

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PLASTİK ENJEKSİYON KALIP ÇELİK YÜZEYLERİNİN
BORLAMA İLE GELİŞTİRİLMESİ

ZÜLEYHA BİRLİK
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2022

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PLASTİK ENJEKSİYON KALIP ÇELİK
YÜZEYLERİNİN BORLAMA İLE
GELİŞTİRİLMESİ

ZÜLEYHA BİRLİK
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
PROF. DR. YÜCEL GENÇER

GEBZE
2022

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**IMPROVEMENT OF PLASTIC INJECTION
MOLD STEEL SURFACES BY BORIDING**

ZÜLEYHA BİRLİK
**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE**
DEPARTMENT OF MATERIAL SCIENCE AND ENGINEERING

THESIS SUPERVISOR
PROF. DR. YÜCEL GENÇER

GEBZE
2022



YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 07/02/2022 tarih ve 2022/08 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 18/05/2022 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Züleyha Birlik'in 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. Mediha İPEK

ÜYE

: Dr. Öğr. Üyesi Kerem Özgür GÜNDÜZ

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Bu çalışmada sanayide kullanılan DIN 1.2313, DIN 1.2842, DIN 1.2738, DIN 1.2343 plastik (enjeksiyon) takım çelikleri, kutu borlama yöntemi ile 850°C, 950°C ve 1050°C’de 3 saat süre ile kaplanmıştır. Oluşturulan kaplamanın mikroyapısı, faz bileşimi, mikrosertliği, kimyasal bileşimi, X-ray kırınımı, optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu, enerji dağılım spektroskopisi ve mikrosertlik ölçüm cihazı ile karakterize edilmiştir. Çalışılan üç sıcaklıkta da kaplama tabakası, altlık malzemeye yapışmıştır. Tüm numunelerin borür tabakasında FeB ve Fe₂B fazlarının varlığı tespit edilmiştir. Borür tabakası testere dişi morfolojisinde olduğu, ancak testere dişli yapının altlıktaki elementlerin miktarının artması ile düzleştiği görülmüştür. DIN 1.2343 numunesinin yüzeyinde borür tabakasına ilaveten geçiş bölgesi ve bu bölgede oluşan çökelti benzeri yapılarak bir şekilde görülmüştür. Borlanan dört farklı çelik numunede de mikrosertlik, borür tabakadan matrise doğru gidildikçe azalma göstermektedir. Bileşiminde Mo ve Cr içeren DIN 1.2343 çeliği en düşük kaplama kalınlığına sahip olduğu görülmüştür. Tüm numunelerde borlama sıcaklığı arttıkça kaplama kalınlığı doğrusal bir şekilde artmış, en yüksek borür tabaka kalınlıkları 1050°C’de oluşmuştur. Bileşiminde daha düşük miktarda Mo (at. %0,2) ve Cr (at. %0,2-1,9) içeren çelik numunelerin kaplama kalınlıkları birbirine yakın olup, bileşiminde Mo (at. %1,12) ve Cr (at. %5,11) miktarı daha yüksek olan DIN 1.2343 çeliğinin en düşük kaplama kalınlığına sahip olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Kutu Borlama, Takım Çelikleri, Demir Borür, Plastik Enjeksiyon Çelikleri.

SUMMARY

In this study, DIN 1.2313, DIN 1.2842, DIN 1.2738, DIN 1.2343 alloy steels, which are plastic (injection) tool steels used in industry, were coated with pack boriding method at 850°C, 950°C, and 1050°C for 3 hours. The microstructure of the coating, phase composition, microhardness and chemical composition of the coating were characterized, by X-ray diffraction, optical microscopy, scanning electron microscopy, and energy distribution spectroscopy and microhardness testers. At all three boronizing temperatures, the coating layer adhered well to the substrates. FeB and Fe₂B phases were evident in the boride layers of all samples. The saw-tooth morphology of the boride layer was formed, but the saw-tooth structure became flat with the increase in the amount of elements in the substrate. In addition to the boride layer on the surface of DIN 1.2343, the transition zone and precipitate like structures formed in this region were clearly seen. In all four different boronized steel samples, the microhardness decreased from the boride layer to the substrates. DIN 1.2343 steel with considerable amount of Mo and Cr has the lowest coating thickness in its boride layer formed. As the temperature increased in all samples, the coating thickness also increased linearly, and the highest boride layer thicknesses were at 1050°C. The coating thicknesses are close to each other for steel samples containing lower amounts of Mo (at. 0.2%) and Cr (at. 0.2%-1.9%) in their composition. It was observed that DIN 1.2343 steel, which has a higher Mo (at. 1.12%) and Cr (at. 5.11%) content in its composition, has the lowest coating thickness.

Key Words: Pack Boriding, Tool Steels, Iron Boride, Plastic Injection Steels.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan, değerli danışmanım Prof. Dr. Yücel Gençer'e tüm destekleri için teşekkür ederim. Deneysel çalışmalarımda benden bilgi ve deneyimlerini esirgemeyen ve her konuda destek olan değerli hocam Prof. Dr. Mehmet Tarakçı'ya da teşekkürlerimi sunarım. Literatür çalışmalarımda değerli desteklerinden dolayı Dr. Öğr. Üyesi Kerem Özgür Gündüz'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam için gerekli olan deneysel çalışmalarımda bana yardımcı olan Arş. Gör. Dr. Sezgin Cengiz'e, arkadaşım Doğançan Ceylan'a, Uzman Adem Şen'e ve Uzman Ahmet Nazım'a teşekkürü bir borç bilirim.

Kariyer ve eğitim hayatımın her aşamasında her zaman bana destek olan, Farplas Otomotiv CCO'su Tolga Yalgı'ya, PHI Metal Otomotiv Üretim ve Arge Müdür'ü İlker Demir'e ve Cihan Gürbüz'e teşekkürü borç bilirim.

Bugünlere gelmemde çok büyük emeği olan, hayatım boyunca beni destekleyen ve her zaman arkamda olan annem Fazilet Yünkül'e, babam İrfan Yünkül'e ve değerli kardeşlerime sonsuz sevgi ve teşekkürü borç bilirim.

Son olarak tez sürecimde beni her zaman destekleyen ve bu süreçte her konuda yardımcı olan sevgili eşim Can Birlik'e teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLolar DİZİNİ	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği	1
2. TAKIM ÇELİKLERİ	2
2.1. Takım Çeliklerinden Beklenen Özellikler	3
2.2. Takım Çeliklerinin Alaşım Elementlerine Etkisi	4
2.3. Takım Çeliklerinin Sınıflandırılması	6
2.3.1. Sıcak İş Takım Çelikleri	6
2.3.2. Soğuk İş Takım Çelikleri	9
2.3.3. Yüksek Hız Takım Çelikleri	11
2.3.4. Plastik Takım Çelikleri	12
2.4. Takım Çeliklerine Uygulanan Yüzey Modifikasyon Yöntemleri	15
2.4.1. Elektrokimyasal Uygulamalar	16
2.4.1.1. Sert Krom Kaplama	17
2.4.1.2. Nikel Kaplama	17
2.4.2. Düşük Basınçta Kaplama Uygulamaları	18
2.4.2.1. Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemleri ile Kaplama	19
2.4.2.2. Fiziksel Buhar Biriktirme Yöntemleri ile Kaplama	20
2.4.3. Termokimyasal Uygulamalar	21
2.4.3.1. Karbürleme	21
2.4.3.2. Nitrürleme	22

3. BORLAMA	25
3.1. Borlamanın Avantajları ve Dezavantajları	26
3.2. Borlama Yöntemleri	29
3.2.1. Kutu Borlama	30
3.2.2. Pasta Borlama	35
3.2.3. Sıvı Borlama	35
3.2.4. Gaz Borlama	36
3.2.5. Plasma Borlama	37
3.2.6. Akışkan Yataklı Fırınlarda Borlama	30
3.3. Borlanabilen Malzemeler ve Borürlerin Genel Özellikleri	40
3.4. Fe-B İkili Denge Diyagramı	44
3.5. Demir Borürlerin Büyüme Mekanizması	46
3.6. Demir Esaslı Malzemelerin Borlanması	48
3.7. Alaşım Elementlerinin Borlamaya Etkisi	48
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	53
4.1. Giriş	53
4.2. Altlık Malzemeler ve Hazırlanması	54
4.3. Borlama İşlemi	55
4.4. Yüzey X-ışını Kırınımı Analizi	55
4.5. Numunelerin Kesit Karakterizasyonuna Hazırlanması	56
4.6. Kesitten Mesafeye Bağlı Mikrosertlik Ölçümü	56
4.7. Kesitten Mikroyapı İncelenmesi	57
4.8. SEM-EDS Analizi	58
5. SONUÇLAR	59
5.1. Mikroyapı İnceleme Sonuçları (OM & SEM)	59
5.1.1. DIN 1.2312 Çeliği	59
5.1.2. DIN 1.2842 Çeliği	64
5.1.3. DIN 1.2738 Çeliği	68
5.1.4. DIN 1.2343 Çeliği	73
5.2. Kaplama Kalınlığı	77
5.3. Mikrosertlik Sonuçları	81
5.4. SEM-EDS Analiz Sonuçları	97
5.4.1. DIN 1.2312	98

5.4.2. DIN 1.2842	101
5.4.3. DIN 1.2738	104
5.4.4. DIN 1.2343	107
5.5. XRD Analizi	111
5.5.1. DIN 1.2312	112
5.5.2. DIN 1.2842	114
5.5.3. DIN 1.2738	116
5.5.4. DIN 1.2343	118
6. DEĞERLENDİRME	120
7. GENEL SONUÇLAR	124
 KAYNAKLAR	 125
ÖZGEÇMİŞ	129
EKLER	130

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u>	<u>Açıklamalar</u>
<u>Kısaltmalar</u>	
%	: Yüzde
o	: Derece
µm	: Mikron
AISI	: Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
at	: Atomca
Atm	: Atmosfer
cm ³	: Santimetreküp
CVD	: Kimyasal Buhar Biriktirme
EDS	: Enerji Dağılım Spektrometresi
g	: Gram
HRC	: Rocwell Sertlik
HV	: Vickers Sertlik
MPa	: Mega Pascal
N	: Newton
OM	: Optik Mikroskop
PVD	: Fiziksel Buhar Biriktirme
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
sn	: Saniye
XRD	: X Işını Kırınımı

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Sıcak iş takım çeliklerinin sertleştirilmesinde zaman-sıcaklık grafiği.	9
2.2: Titanyum karbür çökeltimi şeması.	19
2.3: PVD tekniği uygulamasının şematik olarak gösterimi.	20
2.4: Kutu karbürleme işleminin şematik gösterimi.	22
3.1: Katı borlama işleminin şematik gösterimi.	31
3.2: Düşük karbonlu bir çelikte (Ck 45) kutu borlama sıcaklığı ve süresinin borür tabaka kalınlığına etkisi.	34
3.3: Gaz ortamında borlama işleminin şematik gösterimi.	37
3.4: Plazma borlama işleminin şematik gösterimi.	38
3.5: Akışkan yataklı fırında borlama işleminin şematik gösterimi.	39
3.6: Fe-B Faz Diyagramı.	44
3.7: Konvansiyonel borlama sırasında borür tabakasının oluşum mekanizması (a), çekirdeklenme aşaması (b) ve (c) <001> oryantasyonunda büyüme aşaması.	46
3.8: Borlanan AISI 1018 malzemesi yüzeyinde oluşan borür tabakanın (FeB dış tabaka ve Fe ₂ B iç tabaka) testere dişi yapısı.	48
3.9: Çelik bileşiminin borür tabakasının morfolojisi ve kalınlığına etkisi; a, 1018 Çeliği (0,20% C); b, 4340 Çeliği (0,40% C -1.67% Cr - 0.84% Ni); c, 304 Çeliği (%18 Cr).	49
3.10: Çelikteki alaşım elementlerinin borür tabakası kalınlığına etkisi.	49
4.1: DeneySEL çalışmaların akış diyagramı.	53
4.2: Vickers ucu ile oluşturulan izin a) Şematik gösterimi ve b) Borlanan bir numune kesitindeki tipik SEM görüntüsü.	57
5.1: 850°C borlanmış DIN 1.2312 çeliğinin kesitten alınan mikroyapı görüntüleri; a) OM, b) SEM.	59
5.2: 950°C borlanmış DIN 1.2312 çeliğinin kesitten alınan mikroyapı görüntüleri; a) OM, b) SEM.	61
5.3: 1050°C borlanmış DIN 1.2312 çeliğinin kesitten alınan mikroyapı görüntüleri; a) OM, b) SEM.	62

5.4:	850°C borlanmış DIN 1.2842 çeliğinin kesitten alınan mikroyapı görüntüleri; a) OM, b) SEM.	64
5.5:	950°C borlanmış DIN 1.2842 çeliğinin kesitten alınan mikroyapı görüntüleri; a) OM, b) SEM.	65
5.6:	1050°C borlanmış DIN 1.2842 çeliğinin kesitten alınan mikroyapı görüntüleri; a) OM, b) SEM.	67
5.7:	850°C borlanmış DIN 1.2738 çeliğinin kesitten alınan mikroyapı görüntüleri; a) OM, b) SEM.	68
5.8:	950°C borlanmış DIN 1.2738 çeliğinin kesitten alınan mikroyapı görüntüleri; a) OM, b) SEM.	70
5.9:	1050°C borlanmış DIN 1.2738 çeliğinin kesitten alınan mikroyapı görüntüleri; a) OM, b) SEM.	71
5.10:	850°C borlanmış DIN 1.2343 çeliğinin kesitten alınan mikroyapı görüntüleri; a) OM, b) SEM.	73
5.11:	950°C borlanmış DIN 1.2343 çeliğinin kesitten alınan mikroyapı görüntüleri; a) OM, b) SEM.	74
5.12:	1050°C borlanmış DIN 1.2343 çeliğinin kesitten alınan mikroyapı görüntüleri; a) OM, b) SEM.	76
5.13:	DIN 1.2312 numunesinin yüzeyinde oluşan borür tabaka (kaplama) kalınlığının borlama sıcaklığına bağlı olarak değişimi.	77
5.14:	DIN 1.2842 numunesinin yüzeyinde oluşan borür tabaka (kaplama) kalınlığının borlama sıcaklığına bağlı olarak değişimi.	78
5.15:	DIN 1.2738 numunesinin yüzeyinde oluşan borür tabaka (kaplama) kalınlığının borlama sıcaklığına bağlı olarak değişimi.	79
5.16:	DIN 1.2343 numunesinin yüzeyinde oluşan borür tabaka (kaplama) kalınlığının borlama sıcaklığına bağlı olarak değişimi.	79
5.17:	Tüm numunelerin yüzeyinde oluşan borür tabaka kalınlığının borlama sıcaklığına bağlı olarak değişimi.	80
5.18:	950°C’de borlanan DIN 1.2312 numunesinin kesitinde oluşturulan Vickers sertlik izlerinin, tipik SEM görüntüsü.	82
5.19:	950°C’de borlanan DIN 1.2312 numunesinin kesitinde oluşturulan Vickers sertlik izlerinin, yüzeyden sertlik izi merkezine kadar olan mesafelerini gösteren tipik SEM görüntüsü.	82

5.20:	950°C’de borlanan DIN 1.2312 numunesinin kesitinde oluşturulan Vickers sertlik izlerinin köşegen uzunluklarının tipik SEM görüntüsü.	83
5.21:	850°C’de borlanan DIN 1.2312 numunesinin kesitinde oluşturulan Vickers sertlik izlerinin tipik SEM görüntüsü.	85
5.22:	950°C’de borlanan DIN 1.2312 numunesinin kesitinde oluşturulan Vickers sertlik izlerinin tipik SEM görüntüsü.	85
5.23:	1050°C’de borlanan DIN 1.2312 numunesinin kesitinde oluşturulan Vickers sertlik izlerinin tipik SEM görüntüsü.	86
5.24:	DIN 1.2312 numunesinin farklı sıcaklıklarda yüzeyden altlığa doğru mikrosertlik değişimi.	86
5.25:	850°C’de borlanan DIN 1.2343 numunesinin kesitinde oluşturulan Vickers sertlik izlerinin tipik SEM görüntüsü.	88
5.26:	950°C’de borlanan DIN 1.2343 numunesinin kesitinde oluşturulan Vickers sertlik izlerinin tipik SEM görüntüsü.	88
5.27:	1050°C’de borlanan DIN 1.2343 numunesinin kesitinde oluşturulan Vickers sertlik izlerinin tipik SEM görüntüsü.	89
5.28:	DIN 1.2343 numunesinin farklı sıcaklıklarda yüzeyden altlığa doğru mikrosertlik değişimi.	89
5.29:	850°C’de borlanan DIN 1.2738 numunesinin kesitinde oluşturulan Vickers sertlik izlerinin tipik SEM görüntüsü.	91
5.30:	950°C’de borlanan DIN 1.2738 numunesinin kesitinde oluşturulan Vickers sertlik izlerinin tipik SEM görüntüsü.	91
5.31:	1050°C’de borlanan DIN 1.2738 numunesinin kesitinde oluşturulan Vickers sertlik izlerinin tipik SEM görüntüsü.	92
5.32:	DIN 1.2738 numunesinin farklı sıcaklıklarda yüzeyden altlığa doğru mikrosertlik değişimi.	92
5.33:	850°C’de borlanan DIN 1.2842 numunesinin kesitinde oluşturulan Vickers sertlik izlerinin tipik SEM görüntüsü.	94
5.34:	950°C’de borlanan DIN 1.2842 numunesinin kesitinde oluşturulan Vickers sertlik izlerinin tipik SEM görüntüsü.	94
5.35:	1050°C’de borlanan DIN 1.2842 numunesinin kesitinde oluşturulan Vickers sertlik izlerinin tipik SEM görüntüsü.	95

5.36:	DIN 1.2842 numunesinin farklı sıcaklıklarda yüzeyden altlığa doğru mikrosertlik değişimi.	95
5.37:	1050°C’de borlanan DIN 1.2312 çeliğinin kesitten alınan SEM fotoğrafı, bu fotoğrafta SEM-EDS analizi yapılan işaretli bölgeler ve bu bölgelerden elde edilen SEM-EDS spektruları; (a) SEM fotoğrafı ve işaretli bölgeler, (b) ‘1’ ile işaretli bölgenin, (c) ‘2’ ile işaretli bölgenin, (d) ‘3’ ile işaretli bölgenin, (e) ‘4’ ile işaretli bölgenin SEM-EDS spektrumu.	98
5.38:	1050°C’de borlanan DIN 1.2842 çeliğinin kesitten alınan SEM fotoğrafı, bu fotoğrafta SEM-EDS analizi yapılan işaretli bölgeler ve bu bölgelerden elde edilen SEM-EDS spektruları; (a) SEM fotoğrafı ve işaretli bölgeler, (b) ‘1’ ile işaretli bölgenin, (c) ‘2’ ile işaretli bölgenin, (d) ‘3’ ile işaretli bölgenin, (e) ‘4’ ile işaretli bölgenin SEM-EDS spektrumu.	101
5.39:	1050°C’de borlanan DIN 1.2738 çeliğinin kesitten alınan SEM fotoğrafı, bu fotoğrafta SEM-EDS analizi yapılan işaretli bölgeler ve bu bölgelerden elde edilen SEM-EDS spektruları; (a) SEM fotoğrafı ve işaretli bölgeler, (b) ‘1’ ile işaretli bölgenin, (c) ‘2’ ile işaretli bölgenin, (d) ‘3’ ile işaretli bölgenin, (e) ‘4’ ile işaretli bölgenin SEM-EDS spektrumu.	104
5.40:	1050°C’de borlanan DIN 1.2343 çeliğinin kesitten alınan SEM fotoğrafı, bu fotoğrafta SEM-EDS analizi yapılan işaretli bölgeler ve bu bölgelerden elde edilen SEM-EDS spektruları; (a) SEM fotoğrafı ve işaretli bölgeler, (b) ‘1’ ile işaretli bölgenin, (c) ‘2’ ile işaretli bölgenin, (d) ‘3’ ile işaretli bölgenin, (e) ‘4’ ile işaretli bölgenin SEM-EDS spektrumu.	107
5.41:	950°C’de borlanan DIN 1.2343 çeliğinin kesitten alınan SEM-EDS fotoğrafı ve bu fotoğrafta SEM-EDS analizi yapılan işaretli bölgeler.	109
5.42:	Borlama öncesi ve farklı sıcaklıklarda borlama sonrası DIN 1.2312 çeliğinin yüzeyinden elde edilen XRD desenleri; (a) Borlama öncesi, (b) 850°C, (c) 950°C, (d) 1050°C.	112

- 5.43: Borlama öncesi ve farklı sıcaklıklarda borlama sonrası DIN 1.2842 114
çeliğinin yüzeyinden elde edilen XRD desenleri; (a) Borlama öncesi, (b)
850°C, (c) 950°C, (d) 1050°C.
- 5.44: Borlama öncesi ve farklı sıcaklıklarda borlama sonrası DIN 1.2738 116
çeliğinin yüzeyinden elde edilen XRD desenleri; (a) Borlama öncesi, (b)
850°C, (c) 950°C, (d) 1050°C.
- 5.45: Borlama öncesi ve farklı sıcaklıklarda borlama sonrası DIN 1.2343 118
çeliğinin yüzeyinden elde edilen XRD desenleri; (a) Borlama öncesi, (b)
850°C, (c) 950°C, (d) 1050°C.

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Matris yapısına/karbonla etkileşimlerine göre elementler.	5
2.2: Sıcak iş takım çeliklerinin kimyasal bileşimi.	7
2.3: Soğuk iş takım çeliklerinin kimyasal bileşimi.	10
2.4: Plastik takım çelikleri için önerilen ısıtım işlem uygulamaları.	14
3.1: Bazı yüzey sertleştirme işlemleri ile elde edilen ve bazı malzemelerin sertlikleri.	27
3.2: Kutu borlama işleminde kullanılan bazı bor kaynakları.	32
3.3: Tipik ticari borlama toz karışımlarının bileşenleri.	32
3.4: Ekabor borlama ürünleri ve özellikleri.	33
3.5: Fe ₂ B ve FeB'nin bazı özellikleri.	41
3.6: Farklı altlık malzemelerin borlanması sonucu oluşan farklı borür fazlarının ergime sıcaklığı ve mikrosertliği.	43
4.1: Deneyisel çalışmalarda kullanılan altlık çeliklerin kimyasal bileşimi.	54
5.1: Farklı sıcaklıklarda borlama işlemine tabi tutulan altlık malzemelerin ve bu malzemelerin yüzeyinde oluşan borür tabakanın ortalama sertlik değerleri.	96
5.2: 1050°C'de borlanmış DIN 1.2312 çeliğinin Şekil 5.37'de işaretlenmiş bölgelerden yapılan SEM-EDS analizi sonucu elde edilen element miktarları (% atomik).	100
5.3: 1050°C'de borlanmış DIN 1.2842 çeliğinin Şekil 5.38'de işaretlenmiş bölgelerden yapılan SEM-EDS analizi sonucu elde edilen element miktarları (% atomik).	103
5.4: 1050°C'de borlanmış DIN 1.2738 çeliğinin Şekil 5.39'da işaretlenmiş bölgelerden yapılan SEM-EDS analizi sonucu elde edilen element miktarları (% atomik).	106
5.5: 1050°C'de borlanmış DIN 1.2343 çeliğinin Şekil 5.40'da işaretlenmiş bölgelerden yapılan SEM-EDS analizi sonucu elde edilen element miktarları (% atomik).	109

5.6: 950°C’de borlanmış DIN 1.2343 çeliğinin Şekil 5.41’de işaretlenmiş 110 bölgelerden yapılan SEM-EDS analizi sonucu elde edilen element miktarları (% atomik).

1. GİRİŞ

1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği

Plastiklerin (polimer malzemelerin) başta enjeksiyon olmak üzere, ekstrüzyon, şişirme ve çeşitli presleme teknikleriyle şekillendirilmesinde kullanılan çeliklere, plastik (enjeksiyon) takım çeliği denir. Plastik takım çelikleri seçimi yapılırken; korozyon direnci, aşınma dayanımı, işlenebilirlik, boyutsal kararlılık, ısı iletkenlik, kaynak edilebilirlik, kayma özelliği (plastik parçanın kalıba yapışmadan ayrılması), kalıp yüzeyinde malzeme kalıntılarının ve yapışmanın azalması gibi kriterler kullanım alanına göre yüksek önem taşımaktadır. Birden fazla özelliği aynı çelik malzeme elde etmek her zaman mümkün olmadığı için, çelik üreticileri ve kullanıcıları plastik parça üreticileri ile, uygun işlemleri kullanarak, enjeksiyon kalıplarının kalitesini ve servis ömrünü arttırmaya çalışmaktadırlar. Bu iyileştirme genelde malzeme kütle (bulk) özelliklerini arttırmaktan daha çok farklı yüzey iyileştirme yöntemleri ile yapılmaktadır. Termokimyasal yöntemlerden olan nitrürleme, karbürleme ve bu metotların türevleri (karbonitrürleme) ile plastik enjeksiyon çeliklerinin yüzey özelliklerinin geliştirmesi endüstride oldukça yaygındır. Bu yüzey iyileştirme yöntemleri ile kalıp yüzeyinde aşınma ve korozyona dirençli bir tabaka oluşturulması amaçlanmaktadır. Nitrürleme, karbürlemeye ilaveten son zamanlarda borlama tekniği de plastik takım çeliklerinin yüzey özelliklerinin geliştirilmesi için gelecek vaat eden bir termokimyasal kaplama yöntemidir.

Bu tez çalışmasında nitrürleme ile yüzey iyileştirme işlemine tabi tutulan farklı plastik takım çeliklerinin (DIN 1.2738, DIN 1.2312) farklı proses şartlarında borlanarak yüzey geliştirmesi hedeflenmektedir. Bu çeliklere ilaveten plastik takım çeliği olarak kullanılabilecek iki takım çeliği (DIN 1.2343 ve DIN 1.2842) de borlama işlemine tabi tutulmuştur. Bu tez çalışması kapsamında bu dört takım çeliği farklı sıcaklıklarda aynı süre boyunca kutu borlama tekniği ile borlanmış ve oluşan borür tabaka farklı karakterizasyon teknikleri ile karakterize edilmiştir.

2. TAKIM ÇELİKLERİ

Takım çelikleri, döküm, dövme ve ekstrüzyon kalıbı malzemesi, aynı zamanda da plastik, demir dışı ve çelikler de dahil olmak üzere çeşitli malzemelerin şekillendirilmesi ve kesilmesi işlemlerinde kullanılan demir esaslı alaşımlar olarak tanımlanmaktadır [1]. Sertleştirilebilen ve temperlenebilen karbon alaşımlı veya yüksek hızlı takım çelikleri genellikle elektrikli fırınlarda ergitilerek özel gereksinimleri karşılamak için üretilirler. Bazı el aletlerinde, yüksek sıcaklıklarda malzemelerin kesilmesi, şekillendirilmesi, form verilmesi, boşaltılması işlemlerine uygun olarak mekanik fikstürler olarak kullanılabilirler [8]. Takım çelikleri, aynı zamanda, optimum performans için aşınma direnci, mukavemet, tokluk ve diğer özelliklerin seçildiği çok çeşitli diğer uygulamalarda da kullanılmaktadır. Takım çelikleri, yaylar, mıknatıslar, yataklar ve hatta yapısal uygulamalarda kullanılmak üzere beklenen özelliklerde üretilir ve kullanılırlar.

Takım çelikleri, sertleştirilme ve temperlenme özelliğine sahip karbon ve alaşımlı çelikler, aynı zamanda da yüksek hız çelikleridir. 1868 yılında havada sertleşen tungsten alaşımlı takım çeliklerinin üretimi ile başlayan süreç 1898 yılında yüksek hız çelikleri, 1904 yılında vanadyum ile alaşımlama, 1906'da elektrik ark fırını uygulamaları, 1970'de takım çeliklerinde toz metalurjisi uygulamaları ve 1980'lerle birlikte ince film kaplama uygulamaları ile devam etmiştir [1]. Karbon ve düşük alaşımlı çubuk çelikler yüksek hacimde, yüksek kalitede elektrikli ark fırınlarda ergime, safsızlık ve inklüzyon kontrolü için pota metalurjisi ve sürekli döküm ile üretilmektedir. Bununla birlikte, takım çelikleri özeldir ve dikkatli üretim gerektirir.

Modern takım çelikleri, yüksek sertlikleri nedeniyle alaşımlamaya ve ısı işleme büyük ölçüde bağlıdır ve 19. yüzyılda karbon içeriği, alaşım bileşimi ve işleme arasındaki ilişkiler anlaşılmaya başlamıştır. Eş zamanlı olarak, çeliklerin mikro yapısını çözebilecek hassas kimyasal analiz ve metalografi yöntemlerde gelişmeye başlamıştır.

Modern takım çelikleri çağını başlatan alaşımlama, 1868'de yüksek karbonlu çeliğe tungsten ekleyen Robert Mushet'e atfedilir [3]. 1900 yılına kadar "R. Mushet'in Özel Takım Çeliği" olarak pazarlanan Mushet çeliğinin bileşimi, nominal olarak %2 C, %2,5 Mn, %7 W ve %0,50 Cr ve %1,10 Si olarak tanımlanır [3]. Mushet çeliği,

dövme veya ısıtma işleminden sonra hava ile soğutma sırasında olağanüstü sertleşme kapasitesine sahiptir ve ilk yüksek hızlı çelik olarak kabul edilir.

2.1. Takım Çeliklerinden Beklenen Özellikler

Takım çeliklerinin, kimyasal kompozisyonları ve barındırdıkları özellikleri nedeniyle, uygulama alanları ve çalışma koşulları göz önünde bulundurulduğunda beklenen özellikleri mevcuttur. Tribolojik, mekanik, termal ve kimyasal yükleme altında çalışan bu çelikler diğer çelik gruplarına göre içerik olarak daha zengindir.

Çalışma koşulları göz önünde bulundurulduğunda, daha yüksek performans için takım çeliklerinden beklenen özellikler aşağıdaki gibi sıralanabilir [1], [8].

- İyi işlenebilirlik
- Yüksek süneklik
- Yüksek tokluk
- Yüksek termal yorulma ve termal şok direnci
- Homojen mikroyapı
- Yüksek sertlik
- Yüksek mukavemet
- İyi parlatılabilirlik
- Yüksek sertleşebilme özelliği
- Isıl işlemde boyutsal kararlılık
- Yüzey işlemlerine uygunluk
- Yüksek termal iletkenlik
- Düşük termal genleşme

Takım çeliklerinden beklenen yüksek performans özellikleri mikroyapı ile doğrudan ilişkilidir. Mikroyapının ise doğrudan ısıtma işlemi, üretim koşulları, yüzey işlemleri ve çelik malzemenin barındırdığı fiziksel ve kimyasal özellikleri ile ilişkili olduğu söylemek mümkündür.

2.2. Takım Çeliklerine Alaşım Elementlerinin Etkisi

Çelikler, yaklaşık %2,14'e kadar karbon içeren demir karbon alaşımı olarak tanımlanmaktadır.

Çelikleri yalın karbonlu, düşük alaşımlı ve yüksek alaşımlı olarak sınıflamak mümkündür. Takım çelikleri yüksek alaşımlı çelikler sınıfına aittir. Karbon, birçok çelik türü için ana alaşım elementidir ve düşük alaşımlı karbon çeliklerinkine benzer şekilde takım çeliği teknolojisi, büyük ölçüde karbonun mikroyapı ve özellikler üzerindeki etkilerinin kontrolüne dayanmaktadır. Bununla birlikte, takım çeliklerinin karbon içeriği genellikle çoğu yapısal çeliklerden daha yüksektir [21]. Takım çeliklerinin yüksek karbonlu ve alaşımlı içerikleri, martensit ve çeşitli karbürler gibi kristal fazların oluşumu ile çok yüksek mukavemet ve sertlik üretmek için kullanılır [3]. Fazlar, katılaştırma veya toz işleme, sıcak haddeme ve ısıtma işlemi mikroyapılar halinde düzenlenir. Sertleştirilmiş takım çeliklerinde, tipik mikroyapı, temperlenmiş martensit matrisi içinde sert karbürlerin dağılımından oluşur [3]. Alaşımlama ve işleme koşullarına bağlı olarak bu mikroyapının birçok varyasyonu mevcuttur. Takım çelikleri, sistemin her mikroyapısal bileşeninin alaşımdan etkilendiği karmaşık mikroyapısal sistemlerden oluşur.

Fazlar, bir alaşım sistemini oluşturan benzersiz yapılara ve kimyasal bileşimlere sahip bağımsız mikroyapısal birimlerdir. Bir sistemin çeşitli kimyasal bileşenleri termodinamik prensiplere göre fazlar arasında dağılır ve mevcut olabilecek fazların sayısı kimyasal bileşim, sıcaklık ve basınçla bağlıdır. Neredeyse tüm takım çeliklerinin işlenmesi ve kullanımı atmosferik basınçta gerçekleşir; bu nedenle, alaşım faz dengesinin temsiliinde basıncın genellikle sabit olduğu varsayılır. Bu nedenle, mevcut fazlar, 1 atm'lik sabit basınç varsayılarak kimyasal bileşimin ve sıcaklığın bir fonksiyonudur ve faz dengeleri, sıcaklık ve bileşim çizimlerinde uygun şekilde temsil edilir. Faz diyagramları denge durumundadır. Denge durumunda, belirli bir alaşımda belirli bir sıcaklıkta bulunan fazların ve faz kombinasyonlarının mümkün olan en düşük serbest enerjiye sahip olduğu ve bu duruma ulaşmak için yeterli zamana sahip olduğu varsayılır. Takım çeliklerinin işlenmesinde, alaşım elementlerinin kendilerini katı hal difüzyonu ile çeşitli fazlar arasında tamamen paylaşımı için yeterli zaman bulamaz ve bu nedenle, denge faz diyagramları, gerçekte ulaşılan durumdan çok, yaklaşılan durumu temsil eder [3].

Takım çeliği teknolojisinde, prosesin büyük kısmı karbonun mikroyapı ve özelliklere olan etkisinin kontrolü üzerine kurulmuştur. Matris yapıya ve karbon ile etkileşimlerine göre alaşım elementleri aşağıdaki gibi gruplanabilir [22].

Tablo 2.1: Matris yapısına/karbonla etkileşimlerine göre elementler.

Matris Yapısına Etki Eden Elementler		Karbonla Etkileşimlerine Etki Eden Elementler	
Östenit Stabilizatörleri	Ferrit Stabilizatörleri	Karbür Oluşturan	Karbür Oluşturmayan
Cu, Ni, C, N, Co, Mn	B, Si, Cr, Nb, Mo, W, P, Al, Sn, Sb, As, Zr, S, Ce	Mn, Cr, Mo, W, V, Nb, Ti	Ni, Co, Cu, Si, P, Al

Bazı alaşım elementlerinin takım çeliklerine etkisi aşağıda açıklanmıştır.

Karbon (C): Çelikte en etkili ve önemli alaşım elementi olan karbon elementinin içeriğinin artırılması, takım çeliklerinde sertliği, çekme mukavemetini ve aşınmaya karşı direnci artırır. Sertlik ve mukavemet artışına bağlı olarak, takım çeliklerinde işlenebilirliği, sünekliği ve kaynaklanabilirliğini düşürür [21]-[23].

Manganez (Mn): Manganez sertleşebilirliği artırır ve çelik yapımında oksitlenmeyi giderici olarak kullanılır. Manganez elementinin içeriğinin artırılması takım çeliklerinde çekme mukavemetini, sertleşebilirliği ve aşınma direncini artırır. Karbonlamada karbon penetrasyon oranını artırır [21,22,23].

Nikel (Ni): Karbür oluşturuca özelliği olmayan nikel elementi sertleşebilirliği ve korozyon direncini artırır ve bununla birlikte yüksek kromlu (paslanmaz) çeliklere uygun miktarlarda verildiğinde yüksek sıcaklıklarda korozyona karşı direnci artırır [21,22,23].

Silisyum (Si): Silisyum elementi sertleşebilirliği, çekme ve akma dayanımını, dövülebilirliği, manyetik geçirgenliği artırır [21,22].

Molibden (Mo): Molibden, tavlama sırasında ince tane oluşumunu ve ikincil sertleşmeyi destekleyen elementtir. Karbon ile kombinasyon halinde aşınma direncini arttıran molibden elementi aynı zamanda yüksek sıcaklıklarda sürünme direncini, işlenebilirliği ve korozyon direncini de artırır. Sıcak iş ve yüksek hız çeliklerinde kırmızı sertlik özelliklerini artırır [21,22,23].

Kobalt (Co): Yüksek hız çeliğinin mukavemetini ve sertliğini arttıran kobalt elementi daha yüksek su verme sıcaklıklarına izin vererek kırmızı sertliği artırır.

Ayrıca, daha karmaşık çeliklerdeki diğer ana elementlerin bireysel etkilerini de yoğunlaştırır [21].

Vanadyum (V): Güçlü bir karbür oluşturunca olan vanadyum elementi meneviş direncini artırır ve ince tane oluşumunu destekler. Vanadyum elementinin içeriğinin artırılması mukavemeti, sertliği, aşınma direncini ve tokluğu artırır. Aynı zamanda, yüksek hızlı metal kesme takımlarının kırmızı sertlik özelliklerini geliştirir [21,22].

Tungsten (T): Tane büyümesini geciktiren tungsten elementi güçlü bir karbür oluşturunca ve karbon ile birlikte aşınma direncini artırır. Aynı zamanda mukavemeti, sertliği ve tokluğu artırır. Tungsten çelikler, yüksek sıcaklıklarda üstün sıcak işleme ve daha yüksek kesme verimliliğine sahiptir [21,22].

Krom (Cr): Krom bir karbür oluşturunca ve yüksek sıcaklıklarda gerilme mukavemetini, sertliği, sertleşebilirliği, tokluğu, aşınma direncini ve korozyon direncini artırır [21,22,23].

2.3. Takım Çeliklerinin Sınıflandırılması

Takım çeliklerinin çok sayıda özel kalitesi veya bileşimi vardır. Bu çelikler, çeşitli çalışma koşullarında dövme, soğuk iş, kalıp döküm ve yüksek hızlı işleme gibi belirli işlevleri yerine getirmek için geliştirilmiş gruplar veya türler halinde düzenlenmiştir. Her bir grup veya tür içinde, benzer olan ancak biraz farklı işleme gereksinimlerini, çalışma koşullarını veya çalışma malzemelerini barındırmak için birbirinden biraz farklı olan birçok sınıf olabilir.

Takım çelikleri bileşimlerine ve kullanım alanlarına göre aşağıdaki dört sınıf altında incelenmektedir [3].

2.3.1. Sıcak İş Takım Çelikleri

AISI sınıflandırma sisteminde, H grubu çelikler olarak adlandırılan sıcak iş takım çelikleri özellikle çeliklerin, demir olmayan metallerin, yüksek polimerlerin ve seramik malzemelerin 200 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda form verme ve formunu değiştirmeleri için yararlanılan takımların imalinde kullanılır. Sıcak iş takım çelikleri, enjeksiyon döküm kalıpları, ekstrüzyon kalıpları, dövme kalıpları, kalıp ve boru presleri, delici zımbalar ve kalıpları vb. gibi önemli kullanım alanlarına sahiptir [3].

Sıcaklık işlenen malzemeye bağlı olduğundan ve uygulanan temas sürelerinde 300°C-1000°C'ye ulaşabildiğinden dolayı, bu çelikler çok sık bir şekilde darbe tarzında da olan ve ısı şok olarak da meydana gelen, çok yüksek mekanik ve termik zorlanma altında kalırlar. Sıcak iş takımlarında çoğu zaman plastik form değiştirmesi, sıcakta çatlak kaynaklı, kırılma, aşınma veya korozyon nedeniyle hasarlar olabilir. Bundan dolayı sıcak iş takım çelikleri için olan malzemelerin yüksek sıcakta yüksek mukavemete, yüksek sıcakta aşınma direncine, yeterli sünekliğe ve iyi termoşok dayanımına sahip olması gerekir [2].

Sıcak iş takım çelikleri kimyasal bileşimleri Tablo 2.2'de belirtilmiştir [24].

Tablo 2.2: Sıcak iş takım çeliklerinin kimyasal bileşimi.

Element (% ağı.)							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
0,35-0,42	0,80-1,20	0,25-0,50	0,025	0,002	4,80-5,50	1,20-1,50	0,85-1,15

H tipi çelikler, yüksek sıcaklıklarda sertlik sağlamak için kullanılan alaşımlama yaklaşımına göre aşağıdaki gibi üç sınıfa ayrılır;

- Nominal olarak %5 Cr ve önemli miktarda silisyum, molibden ve vanadyum dahil diğer elementler içeren krom sıcak iş çelikleri
- Tungsten sıcak iş çelikleri
- Molibden sıcak iş çelikleri

Çoklu alaşım elementleri, tungsten ve molibden sıcak iş çeliklerine eklenir ve bu çeliklerin performansı genellikle krom çeliklerinden daha yüksektir [3].

Sıcak iş uygulamaları için tüm takım ve kalıp çeliklerinin taşınması gereken önemli özellikler vardır. Sıcak iş çelikleri çalışma sıcaklıklarında deformasyona karşı dirençli olmalıdır. Bu özellik, sıcak iş takım çeliklerini, daha yüksek ısı işlem görmüş oda sıcaklığında sertliğe sahip olabilen ve bu nedenle soğuk iş uygulamaları için daha iyi performans sağlayan, ancak sıcak çalışma sıcaklıklarında hızla yumuşayan diğer takım çeliklerinden ayırır [1].

Sıcak iş çeliklerin termal şok direnci yüksek olmalıdır. Çünkü, çatlamayı ve kırılmayı önlemek için mekanik ve termal şoka karşı iyi direnç ve iyi çentik tokluğu

gereklidir. Bu nedenle H çeliklerinin karbon içerikleri düşük veya orta seviyelerde tutulur [1], [3].

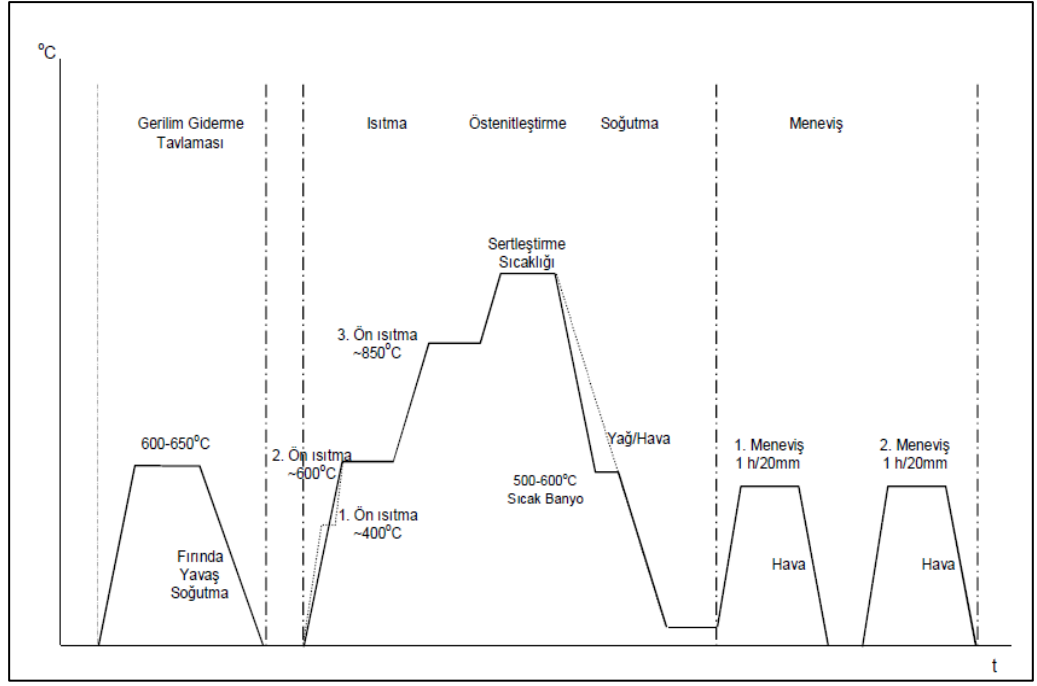
Sıcak iş çeliklerinin yüksek sıcaklıkta aşınmaya karşı dirençli olması beklenir.

Genellikle "yıkama" olarak adlandırılan sıcak çalışma sıcaklıklarında erozyon veya aşınmaya karşı direnç, uzun takım ve kalıp ömrü için önemlidir. Genellikle daha yüksek sıcak sertliğe ancak daha düşük tokluğa sahip alaşım ve mikro yapıların seçimi ile geliştirilir [3]. Ayrıca ısıl işlem bozulmasına karşı dirençli olması da beklenen özellikler arasında olup, üretim sırasında bozulma ve boyutsal değişiklikler, özellikle karmaşık kalıplar için en aza indirilmelidir. Havayla soğuma ile yeterli sertleşebilirliğe sahip daha yüksek alaşımlı çelikler, ısıl işlem sırasında bozulmaya karşı en iyi direnci sağlar [22].

Sıcak iş takımları, kullanım alanları da göz önünde bulundurulduğunda, işlenebilir özellikte olmalıdır. Birincil işlemeye ve tavlama dikkat edilerek işlenebilirlik geliştirilmelidir. Diğer çeliklerde işlenebilirliği artırmak için kullanılan katkıların veya diğer ikinci faz parçacıklarının dağılımlarını geliştiren eklemelerle geliştirilemez. Bu tür ikinci faz partikülleri, darbe dayanımını ve yorulma direncini düşürür [22].

Isınma döngülerine ve strese tekrar tekrar maruz kalmak, sıcak iş takım çeliklerinde ince, sık çatlak ağlarının gelişmesine neden olur. Bu koşul, ısı kontrolü olarak adlandırılır ve döküm kalıpları için kullanılan sıcak iş takım çeliklerinin ömrünü sınırlayan temel faktördür [3]. Bu nedenle ısı kontrolüne karşı dirençli olmaları beklenmektedir.

Belirli bir uygulama için en iyi sıcak iş takım çeliğinin seçimi, üretim ve performans gereksinimlerinin çelikle eşleştirilmesine ve bu gereksinimler için en iyi özellik kombinasyonunu sağlayan ısıl işleme bağlıdır. Çalışma sıcaklıklarını düşük tutmak ve aşırı yumuşamayı önlemek için kalıpların suyla soğutulması gereklidir. Krom sıcak iş takım çelikleri, çatlamaya karşı daha yüksek dirençleri nedeniyle tungsten sıcak iş takım çeliklerine tercih edilir. Bununla birlikte, kalıp tasarımı sürekli su sirkülasyonuna izin veriyorsa, bazı tungsten sıcak iş takım çelik türleri suyla soğutulabilir. Yüksek düzeyde krom içeren tungsten sıcak iş takım çelikleri hiçbir durumda hızlı ısıtma ve soğutma döngülerine tabi tutulmamalıdır. Çalışma sırasında aşırı termal şokla karşılaşılması muhtemel durumlarda, düşük karbonlu H-tipi çelikler tercih edilir [3].



Şekil 2.1: Sıcak iş takım çeliklerinin sertleştirilmesinde zaman-sıcaklık grafiği.

Sıcak iş takımlarının sertleştirilmesi büyük ölçüde alaşımlı soğuk iş takım çeliklerine benzer. Ancak meneviş sıcaklıkları oldukça yüksektir. Termal şoku en aza indirmek için, takımlar ve kalıplar bir sıcak işleme işlemine başlamadan önce dikkatlice önceden ısıtılmalıdır. Uzun süreli çalışmada süreleri sırasında takımları ve kalıpları sıcak tutarak takım ömrü uzatılabilir [24]. Takımların ve kalıpların uygun şekilde soğutulması, bölgesel aşırı ısınmayı önler ve daha düşük, daha homojen sıcaklıklarda çalışmayı mümkün kılar. Döküm kalıplarında, dolaşan su ile iç soğutma yaygındır. Dövme kalıplarında soğutma, su veya yağ spreyi veya hava üfleme ile gerçekleştirilebilir. Takımlar ısıl işlemiden sonra saklanırken korozyonu önlemek için özen gösterilmelidir. Küçük pas lekeleri, bir takım çalışmaya başladığında kısa sürede çukurlara dönüşür [3].

2.3.2. Soğuk İş Takım Çelikleri

AISI sınıflandırma sisteminde D grubu çelikler olarak adlandırılan, yüksek karbon ve krom içerden, en yüksek alaşımlı takım çelikleri soğuk iş çelikleridir. Soğuk iş takım çeliklerinin kullanımı, takımlarda maksimum yüzey sıcaklıklarının 200°C'ye kadar yükselebildiği özellikle talaşlı ve talaşsız şekil verme işlemleridir [2]. Ana alaşım elementi kromdur ve sertleştirme işlemine uygun çelik grubudur. Ortalama

olarak %12 oranında krom içeren soğuk iş takım çeliklerine, karbür oluşturuıcı özelliğe sahip, molibden, vanadyum, nikel, manganez, tungsten ve kobalt gibi alaşıım elementleri kullanım yerine göre eklenebilir. Soğuk iş takım çeliklerinde karbon miktarı %0,3-2,5 arasında değişir ve hatta yüksek alaşıımlı çeliklerde %3'e ulaşır. %1 karbonda düşük alaşıımlı çeliğin yapısındaki karbür miktarı %5 iken, %2'den fazla karbon içeren yüksek alaşıımlarda bu değer %10-30 değerine yükselir [2].

Soğuk iş takımları kimyasal bileşimi aşağıdaki Tablo 2.3'te gösterilmiştir [24].

Tablo 2.3: Soğuk iş takım çeliklerinin kimyasal bileşimi.

Element (% ağı.)							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
1,45-1,60	0,10-0,60	0,20-0,60	0,03	0,03	11,00-13,00	0,60-0,80	0,90-1,10

Yüksek karbon ve alaşıım içerikleri göz önüne alındığında, soğuk iş takım çelikleri derinlemesine sertleşir. D tipi takım çelikleri ilk olarak kesici takımlarda kullanılan yüksek hızlı çeliklerin olası alternatifleri olarak geliştirildi. Ancak yetersiz sıcak sertliğe sahip oldukları ve işleme için çok kırılgan olduklarından kullanıma uygun olmadığı görüldü. Yüksek aşınma direncine, yüksek basma dayanımına ve yüksek tokluğa sahip olan, soğuk iş takım çeliklerinin kullanım alanları aşağıdaki gibi sıralanabilir [20].

- Kesme takımları
- Soğuk ekstrüzyon takımları
- Delme zımbaları
- Makine bıçakları
- Civata perçin ve somunları
- Kâğıt ve plastik bıçakları
- Kazıma bıçakları
- Sıvama kalıpları vb.

