

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

1.3207 TAKIM ÇELİĞİNİN BORLANMASI VE
KARAKTERİZASYONU

SERDAR TOZKOPARAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: PROF. DR. YÜCEL GENÇER

TEMMUZ 2025

**T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜST EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**1.3207 TAKIM ÇELİĞİNİN BORLANMASI VE
KARAKTERİZASYONU**

SERDAR TOZKOPARAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

DANIŞMAN: PROF. DR. YÜCEL GENÇER

TEMMUZ 2025

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL

BORONIZING AND CHARACTERIZATION OF 1.3207
TOOL STEEL

SERDAR TOZKOPARAN

A THESIS OF MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF MATERIAL SCIENCE AND
ENGINEERING

ADVISOR: PROF. DR. YUCEL GENCER

JULY 2025



YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun 16/06/2025 tarih ve 2025/32 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 01/07/2025 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Serdar TOZKOPARAN'ın tez çalışması Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE
(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Yücel GENÇER

ÜYE : Prof. Dr. Mehmet TARAKÇI

ÜYE : Doç. Dr. Gökhan ÖZER

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Bu çalışmada, 1.3207 yüksek hız çeliğine, ticari Ekabor-2 tozu kullanılarak farklı sıcaklık (850 °C, 925 °C ve 1000 °C) ve sürelerde (1,5, 3, 6 ve 9 saat) kutu borlama işlemi uygulanmıştır. Yüksek kesme performansı, ısı altında sertliğini uzun süre koruma yeteneği, darbelere karşı dayanıklılığı ve aşınma direnci sayesinde endüstride sıklıkla tercih edilen bu çelik, özellikle hassas takım, kalıp ve kesici uç üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Borlama işlemi sonrası elde edilen numuneler; detaylı mikroyapı ve faz analizleri için çeşitli ileri karakterizasyon teknikleriyle incelenmiştir. Bu kapsamda optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu, X-ışını kırınımı teknikleri ve mikrosertlik ölçümleri kullanılmış, böylece çok yönlü bir analiz yapılmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda, 850 °C ve 925 °C sıcaklıklarında borlanan örneklerde borür tabakası, geçiş bölgesi ve altlık malzeme olmak üzere üçlü bir mikroyapı gözlemlenmiştir. Ancak 1000 °C’de uygulanan borlama işlemi sonucunda geçiş bölgesi kaybolmuş ve yapı iki tabakalı hale gelmiştir. FeB ve Fe₂B fazları morfolojik olarak ayırt edilmiş, Fe₂B’nin daha kalın, derin ve sürekliliği yüksek bir tabaka oluşturduğu belirlenmiştir. Yüzeye yakın bölgelerde FeB; daha derinlerde ise Fe₂B fazlarının bulunduğu doğrulanmış, bor difüzyonunun derinlikte giderek azaldığı gösterilmiştir. Borür tabaka kalınlığı, borlama sıcaklığındaki artışla parabolik olarak hızlanırken, işlem süresi uzadıkça bu artış yavaşlamakta; sabit sıcaklıkta ise süre uzaması tabaka kalınlığında daha doğrusal bir artışa yol açmaktadır. Mikrosertlik ölçümleri, yüzeyden altlığa doğru düzenli bir sertlik geçişi olduğunu göstermiş; ancak 1000 °C’de bu geçişin bozulduğu ve dalgalı profillerin oluştuğu saptanmıştır. En yüksek yüzey sertliği, 925 °C’de 9 saatlik borlama işlemi sonunda elde edilmiştir. Sonuç olarak, elde edilen bulgulara göre özellikle 850–925 °C aralığında gerçekleştirilen borlama işlemlerinin daha homojen ve kararlı mikroyapılar oluşturduğu; bu nedenle optimum mekanik ve yapısal özellikler sağladığı net olarak ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Kutu Borlama, Borür Tabaka, Yüksek Hız Çeliği, Mikrosertlik

ABSTRACT

In this study, pack boriding treatment was applied to 1.3207 high-speed steel using commercial Ekabor-2 powder at different temperatures (850 °C, 925 °C, and 1000 °C) and durations (1.5, 3, 6, and 9 hours). Due to its high cutting performance, ability to retain hardness under elevated temperatures, resistance to impact, and excellent wear resistance, this steel is widely preferred in the industry, particularly for the production of precision tools, molds, and cutting inserts. After the boriding treatment, the obtained samples were examined in detail through various advanced characterization techniques for microstructural and phase analyses. Within this scope, optical microscopy, scanning electron microscopy, X-ray diffraction techniques, and microhardness measurements were employed, enabling a comprehensive and multidimensional evaluation. The analyses revealed that in samples borided at 850 °C and 925 °C, a triple microstructure consisting of a boride layer, a transition zone, and the substrate material was observed. However, as a result of boriding at 1000 °C, the transition zone disappeared, and the structure transformed into a two-layered morphology. FeB and Fe₂B phases were morphologically distinguished, and it was determined that Fe₂B formed a thicker, deeper, and more continuous layer. It was confirmed that FeB phases were present in the regions near the surface, whereas Fe₂B phases dominated in the deeper zones, demonstrating that boron diffusion gradually decreased with depth. The thickness of the boride layer accelerated parabolically with increasing boriding temperature, while the growth rate slowed down with longer durations; at constant temperatures, the extension of the process duration resulted in a more linear increase in layer thickness. Microhardness measurements indicated a gradual hardness transition from the surface to the substrate; however, at 1000 °C this transition was disrupted, and fluctuating profiles were observed. The highest surface hardness was obtained after 9 hours of boriding at 925 °C. In conclusion, based on the obtained findings, it was clearly demonstrated that boriding treatments carried out within the 850–925 °C range generated more homogeneous and stable microstructures; thus, they provided optimum mechanical and structural properties.

Keywords: Pack Boriding, Boride Layer, High-Speed Steel, Microhardness

TEŞEKKÜR

Tez alıőmam sűresince bilgi ve deneyimlerini benimle paylaőan, deęerli danıőmanım Prof. Dr. Yűcel Gençer'e tűm destekleri için teőekkűr ederim. Deneysel çalıőmalarımnda benden bilgi ve deneyimlerini esirgemeyen ve her konuda destek olan deęerli hocam Prof. Dr. Mehmet Tarakçı'ya da teőekkűrlerimi sunarım.

Tez çalıőmam için gerekli olan deneysel çalıőmalarımnda bana yardımcı olan Mustafa Alp Yalçın, Doęukan etiner, Caner Kiraz ve Onur Kart'a teőekkűr ederim.

Buęűnlere gelmemde çok bűyűk emeęi olan, hayatım boyunca beni destekleyen ve her zaman arkamda olan annem Fadila, babam Nihat ve kardeőim Semiha'ya sonsuz sevgi ve teőekkűrű borç bilirim.

Son olarak tez sűrecimde beni her zaman destekleyen ve bu sűrete her konuda yardımcı olan sevgili eőim Didem Akgűn'e teőekkűr ederim.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR	3
2.1. Takım Çelikleri	3
2.1.1. Takım Çelikleri Alaşım Elementleri	4
2.1.2. 1.3207 Yüksek Hız Çeliği	6
2.1.3. 1.3207 Yüksek Hız Çeliğine Uygulanan Yüzey İşlemleri	7
2.2. Borlama	10
2.2.1. Borlamanın Avantajları ve Dezavantajları	11
2.2.2. Borlama Yöntemleri	12
2.2.2.1. Kutu Borlama	13
2.2.2.2. Sıvı Borlama	15
2.2.2.3. Gaz Borlama	16
2.2.2.4. Pasta Borlama	17
2.2.2.5. Plazma Borlama	18
2.2.2.6. Akışkan Yataklı Fırınlarda Borlama	19
2.2.3. Demir Dışı Malzemelerin Borlanması	21
2.2.4. Fe-B İkili Denge Diyagramı	22
2.2.5. Demir Borürlerin Büyüme Mekanizmaları	24
2.2.6. Borür Tabakasının Özellikleri	25
2.2.7. Alaşım Elementlerinin Borlama Davranışına Etkisi	26
2.2.8. Takım Çeliklerinin Borlanması	28
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	35
3.1. Giriş	35
3.2. Altlık Malzemenin Karakterizasyonu	36
3.3. Borlama İşlemi	36
3.4. Kesit Karakterizasyon İşlemlerine Hazırlık	39
3.5. Kesit X-ışını Kırınımı Analizi	39
3.6. Optik Mikroskop İncelemesi	39
3.7. Kesit SEM-EDS Analizleri	39
3.8. Kesitten Mesafeye Bağlı Mikrosertlik Ölçümleri	40
4. DENEYSEL SONUÇLAR	41
4.1. XRD Analiz Sonuçları	41
4.2. Optik Mikroskop Sonuçları	48
4.3. SEM Analiz Sonuçları	51
4.4. SEM-EDS Analizi Sonuçları	68
4.5. Borür Tabaka Kalınlığı	77
4.6. Mikrosertlik Sonuçları	81

5. DEĞERLENDİRME	84
6. GENEL SONUÇLAR	90

KAYNAKLAR	92
ÖZGEÇMİŞ	97
TEZ METNİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR	98



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

%	: Yüzde
°	: Derece
µm	: Mikron
ΔH	: Entalpi Değişimi
%ağ.	: Yüzde Ağırlıkça
AISI	: Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
BSED	: Geri Saçılan Elektron Dedektörü
CVD	: Kimyasal Buhar Biriktirme
DIN	: Alman Standardı
EDS	: Enerji Dağılımı Spektrometresi
EN	: Avrupa Standardı
GDOS	: Parlama Deşarj Optik Spektroskopisi
GPa	: Gigapaskal
HRC	: Rockwell Sertlik
HV	: Vickers Sertlik
JIS	: Japon Endüstri Standartları
mbar	: Milibar
OM	: Optik Mikroskop
PVD	: Fiziksel Buhar Biriktirme
SED	: İkincil Elektron Dedektörü
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
XRD	: X Işını Kırınımı

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1: Kutu borlama işleminin şematik gösterimi.	13
Şekil 2.2: Gaz ortamında borlama işleminin şematik gösterimi.	17
Şekil 2.3: Plazma borlamanın şematik gösterimi [1].	19
Şekil 2.4: Akışkan yataklı fırınlarda borlama işleminin şematik gösterimi [21].	20
Şekil 2.5: Fe-B ikili denge diyagramı [32].	23
Şekil 2.6: Borür tabakasının oluşum aşaması [34].	24
Şekil 3.1: Deneysel Çalışmalara Ait Akış Şeması.	35
Şekil 3.2: Borlama işleminde kullanılan potalar.	37
Şekil 3.3: Havada soğutulmaya bırakılan potalar.	38
Şekil 4.1: 1.3207 çeliğinin XRD deseni.	41
Şekil 4.2: 850 °C’de farklı sürelerde borlama yapılmış numunelerin XRD desenleri.	42
Şekil 4.3: 925 °C’de farklı sürelerde borlama yapılmış numunelerin XRD desenleri.	43
Şekil 4.4: 1000 °C’de farklı sürelerde borlama yapılmış numunelerin XRD desenleri.	44
Şekil 4.5: 1,5 saat farklı sıcaklıklarda borlama işlemi uygulanmış numunelerin XRD desenleri.	45
Şekil 4.6: 3 saat farklı sıcaklıklarda borlama işlemi uygulanmış numunelerin XRD desenleri.	46
Şekil 4.7: 6 saat farklı sıcaklıklarda borlama işlemi uygulanmış numunelerin XRD desenleri.	47
Şekil 4.8: 9 saat farklı sıcaklıklarda borlama işlemi uygulanmış numunelerin XRD desenleri.	48
Şekil 4.9: Farklı sıcaklıklarda 1,5 saat borlanmış numunelerin OM görüntüleri 1) 850 °C, 2) 925 °C 3) 1000 °C.	49
Şekil 4.10: Farklı sıcaklıklarda 3 saat borlanmış numunelerin OM görüntüleri 1) 850 °C, 2) 925 °C 3) 1000 °C.	49
Şekil 4.11: Farklı sıcaklıklarda 6 saat borlanmış numunelerin OM görüntüleri 1) 850 °C, 2) 925 °C 3) 1000 °C	50
Şekil 4.12: Farklı sıcaklıklarda 9 saat borlanmış numunelerin OM görüntüleri 1) 850 °C, 2) 925 °C 3) 1000 °C	51
Şekil 4.13: Borlanmış ST8001 numunesinin farklı büyütme ölçeklerinde kesitten alınan SEM görüntüleri; a)500X b)1000X.	52
Şekil 4.14: Borlanmış ST8003 numunesinin farklı büyütme ölçeklerinde kesitten alınan SEM görüntüleri; a)500X b)1000X.	54
Şekil 4.15: Borlanmış ST8006 numunesinin farklı büyütme ölçeklerinde kesitten alınan SEM görüntüleri; a)500X b)1000X.	55
Şekil 4.16: Borlanmış ST8009 numunesinin farklı büyütme ölçeklerinde kesitten alınan SEM görüntüleri; a)500X b)1000X.	57
Şekil 4.17: Borlanmış ST9001 numunesinin farklı büyütme ölçeklerinde kesitten alınan SEM görüntüleri; a)500X b)1000X.	58
Şekil 4.18: Borlanmış ST9003 numunesinin farklı büyütme ölçeklerinde kesitten alınan SEM görüntüleri; a)500X b)1000X.	60

Şekil 4.19: Borlanmış ST9006 numunesinin farklı büyütme oranlarında kesitten alınan SEM görüntüleri; a)500X b)1000X.	61
Şekil 4.20: Borlanmış ST9009 numunesinin farklı büyütme oranlarında kesitten alınan SEM görüntüleri; a)500X b)1000X.	63
Şekil 4.21: Borlanmış ST10001 numunesinin kesitten alınan SEM görüntüsü.	64
Şekil 4.22: Borlanmış ST10003 numunesinin kesitten alınan SEM görüntüsü.	65
Şekil 4.23: Borlanmış ST10006 numunesinin kesitten alınan SEM görüntüsü.	66
Şekil 4.24: Borlanmış ST10009 numunesinin kesitten alınan SEM görüntüsü.	67
Şekil 4.25: ST8001 numunesinin kesitten alınan SEM görüntüsü ve SEM-EDS analizi yapılan noktalar/bölgeler.	68
Şekil 4.26: ST8009 numunesinin kesitten alınan SEM görüntüsü ve SEM-EDS analizi yapılan noktalar/bölgeler.	70
Şekil 4.27: ST9001 numunesinin kesitten alınan SEM görüntüsü ve SEM-EDS analizi yapılan noktalar/bölgeler.	71
Şekil 4.28: ST9009 numunesinin kesitten alınan SEM görüntüsü ve SEM-EDS analizi yapılan noktalar/bölgeler.	73
Şekil 4.29: ST10001 numunesinin kesitten alınan SEM görüntüsü ve SEM-EDS analizi yapılan noktalar/bölgeler a) Mikrograf 1 (Dış bölge), b) Mikrograf 2 (İç Bölge).	74
Şekil 4.30: ST10009 numunesinin kesitten alınan SEM görüntüsü ve SEM-EDS analizi yapılan noktalar/bölgeler; a) Mikrograf 1 (Dış Bölge), b) Mikrograf 2 (İç Bölge).	76
Şekil 4.31: Farklı borlama sıcaklıklarında oluşan borür tabaka kalınlıklarının borlama süresine bağlı olarak değişimi.	79
Şekil 4.32: Farklı borlama sürelerinde oluşan borür tabaka kalınlıklarının borlama sıcaklığına bağlı olarak değişimi.	80
Şekil 4.33: 850 °C’de farklı sürelerde borlanmış numunelerin kesitlerinden alınan mikrosertlik değerlerinin, yüzeyden altlığa doğru mesafeye bağlı değişimi.	81
Şekil 4.34: 925 °C’de borlama işlemi görmüş numunelerin mesafeye bağlı sertlik değişimi.	82
Şekil 4.35: 1000 °C’de borlama işlemi görmüş numunelerin mesafeye bağlı sertlik değişimi.	83

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1: Katı ortamda borlama işleminde bor kaynakları [3], [16], [22].	14
Tablo 2.2: Ticari kullanılan katı borlama toz karışım bileşenleri [21].	14
Tablo 2.3: FeB ve Fe ₂ B fazlarının özellikleri [1].	25
Tablo 3.1: Borlanmış numunelerin sıcaklık ve süreleri.	38
Tablo 4.1: ST8001 numunesinden (Şekil 4.25) elde edilen SEM-EDS analiz sonuçları.	69
Tablo 4.2: ST8009 numunesinden (Şekil 4.26) elde edilen SEM-EDS analiz sonuçları.	70
Tablo 4.3: ST9001 numunesinden (Şekil 4.27) elde edilen SEM-EDS analiz sonuçları.	72
Tablo 4.4: ST9009 numunesinden (Şekil 4.28) elde edilen SEM-EDS analiz sonuçları.	73
Tablo 4.5: ST10001 numunesinden (Şekil 4.29) elde edilen SEM-EDS analiz sonuçları.	75
Tablo 4.6: ST10009 numunesinden (Şekil 4.30) elde edilen SEM-EDS analiz sonuçları.	77
Tablo 4.7: Farklı sıcaklık ve sürelerde elde edilen ortalama borür tabaka kalınlıkları.	78

1. GİRİŞ

Yüzey özelliklerini geliştirmek, malzemenin hizmet süresini uzatmak ve zorlu çevresel koşullara karşı daha dirençli hale getirmek amacıyla pek çok yüzey işlem yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemler, özellikle mühendislik uygulamalarında yaygın bir şekilde kullanılarak, yüzey sertliği, korozyon dayanımı ve aşınma direnci gibi performans kriterlerinin iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır. 1990'lı yıllardan itibaren yüzey modifikasyonuna yönelik teknolojilerde yaşanan gelişmeler, bu yöntemlerin çeşitliliğini artırmış ve endüstride daha geniş kullanım alanları bulmasına olanak tanımıştır. Uygulanan işlemler; mekanik etkili, kimyasal ve termal temelli ya da difüzyon esaslı sistemler gibi çeşitli gruplara ayrılmaktadır. Tercih edilecek yöntemin belirlenmesinde ise malzemenin işlevsel gereksinimleri, çevresel koşullar ve hedeflenen yüzey özellikleri dikkate alınmaktadır [1], [2].

Bu bağlamda borlama işlemi, özellikle demir esaslı ve bazı demir dışı alaşımlarda yüzey özelliklerini artırmak amacıyla uygulanan termokimyasal modifikasyon tekniklerinden biridir. Bu yöntem, takım çelikleri, paslanmaz çelikler, sinterlenmiş metaller ve döküm malzemeler gibi geniş bir malzeme yelpazesine uygulanabilir. Ayrıca titanyum, kobalt, nikel gibi metaller üzerinde de etkili sonuçlar verdiği bilinmektedir. Uygulama şekline göre borlama yöntemleri genel olarak termokimyasal ve fiziksel esaslı olarak sınıflandırılabilir. Termokimyasal yöntemler, bor atomlarının yüksek sıcaklık altında difüze olması esasına dayanır. Bunlar arasında kutu borlama, sıvı borlama, pasta uygulamaları ve gaz borlama yer almaktadır. Fiziksel uygulamalarda ise PVD (Fiziksel Buhar Biriktirme), CVD (Kimyasal Buhar Biriktirme) ve plazma sprey gibi yöntemler öne çıkmaktadır. Endüstride en yaygın tercih edilen tekniklerden biri olan kutu borlama, düşük maliyetli ekipman ihtiyacı ve esnek uygulama koşullarıyla dikkat çeker. Borlama sürecinde bor atomları, yüksek sıcaklığın etkisiyle yüzeye doğru difüze olur ve burada FeB ile Fe₂B fazlarının oluşumu gerçekleşir. Bu borür fazları, malzemenin sertlik, aşınma dayanımı, oksitlenme ve sıvı metale karşı direncini önemli ölçüde artırır. Uygulamanın başarısı; işlem sıcaklığı ve süresi, kullanılan bor bileşiği miktarı ve altlık malzemenin kimyasal yapısı gibi çeşitli parametrelere bağlıdır. Bu değişkenlerin kontrolü, istenen yüzey özelliklerinin elde edilmesini mümkün kılmaktadır [1], [3].

Çok geniş bir uygulama alanı olan borlama işleminin, yüksek hız çelikleri üzerindeki etkileri de literatürde çokça çalışılmıştır. Ancak W, Co, Mo, Cr, V elementlerini önemli miktarda içeren özellikle matkap uçları, freze bıçakları, şerit testereler gibi yaygın kullanım alanına sahip olan 1.3207 kalite yüksek hız çeliğin borlanması üzerine herhangi bir çalışmanın yapılmadığı tespit edilmiştir. Bu çalışma kapsamında 1.3207 yüksek hız çeliği 850 °C, 925 °C ve 1000 °C sıcaklıklarda, 1,5, 3, 6, 9 saat boyunca Ekabor 2 tozu içerisinde kutu borlama işlemine tabi tutulmuştur. Borlanmış numunelerin karakterizasyonu optik mikroskop (OM) ve SEM (Taramalı elektron mikroskobu) incelemeleri, XRD (X ışını kırınımı) analizleri ve mikrosertlik ölçümleri ile gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, borlama işleminin 1.3207 yüksek hız çeliğine olan etkileri incelenmiştir.



2. LİTERATÜR

2.1. Takım Çelikleri

Takım çelikleri, yüksek dayanım, sertlik ve aşınma direnci gibi özellikleriyle üretim süreçlerinde sıkça tercih edilen özel alaşımlı malzemelerdir. Bu çelikler, özellikle yüksek sıcaklık ve mekanik zorlanmaların yoğun olduğu kesme, şekillendirme ve kalıplama gibi uygulamalarda etkin performans sergiler. Bu üstün özellikler, hem alaşım bileşimlerinde yer alan elementlerden hem de uygulanan ısıtma işlemleriyle geliştirilen mikroyapılarından kaynaklanmaktadır [4].

Takım çelikleri, farklı üretim koşullarına uyum sağlayabilmeleri amacıyla sınıflandırılarak kullanılmaktadır. Düşük sıcaklık ortamlarında iş gören kalıplar ya da kesici takımlar için geliştirilen türler, aşınmaya karşı yüksek direnç ve sertlik gibi özellikleriyle öne çıkar. Öte yandan, yüksek sıcaklık altında çalışan sistemlerde kullanılan çelikler, ısıtma genleşmelerine karşı boyutsal kararlılık göstererek işlevselliğini korur. Özellikle yüksek hızla işleyen takım tezgâhlarında kullanılan özel alaşımlar ise bu ortamlarda stabil performans sergileyerek verimlilik sağlar. Bu sınıflandırmalar, kullanılan alaşım elementlerinin çelik mikroyapısına etkilerine bağlı olarak şekillenmektedir.

Takım çeliklerinde performansı belirleyen en temel etken, bileşimde yer alan alaşım elementlerinin türü ve oranıdır. Krom, molibden, tungsten ve vanadyum gibi elementler; sertlik, tokluk ve yüksek sıcaklık dayanımı gibi özellikleri doğrudan etkileyerek malzemenin kullanım ömrünü artırır. Örneğin, vanadyumun karbür oluşturma etkisi sayesinde çeliğin aşınmaya karşı direnci yükselirken; krom elementi yüzeyin oksidasyona karşı daha dayanıklı hale gelmesini sağlar. Bu elementlerin uygun oranlarda bir araya gelmesi, takım çeliğinin kullanım amacına özel nitelikler kazanmasına katkı sağlar.

Isıtma işlem süreçleri, çeliklerin mikroyapılarını kontrol ederek istenen mekanik özelliklere ulaşmalarını sağlar. Sertleştirme, temperleme ve nitrürleme gibi işlemler sayesinde malzemenin dayanımı artırılabilir. Örneğin, sertleştirme işlemi sırasında östenit fazına getirilen çeliğin ani soğutulmasıyla martenzitik yapı elde edilir ve

yüksek sertlik sağlanır. Takiben uygulanan temperleme, bu sertliği dengeli bir mukavemet ile desteklerken kırılganlığı da azaltır.

Yüzey özelliklerini daha da iyileştirmek amacıyla bazı uygulamalarda yüzey kaplamaları tercih edilmektedir. PVD ve CVD gibi yöntemlerle gerçekleştirilen kaplamalar, malzemenin aşınma, oksitlenme ve korozyona karşı direncini artırır. Bu sayede takım çelikleri, yoğun çalışma koşullarında uzun ömürlü ve güvenilir bir performans sergileyebilir.

Takım çeliklerinin üstün özellikler göstermesi; doğru alaşım seçimi, etkin ısıl işlemler ve gerektiğinde uygulanacak yüzey modifikasyonları ile mümkün olmaktadır. Bu kombinasyon sayesinde, bu çelik türleri modern üretim süreçlerinde yüksek verimlilik ve dayanıklılıkla öne çıkmaktadır [5].

2.1.1. Takım Çelikleri Alaşım Elementleri

Takım çelikleri, sanayide yoğun yük altında çalışan kesici ve şekillendirici parçaların üretiminde tercih edilen, özel alaşım içeriğine sahip çelik türleridir. Bu malzemelerin teknik başarımı, bünyelerinde yer alan alaşım elementlerinin türü ve miktarıyla doğrudan ilişkilidir. Özellikle karbon, vanadyum, krom, molibden ve tungsten gibi elementler; çeliklerin sertlik, aşınma direnci ve ısıl dayanım gibi özelliklerini iyileştirerek farklı kullanım koşullarına uyum sağlamalarını sağlar. Bu elementlerin birlikte kullanımı, takım çeliklerinin çeşitli endüstriyel talepleri karşılayabilecek düzeyde uyarlanabilir nitelikler kazanmasına olanak tanır [6], [7].

Takım çeliklerinde yer alan alaşım elementleri arasında karbon, temel mekanik özellikleri belirleyen başlıca unsurlardan biridir. Bu element, özellikle sertlik ve aşınma direnci gibi kritik özelliklerin gelişmesinde önemli rol oynar. Ayrıca karbon, martenzitik dönüşüm mekanizmasında aktif görev alarak çeliğin sertleştirilmesini mümkün kılar. Bununla birlikte, karbon oranının gereğinden yüksek olması, malzemenin gevrekliğini artırarak kırılma riskini yükseltebilir. Bu nedenle, karbon miktarının uygulama koşullarına uygun şekilde optimize edilmesi, çeliğin performansı açısından büyük önem taşımaktadır [6], [7].

Vanadyum, takım çeliklerinde özellikle karbür oluşumuna katkı sağlayarak aşınma direncinin artırılmasında etkili bir alaşım elementidir. Bu özelliği sayesinde, çeliğin uzun süreli mekanik zorlanmalara karşı daha dayanıklı hale gelmesini sağlar.

Vanadyumun yüksek hız çeliklerinde tane inceltici etkisi bulunmakta olup, bu durum hem termal kararlılığı güçlendirir hem de çeliğin yüksek sıcaklık altında boyutsal kararlılığını korumasına yardımcı olur. Bu nedenle vanadyum, özellikle yüksek performans gerektiren kesici takım uygulamalarında, takım ömrünü uzatan ve güvenilirlik sağlayan stratejik bir bileşen olarak değerlendirilmektedir [6].

Krom elementi, takım çeliklerinin sertleşebilirliğini artırarak ısı işlem sonrası daha homojen bir sertlik dağılımının elde edilmesine katkı sağlar. Bunun yanı sıra, kromun oksidasyon ve korozyona karşı direnci artırma özelliği sayesinde özellikle yüksek sıcaklık altında çalışan uygulamalarda tercih edilme oranı yüksektir. Ayrıca bu element, karbür oluşumuna olan eğilimiyle çeliğin aşınma direncini güçlendirerek, malzemenin zorlu hizmet koşullarında daha uzun ömürlü olmasını sağlar.

Molibden ve tungsten, takım çeliklerinde yüksek sıcaklık performansını iyileştiren ve özellikle ikincil sertleşme mekanizmasını destekleyen temel alaşım elementleri arasında yer alır. Tungsten, sıcak sertlik üzerinde olumlu etkiler göstererek çeliğin yüksek kesme hızlarında yapısal bütünlüğünü korumasına olanak tanırken; termal deformasyona karşı direnci de artırmaktadır. Molibden ise tane büyümesini sınırlayarak mikroyapının kararlılığını sürdürmekte, bu sayede çeliklerin uzun süreli mekanik dayanım göstermesine katkıda bulunmaktadır [7].

Takım çeliklerinde kullanılan alaşım elementlerinin birlikte ve dengeli biçimde kullanılması, malzemenin hem mekanik hem de kimyasal özelliklerini optimize etme açısından büyük önem taşır. Örneğin, karbon ile vanadyumun birlikte yer aldığı alaşımlarda, yüksek sertlik elde edilirken aynı zamanda çeliğin tokluğu da artırılabilir. Benzer biçimde, krom ve molibdenin bir arada bulunması, malzemeye hem korozyon direnci kazandırmakta hem de aşınma direncinin korunmasını sağlamaktadır. Bu tür sinerjik etkiler, özellikle yüksek performans beklenen kesici takımların uzun ömürlü ve güvenilir çalışmasında belirleyici rol oynamaktadır [6].

Takım çeliklerinin performansı, bünyelerinde yer alan alaşım elementlerinin doğru seçimi ve uygun oranlarda kullanımıyla doğrudan ilişkilidir. Karbon, vanadyum, krom, molibden ve tungsten gibi elementler; çeliğin aşınma direnci, korozyon dayanımı ve mekanik kararlılık gibi temel özelliklerini iyileştiren başlıca bileşenlerdir. Bu elementlerin takım çeliği içerisindeki etkileri, malzemenin kullanım süresini

uzatmakla kalmayıp, aynı zamanda yüksek performans gerektiren uygulamalar için yeni nesil malzeme tasarımlarının geliştirilmesine de olanak tanımaktadır. Dolayısıyla, alaşım elementlerinin rolünü anlamak, takım çeliklerinin endüstriyel verimliliği açısından stratejik bir önem taşımaktadır [6], [7].

2.1.2. 1.3207 Yüksek Hız Çeliği

1.3207 sınıfı yüksek hız çeliği, özellikle yüksek kesme hızlarında çalışan takımların üretiminde sıklıkla tercih edilen bir malzeme türüdür. Alaşım bileşiminde yer alan yüksek miktardaki kobalt ve tungsten, çeliğin yüksek sıcaklıklarda dahi sertliğini koruyabilmesini sağlayarak aşınma direnci açısından önemli avantaj sunar. Bu özellik, özellikle kesici takımın iş parçası ile temas ettiği bölgede oluşan ısının takım performansını düşürmesini önler. Ek olarak, tungsten ve vanadyum içeriği sayesinde çeliğin mikroyapısında karbür oluşumu desteklenmekte, bu da takım ömrünü uzatan bir etki yaratmaktadır.

Bu malzeme, başta freze uçları ve matkaplar olmak üzere, delme, tornalama ve talaş kaldırma işlemlerinde kullanılan birçok kesici takımın üretiminde yer bulur. Yüksek sıcaklık dayanımı sayesinde, yoğun termal yüke maruz kalan proseslerde bile güvenilir performans göstermektedir.

1.3207 çeliğinden beklenen mekanik özelliklerin elde edilebilmesi için uygun ısıtma işlem süreçlerinin uygulanması gerekmektedir. Bu çelik için yumuşatma tavlama genellikle 800–860 °C aralığında yapılırken, sertleştirme için önerilen östenitleme sıcaklığı 1200–1230 °C'dir. Sertleştirme işlemi sonrasında hava veya tuz banyosu ile kontrollü soğutma yapılmakta; bu işlemin ardından elde edilen sertlik değerleri 64–67 HRC arasında değişmektedir. Temperleme ise istenilen sertlik ve tokluk dengesine göre 100–650 °C aralığında uygulanabilir.

1.3207 yüksek hız çeliği, yüksek sıcaklık altında mekanik kararlılığını ve aşınma direncini koruyabilmesiyle öne çıkan, yüksek performanslı takımlar için son derece uygun bir malzeme olarak değerlendirilmektedir. Doğru ısıtma işlem parametreleri ile uygulandığında, zorlu üretim koşullarında dahi uzun süreli ve güvenilir kullanım sunmaktadır.

Bu çeliğin diğer standartlardaki bilinen isimleri: AISI M45, EN HS10-4-3-10, DIN S10-4-3-10 ve JIS: SKH57. Kimyasal bileşim aralığı ise %ağ.: C 1,2-1,35, Co 9,5-10,5, Cr 3,8-4,5, Mo 3,2-3,9, V 3-3,5, W 9-10.

2.1.3. 1.3207 Yüksek Hız Çeliğine Uygulanan Yüzey İşlemleri

1.3207 sınıfı yüksek hız çeliği, sahip olduğu sertlik, aşınma direnci ve termal stabilite gibi özellikleri sayesinde kesici takım üretimi, kalıp imalatı ve ağır hizmet tipi talaşlı imalat süreçlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak yoğun çalışma koşullarında yüzeyden kaynaklı deformasyonların önlenmesi ve malzemenin servis ömrünün artırılabilmesi amacıyla çeşitli yüzey modifikasyon tekniklerinin uygulanması üzerine araştırmalar yapılmaktadır. Bu doğrultuda, söz konusu çelik üzerinde plazma nitrürleme, bor karbür kaplama, karbon temelli kaplamalar ile fiziksel ve kimyasal buhar biriktirme yöntemlerinin kullanıldığı çalışmalar literatürde yer almaktadır. Bununla birlikte, 1.3207 çeliği üzerinde doğrudan borlama işlemi uygulanmasına yönelik çalışmanın bulunmadığı dikkat çekmektedir.

Korsós ve arkadaşları, 1.3207 çeliği üzerinde aktif ekran plazma nitrürleme işlemini incelemiştir. Çalışmalarında, farklı düşük sıcaklıklar ve işlem süreleri kullanılmıştır. Nitrürleme işlemi sırasında yüzeye azot difüzyonu sağlanarak yüksek sertlik ve aşınma direncine sahip bir yüzey tabakası oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçlar, nitrürleme sıcaklığı ve süresinin yüzey sertliğini önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Özellikle 520°C’de yapılan 8 saatlik işlem, yüzey sertliğinde %50’ye varan bir artış sağlamıştır. Bunun yanı sıra, yüzeyde bileşik bir tabaka yerine yalnızca bir difüzyon tabakası gözlenmiştir [8].

Bor karbür kaplamalar, yüksek sertlik ve düşük sürtünme katsayısı gibi özellikleri nedeniyle endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Eckardt ve arkadaşları, 1.3207 çeliği üzerinde bor karbür kaplama yaparken, kaplama sürecinde reaktif püskürtme yöntemini kullanmıştır. Titanyum ara tabaka kullanımı, kaplamanın yapışma dayanımını artırmış ve sürtünme katsayısını düşürmüştür. Çalışma, kaplama sürecinde kullanılan asetilen gazının kimyasal bileşim üzerindeki etkilerini de detaylı bir şekilde ortaya koymuştur. Bu kaplamalar, özellikle yüksek aşınma direnci gerektiren uygulamalar için uygun bulunmuştur [9].

Karbon bazlı kaplamalar, yüksek aşınma direnci ve düşük sürtünme katsayısı sunan bir diğer yüzey iyileştirme yöntemidir. Vetter ve arkadaşları, 1.3207 çeliği üzerinde sert amorf karbon (a-C) kaplamalar oluşturmuş ve bu kaplamaların mikroyapı ve tribolojik özelliklerini incelemiştir. Kaplamaların sertliği 1400 HV'ye kadar ulaşmış ve düşük sürtünme katsayısı ile üstün aşınma performansı sergilemiştir. Kaplamaların kalitesi, kullanılan büyüme koşullarına ve substrat yüzeyinin ön temizliği gibi faktörlere bağlı olarak değişiklik göstermiştir [10].

PVD yöntemi, ince film kaplamalarının üretilmesinde yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Ertürk ve Heuvel, 1.3207 çeliği üzerinde TiN kaplamalar oluşturmuş ve kaplamaların yapışma özelliklerini incelemiştir. Çalışma, farklı sıcaklık ve voltajların kaplama yapışma dayanımı üzerindeki etkilerini analiz etmiştir. Sonuçlar, 450 °C gibi yüksek sıcaklıklarda TiN kaplamaların daha yoğun bir yapıya ve daha iyi yapışma dayanımına sahip olduğunu göstermiştir. Bunun yanı sıra, düşük sıcaklıklarda bile kaplamaların yeterli yapışma performansı sunduğu belirtilmiştir [11].

CVD yöntemi, yüksek kaliteli kaplamalar üretmek için kullanılan bir başka yüzey iyileştirme tekniğidir. Buijnsters ve arkadaşları, 1.3207 çeliği üzerine krom nitrür (CrN) ara tabakası kullanarak elmas kaplamalar biriktirmiştir. Çalışma, CrN ara tabakasının, elmasın çelik yüzeye doğrudan birikiminde oluşan grafit tabakasını önlediğini ve kaplamaların yapışma kalitesini artırdığını göstermiştir. Elde edilen elmas kaplamalar, yüksek sıcaklıklarda bile mükemmel aşınma direnci ve düşük sürtünme özellikleri sergilemiştir [12].

Yüksek performanslı kesici takım üretiminde yaygın olarak kullanılan 1.3207 çeliği, içerdiği yüksek kobalt oranı ile dikkat çeker. Ancak yüzey modifikasyonu amacıyla uygulanan bazı kaplama yöntemleri, bu tür alaşımlarda sınırlı başarı gösterebilmektedir. Freller ve arkadaşları, çeşitli takım çeliklerine uygulanan zirkonyum-karbon (Zr:C) kaplamaların yapışma davranışlarını değerlendirmiş; sonuçlar 1.3207 çeliği üzerinde bu kaplamanın yeterli yüzey tutunma sağlayamadığını göstermiştir. Hem konvansiyonel üretimle elde edilen (13207s) hem de toz metalurjisiyle üretilen (13207p) 1.3207 numunelerinde, kaplamanın yüzeye tutunma düzeyi oldukça düşük bulunmuştur. Bu durum, söz konusu çeliğin bünyesinde yer alan kobalt elementinin kaplama-yüzey etkileşimini olumsuz yönde etkilemesiyle ilişkilendirilmiştir. Elde edilen veriler, kobalt içerikli çeliklerin kaplama uyumluluğunun dikkatle değerlendirilmesi gerektiğini ve özellikle Zr esaslı

kaplama ların bu tür malzemelerle sınırlı etkileşim gösterebileceğini ortaya koymuştur [13].

