper plastik borlama yöntemi ile düşük alaşımlı çelikleri (%0,9 C, %1 Si, %1 Cr, Fe) geleneksel borlama yöntemlerine göre daha hızlı borlama işlemi yaparak gelişmiş mekanik özelliklere sahip olmasını amaçlamışlardır. Süper plastik borlama yöntemi ile borlanan numunelerin eğme testi sonucunda geleneksel yöntemlere göre kırılma mukavemeti, tokluk, maksimum eğilme değerlerinde sırasıyla 8, 18 ve % 15 artış olduğunu tespit etmişlerdir [45].

Li, J. ve diğ., (2007), yapmış oldukları çalışmada; ötektik halde bulunan Flinak karışımını (LiF-NaF-KF-K₂TiF₆-KBF₄ karışımı) kullanılarak grafit pota içerisinde borlama işlemi yapılmıştır. Borlama işlemi molibden altlık malzemesi üzerine 700 °C işlem sıcaklıklarında ve 0.5 saat işlem sürelerinde yüksek saflıktaki argon atmosferi altında gerçekleştirmişlerdir. Koruyucu atmosfer atında yapılan bu çalışmada endüstriyel uygulamalar açısından yetersiz gelmiştir. [46].

Teker, T. ve Karakurt, E. M., (2017), yapmış oldukları çalışmada; Fe-%1 Nb, Fe-%5 Nb ve Fe-%10 Nb (%at.) ikili alaşımlar 950, 1050 ve 1150 °C’lerde 3 saat süreyle borlama işlemine tabi tutmuşlardır. Demir içine alaşımlandırılan niyobyum elementinin münferit etkisi ve artan borlama sıcaklığının kaplama üzerindeki etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Borlama işlemi sonrası numunelerin ara yüzeyinde meydana gelen mikroyapısal değişim optik mikroskop (OM), SEM ve EDX analizleriyle incelenmiştir. Yüzey kaplamalarda testere dişi morfolojisi gözlenmiş olup kaplama sertlik ve kalınlıkları her numune için ayrı ayrı ölçülmüştür. Sonuç olarak, elde edilen bütün kaplama sertlikleri altlık malzemeye nazaran çok daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca kaplama kalınlıklarının artan niyobyum içeriğiyle beraber azaldığı tespit edilmiştir [47].

Fastner, U. ve Steck, T., (2011), yapmış oldukları çalışmada; KCl-NaCl-NaF-KBF₄-K₂TiF₆-Ti bileşimine sahip malzeme elektrokimyasal yöntemlerle borlanmıştır. Borlama işlemi tamamlanmasından sonra tetrafloroboratin termal parçalanması sonucunda elektrolit veriminin düştüğü belirtilmektedir [48].

Anthymidis, K.G. ve Tsipas, D.N., (2012), yapmış oldukları çalışmada; akışkan yatak prosesiyle Ti-Al-V alaşımlarına borlama işlemini gerçekleştirmişlerdir. Yapılan bu çalışma 1000 °C işlem sıcaklıklarında 6 saat işlem sürelerinde akışkan

ortam içerisinde B_4C ve katı halojen içeren bileşikten oluşup argon gazı atmosferi koşullarında yapılmıştır. Borlama işlemi sonucunda 10 μm ortalama kaplama kalınlığı elde edilmiştir [49].

Xin, X.C. ve Meng-lan, O., (2010), yapmış oldukları çalışmada; kromlu çeliklerin borlanması sonucunda malzemeye çeşitli ısıtma işlemleri uygulayarak tek fazlı Fe_2B fazının aşınma dayanımını ve artık gerilmeler hakkında deneyler yapmışlardır. Yapılan bu deneyler sonucunda artık gerilmelerin ısıtma işlemleri ile düzenli olarak değişim gösterdikleri ve çeliklerin aşınma dayanımlarında önemli derece etki ettikleri sonucuna varılmıştır [50].

Sofroshenkov, A.F. ve Sofroshenkov, I.A., (2013), yapmış oldukları çalışmada; hız çeliklerine borlama işlemini kalıpların ve kesme takımlarının aşınma dayanımlarını artırmak amacıyla yapmışlardır. Yapılan çalışma sonrasında hız çeliklerinin sertliği yaklaşık olarak 2000 MPa çıkmıştır. Ayrıca FeB ve Fe_2B fazlarının da tabakada olduğu ve bu tabakaların Fe-B denge diyagramıyla uyum gösterdiği sonucuna varılmıştır [51].

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. Çalışmanın Amacı

Yüzey modifikasyon işlemlerinden biri olarak sayılan borlama yöntemi, kapladıkları malzemelerin servis sahasında özelliklerini geliştirerek daha uzun süre hizmet etmesini sağlar. Endüstride borlama işlemi genellikle demir içerikli alaşımlara uygulanmaktadır. Borlama işlemi sonrasında malzemelerin sertlik, korozyon direnci, aşınma dayanımı, yüksek sıcaklıklarda korumak amacıyla erozyon dayanımını da arttırmak amacıyla kullanılmaktadır.

Çalışmanın amacı; sementasyon çeliğini kutu borlama yöntemi ile borlama işlemine tabi tutarak malzeme yüzeyinde sertlik, korozyon dayanımı, aşınma dayanımı ve erozyon dayanımını arttırmaktır. Bu özelliklerin artırılması sonucunda endüstride birçok alanda kullanılan sementasyon çeliklerinin kullanım alanının yaygınlaştırılmasına katkı saylayacağı düşünülmektedir.

3.2. Borlama Öncesi Yapılan Karakterizasyon İşlemleri

3.2.1. Deneyde Kullanılacak Numunenin Özellikleri

Sementasyon çeliği, aşınmaya dayanıklı olan yüzeyleri sert, çekirdekte ise yumuşak, darbeli yerlerde kullanılan içerisinde Fe, Mn, Cr, C, Mo ve Si içeren bir çeliktir.

3.2.2. Numunelerin Kesilmesi

Borlama işlemi için hazırlanacak olan numuneler Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği'nde bulunan Mikrotest marka kesme cihazına amaca uygun şekilde kesilmek üzere yerleştirilmiştir (Resim 3.1). Numunelerin kesilme işlemi belirli bir hızda dönen SiC testere çarklarla numuneler amaca uygun boyutlarında dilimlenmiştir. Kesim esnasında malzemelerin aşırı ısınması ve buna bağlı olarak numunelerde meydana gelen deformasyonu

önlemek için kesme esnasında cihaz tarafından numunelere su püskürtülmüştür. Kesme işlemi tamamlandıktan sonra numuneler sırasıyla zımparalama ve parlatma işlemlerine hazır hale getirilmiştir.



Resim 3.1 Kesme cihazı

3.2.3. Zımparalama ve Parlatma

Borlama işlemi için hazır hale getirilecek olan numuneler istenilen boyutlarda kesilme işleminden sonra numunelerin yüzeyleri sırasıyla 80,150, 180, 240, 320, 400, 500, 600, 800, 1000, 1200 zımpara kâğıtları Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan Metkon marka zımparalama makinasına yerleştirilmiştir (Resim 3.2). Daha sonra numunelerin yüzeyindeki her yerinin homojen olması için zımparalama işlemi yapılmıştır. Sırasıyla yapılan zımparalama işlemi ilk olarak 80 mesh boyutlarındaki zımparalama kâğıdı ile başlanıp 1200 mesh boyutlarında bitirilmiştir. Bu yapılan zımparalama işlemi sırasında numune hassas bir şekilde bastırılmıştır. Her bir zımparalama işleminde numunelerin aşınması sonucunda meydana gelen parçacıklar ve numune su ile temizlenir. Zımparalama işlemi esnasında malzemelerin homojen bir şekilde olması, numunelerin aşırı ısınmaması ve aşınma sonucunda meydana gelen talaşların malzeme yüzeyine zarar vermemesi için zımparalama cihazında bulunan su sistemi sürekli aktif halde kalmıştır. Daha sonra borlama işlemi için istenilen yüzey kalitesini sağlamak amacıyla numuneler parlatma cihazdan geçirilmiştir. Parlatma cihazında 1-3 μm boyutlarında elmas pasta kullanılmıştır.

Numunelerin yüzeylerinin çok hassas olması gerektiği için çok sert olmayan çuha kullanılmıştır. Parlatma işlemi tamamlandıktan hemen sonra numune yüzeylerinde bulunan elmas pasta artıkları gibi istenmeyen kalıntılar etil alkol (etanol C_2H_5OH) içinde 10 dakika kadar bekletilmiştir. Bekletme işleminden hemen sonra numuneler iyi bir şekilde kurutularak borlama işlemi için hazır hale getirilmiştir.



Resim 3.2 Zımparalama ve parlatma makinesi

3.3. Borlama İşlemi

Borlama işlemi Adıyaman Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği laboratuvarında bulunan dijital kontrollü Protherm marka kutu fırın kullanılarak yapıldı (Resim 3.3).



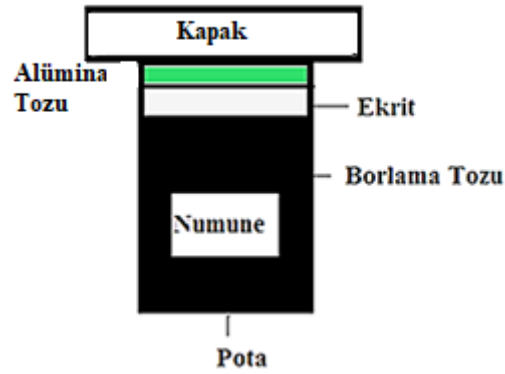
Resim 3.3 Dijital kontrollü fırın

Bor kaynağı, ticari olarak piyasadan temin edilen Ekabor II (5% B₄C (verici), 90% SiC (seyreltici=bor potansiyelini azaltarak düzenleyen ajan), 5% KBF₄ (aktivatör)) bor verici tozu kullanılmıştır. SiC miktarının fazla olarak seçilmesinin esas sebebi bor potansiyelinin yüksek olması durumunda demir esaslı malzemelerde iki tabaka (FeB, Fe₂B) oluşumunu ve bu iki tabakanın da soğuma esnasında çatlayarak kaplamanın dökülmesini engellemek içindir. Çizelge 3.1’de Ekabor II tozunun özellikleri hakkında bilgiler verilmiştir.

Çizelge 3.1 Ekabor borlama tozlarının özellikleri

Toz Türü	Tane Büyüklüğü	Yoğunluk	Açıklamalar
Ekabor2	≤ 850 µm	1.50	İyi yüzey kalitesi ve borlama işlemi sonrasında kolayca temizlenebilme

Borlama işleminde maksimum verim alabilmek amacıyla ticari olarak elde edilen bor tozlarının içerisinde bulunan nem miktarının minimum seviyelere düşürmek amacıyla Adıyaman Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği laboratuvarında bulunan vakumlu MMM-Grup markalı etüvde 100 °C’de 24 saat kurutma işlemine tabi tutulmuştur. Kurutma işleminden hemen sonra bor tozlarının içerisindeki nem miktarının artmaması için hemen borlama işlemine başlanmıştır. Borlama işlemi yapılacak olan numuneler borlama tozları etüv fırınındayken hazır hale getirilmiştir. Borlama işlemi yapılacak olan numune bor tozu üstte ve altta olmak koşuluyla 4-5 cm’lik bor verici ortama gömülerek silisyum-karbür potaya dolduruldu (Şekil 3.1). Borlama işlemi yapılacak olan fırın atmosfer koşullu olduğu için pota içerisine bor verici toz konulup (Ekabor-II) içerisine numune gömüldükten sonra bor tozunun hemen üstüne oksidasyondan malzemeyi korumak amacıyla deoksidan görevi yapan sırasıyla Bortec firması tarafından üretilen SiC esaslı amorf faza sahip ekrit tozu ve alümina tozu konuldu. İşlem tamamlandıktan sonra pota kapağı sıkıca kapatıldı ve borlama işlemi için hazır hale getirildi.



Şekil 3.1 Numuneni potaya diziliş şekli

Borlama işlemi dijital kontrollü Protherm marka fırın kullanılarak yapılmıştır. Borlama işlemi 850, 950 ve 1050 °C’lerde, 6-8 ve 10 saat olmak üzere yapılmıştır. İşlem saati bitiminden sonra potanın termal şok etkisi minimum seviyeye indirmek amacıyla fırın kapağı belli bir periyotla yavaş yavaş açılmıştır. Sıcaklık yaklaşık olarak 400 °C yaklaştığında fırının kapağı tamamen açıldı ve soğumaya bırakıldı.

3.4. Borlama Sonrası Yapılan Karakterizasyon İşlemleri

3.4.1. Borlanmış Numuneleri Ortadan İkiye Kesme

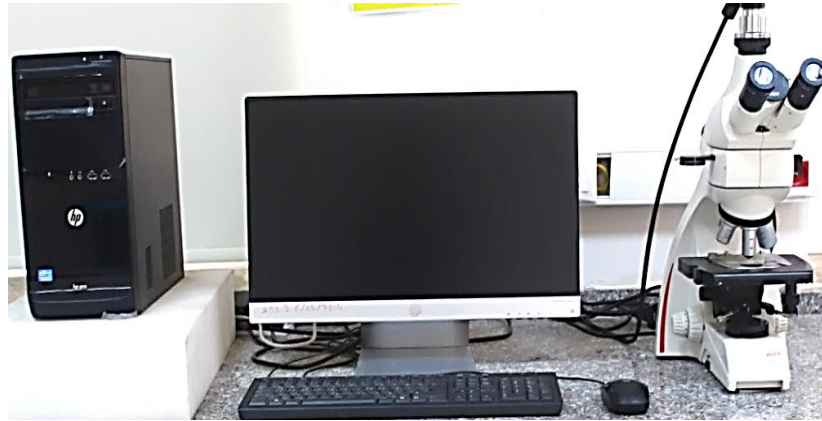
Bu aşamada borlanmış malzemelerin kesit karakterizasyonu için numunelerin hazırlanılması aşamasına geçildi. Öncelikle numuneler Brilliant 210 marka hassas kesicinin bölmesine yerleştirilerek elmas uçlu testere kesici ile ortadan ikiye ayrıldı (Resim 3.4).



Resim 3.4 Hassas kesme cihazı

3.4.2. Optik Görüntü Analizi

Metalografi teknikleri ile hazırlanan sementasyon çeliği 850 °C 6-8-10 saat, 950 °C 6-8-10 saat ve 1050 °C 6-8-10 saat borlanmasıyla elde edilen 9 tane numunenin optik mikroskop görüntüleri Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji Malzeme Mühendisliği laboratuvarında bulunan, Resim 3.5’deki fotoğrafı verilen LEICA DM750 marka optik mikroskopta farklı kaplama bölgelerinden ve farklı büyütmelerde optik görüntüleri çekilmiştir.



Resim 3.5 Optik mikroskop

3.4.3. Yüzey XRD Analizleri

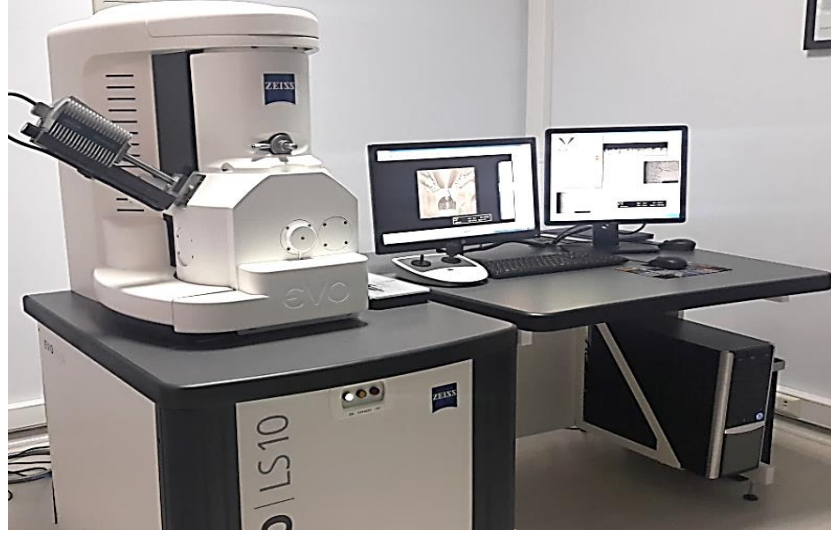
Borlama işleminden sonra oluşan fazları ve bileşikleri tespit etmek için Malatya İnönü Üniversitesi Merkezi Araştırma laboratuvarında (İBTAM) bulunan BRUKER marka XRD cihazı (X-ray diffractometer RadB-DMAX II, Cu K α radyasyonu, $\lambda=1,5418$ Å dalga boylu ile 2θ olarak 2° den 80° ye kadar bir aralıkta) ile testler yapıldı (Resim 3.6).



Resim 3.6 XRD cihazı

3.4.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizleri

Kaplama tabakasındaki alaşım elementlerinin ve hâkim fazın dağılımını, borlama sonrası oluşan kaplama morfolojisini ve oluşan tabaka kalınlıklarını ortaya çıkarmak amacıyla Adıyaman Üniversitesi Merkezi Araştırma laboratuvarında bulunan ZEISS marka EVO LS 10 marka Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılmıştır (Resim 3.7).



Resim 3.7 Deneylerde kullanılan taramalı elektron mikroskobu (SEM)

3.4.5. Enerji Dağılım Spektroskopisi (EDS) ve Elementel Haritalandırma (Mapping) Analizleri

Hazırlanan numunelerin tabaka üzerinde elementel kompozisyonu tanımlamak için EDS ve yüzey haritalandırma (Mapping) yöntemleri kullanılmıştır. Taramalı elektron mikroskobunda kullanılan bir tekniktir. İnönü Üniversitesi Merkezi Araştırma laboratuvarı'nda bulunan EVO 40 marka Taramalı Elektron Mikroskobu kullanılmıştır (Resim 3.8).



Resim 3.8 EDS deneyinde kullanılan taramalı elektron mikroskobu

3.4.6. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Analizi

Hazırlanan numunelerin numunelerin yüzey pürüzlülüğü değerlerini ölçmek için MİTUTOYO SJ-210 model yüzey pürüzlülük cihazı kullanılmıştır (Resim 3.9). Yüzey pürüzlülüğü, çok hassas ince bir ucun numune yüzeylerini taramasıyla yapıldı. Bu işlem sırasında numunelerin merkezleri hedeflenerek 0,8 x 5 mm bir alan tarandı. Bu işlem her bir numune için ayrı ayrı yapıldı.



Resim 3.9 Yüzey pürüzlülük test cihazı

3.4.7. Kesitten Mikrosertlik Ölçümü Analizi

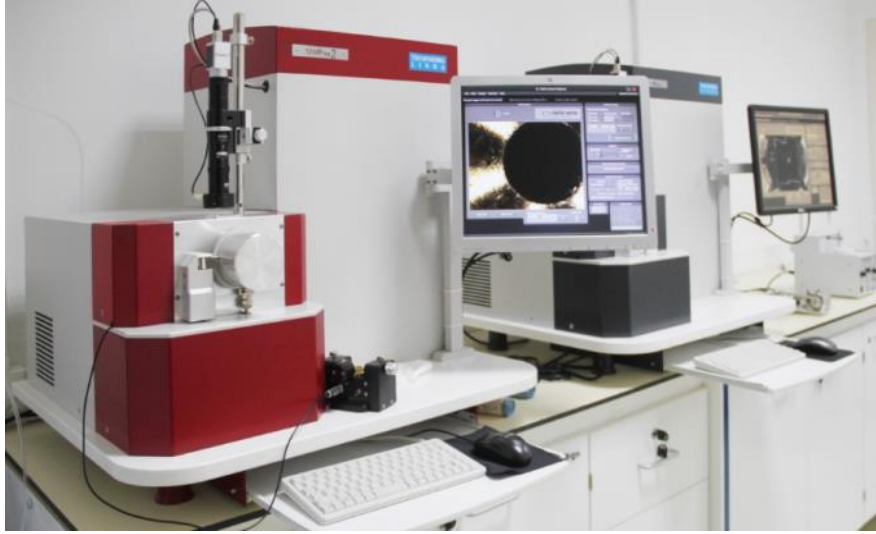
Borlama sonrasındaki sertlik değişimlerini ölçmek için Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji Malzeme Mühendisliği'nde bulunan QNESS Q10 marka mikrosertlik cihazı (Resim 3.10) kullanıldı. Mikrosertlik ölçümleri 30 gr yük altında 5 sn süreyle 0.5 mm aralıklarda Vickers (HV) skalasında gerçekleştirildi.