Yüksek kromlu soğuk iş takım çelikleri son derece düşük ısı iletkenliğine sahiptir ve ısıyı çok yavaş emer. Bu nedenle, ısıtma veya soğutma sırasında çatlamaya neden olabilecek sıcaklık değişimleri kolaylıkla gelişebilir. Dövme veya sertleştirme

için ısıtmada çatlamayı en aza indirmek 650-700°C'de ön ısıtma yapılması ile mümkündür [21]. Yaklaşık %1 V içeren D tipi çelikler en dar dövme sıcaklık aralığına sahiptir ve 870°C'nin altında dövme yapılması genellikle önerilmez [3]. Derin sertleşme özelliklerinden dolayı D tipi çelikler dövme işleminde sonra yavaşça soğutulmalı ve normalize edilmemelidir. Uygun şekilde östenitlenmiş numunelerde hava soğutması, difüzyonla yüksek sertlikte martensitik mikro yapıların oluşturulması için yeterlidir.

2.3.3. Yüksek Hız Takım elikleri

Yüksek hız takım çelikleri, yüksek sıcaklıkta sertliğini büyük oranda ve uzun süre koruyan malzemelerdir. Yüksek hız takım elikleri, AISI sınıflandırma sisteminde, ana alaşımlama yaklaşımının molibden veya tungstene dayalı olmasına bağlı olarak grup M veya grup T elikler olarak adlandırılır [3]. Yüksek hız takım çelikleri öncelikle çeliklerin ve diğer metallerin yüksek hızlı işlenmesi sırasında önemli ölçüde ısı üreten kesici takımlar için kullanılır. Yüksek hız takım çelikleri alaşım elementlerinin eklenmesi veya uygun ısıl işlemler ile, yüksek sıcaklıklarda aşınmaya karşı yüksek dayanım özelliği kazanırlar. Yüksek hız takım çelikleri iyi sertleşebilirliğe sahip oldukları için, bunlardan yapılan takımlar tuz banyosunda veya havada bile sertleşebilirler. Yüksek hız takım çeliklerinin en genel uygulama alanı talaş kaldırma takımlarıdır. Mikroyapıyı ve dolayısıyla malzeme özelliklerini önemli ölçüde değiştiren belli başlı alaşım elementleri C, Cr, Mo, V, W ve Co'tır. Co'ın dışındakiler i yapıda çökelerek karbür oluştururlar [24]. Alaşım elementlerinin etkisi ile oluşan karbrlar, yüksek hız takım çeliklerinin yüksek sıcaklıklarda sertliğin korumasını sağlar.

Yüksek hız takım çeliklerinin bazı temel özellikleri aşağıdaki gibidir.

Sertlik: Yüksek hız çeliklerinin yüksek karbon ve alaşım elementleri ilavelerinden dolayı sertlikleri yüksektir. Alaşım elementlerinin etkisiyle oluşan özel karbrlar sertlik artışına önemli ölçüde katkıda bulunur. Karbon ve alaşım elementlerini ve dolayısıyla bunların oluşturduğu özel ve sert karbürleri arttırarak sertlik 67-68 HRC'ye kadar yükseltilebilir [2]. Yağ veya tuz banyosu ile soğutma gerçekleştirilirse, hava ile soğutma işlemine göre sertleşme derinliği artar.

Tokluk: Çarpma kuvvetleri altında takım çeliklerinin kırılmaya karşı dirençli yani tok olması beklenir. Yüksek hız takım çeliklerindeki karbon ve alaşım elementlerinin yüksek miktarda bulunması, çeliğin sertlik özelliğini geliştirdiği için, çeliğin tok olması istendiğinde takım çeliği seçiminde bazı noktalara dikkat edilmelidir. Yüksek hız takım çeliklerinde tokluk, iki şekilde elde edilebilir. Öncelikli olarak çeliğin bileşiminde daha düşük karbon miktarının olmasıyla elde edilir. Ek olarak yüksek derecede (550°C-650°C) temperleme de tokluk artışına katkıda bulunabilir. Tokluk artışı sağlanırken, çeliğin sertliğinde düşüş görülür [1].

Aşınma Dayanımı: Yüksek hız takım çelikleri, sert karbürlerin ve martenzit matrisinin yüksek sertliğinden dolayı yüksek aşınma dayanımına sahiptirler. Alaşım elementlerinin eklenmesi ile oluşan karbürler sertliği artırır ve dolayısı ile aşınma dayanımını arttırır. Artan sertlik ve aşınma dayanımı ile birlikte işlenebilme, taşlanabilme zorlaşır [1].

2.3.4. Plastik Takım Çelikleri

Plastik (Polimer) takım çelikleri AISI sınıflandırma sisteminde P grubu çelikler olarak adlandırılır. Kalıplama ve bazı pres döküm uygulamaları için kullanılan çelikler, diğer takım çeliklerinden üstün imalat ve performans özelliklerine sahiptir. Dolayısıyla, imalat ve kalıp sektörünün en çok kullanım alanına sahip çeliklerdir [1], [3].

Uygulama alanları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Plastik enjeksiyon ve kauçuk kalıpları
- Form verme ve kesme kalıpları
- Metal enjeksiyon kalıpları
- Sıcak dövme kalıpları
- Makine elamanları ve mühendislik uygulamaları vb.

Her türlü plastik bazlı malzemelerin şekillendirmesi plastik takım çelikleri ile gerçekleştirilmektedir. Plastik kalıp çelikleri kullanılan plastik hammaddesinin cinsine göre aşınmaya, basınca ve korozyona maruz kalırlar [2]. Termoplastiklerin enjeksiyonla kalıplanması ve termoset plastiklerin sıkıştırılarak kalıplanmasıyla

mevcut ve beklenen çok yüksek plastik üretimi, yüksek kalite ihtiyacı ve kalıp imalatında maliyetleri koruma ihtiyacı doğurmuştur. Bu nedenle çok çeşitli plastik kalıp çelikleri geliştirilmiştir. Kalıp çeliklerindeki ana alaşım elementleri krom ve nikeldir. Kalıp çelikleri, tek bir orta karbonlu takım çeliğine sahip düşük karbonlu takım çelikleridir. P serisi çelikler, P2, P3, P4, P5, P6, P20 ve P21 çeliklerini içerir [25]. Bu seriye ait tüm çelikler, P4 ve P21 hariç, yüksek sıcaklıklarda yumuşamaya karşı düşük direnç gösterirken, P4 ve P21 orta dirence sahiptir. Düşük karbonlu çelik türlerinin yüzeyi karbürizasyon ile sertleştirilebilir [25].

Plastik takım çeliklerinden beklenen özellikler aşağıdaki gibidir.

Parlatılabilirlik: Son ürün üzerinde pürüzsüz bir yüzeyin zorunlu olduğu plastik kalıplama kalıplarında özellikle önemlidir. Kimyasal ve yapısal homojenlik ve yüksek yüzey sertliği, iyi parlatılabilirlik için çok önemlidir [1], [3].

Aşınma direnci: Üretim sırasında tekrarlanan baskılar nedeniyle kalıp yüzeyinde aşınmalar meydana gelebilir. Bu nedenle aşınmaların önüne geçmek için, sert, aşınmaya dayanıklı bir yüzey gereklidir. Yüksek yüzey sertliği parlatılabilirliği ve aşınma direncini artırır [1].

Dayanıklılık: Açma ve kapama kalıplarının mekanik olarak çalıştırılması, plastiklerin veya alaşımların yüksek hızda enjeksiyonu ile hızlı ısıtma ve soğutmanın termal şoku gibi çeşitli kaynaklardan gelen şoka maruz kalabilir. Sert ve sünek bir malzeme, dayanıklı ve şok direnci için avantajlıdır [1].

Sertleşmede minimum boyut değişikliği: Kalıp malzeme seçiminde genellikle ısıtma işleminden sonra boyutlandırmak için minimum miktarda enerji gerektiren kalıp malzemeleri tercih edilir.

Korozyona karşı direnç: Bazı plastikler oldukça korozyif özelliktedir. Paslanma, özellikle yüksek nem koşullarında bir sorun haline gelebilir.

Tavlama sertlik kaybına karşı direnç: Bazı ürünlerin kalıplanmasında yüksek sıcaklıklar söz konusudur. Sertliğini kaybeden bir kalıp, kısa sürede aşınma belirtileri gösterir.

Takım çelikleri kullanım alanları göz önünde bulundurulduğunda, kalıp yüzeylerinin, kalıp işlevselliği üzerinde oldukça önemli etkisi bulunmaktadır. Mekanik ve korozyif yük altında, öncelikle bileşen yüzeyi etkilenmektedir. Korozyon hasarlarının en büyük nedeni genellikle üretim prosesleri ve kullanılan kimyasal hammaddeler ile doğrudan ilgilidir. Sıcak yolluk sisteminde termal homojensizlik, eriyik hammadde besleme sistemlerinde yüksek basınç kayıpları, enjeksiyon işlemi

sırasında uzun süre tutma, granül şeklindeki hammadde içerisinde yüksek nem oranı, eriyik hammadde ile temas halindeki kalıp yüzeyi için yetersiz işlem veya yanlış malzeme seçimi gibi etkenler, plastik kalıp yüzeyinde işlevselliği olumsuz yönde etkilemektedir.

Plastik kalıp çeliklerinin; yüzey sertliği, başınç dayanımı, korozyon direnci, yapışma, kalıptan çıkma davranışı gibi özelliklerinin geliştirmek için genellikle termokimyasal yüzey işlemleri uygulanmaktadır.

Plastik kalıp çelikleri karbürlendiğinde veya nitrürlendiğinde aynı prosedürlere tabii tutulur. Plastik enjeksiyon prosesi ile birlikte kullanılan plastik kalıp takım çelikleri için ısıtıl işlem oldukça önemlidir. Plastik kalıp takım çeliğine doğru uygulanan ısıtıl işlem, aynı zamanda enjeksiyon ile kalıplanmış parçaların kalitesini ve hassasiyetini de arttırmaktadır. P1, P2, P3, P4, P5 ve P6 Plastik kalıp çelikleri için önerilen ısıtıl işlem uygulamaları Tablo 2.5’te verilmiştir [11].

Tablo 2.4: Plastik Takım Çelikleri için önerilen ısıtıl işlem uygulamaları.

Çelik Türü	Tavlama İşlemi			Sertleştirme (Karbürleme İşleminin Sonra)				
	Tavlama Sıcaklığı (°C)	Soğuma Hızı (°C/h)	Sertlik (HB)	Karbürleme Sıcaklığı (°C)	Östenitleme Sıcaklığı (°C)	Tutma Süresi (Min.)	Sertleştirme Ortamı	Sertlik (HRC)
P1	730-900	22	81-101	900-925	790-800	15	Su, Tuzlu Su	62-64
P2	730-815	22	103-123	900-925	830-845	15	Yağ	62-65
P3	730-815	22	109-137	900-925	800-830	15	Yağ	62-64
P4	870-900	14	116-128	970-995	970-995	15	Hava	62-65
P5	845-870	22	105-116	900-925	845-870	15	Yağ, Su	62-65
P6	845	8	183-217	900-925	790-815	15	Hava, Yağ	60-62

Plastik Takım kalıplarının, kalıp alaşımlarındaki farklılığa göre, tavlama, normalleştirme, su verme ve tavlama gibi farklı ön ısıtıl işlem işlemleri uygulanmaktadır. Yüksek karbon alaşımlı kalıp çeliklerinde, uygun ön ısıtıl işlem ile ikincil sementit oluşumu önlenir ve karbürler küreselleştirilir. Su verme ve temperleme ısıtıl işlemlerinin doğru yapılması, enjeksiyon kalıbı hizmet ömrünü arttırır. Plastik takım çeliklerinde yaşanan aşırı ısınma, iş parçasının daha fazla kırılganlığına neden

olmakla kalmaz, aynı zamanda soğutma sırasında kalıbın hizmet ömrünü ciddi şekilde etkileyecek olan deformasyon ve çatlamaya da neden olur.

Gerilim giderme tavlama, plastik enjeksiyon kalıbının işlenmesinden sonra yapılmalıdır. Amaç, su vermenin neden olduğu aşırı deformasyon ve çatlamayı önlemek için kaba işlemenin neden olduğu iç gerilimi ortadan kaldırmaktır. Yüksek hassasiyet gereksinimleri olan plastik kalıplar için, kalıp hassasiyetini stabilize etmek ve kalıp hizmet ömrünü uzatmak için faydalı olan taşlama veya elektrikli işleme sonrasında gerilim giderme ve tavlama tabi tutulması gerekir [11].

2.4. Takım Çeliklerine Uygulanan Yüzey Modifikasyon Yöntemleri

Yüzey, maddeyi çevreleyen ve onun geometrisini oluşturan yine maddenin kendisinden meydana gelen bir zarf tabakadır. Maddenin çevreyle olan tüm etkileşimi yüzey üzerinden olmaktadır. Bu etkileşimlerin kiminde malzemenin tümüne mal olan özellikleri büyük ölçüde yüzey tarafından belirlenir [4].

Malzemelerin yüzeyi tarafından belirlenen bazı özellikleri aşağıdaki gibidir.

- Sürtünme ve aşınma özellikleri
- Korozyon davranışları
- Yüzeye bağlı mekanik özellikleri(yorulma)
- Dış görünüm ve renkleri
- Optik özellikleri
- Fotoelektrik özellikleri
- Komşu maddeye difüzyon özellikleri
- Yapışma özellikleri
- Elektronik kontak özellikleri
- Isıl elektron emisyon özellikleri

Malzemelerden beklenen özelliklerin karşılanması yüzey özellikleri ile doğrudan ilişkilidir. Kimi zaman malzemenin yüzeyinden beklenen özellikler açısından malzeme yetersiz kalabilir ve daha yüksek nitelikli başka bir malzemeye gereksinim duyulabilir, bu gibi durumlar tüm kütleyi iyileştirmek veya değiştirmek

yerine sadece yüzeydeki malzemeyi değiştirmek büyük bir kaynak tasarrufu sağlamaktır.

Kimi durumlarda ise yüzeyden özellikler malzemenin kütlesinden beklenen özelliklere tamamen zıt olabilir. Örneğin aşınma dayanımı istenen malzemelerin sert olması zorunludur ancak sert malzemeler de kırılganlıkları o derece yüksektir. Bazı hallerde ise yüksek nitelikli malzemeyi kütsel olarak üretmek teknolojik veya ekonomik olarak mümkün olmayıp, aynı malzemeyi yüzeye yapıştırmak, kaplamak gibi yöntemler mümkün olabilmektedir.

Kalıp yüzey iyileştirme ve geliştirmeleri toplam kütlenin çok küçük bir kısmını oluşturmalarına rağmen malzeme ömrüne etkisi oldukça fazladır.

2.4.1. Elektrokimyasal Uygulamalar

Özellikle plastik enjeksiyon takım çeliklerinde, enjeksiyon sırasında bazı polimerik ve aynı zamanda kimyasal olarak agresif malzemeler kullanılır. Kullanılan polimerik malzemeler işlem sırasında ortama hidroklorik veya asetik asit salmaktadır. Bu nedenle aşınmayı önlemek, korozyon direncini arttırmak için bu çelikler için son derece önemlidir.

Genelde bu çeliklerden üretilen kalıplar sıklıkla krom veya nikel ile elektrolitik olarak kaplanarak yüzey özellikleri korunur [5]. Sadece korozyon direnci değil, aynı zamanda sürtünme önleyici özellikler ile son ürün kalitesi ve kalıbın servis ömrü arttırılır. Kaplama kalınlığının tüm yüzeyde homojen olması ve kaplama yapılan kalıpta tasarımsal olarak keskin köşelerin bulunmaması durumunda etkin sonuç sağlar. Düzgün olmayan kalınlık ve keskin kenarlar, koruyucu tabakada gerilmelere neden olur ve bu durumun sonucunda oluşan yükler altında kaplamalarda soyulmaya veya dökülmeye sebebiyet verir [6]. Bükülme gerilimlerine maruz kalan kaplanmış ince flanşlar çatlamaya karşı çok hassastır. Elektrolitik çöktirme ile koruyucu kaplama yapılmadan önce, kalıpların uygun şekilde bitirilmesi gerekir. Temel malzemenin kalitesine bağlı olarak, taşlanmış veya parlatılmış yüzeyler kaplamanın homojen oluşumu ve yüzey kalitesi açısından en iyi sonuçları verir [6].

2.4.1.1. Sert Krom Kaplama

Sert krom kaplama işlemi, uygun oranda kromik asit (CrO_3) ve bir katalitik anyon içeren çözeltiden elektrodpozisyon ile üretilir. Sert krom kaplama ile sürtünmeye, aşınmaya ve korozyona dirençli düşük bir sürtünme katsayısına sahip yüzey sağlayarak işlevsel parçaların servis ömrünü uzatmak amaçlamaktadır. Diğer bir önemli amaç, küçük boyutlu parçaların boyutlarını eski haline getirmektir [6].

Sert krom kaplama piston halkaları, amortisörler, destekler, fren pistonları, motor valf gövdeleri, hidrolik çubuklar, plastik enjeksiyon takım çelikleri gibi ürünlerin geliştirilmesinde kullanılır. Hatalı işlenmiş veya aşınmış parçaların yeniden nominal boyutuna getirilmesi için de ayrıca kullanılır. Sürtünmeyi azaltmak ve aşınmayı önlemek veya en aza indirmek için çeşitli tipte takımlar kromla kaplanmıştır. Plastik kalıplama için çelik veya berilyum bakır kalıplar, özellikle vinil veya diğer aşındırıcı plastik malzemelerin enjeksiyonla üretiminde kullanılacaksa, genellikle kromla kaplanır. Kalıplara yapışan parçalarda aşınmayı önlemek ve çeliğe etki eden plastikler kalıplanırken yıpranmadan dolayı gereken parlatma sıklığını azaltmak için genellikle 2,5-125 μm kaplama kalınlıkları önerilir. Elektrolitik olarak çökeltilmiş krom katmanlarının kalınlığı, mevcut yoğunluğa ve elektrolitin sıcaklığına bağlıdır. Sertlikleri ayrıca kaplamadan sonra ısıl işlemin sıcaklığına da bağlıdır [7].

Yangın geciktirici klorür içeren plastikler kalıplandığında krom kaplı kalıplar kullanılmamalıdır [6].

Kaplamanın tekrarlanması durumunda, yüzeye yakın bölgelerde hidrojen gevrekliği dikkate alınmalıdır. Sert krom kaplamalar genellikle yüksek iç çekme gerilimi nedeniyle mikro çatlaklar meydana getirirler [8].

2.4.1.2. Nikel Kaplama

Özellikle aşınma ve korozyona karşı koruma sağlamak amacı ile yapılan nikel kaplama, bakır gibi demir dışı metallerle de kullanılabilir. Nikel kaplama, çözünür metal anotların kullanıldığı diğer elektro kaplama işlemleriyle oldukça benzerdir. İletken, sulu bir nikel tuzları çözeltisine batırılmış iki elektrot arasında doğru akım geçişini gerektirir. Doğru akım, elektrotlardan birinin (anot) çözünmesine ve diğer elektrotun (katot) nikel ile kaplanmasına neden olur. Çözeltideki nikel, iki değerli

pozitif yüklü iyonlar (Ni^{++}) formunda bulunur. Akım aktığında, pozitif iyonlar iki elektronla ($2 e^-$) reaksiyona girer ve katot yüzeyinde metalik nikel (Ni^0) dönüştürülür. Ters anotta meydana gelir, burada metalik nikel çözülerek çözeltiye giren iki değerli pozitif yüklü iyonlar oluşturur. Katotta boşaltılan nikel iyonları anotta oluşanlarla yenilenir [6].

Nikel hem galvanik hem de kimyasal olarak biriktirilebilir (harici bir akım kaynağı olmadan). Nikelin harici akım olmadan biriktirilmesi, özellikle kenarlarda değişen kat kalınlıklarının oluşumunun neden olduğu tahribatı ortadan kaldırır. Nikel kaplama üzerindeki iç gerilmeler, galvanik olarak çöktürülmüş sert krom kaplamalara göre daha düşüktür. Genellikle kullanılan kaplama kalınlığı 20-50 μm 'dir. Nikel-fosfor-silisyum karbür dispersiyonunun, koruyucu önlemler için yüzeyler üzerine elektriksiz kaplamaların biriktirilmesinde de yararlı olduğu kanıtlanmıştır. Ancak unutulmamalıdır ki alt tabaka malzemesinden çok daha sert olan nikel tabakası, bir basınç yükü altında hasar görebilir ve tabakalara ayrılma eğilimi gösterir [8].

Nikel kaplamanın mühendislik uygulamaları, tamamen parlak bir görünüme ihtiyaç duyulmayan iş parçalarını içerir. Mühendislik nikel yatakları genellikle sülfür içermez ve görünüşte mattır. Bu kaplama, korozyon ve aşınma direncini geliştirmek, aşınmış veya küçük parçaları kurtarmak, manyetik özellikleri değiştirmek, emaye veya organik kaplama için yüzeyleri hazırlamak, elektronik uygulamalarda ve diğer amaçlarla difüzyon bariyerleri olarak işlev görmek için belirtilebilir. Kimya, nükleer, telekomünikasyon, tüketici elektroniği ve bilgisayar endüstrilerinde mühendislik uygulamaları mevcuttur [6].

2.4.2. Düşük Basınçta Kaplama Uygulamaları

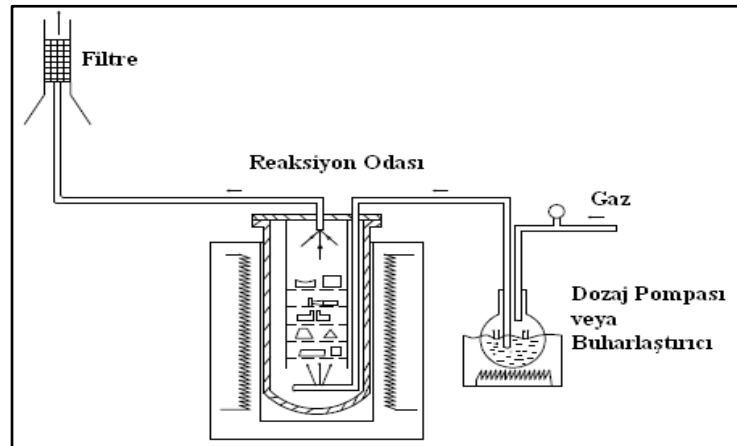
Gaz fazında çöktürme tekniğine dayalı yaygın kaplama teknikleri; kimyasal buhar biriktirme (CVD-Chemical Vapour Deposition), fiziksel buhar biriktirme (PVD-Physical Vapour Deposition) ve bu tekniklerin varyantlarıdır. İki teknik de belirli avantaj ve dezavantajlara sahiptir. CVD işlemi için takım çeliklerinin sertleştirildiği sıcaklığın üzerinde sıcaklık gerektiğinden işlemden sonra çeliğe ısıtma işlemi uygulanması gerekir [7]. PVD teknolojisinin CVD'ye göre en büyük avantajı sert metal ve yüksek hız çeliklerinin özelliklerini etkilemeden düşük sıcaklıklarda kaplama yapılabilmesidir.

2.4.2.1. Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemi ile Kaplama

Kapalı bir kap içerisinde ısıtılmış malzeme (altlık) yüzeyinin, taşıyıcı bir gazın kimyasal reaksiyonu sonucu oluşan katı bir tabaka ile yüzey kaplanması 'kimyasal buhar biriktirme (CVD) yöntemi olarak tanımlanır. CVD işlemi, katıların bir gaz fazından 800 °C 'nin üzerindeki sıcaklıklarda bir kimyasal reaksiyonla biriktirilmesine dayanır [6]. Bir CVD işleminde, karbürler, metaller, nitrürler, borürler, silisit veya oksitler, 800-1100 °C arasındaki sıcaklıklarda kalıpların ısıtılmış yüzeyinde biriktirilebilir [10]. Reaksiyon sonucu çıkan, istenmeyen ürünler buhar olarak sistemden uzaklaştırılır. Kimyasal olarak parçalanma enerjisi termal, optik ve elektriksel yollardan birisi kullanılarak verilen bu yöntem ile avantajları, düzlemsel olmayan yüzeyleri kaplama ve pin boşluğu yapmama olan PVD yöntemi karşılaştırılınca ortaya çıkan fark, kimyasal buhar biriktirme yönteminin enerji temin yolları olmaktadır.

Konum ve kalıp tipine bağlı olarak, 6 -30 µm kalınlığa ve 4000 MPa'ya kadar mukavemete sahip kaplamalar meydana gelir [7]. Yüzeyin işlenmesinden kaynaklanan çizik gibi izler bir CVD işlemiyle gizlenmez. Bu nedenle, kalıp yüzeyi, taşlama veya parlatma yapılarak kaplamaya uygun hale getirilmelidir. Bu işlem için gereken yüksek sıcaklıklar, ana malzemenin sertliğini ve mukavemetini kaybetmesine neden olur. Bu nedenle kaplama işlemi sonrası ısıl işlem gerektirir. Kaplanacak iş parçası içim uygun kalitede malzeme seçimi oldukça önemlidir.

Şekil 2.2'de titanyum karbür çökeltimi şeması verilmiştir [7].



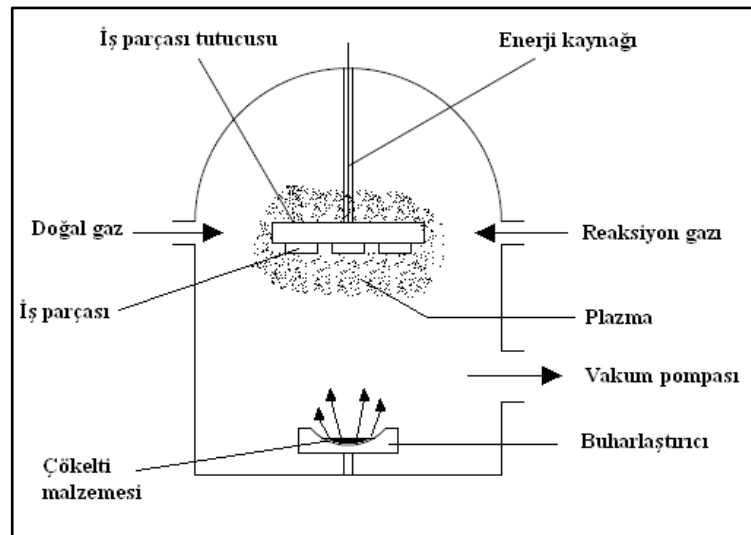
Şekil 2.2: Titanyum karbür çökeltimi şeması.

2.4.2.2. Fiziksel Buhar Biriktirme Yöntemi ile Kaplama

1800'lü yıllardan beri bilinmekte, ancak son 50 senedir kendisine endüstride bir yer bulabilmiş, ince film kaplama tekniğidir. Fiziksel buhar biriktirme yöntemi (PVD), parçacık bombardımanı yoluyla termal ve kinetik enerjinin eşzamanlı etkileri altında metal alaşımlarının, nitrürler ve karbürler gibi kimyasal bileşiklerinin bir vakumda biriktirilebildiği tüm kaplama tekniklerini özetlemektedir [7].

Kaplama işlemi 500-550 °C arasındaki sıcaklıklarda gerçekleşir [7]. Bu sıcaklık temel malzemenin tavlama sıcaklığının altındadır ve bu nedenle kaplamadan sonra ısıtım işlemi gerektirmez. Büyüme genellikle ısıtılmış bir yüzey tarafından katalize edilen heterojen reaksiyonlar yoluyla gerçekleşir [6], [7]. Bu işlem tüm takım çelikleri için uygundur. PVD tekniği içinde, kaplamadan önce kalıp yüzeyinin kalitesi ve temizliği, kaplamadan sonraki bağ ve yüzey kalitesi için çok önemlidir. PVD'nin bir çeşidi olan, PVD ark kaplaması, hemen hemen her türlü tek katmanlı ve çok katmanlı sistemlerde kaplama malzemesi olarak kullanılır [10]. Kaplama malzemeleri genellikle elde edilebilir sertlik, sürtünme katsayısı, korozyon direnci ve maliyet esas alınarak seçilir. TiN, TiC, TiCN, TiAlN, CrN ve CrAlN bileşimleri Kaplama malzemesi olarak kullanılabilir [7].

Şekil 2.3'te PVD tekniği uygulaması şematik olarak gösterilmiştir [7].



Şekil 2.3: PVD tekniği uygulamasının şematik olarak gösterimi.

2.4.3. Termokimyasal Uygulamalar

Termokimyasal işlemler aşınma dayanımı yüksek ve malzeme yüzeyinde sert bir katman oluşturarak, malzemenin kullanım yerine göre istenen özelliklerinin elde edilmesi için kullanılır. Termokimyasal işlemler metalik malzemenin yüzeyinde difüzyon yardımı ile gerçekleşir ve çeliğin yüzey bileşimi değiştirilir [6]. Bu değişiklikten önce veya sonra ısıtım işlem uygulanacağı için malzeme yüzeyi sert ve çekirdeği nispeten yumuşak bir yapı elde edilir [5].

Termokimyasal yöntemler aşağıdaki şekilde sınıflandırılır.

- Karbürleme
- Nitrürleme
- Borlama

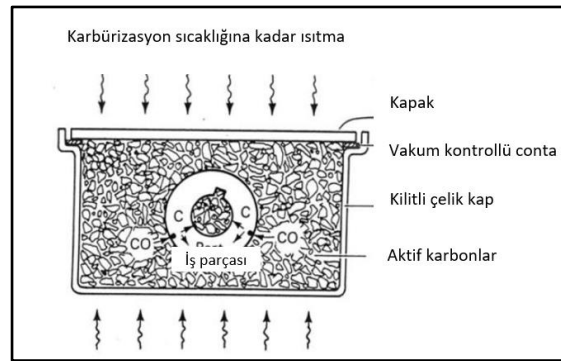
2.4.3.1. Karbürleme

Karbürleme, düşük karbonlu alaşımsız veya az alaşımlı çeliklerin yüzeyine karbon difüzyonu esasına dayanır [14]. İş parçasının ostenit faz bölgesinde (900-930°C) karbon verici bir ortamda tutulması şeklinde gerçekleştirilir [7]. Difüzyon ile gerçekleştiği için işlem, işlemsüresi ile doğrudan ilgilidir. İşlem süresini kısaltmak için farklı karbürleme metodları geliştirilmiştir. Kaplama kalınlıkları 2-3 mm civarında görülmektedir. Yüzeydeki karbon bileşimi ise %0,9 civarlarında seyir eder [7]. Daha yüksek karbon içeriği istenmez. Çünkü yüksek karbon içeriği, aşırı karbür ağlarının veya büyük karbürlerin neden olabilir. Malzemenin iç bölgesi (çekirdek) karbürleme işleminden etkilenmez ve orijinal karbon içeriğini korur ($C < 0,3$). Karbürleme işleminden sonra ısıtım işlem uygulanarak yüzeyde martensitik bir yapı elde edilir.

Karbürleme yöntemleri aşağıdaki gibidir [5].

- Gaz karbürleme
- Vakumlu karbürleme veya düşük basınçlı karbürleme
- Plazma karbürleme
- Tuz banyosunda karbürleme
- Paket karbürleme

Bu yöntemler, gaz (atmosferik gaz, plazma ve vakumlu karbürleme), sıvılar (tuz banyosunda karbürleme) veya katı bileşikler (paket karbürleme) kullanılarak karbürizasyon sağlanır. Tüm bu yöntemlerin sınırlamaları ve avantajları vardır, ancak gazla karbürleme çoğunlukla yüksek hacimli üretim için kullanılır çünkü doğru bir şekilde kontrol edilebilir ve minimum özel işlem gerektirir. Vakumlu ve plazma karbürleme uygulamaları, fırın atmosferinde oksijenin olmaması nedeniyle tane sınırında oluşan oksidasyonu ortadan kaldırır. Tuz banyosu ve kutu karbürlemenin ticari önemi nispeten daha azdır. Kutu karbürleme işleminin şematik gösterimi aşağıdaki gibidir [26].



Şekil 2.4: Kutu karbürleme işleminin şematik gösterimi.

Bazı uygulamalarda karbon ile birlikte azot difüzyonu da gerçekleştirilebilir. Bu işleme de karbonitrasyon adı verilir. Karbonitrasyon uygulamalarında işlem sıcaklığı yaklaşık olarak 850-900°C'dir [26]. Kaplama kalınlığı karbürleme işlemine göre daha düşüktür.

2.4.3.2. Nitrürleme

Nitrürleme, ferritik durumdayken 500-550°C sıcaklık aralığında çeliğin yüzeyine azot veren yüzey sertleştirme ısıl işlemidir [6]. Nitrürleme, martensit oluşturmak için su verme ile östenit fazına ısıtmayı içermediğinden, nitrür bileşenleri minimum bozulma ve mükemmel boyutsal kararlılık sergiler. Nitrürlemenin amacı, sertlik, aşınma dayanımı ve korozyon dayanımı sağlamaktır. Ayrıca tuz püskürtme testlerinde korozyon direncini iyileştirmede ek avantaj sağlar.

Nitrürleme mekanizması genel olarak bilinmektedir, ancak farklı çeliklerde ve farklı nitrürleme ortamlarında meydana gelen spesifik reaksiyonlar her zaman

bilinmemektedir. Azot, demirde kısmi çözünürlüğe sahiptir. Yaklaşık %6 nitrojen içeriklerinde ferrit ile katı bir çözelti oluşturabilir [6]. Yaklaşık %6 N içerdiğinde, Fe_4N bileşimli gama üssü (γ') adı verilen bir bileşik oluşur [1]. %8'in üzerindeki azot içeriklerinde, denge reaksiyon ürünü Fe_3N 'dir. Nitrülenmiş tabakaların en dış yüzeyin tamamı gama üssü olabilir. Oluşan bu katman beyaz katman olarak adlandırılır. Böyle bir yüzey tabakası istenmeyen bir durumdur ve çok kırılgandır. Bu nedenle kullanım sırasında parçalanabilir. Genellikle bu tabaka istenmediği için kaldırılır. Bu tabakayı azaltmak veya daha az kırılgan hale getirmek için özel nitrüleme işlemleri kullanılır. Malzeme dış katmanında Fe_3N bileşiğinin oluşumu ile sertleşir. Dış katmanda oluşan Fe_3N , Fe_4N 'den daha serttir [5]. Bu bileşik katmanlarının her birinin oluşumunu kontrol etmek, uygulama ve distorsiyon derecesi için çok büyük önem taşımaktadır.

Kaplamanın derinliği ve özellikleri, büyük ölçüde çelikteki nitrür oluşturan elementlerin konsantrasyonuna ve türüne bağlıdır. Genel olarak, alaşım içeriği ne kadar yüksekse, yüzey sertliği de o kadar yüksek olur. Bununla birlikte, daha yüksek alaşım elementleri N_2 difüzyon hızını geciktirir ve bu durum kaplama derinliğini azaltır. Bu nedenle, nitrüleme, karbürleme için gerekenden daha fazla cidar (case) derinliği gerektirir [6].

Nitrülenmiş çelikler genellikle alüminyum, krom, vanadyum ve molibden gibi güçlü nitrür oluşturan elementler içeren orta karbonlu (su verilmiş ve temperlenmiş) çeliklerdir. En önemli sertleşme, yaklaşık %1 Al içeren alaşımlı çelik sınıfı ile elde edilir. Bu çelikler nitrürlendiğinde, alüminyum AlN parçacıkları oluşturur, bu da ferrit kafesini gerer ve güçlendirme dislokasyonları yaratır [5].

Titanyum ve krom elementleri de kaplama sertliğini artırmak için kullanılır ancak alaşım içeriği arttıkça kaplama derinliği azalır. Mikroyapı, nitrülemede önemli bir rol oynar. Azot, ferritten kolaylıkla yayılabilir ve düşük karbür miktarı, difüzyonu ve kaplama sertliğini destekler. Nitrüleme için genellikle ısıtma işlemi görmüş (su verilmiş ve temperlenmiş) koşullarda alaşımlı çelikler kullanılır.

Nitrüleme için işlem yöntemleri aşağıdaki gibidir [6].

- Gaz nitrüleme
- Tuz banyosu nitrülemesi
- Akışkan yataklı nitrasyon
- Plazma nitrüleme

Bu tekniklerin avantajları ve dezavantajları, karbonlama ile benzerdir. Bununla birlikte, gaz nitrürleme için işlem süreleri oldukça uzun olabilir. Uygulamaya bağlı olarak 10-130 saat arasındadır. Kaplama derinlikleri nispeten daha azdır (genellikle 0,5 mm'den az) [6]. Plazma nitrürleme, daha hızlı nitrürlemeye izin verir ve plazma işleminin hızla elde edilen yüzey doygunluğu, daha hızlı difüzyonla sonuçlanır. [6].

Plastik enjeksiyon takım çeliklerine uygulanan bir diğer termokimyasal yüzey modifikasyon tekniği borlama olup bir sonraki bölümde detayı verilmiştir.

3. BORLAMA

Borlama, sertliğin ve aşınma direncinin artırılması için borun metal yüzeylere difüzyonunu içeren termokimyasal yüzey geliştirme yöntemidir. Borlama, çoğunlukla ısıtılma işlemiyle gerçekleştirilebilen takım çeliklerine de uygulanır. Çeşitli demir esaslı ve demir dışı malzemelere uygulanabilen termokimyasal bir yüzey sertleştirme işlemi olan borlama işlemi, iyi temizlenmiş malzemenin 700-1100°C aralığında, tercihen 1-12 saat boyunca bor içeren bir katı toz (borlama bileşiği), macun, sıvı veya gazla temas halinde ısıtılmasını içerir [11]. Borlama prosesi temelde bor kaynağı (B₄C, Na₂B₄O₇, H₂B₆), aktivatör (KBF₄) ve dolgu malzemesi olarak deoksidan bileşenlerinden meydana gelmektedir [41]. Günümüzde birden fazla bileşenle borlama işlemi kullanımına yönelik mevcut bir eğilim vardır [11].

Bor, gazlı, sıvı ve katı ortamda ve uygulanması için plazma, PVD ve CVD teknikleriyle sağlanabilir. Bor tozları paketleme araçlarıyla veya macunlarla uygulandığı şekliyle, büyük ölçüde bor karbür içeren katı borlama ajanlarının kullanımı, borlama için teknolojik olarak en uygun yöntem olarak kabul edilebilir [5].

Borlama işlemi sonucunda yaklaşık 20-300 µm kalınlığında borür tabakası elde edilir. Ortaya çıkan metalik borür tabakası, yüksek sertlik, iyi aşınma ve korozyon direnci ile birlikte yüksek sıcaklıkta orta derecede oksidasyon direnci gibi olağanüstü özellikler verir.

Krom, molibden, nikel, manganez, vanadyum ve kobalt gibi bazı elementler borür tabakasına dahil edilir. Karbon, silisyum, alüminyum ve bakır gibi elementler borür tabakasında çözünmez ve çeliğe yayılır. Bu nedenle, çelikteki alaşım elementlerinin çoğu, borür tabakasının büyümesini bir dereceye kadar geciktirir ve borür tabakalarının elde edilebilir kalınlığını azaltma eğilimindedir [6], [11].

Borlama sırasında, bor atomları difüze olur ve ardından bileşen yüzeyinin metalik kafesine emilir. Borlama işlemi sonucunda, tek fazlı borür ya da birçok fazlı borür tabakası ile bir ara yer bor bileşimi oluşturulur. Morfoloji, büyüme ve faz bileşimi dahil olmak üzere borür tabakasının çeşitli özellikleri, altlık malzemelerindeki elementlere bağlıdır [10].

Daha önce yapılan ve literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde, DIN 1.2842 çeliği için 850°C, 950°C ve 1050°C sıcaklıklarda, 1 saat ve 4 saat süreler ile borlama işlemi gerçekleştirilmiş olup, deneylerde borlama sıcaklığı ve zamanın artışına bağlı olarak borür tabaka kalınlığının arttığı görülmüştür. Ayrıca oluşan ortalama sertlik değerlerinin de borür yüzeyden altlık malzemeye doğru gidildikçe azalma gösterdiği, yapılan deneysel çalışmalar ile ortaya koyulmuştur [27].

3.1. Borlamanın Avantajları ve Dezavantajları

Borlama işlemi sonrası elde edilen borür tabakaları, geleneksel sertleştirilmiş tabakalara göre bir dizi avantajlara sahiptir. En temel avantajı borür tabakalarının son derece yüksek sertlik değerine (1450-5000 HV) sahip olması ve bileşen fazlarının yüksek ergime noktalarına sahip olmalarıdır. Borlamanın diğer bazı avantajları aşağıdaki gibidir.

- Borür tabakasının sertliği, nitrürlenmiş tabakalara göre daha yüksek sıcaklıklarda korunabilir.
- Tamamen sertleştirilebilir çelikler dahil olmak üzere çok çeşitli çelikler, borlama prosesleri ile uyumludur.
- Oksitleyici olmayan seyreltik asitler ve alkali ortamdaki demirli malzemelerin korozyon erozyon direncini önemli ölçüde artırabilen borlama, birçok endüstriyel uygulamada avantaj oluşturmaktadır.
- Borlanmış yüzeyler orta düzeyde oksidasyon direncine sahiptir (850°C kadar) ve ergimiş metallere karşı oldukça dirençlidir [5].
- Borlanmış parçalar, oksitleyici ve aşındırıcı ortamlar altında daha uzun yorulma ömrüne ve servis performansına sahiptir. Bu durum iş parçalarının kullanım ömrünü uzattığı için uzun vadede ekonomiktir.
- Diğer yüzey geliştirme işlemlerinden farklı olarak borlama, ortamda toksik atık üretmez. Süreç sadece çevre için değil, çalışanlar için de güvenlidir.
- Borlanmış tabakanın yüksek yüzey sertliği ve düşük yüzey sürtünme katsayısının kombinasyonu, ana aşınma mekanizmalarıyla mücadelede de önemli bir katkı sağlar. Yapışma, aşınma ve yüzey yorulması üzerinde oldukça önemli etkilere sahiptir. Bu durum, kalıp üreticilerinin temel metal yerine işlenmesi daha kolay

Çelikleri ikame etmelerine ve orijinal malzemeden daha üstün aşınma direnci özellikleri elde etmelerine olanak sağlamıştır [3].

- Plastik enjeksiyon uygulamalarında kullanılan kalıp çeliklerinden beklenen özellikleri karşılamak için de borlama işlemi uygulanabilmektedir. Plastik enjeksiyon işlemi sırasında açığa çıkan asidik gazlar, takım çeliği üzerinde aşınma ve korozyonu hızlandırmaktadır. Literatüre göre, borlama işlemi uygun malzemeler seçilerek uygulandığında, sürtünme dayanımını arttırarak, yapışmayı azaltır ve aşınma dayanımı sağlar [13].

Tablo 3.1’de karbon çeliklerin borlanması ile elde edilen borür tabakalarının sertliğinin diğer geleneksel yüzey sertleştirme işlemleriyle kıyaslandığında çok daha yüksek olduğu gösterilmektedir. Sertleştirilmiş takım çeliği, sert krom elektrolizle kaplamadan daha yüksek sertliğe ve tungsten karbrinkine eşdeğer sertliğe sahiptir [11], [13].

Tablo 3.1: Bazı yüzey sertleştirme işlemleri ile elde edilen ve bazı malzemelerin sertlikleri.

Malzeme	Mikrosertlik (HV)
Borlanmış yumuşak elik	1600
Borlanmış AISI H13 kalıp eliği	1800
Borlanmış AISI A2 eliği	1900
Su verilmiş elik	900
Sertleştirilmiş ve temperlenmiş H13 kalıp eliği	540-600
Sertleştirilmiş ve temperlenmiş A2 kalıp eliği	630-700
Yüksek hız eliği (HSS) BM42	900-910
Nitrürlenmiş elik	650-1700
Karbrlenmiş düşük alaşım elikleri	650-950
Sert krom kaplama	1000-1200
Sinterlenmiş karbrlar WC+Co	1160-1820
Al ₂ O ₃ +ZrO ₂ seramik	1483
Al ₂ O ₃ +TiC+ZrO ₂ seramik	1738
Sialon seramik	1569
TiN	2000
TiC	3500
SiC	4000
B ₄ C	5000
Elmas	>10000

Borlama işleminin avantajlarının yanında bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Borlama işleminin dezavantajları aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

- Karbonlama ve plazma nitrürleme gibi diğer termokimyasal yüzey sertleştirme işlemlerine göre, borlama teknikleri esnek değildir ve daha yüksek maliyetlidir. Bu nedenle borlama işlemi, borür tabakalarının yüksek sertliğe, yüksek aşınma ve korozyon direncine ve daha ucuz işçiliğe ihtiyaç duyduğu talepler için uygundur.
- Borlamadan işlemi sonucunda malzeme tabakasında %5-25 hacim genişleme olduğu için parçanın boyutlarında değişiklikler olmaktadır. Büyüme, temel malzeme bileşimine bağlıdır. Bu nedenle borlama işlemi malzeme geometrisine bağlı olup, hassas boyutlar için sorun teşkil etmektedir.
- Talaş kaldırmaya izin verilen hassas parçaların işlenmesi için, geleneksel aşındırma metodları kullanılmalıdır. Bu talaş kaldırma işlemi sonucunda kaplama tabakasında çatlak oluşma riski vardır.
- Genel olarak, borlanmış alaşımlı çeliklerin, dönen hareketli parçalarındaki yorulma özellikleri, yüksek yük altında karbonlanmış ve nitrürlenmiş çeliklere kıyasla çok daha zayıftır. Bu nedenle, dişlilerin borlama işlemleri düşük temas yükleri ile sınırlıdır.
- Borür tabakasının bütünlüğünü korumak için, borlama işleminden sonra, bir vakum veya inert atmosfer gerektiren fırın ile, sertleştirme ve temperlenme işlemi yapılmasına ihtiyaç duyulur [5].
- Yüksek hız çeliklerinin sertleşme sıcaklıkları genellikle 1150°C'nin üzerinde olup borlama için uygun değildir.
- Borlama sonrası parça yüzeyinde tuz kalıntıları veya reaksiyona girmemiş bor tozları olabilir. Bunların giderilmesi için ek işlemlere ihtiyaç duyulur. Bu nedenle ekonomik olarak dezavantaj sağlar.
- İşlem yüksek sıcaklıklarda gerçekleştiğinden, ergime sıcaklığı düşük olan metal ve alaşımların termokimyasal yöntemle borlanması mümkün değildir [42].

Belirtilen dezavantajlara rağmen borlama uygulamaları, doğru malzeme ve doğru parça seçimi ile etkin şekilde uygulanabilmektedir.

3.2. Borlama Yöntemleri

Borlama işleminde bor sağlayıcı bileşikler ve bor kaynağı farklı fazlarda bulunabilir. Borür tabakasını oluşturmak için kullanılan yöntemler aşağıdaki şekilde termokimyasal ve termokimyasal olmayan yöntemler gibi sınıflandırılmaktadır. Açıklanan teknikler esas olarak olarak demir içeren metallerde kullanılır [1], [11].

Termo-kimyasal yöntemler;

- Kutu borlama
- Pasta borlama
- Sıvı borlama
- Gaz borlama
- Plazma borlama
- Akışkan yataklı fırınlarda borlama

Termo-kimyasal olmayan yöntemler;

- Fiziksel buhar biriktirme (PVD)
- Kimyasal buhar biriktirme (CVD)
- Plazma sprey kaplama
- İyon biriktirme

Bu teknikler içerisinde en çok termokimyasal teknikler kullanılır ve bu yöntemde bor kaynağı ve bileşik arasında sıcaklığın ve sürenin bir fonksiyonu olarak difüzyon mekanizması ile bir ara yüzey oluşur. Esas olarak bor elementinin yüksek sıcaklıkta çeliğe difüzyonunu içermektedir. Yüzeydeki partiküllerin çekirdeklenme hızı, borlama süresinin ve sıcaklığının bir fonksiyonudur [6].

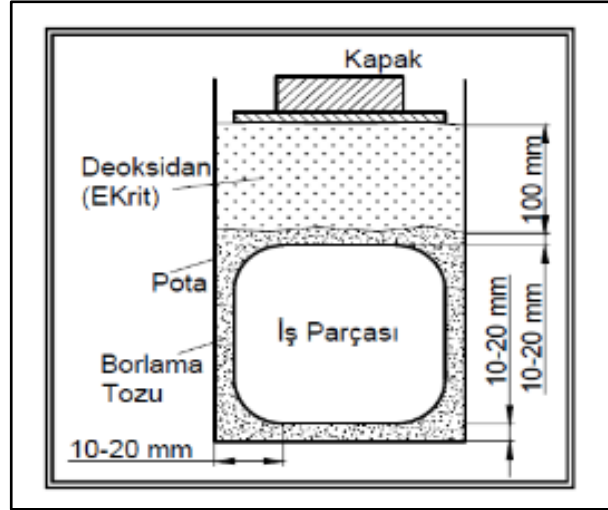
3.2.1. Kutu Borlama

Kutu borlama işlemi, kullanım kolaylığı sağlaması, kullanım güvenliği ve toz karışımının bileşiminde değişimin az olmasının yanında kullanılacak ekipmanların daha az ve basit olması ile sonuçta ortaya çıkan ekonomik nedenlerden dolayı en yaygın kullanılan borlama işlemidir [6].

Borlama işlemi; tavllanmış, temizlenmiş, pürüzsüz parçaların, ısıya dayanıklı bir pota içinde bulunan bir borlama tozu karışımı ile 10-20 mm kalınlığında tabaka oluşturacak şekilde paketlenmesi ile yapılır [11]. Kutu borlama için birçok farklı borlama bileşiği kullanılmıştır. Bu bileşenler, katı bor kaynağı maddeler, seyrelticiler ve aktivatördür. Yaygın olarak kullanılan bor kaynağı maddeler, bor karbür (B_4C), ferroboron ve amorf bor'dur [11], [29]. Ferroboron ve amorf bor daha yüksek bor potansiyeline sahip ve kalın bir bor tabakası sağlar. Maliyet olarak B_4C bileşiğine göre daha pahalıdır. Silisyum karbür (SiC) ve alümina (Al_2O_3) seyreltici görevi görür ve reaksiyonda yer almazlar [11]. Ancak SiC , bor miktarını kontrol eder ve borlaştırıcı maddenin çökmesini önler. $NaBF_4$, KBF_4 , $(NH_4)_3BF_4$, NH_4Cl , Na_2CO_3 , BaF_2 ve $Na_2B_4O_7$ borlama aktivatörleridir [11], [29].