Park ve çalışma arkadaşları, 1.3207 yüksek hız çeliğinin yüzey özelliklerini geliştirmek amacıyla CrN kaplama sürecini incelemiştir. Kaplama işlemi sırasında kullanılan magnetron sputtering tekniğine, belirli aralıklarla uygulanan ara plazma aşındırma adımları entegre edilerek, kaplama yapısının iyileştirilip iyileştirilemeyeceği araştırılmıştır. Araştırma bulgularına göre, ara aşındırma işlemleri sayesinde CrN kaplamaların yapısı daha sıkı ve düzgün hale gelmiş; bu durum kaplamanın yüzey boşluklarını azalttığı gibi, korozyon direncini de belirgin biçimde artırmıştır. Ayrıca, kristal yapı analizlerinde, kaplamaların belirli bir kristal yönelimi (200 düzlemi) göstermeye başladığı ve bunun da kaplama performansını olumlu yönde etkilediği belirlenmiştir. Sonuç olarak çalışma, 1.3207 çeliği üzerinde çok katmanlı yapı oluşturmanın, yüzeyin uzun vadeli işlevselliğini iyileştirmek açısından etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir [14].

Kıyasöz ve arkadaşları, çalışmalarında DIN 1.3207 numaralı çelik üzerinde farklı alaşım elementlerinin ve çeşitli ısıl işlem parametrelerinin mikro yapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkileri deneysel olarak incelemiştir. Özellikle, farklı östenitleme ve temperleme sıcaklıklarının çeliğin sertlik değerleri ve takım ömrü üzerindeki rolü araştırılmıştır. Deneysel süreçte, 1.3207 çeliğine uygulanan östenitleme işlemleri 1080 °C ile 1200 °C arasında gerçekleştirilmiş, ardından numuneler 525 °C ve 560 °C’de temperlenmiştir. Uygulanan bu ısıl işlemler sonrasında çelik numunelerin sertlikleri Rockwell (HRC) ölçeği ile ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre, artan östenitleme sıcaklığı ile martenzit fazına çözünen karbon miktarının yükseldiği, bunun da daha yüksek sertlik değerlerine yol açtığı belirlenmiştir. 1.3207 çeliği, sahip olduğu yüksek karbon, tungsten ve vanadyum içerikleri sayesinde MC tipi karbürler oluşturarak sertliğini artırmakta, aynı zamanda temperleme sonrası ikincil karbürlerin çökmesiyle mekanik dayanımını korumaktadır. Ayrıca, deneysel süreçte takım ömrü değerlendirmesi için vida üretimi testi yapılmış ve 1.3207 çeliğinin, diğer karşılaştırmalı çelik olan 1.3243’e göre daha uzun takım ömrü sunduğu görülmüştür. Bu fark, 1.3207 çeliğinin daha yüksek C, W, V ve Co içeriğine sahip olmasıyla ilişkilendirilmiştir. Kobalt elementi özellikle sıcak çalışma koşullarında mekanik dayanımı destekleyici rol oynamıştır [15].

2.2. Borlama

Borlama işlemi, demir ve demir dışı alaşımların yüzey özelliklerini geliştirmek amacıyla uygulanan bir yüzey modifikasyon yöntemidir. Yüksek sıcaklık altında gerçekleştirilen bu işlemde, bor atomları malzemenin yüzeyine nüfuz ederek burada sert ve dayanıklı bir borür tabakası oluşmasını sağlar. Bu tabaka, özellikle yüzey sertliği, aşınma direnci ve korozyon dayanımı gibi özelliklerde önemli iyileşmeler sağlar. Bu nedenle borlama, yüzey dayanımının kritik olduğu uygulamalarda tercih edilen etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır [16]. Borlama özellikle çelikler üzerinde etkili olup, endüstriyel uygulamalarda malzemelerin kullanım ömrünü uzatma amacı taşır.

Borlama işlemi sırasında yüzeyde FeB ve Fe₂B gibi borür bileşikleri oluşur. Bu bileşikler, yüksek sertlik seviyelerine ulaşılmasını sağlar ve malzemenin yüzey dayanımını önemli ölçüde artırır [17]. Örneğin, borlama işlemi görmüş bir çeliğin sertlik değeri, geleneksel yüzey işlemlerine kıyasla daha yüksek değerlere ulaşabilir. Borlama yöntemi, aynı zamanda yüzey pürüzlülüğünü kontrol altına alarak sürtünme katsayısını düşürür ve aşınmaya karşı etkin bir koruma sağlar.

Borlama işleminin parametreleri, yüzey özelliklerini doğrudan etkiler. Borlama sıcaklığı ve süresi, borür tabakasının kalınlığı ve homojenliğinde kritik bir rol oynar. Yapılan araştırmalar, borlama sıcaklığı ve süresinin artırılmasının, yüzeyde oluşan borür tabakasının sertlik ve kalınlık özelliklerini doğrudan etkilediğini göstermiştir [18]. Bununla birlikte, parametrelerin dikkatli bir şekilde optimize edilmesi, malzemenin tokluk gibi diğer mekanik özelliklerini olumsuz etkilemeden yüzey performansını artırır.

Borlama işlemi, farklı yöntemler kullanılarak gerçekleştirilebilir. En yaygın yöntemler arasında kutu borlama, sıvı borlama ve gaz borlama yer alır. Her bir yöntemin kendine özgü avantajları ve sınırlamaları bulunmaktadır. Örneğin, kutu borlama yöntemi, yüksek sertlikte borür tabakalarının elde edilmesini sağlar ve nispeten ekonomik bir yöntemdir [19], [20]. Ancak bu yöntemin uygulanabilirliği, malzeme türüne ve uygulama gereksinimlerine bağlıdır.

Borlama işlemi, malzeme yüzey özelliklerini iyileştirmek için etkili bir yöntemdir. Bu işlem, özellikle çeliklerin aşınma ve korozyon dayanımını artırarak endüstriyel

uygulamalarda geniş bir kullanım alanı bulur. İlgili araştırmalar, borlama parametrelerinin optimize edilmesiyle daha etkili yüzey özelliklerinin elde edilebileceğini göstermektedir. Bu bağlamda, borlama işleminin avantajları ve uygulama yöntemleri, malzeme mühendisliği alanında önemli bir araştırma konusudur.

2.2.1. Borlamanın Avantajları ve Dezavantajları

Metal yüzeylerin sertliğini ve hizmet ömrünü artırmak amacıyla uygulanan borlama işlemi, bor atomlarının yüksek sıcaklık altında altlık malzemeye difüzyonu yoluyla gerçekleştirilir. Bu sayede yüzeyde, aşınma direnci yüksek bir borür tabakası oluşur. Genellikle çelikler ve bazı metal alaşımları üzerinde uygulanan bu işlem, mekanik dayanım açısından birçok avantaj sunsa da işlem koşullarına bağlı olarak bazı sınırlılıkları da beraberinde getirir [1].

Borlama işleminin avantajları aşağıdaki gibidir:

- **Yüksek Yüzey Sertliği:** Borlama işlemi sonucunda oluşan borür tabakası, yüzey sertliğini önemli ölçüde artırır. Bu sertlik seviyesi, genellikle 1500-2500 HV (Vickers Sertlik) aralığında olup, çeliğin mekanik dayanımını büyük ölçüde geliştirir.
- **Aşınma Direnci:** Borlama, malzemelerin aşınmaya karşı dayanıklılığını artırarak hareketli parçalarda uzun ömür sağlar. Bu özellik, özellikle kesici takımlar, dişliler ve rulmanlar gibi uygulamalarda önemlidir.
- **Korozyon Dayanımı:** Oluşan borür tabakası, bazı çevresel koşullara karşı koruma sağlayarak metalin korozyona dayanıklılığını artırır. Bu, özellikle yüksek sıcaklık ve kimyasal ortamlarda önemli bir avantajdır.
- **Termal Dayanım:** Borlama işlemiyle oluşturulan tabaka, yüksek sıcaklıklarda dahi sertliğini ve dayanıklılığını korur. Bu, borlamayı yüksek sıcaklık uygulamaları için ideal bir seçenek haline getirir.
- **Kimyasal İnertlik:** Borür tabakası, kimyasal olarak inert bir yapı oluşturur. Bu durum, metal yüzeyini agresif kimyasallardan korur ve malzemenin ömrünü uzatır.

- Ekonomik Faydalar: Borlama işlemi, malzemelerin kullanım ömrünü uzatarak bakım ve değiştirme maliyetlerini düşürür. Uzun vadeli ekonomik faydalar sunar.

Borlama işleminin dezavantajları aşağıdaki gibidir:

- Düşük Çekirdek Tokluğu: Borlama işlemi, yüzeyde sert bir tabaka oluştururken çekirdek bölgelerde tokluk kaybına neden olabilir. Bu durum, malzemenin ani darbelere karşı dayanıklılığını azaltabilir.
- Tabaka Kırılabilirliği: Borür tabakası oldukça sert ve kırılmandır. Bu kırılabilirlik, yüzeyin mekanik darbelere karşı hassasiyetini artırabilir ve çatlamalara yol açabilir.
- Kalınlık Kontrolü: Borlama işlemi sırasında oluşan borür tabakasının kalınlığını kontrol etmek zordur. Düzgün bir yüzey tabakası elde etmek için işlem parametrelerinin dikkatlice optimize edilmesi gerekir.
- Uygulama Sınırlamaları: Borlama, yalnızca belirli metal ve alaşımlar için uygundur. Örneğin, paslanmaz çelikler ve düşük karbon içerikli malzemelerde işlem verimliliği sınırlı olabilir.
- Yüksek İşlem Süresi: Borlama, diğer yüzey sertleştirme yöntemlerine kıyasla daha uzun sürebilir. Bu durum, üretim verimliliğini olumsuz etkileyebilir.
- Yüksek İşlem Sıcaklığı: Borlama işlemi, genellikle 700-1100 °C aralığında gerçekleştirilir. Bu yüksek sıcaklıklar, malzemenin iç yapısını olumsuz etkileyebilir ve termal gerilmeler oluşturabilir [1].

2.2.2. Borlama Yöntemleri

Borlama işlemi, uygulama yöntemi açısından farklı gruplara ayrılmakta olup, tercih edilecek yöntem genellikle malzemenin yapısal özelliklerine, işlem parametrelerine ve endüstriyel ihtiyaçlara göre belirlenmektedir. Bu kapsamda, borlama teknikleri genel hatlarıyla iki ana sınıfa ayrılmaktadır: termokimyasal yöntemler ve termokimyasal olmayan yöntemler.

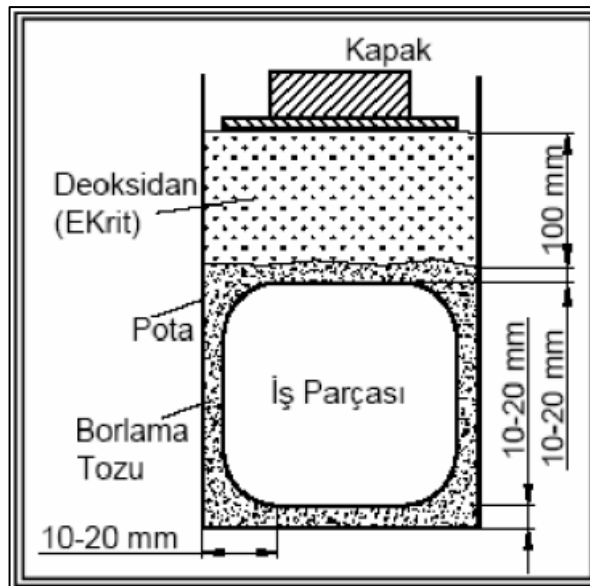
Termokimyasal borlama yöntemleri, bor elementinin yüksek sıcaklık altında altlık malzemeye difüze edilmesi esasına dayanır. Bu gruptaki başlıca uygulamalar arasında kutu borlama, sıvı borlama, gaz borlama, pasta formundaki borlama işlemleri, plazma destekli borlama ve akışkan yataklı sistemlerde gerçekleştirilen borlama teknikleri yer

alır. Her bir yöntemin işlem süresi, sıcaklık aralığı ve yüzey etkileşim biçimi farklılık göstermektedir.

Diğer yandan, borlama işlemi termokimyasal esaslara dayanmaksızın da gerçekleştirilebilmektedir. Bu grupta yer alan yöntemler arasında PVD, CVD, plazma sprej kaplama ve iyon biriktirme teknikleri bulunmaktadır. Bu işlemler, genellikle yüzeye bor içeren sert bir tabaka uygulanarak yüzey özelliklerinin iyileştirilmesini amaçlamaktadır. Yöntem seçimi yapılırken; işlem sıcaklığı, ekonomik verimlilik, istenen kaplama kalınlığı, işlem süresi ve malzemenin geometrik özellikleri gibi çok sayıda faktör dikkate alınmalıdır [1].

2.2.2.1. Kutu Borlama

Kutu borlama, ekonomik oluşu ve uygulama kolaylığı sayesinde endüstride yaygın olarak tercih edilen bir yüzey sertleştirme yöntemidir. Bu yöntemde, çelik parçalar bor içeriğine sahip toz karışımlarıyla birlikte yüksek sıcaklıktaki fırınlarda işleme alınır. Bor elementi, yüksek ısı etkisiyle çelik yüzeyine doğru difüze olur ve burada sert borür bileşenleri oluşur. Genellikle 800 ila 1100 °C arasında uygulanan bu işlem sonucunda, işlenen parçaların yüzeyinde aşınma direnci artar ve korozyona karşı daha dayanıklı bir yapı elde edilir. Kutu borlama işleminin şematik gösterimi Şekil 2.1’de verilmiştir [21].



Şekil 2.1: Kutu borlama işleminin şematik gösterimi.

Kutu borlama işlemine başlamadan önce, borlanacak metal yüzeyleri dikkatlice temizlenir. Yüzeydeki yağ, kir veya oksitler işlem sırasında bor atomlarının difüzyonunu engelleyebileceği için bu adım oldukça kritiktir. Temizleme işlemi genellikle kimyasal bir temizleyici veya kumlama yöntemi ile yapılır. Temizlenen metal parça, bor içeren bir toz karışımına tamamen gömülür. Borlama tozunun ana bileşeni bor karbür (B_4C), ferro-bor, amorf bor olup fiziksel özellikleri **Tablo 2.1**'de verilmiştir. Ayrıca kutu borlamada kullanılan, ticari olarak kullanılan toz bileşenleri **Tablo 2.2**'de verilmiştir.

Tablo 2.1: Katı ortamda borlama işleminde bor kaynakları [3], [16], [22].

Bor Kaynağı	Kimyasal Formül	Molekül Ağırlığı	Bor İçeriği (%)	Ergime Sıcaklığı (°C)
Bor Karbür	B_4C	55,29	77,29	2540
Ferro-Bor	B	-	17-19	-
Amorf Bor	Fe-B	10,82	95-97	2050

Tablo 2.2: Ticari kullanılan katı borlama toz karışım bileşenleri [21].

Bor Kaynağı (ağ. %)	Akışkan Kaynağı (ağ. %)	Aktivatör (ağ. %)
5 B_4C	90 SiC	5 KBF_4
50 B_4C	45 SiC	5 KBF_4
85 B_4C	-	15 Na_2CO_3
95-97 Amorf Bor	-	3-5 KBF_4
40-80 B_4C	20-60 Fe_2O_3	-
60 B_4C -5 B_2O_3	5 NaF	30 Fe_2O_3
50 Amorf Bor	49 Al_2O_3	1 $NH_4.HF$
100 B_4C	-	-
20 B_4C	75 Grafit	5 KBF_4
95 Amorf Bor	-	5 KBF_4

Borlama işleminde en yaygın kullanılan bor kaynağının B_4C olduğu, düşük maliyetli olması ve yüksek performans sunması nedeniyle öne çıktığı görülmektedir. Bu kaynağa, işlem sırasında difüzyonu kolaylaştırmak için çeşitli aktivatörler

eklenmektedir. Bu aktivatörler arasında NH_4Cl , NaBF_4 , KBF_4 ve benzeri bileşikler yer almaktadır. İşlem öncesi iş parçası, özel olarak hazırlanan borlama karışımı içerisinde yerleştirilir. Bu karışım, parçanın tüm yüzeyini yeterli kalınlıkta kaplayacak şekilde düzenlenir. Difüzyonun dengeli gerçekleşebilmesi için karışıma bazen katkı malzemeleri de ilave edilir. İşlem sırasında, oksidasyonu önlemek amacıyla pota kapatılır ve malzemenin termal genişlemesine karşı uygun bir pota tipi seçilir. Bu noktada potanın fırına yerleşimi de önem arz eder; işlem verimliliğini sağlamak adına pota hacminin fırın kapasitesinin belirli bir oranını geçmemesi gerekir. Borlama tamamlandıktan sonra soğutma aşamasına geçilir. Bu aşama, işlem hedeflerine göre hızlı ya da yavaş olarak tercih edilebilir. Soğutma yöntemi, oluşan borür tabakasının yapısal kararlılığı ve malzemenin genel performansı üzerinde doğrudan etkilidir. Bu yüzden, fırın içi yavaş soğutma ya da yüzeye su temasıyla yapılan hızlı soğutma arasında seçim yapılırken, iş parçasının nihai özellikleri dikkate alınmalıdır. Bu işlemde kullanılan pota türleri genellikle yüksek sıcaklık dayanımına sahip malzemelerden seçilmektedir. Alümina ve paslanmaz çelik gibi malzemeler, termal dirençleri ve oksidasyon direnci nedeniyle tercih edilen seçenekler arasında yer almaktadır. Uygun pota ve yardımcı ekipman seçimi, borlama işleminin başarısını doğrudan etkileyen kritik unsurlardır [23].

Kutu borlama işlemi sırasında bor atomları, metal yüzeyine FeB ve Fe_2B gibi sert borür bileşikleri şeklinde yerleşir. Bu borür tabakaları, yüzey sertliğini artırarak malzemenin aşınma direncini önemli ölçüde yükseltir. Borlama işlemi yüzey sertliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. İşlem sıcaklığının artırılmasıyla borür tabakasının kalınlığı artmaktadır. FeB tabakası genellikle yüzeyde daha sert bir yapı oluştururken, Fe_2B tabakası altında daha esnek bir katman olarak bulunur. Bu iki tabakanın bir arada bulunması, malzemenin mekanik dayanımını ve tokluğunu optimize eder [3].

2.2.2.2. Sıvı Borlama

Sıvı borlama, bor elementinin metal yüzeyine aktarılması yoluyla malzeme özelliklerinin geliştirilmesini amaçlayan bir yüzey işlem tekniğidir. Bu yöntemde, metal parça yüksek sıcaklıktaki bor içeren sıvı bir ortamla temas ettirilir. Genellikle 900 ile 1050 °C aralığında gerçekleştirilen bu işlem sırasında, bor atomları yüzeye difüze olarak aşınma ve kimyasal etkilere karşı direnç sağlayan bir borür tabakası oluşturur.

Sıvı borlama iki ana yöntemle uygulanır: klasik daldırma yöntemi ve elektrolitik sıvı borlama. Daldırma tekniğinde, işlem öncesinde temizlenmiş metal parça, bor içeren eriyik bir tuz banyosuna daldırılır. Bu banyo, bor elementinin yüzeye taşınmasını sağlayan ortamı oluşturur. Süreç boyunca parça yüzeyine difüze olan bor, belirli bir sürenin ardından sert ve dayanıklı bir tabaka oluşturur.

Elektrolitik sıvı borlama ise farklı bir prensiple çalışır. Bu yöntemde bor içeren sıvı bir çözelti içerisinde bir elektrik akımı yardımıyla bor iyonları metal yüzeye taşınır. Parça sistemde katot olarak yer alırken, anot genellikle grafit gibi iletken malzemelerden seçilir. Uygulanan gerilimle birlikte, bor iyonları çözüldüğü metal yüzeye yönelir ve burada sabitlenerek yüzey tabakasını oluşturur.

Her iki yöntemin de malzeme sertliği, aşınma ve korozyon direnci gibi yüzey özelliklerini iyileştirme potansiyeli yüksektir. Ancak bu işlemler bazı zorlukları da beraberinde getirir. Örneğin, kullanılan tuzların tekrarlı kullanımı sırasında etkinliğinin azalması, banyo bakımını gerekli kılar. Ayrıca, proses sırasında kullanılan kimyasal maddelerin çevresel etkileri ve atık yönetimi dikkatle değerlendirilmelidir.

2.2.2.3. Gaz Borlama

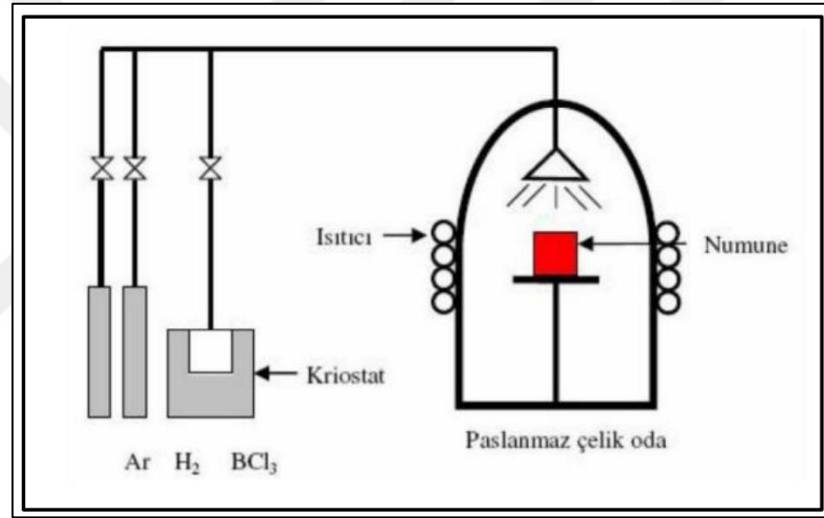
Gaz ortamında gerçekleştirilen borlama işlemi, bor elementinin taşıyıcı gazlar yardımıyla yüksek sıcaklıktaki metal yüzeyine aktarılması esasına dayanır. Bu yöntemde kullanılan bor bileşikleri; örneğin bor triflorür, bor trioksit veya diboran gibi genellikle azot ya da argon gazı aracılığıyla reaksiyon bölgesine yönlendirilir. Yüzeye temas eden bor atomları, belirli bir sıcaklık aralığında (yaklaşık 800–1000 °C) altlık malzemeye nüfuz eder ve yüzeyde sert bir borür tabakası oluşmasına neden olur. Bu yöntem, özellikle karmaşık şekillere sahip parçaların homojen şekilde işlenebilmesine olanak tanınması bakımından avantajlıdır. Oluşan tabaka, aşınma ve ısı etkilerine karşı direnç sağlarken, iş parçasının geometrisine bağlı olarak düzenli bir kaplama elde edilmesine de imkân verir.

Gaz borlama için en sık tercih edilen ortamlar aşağıda sıralanmıştır:

- Diborane (B_2H_6) ve Hidrojen (H_2) Karışımı: Diborane, bor içeriği yüksek bir bileşiktir ve hidrojen ile birleştirildiğinde metal yüzeyine bor atomlarını hızlı bir şekilde taşır. Bu karışım, borlama sürecinde yüksek verimlilik sağlar.

- Bor Halid (iyonize bor) ve Hidrojen/Nitrojen Karışımları: Bor halid gazları, genellikle hidrojen (H_2) veya azot (N_2) gazları ile kullanılır. Özellikle %75 azot ve %25 hidrojen içeren karışımlar, yüzeyde homojen ve sert borür tabakalarının oluşmasına katkıda bulunur.
- Organik Bor Bileşikleri (TriMetilBor $[(CH_3)_3B]$ ve TriEtilBor $[(C_2H_5)_3B]$): Organik bor bileşikleri, metal yüzeyine bor atomlarının aktarılması için kullanılan bir diğer etkili ortamdır. Bu gazlar, yüksek sıcaklıklarda kolayca parçalanarak bor atomlarının serbest kalmasını ve yüzeye nüfuz etmesini sağlar.

Gaz ortamında borlama işleminin şematik gösterimi **Şekil 2.2**'de verilmiştir.



Şekil 2.2: Gaz ortamında borlama işleminin şematik gösterimi.

Gaz borlama işlemi, aşınma ve korozyona karşı çok iyi bir koruma sağlamasına karşın yüksek ekipman maliyeti, fazla enerji tüketimi, kullanılan toksik gazlar ve ortamın patlayıcılığının yüksek olmasından dolayı yöntemin uygulanabilirliği kısıtlıdır.

2.2.2.4. Pasta Borlama

Pasta borlama yöntemi, katı ortamda yapılan borlama işlemlerine kıyasla daha hızlı ve ekonomik bir alternatif sunar. Özellikle büyük hacimli ve karmaşık geometrilere sahip parçaların borlanması tercih edilen bu yöntem, zamandan tasarruf sağlaması ve maliyet avantajları nedeniyle dikkat çekmektedir. Ayrıca, kısmi borlama gereksinimlerinde de bu yöntem oldukça etkilidir [24].

Pasta borlama işlemi sırasında, macun kıvamında hazırlanan borlayıcı madde, borlanacak yüzeye 2-5 mm kalınlıkta uygulanır. Bu uygulama fırçayla sürme ya da püskürtme yöntemiyle yapılabilir. Macunun uygulanmasından sonra, parçanın fırınlanmadan önce tamamen kuruması beklenir. Kurutma işlemi tamamlandıktan sonra parçalar uygun sıcaklığa ayarlanmış fırına yerleştirilerek borlama işlemi gerçekleştirilir. Eğer paket borlama gibi yöntemler ekonomik açıdan zorluk çıkarıyorsa veya zaman alıcı bir süreç içeriyorsa, pasta borlama yöntemi uygun bir alternatif olarak öne çıkar. Bu işlemde genellikle %45 bor karbür (B_4C , tane büyüklüğü 200-240 μm) ve %55 kriyolit (Na_3AlF_6) karışımı bir borlama pastası kullanılır.

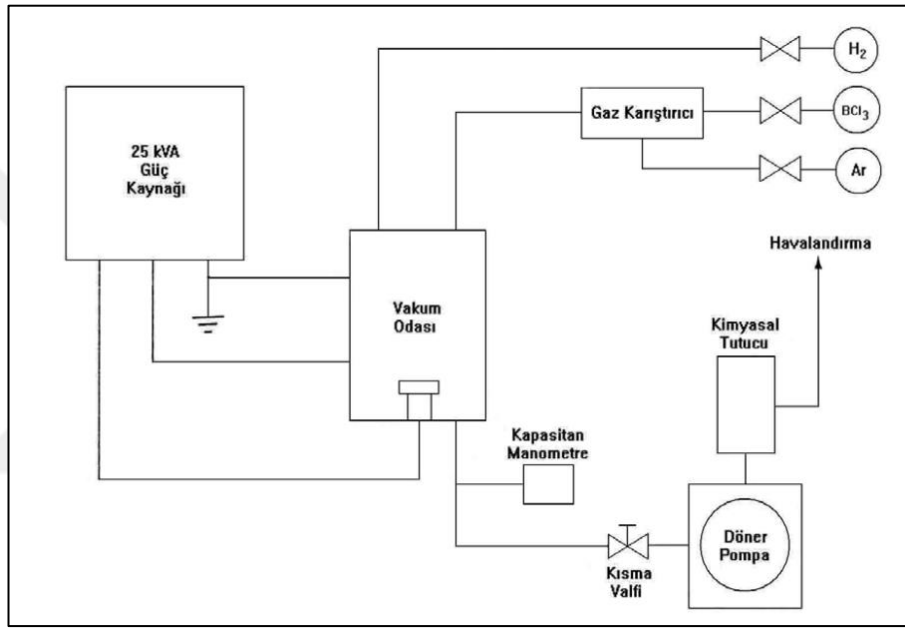
Fırınlama işlemi sırasında, parçalar 800-1000 °C arasında bir sıcaklıkta yaklaşık 5 saat işlem görür. Bu ısı işlem, endüksiyonlu ya da dirençli bir ısıtma metodu kullanılarak gerçekleştirilir. Atmosfer kontrollü fırınlarda ise Ekabor-Paste ve Durborid-Paste gibi özel borlama macunları kullanılabilir. Bu macunlar, su bazlı formülleri sayesinde yanma riskini ortadan kaldırır ve güvenli bir uygulama sağlar. Gaz atmosferi açısından, %90-95 oranında azot ve %5-10 oranında hidrojen karışımı önerilirken, saf azot veya argon gazı kullanılması tavsiye edilmez. Çünkü saf azot veya argon kullanımı, borlama tabakasının daha ince olmasına neden olabilir [24].

Pasta borlama yönteminde endotermik gazlar veya karbon monoksit içeren gazlar kullanılmamalıdır. Bu tür gazlar, borlama işleminin etkinliğini olumsuz etkileyebilir. Pasta borlama hem ekonomik olması hem de pratikliğiyle yüzey mühendisliği alanında etkili bir yöntem olarak dikkat çekmektedir. Özellikle doğru malzemeler ve atmosfer koşulları sağlandığında, bu yöntem yüzey özelliklerini iyileştirmek için oldukça başarılı sonuçlar verir.

2.2.2.5. Plazma Borlama

Plazma; iyonlaşmış gazlardan, serbest elektronlardan ve uyarılmış atomlardan oluşan, yüksek enerjili yarı kararlı bir ortamdır. Genellikle elektriksel deşarj, yüksek sıcaklık veya elektromanyetik ışımaya oluşturulan bu ortam, yüzey modifikasyon teknolojilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Modern üretim uygulamalarında plazma oluşturmak için en çok tercih edilen yöntem elektriksel boşalma tekniğidir. Plazma borlama ise, düşük basınçlı bir reaktör ortamında gerçekleştirilen termokimyasal bir yüzey sertleştirme işlemidir. Bu yöntemde taşıyıcı olarak argon ve

hidrojen gazları kullanılırken, bor kaynağı olarak bor triflorür, diboran, bor trihalojenürler ya da trimetilborat gibi bileşikler tercih edilmektedir. İşlem genellikle 800 ila 1000 °C arasında bir sıcaklıkta ve 10^{-2} mbar mertebesindeki bir basınçta uygulanır. Bor atomlarının altlık yüzeye olan difüzyonu; işlemde kullanılan gaz karışımının bileşimi, sıcaklık düzeyi, basınç şartları ve uygulanan elektriksel güç gibi parametrelerden etkilenir. Bu faktörlerin dengeli şekilde kontrol edilmesi, hem yüzeyde oluşan borür tabakasının kalitesini hem de işlem verimliliğini doğrudan etkiler [1]. Plazma borlama yönteminin şematik gösterimi Şekil 2.3'te verilmiştir.



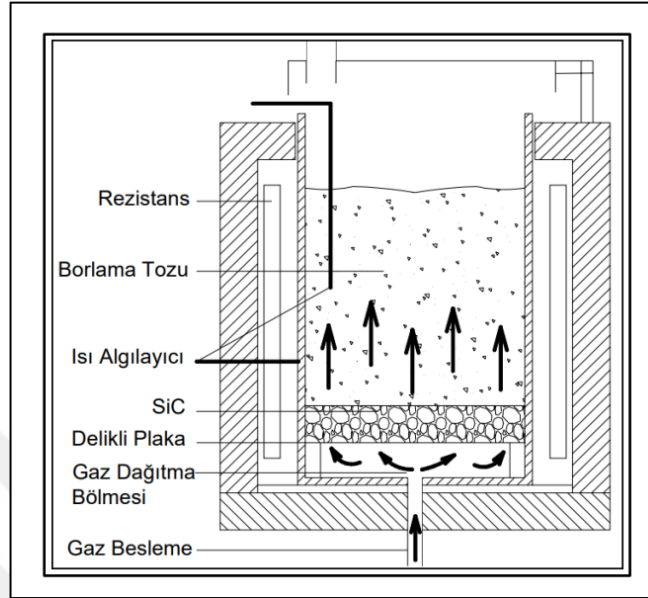
Şekil 2.3: Plazma borlamanın şematik gösterimi [1].

Plazma borlama işleminin birçok avantajı olmasına rağmen işlemde kullanılan atmosferin toksik olmasından dolayı ticari olarak yaygınlaşamamıştır [25].

2.2.2.6. Akışkan Yataklı Fırınlarda Borlama

Kutu borlama yöntemine alternatif olarak geliştirilen akışkan yataklı borlama tekniği, inert gaz atmosferinde gerçekleştirilen kontrollü bir yüzey işlemidir. Bu yöntemde, yüksek sıcaklığa dayanıklı borlama tozları, taşıyıcı gaz olarak kullanılan hidrojen ve azotun yardımıyla akışkan hale getirilir ve iş parçasının çevresinde eşit şekilde dağıtılır. Bu şekilde uygulanan işlem, yüzeyde homojen kalınlıkta bir borür tabakasının oluşmasını sağlar. Elde edilen kaplama, malzemenin yüzey sertliğini

artırmakla kalmaz, aynı zamanda aşınmaya karşı direncini de önemli ölçüde geliştirir. Akışkan yataklı fırında borlama işleminin şematik gösterimi **Şekil 2.4**'te verilmiştir [21].



Şekil 2.4: Akışkan yataklı fırınlarda borlama işleminin şematik gösterimi [21].

Akışkan yataklı fırınlarda borlama yönteminin başlıca avantajları aşağıdaki gibidir [21]:

- İşlem süresi kısaltılabilir; parçalar hızlı bir şekilde ısıtılarak işlem tamamlandıktan sonra doğrudan fırından çıkarılabilir.
- Hareketli partiküllerle sağlanan yüksek ısı transferi sayesinde, borlanan parçalar mükemmel termal stabiliteye sahip olur.
- Sürekli ve otomatik çalışma olanağı sunar; borlanacak parçalar belirli aralıklarla fırına yüklenebilir ve işlem tamamlandığında dışarı alınabilir.
- Borlama işlemi tamamlandıktan sonra, parçalar doğrudan suyla soğutulabilir, bu da borlama ve sertleştirme işlemlerini tek bir adımda birleştirerek verimliliği artırır.
- Seri üretim süreçlerinde zaman ve enerji tasarrufu sağlayarak işlem maliyetlerini düşürür.

2.2.3. Demir Dışı Malzemelerin Borlanması

Kobalt, nikel, vanadyum, molibden, krom, niyobyum, tungsten ve titanyum gibi demir dışı metaller ve alaşımları, çeşitli yöntemler kullanılarak borlama işlemine tabi tutulabilmektedir. Ancak borlama sürecinde uygulanan yüksek sıcaklık nedeniyle, düşük ergime noktasına sahip alüminyum, magnezyum ve çinko gibi metallerin borlanması mümkün olmamaktadır.

Usta ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, saf tungstenin borlanması sonucu oluşan mikroyapı ve mekanik özellikler incelenmiştir. Deneyler, Ekabor tozları kullanılarak 940 °C sıcaklıkta 2, 4 ve 8 saat katı ortamda borlama işlemi uygulanarak gerçekleştirilmiştir. XRD analizleri, saf tungsten yüzeyinde WB fazının oluştuğunu doğrulamıştır. Mikroyapısal analizler, yüzeyde homojen ve yoğun bir borür tabakasının meydana geldiğini göstermiştir. Borür tabakasının kalınlığı 10 ile 42 µm arasında değişirken, sertlik değerleri yüzeyden iç kısma doğru azalmıştır. Borlanmış tabakanın sertliği 2500 HV, temel malzemenin sertliği ise 445 HV olarak ölçülmüştür. Çalışmada ayrıca, borlama süresi arttıkça borür tabakasının kalınlığının doğrusal bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Borlanmış saf tungstenin yüksek sıcaklık dayanımı, sertliği ve aşınma direncinin önemli ölçüde iyileştiği belirlenmiştir [26].

Ünüvar ve arkadaşları, ticari saflıktaki kobaltın borlama işlemine tabi tutulmasıyla oluşan mikroyapısal ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Deneylerde, Ekabor-3 ticari borlama tozu kullanılarak farklı sıcaklık ve sürelerde borlama işlemi uygulanmıştır. Borlanan numuneler optik ve SEM ile incelenmiş, sertlik ölçümleri yapılmış ve XRD kullanılarak oluşan borür tabakalarının faz bileşenleri belirlenmiştir. Borlama sıcaklığı ve süresinin artmasıyla borür tabakası kalınlığının ve sertliğin arttığını, ancak sertlik değerinin tabakadan altlık malzemeye doğru azaldığını göstermiştir. Borlanmış yüzeylerde yüksek sertlik (HV 2000+) ve aşınma direnci elde edilirken, kobaltın mekanik ve korozyon özellikleri önemli ölçüde iyileştirilmiştir. Bu çalışma, kobalt malzemelerinin borlama yöntemiyle yüzey performansının artırılabilceğini ve endüstride aşınmaya dayanıklı parçaların üretimi için uygun bir yöntem olduğunu ortaya koymaktadır [27].