Resim 3.10 Mikrosertlik test cihazı

3.4.8. Elektron Geri Saçılım Difraksiyonu (EBSD) Analizi

Hazırlanan numunelerin Elektron Geri Saçılım Difraksiyonu (EBSD) paternlerinin tekli ve poli-fazlı kristal malzemelerden toplanması ve analizi ile kristallografik oryantasyon ve faz dağılımını belirlemek amacıyla bu yöntem kullanılmıştır. EBSD analiz sistemi, mikroyapı analizlerinin belirlenmesinde kullanılan en kapsamlı yöntemlerden biridir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile elde edilen bir yöntemdir. Bu yöntemde saniyede 1.000 belirlenmiş noktalara aynı anda veri toplama ve işleme hızına ulaşılabilmektedir. Ayrıca EBSD ile birlikte işlem gören ileri saçılım dedektörü ile malzeme tasarlamak için önemli faktörlerden olan kalıntı gerilmeler, deformasyonu belirlemek, mikroyapısal olarak incelemek ve EBDS verisinin elde edilmesi için bölgedeki mikroyapı hakkında önceden bilgi almak mümkündür. EBSD analizi Dumlupınar Üniversitesi İleri Teknolojiler Merkezi (İLTEM) laboratuvarında yapılmıştır (Resim 3.11).

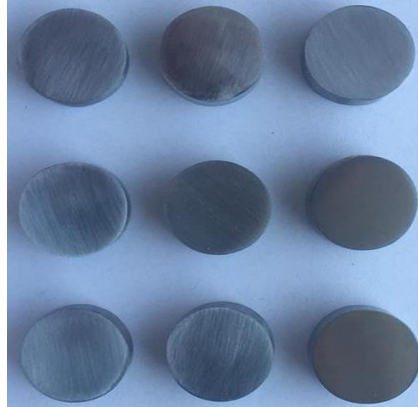


Resim 3.11 Elektron geri saçılım difraksiyon (EBSD) cihazı

4. BULGULAR ve TARTIŞMA**4.1. Makro Fotoğrafların Değerlendirilmesi**

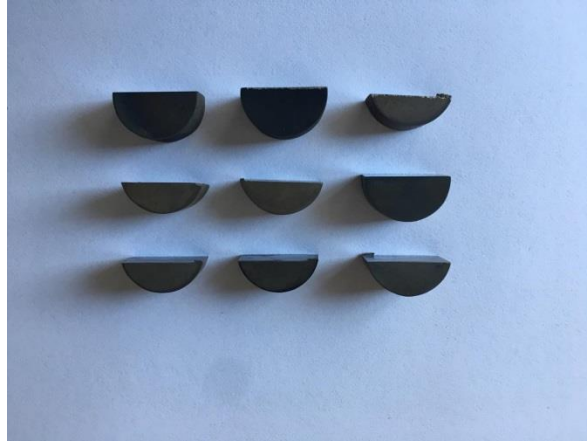
Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda 850, 950 ve 1050 °C işlem sıcaklıklarında ve 6, 8 ve 10 saat işlem süreleriyle borlanan tüm numunelerin borlama işlem öncesi ve sonrası makro görüntüleri Resim 4.1 ve Resim 4.2’de görülmektedir.

Buna göre borlama, işlem öncesi sementasyon çeliğinin yüzey kalitesini artırmak için zımparalama ve parlatma işlemine tabi tutulmuştur. Bu yüzden parlatma sonrası elde edilen yüzey kalitesi çok pürüzsüz bir yapı elde edilmiştir. Çünkü borlama işlemi difüzyona dayalı bir işlem olduğundan dolayı, yüzey kalitesi kaplama üzerinde önemli bir yere sahiptir.



Resim 4. 1 Borlama işlem öncesi tüm numunelerin makro görüntüleri

Borlama işlem sonrası tüm numunelerin makro fotoğrafları Resim 4.2’de verilmiştir. Buna göre, borlanan numunelerin makro fotoğrafları incelendiğinde artan borlama işlem sıcaklığı numunenin kaplama yüzey kalitesi üzerinde önemli bir etki meydana getirmiştir. En yüksek borlama işlem sıcaklığı 1050 °C olan numunelerin kaplama yüzeylerinde bazı poroziteler ve topaklanmalar görülmektedir. Bu kapsamda artan borlama işlem sıcaklıkları, numune yüzeylerindeki pürüzlülük katsayısını artırmıştır.

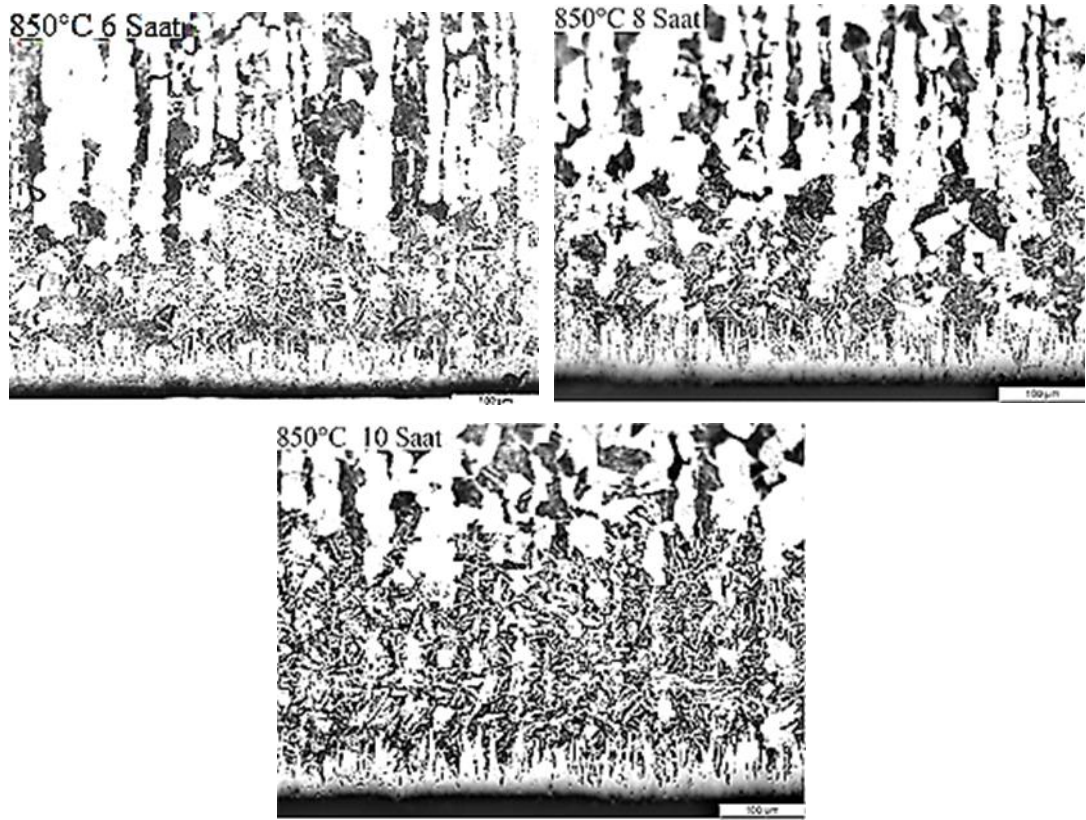


Resim 4.2 Borlama işlem sonrası numunelerin makro görüntüleri

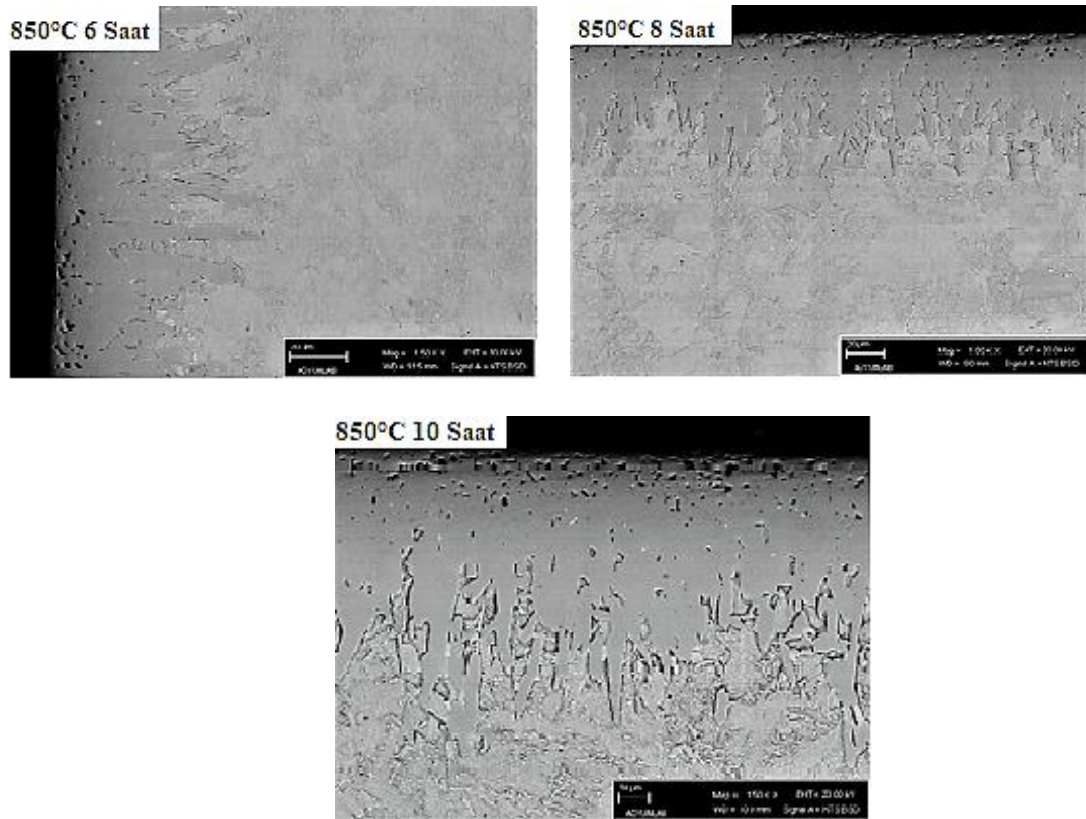
4.2. Optik, SEM ve EDS Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda 850, 950 ve 1050 °C işlem sıcaklıklarında ve 6, 8 ve 10 saat işlem süreleriyle borlanan tüm numunelerin ara-kesit mikroyapıları verilmiştir. Mikroyapı fotoğrafları incelendiğinde 850, 950 ve 1050 °C işlem sıcaklıklarında gerçekleştirilen tüm sementasyon çeliklerinin yüzeylerinde borür tabakalarının olduğu gözlemlenmiştir. Borlamada tipik olarak görülen testere dişi morfolojisi; 850, 950 ve 1050 °C işlem sıcaklıklarında gerçekleştirilen tüm deney numunelerinin yüzeylerinde elde edilmiştir. Bu durum literatürde belirtildiği üzere tercihli yönlerde difüzyon hızının daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. En sıkı kristal düzlemlerine dik olan yönlerde atomik boşluğun göreceli yüksek olması bu sonucu doğurmaktadır.

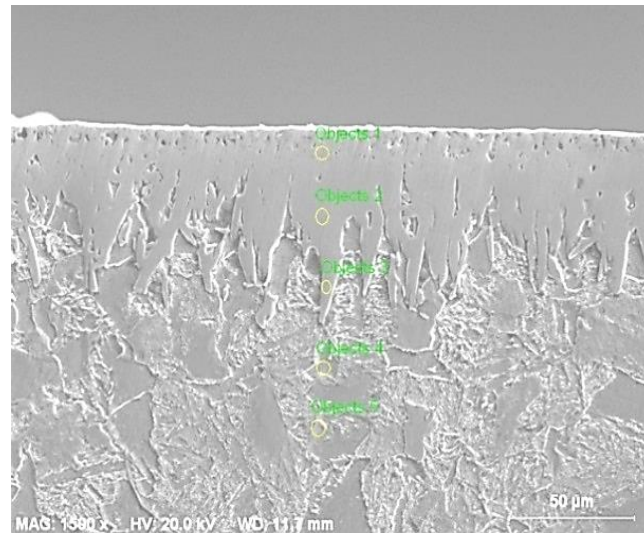
Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda 850 °C işlem sıcaklıklarında ve 6, 8 ve 10 saat işlem süreleriyle borlanan tüm numunelerin ara-kesit mikroyapıları (Resim 4.3-4.4) görülmektedir.



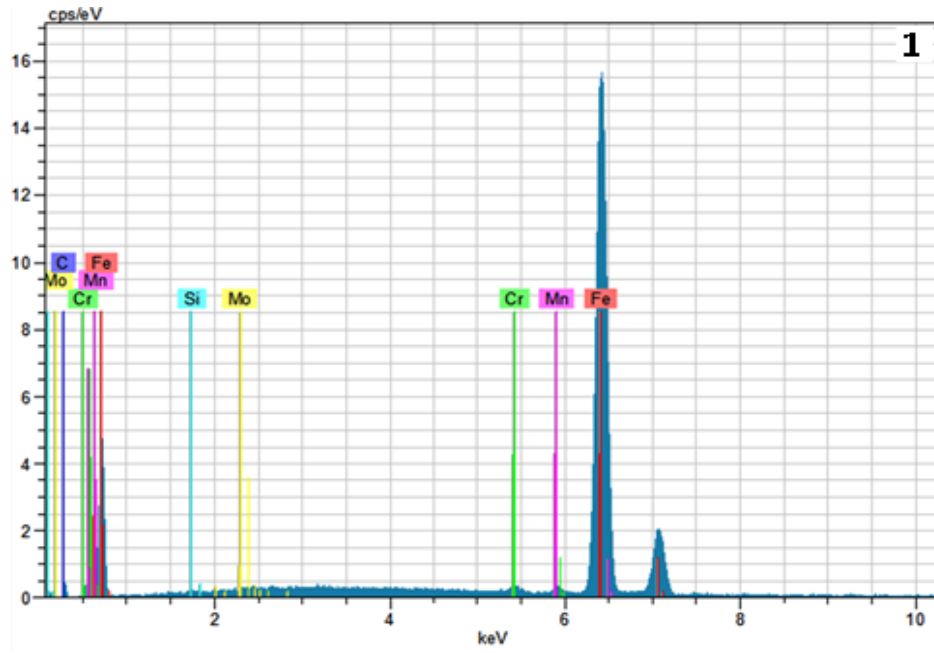
Resim 4.3 850 °C’de borlanan numunelerin optik görüntüleri



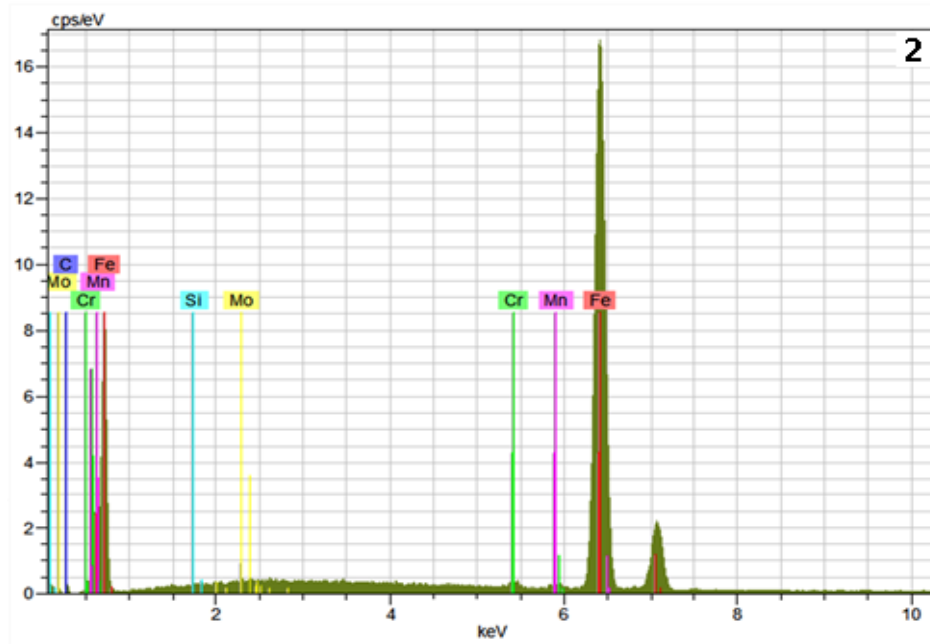
Resim 4.4 850 °C’de borlanan numunelerin SEM görüntüleri



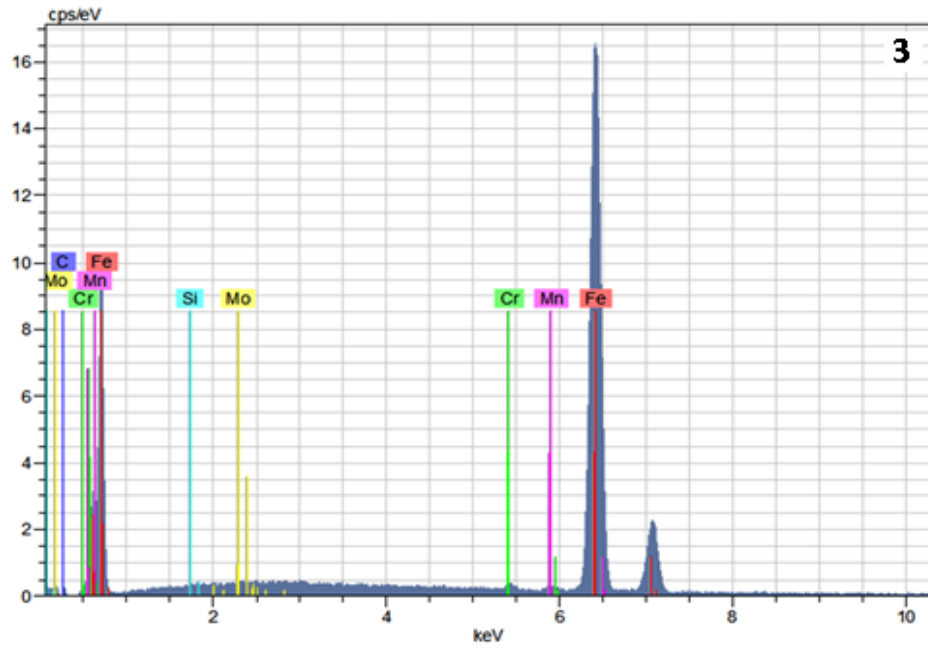
Resim 4.5 850 °C 6 saat işlem proseslerinde borlanan numunenin EDS analiz noktalarını gösteren SEM görüntüsü