İş parçası etrafı, en az 10-20 mm kaplanacak şekilde pota içerisine yerleştirilir ve borlama tozlarının üzerine dolgu maddesi eklenir. Potanın üst kısmına hava ile teması kesmek ve oksitlenmeyi engellemek için kapak kapatılır. Potada meydana gelecek çatlaklar ve iç gerilmeleri önlemek için, hazırlanan borlama toz karışımı ilavesi gerektiği durumlarda yeniden eklenebilir. Bu nedenle pota hacmi, fırın hacminin %60'ını geçmemelidir [31]. Borlama işlemi tamamlandıktan sonra fırın içerisinden çıkartılan potalar üzerine su dökülerek hızlı bir şekilde veya fırın içinde bekletilerek yavaş bir şekilde soğutulabilir. Borlama işlemi için, pota malzemeleri; alümina, alaşımsız çelik ve paslanmaz çelik olarak kullanılabilir [43].

Kutu borlama işleminin şematik gösterimi Şekil 3.1'de verilmiştir [30].



Şekil 3.1: Katı borlama işleminin şematik gösterimi.

Ticari katı borlama tozu karışımlarının bileşimleri aşağıdaki gibidir.

- 5% B_4C , 90% SiC , 5% KBF_4
- 50% B_4C , 45% SiC , 5% KBF_4
- 85% B_4C , 15% Na_2CO_3
- 95% B_4C , 5% $Na_2B_4O_7$
- 84% B_4C , 16% $Na_2B_4O_7$
- Amor Bor (95-97% B)
- 95% Amorf Bor, 5% KBF_4 [11].

Bor atomlarının yayılımı öncelikle malzeme yüzeyinde başlamaktadır. Malzeme yüzeyine daha homojen bir yayılım sağlanabilmesi için geniş temas yüzeyine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle borlama işlemi yapılacak olan tozun içeriği, tane boyutu ve özellikleri oldukça önem kazanmaktadır. Uygun bir toz karışımı ile borlama işlemi yapılabileceği gibi, ticari karışımlar ile de yapılabilmektedir [43].

Daha düşük maliyeti ve üretim kalitesini olumsuz yönde etkilememesi sebebi ile B_4C kullanılan en yüksek bor kaynağıdır. Kutu borlama işlemi için kullanılan bazı bor kaynakları ve özellikleri Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2: Kutu borlama işleminde kullanılan bazı bor kaynakları.

Malzeme	Formülü	Molekül Ağırlığı (g/mol)	Teorik Bor İçeriği (%)	Ergime Sıcaklığı (°C)
Bor Karbür	B ₄ C	55,29	77,29	2540
Amorf Bor	B	-	17-19	-
Ferro-Bor	Fe-B	10,82	95-97	2050

Tablo 3.3: Tipik ticari borlama toz karışımlarının bileşenleri.

Bor Kaynağı (Ağ. %)	Akışkan Kaynağı (Ağ. %)	Aktivatör (Ağ. %)
5 B ₄ C	90 SiC	5 KBF ₄
50 B ₄ C	45 SiC	5 KBF ₄
85 B ₄ C	-	15 Na ₂ CO ₃
95-97 Amorf Bor	-	3-5 KBF ₄
(40-80) B ₄ C	(20-60) Fe ₂ O ₃	-
60 B ₄ C 5 B ₂ O ₃	5 NaF	30 Fe ₂ O ₃
50 Amorf Bor	49 Al ₂ O ₃	1 NH ₄ .HF
100 B ₄ C	-	-
20 B ₄ C	75 Grafit	5 KBF ₄

EKABOR firması tarafından ticari olarak üretilen bor tozları deoksidan ekrit ile birlikte Tablo 3.4’te verilmiştir [39].

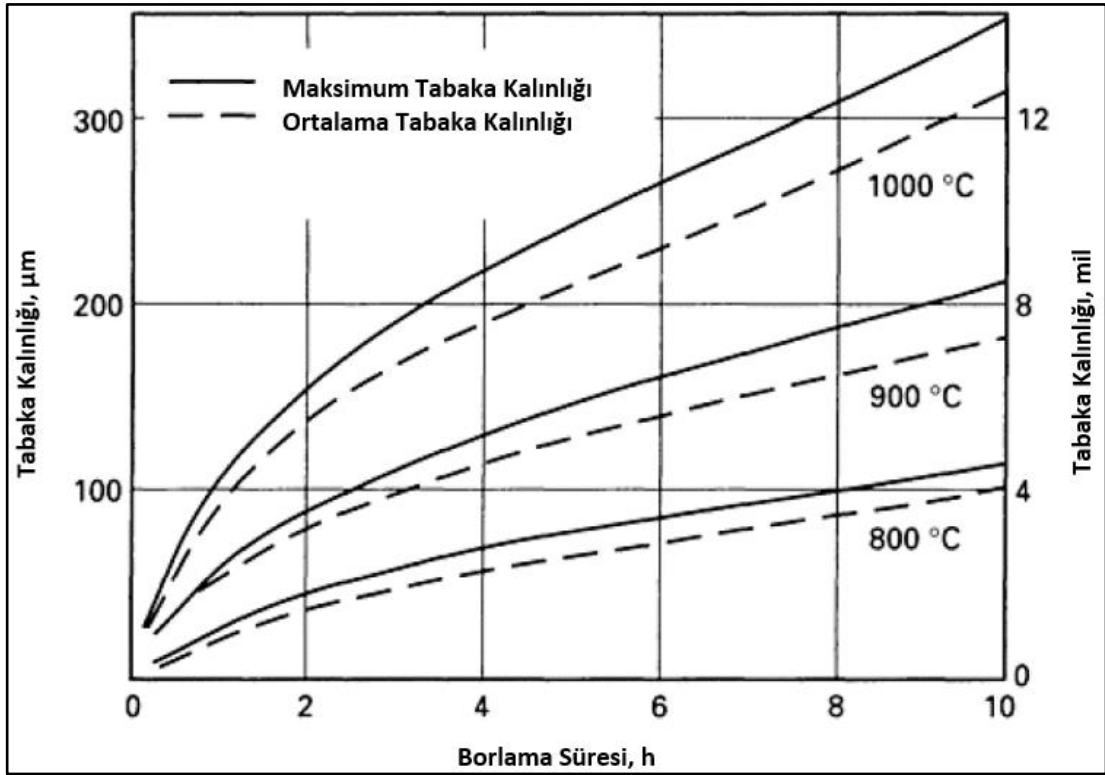
Tablo 3.4: Ekabor borlama ürünleri ve özellikleri

Borlama Ürünü	Tane Boyutu (μm)	Yoğunluk (gr/cm^3)	Özellik
Ekabor™ 1	< 150	1,90	Yüzey Kalitesi en yüksek tabaka için birlikte bağlanmaya eğilimli
Ekabor™ 2	< 850	1,70	Mükemmel yüzey kalitesi; işlem sonrası parçalardan kolaylıkla ayrılma
Ekabor™ 3	< 1400	0,95	Çok iyi yüzey kalitesi, işlem sonrası toz akıcılığı daha iyidir
Ekabor™ HM	< 150	0,95	Çok iyi yüzey kalitesi; sert metal, küçük delik ve kalın tabakalar için
Ekabor™ Pasta	-	1,90	Daldırma fırça ile sürme ve püskürtme ile uygulanabilir, inert gaz altında çalışılmalıdır
Ekabor™ Ni	< 150	-	Nikel esaslı alaşımların borlanması içindir
EKrit™	≤ 420	1,55	Örtü Malzemesi, borlama süresinde toz borlama ürünlerine oksijen sızmasını önler

850°C -1050°C’de gerçekleştirilen borlama işlemi sonucu demir yüzeyine bor yayılması gerçekleşir. Bu yayılma işlemi ile tek fazlı Fe₂B veya iki fazlı Fe₂B+ FeB den oluşan ferrobör tabakası elde edilir. Tek faz Fe₂B oluşumu, iki faz Fe₂B+ FeB nin oluşumundan daha fazla istenir. Borca zengin FeB fazının kırılabilirliği yüksek olduğu için FeB fazının oluşumu istenmez. İlk oluşan Fe₂B fazının büyümesi uzun süre almaktadır. Son aşamada oluşan FeB fazı, Fe₂B fazından daha kısa sürede büyür. Bu nedenle Fe₂B fazı, FeB fazına göre daha güçlü bir yapı sergiler. FeB’nin ısı genleşme katsayısı, Fe₂B nin ısı genleşme katsayısından büyüktür. İki fazlı sistemde oluşan Fe₂B ve FeB fazları arasındaki ısı genleşme farklılıkları nedeni ile yüzeyde çatlaklar oluşur. Fe₂B yüksek basınç gerilmesi altında yüzey oluştururken, FeB yüksek çekme gerilmesi altında yüzey oluşmaktadır.

Altlık malzemenin özelliğine göre, borlama işleminde uygulanan sıcaklık ve süre oldukça önemlidir. Alaşımlı ve düşük alaşımlı çeliklerde 800°C’nin üzerindeki sıcaklıklarda bor atomlarının difüzyon hızı, borür tabaka oluşumu için yeterli büyüklüğe erişir. Hızlı ısıtma ile 700°C - 800°C’nin üzerine geçilmesi, yüzeyde oluşacak FeB fazının önüne geçilmesi için oldukça faydalıdır.

Düşük karbonlu Ck45 çeliğinin kutu borlama işlemi ile sıcaklık ve süresinin tabaka kalınlığına etkisi Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2: Düşük karbonlu bir çelikte (Ck 45) kutu borlama sıcaklığı ve süresinin borür tabaka kalınlığına etkisi.

Pratikte elde edilmek istenen tabaka kalınlığı için Şekil 3.2’den yararlanılabilir. İş parçasının kullanım alanına göre, elde edilmek istenen tabaka kalınlığı değişiklik gösterebilir. Örneğin, talaşsız şekillendirme, metal damgalama kalıpları gibi iş parçaları için daha ince bor katmanına ihtiyaç duyulurken, aşınma riskine karşın plastik enjeksiyon kalıplarında istenen bor katmanının daha kalın olması beklenir. Genel olarak, düşük alaşımlı ve düşük karbonlu çelikler için, 0,05-0,25 mm tabaka kalınlığı beklenirken, yüksek alaşımlı çelikler için ise 0,025-0,076 mm tabaka kalınlığı beklenir.

3.2.2. Pasta Borlama

Pasta borlama ticari olarak kutu borlamanın zor, daha pahalı veya zaman alıcı olduğu durumlarda kullanılır. Bu proseste, iyi bir bağlayıcı ajan ($B_4C-SiC-KBF_4$) içinde % 45 B_4C (tane boyutu 200 - 240 μm) ve % 55 kriyolit (Na_3AlF_6 , flaks ilaveli) veya geleneksel borlaştırıcı toz karışımı ($B_4C-SiC-KBF_4$) içeren bir macun 2-5 mm kalınlıkla borlanacak malzemenin üzerine sürülür [11]. Daha sonra macun, ön ısıtma odasında veya kurutma fırınında kurutulur. Kurutma işleminin ardından demir içeren malzemeler endüktif olarak, dirençli veya geleneksel bir fırında 800 - 1000°C'de belirli bir süreyle ısıtılır (örneğin 900°C 4 saat) [16]. Bu süreçte koruyucu bir atmosfer gazı (örneğin argon, çatlak NH_3 veya N_2) gereklidir [6]. 20 dakika boyunca 1000°C geleneksel veya dirençli fırında ısıtıldıktan sonra 50 μm 'den fazla kalınlıkta bir katman elde edilebilir [11]. Bu işlem koruyucu atmosfer gazı ortamında yapılmazsa kötü bir borür tabakası oluşabilir.

3.2.3. Sıvı Borlama

Sıvı ortamda yapılan borlama işleminde, borlanacak malzeme 900-1100°C arasındaki sıcaklığa sahip, sıvı bir borlu ortam içinde 2-9 saat bekletilerek bor yayılımı gerçekleştirilmesi yöntemidir [16]. Sıvı ortamda borlama işlemi için iki yöntem kullanılır. Kullanılan yöntemlerden biri Elektrolitli sıvı borlama, ikincisi ise Elektrolitsiz-(Daldırma) sıvı borlamadır [11].

Elektrolitli sıvı borlama işleminde, borlanacak malzeme katot ve grafit anot görevi görür. İş parçası, oluşan akım yoğunluğu kullanılarak 4 saat boyunca 940°C'de elektrolitik erimiş boraks içine daldırılır [1]. Borlanacak malzeme daha sonra hava ile soğutulur. Yüksek akım yoğunluğu, düşük alaşımlı çelikler üzerinde kısa sürede ince bir kaplama oluşturur. Daha kalın olan yüksek alaşımlı çelikler için daha düşük akım yoğunlukları ve daha uzun süre gereklidir.

Genellikle kullanılan elektrolit tuz banyosu kompozisyonları aşağıdaki gibidir [11].

- $KBF_4-LiF-NaF-KF$ karışımı (600-900°C)
- 20KF-30NaF-50LiF-0.7BF₂ karışımı (molce %) (800-900°C)

- 9:1 (KF-LiF)-KBF₄ karışımı argon atmosferi altında
- KBF₄-NaCl karışımı (650°C)
- 90(30LiF + 70KF)-10KBF₄ karışımı (700-850°C)
- 80Na₂B₄O₇-20NaCl (800-900°C)

Borlanacak malzemelerin elektrolitsiz tuz banyosunda borlanması, yaklaşık 900-950°C'de boraks bazlı bir eriyik içinde gerçekleştirilir ve bu eriyik içerisine ağırlık olarak yaklaşık % 30 B₄C eklenir. Borlaştırma etkisi, daha güçlü indirgeyiciler ile arttırılabilir [16].

3.2.4. Gaz Borlama

Borlama işlemi gaz fazında gerçekleşir. Gaz borlamanın gerçekleşebilmesi için bor verici ortam olarak bor halojenleri, diboran B₂H₆ ve organik bor bileşikleri kullanılır. Diboran (B₂H₆) - H₂ karışımı, Bor halojenür-H₂ veya (75:25 N₂-H₂) gaz karışımı, (CH₃)₃B ve (C₂H₅)₃B gibi organik bor bileşikleri kullanılarak gaz ortamında borlama yapılabilir [11].

B₂H₆-H₂ karışımı ile borlama, diboranın yüksek toksik ve patlayıcı doğası nedeniyle ticari olarak uygun değildir. Organik bor bileşikleri kullanıldığında, karbür ve borür tabakaları aynı anda oluşur. BBr₃ pahalı ve kullanımı zor (suyla şiddetli reaksiyonlarda), BF₃ yüksek indirgeme sıcaklığı gerektiren (daha yüksek stabilitesinden dolayı), HF borlaşma sırasında keskin bir gaz üreten bileşenler olduğu için, BCl₃ gaz borlama için iyi bir seçim olmaktadır [11], [31].

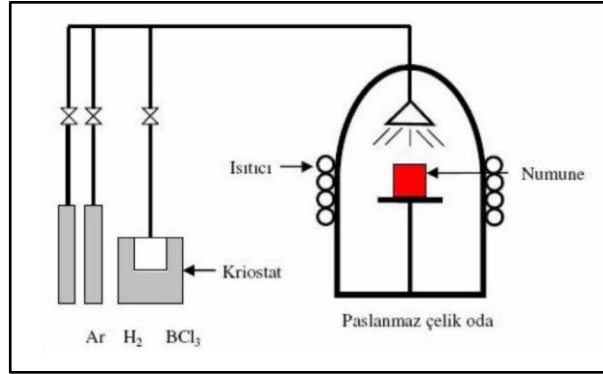
Borlanacak malzemeler, 700 - 950°C sıcaklıkta ve 67 kPa'ya kadar basınçta seyreltik (1:15) BCl₃-H₂ gaz karışımında gaz borlama yapıldığında, 920°C'de 120-150 µm kalınlığında bir borür tabakası oluşturduğu bilinmektedir [5].

Gaz borlama işlemi, borlama sırasında bor aktivitesinin kontrol edilmesini sağlar. Gaz borlama için bor halojenürlerin (BCl₃, BF₃) kullanılması, yüksek sertlik ve aşınma direnci ile karakterize edilen çok kalın borid tabakalarının oluşmasına neden olur [44].

Nikel bazlı altlık malezeme üzerine yapılan gaz borlama çalışmalarında, borür tabakasının oluşumu için H₂-BCl₃ atmosferi yerine, sınırlı hidrojen içeriğine sahip (hacimce yaklaşık %25) N₂-H₂-BCl₃'den oluşan daha güvenli gaz karışımı

kullanıldığında, H_2 ile ilişkili olarak yüksek BCl_3 ilavesi kullanılmış olmasına rağmen, tüm borlama atmosferindeki ($N_2-H_2-BCl_3$) BCl_3 içeriğinin nispeten düşük olduğu görülmüştür. Gaz borlama işleminde daha kısa sürede, diğer kabul edilebilir difüzyon yöntemi durumunda ölçülen tabaka kalınlıklarına yakın değerler elde edildiği de yapılan çalışmalar ile görülmüştür [45].

Gaz ortamında borlama işleminin şematik gösterimi Şekil 3.3'te verilmiştir [32].



Şekil 3.3: Gaz ortamında borlama işleminin şematik gösterimi.

3.2.5. Plazma Borlama

Plazma Borlama işlemi, BCl_3-H_2-Ar , BCl_3-H_2 , $B_2H_6-H_2$, BF_3 veya $B(OCH_3)_3$ gibi bor kaynakları kullanarak, $800-1000^\circ C$ sıcaklıkta, yaklaşık 10^{-2} Pa gibi düşük bir basınçta oluşturulmuş plazma içerisinde yapılan borlamadır [43].

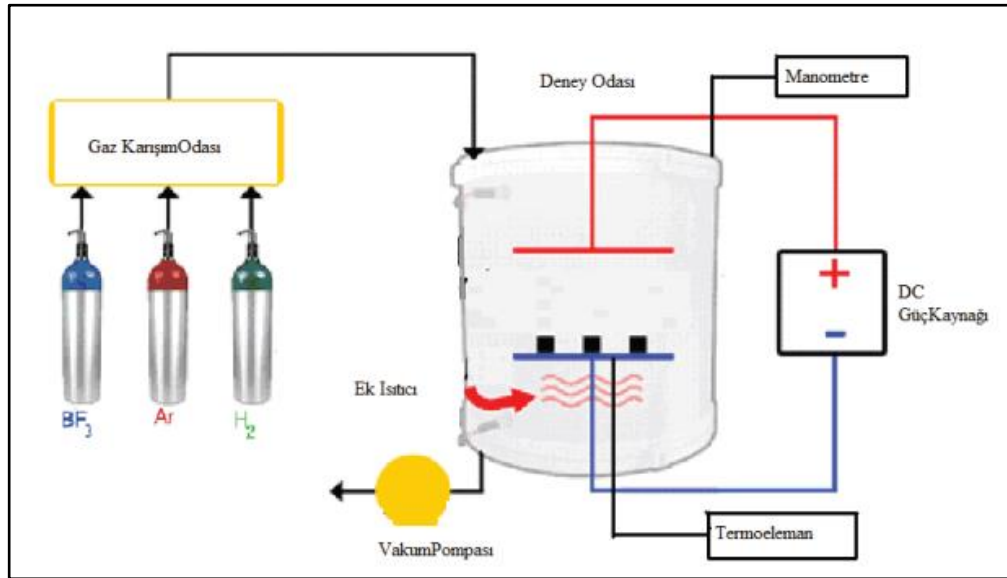
Maddenin plazma hali, gaz halinin iyonize olmuş hali olarak tanımlanabilir. Yüksek sıcaklık ve enerji yoğunluğuna sahip olan plazma halinde atomların iyonlaşması ile sürekli olarak atomların birbirleri ile çarpışması durumu söz konusudur. Bu durum plazma durumunda kimyasal reaksiyonların daha hızlı gerçekleşmesine sebep olmaktadır. Pratikte plazma, ısı enerjisi verilerek, ışınla veya elektriksel boşalma ile elde edilir [43].

Bilinen yüzey geliştirme işlemlerine göre, çevresel ve ekonomik olarak oldukça avantajlı bir yöntemdir. Daha kontrollü bir işlem sağlamak da oldukça avantajlı olduğu için, mikro yapının kontrol edilebilirliğine de önemli katkı sağlamaktadır. Bununla birlikte, gaz, kutu veya sıvı borlama işlemi ile mümkün olmayan $600^\circ C$ gibi nispeten düşük sıcaklıklarda da çeşitli çelikler üzerinde borür tabakası oluşturmak için uygulanabilmektedir [11]. Çift fazlı borür tabakalarında, bor tortusu ile ilişkili olarak

gözenekliliğin arttığı görülebilir. Bu gözenekliliği en aza indirmek için BCl_3 konsantrasyonu artırılabilir. 700°C - 850°C Sıcaklıkta ve 270 Pa - 800 Pa basınçta, 6 saatlik işlemden sonra 200 μm kalınlığa kadar borid tabaka kalınlığı görülebilmektedir [11].

Yapılan çalışmalarda, Tungsten karbür kesme takımlarında plazma borlama işlemi sırasında elektromanyetik alanın kenar bölgelerde yoğunlaşması ile birlikte sertlik farkı oluştuğu görülmüştür. Oluşan sertlik farkının tokluğa olumlu yönde etki ettiği de belirtilmiştir. Ayrıca sabit borlama süresinde sıcaklığın artması ile tabaka kalınlığının arttığı görülmüştür [42].

Şekil 3.4'te plazma borlama işleminin şematik gösterimi verilmiştir [46].



Şekil 3.4: Plazma borlama işleminin şematik gösterimi.

Plazma borlama işleminin bazı avantajları aşağıda verilmiştir [11].

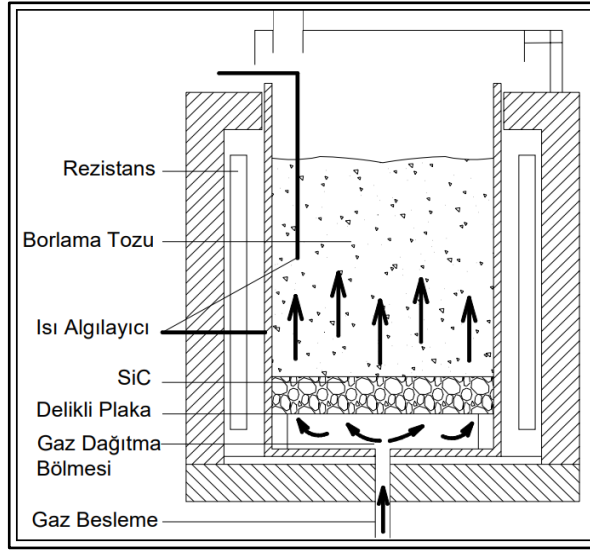
- Borür tabaka fazlarının ve tabaka kalınlığının kontrolü
- Konvansiyonel paket borlama ile karşılaştırıldığında artan bor potansiyeli
- Daha ince plazma ile işlenmiş borür katmanları oluşması
- Daha düşük sıcaklık ve sürelerde oluşan borür tabakaları
- Yüksek sıcaklık fırınlarına ihtiyaç olmaması
- Enerji ve gaz tüketiminde tasarruf sağlanması

İşlemin tek dezavantajı kullanılan atmosferin toksik olmasıdır. Bu nedenle, henüz plazma borlama işlemi ticari kabul görmemiştir.

3.2.6. Akışkan Yataklı Fırınlarda Borlama

Katı ortamda borlama işlemine benzer bir yöntem olan akışkan yataklı fırınlarda borlama yönteminde, Ekabor WB gibi özel bir borlama tozu, N_2/H_2 gazı gibi oksijensiz gazlar ile akıcı hale gelmekte ve akıcı bir ortam oluşturulmaktadır. Isı kaynağı olarak elektrik kullanıldığında, akışkan yatak daha hızlı bir ısı transfer ortamı görevi görür [11].

Şekil 3.5'te akışkan yataklı fırında borlama işleminin şematik gösterimi verilmiştir [44].



Şekil 3.5: Akışkan yataklı fırında borlama işleminin şematik gösterimi.

Akışkan yataklı fırınlarda borlama yönteminin bazı avantajları aşağıdaki gibidir.

- Yüksek ısıtma avantajı sağlaması nedeni ile işlem süresinin kısılması ve borlanan parçanın doğrudan dışarıya alınabilmesi imkânı
- Sıcaklık homojenliği sağlaması nedeni ile termal kararlılığı oldukça yüksektir.

- Tekrar üretilebilirlik sağlaması nedeni ile seri üretilen parçalar üzerinde yüksek kalitede yüzey elde edilmesini sağlar.
- İşlemden hemen sonra su verme (ve ardından temperleme) mümkündür.
- Kısa işlem süresi ve enerji tüketimi, seri üretimlerde düşük işletme maliyetlerinde işlem yapılabilmesine olanak sağlar.

Çevresel sorunlara sebebiyet verebilecek bir işlem olması dezavantaj olarak değerlendirilmektedir.

3.3. Borlanabilen Malzemeler ve Borürlerin Genel Özellikleri

Borlama sırasında, bor atomlarının bileşen yüzeyinin metalik kafesine difüzyonu ve ardından absorpsiyonu, bor bileşiklerini oluşturur. Ortaya çıkan katman, tek fazlı bir borür veya çok fazlı bir borür katmanından oluşabilir. Borlu tabaka veya tabakaların özelliklerini; malzeme bileşimi, borlama ortamındaki bor atomlarının kimyasal aktiviteleri, borlama işlem sıcaklığı ve süresi, ilave ısı işlemler ve seçilen borlama yöntemi etkiler [12].

Borlama işlemi termokimyasal ve termokimyasal olmayan yöntemler ile üretilen bütün demir esaslı alaşımlara uygulanabilmektedir. W, Ta, Mo, Zr, Hf, Nb gibi refrakter metaller, Ni esaslı alaşımlar ve karbürlerle uygun şekilde borlama işlemi yapılabilmektedir. Ti ve Ti esaslı alaşımlara da bor yayılımı ile borlama işlemi yapılmaktadır. Düşük ergime sıcaklığına sahip Zn, Al ve Mg alaşımlarına borlama işlemi uygulanamamaktadır [47].

Borun demirdeki çözünürlüğü çok düşüktür, 900°C'de yaklaşık 50 ppm ve daha düşük sıcaklıklarda daha da düşüktür. Bu nedenle FeB ve Fe₂B fazlarının altında bir bor difüzyon bölgesi tespit etmek zordur. Çeliklerin borlanması, C, Cr, Ni, Mn, Al, Si, Mo gibi mevcut alaşım elementlerinden büyük ölçüde etkilenir. Genel olarak alaşım elementleri, bazı istisnai elementler hariç borür tabaka büyüme hızını düşürür [48].

Demir esaslı metalik malzemelerin, 850°C -1050°C'de gerçekleştirilen borlama işlemi sonucu demir yüzeyine bor yayılması gerçekleşir. Bu yayılma işlemi ile tek fazlı Fe₂B veya iki fazlı Fe₂B + FeB den oluşan ferrobör tabakası elde edilir [16]. İki fazlı demir borürler, ortamda aşırı bor atomu varsa veya malzeme yüksek alaşımlı bir

malzeme ise meydana gelmektedir. Ana malzeme ile borür tabaka arayüzeyinde morfolojik incelemeler yapıldığındaysa iki farklı yapı gözlenir. Birincisi, sade karbonlu ve az alaşımlı çeliklerde görülen testere dişi tipindeki girintili çıkıntılı arayüzey formu, ikincisi de yüksek karbonlu ve yüksek alaşımlı çeliklerde gözlenen daha düz formdaki arayüzey tipidir [16]. Testere dişi oluşumu, Fe₂B fazının tetragonal kafesindeki difüzyon katsayısının belirgin anizotropisinden kaynaklanır. [100] yönelimi, bor atomu için maksimum difüzyon hızı ile kafes yönelimini temsil ettiğinden, difüzyon süresi ne kadar uzun olursa, o kadar güçlü bir [100] katmanı gelişir [48].

Demir borür tabakalarının bazı özellikleri Tablo 3.5'te gösterilmiştir [6], [11].

Tablo 3.5: Fe₂B ve FeB'nin bazı özellikleri.

Özellik	Fe ₂ B	FeB
Ergime Noktası (°C)	1390	1550
Mikrosertlik (HV)	1600-1800	1800-2400
Uzama Katsayısı (1000°C)	$8.0 \times 10^{-6} K^{-1}$	$10-16 \times 10^{-6} K^{-1}$
Termal İletkenlik (1000°C)	0,2-0,3 W/cm°C	0,1-0,2 W/cm°C
Küri Noktası (°C)	742	325
Kristal Sistemi	Tetragonal Hacim Merkezli	Ortorombik
Kafes Parametreleri (Å)	a:5,075 b:4,249	a:4,053 b:5,495 c:2,946
Yoğunluk (gr/cm ³)	7,32	7,15

Borlanmış tabakanın yüksek yüzey sertliği ve düşük yüzey sürtünme katsayısı kombinasyonu, aşınma mekanizmalarıyla mücadelede çok önemli bir katkı sağlar [28]. Ayrıca yapışma, aşınma ve yüzey yorgunluğunu da geliştirmede oldukça önemlidir. Bu nedenle bor kaplama ile kalıp üreticilerinin temel metal yerine işlenmesi daha kolay çelikleri ikame etmelerine olanak sağlamıştır. Borür tabakasının sertliği, yüksek sıcaklıklarda korunabilir. Borlama prosesi, tamamen sertleştirilebilir çelikler dahil olmak üzere çok çeşitli çelikler ve proseslerle uyumludur. Oksitleyici olmayan seyreltik asitler ve alkali ortamlarda demirli malzemelerin korozyon direncini önemli ölçüde artırabilen borlama, birçok endüstriyel uygulamada bu avantaj için giderek daha fazla kullanılmaktadır [1], [5]. Borlanmış yüzeyler orta düzeyde oksidasyon

direncine sahiptir (850°C) ve ergimiş metallerin oluşturduğu oksidasyona karşı oldukça dirençlidir [6].

Tek bir Fe₂B fazının (tercih edilen difüzyon yönüne bağlı bir testere dışı morfolojisine sahip) oluşumu, FeB'li çift fazlı bir katmandan daha fazla arzu edilir. Borca zengin FeB fazı, Fe₂B katmanından daha kırılğan olduğu için istenmeyen olarak değerlendirilir [11], [27]. Ayrıca, FeB ve Fe₂B sırasıyla çekme ve sıkıştırma artık gerilmeleri altında olduğu için, çift fazlı bir katmanın FeB / Fe₂B arayüzünde veya yakınında çatlak oluşumu gözlemlenir [11]. Bu çatlaklar, mekanik bir gerilme uygulandığında ve hatta bir bileşen termal veya mekanik bir şoka maruz kaldığında ayrılma olduğunda, pullanmaya ve dökülmeye neden olabilir [5]. Bu nedenle bor zengini FeB fazından kaçınılmalı veya bor katmanında en aza indirilmelidir.

Tribolojik özelliklerin borür tabakasının mikro yapısına bağlı olduğu da bildirilmiştir. Çift fazlı FeB-Fe₂B katmanları, yüzeyin hemen altındaki gözenekli yüzey bölgesinin kaldırılması koşuluyla, tek fazlı Fe₂B katmanlarından yüksektir [3], [11]. Alternatif olarak, daha az kırılğan ve gözenekli yüzey bölgesi oluşumu ve pullanma gelişimi nedeniyle daha ince bir katman tercih edilir.

Borlama sırasında, bor atomlarının difüzyonu ve ardından bileşen yüzeyinin metalik kafesine absorpsiyonu, arayer bor bileşiklerini oluşturur. Nihai katman, tek fazlı bir borür veya çok fazlı borür katmanından oluşabilir. Borür tabakasının morfolojisi , büyümesi ve faz bileşimi, ana malzemedeki alaşım elementlerinden etkilenebilir. Borür tabakanın mikrosertliği aynı zamanda borid tabakasının bileşimine, yapısına ve ana malzemenin bileşimine de büyük ölçüde bağlıdır [11].

Tablo 3.6'da farklı altlık malzemelerin borlanması ile birlikte oluşan borür fazların, mikrosertlikleri ve ergime noktaları gösterilmiştir [11].

Tablo 3.6: Farklı altlık malzemelerin borlanması sonucu oluşan farklı borür fazlarının ergime sıcaklığı ve mikrosertliği.

Altlık Malzeme	Borür Tabaka Fazları	Mikrosertlik (HV)	Erime Noktası (C°)
Fe	FeB	1900-2100	1390
	Fe ₂ B	1800-2000	-
Co	CoB	1850	-
	Co ₂ B	1500-1600	-
	Co ₃ B	700-800	-
Co-27.5 Cr	CoB	2200	-
	Co ₂ B	1550	-
	Co ₃ B	700-800	-
Ni	Ni ₄ B ₃	1600	-
	Ni ₂ B	1500	-
	Ni ₃ B	900	-
Mo	Mo ₂ B	1660	2000
	MoB ₂	2330	2100
	Mo ₂ B ₅	2400-2700	2100
W	W ₂ B ₅	2600	2300
Ti	TiB	2500	1900
	TiB ₂	3370	2980
Ti-6Al-4V	TiB	-	-
	TiB ₂	3000	-
Nb	NbB ₂	2200	3050
	NbB ₄	-	-
Ta	Ta ₂ B		3200-3500
	TaB ₂	2500	3200
Hf	HfB ₂	2900	3250
Zr	ZrB ₂	2250	3040

Borlama işlemi iki tür reaksiyondan oluşur. İlk reaksiyon, bor kaynağı madde ile bileşen yüzeyi arasında gerçekleşir [3]. Yüzeydeki parçacıkların çekirdeklenme hızı, borlama süresi ve sıcaklığın bir fonksiyonudur. Bu, ince, kompakt bir borür tabakası oluşturur. Sonraki ikinci reaksiyon difüzyon kontrollüdür ve belirli bir sıcaklıkta borür tabakası büyümesinin toplam kalınlığı aşağıdaki basit formülle hesaplanabilir [3], [6]:

$$d = k\sqrt{t} \quad (3.1)$$

d, santimetre cinsinden borür tabakası kalınlığı

k, sıcaklığa bağlı olarak sabit

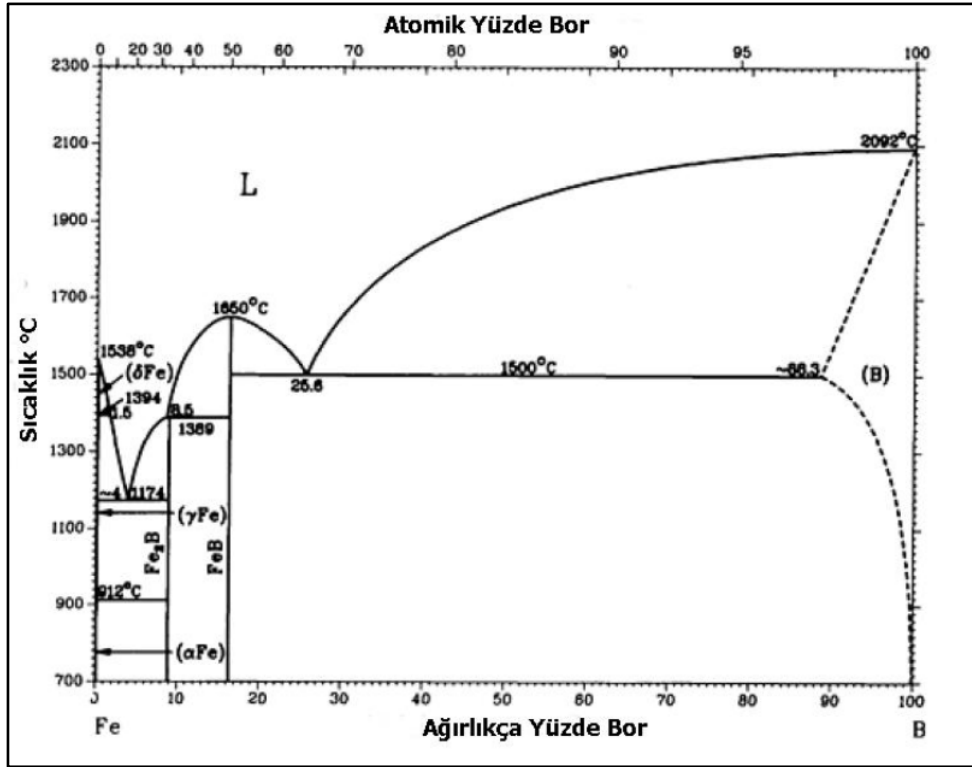
t, belirli bir sıcaklıkta saniye cinsinden zaman

Borun 950°C'de difüzyon hızı, literatüre göre, borür tabakası için $1.82 \times 10^{-8} \text{ cm}^2 / \text{s}$ ve difüzyon bölgesi için $1.53 \times 10^{-7} \text{ cm}^2 / \text{s}$ 'dir. Sonuç olarak, bor içeren difüzyon bölgesi, borür tabakası kalınlığının 7 katından daha fazla alt tabakaya uzanır. Bir konsantrasyon gradyanının difüzyon kontrollü borür büyümesi için itici güç sağladığı yapılan çalışmalar ile öne sürülmüştür [3].

3.4. Fe-B İkili Denge Diyagramı

Bor elementinin demirde çözüldüğü bilinir ve borun atomik boyutu, yer alan ve ara yer katı eriyik oluşumu için gerekli olan değerlere oldukça yakındır. Bazı araştırmacılar borun α -demirinde hem yer alan hem de ara yer katı eriyiği bölgelerini işgal edebileceğini ve aynı zamanda yer alan bor atomlarının karbon gibi diğer ara yer atomları ile etkileşebileceklerini ileri sürmüşlerdir. Düşük sıcaklıklarda demir içerisinde bor çözümlülüğü mukayese edildiğinde 1/50 oranında ara yer atomu olarak, büyük oranda ise yer alan atomu olarak çözüldüğü görülmüştür [9].

Şekil 3.6'da Fe-B faz diyagramı verilmiştir [38].



Şekil 3.6: Fe-B faz Diyagramı.

Fe-B faz diyagramına göre borun ferrit ve ostenit içindeki çözünürlüğü çok küçüktür (900°C 'de $< \%0.008$). Faz diyagramı, reaksiyon sıcaklığında östenite göre, borun ferrit içinde daha yüksek çözünürlüğü bulgularına dayanarak yaklaşık 913°C 'de $\alpha / \gamma / \text{Fe}_2\text{B}$ peritektoid reaksiyonu sergiler [11]. 850°C - 1050°C 'de gerçekleştirilen borlama işlemi sonucu demir yüzeyine bor yayılması gerçekleşir. Bu yayılma işlemi ile tek fazlı Fe_2B veya iki fazlı $\text{Fe}_2\text{B} + \text{FeB}$ den oluşan ferrobör tabakası elde edilir. Tek faz Fe_2B oluşumu, iki faz $\text{Fe}_2\text{B} + \text{FeB}$ nin oluşumundan daha fazla istenir [16]. Borca zengin FeB fazının kırılgenliği yüksek olduğu için FeB fazının oluşumu istenmez [16]. FeB 'nin ısı genleşme katsayısı, Fe_2B nin ısı genleşme katsayısından büyüktür. İki fazlı sistemde oluşan Fe_2B ve FeB fazları arasındaki ısı genleşme farklılıkları nedeni ile yüzeyde çatlaklar oluşur [12]. Ayrıca Fe_2B 'nin yüksek basınç gerilmesi altında yüzey oluştururken, FeB 'nin yüksek çekme gerilmesi altında yüzey oluşturduğu görülmektedir. Bununla birlikte, borlama işlemi, çift fazlı katmanın $\text{FeB} / \text{Fe}_2\text{B}$ arayüzünde çatlak oluşumuna neden olan Fe_2B ve FeB fazlarının çakışmasını önler. Çatlak oluşumu, uygulanan mekanik gerilim veya termal / mekanik şok altında çift fazlı tabakanın dökülmesine ve hatta ayrılmasına neden olur [9]. Borlama işleminden sonra yapılan tavlama işlemi ile FeB fazının oluşumunu azaltabilir.

Borlamanın birinci aşamasında borlayıcı ortam ve ana malzeme yüzeyinde termokimyasal reaksiyon oluşur. Tane sınırları, dislokasyonlar, mikro hatalar ile oluşan yüzey pürüzlülükleri gibi yüzeyin reaktif olduğu yerler, borür tabakası oluşumunun başlangıç noktalarıdır. Bu noktalarda Fe_2B çekirdekleri oluşur ve gelişir [17].

Borlama suresi ile çekirdek oluşumu artar ve ince bir bor tabakası elde edilir. Bor, Fe_2B ve FeB yapısında çeliğin yüzeyine yayılır. Borlama işlemi sırasında, ilk borür çekirdeği numunenin yüzeyinde oluşmaktadır. Oluşan ilk borür çekirdeği ana malzeme (altlık) içinde büyür. Bor atomları kafes yapının $[001]$ doğrultusunda daha hızlı yayıldığı için FeB ve Fe_2B $[001]$ boyunca yönlendirilir [19]. Bu nedenle borür taneleri $[001]$ yönünde yüzeye dik daha hızlı büyür. $[001]$ yönünde büyüme ile kolonsal yapı meydana gelir [19]. İlk önce Fe_2B fazı oluşur ve ortamda bor konsantrasyonu yeterliyse, ikincil olarak FeB fazı da meydana gelir. İlk oluşan Fe_2B fazının büyümesi uzun süre almaktadır. Son aşamada oluşan FeB fazı, Fe_2B fazından daha kısa sürede büyür. Bu nedenle Fe_2B fazı, FeB fazına göre daha güçlü bir yapı sergiler [18].

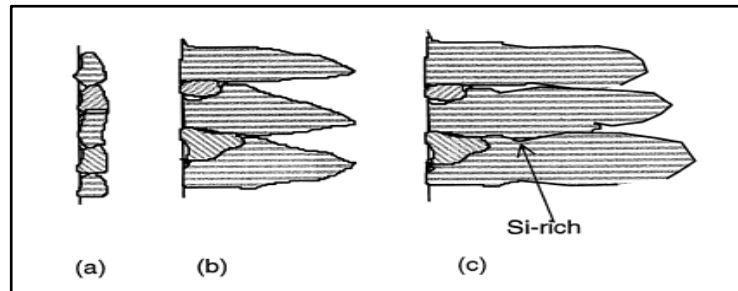
3.5. Demir Borürlerin Büyüme Mekanizması

Borlama prosesinin yapılan çalışmalar neticesinde temelde 2 mekanizması olduğu ortaya atılmıştır [19].

Bu mekanizmaların ilki, bor ortamı ve ana malzeme yüzeyi arasında çekirdeklenme ve büyüme ile gerçekleşir. Çekirdekler, borlama sıcaklığı ve zamanının fonksiyonu olarak oluşur ve bunu borür tabakasının büyümesi izler.

Demir bazlı bir malzemenin borlanması ile, iki fazlı $\text{FeB}+\text{Fe}_2\text{B}$ veya tek fazlı FeB veya Fe_2B demir borür tabakaları meydana gelir. İki fazlı demir borürler, ortamda aşırı bor atomu varsa veya malzeme yüksek alaşımlı bir malzeme ise meydana gelmektedir. FeB fazı ile Fe_2B ve Fe_2B ile matris arayüzeyindeki $[001]$ yönlenmesi kaynaklı olarak kolonsal olduğu bilinmektedir. Ancak, yüksek alaşımlı çeliklerde arayüzey yapısının kolonsal yerine düz bir çizgi halinde olduğu belirtilmektedir [13]. FeB ve Fe_2B fazlarının termal uzama katsayıları farklı olduğundan ortaya çıkan termal gerilmeler nedeniyle çatlamaya neden olabileceği için bu iki fazın aynı anda bulunması istenmez [13].

Çekirdekler, borlama sıcaklığının ve zamanının bir fonksiyonu olarak oluşur ve ince, kompakt bir borür tabakasının büyümesi ile devam eder. Demirli malzemeler söz konusu olduğunda, Fe_2B çekirdekleri önce oluşturulur ve metal yüzeyin kusurlu noktalarında ince bir borür tabakası oluşturur. Aktif bor ortamının fazla olması durumunda, FeB gibi zengin bor ürünü fazı oluşacak ve Fe_2B fazında büyüyecektir [13].



Şekil 3.7: Konvansiyonel borlama sırasında borür tabakasının oluşum mekanizması (a), çekirdeklenme aşaması (b) ve (c) $\langle 001 \rangle$ oryantasyonunda büyüme aşaması.

İkinci mekanizmada ise, bor ortamı ve ana malzeme reaksiyonu difüzyon kontrollüdür. Belirli bir noktada borür tabakasının büyümesinin toplam kalınlığı belirli

bir sıcaklıkta hesaplanabilir. Demir esaslı malzemeler söz konusu olduğunda, bor atomları [001] doğrultusunda yayılma gösteririr. Bu yönde maksimum atom yoğunluğunu elde etmek için Fe_2B 'nin ortagonal kafesini oluşturmayı tercih eder. Difüzyon kanallı büyüme mekanizmasında, Fe_2B 'un kuvvetli bir tercihlî yönelmeye sahip olmasına rağmen, $\text{Fe}_2\text{B}/\text{Fe}$ arayüzeyinde düşük ve ihmal edilebilir bir kolonlaşma göstererek büyümesini veya kristallografik bir tekstürün olmadığı durumda arayüzeydeki kolonlaşmayı açıklamada yetersiz kalmaktadır [13].

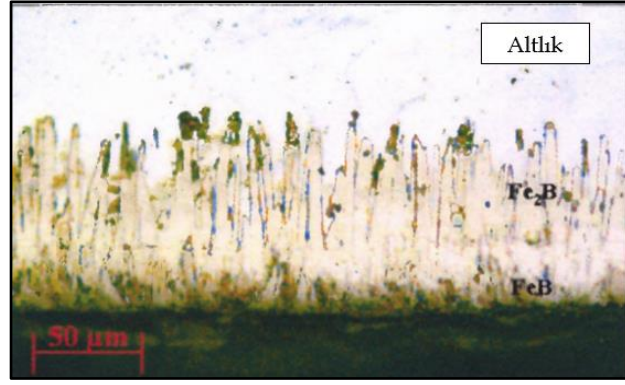
Alüminyum ve silisyum içeren çelikler haricinde, endüstriyel borlama, yapısal çelikler gibi çoğu demir esaslı malzeme üzerinde gerçekleştirilebilir. Yüzeyi sertleştirilmiş, tavllanmış, takım ve paslanmaz çeliklerde, döküm çeliklerinde ve sinterlenmiş demir ve çeliklerde borlama işlemi yapıldığı görülmektedir. Borlama östenitik aralıkta yapıldığından, hava ile sertleşen çelikler aynı anda sertleştirilebilir ve borlanabilir. Borür tabakasının termal şoka duyarlılığı nedeniyle su ile sertleşen kalite çelikleri borlanmamaktadır [6], [11].

Malzeme bileşimi, borlama ortamındaki bor atomlarının aktiviteleri, borlama sıcaklığı ve süresi, ilave ısı işlemler ve seçilen borlama yöntemi borlu tabakaların özelliklerini etkiler.

Ana malzeme ile borür tabaka arayüzeyinde morfolojik incelemeler yapıldığında iki tip yapı gözlenir. Bunlardan ilki sade karbonlu ve az alaşımlı çeliklerde görülen testere dişi (girintili-çıkıntılı arayüzey formu) tipidir. İkincisi ise yüksek karbonlu ve yüksek alaşımlı çeliklerde gözlenen daha düz formdaki arayüzey tipidir [11].

Testere dişi tipi daha girintili çıkıntılı bir yapıya sahip olduğu için altlık olarak tanımladığımız ana malzemeye daha fazla tutunur ve bunun sonucu olarak, mekanik özellikler bu tipler için daha gelişmiş durumdadır [33].

AISI 1018 malzemesi üzerine FeB ve Fe_2B borür tabakalarının testere dişi yapısı Şekil 3.8'de gösterilmiştir [33].



Şekil 3.8: Borlanan AISI 1018 malzemesi yüzeyinde oluşan borür tabakanın (FeB dış tabaka ve Fe₂B iç tabaka) testere dişi yapısı.

Demir borür tabaka yapıları incelendiğinde, iki fazlı demir borür tabakalarına karşı tek Fe₂B fazına sahip testere dişi görünümündeki tabakalar, endüstriyel uygulamalarda daha düşük kırılma dayanıklılık gösterdiğinden tercih edilir [12].

3.6. Demir Esaslı Malzemelerin Borlanması

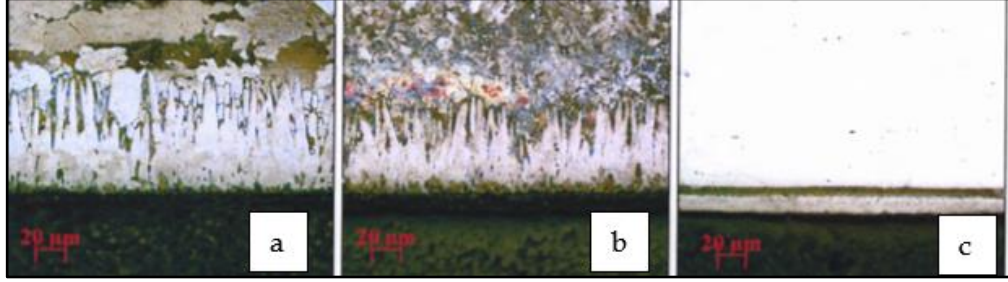
Borlama östenitik aralıkta yapıldığından, hava ile sertleşen çelikler aynı anda sertleştirilebilir ve borlanabilir. Borür tabakasının termal şoka duyarlılığı nedeniyle su ile sertleşen kaliteler borlanmamaktadır [6]. Benzer şekilde, kükürtten arındırılmış ve kurşunlu çelikler, mahfaza dökülmesine ve çatlamasına eğilim gösterdikleri için kullanılmamalıdır. Nitrürlenmiş çelikler, çatlamaya duyarlılıklarından dolayı kullanılmamalıdır.

Karbon bakımından zengin yüzeyden altlığa, bileşimin kademeli olarak azaldığı demir esaslı malzemeler üzerindeki karbürleme işleminden farklı olarak, demir içeren malzemelerin borlanması, belirli bileşimlere sahip tek fazlı veya çift fazlı bir borür tabakasının oluşumuyla sonuçlanır.

