FARKLI ORANDA DEFORME EDİLEN DIN 20MnCr5 ÇELİĞİNİN KUTU BORLAMA SONUCU AŞINMA VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Nurullah ŞAHİN

2022
YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı
Prof. Dr. Hayrettin AHLATCİ

FARKLI ORANDA DEFORME EDİLEN DIN 20MnCr5 ÇELİĞİNİN AŞINMA VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Nurullah ŞAHİN

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

Tez Danışmanı
Prof. Dr. Hayrettin AHLATCI

KARABÜK
Temmuz 2022

Nurullah ŞAHİN tarafından hazırlanan "FARKLI ORANDA DEFORME EDİLEN DIN 20MnCr5 ÇELİĞİNİN KUTU BORLAMA SONUCU AŞINMA VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ" başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr.Hayrettin AHLATCI .....
Tez Danışmanı, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 28/07/2022

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu) İmzası

Başkan : Prof. Dr. Mustafa ACARER (SÜ) .....

Üye : Doç. Dr. Yunus TÜREN (KBÜ) .....

Üye : Prof. Dr. Hayrettin AHLATCİ (KBÜ) .....

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

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ .....
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

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

Nurullah ŞAHİN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FARKLI ORANDA DEFORME EDİLEN DIN 20MnCr5 ÇELİĞİNİN KUTU BORLAMA SONUCU AŞINMA VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Nurullah ŞAHİN

Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:
Prof. Dr. Hayrettin AHLATCI
Temmuz 2022, 139 sayfa

Bu çalışmada, DIN 20MnCr5 türü farklı çapa sahip sementasyon çelik çubuklara, sabit borlama sıcaklığında ve farklı borlama sürelerinde kutu borlama prosesi uygulanmıştır.Kutu borlama prosesi, Ø11 ve Ø14 mm çaplarındaki DIN 20MnCr5 çelik çubuklara 950^{o}C sıcaklıkta, 2,5 ve 7,5 saat borlama sürelerinde gerçekleştirilmiştir.Kutu borlama işleminde aynı borlama tozu kullanılmış ve borlama tozu olarak ticari adıyla Ekabor-II toz karışımı kullanılmıştır. Borür kaplama tabakalarının tribolojik ve mekanik özelliklerini belirlemek için aşınma, korozyon ve yüzeyden matrise sertlik testleri uygulanmıştır. Ayrıca, borlama işlemi uygulanmış numunelerin kaplama bölgelerinin kalınlığı optik mikroskop ile ölçülmüştür.Borür kaplama bölgelerinde SEM-EDX ve XRD çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Yapılan optik mikro yapı sonuçlarına göre, en yüksek kaplama kalınlığı Ø11 mm çapındaki 7,5 saat borlanan DIN 20MnCr5 çelik çubuk numunesinde ve en düşük kaplama kalınlığı Ø14 mm çapındaki 2,5 saat borlanan DIN 20MnCr5 çelik çubuk numunesinde ölçülmüştür. Sertlik testleri sonucunda, en yüksek sertlik değeri Ø11 mm çapındaki 7,5 saat borlanmış DIN 20MnCr5 çelik çubuk numunesinde ölçülürken, en düşük sertlik değeri Ø14 mm çapındaki 2,5 saat borlanmış DIN 20MnCr5 çelik çubuk numunesinde ölçülmüştür. Bununla birlikte Ø11 mm çapındaki ana malzemede Ø11 ve Ø14 mm çapındaki ana malzemede sertlik ölçülmüştür. Aşınma testtleri sonucunda en yüksek aşınma dayanımını Ø11 mm çapındaki 7,5 saat borlanmış DIN 20MnCr5 çelik çubuk numunesinde elde edilmişken, en düşük aşınma dayanımını işlem görmemiş orjinal Ø14 mm çapındaki DIN 20MnCr5 çelik çubuk numunesinde elde edilmiştir. Hem daldırma hemde potansiyodinamik polerizasyon testi sonuçlarına göre, en yüksek korozyon dayanımını Ø11 mm çapındaki 7,5 saat borlanmış DIN 20MnCr5 çelik çubuk numunesinde elde edilmişken, en düşük korozyon dayanımını işlem görmemiş orjinal Ø11 mm çapındaki DIN 20MnCr5 çelik çubuk numunesinde elde edilmiştir. Sonuç olarak sabit kutu borlama sıcaklığında ve sabit deformasyon oranında artan borlama süresiyle borür kaplama kalınlığının, sertliğin, aşınma ve korozyon dayanımının arttığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte sabit kutu borlama sıcaklığında ve sabit borlama sürelerinde artan deformasyon oranı ile borür kaplama kalınlığının, sertliğin, aşınma ve korozyon dayanımının arttığı tespit edilmiştir.

Anahtar Sözcükler : DIN 20MnCr5, kutu borlama, deformasyon oranı, aşınma, korozyon, mikroyapı ve mekanik özellikler.

Bilim Kodu **:** 91519

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

INVESTIGATION OF WEAR AND MECHANICAL PROPERTIES OF DIFFERENT DEFORMED DIN 20MnCr5 STEEL AS A RESULT OF BOX BORING

Nurullah ŞAHİN

Karabük University
Institute of Graduate Programs
Department of Metallurgical and Materials Engineering
Thesis Advisor:
Prof. Dr. Hayrettin AHLATCİ
July 2022, 139 pages

In this study, box boriding process was applied to DIN 20MnCr5 type cemented steel bars with different diameters at constant boriding temperature and different boriding times. Box boriding process was applied to DIN 20MnCr5 steel bars with Ø11 and Ø14 mm diameters at 950^{o}C temperature for 2.5 and 7.5 hours. The same boronizing powder was used in the box boriding process and Ekabor-II powder mixture was used as boronizing powder. Wear, corrosion and surface-to-matrix hardness tests were applied to determine the tribological and mechanical properties of the boride coating layers. In addition, the thickness of the coating areas of the borided samples were measured with an optical microscope. SEM-EDX and XRD studies were carried out on the boride coating areas.

According to the results of the optical microstructure, the highest coating thickness was measured in the Ø11 mm diameter DIN 20MnCr5 steel bar sample boronized for

7.5 hours and the lowest coating thickness was measured in the Ø14 mm diameter DIN 20MnCr5 steel bar sample boronized for 2.5 hours. As a result of the hardness tests, the highest hardness value was measured in the Ø11 mm diameter DIN 20MnCr5 steel bar sample boronized for 7.5 hours, while the lowest hardness value was measured in the Ø14 mm boronized DIN 20MnCr5 steel bar sample with 2.5 hours. However, hardness was measured in Ø11 mm diameter base material and Ø11 and Ø14 mm diameter base material. As a result of the wear tests, the highest wear resistance was obtained in the Ø11 mm diameter DIN 20MnCr5 steel bar sample boronized for 7.5 hours, while the lowest abrasion resistance was obtained in the untreated original Ø14 mm diameter DIN 20MnCr5 steel bar sample. According to both immersion and potentiodynamic polarization test results, the highest corrosion resistance was obtained in the Ø11 mm diameter DIN 20MnCr5 steel bar sample boronized for 7.5 hours, while the lowest corrosion resistance was obtained in the untreated original Ø11 mm diameter DIN 20MnCr5 steel bar sample. As a result, it was determined that boride coating thickness, hardness, wear and corrosion resistance increased with increasing boriding time at constant can boriding temperature and constant deformation rate. On the other hand, it was determined that boride coating thickness, hardness, wear and corrosion resistance increased with increasing deformation rate at fixed box boriding temperature and fixed boriding times.

Key Word **:** DIN 20MnCr5, box boriding, rate of deformation, wear, corrosion, microstructure and mechanical properties .

Science Code : 91519

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocam Prof. Dr. Hayrettin AHLATCİ'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez kapsamında kullanılan numunelerin temin edilmesinde yardımlarını esirgemeyen, KARDEMİR A.Ş. yetkililerine teşekkür ederim.

Sevgili aileme manevi hiçbir yardımı esirgemeden yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

Ayrıca bu tez çalışmasını KBUBAP-22-YL-027 nolu proje kapsamında destekleyen Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinatörlüğüne teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KABUL ii
ÖZET iv
ABSTRACT vi
TEŞEKKÜR viii
İÇİNDEKİLER ix
ŞEKİLLER DİZİNİ xii
ÇİZELGELER DİZİNİ xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ xviii

BÖLÜM 1 19
GİRİŞ 19

BÖLÜM 2 22
SEMENTASYON ÇELİKLER 22
2.1. SEMENTASYON ÇELIKLERININ ÖZELLIKLERİ 22
2.2. SEMENTASYON ÇELIKLERININ KULLANIM ALANLARI 22
2.3. SEMENTASYON ÇELIKLERININ SINIFLANDIRILMASI 23

BÖLÜM 3 25
BORLAMA İŞLEMİ 25
3.1. BORLAMA YÖNTEMLERİ 26
3.1.1. Kutu Borlama Yöntemi 27
3.1.2. Sıvı Borlama Yöntemi 30
3.1.3. Gaz Borlama Yöntemi 31
3.1.4. Plazma Borlama Yöntemi 32
3.2. ALAŞIM ELEMENTLERİNİN BORLAMAYA ETKİSİ 33
3.3. BORLAMANIN AVANTAJLARI VE DEZAVANTAJLARI 37
3.3.1. Borlamanın Avantajları 37

Sayfa

3.3.2. Borlamanın Dezavantajları 38
3.4. FE-B İKILI FAZ DENGE DIYAGRAMI 39
3.4.1. Borür Tabakasının Büyüme Mekanizması 41
3.4.2. Borür Tabakası Çeşitleri 44
3.4.3. Borür Tabakası Yapısı 46
3.4.4. Geçiş Bölgesi 46
3.5. BORÜR TABAKASININ ÖZELLIKLERI 47
3.5.1. Tabaka Kalınlığı 48
3.5.2. Sertlik 49
3.5.3. Korozyon Direnci 50
3.5.4. Aşınma 51

BÖLÜM 4 53
DENEYSEL ÇALIŞMALAR 53
4.1. DIN 20MNCR5 NUMUNELERININ BORLAMA PROSESI İÇİN HAZIRLANMASI 54
4.2. MIKROYAPI İNCELEMELERİ 57
4.2.1. Bakalite Alma ve Parlatma 57
4.2.2. Dağlama 57
4.2.3. Optik Mikroskobu 57
4.2.4. Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) ve EDX Analizi 58
4.2.5. X Işınları Difraksiyon (XRD) Analizi 59
4.3. SERTLIK ÖLÇÜMÜ 59
4.4. AŞINMA DENEYI 60
4.5. KOROZYON DENEYI 61

BÖLÜM 5 63
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA 63
5.1. MIKROYAPI ANALIZLERI VE TABAKA KALINLIKLARI 63
5.2. SEM VE EDX ANALIZ SONUÇLARI 64
5.3. XRD SONUÇLARI 85
5.4. SERTLIK SONUÇLARI 86

Sayfa

5.5. KOROZYON TESTI SONUÇLARI 88
5.5.1. Potansiyodinamik Polarizasyon 88
5.5.2. Daldırma Korozyonu 90
5.6. AŞINMA TEST SONUÇLARI 111

BÖLÜM 6 133
GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER 133

KAYNAKLAR 135

ÖZGEÇMİŞ 140

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. DIN 20MnCr5 çelik çubuklarının başlıca kullanım alanları 23

Şekil 3.1.Katı borlama işleminin (a) numune kutusunun hazırlanması ve (b) numunenin fırında ısıtılması'nın şematik görünüşü.....28

Şekil 3.2.Sıvı borlama sisteminde, (a) borlama sıvısının eritilmesi ve (b) borlama sıvısına numuneye daldırılması. 30

Şekil 3.3.Gaz borlama ünitesi. 31

Şekil 3.4.Plazma borlama şeması. 33

Şekil 3.5.Borür tabaka kalınlığına alaşım elementlerinin etkisi. 36

Şekil 3.6.Alaşım elementi miktarının bor aktivasyon enerjisine etkisi..... 36

Şekil 3.7.Fe-B denge diyagramı. 40

Şekil 3.8.Borlama sırasında borür tabakasının oluşum aşamaları..... 42

Şekil 3.9.Matris ve borür tabakasında B ve Fe dağılımı 44

Şekil 3.10.(a) Tek fazlı ve (b) çift fazlı borür tabakalarının şematik görünüşü 46

Şekil 3.11.Borür tabakasının kalınlığının hesaplanması. 49

Şekil 3.12.Farklı yüzey sertleştirme işlemlerinin aşınma davranışları. 52

Şekil 4.1.Ø11 mm Ø14 mm çaplarındaki DIN 20MnCr5 sementasyon çeliği……55

Şekil 4.2.Isıl işlem fırını..... 56

Şekil 4.3.Kutu borlama prosesi için kutu hazırlama 57

Şekil 4.4.Carl Zeiss markalı optik mikroskobu..... 58

Şekil 4.5.Shımadzu marka vickers sertlik cihazı 59

Şekil 4.6.Pin formunda DIN 20MnCr5 çelik aşınma numuneleri..... 60

Şekil 4.7.Pin on ring aşınma test cihazı 60

Şekil 5.1.950 °C'de a) Ø11 mm çap-2,5 saat, b) Ø14 mm çap-2,5 saat, c) Ø11 mm çap-7,5 saat d) Ø14 mm çap-7,5 saat borlanmış DIN 20MnCr5 çeliğinin optik mikro yapısı ve tabaka kalınlıkları……...64

Şekil 5.2. Ø11 mm DIN 20MnCr5 çeliğin 2,5 saat 950ºC sıcaklıkta borla sonucu oluşan borür tabakasının (a) 500 x büyütmedeki görüntüsü ve (a) şıkkındaki (b) 1 numaralı, (c) 2 numaralı, (d) 3 numaralı ve (e) 4 numaralı bölgelerin 5.00 K X büyütülmüş SEM görüntüsü 67

Sayfa

Şekil 5.3.Ø11 mm DIN 20MnCr5 çeliğin 2,5 saat 950ºC sıcaklıkta borla sonucu oluşan borür tabakasının (a) 500 x büyütmedeki görüntüsü ve (a) şıkkındaki (b) 1 numaralı, (c) 2 numaralı, (d) 3 numaralı ve (e) 4 numaralı bölgelerin 5.00 K X büyütülmüş SEM görüntüsü 69

Şekil 5.4. Ø14 mm DIN 20MnCr5 çeliğin 2,5 saat 950ºC sıcaklıkta borla sonucu oluşan borür tabakasının (a) 500 x büyütmedeki görüntüsü ve (a) şıkkındaki (b) 1 numaralı, (c) 2 numaralı ve (d) 3 numaralı bölgelerin 5.00 K X büyütülmüş SEM görüntüsü 72

Şekil 5.5. Ø14 mm DIN 20MnCr5 çeliğin 2,5 saat 950ºC sıcaklıkta borla sonucu oluşan borür tabakasının EDX analiz sonucu..... 74

Şekil 5.6. Ø11 mm DIN 20MnCr5 çeliğin 7,5 saat 950ºC sıcaklıkta borla sonucu oluşan borür tabakasının (a) 500 x büyütmedeki görüntüsü ve a şıkkındaki (b) 1 numaralı, (c) 2 numaralı ve (d) 3 numaralı bölgelerin 5.00 K X büyütülmüş SEM görüntüsü 76

Şekil 5.7.Ø11 mm DIN 20MnCr5 çeliğin 7,5 saat 950ºC sıcaklıkta borla sonucu oluşan borür tabakasının EDX analiz sonucu 78

Şekil 5.8.Ø14 mm DIN 20MnCr5 çeliğin 7,5 saat 950ºC sıcaklıkta borla sonucu oluşan borür tabakasının (a) 500 x büyütmedeki görüntüsü ve (a) şıkkındaki (b) 1 numaralı, (c) 2 numaralı, (d) 3 numaralı ve (e) 4 numaralı bölgelerin 5.00 KX büyütülmüş SEM görüntüsü 82

Şekil 5.9.Ø14 mm DIN 20MnCr5 çeliğin 7,5 saat 950ºC sıcaklıkta borla sonucu oluşan borür tabakasının EDX analiz sonucu 84

Şekil 5.10.950 ºC'de 7,5 saat borlanmış a) Ø11 mm ve b) Ø14 mm çapındaki DIN 20MnCr5 çubuklarının XRD analizi 85

Şekil 5.11. Ø11 mm ve Ø14 mm çapındaki DIN 20MnCr5 çeliğinin 950 ºC sıcaklıkta 2,5 saat ve 7,5 saat kutu borlama sonucu mikro sertlik eğrileri 87

Şekil 5.12.Potansiyodinamik polarizasyon deney grafikleri..... 88

Şekil 5.13.Ø11 ve Ø14 mm çaplarındaki DIN 20MnCr5 çelik numunelerin daldırma korozyonu sonucu ağırlık kaybı – zaman eğrileri 90

Şekil 5.14.DIN 20MnCr5 çeliğinin % 3.5 NaCl ortamında daldırma korozyon hızının zamanla değişim grafiği..... 91

Şekil 5.15.İncelenen numunelerinin kararlı durum korozyon hızlarının değişimi.... 92

Şekil 5.16.İşlem görmemiş Ø11 mm DIN 20MnCr5 çeliğin daldırma korozyon yüzeyinin (A) 500 X ve (B) seçili alanın 1.00 KX büyütmeli SEM görüntüsü 93

Şekil 5.17.İşlem görmemiş Ø11 mm DIN 20MnCr5 çeliğin daldırma korozyon yüzeyinin EDX analizi..... 94

Şekil 5.18. İşlem görmemiş Ø14 mm DIN 20MnCr5 çeliğin daldırma korozyon yüzeyinin (A) 100 X , (B) 500 X ve (C) 1.00 KX büyütmeli SEM görüntüsü 96

Sayfa

Şekil 5.19.İşlem görmemiş Ø14 mm DIN 20MnCr5 çeliğin daldırma korozyon yüzeyinin EDX analizi..... 97

Şekil 5. 20. 2.5 saat 950ºC sıcaklıkta borlanan Ø11 mm DIN 20MnCr5 çeliğin daldırma korozyon yüzeyinin (A) 100 X , (B) 500 X ve (C) seçili alanın 1.00 KX büyütmeli SEM görüntüsü..... 100

Şekil 5.21. 2.5 saat 950ºC sıcaklıkta borlanan Ø11 mm DIN 20MnCr5 çeliğin daldırma korozyon yüzeyinin EDX analizi 101

Şekil 5.22. 2,5 saat 950ºC sıcaklıkta borlanan Ø14 mm DIN 20MnCr5 çeliğin daldırma korozyon yüzeyinin (A) 100 X , (B) 500 X ve (C) seçili alanın 1.00 KX büyütmeli SEM görüntüsü..... 103

Şekil 5.23.2.5 saat 950ºC sıcaklıkta borlanan Ø14 mm DIN 20MnCr5 çeliğin daldırma korozyon yüzeyinin EDX analizi 104

Şekil 5.24.7,5 saat 950ºC sıcaklıkta borlanan Ø11 mm DIN 20MnCr5 çeliğin daldırma korozyon yüzeyinin (A) 100 X , (B) seçili alanın 500 x büyütmeli ve (C) 1.00 KX SEM görüntüsü 106

Şekil 5.25. 7,5 saat 950ºC sıcaklıkta borlanan Ø11 mm DIN 20MnCr5 çeliğin daldırma korozyon yüzeyinin EDX analizi 107

Şekil 5.26.7.5 saat 950ºC sıcaklıkta borlanan Ø14 mm DIN 20MnCr5 çeliğin daldırma korozyon yüzeyinin (A) 100 X , (B) seçili kırmızı alanın 500 X büyütmeli ve (C) seçili sarı alanın 1.00 KX büyütmeli SEM görüntüsü..... 109

Şekil 5.27.7,5 saat 950ºC sıcaklıkta borlanan Ø14 mm DIN 20MnCr5 çeliğin daldırma korozyon yüzeyinin EDX analizi 110

Şekil 5.28. DIN 20MnCr5 çelik numunelerinin (a) işlem görmemiş ve 950 ºC'de farklı sürelerde borlama işlemi uygulanan , (b) 950 ºC'de farklı sürelerde borlama işlemi uygulanan numunelerin aşınma testi eğrileri..... 113

Şekil 5.29.İncelenen numunelerinin aşınma hızlarının değişimi 114

Şekil 5.30.İşlem görmemiş Ø11 mm DIN 20MnCr5 çeliğinin aşınma yüzeyinin (a) 100 X , (b) Şekil 5.28. (a)'daki kırmızı kare ile gösterilen alanın 500 X ve (c) Şekil 5.28. (b)'deki sarı kare ile gösterilen alanın 1.00 KX büyütmeli SEM görüntüsü 117

Şekil 5.31. İşlem görmemiş Ø14 mm DIN 20MnCr5 çeliğinin aşınma yüzeyinin (a) 100 X , (b) Şekil 5.29. (a)'daki kırmızı kare ile gösterilen alanın 500 X ve (c) Şekil 5.29. (b)'deki sarı kare ile gösterilen alanın 1.00 KX büyütmeli SEM görüntüsü..... 119

Şekil 5.32. 950 ºC sıcaklıkta 2,5 saat borlanan Ø11 mm DIN 20MnCr5 çeliğinin aşınma yüzeyinin (a) 100 X , (b) Şekil 5.30. (a)'daki kırmızı kare ile gösterilen alanın 500 X ve (c) Şekil 5.30. (b)'deki sarı kare ile gösterilen alanın 1.00 KX büyütmeli SEM görüntüs 121

Şekil 5. 33. 2,5 saat 950ºC sıcaklıkta borlanan Ø11 mm DIN 20MnCr5 çeliğin aşınma yüzeyinin EDX analizi..... 122

Sayfa

Şekil 5.34. 950 ºC sıcaklıkta 2,5 saat borlanan Ø14 mm DIN 20MnCr5 çeliğinin aşınma yüzeyinin (a) 100 X , (b) Şekil 5.32. (a)'daki kırmızı kare ile gösterilen alanın 500 X ve (c) Şekil 5.32. (b)'deki sarı kare ile gösterilen alanın 1.00 KX büyütmeli SEM görüntüs 124

Şekil 5.35. 2,5 saat 950ºC sıcaklıkta borlanan Ø14 mm DIN 20MnCr5 çeliğin aşınmayüzeyinin EDX analizi 125