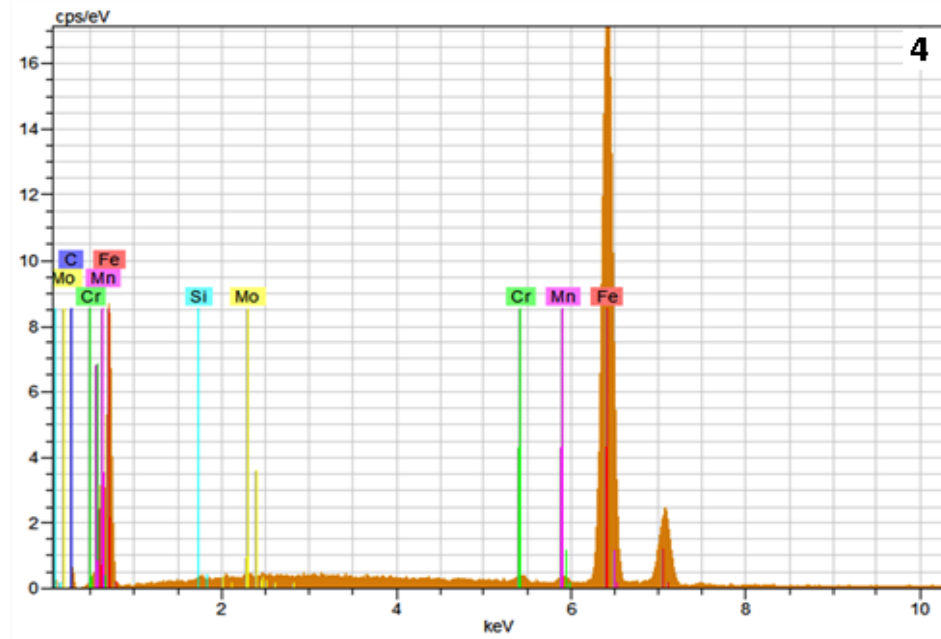
El	AN	Series	Unn. C [wt.%]	Norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Fe	26	K-series	105.63	90.91	88.79	2.9
Mn	25	K-series	8.89	7.65	7.60	0.3
Cr	24	K-series	0.82	0.71	0.74	0.1
C	6	K-series	0.72	0.62	2.80	0.2
Mo	42	L-series	0.14	0.12	0.07	0.0
Si	14	K-series	0.00	0.00	0.00	0.0
Total			116.97	100.00	100.00	



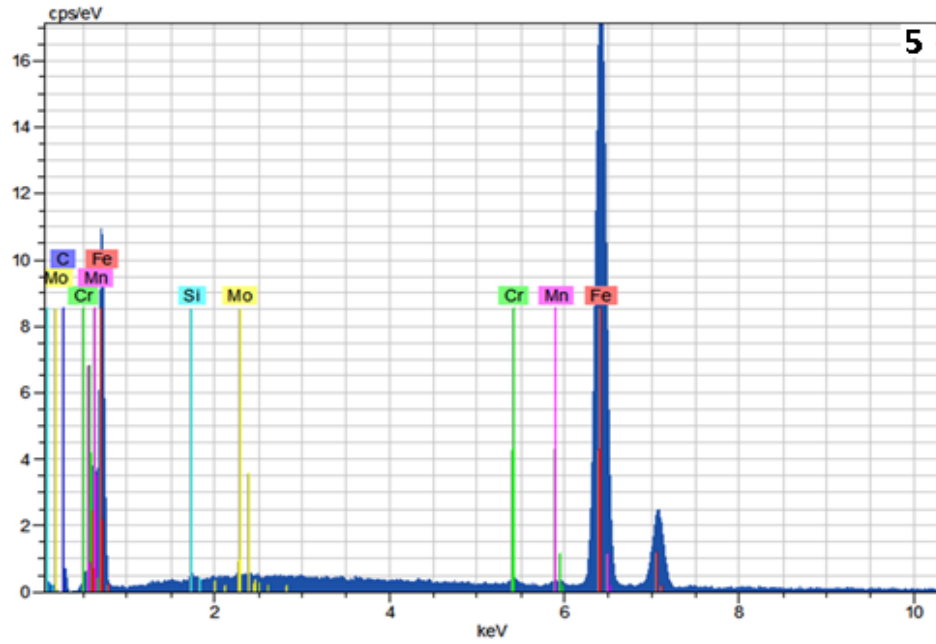
El	AN	Series	Unn. C [wt. %]	Norm. C [wt. %]	Atom. C [at. %]	Error [%]
Fe	26	K-series	94.38	91.18	90.38	2.5
Mn	25	K-series	7.89	7.63	7.69	0.3
Cr	24	K-series	0.60	0.58	0.62	0.1
C	6	K-series	0.25	0.24	1.10	0.1
Mo	42	L-series	0.38	0.37	0.21	0.0
Si	14	K-series	0.00	0.00	0.00	0.0
Total			116.97	100.00	100.00	



El	AN	Series	Unn. C [wt. %]	Norm. C [wt. %]	Atom. C [at. %]	Error [%]
Fe	26	K-series	92.98	90.82	90.13	2.5
Mn	25	K-series	8.03	7.85	7.91	0.3
Cr	24	K-series	0.56	0.55	0.59	0.1
C	6	K-series	0.22	0.22	1.00	0.1
Mo	42	L-series	0.55	0.53	0.31	0.1
Si	14	K-series	0.03	0.03	0.06	0.0
Total			102.38	100.00	100.00	



El	AN	Series	Unn. C [wt.%]	Norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Fe	26	K-series	98.72	90.42	87.81	2.7
Mn	25	K-series	8.72	7.99	7.89	0.3
Cr	24	K-series	0.66	0.60	0.63	0.1
C	6	K-series	0.86	0.79	3.55	0.2
Mo	42	L-series	0.21	0.19	0.11	0.0
Si	14	K-series	0.01	0.01	0.02	0.0
Total			109.18	100.00	100.00	



El	AN	Series	Unn. C [wt.%]	Norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Fe	26	K-series	90.92	89.74	86.16	2.5
Mn	25	K-series	7.98	7.88	7.69	0.3
Cr	24	K-series	0.52	0.52	0.53	0.1
C	6	K-series	1.16	1.14	5.11	0.3
Mo	42	L-series	0.65	0.64	0.36	0.1
Si	14	K-series	0.08	0.08	0.16	0.0
Total			101.31	100.00	100.00	

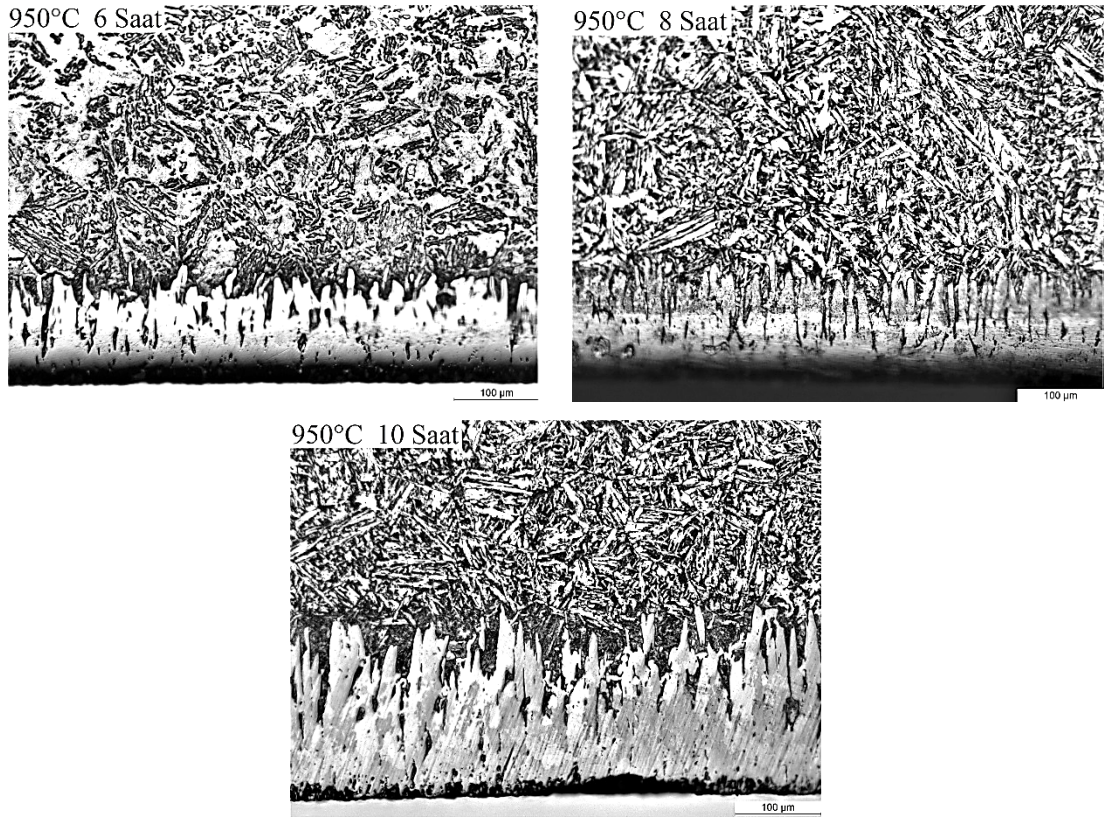
Resim 4.6 850 °C 6 saat işlem proseslerinde borlanan numunenin EDS analiz grafikleri ve sonuçları

850 °C proses sıcaklığında 6, 8 ve 10 saat proses sürelerinde katı ortamda borlama işlemine tabi tutulan tüm sementasyon çeliklerinin yüzeylerinde borür tabakasının oluştuğu optik görüntülerinde Resim 4.3’de aşikâr bir şekilde görülmektedir. 850 °C’de işlem gören bütün numunelerin yüzeylerinde oluşan borür tabakasından matrise doğru gidildikçe tane sınırlarında bir yayınım olduğu bu yayınının ise beyaz renkte olduğu tespit edilmiştir. Oluşan bu yayınının borür tabakası ile aynı renkte olmasının ve tane sınırlarına doğru yayılmasının nedeniyle bor yayınımlı olması düşünülmektedir. Tane sınırlarında oluşan fazların sertlikleri alınmış ve bu sonuçlardan da anlaşılabacağı üzere, bu fazların borür tabakası olduğuna kanaat getirilmiştir. Literatürde de tane sınırları, dislokasyonlar ve mikro boyuttaki hataların bulunduğu bölgelerin borür fazlarının oluşumunda başladığı ve devam ettiği belirtilmiştir. Borlama işleminin tamamlanması ile birlikte numunelerin optik görüntüleri analiz edildiğinde, 850 °C’de işlem sıcaklığına sahip bütün numunelerin borür tabakasında üç farklı bölgenin oluştuğu anlaşılmıştır. Bu bölgeler: borür tabakası, geçiş bölgesi ve ana metal olarak adlandırılır. Ayrıca 850 °C işlem sıcaklığında katı ortamda borlanan tüm numunelerin kaplama morfolojisi, testere-dişi şeklinde görülmektedir.

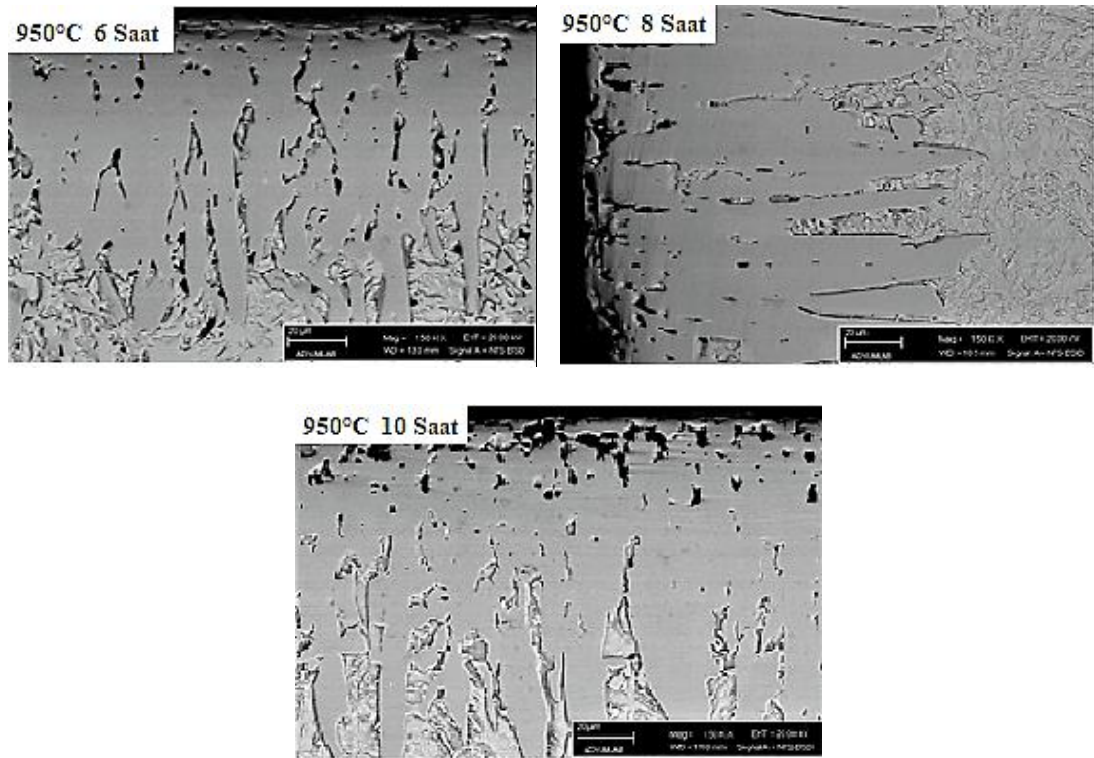
850 °C işlem sıcaklığında 6, 8 ve 10 saat işlem sürelerinde elde edilen tüm numunelerin borür tabakalarının ara kesit SEM fotoğrafları Resim 4.4’de verilmiştir. 850 °C işlem sıcaklığında 6, 8 ve 10 saat işlem sürelerinde elde edilen tüm numunelerin borür tabakalarının SEM fotoğrafları ayrı ayrı incelendiğinde, numunelerin yüzeylerinden çekirdeğe doğru gidildikçe Fe₂B fazları tespit edilmiştir. Elementel analiz sonuçlarında yüzeydeki demir konsantrasyonunun azalması sonucunda bor tabakası meydana gelmektedir. Bu durum ise Fe₂B fazlarının varlığını doğrular niteliktedir. Ayrıca SEM fotoğraflarında yapılan ölçeklendirme sonucunda oluşan tabaka kalınlıkları 850 °C işlem sıcaklığında 6 saat için 47.50 µm, 8 saat için 52.27 µm ve 10 saat için ise 51.51 µm olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar göstermiştir ki artan işlem süresi ile birlikte meydana gelen borür tabakasında bir artış meydana gelmiştir.

850 °C işlem sıcaklığında ve 6 saat işlem süresine sahip numunenin borür tabakasının ara kesitinden alınan EDS analizi Resim 4.5 ve 4.6’da detaylı olarak verilmiştir. EDS analizi incelendiğinde 850 °C işlem sıcaklığı difüzyon için itici gücü sağlamıştır. Buna bağlı olarak kaplama ve esas metal arasındaki difüzyonu kolaylaştırmıştır. Fakat esas metale doğru gidildikçe element difüzyonunun azaldığı ve malzemelerin kendi içyapılarında bulunan orijinal elementel yüzdelere yaklaşıldığı tespit edilmiştir. Borür tabakası, geçiş bölgesi ve ana metal olmak üzere üç ayrı bölgede yapılan elementel analiz sonucunda borür tabakasında en fazla bor elementine rastlanırken geçiş bölgesinde bu oran düşerken ana metalde bor elementine rastlanılmamıştır. Bu analiz sonucunda ise borür tabakasında ve geçiş bölgesinde sırasıyla meydana gelen Fe_2B fazlarının meydana geldiği doğrulanmıştır.

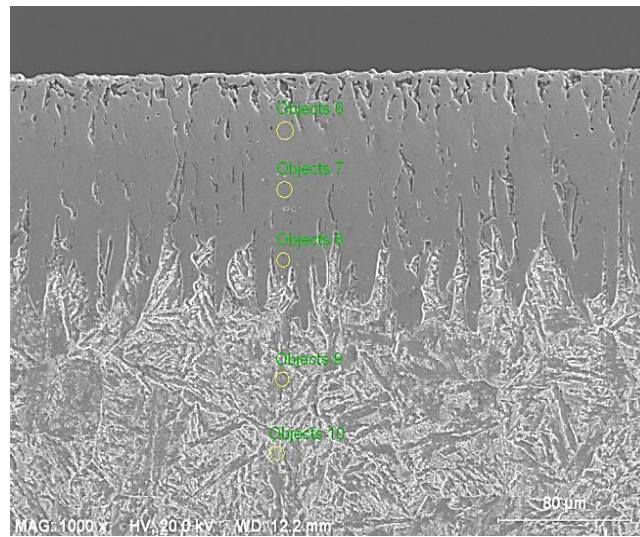
Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda 950 °C işlem sıcaklıklarında ve 6, 8 ve 10 saat işlem süreleriyle borlanan tüm numunelerin ara-kesit mikroyapıları (Resim 4.7-4.8) görülmektedir.



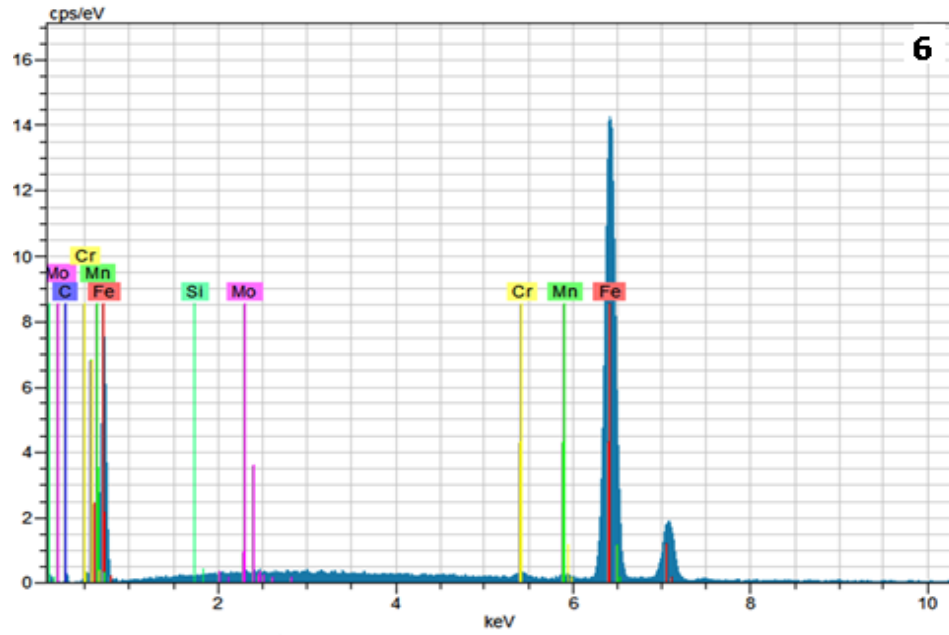
Resim 4.7 950 °C’de borlanan numunelerin optik görüntüleri



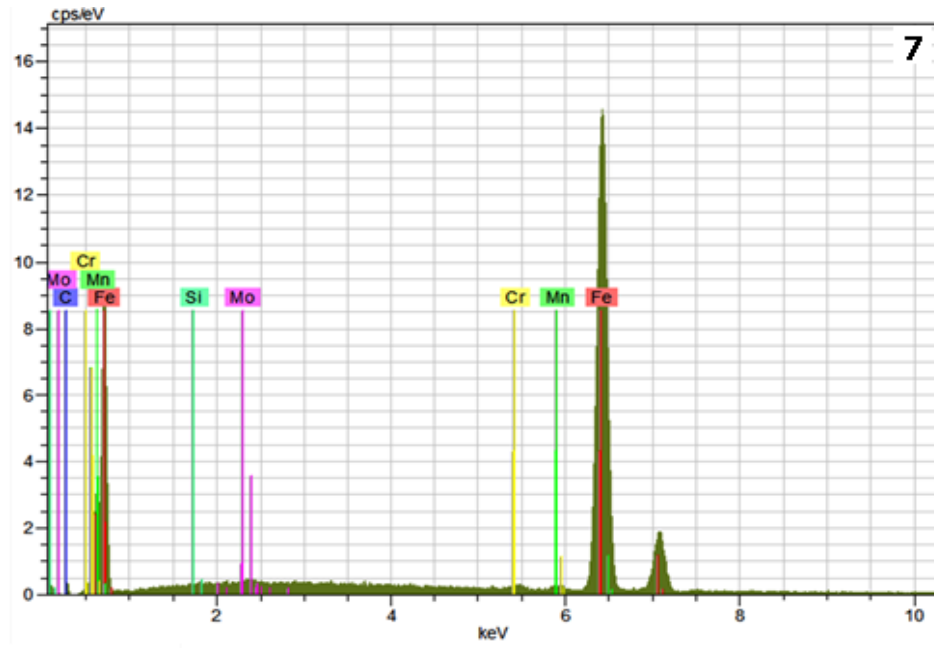
Resim 4.8 950 °C’de borlanan numunelerin SEM görüntüleri