3.7. Alaşım Elementlerinin Borlamaya Etkisi

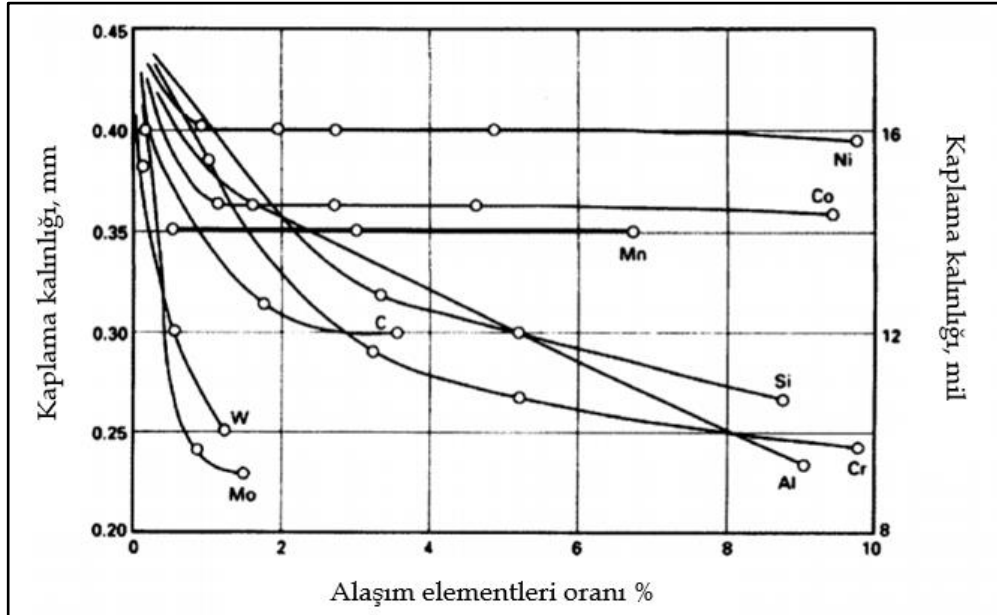
Borür tabakasının belirgin testere dişi yapısı saf demir, alaşımsız düşük karbonlu çelik ve düşük alaşımlı çeliklerde iyi gözlenir. Ana malzemede (altıkta) alaşım elementleri veya karbon içerikleri arttığında, borür tabakasının kalınlığı azalır ve testere dişi yapısı yerine pürüzsüz arayüz gözlemlenebilir [11]. Ana malzemeye bor

difüzyonunu geciktiren alaşım elementlerinin (nikel, kobalt ve manganez hariç) bir başka etkisi de FeB oluşum oranını arttırmasıdır [11]. Örneğin, borlanmış paslanmaz çelikte, alaşım elementlerinin sonucu, borür tabakasında neredeyse %100 FeB oluşumu ile ince ve pürüzsüz bir arayüze meydana getirir [10].



Şekil 3.9: Çelik bileşiminin borür tabakasının morfolojisi ve kalınlığına etkisi; a, 1018 Çeliği (0,20% C); b, 4340 Çeliği (0,40% C - 1.67% Cr - 0.84% Ni); c, 304 Çeliği (%18 Cr).

Çelikteki alaşım elementlerinin borür tabaka kalınlığına etkisi Şekil 3.10'da verilmiştir [11].



Şekil 3.10: Çelikteki alaşım elementlerinin borür tabakası kalınlığına etkisi.

Karbon, silisyum ve alüminyum, borür tabakasında çözünmez. Borlama sırasında, borür tabakası karbon ve silisyumu yüzeyden ana malzeme (altlık) matrisine itecek ve borür testere dişi yapısının altında veya arasında demir silikoborür ve demir

karboborürün çökmesini oluşturacaktır. Borür tabakasının altındaki silikon ve alüminyum içerikleri (%0,8'den fazla), düşük bir yük taşıma kapasitesine sahip olan yumuşak bir ferrit fazı oluşturabilir. [11]. Saf demir içerisine ağırlıkça %1, %2, %4 ve %8 Si ilavesi ile oluşturulan Fe-Si ikili alaşımları 900°C, 1000°C ve 1100°C'de, 3 saat kutu borlama işlemine tabii tutulmuştur. Her üç sıcaklık içinde yapılan borlama işlemi sonucunda, Si miktarının artması ile birlikte kaplama kalınlığının düştüğü görülmüştür. Fe-Si alaşımları için aynı çalışmada sertlik değeri 118-616 HV olarak ölçülmüştür ancak mikrosertlik değerleri ile borlama sıcaklığı, silisyum içeriği ve borür tabakası kalınlığı arasında belirgin bir ilişki görülmemiştir. Fe-Si alaşımlarının altlık mikrosertliğinde artan silisyum oranı ile arttığı görülmüş olmasına rağmen, sıcaklık ve borür tabakası ile doğrudan bir ilişki bulunamamıştır [49].

Nikel, bor atomlarının demirdeki çözünürlüğünü, borür tabakasına difüze ederek Ni_3B ve Fe_2B fazlarını ana malzeme arayüzünde, borür tabakasından çökeltirerek sınırlayacaktır. Bu sınırlamanın sonucunda, borür tabakası kalınlığı ve testere dişi yapısında azalma görülür. Nikel, borür tabakasının mikro sertlik değerini az miktarda düşürebilmesine rağmen, FeB oluşumunu engellemeye yardımcı olur [34].

Krom, borür tabakasının yapısı ve özellikleri için bir modifiye edicidir. Fe_2B fazındaki krom çözünürlüğü, demirin krom ile yer değiştirmesine neden olur ve yüzeyde $(Fe,Cr)B$ ve $(Fe,Cr)_2B$ oluşturur [6]. Krom ilavesi borür tabakasının mikro sertliğini artırabilir ancak borun tane sınırları boyunca dağılmasına neden olur. Difüzyon, borür tabakası kalınlığının azalmasına ve pürüzsüz borür tabakasının artmasına neden olur. Krom aynı zamanda FeB gibi zengin bor ürünü fazlarının borür tabakasına oluşumunu da teşvik eder [34]. 950°C'de 4 saat olarak yapılan çalışmada, kromun borlama üzerindeki etkisini incelemek için ağırlıkça %4 Cr, %12 Cr ve %36 Cr krom içeren Fe-Cr alaşımları borlama işlemine tabii tutulmuştur. %4 Cr içeren ikili alaşımda, borür tabaka kalınlığı 65 μm - 95 μm olarak ölçülmüş olup, %12 Cr içeren ikili alaşımda borür tabaka kalınlığı 65 μm , %26 Cr içeren ikili alaşımda, 5 μm olarak ölçülmüştür. Artan krom içeriği ile tabaka kalınlığında azalma ve testere dişi yapısında düzleşme görülmüştür. %4 Cr ve %12 Cr çeliklerinin yüzeyinde yapılan XRD analizine göre, yönlendirilmiş FeB ve Fe_2B bulunurken, matrisi doğru gidildikçe yönlendirilmiş Fe_2B fazı görülmüştür. %26 Cr ikili alaşımında, borür tabakasının tamamen CrB'den oluştuğu tespit edilmiştir. Ayrıca artan Cr miktarı ile birlikte mikrosertlik değerlerinin de arttığı görülmüştür [50].

Manganez, tungsten, molibden ve vanadyum, borür kalınlığını azaltmak ve testere dişi morfolojisini pürüzsüz hale getirmek için kullanılan tipik alaşım elementleridir [11]. Yapılan çalışmalarda, saf demire farklı miktarlarda manganez eklendiğinde, borlama sonucu oluşan ortalama borür tabaka kalınlığı üzerinde bir etkisi olmadığı rapor edilmiştir [51]. Ayrıca ağırlıkça %16 Mn içeren Fe-Mn alaşımının yüzeyinde oluşan borür tabakada MnB_2 fazının oluştuğu görülmüştür [51].

Molibden'in borlama üzerindeki etkilerini incelemek için yapılan çalışmalarda, saf demire ilave edilen Mo miktarının artması ile borür tabakakalınlığında bir azalma olduğu raporlanmıştır [52]. Ayrıca borür tabakasında ve geçiş bölgesinde Mo_2FeB_2 çökeltileri tespit edilmiş olup, Mo_2FeB_2 çökeltilerinin mikrosertlik değerleri yaklaşık olarak 2600 HV tespit edilmiştir. Ağırlıkça %2 ve daha fazla Mo içeriğine sahip, borlanmış alaşımlar için Mo_2FeB_2 fazının görülmesinin olası olduğuna değinilmiştir. Yapılan çalışmalarda Mo_2FeB_2 fazının FeB ve Fe_2B fazından önce oluştuğu görülmüştür [52].

Saf demirin borlama davranışına titanyumun etkisi üzerine yapılan çalışmada, farklı miktarlarda titanyum içeren Fe-Ti alaşımları 1100°C'de 3 saat süre ile borlama işlemine tabi tutulmuştur. Ti ilavesinin artışı ile borür tabakasının dikkate değer bir şekilde azaldığı rapor edilmiştir. Saf demirin borlanması ile oluşan borür tabaka kalınlığı 320 μm olarak ölçülürken, ağırlıkça %10 Ti içeren Fe-Ti alaşımının borlama sonrası ortalama kaplama kalınlığı 68 μm olarak ölçülmüş. Saf demir üzerinde oluşan borür tabakalarının ortalama mikrosertlik değerleri ~1774 HV iken Fe-Ti alaşımlarında ~2220 HV'ye yükseldiği görülmüştür. Ayrıca aynı çalışmada altlıkta artan Ti miktarı ile borür tabakasının düzleştiği görülmüştür. Borlanmış Fe-Ti alaşım yüzeyinde FeB ve TiB_2 çökeltileri içeren Fe_2B borür tabakası, ile TiB_2 çökeltileri içeren bir geçiş bölgesi oluştuğu görülmüştür. TiB_2 çökeltilerinin farklı geometrik şekillerde oluştuğu ve altlıktaki Ti elementinin artmasıyla TiB_2 'nin hacminin ve boyutunun arttığı görülmüştür. [53].

Vanadyum'un borlama üzerindeki etkilerini inceleyebilmek için farklı miktarlarda vanadyum içeren ikili Fe-V alaşımları hazırlanmış kutu borlama yöntemi borlanmıştır. Vanadyum ilavesinin borür tabaka kalınlığını azaltırken bağlı FeB kalınlığını arttırdığı görülmüştür. Altlık malzemeye V ilavesinin artmasıyla daha pürüzsüz bir arayüzey elde edilmiştir. Söz konusu çalışmada borlama sonrası Fe-V ikili alaşımları yüzeyinde borür tabakası ($FeB+Fe_2B+V_5B_6$), ve Fe(V) katı çözültisi ve V_5B_6 çökeltilerinden oluşan geçiş bölgesi oluştuğu belirtilmiştir [54]. Fe-V ikili

alaşımlarında, V miktarının artması ile çökeltilerin hacminin ve boyutunun arttığı görülmüştür. V_5B_6 çökeltilerin mikrosertliği ~3000 HV olarak ölçülürken, ana borür katmanlarının mikrosertliği saf demir için 1761 HV ve Fe-V ikili alaşımları için 1724 ile 2445 HV arasında ölçülmüştür [54].

Bu tezde yapılan deneysel çalışmalarda, daha önce nitrürleme yüzey işlemine tabi tutulan, DIN 1. 2312, DIN 1.2842, DIN 1.2738 ve DIN 1.2343 çelik numuneleri 850°C, 950°C ve 1050°C sıcaklıklarında, sabit süre (3 saat) olarak borlama işlemine tabi tutulmuştur. Belirlenmiş koşullar altında gerçekleştirilmiş borlama işlemi sonuçları için daha önce gerçekleştirilen yukarıda belirtilen kısmen benzer çalışma haricinde başka çalışmaya rastlanmamıştır. Bu tez çalışmasında plastik enjeksiyon proseslerinde en sık tercihen edilen dört çelik ile borlama işlemi gerçekleştirilerek, kalıp ömürlerinin uzatılmasına ve kalıplardan beklenen özelliklerin elde edilmesine katkı sağlamak amaçlanmıştır.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. GİRİŞ

Bu çalışmada, sanayide hali hazırda plastik enjeksiyon takım çeliği olarak kullanılan, DIN 1.2312, DIN 1.2842, DIN 1.2738, DIN 1.2343 alaşımlı çeliklerinin ön karakterizasyon yapıldıktan sonra, her biri üç farklı sıcaklıkta (850°C, 950°C ve 1050°C) 3 saat süreyle ticari Ekabor 2 borlama tozu kullanılarak kutu borlama işlemine tabi tutulmuştur. Farklı sıcaklık ve birbirinden farklı alaşım bileşimlerine sahip olan dört numune kullanılarak elde edilen kaplamalar çeşitli yöntemler ile karakterize edilerek alaşım elementlerinin ve sıcaklığın etkisi ortaya çıkartılmıştır.

Yapılan deneysel çalışmanın akış diyagramı Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1: Deneysel çalışmaların akış diyagramı.

4.2. Altlık Malzemeler ve Hazırlanması

Deneyisel çalışmalarda kullanılan altlık malzemeler, ticari olarak üretilen ve plastik (enjeksiyon) takım çeliği olarak da sanayide kullanılan DIN 1.2312, DIN 1.2842, DIN 1.2738, DIN 1.2343 çelikleridir. Deneyisel çalışmalarda çelik malzemelerden 1 mm x 1 mm x 2 mm boyutlarında plaka şeklinde numuneler Discotoms marka kaba kesici ile kesilerek altlık olarak hazırlanmıştır. Her bir takım çeliği için 12 numune hazırlanmıştır.

Seçilen çeliklerin, alaşım elementleri oranı farklı olup sabit süre ve değişken sıcaklığa bağlı olarak bu çeliklerin borlanması ile morfolojik ve mekanik etkilerin incelenmesine kimyasal bileşimin etkisi irdelenecektir. Kullanılan takım çeliklerinin kimyasal bileşimleri ICP analizi ile EN ISO 4957 standartlarına uygun olarak belirlenmiştir. Deneylerde kullanılan çeliklerin bileşimleri Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1: Deneyisel çalışmalarda kullanılan altlık çeliklerin kimyasal bileşimi.

Alaşım	Elementler (% Ağı.)								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Ni
DIN 1.2312	0,360	0,360	1.440	0,007	0,090	1.890	0,200	-	-
DIN 1.2842	0,940	0,200	1.930	0,020	0,003	0,270	-	0,080	-
DIN 1.2738	0,420	0,320	1.400	0,200	0,001	1.900	0,190	-	0,960
DIN 1.2343	0,380	0,950	0,430	0,018	-	5.110	1.120	0,359	-

Plakalardan kesilerek hazırlanan, çelik altlık numunelerin yüzeyleri, sırası ile su altında 320-400-600-800-1000-1200 numara SiC zımpara kağıtları ile zımpara işlemine tabi tutulmuştur. İstenilen yüzey kalitesine ulaşmak için 1-3 µm aralığındaki alümina parçacıklarını içeren süspansiyon kullanılarak tüm numuneler parlatılmıştır. Nihai yüzey elde edildikten sonra parlatılmış numuneler, 5 dk süreyle alkol içeren ultrasonik banyoda bekletilerek numune yüzeylerindeki muhtemel kir ve kalıntılar temizlenmiştir. Ultrasonik banyodan çıkarılan numuneler saf alkol ile yıkanıp, ılık hava ile kurutularak borlama işlemi için hazır hale getirilmiştir.

4.3. Borlama İşlemi

Borlama işlemi 1200°C'ye çıkabilen dijital kontrollü Protherm marka kutu fırında alümina pota içerisinde Ekabor 2 tozu kullanarak yapılmıştır. Öncelikle Borlama tozlarının içerisinde muhtemel nemin giderilmesi için Vakumlu MMM-Group markalı etüvde 100°C'de 4 saat süreyle bekletilmiştir.

Hazırlanan altlık malzemeler Ekabor 2 tozu içeren alümina pota içerisine gömülüp, oksitlenmesini engellemek için en üstü deoksidan ekrit tozu ile kaplandıktan sonra potanın kapağı sıkıca kapatılmıştır. Böylelikle üç farklı sıcaklıkta borlama işlemine tabi tutulmak üzere, dört farklı altlık numunenin aynı potadaki borlama tozuna gömülü olduğu üç pota hazırlanmıştır.

Borlanacak numunelerin gömülü olduğu, pota, elektrik dirençli kutu fırına yerleştirilmiştir. Fırının sıcaklık rejim değişkenliğini belirlemek için ısı çifti (Thermocouple) telleri dijital multimetreye bağlanarak sıcaklık ölçülmüştür. Fırının $\pm 5^{\circ}\text{C}$ sıcaklık hassaslığında olduğu tespit edilmiştir. Öncelikle Fırın 20°C/dk ısıtma hızı ile ısıtılıp, birinci potadaki numuneler 850°C'de 3 saat süreyle borlama işlemine tabi tutulmuştur. Fırın benzer şekilde ısıtılıp, ikinci potadaki numuneler 950°C'de ve üçüncü potadaki numuneler 1050°C'de 3 saat süre ile borlama işlemine tabi tutulmuştur. Borlama işlemi bittikten sonra fırının elektriği kesilip, borlanmış numunelerin soğutma işlemi fırın içerisinde gerçekleştirilmiştir.

Soğutma işleminden sonra numuneler potadan çıkarılıp yüzeylerindeki tozlar mekanik olarak temizlendikten sonra ultrasonik banyoda alkol içerisinde 5 dk bekletilerek numunelerin yüzeylerindeki muhtemel kalıntılar giderilmiştir.

Böylelikle üç farklı sıcaklıkta (850°C, 950°C ve 1050°C) ve aynı sürede (3 saat) kutu borlama işlemine tabi tutulmuş DIN 1.2312, DIN 1.2842, DIN 1.2738, DIN 1.2343 numuneleri elde edilmiştir.

4.4. Yüzey X-ışını Kırınımı Analizi

Numunelerin yüzeylerinde borlama işlemi sonucu oluşan fazları tayin etmek için XRD analizi Brukers D8 (40 kW, 40 mA) marka cihaz yardımı ile Cu-K α radyasyon altında 20° ile 100° arasında, 1°/dk ile taranarak yapılmıştır. Elde edilen XRD

desenleri analiz edilerek oluşan pikler veri tabanı ile eşleştirilerek borlanmış numunelerin yüzeyinde oluşan fazlar belirlenmiştir.

4.5. Numunelerin Kesit Karakterizasyonuna Hazırlanması

Borlama sonrası borlama işlemine tabi tutulan numunelerin mikroyapısını kesitten incelemek için 1 mm x 1 mm x 2 mm boyutlarında hazırlanan numuneler, Struers marka hassas kesici kullanılarak ortadan ikiye kesildi. Kesim sonrası oluşan çapaklar temizlendi. Borlanmış numunelerin kesitlerini açığa çıkaracak şekilde numunelerin kesilen tarafı en alta gelecek şekilde polimer malzemeden hazırlanmış kalıba koyularak üzerine reçine ve sertleştirici eklenen numuneler soğuk kalıplama tekniği ile kalıba alındı. Kalıba alınmış numuneler kütleme bittikten sonra Struers LapaPol-5 marka cihaz kullanılarak sırasıyla, 320-400-600-800-1000-1200 numaralı SiC kağıtları kullanılarak sulu zımparalarla aşındırıldı. Daha sonra 1 µm alümina toz içeren süspansiyon kullanılarak numuneler parlatıldı. Parlatılmış numuneler, alkol içerisinde 5 dakika süreyle ultrasonik banyoda temizlendi. Daha sonra temiz alkol ile yıkayıp, ılık hava ile kurutularak mikroyapı karakterizasyonu için hazır hale getirildi.

4.6. Kesitten Mesafeye Bağlı Mikrosertlik Ölçümü

Kesitten mikroyapı karakterizasyonu için hazırlanan numunelerin kaplama dış yüzeyi sıfır noktası sayılarak altlığa doğru kesit boyunca Shimadzu marka sertlik cihazı ile mesafeye bağlı Vickers sertlik izleri oluşturuldu. Mikrosertlik izlerinin hem borür tabakasında, hem (varsa) geçiş bölgesinde hem de altlık bölgesinde oluşturulmasına dikkat edildi. Mikrosertlik izleri 30 gram yük 10 saniye boyunca uygulanarak oluşturuldu. Oluşturulan Vickers mikrosertlik izlerinin köşegen boyutları ve bu izlerin kaplama dış yüzeyine olan mesafeleri SEM altında ölçüldü. Mikrosertlik değerlerini elde edebilmek için, borlanan her bir numunenin kesiti boyunca en az 10 Vickers izi oluşturulmuş olup, elde edilen değerlerin aritmetik ortalamaları alınarak mikrosertlik değerleri hesaplandı. Vickers mikrosertlik ölçme yöntemi tabanı kare olan elmas piramit batıcı uç kullanılarak, malzemeye göre seçilen yük altında belirli bir süre bastırılması ile oluşan izin köşegen uzunluklarının ölçülerek hesaplanmasına dayanmaktadır [40].

Vickers mikrosertlik değerinini tespiti için Vickers Sertlik Denklem (VSD), Eşitlik 4.1 kullanıldı.

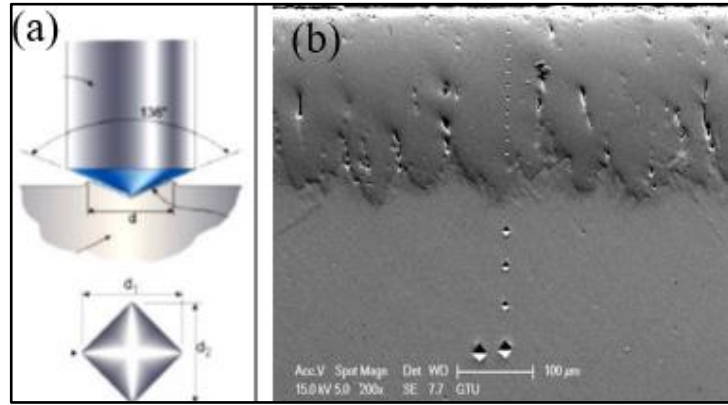
$$VSD = \frac{2P \sin(\alpha/2)}{d^2} = \frac{1.8544P}{d^2} \quad (4.1)$$

Eşitlikte (bkz. Şekil 4.2);

P: Uygulanan yük (kgf)

a: Tepe açısı(136°)

d: Taban köşegen uzunluğu $[(d_1 + d_2)/2]$



Şekil 4.2: Vickers ucu ile oluşturulan izin a) Şematik gösterimi ve b) Borlanan bir numune kesitindeki tipik SEM görüntüsü.

4.7. Kesitten Mikroyapı İncelenmesi

Borlanan ve metalografik olarak hazırlanan numunelerin kesitten mikroyapı incelemesi, öncelikle ZEISS marka optik mikroskop (OM) ile yapılmıştır. Daha sonra detaylı mikroyapı incelemesi için Philips XL30 marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak yapılmıştır. SEM, borlanan numunelerin kesitten mikroyapısını incelemenin yanında, kaplama kalınlığını belirlemek ve oluşturulan mikrosertlik izlerinin boyutlarını ölçmek amacıyla kullanılmıştır.

Kaplama kalınlıkları, SEM ile on farklı bölgeden ölçülen kaplama kalınlıklarının aritmetik ortalaması alınarak tespit edilmiştir.

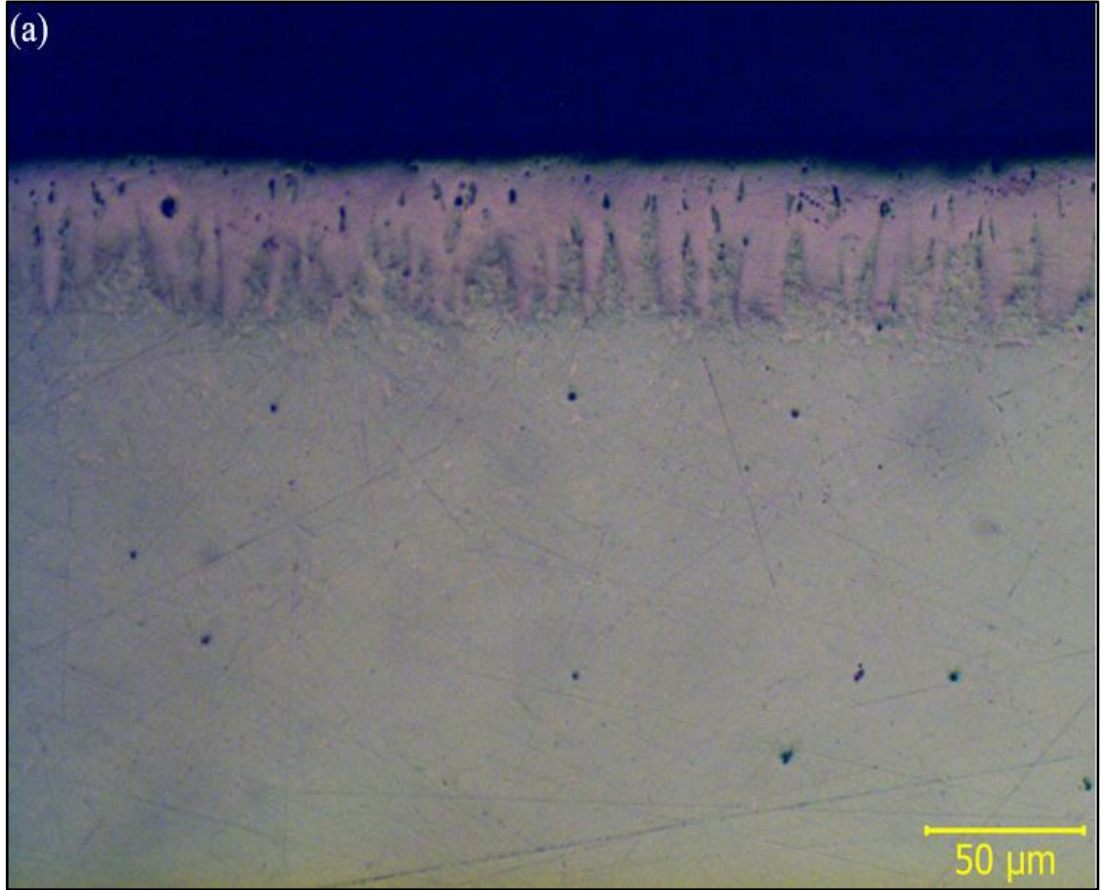
4.8. SEM-EDS Analizi

Borlama işlemine tabi tutulmuş numunelerin yüzeyinde oluşan kaplamanın elemental analizi, Philips XL 30 SEM'e bağlı enerji dağılım spektroskopisi dedektörü (EDS) kullanılarak numune kesitinden hem borür tabakası hem de kaplama matris ara yüzeyinde noktasal ve çizgisel olarak yapıldı.

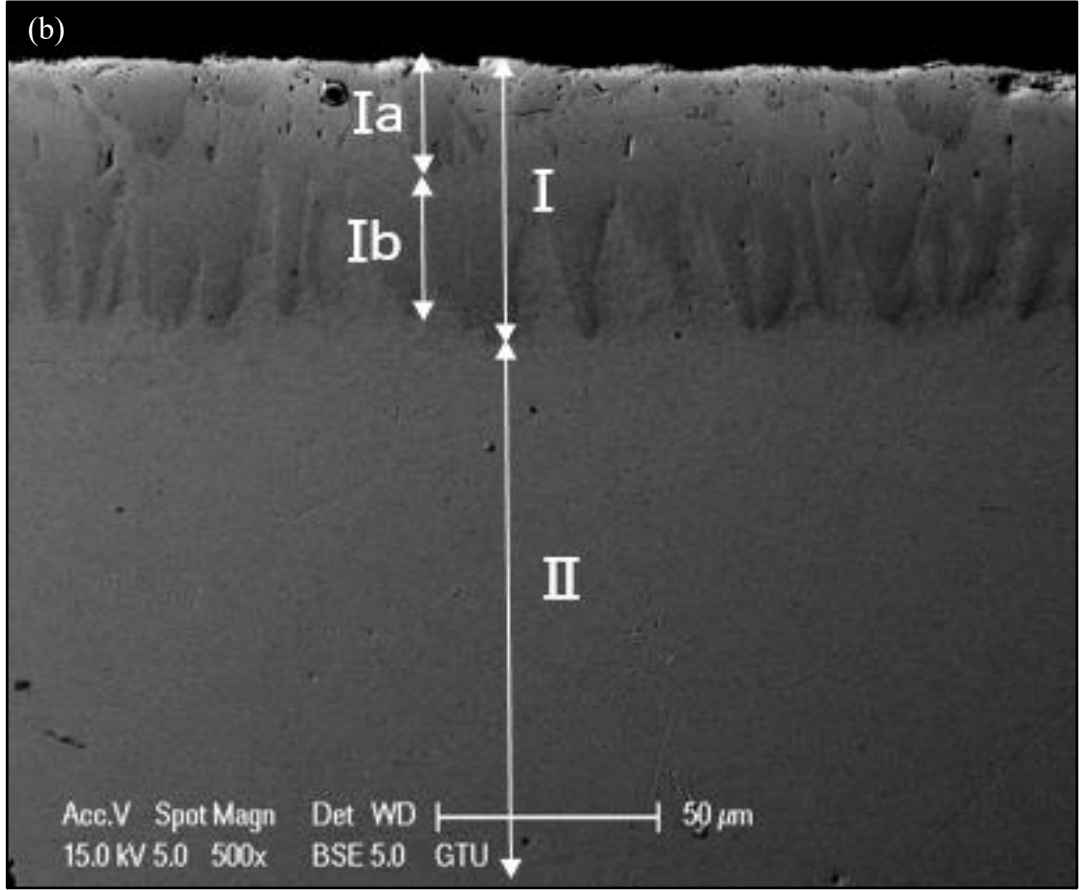
5. SONUÇLAR

5.1. Mikroyapı İnceleme Sonuçları (OM & SEM)

5.1.1. DIN 1.2312 Çeliği



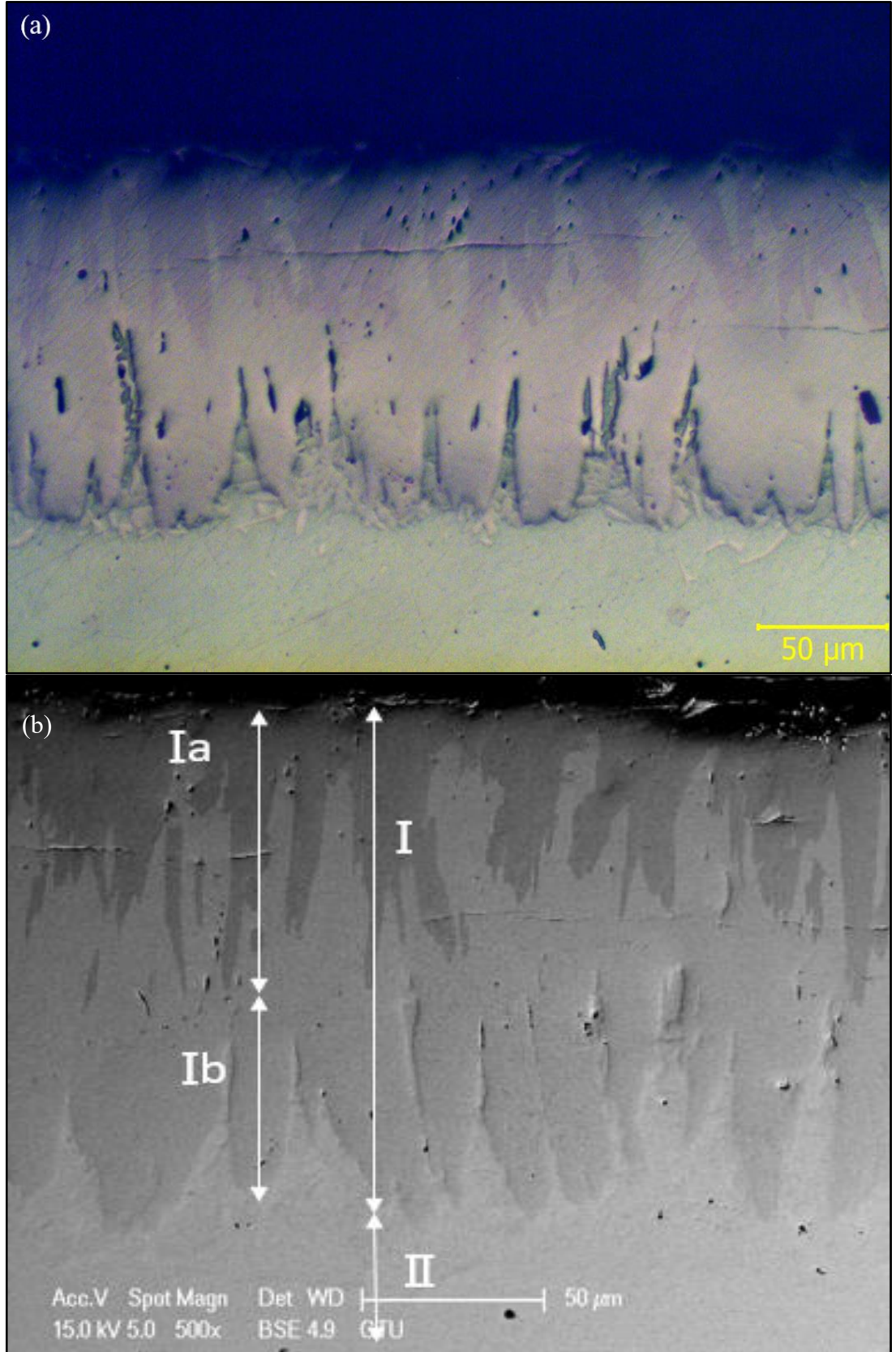
Şekil 5.1: 850°C’de borlanmış DIN 1.2312 çeliğinin kesitten alınan mikroyapı görüntüleri; a) OM, b) SEM.



Şekil 5.1: Devam.

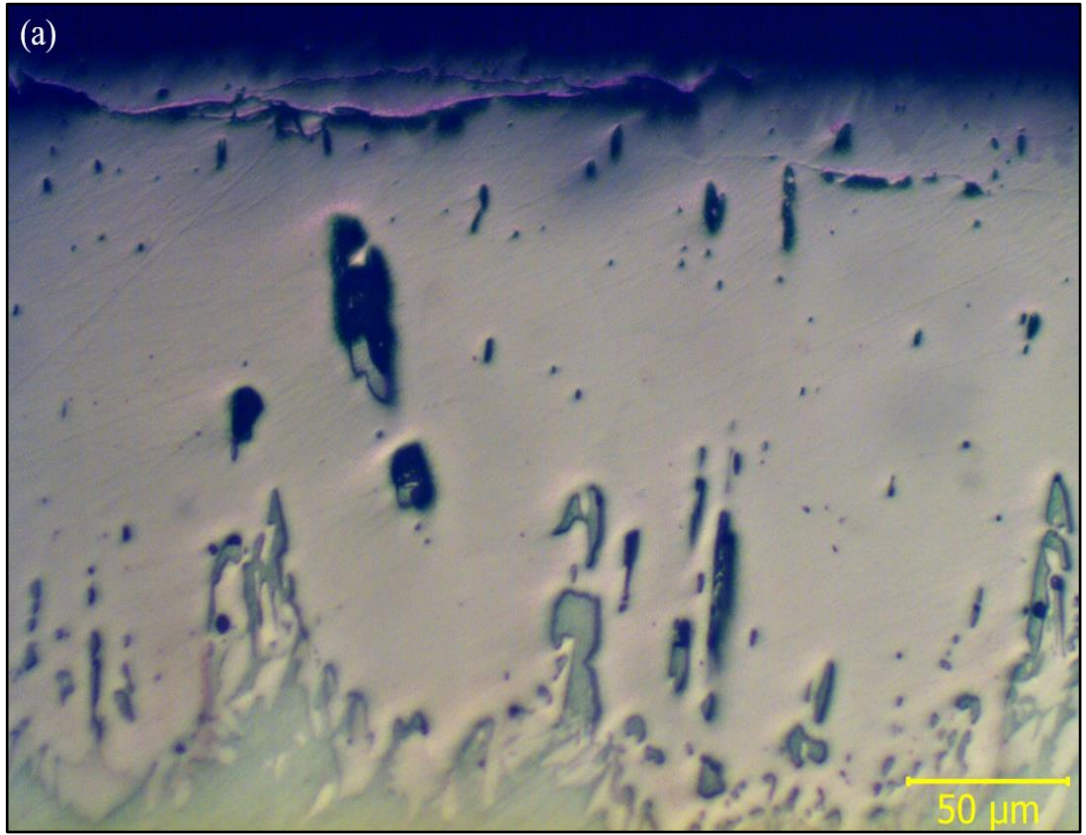
Şekil 5.1’de 850°C’de 3 saat süre ile borlanmış DIN 1.2312 numunesinin kesitten alınan OM ve SEM görüntüleri verilmiştir. Bu görüntülerde borür tabakası (I) ve altlık (II) açık bir şekilde görülmektedir. Çok net olmasa da kontrast farkından dolayı borür tabakasının iki farklı bölge olduğu anlaşılmaktadır. İlgili literatür göz önünde bulundurulduğunda borür tabakadaki koyu bölgenin (Ia) FeB fazına, daha açık olan bölgenin (Ib) Fe₂B fazına ait olduğu anlaşılmaktadır [43].

OM görüntüleri, SEM görüntülerini destekler nitelikte olup, borür tabakada (yoğunlukta) ve altlık bölgede gözeneklere rastlanmaktadır. Borür tabakasının morfolojisinin, girintili-çukurlu testere dişi şeklinde olduğu görülmüştür.

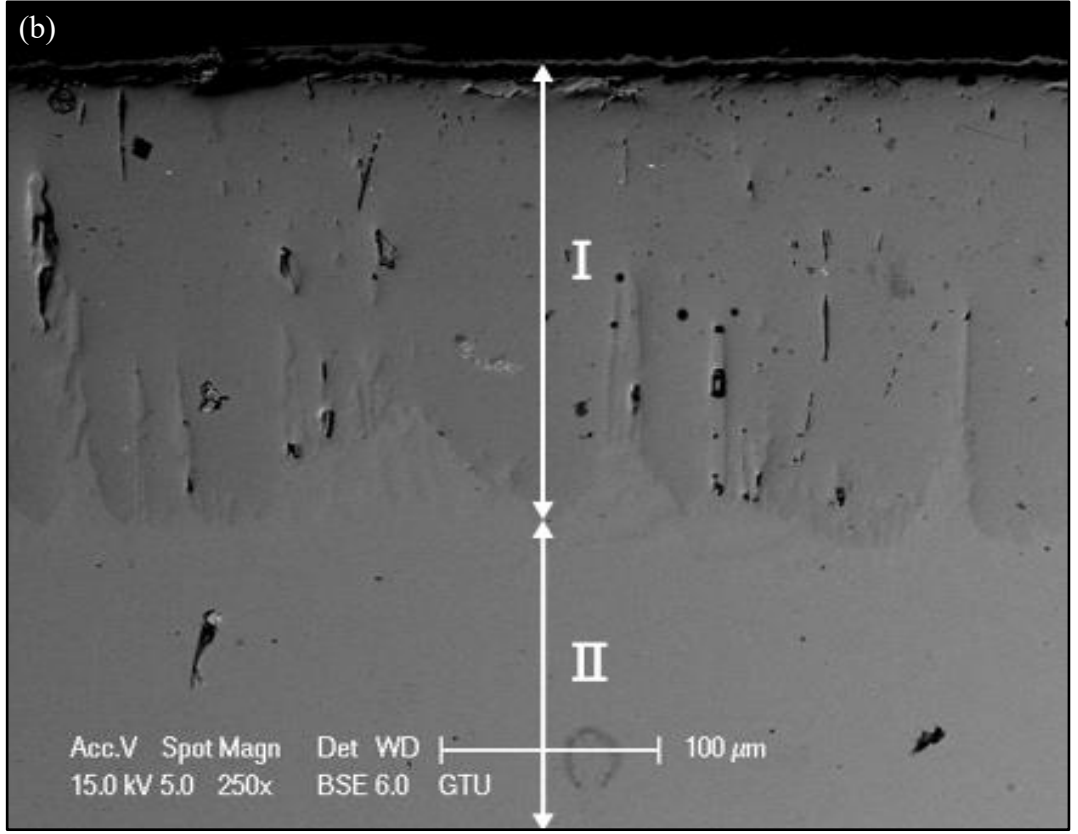


Şekil 5.2: 950'de borlanmış DIN 1.2312 çeliğinin kesitten alınan mikroyapı görüntüleri; a) OM, b) SEM.

Şekil 5.2’de, 950°C’de 3 saat süre ile borlanmış DIN 1.2312 numunesinin kesitten alınan OM ve SEM görüntüleri verilmiştir. Elde edilen bu görüntülerde kontrast değişikliğine istinaden iki farklı bölge görülmektedir. Bunlar borür tabakası (I), ve altlık malzeme (II) bölgesidir. Borür tabakada net olarak ayırt edilebilen renk kontrastına istinaden, ilgili literatür göz önünde bulundurduğunda daha belirgin olan koyu bölgenin (Ia) FeB fazına, daha açık olan bölgenin (Ib) Fe₂B fazına ait olduğu görülmektedir [43]. Demir esaslı malzemelerde borür tabaka için tipik testere dişi yapısı oldukça belirgin şekilde görülmektedir [11].



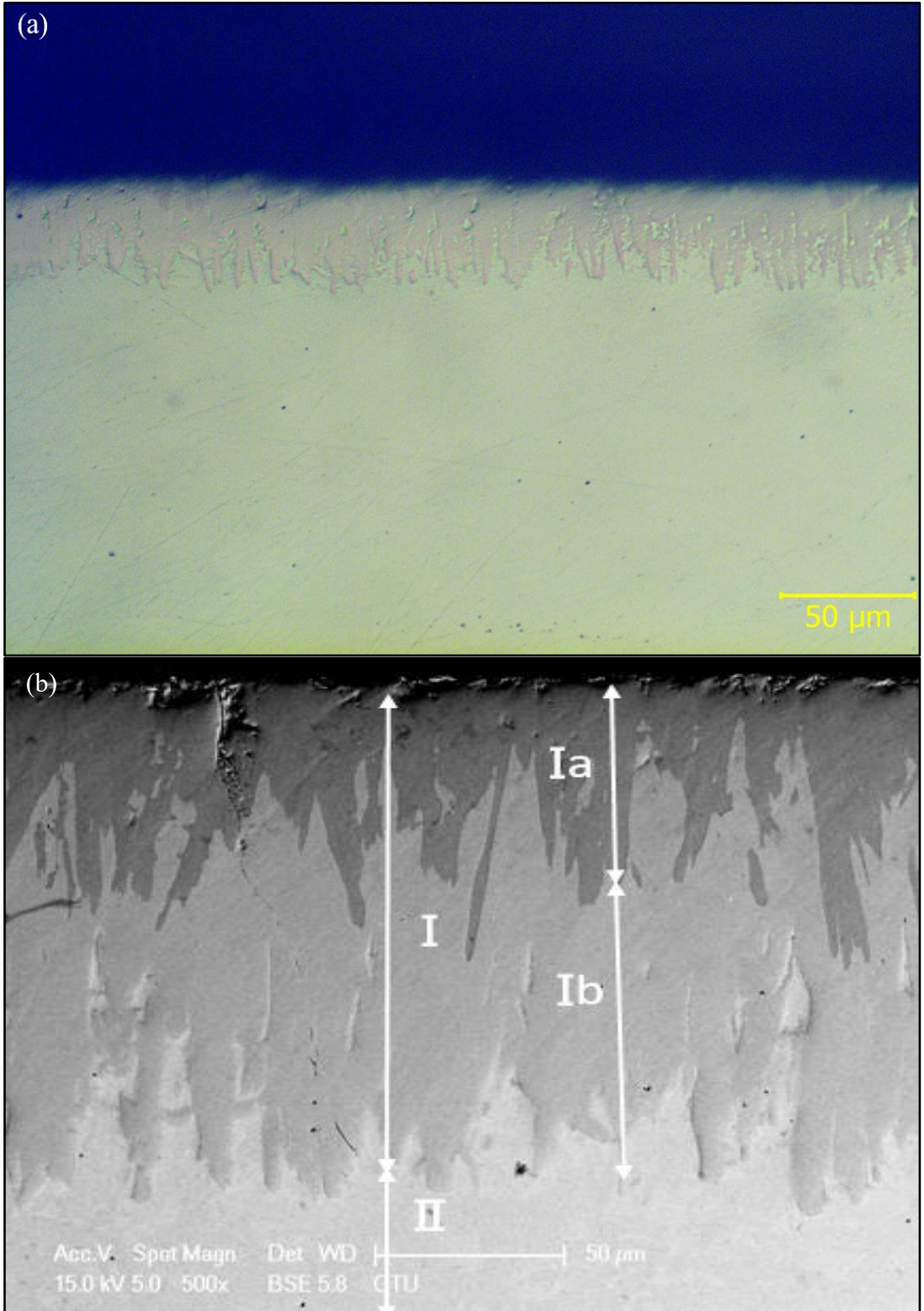
Şekil 5.3: 1050°C’de borlanmış DIN 1.2312 çeliğinin kesitten alınan mikroyapı görüntüleri; a) OM, b) SEM.



Şekil 5.3: Devam.

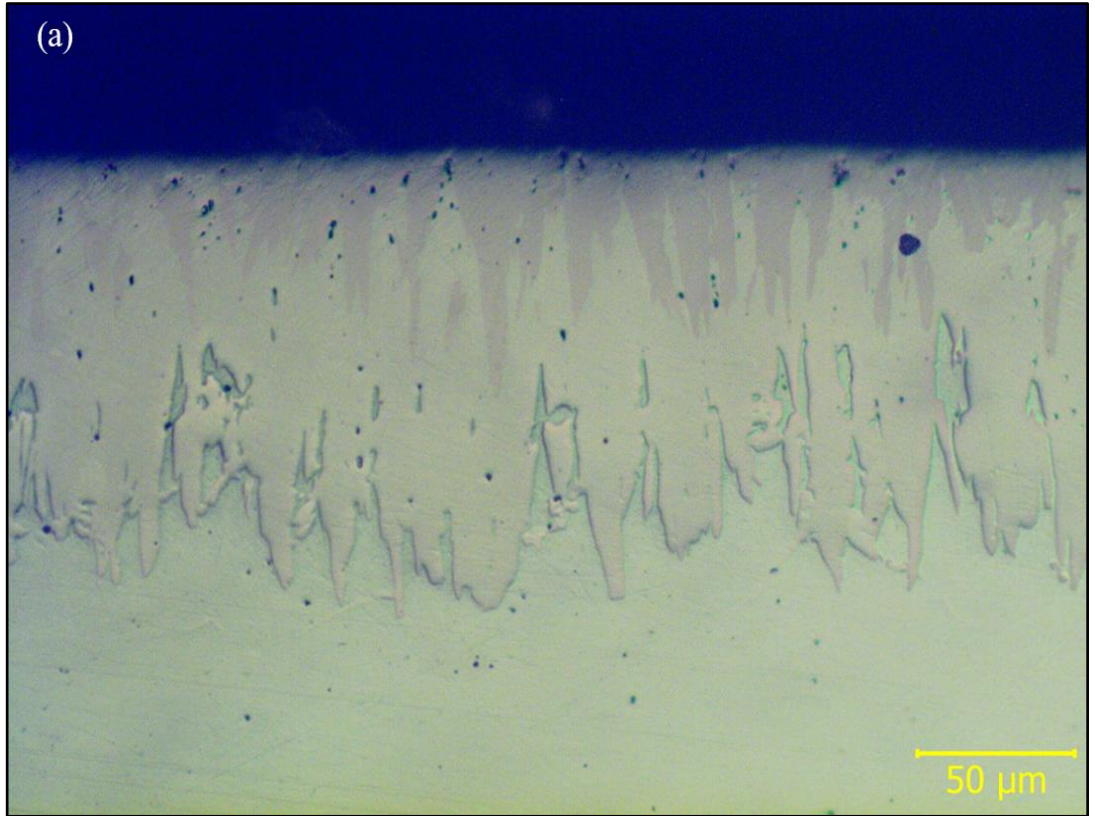
Şekil 5.3’de 1050°C’de 3 saat süre ile borlanmış DIN 1.2312 numunesinin kesitten alınan OM ve SEM görüntüleri verilmiştir. Bu görüntülerde borür bölge (I) ve altlık malzeme (II) bölgesi olmak üzere iki bölge vardır. Borür tabakada gözeneklerin olduğu anlaşılmaktadır. Diğer numunelerin borür tabakasında görülen kontrast, bu numunenin borür tabakasında farkedilmemektedir.

5.1.2. DIN 1.2842 Çeliği

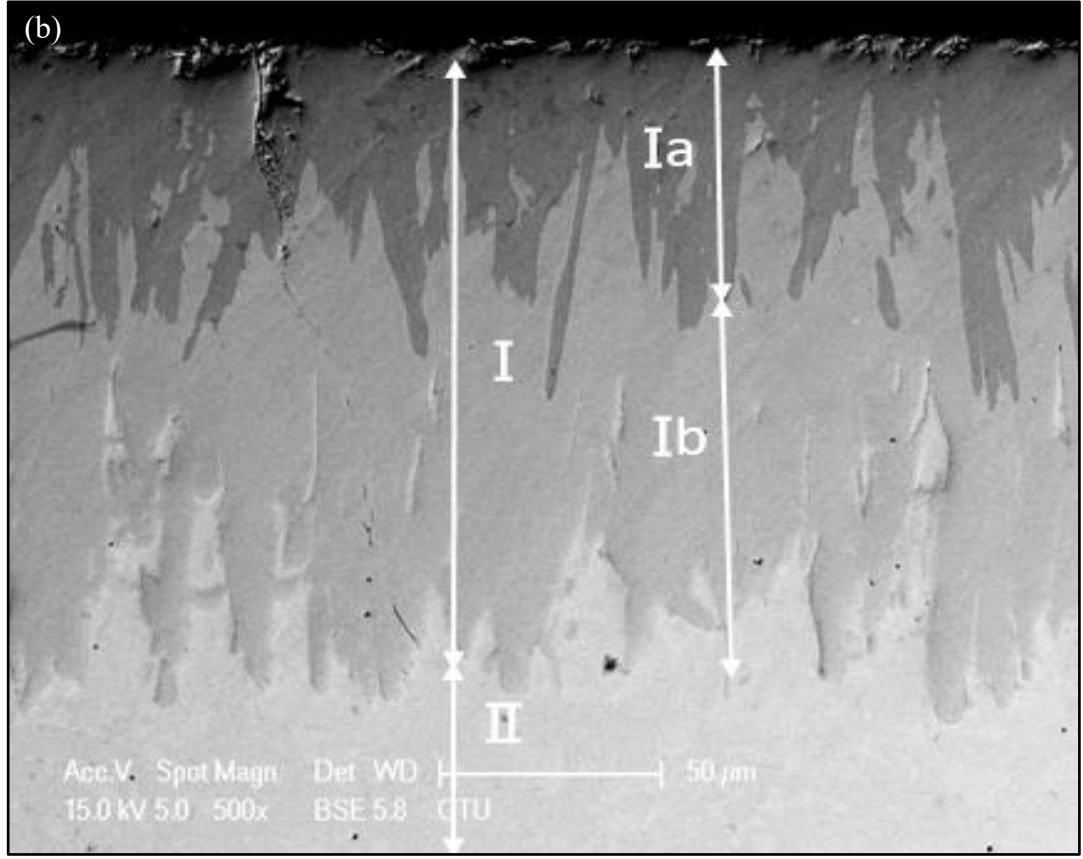


Şekil 5.4: 850°C’de borlanmış DIN 1.2842 çeliğinin kesitten alınan mikroyapı görüntüleri; a) OM, b) SEM.