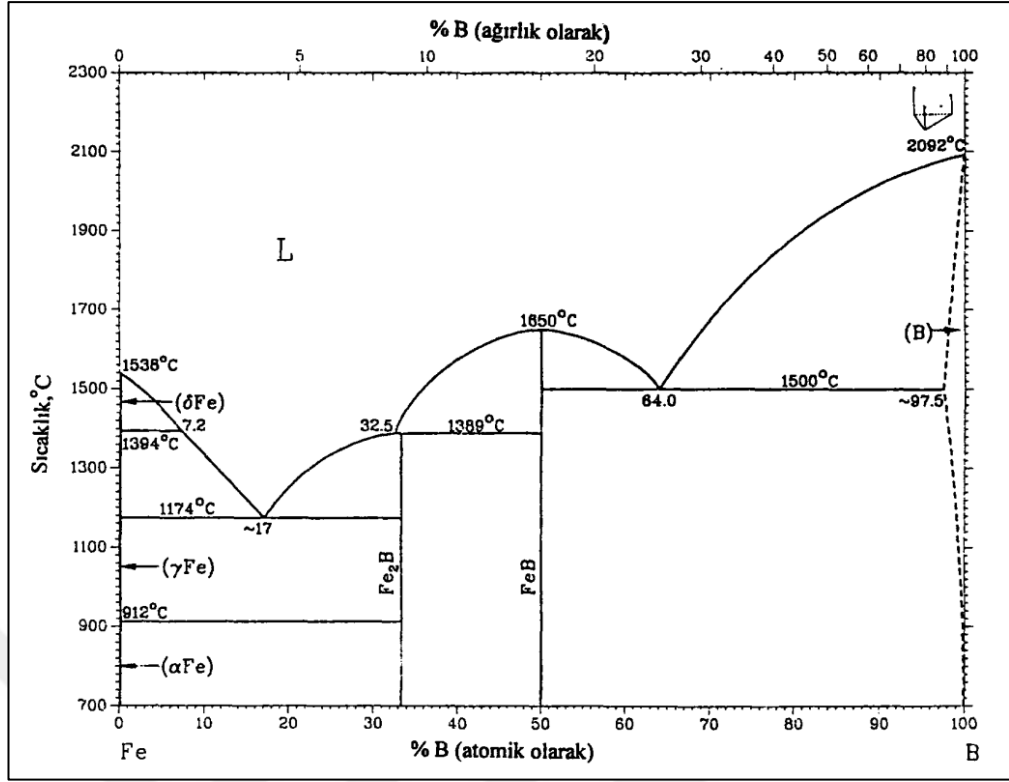
Akça ve arkadaşları, saf molibdenin borlama işlemiyle yüzey özelliklerinin iyileştirilmesini incelemişlerdir. Ekabor 2 borlama tozu kullanılarak 900 °C, 1000 °C ve 1100 °C sıcaklıklarda, 2, 4, 6 ve 8 saat katı ortamda borlama işlemi

gerçekleştirilmiştir. XRD analizleri, borlanan molibden yüzeyinde MoB ve Mo₂B fazlarının oluştuğunu göstermiştir. Optik mikroskop ve SEM analizleri, borlanmış yüzeyde dişli, pürüzsüz ve kompakt yapıda borür tabakalarının oluştuğunu ortaya koymuştur. Borlama süresi ve sıcaklığın artışıyla tabaka kalınlığı 5 µm ile 42,5 µm arasında değişmiş, yüzey sertliği 925 HV_{0.05}'ten 1150 HV_{0.05}'e kadar yükselmiştir. Borlama işlemiyle molibdenin aşınma direnci ve yüzey sertliği önemli ölçüde iyileştirilmiştir. Ayrıca, aktivasyon enerjisi 247,77 kJ/mol olarak hesaplanmış ve bor difüzyon mekanizmasının sıcaklığa bağımlı olduğu tespit edilmiştir [28].

Özbek ve arkadaşları, %99,5 saflıktaki nikelin borlama işlemi sonrası oluşan mikroyapısal ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Deneylerde, Ekabor 2 borlama tozu kullanılarak 950 °C'de 2, 4 ve 8 saat katı ortamda borlama işlemi gerçekleştirilmiştir. XRD analizleri, borlanan nikel yüzeyinde Ni₅Si₂ ve Ni₄B₃ fazlarının oluştuğunu doğrulamıştır. Optik mikroskop ve SEM analizleri, yüzeyde iğnemsiz borür yapılarının meydana geldiğini göstermiştir. Borlama süresi arttıkça kaplama tabakasının kalınlığı 123 ile 281 µm arasında değişmiştir. Sertlik ölçümlerinde, borlanmış yüzeyin mikrosertliği 805 HV'ye ulaşırken, ana malzemenin sertliği 100 HV olarak belirlenmiştir. Bu çalışma ile borlanmış nikelin yüksek aşınma direnci sağladığını ortaya koyulmuştur [29].

2.2.4. Fe-B İkili Denge Diyagramı

Katı kristal yapı içinde çözünen atomların difüzyonunu sağlayan iki temel mekanizma bulunmaktadır. Boşluk mekanizması; atomların kristal yapıdaki boşlukları kullanarak hareket etmesiyle gerçekleşirken, arayer mekanizması; atomların kendilerini çevreleyen diğer atomlar arasından geçerek ilerlemesine dayanır. Bor atomu, demir atomuna kıyasla yaklaşık %27 daha küçük olduğundan hem arayer konumunda hem de yer alan pozisyonunda bulunabilir. Bunun yanı sıra, belirli oranlarda birleşerek sert borür bileşikler de oluşturabilir [30]. Bazı araştırmacılar, bor atomlarının α-demir yapısında hem yerleşik atom (yer alan) hem de arayer konumunda bulunabileceğini öne sürmüştür. Ayrıca, bor atomlarının, karbon gibi diğer arayer atomlarıyla etkileşime girebileceği belirtilmiştir. Yapılan çalışmalar, düşük sıcaklıklarda borun demir içindeki çözünebilirliğinin büyük ölçüde yerleşik atom formunda gerçekleştiğini, ancak yaklaşık 1/50 oranında arayer atomu olarak da çözünebildiğini göstermektedir [31]. **Şekil 2.5**'te Fe-B faz diyagramı verilmiştir.

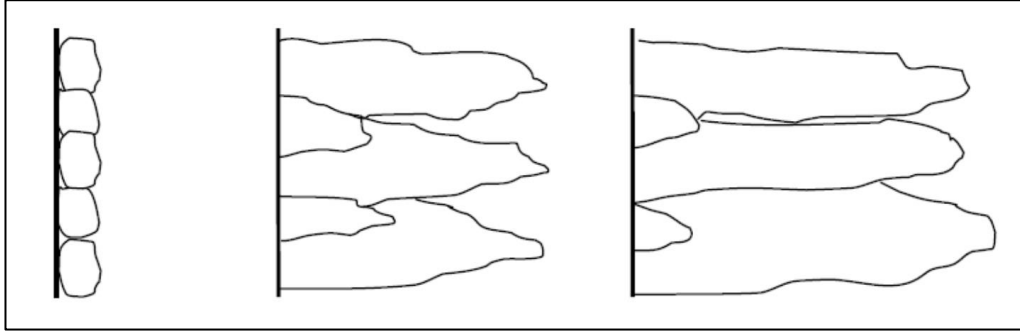


Şekil 2.5: Fe-B ikili denge diyagramı [32].

Fe-B ikili faz dengesi diyagramına göre, bu sistemde %8,83 bor içeriğinde Fe₂B, %16,23 bor içeriğinde ise FeB bileşikleri oluşmaktadır. Ayrıca, %3,8 bor oranında ve 1149°C’de eriyen bir ötektik yapı bulunmaktadır. Bor elementinin demir içindeki çözünürlüğü, hem delta (δ)-Fe hem de gama (γ)-Fe fazlarında atomik olarak %0,5 seviyesindedir. Fe-B faz diyagramı incelendiğinde, 1394 °C’de ve %7,2 atomik bor içeriğine kadar α-Fe’nin δ-Fe ve sıvı faza dönüşmesini sağlayan bir metatektik reaksiyon gerçekleşmektedir. Ayrıca, 912 °C’de δ-Fe ve Fe₂B’nin γ-Fe₂B’ye dönüşümünü sağlayan bir reaksiyon bulunmaktadır. Diyagramda %17 atomik bor içeriğinde, 1174°C’de γ-Fe ve Fe₂B arasında bir ötektik reaksiyon, 1389 °C’de sıvı faz ve FeB arasında bir peritektik reaksiyon oluşmaktadır. %33,3 atomik bor içeriğinde Fe₂B intermetalik bileşiği, %50 atomik bor içeriğinde ise FeB intermetalik bileşiği bulunmaktadır. Çeşitli araştırmalar, Fe₂B fazının erime sıcaklığının 1389-1410 °C arasında, FeB fazının ise 1540-1657 °C arasında değiştiğini ortaya koymuştur [3].

2.2.5. Demir Borürlerin Büyüme Mekanizmaları

Demir esaslı bir malzemenin borlanması sonucunda, yüzeyde tek fazlı FeB veya Fe₂B borür tabakaları ya da iki fazlı FeB+Fe₂B tabakası oluşabilir. Ortamda fazla miktarda bor atomu bulunması veya malzemenin yüksek alaşımlı olması, iki fazlı borür yapısının meydana gelmesine neden olabilir. FeB ve Fe₂B fazları arasındaki [001] yönlenmesi, borür tabakasının kolonsal bir yapı kazanmasına yol açar. Ancak, yüksek alaşımlı çeliklerde bu arayüzeyin kolonsal yerine düz bir sınır şeklinde olduğu belirtilmiştir. FeB ve Fe₂B fazlarının termal genişleme katsayılarının farklı olması, ısı etkisiyle malzeme içinde gerilmelerin oluşmasına neden olabilir. Bu farklılık, borür tabakasında çatlak oluşumuna yol açabileceğinden, genellikle iki fazın aynı anda bulunması istenmeyen bir durumdur. Borlama sürecinde faz oluşumunun kontrollü bir şekilde gerçekleştirilmesi, yüzey bütünlüğünü ve malzeme performansını korumak açısından önem taşımaktadır [33]. Borür tabakası oluşurken ilk borür çekirdeği malzeme yüzeyinde oluşur. Borür tabaka oluşum aşaması Şekil 2.6'da verilmiştir [34].



Şekil 2.6: Borür tabakasının oluşum aşaması [34].

Bor atomları, kristal kafes yapısının [001] doğrultusunda daha hızlı yayıldığından, FeB ve Fe₂B fazları bu doğrultuda yönlenir. Bu nedenle, borür taneleri yüzeye dik yönde [001] doğrultusunda daha hızlı büyür, diğer yönlerdeki büyüme ise daha yavaş gerçekleşir. Bunun sonucu olarak kolonsal yapı meydana gelir. Borlama sürecinde ilk olarak Fe₂B fazı oluşur. Eğer ortamda yeterli miktarda bor atomu bulunuyorsa, FeB fazı da oluşarak iki fazlı bir yapı meydana gelebilir. İlk oluşan Fe₂B tabakası, bor difüzyonu için temel bir ara katman görevi görerek yüzeye daha fazla bor atomunun taşınmasına olanak tanır. Bu süreç, bor konsantrasyonuna ve işlem süresine bağlı olarak ilerler, böylece yüzey sertliği ve aşınma direnci artırılmış olur [3].

2.2.6. Borür Tabakasının Özellikleri

Borür tabakaları, metal yüzeylerinde sertlik, aşınma direnci ve korozyon dayanımını artırmak amacıyla borlama işlemi sonucunda oluşan koruyucu katmanlardır. Demir bazlı malzemelerin borlanması sonucunda genellikle FeB ve Fe₂B olmak üzere iki farklı borür fazı meydana gelir. Bu tabakaların oluşumu, borlama süresi, sıcaklık, malzeme bileşimi ve işlem atmosferine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. **Tablo 2.3**'te FeB ve Fe₂B fazlarının özellikleri verilmiştir [1].

Tablo 2.3: FeB ve Fe₂B fazlarının özellikleri [1].

Özellik	FeB	Fe ₂ B
Kristal Yapı	Ortorombik	Hacim merkezli tetragonal
Bor İçeriği (ağ. %)	16,23	8,83
Yoğunluk (gr/cm ³)	6,75	7,43
Ergime Sıcaklığı (°C)	1540-1657	1389-1410
Mikrosertlik (GPa)	19-21	18-20
Oluşum Entalpisi (ΔH)	-71,13	-71,13
Elastisite Modülü (GPa)	590	280-295

Fe₂B fazı, demir borürlerinin ilk oluşan katmanı olup yüzeye yakın bölgede FeB fazı oluşabilmesi için yeterli bor konsantrasyonuna ihtiyaç duyulmaktadır. Fe₂B fazı daha sünek ve çatlama daha az eğilimli bir yapı sergilerken, FeB fazı daha kırılkan olup yüksek termal gerilimler nedeniyle çatlama daha yatkındır. Bu nedenle, borür tabakasının tasarımında genellikle Fe₂B'nin baskın olduğu yapıların tercih edilmesi önerilmektedir [35].

FeB ve Fe₂B tabakalarının kalınlıkları, işlem süresi ve sıcaklıkla doğrudan ilişkilidir. Örneğin, AISI 5140 çeliği üzerinde yapılan borlama çalışmaları, borür tabakasının 33.8 ila 175 μm arasında değişebileceğini göstermektedir [36]. FeB ve Fe₂B tabakalarının mikrosertliği sırasıyla 1800-2300 HV ve 1500-1800 HV arasında değişmektedir, bu da borlanmış yüzeylerin yüksek aşınma direncine sahip olduğunu göstermektedir [37].

Borlama işlemi sonucunda oluşan termal gerilmeler, özellikle FeB ve Fe₂B fazlarının birlikte bulunduğu sistemlerde çatlak oluşumuna neden olabilir. Bunun sebebi, iki fazın farklı termal genişleme katsayılarına sahip olmasıdır [38]. Bu durum, borlama işlemi tamamlandıktan sonra malzemenin dikkatli bir şekilde soğutulmasını gerektirir. Özellikle FeB fazının aşırı büyümesi, malzemenin mekanik bütünlüğünü olumsuz yönde etkileyebilir.

Fe₂B ve FeB fazları, metal yüzeylerinde kimyasal direnç sağlarken, özellikle agresif ortamlarda korozyon direncini artırmada etkili olabilirler. Yapılan çalışmalar, Fe₂B fazının sülfürik asit gibi aşındırıcı ortamlarda FeB fazına kıyasla daha dayanıklı olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, korozyon dayanımı gerektiren uygulamalarda Fe₂B içeren borür yapıları daha avantajlıdır [39].

Sonuç olarak, FeB ve Fe₂B borür tabakaları, demir esaslı malzemelerin mekanik ve kimyasal özelliklerini büyük ölçüde iyileştirmektedir. Ancak, FeB'nin kırılabilirliği ve Fe₂B'nin daha kararlı yapısı göz önünde bulundurularak işlem parametreleri dikkatlice belirlenmelidir.

2.2.7. Alaşım Elementlerinin Borlama Davranışına Etkisi

Borlama, metal yüzeylerinde sert, aşınmaya ve korozyona dirençli borür tabakalarının oluşmasını sağlayan bir termokimyasal yüzey işlemidir. Bor atomlarının metal içine difüzyonunu esas alan bu işlemde, alaşım elementi içeriği borür tabakasının yapısını, sertliğini ve mekanik özelliklerini doğrudan etkiler. Alaşım elementleri, borun metal içerisine yayılım hızını belirleyerek borür tabakasının kalınlığını, sertliğini, mikroyapısını ve oluşan fazların türünü değiştirir [40], [41]. Borlama işlemi sırasında metal matrisindeki her bir alaşım elementi farklı bir etkiye sahip olup, belirli elementler borür tabakasının oluşumunu teşvik ederken, bazıları difüzyonu yavaşlatarak tabakanın kalınlığını ve sertliğini sınırlayabilir [42].

Alaşım elementleri, borlama işleminin etkinliğini büyük ölçüde belirlemektedir. Karbon, krom, nikel, molibden, silisyum ve vanadyum gibi elementler, bor atomlarının difüzyonunu ve borlanmış yüzeyin mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkileyerek borlama sürecinin verimliliğini artırabilir veya azaltabilir. Borlama işleminde istenilen yüzey özelliklerine ulaşmak için alaşım bileşimi dikkatlice değerlendirilerek uygun işlem parametreleri belirlenmelidir [43].

Karbon, borlama işlemi sırasında bor atomlarının metal içine difüzyonunu etkileyen en önemli alaşım elementlerinden biridir. Düşük karbon içeriğine sahip çelikler bor atomlarını daha hızlı absorbe ederek kalın borür tabakalarının oluşmasını sağlarken, yüksek karbon içeriği bor atomlarının yayılımını engelleyebilir. Karbon içeriği arttıkça, özellikle karbür oluşumu nedeniyle borlama süreci zorlaşabilir ve borlanmış tabakanın sertliği düşebilir [1].

Krom içeren alaşımlar borlama sürecinde genellikle daha yüksek sertlik değerlerine ve daha yüksek korozyon direncine sahiptir. Krom, bor atomlarının metal içerisine difüzyonunu yavaşlatarak borür tabakasının daha ince oluşmasına neden olabilir. Paslanmaz çelikler gibi yüksek krom içeriğine sahip çeliklerde borlanma işlemi daha düşük hızda gerçekleşir ve daha ince borür tabakaları oluşur. Örneğin, AISI 304 paslanmaz çeliği, düşük krom içeriğine sahip çeliklere göre daha yavaş bor difüzyonuna sahiptir, ancak borlanmış yüzeyin korozyon direnci daha yüksektir [44].

Nikel içeren alaşımlar borlama sürecinde farklı davranışlar sergiler. Nikel, bor atomlarının metal matrisine yayılmasını yavaşlatarak borlama işlemi zorlaştırabilir ve borür tabakasının sertliğini düşürebilir. Örneğin, Inconel 718 gibi yüksek nikel içeriğine sahip süperalaşımlar borlama sürecinde daha ince ve gözenekli borür tabakaları oluşturabilir. Bu nedenle, nikel alaşımlarının borlanması sırasında daha yüksek sıcaklık ve uzun işlem süresi gerekmektedir [45].

Molibden, borlanmış yüzeylerin yüksek sıcaklık dayanımını ve sertliğini artıran bir elementtir. Molibden içeren Fe-Mo alaşımlarında borür tabakası daha sert ve dirençli bir yapı gösterir. Örneğin, AISI H13 sıcak iş takım çeliğinde molibden içeriği arttıkça borür tabakasının sertliği ve oksidasyon direnci belirgin şekilde yükselmektedir [46].

Silisyum, bor atomlarının metal içerisine difüzyonunu etkileyerek borür tabakasının homojenliğini ve kalınlığını belirler. Düşük silisyum içeriğine sahip malzemelerde borür tabakası daha kalın ve homojen oluşurken, yüksek silisyum içeriği bor atomlarının difüzyonunu yavaşlatarak daha ince tabakalar oluşturur. Örneğin, AISI 316 paslanmaz çeliğinde yüksek silisyum içeriği nedeniyle borür tabakası daha yavaş oluşur ve sertlik değerleri nispeten düşük olur [47].

Vanadyumun borlama üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla farklı oranlarda vanadyum içeren Fe-V alaşımları hazırlanarak kutu borlama yöntemiyle işlem uygulanmıştır. Yapılan incelemeler, vanadyum ilavesinin borür tabakasının genel

kalınlığını azaltmasına rağmen, FeB fazının kalınlığını artırdığını göstermiştir. Ayrıca, artırılan vanadyum içeriği, borlanmış yüzey ile altlık malzeme arasındaki arayüzeyin daha pürüzsüz hale gelmesine katkı sağlamıştır [19].

2.2.8. Takım eliklerinin Borlanması

Literatürde birçok takım çeliğinin borlanması üzerine çalışmalar yapılmıştır. Takım elikleri arasında en çok çalışma yapılan kalite H13 sıcak iş takım çeliği olduğu grlmştir. H13 sıcak iş takım çeliğine yapılan borlama işlemlerinde; borür tabakasının testere dişi morfolojisinde olduğu ve mikro çatlak içermediği, 800 C’de 4 saate kadar olan borlama işlemlerinde oluşan borür tabakasının tek fazlı Fe₂B olduğu fakat 800 C üzerindeki yapılan borlama işlemlerinde çift fazlı FeB+Fe₂B fazı oluştuğu, diğer çoğu elik kalitesinde olduğu gibi borlama işlemi sıcaklık ve süresinin artması ile oluşan tabaka kalınlığının ve sertliğinin arttığı, aşınma ve korozyon direncinin arttığı grlmştir.

Ayyıldız ve arkadaşları, çalışmalarında AISI H13 eliğinin korozyon, aşınma (tribolojik) ve aşınma-korozyon (tribokorozyon) performansını iyileştirmek amacıyla kutu ve elektrokimyasal esaslı borlama yöntemlerini kullanmıştır. Araştırmada, borlama işlemi kutu borlama ve elektrokimyasal borlama olarak iki farklı yöntemle gerçekleştirilmiştir. Kutu borlama, %90 B₄C ve %10 KBF₄ toz karışımı içinde 950 C’de 6 saat yapılırken, elektrokimyasal borlama %90 Na₂B₄O₇ ve %10 Na₂CO₃ zeltisi içinde, 950 C sıcaklıkta ve 15 dakika boyunca 200 mA/cm² akım yoğunluğunda uygulanmıştır. Sonuçlar, her iki yöntemin de H13 eliğin yüzey sertliğini ve korozyon direncini önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Elde edilen borlanmış tabakalar, FeB ve Fe₂B fazlarından oluşmakta olup, borlama sonucunda yüzey sertliği 1573 HV_{0,05} (kutu borlama) ve 1805 HV_{0,05} (elektrokimyasal borlama) seviyelerine ulaşmıştır. Ayrıca, borlama işlemiyle korozyon oranı önemli ölçüde azalırken, borlanmış H13 elik numunelerinin aşınma hızında %67 ile %94 arasında azalma kaydedilmiştir [46].

Gnen ve arkadaşları, çalışmalarında AISI H13 tipi sıcak iş takım çeliğinin yüzey özelliklerini iyileştirmek amacıyla B₄C ve NaBF₄ toz karışımı kullanılarak yapılan kutu borlama işlemini konu edinmektedir. 800 C, 900 C ve 1000 C sıcaklıklarda, 2, 4 ve 6 saatlik sürelerle gerçekleştirilen borlama işlemi sonrasında oluşan borür

tabakalarının yapısal, mekanik ve korozyon direnci özellikleri detaylı şekilde incelenmiştir. Yapılan analizler sonucunda, düşük sıcaklıklarda tek fazlı Fe₂B yapısı elde edilirken, daha yüksek sıcaklıklarda FeB + Fe₂B çift fazlı bir yapı olduğu gözlemlenmiştir. Tüm borlama koşullarında, yüzeyde kompakt ve çatlak içermeyen tabakalar oluşmuştur. Tabaka kalınlığı 5.81–102.46 µm, sertlik değeri 1635–1915 HV ve yüzey pürüzlülüğü ise 0.315–0.650 µm aralığında değişmiştir. Korozyon testleri sonucunda, borlanmış AISI H13 çeliğinin, borlanmamış haline göre 33 kata kadar daha yüksek korozyon direnci sergilediği, hatta bu performansın AISI 431 martenzitik paslanmaz çeliğe yakın olduğu tespit edilmiştir. Korozyon dayanımı üzerinde tabaka kalınlığı, faz yapısı ve yüzey pürüzlülüğü gibi parametrelerin etkili olduğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, borlama işleminin H13 çeliğinin denizcilik ve buhar türbini gibi zorlu ortamlarda kullanımı için uygun bir yüzey modifikasyon yöntemi olduğunu göstermektedir [48].

Genel ve arkadaşları, çalışmalarında AISI H13 çeliğinin borlama kinetiği ve borür tabaka kalınlığının büyüme özelliklerini incelemiştir. Deneysel çalışmalarda Ekabor-I tozu kullanılarak, 800 °C, 900 °C ve 1000 °C sıcaklıklarda 1-5 saat aralığında borlama yapılmıştır. Borlama işlemi sonucunda yüzeyde oluşan FeB ve Fe₂B borür fazlarının, düzgün ve kompakt bir yapıda olduğu gözlenmiştir. Borlanmış yüzeyin sertliği 1650-2000 HV arasında değişirken, borlanmamış çeliğin sertliği 570 HV olarak ölçülmüştür. Bu da borlama işleminin, yüzey sertliğini yaklaşık 3,5 kat artırdığını göstermektedir. Çalışmanın genel sonucunda, H13 çeliğinin borlama işlemi ile yüzey sertliğinin ve dayanıklılığının artırılacağı, ayrıca borlama süresinin ve sıcaklığının tabaka kalınlığını doğrudan etkilediği belirlenmiştir [49].

Arslan ve arkadaşları, AISI 4140 ve AISI H13 çeliklerinin kutu borlama işlemi uygulanarak yüksek sıcaklıklardaki yorulma dayanımlarını ve aşınma performanslarını incelemiştir. Deneysel çalışmada AISI 4140 ve AISI H13 çelikleri, 900 °C ve 950 °C sıcaklıklarında 4 ve 6 saat kutu borlama işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlemler sonrası çeliklerin iç yapı analizleri, sertlik, aşınma ve ısıl yorulma dayanımları ölçülmüştür. Borlama işlemi sonrasında özellikle çeliklerin yüzey sertliklerinin arttığı ve aşınma performanslarının iyileştiği görülmüştür. Çalışmanın sonuçları, borlama işlemi ile yüzeyde oluşan artık gerilmelerin, yorulma dayanımını da artırdığını göstermektedir [50].

Taktak ve arkadaşları çalışmalarında, AISI H13 sıcak iş takım çeliği ve AISI 304 paslanmaz çeliğin borlanma ile kazandığı bazı mekanik özellikler incelemiştir. Çalışma kapsamında her iki çelik, boraks, borik asit ve ferrosilikon içeren bir tuz banyosunda 800-950 °C sıcaklık aralığında 3, 5 ve 7 saat boyunca borlanmıştır. Borlanmış tabakalarda FeB, Fe₂B, CrB ve AISI 304 için ayrıca Ni₃B fazlarının varlığı XRD analizleriyle doğrulanmıştır. Mikroyapı incelemelerinde, AISI H13 çeliğinde yüzeyde düzensiz bir bor tabakası oluşurken, AISI 304 çeliğinde düz ve pürüzsüz bir tabaka gözlemlenmiştir. Mikrosertlik ölçümleri sonucunda, bor tabakasının AISI H13 çeliğinde 1860 HV, AISI 304 çeliğinde ise 2150 HV olduğu belirlenmiştir. Sertlik değerleri, işlem sıcaklığı ve süresine bağlı olarak artmış, borlu yüzeyin sertliği her iki çeliğin de matrisine göre çok daha yüksek çıkmıştır. Artan borlama süresi ve sıcaklığının kırılma tokluğunu düşürdüğü gözlemlenmiştir. Ayrıca, Rockwell-C yapışma testleri borlanmış tabakaların düşük sıcaklıklarda yeterli yapışma gösterdiğini, yüksek sıcaklıklarda ise tabakaların yapışma dayanımında düşüş yaşandığını ortaya koymuştur. Çalışma sonucunda, borlama işleminin yüzey sertliği ve aşınma direncini önemli ölçüde artırdığı, ancak tokluk ve yapışma dayanımı üzerinde olumsuz etkiler yaratabileceği sonucuna varılmıştır [37].

Özbek ve arkadaşları, çalışmalarında AISI M2 yüksek hızlı takım çeliğinin borlama işlemi sırasında oluşan borür katmanlarının kinetik özelliklerini incelemiştir. Borlama işlemi, Ekabor-1 tozlarının kullanıldığı kutu borlama yöntemiyle, 850 °C, 900 °C ve 950 °C sıcaklıklarında 2 ila 8 saat gerçekleştirilmiştir. Tabaka kalınlığı işlem süresi ve sıcaklığa bağlı olarak 3 µm ile 141 µm arasında değişmiştir. Yüksek sıcaklık ve uzun işlem süresi daha kalın borür tabakalarının oluşumuna yol açmıştır. Borür tabakasının sertliği 1600-1900 HV aralığında ölçülmüştür; bu, borlanmamış çeliğin 237 HV sertlik değerinden oldukça yüksek olduğu görülmüştür. Yüksek sıcaklık ve uzun süreli işlem, borür tabakasının homojen yapısını artırmış, çatlak oluşum riskini düşürmüştür. Borür tabakaları düzgün, kompakt çıkmıştır [51].

Özbek ve arkadaşları, çalışmalarında AISI M50 takım çeliğinin borlanması sonrası mekanik özelliklerini ve kinetik davranışını incelemişlerdir. Borlanma işlemi Ekabor-1 tozları ile 850 °C, 950 °C ve 1050 °C sıcaklıklarında, 2 ila 8 saat yapılmıştır. Borür katmanı çift fazlı (FeB ve Fe₂B) olarak tanımlanmıştır. Tabaka kalınlığı işlem süresi ve sıcaklığa bağlı olarak 6-216 µm arasında değişmiştir. Borlanmış tabakanın sertliği 1630–2040 HV arasında ölçülmüş, bu değerler borlanmamış AISI M50 çeliğine

kıyasla (297 HV) oldukça yüksektir. Aktivasyon enerjisi 282.84 kJ/mol olarak hesaplanmıştır. XRD analizlerinde FeB, Fe₂B, CrB ve Mo₂B gibi fazların oluşumu gözlemlenmiştir [22].

Özbek ve arkadaşları, çalışmalarında AISI W4 takım çeliğinin borlanma işlemi sonucunda yüzeyde oluşan mekanik özellikler incelenmiştir. Borlama işlemi, 850 °C, 950 °C ve 1050 °C sıcaklıklarında, 2, 4, 6 ve 8 saat Ekabor tozları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İşlem sonunda, çelik yüzeyinde FeB ve Fe₂B fazlarının oluştuğu tespit edilmiştir. Borlama süresi ve sıcaklığa bağlı olarak, yüzeyde oluşan borür tabakası kalınlığının 8-386 µm arasında değiştiği gözlenmiştir. Tabaka, lentiküler bir morfolojiye sahip olup üç ana bölgeye ayrılmıştır: borür tabakası, geçiş bölgesi ve çelik matrisi. Borür tabakasının sertliği, Vickers cihazıyla 0,5 ve 1 N yükler kullanılarak ölçülmüş ve 1407-2093 HV arasında değiştiği belirlenmiştir. Daha uzun borlama süreleri ve yüksek sıcaklıklar, tabaka kalınlığını artırırken, çift fazlı (FeB + Fe₂B) tabaka oluşumuna neden olduğu görülmüştür. Ancak bu, çatlakların oluşum riskini de beraberinde getirmektedir. Fe₂B fazının mekanik özellikleri endüstriyel uygulamalar için daha uygun olduğu ve tek fazlı bir yapı elde etmek için işlem sürelerinin 4 saat ile sınırlandırılması önerilmektedir [52].

Genel ve arkadaşları, çalışmalarında AISI W1 çeliğinin borlama işlemi sonucunda oluşan borür tabakasının kinetik özellikleri incelenmiştir. Borlama işlemi, 850-1050 °C aralığında 1-8 saat Ekabor-1 tozlarında gerçekleştirilmiştir. Borlama işlemi sırasında yüzeyde pürüzsüz ve kompakt bir borür tabakası oluştuğu gözlemlenmiştir. Borlama süresi ve sıcaklıkla birlikte borür tabakasının kalınlığı 8,8 ile 178,9 µm arasında değişiklik göstermiştir. Borür tabakasının sertliği 1690-1800 HV arasında ölçülmüştür. Bu değer, borlanmamış çelik matrisinin sertlik değeri olan 260 HV'den oldukça yüksektir. Sertlik, 950 °C sıcaklığına kadar artmakta, ancak bu sıcaklık değerinden sonra tane büyümesinden dolayı azalmakta olduğu görülmüştür. 950 °C sıcaklığında ve 6 saat işlem süresiyle elde edilen sertlik ve tabaka kalınlığı, endüstriyel uygulamalar için uygun görülmüştür [53].

Şen ve arkadaşları, çalışmalarında soğuk iş takım çeliklerinin borlama işlemi sonrası mekanik özelliklerini incelemiştir. Çalışmada altlık olarak düşük alaşımlı soğuk iş takım çeliği kullanılmıştır. Borlama işlemi Ekabor-1 tozları kullanılarak 1000 °C'de 2, 4 ve 6 saat boyunca yapılmıştır. Borür tabakasının dendritik (dişli) morfolojiye sahip olduğu ve üç farklı bölgeden oluştuğu tespit edilmiştir: Borür tabakası (FeB ve Fe₂B

fazları), geçiş bölgesi ve matris. Borür tabakasının kalınlığı, borlama süresine bağlı olarak 70-140 µm arasında değişmektedir. Daha uzun borlama süresi daha kalın bir borür tabaka oluşturmuştur. Borür tabakasının kırılma tokluğu, borlama süresi arttıka azalmıştır. Bu durum, daha sert olan FeB fazının artmasıyla ilişkilendirilmiştir. Borür tabakasının sertliği, elik matrisine göre oldukça yüksek olduğu görülmüştür [54].

Gutierrez-Noda ve arkadaşları, çalışmalarında yüksek hız takım eliği AISI M2'nin yüzey sertleştirme işlemi sonrası tribolojik (aşınma ve sürtünme) zelliklerini incelemiştir. AISI M2 çeliğinden 19 mm çapında ve 8 mm kalınlığında diskler hazırlanmış ve 950 °C'de 6 saat boyunca B₄ tozlarıyla borlama yapılmıştır. 950 °C'de 6 saat boyunca yapılan borlama, AISI M2 eliğinin yüzeyinde homojen bir borür tabakası oluşmasını sağlamıştır. Yüzey sertliği, matrise doğru kademeli olarak azalmakta olduğu görülmüş ve sertlik, borlanmamış çeliğe oranla 7 kat artmıştır. Borlanmış elik, borlanmamış çeliğe kıyasla daha düşük sürtünme katsayısı ve aşınma oranına sahip olduğu tespit edilmiştir [55].

Erdoğan ve arkadaşları, çalışmalarında soğuk iş takım çeliklerinin borlama işlemi mikroyapı ve korozyon davranışları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada altlık olarak yüksek alaşımlı soğuk iş takım çeliği kullanılmıştır. Borlama, katı ortamda Ekabor-2 tozları kullanılarak 850 °C ve 950 °C'de 6 saat gerçekleştirilmiştir. Oluşan bor tabakası, FeB, Fe₂B, CrB, Cr₂B ve MoB fazlarını içermektedir. Oluşan borür tabaka kalınlığı, 13,14 µm ile 120,82 µm arasında değişmiştir. Borlama işlemi, elik yüzeyinin sertliğini ve korozyon direncini önemli ölçüde artırmıştır [56].

Birlik ve arkadaşları, çalışmalarında, DIN 1.2313, DIN 1.2842, DIN 1.2738 ve DIN 1.2343 plastik kalıp eliklerinin, 850 °C, 950 °C ve 1050 °C'de 3 saat boyunca borlanmış ve mikro yapı, sertlik, faz bileşimi gibi özellikler analiz edilmiştir. Borlama sıcaklığı arttıka tabaka kalınlığı artmıştır. DIN 1.2343 eliği, yüksek Mo ve Cr içeriği nedeniyle en düşük kaplama kalınlığına sahip olmuştur. Borür tabakasında sertlik matrise doğru azalmıştır. Borlama sıcaklığının artışı, daha kalın ve düzgün bir borür tabakası oluşumuna katkı sağlamıştır. Borür tabakaları genelde testere dişi morfolojisinde oluşmuş, ancak altlık malzemedeki element miktarı arttıka yapı düzleşmiştir. Borlama işlemi, plastik enjeksiyon takım çeliklerinin yüzey sertliğini, aşınma direncini ve genel performansını önemli ölçüde iyileştirmiştir [25].

Uslu ve arkadaşları, çalışmalarında, AISI P20 çeliği yüzeyinde borür oluşumunun incelemiştir. Ekabor-2 tozları kullanılarak 800, 875 ve 950 °C'de 2, 4, 6 ve 8 saat borlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Katman kalınlığı, işlem süresi ve sıcaklığa bağlı olarak 10 ila 180 µm arasında değişiklik göstermiştir. XRD analizi, yüzeyde FeB, Fe₂B, MnB ve CrB borürlerinin oluştuğunu doğrulamıştır. Borür katman kalınlığı ile işlem süresi arasında parabolik bir ilişki olduğu tespit edilmiştir [57].

Tan ve arkadaşları, M42 yüksek hız çeliğine uygulanan kutu borlama işleminin sıcaklık ve süreye bağlı etkileri araştırmıştır. 900 °C, 950 °C ve 1000 °C'de yapılan işlemlerde, borür tabaka kalınlığının sıcaklık ve süreyle birlikte arttığı gözlemlenmiştir. SEM ve EDX analizleri, yüzeyde FeB ve Fe₂B fazlarının oluştuğunu, testere dişi şeklinde morfolojinin geliştiğini göstermiştir. En yüksek tabaka kalınlığı 71,2 µm olarak ölçülmüş; yüzey sertliğinin arttığı, iç kısımlara doğru azaldığı belirlenmiştir. Sonuçlar, uygun parametrelerle M42 çeliğinde yüksek sertlik ve aşınma direncine sahip borürlü yüzeyler elde edilebileceğini göstermektedir [58].

Oliveira ve arkadaşları, çalışmalarında AISI D2 soğuk iş takım çeliğine borlama işlemi uygulanarak yüzeyde oluşan borür tabakalarının yapısal ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Farklı bileşimlerde hazırlanmış boraks esaslı banyolar kullanılarak, 800 °C ve 1000 °C sıcaklıklarda dört saat termokimyasal borlama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Borlama banyolarına ferrotitanyum ve alüminyum gibi katkı elementleri eklenmiş, bu katkıların tabaka oluşumuna etkileri değerlendirilmiştir. Optik mikroskop, XRD, Vickers mikrosertlik testi ve GDOS (Glow Discharge Optical Spectroscopy) yöntemleriyle yapılan analizler sonucunda, oluşan borür tabakalarının kalınlıkları 30–120 µm arasında değişmiş ve sertlik değerleri 1596–1742 HV aralığında ölçülmüştür. Katkı maddelerine bağlı olarak tabakalarda ağırlıklı olarak Fe₂B veya FeB fazları gözlemlenmiştir. Özellikle 1000 °C'de yapılan işlemler, daha kalın ve bor içeriği yüksek tabakaların oluşmasını sağlamıştır. GDOS analizleri, tabakada Fe ve B oranlarının derinliğe bağlı değişimini ortaya koyarken, Cr elementi ile Fe–Cr borürlerinin de oluşabildiğini göstermiştir. Bu sonuçlar, borlama işlemiyle AISI D2 çeliğinin yüzey özelliklerinin ciddi biçimde geliştirilebileceğini ve işlem parametrelerinin, elde edilen faz yapıları ve tabaka kalınlıkları üzerinde belirleyici rol oynadığını ortaya koymaktadır [59].