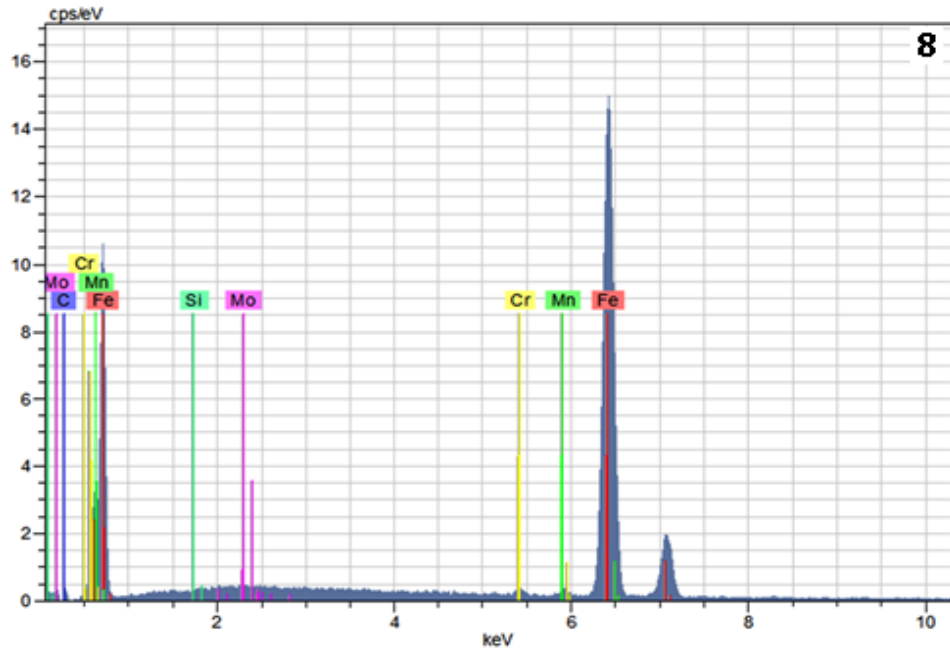
Resim 4.9 950 °C 8 saat işlem proseslerinde borlanan numunenin EDS analiz noktalarını gösteren SEM görüntüsü



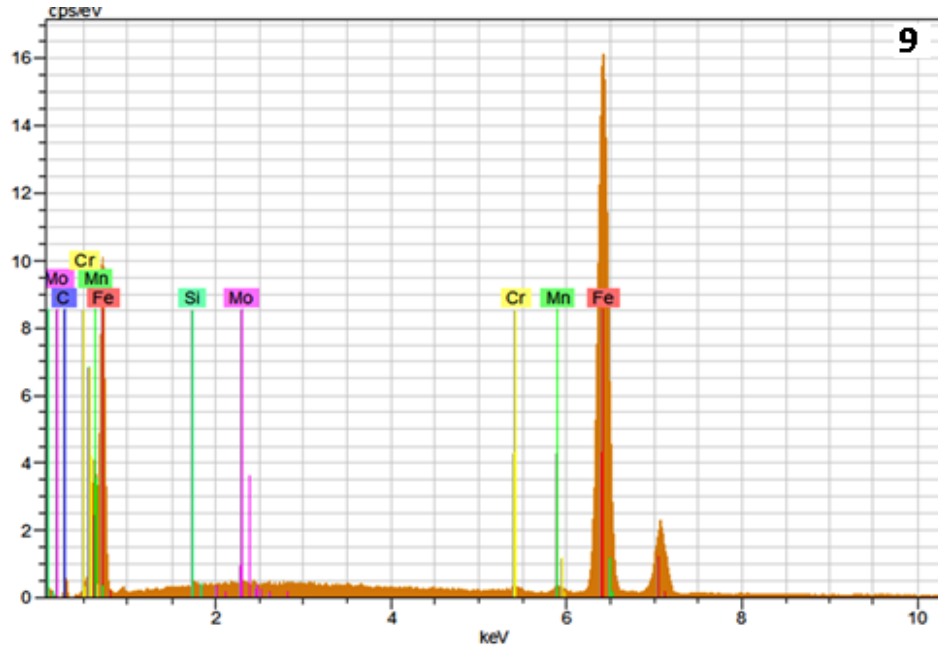
El	AN	Series	Unn. C [wt.%]	Norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Fe	26	K-series	93.53	88.98	87.50	2.5
Mn	25	K-series	9.81	9.33	9.33	0.3
Cr	24	K-series	0.72	0.69	0.73	0.1
C	6	K-series	0.49	0.47	2.13	0.2
Mo	42	L-series	0.56	0.53	0.31	0.1
Si	14	K-series	0.00	0.00	0.00	0.0
Total			105.12	100.00	100.00	



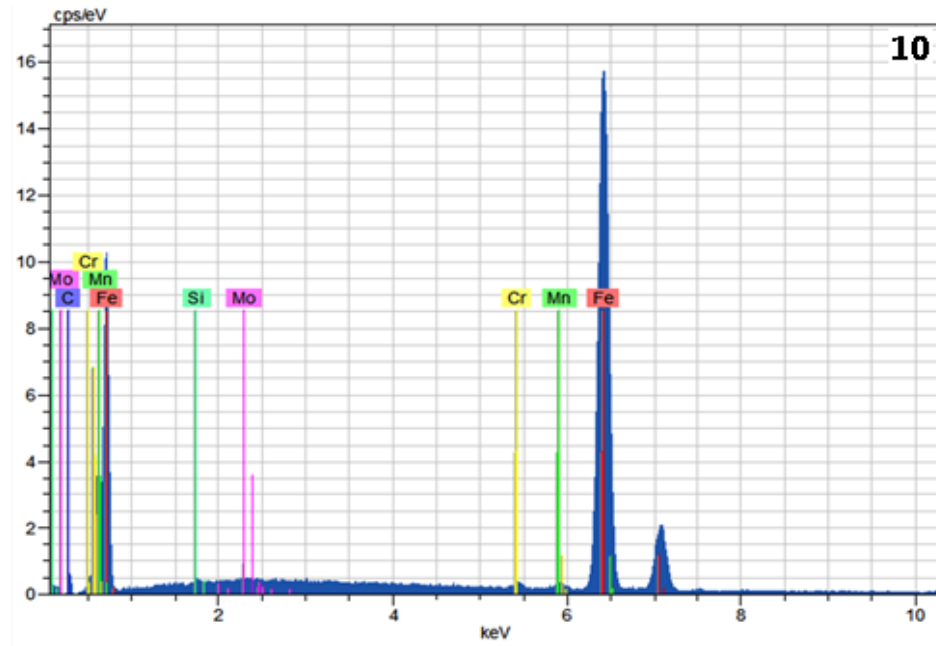
El	AN	Series	Unn. C [wt.%]	Norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Fe	26	K-series	87.21	88.25	86.31	2.4
Mn	25	K-series	9.58	9.69	9.64	0.3
Cr	24	K-series	0.58	0.58	0.61	0.1
C	6	K-series	0.62	0.63	2.84	0.2
Mo	42	L-series	0.76	0.77	0.44	0.1
Si	14	K-series	0.08	0.08	0.15	0.0
Total			98.82	100.00	100.00	



El	AN	Series	Unn. C [wt.%]	Norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Fe	26	K-series	86.33	88.46	86.68	2.3
Mn	25	K-series	8.76	8.98	8.94	0.3
Cr	24	K-series	0.65	0.67	0.70	0.1
C	6	K-series	0.61	0.62	2.84	0.2
Mo	42	L-series	1.17	1.20	0.68	0.1
Si	14	K-series	0.07	0.07	0.15	0.0
Total			97.59	100.00	100.00	



El	AN	Series	Unn. C [wt. %]	Norm. C [wt. %]	Atom. C [at. %]	Error [%]
Fe	26	K-series	85.43	87.62	84.00	2.3
Mn	25	K-series	9.38	9.62	9.37	0.3
Cr	24	K-series	0.60	0.61	0.63	0.1
C	6	K-series	1.15	1.18	5.24	0.3
Mo	42	L-series	0.80	0.82	0.46	0.1
Si	14	K-series	0.15	0.15	0.29	0.0
Total			97.50	100.00	100.00	



El	AN	Series	Unn. C [wt.%]	Norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Fe	26	K-series	85.40	87.53	83.49	2.3
Mn	25	K-series	9.33	9.56	9.27	0.3
Cr	24	K-series	0.57	0.58	0.59	0.1
C	6	K-series	1.29	1.32	5.87	0.3
Mo	42	L-series	0.82	0.85	0.47	0.1
Si	14	K-series	0.15	0.16	0.30	0.0
Total			97.57	100.00	100.00	

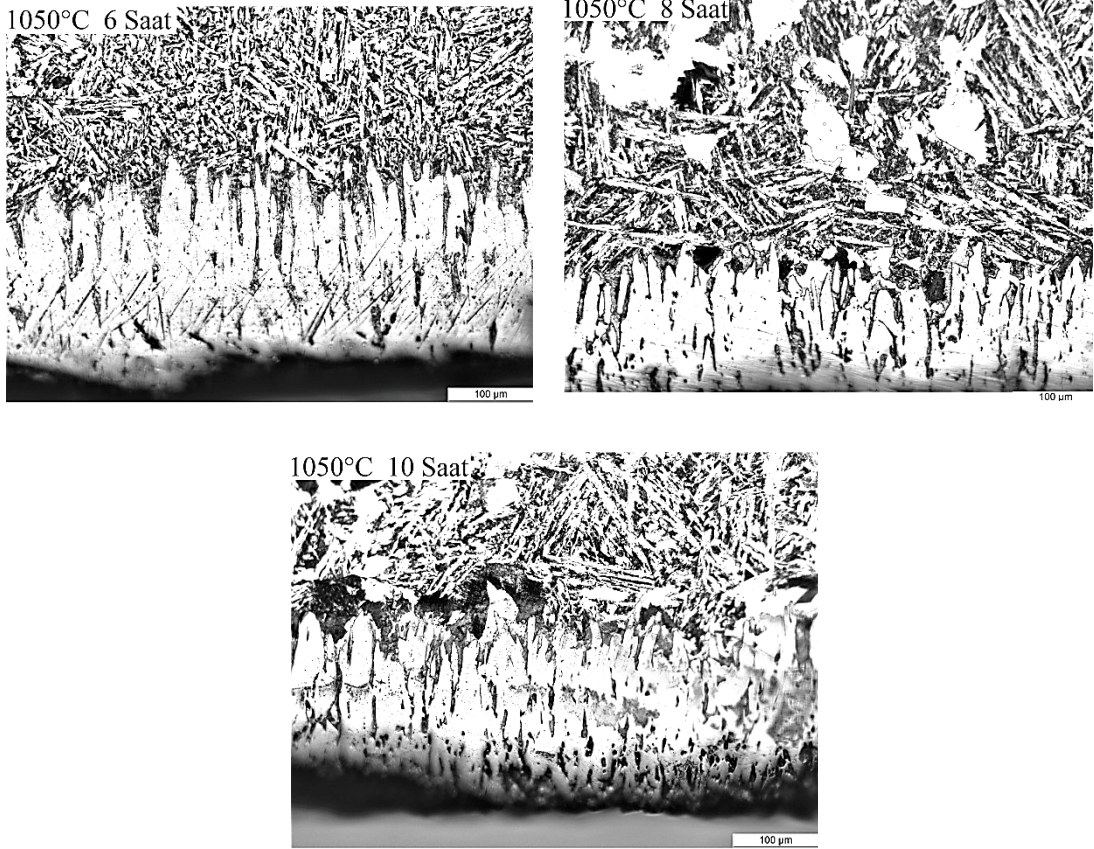
Resim 4.10 950 °C 8 saat işlem proseslerinde borlanan numunenin EDS analiz grafikleri ve sonuçları

950 °C işlem sıcaklığında 6, 8 ve 10 saat işlem sürelerinde katı ortamda borlama işlemine tabi tutulan tüm sementasyon çeliklerinin yüzeylerinde borür tabakalarının optik fotoğrafı Resim 4.7’de verilmiştir. 850 °C proses sıcaklığında 6, 8 ve 10 saat proses sürelerinde borlanan numuneler ile 950 °C proses sıcaklığında 6, 8 ve 10 saat proses sürelerinde borlanan tüm numuneler birbirleri ile kıyaslandığında 950 °C’de işlem gören numunelerin kaplama ve geçiş bölgelerinin kalınlıkları daha fazla olduğu elde edilen görüntüler ile açık bir şekilde görülmektedir. 950 °C proses sıcaklığında 6, 8 ve 10 saat proses sürelerinde borlanan numunelerde 10 saat borlama işlemi gören numunede meydana gelen kaplama kalınlığının 8 saat borlama işlem gören numuneye göre daha fazla olduğu, 8 saat borlama işlemine tabi tutulan numunenin kaplama kalınlığı ise 6 saat borlama işlemi gören numuneye göre daha fazladır.

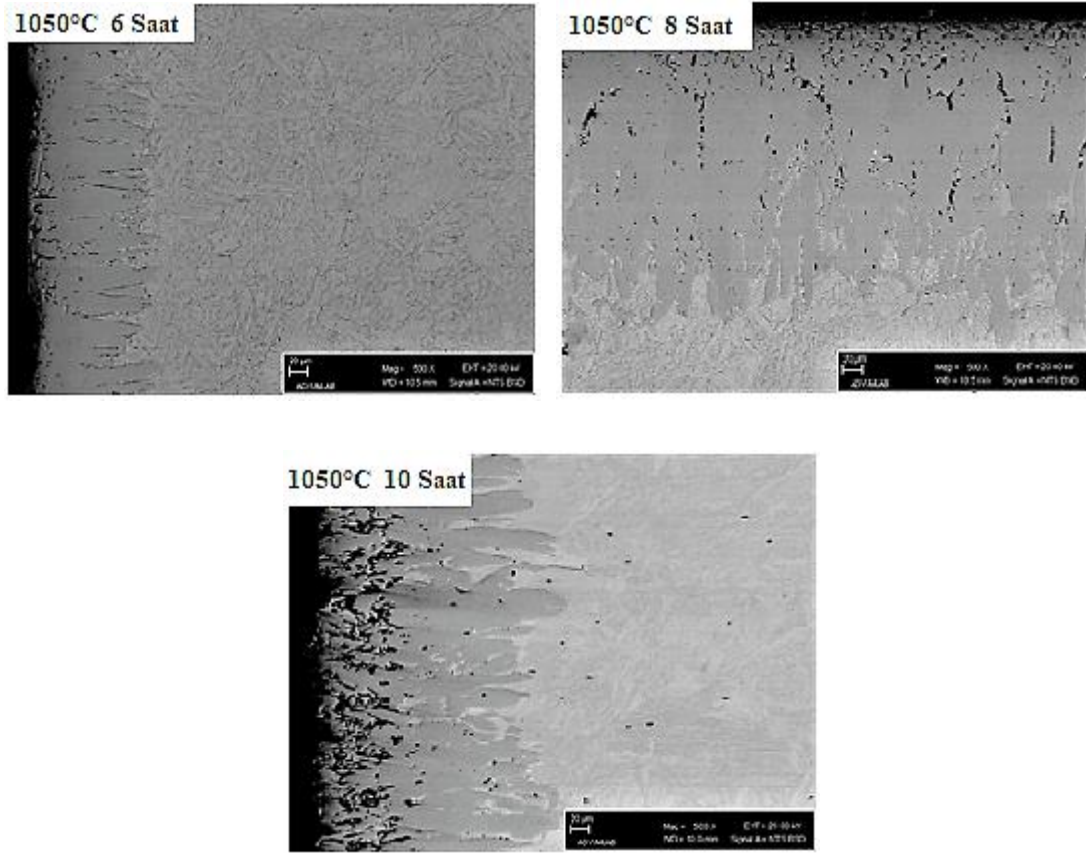
950 °C işlem sıcaklığında 6, 8 ve 10 saat işlem sürelerinde elde edilen tüm numunelerin borür tabakalarının ara kesit SEM fotoğrafları Resim 4.8’de verilmiştir. Elde edilen SEM fotoğrafları incelendiğinde, SEM cihazı aracılığıyla yapılan ölçeklendirme sonucunda oluşan tabaka kalınlıkları 950 °C işlem sıcaklığında 6 saat için 90.92 µm, 8 saat için 102.68 µm ve 10 saat için 156.55 µm olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar göstermiştir ki artan işlem süresi ile birlikte meydana gelen borür tabakasının kalınlığında bir artış meydana gelmiştir.

950 °C işlem sıcaklığında ve 8 saat işlem süresine sahip numunenin borür tabakasının ara kesitinden alınan EDS analizi Resim 4.9 ve 4.10’da detaylı olarak verilmiştir. 950 °C işlem sıcaklığında elde edilen numunenin borür tabakasının ara kesitinden alınan EDS analizi incelendiğinde sıcaklık, difüzyon için itici bir güç olduğundan dolayı difüzyonun daha fazla ve daha kolay olması beklenmektedir. 950 °C işlem sıcaklığında bu durumu EDS analizleri doğrulamaktadır. EDS analiz sonucunda 850 °C yapılan tüm numuneler ile 950 °C yapılan tüm numuneler kıyaslandığında borlama sonucunda meydana gelen borür tabakasında ve geçiş bölgesinde oluşan Fe₂B fazlarının daha derin bir bölgeye nüfuziyet ettiği görülmektedir.

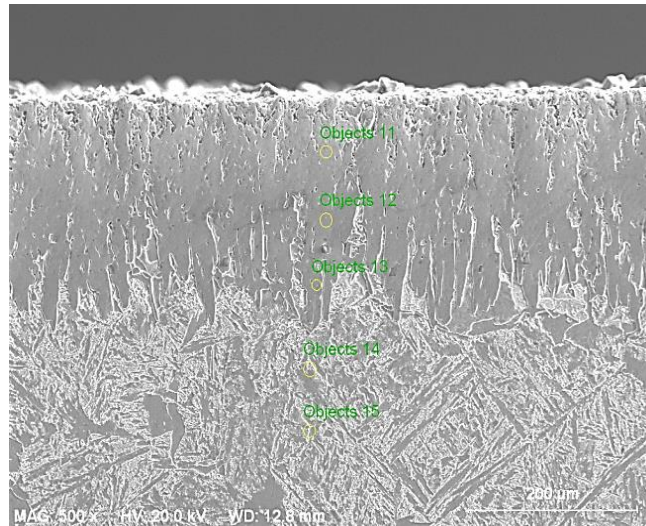
Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda 1050 °C işlem sıcaklıklarında ve 6, 8 ve 10 saat işlem süreleriyle borlanan tüm numunelerin ara-kesit mikroyapıları (Resim 4.11-4.12) görülmektedir.