Şekil 5.36. 950 ºC sıcaklıkta 7,5 saat borlanan Ø11 mm DIN 20MnCr5 çeliğinin aşınma yüzeyinin (a) 100 X , (b) Şekil 5.34. (a)'daki kırmızı kare ile gösterilen alanın 500 X ve (c) 1.00 KX büyütmeli SEM görüntüsü ... 127

Şekil 5.37. 7,5 saat 950ºC sıcaklıkta borlanan Ø11 mm DIN 20MnCr5 çeliğin aşınma yüzeyinin EDX analizi..... 128

Şekil 5.38. 950 ºC sıcaklıkta 7,5 saat borlanan Ø14 mm DIN 20MnCr5 çeliğinin aşınma yüzeyinin (a) 100 X , (b) Şekil 5.36. (a)'daki kırmızı kare ile gösterilen alanın 500 X ve (c) Şekil 5.36. (b)'deki sarı kare ile gösterilen alanın 1.00 KX büyütmeli SEM görüntüs 130

Şekil 5.39.7,5 saat 950ºC sıcaklıkta borlanan Ø14 mm DIN 20MnCr5 çeliğin aşınma yüzeyinin EDX analizi..... 131

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Sementasyon çeliklerinin sınıflandırılması ve standartları ….. 23

Çizelge 2.2. Sementasyon çeliklerinin standardları …… 24

Çizelge 3.1. Bor kaplanan malzemelerin uygulama alanları …….……..26

Çizelge 3.2.Borlama amaçlı kullanılan Ekabor tozlarının çeşitli özellikleri …….29

Çizelge 3.3.Belirli malzemelerin mikrosertlik sonuçları….. 37

Çizelge 3.4.Borlu tabakayı meydana getiren Fe_2B ve FeB bileşiklerinin özellikleri. 44

Çizelge 3.5.Borür tabakalarının sertlik değerleri ve erime noktaları…. 50

Çizelge 4.1.DIN 20MnCr5 çeliğinin kompozisyonu ……..55

Çizelge 5.1.DIN 20MnCr5 çeliğinin kutu borlama sonrası borür tabaka kalınlığı ...64

Çizelge 5.2. Ø11 mm DIN 20MnCr5 numunesinin 2,5 saat 950^oC sıcaklıkta borlanması sonucu oluşan borür tabakası ve ana matrisin EDX analiz sonucu 70

Çizelge 5.3. Ø14 mm DIN 20MnCr5 çeliğin 2,5 saat 950^oC sıcaklıkta borla sonucu oluşan borür tabakasının EDX analiz sonucu..... 74

Çizelge 5.4. Ø11 mm DIN 20MnCr5 çeliğin 7,5 saat 950^oC sıcaklıkta borla sonucu oluşan borür tabakasının EDX analiz sonucu..... 79

Çizelge 5.5.Ø14 mm DIN 20MnCr5 çeliğin 7,5 saat 950^oC sıcaklıkta borlama sonucu oluşan borür tabakasının EDX analiz sonucu..... 84

Çizelge 5.6.Kutu borlama işlemi görmüş Ø11 mm ve Ø14 mm çapındaki DIN 20MnCr5 çelik çubukların yüzeyden merkeze mikro sertlik derinliği değerleri..... 86

Çizelge 5.7.DIN 20MnCr5 çelik numunelerinin I_{cor} ve E_{cor} değerleri 90

Çizelge 5.8. İşlem görmemiş Ø11 mm DIN 20MnCr5 çeliğin daldırma korozyon testi sonrası yüzeyinden alınan (A) 1 numaralı ve (B) 2 numaralı EDX analiz sonucu..... 95

Çizelge 5. 9. İşlem görmemiş Ø14 mm DIN 20MnCr5 çeliğin daldırma korozyon testi sonrası yüzeyinden alınan (A) 1 numaralı ve (B) 2 numaralı EDX analiz sonucu..... 97

Çizelge 5. 10. Ø11 mm DIN 20MnCr5 çeliğin 2,5 saat 950^oC sıcaklıkta borla sonucu oluşan borür tabakasının EDX analiz sonucu..... 101

Çizelge 5.11. Ø14 mm DIN 20MnCr5 çeliğin 2,5 saat 950^oC sıcaklıkta borla sonucu oluşan borür tabakasının EDX analiz sonucu..... 105

Çizelge 5.12.Ø11 mm DIN 20MnCr5 çeliğin 7,5 saat 950^oC sıcaklıkta borla sonucu oluşan borür tabakasının EDX analiz sonucu..... 107

Sayfa

Çizelge 5.13.Ø14 mm DIN 20MnCr5 çeliğin 7,5 saat 950ºC sıcaklıkta borlama sonucu oluşan borür tabakasının EDX analiz sonucu 110

Çizelge 5.14.İşlem görmemiş ve 950 ºC sıcaklıkta farklı sürelerde borlanan DIN 20MnCr5 çelik numunelerin aşınma testinde meydana gelen ağırlık kaybı 111

Çizelge 5.15.Ø11 mm DIN 20MnCr5 çeliğin 2,5 saat 950ºC sıcaklıkta borlama sonucu oluşan borür tabakasının EDX analiz sonucu 122

Çizelge 5.16.Ø14 mm DIN 20MnCr5 çeliğin 2,5 saat 950ºC sıcaklıkta borlama sonucu oluşan borür tabakasının EDX analiz sonucu 125

Çizelge 5.17. Ø11 mm DIN 20MnCr5 çeliğin 7,5 saat 950ºC sıcaklıkta borlama sonucu oluşan borür tabakasının EDX analiz sonucu 128

Çizelge 5.18. Ø11 mm DIN 20MnCr5 çeliğin 7,5 saat 950ºC sıcaklıkta borlama sonucu oluşan borür tabakasının EDX analiz sonucu 131

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

Mn : mangan

Cr : krom

B : bor

Fe : demir

H : hidrojen

Ni : nikel

Mo : molibden

C : karbon

Si : silisyum

Mo : molibden

Ni : nikel

$HV_{0,3}$: vickers sertlik

KISALTMALAR

AISI : American Iron and Steel Institute (Amerika Demir ve Çelik Enstitüsü)

ASTM : American Society for Testing and Materials (Amerika Deneme ve Malzeme Topluluğu)

DIN : Deutch Industrie Normen (Alman Endüstri Normları)

EN : European Norm (Avrupa Normu)

TS : Türk Standardı

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Sementasyon çelikler, esas olarak darbeye ve çeşitli gerilimlere dayanıklı , yüzeyde sert ve aşınmaya dayanıklı , çekirdekte daha yumuşak ve daha tok olan parçaların üretiminde kullanılan bir çelik türüdür.

Zincir bağlantıları, halkalar, zincir dişlileri, kasnaklar, pimler, piston pimleri, kılavuz yataklar, rulman yatakları, diskler, silindirler, soğuk şişirilerek veya ekstrüde edilmiş bileşenler, kesici aletler ve daha birçok ürün sementasyon çeliklerinden yapılmaktadır.

Bor kaplanmış malzemeler, göstermiş oldukları üstün özellikler sebebiyle otomotiv, makine, kimya, tekstil ve gıda endüstrileri başta olmak üzere çok geniş bir endüstriyel kullanım alanına sahiptir. Özellikle adheziv ve abraziv aşınma şartlarında birçok kullanım alanı mevcuttur . Uygulandığı malzemeye kazandırdığı aşınma dayanımı ile öne çıkan, böylelikle parçaların kullanım ömrünü artırarak ekonomik anlamda da çok önemli bir tasarruf sağlatabilen borlama işlemi, diğer termo-kimyasal yüzey yayınım işlemlerine göre pek çok açıdan üstünlük de sağlamaktadır.

Borlama, günümüzde özellikle geleneksel sertleştirme tekniklerine alternatif olarak oldukça gelişmiş bir sektördür. Hem katı ortamda borlama hem de sıvı ortamda borlama, etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Çözünürlük sınırını aşan bir miktarda bor atomlarının metal borürler üretmek için metalik nesnelerin yüzeylerine yayılması işlemi "borlama" olarak bilinir ve termokimyasal bir yüzey işlemidir. Termokimyasal bor kaplama işleminde sıcaklık ve zaman faktörlerdir. Borlama işlemi için bor temini, bor (amorf bor, B_4C, $Na_2B_4O_7$, B_2H_6, vb.), aktivatörler (KBF_4, NH_4F, vb.), dolgu maddeleri ve deoksidantları (SiC, Al_2O_3) içerir. Aktivatörler, borür tabakasının düzenli gelişmesine etki ederler. Deoksidanlar ve dolgu maddeleri, borlaştırıcı maddenin ana malzemeye yapışmasını engeller. Sinterlenmiş karışımın sert borlanmış

malzemesi çok yüksek bir malzeme yüzey sertliğine, aşınma direncine ve güçlü bir korozyon direncine sahiptir. Demirli içerikli malzemelerin borlanmasın da, malzeme yüzeyinde FeB ve Fe_2B ile bu bileşiklerin karışımından oluşan tek veya çift fazlı borür tabakaları elde edilir. Borlama sonucu yüzeylerde oluşturulan demir borürler (Fe_2B, FeB) yüksek sertliğe, yüksek aşınma direncine ve yüksek korozyon direncine sahip olmasının yanında borür tabakasının düşük sürtünme katsayısına, yüksek termal ve elektrik iletkenliği gibi özelliklere de sahiptir.

Borlama ortamı olarak katı maddelerin kullanıldığı katı borlama yöntemi, uygulamanın zor olmaması, kullanılacak düzeneğin basit bir işçilikle yapılabiliyor olması, fazla ekipmana ihtiyaç duyulmaması, ekonomik olması, güvenli ve kullanılan toz karışımın kimyasal kompozisyonunda değişiklik yapılabilirliği nedenlerinden dolayı en yaygın kullanılan borlama tekniğidir. İşlemdeki aşamalar genellikle fırınlama, ısıtma ve temizlemeyi içerir. Proseste, 5 ile 10 mikron arasında borlama tozu, 2-10 saat borlama süresi ve 800-1100 °C sıcaklıkta borlama sıcaklığı kullanılmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, endüstride büyük bir öneme sahip DIN 20MnCr5 çelik çubukları 950 ^oC sıcaklıkta 2,5 ve 7,5 saat farklı borlama sürelerinde kutu borlama prosesi ile yüzeyi bor kaplayarak aşınma, mikroyapı,korozyon ve mekanik özelliklerinin araştırılması ve incelenmesidir.

.

Hazırlanan bu çalışma, genel itibarıyla literatür taraması ve deneysel çalışmalar olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Ancak, literatür taraması ve deneysel çalışmalar kendi içinde altı konu başlığı altında oluşturulmaya çalışılmıştır. Bunlardan birinci bölüm "Giriş" olup burada çalışmanın kısa özeti verilmiştir. İkinci ve üçüncü bölümde, sementasyon çelikleri ve borlama prosesi geniş bir literatür taramasıyla anlatılmıştır.

Dördüncü bölümde çalışmanın amacının belirlenmesinin yanında, deneysel çalışmalarda kullanılan malzemeler, borlama parametreleri, aşınma, korozyon, mikroyapı, mekanik testler ve testlerin uygulanış parametreleri tanıtılmıştır.

Çalışmanın beşinci bölümünde, borlama işlemi uygulanan ve işlem görmeyen numunelere aşınma, korozyon ve sertlik testlerinden elde edilen veriler, kolay değerlendirilebilmesi için grafik olarak çizilmiş ve elde edilen grafikler değerlendirilmiştir. Ayrıca, optik mikroskop çalışmaları sonucu elde edilen görüntüler yorumlanmıştır. Deneysel çalışmalar sonucu elde edilen bulgular, daha önceden yapılmış benzer çalışmalarla sebep-sonuç ilişkisi ile kıyaslanmıştır.

Deneysel çalışmaların nihai sonuçlarının açıklandığı altıncı ve son bölümde, deneysel çalışmalar sonucu elde edilen bulgular, deneysel çalışmanın amacına uygun bir biçimde yorumlanarak sonuçlandırılmıştır.Deneysel çalışmaların nihai sonuçlarının açıklandığı yedinci ve son bölümde, deneysel çalışmalar sonucu elde edilen bulgular, deneysel çalışmanın amacına uygun bir biçimde yorumlanarak sonuçlandırılmıştır.

BÖLÜM 2

SEMENTASYON ÇELİKLER

2.1. SEMENTASYON ÇELIKLERININ ÖZELLIKLERİ

Darbeye ve çeşitli gerilimlere dayanıklı , yüzeyde sert ve aşınmaya dayanıklı , çekirdekte daha yumuşak ve daha tok olan parçaların üretiminde kullanılan düşük karbonlu alaşımlı veya alaşımsız çelikler sementasyon çelikleri olarak bilinir [1,2].

Düşük alaşımlı çelikler, karbon hariç toplam alaşım elementi içeriği %5'ten az olan alaşımlı çeliklerdir. DIN 20MnCr5, AISI 5120, 8620, 4340, 9260, vb. örnekler, standarttaki çelik kalitelerini içerir [3].

Yüksek korozyon, yüksek sıcaklık ve aşınma direnci gerektiren uygulamalarda yüksek alaşımlı çelikler kullanılır. Kullanım amacına göre alaşım elementleri değişiklik gösterebilir. Bunun için yüksek konsantrasyonlarda Ni, Cr, Mo, Mn vb. gereklidir [3,4].

Çin standardı 20CrMn çeliği, Alman standardı çeliğe, DIN 20MnCr5'e eşittir. DIN 20MnCr5 çelikin kükürt içeriğini arttırır, bu da kesme performansını daha iyi hale getirirken kaynak performansını zayıf bırakmaktadır [5].

2.2. SEMENTASYON ÇELIKLERININ KULLANIM ALANLARI

Zincir bağlantıları, halkalar (Şekil 2.1), zincir dişlileri, kasnaklar, pimler, piston pimleri, kılavuz yataklar, rulman yatakları, diskler, silindirler, soğuk şişirilerek veya ekstrüde edilmiş bileşenler, kesici aletler ve daha birçok ürün sementasyon çeliklerinden yapılmıştır [1].

Şekil 2.1. DIN 20MnCr5 çelik çubuklarının başlıca kullanım alanları [6].

Otomobil endüstrisinde ise otomobille ilgili parçalar daha uzun süre çalışmak zorunda kalmaktadır, bu durum parçaların daha hızlı yıpranmaması gerektiği anlamına geliyor. En pahalı parça yedek motor dişli kutusudur. Birçok otomobil endüstrisi, dişliler, şaftlar vb. üretmek için sementasyon çeliklerinden DIN 20MnCr5 çeliğini kullanmaktadır [7].

2.3. SEMENTASYON ÇELIKLERININ SINIFLANDIRILMASI

Sementasyon çelikleri kalite çelikleri ve asal çelikler olmak üzere 2 farklı sınıfa ayrılmaktadır (Çizelge 2.1) [1].

Çizelge 2.1. Sementasyon çeliklerinin sınıflandırılması ve standartları [1]

Kalite Çelikleri
C10
C15
Asal Çelikler
17Cr3
16MnCr5
20MnCr5
14NiCr14
13NiCr6
17CrNiMo6
16MnCrS 5
20MnCrS 5

Çizelge 2.2. Sementasyon çeliklerinin standardları [1]

Alman Standardı (DIN)	**Amerikan Standardı (SAE/AISI)**	**İngiliz Standardı (BS/EN)**	**Fransız Standardı (AFNOR)**
C10	1015	050 A 10	CC 10
C15	1015	050 A 15	CC 12
17Cr3	5015	523 M 15	12 C 3
16MnCr5	5115	527 A 19	16 MC 5
20MnCr5	5120	-	20 MC 5
14NiCr14	3316	655 A 12	14 NC 12
13NiCr6	3115	-	10 NC 6
17CrNiMo6	-	-	18 CND 6
16MnCrS 5	5115	-	16 MC 5
20MnCrS 5	5120	-	20 MC 5

BÖLÜM 3

BORLAMA İŞLEMİ

Bor minerallerinin ve ürünlerinin kullanıldığı sektörlerin yelpazesi genişlemektedir. Dünyada bor bileşikleri cam endüstrisinde ısıya dayanıklı cam ve elyaf oluşturmak için, seramik endüstrisinde emaye, frit ve sır oluşturmak için, temizlik ve beyazlatma endüstrisinde deterjan oluşturmak için, yanma önleyici madde endüstrisi oluşturmak için kullanılmaktadır [8,9].

Seyreltilmiş bor alaşımı olarak da bilinen ferroboron, metal endüstrisinde çelik alaşımlarında kullanılan bor türüdür. Bor, ergime sıcaklığını azaltıcı, cüruf dönüşümünü, çelik sertliğini, aşınma dayanımını artırmak ve yorulma direncini artırmak için kullanılır. Bor türevlerinin kullanılması veya alaşımlarının çelikle olan sertliğinin yüksek olması nedeniyle aşındırıcı ve tesviye malzemelerinde kullanılmaktadır [8,10].

Bor kaplanmış malzemeler, göstermiş oldukları üstün özellikler sebebiyle otomotiv, makine, kimya, tekstil ve gıda endüstrileri başta olmak üzere çok geniş bir endüstriyel kullanım alanına sahiptir. Özellikle adheziv ve abraziv aşınma şartlarında birçok kullanım alanı mevcuttur (Çizelge 3.1). Uygulandığı malzemeye kazandırdığı aşınma dayanımı ile öne çıkan, böylelikle parçaların kullanım ömrünü artırarak ekonomik anlamda da çok önemli bir tasarruf sağlatabilen borlama işlemi, diğer termo-kimyasal yüzey yayınım işlemlerine göre pek çok açıdan üstünlük de sağlamaktadır [11].

Çizelge 3.1. Bor kaplanan malzemelerin uygulama alanları [11]

DIN	Uygulama Alanları
115CrV3	Çekme kalıpları, enjektörler, yataklar, giriş pinleri
St50-1	Döküm akıtıcıları, nozüller ve kollar
C5, Ck15	Dişli sürücüleri, pompa şaftları
C45	Pinler, yardımcı kavrayıcılar, aşındırıcı diskler ve sürgüler
45S20	Şaft koruma parçaları, mandreller
Ck45	Girdaplı akış elemanları, nozüller (petro yakıtlar için), merdaneler, sürgüler ve kovanlar
C60W1	Kavrama aynası, yardımcı barlar
X210Cr12	Kovanlar, basma aletleri, plakalar, mandreller, çekiçler, kalıplar
40CrMnMo7	Giriş plakaları, bükme kalıpları
16MnCr5	Helisel yatak tekerlekleri, yardımcı barlar, yatak kolonları

Çelik, dökme demir, nikel alaşımları ve sinterlenmiş karbürlerin borlanması üzerine araştırmalar yapılmıştır. Çünkü borlanmış malzemelerin yüzeyi yüksek sertliğe sahip olup, aşınmaya ve korozyona dayanımı konusunda hassastır [8].

3.1. BORLAMA YÖNTEMLERİ

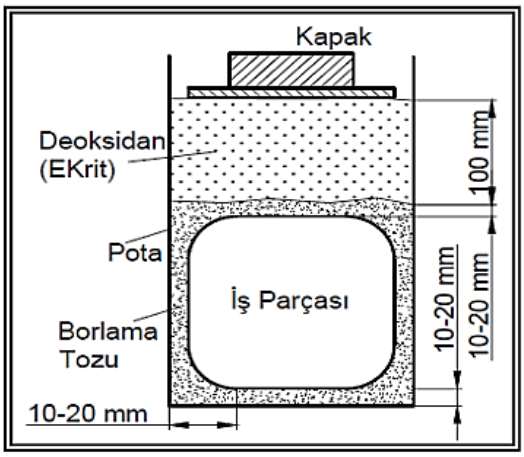
Borlama ısıl işlemin kullanımı yeni değildir. Borlama, günümüzde özellikle geleneksel sertleştirme tekniklerine alternatif olarak oldukça gelişmiş bir sektördür. Hem katı ortamda borlama hem de sıvı ortamda borlama, sırasıyla Almanya ve Rusya'da çeşitli endüstriyel alanlarda etkin bir şekilde kullanılmaktadır [3]. Çözünürlük sınırını aşan bir miktarda bor atomlarının metal borürler üretmek için metalik nesnelerin yüzeylerine yayılması işlemi "borlama" olarak bilinir ve termokimyasal bir yüzey işlemidir. Termokimyasal bor kaplama işleminde sıcaklık ve zaman faktörlerdir. Borlama işlemi için bor temini, bor (amorf bor, B_4C, $Na_2B_4O_7$, B_2H_6, vb.), aktivatörler (KBF_4, NH_4F, vb.), dolgu maddeleri ve deoksidantları (SiC, Al_2O_3) içerir. Aktivatörler, borür tabakasının düzenli gelişmesine etki ederler. Deoksidanlar ve dolgu maddeleri, borlaştırıcı maddenin ana malzemeye yapışmasını engeller. Sinterlenmiş karışımın sert borlanmış malzemesi çok yüksek bir malzeme yüzey sertliğine, aşınma direncine ve güçlü bir korozyon direncine sahiptir. Demirli içerikli malzemelerin borlanmasın da, malzeme yüzeyinde FeB ve Fe_2B ile bu bileşiklerin karışımından oluşan tek veya çift fazlı borür tabakaları elde edilir. Borlama sonucu

yüzeylerde oluşturulan demir borürler (Fe_2B, FeB) yüksek sertliğe, yüksek aşınma direncine ve yüksek korozyon direncine sahip olmasının yanında borür tabakasının düşük sürtünme katsayısına, yüksek termal ve elektrik iletkenliği gibi özelliklere de sahiptir. Alaşımlı çeliklerde ve diğer malzemelerde kendi alaşım elementlerinin borürleri oluşur**.** Borlama işlemi, yüzeyi çok iyi bir şekilde temizlenmiş olan malzemelere, 700-1000 °C aralığında, tercihen 1-12 saat sürede, bor verici katı, sıvı, gaz veya plazma ortamlarda gerçekleştirilebilmektedir [8,10,12]. Ayrıca ilk hazırlık işlemlerinin borlama ve sertleştirme aşamaları boyunca da mevcuttur. İşlem öncesi malzeme üzerinde eğer varsa yağ film tabakasının ve kesme sıvılarının tamamen temizlenmelidir. Borlama işleminin yapılacağı yüzeyde eğer paslanma var ise tel fırça yardımıyla ya da mekanik bir yöntemle pasın giderilmesi gerekmektedir. Parça yüzeyinin pürüzsüz olmasının borlama kalitesinde önemli bir etkisinin olduğundan dolayı yüzeyler, mümkün olduğunca düzgün hale getirilinceye kadar temizlenme işlemlerine tabii tutulmalıdır [13].