Karaarslan ve arkadaşları, soğuk iş takım çeliğinden imal edilen tel çekme çenelerinin yüzey özelliklerinin borlama işlemi ile iyileştirilmesi amaçlamıştır. Çalışmanın temel

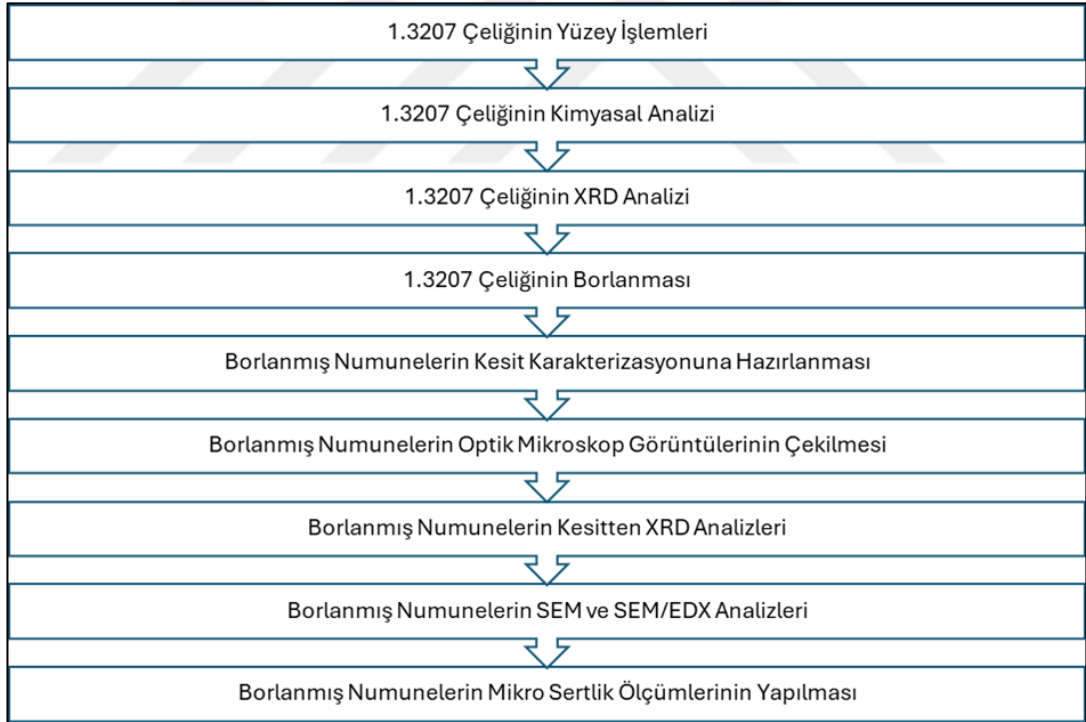
hedefi, yüksek aşınmaya maruz kalan bu çenelerin yüzey sertliği ve aşınma direncini artırarak servis ömürlerini uzatmaktır. Bu doğrultuda, AISI D3 çeliğinden üretilmiş çene numuneleri, 900 °C, 950 °C ve 1000 °C sıcaklıklarında 4 saat termokimyasal borlama işlemine tabi tutulmuştur. Borlama sonrası numunelerin yüzey morfolojileri ve mikro yapı karakterizasyonu optik mikroskop, SEM, EDS ve XRD yöntemleriyle incelenmiştir. Kaplama tabakalarının mikrosertlik dağılımları ve kırılma tokluğu değerleri değerlendirilmiş; ayrıca bilyeli disk cihazı ile aşınma testleri uygulanmıştır. Bulgular, borlama işlemiyle birlikte numunelerde homojen yapıda, çift fazlı (FeB + Fe₂B) bir borür tabakasının oluştuğunu göstermiştir. Daha yüksek işlem sıcaklıklarında kaplama kalınlığı artış göstermiştir. Ayrıca, dişli yüzeylerde, düz yüzeylere kıyasla daha kalın kaplamaların oluştuğu saptanmıştır. Elde edilen borür tabakalarının, temel malzemeye göre yaklaşık 5 ila 6 kat daha yüksek mikrosertlik değerine sahip olduğu belirlenmiştir. Aşınma testleri sonucunda, borlanmış numunelerde aşınma oranlarının yaklaşık dört kat azaldığı gözlemlenmiştir [60].

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. Giriş

Bu çalışmada 1.3207 yüksek hız çeliğinin uygun boyutlarda kesilip metalografik olarak borlama işlemine hazır hale getirildikten sonra ön karakterizasyon yapılmıştır. Daha sonra, hazırlanmış numuneler 850 °C, 925 °C ve 1000 °C sıcaklıklarda 1,5, 3, 6 ve 9 saat ticari Ekabor-2 borlama tozu kullanılarak kutu borlama işlemine tabi tutulmuştur.

Farklı sıcaklık ve sürelerde borlama işlemine tabi tutulmuş olan 1.3207 çeliğinden elde edilen numuneler çeşitli karakterizasyon yöntemleriyle incelenerek, borlama sıcaklığı ve borlama süresinin etkileri incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalara ait akış şeması Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1: Deneysel Çalışmalara Ait Akış Şeması.

3.2. Altlık Malzemenin Karakterizasyonu

Ticari olarak Sağlam Metal firmasından 100 cm x 2 cm x 1 cm boyutlarında satın alınmış olan 1.3207 çeliğinin Struers Discotom-65 kaba kesici ile dilimlenerek 2 cm x 1 cm x 5 mm boyutlarında borlama işlemine tabii tutmak üzere altlık numuneler elde edilmiştir. Bu çeliğin bilinen diğer standartlardaki isimleri: AISI M45, EN HS10-4-3-10 ve JIS: SKH57.

1.3207 çeliğinin kimyasal analizi, ARL iSpark 8860 marka optik emisyon spektrometresinde yapılmıştır. Kimyasal analiz sonucu %ağ.: C=1,27, Co=10,1, Cr=4,2, Mo=3,5, V=3,2, W=9,6.

1.3207 çeliğinin 1 kg yük altında sertlik değerleri Qness marka sertlik cihazında ölçülmüştür. Altlık malzemenin sertliği ortalama 300 HV1 olduğu görülmüştür.

Borlama işleminin verimli olması, numunelerin yüzey pürüzlülüğünün az olması ile doğru orantılıdır. Yüzey pürüzlülüğünün azaltılması amacı ile numunelere sırasıyla 240-400-600-800-1200-2500 numaralı zımparalar ile aşındırıldıktan sonra 3 µm parçacık boyutuna sahip alümina içeren süspansiyon kullanılarak parlatma işlemine tabi tutulmuştur. Parlatma sonrası numune yüzeylerinde olası Al₂O₃ birikimini engelleme amacı ile ultrason banyosunda etil alkol içerisinde 8-10 dakika bekletilerek temizleme işlemine tabi tutulduktan sonra sıcak hava akımında kurutulmuştur.

Altlık malzeme olan borlanmamış 1.3207 yüksek hız çeliğine XRD analizi, Empyrean marka cihaz ile Co-K α radyasyonu altında dakikada 2° ile 20°-100° arası taranarak yapılmıştır.

3.3. Borlama İşlemi

Borlama işleminde kullanılacak olan potalar Erdemir Ar-Ge Merkezi'nde yapılmıştır. 60 mm çapında, 100 mm uzunluğunda 8 adet 310 kalite paslanmaz çelikten boru olarak hazırlanmış ve 310 kalite paslanmaz çelikten 10 mm kalınlıkta kapak yapılmıştır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2: Borlama işleminde kullanılan potalar.

Borlama işleminde kullanılacak olan Ekabor-2 tozları, neminin alınması için vakumlu MMM-Group markalı etüvde 100 °C'de 3 saat bekletilmiştir. Metalografik numune hazırlama yöntemleriyle hazırlanan numuneler, paslanmaz çelik potalar içerisine doldurulan Ekabor-2 tozu içerisine gömülmüştür. Ardından, potaların üst kısmına Ekrit tozu yerleştirilmiş ve paslanmaz çelik kapak ile pota kapatılmıştır. Bu yöntemle, potanın içerisine doldurulan Ekabor-2 tozunun ve numunelerin hava ile temasını engellenmiş ve numunelerin yüksek sıcaklıkta oksitlenmesi önlenmiştir.

Borlama işlemi Protherm marka dijital kontrollü fırın içerisinde gerçekleştirilmiştir. Fırının ısıtma hızı 20 °C/dk olarak ayarlanmıştır. 3 farklı sıcaklık; 850, 925 ve 1000 °C ve 4 farklı sürede; 1,5, 3, 6, 9 saat borlama işlemleri yapılmıştır. Borlama işlemine hazır halde bulunan 4 pota, fırının hedef borlama işlemi sıcaklığına geldikten sonra fırın içine alınmış ve her hedef süre sonunda birer adet pota, fırın kapağı açılarak dışarı çıkarılarak havada oda sıcaklığına kadar soğutulmuştur (**Şekil 3.3**). Pota içerisinde Ekabor-2 tozuna gömülü borlanmış numuneler çıkarılarak önce bir fırça yardımı ile muhtemel bor tozları giderilmiş, daha sonra ultrasonik banyoda etil alkol kullanılarak temizlenip, hava ile kurutulmuştur.



Şekil 3.3: Havada soğutulmaya bırakılan potalar

3 farklı sıcaklık ve 4 farklı sürede toplam 12 adet borlanmış numune elde edilmiştir. Numune kodları ile borlama sıcaklık ve süreleri **Tablo 3.1**'de verilmiştir.

Tablo 3.1: Borlanmış numunelerin sıcaklık ve süreleri.

Numune Kodu	Borlama Sıcaklığı (°C)	Borlama Süresi (saat)
STA		
ST8001	850	1,5
ST8003	850	3
ST8006	850	6
ST8009	850	9
ST9001	925	1,5
ST9003	925	3
ST9006	925	6
ST9009	925	9
ST10001	1000	1,5
ST10003	1000	3
ST10006	1000	6
ST10009	1000	9

3.4. Kesit Karakterizasyon İşlemlerine Hazırlık

Borlanmış numuneler Struers Secotom-50 marka hassas kesici cihazında, borür tabaka kesiti açığa çıkacak şekilde ortasından ikiye kesilmiştir. İkiye kesilmiş olan numunelerin kesiti ortaya çıkacak şekilde soğuk reçine kalıp içerisine alınmıştır. Kalıplama işlemlerinden sonra numuneler 600, 800, 1200, 2400 numaralı SiC zımparalar ile aşındırılmıştır. Daha sonra sırasıyla 3 µm ve 1 µm boyutundaki elmas içeren solüsyon ile parlatılmıştır. SEM analizleri öncesinde, görüntü alımı esnasında şarjlanmasını önlemek amacı ile numuneler Au-Pd kaplanmıştır.

3.5. Kesit X-ışını Kırınımı Analizi

Borlama tabakasında oluşmuş olan fazları belirlemek için X-ışını kırınım analizi yapılmıştır. Bu amaçla numuneler bir tutucu içerisinde X-ışınları borlanmış tabakanın kesiti üzerine düşürülecek şekilde ayarlanmıştır. Empyrean marka cihaz ile Co-K α radyasyonu altında dakikada 2° ile 20°-100° arası taranarak yapılmıştır. Oluşan fazların tayini x'per highscore yazılımı aracılığıyla yapılmıştır.

3.6. Optik Mikroskop İncelemesi

Borlama işlemi uygulanmış numunelerin, borlama tabakasının kalınlığını belirlemek, borlama tabakasının morfolojisi incelemek, borür tabakasını ve borun altlıkla etkileşimini incelemek, eğer oluşmuş ise geçiş bölgelerini ve çökeltileri tespit etmek için ve sertlik cihazında vurulmuş olan mikrosertlik izlerinin ölçümünü yapabilmek adına mikroyapı analizleri Nikon marka optik mikroskop kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

3.7. Kesit SEM-EDS Analizleri

Borlanmış numunelerin mikroyapıları ZEISS marka SEM ile SED (İkincil elektron dedektörü) ve BSED (Geri saçılan elektron dedektörü) kullanılarak yapılmıştır. Kesit SEM analizleri ile borlama tabakasının kalınlığı, morfolojisi, oluşmuş olan gözeneklerin dağılımı, geçiş bölgesi, çökeltilerin boyutları ve mikrosertlik izlerinin ölçümü yapılmıştır. Enerji dağılımı spektroskopisi detektörü ile de elementel analizler

gerçekleştirilmiştir. EDS ile hem kaplamadaki hem de geçiş bölgesindeki yapıların elementel kompozisyonları ve dağılımları analiz edilmiştir.

3.8. Kesitten Mesafeye Bağlı Mikrosertlik Ölçümleri

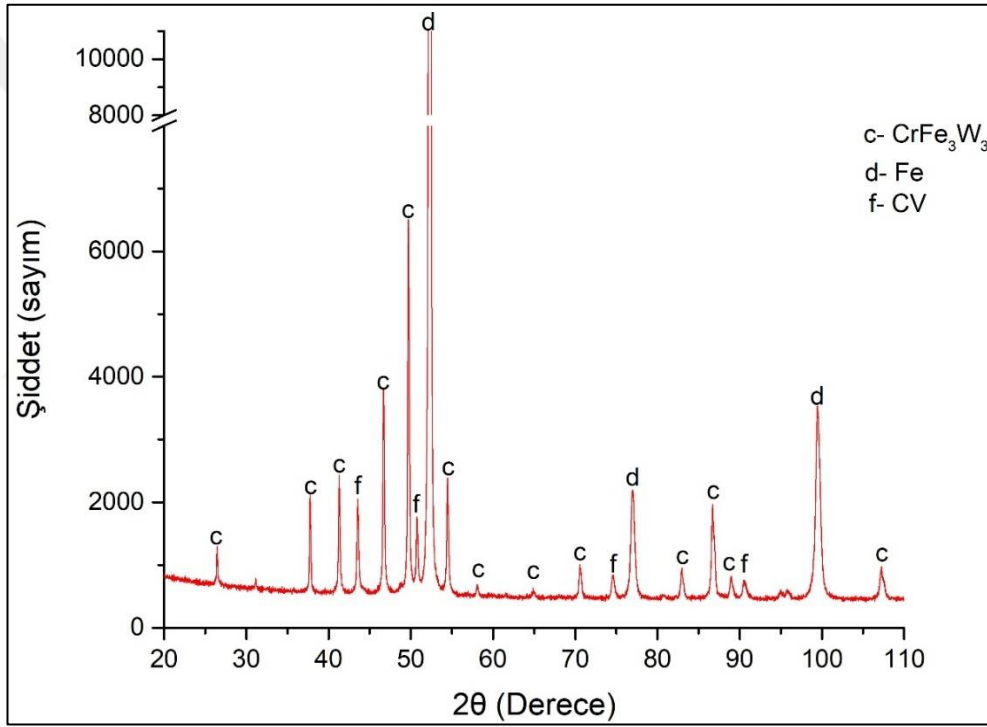
Sertlik ölçümleri, Qness QA10+ marka mikrosertlik ölçüm cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümler sırasında, kaplama tabakasından altlığa kadar olan geçişi kapsayacak şekilde, her bir noktaya 25 gramlık sabit bir yük uygulanmıştır. Bu yük seviyesi, özellikle kırılğan kaplama yapılarında çatlama ve deformasyon riskini en aza indirmek amacıyla seçilmiştir.

Uygulanan yük sonucunda oluşan izler, mikron düzeyinde olduğundan, bu izlerin köşegen uzunlukları SEM görüntüleri üzerinden manuel olarak ölçülmüş ve Vickers sertlik değerleri bu veriler doğrultusunda hesaplanmıştır. Ayrıca, her bir sertlik izinin yüzeye olan uzaklığı da belirlenerek, mesafeye bağlı sertlik dağılımını gösteren grafikler oluşturulmuştur. Bu grafikler aracılığıyla kaplama ve altlık arasındaki geçiş bölgesindeki sertlik profili detaylı bir şekilde analiz edilmiştir.

4. DENEYSEL SONUÇLAR

4.1. XRD Analiz Sonuçları

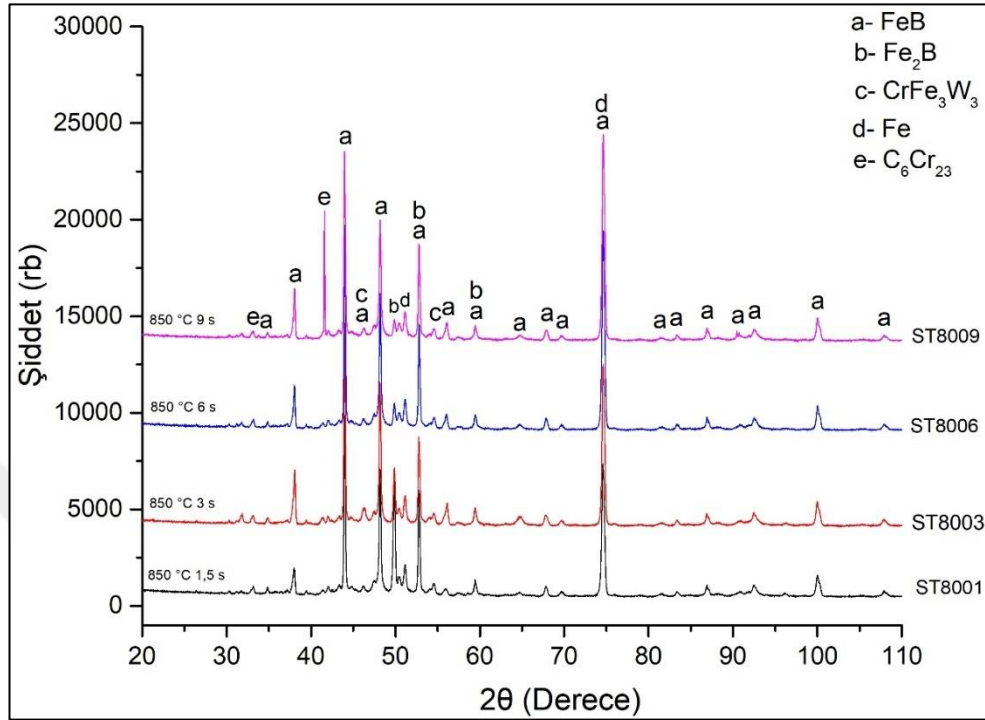
Borlama işlemi öncesi 1.3207 yüksek hız çeliğinin fazlarını ve farklı sıcaklık ve farklı sürelerde borlama işlemi sonrası oluşmuş olan fazları belirlemek adına XRD analizi yapılmıştır. Empyrean marka cihaz ile Co-K α radyasyonu altında dakikada 2° ile 20°-100° arası taranarak yapılmıştır. Oluşan fazların tayini X'per highscore yazılımı aracılığıyla yapılmıştır. Altlık malzeme olan 1.3207 çeliğinin XRD deseni **Şekil 4.1**'de verilmiştir.



Şekil 4.1: 1.3207 çeliğinin XRD deseni.

Şekil 4.1 incelendiğinde, borlama işlemi uygulanmamış 1.3207 yüksek hız çeliğinde 3 adet faz tespit edilmiştir. Bunlar; Fe, CV ve CrFe₃W₃ fazlarıdır. Herhangi bir işleme tabii tutulmamış çeliğin yüzeyinde yapılan XRD analizinde beklenildiği üzere en şiddetli piki Fe fazı vermiştir. Altlık malzemenin kimyasal bileşiminde yüksek oranda bulunan Cr, W ve V elementleri de CrFe₃W₃ ve CV fazlarını oluşturmuştur. Fe fazının en şiddetli pikininin 52.2 derecede, CrFe₃W₃ fazınının 49.7 derecede, CV fazınının ise 43.6 derecede olduğu tespit edilmiştir.

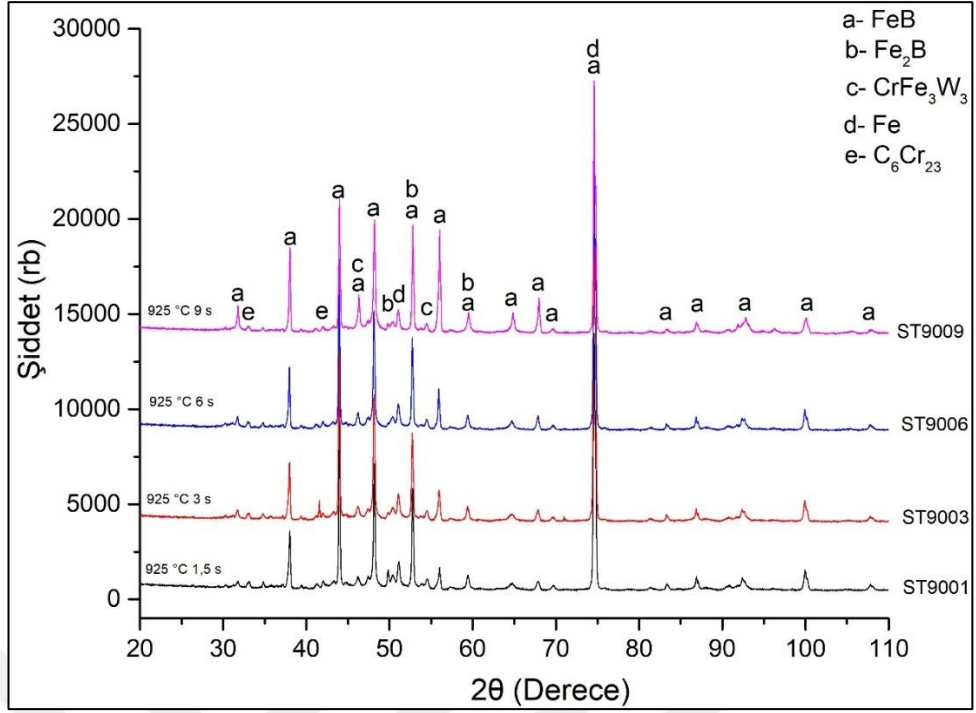
850 °C’de farklı sürelerde borlama işlemine tutulmuş numunelerin XRD desenleri Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2: 850 °C’de farklı sürelerde borlama yapılmış numunelerin XRD desenleri.

Şekil 4.2 incelendiğinde, 850 °C’de 1,5, 3, 6 ve 9 saat borlama işlemi uygulanmış numunelerde 5 farklı fazın varlığı tespit edilmiştir. Bunlar; Fe, FeB, Fe₂B, CrFe₃W₃ ve C₆Cr₂₃ fazlarıdır. FeB ve Fe₂B fazları haricindeki fazların altlık malzemedan geldiği görülmüştür. Borlama işlemi sonucunda malzeme yüzeyinde FeB ve Fe₂B fazları oluşmuştur. 850 °C’de, artan borlama işlemi süresi ile oluşan faz ve fazların piklerinde belirgin farklar gözlemlenmemiştir. Literatür araştırmalarına göre FeB fazının Fe₂B fazına göre daha sert ve gevrek olduğu bilinmektedir. 850 °C’de yapılan borlama işleminde FeB fazının daha baskın olduğu görülmektedir.

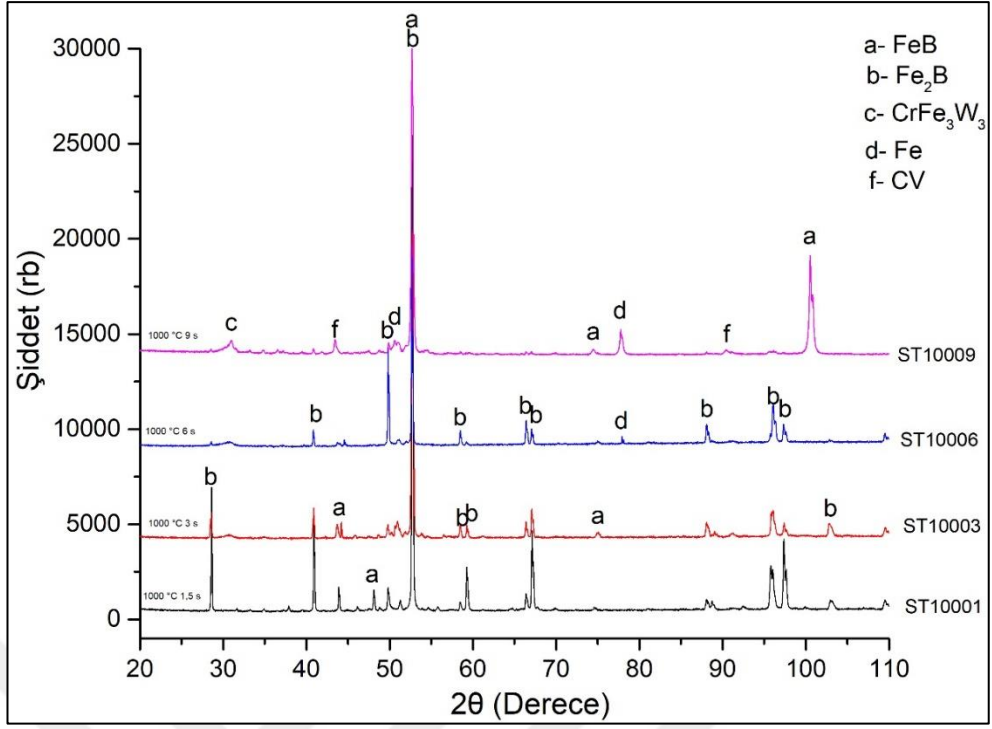
925 °C’de farklı sürelerde borlama işlemine tutulmuş numunelerin XRD desenleri Şekil 4.3’te verilmiştir.



Şekil 4.3: 925 °C’de farklı sürelerde borlama yapılmış numunelerin XRD desenleri.

Şekil 4.3 incelendiğinde, 925 °C’de 1,5, 3, 6 ve 9 saat borlama işlemi uygulanmış numunelerde 5 farklı fazın varlığı tespit edilmiştir. Bunlar; Fe, FeB, Fe₂B, CrFe₃W₃ ve C₆Cr₂₃ fazlarıdır. 850 °C’de uygulanmış olan borlanmış numunelerin XRD desenlerine benzer olduğu görülmüştür. Borlama işlem süresinin artışı ile FeB fazı piklerinin şiddetinin arttığı görülmüştür. FeB fazının Fe₂B fazına göre daha baskın olduğu tespit edilmiştir.

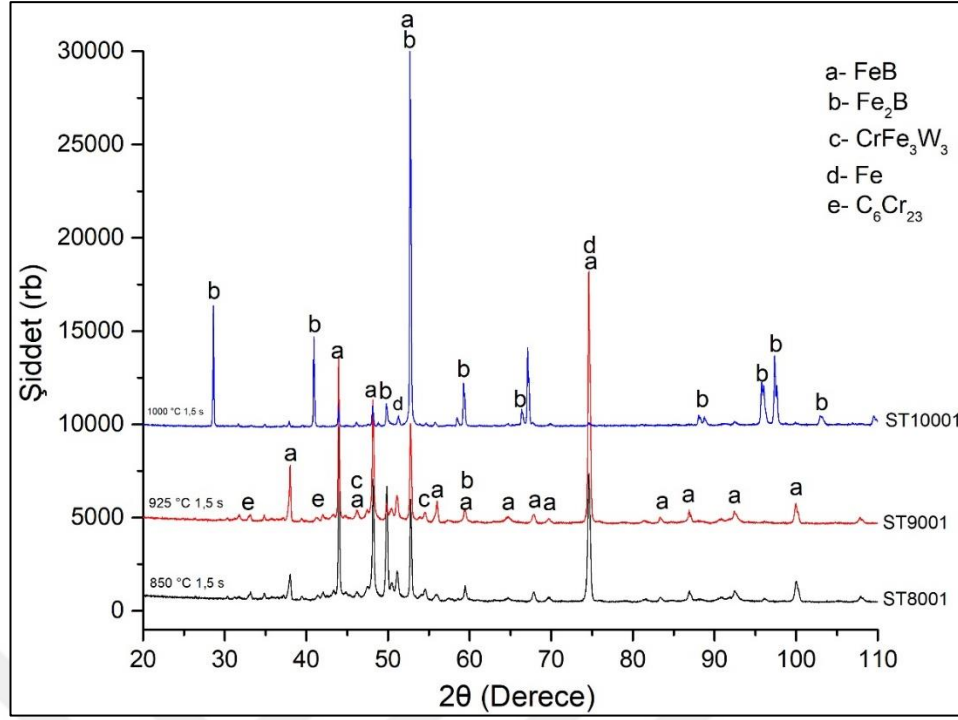
1000 °C’de farklı sürelerde borlama işlemine tutulmuş numunelerin XRD desenleri **Şekil 4.4**’te verilmiştir.



Şekil 4.4: 1000 °C’de farklı sürelerde borlama yapılmış numunelerin XRD desenleri.

Şekil 4.4 incelendiğinde, 1000 °C’de 1,5, 3, 6 ve 9 saat borlama işlemi uygulanmış numunelerde 5 farklı fazın varlığı tespit edilmiştir. Bunlar; Fe, FeB, Fe₂B, CrFe₃W₃ ve CV fazlarıdır. Borlama işlem sıcaklığının 1000 °C’lere gelmesi ile Fe₂B fazının FeB fazına göre daha baskın hale geldiği görülmüştür. Borür fazlarının azalması, altlıktan gelen fazların artması ve optik mikroskop görüntülerinden de görüldüğü gibi ST10009 numaralı numunede, kaplamanın yer yer altlık yüzeyden koptuğu düşünülmektedir.

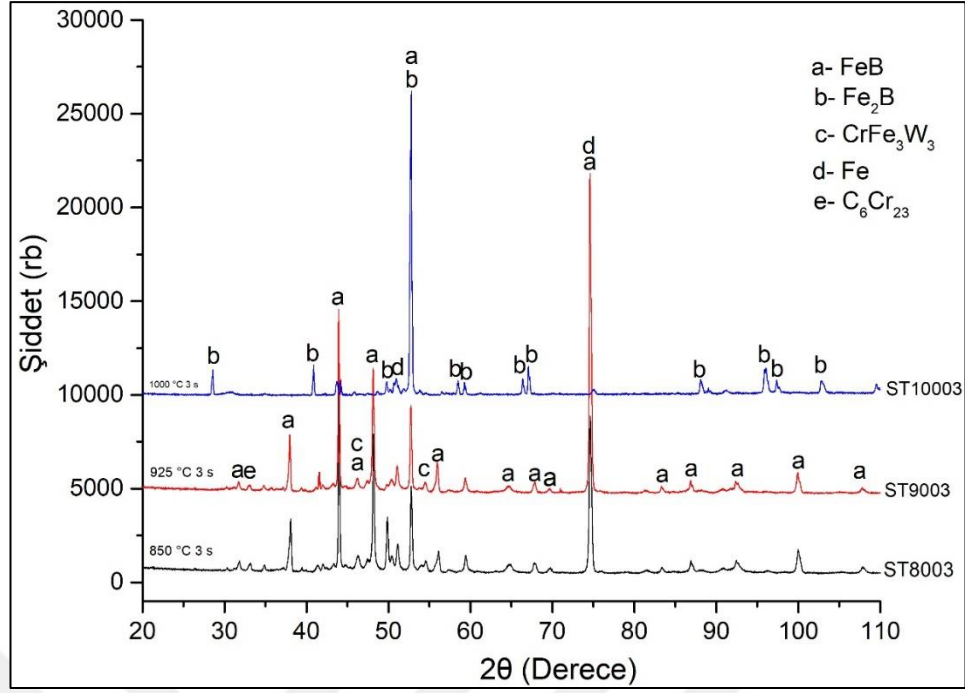
1,5 saat farklı sıcaklıklarda borlama işlemi uygulanmış numunelerin XRD desenleri **Şekil 4.5**’te verilmiştir.



Şekil 4.5: 1,5 saat farklı sıcaklıklarda borlama işlemi uygulanmış numunelerin XRD desenleri.

Şekil 4.5 incelendiğinde, 850, 925 ve 1000 °C’de 1,5 saat borlama işlemi uygulanmış numunelerde 5 farklı faz tespit edilmiştir. Bunlar; Fe, FeB, Fe₂B, CrFe₃W₃ ve C₆Cr₂₃ fazlarıdır. Borlama işlemi sıcaklığı arttıkça FeB fazlarının yerinin Fe₂B fazlarının aldığı görülmüştür. Fe₂B fazının FeB fazına oranla daha baskın hale geldiği görülmektedir. Her 3 sıcaklığa da baktığımızda, FeB ve Fe₂B fazının ortak bulunduğu 52.7 derecedeki pik en şiddetli pik olduğu görülmüştür.

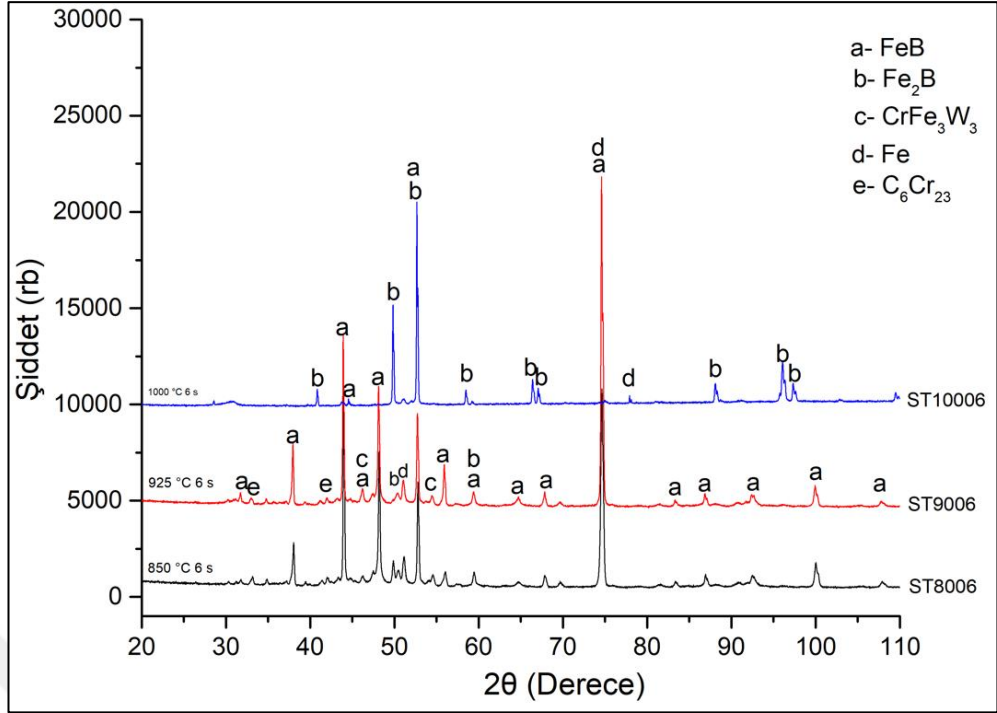
3 saat farklı sıcaklıklarda borlama işlemi uygulanmış numunelerin XRD desenleri **Şekil 4.6**’da verilmiştir.



Şekil 4.6: 3 saat farklı sıcaklıklarda borlama işlemi uygulanmış numunelerin XRD desenleri.

Şekil 4.6 incelendiğinde, 850, 925 ve 1000 °C’de 3 saat borlama işlemi uygulanmış numunelerde 5 farklı faz tespit edilmiştir. Bunlar; Fe, FeB, Fe₂B, CrFe₃W₃ ve C₆Cr₂₃ fazlarıdır. Şekil 4.5’teki XRD desenleri ile karşılaştırıldığında, bu XRD desenlerine göre de borlama işlemi sıcaklığı arttıkça FeB fazlarının yerinin Fe₂B fazlarının aldığı görülmüştür. Fe₂B fazının FeB fazına oranla daha baskın hale geldiği görülmektedir. 1000 °C borlama sıcaklığına ulaştığımızda, altlıktan gelen CrFe₃W₃ ve C₆Cr₂₃ gibi fazların yok olduğu gözlemlenmiştir.

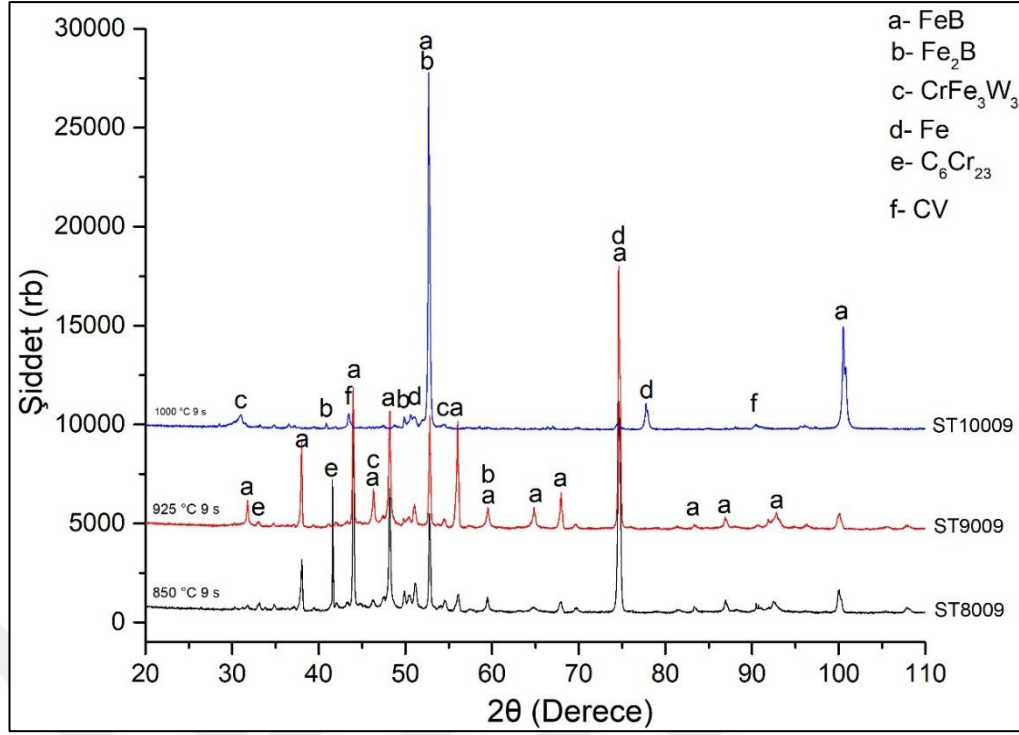
6 saat farklı sıcaklıklarda borlama işlemi uygulanmış numunelerin XRD desenleri **Şekil 4.7**’de verilmiştir.