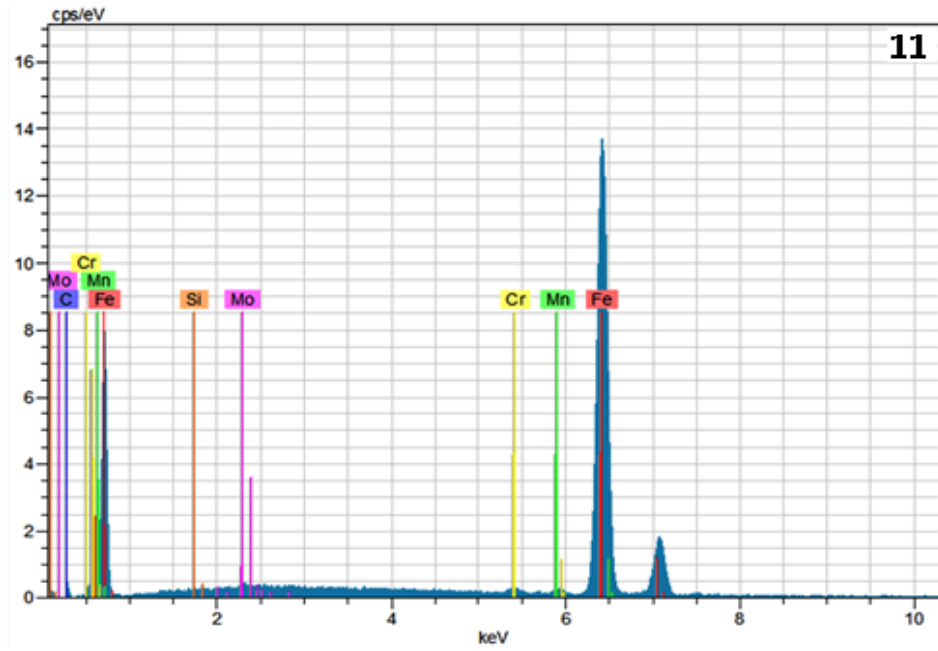
Resim 4.11 1050 °C’de borlanan numunelerin optik görüntüleri



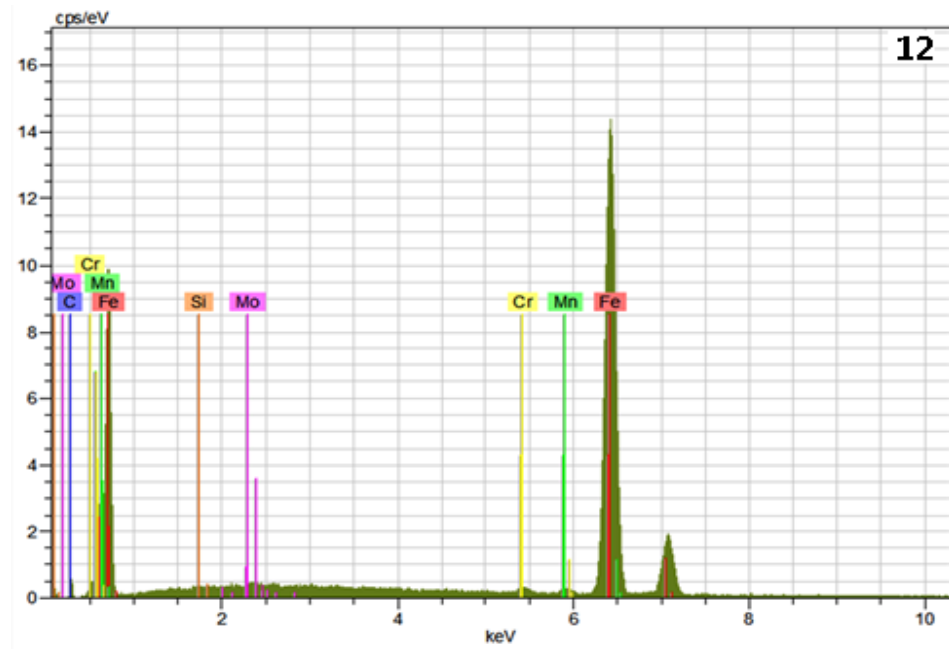
Resim 4.12 1050 °C’de borlanan numunelerin SEM görüntüleri



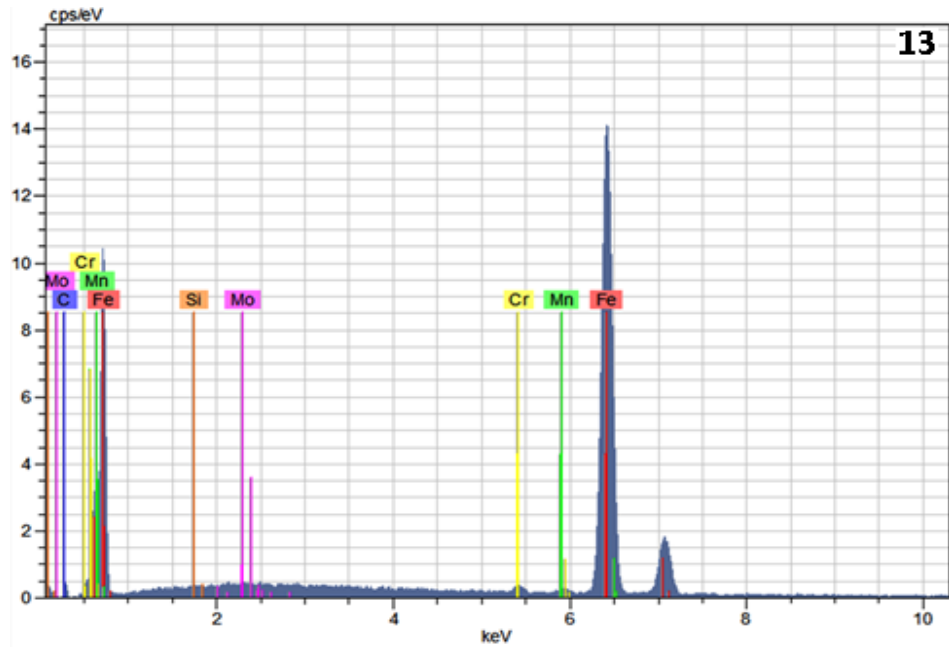
Resim 4.13 1050 °C 8 saat işlem proseslerinde borlanan numunenin EDS analiz noktalarını gösteren SEM görüntüsü



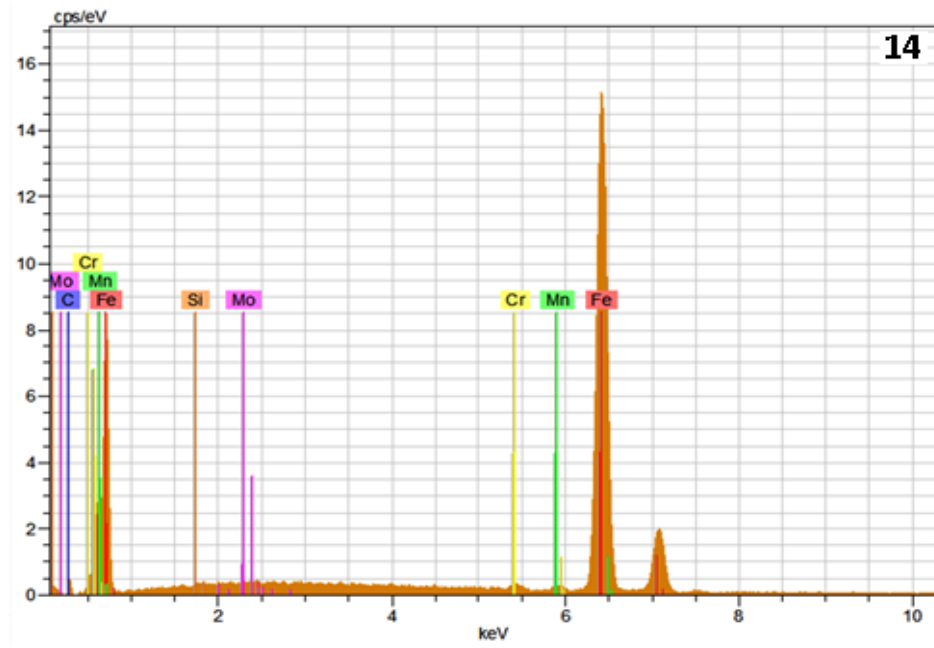
El	AN	Series	Unn. C [wt.%]	Norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Fe	26	K-series	83.42	86.47	83.25	2.3
Mn	25	K-series	10.49	10.87	10.64	0.3
Cr	24	K-series	0.59	0.61	0.63	0.1
C	6	K-series	1.04	1.08	4.84	0.3
Mo	42	L-series	0.86	0.89	0.50	0.1
Si	14	K-series	0.07	0.08	0.14	0.0
Total			96.47	100.00	100.00	



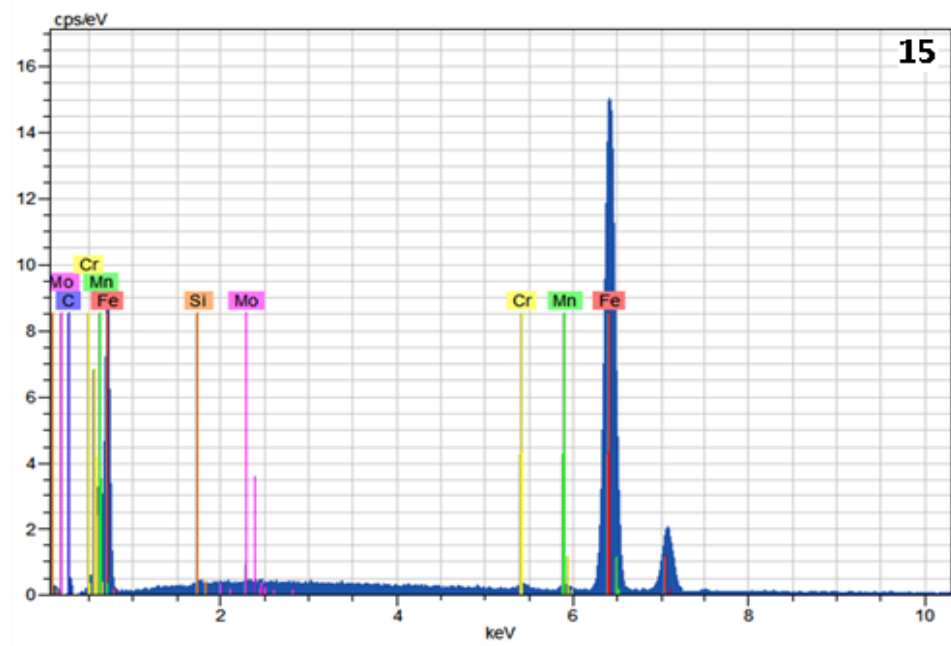
El	AN	Series	Unn. C [wt.%]	Norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Fe	26	K-series	90.52	87.07	84.40	2.5
Mn	25	K-series	11.00	10.58	10.43	0.4
Cr	24	K-series	0.68	0.65	0.68	0.1
C	6	K-series	0.93	0.89	4.03	0.3
Mo	42	L-series	0.82	0.78	0.44	0.1
Si	14	K-series	0.01	0.01	0.02	0.0
Total			103.95	100.00	100.00	



El	AN	Series	Unn. C [wt.%]	Norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Fe	26	K-series	82.71	86.19	83.68	2.2
Mn	25	K-series	10.62	11.07	10.92	0.3
Cr	24	K-series	0.64	0.67	0.70	0.1
C	6	K-series	0.84	0.87	3.93	0.3
Mo	42	L-series	1.09	1.13	0.64	0.1
Si	14	K-series	0.06	0.07	0.13	0.0
Total			95.96	100.00	100.00	



El	AN	Series	Unn. C [wt.%]	Norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Fe	26	K-series	87.64	87.25	84.34	2.4
Mn	25	K-series	10.61	10.56	10.38	0.3
Cr	24	K-series	0.65	0.65	0.67	0.1
C	6	K-series	0.94	0.93	4.20	0.3
Mo	42	L-series	0.56	0.56	0.31	0.1
Si	14	K-series	0.05	0.05	0.10	0.0
Total			100.45	100.00	100.00	



El	AN	Series	Unn. C [wt.%]	Norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Fe	26	K-series	84.60	86.48	83.34	2.3
Mn	25	K-series	10.88	11.12	10.89	0.4
Cr	24	K-series	0.52	0.53	0.55	0.1
C	6	K-series	0.99	1.01	4.54	0.3
Mo	42	L-series	0.69	0.71	0.40	0.1
Si	14	K-series	0.14	0.15	0.28	0.0
Total			97.82	100.00	100.00	

Resim 4.14 1050 °C 8 saat işlem proseslerinde borlanan numunenin EDS analiz grafikleri ve sonuçları

1050 °C işlem sıcaklığında 6, 8 ve 10 saat işlem sürelerinde katı ortamda borlama işlemine tabi tutulan tüm sementasyon çeliklerinin yüzeylerinde borür tabakalarının optik fotoğrafı Resim 4.11’de verilmiştir. Elde edilen optik fotoğraflar incelendiğinde, 850 °C ve 950 °C işlem sıcaklığında 6, 8 ve 10 saat işlem sürelerinde borlanan numuneler ile 1050 °C işlem sıcaklığında 6, 8 ve 10 saat işlem sürelerinde borlanan tüm numuneler birbirleri ile kıyaslandığında, 1050 °C’de işlem gören numunelerin kaplama kalınlıklarına ek olarak geçiş bölgelerinin de kalınlıklarının arttığı tespit edilmiştir. 1050 °C işlem sıcaklığında 6, 8 ve 10 saat işlem sürelerinde borlanan numunelerde kendi arasında kıyaslandığında, artan işlem sıcaklığına bağlı olarak 10 saat borlama işlemi gören numunede meydana gelen kaplama kalınlığının 8 saat borlama işlem gören numuneye göre daha fazla olduğu, 8 saat borlama işlemine tabi tutulan numunenin kaplama kalınlığı ise 6 saat borlama işlemi gören numuneye göre daha fazladır.

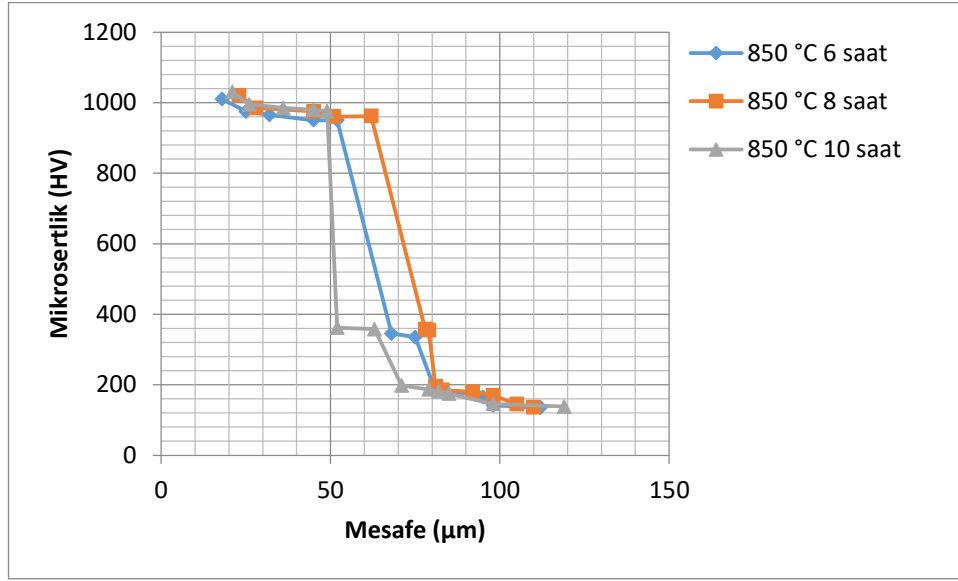
1050 °C işlem sıcaklığında 6, 8 ve 10 saat işlem sürelerinde elde edilen tüm numunelerin borür tabakalarının ara kesit SEM fotoğraflarında Resim 4.12’de verilmiştir. Elde edilen kesit SEM fotoğrafları incelendiğinde, SEM cihazı aracılığıyla yapılan ölçeklendirme sonucunda oluşan tabaka kalınlıkları tüm işlem süreleri için 850 °C işlem sıcaklığında ortalama 50.42 µm, 950 °C işlem sıcaklığında ortalama 116.71 µm ve 1050 °C işlem sıcaklığında ise ortalama 246.57 µm olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar göstermiştir ki artan işlem süresi ile birlikte meydana gelen borür tabakasının kalınlığında bir artış meydana gelmiştir. Ayrıca 850 °C ve 950 °C işlem sıcaklıklarında meydana gelen porozite yoğunluğu ile 1050 °C işlem sıcaklıklarında meydana gelen porozite yoğunluğuyla kıyas edildiğinde 1050 °C’de meydana gelen porozite yoğunluğunun daha fazla olduğu SEM görüntülerinden açık bir şekilde görülmektedir. Ayrıca meydana gelen poroziteleri detaylı bir şekilde incelediğimizde 850 °C işlem sıcaklığında 6 saat işlem süresiyle borlanan numunede porozite büyüklüğü minimum seviyelerdeyken işlem süresinin ve sıcaklığının artması ile birlikte meydana gelen porozitelerin büyüklüğünün arttığı net bir şekilde görülmektedir. Bu da daha yüksek borlama işlem sıcaklığına sahip numunelerin yüzey pürüzlülüklerinin fazla çıkmasına neden olmaktadır. Böylece, borlama işlem sıcaklığının ve sürenin artması ile birlikte porozitelerin yoğunluğunun ve

büyükliğünün doğru orantılı bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Bu yüzden porozitelerin en yoğun ve boyut olarak en büyük örnekleri, 1050 °C borlama işlem sıcaklığına sahip olan numunelerde görülmektedir. Detaylı bir şekilde incelediğimizde meydana gelen porozite yoğunluğu 850 °C işlem sıcaklığında 6 saat işlem gören numunenin borür tabakasında meydana gelirken işlem sıcaklığı ve işlem süresinin artması ile birlikte meydana gelen poroziteler geçiş bölgesine doğru ilerlemiştir. Buna bağlı olarak maksimum porozite yoğunluğuna ve büyüklüğüne sahip olan numune 1050 °C borlama işlem sıcaklığına ve 10 saat işlem süresine sahip olan numunede gözlenmiştir.

1050 °C işlem sıcaklığında ve 8 saat işlem süresine sahip numunenin borür tabakasının ara kesitinden alınan EDS analizi Resim 4.13 ve 4.14’de detaylı olarak verilmiştir. Elde edilen EDS analizi muayene edildiğinde 1050 °C işlem sıcaklığında ve 8 saat işlem süresinde borlamaya tabi tutulan numunenin bor konsantrasyon derinliği, 850 ve 950 °C işlem sıcaklıklarında 6 ve 8 saat sırasıyla işlem sürelerine sahip numunelerin bor konsantrasyon derinliğinden daha fazladır. Bunun temel sebebinin artan sıcaklık miktarı ve difüzyona izin veren işlem sürenin artması olarak düşünülebilir.

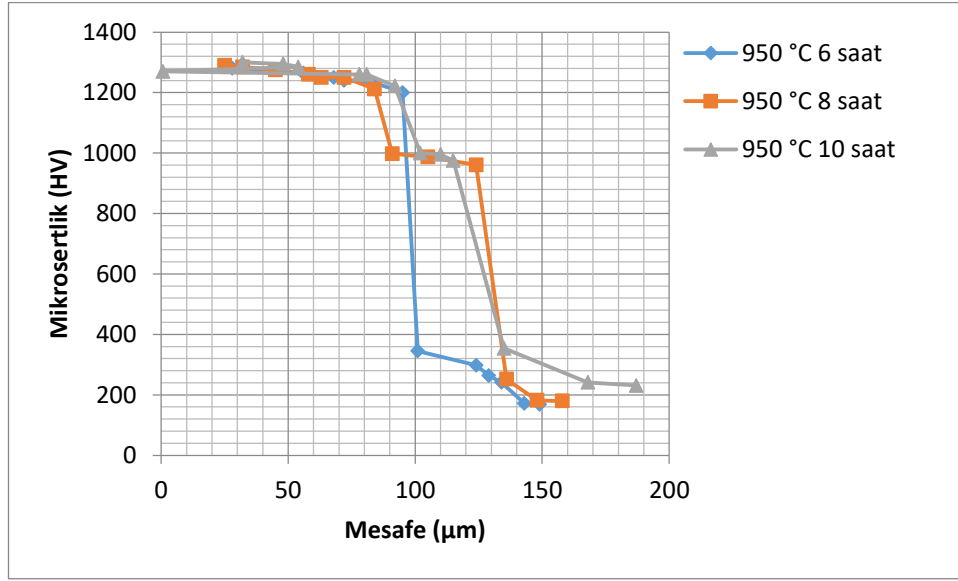
4.3. Mikrosertlik Test Sonuçları

850 °C 6-8-10 saat, 950 °C 6-8-10 saat ve 1050 °C 6-8-10 saat parametrelerinde borlama sonrası numunelerin sertlik ilişkisini gösteren grafik çizilmiştir. Borlama sonrası alınan sertlik değerlerinin karşılaştırılması sonucunda meydana gelen sertlik değerleri farkı aşikâr bir şekilde görülmektedir. İkinci olarak kaplamalarda meydana gelen esas metal ve Fe₂B fazları arasında da sertlik farkı vardır ve FeB fazı daha serttir. Dolayısıyla sertlik ölçümlerinde Vickers ucun hangi faz üzerine düşürüldüğü net bir şekilde tespit edilemediğinden aynı mesafedeki noktaların sertlik değerleri arasında da fark olabilmektedir.