Şekil 5.4’de 850°C’de 3 saat süre ile borlanmış DIN 1.2842 numunesinin kesitten alınan OM ve SEM görüntüleri verilmiştir. Bu görüntülerde, borür tabaka (I) ve altlık bölgesi (II) olmak üzere iki farklı bölge bulunmaktadır. Borür tabakasının ise iki farklı renkte olduğu göze çarpmaktadır. İlgili lüteratüre göre, koyu olan üst tabaka (Ia) bölgesinin, FeB fazına ait olduğu, daha açık renkli olan bölgesinin (Ib), Fe₂B fazına ait olduğu düşünülmektedir [43]. İlgili literatürde de yer alan, testere dişi yapısı oldukça belirgin şekilde görülmektedir [11].

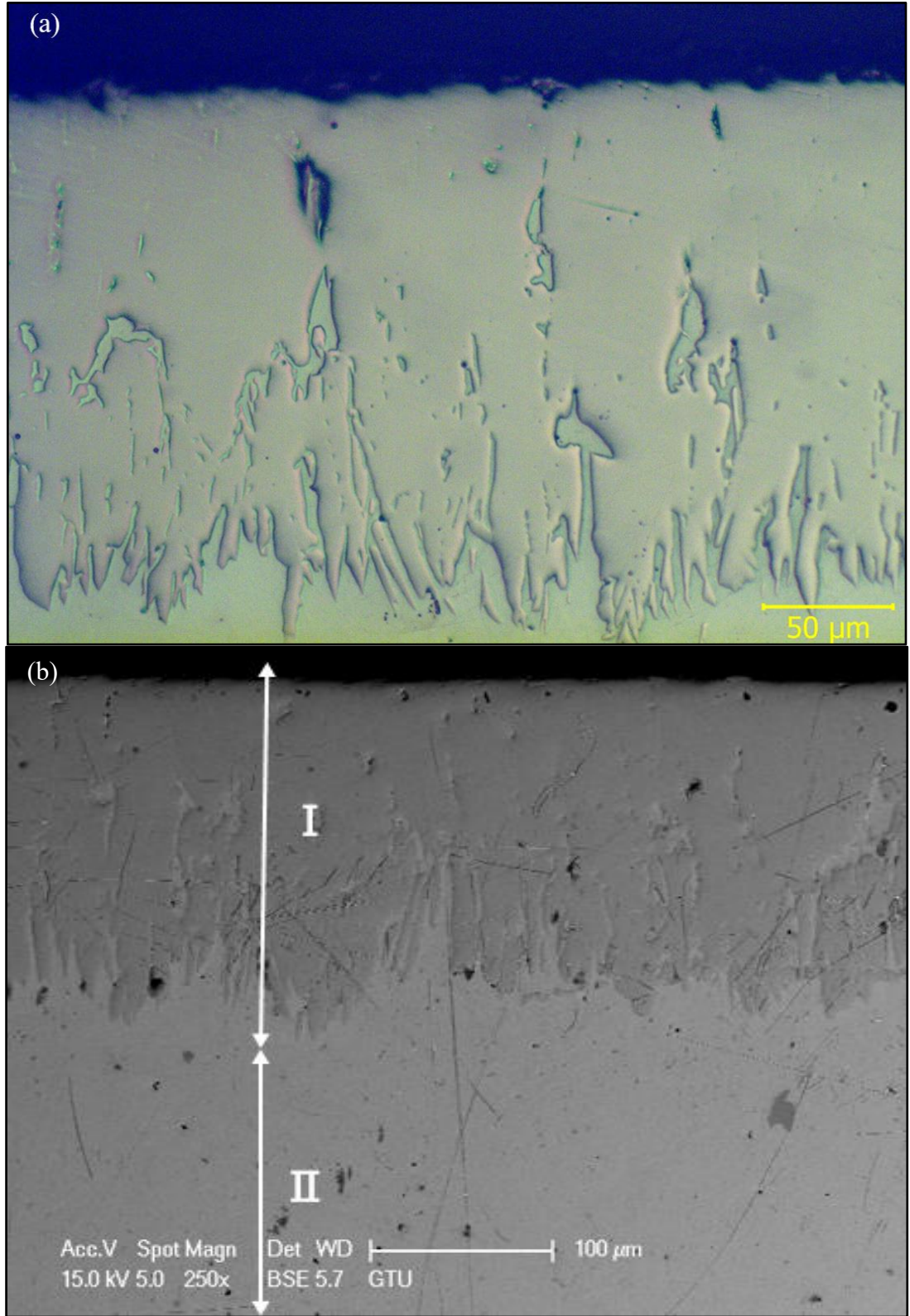


Şekil 5.5: 950°C’de borlanmış DIN 1.2842 çeliğinin kesitten alınan mikroyapı görüntüleri; a) OM, b) SEM.



Şekil 5.5: Devam.

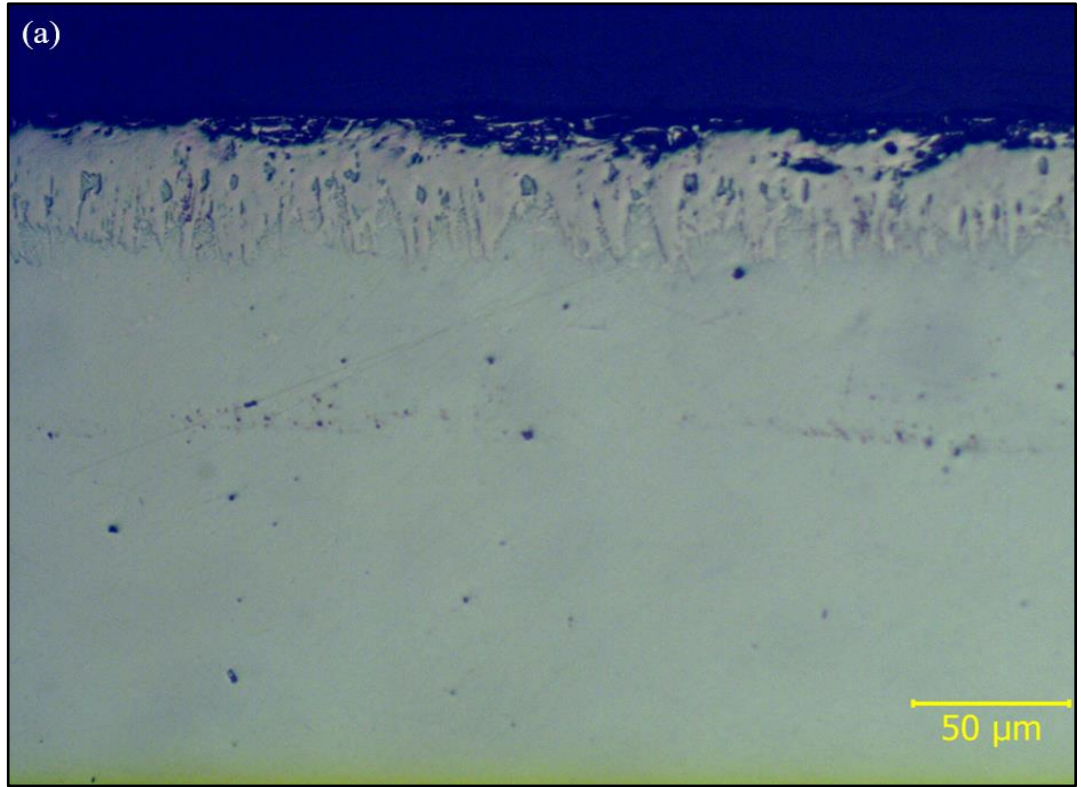
Şekil 5.5’te, 950°C’de 3 saat borlanmış DIN 1.2842 numunesinin kesitten alınan OM ve SEM görüntüleri verilmiştir. Borlama işlemi sonucunda, numunelerin yüzeyinde oluşan iki farklı bölge gözlenmektedir. Bu görüntülerde borür tabaka (I) ve altlık bölgesi (II) olmak üzere iki farklı bölge bulunmaktadır. Borür tabakasının ise iki farklı renkte olduğu göze çarpmaktadır. İlgili literatüre göre, koyu olan üst tabakanın (Ia) FeB fazına ait olduğu, daha açık renkli olan bölgenin (Ib), Fe₂B fazına ait olduğu düşünülmektedir [13]. Ayrıca yüzeye yakın bölgelerde gözenekler olduğu görülmektedir. Borür tabakaya ait tipik testere dişi yapısı oldukça belirgin şekilde görülmektedir [10].



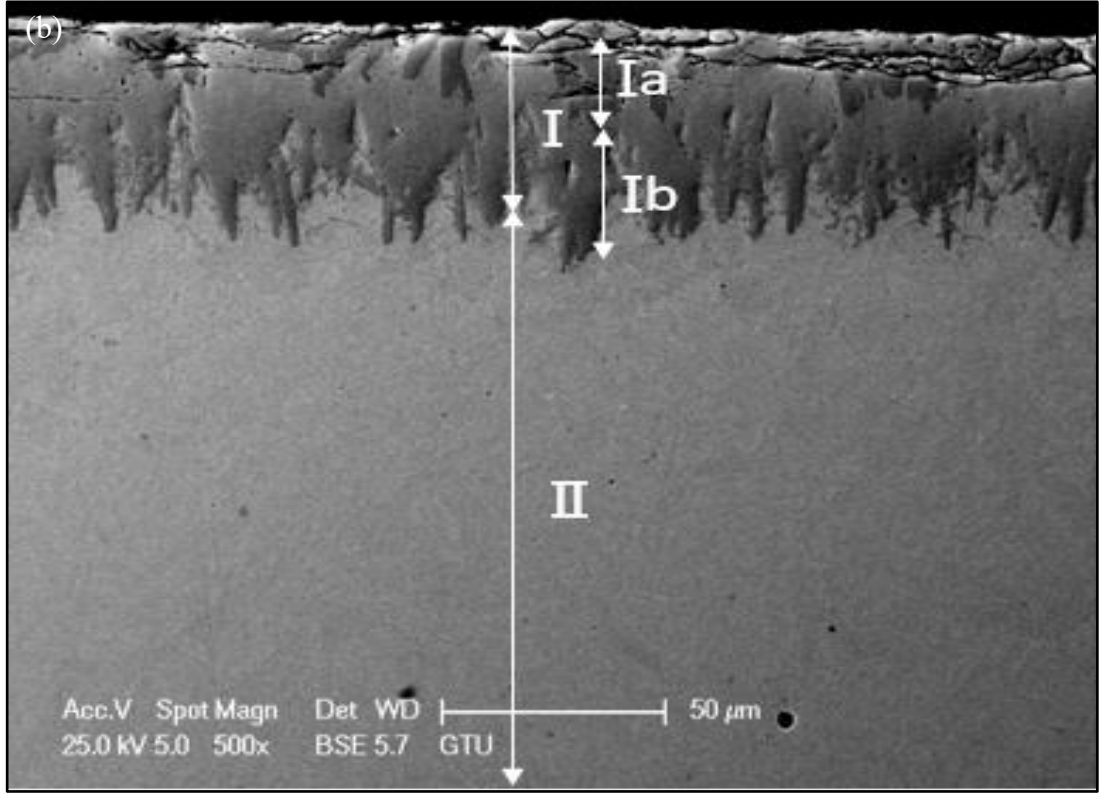
Şekil 5.6: 1050°C’de borlanmış DIN 1.2842 çeliğinin kesitten alınan mikroyapı görüntüleri; a) OM, b) SEM.

Şekil 5.6’da 1050°C’de 3 saat süre ile borlanmış DIN 1.2842 numunesinin kesitten alınan OM ve SEM görüntüleri verilmiştir. Bu görüntülerde borür bölge (I) ve altlık malzeme (II) bölgesi olmak üzere iki bölge vardır. Diğer numunelerin borür tabakasında görülen kontrast, bu numunenin borür tabakasında farkedilmemektedir. Borür tabakaya ait tipik testere dişi yapısı oldukça belirgin şekilde görülmektedir [11].

5.1.3. DIN 1.2738 Çeliği

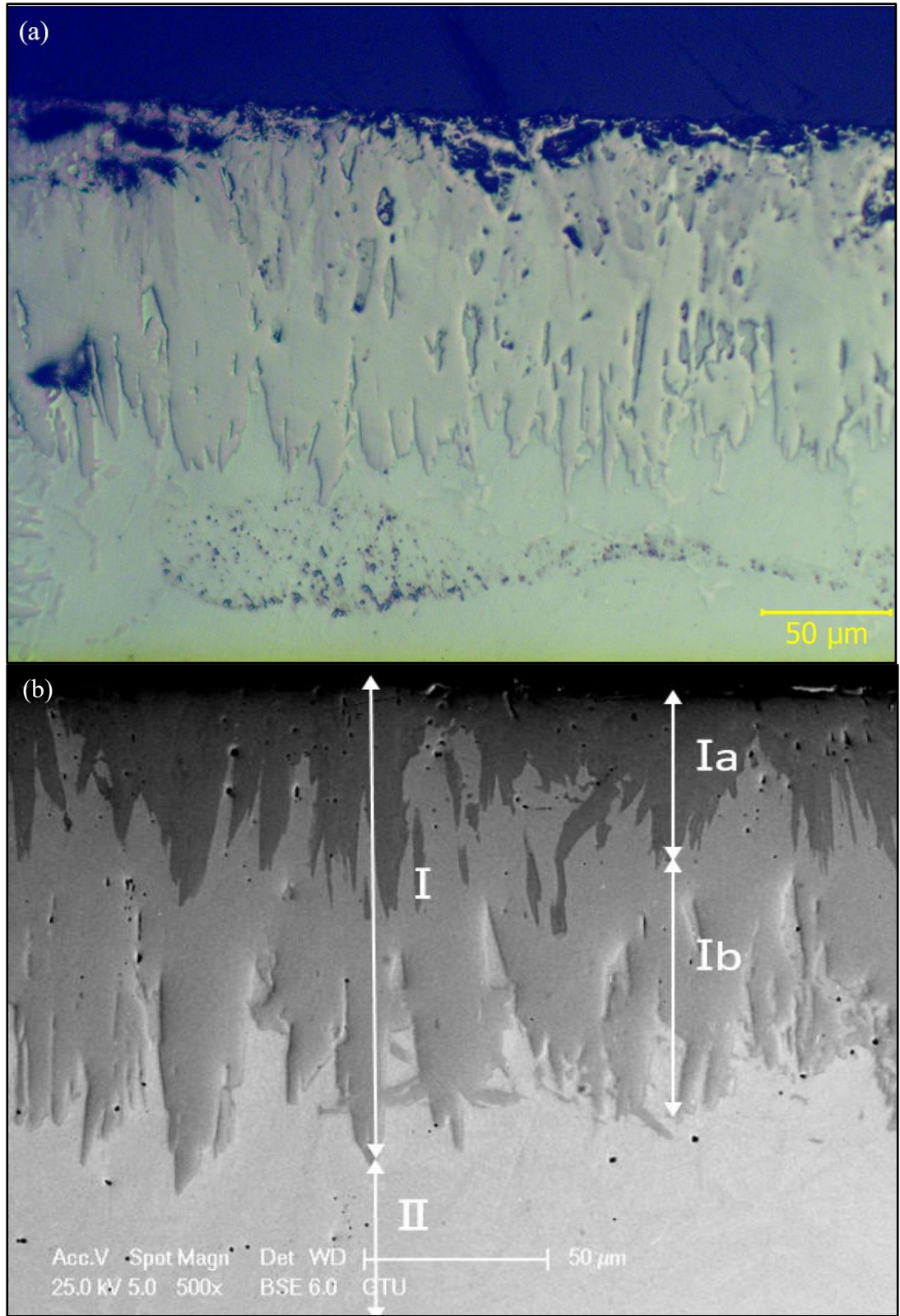


Şekil 5.7: 850°C’de borlanmış DIN 1.2738 çeliğinin kesitten alınan mikroyapı görüntüleri; a) OM, b) SEM.



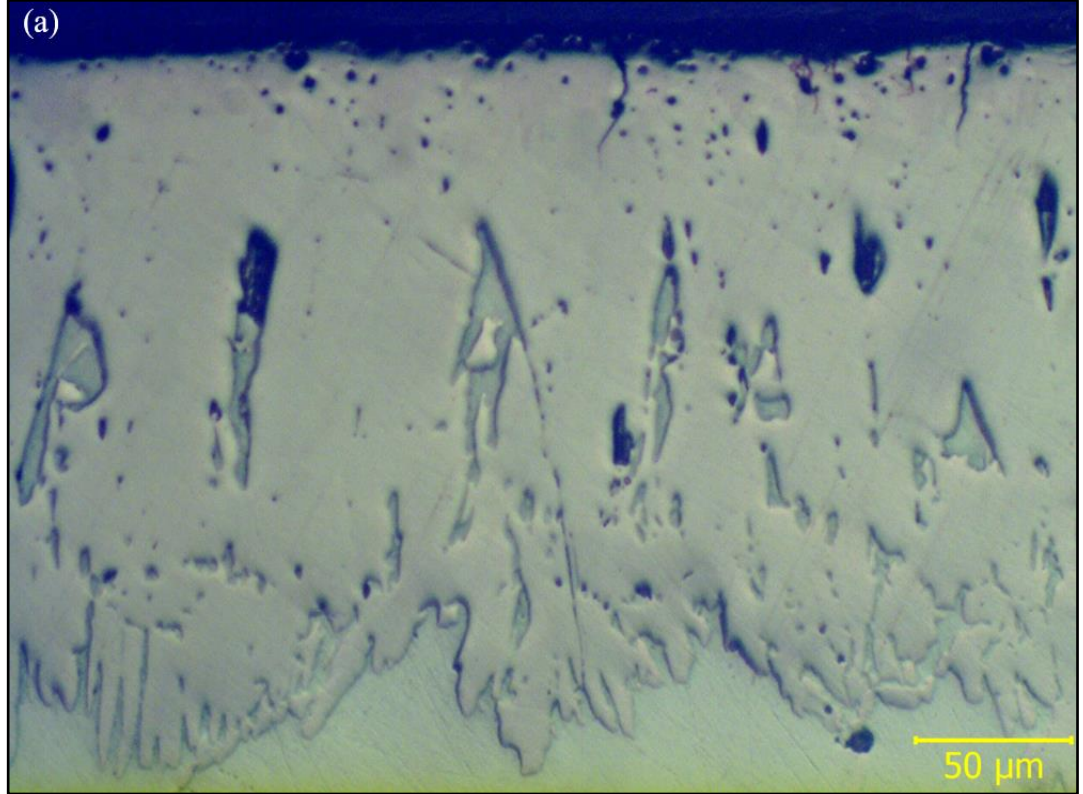
Şekil 5.7: Devam.

Şekil 5.7’de, 850°C’de 3 saat süre ile borlanmış DIN 1.2738 numunesinin kesitten alınan OM ve SEM görüntüleri verilmiştir. Elde edilen SEM görüntülerinde iki farklı bölge gözlenmiştir. Bu bölgeler, borür tabaka (I) ve altlık malzeme (II) bölgesidir. Çökelti şeklinde gözlemlenen geçiş bölgesi görülmemektedir. Borür tabakasının ise iki farklı renkte olduğu göze çarpmaktadır. İlgili literatüre göre, koyu olan üst tabakanın (Ia) FeB fazına ait olduğu, daha açık renkli olan bölgenin (Ib), Fe₂B fazına ait olduğu düşünülmektedir [11]. Borür tabakaya ait tipik testere dişi yapısı oldukça belirgin şekilde görülmektedir [43].

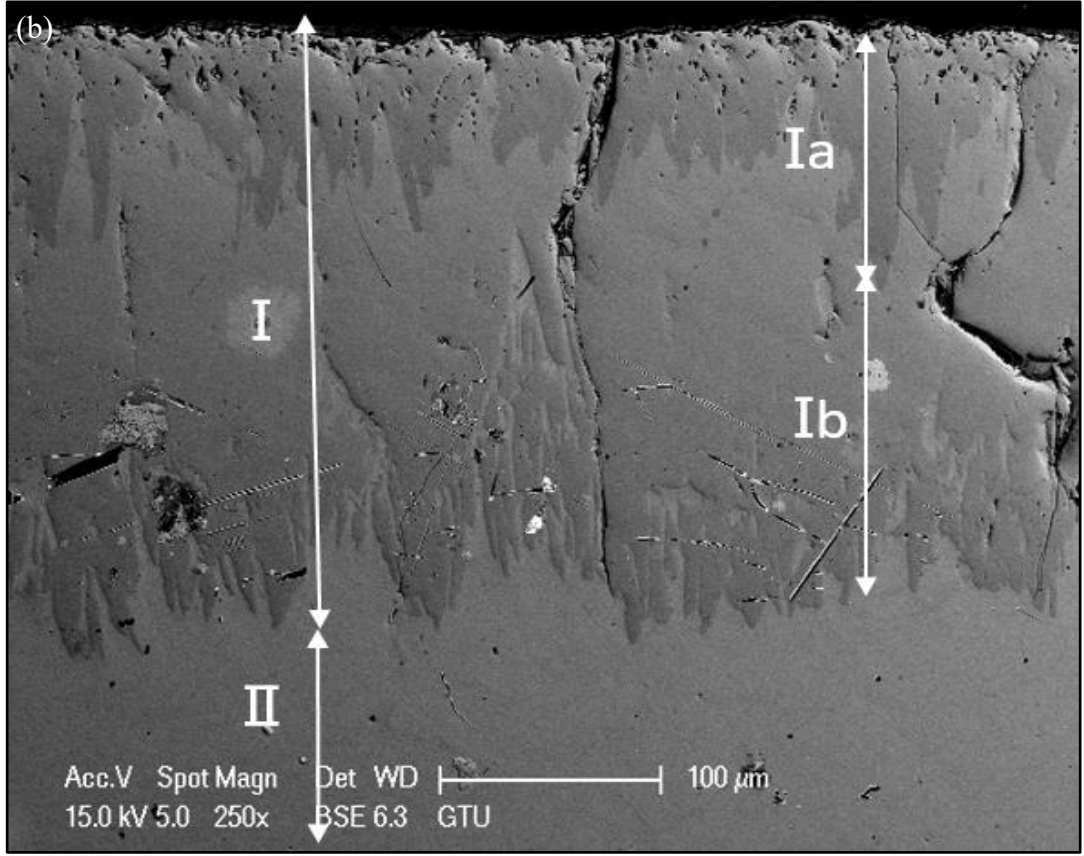


Şekil 5.8: 950°C’de borlanmış DIN 1.2738 çeliğinin kesitten alınan mikroyapı görüntüleri; a) OM, b) SEM.

Şekil 5.8’de, 950°C’de 3 saat süre ile borlanmış DIN 1.2738 numunesinin kesitten alınan OM ve SEM görüntüleri verilmiştir. Bu görüntülerde iki farklı bölge görülmüş olup, bu bölgeler; borür tabaka (I) ve altlık (II) bölgesidir. Borür tabakasının iki farklı renkte olduğu göze çarpmaktadır. İlgili literatüre göre, koyu olan üst tabakanın (Ia), FeB fazına ait olduğu, daha açık renkli olan bölgenin (Ib), Fe₂B fazına ait olduğu düşünülmektedir [11]. Borür ve altlık bölgede gözeneklere rastlanmıştır.



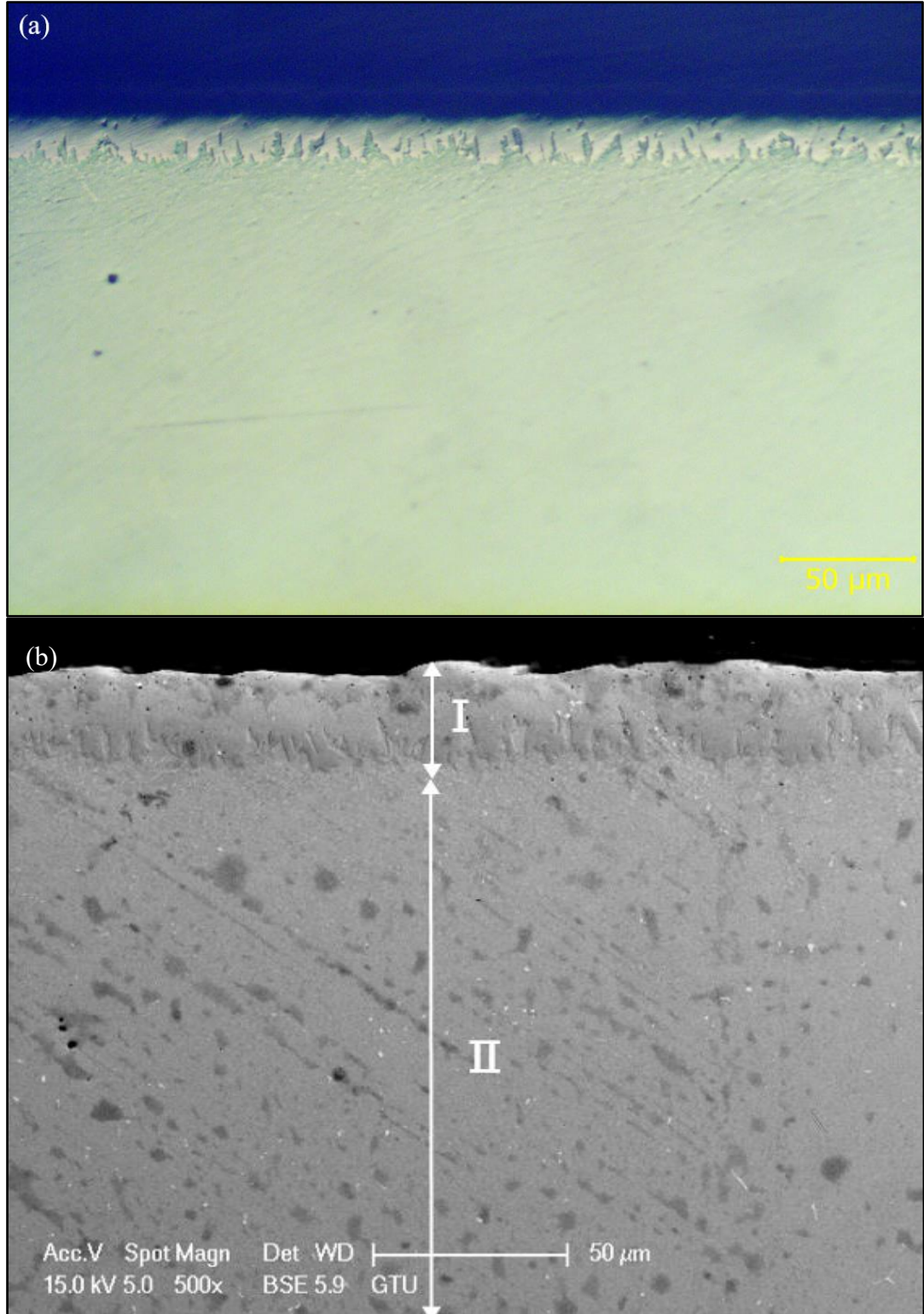
Şekil 5.9: 1050°C’de borlanmış DIN 1.2738 çeliğinin kesitten alınan mikroyapı görüntüleri; a) OM, b) SEM.



Şekil 5.9: Devam.

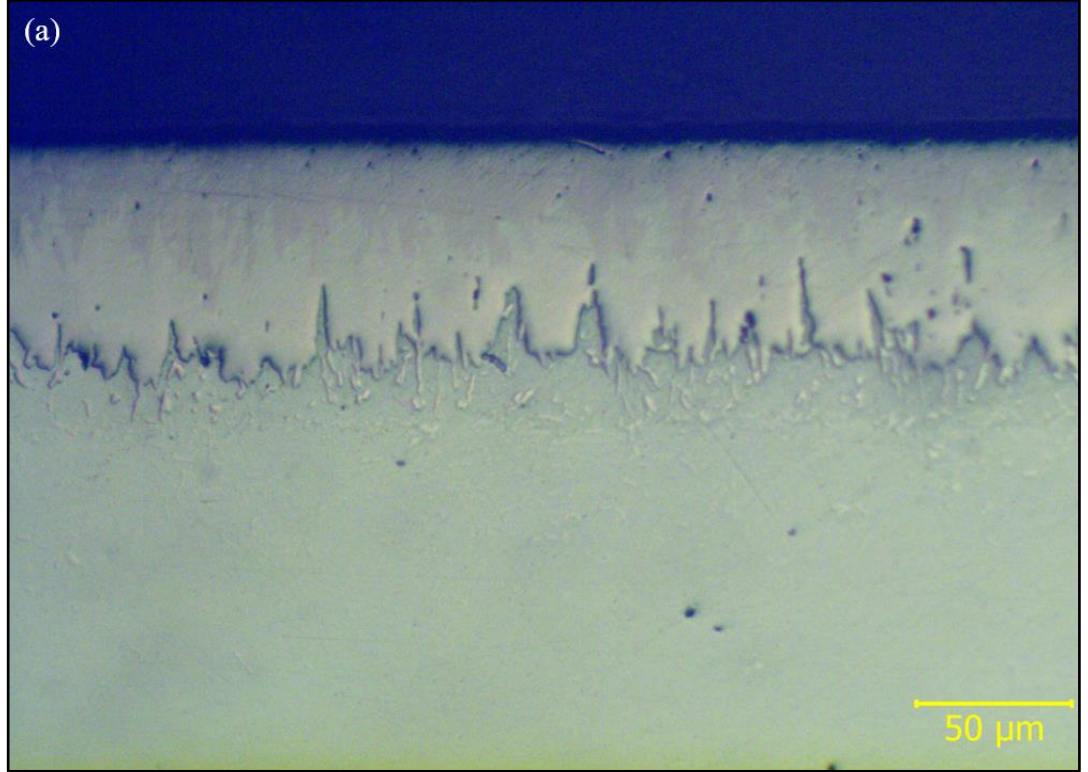
Şekil 5.9’da 1050°C’de 3 saat süre ile borlanmış DIN 1.2738 numunesinin kesitten alınan OM ve SEM görüntüleri verilmiştir. Bu görüntülerde iki farklı bölge gözlemlenmiş olup, bu bölgeler; borür tabaka (I) ve altlık (II) bölgesidir. Borür tabakasının ise iki farklı renkte olduğu göze çarpmaktadır. İlgili literatüre göre, koyu olan üst tabakanın (Ia), FeB fazına ait olduğu, daha açık renkli olan bölgenin (Ib), Fe₂B fazına ait olduğu anlaşılmaktadır [43]. Ayrıca numune içerisinde mikro çatlaklar olduğu görülmüştür.

5.1.4. DIN 1.2343 Çeliği

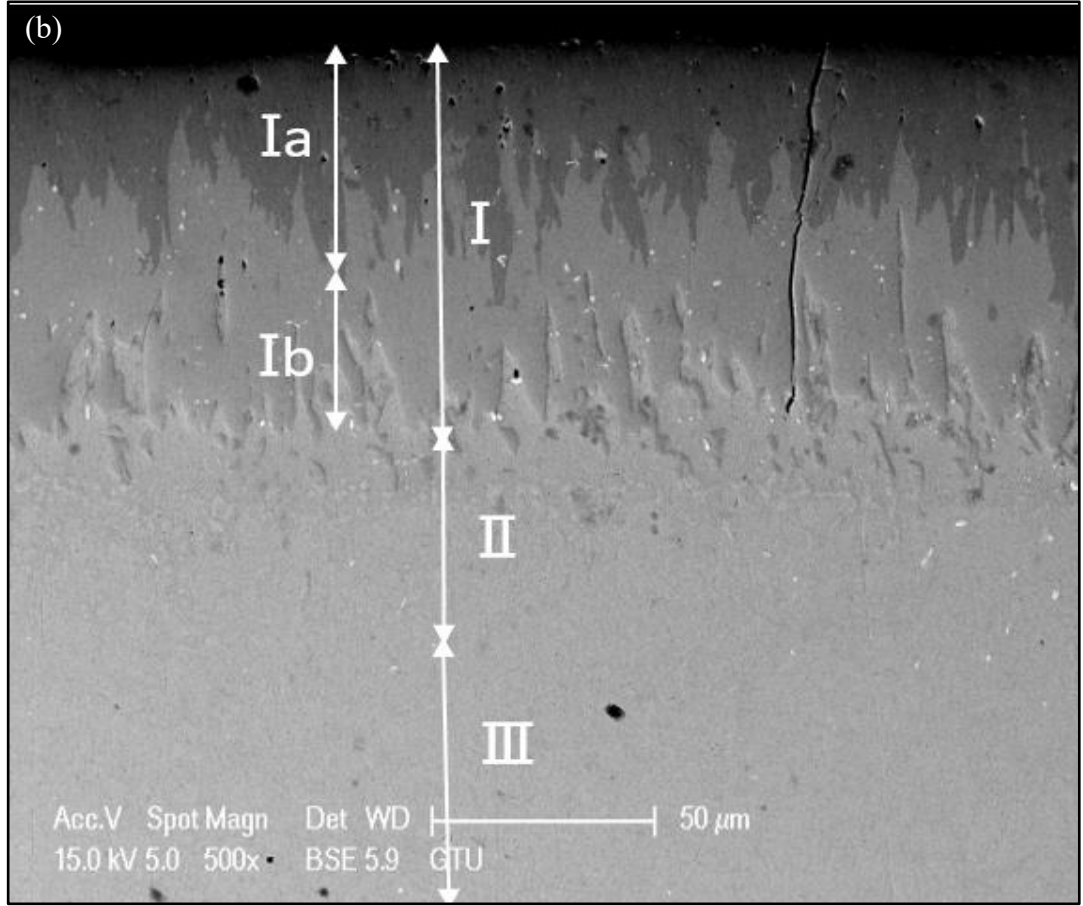


Şekil 5.10: 850°C’de borlanmış DIN 1.2343 çeliğinin kesitten alınan mikroyapı görüntüleri; a) OM, b) SEM.

Şekil 5.10'da 850°C'de 3 saat borlanmış DIN 1.2343 numunesinin kesitten alınan OM ve SEM görüntüleri verilmiştir. Bazı bölgelerde, beyaz renkli karbür şeklinde yapılar görülmüştür. Bu görüntülerde borür bölge (I) ve altlık (II) bölgesi olmak üzere iki bölge vardır. Ayrıca numunenin kirliliği nedeni ile oluştuğu düşünülen, lekeler gözlenmiştir. Diğer numunelerin borür tabakasında görülen kontrast, bu numunenin borür tabakasında farkedilmemektedir.

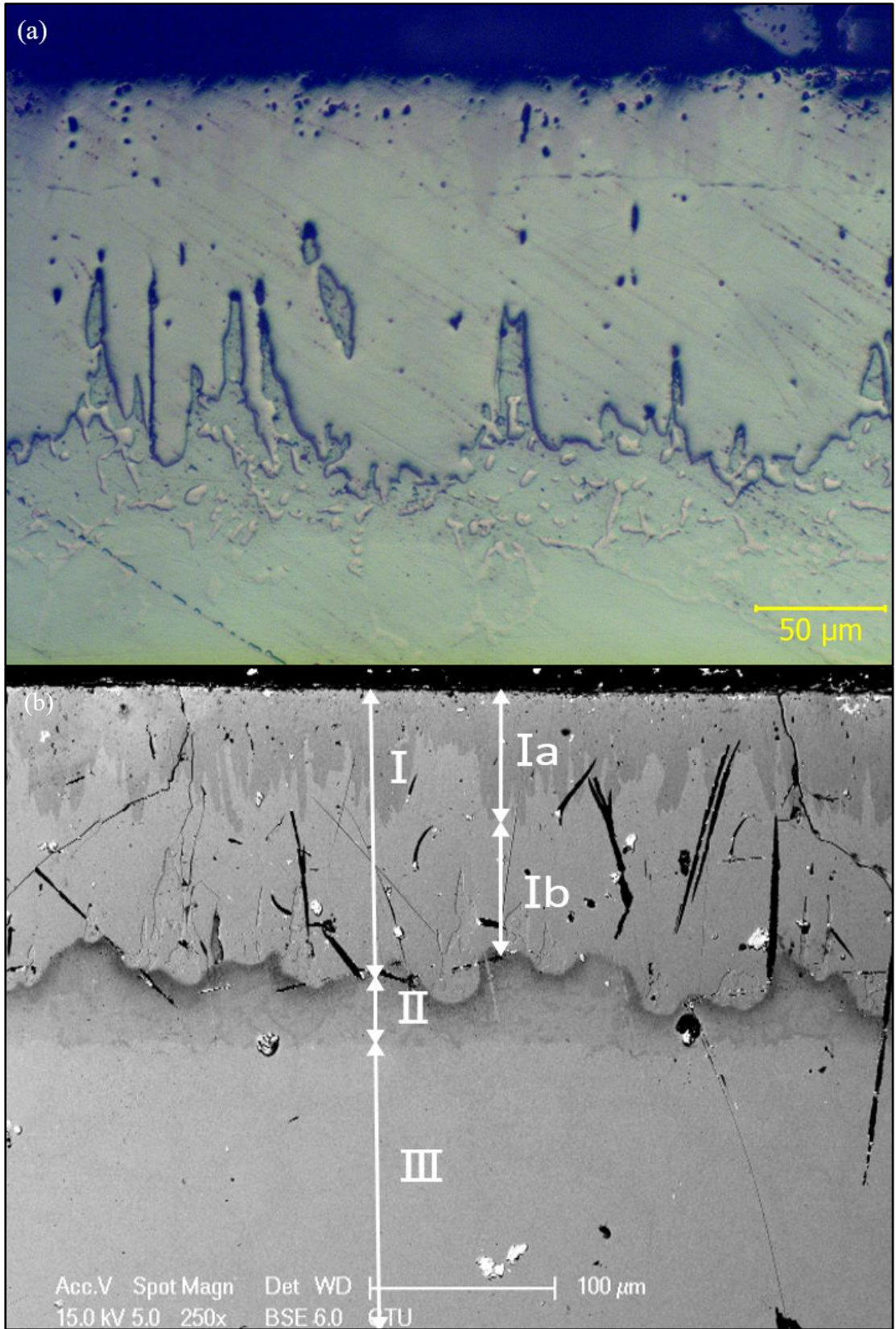


Şekil 5.11: 950°C'de borlanmış DIN 1.2343 çeliğinin kesitten alınan mikroyapı görüntüleri; a) OM, b) SEM.



Şekil 5.11: Devam.

Şekil 5.11’de 950°C’de 3 saat süre ile borlanmış DIN 1.2343 numunesinin kesitten alınan OM ve SEM görüntüleri verilmiştir. Kesit görüntülerinde Cr ve Mo oranının artmasıyla birlikte altlık ve borür tabakasına ilaveten geçiş bölgesinin (II) varlığı da oluşan çökelti benzeri yapılardan açık bir şekilde görülmektedir. 950°C’de de 850°C’de olduğu gibi beyaz renki karbürler görülmüştür. Bu görüntülerinde borür bölgesi (I), geçiş bölgesi (II) ve altlık (III) bölgeleri görülmektedir. Ayrıca özellikle borür tabakada gözeneklere ve mikro çatlaklara rastlanmıştır. Borür tabakasının iki farklı renkte olduğu göze çarpmaktadır. İlgili literatüre göre, koyu olan üst tabakanın (Ia), FeB fazına ait olduğu, daha açık renkli olan bölgenin (Ib), Fe₂B fazına ait olduğu anlaşılmaktadır [43].



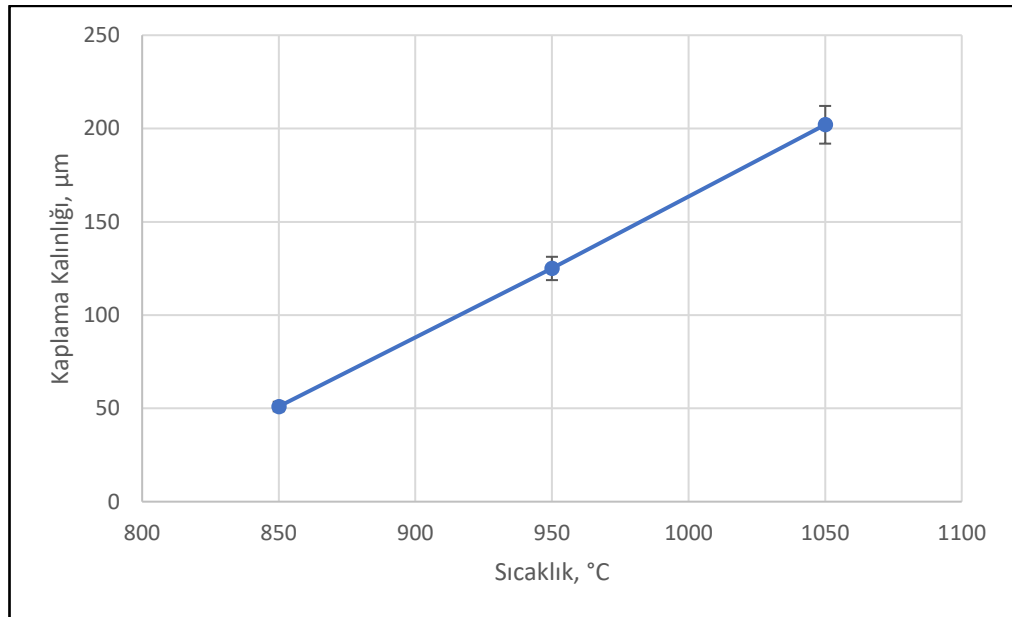
Şekil 5.12 1050°C’de borlanmış DIN 1.2343 çeliğinin kesitten alınan mikroyapı görüntüleri; a) OM, b) SEM.

Şekil 5.12’de 1050°C’de 3 saat süre ile borlanmış DIN 1.2343 numunesinin kesitten alınan OM ve SEM görüntüleri verilmiştir. 850°C ve 950°C’de görünen beyaz renkli karbürlere, 1050°C’de rastlanmamıştır. SEM görüntülerinde görülen beyaz nokta şeklindeki yapıların numunenin kirliliği nedeni ile olduğu düşünülmektedir. Bu görüntülerde borür bölge (I), geçiş bölgesi (II) ve altlık bölgesi (III) görülmüştür. Borür tabakasının iki farklı renkte olduğu göze çarpmaktadır. İlgili literatüre göre, koyu olan üst tabakanın (Ia), FeB fazına ait olduğu, daha açık renkli olan bölgenin (Ib), Fe₂B fazına ait olduğu anlaşılmaktadır [43]. Borür tabakada tipik testere dişi yapısı açıkça görülmekte olup, siyah lekelerin malzeme yüzeyinin çizilmesi nedeniyle oluştuğu görülmüştür [11].

5.2. Kaplama Kalınlığı

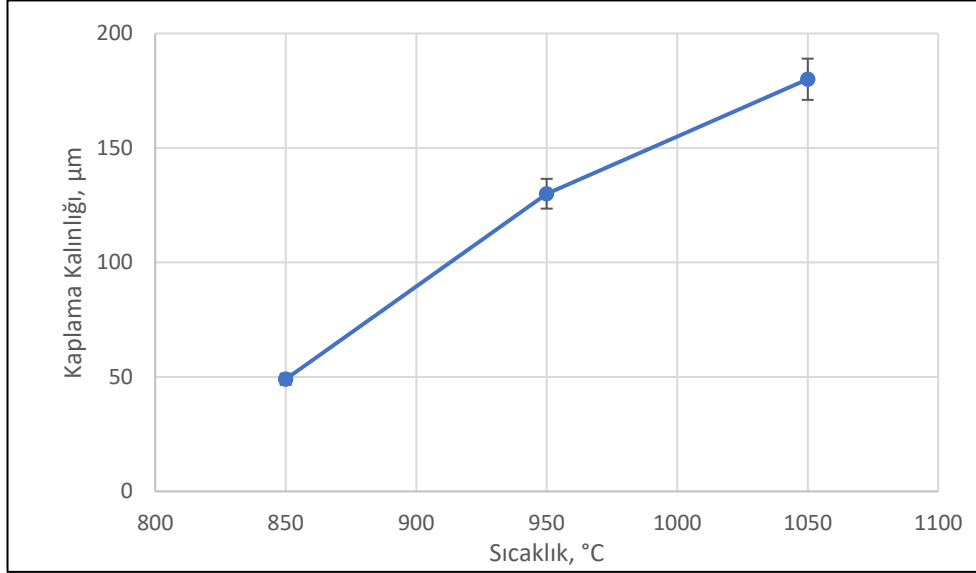
Kaplama kalınlığı ölçümünde, tipik SEM görüntüleri üzerinden IMAGE J programı kullanılarak kaplama yüzeyi ile borür kristal uçları arasında en az 10 ölçüm alınmış olup, sonuçların değerlendirilmesinde bu ölçümlerin ortalamaları esas alınmıştır.

Tüm numuneler için ortalama borür tabaka (kaplama) kalınlığının sıcaklık ile değişimi Şekil 5.13-5.16’da verilmiştir.



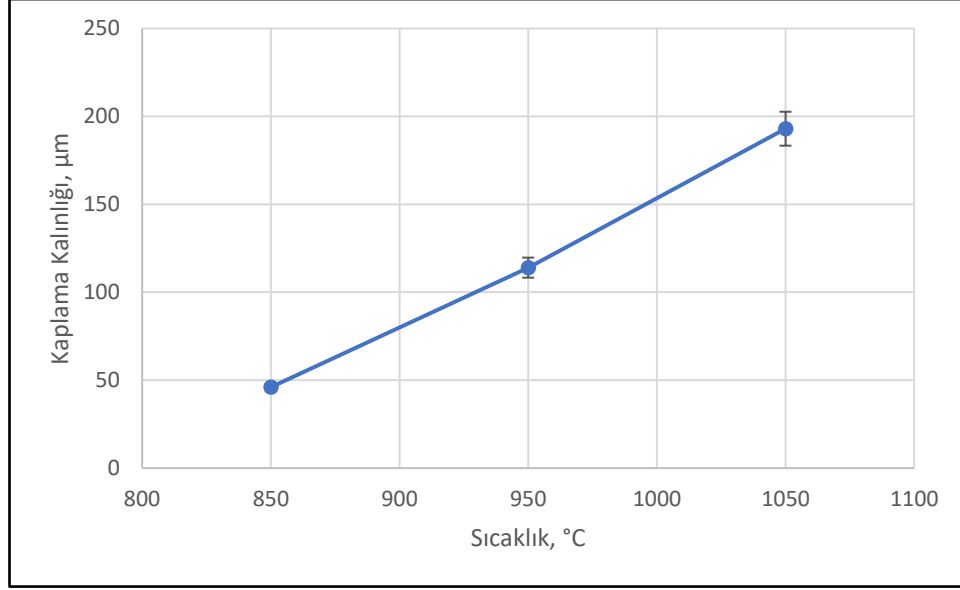
Şekil 5.13: DIN 1.2312 numunesinin yüzeyinde oluşan borür tabaka (kaplama) kalınlığının borlama sıcaklığına bağlı olarak değişimi.

Şekil 5.13’de DIN 1.2312 numunesinin yüzeyinde oluşan kaplama kalınlığının borlama sıcaklığına bağlı olarak değişimi verilmiştir. Ortalama kaplama kalınlıkları, 850°C’de 51 μm , 950°C’de 125 μm , 1050°C’de 202 μm , olarak ölçülmüştür. Borlama sıcaklığına bağlı olarak, borür tabaka kalınlığının doğrusal bir şekilde arttığı görülmektedir.



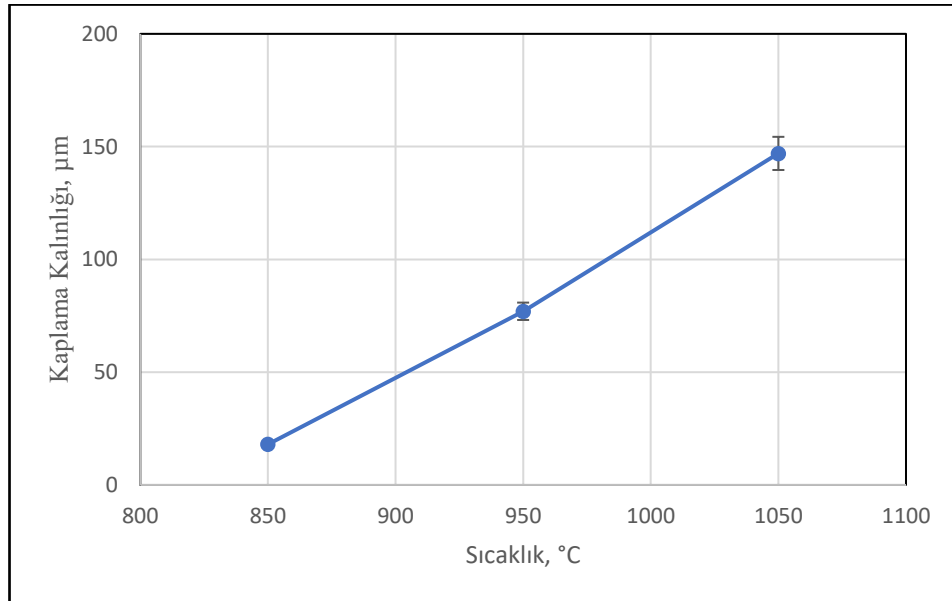
Şekil 5.14: DIN 1.2842 numunesinin yüzeyinde oluşan borür tabaka (kaplama) kalınlığının borlama sıcaklığına bağlı olarak değişimi.

Şekil 5.14’te DIN 1.2842 numunesinin yüzeyinde oluşan kaplama kalınlığının borlama sıcaklığına bağlı olarak değişimi verilmiştir. Ortalama kaplama kalınlıkları, 850°C’de 49 μm , 950°C’de 130 μm , 1050°C’de 180 μm olarak ölçülmüştür. Borlama sıcaklığına bağlı olarak, borür tabaka kalınlığının doğrusal bir şekilde arttığı görülmektedir.



Şekil 5.15: DIN 1.2738 numunesinin yüzeyinde oluşan borür tabaka (kaplama) kalınlığının borlama sıcaklığına bağlı olarak değişimi.