Şekil 4.7: 6 saat farklı sıcaklıklarda borlama işlemi uygulanmış numunelerin XRD desenleri.

Şekil 4.7 incelendiğinde, 850, 925 ve 1000 °C’de 6 saat borlama işlemi uygulanmış numunelerde 5 farklı faz tespit edilmiştir. Bunlar; Fe, FeB, Fe₂B, CrFe₃W₃ ve C₆Cr₂₃ fazlarıdır. Sıcaklık arttıkça Fe₂B fazının FeB fazına oranla daha baskın hale geldiği ve altlıktan gelen fazların yok olduğu görülmüştür.

9 saat farklı sıcaklıklarda borlama işlemi uygulanmış numunelerin XRD desenleri Şekil 4.8’de verilmiştir.

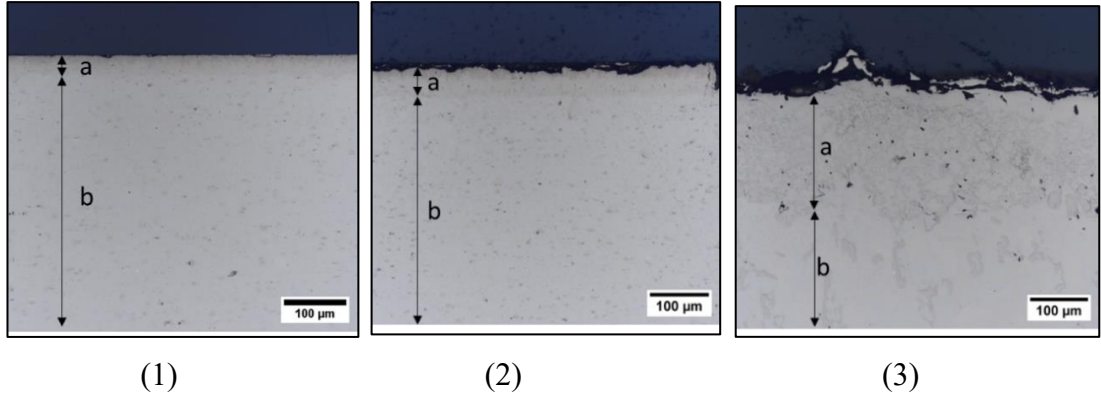


Şekil 4.8: 9 saat farklı sıcaklıklarda borlama işlemi uygulanmış numunelerin XRD desenleri.

Şekil 4.8 incelendiğinde, 850, 925 ve 1000 °C’de 9 saat borlama işlemi uygulanmış numunelerde 6 farklı faz tespit edilmiştir. Bunlar; Fe, FeB, Fe₂B, CrFe₃W₃, C₆Cr₂₃ ve CV fazlarıdır. Borür fazlarının azalması ve altlıktan gelen fazların artması gibi sebeplerden dolayı ST10009 numaralı numunede, kaplamanın yer yer altlık yüzeyden koptuğu düşünülmektedir.

4.2. Optik Mikroskop Sonuçları

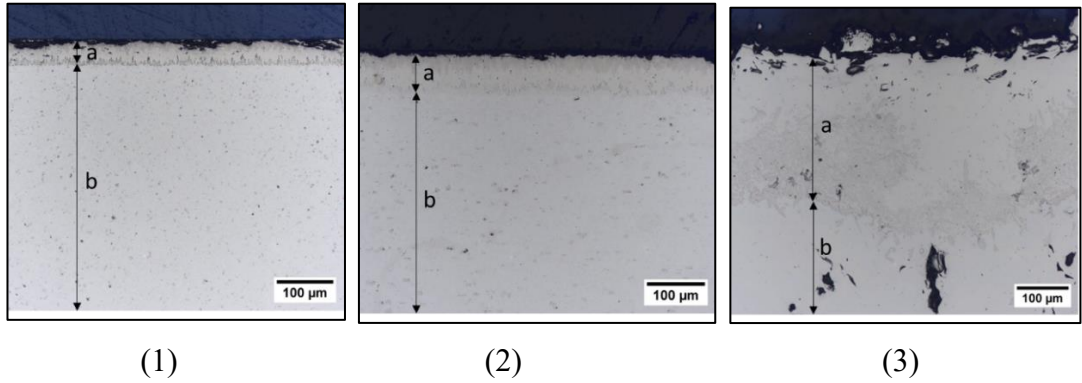
Borlama işlemi uygulanmış numunelerin, borlama tabakasının kalınlığını belirlemek, borlama tabakasının morfolojisini incelemek ve borun altlıkla etkileşiminin incelenmesi adına 12 adet borlanmış numunenin mikroyapı incelemeleri optik mikroskop kullanılarak gerçekleştirilmiştir. **Şekil 4.9**’da 1,5 saat süreyle farklı sıcaklıklarda borlanmış numunelere ait kesitten alınan optik mikroskop görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.9: Farklı sıcaklıklarda 1,5 saat borlanmış numunelerin OM görüntüleri 1) 850 °C, 2) 925 °C 3) 1000 °C.

1,5 saat süreyle 850, 925 ve 1000 °C sıcaklıklarda borlama işlemi uygulanmış numunelere ait optik mikroskop görüntüleri Şekil 4.9’da verilmiştir. ‘a’ ile gösterilen bölgeler borür tabakayı, ‘b’ ile gösterilen bölgeler ise altlık malzemeyi temsil etmektedir. Borlama süresinin sabit tutulup borlama işlem sıcaklığının yükseldiği durumda borür tabaka kalınlığının arttığı gözlemlenmiştir. Borlama işlem sıcaklığının 925 °C’den 1000 °C’ye çıkarıldığında borür tabaka kalınlığında dramatik bir artış oluşmuştur.

Şekil 4.10’da üç saat süreyle farklı sıcaklıklarda borlanmış numunelere ait kesitten alınan optik mikroskop görüntüleri verilmiştir.

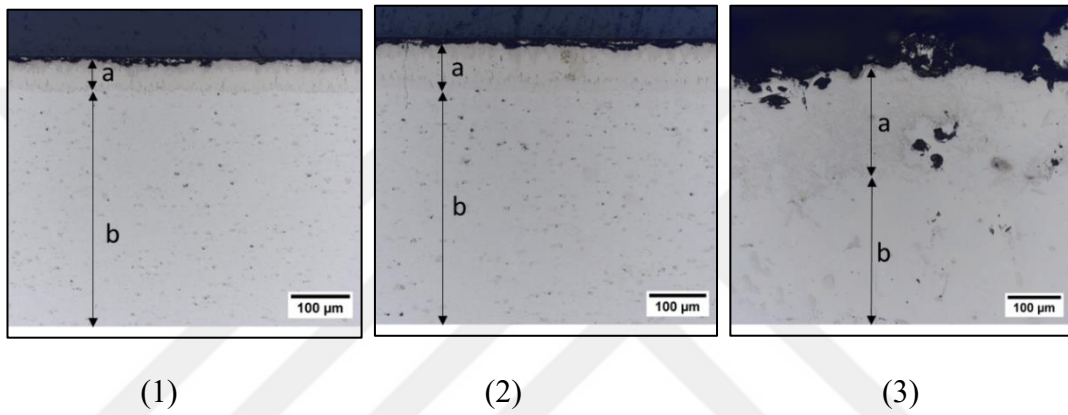


Şekil 4.10: Farklı sıcaklıklarda 3 saat borlanmış numunelerin OM görüntüleri 1) 850 °C, 2) 925 °C 3) 1000 °C.

Üç saat süreyle 850, 925 ve 1000 °C sıcaklıklarda borlama işlemi uygulanmış numunelere ait optik mikroskop görüntüleri Şekil 4.10’da verilmiştir. ‘a’ ile gösterilen

bölgeler borür tabakayı, 'b' ile gösterilen bölgeler ise altlık malzemeyi temsil etmektedir. Farklı sıcaklıklarda borlama işlemine tabi tutulan numunelerde, sıcaklık arttıkça borür tabakası kalınlığının da arttığı gözlemlenmiştir. 850 °C ve 925 °C'de gerçekleştirilen borlama işlemleri sonucunda daha homojen kaplamalar elde edilirken, 1000 °C'de üç saat boyunca borlama uygulanan numunede, kaplamada kopmalar meydana geldiği tespit edilmiştir.

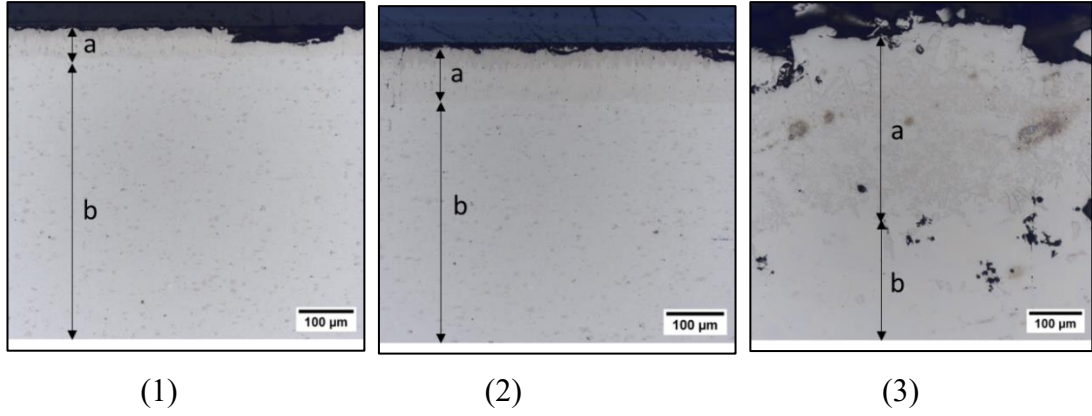
Şekil 4.11'de, 6 saat süreyle farklı sıcaklıklarda borlanmış numunelere ait kesitten alınan optik mikroskop görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.11: Farklı sıcaklıklarda 6 saat borlanmış numunelerin OM görüntüleri 1) 850 °C, 2) 925 °C 3) 1000 °C

Altı saat süreyle 850, 925 ve 1000 °C sıcaklıklarda borlama işlemi uygulanmış numunelere ait optik mikroskop görüntüleri **Şekil 4.11**'de verilmiştir. 'a' ile gösterilen bölgeler borür tabakayı, 'b' ile gösterilen bölgeler ise altlık malzemeyi temsil etmektedir. Diğer numunelerde olduğu gibi borlama sıcaklığının artışı ile borür tabaka kalınlığı artış göstermiştir. 1000 °C sıcaklıkta, 6 saat borlama işlemi görmüş numunede kaplama homojenliğinin bozulup, kaplamada kopmaların gerçekleştiği görülmüştür.

Şekil 4.12'de, 9 saat süreyle farklı sıcaklıklarda borlanmış numunelere ait kesitten alınan optik mikroskop görüntüleri verilmiştir.

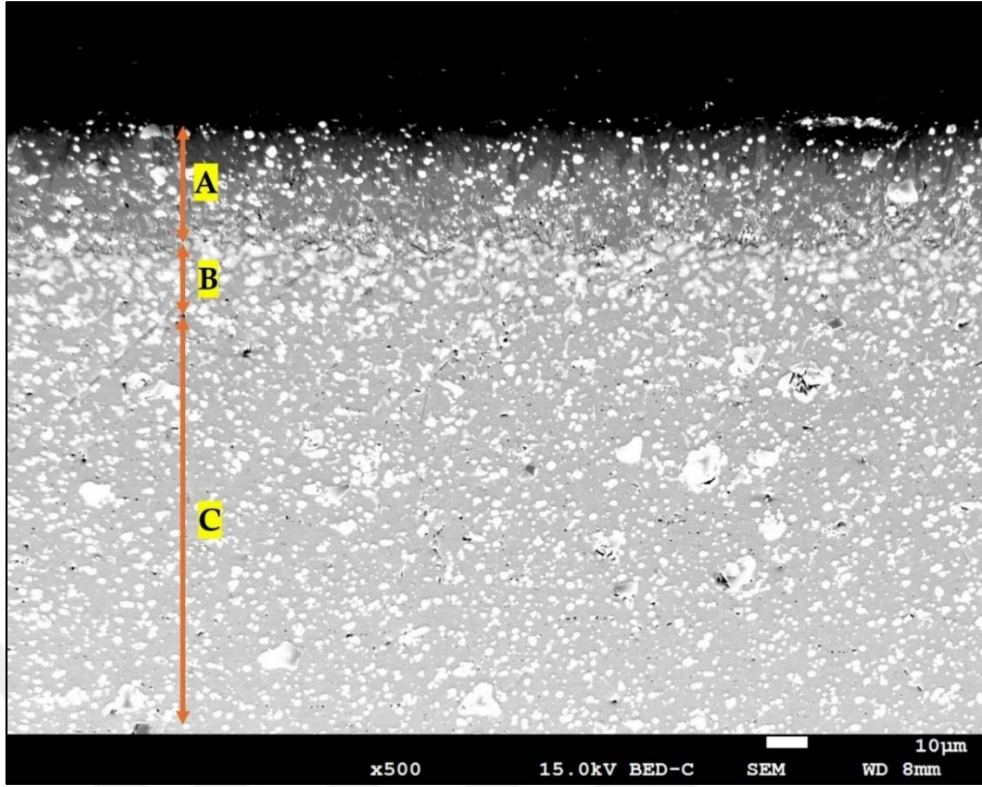


Şekil 4.12: Farklı sıcaklıklarda 9 saat borlanmış numunelerin OM görüntüleri 1) 850 °C, 2) 925 °C 3) 1000 °C

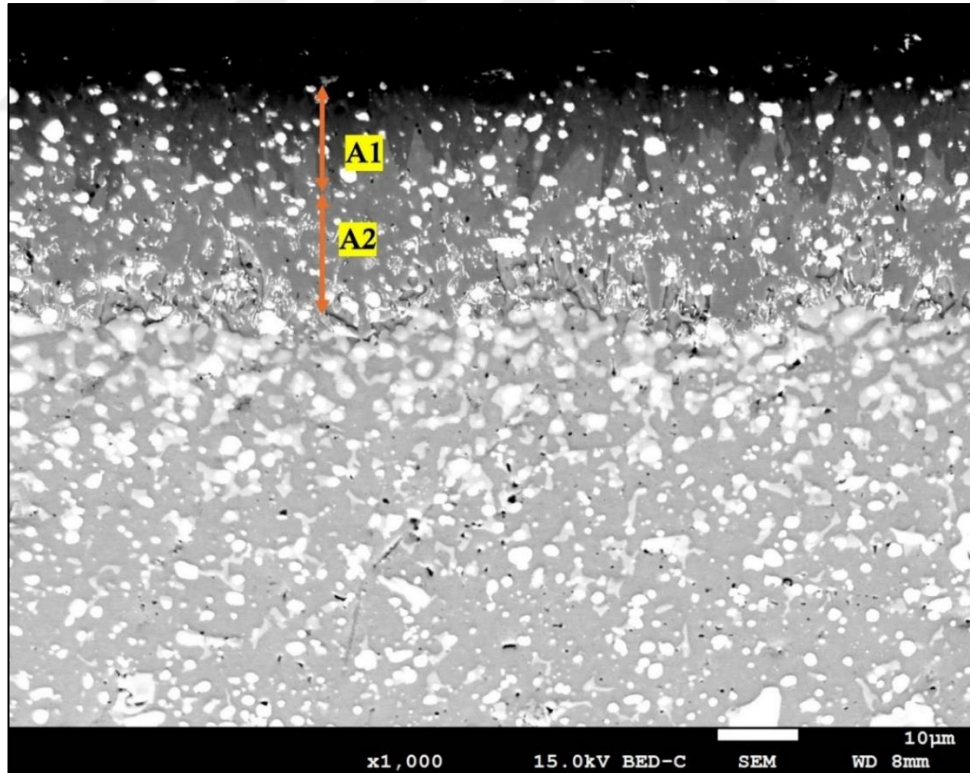
Dokuz saat süreyle 850, 925 ve 1000 °C sıcaklıklarda borlama işlemi uygulanmış numunelere ait optik mikroskop görüntüleri **Şekil 4.12**'de verilmiştir. 'a' ile gösterilen bölgeler borür tabakayı, 'b' ile gösterilen bölgeler ise altlık malzemeyi temsil etmektedir. Borlama sıcaklığının artışı ile borür tabaka kalınlığının arttığı görülmüştür. En yüksek kalınlık artışı 1000 °C'de borlama işlemi görmüş numunede olduğu görülmüştür. 1000 °C'de 9 saat boyunca borlama uygulanan numunede, kaplamada kopmalar meydana geldiği tespit edilmiştir.

4.3. SEM Analiz Sonuçları

Şekil 4.13'te 850 °C'de 1,5 saat borlama işlemi uygulanmış ST8001 numunesine ait farklı büyütme ölçeklerinde kesitten alınan SEM görüntüleri sunulmuştur. Borlanmış numunede 3 farklı bölge tespit edilmiştir: (A) bölgesi borür tabakasını, (B) bölgesi geçiş tabakasını ve (C) bölgesi ise altlık malzemeyi temsil etmektedir. Borür tabaka kendi içerisinde incelendiğinde, koyu renkli (A1) bölgesinin, ilgili literatüre göre FeB fazına, daha açık renkli (A2) bölgesinin ise Fe₂B fazına karşılık geldiği belirlenmiştir. SEM ve OM görüntüleri arasında paralellik gözlemlenmiş olup; her iki analiz sonucuna göre borür tabakada Fe₂B fazının, FeB fazına göre daha kalın olduğu ve tabaka morfolojisinin testere dişi şeklinde olduğu tespit edilmiştir.



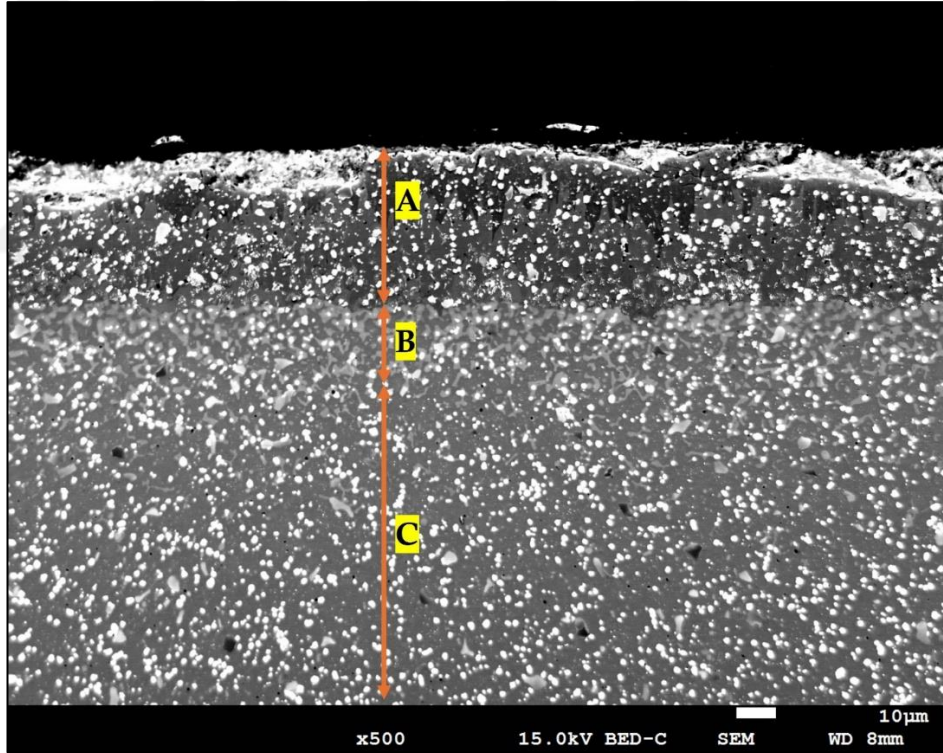
(a)



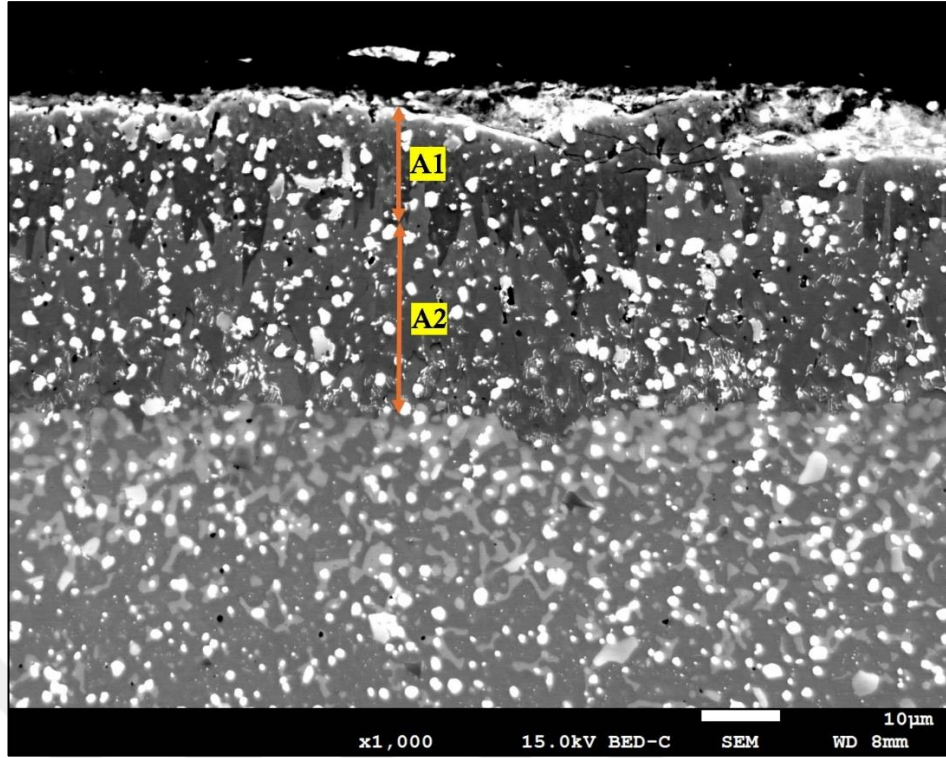
(b)

Şekil 4.13: Borlanmış ST8001 numunesinin farklı büyütmelerde kesitten alınan SEM görüntüleri; a)500X b)1000X.

Şekil 4.14'te, 850 °C'de 3 saat borlama işlemi uygulanmış ST8003 numunesine ait farklı büyütmelerde elde edilen SEM görüntüleri sunulmuştur. İncelenen borlanmış yapı üç ayrı bölgeden oluşmaktadır: (A) borür tabakası, (B) geçiş bölgesi ve (C) altlık malzeme. Borür tabakası detaylı olarak değerlendirildiğinde, koyu tonlarda görülen (A1) bölgesinin literatür verileri ve yapılan ek analizler (XRD, EDS) doğrultusunda FeB fazına karşılık geldiği, açık renkli (A2) alanın ise Fe₂B fazını temsil ettiği anlaşılmıştır. Optik mikroskop (OM) görüntüleri de SEM bulgularını desteklemekte olup, Fe₂B fazının, FeB fazına göre daha kalın bir tabaka oluşturduğu ve borür tabakasının genel olarak testere dişi benzeri bir morfolojiye sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, borür tabakası içinde az da olsa gözenekliliklerin olduğu gözlemlenmiştir.



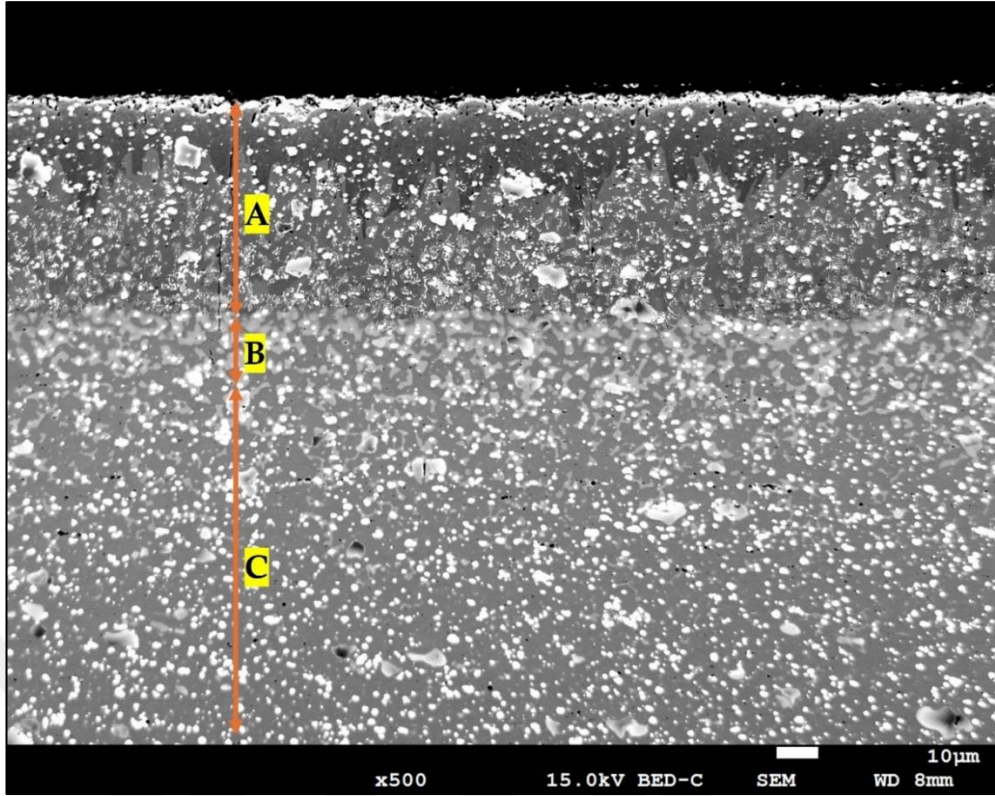
(a)



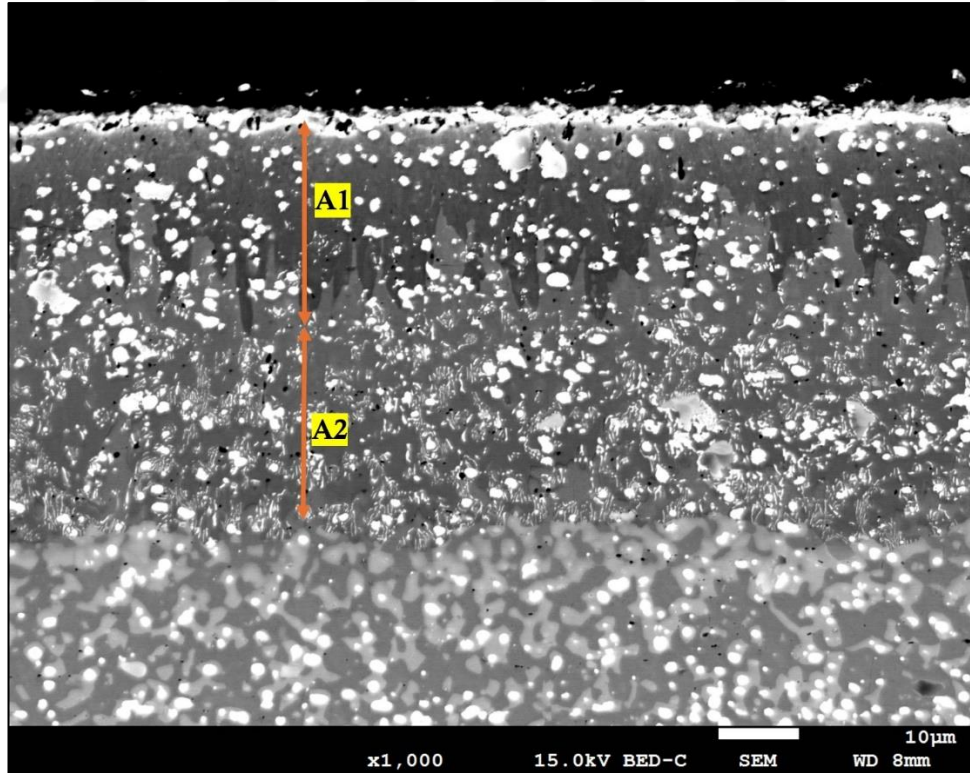
(b)

Şekil 4.14: Borlanmış ST8003 numunesinin farklı büyütmelerde kesitten alınan SEM görüntüleri; a)500X b)1000X.

Şekil 4.15'te, 850 °C sıcaklıkta 6 saat borlama işlemi uygulanmış ST8006 çeliğine ait farklı büyütmelerde elde edilen SEM görüntüleri verilmiştir. Yapılan mikroyapısal incelemeler sonucunda, borlanmış numunede üç temel bölge tanımlanmıştır: (A) yüzeyde oluşan borür tabakası, (B) bu tabaka ile altlık malzeme arasındaki geçiş bölgesi ve (C) altlık malzeme. Borür tabakasının detaylı incelenmesi sonucunda, koyu kontrastlı (A1) bölgenin, ilgili literatürdeki veriler ile uyumlu olarak ve X-Işını Difraksiyonu ile Enerji Dağılımlı Spektroskopi analizlerinden elde edilen sonuçlar doğrultusunda FeB fazına karşılık geldiği, açık renkli (A2) alanın ise Fe₂B fazını temsil ettiği belirlenmiştir. Optik mikroskop görüntüleri, bu faz dağılımını desteklemekte olup, borür tabakası içerisinde Fe₂B fazının, FeB fazına oranla daha kalın bir yapıda olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, borür tabakasının morfolojisinin testere dişi formunda geliştiği ve borür tabaka yüzeyinde gözenekliliğin arttığı tespit edilmiştir.



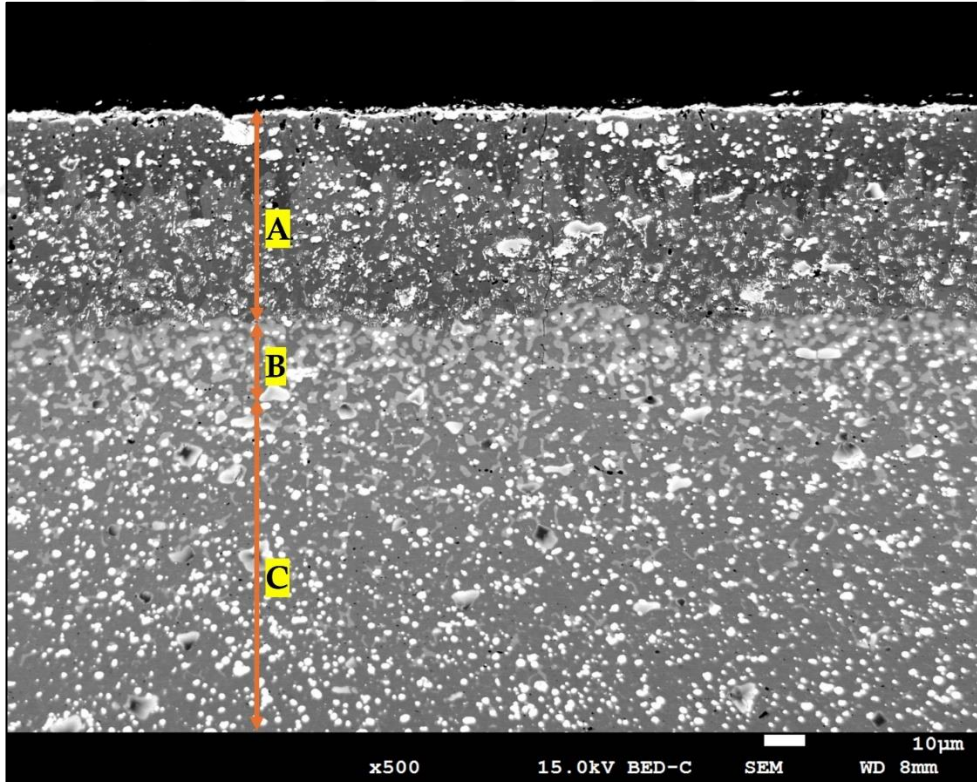
(a)



(b)

Şekil 4.15: Borlanmış ST8006 numunesinin farklı büyütmelerde kesitten alınan SEM görüntüleri; a)500X b)1000X.

Şekil 4.16'da 850 °C sıcaklıkta 9 saat borlama işlemi uygulanmış ST8009 çeliğine ait farklı büyütmelelerde elde edilen SEM görüntüleri verilmiştir. Yapılan mikroyapı analizleri sonucunda numune üç ana bölgeye ayrılmıştır: yüzeyde oluşan borür tabakası (A), bu tabaka ile esas malzeme arasındaki geçiş bölgesi (B) ve altlık malzeme (C). Borür tabakasının iç yapısı incelendiğinde, koyu tonlarda gözlemlenen (A1) bölgenin XRD ve EDS analizleri ile literatür verileri ışığında FeB fazına karşılık geldiği anlaşılmıştır. Buna karşın daha açık tonda görülen (A2) alanın Fe₂B fazı olduğu tespit edilmiştir. Beyaz ve genel olarak yuvarlak bir yapıda olan karbür oluşumları çeliğin tüm bölgelerinde bolca görülmektedir. Borür tabaka yüzeyinde az da olsa kaplamadan kopmaların gerçekleştiği görülmüştür. Borür tabaka morfolojisinin diğer numuneler ile aynı olan testere dişi şeklinde olduğu görülmüştür. Karbür yapılarının yuvarlak olan morfolojisini kaybetmeye başlayıp ağsı yapı oluşturmaya başladığı görülmüştür.



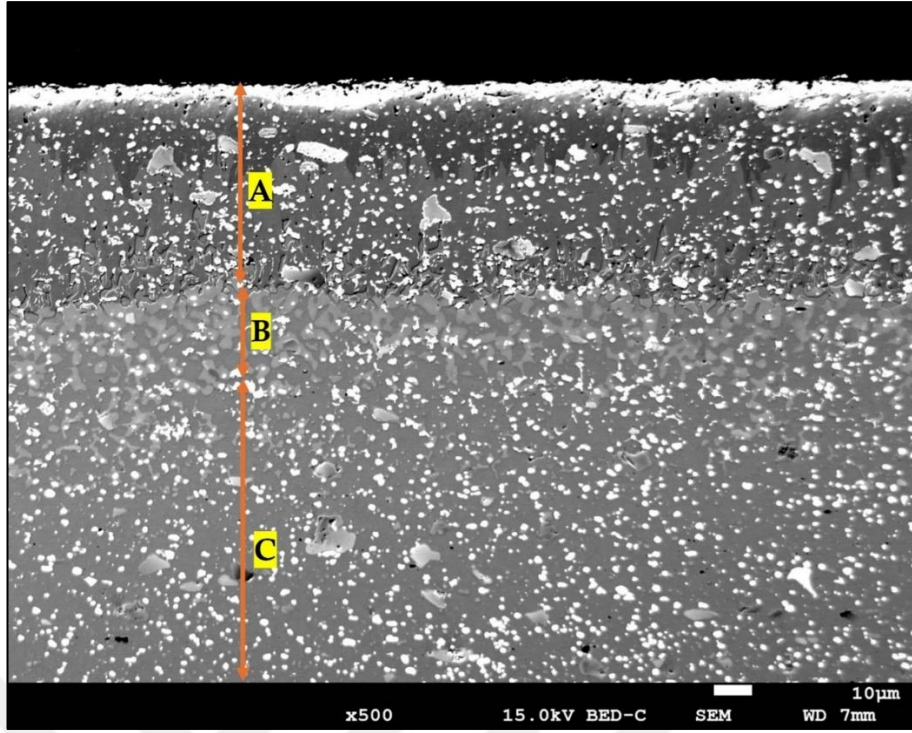
Şekil 4.16: Borlanmış ST8009 numunesinin farklı büyütmelelerde kesitten alınan SEM görüntüleri; a)500X b)1000X.



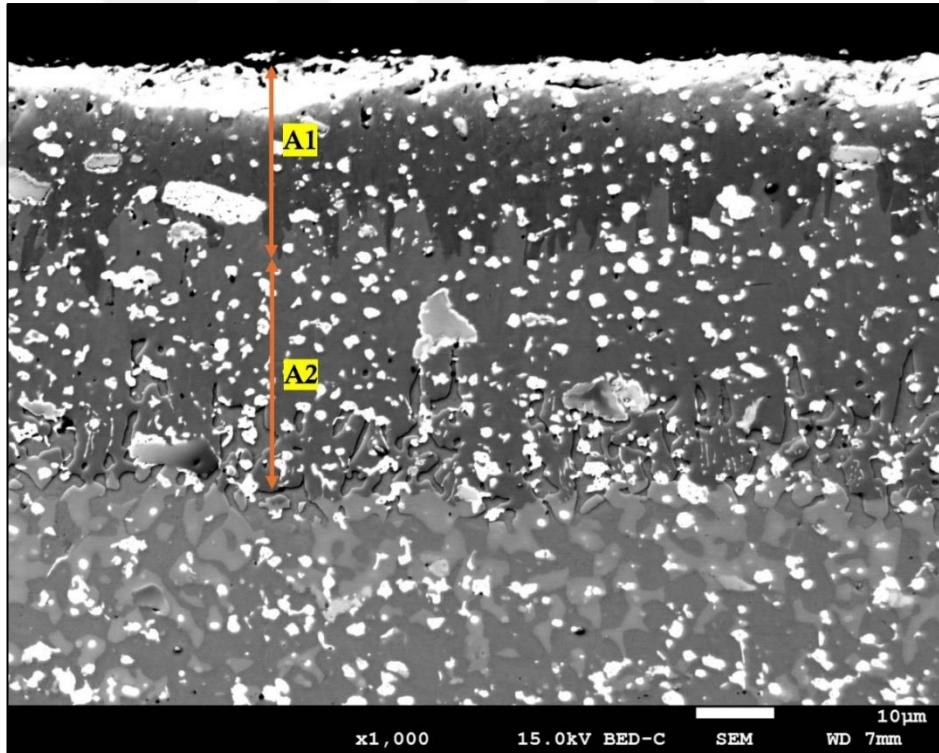
(b)

Şekil 4.16 Devam: Borlanmış ST8009 numunesinin farklı büyütmelerde kesitten alınan SEM görüntüleri; a)500X b)1000X.