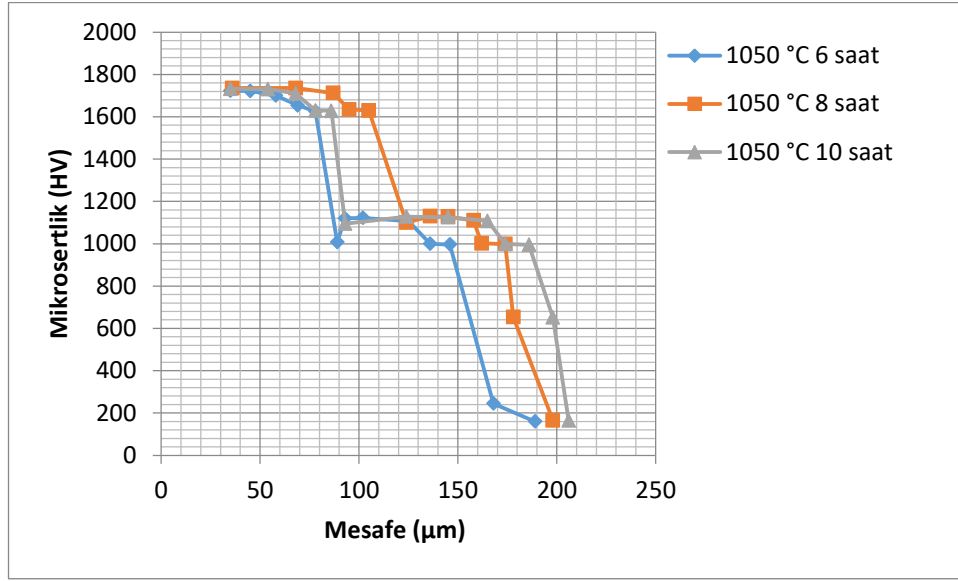
Şekil 4.1 850 °C'de borlanan sementasyon çeliğinin farklı işlem sürelerine bağlı olarak numunelere ait sertlik-mesafe eğrilerindeki değişim

850 °C işlem sıcaklığında 6, 8 ve 10 saat işlem sürelerinde borlanan sementasyon çeliklerinin işlem sürelerine bağlı olarak numunelere ait sertlik-mesafe eğrilerindeki değişim Şekil 4.1'de verilmiştir. Elde edilen sertlik mesafe eğrisi incelenirse 6 saat işlem süresince borlanan numunenin esas metalinde sertlik yaklaşık olarak 130 HV iken borür tabakasında bu değer yaklaşık olarak 1000 HV'dir. 850 °C işlem sıcaklığında 8 saat işlem süresinde borlanan sementasyon çeliğinde ise esas metalde sertlik yaklaşık olarak 135 HV iken borür tabakasında bu değer yaklaşık olarak 1050 HV dir. 850 °C işlem sıcaklığında 10 saat işlem süresinde borlanan sementasyon çeliğinde ise esas metalde sertlik değeri yaklaşık olarak 140 HV iken borür tabakasında bu değer yaklaşık olarak 1100 HV'dir. 850 °C işlem sıcaklığında 6, 8 ve 10 saat işlem sürelerinde borlanan sementasyon çeliklerinin yüzeydeki sertlik değerleri esas metale nazaran en az yedi veya sekiz kat artmıştır. Ayrıca borlama işlem süresinin arttırılmasıyla birlikte sertlik değerlerinde gözle görülür bir şekilde artış olduğu açık bir şekilde görülmüştür. Bunun nedeni ise XRD faz analiziyle belirlenmiş olan Fe_2B fazlarına rastlanmış olmasıdır. Demir ile bor bileşik oluşturması sonucunda meydana gelen Fe_2B fazları seramik karakterde olup sert ve gevrek bir yapıya sahiptir.



Şekil 4.2 950 °C'de borlanan sementasyon çeliğinin farklı işlem sürelerine bağlı olarak numunelere ait sertlik-mesafe eğrilerindeki değişim

950 °C işlem sıcaklığında 6, 8 ve 10 saat işlem sürelerinde borlanan sementasyon çeliklerinin işlem sürelerine bağlı olarak numunelere ait sertlik-mesafe eğrilerindeki değişim Şekil 4.2'de verilmiştir. Elde edilen sertlik mesafe eğrisi incelenirse 6 saat işlem süresince borlanan numunenin esas metalinde sertlik yaklaşık olarak 160 HV iken borür tabakasında bu değer yaklaşık olarak 1200 HV'dir. 950 °C işlem sıcaklığında 8 saat işlem süresinde borlanan sementasyon çeliğinde ise esas metalde sertlik yaklaşık olarak 180 HV iken borür tabakasında bu değer yaklaşık olarak 1260 HV'dir. 950 °C işlem sıcaklığında 10 saat işlem süresinde borlanan sementasyon çeliğinde ise esas metalde sertlik değeri yaklaşık olarak 230 HV iken borür tabakasında bu değer yaklaşık olarak 1310 HV'dir. 950 °C işlem sıcaklığındaki tüm numuneler için elde edilen tüm sertlik değerleri, 850 °C işlem sıcaklığında işlem görmüş tüm numunelerden daha büyüktür. İşlem sıcaklığının artması ile birlikte sertlik değerlerinde bir artış olduğu görülmektedir.



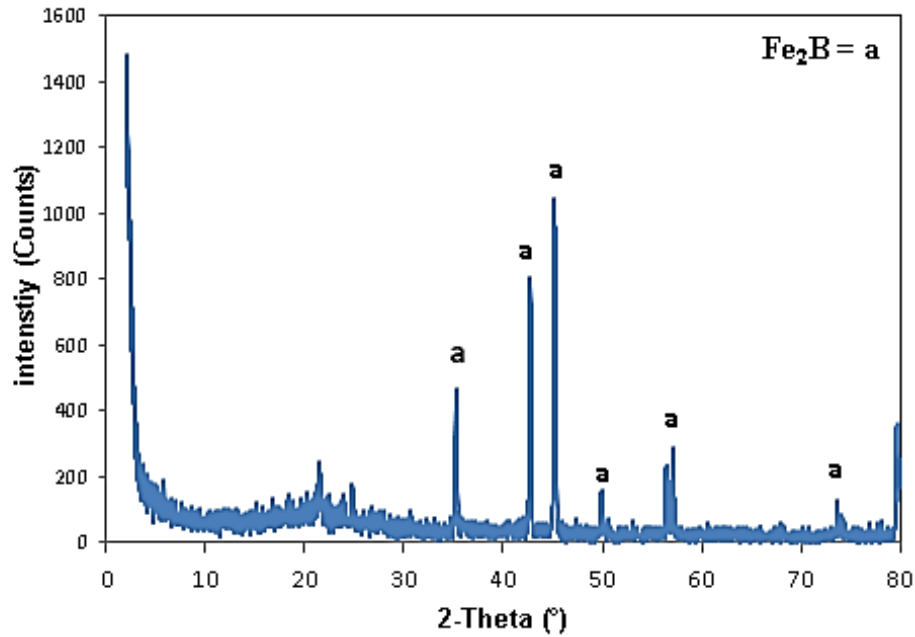
Şekil 4.3 1050 °C'de borlanan sementasyon çeliğinin farklı işlem sürelerine bağlı olarak numunelere ait sertlik-mesafe eğrilerindeki değişim

1050 °C işlem sıcaklığında 6, 8 ve 10 saat işlem sürelerinde borlanan sementasyon çeliğinin işlem sürelerine bağlı olarak numunelere ait sertlik-mesafe eğrilerindeki değişim Şekil 4.3'de verilmiştir. Elde edilen sertlik mesafe eğrisi incelenirse 6 saat işlem süresince borlanan numunenin esas metalinde sertlik yaklaşık olarak 160 HV iken, borür tabakasında bu değer yaklaşık olarak 1710 HV dir. 950 °C işlem sıcaklığında 8 saat işlem süresinde borlanan sementasyon çeliğinde ise esas metalde sertlik yaklaşık olarak 165 HV iken borür tabakasında bu değer yaklaşık olarak 1730 HV'dir. 950 °C işlem sıcaklığında 10 saat işlem süresinde borlanan sementasyon çeliğinde ise esas metalde sertlik değeri yaklaşık olarak 165 HV iken borür tabakasında bu değer yaklaşık olarak 1720 HV'dir. Sıcaklık ve zaman difüzyonun gerçekleşmesi için gerekli itici gücü sağlar. Bu bağlamda en yüksek borlama parametrelerine sahip olan 1050 °C borlanan tüm numuneler en yüksek sertliğe sahip olmasına neden olmuştur. Ayrıca 1050 °C işlem sıcaklığında 10 saat işlem gören numunenin sertlik ölçümleri yapılırken numunede mevcut halde olan porozite yoğunluğunun fazla olmasından dolayı ölçüm sonuçları 1050 °C sıcaklıkta 6 ve 8 saat işlem gören numunelere göre daha düşük sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca aynı numunelerin borür tabakasından aynı mesafelerden Vickers izlerden sertlik

değerleri arasında farklar olduğu tespit edilmiştir ve bu yüzden sertlik değerlerinin ortalamaları alınmıştır. Bu farklılıkların iki nedeni olabilir: birincisi her bir borürün farklı elastik-plastik davranış göstermesi, ikincisi ise oryantasyon farklılıkları ve tabakanın porozite içermesi gibi nedenlerden kaynaklandığı düşünülmüştür.

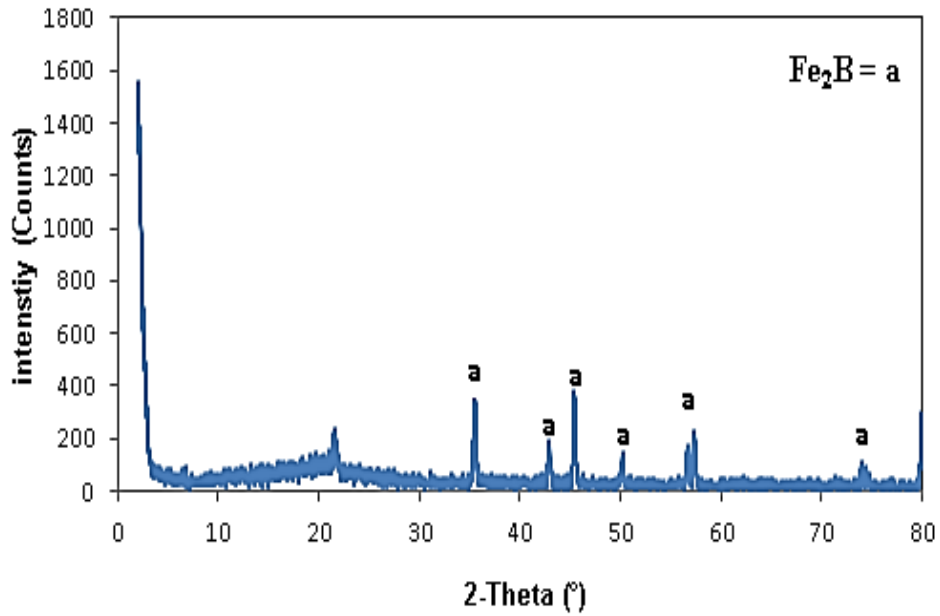
4.4. XRD Faz Analizi

850 °C 6-8-10 saat, 950 °C 6-8-10 saat ve 1050 °C 6-8-10 saat borlanan sementasyon çeliği yüzeylerinde Fe_2B fazları meydana gelmiştir. Borlama sonucunda meydana gelen bu fazlar malzemenin sertliğini önemli bir biçimde arttırmaktadır. Borlama işlemini sıcaklık yönünden ele alırsak XRD analizlerinde genel olarak uygulanan işlem sıcaklığı arttıkça meydana gelen Fe_2B fazının şiddetlerinde değişiklikler gözlemlenmiştir.



Şekil 4.4 850 °C işlem sıcaklığında 6 saat sürede borlanan sementasyon çeliğinin XRD analizi

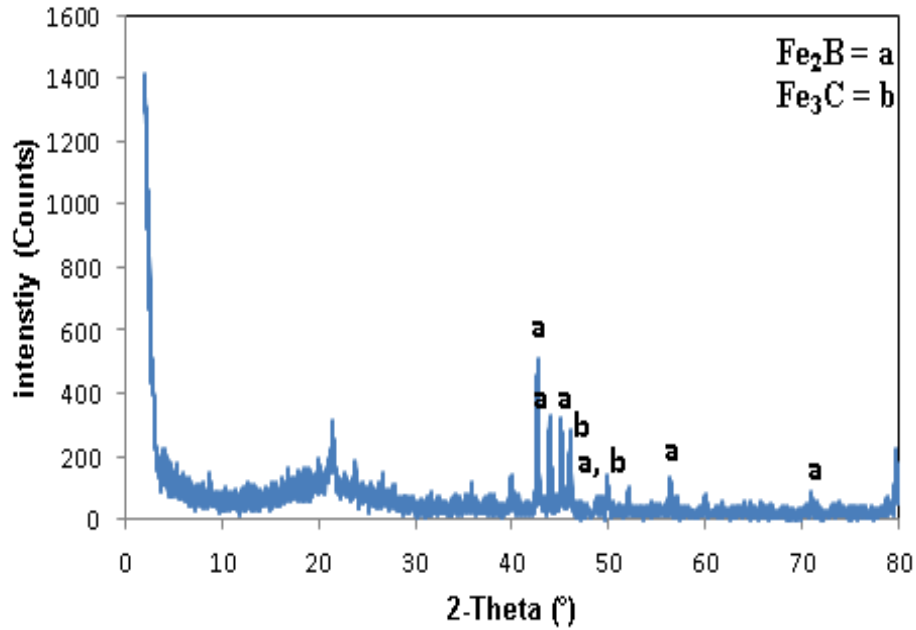
850 °C işlem sıcaklığında 6 saat işlem süresinde borlanan sementasyon çeliğinin XRD analiz sonucu Şekil 4.4’de verilmiştir. 850 °C işlem sıcaklığında 6 saat sürede borlanan numunenin XRD analizi sonucunda oluşan pikler incelendiğinde ana faz olarak sadece Fe_2B fazının meydana geldiği açık bir şekilde görülmektedir. Borlama işleminde kullanılan sıcaklık ve süre FeB oluşumu için gerekli olan reaksiyona müsaade etmemiştir. Bunun nedeni ise difüzyon için en önemli parametre olan sıcaklık ve süre, Fe_2B oluşumunda önemli bir yere sahiptir. Ayrıca Fe_2B konsantrasyonuna sahip olan kaplama kalınlığının altındaki geçiş bölgesinde bor konsantrasyonu Fe_3B fazı oluşturacak kadar fazla değildir.



Şekil 4.5 950 °C işlem sıcaklığında 8 saat sürede borlanan sementasyon çeliğinin XRD analizi

950 °C işlem sıcaklığında 8 saat işlem süresinde borlanan sementasyon çeliğinin XRD analiz sonucu Şekil 4.5’de verilmiştir. 950 °C işlem sıcaklığında 8 saat sürede borlanan numunenin XRD analizi sonucunda oluşan pikler incelendiğinde artan sıcaklık ve artan süreyle birlikte borlama sonucunda meydana gelen Fe_2B fazının şiddetinde bir azalma olduğu tespit edilmiştir. Buna ek olarak 950 °C işlem sıcaklığında 8 saat işlem süresinde gerçekleşen borlama işlemi sonucunda

yine ana faz olarak Fe_2B fazı görülmektedir. Bu durumdan anlaşılmaktadır ki 950 °C işlem sıcaklığında 8 saat işlem süresinde sahip borlanmış numunede beklenildiği üzere borlama işlemi sırasında meydana gelen sıcaklık ve süre artışları numunenin yüzeyinde Fe_2B fazının oluşumuna olanak sağlamıştır.



Şekil 4.6 1050 °C işlem sıcaklığında 10 saat sürede borlanan sementasyon çeliğinin XRD analizi

1050 °C işlem sıcaklığında 10 saat işlem süresinde borlanan sementasyon çeliğinin XRD analiz sonucu Şekil 4.6’da verilmiştir. 1050 °C işlem sıcaklığında 10 saat sürede borlanan numunenin XRD analizi sonucunda oluşan pikler incelendiğinde yine ana faz olarak Fe_2B fazına rastlanmıştır. Bunun yanı sıra Fe_3C fazı da elde edilmiştir. Fe_3C fazının oluşmasına sebep olarak artan işlem sıcaklığı ve süresiyle birlikte kaplama sırasında meydana gelen porozite sayısı ve yoğunluğu, XRD analiz ışınlarının kaplamanın alt tabakasına kadar nüfuz etmesine sebep olması ile açıklanabilir. Ayrıca Fe_2B fazının piklerinde meydana gelen şiddet değişimi tıpkı 950 °C işlem sıcaklığında ve 8 saat işlem süresinde meydana gelen şiddet değişimine benzer özellikler göstermektedir. Buna ek olarak 950 °C işlem sıcaklığında ve 8 saat işlem süresinde borlanan numune ile 1050 °C işlem sıcaklığında 10 saat işlem

süresinde borlanan numune karşılaştırıldığında artan işlem sıcaklığı ve işlem süresine bağlı olarak Fe₂B piklerinin şiddetlerinde bir artma görülmüştür.

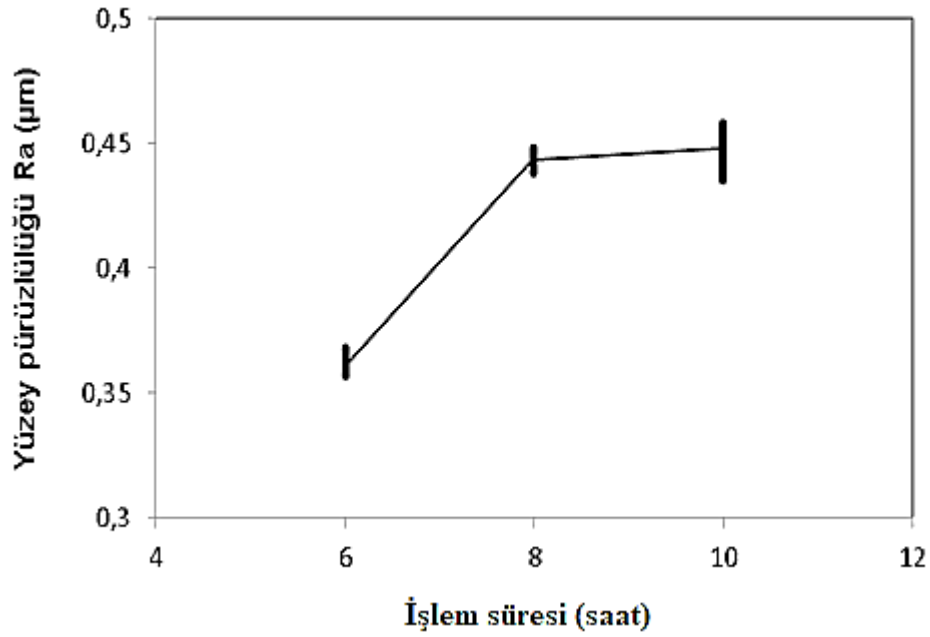
4.5. Kaplamaların Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Sonuçları

Borlama işleminden sonra malzeme yüzeylerinin endüstriyel uygulamalar açısından makul olup olmadığını anlamak için yüzey pürüzlülüğünün kalitesini ortaya çıkarmak önemlidir. Borlama işleminden sonra malzeme yüzeyinde bazı reaksiyonlar oluşması sonucunda malzeme yüzeyinde madde geçişleri meydana gelmektedir. Bunun sonucunda malzeme yüzey pürüzlülüğünü belirli seviyelerde değişime uğratmaktadır. Dolayısıyla bu çalışmada borlama sonucunda elde edilen Ra değerlerinin düşük olması malzeme yüzeyinden madde geçişlerinden kaynaklanmaktadır.