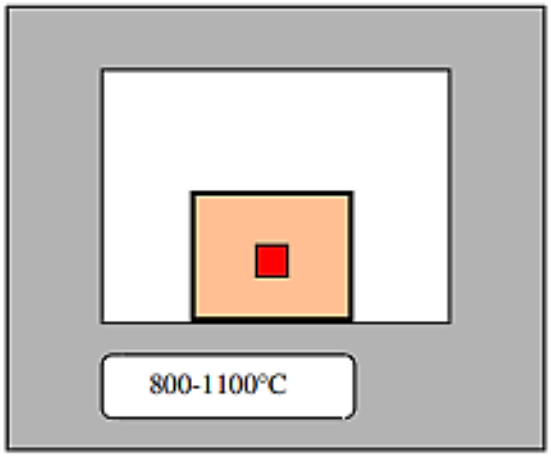
3.1.1. Kutu Borlama Yöntemi

Borlama ortamı olarak katı maddelerin kullanıldığı yöntemdir. Ticari olarak fiilen uygulanan iki yöntemden biridir. Uygulamanın zor olmaması, kullanılacak düzeneğin basit bir işçilikle yapılabiliyor olması, fazla ekipmana ihtiyaç duyulmaması, ekonomik olması, güvenli ve kullanılan toz karışımın kimyasal kompozisyonunda değişiklik yapılabilirliği nedenlerinden dolayı en yaygın kullanılan borlama tekniğidir [14]. İşlemdeki aşamalar genellikle fırınlama, ısıtma ve temizlemeyi içerir. Numune içine yerleştirilmeden önce kapalı bir kutu (Şekil 3.1), B_4C, KBF_4 ve SiC tozları veya granüllerinin bir kombinasyonu ile doldurulur. Burada amaç, oksijenin ortamdan borlama ortamına geçişini durdurmaktır. Sonuç olarak indirgeme ortamı korunur. Pota için fırın kapasitesinin maksimum %60'ı kullanılmamalıdır. Bu, ısıtıcılara yakın olduğu için, pota yüzeyindeki iç gerilimleri, çatlakları ve malzeme dökülmelerini en aza indirmek ve işlem çalışırken yeniden toz ilavesi (%10-50) olması durumunda borlamanın devam etmesi için yapılır. Toz tane boyutları, malzeme yüzeyinde istenilen borür tabakasının özelliklerine bağlı olarak 5 ile 10 mikron arasında olmalıdır. Kutu daha sonra 2-10 saat ve 800-1100 °C sıcaklıkta ısıtılır. İstenilen

sıcaklık ve sürede muhafaza edildikten sonra soğutulur. İşlem sırasında ısıya dayanıklı malzemeden üretilmiş kutular kullanılır [8,15,16].



(a)



(b)

Şekil 3.1.Katı borlama işleminin (a) numune kutusunun hazırlanması ve (b) numunenin fırında ısıtılmasının şematik görünüşü [8,9]

Amorf bor, ferroboron ve boronkarbür, katı borlama işleminde kullanılan üç bor kaynağıdır. Her ikisi de mükemmel bor donörleri olan ferrobor ve amorf bor tarafından kalın bir borür tabakası oluşturulur. Bunlardan en sık kullanılanı borkarbürdür. Aktivatör olarak sodyum karbonat (Na2CO3), potasyum bor florür (KBF4), baryum florür (BaF2), amonyum klorür (NH4Cl), silisyum karbür (SiC), grafit ve sodyum klorür kullanılır. İndirgeyici maddeler çözünmeyi kolaylaştırır, akışkanlık sağlar ve süreçte hiçbir rol oynamaz [9,12,17]. Buna ek olarak, piyasada Ekabor tozu gibi ticari bor sağlayıcıları da sunmaktadır. Çizelge 3.2 borlama için kullanılan Ekabor tozlarının farklı nitelikleri hakkında ayrıntılı bilgi vermektedir. Borlaştırıcı maddenin partikül boyutu azaldıkça temas alanı yükselir. Sonuç olarak, bor atomu difüzyonu kolaylaştırılır. Sonuç olarak, borür tabakasının kalınlığı ve mikrosertliği yükselir. Borlama, kaynaklı bağlantılarda iyi sonuç veren bir tekniktir [18,19].

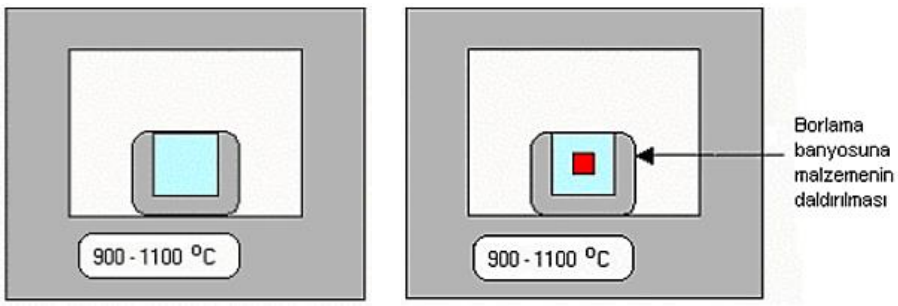
Çizelge 3.2.Borlama amaçlı kullanılan Ekabor tozlarının çeşitli özellikleri [11,12]

Tip	**Tane Boyutu (µm)**	**Yoğunluk (gr/cm^3)**	**Özellik**
Ekabor-I	≤ 150	1,90	Yüksek yüzey kalitesi ve optimum tabaka kalınlığının oluşumda kullanılır. Toz halindedir.
Ekabor-II	≤ 850	1,70	Granüllüdür. Yüzey pürüzlülüğü bakımından ileri seviyede kalitededir. Düşük alaşımlı çeliklerin borlama işleminde kullanılır.
Ekabor-III	≤ 1,400	0,95	Granüllüdür. Ekabor-II'ye göre daha büyük taneli ve yüzey kalitesi olarak daha iyidir. Yüksek alaşımlı çeliklerin borlama işleminde kullanılır. İşlem sonrasındaki toz akıcılığı hala iyidir.
Ekabor HM	≤ 150	0,95	Çok iyi yüzey kalitesi; sert metal, küçük delik ve kalın tabakalar için.
Ekabor WB	220–350	0,95	Oksijensiz gaz atmosferde kullanılır.
Ekabor Pasta	-	1,90	Daldırma, fırça ile sürme ve püskürtme ile uygulanabilir, inert gaz altında çalışılmalı.
Ekrit	≤ 420	1,55	Örtü malzemesi, borlama süresince toz borlama ürünlerine oksijen sızmasını önler.

Kutu borlama işlemi bittikten sonra % 25 ile 45 oranında niteliklerini koruyan bir borlama karışımı kalabilir, bu nedenle bu kombinasyon 4 veya 5 kez daha kullanılabilir [11].

3.1.2. Sıvı Borlama Yöntemi

Metalik elementlerin bor içeren erimiş tuz çözeltisine daldırılmasıyla sıvı ortamda borlama üretilir (Şekil 3.2). Bor bileşikleri, aktivatörler ve indirgeyici maddeler tuz banyosunu oluşturur. Borlama zamanı daldırma zamanıdır. Difüzyon, erimiş tuz banyosuna çeşitli oranlarda B_4C, BaO, KCl ve NaCl eklenmesiyle büyük ölçüde arttırılır. Borlama işlemi sırasında elektrik akımı kullanılıyorsa elektrolitik borlama (elektroliz tekniği ile borlama) olarak bilinir; aksi halde normal sıvı ortamda daldırma yöntemiyle borlama olarak bilinir [10,13]. Borlama işlemi, 700 ile 1000 °C arasındaki bir sıcaklıkta 2 ile 9 saat sürer. Sıcaklık, bu yaklaşımın bir dezavantajıdır. Sıcaklık 850°C'nin altına düştüğünde erimiş boraksın akışkanlığı azalarak borlaşmayı imkansız hale getirir [11,20]. Prosedür, susuz boraks (Na2B4O7), susuz borik asit (B2O3), metaborik asit (HBO2), boraks ve bor karbür gibi bor bileşiklerinin kullanımını içerir. Silisyum karbür, ferrosilisyum, grafit, NaCl ve Al dahil olmak üzere indirgeyici maddeler kullanılır. Borlaştırıcının sıvı hale gelmesi için yüksek konsantrasyonlarda bor veya NaCl gibi çözücüler gereklidir. Olgunluk ayrıca bu okunabilir malzemelerde erir ve sıvı bir çözelti verir. Borlamada erimiş tuz numune yüzeyine yapışır ve bir kaplama haline gelebilir, bu durumda ekstra bir temizleme prosedürü gerekebilir. Bu ise bu prosesi istenmeyen hale getirir [18].

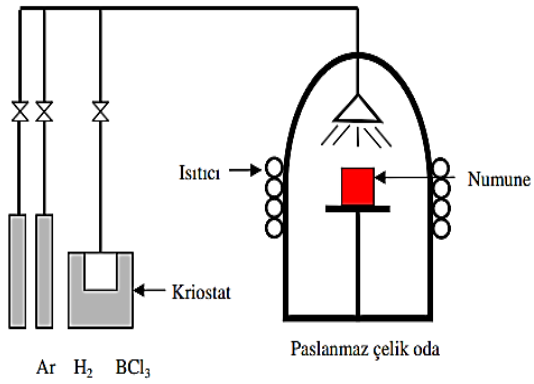


(a) (b)

Şekil 3.2.Sıvı borlama sisteminde, (a) borlama sıvısının eritilmesi ve (b) borlama sıvısına numuneye daldırılması [8].

3.1.3. Gaz Borlama Yöntemi

Boridlerin gazlı bir borlama ortamı ile termal olarak parçalanmasıyla üretilen buhar bazlı borlama yöntemidir [11]. Ortamın basıncı, gaz ortamının yapısı ve gazın sistemden çıkış hızı bu teknikte borlama tabakasını belirleyen parametrelerdir [21]. Gaz borlamanın avantajları gaz sirkülasyonu sonucu daha uniform bir bor dağılımın sağlanması, sonradan temizleme gerektirmediği için kolay elde edilmesidir. Ancak bor tabakasının gözenekliliğini ve bileşimini kontrol etmenin zorluğu yöntemin en önemli sorunlarıdır [22]. Dışarıdan sızdırmazlığı sağlanan paslanmaz çelik bir silindirde, numuneye belirli bir Ar ve H_2 gazları kombinasyonunun yanı sıra gazlaştırılmış bir bor kaynağı (örneğin BCl_3) püskürtülür. Borlama işlemi 1:15 BCl_3+H_2 gaz kombinasyonunda 67 KPa (0.67 bar) basınçta, 700 - 950 ^oC sıcaklık aralığında gerçekleştirilirse borür tabakası kalınlığı 120 ile 150 mikron arasında olabilir. Son araştırmalar, H_2 yerine indirgeyici olarak 75:25 N_2:H_2 kullanıldığında kırılgan FeB fazının azaldığını ve daha yüksek yüzey kalitesine sahip bir borür tabakasının üretildiğini göstermiştir. Gaz borlama ünitesinin şeması Şekil 3.3'te görülmektedir.



Şekil 3.3.Gaz borlama ünitesi [8]

BCl_3 (boron halojenürler), BF_3, B_2H_6 (diboran) ve TEB (trietil boran) gibi gazlaştırılabilir bor bileşikleri, hidrojen gazı ile birlikte bir indirgeyici olarak gaz borlamasında kullanılır. Gaz borlama işleminde kullanılan Diboran ve bor halojenürler zehirlidir, korozyona karşı hassastır ve patlayıcı etkiye sahiptir; Sonuç olarak, çevre kirliliği nedeniyle ticari kullanımları kısıtlanmıştır. Ek olarak, diboran yaklaşık 150

^{o}C'lik bir sıcaklıkta parçalanır. Bununla birlikte, diboran'ı rafine etmek için hidrojen kullanmak son derece maliyetlidir. Sonuç olarak, prosedür zordur. Trimetil boron $(CH_3)_3B$, trietil boron $(C_2H_5)_3$ ve trietillamin boron dahil toksik olmayan organik bor kaynakları, diboran ve bor klorür gazlarının ikamesi olarak kullanılmaktadır. Bu gazlar tehlikeli olsalar da, zehirli olmamaları nedeniyle yine de kullanılırlar [3,10,23].

3.1.4. Plazma Borlama Yöntemi

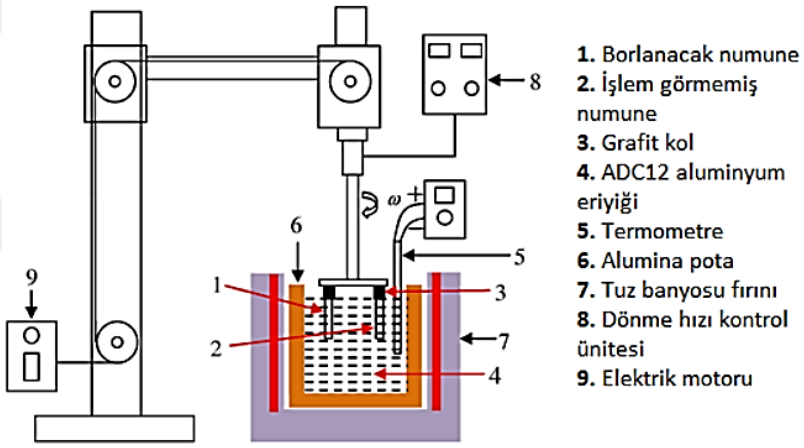
Katı haldeki bir maddeyi enerji vererek sıvı, sıvı haldeki maddeyi enerji vererek gaz ve gaz durumdaki maddeyi enerji vererek plazma haline getirmek mümkündür. Plazma borlamanın mekanizması yüksek sıcaklıktaki malzemelerin taşıyıcı metal yüzeyine püskürtülmesini kapsar (Şekil 3.4) [24]. İyonlar, elektronlar, uyarılmış atomlar, fotonlar ve nötr atomlar veya moleküller plazmayı oluşturur. Gerçekte, plazma oluşturmak için ısı enerjisi, radyasyon veya elektrik boşalması kullanılır. Elektrik deşarjı en sık kullanılan plazma tekniğidir. Belirli gereksinimlerin karşılanması ve uygulanan voltajın plakalar arasındaki gazın bozulma voltajından daha büyük olması koşuluyla, aralarına bir elektrik voltaj kaynağı bağlandığında bu iki plaka arasında bir elektrik akışı meydana gelir [8,9,19].

Proses sıcaklığına, malzemenin bileşimine, basınç ve gaz değişim oranlarına ve kullanılan akım yoğunluğuna bağlı olarak, malzemenin mikro yapısını ve borlama işleminin bir sonucu olarak oluşan borür tabakalarının gelişimini düzenlemek mümkündür [25].

Trietil boran $(B(OCH_3)_3)$, BCl_3, BF_3 ve B_2H_6 gibi bor bileşikleri, 10-2 Pa civarında düşük basınçlarda ve 800 ile 1100 °C arasındaki sıcaklıklarda üretilen bir plazmada bor kaynağı olarak gerçekleşir. Raporlara göre, BCl_3 ve H_2Ar gazlarının bir kombinasyonunu kullanan plazma borlama, daha az kalıntı stres, geliştirilmiş BCl_3 konsantrasyon kontrolü ve bor film tabakalarının artan mikrosertliği gibi avantajlar sunar [21]. Bu prosedürde bor tozu, hava ve hidrojen ile birleşmeden önce bir dizi ısıtma aşamasından geçirilir. Basınç odasında (300–1500 Pa), sıcak gaz proses odasında biriktirilmeden önce hızlandırılır. Gaz, 800–1100°C'ye ısıtılmış nozullardan geçerken plazma haline gelir. Soğutulan plazmanın yüzeyi daha sonra kalan bor

iyonlarından kurtulmak için sodyum hidroksit ile temizlenir. Proses sıcaklığı, gaz karışım oranları, malzeme bileşimleri, basınç değişim oranları ve uygulanan akım yoğunluğunun tümü, demir bor katmanlarının mikro yapısını ve gelişimini düzenlemek için kullanılabilir. Plazma borlama, geleneksel borlama, tuz borlama ve gaz borlama ile karşılaştırıldığında çevre kirlilik potansiyeli nedeniyle son zamanlarda daha fazla ilgi görmüştür [13,18].

Yüksek enerji ekonomisi, minimum çarpılma ve düşük işleme sıcaklığı, plazma borlamanın faydalarıdır. BCl_3 ve B_2H_6 gazlarının kullanılması, plazma borlamanın bir dezavantajıdır. Bu gazlar pahalı, sağlık açısından zehirli, patlayıcıdır ve korozyona maruz kalırlar [8,19].



Şekil 3.4.Plazma borlama şeması [26].

3.2. ALAŞIM ELEMENTLERİNİN BORLAMAYA ETKİSİ

Geçiş bölgesinin morfolojisi, tabaka geliştirme kinetiği, mekanik özellikler, kaplama kalınlığı, tabaka morfolojisi ve faz bileşenleri alaşım elementlerinden etkilenmektedir [27]. Genel olarak bütün alaşım elementleri için tabaka kalınlığında bir azalma tespit edilmiştir [28]. Öyle ki, her iki malzeme türü için de borlama işleminin bir sonucu olarak saf malzemelerin kaplama kalınlığı alaşımlı malzemelerden daha üstündür [21]. Alaşım elementleri borlama esnasında bor difüzyonunu olumsuz etkilemekte olup, ana malzeme ve borür tabakasının özelliklerini değiştirmektedir [29].

Borlanmış malzeme, üç ayrı yerde alaşım bileşenlerini içermektedir. Bunlar, kararlı bileşikler oluştururlar, tercihen kaplanmış tabaka üzerine yayılırlar veya bor ile etkileşime girerler. Borlama tabakasında çözünen elementler (Cr, Mn, V, Ni, Mo) ve çözünmeyen elementler (C, Si, Al, Cu) yer almaktadır [21]. Alaşım elementlerinin atom ağırlıklarına ve atom çaplarına bağlı olarak borlanmış malzemeler üzerinde farklı etkileri vardır. Örneğin atom numaraları Fe'ninkinden küçük olduğu için Cr ve Mn elementleri taban malzemeden yüzeye, Ni ve C elementleri ise yüzeyden içeri difüze olur [25].

Düz veya testere dişi morfolojisinde, alaşım bileşenleri borür kaplama tabakasının birincil matrisine bağlanmaktadır. Ara yüzeydeki iç gerilimler, testere dişi deseni borür tabakası ile ana metal arasındaki bağı güçlendirse bile daha geniş bir bölge boyunca yayılabilmektedir [8].

Ana malzeme içerisindeki karbon oranının artması tabaka kalınlığını azaltmaktadır. Karbon, FeB ve Fe_2B gibi fazlarda çözünmediğinden borür tabakasından matrise doğru ilerleyerek, borür tabakasının altında yani difüzyon bölgesinde perlitik bir faz oluşutururlar ve burada Fe_3C, Cr_3C, Fe_6C_3 gibi karbürler halinde birikirler. Bu durum tabaka yapısını önemli oranda etkilemektedir. Oluşan bu karbürler Fe_2B fazının FeB fazına göre daha kararlı olmasını, bor tabakasının azalmasını ve Fe_2B fazı ile matris ara yüzeyinin (difüzyon-geçiş bölgesinin) düzenli olmasını, borür tabakasını daha sıkı ve sert bir yapıya sahip olmasını sağlarlar [27,30].

Krom, çeliklerdeki borür tabakasının derinliğini ve şeklini etkiler. Katman kalınlığı ve arayüzün girintili şekli, krom konsantrasyonu arttıkça azalır. Kromun borür tabakasının kalınlığını azalttığını ima eden araştırmaların aksine, kromdaki bir artışın borid tabakasının toplam kalınlığını değiştirmediği, sadece FeB ve Fe_2B fazlarının kalınlığını değiştirdiği öne sürülmüştür. Krom, demirden daha düşük bir atom numarasına sahip olduğundan, borlandığında borür tabakasında çözünür ve malzeme içinden yüzeye yayılır [21,31,32]. % 4 Cr içeren çelikler 65-95 mikron kalınlığında sütunlu borür tabakası oluştururken, % 12 Cr içeren çelikler 65 mikron kalınlığında düz borid tabakası meydana getirmektedir. %26 Cr içeren çeliklerde borür tabakasının kalınlığı tipik olarak 5 mikrondan fazla değildir. Sonuç olarak, krom içeriği arttıkça

bor tabakasının özellikleri iyileşir; bor bakımından zengin bileşikler oluşturulur, tabakanın kalınlığı düşer ve bor tabakasının matris ile ara yüzeyi düzleşir [33]

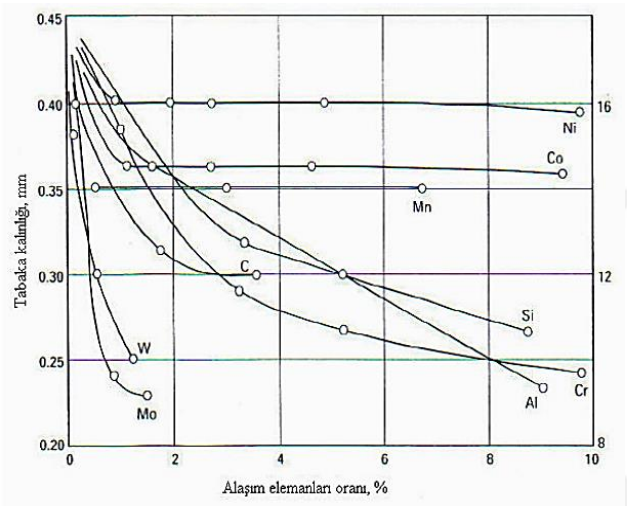
Manganez ve nikel borür tabaka kalınlığını fazla etkilememektedir [28]. Buna karşılık yüksek nikel oranı borür tabakasının kolonsal yapısını ve tabakanın derinliğini azaltmakta, yüksek poroziteyi ve kötü mekanik özellikleri beraberinde getirmektedir [33]. Demir atomu ile nikel bor tabakasında (Fe, Ni) B ve $(Fe, Ni)_2B$ bileşikleri oluşturarak bor tabakasında yer alır. Borid tabakasının altında nikel daha fazla birikebilir ve Fe_2B fazına (geçiş bölgesi) ulaşabilir. Ek olarak, bu durumda Ni_3B'nin oluşmasına neden olabilir. Manganez, karbon çeliklerinde üretilen borür yapısının sütunluluğu üzerinde düzleştirici bir etkiye sahiptir ve borür tabakasının kalınlığını azaltmada etkilidir. Kırılma tokluğu manganezden olumlu şekilde etkilenmektedir [34,35].