Şekil 4.17’de, 925 °C sıcaklıkta 1,5 saat borlama uygulanan ST9001 çeliğine ait farklı büyütmelerde alınmış SEM görüntüleri sunulmaktadır. 925 °C sıcaklıkta 1,5 saat borlama işlemi uygulanmış ST9001 numunesine ait mikroyapı incelemeleri sonucunda, 850 °C’de borlanan numunelerde gözlemlenen yapısal karakteristiklerin büyük ölçüde korunduğu belirlenmiştir. SEM görüntüleri doğrultusunda, yüzeyde borür fazından oluşan bir tabaka (A), onun altında geçiş bölgesi (B) ve devamında altlık malzeme (C) olmak üzere üçlü bir yapı gözlenmiştir. Borür tabakasının iç yapısı yine iki ayrı fazdan oluşmakta olup; koyu tonlu alanların (A1) FeB, açık renkli bölgelerin (A2) ise Fe₂B fazını temsil ettiği belirlenmiştir.



(a)

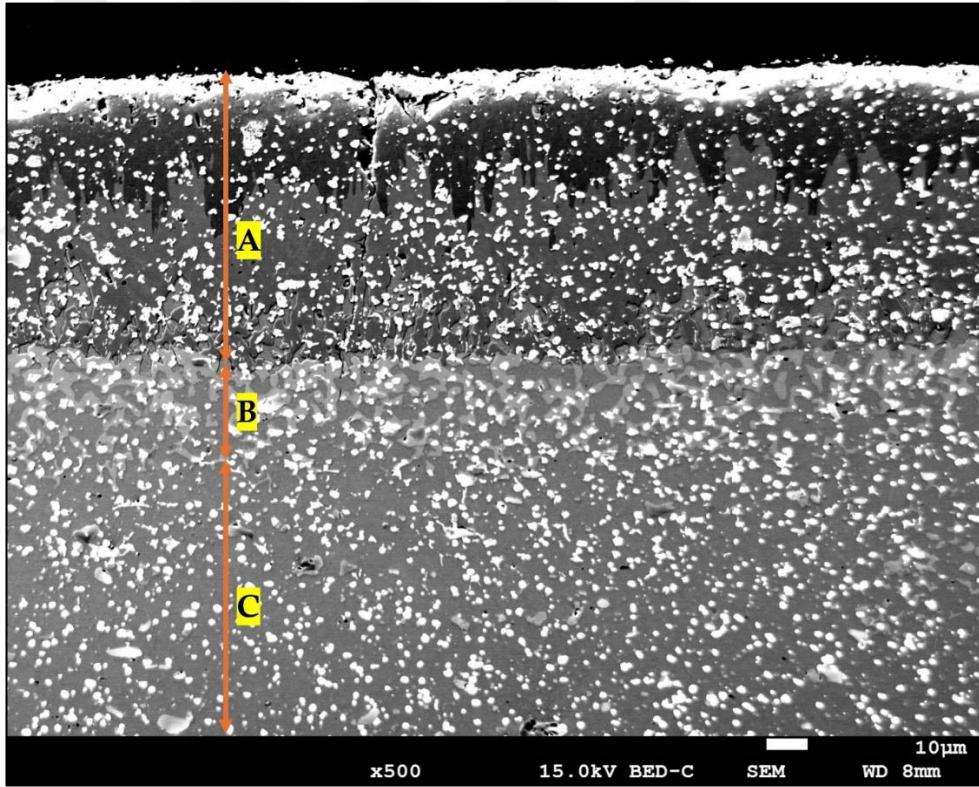


(b)

Şekil 4.17: Borlanmış ST9001 numunesinin farklı büyütmelerde kesitten alınan SEM görüntüleri; a)500X b)1000X.

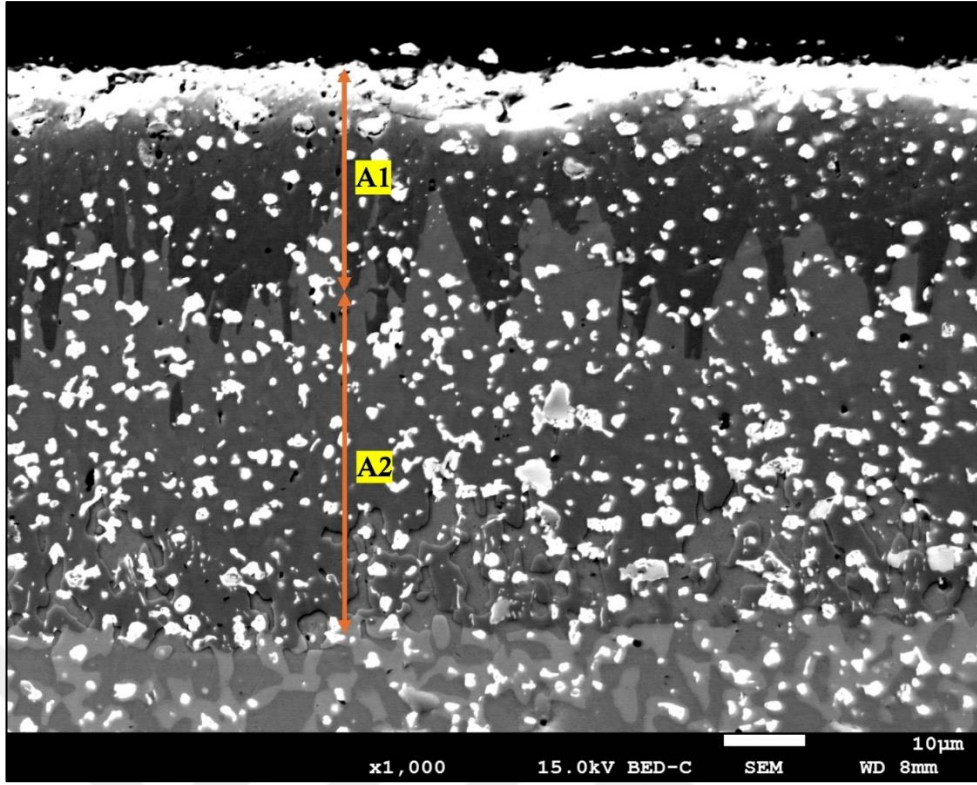
Şekil 4.18'de 925 °C sıcaklıkta 3 saat borlama işlemi uygulanmış ST9003 çeliğine ait farklı büyütmelerde elde edilen SEM görüntüleri verilmiştir. Yapılan mikroyapı analizleri, bu sıcaklık ve süre koşullarında borlanan numunelerde, 850 °C'de borlanan örneklerde gözlemlenen yapısal özelliklerin büyük oranda devam ettiğini göstermektedir.

SEM incelemeleri sonucunda, yüzeyde borür fazlarından oluşan bir tabakanın (A), onun altında bir geçiş bölgesinin (B) ve en altta ise çeliğin orijinal mikroyapısını koruyan altlık malzemenin (C) yer aldığı üç katmanlı bir yapı belirlenmiştir. Borür tabakası kendi içerisinde iki ayrı faz içerdiği izlenimini vermektedir; bu fazlardan koyu tonlu alanlar (A1) FeB fazına, daha açık tonlu bölgeler ise (A2) Fe₂B fazına karşılık gelmektedir. Borür tabakasının testere dişi morfolojisine sahip olduğu görülmüştür. Termal gerilimlerden kaynaklı olarak ufak çatlak başlangıçları görülmüştür.



(a)

Şekil 4.18: Borlanmış ST9003 numunesinin farklı büyütmelerde kesitten alınan SEM görüntüleri; a)500X b)1000X.

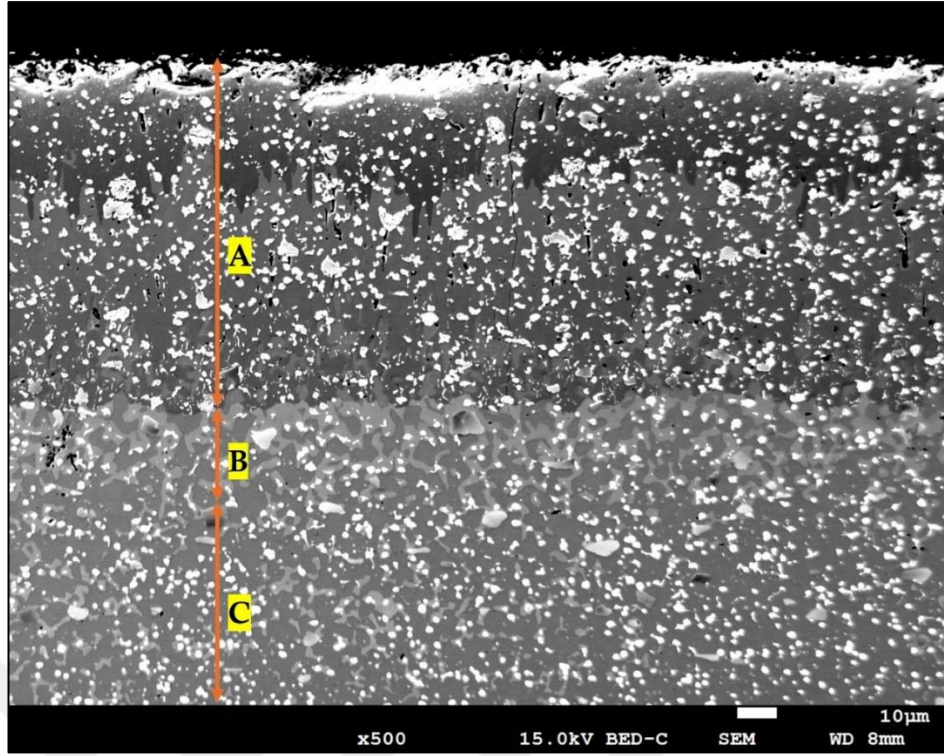


(b)

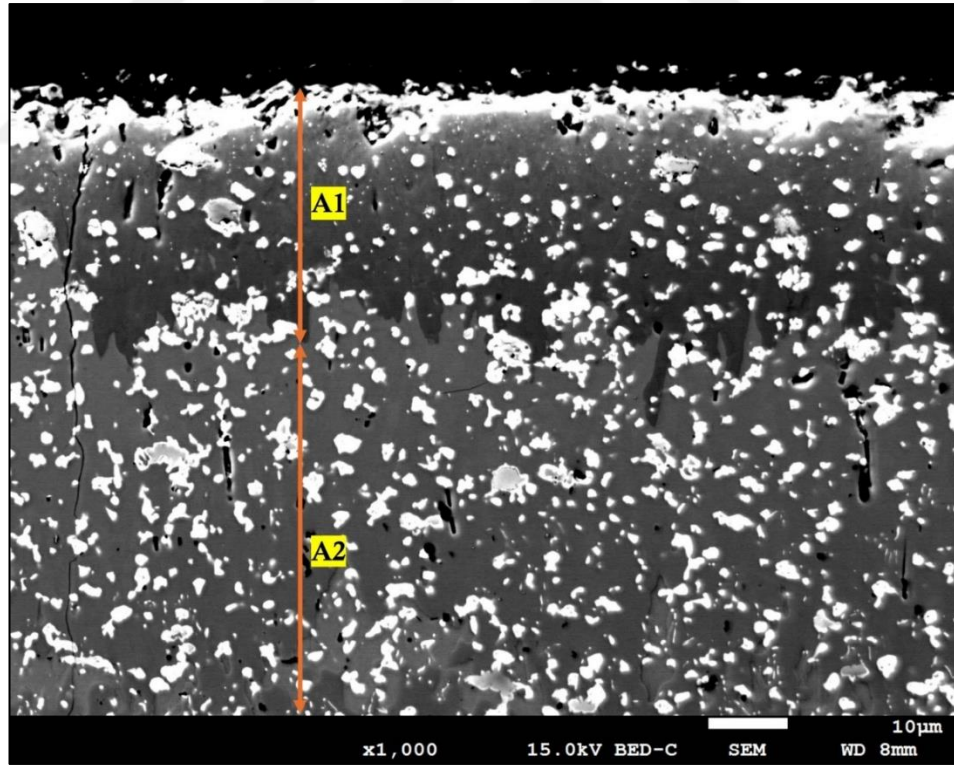
Şekil 4.18 Devam: Borlanmış ST9003 numunesinin farklı büyütme oranlarında kesitten alınan SEM görüntüleri; a) 500X b) 1000X.

Şekil 4.19’da sunulan SEM görüntüleri, 925 °C’de 6 saat boyunca borlama işlemi uygulanmış ST9006 çeliğine ait olup, farklı büyütme oranlarında elde edilmiştir.

SEM incelemeleri, yüzeyde üç katmanlı bir yapının oluştuğunu göstermiştir. En üstte borür fazlarından oluşan bir tabaka (A), bunun altında bir geçiş bölgesi (B) ve en altta ise orijinal çelik mikroyapısını koruyan ana malzeme (C) yer almaktadır. Borür tabakası, kendi içinde farklı fazları barındırıyor gibi görünmektedir: koyu tonlarda izlenen alanlar (A1) FeB fazını, açık tonlarda gözlenen bölgeler ise (A2) Fe₂B fazını işaret etmektedir. Ayrıca, bu tabakanın karakteristik olarak testere dişi benzeri bir morfolojiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Yüksek sıcaklık nedeniyle oluşan termal gerilmeler sonucu, yüzeyde küçük çaplı çatlak başlangıçlarının meydana geldiği ve yüzeyde de kopmaların başladığı tespit edilmiştir. Ayrıca borür tabaka üzerinde gözeneklerin arttığı görülmüştür.



(a)

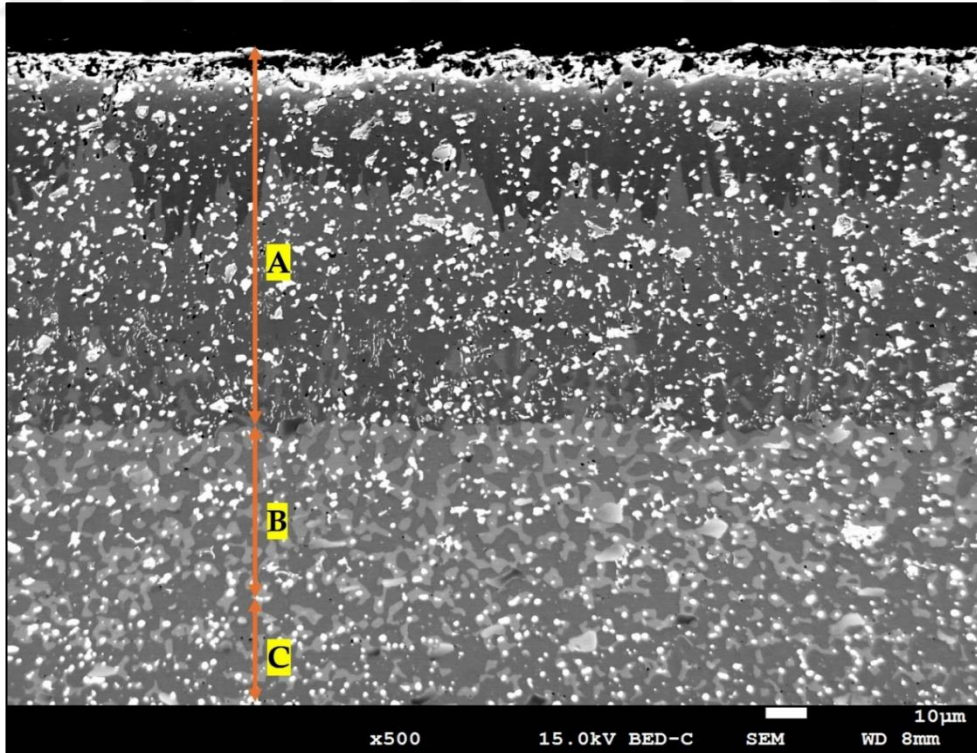


(b)

Şekil 4.19: Borlanmış ST9006 numunesinin farklı büyütmelerde kesitten alınan SEM görüntüleri; a)500X b)1000X.

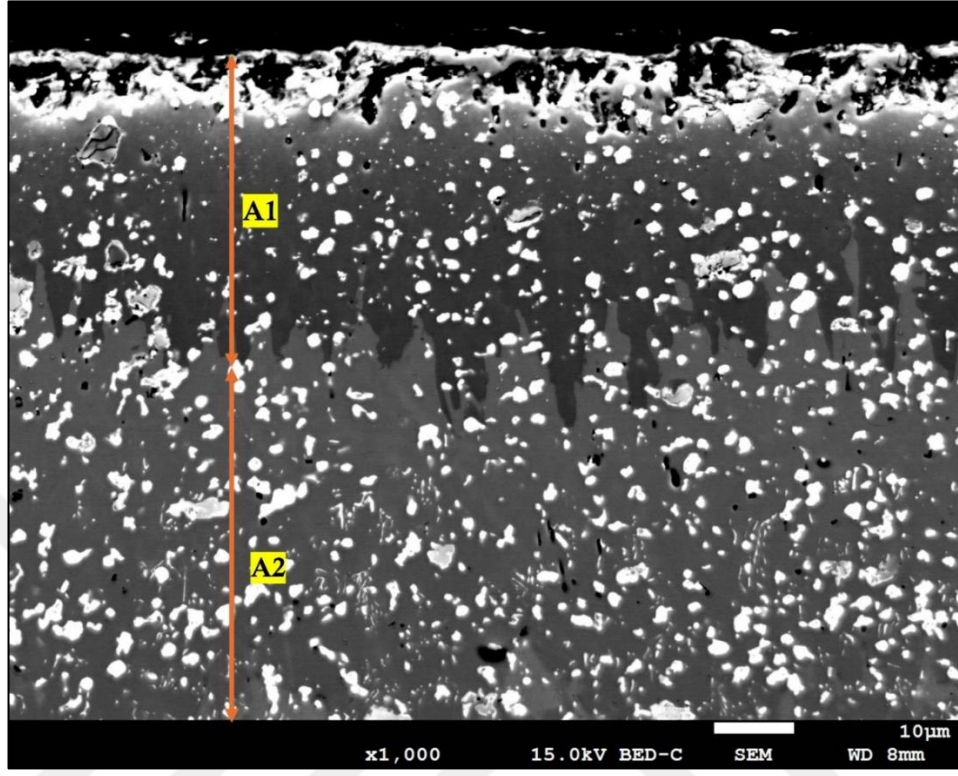
Şekil 4.20'de, 925 °C sıcaklıkta 9 saat borlama işlemine tabi tutulan ST9009 çeliğine ait, farklı büyütmelerle elde edilmiş SEM görüntüleri sunulmaktadır. Yapılan mikroyapısal değerlendirmeler, bu işlem koşullarında oluşan yapıların, 850 °C'de borlanan numunelerde gözlenen mikroyapısal özelliklerle büyük ölçüde benzerlik gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Gerçekleştirilen taramalı elektron mikroskobu incelemeleri sonucunda, yüzeyden itibaren üçlü bir tabaka yapısı saptanmıştır. Bu yapı; en üstte borür fazlarının yer aldığı tabaka (A), onun altında bu faz ile ana malzeme arasında geçiş özelliği gösteren bir bölge (B) ve en altta ise çeliğin orijinal mikroyapısını koruyan altlık malzeme (C) olmak üzere sınıflandırılmıştır. Borür tabakasının, iç yapısında iki farklı faz içerdiği izlenimi edinilmiştir. Bu fazlardan koyu kontrastlı alanların (A1) FeB fazına, açık kontrastlı bölgelerin ise (A2) Fe₂B fazına karşılık geldiği değerlendirilmiştir. Ayrıca, borür tabakasının karakteristik olarak testere dişi şeklinde bir morfolojik yapıya sahip olduğu ancak bu testere dişlerinin matrise doğru daha kalın şekilde uzandığı görülmüştür. ST8009 numunesine benzer şekilde, borür tabakadaki karbür fazının yuvarlak morfolojisinin dağılmaya başlayıp ağsı yapıya dönüştüğü görülmüştür.



(a)

Şekil 4.20: Borlanmış ST9009 numunesinin farklı büyütme oranlarında kesitten alınan SEM görüntüleri; a)500X b)1000X.

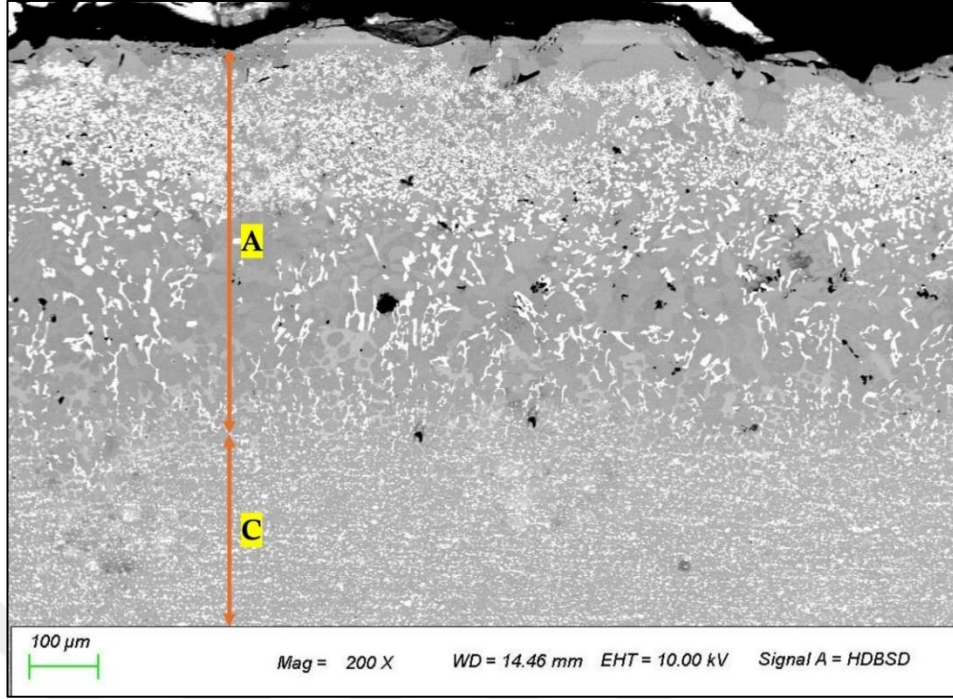


(b)

Şekil 4.20 Devam: Borlanmış ST9009 numunesinin farklı büyütme oranlarında kesitten alınan SEM görüntüleri; a)500X b)1000X.

Şekil 4.21’de, 1000 °C sıcaklıkta 1,5 saat borlama işlemine tabi tutulan ST10001 çeliğine ait, elde edilmiş SEM görüntüsü verilmiştir.

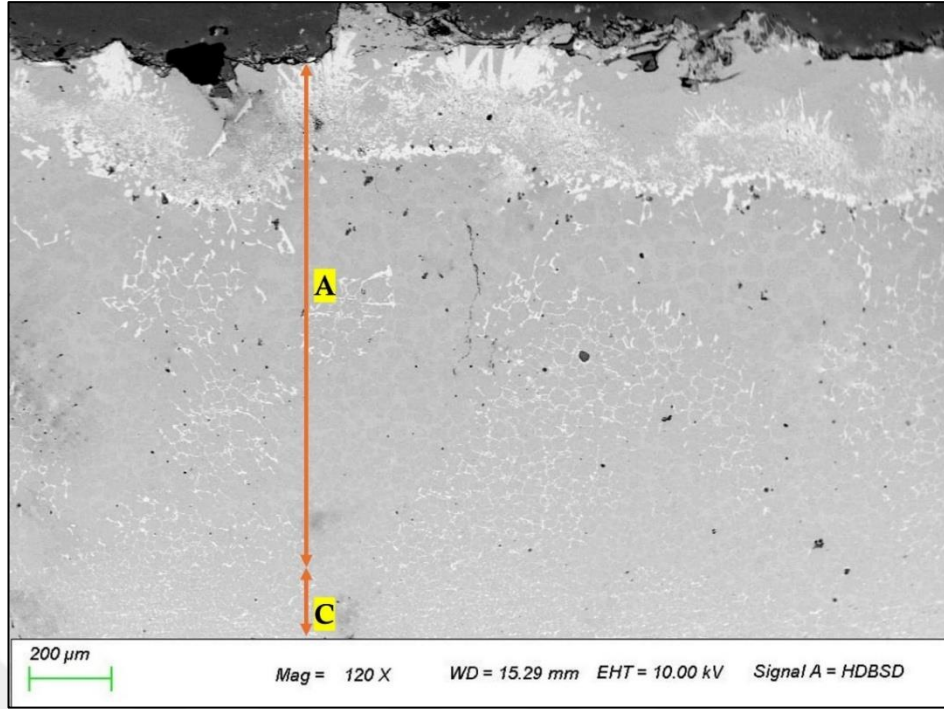
850 ve 925 °C sıcaklıkta borlama işlemi görmüş numunelerden farklı olarak, bu numunede 3 yerine 2 farklı tabaka görülmüştür. Bu yapı; en üstte borür fazlarının yer aldığı tabaka (A) ve en altta ise çeliğin orijinal mikroyapısını koruyan altlık malzeme (C) olmak üzere sınıflandırılmıştır. Geçiş bölgesine rastlanılmamıştır. Ayrıca borür tabakada FeB ve Fe₂B fazlarının ayrıştığına yönelik renk farklılıkları gözlemlenmemiştir. Borür tabaka kalınlığının 850 ve 925 °C sıcaklıkta borlama işlemi görmüş numunelere oranla çok daha fazla arttığı görülmüştür. Numune yüzeyinde belirgin kopmaların yaşandığı görülmüştür. Karbürlerin yüzeyde tarafında daha küçük ve sık şekilde yoğunlaşmış, matrise ilerledikçe sıklığının azalması ince bir şekilde matrise doğru uzadığı görülmüştür.



Şekil 4.21: Borlanmış ST10001 numunesinin kesitten alınan SEM görüntüsü.

Şekil 4.22’de, 1000 °C sıcaklıkta ve 3 saatlik işlem süresiyle borlanmış ST10003 çeliğine ait SEM görüntüsü yer almaktadır. Daha düşük sıcaklıklarda (850 °C ve 925 °C) borlama uygulanmış örneklerle kıyaslandığında, bu numunede mikroyapısal olarak farklı bir tabakalaşma gözlemlenmiştir. İnceleme sonucunda, örnekte yalnızca iki ana bölgenin ayırt edilebildiği belirlenmiştir: yüzeyde borür fazlarının oluşturduğu tabaka (A) ve bu tabakanın altında, orijinal çelik mikroyapısının korunduğu altlık malzeme (C). Bu örnekte önceki sıcaklıklarda görülen geçiş bölgesine rastlanmamıştır.

Ayrıca, borür tabakası içerisinde FeB ve Fe₂B fazlarının ayırt edilmesine olanak tanıyacak belirgin renk kontrastları tespit edilememiştir. Bununla birlikte, borür tabaka kalınlığının, daha düşük sıcaklıklarda işleme tabi tutulmuş numunelere kıyasla önemli ölçüde arttığı gözlenmiştir. Yüzey morfolojisinde ise borlama sonrası oluşan belirgin kopmalar dikkate değerdir. Yüzeye yakın bölgelerde karbür oluşumlarının daha küçük boyutlarda ve yoğun şekilde dağıldığı, matrise doğru ilerledikçe ise bu yapıların seyrekleşerek tane sınırlarına çökelediği tespit edilmiştir.

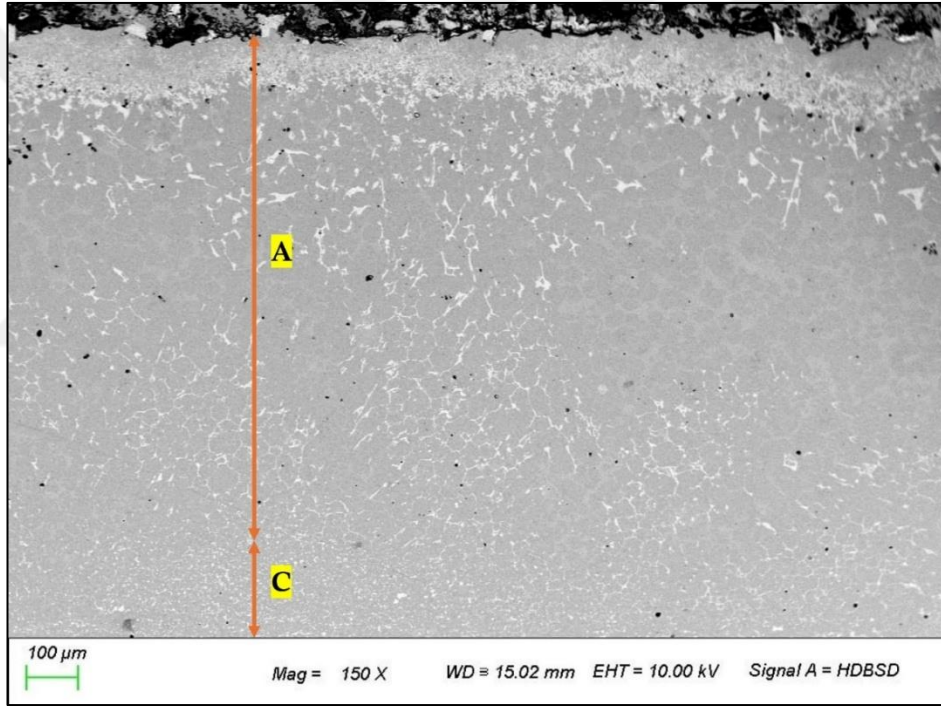


Şekil 4.22: Borlanmış ST10003 numunesinin kesitten alınan SEM görüntüsü.

Şekil 4.23'te yer alan SEM görüntüsü, 1000 °C sıcaklıkta ve 6 saat borlama işlemine tabi tutulan ST10006 çeliğine ait mikroyapısal özellikleri ortaya koymaktadır. Önceki sıcaklıklarda gözlenen üçlü katman yapısı (borür tabakası, geçiş bölgesi ve altlık malzeme) bu numunede yerini iki tabakalı bir yapıya bırakmıştır. Söz konusu yapı; yüzeyde borür fazlarının yer aldığı üst tabaka (A) ile, bunun altında yer alan ve çeliğin orijinal mikroyapı özelliklerini büyük ölçüde koruyan altlık malzeme (C) olarak tanımlanmıştır. Bu örnekte geçiş bölgesi karakteristiği taşıyan bir ara yapı tespit edilememiştir.

Borür tabakasının iç yapısına ilişkin yapılan incelemelerde, daha önceki sıcaklıklarda oluşan FeB ve Fe₂B fazlarının kontrast farklılıklarıyla ayırt edilebildiği durumların aksine, bu örnekte söz konusu faz ayrımlarını net biçimde ortaya koyacak herhangi bir renk veya ton farkı gözlenmemiştir. Bu durumun yüksek sıcaklık ve işlem süresi nedeniyle fazlar arası geçişlerin belirginliğini yitirmesinden kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Buna ek olarak, borür tabakasının kalınlığının, daha düşük sıcaklıklarda borlama uygulanmış örneklerle kıyaslandığında, gözle görülür ölçüde arttığı belirlenmiştir. Artan sıcaklık ve sürenin, bor atomlarının difüzyonunu hızlandırarak tabaka kalınlığını önemli ölçüde artırdığı görülmüştür.

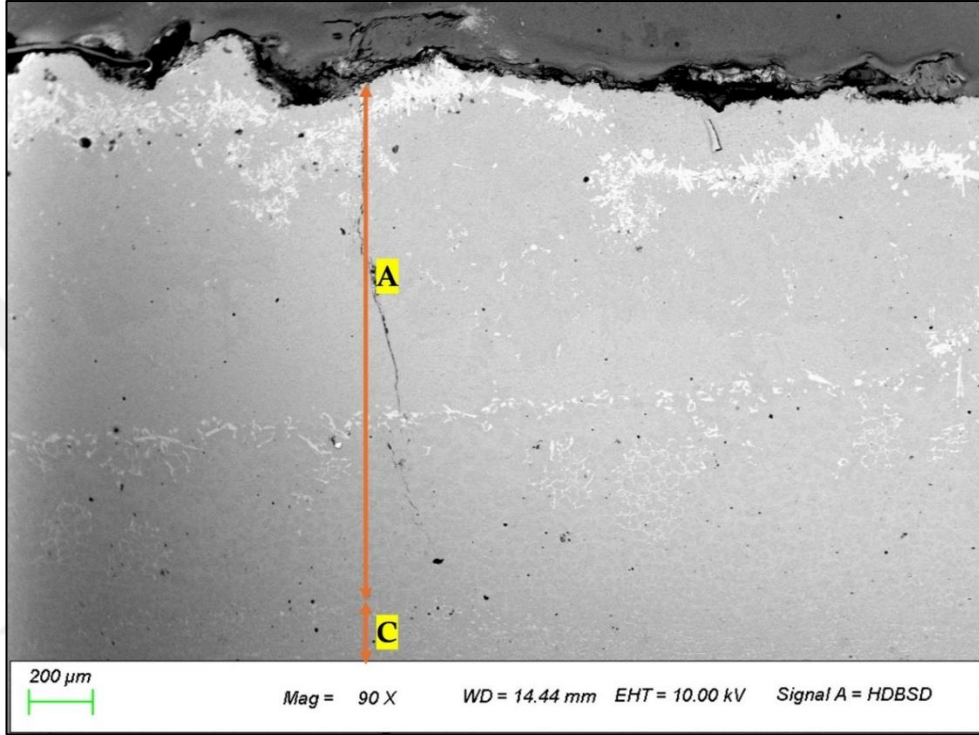
SEM görüntüleri ayrıca, yüzey bölgesinde meydana gelen yapısal bozulmalara da dikkat çekmektedir. Borlama işlemi sonucunda, özellikle yüzeyde keskin kenarlı ve düzensiz morfolojiler ile karakterize edilen belirgin kopmalar ve yüzey pürüzlülüğü olduğu gözlemlenmiştir. Bu tür bozulmaların, yüksek sıcaklık kaynaklı termomekanik gerilmeler veya borür tabakasının gevrek yapısı nedeniyle meydana gelmiş olduğu bilinmektedir. Diğer yandan, karbür yapılarının dağılımı incelendiğinde, yüzeye yakın bölgelerde daha küçük boyutlarda ve yüksek yoğunlukta bir karbür oluşumu gözlenmiştir; bu yapıların çelik matrisine doğru ilerledikçe hem boyut hem de yoğunluk açısından azalarak daha seyrek ve uzamış bir form kazandığı belirlenmiştir. Matrise doğru karbürlerin tane sınırlarında olduğu görülmüştür.



Şekil 4.23: Borlanmış ST10006 numunesinin kesitten alınan SEM görüntüsü.

Şekil 4.24'te, 1000 °C sıcaklıkta ve 9 saat borlama işlemine tabi tutulmuş ST10009 çeliğine ait SEM görüntüsü verilmiştir. Mikroyapısal incelemeler sonucunda, numunede iki temel tabakanın olduğu tespit edilmiştir. Bu tabakalar; yüzeyde borür fazlarının yoğun olarak bulunduğu üst katman (A) ve onun altında, çelik esaslı altlık malzeme (C) şeklinde sınıflandırılmıştır. Bu örnekte, ara faz karakteri gösteren geçiş bölgesine rastlanmamıştır. FeB ve Fe₂B fazları arasında herhangi bir belirgin ayrışma izine ulaşılamamıştır. Karbür sayısında diğer numunelere oranla bir azalma olduğu

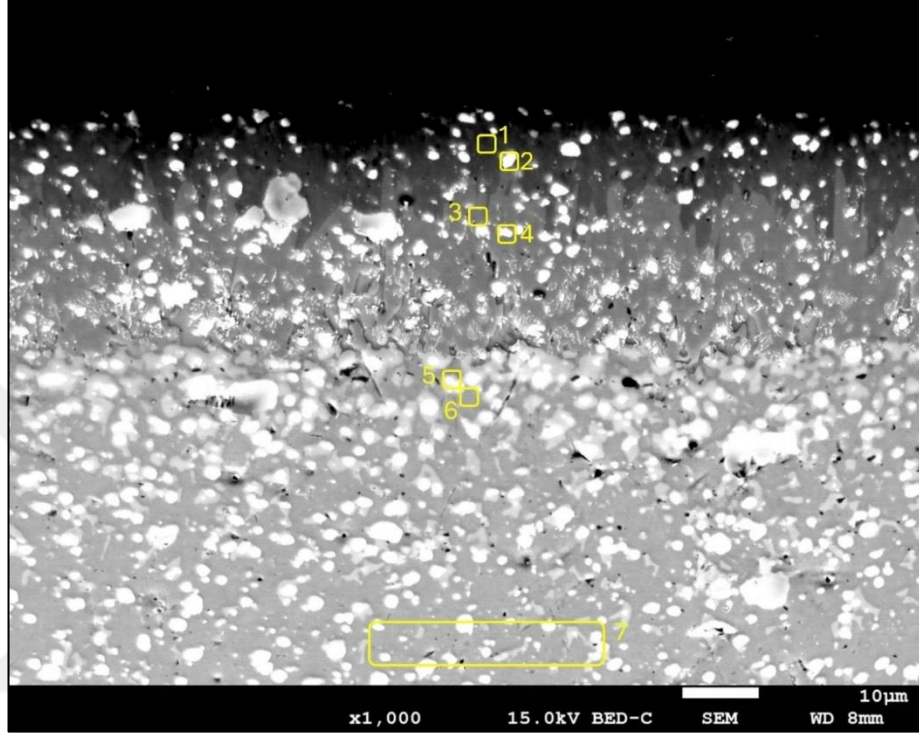
görülmüştür. Yüzey morfolojisine ilişkin gözlemler, borlama işlemi sonucunda yüzeyde çeşitli yapısal bozulmaların meydana geldiğini ortaya koymaktadır. Özellikle, yüzeyde düzensiz kopmalar ve ayrılmalar dikkat çekmekte olup, bu durum yüksek sıcaklık etkisiyle oluşan termal gerilmeler ve borür fazlarının gevrek karakteriyle ilişkilendirilmektedir.



Şekil 4.24: Borlanmış ST10009 numunesinin kesitten alınan SEM görüntüsü.

4.4. SEM-EDS Analizi Sonuçları

Şekil 4.25'te borlanmış ST8001 numunesinin SEM-EDS analizi yapılmış bölgeler, işaretlenmiş olarak SEM görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.25: ST8001 numunesinin kesitten alınan SEM görüntüsü ve SEM-EDS analizi yapılan noktalar/bölgeler.