Yüzey pürüzlülüğüne etki eden diğer bir parametre ise yüzeyde oluşan reaksiyonların hızıdır. Borlama işleminde meydana gelen reaksiyon hızının bölgesel olarak farklılık göstermesi yüzey pürüzlülüğünü önemli derecede etkilemektedir. Bunun nedeni ise borlama işlemi esnasında fırın içerisindeki sıcaklığın malzemenin her yerine eşit bir şekilde yayılmamasındandır. Borlama esnasında gerekli olan sıcaklık malzemelerde meydana gelen tepkimeler için itici bir güçtür. Sonuç olarak borlanma sonucunda elde ettiğimiz her farklı numune için farklı pürüzlülük değerleri elde etmemiz beklenen bir durumdur.

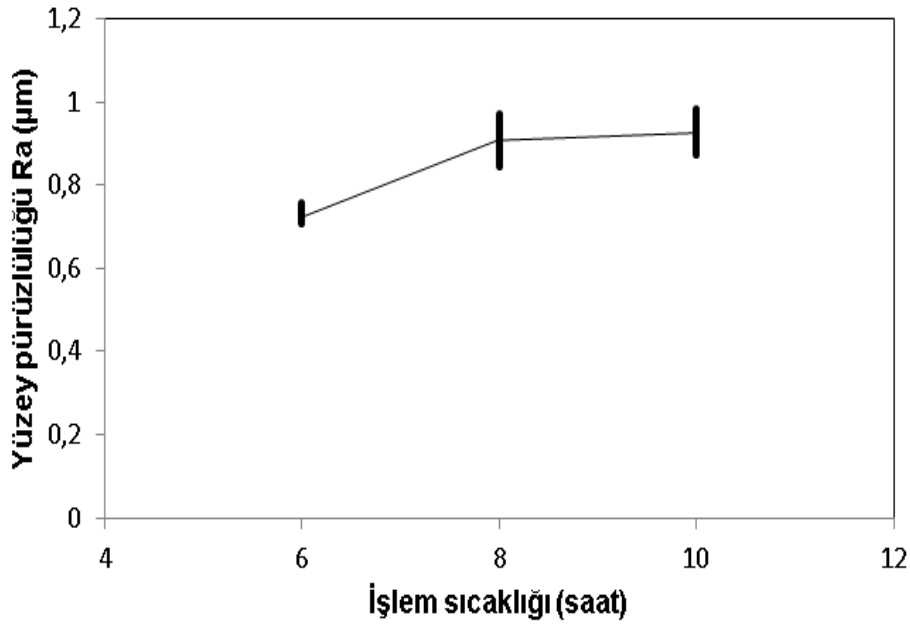
850, 950 ve 1050 °C işlem sıcaklıklarında borlanan numunelerde yapılan yüzey pürüzlülük analizi sonucunda artan borlama sıcaklığından dolayı meydana gelen kimyasal reaksiyonlar sonucunda numunelerin yüzey pürüzlülük değerlerinde bir artış meydana gelmektedir.

Sementasyon çeliğinin borlama sonrasında 850 °C’ de, 950 °C’de ve 1050 °C’de borlanmaları sonrasında tüm numunelerin ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerleri kıyaslama amacıyla birlikte Şekil 4.7-9’de verilmiştir.



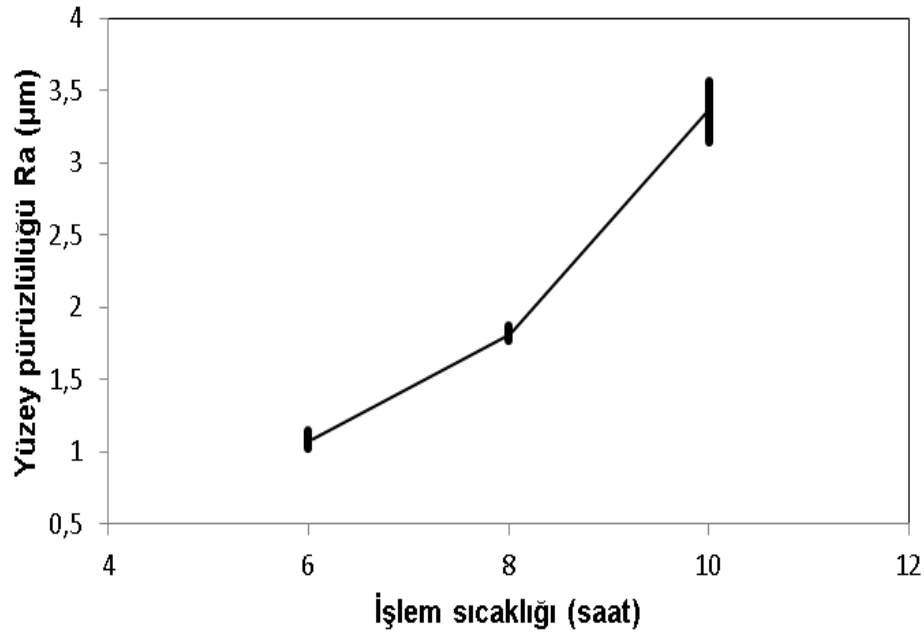
Şekil 4.7 850 °C işlem sıcaklığında 6, 8 ve 10 saat işlem sürelerinde borlanan sementasyon çeliğinin yüzey pürüzlülük analiz sonuçları

850 °C işlem sıcaklığında 6, 8 ve 10 saat işlem sürelerinde borlanan sementasyon çeliğinin yüzey pürüzlülük analiz sonuçları Şekil 4.7’de gösterilmiştir. 850 °C işlem sıcaklıklarında 6 saat işlem süresinde borlanan sementasyon çeliğinin yüzey pürüzlülük değeri yaklaşık olarak 0.36 μm ölçülürken 8 saat işlem gören numunenin yüzey pürüzlülük değeri yaklaşık olarak 0.43 μm olarak 10 saat işlem gören numunenin yüzey pürüzlülük değeri ise yaklaşık olarak 0.47 μm olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlardan da anlaşılacağı üzere işlem süresinin artması ile birlikte meydana gelen yüzey pürüzlülük değerleri de artmıştır.



Şekil 4.8 950 °C işlem sıcaklığında 6, 8 ve 10 saat işlem sürelerinde borlanan sementasyon çeliğinin yüzey pürüzlülük analiz sonuçları

950 °C işlem sıcaklığında 6, 8 ve 10 saat işlem sürelerinde borlanan sementasyon çeliğinin yüzey pürüzlülük analiz sonuçları Şekil 4.8’de gösterilmiştir. 950 °C işlem sıcaklıklarında 6 saat işlem süresinde borlanan sementasyon çeliğinin yüzey pürüzlülük değeri yaklaşık olarak 0.75 μm ölçülürken 8 saat işlem gören numunenin yüzey pürüzlülük değeri yaklaşık olarak 0.90 μm olarak 10 saat işlem gören numunenin yüzey pürüzlülük değeri ise yaklaşık olarak 1,00 μm olarak ölçülmüştür. 950 °C işlem sıcaklığı içinde aynı şeyi söylemek mümkündür. Artan süreyle birlikte meydana gelen yüzey pürüzlülük değerinde bir artış meydana gelmiştir. Ayrıca 850 °C işlem sıcaklığı ile 950 °C işlem sıcaklıklarını mukayese edilirse 850 °C işlem sıcaklığında ortalama değer olarak 0.42 μm ölçülürken 950 °C işlem sıcaklığında ortalama değer olarak 0.88 μm olarak ölçülmüştür. Dolayısıyla işlem sıcaklığının artması ile birlikte yüzey pürüzlülük oranı da artmıştır.



Şekil 4.9 1050 °C işlem sıcaklığında 6, 8 ve 10 saat işlem sürelerinde borlanan sementasyon çeliğinin yüzey pürüzlülük analiz sonuçları

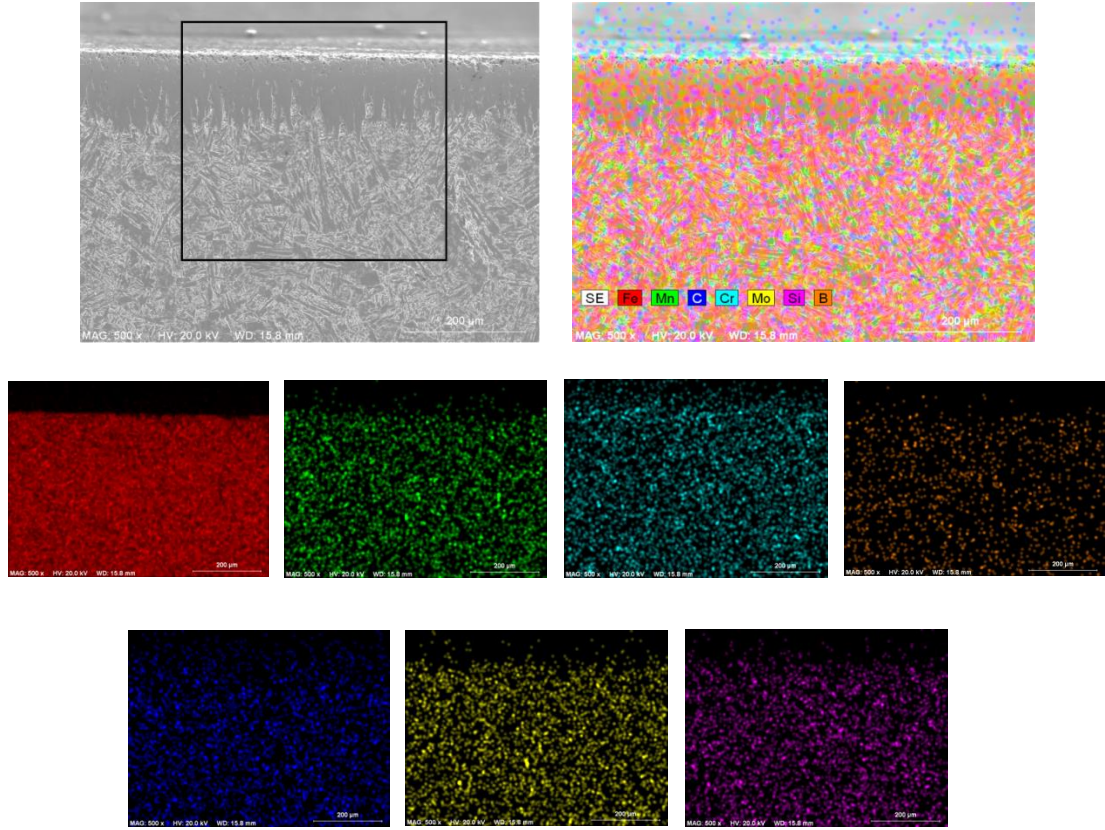
1050 °C işlem sıcaklığında 6, 8 ve 10 saat işlem sürelerinde borlanan sementasyon çeliğinin yüzey pürüzlülük analiz sonuçları Şekil 4.9'da gösterilmiştir. 1050 °C işlem sıcaklıklarında 6 saat işlem süresinde borlanan sementasyon çeliğinin yüzey pürüzlülük değeri yaklaşık olarak 1.20 µm ölçülürken 8 saat işlem gören numunenin yüzey pürüzlülük değeri yaklaşık olarak 1.90 µm olarak 10 saat işlem gören numunenin yüzey pürüzlülük değeri ise yaklaşık olarak 3.40 µm olarak ölçülmüştür. 850 °C işlem sıcaklığında ortalama değer olarak 0.42 µm ölçülürken 950 °C işlem sıcaklığında ortalama değer olarak 0.88 µm olarak 1050 °C işlem sıcaklığında ortalama değer olarak ise 2.15 µm olarak ölçülmüştür.

Bu sonuçlar ise bize artan işlem sıcaklığı ve süresiyle birlikte meydana gelen yüzey pürüzlülük değerlerinin arttığını ispat etmektedir. Bunun nedeni ise 1050 °C sıcaklıkta borlanan numunelerin yüzeylerinden içeriye doğru daha hızlı reaksiyon ürünlerinin geçiş yaptığı ve böylelikle artan reaksiyon hızına bağlı olarak en yüksek Ra değerleri de 1050 °C' de borlanan numunelerde meydana geldiği gösterilmiştir. Buna ek olarak, numunelerin yüzeyleri dikkatli bir şekilde incelediğinde porozite yoğunluğunun sırasıyla en fazla 1050, 950 ve 850 °C olduğu tespit edilmiştir.

Ayrıca porozite yoğunluğu en fazla olan 1050 °C işlem sıcaklıklarında 10 saat işlem sürelerinde borlanan numunenin yüzey pürüzlülük değeri de en fazla çıkmıştır. Bu sonuçlar göstermiştir ki porozite oranının artması ile birlikte yüzey pürüzlülük değerinin de arttığı tespit edilmiştir.

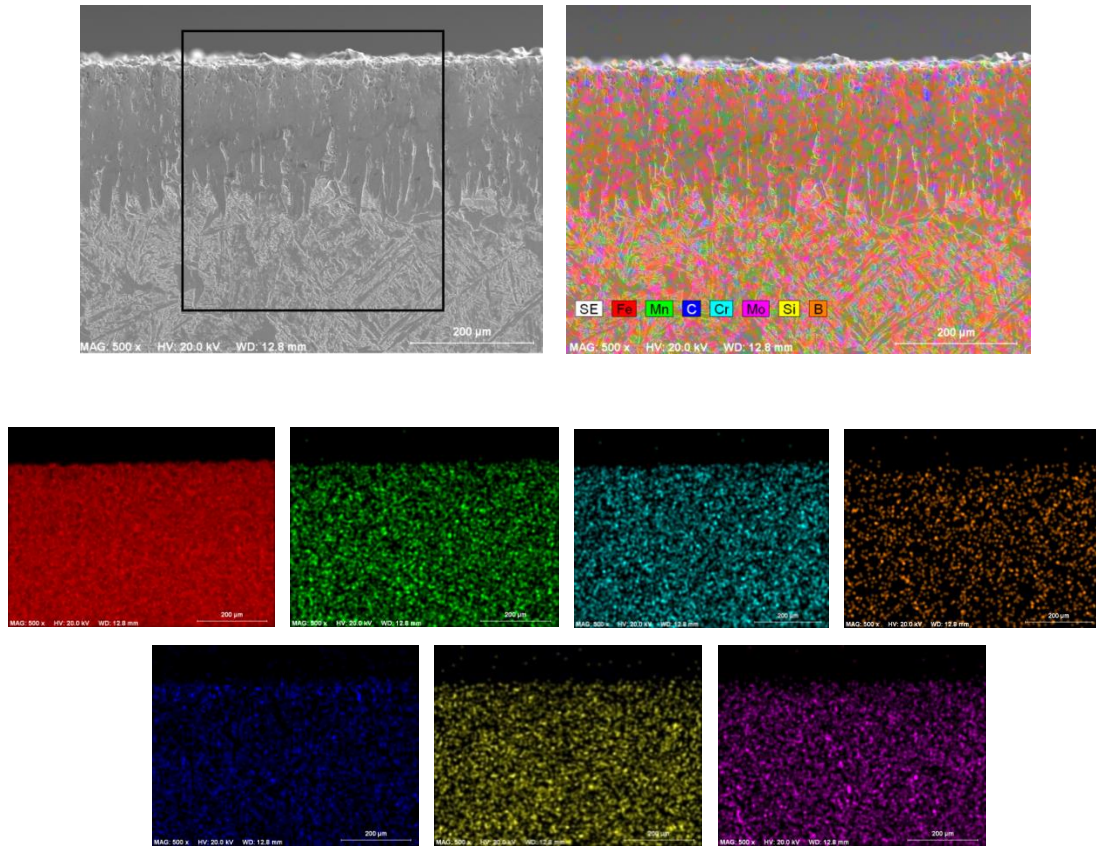
4.6. Elementel Haritalandırma (Mapping) Analiz Sonuçları ve İrdelenmesi

950 °C işlem sıcaklığında 8 saat sürede borlanan sementasyon çeliğinde meydana gelen kaplama bölgesinden ve altlık malzemeden alınan elementel haritalandırma yöntemi sayesinde hangi elementlerin malzeme içerisinde nasıl bir dağılıma sahip olduğu tespit edilmiştir. Buna göre, 950 °C işlem sıcaklığında 8 saat sürede borlanan sementasyon çeliğinin elementel haritalandırma analizi Resim 4.15’de verilmiştir. Numuneye uygulanan elementel haritalandırma analizi incelendiğinde, 950 °C işlem sıcaklığında 8 saat sürede borlanan sementasyon çeliğinin yüzeyindeki kaplama bölgesinde bor (B) konsantrasyonun sahip yoğun bölgeler bulunurken altlık malzemede ise matris elementi olarak adlandırdığımız Fe (demir) elementinin yoğun bir konsantrasyona sahip olduğu belirlenmiştir. Bunun yanında sementasyon çeliğinde alaşım elementi olarak bulunan Mn, Cr, C, Mo, Si gibi elementlerin varlığı da görülmektedir.



Resim 4.15 950 °C işlem sıcaklığında 8 saat sürede borlanan sementasyon çeliğinin elementel haritalandırma analizi

1050 °C işlem sıcaklığında 8 saat sürede borlanan sementasyon çeliğinin elementel haritalandırma analizi Şekil 4.16’da verilmiştir. Buna göre, 1050 °C işlem sıcaklığında 8 saat sürede borlanan sementasyon çeliğinin elementel haritalandırma analizi incelendiğinde, 950 °C işlem sıcaklığında 8 saat sürede borlanan sementasyon çeliğinin elementel haritalandırma analizine benzer bir elementel haritalandırma analizi elde edilmiştir. Farklı olarak yüzey bor tabakası daha kalın olduğundan dolayı elementel haritada da bor konsantrasyonu malzeme yüzeyinde kalın çıkmıştır. Altlık malzemedeki sementasyon çeliğinde ise elementel haritalandırma analizi yapılan numunedeki gibi sementasyon çeliğinde bulunan alaşım elementlerinin konsantrasyonu gözlemlenmiştir.