Borid tabakası sertliği silisyumdan etkilenmez, ancak silisyum geçiş bölgesinin sertliğini arttırır [36]. Silisyum, borür tabakasını daha kırılgan hale getirdiğinden, %1'den fazla silisyum içeren çelikler borlama için uygun değildir [37]. Al ve Si bor atomlarının difüzyonu sırasında borid tabakasında çözünmedikleri için yüzeyden içeriye doğru itilirler. Fe_2B fazının önündeki difüzyon bölgesinde birikerek ferritik yapıya sahip bir bölge oluştururlar. Aşırı yumuşaklığından dolayı ferritik bölge sertleştirilemez. Sert borür tabakasının altında yer alacak ve ana malzemeden daha yumuşak olan ferrit, kaplanmış malzemenin, kırılmasına, pullanmasına veya parçalanmasına neden olacaktır [10,11,21]. Basınç ve darbe altında çalışan, borlama işlemi uygulanabilen makinesi bileşenlerinde Silisyum içeriğinin %0,7'den düşük olmalıdır [32].

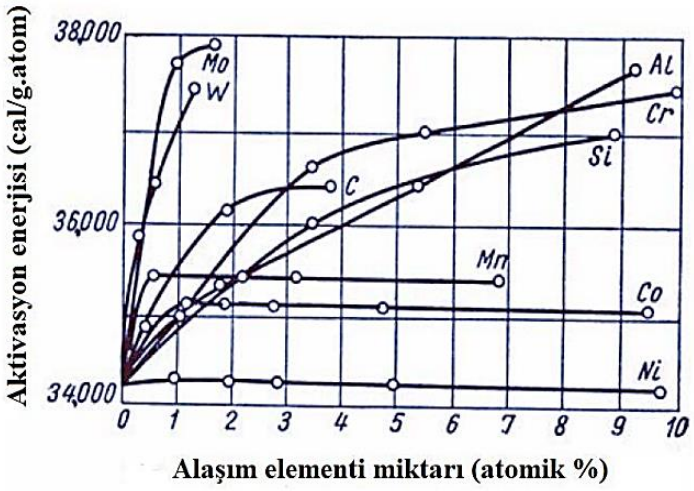
Kaplama tabakası ve geçiş bölgesi arasında, molibden, titanyum, tungsten ve vanadyum gibi alaşım elementleri sıklıkla yer alır, bu da toplam tabaka kalınlığında bir azalmaya ve borid tabakasının sütunlu yapısının düzleşmesine neden olur. Malzemelerdeki vanadyum içeriğinin % 0.15'ten fazla bor içermemesi istenir. Vanadyum kararlı bor bileşikleri (VB, V_2B_3) üretmenin yanı sıra yüksek sertlik, yüksek erime sıcaklığı ve yüksek aşınma direnci sergiler [28,31]. FeB'de titanyum

çözülür ve metali sertleştirir. Geçiş bölgesinde, tane irileşmesinin önlenmesine de yardımcı olur [36].

Şekil 3.6'da bir alaşım elementinin belirli bir atom yüzdesinin bor difüzyonu için gereken aktivasyon enerjisi üzerindeki etkisini göstermektedir. Şekil 3.5' ise alaşım elementlerinin borür tabakasının kalınlığı üzerindeki etkisini göstermektedir [11].



Şekil 3.5.Borür tabaka kalınlığına alaşım elementlerinin etkisi [11]



Şekil 3.6.Alaşım elementi miktarının bor aktivasyon enerjisine etkisi [11]

3.3. BORLAMANIN AVANTAJLARI VE DEZAVANTAJLARI

3.3.1. Borlamanın Avantajları

Eşsiz özellikleri nedeniyle borür tabakaları, geleneksel teknikler kullanılarak oluşturulanlara göre önemli faydalar sunar. Sertlik, aşınma direnci, kırılma tokluğu ve darbe direnci, borlanmış malzemelerin mekanik olarak nasıl davrandığını etkileyen birincil fiziksel özelliklerdir. Bor tabakasının yapışması ve 1450–5000 HV yüzey sertliği nedeniyle aşınma koşullarında oksidasyon, aşınma ve yüzey yorulması gibi aşınma süreçlerine karşı dayanıklıdır [27,38]. Bu özellik, kalıp üreticilerinin ana metali, işlenmesi daha basit olan ve orijinal malzemeden daha iyi aşınma direnci ve korozyon özelliklerine sahip olan çeliklerle değiştirmesini mümkün kılmıştır [39].

Borlanmış çeliklerin yüzey sertliği diğer prosedürler ve sert malzemelerle karşılaştırıldığında, karbon içeren çeliklerin borid tabakasının sertliğinin diğer geleneksel yüzey sertleştirme tekniklerinden önemli ölçüde daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Tungsten karbür ve krom kaplı çeliğin sertleştirilmiş takım çeliğine eşit olduğu iddia edilmektedir [27]. Çizelge 3.3 borlama ve birkaç yüzey sertleştirme tekniği ile üretilen sertlik değerlerini vermektedir.

Çizelge 3.3.Belirli malzemelerin mikrosertlik sonuçları [18]

Malzeme	Mikrosertlik (HV)
Borlanmış yumuşak çelik	1600
Borlanmış AISI A2 çeliği	1900
Borlanmış AISI H13 kalıp çeliği	1800
Su verilmiş çelik	900
Su verilmiş+temperlenmiş H13 çeliği	540-600
Yüksek hız çeliği BM 42	900
Su verilmiş+temperlenmiş A2 çeliği	630-700
Nitrürlenmiş çelik	650-1700
Sementasyonlu düşük alaşımlı çelik	650-900
Sert krom kaplama	1000-1200
TiN	2000
SiC	4000
Elmas	>10000
SiC	5000

Borür tabakasının başlıca diğer avantajları:

- Bor tabakası, yüksek sıcaklıklarda (650^{o}C) bile daha dayanıklı ve ısıya dayanıklı olup, borlama işlemi sonucunda yüksek (1450-5000 HV) yüzey sertliği sağlar.
- Borür bileşenler, oksitleyici ve aşındırıcı koşullarda iyileştirilmiş yorulma ömrüne ve hizmet performansına sahiptir.
- Sertleştirilebilir çelikler de dahil olmak üzere çok çeşitli çelikler prosese uyumludur.
- Bir iş parçasının sertleştirilmesi gereken karmaşık düzensiz formlara ve belirli lokal bölgelere üniform olarak uygulanabilir.
- Borür tabakası, alaşımlı çeliklerin H_2SO_4, H_3PO_4 ve HCl gibi seyreltik demir bazlı asitlere karşı savunmasını güçlendirir.
- Borlanmış çelikler, yüksek sıcaklıklarda (850^{o}C) güçlü oksidasyon direnci ve sıcak metallerin korozyonuna karşı direnç gösterir.
- Borlama işlemi kullanılarak makineye daha uzun bir hizmet ömrü verilerek, ekipmanın tamamlanması için çözülmesi zor olan problemler giderilebilir. Bazı gezegenlerde aşındırıcı koşullar da aşındırıcı korozyona neden olabilir. Yine bu durumda borlanmış kesitler diğerlerine göre önemli ölçüde daha fazla direnç gösterir.
- Bor bileşikleri, sürtünme katsayısını düşürerek ve soğuk kaynak eğilimini azaltarak yağlayıcı ihtiyacını azaltır. Bu özellik, yüzeyin yapışkan aşınma eğilimini azaltır. Yüzey borlanmış malzemeler bu nedenle soğuk metal çalışma ortamlarında işlev görebilir. Ekonomik olarak bakıldığında yağlayıcı kullanımının sınırlandırılması borlama işleminin avantajlarından biridir [20,27,38].

3.3.2. Borlamanın Dezavantajları

Diğer birçok uygulamaya benzer şekilde, malzeme yüzeyinden termokimyasal etki ile bor difüzyonu tekniği önemli dezavantajlara ve sınırlamalara sahiptir.

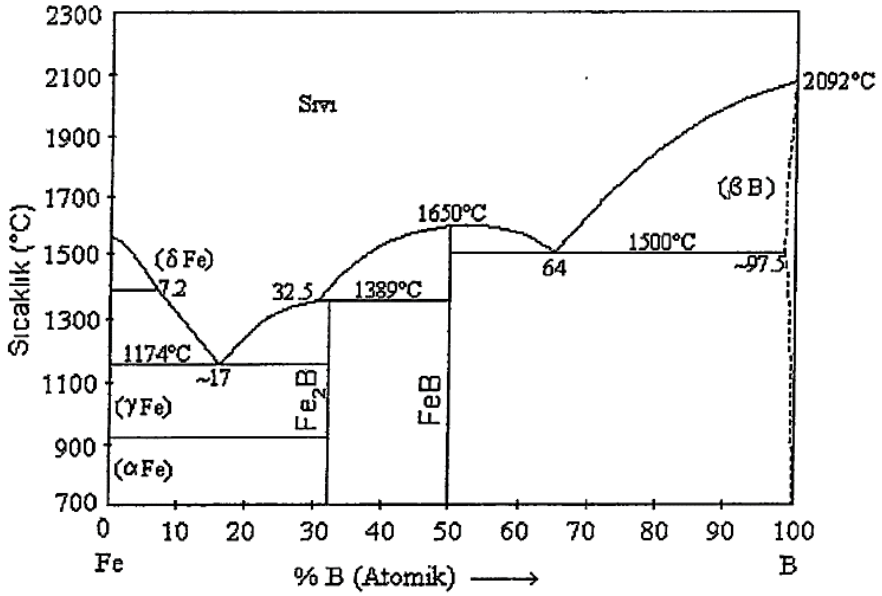
- Kutu borlama nedeniyle yüzeydeki borür kaplama tabakası homojen değildir ve borlama işlemi için yüksek sıcaklıklar gerektirir.

- Borlama yöntemlerine kıyasla gaz sementasyonu ve plazma nitrasyonu daha düşük işletme ve bakım maliyetleri, esneklik, daha hızlı işlem süreleri ve daha basit uygulamalar sağlar.
- Borid tabakalarının yüksek sertlik ve dikkate değer aşınma ve korozyon direncine ihtiyaç duyan mühendislik bileşenlerinin yanı sıra daha düşük işçilik gerektiren mühendislik bileşenleri borlama işleminden yararlanabilir [40,41].
- Plazma borlamada kullanılan atmosfer çok tehlikeli olduğu için sanayide kullanılmaz. Borlanmış malzemeler, bor tabakasının kalınlığında %5-20'lik bir boyutsal artış gösterir.
- Teorik olarak, borlama işleminin sıcaklığı arttıkça tabaka kalınlığı da artar. Borlanmış tabakanın kalınlığı arttıkça yüzeydeki gözenekliliğin gelişimi hızlanır. Artan gözeneklilik sonucu oluşan bor tabakası kırılgan bir yapıya sahiptir.
- Borlamadan sonra yüzey pürüzlülüğü büyük ölçüde artar ve yüzey pürüzlülüğü arttıkça korozyon direnci de artar.
- Geleneksel yüzey işleme teknikleri, kaplama tabakasında çatlaklara neden olur.
- Sıvı borlamada malzemeye son derece iyi bir şekilde yapışan tuz tabakasının çıkarılması, sıvı borlama işleminin maliyetini arttırır ve büyük parçalarda kullanılamaz.
- Gaz borlama işlemi zehirli bir atmosfere, patlama tehlikesine ve pahalı kurulum maliyetlerine sahiptir.
- Yüksek hız çelikleri, sertleşme sıcaklığı 1150 ^{o}C'yi aştığı için borlanamaz [20,21, 23,27,42].

3.4. FE-B İKILI FAZ DENGE DIYAGRAMI

Boraks atomları, yüksek sıcaklıkta (700–1000°C) borlama işlemi sırasında demir ara boşluklarında çözülür. Bor atomları, demir alaşımlarına hızla yayılır ve termal enerji ile demir alaşımlarının matrisine yerleşir, küçük atom çapları ve güçlü hareketlilikleri sayesinde FeB ve Fe_2B tipi metaller arası bileşikler üretir [43,44]. Bu yayınma işlemi ile tek fazlı Fe_2B veya iki fazlı Fe_2B + FeB'den oluşan bir ferroboron tabakası oluşturulur. Fe_2B ve FeB ile iki fazın aksine Fe_2B'nin tek faz olarak gelişmesi tercih

edilir. FeB fazının gelişimi, bor bakımından zengin FeB fazının yüksek kırılganlığından dolayı istenmez. FeB, Fe_2B'lerden (sırasıyla 23 x 10^{-6}/°C ,7,85 x 10^{-6}/°C) daha yüksek olan bir termal genleşme katsayısına sahiptir. İki fazlı sistemde oluşturulan Fe_2B ve FeB fazlarının farklı termal genleşme oranları nedeniyle, yüzey çatlakları meydana gelir. Ancak pratikte FeB ve Fe_2B fazlarının birbirine uyguladığı basma ve çekme gerilmeleri sıklıkla iki faz arasında çatlaklara neden olur. FeB fazının oranını düşürerek veya FeB fazının oluşmasını önleyerek bu çatlaklardan kaçınılabilir. Borlama işlemi sırasında zamana ve sıcaklığa bağlı olarak tek veya çift fazlı fazlar gelişebilir. Sonuç olarak, işlemin başlangıcındaki borlama sıcaklığını belirlemek için Şekil 3.7'de verilen demir-bor denge diyagramı kullanılmalıdır [9,10,45].



Şekil 3.7.Fe-B denge diyagramı [21]

Hume-Rothery yasalarına göre alaşım elementleri için atomik çap boyutlarına sahip Fe alaşım sistemlerinde yer alan veya ara yer elementi olarak ergiyebilir. Atom büyüklüğü faktörü bu yasalar bağlamında en önemli faktördür. Atom boyutu faktörü Fe-B sistemi için en önemli faktördür. Borun atom çapı, demirin atom çapından %27 daha küçük olduğu için katı bir çözelti oluşturabilir [10,13].

Şekil 3.7'deki demir-bor ikili denge diyagramından, 1394ºC'de %7.20'lik bir B konsantrasyonunda ve 911ºC'de γ-Fe' den γ-sıvıya dönüşüm gerçekleştiren bir metatektik reaksiyonun meydana geldiği gözlemlenebilir. Bor içeriği ağırlıkça % 8.83 olduğunda Fe_2B bileşiklerinin oluştuğu, bor içeriği ağırlıkça % 16.23 olduğunda FeB bileşiklerinin oluştuğu görülmektedir. Ek olarak, 1149 ºC'de demir ve bor, ağırlıkça %3,8 bor içeriğine sahip bir ötektik oluşturmak üzere birleşir [32,42]. Bor difüzyonu ötektik gelişmeye hakimdir. γ -Fe tane sınırlarında ve/veya Fe_2B, $Fe_3(C,B)$'de ile başlar. Ötektiğin yapısı ve özellikleri hem kimyasal kompozisyonun soğuma hızından hem de çevrenin soğuma hızından etkilenir. Yüksek soğutma oranlarında, ince mikro yapı ve yüksek sertlik meydana gelir. Ötektik noktasının düşük sıcaklıklarda olması, başta karbon olmak üzere diğer bileşenlerinden kaynaklanır. Demir matrisinde bor oranının yüksek olması durumunda Fe_2B fazından FeB fazına bir geçiş görülebilir. α-Fe ve γ-Fe yapılarında %0,5 bir konsantrasyonda bor içermektedir. Ancak bor miktarını kesin olarak tespit etmek mümkün olmamıştır [20,25].

3.4.1. Borür Tabakasının Büyüme Mekanizması

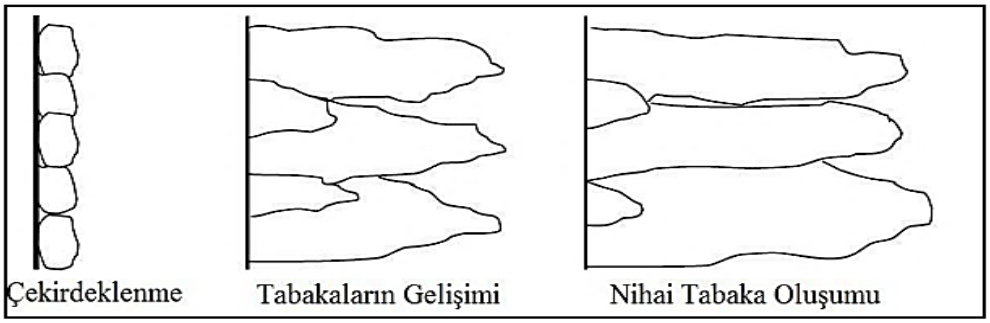
Demir esaslı malzemelerin borlanmasından kaynaklanan katman, genellikle demir boridlerin çekirdeklenmesi ve büyümesi olarak kendini gösterir.Demir boridler;

- yüksek ısıl iletkenliği,
- yüksek elektrik iletkenliği
- yüksek sertlik özellikleri

özelliklerine sahiptir [30].

Borlama işlemindeki borür fazlarının başlangıç bölgeleri, tane sınırları, dislokasyonlar, atomik boşluklar gibi mikro hataları ve yüzey pürüzlülüğü ve çizikler gibi yüzeyin daha reaktif kısımlarını içerir. Bu, borlama ortamının aktif bor konsantrasyonuna bağlıdır. Fe_2B çekirdekleri bu bölgelerde oluşur ve büyür. Boridlerin çekirdeklenmesi, düşük aktif bor konsantrasyonlarına sahip yerler için en uygunudur. Bu bölgeler çekirdekleşmeye uğrar, bu da küçük borid bölgelerinin oluşumuyla sonuçlanır.

Borlama ortamı ve malzeme yüzeyi arasındaki etkileşimi, borlamanın ilk aşaması olarak Fe_2B çekirdeğini üretir [11]. İkincisi, sıcaklık ve zamanın bir fonksiyonu olarak difüzyon mekanizmaları aktive olur ve difüzyon başlar [18]. Bu iki işlem sürekli bir döngü içinde ilerlerken bor tabakası gelişir ve belirli bir kalınlığa ulaşır. Borlama süresiyle birlikte zamanla çekirdek oluşumu yüzeyde artar ve ince bir bor tabakası oluşur. Çekirdeklenmeyi takiben daha fazla bor içeren Fe_2B bileşikleri oluşmaya başlar. Fe_2B ve FeB yapısında bor, çeliğin yüzeyi boyunca dağılır. Şekil 3.8'de gösterildiği gibi, borlama işlemi sırasında numune yüzeyinde ilk borür çekirdeği oluşur [8,9,10,13].



Şekil 3.8.Borlama sırasında borür tabakasının oluşum aşamaları

Yüksek saflıkta demir gibi düşük demir-bor reaktivitesi durumlarında, bu noktaların yalnızca küçük bir kısmı reaksiyona girerek rastgele çekirdeklerin oluşmasına neden olur. Ortamın bor potansiyeli yüksek olduğunda metal yüzeyinde daha az reaktif olan alanlar aktive edilerek sürekli bir tabaka oluşturulabilir. Üretilen bu borür tabakasının en dış yüzeyinde FeB_{1+X} fazı, ardından FeB fazı, yüzeyden uzaklaştıkça Fe_2B fazı ve daha içeride bir geçiş bölgesi yer alır [13,29]. Ancak, reaksiyon temasının ötelenmesi nedeniyle, Fe_2B fazı ile matris arasında olduğu kadar FeB fazı ile Fe_2B fazı arasında da bor difüzyonu gerçekleşir [12].

Borlama prosesinde homojenlik sağlanmadan, borlama işlemi soğumaya maruz bırakılırsa borun iç bölgeye difüze olmasının zorlaşması nedeniyle Fe_2B faz yapısının iç kısmında Fe_3B fazınında yer aldığı da gözlenmiştir [12]. Borür tabakasının büyüme mekanizması iki şekilde ortaya çıkmaktadır [42].

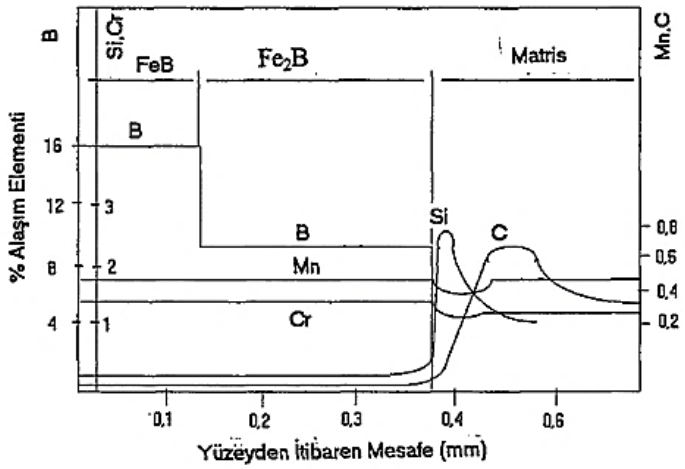
- Difüzyon Kanallı Büyüme mekanizması

- Uçtan büyüme mekanizması

Numunede oluşan ilk borid çekirdeği, difüzyon kanalı geliştirme sürecine uygun olarak meydana gelir. Ortogonal prizmatik yapı en büyük kesite sahiptir ve bor atomu difüzyonuna en elverişli olanıdır. Borid tabakaları geçiş bölgesine doğru [001] yönünde bor atomları yayılarak Fe_2B kristalleri oluşturur. "Difüzyon kanalı büyüme mekanizması" terimi bu duruma atıfta bulunur. Sonuç olarak, borid granülleri, yüzeye dik olan [001] yönü boyunca daha hızlı gelişir. Diğer yönlerde bor taneleri daha yavaş hareket eder. Bu malzemeler borid tabakalı kolonlar olarak sınıflandırılır. Fe_2B oluşturulduğunda gerçekleşir. İlk Fe_2B aşamasının olgunlaşması biraz zaman alacaktır. Borid tabakasının hedefindeki FeBx, FeB ve Fe_2B yapıları bu tabakayı oluşturur. FeB fazı bordan geriye kalan tek şeydir. Fe_2B fazı ile karşılaştırıldığında, FeB fazı daha kısadır. Sonuç olarak, FeB fazının oluşumu Fe_2B fazından daha zayıftır [8,9,10].