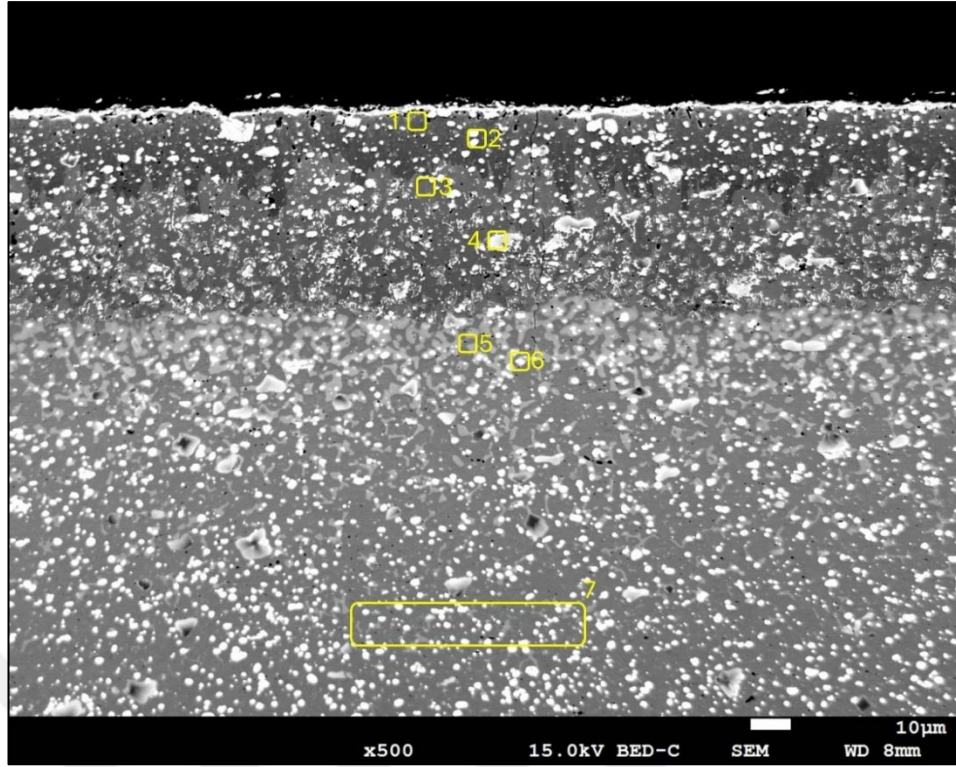
Tablo 4.1'de 850 °C'de 1,5 saat borlama işlemi görmüş numunenin Şekil 4.25'te işaretlenmiş bölgelerden alınan SEM-EDS analiz sonuçları verilmiştir.

Tablo 4.1: ST8001 numunesinden (Şekil 4.25) elde edilen SEM-EDS analiz sonuçları.

Analiz Noktası/Bölgesi	Element (% atomik)							
	Fe	B	W	C	V	Cr	Co	Mo
1	36,88	54,19	0,31	-	0,87	2,19	5,76	-
2	30,24	-	20,13	24,34	3,85	3,94	5,27	12,22
3	61,92	25,85	0,22	-	-	3,38	8,63	-
4	31,23	-	18,99	25,54	5,12	6,61	-	12,50
5	28,57	-	19,86	25,71	5,15	4,34	3,72	12,66
6	77,92	-	1,59	-	1,79	5,53	11,66	1,51
7	82,90	-	0,52	-	-	3,32	13,26	-

Tablo 4.1 incelendiğinde difüzyon profili yüzeyden altlığa doğru azalan bor ve artan demir konsantrasyonu ile klasik bir borlama yapısı göstermektedir. Borür tabakadan alınan EDS noktaları arasında (1-4) 1 numaralı noktadan alınan EDS sonucuna göre FeB fazının, 3 numaralı noktadan alınan EDS sonucuna göre Fe₂B fazının oluştuğu görülmektedir. 2 ve 4 numaralı noktalarda ise karbür oluşumları gözlemlenmiştir. Geçiş tabakasından alınan EDS noktalarında (5-6) Bor fazları görülmemektedir.

Şekil 4.26'da borlanmış ST8009 numunesinin SEM-EDS analizi yapılmış bölgeler, işaretlenmiş olarak SEM görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.26: ST8009 numunesinin kesitten alınan SEM görüntüsü ve SEM-EDS analizi yapılan noktalar/bölgeler.

Tablo 4.2'de 850 °C'de 9 saat borlama işlemi görmüş numunenin **Şekil 4.26'**da işaretlenmiş bölgelerden alınan SEM-EDS analiz sonuçları verilmiştir.

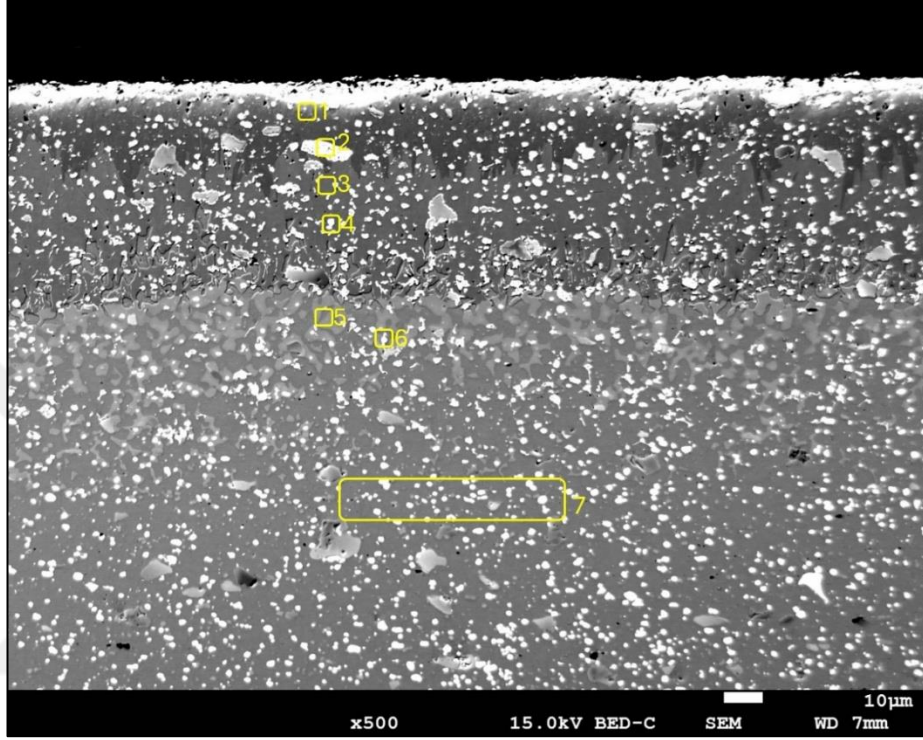
Tablo 4.2: ST8009 numunesinden (**Şekil 4.26**) elde edilen SEM-EDS analiz sonuçları.

Analiz Noktası/Bölgesi	Element (% atomik)							
	Fe	B	W	C	V	Cr	Co	Mo
1	40,72	51,16	0,18	-	-	2,18	5,76	-
2	27,26	-	19,01	30,76	3,17	4,55	3,47	11,78
3	56,71	31,89	0,25	-	-	3,04	8,11	-
4	27,92	-	17,01	31,64	4,63	2,57	5,85	10,37
5	75,93	-	2,58	-	1,62	7,76	9,98	2,13
6	4,47	-	5,19	53,40	27,87	4,55	-	4,53
7	81,04	-	0,55	-	-	4,00	13,85	0,55

Tablo 4.2 incelendiğinde öncelikle borür tabakadan alınan EDS noktaları (1-4) özelinde yorumlarsak 1 numaralı noktada FeB, 3 numaralı noktada Fe₂B fazları tespit edilmiştir. 2 ve 4 numaralı noktalarda ise karbür oluşumu gözlemlenmiştir. Geçiş

noktasında (5-6) ise yapının modifiye olduğu fakat borür fazlarının artık oluşmadığı görülmüştür.

Şekil 4.27’de borlanmış ST9001 numunesinin SEM-EDS analizi yapılmış bölgeler, işaretlenmiş olarak SEM görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.27: ST9001 numunesinin kesitten alınan SEM görüntüsü ve SEM-EDS analizi yapılan noktalar/bölgeler.

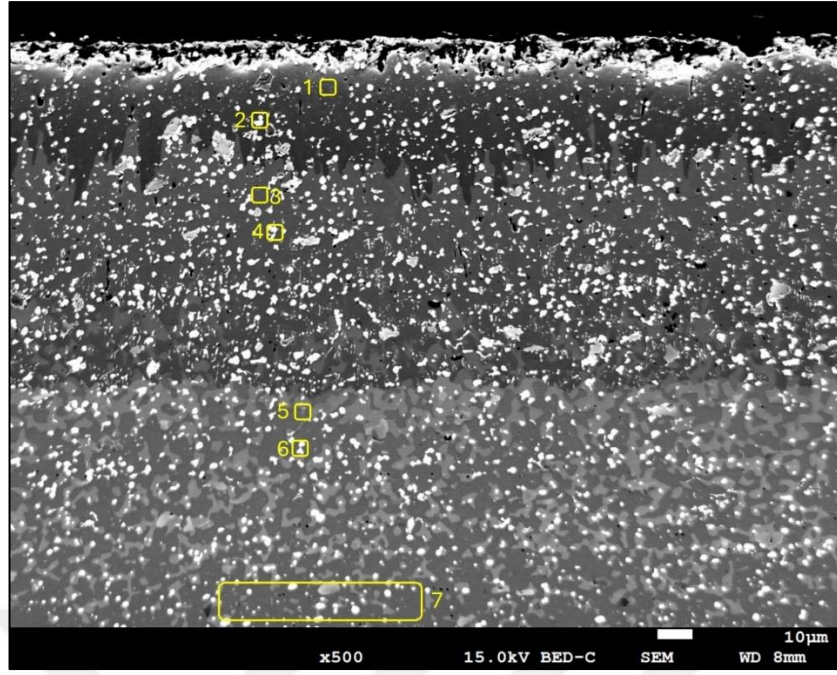
Tablo 4.3’te 925 °C’de 1,5 saat borlama işlemi görmüş numunenin Şekil 4.27’de işaretlenmiş bölgelerden alınan SEM-EDS analiz sonuçları verilmiştir.

Tablo 4.3: ST9001 numunesinden (Şekil 4.27) elde edilen SEM-EDS analiz sonuçları.

Analiz Noktası/Bölgesi	Element (% atomik)							
	Fe	B	W	C	V	Cr	Co	Mo
1	44,14	47,22	0,27	-	-	2,02	6,34	-
2	30,59	-	21,08	21,71	5,72	4,75	3,98	12,18
3	59,56	26,15	0,43	-	1,12	3,89	8,84	-
4	28,09	-	21,14	23,14	5,85	5,74	3,44	12,60
5	75,84	1,15	2,26	-	2,60	8,12	10,04	-
6	26,97	-	21,28	24,22	5,27	5,67	3,61	12,98
7	81,58	-	0,63	-	-	4,54	12,43	0,83

Tablo 4.3 verileri doğrultusunda, borür tabakasına karşılık gelen 1–4 numaralı EDS analiz noktaları incelendiğinde; 1 numaralı noktada yüksek bor içeriğiyle uyumlu olarak FeB fazının, 3 numaralı noktada ise daha düşük bor ve yüksek demir içeriğine karşılık gelen Fe₂B fazının oluştuğu belirlenmiştir. Buna karşın, 2 ve 4 numaralı noktalarda tespit edilen yüksek tungsten, karbon ve molibden içerikleri, bu bölgelerde borür fazlarının yerine karbür esaslı faz oluşumlarının baskın olduğunu göstermektedir. Nokta 5'te, geçiş zonuna ait EDS analizinde bor elementi %1,15 seviyesinde analiz edilmiştir; bu, bor difüzyonunun derinliğinin azaldığını ve borür oluşumunun bu bölgede zayıfladığını göstermektedir.

Şekil 4.28'de borlanmış ST9009 numunesinin SEM-EDS analizi yapılmış bölgeler, işaretlenmiş olarak SEM görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.28: ST9009 numunesinin kesitten alınan SEM görüntüsü ve SEM-EDS analizi yapılan noktalar/bölgeler.

Tablo 4.4'te 925 °C'de 9 saat borlama işlemi görmüş numunenin **Şekil 4.28'**de işaretlenmiş bölgelerden alınan SEM-EDS analiz sonuçları verilmiştir.

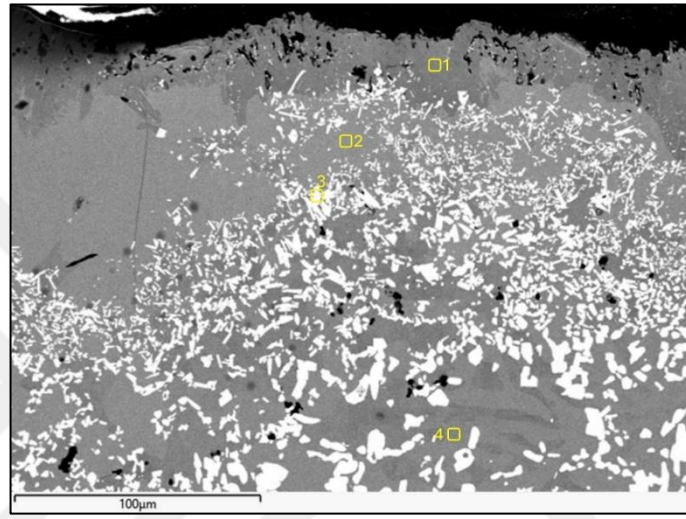
Tablo 4.4: ST9009 numunesinden (**Şekil 4.28**) elde edilen SEM-EDS analiz sonuçları.

Analiz Noktası/Bölgesi	Element (% atomik)							
	Fe	B	W	C	V	Cr	Co	Mo
1	45,00	40,10	0,73	-	1,96	5,71	6,50	-
2	29,58	-	20,05	22,23	5,53	4,53	5,12	12,96
3	57,23	28,32	0,32	-	1,17	3,65	9,31	-
4	27,61	-	22,39	22,16	4,45	5,89	3,48	14,02
5	77,36	-	2,50	-	2,55	6,73	9,31	1,55
6	22,77	-	12,13	45,94	3,53	4,54	3,42	7,67
7	83,67	-	0,73	-	-	3,28	12,32	-

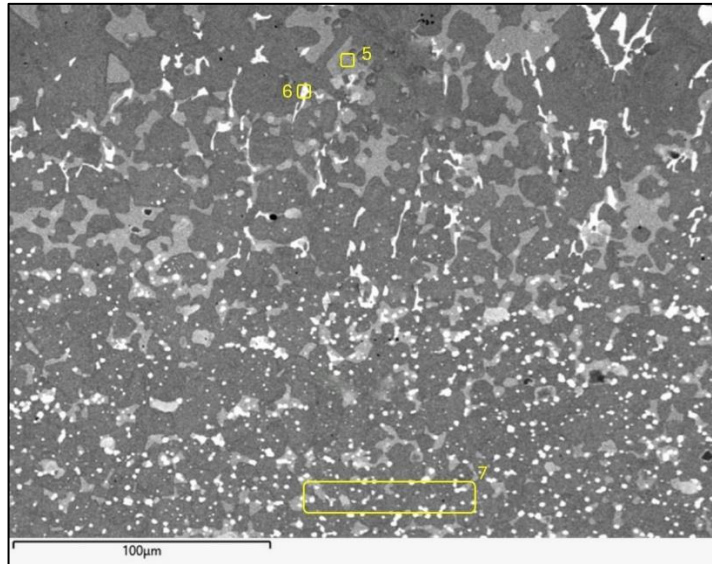
Tablo 4.4'e bakıldığında 1 numaralı alanda yüksek bor içeriğiyle tipik bir FeB fazı gözlemlenmiştir. 3 numaralı alanda düşük bor ve artan demir oranı, Fe₂B fazının varlığını desteklemektedir. 2 ve 4 numaralı alanlarda bor tespit edilememiştir. Ancak her iki alanda da yüksek W (%20,05–22,39), C (%22 civarı), Mo (12,96–14,02) ve diğer alaşım elementlerinin varlığı, bu bölgelerde karbür esaslı yapılar (örneğin W–

Mo–C karbürleri) oluştuğuna işaret etmektedir. Geçiş bölgesindeki 5 numaralı alanda Bor bulunmamakta, ancak Fe oranı çok yüksektir. Bu durum, borür oluşumunun bu noktada sonlandığını göstermektedir.

Şekil 4.29'da borlanmış ST10001 numunesinin SEM-EDS analizi yapılmış bölgeler, işaretlenmiş olarak SEM görüntüsü verilmiştir. Borür tabakasından altlığa kadar olan bölüme bakabilmek ve yüksek büyütmede bakabilmek adına düşey şerit halinde sıralı görüntü alınmıştır.



(a)



(b)

Şekil 4.29: ST10001 numunesinin kesitten alınan SEM görüntüsü ve SEM-EDS analizi yapılan noktalar/bölgeler a) Mikrograf 1 (Dış bölge), b) Mikrograf 2 (İç Bölge).

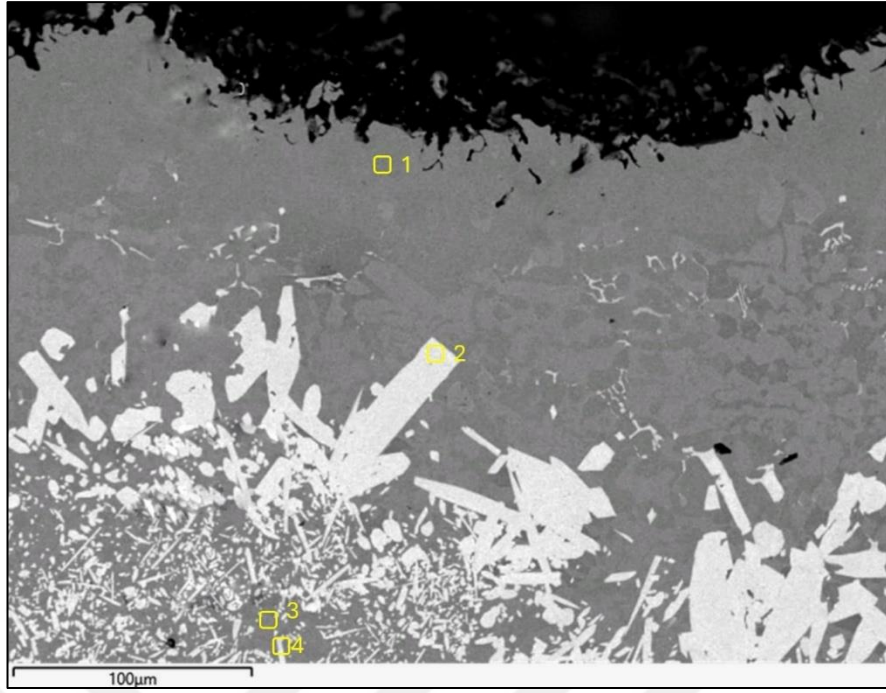
Tablo 4.5'te 1000 °C'de 1,5 saat borlama işlemi görmüş numunenin **Şekil 4.29**'da işaretlenmiş bölgelerden alınan SEM-EDS analiz sonuçları verilmiştir.

Tablo 4.5: ST10001 numunesinden (**Şekil 4.29**) elde edilen SEM-EDS analiz sonuçları.

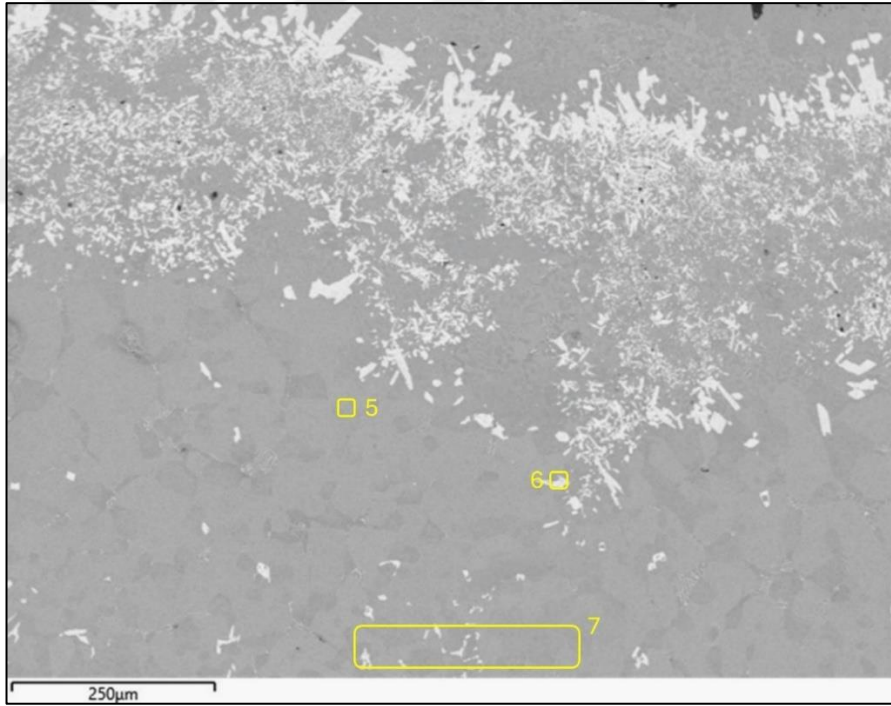
Analiz Noktası/Bölgesi	Element (% atomik)							
	Fe	B	W	C	V	Cr	Co	Mo
1	62,50	30,48	-	-	2,13	4,90	-	-
2	40,60	48,43	0,46	-	1,44	2,69	5,86	0,52
3	26,20	-	12,81	26,90	10,63	5,02	3,38	15,06
4	43,74	43,90	0,64	-	1,83	4,10	5,31	0,49
5	76,94	-	2,81	-	2,90	7,71	9,64	-
6	26,01	-	18,26	25,46	10,82	5,11	3,95	10,39
7	80,88	-	1,00	-	-	4,63	12,56	0,94

Tablo 4.5 incelendiğinde, 1, 2 ve 4 numaralı bölgelerde Fe₂B ve FeB fazının varlığı desteklenmiştir. 7 numaralı bölge altlığı göstermektedir. 3 ve 6 numaralı bölgelerde karbür esaslı yapıların oluştuğu görülmüştür. 1000 °C'de borlama işlemi görmüş numunelerde geçiş bölgesi gözlemlenmediği için 1'den 6'ya kadar olan bölgeler borür tabaka içerisinde, 7 numaralı bölge ise altlıktan alınmış olan alan olarak nitelendirilmiştir.

Şekil 4.30'da borlanmış ST10009 numunesinin SEM-EDS analizi yapılmış bölgeler, işaretlenmiş olarak SEM görüntüsü verilmiştir. Borür tabakasından altlığa kadar olan bölüme bakabilmek ve yüksek büyütmede bakabilmek adına düşey şerit halinde sıralı görüntü alınmıştır.



(a)



(b)

Şekil 4.30: ST10009 numunesinin kesitten alınan SEM görüntüsü ve SEM-EDS analizi yapılan noktalar/bölgeler; a) Mikrograf 1 (Dış Bölge), b) Mikrograf 2 (İç Bölge).

Tablo 4.6'da 1000 °C'de 9 saat borlama işlemi görmüş numunenin **Şekil 4.30'**da işaretlenmiş bölgelerden alınan SEM-EDS analiz sonuçları verilmiştir.

Tablo 4.6: ST10009 numunesinden (Şekil 4.30) elde edilen SEM-EDS analiz sonuçları.

Analiz Noktası/Bölgesi	Element (% atomik)							
	Fe	B	W	C	V	Cr	Co	Mo
1	44,60	43,50	0,58	-	0,96	4,35	5,26	0,76
2	30,67	-	19,01	22,08	10,79	5,26	-	12,20
3	43,70	42,60	0,52	-	0,89	5,75	5,95	0,59
4	24,16	-	17,17	34,09	10,06	5,10	-	9,43
5	77,36	-	1,07	-	3,45	8,68	8,56	0,88
6	28,53	-	16,35	23,96	10,17	6,05	3,82	11,12
7	80,58	-	0,83	-	2,65	7,83	8,12	-

Tablo 4.6 incelendiğinde, 1 ve 3 numaralı bölgeler FeB fazının varlığını desteklemiştir. 2 ve 4 numaralı bölgeler, tungsten ağırlıklı karbür yapılar olduğu görülmüştür. 7 numaralı bölge ise altlık malzemeye işaret etmektedir.

4.5. Borür Tabaka Kalınlığı

SEM görüntüleri kullanılarak FeB ve Fe₂B borür fazlarının tabaka kalınlıkları ölçülmüştür.

850 °C ve 925 °C sıcaklıklarında borlama işlemi uygulanmış numunelerde FeB ve Fe₂B fazları birbirinden ayırt edilebilir şekilde gözlemlenmiş, bu nedenle her iki fazın kalınlıkları ayrı ayrı belirlenebilmiştir. Ancak 1000 °C’de borlanan numunelerde fazlar net bir şekilde ayrıştırılamadığından, bu numuneler için yalnızca toplam borür tabaka kalınlıkları hesaplanmıştır.

Tüm numunelere ait borür kalınlıkları **Tablo 4.7**’de sunulmuştur. Ayrıca, **Şekil 4.31**’de borlama süresine bağlı borür kalınlığı değişimi, **Şekil 4.32**’de ise borlama sıcaklığına bağlı olarak gözlenen değişimler grafiksel olarak gösterilmiştir.

Tablo 4.7: Farklı sıcaklık ve sürelerde elde edilen ortalama borür tabaka kalınlıkları.

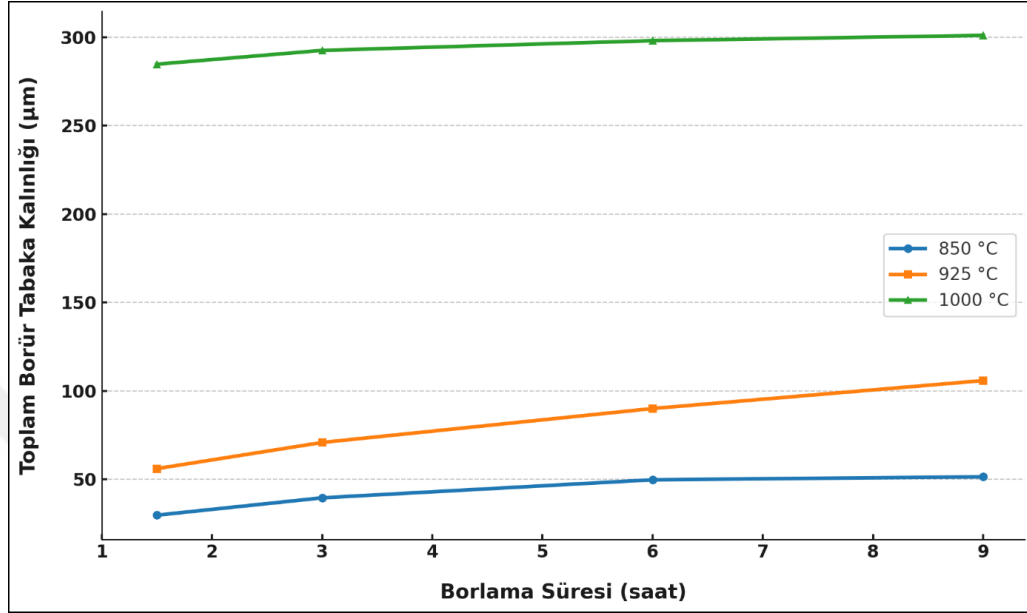
Numune Kodu	FeB kalınlığı (µm)	Fe ₂ B kalınlığı (µm)	Toplam Borür Tabaka Kalınlığı (µm)
ST8001	13,5	16,2	29,7
ST8003	16,7	22,6	39,5
ST8006	20,8	28,9	49,7
ST8009	21,5	29,9	51,4
ST9001	21,6	34,4	56,0
ST9003	30,0	40,8	70,8
ST9006	36,8	53,2	90,0
ST9009	38,6	67,2	105,8
ST10001	-	-	284,7
ST10003	-	-	292,5
ST10006	-	-	297,5
ST10009	-	-	301,0

Tablo 4.7'de sunulan veriler incelendiğinde, borlama sıcaklığı ve süresindeki artışın, borür tabaka kalınlıklarında belirgin bir yükselişe neden olduğu gözlemlenmektedir. 850 °C ve 925 °C sıcaklıklarında borlama işlemi uygulanmış numunelerde FeB ve Fe₂B fazları mikroyapısal olarak birbirinden ayırt edilebilmiştir. Bu numunelerde yapılan ölçümler, Fe₂B fazının FeB fazına kıyasla daha kalın bir tabaka oluşturduğunu ortaya koymuştur. Özellikle sıcaklık ve süre parametrelerinin artmasıyla birlikte Fe₂B fazının kalınlığındaki artışın, FeB fazına oranla daha yüksek olduğu saptanmıştır.

Borür difüzyon kinetiğinin sıcaklık ve zamanla doğrudan ilişkili olduğu bu bulgularla desteklenmiş olup, en yüksek toplam borür tabaka kalınlığı 1000 °C'de 9 saat borlama işlemi uygulanmış numunede elde edilmiştir. Bu numunede ölçülen ortalama toplam borür kalınlığı 301 µm olarak tespit edilmiştir. Buna karşılık, en düşük borür kalınlığı değeri ise 29,7 µm ile 850 °C'de 1,5 saat borlanmış numunede kaydedilmiştir.

Bu sonuçlar hem sıcaklık hem de işlem süresinin borür tabakasının büyüme mekanizması üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymaktadır.

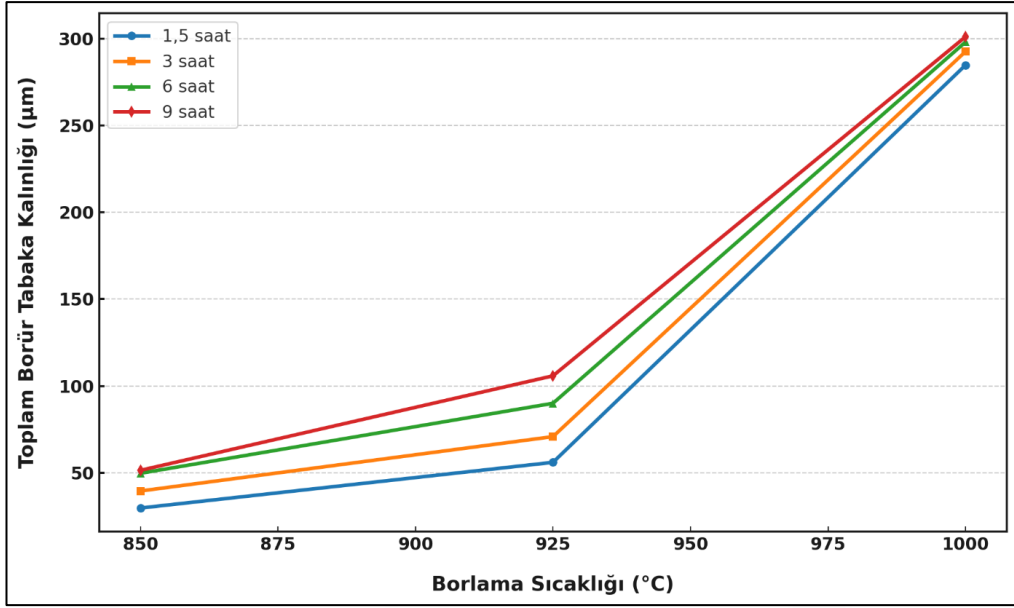
Şekil 4.31’de 850, 925 ve 1000 °C sıcaklıklarda borlama işlemi uygulanmış numunelerde borlama süresine bağlı olarak borür tabaka kalınlıklarının değişimi verilmiştir.



Şekil 4.31: Farklı borlama sıcaklıklarında oluşan borür tabaka kalınlıklarının borlama süresine bağlı olarak değişimi.

Tüm sıcaklıklarda, borlama süresi arttıkça toplam borür kalınlığı da artış göstermektedir. Bu durum, difüzyonla ilerleyen borlama sürecinin zamanla birlikte daha derine işlediğini ve tabaka kalınlığını artırdığını ortaya koymaktadır. Özellikle 925 °C ve 1000 °C sıcaklıklarında, borlama süresi arttıkça kalınlıkta artış devam etse de bu artış giderek yavaşlamaktadır. Yani başlangıçta hızlı olan kalınlık artışı zamanla daha durağan bir hâl almaktadır. Bu durum, difüzyonun zamanla yavaşlayan bir süreç olduğunu göstermektedir.

Şekil 4.32’de 1,5, 3, 6 ve 9 saat borlama işlemi uygulanmış numunelerde borlama sıcaklığına bağlı olarak borür tabaka kalınlıklarının değişimi verilmiştir.

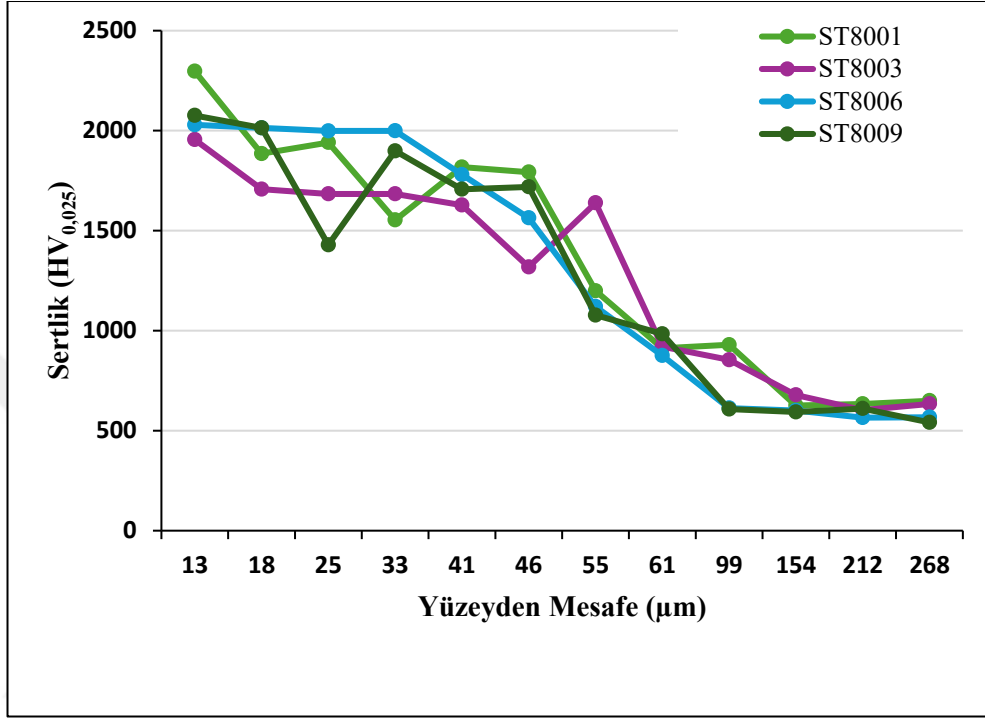


Şekil 4.32: Farklı borlama sürelerinde oluşan borür tabaka kalınlıklarının borlama sıcaklığına bağlı olarak değişimi.

Borlama sıcaklığının artışıyla birlikte borür tabaka kalınlığında genel bir artış eğilimi gözlemlenmiştir. Özellikle 1000 °C’de gerçekleştirilen borlama işlemleri, diğer sıcaklıklarla kıyaslandığında borür kalınlıklarında belirgin ve hızlı bir artışa neden olmuştur.

4.6. Mikrosertlik Sonuçları

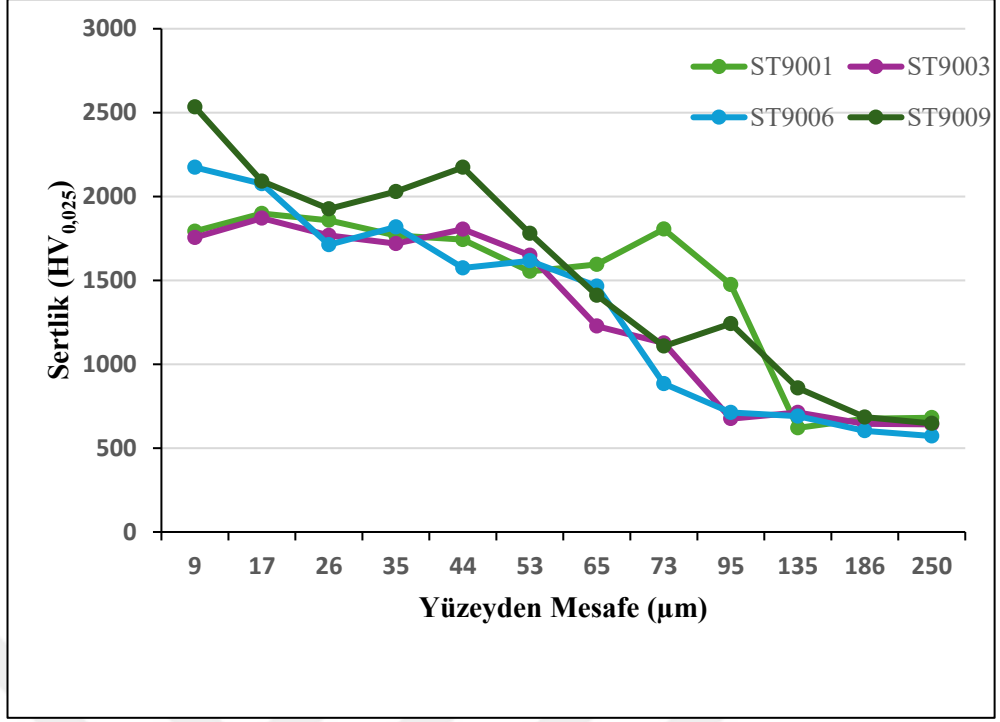
Şekil 4.33'te 850 °C'de 1,5, 3, 6 ve 9 saat borlama işlemi görmüş numunelerin yüzeye olan mesafenin arttıkça sertlik değerlerindeki değişim grafiği verilmiştir.