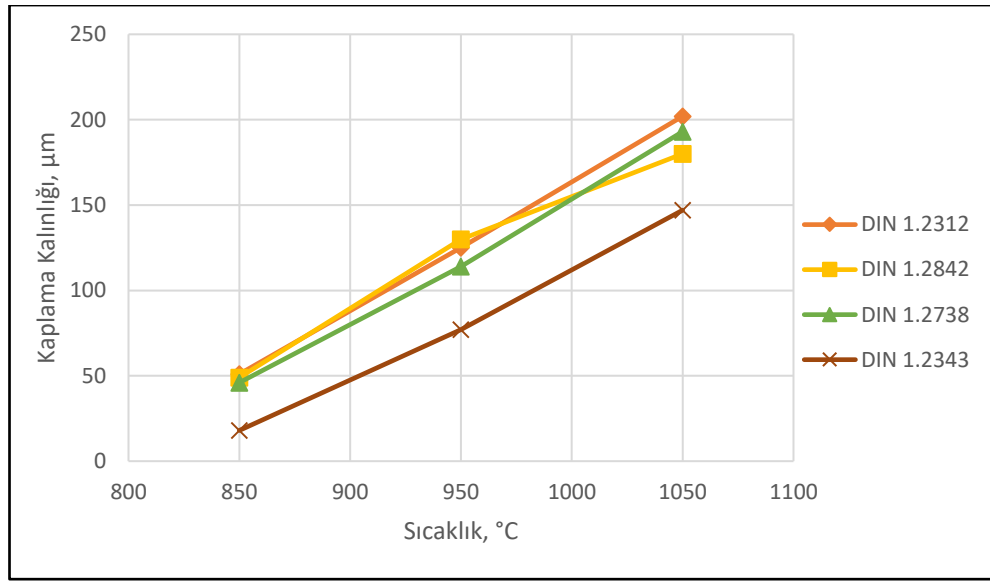
Şekil 5.15'te DIN 1.2738 numunesinin yüzeyinde oluşan kaplama kalınlığının borlama sıcaklığına bağlı olarak değişimi verilmiştir. Ortalama kaplama kalınlıkları, 850°C'de 46 μm, 950°C'de 114 μm, 1050°C'de 193 μm olarak ölçülmüştür. Borlama sıcaklığına bağlı olarak, borür tabaka kalınlığının doğrusal bir şekilde arttığı görülmektedir.



Şekil 5.16: DIN 1.2343 numunesinin yüzeyinde oluşan borür tabaka (kaplama) kalınlığının borlama sıcaklığına bağlı olarak değişimi.

Şekil 5.16’da DIN 1.2343 numunesinin yüzeyinde oluşan kaplama kalınlığının borlama sıcaklığına bağlı olarak değişimi verilmiştir. Ortalama kaplama kalınlıkları, 850°C’de 18 µm, 950°C’de 77 µm, 1050°C’de 147 µm olarak ölçülmüştür. Borlama sıcaklığına bağlı olarak, borür tabaka kalınlığının doğrusal bir şekilde arttığı görülmektedir.

Dört farklı çelik numune yüzeyinde oluşan borür tabaka kalınlığının borlama sıcaklığına bağlı olarak değişimi, karşılaştırma amaçlı olarak topluca Şekil 5.17’de verilmiştir.



Şekil 5.17: Tüm numunelerin yüzeyinde oluşan borür tabaka kalınlığının borlama sıcaklığına bağlı olarak değişimi.

Dört farklı numune için, borlama sıcaklığına bağlı olarak borür tabaka kalınlığının doğrusal bir şekilde arttığı ve tüm numuneler için değişimin benzer olduğu görülmektedir. Ölçülen kaplama kalınlıkları 18 µm (850°C, DIN 1.2343) ile 202 µm (1050°C, DIN 1.2312) arasında değişmektedir.

En yüksek ortalama borür tabaka kalınlığı 1050°C’de DIN 1.2312 numunesinde, 202 µm olarak ölçülmüştür. En düşük borür tabaka kalınlığı ise 850°C’de DIN 1.2343 numunesinde, 18 µm olarak ölçülmüştür.

Kaplama kalınlıkları genel olarak değerlendirildiğinde sıcaklıktan bağımsız olarak kaplama kalınlıkları sırasıyla en düşükten en yükseğe DIN 1.2343, DIN 1.2738, DIN 1.2312 numunelerinde olmak üzere benzer davranış gösterirken DIN 1.2842 numunesinde biraz farklılık arz etmektedir.

5.3. Mikrosertlik Sonuçları

Şekil 5.18’de, 950°C’de borlanan DIN 1.2312 numunesinin kesitinde oluşturulan Vickers sertlik izlerinin, tipik SEM görüntüsü verilmiştir. Kaplama yüzeyinden altlığa doğru mesafeye bağlı olarak mikrosertlik değerleri ölçümü için işaretlenen Vickers sertlik izleri, Vickers izi boyutlarıyla mikrosertlik ölçümünün örneği için kullanılmıştır.

Şekil 5.19’da 950°C’de borlanan DIN 1.2312 numunesinin kesitinde oluşturulan işaretlenmiş Vickers sertlik izlerinin, yüzeyden sertlik izi merkezine kadar olan mesafelerini gösteren tipik SEM görüntüsü verilmiştir. Şekil 5.19’da işaretlenmiş bölgede yüzeyden sertlik izi merkezine kadar olan mesafeler, Vickers mikrosertlik ölçüm örneği için kullanılmıştır.

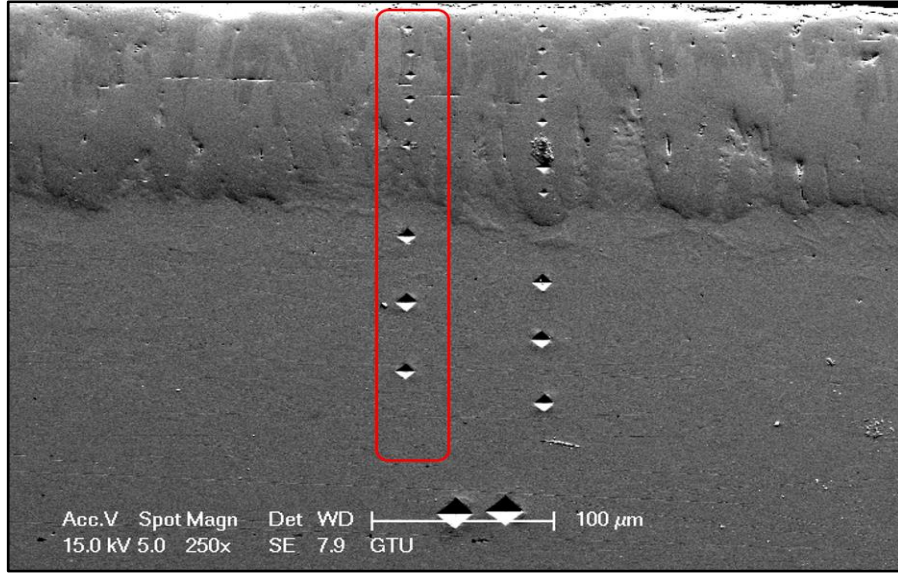
Şekil 5.20’de 950°C’de borlanan DIN 1.2312 numunesinin kesitinde oluşturulan Vickers sertlik izlerinin köşegen uzunluklarının tipik SEM görüntüsü verilmiş olup, işaretli bölgede bulunan Vickers sertlik izinin ölçülmüş köşegen uzunlukları (5,23 μm ve 5,26 μm), Vickers mikrosertlik ölçüm örneği için kullanılmıştır. Daha düşük sıcaklıkta borlanmış numunelere göre (850°C - 950°C) sertlik izlerinin daha küçük olduğu görülmektedir.

Numunelerde borür tabakadan altlığa doğru sertlik değerlerinde ani bir azalma görülmektedir ve sertlik açısından bir geçiş bölgesi yoktur.

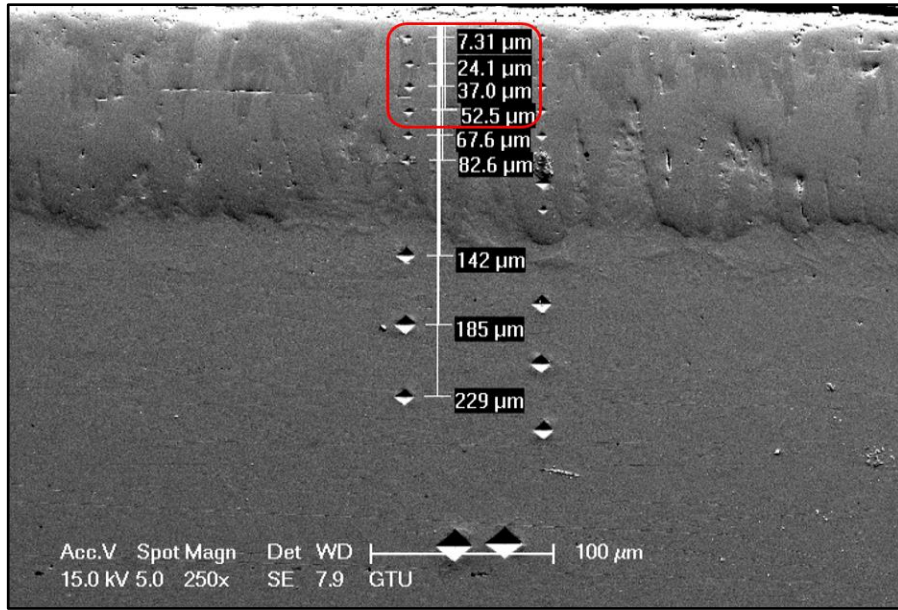
Vickers izlerinin görüldüğü tipik SEM görüntülerinde tüm numuneler için altlık malzemeden alınan sertlik izlerinin borür tabakadan alınan sertlik izlerinden daha büyük olduğu görülmektedir. Bu durum, borür tabaka sertlik değerlerinin ana malzemeye göre daha yüksek olduğunu desteklemektedir.

Vickers mikrosertlik değerinin tespiti için aşağıdaki Vickers Sertlik Denklem’i kullanılmıştır.

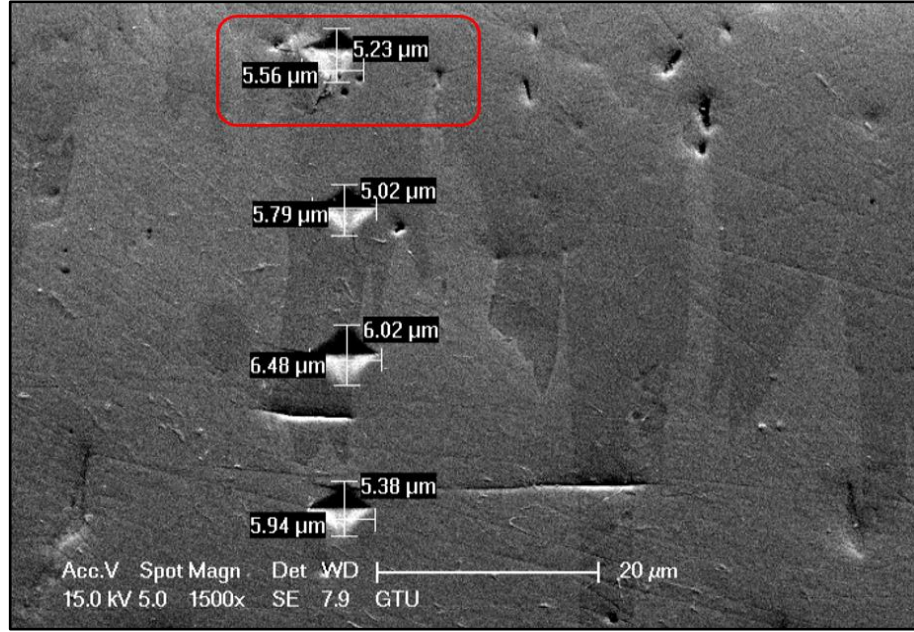
Borlanan DIN 1.2312 numunesi kesitinde oluşturulan Vickers izi boyutlarıyla tipik bir mikrosertlik hesaplaması aşağıdaki gibidir;



Şekil 5.18: 950°C’de borlanan DIN 1.2312 numunesinin kesitinde oluşturulan Vickers sertlik izlerinin tipik SEM görüntüsü.



Şekil 5.19: 950°C’de borlanan DIN 1.2312 numunesinin kesitinde oluşturulan Vickers sertlik izlerinin, yüzeyden sertlik izi merkezine kadar olan mesafelerini gösteren tipik SEM görüntüsü.



Şekil 5.20: 950°C’de borlanan DIN 1.2312 numunesinin kesitinde oluşturulan Vickers sertlik izlerinin köşegen uzunluklarının, tipik SEM görüntüsü.

DIN 1. 2312 Numunesinin kesitinde oluşturulan, köşegen uzunluğu 5,23 μm ve 5,26 μm olan sertlik izinin (Şekil 5.20), Vickers sertlik denklemi kullanılarak hesaplanmasında aşağıdaki değerler kullanılmıştır.

$$P = 0,03 \text{ kgf}$$

$$a = \text{Tepe açısı } 136^\circ$$

$$d_1 = 5,23 \text{ } \mu\text{m}$$

$$d_2 = 5,26 \text{ } \mu\text{m}$$

$$d = [(5,23 + 5,26)/2]$$

$$d = 5,25 \text{ } \mu\text{m} = 0,005245 \text{ mm}$$

$$d^2 = 2,751 \times 10^{-5} \text{ mm}^2$$

Vickers sertlik denkleminde değerler yerine koyulduğunda,

$$VSD = \frac{2P \sin(\alpha/2)}{d^2} = \frac{1,8544P}{d^2} = \frac{1,8544 \cdot 0,03}{(2,751 \cdot 10^{-5})^2} \quad (5.1)$$

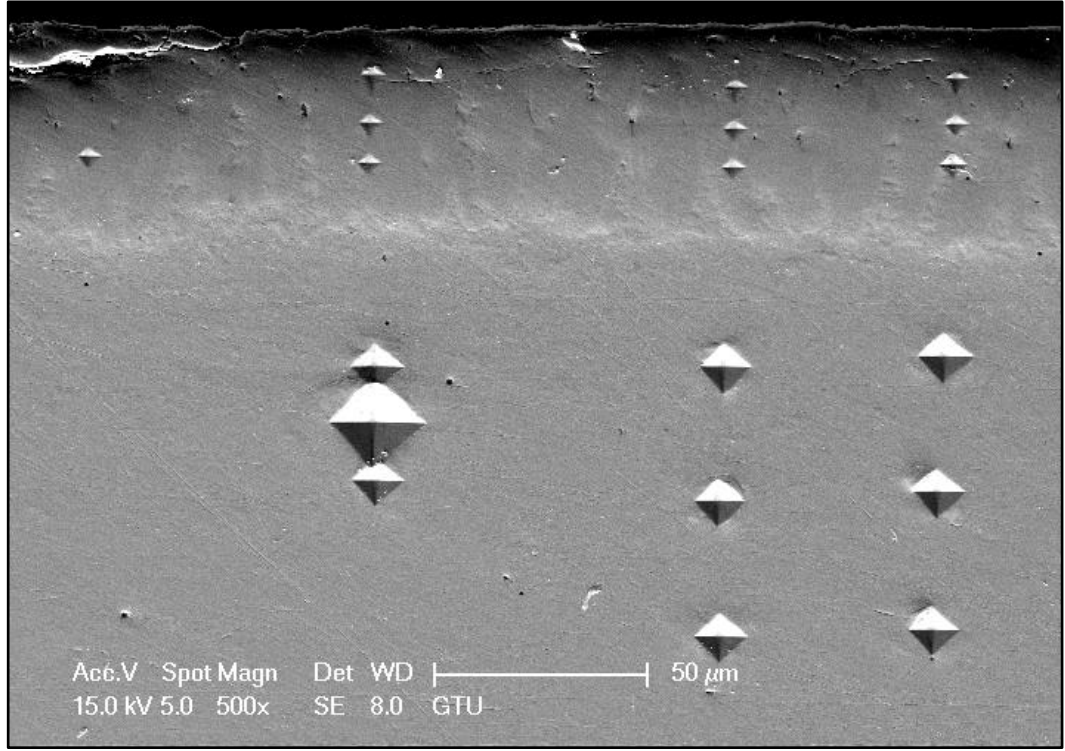
$$VSD = 2022 \text{ HV}$$

DIN 1.2312 numunesinin farklı sıcaklıklarda gerçekleşen borlama işlemleri sonrasında kesitlerinde oluşturulan Vickers sertlik izlerinin tipik SEM görüntüleri Şekil 5.21-5.23'te verilmiştir.

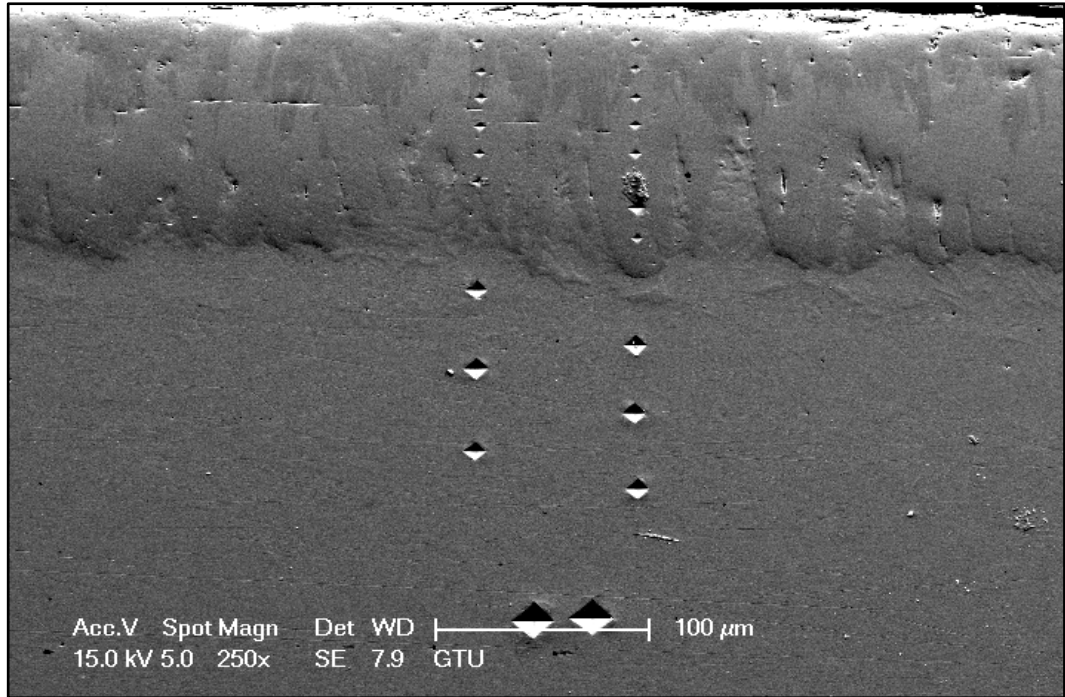
Şekil 5.21'de DIN 1.2312 numunesinin 850°C'de Vickers sertlik izlerinin tipik SEM görüntüsü verilmiş olup, kaplama yüzeyinden altlığa doğru mesafeye bağlı olarak mikrosertlik değerlerinin değişimi görülmektedir. Altlık malzemeden alınan sertlik izlerinin borür tabakadan alınan sertlik izlerinden daha büyük olduğu görülmektedir. Bu durum, borür tabaka sertlik değerlerinin altlık malzemeye göre daha yüksek olduğunu desteklemektedir.

Şekil 5.22'de DIN 1.2312 numunesinin 950°C'de Vickers sertlik izlerinin tipik SEM görüntüsü verilmiş olup, kaplama yüzeyinden altlığa doğru mesafeye bağlı olarak mikrosertlik değerlerinin değişimi görülmektedir. Altlık malzemeden alınan sertlik izlerinin borür tabakadan alınan sertlik izlerinden daha büyük olduğu görülmektedir. Bu durum, borür tabaka sertlik değerlerinin ana malzemeye göre daha yüksek olduğunu desteklemektedir. Borür tabaka ve altlık bölge boyunca oluşturulan mikrosertlik izlerinin birbirine yakın olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum borür tabaka ve altlık bölge boyunca mikrosertlik değerlerinin homojen olduğunu göstermektedir.

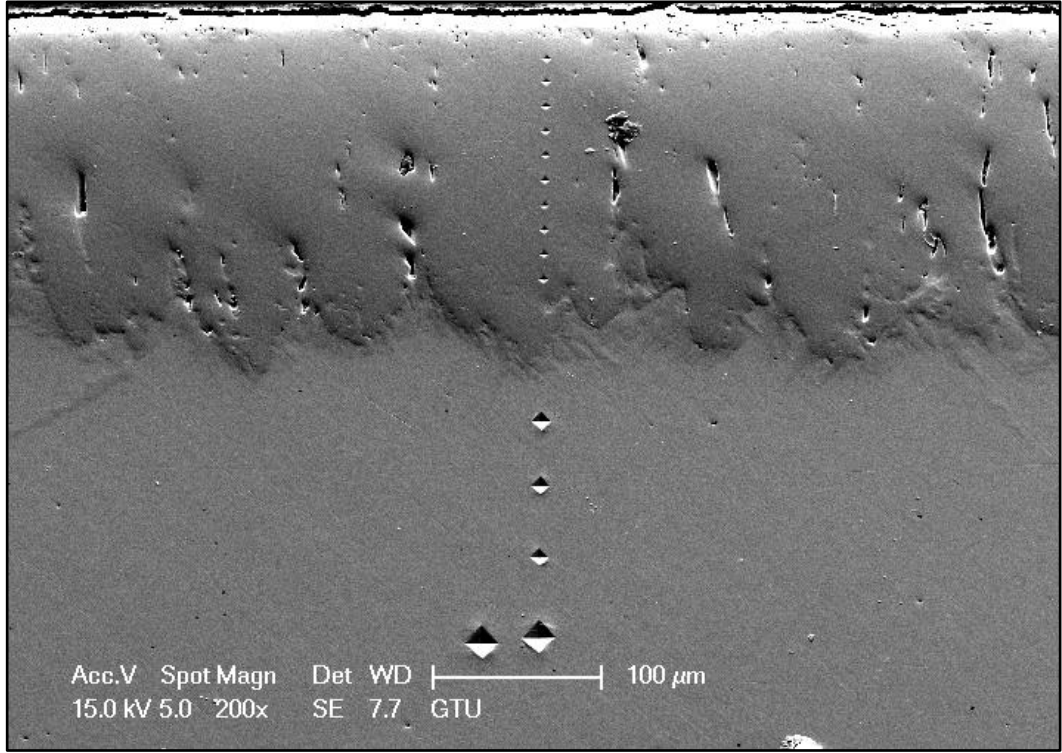
Şekil 5.23'te DIN 1.2312 numunesinin 1050°C'de Vickers sertlik izlerinin tipik SEM görüntüsü verilmiş olup, kaplama yüzeyinden altlığa doğru mesafeye bağlı olarak mikrosertlik değerlerinin değişimi görülmektedir. Altlık malzemeden alınan sertlik izlerinin borür tabakadan alınan sertlik izlerinden daha büyük olduğu görülmektedir. Bu durum, borür tabaka sertlik değerlerinin ana malzemeye göre daha yüksek olduğunu desteklemektedir. Borür tabakada oluşturulan mikrosertlik izlerinin birbirine oldukça yakın olduğu anlaşılmaktadır. 1050°C'de mikrosertlik izlerinin, daha düşük sıcaklıklardaki (850°C - 950°C) mikrosertlik izlerinden daha küçük olduğu anlaşılmıştır. Sıcaklık ile bağlantılı olarak mikrosertliğin arttığı görülmektedir.



Şekil 5.21: 850°C’de borlanan DIN 1.2312 numunesinin kesitinde oluşturulan Vickers sertlik izlerinin tipik SEM görüntüsü.

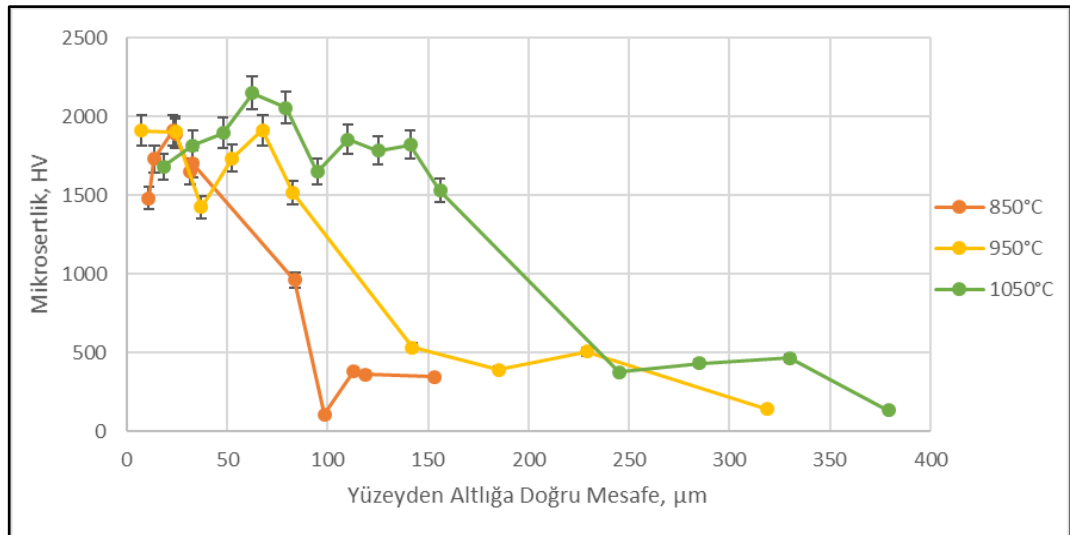


Şekil 5.22: 950°C’de borlanan DIN 1.2312 numunesinin kesitinde oluşturulan Vickers sertlik izlerinin tipik SEM görüntüsü.



Şekil 5.23: 1050°C’de borlanan DIN 1.2312 numunesinin kesitinde oluşturulan Vickers sertlik izlerinin tipik SEM görüntüsü.

Söz konusu DIN 1.2312 numunesinin mikrograflarındaki Vickers sertlik izleri kullanılarak borür tabakadan ana malzeme matrisine doğru hesaplanan sertlik değerlerinin grafikleri Şekil 5.24’te verilmiştir.



Şekil 5.24: DIN 1.2312 numunesinin farklı sıcaklıklarda yüzeyden altılığa doğru mikrosertlik değişimi.

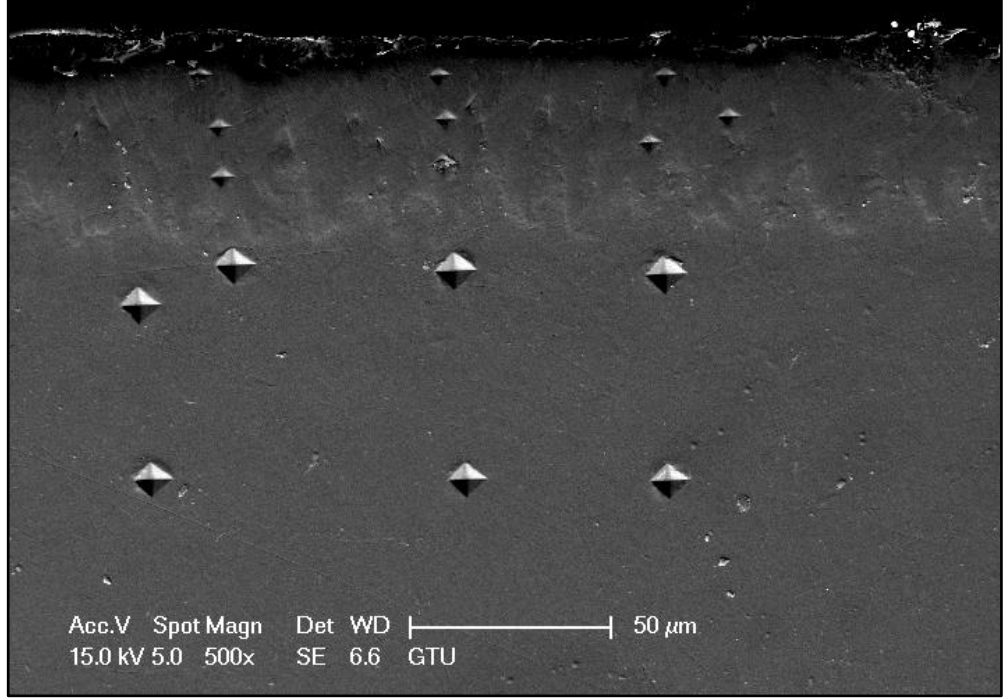
Şekil 5.24’de DIN 1.2312 Numunesinin farklı sıcaklıklarda yüzeyden altlığa doğru mikrosertlik değişimi verilmiştir. DIN 1.2312 Numunesinin 850°C’de yüzeyden altlık malzemeye doğru alınmış olan mikrosertlik izlerinden elde edilen, en yüksek sertlik değeri 1911 HV olup, borür tabaka üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Borür tabaka üzerinden elde edilen sertlik değerinin, altlık bölgesine göre oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Sertlik değerleri 345 HV (altlık bölgesi) ile 1911 HV (borür tabaka) arasında olup, borür tabakadan altlık malzemeye doğru sertlik değeri azalarak ilerlemektedir. 950°C’de Yüzeyden altlık malzemeye doğru alınmış olan mikrosertlik izlerinden elde edilen, en yüksek sertlik değeri, borür tabaka üzerinde 1915 HV, en düşük sertlik değeri altlık bölgede 138 HV olarak ölçülmüştür. Borür tabakadan altlık malzemeye doğru mikrosertlik değeri azalarak ilerlemektedir. 1050°C’de Yüzeyden altlık malzemeye doğru alınmış olan sertlik izlerinden elde edilen, en yüksek sertlik değeri borür tabaka üzerinde 2152 HV olup, en düşük sertlik değerinin altlık bölgesinde 134 HV olduğu görülmektedir. Borür tabaka üzerinden elde edilen en yüksek sertlik değerinin, altlık malzemenin yaklaşık 7 katı olduğu görülmüştür. Borür tabakadan altlık malzemeye doğru mikrosertlik değeri azalarak ilerlemektedir.

Şekil 5.25’de DIN 1.2343 numunesinin 850°C’de Vickers sertlik izlerinin tipik SEM görüntüsü verilmiş olup, kaplama yüzeyinden altlığa doğru mesafeye bağlı olarak mikrosertlik değerlerinin değişimi görülmektedir. Altlık malzemedan alınan sertlik izlerinin borür tabakadan alınan sertlik izlerinden daha büyük olduğu görülmektedir. Bu durum, borür tabaka sertlik değerlerinin ana malzemeye göre daha yüksek olduğunu desteklemektedir. Borür tabaka ve altlık bölge boyunca oluşturulan mikrosertlik izlerinin birbirine yakın olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum borür tabaka ve altlık bölge boyunca mikrosertlik değerlerinin homojen olduğunu göstermektedir.

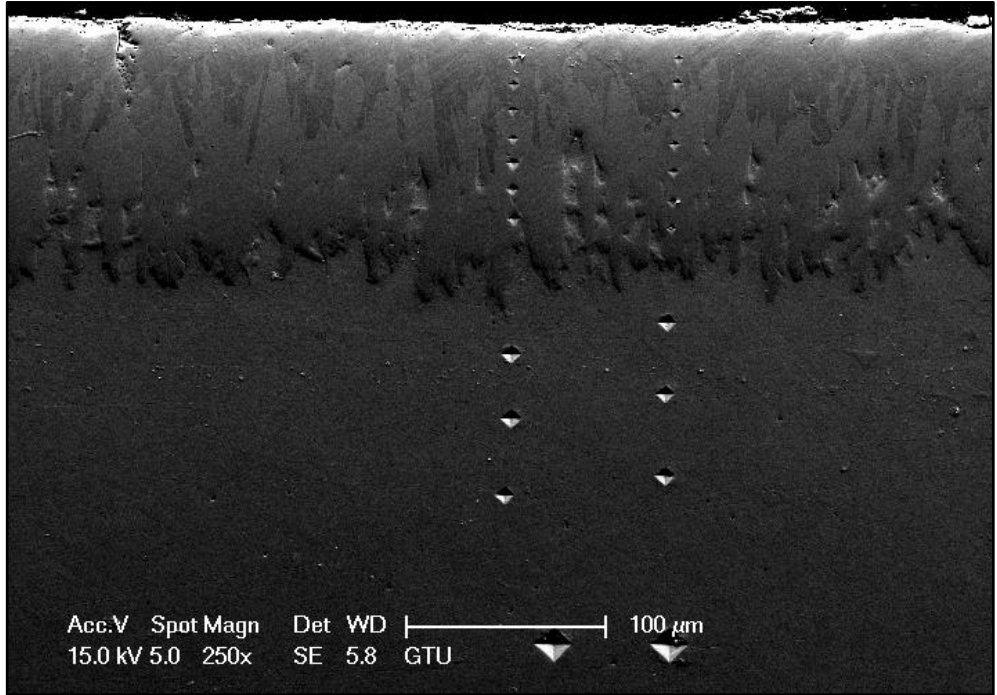
Şekil 5.26’da DIN 1.2343 numunesinin 950°C’de Vickers sertlik izlerinin tipik SEM görüntüsü verilmiş olup, kaplama yüzeyinden altlığa doğru mesafeye bağlı olarak mikrosertlik değerlerinin değişimi görülmektedir. Altlık malzemedan alınan sertlik izlerinin borür tabakadan alınan sertlik izlerinden daha büyük olduğu görülmektedir. Borür tabaka ve altlık bölge boyunca mikrosertlik değerlerinin homojen olduğunu göstermektedir.

Şekil 5.27’de DIN 1.2343 numunesinin 1050°C’de Vickers sertlik izlerinin tipik SEM görüntüsü verilmiş olup, kaplama yüzeyinden altlığa doğru mesafeye bağlı olarak mikrosertlik değerlerinin değişimi görülmektedir. Altlık malzemedan alınan sertlik izlerinin borür tabakadan alınan sertlik izlerinden daha büyük olduğu

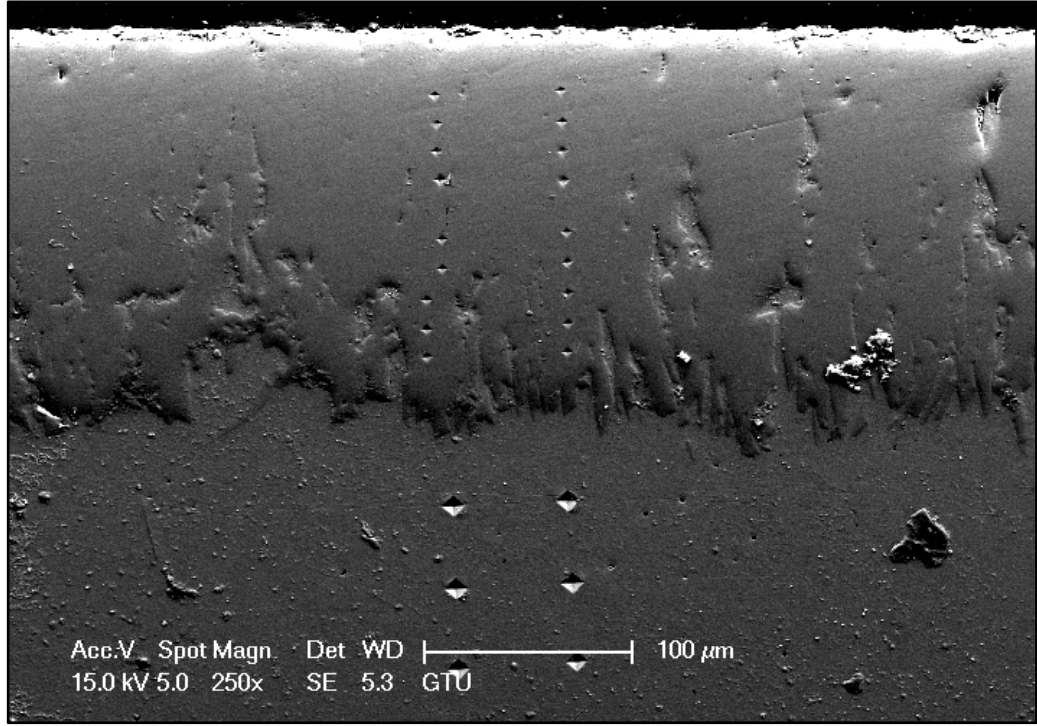
görülmektedir. Sertlik izleri büyüklüğünün, 950°C'deki sertlik izleri ile yakın olduğu görülürken, 850°C'deki sertlik izlerine göre daha küçük olduğu görülmüştür.



Şekil 5.25: 850°C'de borlanan DIN 1.2343 numunesinin kesitinde oluşturulan Vickers sertlik izlerinin tipik SEM görüntüsü.

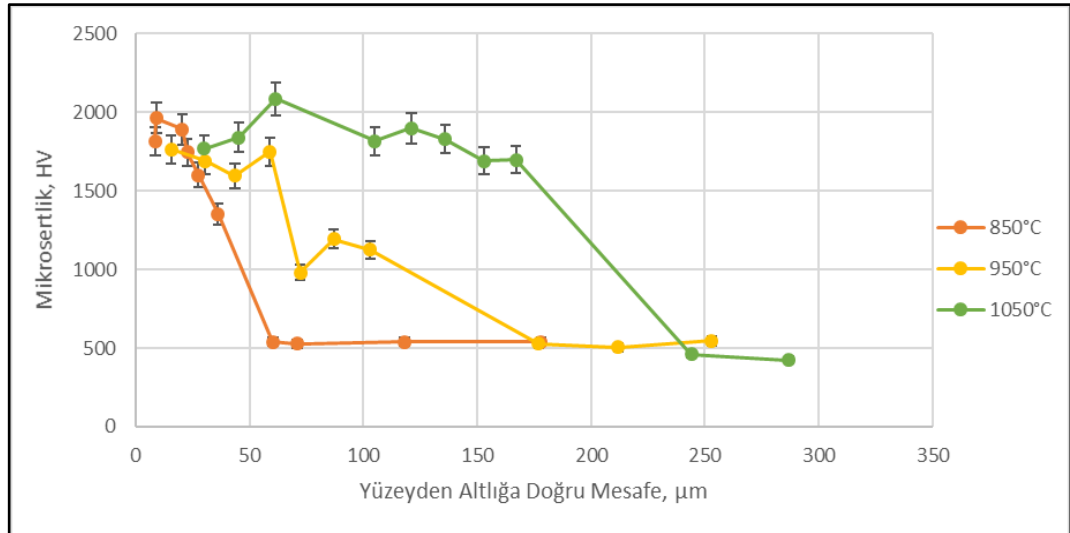


Şekil 5.26: 950°C'de borlanan DIN 1.2343 numunesinin kesitinde oluşturulan Vickers sertlik izlerinin tipik SEM görüntüsü.



Şekil 5.27: 1050°C’de borlanan DIN 1.2343 numunesinin kesitinde oluşturulan Vickers sertlik izlerinin tipik SEM görüntüsü.

Söz konusu DIN 1.2343 numunesinin mikrograflarındaki Vickers sertlik izleri kullanılarak borür tabakadan ana malzeme matrisine doğru hesaplanan sertlik değerlerinin grafikleri Şekil 5.28’de verilmiştir.



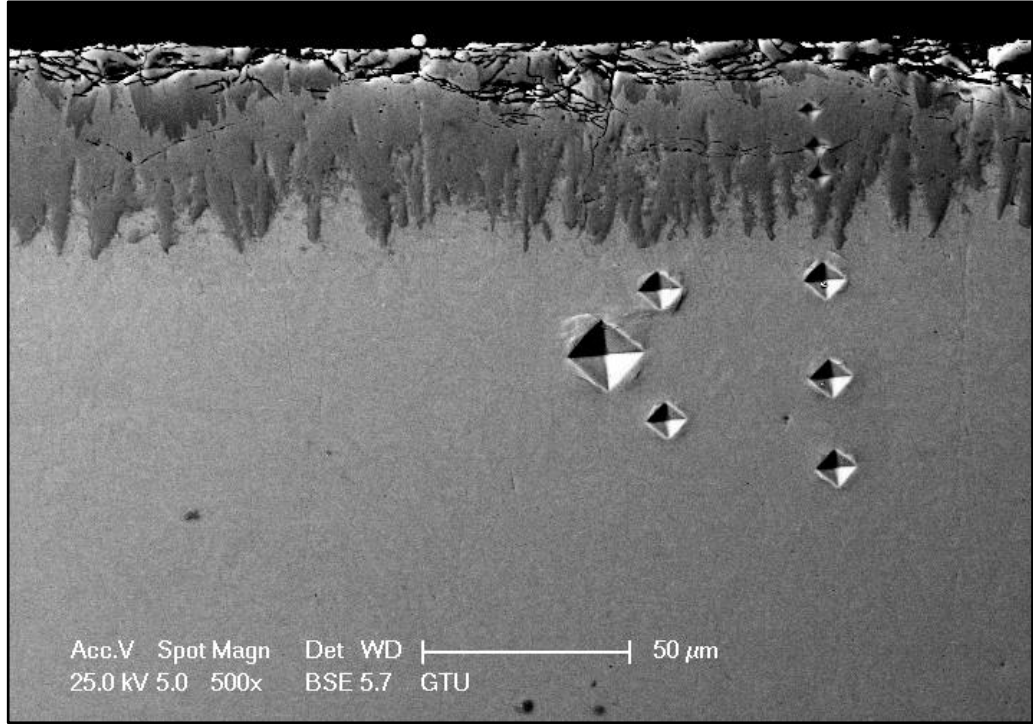
Şekil 5.28: DIN 1.2343 numunesinin farklı sıcaklıklarda yüzeyden altlığa doğru mikrosertlik değişimi.

Şekil 5.28’de DIN 1.2343 numunesinin farklı sıcaklıklarda yüzeyden altlığa doğru mikrosertlik değişimi verilmiştir. 850°C’de yüzeyden altlık malzemeye doğru alınmış olan mikrosertlik izlerinden elde edilen, en yüksek sertlik değeri borür tabaka üzerinde 1962 HV, en düşük sertlik değeri altlık bölgesinde 530 HV olarak ölçülmüştür. Borür tabaka üzerinden elde edilen en yüksek sertlik değerinin, altlık bölgesinde elde edilen sertlik değerine göre oldukça yüksek olduğu görülmüştür. Borür tabakadan altlık malzemeye doğru mikrosertlik değeri azalarak ilerlemektedir. 950°C’de Yüzeyden altlık malzemeye doğru alınmış olan mikrosertlik izlerinden elde edilen, en yüksek sertlik değeri 1765 HV olup, borür tabaka üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Borür tabaka üzerinden elde edilen en yüksek sertlik değerinin, altlık malzemenin yaklaşık 9 katı olduğu görülmektedir. Sertlik değerleri 505 HV (altlık bölgesi) ile 1765 HV (borür tabaka) arasında olup, borür tabakadan altlık malzemeye doğru mikrosertlik değeri azalarak ilerlemektedir. 1050°C’de Yüzeyden altlık malzemeye doğru alınmış olan sertlik izlerinden elde edilen, en yüksek sertlik değeri 2085 HV olup, borür tabaka üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Borür tabaka üzerinden elde edilen en yüksek sertlik değerinin, altlık malzemenin yaklaşık 9 katı olduğu görülmüştür. Sertlik değerlerinin 424 HV (altlık bölgesi) ile 2085 HV (borür tabaka) arasında olduğu görülmektedir. Mikrosertlik değeri, borür tabakadan altlık malzemeye doğru azalarak ilerlemektedir.

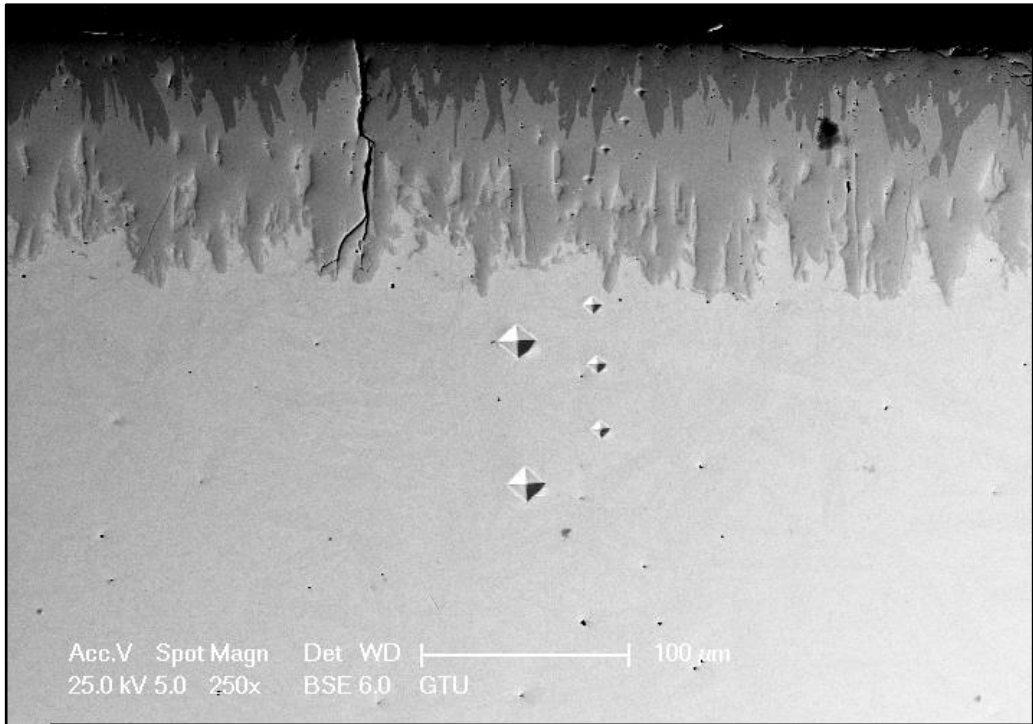
Şekil 5.29’da DIN 1.2738 numunesinin 850°C’de Vickers sertlik izlerinin tipik SEM görüntüsü verilmiş olup, kaplama yüzeyinden altlığa doğru mesafeye bağlı olarak mikrosertlik değerlerinin değişimi görülmektedir. Altlık malzemedan alınan sertlik izlerinin borür tabakadan alınan sertlik izlerinden daha büyük olduğu görülmektedir. Bu durum, borür tabaka sertlik değerlerinin ana malzemeye göre daha yüksek olduğunu desteklemektedir.

Şekil 5.30’da DIN 1.2738 numunesinin 950°C’de Vickers sertlik izlerinin tipik SEM görüntüsü verilmiş olup, kaplama yüzeyinden altlığa doğru mesafeye bağlı olarak mikrosertlik değerlerinin değişimi görülmektedir.

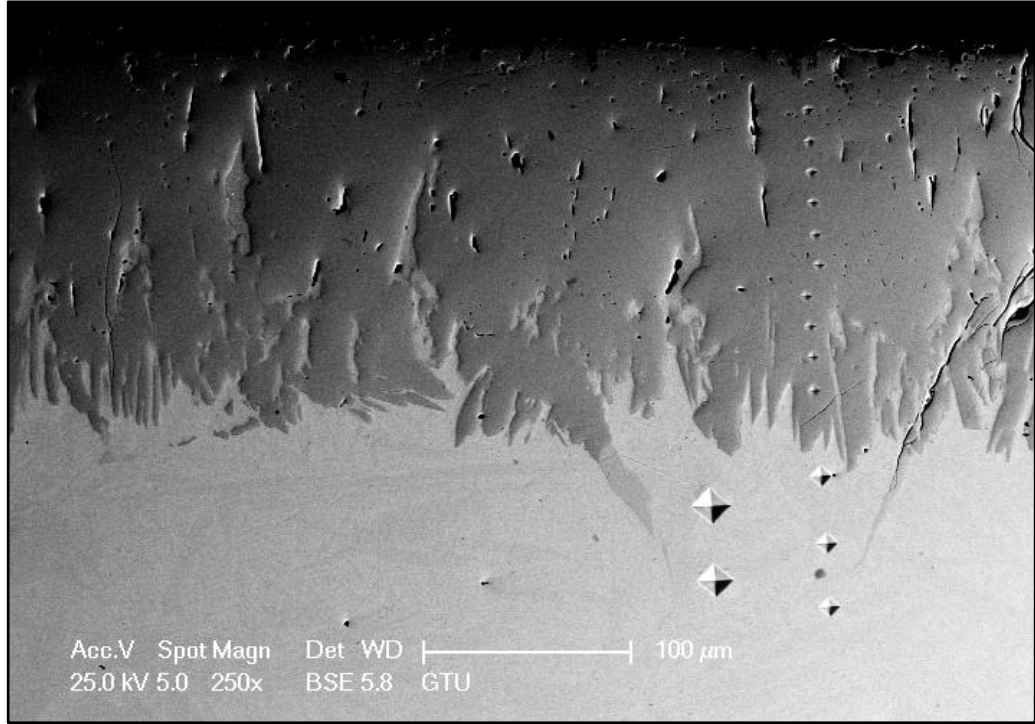
Şekil 5.31’de DIN 1.2738 numunesinin 1050°C’de Vickers sertlik izlerinin tipik SEM görüntüsü verilmiş olup, kaplama yüzeyinden altlığa doğru mesafeye bağlı olarak mikrosertlik değerlerinin değişimi görülmektedir. Altlık malzemedan alınan sertlik izlerinin borür tabakadan alınan sertlik izlerinden daha büyük olduğu görülmektedir.



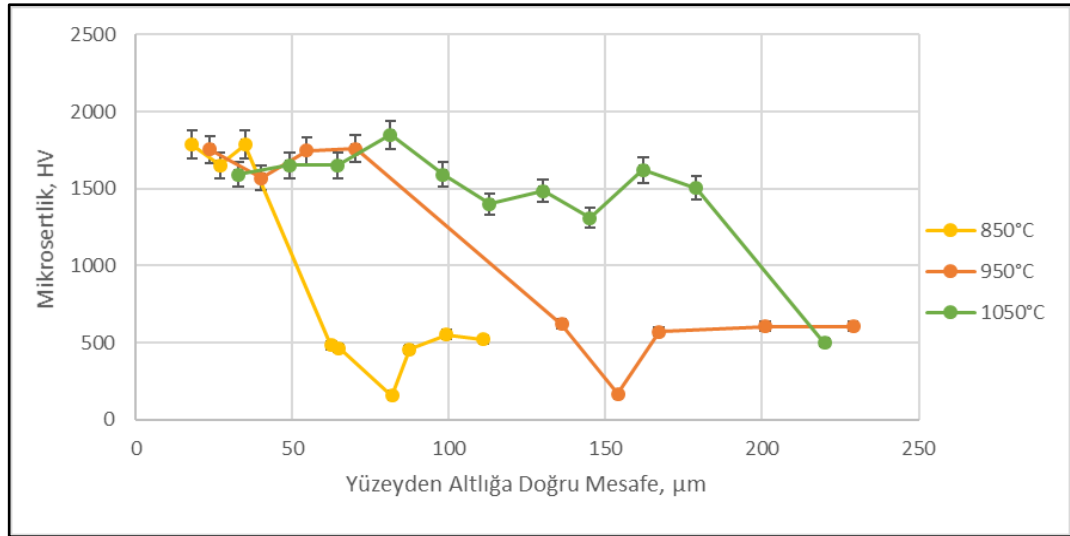
Şekil 5.29: 850°C’de borlanan DIN 1.2738 numunesinin kesitinde oluşturulan Vickers sertlik izlerinin tipik SEM görüntüsü.



Şekil 5.30: 950°C’de borlanan DIN 1.2738 numunesinin kesitinde oluşturulan Vickers sertlik izlerinin tipik SEM görüntüsü.