Borür tabakasının gelişimini anlatan ikinci mekanizma ise uçtan büyüme mekanizmasıdır. Bu mekanizmaya göre ana malzemenin bileşimine, bor kaynağına ve borlama prosesi koşullarına bağlı olarak ilk olarak çekirdeklenen Fe_2B fazı iğnemsi bir morfolojide büyür ve bor eğimine paralel yönlenme gösterir. Bu durumda Fe_2B çekirdeğinin uç kısımlarında oluşan bölgesel yüksek gerilim alanları ve kafes distorsiyonları tabakanın kolonsal yani eş eksenli olarak büyümesini sağlamaktadır [10,11,46].

Çok fazlı borür tabakalarında Fe_2B üzerinde FeB'nin büyüme mekanizması demir üzerinde Fe_2B' nin büyümesi ile aynıdır. Ancak aynı tabaka için FeB/Fe_2B ara yüzeyindeki kolonsallık, Fe_2B / matriks ara yüzeyine göre daha düşüktür. Fe_2B fazı nispeten sünek olan bir matrikste büyürken, Fe_2B fazı üzerinde büyüyen FeB fazı çok sert bir fazdır. Bu farklılıklar, ara yüzeylerde çok farklı bölgesel gerilmelere ve kafes distorsiyonlarına sebep olur. Borür tabakası ve matris içerisinde ki bor dağılımı Şekil 3.9'da gösterilmiştir [11,29].



Şekil 3.9.Matris ve borür tabakasında B ve Fe dağılımı

Çizelge 3.4.Borlu tabakayı meydana getiren Fe_2B ve FeB bileşiklerinin özellikleri

Özellikler	**Fe_2B**	**FeB**
Ergime noktası (^oC)	1390	1550
Mikro Sertlik (HV)	1600-2000	1600-2400
Uzama Katsayısı (1000 ^oC)	8.10^{-6} 1/^{o} K	$10\text{-}16.10^{-6}$ 1/^{o} K
Termal İletkenlik (1000 ^oC)	0.2-0.3 W/(cm ^oC)	0.1-0.2 W/(cm ^oC)
Küri Noktası (^oC)	742	325
Yoğunluk (gr/cm^3)	7.00	6.3
Kristal Yapısı	Hacim Merkezli Tetragonal	Ortorombik
Kafes Parametreleri (A^o)	a:5.078, c:4.249	a:4.053, b:5.495, c:2.496
Elektriksel Direnç (10^6 Ω.cm)	38	80
Renk	Gri	Gri

3.4.2. Borür Tabakası Çeşitleri

Borlanmış malzemede oluşan borür tabakasının yapısı, boyutu ve özellikleri borlama prosesi yöntemine, bor kaynağına, borlama parametrelerine ve ana malzeme özelliklerine bağlıdır. Belirtilen parametreler ile tabaka düz bir formda ya da dişli bir bor morfolojisi elde edilmektedir. Demir borürler için metalografik incelemeler kaplama tabakasını, tabakanın morfolojisini ve Fe_2B veya FeB'yi gösterir. FeB, Fe_2B ve geçiş bölgesi, demir içeren malzemeler için borlama işlemine tabi tutulabilir. Bu

tabaklar, malzeme türüne göre tek başlarına veya çeşitli kombinasyonlarda bulunabilen tabaklardır [42]. Borlama işlemi boyunca üretilen 12 ayrı borür tabakası vardır. Bunlar;

- Tek fazlı tabaka, sadece FeB
- İki fazlı tabaka, Fe_2B ve FeB. (Tam tabaka)
- İki fazlı tabaka, FeB tabakası
- İki fazlı tabaka, fakat FeB dişleri izole edilmiş.
- Tek fazlı tabaka, sadece Fe_2B, güçlü dişler.
- Tek fazlı tabaka, sadece Fe_2B, daha az kuvvetli dişler.
- Bağımsız Fe_2B dişli tabaka.
- İzole edilmiş Fe_2B tabakası.
- Geçiş bölgesi
- Dejenere olmuş tabaka.
- İki fazlı FeB ve Fe_2B tabakası, düzgün gelişmiş, dişsiz
- Tek fazlı FeB ve Fe_2B tabakası, düzgün gelişmiş, dişsiz

olmak üzere farklı borür katmanları oluşabilmektedir.

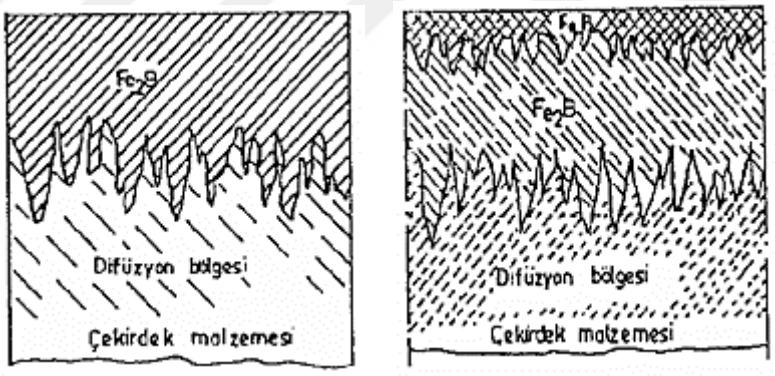
Endüstriyel ortamda, borid tipi tek fazlı tabakalar (tek başına Fe_2B güçlü dişler ve sadece Fe_2B, daha az güçlü dişler) tercih edilir. Bunun nedeni, Fe_2B katmanından daha kırılgan olduğu için biraz borca zengin FeB fazının istenmemesidir. Borid tabakaları da kendi genleşme katsayılarındaki farklılıklar nedeniyle göz ardı edilemeyecek düzeyde iç gerilmeler sergiler. Çekme ve basma yükleri FeB ve Fe_2B fazları tarafından birbirinin üzerine bindirilir ve bunun sonucunda iki faz arasında sıklıkla kırılmalar oluşur. Artık gerilimler, FeB faz yapısı çekme ve Fe_2B faz yapısı basma olarak meydana getirerek üretilir. Çift faz katmanında FeB/Fe_2B ara katmanında veya yakınında çatlak büyümesi görülür. Bir termal şokta ya da mekanik şokta bu çatlaklar meydana gelir veya pul pul dökülmeye ve parçalanma görülebilmektedir. Bu kalıntı, borürce zengin FeB fazından kaçınılması veya en aza indirilmesi önerilir [27].

Çift fazlı yapı, tek fazlı yapıya göre daha düşük mekanik özelliklere ve aşınma dayanımına sahiptir. Fe_2B fazında en az aşınma meydana gelirken, en fazla aşınmada daha sert yapıda olan FeB borür tabakasında meydana gelmektedir. En yüksek aşınma

dayanımının FeB fazını içermeyen yani tek fazlı Fe_2B borür tabakalarında elde edildiği deneylerle tespit edilmiştir [13].

3.4.3. Borür Tabakası Yapısı

Alaşımsız çelikler, borlama işlemi ve malzeme bileşimi, sıcaklık değerleri ve süre gibi parametrelere bağlı olarak çeşitli morfolojilerde tek fazlı (Fe_2B) veya iki fazlı (FeB + Fe_2B) borür tabakası oluşturabilir. Burada iki farklı morfoloji vardır: yüksek alaşım elementlerinin yaygın olduğu çeliklerde sıklıkla bulunan yassı yapı ve Fe_2B fazının öne çıktığı testere dişi morfolojisi. Sıcaklık ve zaman uygun parametrelerde olduğunda, borür tabakalarındaki Fe_2B fazına ek olarak bor miktarını sağlamak için Fe_2B ortamı için gerekli olan bor miktarı kullanılır [13,29]. Alaşım elementine ek olarak, alaşımlı çelikler Cr_2B, TiB_2, NiB_2 ve CoB fazlarından bir veya daha fazlasını içerebilmektedir. [33]. Şekil 3.10'da iki fazlı ve tek fazlı sınır tabakaları görülmektedir.



(a) (b)

Şekil 3.10.(a) Tek fazlı ve (b) çift fazlı borür tabakalarının şematik görünüşü

3.4.4. Geçiş Bölgesi

Fe_3(C, B) geçiş bölgesi, üretilen borür tabakasında Fe_2B fazı ile en dıştaki FeB fazı arasındaki ana matris arasında bulunur [12]. C ve Si, çeliğin içindeki elementlerin etkisi altında borür tabakasında oluşamadığı için bor difüzyonu sırasında yüzeyden

içeri yönde difüze olurlar. Özellikle Fe_2B, tane üzerinde silisyum zengin olarak bulunur ve bu nedenle kaba bir şekilde görünür. Sonuç olarak, karbonca zengin bir geçiş bölgesi oluşturulur [13]. Bu bölge gerçekte Fe_2B fazının küçük çökeltileri olup çeliğin iç kısmı ile koyu renkli bir ara yüz oluşturur. Karbonca zengin olan geçiş bölgesinin, karbonun borür tabakası tarafından içeriye doğru zorlanması sonucunda ana malzeme yapısından daha fazla perlit yapısı oluşturduğu söylenmektedir [47,48].

Geçiş zonunun kalınlığı literatürde çok sayıda çalışmaya konu olmuştur. Genel olarak, geçiş bölgesinin kalınlığının borid tabakasının kalınlığının yaklaşık 3-4 katı olduğu belirtilmektedir. Yapılan çalışmalar sonucunda geçiş bölgesinin tane boyutunun birincil malzemenin tane boyutundan daha büyük olduğu keşfedilmiştir. Borun tane büyümesine etkisi neden olarak gösterilmiştir [9,20,42].

3.5. BORÜR TABAKASININ ÖZELLIKLERI

Borlanmış malzemenin kimyasal yapısı , borlama ortamının yapısı , borlama tekniği , işlem sıcaklığı ve süresi gibi işlem koşulları ve borür tabakasının düz veya dişli / sütunlu olup olmadığı , hepsi tabakanın özelliklerini etkiler [10].

Boridlerin çoğu güçlü kovalent bağlara sahip olduğundan, elastisite modülleri, erime noktaları ve sertlikleri yüksek değerlere sahiptirler. Genel olarak, borürler düşük termal genleşme katsayılarına sahiptir, ancak oldukça güçlü termal şok direnci ve termal iletkenlik katsayılarına sahiptir [25].

Ayrıca borür tabakasının mikro yapısının tribolojik özellikleri etkilediği belirtilmiştir. Yüzeyin hemen altındaki gözenekli yüzey bölgesi ortadan kaldırılırsa, çift fazlı FeB-Fe_2B katmanları, tek fazlı FeB katmanlarından daha düşük değildir. Bunun yerine, pullanma gelişiminin azalması, kırılgan ve gözenekli bir yüzey bölgesinin oluşması nedeniyle daha ince bir tabaka önerilir [27].

Mikroskop altında, borid tabakaları, morfolojik olarak karşılaştırılabilir olan diş köküne benzer görüntüler gösterir. İş parçası yüzeyine paralel olmasının aksine diş kökü gibi yüzeylere derinlemesine nüfuz ederek, tutunma yüzey alanını arttırır. Bu,

mukavemetin artmasına katkıda bulunur. Ancak literatür, artan tabaka kalınlığı ve çeşitli termal genleşme katsayıları (FeB/Fe_2B) sonucu borid tabakalarındaki ve derinliklerindeki çatlakların da arttığını iddia etmektedir. Çift fazlı yapılar üzerinde yapılan aşınma testlerine göre, FeB'nin çekme gerilmelerine ve Fe_2B'nin basma gerilmelerine maruz kalması ve ayrıca aşınmanın oluşturduğu ısının katmanlar tarafından farklı oranlarda emilmesi pullanma görüntülerinin nedenleri olarak kabul edilmektedir. Aşınma yüzeylerinde görünen Bu faktörler, düşük FeB kalınlığına sahip yapıların tek veya çift katmanlarda hedeflenmesine yol açmaktadır [49].

3.5.1. Tabaka Kalınlığı

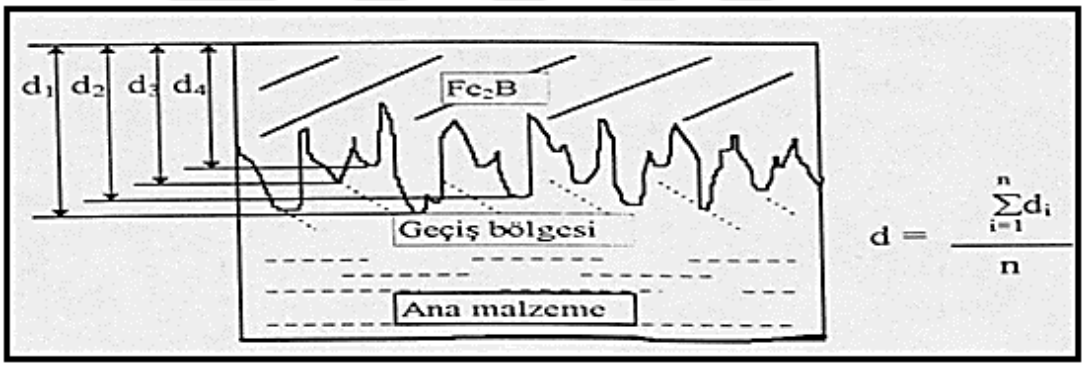
Borlanan malzemenin bileşimi, cinsi, borlayıcı ortamın bileşimi, prosesin şekli, borlama sıcaklığı ve süresi borür kaplama tabakasının kalınlığına etkileyen faktörlerdir. Borlama prosesinin sıcaklığı ve süresinin artmasıyla borür tabakasının kalınlığını arttırmak mümkündür [21]. Ancak yüzeyde lokal ergimeler meydana gelmemesi için borlama sıcaklığının Fe-B denge diyagramında yer alan ötektik sıcaklığın (1149 ^oC) altında olması gerekir. Aksi durumda malzeme kaplama yüzeyinde bozulmalar oluşmaktadır. Bununla birlikte artan sıcaklıkla kaplama kalınlığının artmasının yanında porozite de artacak ve tabaka gevrekleşerek kırılmalar meydana gelecek ve kaplama tabakasının malzemeye tutunma mukavemeti azalacaktır. Borlama süresinin belirlenmesinde, enerji kaynaklarının sınırsız olmaması nedeniyle harcanacak enerjiyi de göz önünde bulunduran, ekonomik olan ve kullanım şartlarına uygun kalınlığı verebilen optimum zaman tercih edilmelidir [8].

Borlayıcı ortamda, bor kaynağının ortamda yeterince olmaması sonucunda tabaka oluşumu durur. Böylece ince bir borür tabakası oluşur. Bunun dışında ortamda bor kaynağından bor elementinin serbest hale gelebilmesi için SiC gibi redüktanlar kullanılmaktadır. Ortamda yeterli redüktan yoksa bor kaynağından elementel bor elde edilemez bununla birlikte oluşan bor elementleride oksijene afin olduğu için Fe ile bileşik oluşturmadan oksijenle bileşik oluştururlar. Bunun sonucu kaplama kalınlığı azalmaktadır [9,50].

Borlama sıcaklığı ve süresinin artmasıyla her nekadar kaplama kalınlığı da artacak olsa bir sınırlama söz konusudur. Borür kaplama kalınlığını sınırlayan bir diğer etken kırılganlıktır. Tabaka kalınlığı arttıkça doğru orantılı bir şekilde kırılganlık da artacaktır. Bu nedenle özellikle çift fazlı borür kaplama tabakalarında yüksek kaplama kalınlığı olmamasına dikkat etmek gerekmektedir [9,37].

Borür kaplama kalınlığını azaltan bir diğer etken bileşimde ki alaşım elementleridir. Karbon ve bileşimdeki alaşım elementinin artmasıyla bor difüzyonu azalacağı için kaplama kalınlığı azalır ve düz bir morfoloji elde edilir [25].

Literatürde yapılan araştırmalar sonucunda tabaka kalınlığının, tabakanın diş yapısını, düz bir düzlemle karşılaştırarak ve bor dişlerinin bu düzleme göre ortalama değeri alınarak hesaplanmaktadır (Şekil 3.11) [13].



Şekil 3.11.Borür tabakasının kalınlığının hesaplanması [13]

3.5.2. Sertlik

Borid tabakasının malzeme yüzeyine verdiği yüksek sertlik, borlama işlemini diğer termokimyasal yüzey sertleştirme işlemlerinden ayıran en önemli özelliktir. Ana malzemenin kimyasal kompozisyonu ve sonunda yüzeyde oluşacak borür tabakasının fazları borit tabakasının sertliğini belirler.Çizelge 3.5, yüzeye yakın FeB fazının, matrise yakın Fe_2B fazından daha kırılgan ve daha sert olduğunu göstermektedir [8]. Borlama işlemi sonucunda yüksek ergime sıcaklıklarına, elastik modüllere ve 1450 HV ile 5000 HV arasında mikrosertliğe sahip borür tabakaları üretilir [32].

Çizelge 3.5.Borür tabakalarının sertlik değerleri ve erime noktaları [13]

Malzeme	Oluşan Bileşik	Sertlik (HV)	Ergime Noktası
Fe	FeB	1900-2100	1390
Fe	Fe_2B	1800-2000	1390

Sertlik ölçümleri Vickers veya knoop mikrosertlik yöntemi ile yapılmaktadır [28]. Rockwell ve Birinell sertlik tekniklerinin kullanılması, tabakanın altındaki alanın deformasyonuna ve borür tabakasının bozulmasına neden olacağından tavsiye edilmez [9,20]. Ölçümlerde büyük yüklerin kullanılması çatlama ve dökülmeye neden olabileceğinden dolayı hatalı sonuçlara sebep olabilir. Ayrıca büyük yükler tabakanın bozulmasına ve tabakanın altındaki bölgenin deformasyonuna sebep olabilir. Genel olarak Vickers veya knoop mikrosertlik yönteminde tabaka kalınlığına ve faz yapısına göre 50-100 gram yüklerle tabaka boyunca ölçüm yapılır [8].

Borlama işleminin en büyük avantajlarından biri de malzemelerin borlama sonucu oluşan yüksek sertlik ve aşınma dayanımı 900-1000^oC'a kadar kararlı bir formda kalabilmesidir [8].

3.5.3. Korozyon Direnci

Malzemelerin atmosfere, aşırı ısıya, deniz suyuna ve asidik sıvılar gibi korozif koşullara karşı direnci borlama işlemi öncesi ile karşılaştırıldığında, malzemenin korozyon direncinin arttığı gösterilmiştir. Bu korozyon direnci ile malzeme ömrü büyük ölçüde artar. Borid tabakası suya ve çevreye karşı düşük bir korozyon direncine sahip olmasına rağmen, sıvı metallere ve bazı asitlere karşı yüksek direnç gösterir. Özellikle metal eriyiklerinin yanı sıra H_2SO_4 (sülfürik asit), H_3PO_4 (fosforik asit) ve HCl (hidroklorik asit) gibi asitlerin varlığında son derece yüksek korozyon direnci elde edilir [9,11,20,28].

Borlama işlemi uygulanarak bor kaplanmış malzemelerin korozyon dayanımı, büyük oranda borür tabakasında ki mikro çatlakların ve gözeneklerin oranına bağlıdır. Gözenekli ya da çatlaklı tabakalardan, korozif çözeltinin sızması durumunda tabaka dökülür ve çok daha fazla kütle kaybı yaşanmış olur[51].

Elementel halde yüksek krom içeren çeliklerin borlanması sonucunda yüzeyde koruyucu krom oksit tabakası yerine koruyuculuğu daha az olan krom borür meydana gelmektedir. Bu durum malzemenin korozyona karşı dayanımının azalmasına neden olmaktadır. Bu bakımdan yüksek alaşımlı malzemelerin borlanması, korozyon direncinin azalmasına neden olarak bir dezavantaj oluşturmaktadır [8,9,11].

3.5.4. Aşınma

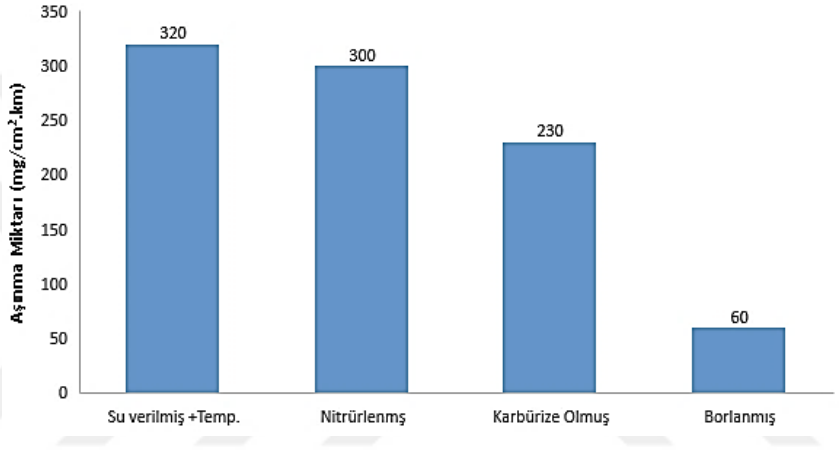
Bir sistemin kapsamlı, derinlemesine bir incelemeyi tamamlaması için, mutlaka aşınma denetimi yapılmalıdır. Malzeme analizine ve borlama sonucunda ortaya çıkan borür fazlarına göre bu yüzey sağlanır [31]. "Makine parçalarının hizmet ömrünü ve güvenilirliğini artırmak" için, malzemenin aşınma yüzeyinin gelişimi ile sağlanmaktadır [50].

Tabakanın Fe_2B veya $FeB+Fe_2B$ fazında olup olmadığı, sertlik ve morfolojik yapısı, borlanmış tabakanın aşınmaya ne kadar dayanıklı olduğunu etkiler. Tek fazlı (Fe_2B) yapı ile karşılaştırıldığında, çift fazlı yapı ($FeB+Fe_2B$) daha zayıf bir aşınma direncine ve mekanik niteliklere sahiptir. En sert FeB faz borür tabakası en fazla aşınmaya sahipken, Fe_2B fazı en az aşınmaya sahiptir. Deneyler, yalnızca Fe_2B fazını içeren ve FeB fazını içermeyen borür katmanlarının maksimum aşınma direncine sahip olduğunu göstermiştir. FeB fazının Fe_2B fazına göre daha fazla kırılgan olması bunun nedenidir [9]. Borlama işlemi sonucu malzeme, yüksek yüzey sertliğine ve düşük sürtünme katsayısına sahip olur. Bu durum, malzemenin abrazif aşınma dayanımının artmasına neden olur [32].