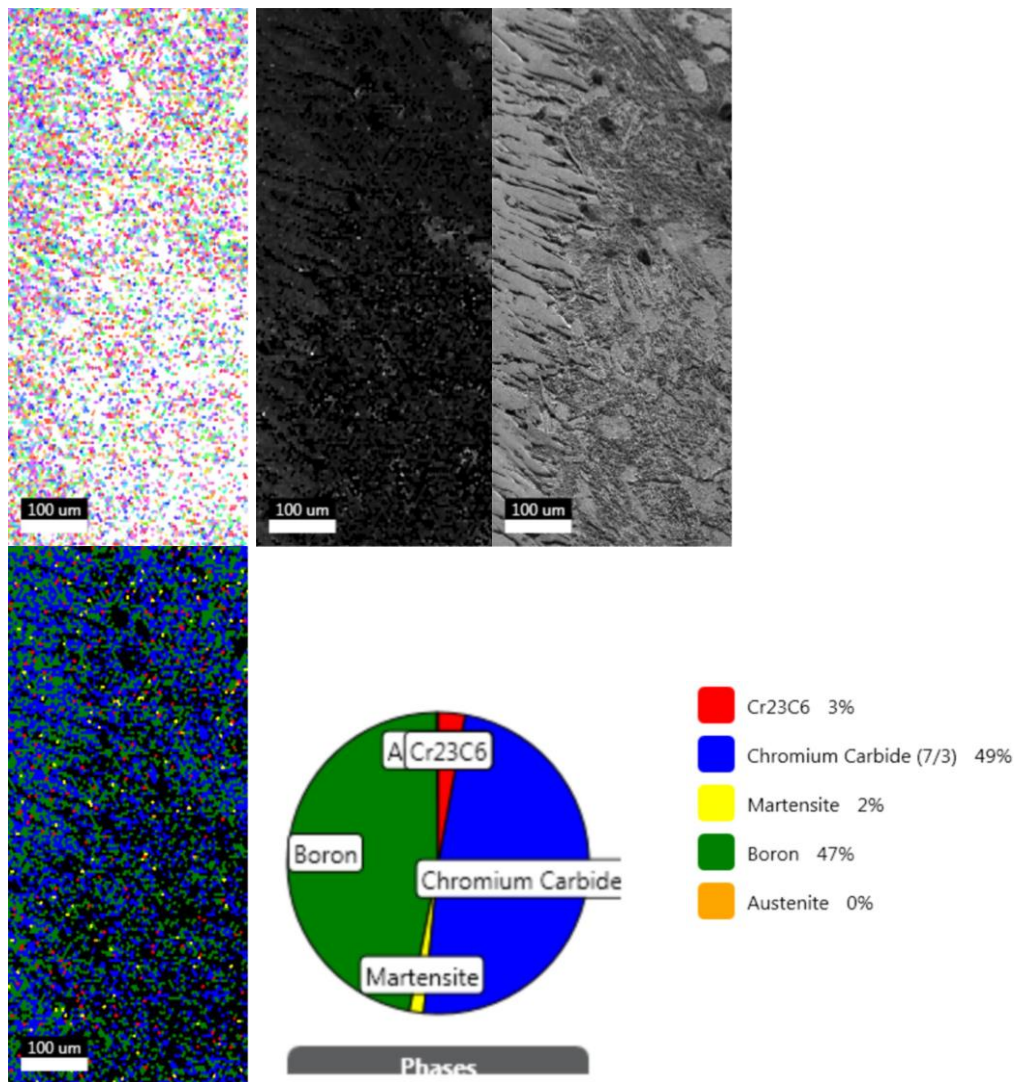


Resim 4.16 1050 °C işlem sıcaklığında 8 saat sürede borlanan sementasyon çeliğinin elementel haritalandırma analizi

4.7. EBSD Analiz Sonuçları

1050 °C işlem sıcaklığında 8 saat sürede borlanan sementasyon çeliğinde meydana gelen kaplama bölgesinden ve altlık malzemedan alınan elektron geri saçılma kırınımı (EBSD) yöntemi sayesinde hangi faz ve bileşiklerin kaplama ve altlık malzeme içerisinde nasıl bir dağılıma sahip olduğu tespit edilmiştir. Buna göre, 1050 °C işlem sıcaklığında 8 saat sürede borlanan sementasyon çeliğinin EBSD analizi Resim 4.17’de verilmiştir. Numuneye uygulanan EBSD analiz sonucu incelendiğinde, 1050 °C işlem sıcaklığında 8 saat sürede borlanan sementasyon çeliğinin yüzeyindeki kaplama ve altlık malzeme bölgesinde Cr_7C_3 bileşiği yoğun bir konsentrasyona (%49) sahip olduğu belirlenmiştir. Çünkü, numune proses sıcaklığı işlem sırasında A3 sıcaklığının üzerinde çıkılarak bekletilmiş olup, daha sonra ani soğumaya maruz kaldığından krom-karbür bileşiklerinin oluşmasına sebebiyet

vermektedir. Altık malzeme üstünde yer alan kaplama bölgelerinde bor (B) konsantrasyonunun sahip yoğun bölgeler bulunmaktadır (%47). Bu göstermektedir ki; ekabor II tozu içerisinde esas metale doğru yoğun olarak bor difüzyonu gerçekleşmiştir.



Resim 4.17 1050 °C işlem sıcaklığında 8 saat işlem süresinde borlama işlemine tabi tutulan sementasyon çeliğinin EBSD analiz sonuçları

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada sementasyon çeliğini 850 °C işlem sıcaklığında 6, 8 ve 10 saat işlem sürelerinde, 950 °C işlem sıcaklığında 6, 8 ve 10 saat işlem sürelerinde ve 1050 °C işlem sıcaklığında 6, 8 ve 10 saat işlem sürelerinde borlama işlemine tabi tuttukten sonra oluşan kaplama bölgesi üzerindeki etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Deneysel çalışmalardan elde edilen verilere bakılarak aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Borlama işlemine tabi tutulan tüm sementasyon çeliklerinin yüzeylerinde borür tabakaları oluşmuştur.
- Borlama işleminde testere dişli morfolojisi, gerçekleştirilen tüm işlem sıcaklıklarında ve zamanlarında görülmüştür.
- Borlama işleminin sonrasında demir esaslı metallerde beklenen Fe_2B fazları görülmüştür.
- Artan işlem süresi ile birlikte meydana gelen borür tabakasında bir artış meydana gelmiştir.
- 850 °C ve 950 °C işlem sıcaklığında 6, 8 ve 10 saat işlem sürelerinde borlanan numuneler ile 1050 °C işlem sıcaklığında 6, 8 ve 10 saat işlem sürelerinde borlanan tüm numuneler birbirleri ile kıyaslandığında, 1050 °C de işlem gören numunelerin kaplama kalınlıklarına ek olarak geçiş bölgelerinin de kalınlıklarının arttığı tespit edilmiştir.
- İşlem sıcaklığının artması durumunda malzemelerde meydana gelen termokimyasal tepkimelerin artması sonucunda malzemelerin yüzeylerinde istenilmeyen boşluklu yapılar (porozite) meydana gelmiştir.
- 850 °C ve 950 °C işlem sıcaklıklarında meydana gelen porozite yoğunluğu ile 1050 °C işlem sıcaklıklarında meydana gelen porozite yoğunluğu kıyas edildiğinde, 1050 °C de meydana gelen porozite yoğunluğunun daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

- Borür tabakası, geçiş bölgesi ve ana metal olmak üzere 3 ayrı bölgede yapılan elementel analiz sonucunda borür tabakasında en fazla bor elementine rastlanırken geçiş bölgesinde bu oran düşerken ana metalde bor elementine rastlanılmamıştır.
- 1050 °C işlem sıcaklığında ve 10 saat işlem süresinde borlamaya tabi tutulan numunenin bor konsantrasyon derinliği, 850 ve 950 °C işlem sıcaklıklarında 6, 8 ve 10 saat sırasıyla işlem sürelerine sahip numunelerin bor konsantrasyon derinliğinden daha fazladır.
- İşlem sıcaklığının artması sonucunda malzeme pürüzlülüklerinde bir artış meydana gelmiştir.
- 950 °C işlem sıcaklıklarında 6 saat işlem süresinde yüzey pürüzlülük değeri yaklaşık olarak 0.75 μm ölçülürken, 8 saat bu yaklaşık olarak 0.90 μm 10 saatte ise bu değer yaklaşık olarak 1.00 μm olarak ölçülmüştür. Bu bağlamda artan süreyle birlikte meydana gelen yüzey pürüzlülük değerinde bir artış meydana gelmiştir.
- 850 °C işlem sıcaklığı ile 950 °C işlem sıcaklıklarında borlanan numunelerin tabaka kalınlıkları mukayese edilirse 850 °C işlem sıcaklığında ortalama değer olarak 0.42 μm ölçülürken, 950 °C işlem sıcaklığında ortalama değer olarak 0.88 μm olarak ölçülmüştür.
- Porozite yoğunluğunun en fazla 1050 °C’de olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca porozite yoğunluğu en fazla olan 1050 °C işlem sıcaklıklarında 10 saat işlem sürelerinde borlanan numunenin yüzey pürüzlülük değeri de en fazla çıkmıştır. Bu sonuçlar göstermiştir ki porozite oranının artması ile birlikte yüzey pürüzlülük değerinin de arttığı tespit edilmiştir.
- Borlama sonrasında sertlik değerlerinde önemli derecede bir artış meydana gelmiştir.
- 950 °C işlem sıcaklığındaki tüm numuneler için elde edilen tüm sertlik değerleri, 850 °C işlem sıcaklığında işlem görmüş tüm numunelerden daha büyüktür. Buna bağlı olarak işlem sıcaklığının artması ile birlikte sertlik değerlerinde bir artış olduğu görülmektedir.

- 1050 °C işlem sıcaklığında 10 saat işlem gören numunenin sertlik ölçümleri yapılırken numunede mevcut halde olan porozite yoğunluğunun fazla olmasından dolayı ölçüm sonuçları 1050 °C sıcaklıkta 6 ve 8 saat işlem gören numunelere göre daha düşük sonuçlar elde edilmiştir.
- XRD analiz sonuçlarına göre borlanan tüm numunelerde Fe_2B fazların olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca artan işlem süresine ve işlem sıcaklığına bağlı olarak bu fazların şiddetlerinde değişiklik meydana gelmiştir. Buna ek olarak 1050 °C işlem sıcaklığında 10 saat işlem gören numunede Fe_3C fazına rastlanılmıştır.
- 1050 °C işlem sıcaklığında ve 8 saat sürede borlanan sementasyon çeliğine uygulanan EBSD analizi göstermiştir ki; kaplamanın alt kısımlarında (esas metalde) krom karbür oranı en yüksek seviyelerde iken, kaplamada ise boron seviyesi en yüksek derecededir.
- 950 ve 1050 °C işlem sıcaklıklarında ve 8 saat sürede borlanan sementasyon çeliklerinin yüzeylerindeki kaplama bölgesinde bor (B) konsantrasyonunun sahip yoğun bölgeler bulunurken altlık malzemede ise matris elementi olarak adlandırdığımız Fe (demir) elementinin yoğun bir konsantrasyona sahip olduğu belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

1. K. Othmer, "Encyclopedia of Chemical Technology", *Wiley-Interscience Publication*, vol. 16, pp. 196-211, 2006.
2. A.K. Sinha, "Boriding", *ASM Handbook*, pp. 978–994, 1991.
3. G. Krauss, "Martensite in Steel: Strength and Structure", *Materials Science and Engineering*, vol.273–275, pp. 40–57, 1999.
4. G. Parrish, "Carburizing, Microstructures and Properties", International the Materials Information Society, 1999.
5. E.J. Mittemeijer, "Steel Heat Treating Fundamentals and Processes, Fundamentals of Nitriding and Nitrocarburizing", *ASM Handbook*, vol. 4A, pp. 7, 2013.
6. A.K. Sinha, "Boronizing", *International the Materials Information Society*, vol. 2 pp. 437–447, 1991.
7. N. Wang ve T.E. Fischer, "Modification of Tribological Properties of Aluminum Oxide by Pack Boronization ", *Lubricant Engineering*, vol. 12, pp. 49, 1993.
8. J. Rus, C. Luis de Leal ve D.N. Tsipas, "Boronizing of 304 Steel", *Journal Materials Science Letters*, vol. 4, pp. 558-560, 1985.
9. M. Ozbek, I. Ipek, M. Bindal, ve C. Ucisik, "The Characterization of Borided Pure Tungsten", *Surface and Coatings Technology*, vol. 1, pp. 330-334, 2005.
10. M.J. Balart, C.L. Davis ve M. Strangwood, *Material Science and Engineering*, vol. 1, pp. 328, 2002.
11. I. Barin ve O. Knocke, "Thermo-Chemical Properties of Inorganic Substances", Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, 1973.
12. I. Campos, G. Ramirez, U. Figueroa, J. Martinez. ve O. Morales, *Applied Surface Science*, pp. 253 346, 2007.
13. P. Goeuriot, "The Influence of Alloying Element Additions on the Boriding of Steels", *Materials Science and Engineering*, vol.1, pp.9-19, 1982.
14. Z. Shao, "On Structure of Surface Coaintg of Eutectic Alloys on Steel by Laser-Melting", *Journal of Materials Science*, vol.3, 1982.

15. M. Carbucicchio, G. Palombarini ve G. Sambogna, "Composition and Structure of Boride Layers Grown on Low-Manganese Ternary Iron Alloys", *Journal Materials Science*, 15, pp. 4035-39, 1984.
16. R.A. Cutler, "Engineering Properties of Borides", *Engineering Materials Handbook*, vol.4, pp. 787-803, 1991.
17. O. Yılmaz, T. Teker ve S. Karataş, "Wear Behavior of İron Boride Coating on AISI 4140", *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, vol. 52, pp. 119-127, 2016.
18. G. Palombarini, "Growth of Boride Coatings on Iron", *Journal Materials Science Letters*, vol. 6, pp. 415-416, 1987.
19. B. Selçuk, R. Ipek ve M.B. Karamıs, "A Study on Friction and Wear Behaviour of Carburized, Carbonitrided and Borided AISI 1020 and 5115 Steels", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 1, pp. 189-196, 2003.
20. I.S. Dukarevich, M.V. Mozharov ve A.S. Shigarev, "Redistribution of Elements in Boride Coatings", *Metal Science and Heat Treatment*, pp. 160-162, 1973.
21. H.A. Uzun, "Borlama ile yüzeyleri sertleştirilen çeliklerin aşınma ve korozyona karşı dayanımları", Yüksek lisans tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, 2002.
22. A. Uluköy, "Çeliklerin Borlanması", *Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 12, pp. 189-198, 2006.
23. G.K. Kariofillis, G.E. Kiourtsidis ve D.N. Tsipas, "Corrosion Behavior of Borided AISI H13 Hot Work Steel", *Surface And Coating Technology*, vol. 2, pp. 19-24, 2006.
24. P. Geoeuriot, R. Fillet, F. Thevenot, J.H. Driver ve H. Bruyas, "The Influence of Alloying Element Additions on the Boriding of Steels", *Material Science and Engineering*, vol. 5, pp. 9-19, 1982.
25. A. Özsoy, "Çeliğin borlanması borür tabakası, geçiş sonu ve ana matrisin özelliklerinin iyileştirilmesi", Doktora tezi, Anadolu Üniversitesi, 1996.
26. P. Goeuriot, "The Influence of Alloying Element Additions on the Boriding of Steels", *Materials Science and Engineering*, vol. 55, pp. 9-19, 1982.
27. A.K. Sinha, "First Five Years Experience with the Maxi-Probe EMR-16 System for Deep Mineral Exploration", *Geophysics*, vol. 47, pp. 432-433, 1982.

28. G. Palombarini ve M. Carbucicchio, "Growth of Boride Coatings on Iron", *Journal of Materials Science Letters*, vol. 6, pp. 415-416, 1987.
29. J. Subrahmanyam ve K. Gopinath, "Wear Studies on Boronized Milt Steel", *Materials Science and Engineering*, vol. 95, pp. 287-292, 1984.
30. M. Blazon, B. Stanojevic ve V. Veljkovic, "Effect of Alloying Elements on the Formation of Boride Layer on Steel", *Materials Science Letters*, vol. 19, pp. 1153-1156, 1975.
31. P. Geoeuriot, R. Fillet, F. Thevenot, J.H. Driver ve H. Bruyas, "The Influence of Alloying Element Additions on The Boriding of Steels", *Materials Science and Engineering*, vol. 55, pp. 9-19, 1982.
32. A. Taşçı, "Borlanmış çeliklerin aşınma ve korozyon dayanımları", Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 1993.
33. P. Goeuriot, F. Thevenot, J.H. Driver ve T. Magnin, "Methods for Examining Brittle Layers Obtained by a Boriding Surface Treatment", *Materials Science and Engineering*, vol. 86, pp. 1-10, 1983.
34. M. Carbucicchio, G. Palombarini, G. Sanbogna, "Composition and Structure of Boride Laters Grown on Low Manganese Ternary Iron Alloys", *Journal. Materials Science*, vol.19, pp. 4035-4039, 1984.
35. W. Fichtl, "Boronizing and its Pratical Applications", *Materials in Engineering*, vol. 2, pp. 276-286, 1981.
36. A. Graf ve W. Matuschka, "Borieren", *Journal Materials Science*, vol. 1, pp. 1-87, 1977.
37. M.W. Biddulph, "Cryogenic Embrittlement of Steel" *Conservation and Recycling*, vol. 1, pp. 221-230, 1977.
38. G. Özbek, B.A. Konduk, C. Bindal ve A.H. Üçisık, "Characterization of Borided AISI 316L Steel Implant", *Vacuum*, vol. 7, pp. 521-525, 2002.
39. A. Özsoy, "Borlama İle İlgili Genel Değerlendirme" *Endüstriyel Yüzey Teknolojileri Dergisi*, vol. 22, pp. 10-13, 2001.
40. G. Özbek, S. Sen, M. İpek, C. Bindal, S. Zeytin ve A.H. Üçisık, "A Mechanical Aspect of Borides Formed on the AISI 440C Stainless-steel", *Vacuum*, vol. 73, pp. 643-648, 2004.

41. W. Fichtl, "Über Neue Erkenntnisse auf dem Gebiete Oberflächen Borierens". *HTM*, vol. 2, pp. 113-119, 1974.
42. S. Aich, K.S. Ravi Chandran, "TiB Whisker Coating on Titanium Surfaces by Solid-State Diffusion: Synthesis, Microstructure, and Mechanical Properties", *Metallurgical and Materials Transactions*, vol. 33, pp. 3489-3498, 2012.
43. Y.L. Yang, Z.G. Wang, X. Tian, S.J. Sun, Y. Lu ve Y. An, "Tensile Properties of Boronized N80 Steel Tube Cooled by Different Methods", *Journal Materials Science*, pp. 162-167, 2010.
44. N. Gidikova, "Vanadium Boride Coatings on Steel", *Materials Science and Engineering*, vol. 278, pp. 181-186, 2011.
45. C.H. Xu, J.K. Xi ve W. Gao, "Improving the Mechanical Properties of Boronized Layers by Superplastic Boronizing", *Journal of Materials Processing Technology*, vol.1, pp. 94-98, 2015.
46. J. Li ve B. Li, "Preparation of the TiB₂ Coatings by Electroplating in Molten Salts", *Materials Letters*, vol. 61, pp. 1274-1278. 2007.
47. T. Teker ve E.M. Karakurt, "Demir-Niyobyum İkili Alaşımların Kutu Borlanması Artan İşlem Sıcaklığının Borür Tabakasının Oluşumu Üzerindeki Etkisi", *Adıyaman Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 6, pp. 13-19, 2017.
48. U. Fastner, T. Steck, A. Pascual, G. Faflek ve G.E. Nauer, "Electrochemical Deposition of TiB₂ in High Temperature Molten Salts", *Journal of Alloys and Compounds*, pp. 32-35, 2008.
49. K.G. Anthymidis, S. Aich, D.N. Tsiapas ve E. Stergioudis, "Boriding of Titanium Alloys in Fluidized Bed Reactor", *Journal of Materials Science Letters*, pp. 2067-2069, 2011.
50. X.C. Xin ve O. Meng-lan, "Mechanical Explanation for the Influence of Residual Stress on The Wear Resistance of Borided Steel", *Wear*, vol. 137, pp. 157-159, 2010.
51. A.F. Sofroshenkov ve I.A. Sofroshenkov, "Technology of Boronizing High-Speed Steels", *Steels in Translation*, vol. 27, pp. 62-65, 2013.

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Murat SARI
Doğum Yeri : Yenimahalle
Doğum Tarihi : 11.07.1991
Medeni Hali : Bekar
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : muratsari0073@gmail.com

Eğitim Durumu

Lise : Ayşe Bezci Otelcilik ve Turizm Meslek Lisesi
Lisans : Adıyaman Üniversitesi/Metalurji ve Malzeme Mühendisliği
Yüksek Lisans : Adıyaman Üniversitesi/Metalurji ve Malzeme Mühendisliği