Şekil 5.31: 1050°C’de borlanan DIN 1.2738 numunesinin kesitinde oluşturulan Vickers sertlik izlerinin tipik SEM görüntüsü.



Şekil 5.32: DIN 1.2738 numunesinin farklı sıcaklıklarda yüzeyden altlığa doğru mikrosertlik değişimi.

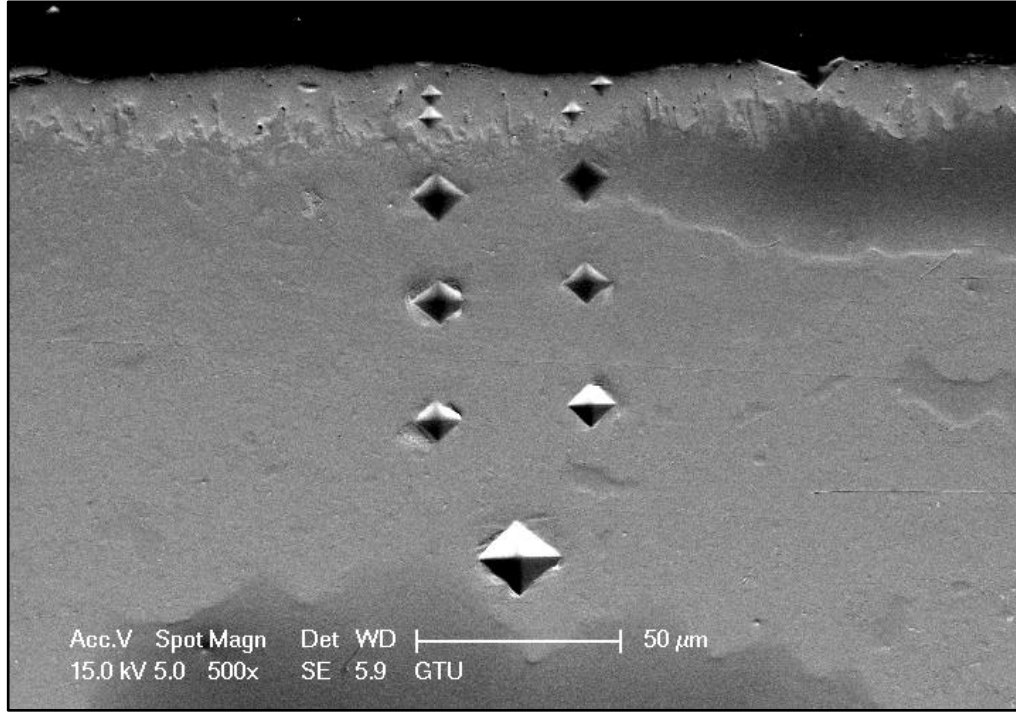
Şekil 5.32’de DIN 1.2738 numunesinin farklı sıcaklıklarda yüzeyden altlığa doğru mikrosertlik değişimi verilmiştir. 850°C’de yüzeyden altlık malzemeye doğru alınmış olan mikrosertlik izlerinden elde edilen en yüksek sertlik değeri, 1787 HV olup, borür tabaka üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Sertlik değerleri 157 HV (altlık bölgesi) ile 1787 HV (borür tabaka) arasında olup, borür tabakadan altlık malzemeye

doğru sertlik değeri azalarak ilerlemektedir. 950°C’de Yüzeyden altlık malzemeye doğru alınmış olan mikrosertlik izlerinden elde edilen en yüksek sertlik değeri, 1758 HV olup, borür tabaka üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Sertlik değerleri 165 HV (altlık bölgesi) ile 1758 HV (borür tabaka) arasında olup, sertlik değeri borür tabakadan altlık malzemeye doğru azalarak ilerlemektedir. 1050°C’de Yüzeyden altlık malzemeye doğru alınmış olan mikrosertlik izlerinden elde edilen en yüksek sertlik değeri, 1849 HV olup, borür tabaka üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Borür tabaka üzerinden elde edilen en yüksek sertlik değerinin, altlık malzemenin yaklaşık 5 katı olduğu görülmüştür. Sertlik değerleri 500 HV (altlık bölgesi) ile 1849 HV (borür tabaka) arasında olup, sertlik değeri borür tabakadan altlık malzemeye doğru azalarak ilerlemektedir.

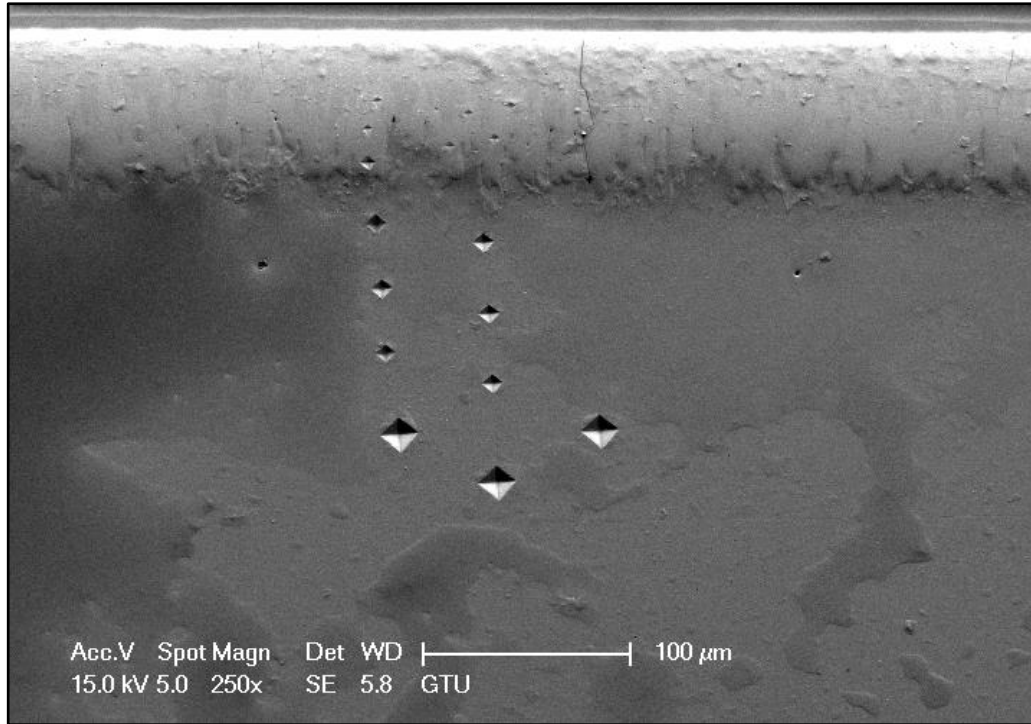
Şekil 5.33’te DIN 1.2842 numunesinin 850°C’de Vickers sertlik izlerinin tipik SEM görüntüsü verilmiş olup, kaplama yüzeyinden altlığa doğru mesafeye bağlı olarak mikrosertlik değerlerinin değişimi görülmektedir. Altlık malzemedan alınan sertlik izlerinin borür tabakadan alınan sertlik izlerinden daha büyük olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum, borür tabaka sertlik değerlerinin ana malzemeye göre daha yüksek olduğunu desteklemektedir.

Şekil 5.34’te DIN 1.2842 numunesinin 950°C’de Vickers sertlik izlerinin tipik SEM görüntüsü verilmiş olup, kaplama yüzeyinden altlığa doğru mesafeye bağlı olarak mikrosertlik değerlerinin değişimi görülmektedir. Altlık malzemedan alınan sertlik izlerinin borür tabakadan alınan sertlik izlerinden daha büyük olduğu görülmektedir. Bu durum borür tabaka sertlik değerinin altlık bölgesi sertlik değerlerine göre daha yüksek olduğunu desteklemektedir.

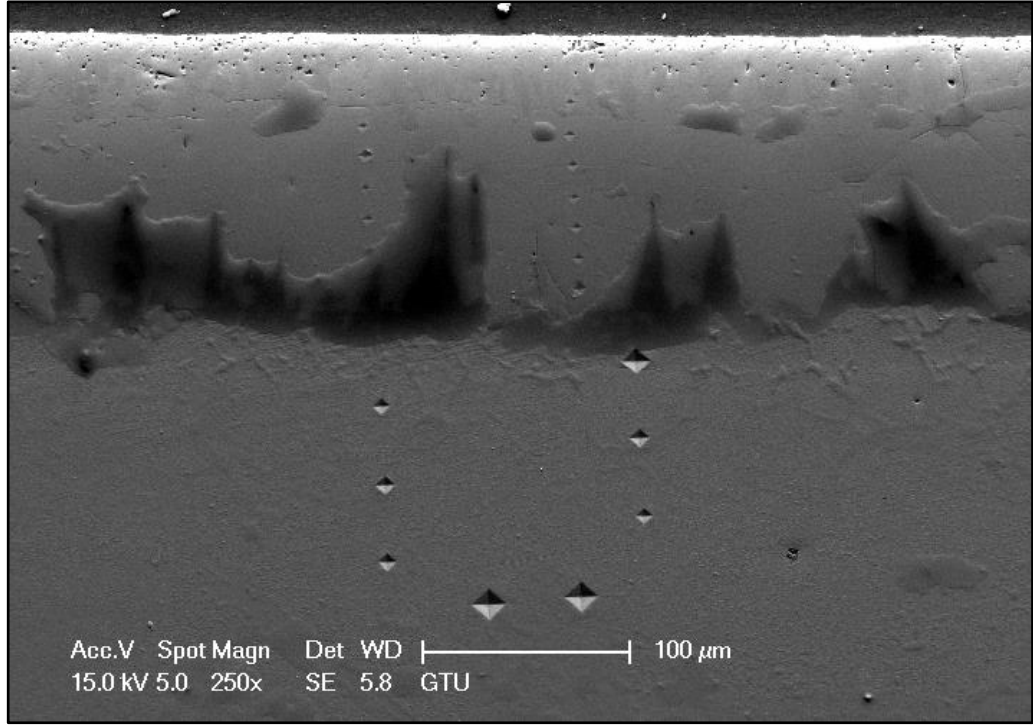
Şekil 5.35’te DIN 1.2842 numunesinin 1050°C’de Vickers sertlik izlerinin tipik SEM görüntüsü verilmiş olup, kaplama yüzeyinden altlığa doğru mesafeye bağlı olarak mikrosertlik değerlerinin değişimi görülmektedir. Altlık malzemedan alınan sertlik izlerinin borür tabakadan alınan sertlik izlerinden daha büyük olduğu görülmektedir.



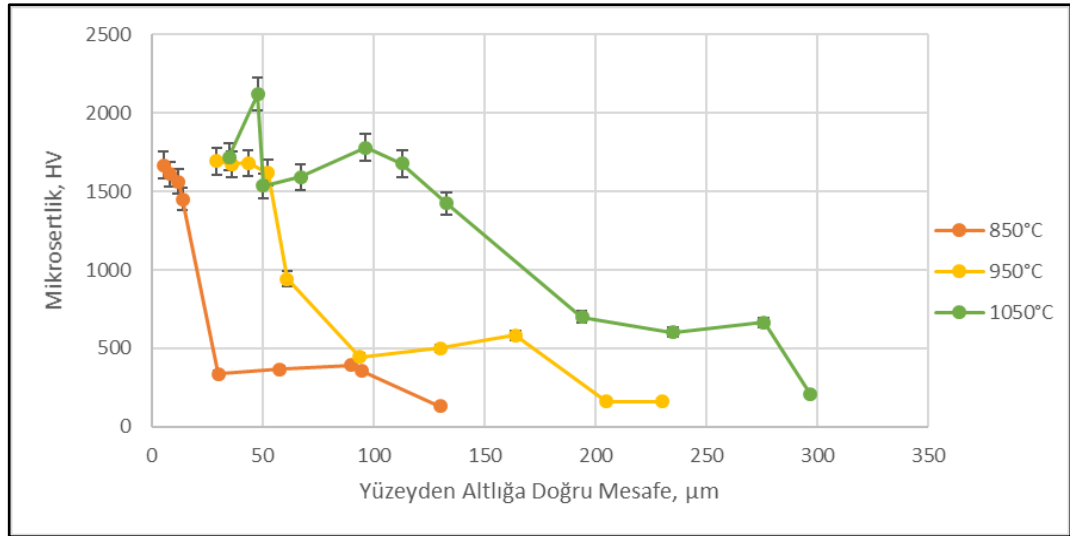
Şekil 5.33: 850°C’de borlanan DIN 1.2842 numunesinin kesitinde oluşturulan Vickers sertlik izlerinin tipik SEM görüntüsü.



Şekil 5.34: 950°C’de borlanan DIN 1.2842 numunesinin kesitinde oluşturulan Vickers sertlik izlerinin tipik SEM görüntüsü.



Şekil 5.35: 1050°C’de borlanan DIN 1.2842 numunesinin kesitinde oluşturulan Vickers sertlik izlerinin tipik SEM görüntüsü.



Şekil 5.36: DIN 1.2842 numunesinin farklı sıcaklıklarda yüzeyden altlığa doğru mikrosertlik değişimi.

Şekil 5.36’da DIN 1.2842 numunesinin farklı sıcaklıklarda yüzeyden altlığa doğru mikrosertlik değişimi verilmiştir. 850°C’de yüzeyden altlık malzemeye doğru alınmış olan mikrosertlik izlerinden elde edilen, en yüksek sertlik değeri 1668 HV olup, borür tabaka üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Borür tabaka üzerinden elde edilen en yüksek sertlik değerinin, altlık malzemenin yaklaşık 8 katı olduğu

görülmüştür. Sertlik değerleri 132 HV (altlık bölgesi) ile 1668 HV (borür tabaka) arasında olup, sertlik değeri borür tabakadan altlık malzemeye doğru azalarak ilerlemektedir. 950°C’de yüzeyden altlık malzemeye doğru alınmış olan mikrosertlik izlerinden elde edilen en yüksek sertlik değeri 1691 HV olup, borür tabaka üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Borür tabaka üzerinden elde edilen en yüksek sertlik değerinin, altlık malzemenin yaklaşık 9 katı olduğu görülmüştür. Sertlik değerleri 160 HV (altlık bölgesi) ile 1691 HV (borür tabaka) arasında olup, sertlik değeri borür tabakadan altlık malzemeye doğru azalarak ilerlemektedir. 1050°C’de yüzeyden altlık malzemeye doğru alınmış olan mikrosertlik izlerinden elde edilen en yüksek sertlik değeri, 2118 HV olup, borür tabaka üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Sertlik değerleri 204 HV (altlık bölgesi) ile 2118 HV (borür tabaka) arasında olduğu görülmektedir. Borür tabakadan altlık malzemeye doğru mikrosertlik değeri azalarak ilerlemektedir.

Tablo 5.1: Farklı sıcaklıklarda borlama işlemine tabi tutulan altlık malzemelerin ve bu malzemelerin yüzeyinde oluşan borür tabakanın ortalama sertlik değerleri.

Numune	Altlık Ortalama Mikrosertlik (HV)	Sıcaklık (°C)	Ortalama Mikrosertlik (HV)	Sıcaklık (°C)	Ortalama Mikrosertlik (HV)	Sıcaklık (°C)	Ortalama Mikrosertlik (HV)
DIN 1.2312	315	850	1140	950	1197	1050	1234
DIN 1.2343	225	850	1251	950	1201	1050	1517
DIN 1.2738	335	850	837	950	1055	1050	1459
DIN 1.2842	222	850	902	950	995	1050	1234

Hesaplanan mikrosertlik değerlerinde sıcaklıktan bağımsız olarak saçılma görülmemiştir. Bu durum borür tabakanın homojen olduğunu göstermektedir. Numuneler beraberce değerlendirildiğinde en yüksek ortalama mikrosertlik değerleri 1050°C’de borlanan numunelere aittir. Borlama sıcaklığı arttıkça ortalama mikrosertlik değerlerinin de arttığı görülmüştür. Bu numunelerden en yüksek mikrosertlik değeri DIN 1.2343 çeliğin yüzeyinde oluşan borür tabakada elde edilmiştir (1517 HV).

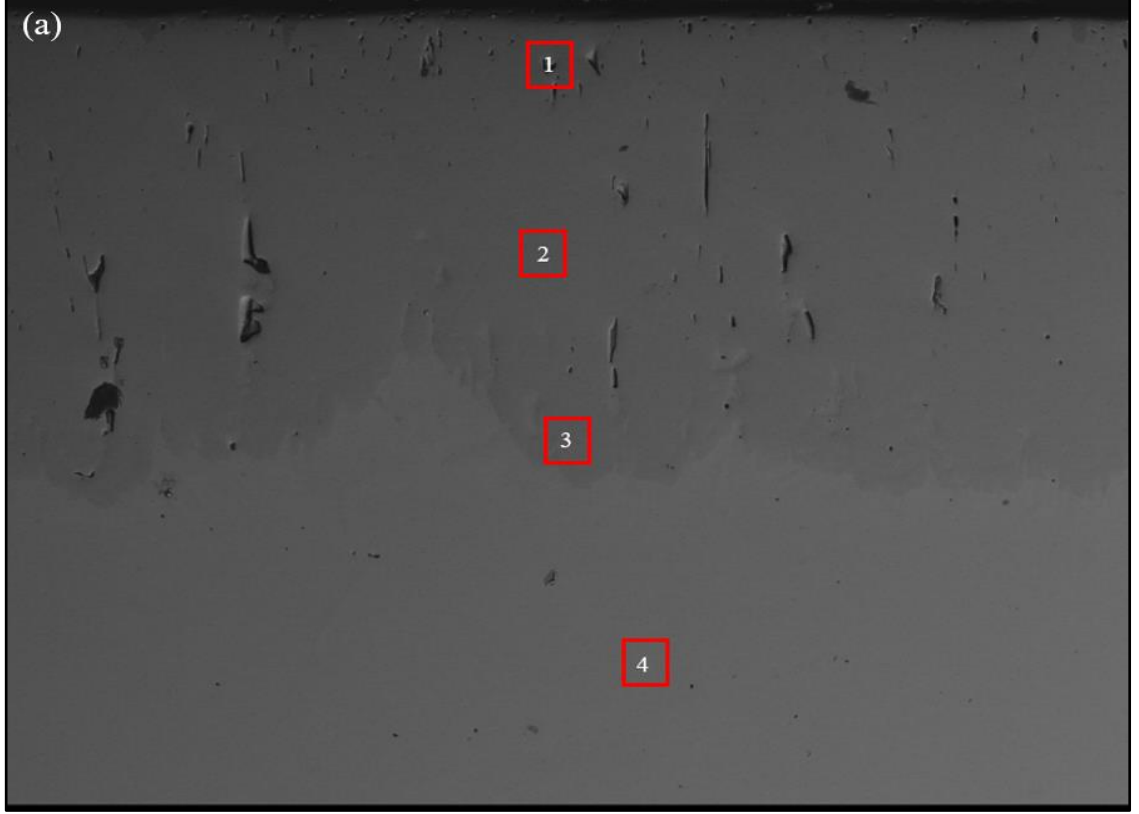
Borlanan tüm numunelerde mikrosertlik, borür tabaka yüzeyinden altlık malzemeye doğru gidildikçe azalma göstermektedir.

5.4. SEM-EDS Analiz Sonuçları

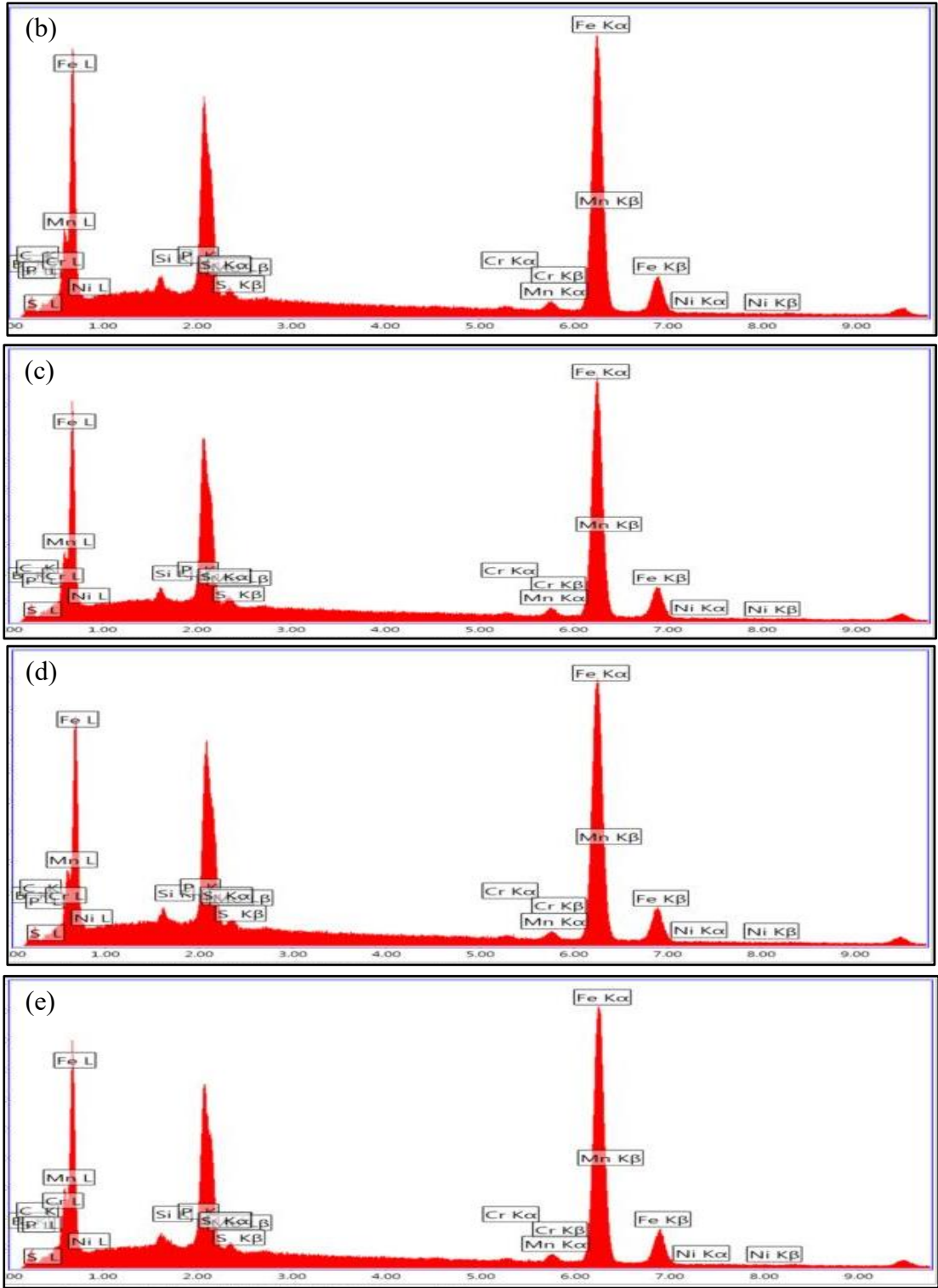
Borlama sonrası oluşan, borür tabakada meydana gelen fazların kimyasal bileşimlerinin net olarak anlaşılması, alaşım elementinin kaplama içerisinde dağılımını ortaya çıkarmak amacıyla detaylı SEM-EDS çalışması yapılmıştır. Alaşımlardaki SEM-EDS analizi yapılırken, kaplama üzerinden en az üç nokta, borür tabakanın altlığın içerisine doğru çökeltiiler meydana getirdiği bölgelerden iki nokta ve altlık bölgesinden en az bir nokta seçilmiştir. Tabaka boyunca yüzeyden altlığa doğru birçok noktada SEM-EDS analizi yapılmış olup, değerler birbirine oldukça yakın olduğundan bu kısımda sadece dört noktadan (kaplama bölgesi, varsa geçiş bölgesi ve altlık bölgesini içerecek şekilde) elde edilen veriler listelenmiştir.

5.4.1. DIN 1.2312

Şekil 5.37’de 1050°C’de 3 saat borlanmış DIN 1.2312 çeliğinin kesitinden alınan SEM görüntüsü, bu görüntüde SEM-EDS analizinin yapıldığı alanların işaretlendiği bölgeler (Şekil 5.37a) ve bu bölgelerden elde edilen SEM-EDS spektrumları (Şekil 5.37b-e) verilmiştir.



Şekil 5.37: 1050°C’de borlanan DIN 1.2312 çeliğinin kesitten alınan SEM fotoğrafı, bu fotoğrafta SEM-EDS analizi yapılan işaretli bölgeler ve bu bölgelerden elde edilen SEM-EDS spektrumları; (a) SEM fotoğrafı ve işaretli bölgeler, (b) ‘1’ ile işaretli bölgenin, (c) ‘2’ ile işaretli bölgenin, (d) ‘3’ ile işaretli bölgenin, (e) ‘4’ ile işaretli bölgenin SEM-EDS spektrumu.



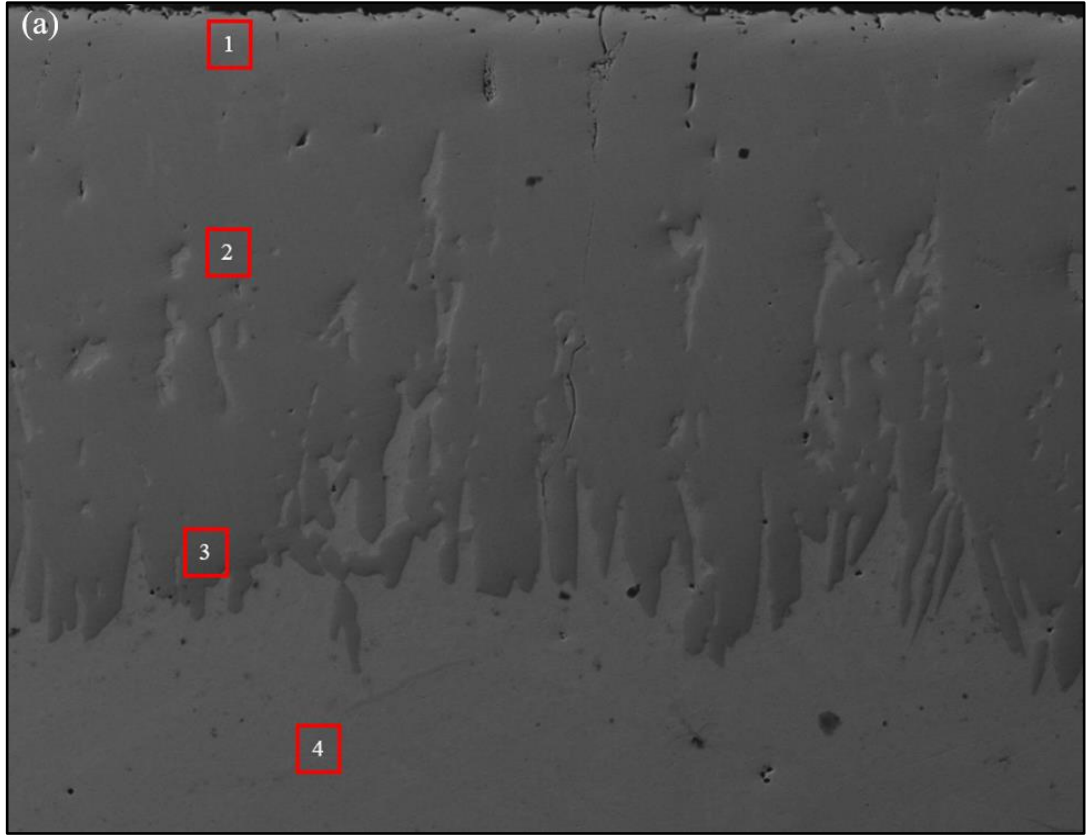
Şekil 5.37: Devam.

Tablo 5.2: 1050°C’de borlanmış DIN 1.2312 çeliğinin Şekil 5.37’de işaretlenmiş bölgelerden yapılan SEM-EDS analiz sonucu elde edilen element miktarları (% atomik).

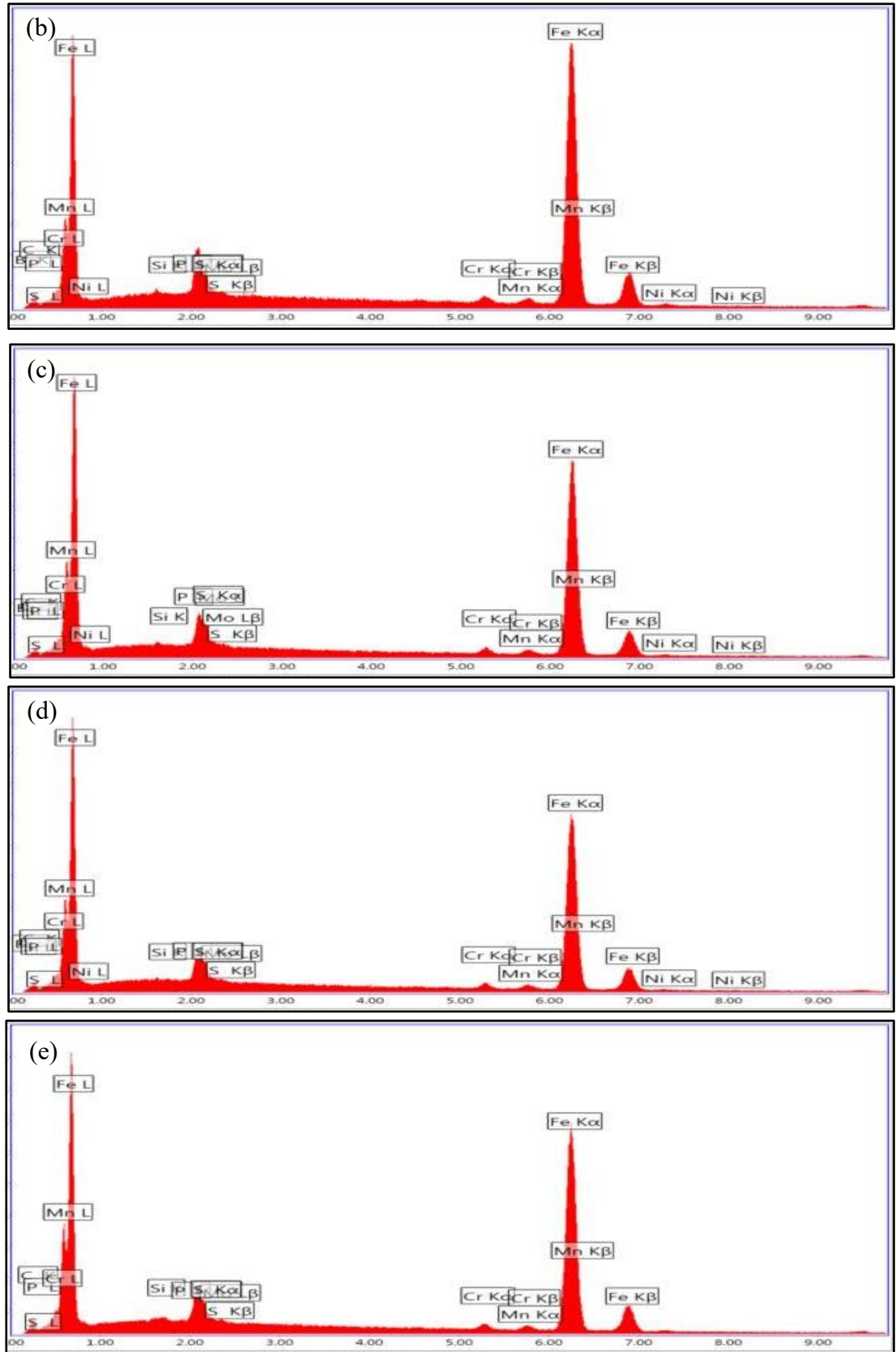
Bölge	Si	Mo	Cr	Mn	Fe	Ni
1	0,95	5,14	0,43	1,76	83,75	0,27
2	1,11	5,36	0,53	1,69	83,45	0,55
3	0,99	5,05	0,42	1,89	84,50	0,26
4	0,95	4,67	0,47	1,81	85,02	0,29

DIN 1.2312 numunesinde, işaretli bölgelerden alınan SEM-EDS analiz sonuçları Tablo 5.2’de verilmiştir. Analiz sonuçları incelendiğinde, Ni miktarının 1, 3 ve 4. bölgelerde yaklaşık olarak aynıyken, 2. bölgede bir miktar arttığı görülmektedir. Fe miktarının 1 ve 2. bölgelerde aynı olduğu görülürken, 3 ve 4. bölgelerde bir miktar arttığı görülmektedir. Cr miktarı 1, 3 ve 4. bölgelerde yaklaşık aynı değerdeyken, 2. bölgede bir miktar arttığı görülmektedir. Mo miktarı 1, 2 ve 3. bölgede yaklaşık olarak aynı iken 4. bölgede yani altlık bölgesinde azaldığı görülmektedir. Si miktarı 1, 3 ve 4. bölgelerde aynı miktarda bulunurken, 2. bölgede küçük bir miktar arttığı görülmektedir.

5.4.2. DIN 1.2842



Şekil 5.38: 1050°C’de borlanan DIN 1.2842 çeliğinin kesitten alınan SEM fotoğrafı, bu fotoğrafta SEM-EDS analizi yapılan işaretli bölgeler ve bu bölgelerden elde edilen SEM-EDS spektrumları; (a) SEM fotoğrafı ve işaretli bölgeler, (b) ‘1’ ile işaretli bölgenin, (c) ‘2’ ile işaretli bölgenin, (d) ‘3’ ile işaretli bölgenin, (e) ‘4’ ile işaretli bölgenin SEM-EDS spektrumu.



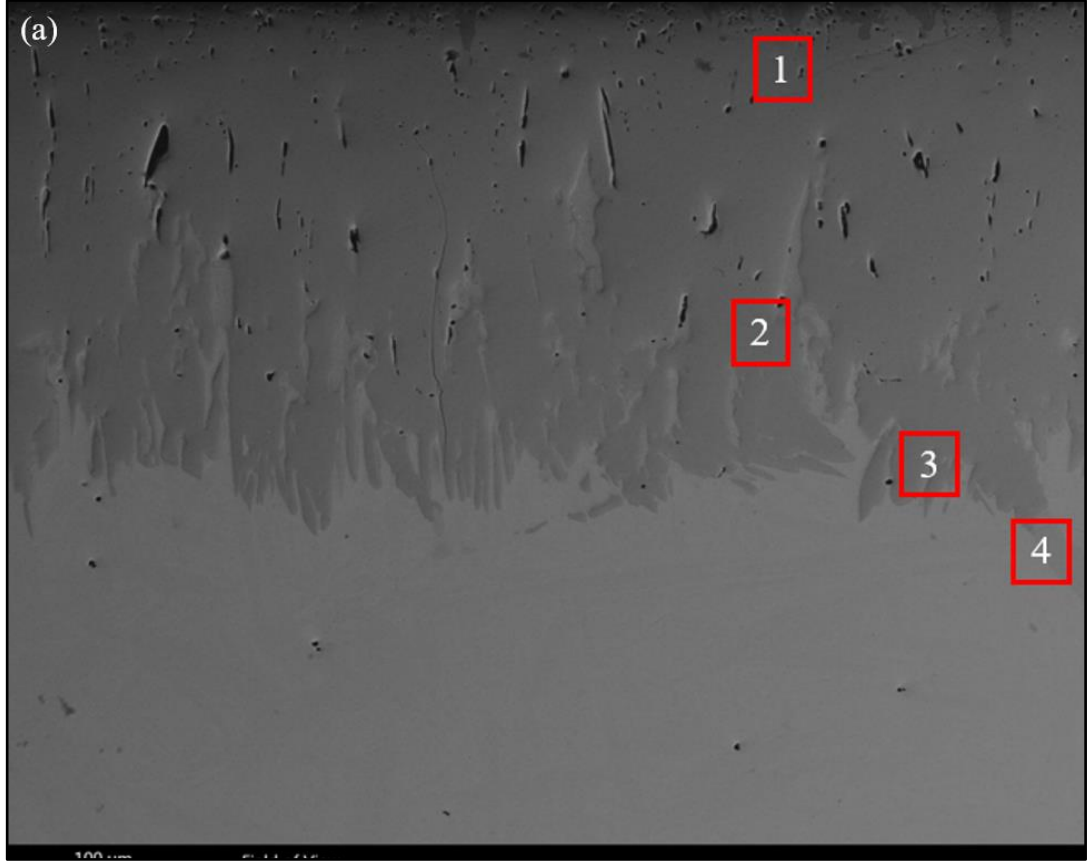
Şekil 5.38: Devam.

Tablo 5.3: 1050°C’de borlanmış DIN 1.2842 çeliğinin Şekil 5.38’de işaretlenmiş bölgelerden yapılan SEM-EDS analiz sonucu elde edilen element miktarları (% atomik).

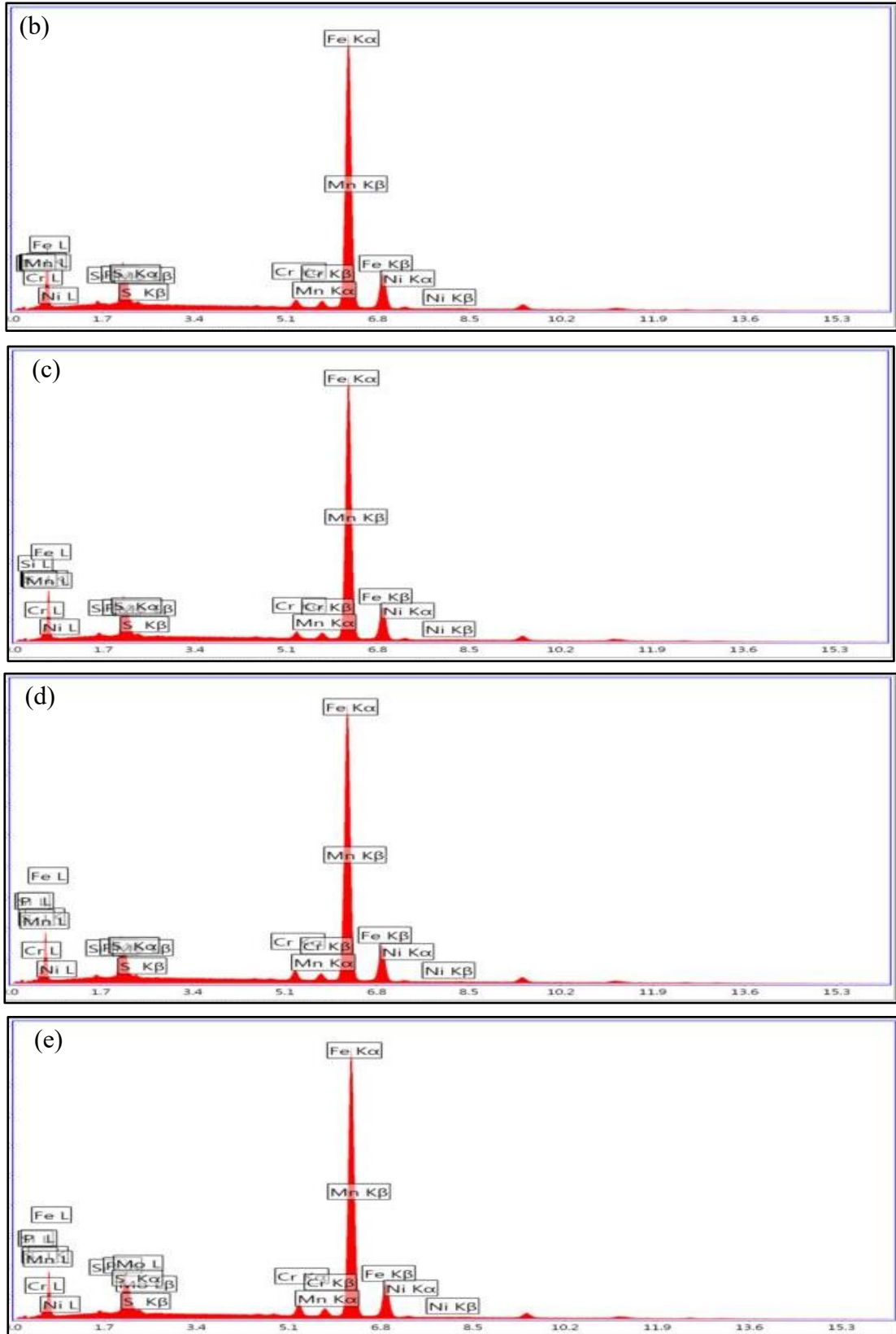
Bölge	Si	Mo	Cr	Mn	Fe	Ni
1	0,20	1,74	1,12	1,27	87,60	1,20
2	0,18	1,88	0,98	1,19	86,94	0,66
3	0,26	1,79	1,05	1,32	85,03	0,86
4	0,35	1,71	1,07	1,26	90,97	0

DIN 1.2842 numunesinde, işaretli bölgelerden alınan SEM-EDS analiz sonuçları Tablo 5.3’de verilmiştir. Analiz sonuçları incelendiğinde, Ni miktarının 2 ve 3. bölgelerde oldukça yakın değerlere sahip olduğu görülürken, 1. bölgede bir miktar daha fazla olduğu ve 4. bölgede (altlık bölgesinde) Ni olmadığı görülmektedir. Fe miktarının 1, 2 ve 3. bölgelerde yaklaşık aynı miktarda olduğu görünürken, 4. bölgede bir miktar arttığı görülmektedir. Cr miktarının 1, 2, 3 ve 4. bölgelerde yaklaşık olarak aynı olduğu görülmektedir. Mo miktarı 2 ve 3. bölgelerde yaklaşık olarak aynı iken 1 ve 4. bölgelerde de yaklaşık olarak aynı değere sahip olduğu görülmektedir. Si miktarı 1, 2 ve 3. bölgelerde aynı miktarda bulunurken, 4. bölgede bir miktar arttığı görülmektedir.

5.4.3. DIN 1.2738



Şekil 5.39: 1050°C’de borlanan DIN 1.2738 çeliğinin kesitten alınan SEM fotoğrafı, bu fotoğrafta SEM-EDS analizi yapılan işaretli bölgeler ve bu bölgelerden elde edilen SEM-EDS spektrumları; (a) SEM fotoğrafı ve işaretli bölgeler, (b) ‘1’ ile işaretli bölgenin, (c) ‘2’ ile işaretli bölgenin, (d) ‘3’ ile işaretli bölgenin, (e) ‘4’ ile işaretli bölgenin SEM-EDS spektrumu.



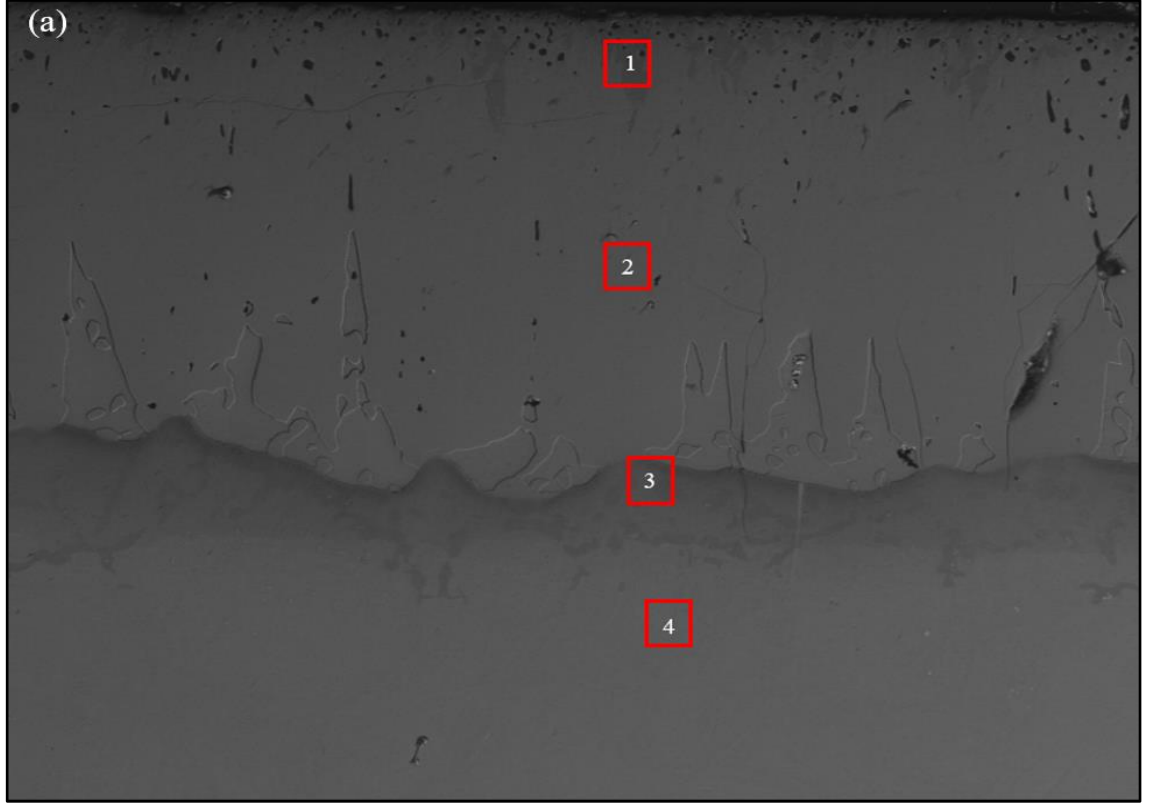
Şekil 5.39: Devam.

Tablo 5.4: 1050°C’de borlanmış DIN 1.2738 çeliğinin Şekil 5.39’da işaretlenmiş bölgelerden yapılan SEM-EDS analiz sonucu elde edilen element miktarları (% atomik).

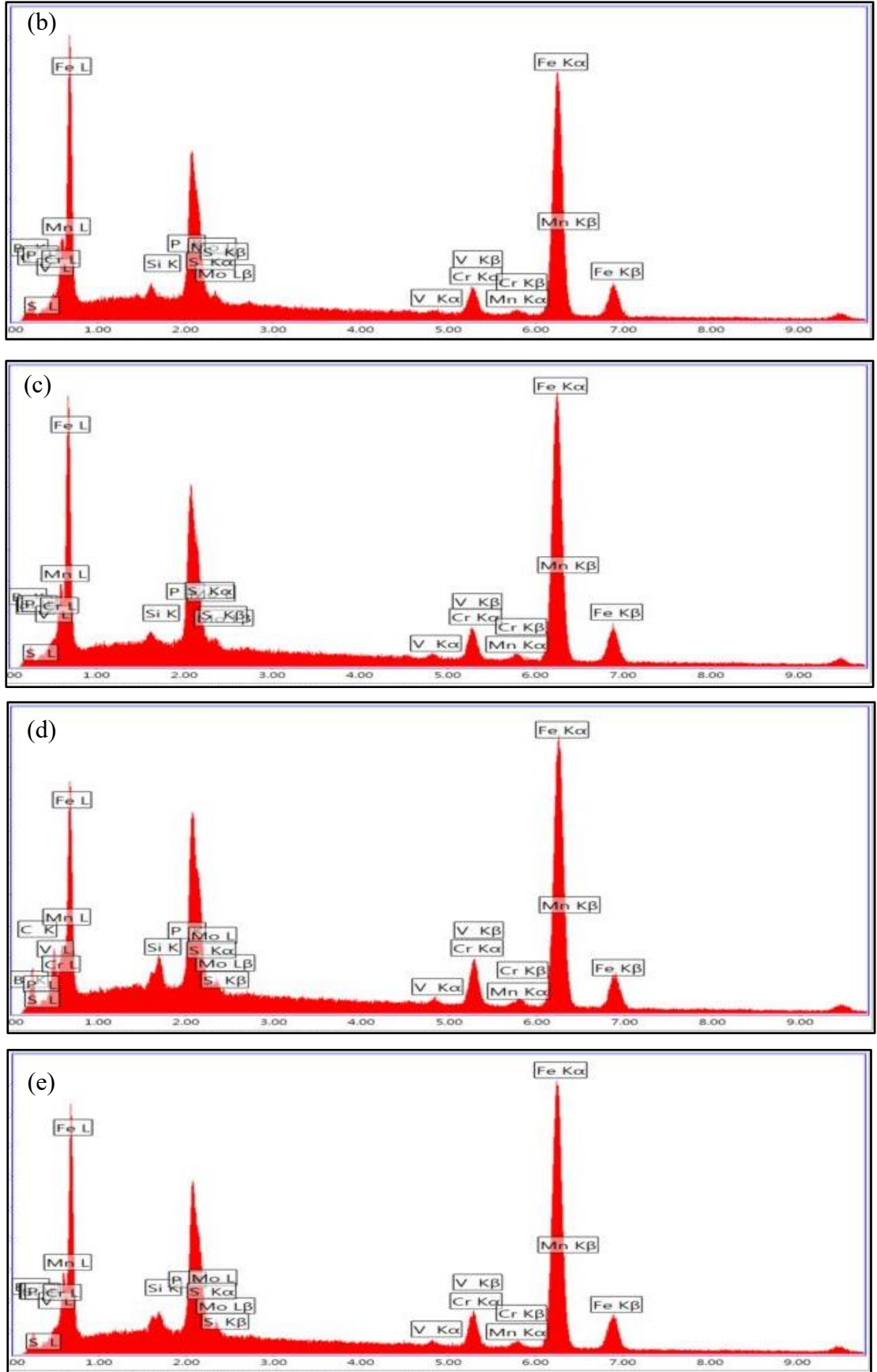
Bölge	Si	Mo	Cr	Mn	Fe	Ni
1	0,93	3,93	1,22	1,49	84,99	1,01
2	0,86	3,61	1,23	1,52	86,84	0,73
3	0,56	3,44	1,75	1,72	86,86	0,73
4	0,22	4,03	2,16	1,92	86,65	0,82

DIN 1.2738 numunesinde, işaretli bölgelerden alınan SEM-EDS analiz sonuçları Tablo 5.4’te verilmiştir. Analiz sonuçları incelendiğinde, Ni miktarının 2 ve 3. bölgelerde aynı değerlere sahip olduğu görülürken, 1 ve 4. bölgelerde bir miktar fazla olduğu görülmektedir. Fe miktarının 2, 3 ve 4. bölgelerde yaklaşık aynı değerlere sahip olduğu ve 1. bölgeye göre bir miktar arttığı görülmektedir. Cr miktarının 1 ve 2. bölgelerde yaklaşık olarak aynı olduğu ancak 3 ve 4. bölgelerde bir miktar arttığı görülmektedir. Mo miktarı 1, 2 ve 3. bölgelerde yaklaşık olarak aynı iken 4. bölgede bir miktar arttığı görülmektedir. Si miktarı 1 ve 2. bölgelerde yaklaşık olarak aynı miktarda bulunurken, 3 ve 4. bölgelerde bir miktar azaldığı görülmektedir. Si oranı altlık bölgede en az miktarda bulunmaktadır.