Bor atomunun oksijen için güçlü kimyasal afinitesi, borlama tabakasının düşük sürtünme katsayısını açıklar. Bor elementinin oksijene olan güçlü afinitesi, yüzeyde ince, koruyucu bir oksit tabakasının oluşmasına neden olur. Bu oksit tabakası sürtünmeyi azaltır ve malzemenin yüzeyinde katı bir yağlayıcı görevi görerek birbiriyle temas halinde olan yüzeylerin soğuk kaynaklanmasını önler. Bu mekanizma, borlama işleminin adhezif aşınma direnci üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir.

[8,11,32]. Borlama, WC ile karşılaştırılabilir bir sertliğe ve Teflon'a (PTFE) benzer bir sürtünme katsayısına sahip malzemeler sağlayabilir [52].

Borlama ile yüzey sertleştirilmiş malzemeler, darbesiz aşınmanın önemli olduğu durumlarda başarıyla kullanılmaktadır. Paslanmaz çelik için derin çekme kalıbının, sert krom kaplı AISI A6 çelikten yapıldığında 2000 parça, aynı çelik borlandığında ise 50.000 parça ürettiği söylenmektedir [52]. Şekil 3.12'de farklı yüzey sertleştirme işlemlerinin düşük karbonlu çeliğin aşınma dayanımına etkisi gösterilmiştir.



Şekil 3.12.Farklı yüzey sertleştirme işlemlerinin aşınma davranışları [8]

BÖLÜM 4

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

DIN 20MnCr5 çeliğine yönelik yapılan kutu borlama çalışmalarında; Ergun y. ve arkadaşları yapmış olduğu bir çalışmada farklı bir çelik kalitesi ile (AISI 420) aynı kutu borlama parametreleri (950^{o}C-5 saat) kullanılarak b (bor) elementinin oksijene karşı afinetisinden yararlanılmış ve yüzeyde oluşan koruyucu ince oksit tabakasının etkisi üzerine inceleme yapılmıştır. Bununla birlikte sertlik değerleri de karşılaştırılmıştır. AISI 420 çeliğinin işlem öncesi 340 HV ve işlem sonrası 1854 ile 2147 HV aralığında bulunmuşken, DIN 20MnCr5 çeliğinin işlem öncesi 224 HV ve işlem sonrası 1498 ile 1892 HV aralığında bulunmuştur. Borlanmış çeliklerin aşınma hızının borlanmamış çeliklerin aşınma hızından yaklaşık beş kat daha düşük olduğu belirtilmiştir [52]. Lıszewskı, M. ve arkadaşları yapmış oldukları bir çalışmada DIN 20MnCr5 çeliğine kutu borlama, kutu sementasyon, kutu kromlama ve vakum kromlama işlemleri uygulamış, çalışma sertlik testleri, aşınma yoğunluğunu belirlemeyi mümkün kılan bir pin on disk tipi aşınma cihazında gerçekleştirilen tribolojik analizler ile sınırlı kalmıştır. Yapılan çalışmada borlama sonrası 794 HV sertlik, 483.3 MPa aşınma yoğunluğu belirlenmiş olup aşınmaya karşı en yüksek direncin, borlama ile sertleştirilmiş DIN 20MnCr5 'in olduğu sonucuna varılmıştır [53]. Krumes D. ve arkadaşları DIN 20MnCr5 çeliğine dubleks yüzey sertleştirme işlemi yapmışlardır. İlk olarak kutu borlama (900°C ve 4 saat) işlemi yapılmış ve borlama işleminden sonra gerçekleştirilen ikinci aşamada, ticari (pn-mono 5) bir ünite kullanılarak plazma nitrürleme (520^{o}C ve 40 dakika) yapılmıştır [54]. DIN 20MnCr5 çeliğine yapılan kutu borlama yüzey işlemi belirtilen çalışmalarla sınırlı kalmıştır. Ancak metal sanayisi alanında DIN 20MnCr5 çeliğine yönelik yapılan yüzey sertleştirme yöntemlerine bakıldığında proses maliyetinin düşük olması, toz bileşimlerinin kolayca değiştirilebilmesi, gerekli cihaz ve donanımın basitliği, emniyetli olması ve faz bileşimlerinin değişiminin çok az olması açısından kutu borlama yöntemi tercih edilmektedir.

Bu tez konusu kapsamında, farklı çaplardaki DIN 20MnCr5 çelik çubuk numunelere sabit sıcaklık ve farklı sürelerde kutu borlama işlemi yapılacaktır. Böylece deformasyon oranının borür kaplama tabakasına, sertliğe, aşınma ve korozyon dayanımına etkisi incelenecek hem de aynı çaptaki DIN 20MnCr5 çelik çubuklarına sabit sıcaklık ve farklı sürelerde yapılacak kutu borlama işlemiyle de kutu borlama alanında yapılan çalışmalara ek kaynak oluşturularak sertlik, aşınma ve korozyon dayanımının geliştirilmesine yönelik gerekli parametreler sunulacaktır. Daha önceki çalışmalarda deformasyon oranının borür kaplama tabakasına, sertliğe, aşınma ve korozyon dayanımına etkisi incelenmemiştir. Deformasyon oranı-kutu borlama ilişkisi bu tez kapsamında detaylandırılacak olup bilimsel açıdan literatürdeki eksiklik giderilmiş ve metal sanayisine, tasarım ve imalat firmalarına malzeme seçimi konusunda veri oluşturulmuş olacaktır

4.1. DIN 20MNCR5 NUMUNELERININ BORLAMA PROSESI İÇİN HAZIRLANMASI

Bu çalışma kapsamında kullanılan Ø11 ve Ø14 mm çaplarındaki DIN 20MnCr5 sementasyon çeliği Şekil 4.1 de gösterilmiştir. Çelik çubuklar Kardemir A.Ş. tarafından temin edilmiştir. Çeliğin kimyasal bileşimi Çizelge 4.1 de verilmiştir. Borlama işleminden önce numuneler Ø11 x 15 mm ve Ø14 x 15 mm boyutlarında kesilerek hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin yüzeyleri sırasıyla P400, P600, P800 ve P1200 grit SiC zımpara kağıtları ile zımparalanmıştır.

Şekil 4.1.Ø11 mm Ø14 mm çaplarındaki DIN 20MnCr5 sementasyon çeliği

Çizelge 4.1.DIN 20MnCr5 çeliğinin kompozisyonu

ÇAP	KARDEMİR KALİTE KODU	KİMYASAL BİLEŞİM					
		%C	%Mn	%Si	%S	% P	% Cr
Ø11	**KAR 20MNCR5_00**	0,199	0,68	0,217	0,016	0.017	1,003
Ø14	**KAR 20MNCR5_00**	0,172	0,74	0,219	0,011	0,014	1,087

Kutu borlama işlemi Şekil 4.2 de gösterilen atmosferik koşullar altındaki bir fırında dökme demirden yapılmış kutu içerine 3-6 mikron boyutlarında Ekabor-2 ticari adıyla bilinen toz karışımı yerleştirilmiştir. 11mm çapında x 15mm yüksekliğinde ve 14 mm çapında x 15 mm yüksekliğinde ki numuneler toz karışımı içerisine yüzeyini tamamen örtecek şekilde ve birbirlerine temas etmeyecek şekilde yerleştirilmiş ve bakır pullar deoksidant olarak kullanılmıştır (Şekil 4.3.). Bakır pul katmanı yaklaşık 2 cm kalınlığında ayarlanmıştır. Kapağı kapatılan kutu fırın içerisine yerleştirilecek ve 950 ^{o}C'ye homojen ısıtılacaktır. 950 ^{o}C sıcaklıkta, 2,5 ve 7,5 saat farklı borlama sürelerinde tavlanarak numune yüzeyine bor difüzyonu gerçekleştirilecektir. Belirlenen sıcaklıklarda fırınlama işlemi gerçekleştirildikten sonra kutu fırından çıkarılmış ve oda sıcaklığına soğutulmuştur.

Şekil 4.2.Isıl işlem fırını

Şekil 4.3.Kutu borlama prosesi için kutu hazırlama

4.2. MIKROYAPI İNCELEMELERİ

4.2.1. Bakalite Alma ve Parlatma

Borlama işleminden sonra tabaka kalınlığını görüntüleyebilmek için numune zımpara ile kesiti baz alınarak düz bir yüzey elde edilmiştir. Bununla birlikte zımparalama ile kesitsel paralellik sağlanmıştır. Numunelerin kesit yüzeyi dış yüzeye temas edecek şekilde kalıp içerisine yerleştirilmiştir. Bakalite alma işlemi soğuk kalıplama işlemi ile uygulanmıştır. Bakalit kalıbın içerisinden çıkartılan ve kesiti alınan numuneler sırasıyla 400-600-800-1000-1200-2000-2500'lük zımparalar ile metalografik olarak parlatılmıştır. Zımparalanan numuneler, çuhaya alümina süspansiyonun dökülmesi ile parlatılmıştır.

4.2.2. Dağlama

Dağlama işlemi için 3,5 ml HNO_3 ve 100 ml Etil alkol (%3,5 Nital) ile hazırlanan dağlayıcı içerisinde 50 saniye süreyle bekletilmiştir.

4.2.3. Optik Mikroskobu

Borlanmış metalografik olarak parlatılmış numunelerde borür tabakasının morfolojisinin ve kaplama kalınlıklarının incelemesi Şekil 4.4'te verilen Carl Zeiss markalı optik mikroskopta gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4.4.Carl Zeiss markalı optik mikroskobu

4.2.4. Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) ve EDX Analizi

Numunelerin korozyon ve aşınmış yüzeylerin analizinde taramalı elektron mikroskobu (Carl Zeiss Ultra Plus Gemini FESEM) kullanılmıştır. Görüntülemede FeB ve Fe_2B fazlarının ayrımı, renk farkı ile ortaya konulmuştur. Korozyon deneyi sonrasında yüzeyden, aşınma deneyleri sonrasında ise aşınma bölgelerinden 500x-7kx büyütme aralığında SEM görüntüleri alınmıştır. Böylece korozyon numunelerinin yüzeylerinde meydana gelen korozyon türü, aşınma yüzeyinde ise görüntü alanındaki deformasyon karakteristikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Bunlara ilave olarak korozyon ve aşınma yüzeylerindeki kimyasal elementlerin analizi X-ışınlarının enerji dağılımı (EDX) ile yapılmıştır.

4.2.5. X Işınları Difraksiyon (XRD) Analizi

Borlama işlemi uygulanmış numunelerin yüzeylerinde oluşan fazların tayininde X-ışınları difraksiyon (XRD) analiz tekniği kullanılmıştır. XRD incelemelerinde Rigaku Ultima IV marka cihaz kullanılmıştır. Analiz sırasında Cu Kα (λ = 1,79021 Å) radyasyonu kullanılarak (tarama hızı: 20/dk; voltaj: 40 kV, tarama açısı: 20°-90° ve akım: 30 mA) yapılmıştır.

4.3. SERTLIK ÖLÇÜMÜ

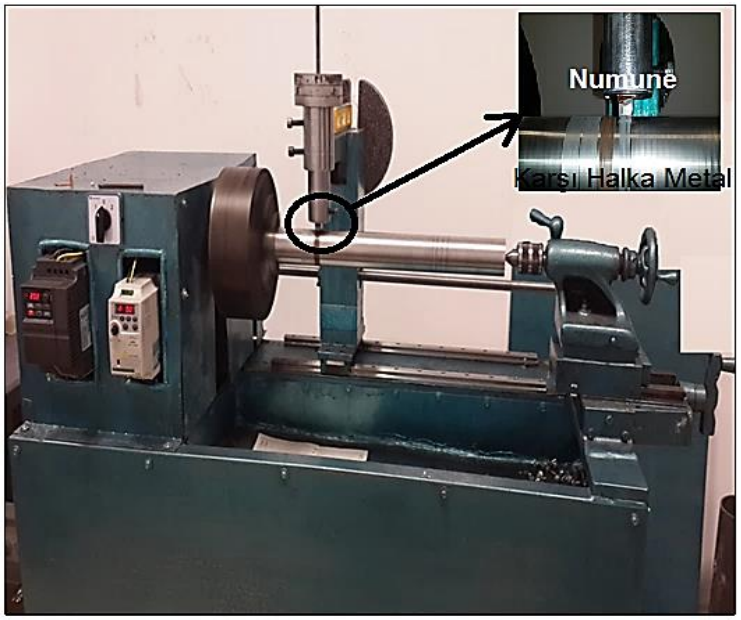
Bu çalışmada işlemsiz ve borlanmış numunlerin sertlik ölçümleri Şekil 4.5'verilen Shımadzu marka vickers sertlik cihazı ile belirlenmiştir. Vickers sertlik deneyinde elmas kare piramit şekilli batıcı uç 0,2 kg yük altında 15 saniye boyunca bekletilmesi sonucu oluşan izin köşegen uzunlukları ölçülerek numunelerin sertlik değerleri belirlenmiştir. Borlanmış numunelerin kaplama yüzeyinden matrikse doğru ölçümler yapılarak borür tabakasının sertlik derinlikleri hesaplanmıştır.

Şekil 4.5.Shımadzu marka vickers sertlik cihazı

4.4. AŞINMA DENEYI

Aşınma deneyi için DIN 20MnCr5 çelik çubuklardan Şekil.4.6'da gösterilen pin formunda aşınma numuneleri yapılmıştır. Ardından pin formundaki numunelere kutu borlama işlemi uygulanmıştır. Numunelerin aşınma davranışları Şekil 4.7'de gösterilen Pin on Ring test cihazı ile kuru ortamda yapılmıştır.

Şekil 4.6.Pin formunda DIN 20MnCr5 çelik aşınma numuneleri



Şekil 4.7.Pin on ring aşınma test cihazı

Pin on Ring aşınma cihazında 1.2379 kalite soğuk iş takım çeliği üzerinde 20N yük altında, 0,1 m/s kayma hızında ve 2000 metre aralıklarla toplamda 10000 m kayma mesafesi uygulanmıştır. Her bir kayma mesafesi bitiminde 0,1 mg hassasiyetine sahip dijital hassas terazide ağırlıkları ölçülerek her 2000 metrede bir ağırlık kaybı hesabı yapılmıştır. Her 10000 metrede numune değiştirme sırasında numune tutucu kol yatay hareket ettirilerek temiz yüzey üzerinde sürtünmesi sağlanmıştır.

4.5. KOROZYON DENEYI

Korozyon testi potansiyodinamik polarizasyon testi ve daldırma testi ile yapılmıştır. Potansiyodinamik polarizasyon testi için bakır tel ile sarıldıktan sonra incelenecek numuneler, sertleştirilmiş yüzeye dik olarak önden 254 mm^2 alan açıkta kalacak şekilde epoksi reçine içine gömülmüştür. Potansiyodinamik polarizasyon testleri oda sıcaklığında, %3,5 NaCl çözeltisi içerisinde, bilgisayar kontrollü DC105 korozyon analizine sahip Gamry model PC4/300 mA potansiyostat/galvanostat ile yapılmıştır. Karşıt elektrot olarak grafit çubuk, referans elektrot olarak doymuş kalomel elektrot (SCE) ve çalışma elektrodu olarak numune yüzeyinin bulunduğu klasik üç elektrotlu hücre kullanılmıştır. Polarizasyon eğrileri, 1 $mV.s^{-1}$ tarama hızında, -0,25 V (vs. Açık devre potansiyeli, Eoc) +0,25 V (vs. Eoc) aralığında tarama ile oluşturulmuştur. Her bir parametre için 3 adet potansiyodinamik polarizasyon testi yapılmış ve bulunan sonuçların ortalaması alınmıştır.

Daldırma korozyon testi için Ø11x15 mm ve Ø14x15 mm ebatlarında borlanmış ve borlama işlemi yapılmamış DIN 20MnCr5 çelik çubuk kaliteden 6 farklı numuneler ilk olarak yüzey alanları hesaplanıp hassas terazi ile tartılmıştır. Daha sonra ise ortam sıcaklığında cam kavanozda saf su içerisine % 3.5 NaCl ilavesi ile hazırlanan çözeltiye polimer file içerisine konularak daldırılmıştır. Çözelti içerisine daldırılan numuneler 0-8 saat aralıklarında ikişer, 8-24 saat aralıklarında dörder ve 24-48 saat aralıklarında sekizer saatten oluşan periyotlarda bulundukları çözelti dolu kavanozlardan çıkartılıp öncelikle 180 gr/L oranında saf su yardımı ile ultrasonik temizleyicide 5 dakika temizlendikten sonra aynı ultrasonik temizleyicide 5 dakika metil alkol ile temizlenmiştir. Temizleme sonrası kurutma işlemi uygulanmış ve 0.1 mg hassasiyetteki hassas terazi ile tartılmıştır. Tartım sonucu kaydedildikten hemen sonra

numuneler kavanozlara tekrar aynı şekilde daldırılmış ve bu işlem belirtilen saat aralıklarında tekrarlanmıştır. Testler sonrası (2) numaralı formülde verilen denklemde mdd olarak hesaplanmıştır.

$$mdd = mg/dm^2 * day \quad (1)$$

Burada; mg: Korozyon ortamından belirli periyotlarda çıkarılan numunenin ölçülen ağırlık kaybı, dm^2: numunenin deney öncesi yüzey alanı, Zaman: Numunenin korozyon ortamına maruz kaldığı gün'dür.

Korozyon testi sonunda her bir numunenin korozyona uğramış yüzey görüntüleri SEM ile alınıp, korozyon mekanizmaları detaylı olarak incelenmiştir.

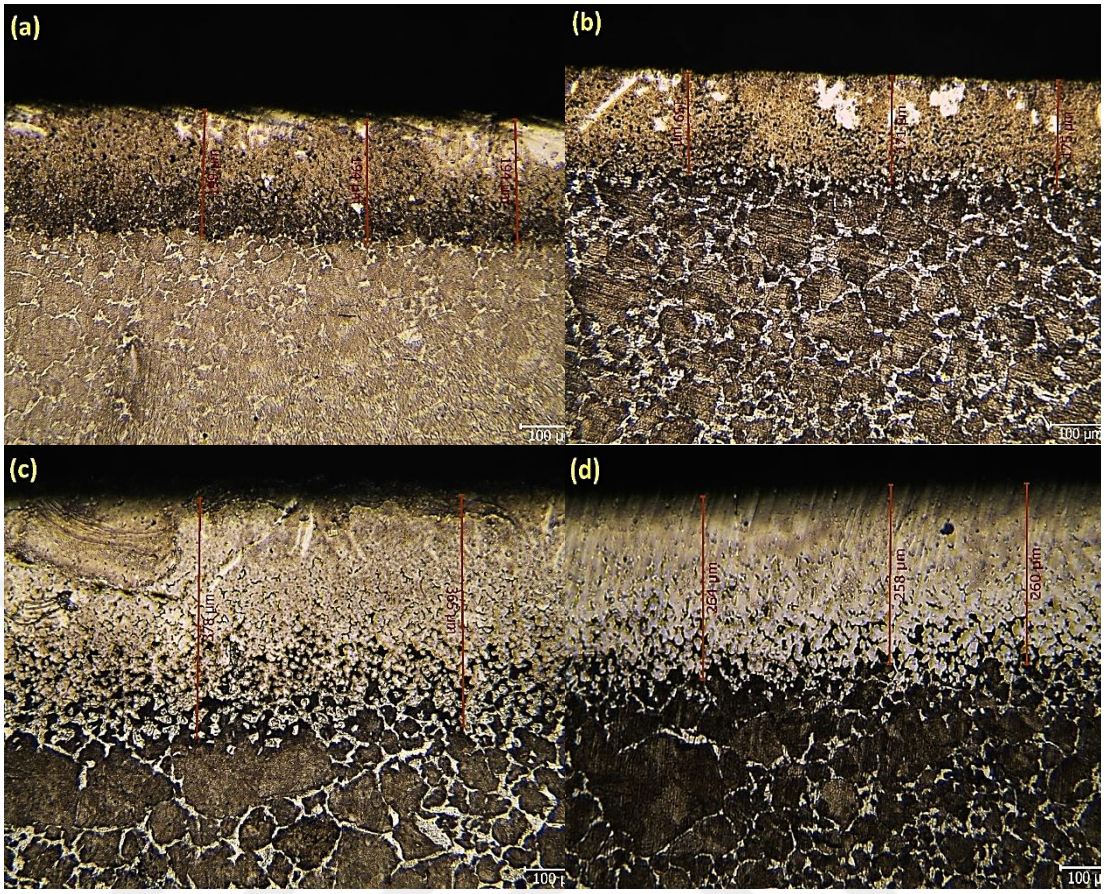
BÖLÜM 5

DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

5.1. MIKROYAPI ANALIZLERI VE TABAKA KALINLIKLARI

Borlama deneyi sonrası, metalografik inceleme için hazırlanmış numunelerin optik mikroskop görüntüleri ve borür tabaka kalınlıkları Carl Zeiss Microscopy marka optik mikroskop ile alınmıştır.950°C sıcaklıkta ve farklı sürelerde borlanmış DIN 20MnCr5 çeliklerinin kesiti boyunca alınan optik mikro yapıları Şekil 5.1'de gösterilmektedir. Numuneler % 3 Nital dağlayıcısı içerisinde 20 saniye bekletildikten sonra mikro yapı görüntüleri alınmıştır.

Her dört mikro yapıda borür tabakası ile matris bölgesi renk olarak net bir şekilde ayrılmıştır. Ana matris ile borür kaplama ara yüzeyi artan kaplama tabaka kalınlığı ile birlikte düz bir ara yüzeyden süreksiz dalgalı ara yüzey morfolojisine sahip olmuştur. Aynı çapa sahip DIN 20MnCr5 çeliğinin borlama süresinin artmasıyla Şekil 5.1 de a-c ve b-d mikro yapılarında da görüldüğü üzere borür kaplama kalınlığı artmıştır. Bununla birlikte Şekil 5.1'de a-b ve c-d mikro yapılarına bakıldığında sabit borlama sıcaklığı ve sürelerinde artan deformasyon oranı ile borür kaplama kalınlığının azaldığı görülmektedir. Ø11 mm çapındaki çelik çubuklar (% 99,57), Ø14 mm çapındaki çelik (%99,31) çubuklara göre daha yüksek deformasyona uğradıkları için ince taneli bir yapıya sahiptir. Tane sınırları daha reaktif olduğundan borür tabakası oluşumunun çekirdekleşme başlangıç noktalarıdır. Bu noktalarda Fe_2B çekirdekleri oluşur ve gelişir. Bu nedenle Çizelge 5.1'de verilen tabaka kalınlıkları incelendiğinde Ø11 mm çapındaki çelik çubuklarda Fe_2B faz çekirdeklerinin oluşum bölgeleri için gerekli olan tane sınırlarının Ø14 mm çapındaki çelik çubuklara kıyasla daha yüksek olmasından dolayı borür tabaka kalınlıkları daha yüksektir.