Şekil 4.33: 850 °C'de farklı sürelerde borlanmış numunelerin kesitlerinden alınan mikrosertlik değerlerinin, yüzeyden altlığa doğru mesafeye bağlı değişimi.

Şekil 4.33'te 850 °C'de farklı sürelerde borlama işlemi görmüş numunelerin yüzeye olan uzaklığına göre sertlik değişimleri incelendiğinde en yüksek sertlik değerinin 850 °C'de 1,5 saat borlama işlemi görmüş numunede 2297 HV olarak ölçülmüştür. En düşük sertlik değerlerinin de numunelerin altlık bölgelerinde olduğu görülmüştür. Altlıktan alınan sertlik değerleri arasında ciddi farklar görülmemiştir. Altlıktan alınan sertlik değerlerinin 4 numune için de ortalama 600 HV ölçülmüştür. Sertlik değerlerinin yüzeyden uzaklaştıkça azaldığı görülmüştür. Bu azalan ivmenin sabit olmayıp, bazı mesafelerde sertlik artışı görüyor olma sebebimiz, sertlik izinin karbür fazına denk gelmesinden dolayı olduğu düşünülmektedir.

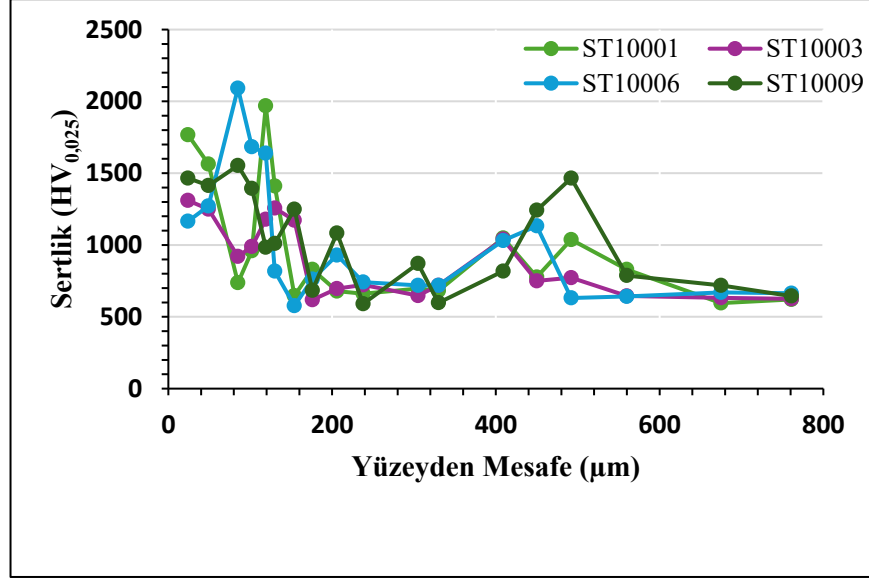
Şekil 4.34'te 925 °C'de 1,5, 3, 6 ve 9 saat borlama işlemi görmüş numunelerin yüzeye olan mesafenin arttıkça sertlik değerlerindeki değişim grafiği verilmiştir.



Şekil 4.34: 925 °C’de borlama işlemi görmüş numunelerin mesafeye bağlı sertlik değişimi.

Şekil 4.34’te 925 °C’de farklı sürelerde borlama işlemi görmüş numunelerin yüzeye olan uzaklığına göre sertlik değişimleri incelendiğinde en yüksek sertlik değerinin 925 °C’de 9 saat borlama işlemi görmüş numunede 2534 HV olarak ölçülmüştür. Altlıktan alınan sertlik değerlerinin 4 numune için ortalama 650 HV ölçülmüştür. Yüzeiden mesafe arttıkça sertlik değerlerinin azaldığı görülmektedir.

Şekil 4.35’te 1000 °C’de 1,5, 3, 6 ve 9 saat borlama işlemi görmüş numunelerin yüzeye olan mesafenin arttıkça sertlik değerlerindeki değişim grafiği verilmiştir.



Şekil 4.35: 1000 °C’de borlama işlemi görmüş numunelerin mesafeye bağlı sertlik değişimi.

Şekil 4.35’te 1000 °C’de farklı sürelerde borlama işlemi görmüş numunelerin yüzeye olan uzaklığına göre sertlik değişimleri incelendiğinde en yüksek sertlik değerinin 1000 °C’de 6 saat borlama işlemi görmüş numunede 2092 HV olarak ölçülmüştür. Altlıktan alınan sertlik değerlerinin 4 numune için ortalama 650 HV ölçülmüştür. Yüzeyden mesafe arttıkça sertlik değerlerinin azaldığı görülmektedir. Fakat 850 °C ve 925 °C sıcaklıklarında borlama işlemi uygulanmış numunelerde, yüzeye olan mesafeye bağlı olarak Vickers mikrosertlik değerlerinin daha homojen bir azalma eğilimi gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu durum, bu sıcaklıklarda oluşan borür tabakasının daha düzenli ve kademeli bir geçiş bölgesi oluşturduğunu göstermektedir. Sertlik değerleri, yüzeyden altlığa doğru belirli bir süreklilik içerisinde azalarak ilerlemektedir.

Buna karşılık, 1000 °C’de borlanmış numunelerde sertlik dağılımı daha heterojen bir yapı sergilemiş, yüzey-altlık geçişinde düzenli bir azalış eğilimi yerine, ara bölgelerde lokal sertlik artışlarının meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu tür düzensiz dağılımlar, borür tabakasının bu sıcaklıkta mikroyapısal olarak homojen olmayan bir biçimde oluştuğuna işaret etmektedir.

Sertlik profilindeki bu düzensizliklerin, yüksek sıcaklığın etkisiyle tabakada meydana gelen çatlaklar, kopmalar ve borür-karbür etkileşimleri gibi yapısal bozulmalardan kaynaklandığı düşünülmektedir.

5. DEĞERLENDİRME

Bu tez çalışması kapsamında, 1.3207 yüksek hız çeliğine farklı sıcaklıklar (850 °C, 925 °C ve 1000 °C) ve sürelerde (1,5; 3; 6 ve 9 saat) borlama işlemleri uygulanmıştır. Borlama sıcaklığı ve süresinin, bu çeliğin borlama davranışı üzerinde belirgin etkiler oluşturduğu ve oluşan borür tabakasının özelliklerini önemli ölçüde etkilediği tespit edilmiştir. Faz dönüşümleri üzerindeki etkiler XRD analiziyle değerlendirilmiştir. Yapılan analizler, hem işlem parametrelerine (sıcaklık ve süre) bağlı olarak yüzeyde oluşan borür fazlarının karakterini ve altlık malzemedeki kaynaklanan yapısal fazların varlığını detaylı bir biçimde ortaya koymuştur.

Borlama işlemi uygulanmış numunelere ait SEM-EDS analizleri, borür tabakasının kimyasal bileşimi ve faz içeriği hakkında önemli bulgular sunmuştur. Yapılan analizlerde, borür tabakasında genellikle iki farklı demir borür fazı tespit edilmiştir: yüzeye yakın bölgelerde yüksek bor içeriğine karşılık gelen FeB fazı ve daha derin bölgelerde, bor içeriğinin azalıp demir içeriğinin arttığı alanlarda Fe₂B fazı. Bu faz ayrımları, SEM-EDS nokta analizleriyle doğrulanmış ve XRD verileriyle de uyumlu bulunmuştur.

Bazı noktalarda, özellikle borür tabakası içinde yer alan farklı alanlarda, yüksek tungsten, molibden ve karbon içeriğine sahip bölgeler tespit edilmiş ve bu bölgelerde karbür esaslı fazların oluştuğu değerlendirilmiştir. Bu fazlar, borlama işlemi sırasında altlık malzemedeki alaşım elementlerinin yeniden düzenlenmesiyle oluşmuş olup, yapısal çeşitliliği artırmıştır.

Geçiş bölgelerinden alınan EDS analizlerinde ise bor elementinin ya hiç tespit edilemediği ya da çok düşük seviyelerde bulunduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, bor difüzyonunun belirli bir derinlikte sonlandığını ve borür oluşumunun bu sınırın ötesine geçmediğini göstermektedir.

Sonuç olarak, SEM-EDS analizleri, borür tabakasının faz dağılımının ve difüzyon derinliğinin sıcaklık ve süreye bağlı olarak değiştiğini; aynı zamanda karbür oluşumlarının da bu süreçte önemli bir rol oynadığını ortaya koymuştur.

Borlama öncesinde yapılan XRD analizinde, borlama uygulanmamış 1.3207 çeliğinde üç farklı fazın bulunduğu belirlenmiştir: Fe, CrFe₃W₃ ve CV fazları. Bu fazların oluşumu, malzemenin alaşım bileşiminde yüksek oranda bulunan Cr, W ve V

elementlerine atfedilmiştir. En baskın pik ise, beklendiği üzere Fe fazına ait olup $52,2^\circ$ 'de gözlemlenmiştir.

Borlama işlemi sonrası elde edilen XRD desenleri, tüm sıcaklık ve süre kombinasyonlarında, yüzeyde FeB ve Fe₂B fazlarının oluştuğunu göstermiştir. FeB ve Fe₂B fazlarının oluşumu, literatürdeki diğer çalışmalarla paralel olarak, borlama işlemine tabi tutulan demir esaslı malzemelerde beklenen bir durumdur ve mevcut literatürde yer alan birçok çalışma ile uyumluluk göstermektedir [53], [61]. Özellikle 850°C 'de uygulanan işlemlerde, borlama süresi artsa da faz türlerinde belirgin bir değişim gözlemlenmemiş; FeB fazının daha baskın olduğu tespit edilmiştir. 925°C 'de benzer bir faz dağılımı gözlenmiş, ancak artan işlem süresiyle birlikte FeB fazına ait piklerin şiddetinde artış meydana gelmiştir. Benzer şekilde, sıcaklık ve sürenin etkisiyle FeB ve Fe₂B fazlarında meydana gelen değişimler literatürde de raporlanmıştır [35], [58].

Borlama sıcaklığının 1000°C 'ye çıkarılmasıyla birlikte önemli bir yapısal değişim gözlenmiştir. Bu sıcaklıkta Fe₂B fazı, FeB fazına kıyasla daha baskın hale gelmiş ve XRD desenlerinde bu faza ait piklerin daha güçlü olduğu görülmüştür. Ayrıca yüksek sıcaklığın etkisiyle, borür fazlarının miktarında azalma meydana gelmiş ve altlık malzemedan kaynaklanan fazlar yeniden belirginleşmiştir. Bu durum, özellikle 9 saat borlama işlemine tabi tutulan numunede (ST10009), kaplamanın altlık yüzeyden ayrılmasına yol açan yapısal bir zayıflıkla ilişkilendirilmiştir.

Sıcaklık sabit tutularak sürenin etkisinin değerlendirildiği karşılaştırmalı XRD analizlerinde, borlama süresi uzadıkça Fe₂B fazının hem görünürlüğünün hem de baskınlığının arttığı belirlenmiştir. 1000°C 'de gerçekleştirilen borlama işleminde, borlama süresine bağlı olmaksızın, altlık malzemedan kaynaklanan CrFe₃W₃ ve C₆Cr₂₃ gibi bazı fazların ya tamamen ortadan kalktığı ya da XRD desenlerinde belirginliğini kaybettiği tespit edilmiştir. Bu bulgular, borlama sıcaklığı ve süresinin birlikte değerlendirilmesinin, oluşan borür tabakasının faz içeriği ve yapısal stabilitesi açısından kritik bir öneme sahip olduğunu göstermektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, borlama sıcaklığı arttıkça FeB'den Fe₂B fazına doğru bir faz dönüşümü eğilimi gözlemlenmiştir. Ayrıca 1000°C 'de ve uzun süreli işlemlerde kaplama bütünlüğünün zayıfladığı ve yapısal kopmaların arttığı değerlendirilmiştir.

Borlama işleminin oluşturduğu borür tabakasının morfolojisini değerlendirmek, tabaka kalınlıklarını belirlemek ve bor elementinin altlık malzeme ile etkileşim düzeyini incelemek amacıyla, farklı sıcaklık ve sürelerde borlanmış toplam 12 adet numune üzerinde mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir.

Analizler sonucunda, borlama süresi sabit tutulduğunda, işlem sıcaklığındaki artışın borür tabaka kalınlığında doğrudan ve anlamlı bir artışa neden olduğu belirlenmiştir. Özellikle 1,5 saatlik işlem süresine sahip numunelerde, 850 °C'den 1000 °C'ye kadar sıcaklık artışı ile borür tabaka kalınlığının belirgin biçimde arttığı gözlenmiştir. 925 °C'den 1000 °C'ye geçişte, tabaka kalınlığındaki artışın daha dramatik olduğu tespit edilmiştir.

Benzer şekilde, 3 ve 6 saatlik borlama süresi uygulanan numunelerde de sıcaklık yükseldikçe borür kaplama kalınlığı artış göstermiştir. 850 °C ve 925 °C sıcaklıklarında elde edilen kaplamaların daha homojen ve süreksizlik içermeyen bir yapıda olduğu; buna karşın, 1000 °C'de borlanan örneklerde, yüksek sıcaklığın etkisiyle borür tabakasında çeşitli kopmalar ve bütünlük kaybı meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu durumun, yüksek sıcaklık kaynaklı termal gerilmeler ve borür fazlarının artan kırılgenliği ile ilişkili olduğu değerlendirilmektedir.

Dokuz saatlik borlama süresi uygulanan örneklerde de benzer bir eğilim saptanmıştır. Yüksek sıcaklık, bu sürede de borür tabaka kalınlığını artırmış; en yüksek kalınlığa ise 1000 °C'de borlanan numunede ulaşılmıştır. Ancak bu yüksek sıcaklıkta da kaplama homojenliğinde bozulmalar ve yapısal kopmalar gözlemlenmiş; bu da işlem parametrelerinin dikkatli bir şekilde optimize edilmesinin gerekliliğine işaret etmektedir.

Sonuç olarak, optik mikroskop ve SEM analiz sonuçları, borlama sıcaklığının, tabaka kalınlığı ve kaplama kalitesi üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur. Düşük sıcaklıklarda daha bütünlüklü ve homojen kaplamalar elde edilirken, yüksek sıcaklıklarda tabaka kalınlığı artsa da yapısal sürekliliğin zarar gördüğü tespit edilmiştir. Bu durum, uygulama süresi ve sıcaklığın birlikte optimize edilmesinin hem fonksiyonel performans hem de kaplama kararlılığı açısından kritik olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmada, farklı sıcaklık ve sürelerde borlama işlemi uygulanmış 1.3207 çeliğine ait numunelerin mikroyapısal değişimleri SEM ile detaylı şekilde incelenmiştir.

Yapılan gözlemler sonucunda, borlama sıcaklığı 850 °C ve 925 °C olan tüm numunelerde üçlü bir yapı (borür tabakası, geçiş bölgesi ve altlık malzeme) belirlenmiş, buna karşılık 1000 °C’de borlanan numunelerde geçiş bölgesinin ortadan kalktığı ve yapıların iki tabakalı hale geldiği tespit edilmiştir.

Borür tabakası, genellikle testere dişi morfolojisi göstermekte olup, bu tabakanın iç yapısında koyu tonlu FeB fazı ile açık tonlu Fe₂B fazı birlikte gözlemlenmiştir. 850 °C ve 925 °C sıcaklıklarda elde edilen örneklerde Fe₂B fazının FeB fazına oranla daha kalın olduğu, yapının nispeten homojen ve süreksizlik içermediği belirlenmiştir. Buna karşılık, 1000 °C’de borlanan numunelerde, özellikle işlem süresi arttıkça borür tabaka kalınlığında ciddi bir artış gözlenmiş, ancak aynı zamanda yapıda gözeneklilik, çatlak oluşumu ve yüzey kopmaları da artmıştır. Bu durum, yüksek sıcaklığın difüzyon hızını artırarak tabaka kalınlığını büyütmesine rağmen, yapısal bütünlüğü olumsuz etkilediğini göstermektedir.

Karbür fazlarına ilişkin gözlemler, düşük sıcaklıklarda küresele benzer karbürlerin daha yoğun olduğunu, sıcaklık yükseldikçe bu yapıların şekil değiştirerek ağısı bir dağılım gösterdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, yüksek sıcaklıkta işleme tabi tutulan örneklerde karbür sayısının azaldığı, bazı bölgelerde tane sınırlarına çökeldiği ve homojenliğin bozulduğu saptanmıştır.

Genel olarak, SEM analizleri borlama parametrelerinin tabaka yapısı, faz dağılımı ve yüzey bütünlüğü üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermiştir. Düşük sıcaklık ve uygun sürelerde yapılan işlemlerle daha homojen ve kararlı borür tabakaları elde edilirken, yüksek sıcaklık ve uzun süreli işlemler yapısal süreksizliklere, kaplama kopmalarına ve karbür dağılımında düzensizliklere yol açmaktadır. Bu nedenle, istenilen mikroyapısal özelliklerin elde edilmesi açısından işlem sıcaklığı ve süresinin birlikte optimize edilmesi büyük önem taşımaktadır.

SEM görüntüleri üzerinden yapılan ölçümlerle, borlama işlemi sonrası oluşan FeB ve Fe₂B fazlarının kalınlıkları değerlendirilmiştir. 850 °C ve 925 °C sıcaklıklarında borlanan numunelerde bu iki faz mikroyapısal olarak birbirinden ayırt edilebildiği için kalınlıklar ayrı ayrı belirlenmiştir. Yapılan ölçümler, genellikle Fe₂B fazının FeB fazına göre daha kalın bir tabaka oluşturduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, sıcaklık ve süre arttıkça özellikle Fe₂B fazında belirgin bir kalınlık artışı gözlemlenmiştir.

1000 °C sıcaklıkta borlanan numunelerde ise fazlar net biçimde ayrıştırılmadığından, yalnızca toplam borür tabaka kalınlıkları ölçülebilmektedir. Tüm sıcaklıklarda borlama süresinin uzaması, tabaka kalınlığında artışa neden olmuş; bu da bor difüzyonunun süreyle birlikte derinleştiğini göstermiştir. Ancak özellikle yüksek sıcaklıklarda (925 °C ve 1000 °C), işlem süresi arttıkça bu artışın yavaşladığı, yani difüzyon hızının zamanla azaldığı tespit edilmiştir.

En düşük borür kalınlığı, 850 °C’de 1,5 saat işlem gören numunede 29,7 µm olarak ölçülürken, en yüksek kalınlık değeri 1000 °C’de 9 saat borlama uygulanan numunede 301 µm’ye ulaşmıştır. Bu bulgular hem sıcaklık hem de süre parametrelerinin borür tabaka oluşumunu doğrudan etkilediğini, yüksek sıcaklıkların tabaka kalınlığında hızlı ve belirgin artışlar sağladığını göstermektedir.

Farklı sıcaklık ve sürelerde borlama işlemi uygulanmış numuneler üzerinde gerçekleştirilen Vickers mikrosertlik ölçümleri, yüzeyden altlığa doğru sertlik dağılımının borür tabaka yapısı ile doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. Genel olarak tüm sıcaklıklarda, yüzey sertlik değerleri yüksek çıkarken, altlık malzemeye yaklaştıkça sertlik değerlerinde kademeli bir azalma gözlemlenmiştir.

850 °C ve 925 °C sıcaklıklarında borlanan numunelerde, sertlik profilleri daha düzenli ve homojen bir düşüş eğilimi sergilemiş; bu da bu sıcaklıklarda oluşan borür tabakasının daha kararlı ve geçişli bir yapıya sahip olduğunu göstermiştir. Yüzeyde en yüksek sertlik değeri 925 °C’de 9 saat işlem görmüş numunede 2534 HV olarak ölçülmüş, altlık bölgelerinde ise ortalama değerler 600–650 HV aralığında kalmıştır.

Buna karşın, 1000 °C’de borlanan numunelerde sertlik dağılımı daha düzensiz ve yer yer dalgalı bir profil göstermiştir. Özellikle ara bölgelerde lokal sertlik artışlarının gözlemlenmesi, mikroyapıda faz karışımları, karbür-borür etkileşimleri ve yapısal bozulmalar (çatlama, kopma vb.) yaşandığına işaret etmektedir. Bu durum, yüksek sıcaklıkta difüzyon hızının artmasıyla birlikte faz geçişlerinin keskinliğini yitirmesinden kaynaklanmaktadır.

Altlık malzemenin yüksek alaşımlı yapısından ötürü karbür fazlarının yoğunlukla bulunduğu tespit edilmiştir.

Sıcaklık artışıyla birlikte difüzyon hızının arttığı, mevcut gözeneklerin büyüdüğü ve buna bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün arttığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle, borlama

işleminin daha düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilmesi daha düzgün ve pürüzsüz yüzeylerin elde edilmesini sağlamaktadır.

Borür tabaka kalınlığı, borlama sıcaklığındaki artışla birlikte parabolik, borlama süresinin uzamasıyla ise lineer bir biçimde artış göstermektedir. Bu durum, difüzyon mekanizmasıyla doğrudan ilişkilidir. Fick'in ikinci yasasına göre difüzyon sıcaklıkla birlikte artmakta ve bu hız Arrhenius denklemine göre üssel olarak gerçekleşmektedir. Ancak işlem süresi arttıkça, oluşan borür tabakası bor atomlarının geçişine direnç oluşturarak difüzyon hızını düşürmekte ve bu da tabaka kalınlığındaki artışın zamanla yavaşlamasına neden olmaktadır. Öte yandan, sabit sıcaklık altında sürenin uzaması, bor atomlarının difüzyonuna daha fazla zaman tanımakta ve buna bağlı olarak tabaka kalınlığı doğrusal bir artış eğilimi göstermektedir.

1.3207 kalite çeliği; yüksek oranda tungsten, molibden, krom, vanadyum ve karbon içeren bir yüksek hız çeliğidir. Bu alaşım elementleri, borlama işlemi sonucunda oluşan borür tabakasının kalınlığı, yapısı ve mikroyapısal bütünlüğü üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Özellikle karbür oluşturma eğiliminde olan W, Mo ve V elementleri, bor atomlarının difüzyonunu sınırlandırmakta ve borlama sürecinde bir "difüzyon bariyeri" görevi görmektedir. Ayrıca bu elementlerin varlığı, malzemenin genel sertliğini artırmaktadır. Literatürdeki benzer çalışmalarda, borlama işlemine tabi tutulan demir esaslı malzemelerde karbür oluşumunun difüzyonu engellediğine dair bulgular rapor edilmiştir [51], [52].

Elde edilen bu bulgular, borlama parametrelerinin yalnızca tabaka kalınlığı değil, aynı zamanda sertlik dağılımı üzerinde de belirleyici olduğunu göstermektedir. Özellikle orta seviyedeki sıcaklıklarda daha kontrollü ve homojen yapıların elde edilebildiği, yüksek sıcaklıklarda ise mikroyapısal kararsızlıkların sertlik profilini olumsuz yönde etkileyebileceği sonucuna varılmıştır.

6. GENEL SONUÇLAR

- SEM gözlemleri, 850 °C ve 925 °C'de daha homojen, üçlü yapı (borür tabakası–geçiş bölgesi–altlık) oluştuğunu; 1000 °C'de ise geçiş bölgesinin kaybolarak yapının iki tabakaya indirgenmiş hale geldiğini ortaya koymuştur.
- FeB ve Fe₂B fazları, SEM görüntülerinde morfolojik olarak ayırt edilebilmiş; özellikle Fe₂B fazının daha kalın ve daha derin bir tabaka oluşturduğu tespit edilmiştir.
- Yüksek sıcaklıkta borlanan numunelerde, tabaka kalınlıkları artsa da çatlak oluşumu ve gözeneklilik gibi yapısal bozulmalar nedeniyle kaplama kalitesinde azalma meydana gelmiştir.
- Karbür fazlarının morfolojik dönüşümü de sıcaklığa bağlı olarak değişmiş; yuvarlak yapılar yerini ağsı ve düzensiz yapılara bırakmış, bazı bölgelerde tane sınırlarında çökelmeler gözlemlenmiştir.
- Borlama süresi sabit tutulduğunda dahi, sıcaklık artışıyla tabaka kalınlıklarında önemli artışlar gözlemlenmiştir.
- Mikrosertlik analizleri, yüzeyden altlığa doğru düzenli bir sertlik geçişi olduğunu; ancak 1000 °C gibi yüksek sıcaklıklarda bu geçişin bozulduğunu ve dalgalı sertlik profillerinin ortaya çıktığını göstermiştir.
- En yüksek yüzey sertliği, 925 °C'de 9 saat işlem uygulanan numunede ölçülmüştür.
- SEM-EDS analizleri, yüzeye yakın bölgelerde FeB fazının; daha derinlerde ise Fe₂B fazının bulunduğunu doğrulamış; bor difüzyonunun derinlikte azaldığı belirlenmiştir.
- Yapısal bütünlük ve sertlik değerlerine göre en iyi sonuçları veren 925 °C'de 9 saat işlem uygulanan numune olmuştur.
- Genel olarak, 850–925 °C'de borlama işlemi görmüş numunelerde daha dengeli, homojen ve kararlı bir borür tabakası oluştuğu; buna karşın 1000 °C gibi yüksek sıcaklıklarda hem yapısal bütünlüğün hem de sertlik dağılımının olumsuz etkilendiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu durum, borlama parametrelerinin dikkatli bir şekilde optimize edilmesinin gerekliliğini bir kez daha ortaya koymuştur.

- Borür tabaka kalınlığı, borlama sıcaklığındaki artışla parabolik bir şekilde hızla artarken, işlem süresinin uzaması, bu artışın zamanla yavaşlamasına neden olmaktadır. Öte yandan, sabit sıcaklık altında borlama süresinin uzaması tabaka kalınlığında doğrusal bir artış eğilimi göstermektedir.



KAYNAKLAR

- [1] Sinha A. K., (1991), “Boriding (boronizing)”, ASM Handbook, 4th ed., pp. 437–447.
- [2] Sidky P. S., Hocking M. G., (1999), “Review of inorganic coatings and coating processes for reducing wear and corrosion”, British Corrosion Journal, vol. 34, no. 3, pp. 171–183.
- [3] Matuschka A. G., (1980), “Boronizing”.
- [4] Okolovich G. A., (2006), “Tool steels for cold working dies”, Metal Science and Heat Treatment, vol. 48, no. 5–6, pp. 233–239.
- [5] Totten G. E., Howes M. A. H., (2003), “Tool Steels”, 5th ed. New York: Marcel Dekker Inc.
- [6] Krauss G., Thompson S. W., (1995), “Ferritic microstructures in continuously cooled low- and ultralow-carbon steels”, ISIJ International, vol. 35, no. 8, pp. 937–945.
- [7] Schlegel J., (2023), “Alloying elements and steel properties”, The World of Steel, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, pp. 63–103.
- [8] Korsós K., Kovács D., (2023), “Effects of plasma nitriding temperature on the properties of 1.3207 type high speed steel”, Acta Materialia Transylvanica, vol. 6, no. 1, pp. 29–32.
- [9] Eckardt T., Bewilogua K., Hurkmans T., Trinh T., Fleischer W., (2000), “Improving tribological properties of sputtered boron carbide coatings by process modifications”, Surf Coat Technol, vol. 126, no. 1, pp. 69–75.
- [10] Vetter J., Stüber M., Ulrich S., (2003), “Growth effects in carbon coatings deposited by magnetron sputtering”, Surf Coat Technol, vol. 168, no. 2–3, pp. 169–178.
- [11] Ertürk E., Heuvel H., (1987), “Adhesion and structure of TiN arc coatings”, Thin Solid Films, vol. 153, no. 1–3, pp. 135–147.
- [12] Buijnsters J. G., Shankar P., Fleischer W., Schermer J. J., (2002), “CVD diamond deposition on steel using arc-plated chromium nitride interlayers”, *Diam Relat Mater*, vol. 11, no. 3–6, pp. 536–544.
- [13] Freller H., Hempel A., Lilge J., Lorenz H. P., (1992), “Influence of intermediate layers and base materials on adhesion of amorphous carbon and metal-carbon coatings”.

- [14] Park H., Kappl H., Lee K. H., Lee J.J., Jehn H. A., Fenker M., (2000), “Structure modification of magnetron-sputtered CrN coatings by intermediate plasma etching steps”.
- [15] Kisasoz A., Toptop G. O., Karaaslan A., (2013), “Effects of alloying elements with various heat treatment processes on the properties of high speed steels”, *Kovove Materialy*, vol. 51, no. 3, pp. 205–209.
- [16] Azakli Y., Cengiz S., Tarakci M., Gencer Y., (2016), “Characterisation of boride layer formed on Fe-Mo binary alloys”, *Surface Engineering*, vol. 32, no. 8, pp. 589–595.
- [17] Kulka M., (2019), “Trends in thermochemical techniques of boriding”, *Engineering Materials*, Springer Science and Business Media B.V., pp. 17–98.
- [18] Gencer Y., Tarakci M., Calik A., (2008), “Effect of titanium on the boronizing behaviour of pure iron”, *Surf Coat Technol*, vol. 203, no. 1–2, pp. 9–14.
- [19] Gunduz K. O., (2011), “İkili Fe-V alaşımlarında artan vanadyum miktarının borlamaya etkisi”, *Yüksek Lisans Tezi*, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü.
- [20] Azakli Y., (2012), “Alaşım element olarak tungstenin saf demirin borlanma davranışına etkisi”, *Yüksek Lisans Tezi*, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü.
- [21] Uluköy A., Can A. Ç., (2006), “Çeliklerin borlanması”, *Pamukkale Üniversitesi Muhendislik Bilimler Dergisi*, vol. 12, no. 2, pp. 189–198.
- [22] Ozbek I., (2014), “Mechanical properties and kinetics of borided AISI M50 bearing steel”, *Arab J Sci Eng*, vol. 39, no. 6, pp. 5185–5192.
- [23] Kutucu Y., (2013), “Yüksek alaşımlı çeliklerin borlanması sonucunda oluşan ısıl artık gerilmelerin incelenmesi”, *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi.
- [24] Karaman Y., (2003), “Endüstriyel borlama ve tekstil endüstrisinde bir uygulama”, *Yüksek Lisans Tezi*, Süleyman Demirel Üniversitesi.
- [25] Birlik Z., (2022), “Plastik enjeksiyon kalıp çelik yüzeylerinin borlama ile geliştirilmesi”, *Yüksek Lisans Tezi*, Gebze Teknik Üniversitesi.
- [26] Usta M., Ozbek I., Ipek M., Bindal C., Ucisik A. H., (2005), “The characterization of borided pure tungsten”, *Surf Coat Technol*, vol. 194, no. 2–3, pp. 330–334.
- [27] Unuvar F., (2013), “Saf kobaltın borlama özelliklerinin incelenmesi”, *Yüksek Lisans Tezi*, Süleyman Demirel Üniversitesi.
- [28] Akca B., (2015), “Saf molibdenin borlama özelliklerinin incelenmesi”, *Yüksek Lisans Tezi*, Süleyman Demirel Üniversitesi.

- [29] Ozbek I., Akbulut H., Zeytin S., Bindal C., Ucisik A. H., (2000), “The characterization of borided 99.5% purity nickel”.
- [30] Fors D. H. R., Wahnström G., (2008), “Nature of boron solution and diffusion in α -iron”, Phys Rev B, vol. 77, no. 13.
- [31] Uzun H. A., (2002), “Borlama ile yüzeyleri sertleştirilen çeliklerin aşınma ve korozyona karşı dayanımları”, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi.
- [32] Massalski T. B., Murray J. L., Bennet L. H., Baker H., (1986), “Binary Alloy Phase Diagrams”, vol. 1. The United States of America: American Society for Metals.
- [33] Yapar U., (2003), “Düşük ve orta karbonlu çeliklerin termokimyasal borlama ile yüzey özelliklerinin geliştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [34] Bayça S. U., Sahin S., (2004), “Borlama”, Mühendis ve Makina, vol. 45, no. 532, pp. 51–59.
- [35] Campos-Silva I., Ortiz-Domínguez M., Tapia-Quintero C., Rodríguez-Castro G., Jiménez-Reyes M. Y., Chávez-Gutiérrez E., (2012), “Kinetics and boron diffusion in the FeB/Fe₂B layers formed at the surface of borided high-alloy steel”, J Mater Eng Perform, vol. 21, no. 8, pp. 1714–1723.
- [36] Barut N., Yavuz D., Kayalı Y., (2014), “Borlanmış AISI 5140 ve AISI 420 çeliklerinin difüzyon ve adhezyon davranışlarının incelenmesi”, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi.
- [37] Taktak S., (2007), “Some mechanical properties of borided AISI H13 and 304 steels”, Mater Des, vol. 28, no. 6, pp. 1836–1843.
- [38] Cimenoglu H., Atar E., Motallebzadeh A., (2014), “High temperature tribological behaviour of borided surfaces based on the phase structure of the boride layer,” Wear, vol. 309, no. 1–2, pp. 152–158.
- [39] Kumar R., Sharma N., Singh H., Arora H. S., (2019), “Properties and high temperature dry sliding wear behavior of boronized inconel 718”, Mater Res Express.
- [40] Yardım U., (2022), “Borlama yöntemiyle yüzeyi sertleştirilmiş R260 ray çeliğinin aşınma davranışının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Katip Çelebi Üniversitesi.
- [41] Sahinturk U., (2011), “Fe-Si ikili alaşımlarında artan silisyum miktarının borlanma özelliklerine etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü.
- [42] Mackan B. N., (2019), “Fe-Cr-Ni üçlü alaşımlarının borlanması ve karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü.

- [43] Tastan F., (2010), “Farklı bileşimlere sahip çeliklerin borlama işlemi ile yüzey özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi.
- [44] Sert M., (2019), “AISI 304L paslanmaz çeliğin KRTD-BOR yöntemi ile borlanması”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [45] Duran H., Özkan D., Karaoğlanlı A. C., (2021), “Borlama işlemi uygulanmış Inconel 718 süperalaşımın mikroyapı, aşınma ve mekanik özelliklerinin incelenmesi”, *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, vol. 11, pp. 61–72.
- [46] Ayyıldız U., (2024), “AISI H13 çeliğinin korozyon, tribolojik ve tribokorozyon performansının kutu ve elektrokimyasal esaslı borlama yöntemleriyle geliştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Seyh Edebalı Üniversitesi.
- [47] Kayalı Y., Yalçın Y., (2020), “Borlanmış AISI 316L paslanmaz çeliğin difüzyon kinetiğinin incelenmesi”, *Journal of Materials and Mechatronics*, vol. 1, no. 1, pp. 12–21.
- [48] Günen A., (2020), “Properties and corrosion resistance of AISI H13 hot-work tool steel with borided B4C powders”, *Metals and Materials International*, vol. 26, no. 9, pp. 1329–1340.
- [49] Genel K., (2006), “Boriding kinetics of H13 steel”, *Vacuum*, vol. 80, no. 5, pp. 451–457.
- [50] Arslan D., (2017), “Kutu borlama işlemi uygulanmış çeliklerin yüksek sıcaklık yorulma dayanımlarının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi.
- [51] Ozbek I., Bindal C., (2011), “Kinetics of borided AISI M2 high speed steel”, *Vacuum*, vol. 86, no. 4, pp. 391–397.
- [52] Ozbek I., Bindal C., (2002), “Mechanical properties of boronized AISI W4 steel”.
- [53] Genel K., Ozbek I., Bindal C., (2003), “Kinetics of boriding of AISI W1 steel,” *Material Science and Engineering*, pp. 311–314.
- [54] Sen S., Ozbek I., Sen U., Bindal C., (2001), “Mechanical behavior of borides formed on borided cold work tool steel”.
- [55] Gutierrez-Noda L., Cuao-Moreu C. A., Perez-Acosta O., Lorenzo-Bonet E., Zambrano-Robledo P., Hernandez-Rodriguez M. A. L., (2019), “The effect of a boride diffusion layer on the tribological properties of AISI M2 steel”, *Wear*, vol. 426–427, pp. 1667–1671.
- [56] Erdogan M., Gunes I., (2015), “Corrosion behavior and microstructure of borided tool steel”, *Revista Materia*, vol. 20, no. 2, pp. 523–529.
- [57] Uslu I., Comert H., Ipek M., Ozdemir O., Bindal C., (2007), “Evaluation of borides formed on AISI P20 steel”, *Mater Des*, vol. 28, no. 1, pp. 55–61.

[58] Tan H. O., Atasoy S., Aktaş S., (2024), “The Effect of Boriding Temperature and Time on the Structural and Mechanical Properties of M42 Steel”, *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, vol. 13, no. 2, pp. 1–5.

[59] Oliveira C. K. N., Casteletti L. C., Neto A. L., Totten G. E., Heck S. C., (2010), “Production and characterization of boride layers on AISI D2 tool steel”, *Vacuum*, vol. 84, no. 6, pp. 792–796.

[60] Karaarslan İ., Dal S., (2023), “Soğuk iş takım çeliği tel çekme çenelerinin aşınma dirençlerinin termokimyasal borlama yöntemiyle iyileştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Hacı Bektas Veli Üniversitesi.

[61] Ozbek İ., (1999), “Borlama yöntemiyle (AISI M50, AISI M2) yüksek hız çeliklerinin ve AISI W1 çeliğinin yüzey performanslarının geliştirilmesi”, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi.



ÖZGEÇMİŞ

Serdar TOZKOPARAN, 2013 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimine başlamış ve 2018 yılında mezun olmuştur. 2023 yılında Gebze Teknik Üniversitesi Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başlamıştır.

2019–2022 yılları arasında, bakır ve bakır alaşımları üretimi yapan bir firmada Ar-Ge Mühendisi olarak görev almıştır. 2022 yılı itibarıyla Erdemir Ar-Ge Merkezi'nde Proje Yöneticisi olarak çalışma hayatına devam etmektedir.



TEZ METNİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

Tozkoparan S., Gençer Y., Tarakçı M., Coşan K.A., Ceylan D., (2025), “1.3207 Yüksek Hız Çelik Yüzeyinin Kutu Borlama Yöntemiyle Modifikasyonu”, 5. Uluslararası Bilimsel Araştırmalar ve Yenilikçi Çalışmalar Sempozyumu, 465-466, Balıkesir, 19-22 Mart.