5.4.4. DIN 1.2343



Şekil 5.40: 1050°C’de borlanan DIN 1.2343 çeliğinin kesitten alınan SEM fotoğrafı, bu fotoğrafta SEM-EDS analizi yapılan işaretli bölgeler ve bu bölgelerden elde edilen SEM-EDS spektrumları; (a) SEM fotoğrafı ve işaretli bölgeler, (b) ‘1’ ile işaretli bölgenin, (c) ‘2’ ile işaretli bölgenin, (d) ‘3’ ile işaretli bölgenin, (e) ‘4’ ile işaretli bölgenin SEM-EDS spektrumu.

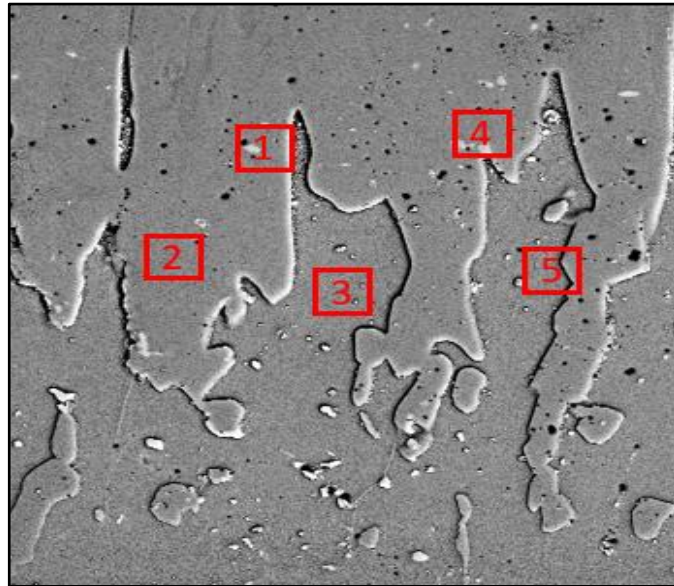


Şekil 5.40: Devam.

Tablo 5.5: 1050°C’de borlanmış DIN 1.2343 çeliğinin Şekil 5.40’da işaretlenmiş bölgelerden yapılan SEM-EDS analiz sonucu elde edilen element miktarları (% atomik).

Bölge	Si	Mo	V	Cr	Mn	Fe
1	1,02	5,98	0,50	4,11	0,47	78,55
2	0,75	5,01	0,46	4,12	0,51	82,67
3	1,73	5,07	0,69	5,73	0,63	75,35
4	1,42	5,20	0,59	4,58	0,60	81,06

DIN 1.2343 numunesinde, işaretli bölgelerden alınan SEM-EDS analiz sonuçları Tablo 5.5’de verilmiştir. Analiz sonuçları incelendiğinde, Fe miktarının 1 ve 3. bölgelerde yaklaşık aynı değerlere sahip olduğu görülürken 2 ve 4. bölgelerde bir miktar arttığı görülmektedir. Cr miktarının 1, 2 ve 4. bölgelerde yaklaşık olarak aynı olduğu ancak 3. bölgede bir miktar arttığı görülmektedir. Mo miktarı 1. bölgede en yüksek miktarda bulunup, 2, 3 ve 4. bölgelerde bir miktar azaldığı görülmektedir. Si miktarı 1 ve 2. bölgelerde yaklaşık olarak aynı miktarda bulunurken, 3 ve 4. bölgelerde bir miktar arttığı görülmektedir. V miktarı 1 ve 2. bölgelerde yaklaşık olarak aynıyken, 3 ve 4. bölgelerde az miktarda artış görülmektedir.



Şekil 5.41: 950°C’de borlanan DIN 1.2343 çeliğinin kesitten alınan SEM-EDS fotoğrafı ve bu fotoğrafta SEM-EDS analizi yapılan işaretli bölgeler.

Tablo 5.6: 950°C’de borlanmış DIN 1.2343 çeliğinin Şekil 5.41’de işaretlenmiş bölgelerden yapılan SEM-EDS analiz sonucu elde edilen element miktarları (% atomik).

Bölge	Si	Mo	Cr	Mn	Fe
1	0,84	23,28	6,35	0,60	56,38
2	0,82	5,14	4,37	0,54	78,41
3	4,44	4,64	1,00	0,37	79,57
4	0,76	17,85	5,21	0,51	63,98
5	4,57	4,75	1,03	0,21	80,42

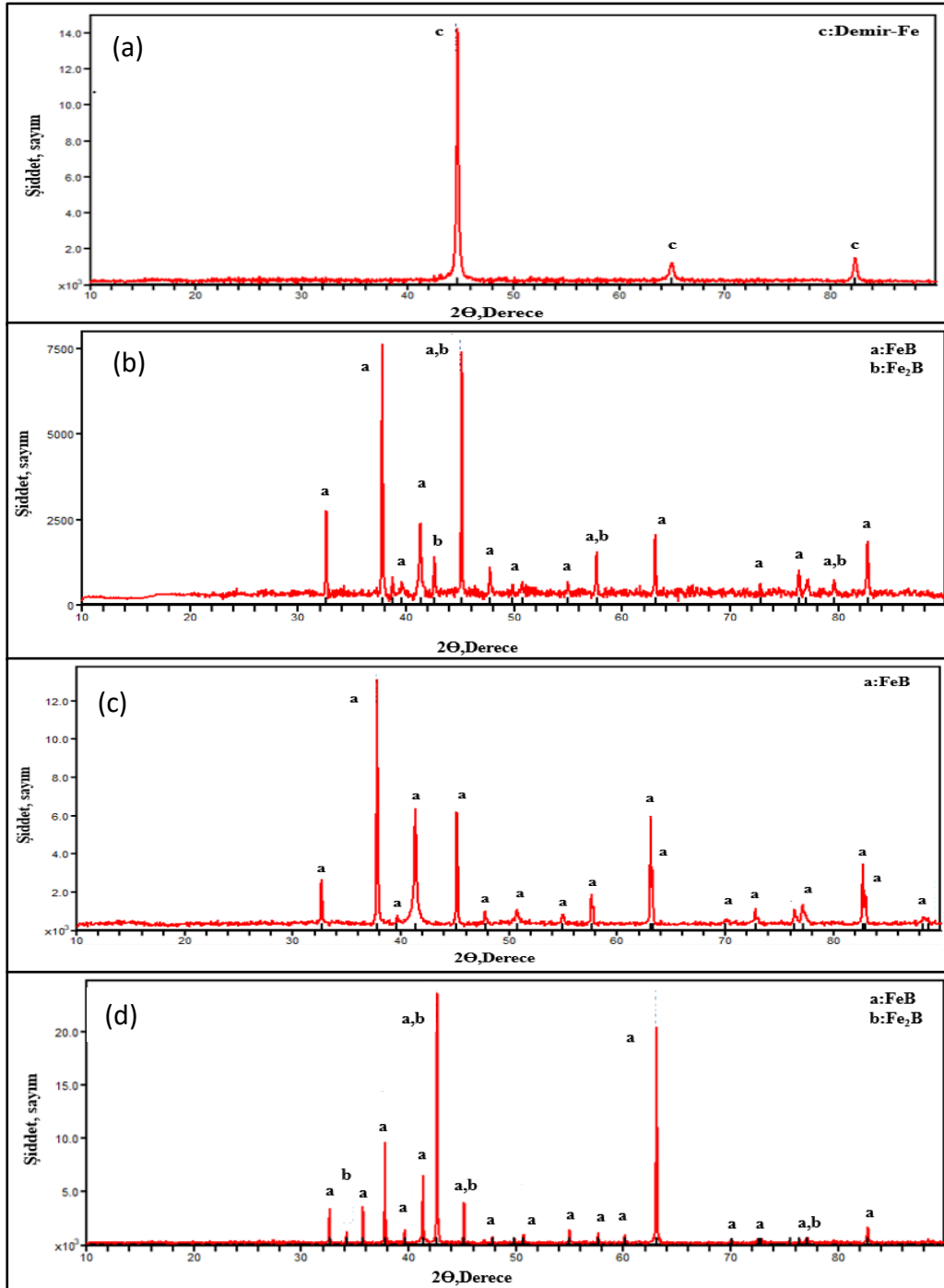
DIN 1.2343 numunesinde, işaretli bölgelerden alınan SEM-EDS analiz sonuçları Tablo 5.6’da verilmiştir. 950°C’de 3 saat borlanmış DIN 1.2343 çeliğinden alınan SEM görüntülerinde beyaz karbürler olduğu görülmektedir. Görülen beyaz karbürlerin anlaşılabilir olması için, borür tabaka üzerinde yer alan 5 bölge için SEM-EDS analizi yapılmıştır. Seçilen 1. ve 4. bölgeler özellikle beyaz karbürlere denk gelecek şekilde alınmış olup, diğer bölgelerden de karşılaştırma yapmak amacı ile SEM-EDS analizi yapılmıştır. 1 ve 4. bölgelerden alınan sonuçlar incelendiğinde Mo miktarının arttığı belirgin şekilde görülmektedir. Mo miktarının 2, 3 ve 5. bölgelerde oldukça yakın değerlerde olduğu görülmektedir. Mo miktarındaki bariz artış nedeni ile beyaz karbür şeklinde görmüş olduğumuz noktaların Mo₂B olduğu düşünülmektedir. Fe miktarı, Mo miktarının en yüksek görüldüğü 1 ve 4. bölgelerde birbirine yakın ve en az miktarda görülmektedir. Fe miktarının 2, 3 ve 5. bölgelerde oldukça yakın değerlerde olduğu görülmektedir. Cr miktarı 1, 2 ve 4. bölgelerde oldukça yakın değerlerde görülürken, 3 ve 5. bölgelerde miktarın azaldığı görülmektedir. Si miktarı 1, 2 ve 4. bölgelerde oldukça yakın değerlerde görülürken, 3 ve 5. bölgelerde arttığı görülmektedir.

5.5. XRD Analizi

Kaplama işlemi öncesi numunelerin mevcut durumdaki fazları ve kaplama işlemi sonrası, kaplama tabakasında oluşan fazları tespit etmek için XRD analizi kullanılmıştır. Farklı sıcaklıklarda 3 saat borlama işlemine tabi tutulan çelik numunelerin yüzeylerinde oluşan borür tabakalarındaki fazlar XRD kullanılarak belirlenmeye çalışılmıştır. Numunelere ait XRD desenleri borlama işlemi öncesi ve borlama işlemi sonrası olacak şekilde aşağıda verilmiştir.

5.5.1. DIN 1.2312

DIN 1.2312 çeliğinin borlama öncesi ve farklı sıcaklıklarda borlama sonrası yüzeyinden elde edilen XRD desenleri Şekil 5.42’de verilmiştir.

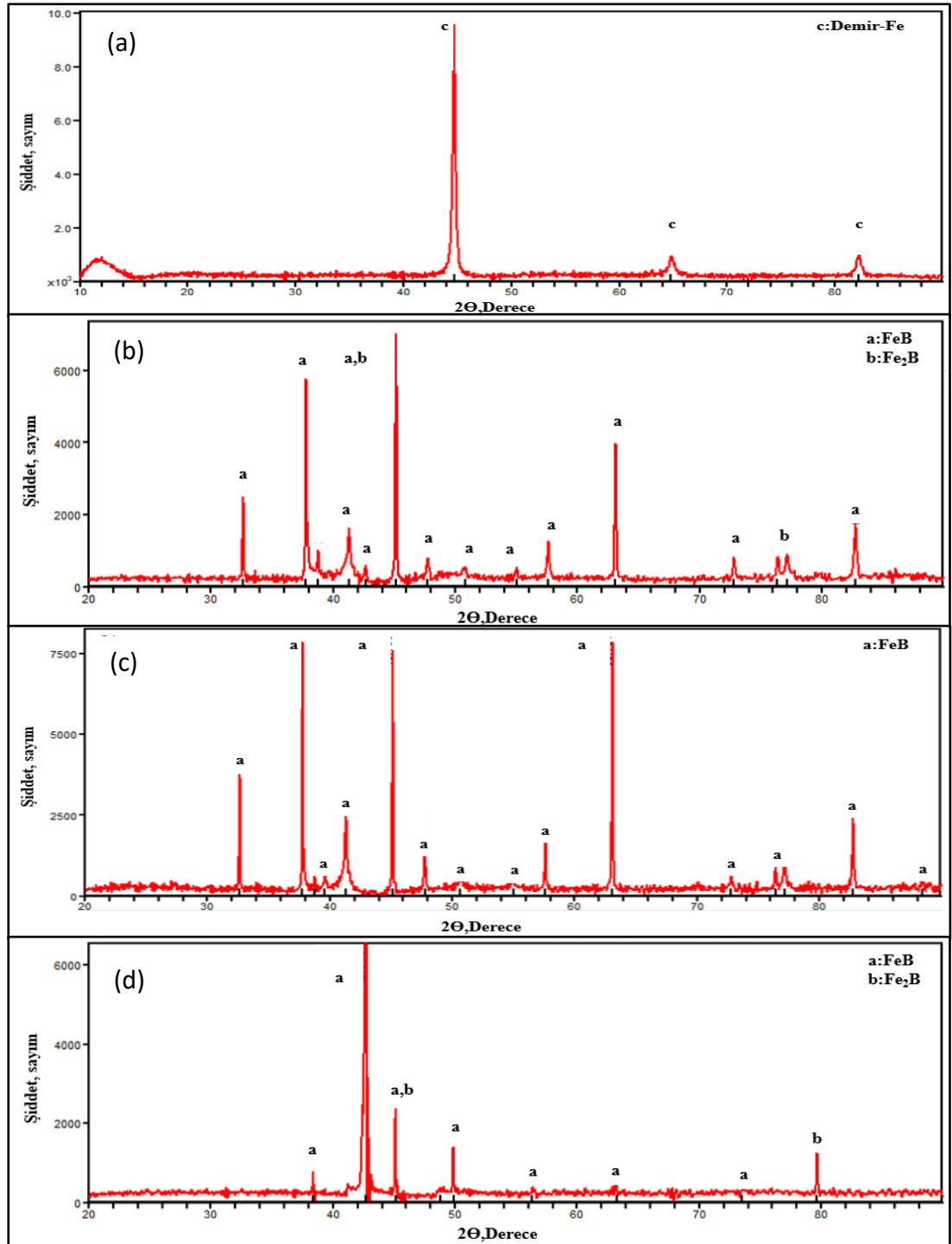


Şekil 5.42: Borlama öncesi ve farklı sıcaklıklarda borlama sonrası DIN 1.2312 çeliğinin yüzeyinden elde edilen XRD desenleri; (a) Borlama öncesi, (b) 850°C, (c) 950°C, (d) 1050°C.

Borlama öncesi altlık malzemeye ait XRD desenindeki (Şekil 5.42) pikler ilgili yazılım kullanılarak XRD veri tabanındaki ilgili fazlar ile eşleştirilmiştir. Bu eşleştirme sonucunda XRD desenindeki piklerin Fe fazına ait olduğu belirlenmiştir. Borlama sonrası numune yüzeyinde borür fazlarının olduğu açıkça görülmektedir (Şekil 5.42b-d).

850°C’de borlanan numune yüzeyinden elde edilen XRD deseni (Şekil 5.42b) incelendiğinde oluşmasını beklediğimiz borür fazları (FeB ve Fe₂B) görülmüştür. 950°C’de borlanan numune yüzeyinden elde edilen XRD deseni (Şekil 5.42c) daha gevrek ve sert olan FeB fazı oluştuğunu göstermiştir. 1050°C’de borlanan numune yüzeyinden elde edilen XRD deseni (Şekil 5.42d) incelendiğinde FeB ve Fe₂B fazlarının olduğu görülmektedir. XRD ile elde edilen sonuçlar borlanan numunelerin kesitinden elde edilen mikroyapı inceleme sonuçlarını (Şekil 5.1-5.3) teyit etmektedir.

5.5.2. DIN 1.2842

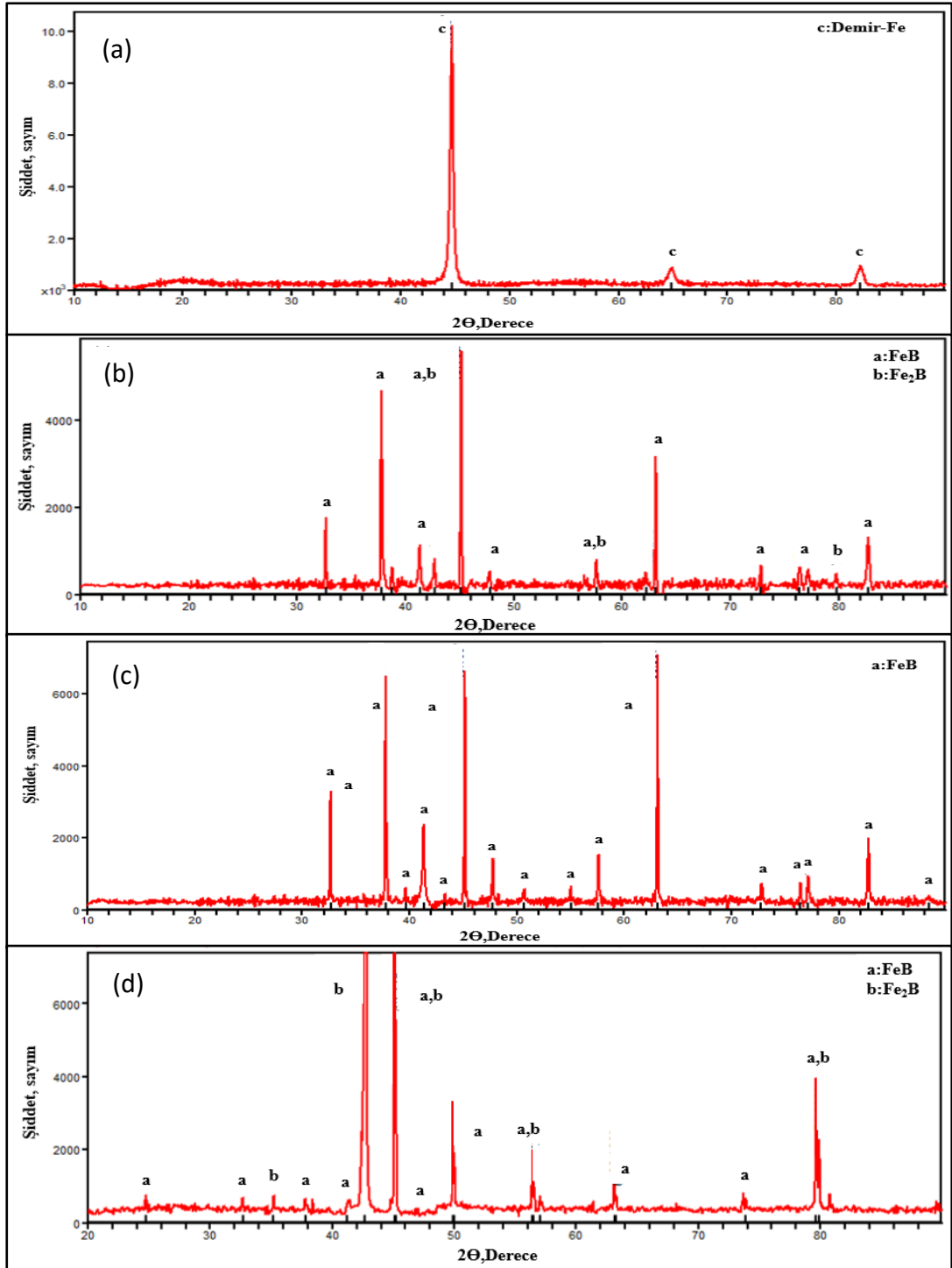


Şekil 5.43: Borlama öncesi ve farklı sıcaklıklarda borlama sonrası DIN 1.2842 çeliğinin yüzeyinden elde edilen XRD desenleri; (a) Borlama öncesi, (b) 850°C, (c) 950°C, (d) 1050°C.

Borlama öncesi altlık malzemeye ait XRD desenindeki (Şekil 5.43) pikler ilgili yazılım kullanılarak XRD veri tabanındaki ilgili fazlar ile eşleştirilmiştir. Bu eşleştirme sonucunda bu XRD desenindeki piklerin Fe fazına ait olduğu belirlenmiştir. Borlama sonrası numune yüzeyinde borür fazlarının olduğu açıkça görülmektedir (Şekil 5.43b-d).

850°C’de borlanan numune yüzeyinden elde edilen XRD deseni (Şekil 5.43b) incelendiğinde FeB ve Fe₂B, fazlarının olduğu gözlemlenmiştir. 950°C’de borlanan numune yüzeyinden elde edilen XRD deseni (Şekil 5.43c) daha gevrek ve sert olan FeB fazı görülmüştür. 1050°C’de borlanan numune yüzeyinden elde edilen XRD deseni (Şekil 5.43d) incelendiğinde FeB ve Fe₂B fazının oluştuğunu göstermiştir. XRD ile elde edilen sonuçlar borlanan numunelerin kesitinden elde edilen mikroyapı inceleme sonuçlarını (Şekil 5.4-5.6) teyit etmektedir.

5.5.3. DIN 1.2738

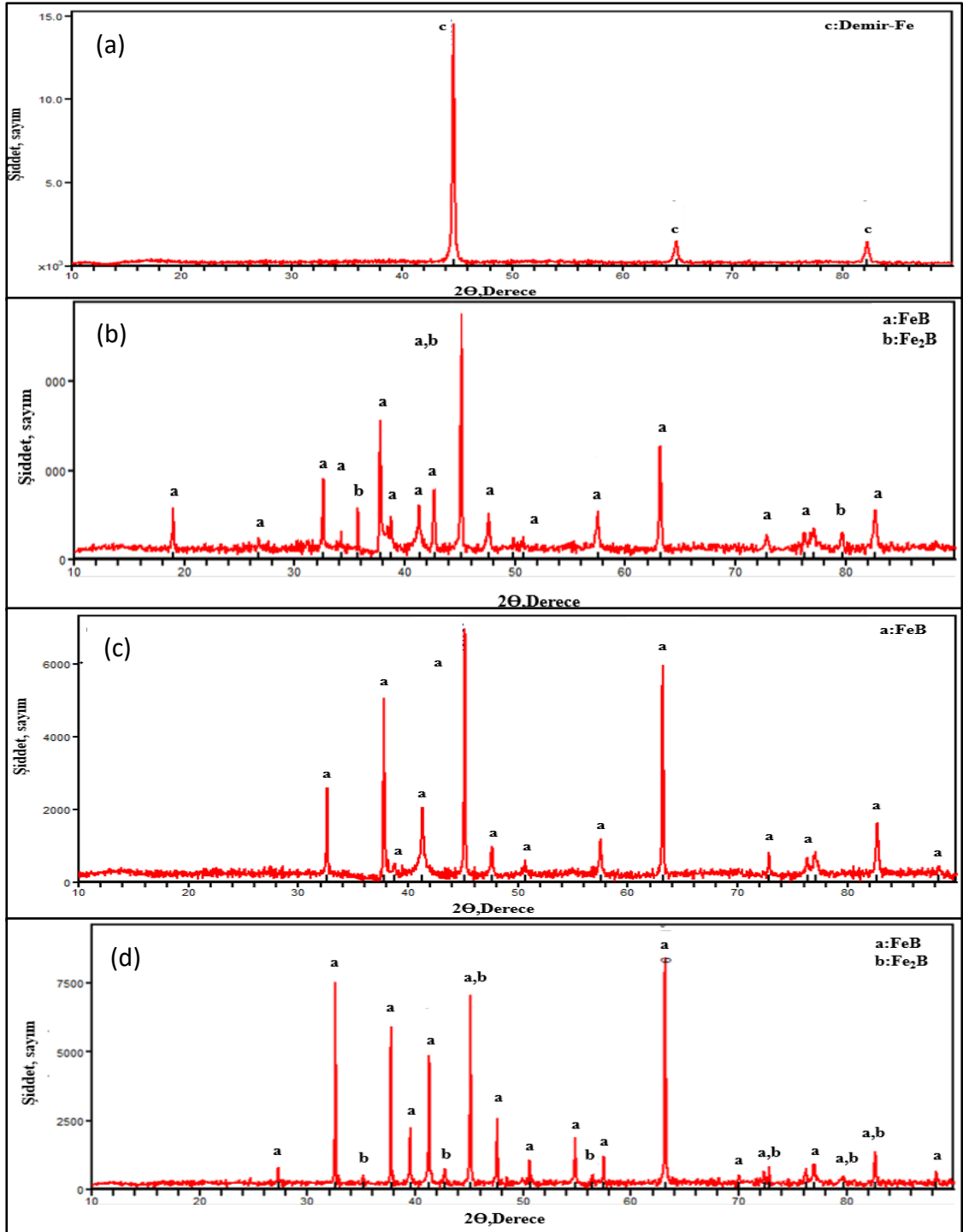


Şekil 5.44: Borlama öncesi ve farklı sıcaklıklarda borlama sonrası DIN 1.2738 çeliğinin yüzeyinden elde edilen XRD desenleri; (a) Borlama öncesi, (b) 850°C, (c) 950°C, (d) 1050°C.

Borlama öncesi altlık malzemeye ait XRD desenindeki (Şekil 5.44) pikler ilgili yazılım kullanılarak XRD veri tabanındaki ilgili fazlar ile eşleştirilmiştir. Bu eşleştirme sonucunda bu XRD desenindeki piklerin Fe fazına ait olduğu belirlenmiştir. Borlama sonrası numune yüzeyinde borür fazlarının olduğu açıkça görülmektedir (Şekil 5.44b-d).

850°C’de borlanan numune yüzeyinden elde edilen XRD deseni (Şekil 5.44b) incelendiğinde FeB ve Fe₂B, fazlarının olduğu gözlemlenmiştir. 950°C’de borlanan numune yüzeyinden elde edilen XRD deseni (Şekil 5.44c) daha gevrek ve sert olan FeB fazı oluşmuştur. 1050°C’de borlanan numune yüzeyinden elde edilen XRD deseni (Şekil 5.44d) incelendiğinde FeB ve Fe₂B fazlarının oluştuğunu göstermiştir. XRD ile elde edilen sonuçlar borlanan numunelerin kesitinden elde edilen mikroyapı inceleme sonuçlarını (Şekil 5.7-5.9) teyit etmektedir.

5.5.4. DIN 1.2343



Şekil 5.45: Borlama öncesi ve farklı sıcaklıklarda borlama sonrası DIN 1.2343 çeliğinin yüzeyinden elde edilen XRD desenleri; (a) Borlama öncesi, (b) 850°C, (c) 950°C, (d) 1050°C.

Borlama öncesi altlık malzemeye ait XRD desenindeki (Şekil 5.45) pikler ilgili yazılım kullanılarak XRD veri tabanındaki ilgili fazlar ile eşleştirilmiştir. Bu eşleştirme sonucunda bu XRD desenindeki piklerin Fe fazına ait olduğu belirlenmiştir. Borlama sonrası numune yüzeyinde borür fazlarının olduğu açıkça görülmektedir (Şekil 5.45b-d).

850°C’de borlanan numune yüzeyinden elde edilen XRD deseni (Şekil 5.45b) incelendiğinde FeB ve Fe₂B borür fazlarının olduğu gözlemlenmiştir. 950°C’de borlanan numune yüzeyinden elde edilen XRD deseni (Şekil 5.45c) daha gevrek ve sert olan FeB fazı oluşmuştur. 1050°C’de borlanan numune yüzeyinden elde edilen XRD deseni (Şekil 5.45d) incelendiğinde FeB ve Fe₂B fazları oluştuğunu göstermiştir. XRD ile elde edilen sonuçlar borlanan numunelerin kesitinden elde edilen mikroyapı inceleme sonuçlarını (Şekil 5.10-5.12) teyit etmektedir.

6. DEĞERLENDİRME

Farklı sıcaklıklarda (850°C, 950°C ve 1050°C) 3 saat süre ile borlanmış dört farklı çelik (DIN 1.2312, DIN 1.2842, DIN 1.2738, DIN 1.2343) numunenin, kesitten alınan OM ve SEM görüntüleri incelenmiştir. DIN 1.2312, DIN 1.2842 ve DIN 1.2738 numunelerinde 850°C ve 950°C’de borlama işlemi sonucunda, elde edilen SEM görüntülerinde kontrast değişikliğine istinaden iki farklı bölge gözlenmiştir. Bu bölgeler; borür tabakası ve altlık malzeme bölgesidir. Literatürde yer alan çalışmalar ile beraber değerlendirildiğinde koyu olan bölgenin FeB fazı olduğu ve daha açık renk olan bölgenin ise Fe₂B fazı olduğu ve borür tabakada bu iki faz kontrast farkından rahatça ayırt edilebildiği görülmüştür [43].

Her üç sıcaklıkta borlama işlemine tabi tutulan numunelerden elde edilen XRD spektrumları incelendiğinde, dört numune için de borlama işlemi sonrası 850°C’de FeB ve Fe₂B fazlarına ait pikler görülmekte olup, 950°C daha gevrek ve sert olan FeB fazına ait pikler görülmektedir. 1050°C’de ise FeB ve Fe₂B fazlarına ait pikler görülmektedir. Literatüre göre borlama sonucu oluşan faz FeB’den ibaret ise kalıcı gerilim çekme kuvveti etkisindedir [38]. FeB fazının Fe₂B fazına göre daha kırılgan olduğu yapılan çalışmalarda görülmektedir [42]. Bu nedenle tabakalarda ayrılmaya ve kırılmaya neden olabilecek FeB fazının tek başına oluşması istenmez. Dört numune için de 950°C’de borlama işlemi sonrası ısıtma işlemi ihtiyacı doğacağı değerlendirilebilir. Borlama öncesi numunelerde yalnızca Fe fazı bulunmaktadır. Demir esaslı malzemelerin borlanması sonucu yapılan XRD sonuçlarında artan bor miktarı ile FeB ve Fe₂B fazlarına ait pikler oluştuğu belirtilmiştir. İlgili literatüre göre malzeme yüzeyinde önce Fe₂B fazı oluşurken, artan bor potansiyeline bağlı olarak, Fe₂B fazının borür tabakasının dış kısmından başlayarak FeB fazına dönüştüğü belirtilmiştir [11]. Elde edilen SEM görüntülerinde renk farklılığı ile ayırt edilen bu fazlar XRD sonuçlarını desteklemektedir ve Fe₂B fazının altlık bölgesine yakın yerde meydana geldiği görülmektedir.

Borür tabakada meydana gelen fazların kimyasal bileşimlerinin tespiti için dört numune için 1050°C’de detaylı SEM-EDS çalışması yapılmış ve elde edilen sonuçlar, sonuçlar bölümünde paylaşılmıştır. DIN 1.2312, DIN 1.2842 ve DIN 1.2738 numunelerinden elde edilen SEM-EDS analizinde element miktarlarının borür tabakadan altlığa doğru çok büyük miktarda değişiklik göstermediği görülmektedir.

DIN 1.2343 numunesinin 850°C’de kesitten alınan OM ve SEM görüntülerinde, borür bölgesi ve altlık bölgesi görülürken 950°C’de elde edilen görüntülerinde, beyaz çökelti benzeri yapılar görülmektedir. Özellikle borür tabakası üzerinde beyaz çökelti benzeri yapıların görülmüş olması kirlilik kaynaklı olmadığı konusunda yönlendirici olmuştur. DIN 1.2343 numunesinin kesitten alınan SEM görüntülerinde, Cr ve Mo oranının artmasıyla birlikte altlık ve borür tabakasına ilaveten geçiş bölgesinin varlığı da oluşan çökelti benzeri yapılardan açık bir şekilde görülmektedir. Özellikle 950°C’de yapılmış olan borlama sonucu elde edilen beyaz çökelti benzeri yapılardan alınan SEM-EDS analizleri ve XRD sonuçları beraberce değerlendirildiğinde, Mo miktarının oldukça yüksek olduğu ve bu durumun borlama işlemi sonrası oluşmuş, molibden borürlerin (Mo_2B) varlığından kaynaklandığı tespit edilmiştir. Mo elementinin FeB ve Fe_2B ’deki çözünürlüğü sınırlı miktarda olduğundan, Mo borür tabaka sınırlarında ayrılarak, altlık malzemeye doğru bor difüzyonu ile Mo miktarının yoğunlaştığı geçiş bölgelesinde, Mo_2B çökeltilerinin oluşmasına neden olduğu düşünülmektedir. Literatürde yapılan çalışmalar da göz önünde bulundurulduğunda, Mo miktarının ağırlıkça %2 ve daha fazla Mo içeriğine sahip, borlanmış alaşımlar için Mo_2B fazının görülmesinin olası olduğuna değinilmiştir [52]. Ayrıca borür tabakasında ve geçiş bölgesinde SEM-EDS analizi sonucunda Mo_2B çökeltileri tespit edilmiştir. [52]. 1050°C’de elde edilen SEM ve OM görüntülerinde de borür bölgesi yanında geçiş bölgesi görülmüştür.

Borlama sıcaklığın artması ile birlikte kaplama kalınlığının da doğrusal olarak arttığı her dört numune için görülmektedir. Ölçülen kaplama kalınlıkları 18 μm (850°C DIN 1.2343) ile 202 μm (1050°C DIN 1.2312) arasında değişmektedir. İlgili literatüre göre takım çeliklerinin borlanması ile 10 μm ile 200 μm arasında kaplama kalınlıkları elde edilebilir [6]. Dört numunenin borlanması sonucu elde edilen kaplama kalınlıkları ortalamaları literatürü desteklemektedir. DIN 1.2738 ve DIN 1.2842 çelik numunesinin ortalama kaplama kalınlık değerlerinin DIN 1.2312 çelik numunesine yakın olduğu görülmektedir. En yüksek Mo (at. %4,64-23,28) ve Cr (at. %5,11) miktarını içeren DIN 1.2343 çelik numunesinde, üç sıcaklık için de en düşük kaplama kalınlığı değerleri elde edilmiştir. İlgili literatüre göre Molibden miktarının çelikte azalması ile kaplama kalınlığı kalınlığı artar [52],[11]. Mo elementinin FeB ve Fe_2B fazlarında çözünürlüğü sınırlı olduğu için bor difüzyonunun gecikmesine sebep olur ve dolayısı artan Mo miktarının kaplama kalınlığının azalmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Ayrıca Cr oranının artması, borür tabakanın testere dişi yapısında

düzleşmeye sebep olur ve tabaka kalınlığını azaltma yönünde eğilim gösterir [50]. Kaplama kalınlığının en düşük DIN 1.2343 numunesinde olması literatür çalışmalarını desteklemektedir.

Çelik numunelerde borür tabakadan altlığa doğru sertlik değerlerinde ani bir azalma görülmektedir ve sertlik açısından bir geçiş bölgesi görülmemektedir. Vickers izlerinin görüldüğü tipik SEM görüntülerinde altlık bölgesinden alınan sertlik izlerinin borür tabakadan alınan sertlik izlerinden daha büyük olduğu görülmektedir. Bu durum, borür tabaka sertlik değerlerinin altlık malzemeye göre daha yüksek olduğunu desteklemektedir. Altlık malzemelerin borlama öncesi ortalama sertlik değerlerinin, borlama sonrası oluşan sertlik değerlerinden oldukça az olması da Vickers izlerinin bu şekilde görülmesini doğrulamaktadır. Borlama işlemi sonrası sertlik değerlerinde sıcaklıktan bağımsız olarak saçılma görülmemiştir. Saçılma görülmediği için borür tabakaların homojen olarak oluştuğunu söylemek mümkündür. Dört numune için de ortalama en yüksek sertlik değerleri 1050°C’de gözlemlenmiştir. En yüksek sertlik değeri DIN 1.2343 çeliğinde elde edilmiştir. Cr ve Mo miktarlarının artması ile mikrosertlik değerlerinin arttığı literatürde yapılan çalışmalarda ortaya koyulmuştur [50] [11]. DIN 1.2343 çelik numunesinde en yüksek Cr (at. %5,11) ve Mo (at. %4,64-23,28) miktarı olduğu göz önünde bulundurulduğunda, elde edilen en yüksek mikrosertlik değerinin ilgili numunede olması literatürde raporlanan benzer çalışmalarla paralellik arz etmektedir. SEM görüntülerinde görünen Mo₂B ’nin de sertliğe olumlu yönde etkisi olduğu yapılan çalışmalar ile bilinmektedir [52]. DIN 1.2343 çelik numunesine göre daha düşük Cr (at. %0,2-1,9) içeren çelik numunelerde mikrosertlik değeri daha düşük görülmektedir.

Borlama işlemine tabi tutulan numuneler ile geliştirilmesi hedeflenen yüzey özellikleri için daha önce farklı termokimyasal kaplama yöntemleri uygulanmıştır. Literatürdeki çalışmalara göre, 500°C plazma nitrürleme işlemine tabi tutulmuş DIN 1.2842 çeliğinin kaplama kalınlığının 380 µm, dış yüzeyden alınan sertliğinin 500 HV olduğu görülmüştür [35]. DIN 1.2343 çeliğinin 580°C gaz nitrürleme sonrası sertlik değerinin dış yüzeyden (0,1-0,4 mm mesafesinden alınan) 700 HV olduğu da yapılan çalışmalarda görülmüştür [36]. DIN 1.2312 çeliği için ise 525°C’de gerçekleştirilen gaz nitrürleme yüzey işlemi sonrası sertlik değerinin yaklaşık olarak 650 HV olduğu yapılan çalışmalar ile ortaya koyulmuştur [37]. Yapılan nitrürleme çalışmaları ile elde edilen mikrosertlik ve kaplama kalınlığı değerleri göz önünde bulundurulduğunda, borlama işlemi sonucunda DIN 1.2842 çeliği için elde edilen ortalama mikrosertlik

902 HV (850°C) -1234 HV (1050°C) ve kaplama kalınlığı 180 µm (1050°C) değeri, borlama işlemi ile daha yüksek sertlik değeri elde edildiğini ancak nitrürleme işlemine göre daha düşük kaplama kalınlığı elde edildiğini göstermektedir. Borlama sonucu, DIN 1.2312 çeliği için elde edilen ortamala mikrosertlik 1140 HV (850°C) -1234 HV (1050°C) ve DIN 1.2343 çeliği için elde edilen ortamala mikrosertlik 1251 HV (850°C) -1517 HV (1050°C) değerlerinin gaz nitrürleme işlemi ile elde edilen mikrosertlik değerinden daha yüksek olduğu görülmektedir.

7. GENEL SONUÇLAR

- Farklı sıcaklıklarda (850°C, 950°C ve 1050°C) 3 saat süre ile borlanmış dört farklı çelik (DIN 1.2312, DIN 1.2842, DIN 1.2738, DIN 1.2343) numunenin, yüzeyinde her üç borlama sıcaklığında da kaplama tabakası altlık malzemeye çok iyi yapışmış ve testere dişi yapısı görülmüştür. Ancak testere dişi yapının altlıktaki elementlerin miktarına bağlı olarak düzleştiği görülmüştür. Borlama sıcaklığı arttıkça kaplama kalınlığı doğrusal bir şekilde artmaktadır. En yüksek borür tabaka kalınlıkları dört numune için de 1050°C’de ölçülmüştür.
- Borlanan tüm numunelerin yüzeyinde FeB ve Fe₂B fazları oluşmuştur.
- DIN 1.2343 Çeliğinde, Mo (at. %4,64-23,28) miktarının artması ile birlikte borür tabaka içerisinde ve geçiş bölgesinde çökelti oluşmuştur.
- Borlanan dört farklı çelik numunede de mikrosertlik, borür tabakadan altlığa doğru gidildikçe azalma göstermektedir.
- Borür tabaka mikrosertlik değerleri düşük Cr (at. %0,2-1,9) içeren çelik numunelerde daha düşük olup, yüksek Cr (at. %5,11) içeren DIN 1.2343 çelik numunesinde artmıştır.
- DIN 1.2343 Çeliğinde, Mo (at. %4,64-23,28) miktarının artması ile birlikte borür tabaka içerisinde ve geçiş bölgesinde çökelti oluşmuştur.
- En yüksek Mo (at. %1,12) içeren DIN 1.2343 çelik numunesinde, borlama sonrası oluşan Mo₂B, mikrosertlik artışında önemli bir rol oynamıştır ve borlama sonrası en yüksek sertlik değeri bu çeliğin borür tabakasında ölçülmüştür.
- Bileşiminde daha düşük miktarda Mo (at. %0,2) ve Cr (at. %0,2-1,9) içeren çelik numunelerin kaplama kalınlıkları birbirine yakın olup, bileşiminde Mo (at. %1,12) ve Cr (at. %5,11) miktarı daha yüksek olan DIN 1.2343 çeliğinin en düşük kaplama kalınlığına sahip olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] Yeşilçubuk A., (2010), “Enjeksiyon Kalıplarında Kullanılan Sıcak İş Takım Çeliklerinin Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesi”, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [2] Web 1, (2021), <http://www.metalurjiakdag.com.tr/isil-islem.html>, (Erişim Tarihi: 14/03/2021).
- [3] Roberts G., Krauss G., Kennedy R., (1998), “Tool Steels”, 5th Edition, ASM International.
- [4] Web 2, (2022), <https://www.metalreyonu.com.tr/blog/malzemelerin-yuzey-islemleri>, (Erişim Tarihi: 12/04/2022).
- [5] Schneider M. J., Chatterjee M. S., (2013), “Introduction to Surface Hardening of Steels”. In: “Steel Heat Treating Fundamentals and Processes”, ASM Handbook, Volume 4A.
- [6] Cotell C. M., Sprague J. A., Smidt, F. A., (1994), “Surface Engineering”, ASM Handbook, Volume 5.
- [7] Menges G., Michaeli W., Mohren P., (1923), “How to Make Injection Molds”, 3rd Edition, Hanser Gardner Publications.
- [8] Gastrow H., (2006), “Injection Molds 130 Proven Designs”, 4th Edition, Hanser Gardner Publications.
- [9] Uzun H. A., (2002), “Borlama ile Yüzeyleri Sertleştirilen Çeliklerin Aşınma ve Korozyona Karşı Dayanımları”, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi.
- [10] Suwattananont N., (2004), “Surface treatment of ferrous alloys with boron”, Theses, New Jersey Institute of Technology.
- [11] ASM Handbook Committee, (1991), “Heat Treating”, ASM Handbook, Volume 4.

- [12] Er Ü., Par B., (2004), “Bor Yayınımıyla Yüzeyi Sertleştirilmiş AISI 1030 ve AISI 1050 Çeliklerinin Abrasif Aşınma Dayanımlarının İncelenmesi”, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 17(1), 1-12.
- [13] Yapar U., (2003), “Düşük ve Orta Karbonlu Çeliklerin Termokimyasal Borlama ile Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [14] Zeytin S., Eker A. A., (2020), “Isıl İşlemler Dersi Notları”, Sakarya Üniversitesi.
- [15] Ünlü B. S., Yılmaz S. S., (2004), “Bor ve Borlamanın Kullanım Alanları”, Mühendis ve Makine Dergisi, 532 (47).
- [16] Bayça S. U., Şahin S., (2003), “Borlama”, Mühendis ve Makine Dergisi, 532 (45).
- [17] Şahin, S., (1999), “Katı Borlama Yöntemi ile Ferrobör Üretimi ve Özelliklerinin Belirlenmesi”, Doktora Tezi, Celal Bayar Üniversitesi.
- [18] Xu, C. H., Gao, W., Yang, Y. L., (2000), “Superplastic Boronizing of a Low Alloy Steel- Microstructural Aspects”, Journal of Materials Processing Technology, 108, 349-355.
- [19] Palombarini G., Carbucicchio M., (1984), “On the morphology of thermochemically produced Fe₂B/Fe interfaces”, Journal of Materials Science Letters, 3, 791-794.
- [20] Özbek, İ., (2000), “Borlama Yöntemiyle (AISI M50, AISI M2) Yüksek Hız Çeliklerinin ve AISI W1 Çeliğinin Yüzey Performanslarının Geliştirilmesi”, Sakarya Üniversitesi.
- [21] Web 3, (2021), <http://www.metalurjiakdag.com.tr/dosya/seminer-notlari-2013.pdf>, (Erişim Tarihi: 22/11/2021).
- [22] Totten G. E., (2006), “Steel Heat Treatment Handbook”, CRC Press.

- [23] Web 4, (2022), <https://www.diehlsteel.com/technical-information/effects-of-common-alloying-elements-in-steel/>, (Erişim Tarihi: 01/02/2022)
- [24] İrizalp S., (2020), “Çeliklerin Sınıflandırılması ve Standart Gösterimi Ders Notları”, Celal Bayar Üniversitesi.
- [25] Taşçı A., (2003), “Borlanmış Çeliklerin Aşınma ve Korozyon Dayanımları”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi.
- [26] Zeytin S., (2020), “Yüzey İşlemleri Ders Notları”, Sakarya Üniversitesi.
- [27] Topuz P., (2016), “DIN 1.2842 Çeliğinin Borlanması ile Oluşan Borür Tabakası Üzerine Borlama Sıcaklık ve Süresinin Etkileri”, Journal of Boron, 1(1), 15-19.
- [28] Shao H., Zhang Q., (1983), “The eutectic reaction process of the structure of boriding layer on steel”, Trans. Met. Heat. Treat., Volume 16.
- [29] Çelik O.N., Akbayır Ö., Gaşan H., Er Ü., Aydınbeyli N., (2008), “Borlanmış AISI 1030 Çeliğinin Abratif Aşınma Özellikleri”, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 21(1), 71-85.
- [30] Dilektaşlı E., (2014), “Bazı Alaşımlı Çeliklerin Yüksek Sıcaklık Aşınma Davranışına Borlama İşleminin Etkisi”, Yüksek Lisan Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [31] Uluköy A., Can A.Ç., (2006), “Çeliklerin Borlanması”, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 12(2), 189-198.
- [32] Web 5, (2021), <https://ferdionen.files.wordpress.com/2012/12/bor-c3a7elikleri.pdf>, (Erişim Tarihi: 08/09/2021)
- [33] Özsoy A., (2001), “Borlama ile ilgili genel bir değerlendirme”, Endüstriyel Yüzey Teknolojileri Dergisi, 22, 10–13.
- [34] Çalık A., Delikanlı K., Uzun A., (2004), “Ç 1035 Çeliğın Borlama Özelliklerinin İncelenmesi”, II. Uluslararası Bor Sempozyumu, Eskişehir, 23-25 Eylül 2004.

- [35] Krbata M., Escherova J., (2021), “Performance Characteristics of Steel 1.2842 After Nitridation”, Science & Military, 2021.1, 43-48.
- [36] Web 6, (2022), https://www.haerterei-haupt.de/wp-content/uploads/2017/11/Haupt_Downloads-2017_Annealing_E.pdf, (Erişim Tarihi: 19/03/2022)
- [37] Web 7, (2022), <https://www.fushunspecialsteel.com/wp-content/uploads/2015/11/quenching-and-tempering.jpg>, (Erişim Tarihi: 19/03/2022)
- [38] Gürbüz K. ., (2011), “İkili Fe-V Alaşımlarında Artan Vandyum Miktarının Borlanma zelliklerine Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi.
- [39] Azaklı Y., (2012), “Alaşım Elementi Olarak Tungstenin Saf Demirin Borlanma Davranışına Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi.
- [40] Web 8, (2022), <https://makine.btu.edu.tr/index.php?sid=6559>, (Erişim Tarihi: 25/03/2022).
- [41] Maçkan N. B., (2019), “Fe-Cr-Ni çl Alaşımlarının Borlanması ve Karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi.
- [42] Işıtan A, (2019), “Boronizing: In the Industrial Applications in Turkey, Why Not Find The Place It Deserves?”, International Symposium on Boron, 287-292, Nevşehir, Nisan.
- [43] Kutucu Y. K., (2013), “Yüksek Alaşımlı Çeliklerin Borlanması Sonucunda Oluşan Isıl Artık Gerilmelerin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniveritesi.
- [44] Makuch N., Dziarski P., Kulka M., (2020), “Gas Technique of Simultaneous Borocarburing of Armco Iron Using Trimethyl Borate”, Coatings Journal, 10, 2-17.
- [45] Makuch N., Dziarski P., Kulka M., (2020), “Gas boriding of Nimonic 80A alloy”, Materials Engineering, 3, 124-128.

- [46] Baştürk S., Erten M., (2017), “Plazma Borlamanın Kesici Takımların Mikrosertliği Üzerindeki Etkisi”, *Aurum Mühendislik Sistemleri ve Mimarlık Dergisi*, 1(2), 91-107.
- [47] Akgündüz T., (1991), “Çelikte Alaşım Elementi olarak Bor ve Borlama ile Yüzey Sertleştirme”, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Üniversitesi.
- [48] Hunger, H. J., Trute G., (1994), “Boronizing to Produce Wear-Resistant Surface-Layers”, *Heat Treatment of Metals*, 21(2), 31-39.
- [49] Şahintürk U., (2011), “Fe-Si İkili Alaşımlarında Artan Silisyum Miktarının Borlanma Özelliklerine Etkisi” *Yüksek Lisans Tezi*, Gebze Teknik Üniversitesi.
- [50] Goeuriot, P., Fillit R., Thevenot F., Driver J. H., Bruyas H., (1982), “The Influence of Alloying Element Additions on the Boriding of Steels”, *Materials Science and Engineering*, 55(1), 9-19.
- [51] Gencer Y., (2011), “Influence of Manganese On Pack Boriding Behaviour of Pure Iron”, *Surface Engineering*, 27(8), 634-638.
- [52] Azakli Y., Cengiz S., Tarakci M., Gencer Y., (2016), “Characterisation of boride layer formed on Fe–Mo binary alloys”, *Surface Engineering*, 32(8), 589-595.
- [53] Gencer, Y., Tarakci M., Calik A., (2008), “Effect of titanium on the boronizing behaviour of pure iron”, *Surface & Coatings Technology*, 203(1-2), 9-14.
- [54] Gündüz, K.Ö., Gencer Y., Tarakci M., Calik A., (2013), “The Effect Of Vanadium On The Boronizing Properties Of Pure Iron”, *Surface & Coatings Technology*, 221, 104-110.

ÖZGEÇMİŞ

Züleyha Birlik; 2009 yılında başladığı İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği bölümünü 2014 yılında başarı ile tamamlayarak, 2018 yılında yüksek lisans Eğitimine Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında başladı.

2009-2020 yılları arasında otomotiv sektöründe Arge ve Proje Mühendisi olarak çalıştı. 2021 Yılı itibari ile bilişim sektöründe NTT Data Business Solutions firmasında Proje Yöneticisi olarak çalışmaktadır.

EKLER

Ek A: Tez Çalışması Kapsamında Yapılan Yayınlar

Yünkül Z., Gençer Y., Tarakçı M., Ceylan D., (2021), “Plastik Enjeksiyon Kalıp Çelik Yüzeylerinin Borlama ile Geliştirilmesi”, GTÜ 5. Lisansüstü Araştırmalar Sempozyumu, 114, Gebze, 10-11 Haziran.