Şekil 5.1. 950 °C'de a) Ø11 mm çap-2,5 saat, b) Ø14 mm çap-2,5 saat, c) Ø11 mm çap-7,5 saat d) Ø14 mm çap-7,5 saat borlanmış DIN 20MnCr5 çeliğinin optik mikro yapısı ve tabaka kalınlıkları

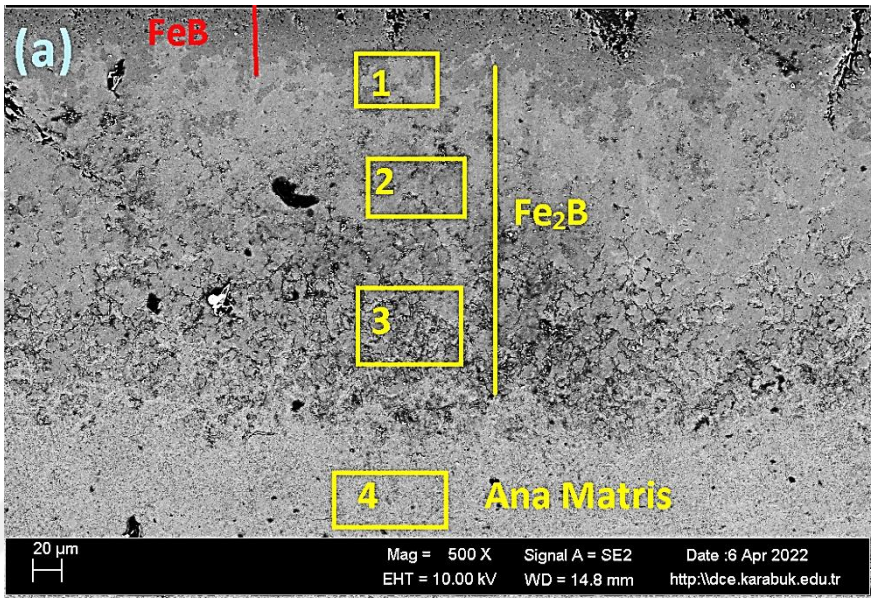
Çizelge 5.1.DIN 20MnCr5 çeliğinin kutu borlama sonrası borür tabaka kalınlığı

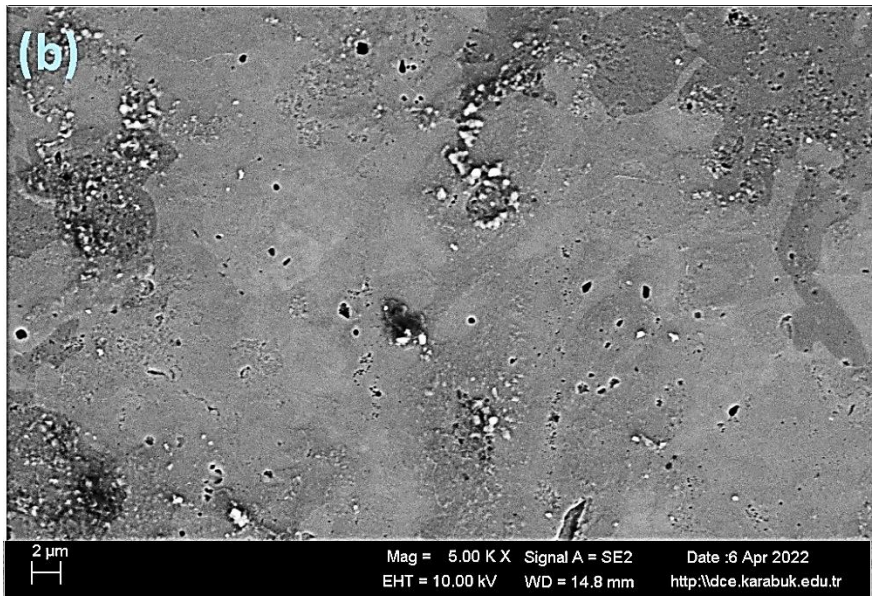
Çelik Kalitesi	**Tabaka Kalınlıkları (mikron)**			
	950 °C- 2,5 saat		**950 °C- 7,5 saat**	
	Ø11 mm çap	Ø14 mm çap	Ø11 mm çap	Ø14 mm çap
DIN 20MnCr5	Ort: 195.6	Ort: 168.3	Ort: 371.5	Ort: 260.6

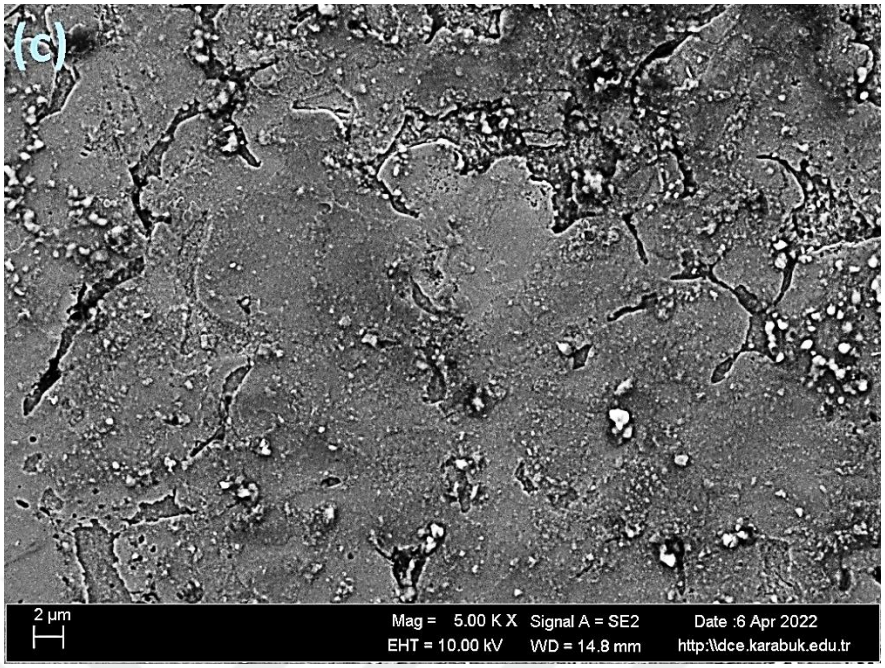
5.2. SEM VE EDX ANALIZ SONUÇLARI

Borlama işlemi uygulanmış numunelerin Carl Zeiss Ultra Plus Gemini Fesem marka tarama elektron mikroskobu ve buna ait EDX ünitesinde kimyasal kompozisyonları hakkında bilgi edinmek amacıyla noktasal analiz yapılmış olup sonuçları sırasıyla Şekil 5.2 - Şekil 5.10 ve Çizelge 5.2 - Çizelge 5.5 arasında sunulmuştur.

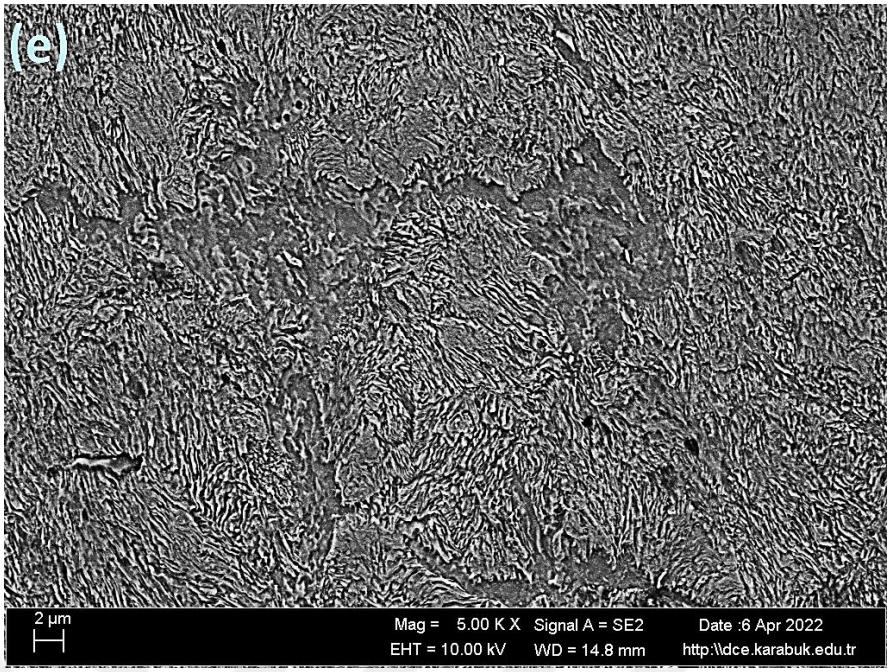
950 °C‘de 2,5 saat borlanan Ø11 mm DIN 20MnCr5 numunesinin bor kaplama tabakasının SEM görüntüleri Şekil 5.2’de verilmiştir. Şekil 5.2’de SEM görüntüsü üzerinde belirtilen 1 numaralı bölgenin büyük ölçekli görüntüsü Şekil 5.2 (a)’da, 2 numaralı bölgenin büyük ölçekli görüntüsü Şekil 5.2 (b)’de, 3 numaralı bölgenin büyük ölçekli görüntüsü Şekil 5.2 (c)’de ve 4 numaralı bölgenin büyük ölçekli görüntüsü Şekil 5.2 (d) ‘de verilmiştir.






(c)
2 µm
Mag = 5.00 K X Signal A = SE2 Date :6 Apr 2022
EHT = 10.00 kV WD = 14.8 mm http:\\dce.karabuk.edu.tr

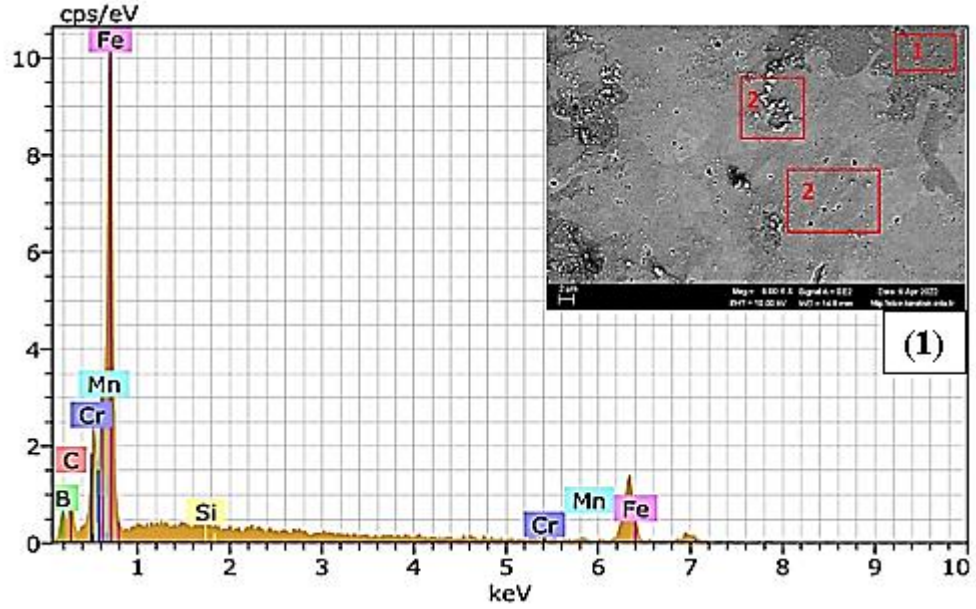
(d)
2 µm
Mag = 5.00 K X Signal A = SE2 Date :6 Apr 2022
EHT = 10.00 kV WD = 14.7 mm http:\\dce.karabuk.edu.tr

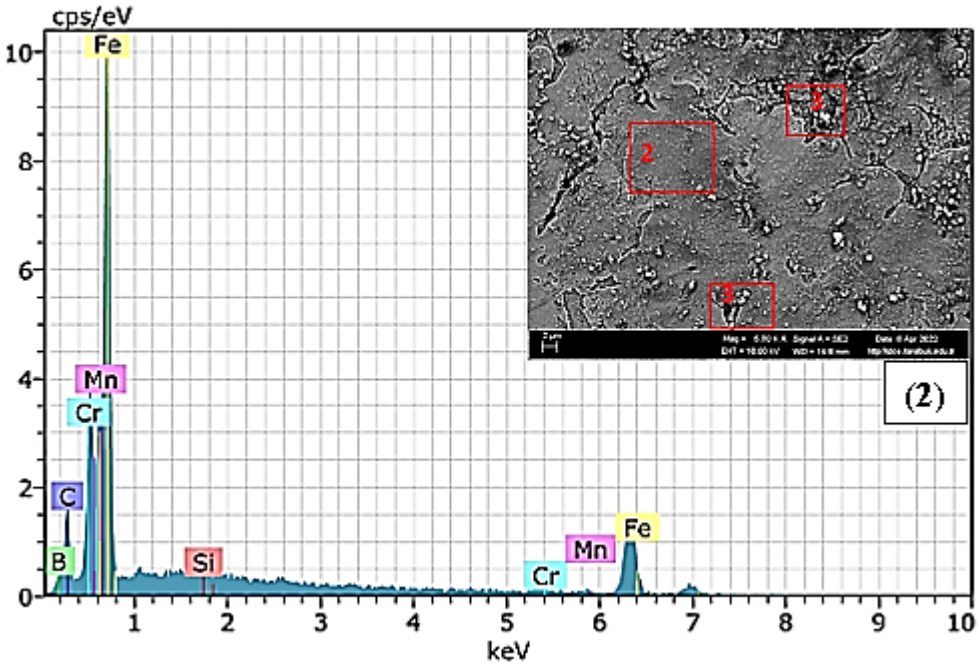


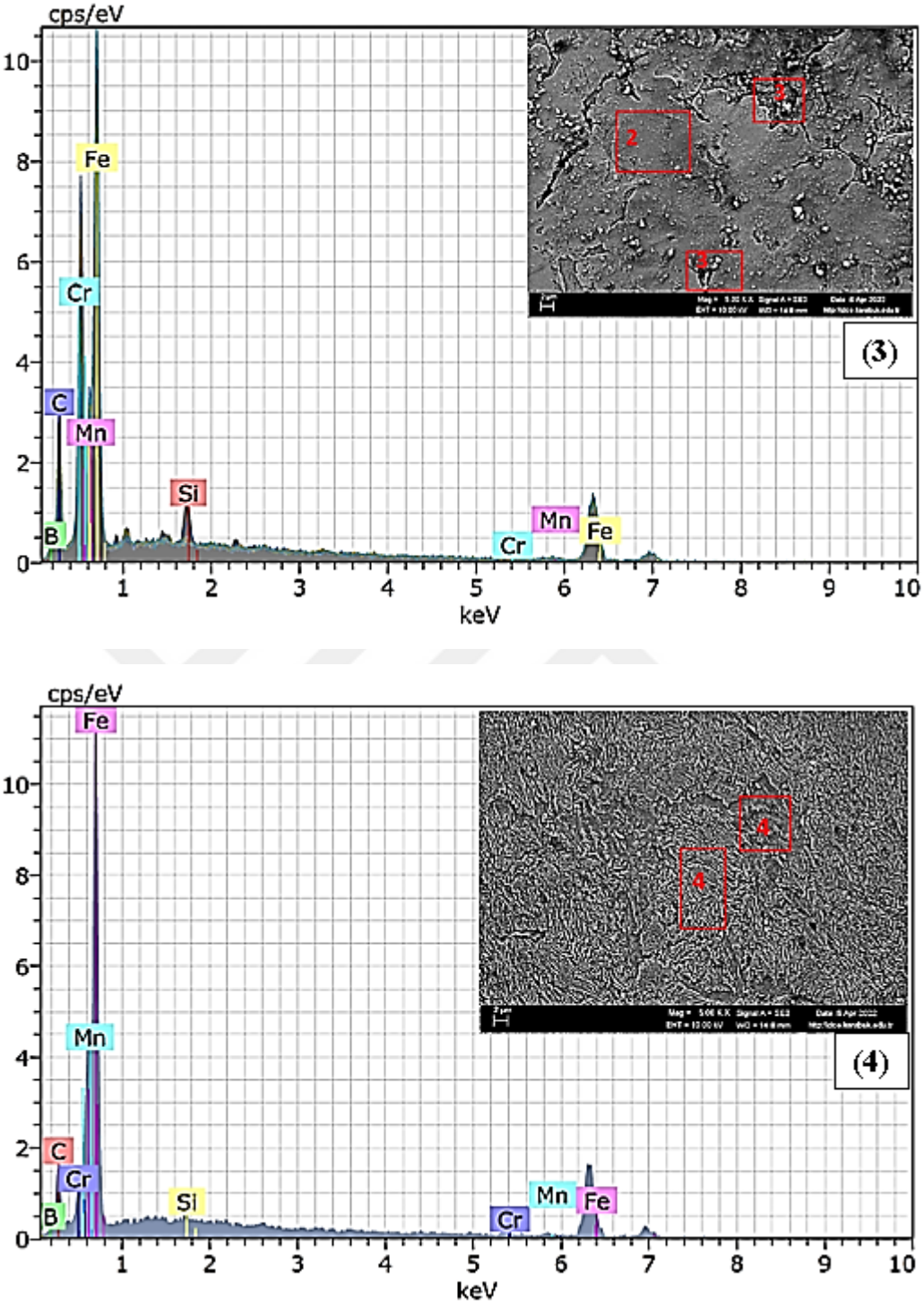
Şekil 5.2. Ø11 mm DIN 20MnCr5 çeliğin 2,5 saat 950ºC sıcaklıkta borlama sonucu oluşan norür tabakasının (a) 500 x büyütmedeki görüntüsü ve (a) şıkkındaki (b) 1 numaralı, (c) 2 numaralı, (d) 3 numaralı ve (e) 4 numaralı bölgelerin 5.00 K X büyütülmüş SEM görüntüsü

Şekil 5.2 (a)' daki SEM görüntüsü üzerinde kaplama tabakasında yer alan koyu gri ve açık parlak kontrastındaki bölgeler sırasıyla kırmızı ve sarı çizgi ile gösterilmiştir. Literatüre [55] göre bor tabakasının kırmızı çizgi ile gösterilen parçası FeB, sarı ile gösterilen kısmı Fe_2B olduğu düşünülmektedir. "1 ve 2" numaralı noktalar borür kaplama tabakasında yer almaktadır. 3 numaralı bölgenin 5.00 K X ölçekli Şekil 5.2 (c),'de ki görüntüsünde yapıda borür kaplaması ile birlikte lamelli perlit yapıları görülmektedir. Perlit yapısı, borür fazlarının oluşmasından sonra soğuma-katılaşma aşamasında perlitin çekirdeklenmesi sonucu oluşmaktadır. Bu nedenle 3 numaralı bölgenin difüzyon bölgesi (kaplama ile matris geçiş bölgesi) ve 4 numaralı bölgenin 5.00 K X ölçekli Şekil 5.2 (d)'de ki görüntüsünde ana matrisin yoğun ince lamelli perlit yapısı ile birlikte tane sınırı ferrit yapısına sahip olduğu görülmektedir.

950 °C'de 2,5 saat borlanan Ø11 mm DIN 20MnCr5 numunesinin EDX analizi Şekil 5.3'te ve spektrum değeri Çizelge 5.2'de verilmiştir.


cps/eV
Fe
Mn
Cr
C
B
Si
Cr
Mn
Fe
keV
1
2
2
(1)


cps/eV
Fe
Mn
Cr
C
B
Si
Cr
Mn
Fe
keV
3
2
3
(2)



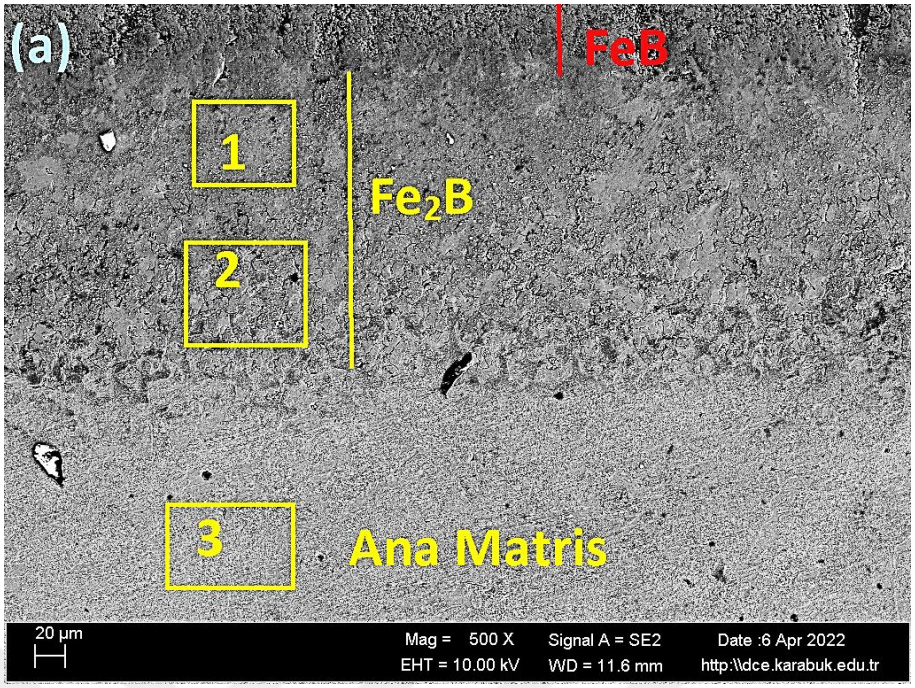
Şekil 5.3.Ø11 mm DIN 20MnCr5 çeliğin 2,5 saat 950ºC sıcaklıkta borlama sonucu oluşan borür tabakasının (a) 500 x büyütmedeki görüntüsü ve (a) şıkkındaki (b) 1 numaralı, (c) 2 numaralı, (d) 3 numaralı ve (e) 4 numaralı bölgelerin 5.00 K X büyütülmüş SEM görüntüsü

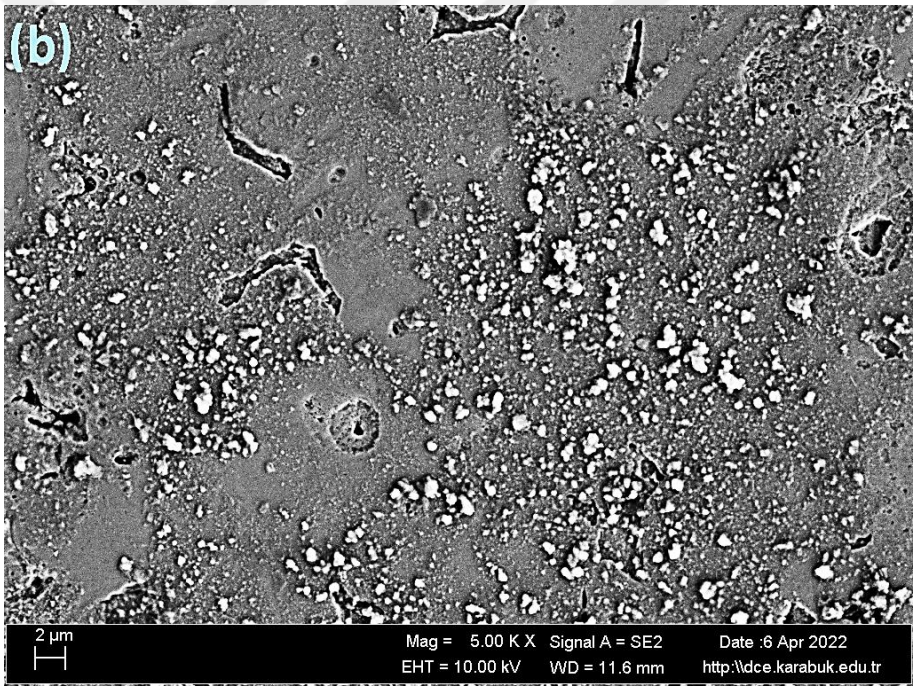
Çizelge 5.2. Ø11 mm DIN 20MnCr5 numunesinin 2,5 saat 950ºC sıcaklıkta borlanması sonucu oluşan borür tabakası ve ana matrisin EDX analiz sonucu

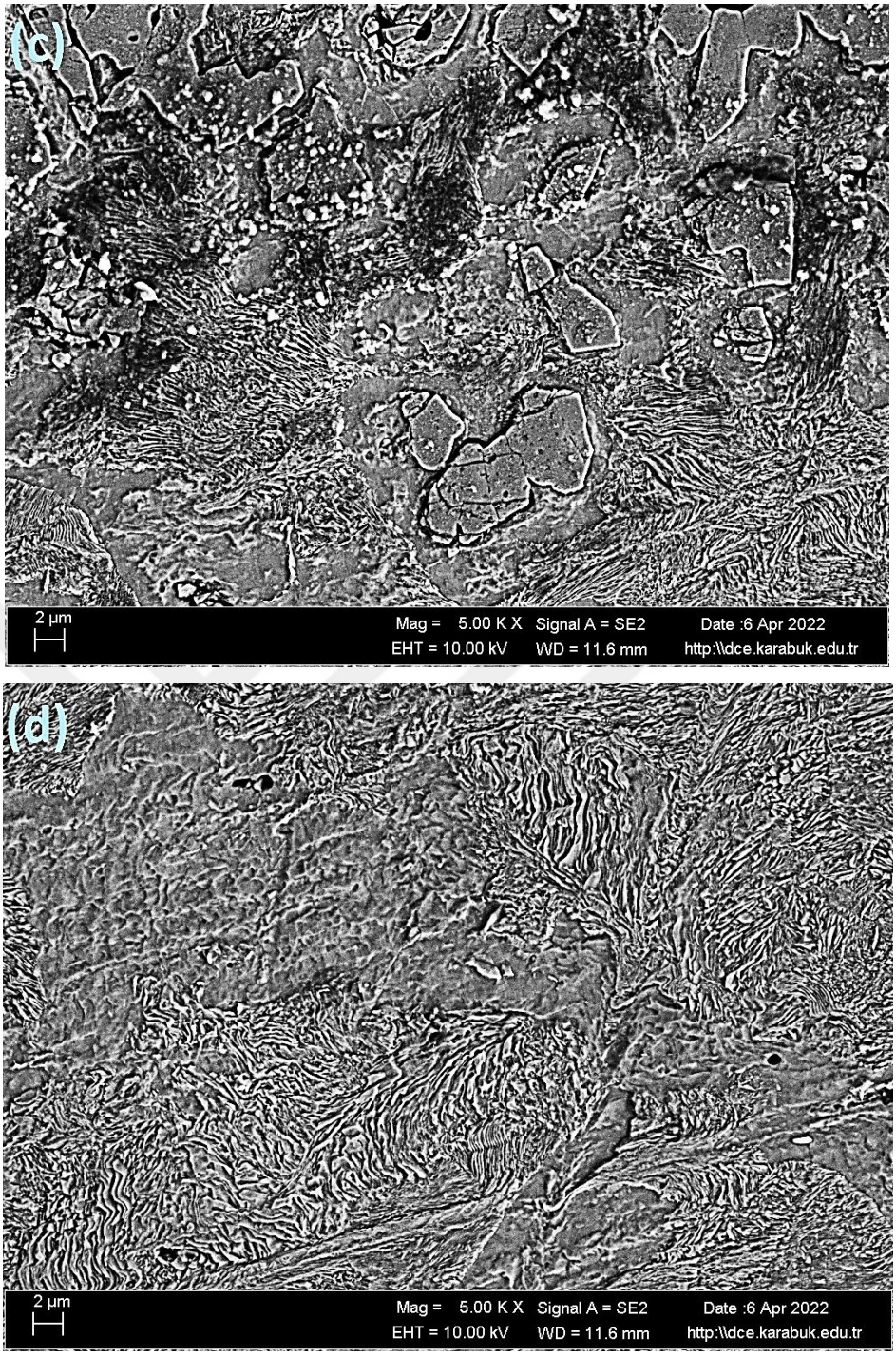
Spektrum	B	C	Si	Cr	Mn	Fe
1	23.12	7.96	0.10	1.21	0.72	66.90
2	13.59	17.72	0.45	0.76	0.87	66.52
3	11.69	21.08	1.14	0.95	0.79	63.79
4	5.90	9.23	0.30	0.92	2.09	80.78

Şekil 5.3 ve Çizelge 5.2'de ki "1" numaralı bölgenin diğerlerine kıyasla B ve Cr içeriği yüksek olup sırasıyla % 23.12 ve %1.21 kimyasal içerikli (Fe,Cr)B borür katmanı olduğunu göstermektedir. "2 ve 3" numaralı noktalar borür tabakasından ve "4" numaralı nokta ana matris üzerinden alınan noktasal analiz yerlerini göstermektedir. "2 ve 3" numaralı noktalar da bor elementinin ana matrise kıyasla yüksek oranda ancak yüzeye yakın "1" numaralı alana kıyasla düşük (%11.69-13.59 B aralığındaki) oranda bor elementi görülmüştür. Bu nedenle "2 ve 3" noktalarının yer aldığı bölgenin ise $(Fe,Cr)_2B$ faz yapısında olduğu söylenebilir.1.nokta ile 4.nokta arasında giderek azalan bir bor miktarı tespit edilmiştir. Ana matriste ise yaklaşık % 6 bor elementi tespit edilmiştir. Şekil 5.2 (d) ve Çizelge 5.2'ye göre "4" noktasının kaplama tabakası olmadığı, bu bölgenin ana matris olduğu görülmektedir. Bor elementinin difüzyon sırasında ana malzemeye yayınımı sonucu yaklaşık % 6 oranında bor elementi ana matriste ölçülmüştür.

950 °C'de 2,5 saat borlanan Ø14 mm DIN 20MnCr5 numunesinin bor kaplama tabakasının SEM görüntüleri Şekil 5.4'te verilmiştir. Şekil 5.4'te SEM görüntüsü üzerinde belirtilen 1 numaralı bölgenin büyük ölçekli görüntüsü Şekil 5.4 (a)'da, 2 numaralı bölgenin büyük ölçekli görüntüsü Şekil 5.4 (b)'de ve 3 numaralı bölgenin büyük ölçekli görüntüsü Şekil 5.4 (c)'de verilmiştir.


(a)
FeB
1
2
Fe2B
3
Ana Matris
20 µm
Mag = 500 X
EHT = 10.00 kV
Signal A = SE2
WD = 11.6 mm
Date :6 Apr 2022
http:\\dce.karabuk.edu.tr


(b)
2 µm
Mag = 5.00 K X
EHT = 10.00 kV
Signal A = SE2
WD = 11.6 mm
Date :6 Apr 2022
http:\\dce.karabuk.edu.tr

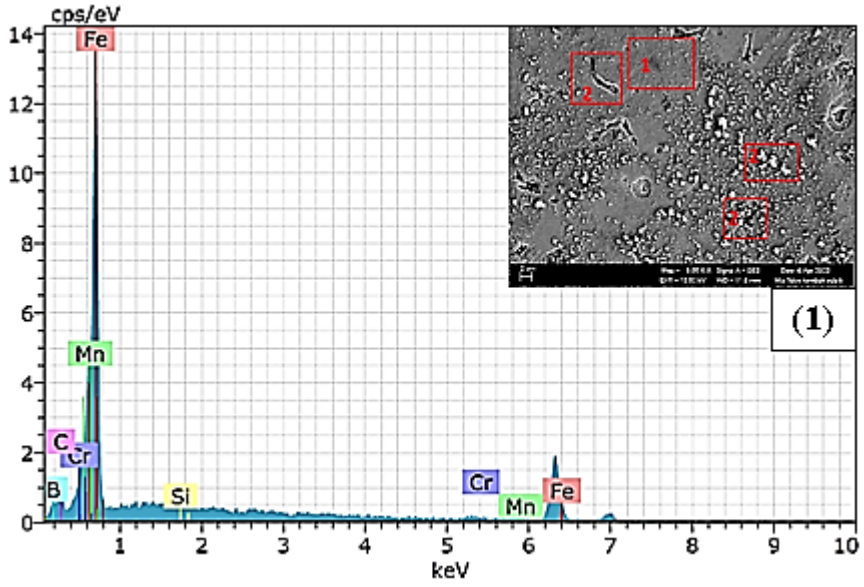


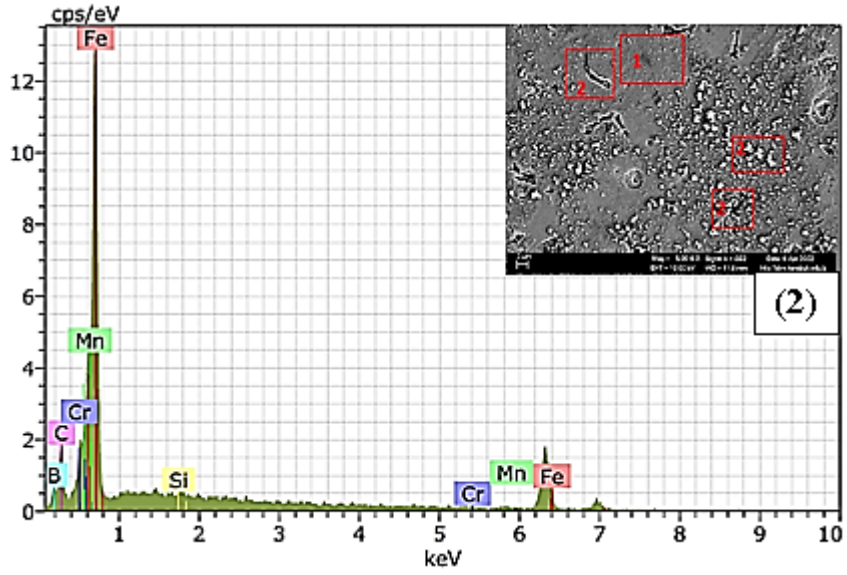
Şekil 5.4. Ø14 mm DIN 20MnCr5 çeliğin 2,5 saat 950ºC sıcaklıkta borlama sonucu oluşan borür tabakasının (a) 500 x büyütmedeki görüntüsü ve (a) şıkkındaki (b) 1 numaralı, (c) 2 numaralı ve (d) 3 numaralı bölgelerin 5.00 K X büyütülmüş SEM görüntüsü

Şekil 5.4 (a)' daki SEM görüntüsü üzerinde kaplama tabakasında yer alan koyu gri ve açık parlak kontrastındaki bölgeler sırasıyla kırmızı ve sarı çizgi ile gösterilmiştir.

Literatüre [55] göre bor tabakasının kırmızı çizgi ile gösterilen parçası FeB, sarı ile gösterilen kısmı Fe_2B olduğu düşünülmektedir. "1" numaralı nokta borür kaplama tabakasında yer almaktadır. "2" numaralı bölgenin 5.00 K X ölçekli Şekil 5.4 (b),'de ki görüntüsünde yapıda borür kaplaması ile birlikte lamelli perlit yapıları görülmektedir. Bu nedenle "2" numaralı bölgenin difüzyon bölgesi (kaplama ile matris geçiş bölgesi) ve 3 numaralı bölgenin 5.00 K X ölçekli Şekil 5.4 (c),'de ki görüntüsünde yapıda ana matrisin yoğun ince lamelli perlit yapısı ile birlikte tane sınırı ferrit yapısına sahip olduğu görülmektedir.

950 °C'de 2,5 saat borlanan Ø14 mm DIN 20MnCr5 numunesinin EDX analizi Şekil 5.5'te ve spektrum değeri Çizelge 5.3'te verilmiştir.





Şekil 5.5. Ø14 mm DIN 20MnCr5 çeliğin 2,5 saat 950°C sıcaklıkta borla sonucu oluşan borür tabakasının EDX analiz sonucu

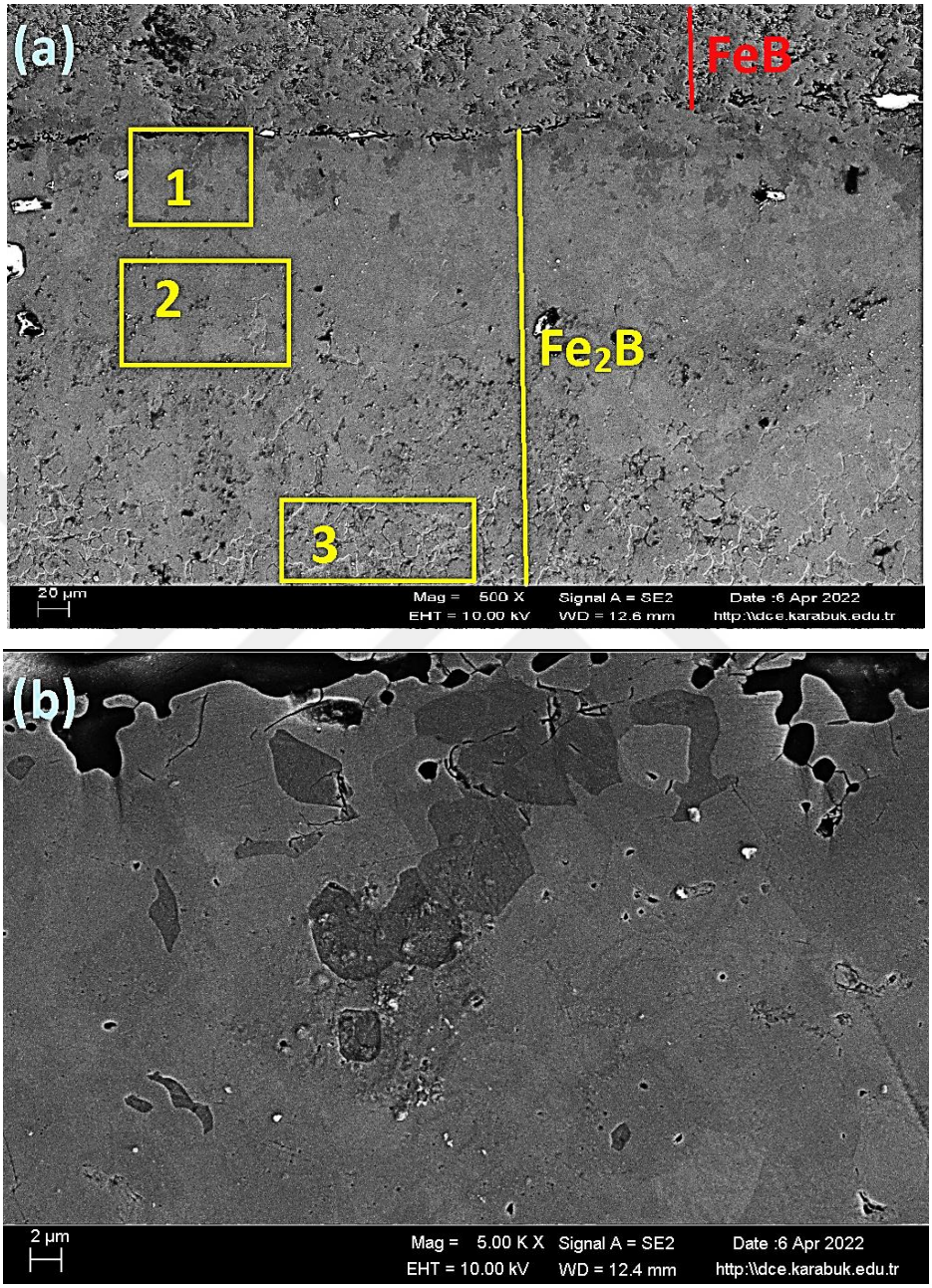
Çizelge 5.3. Ø14 mm DIN 20MnCr5 çeliğin 2,5 saat 950°C sıcaklıkta borla sonucu oluşan borür tabakasının EDX analiz sonucu

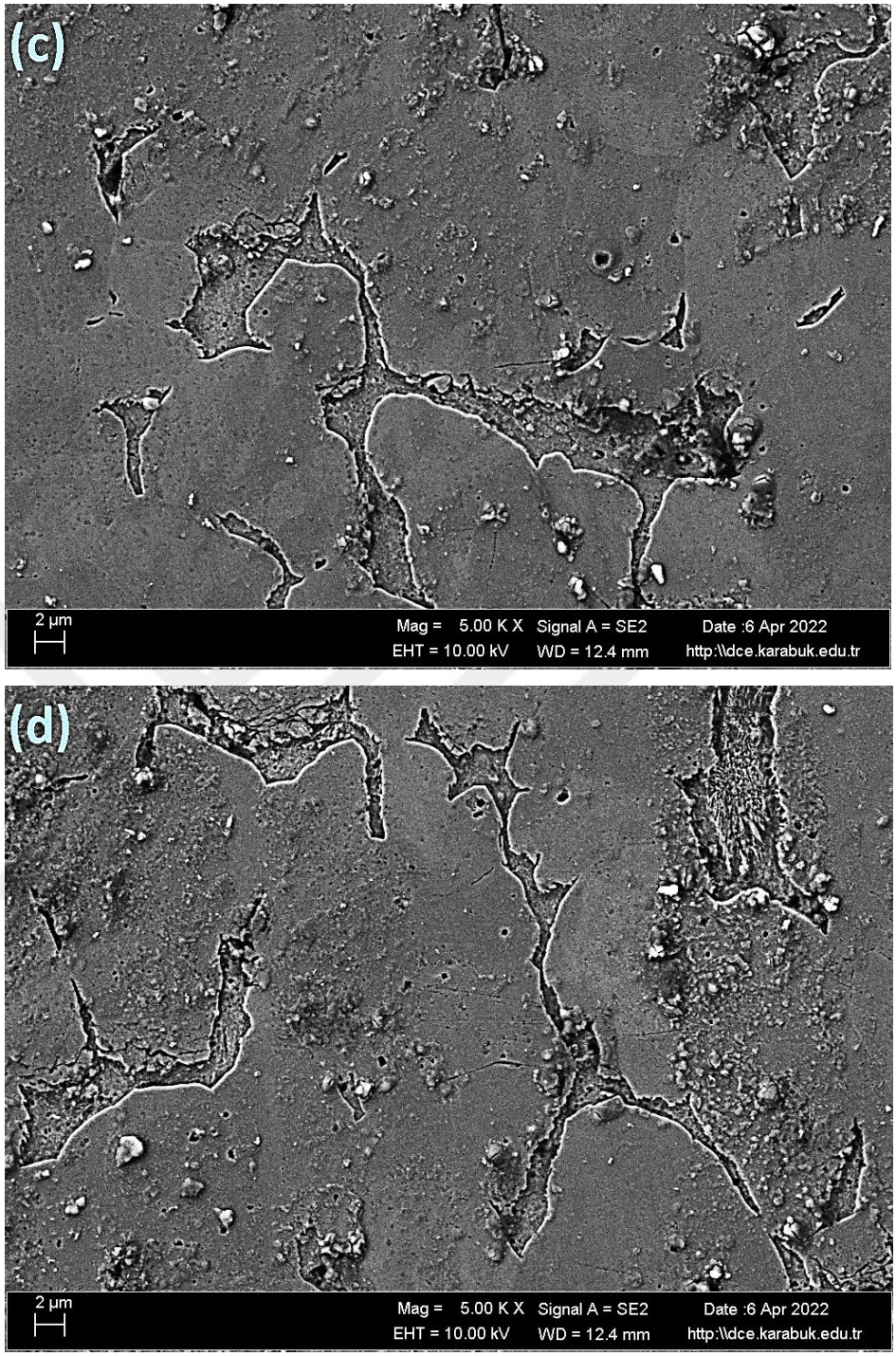
Spektrum	B	C	Si	Cr	Mn	Fe
1	17.66	8.41	0.02	1.15	0.85	71.95
2	15.95	14.59	0.37	0.76	0.67	67.7

Şekil 5.5 ve Çizelge 5.3'te ki "1" numaralı bölgenin B ve Cr içeriği "2" numaralı bölge ile yaklaşık yakın değerlerde olup sırasıyla % 17.66 ve %1.15 kimyasal içerikli (Fe,Cr)B borür katmanı olduğunu göstermektedir. "2" numaralı noktalar borür tabakası üzerindeki çizgisel ve beyaz küresel morfolojiye sahip yapılardan alınan noktasal analiz yerlerini göstermektedir. "2 " numaralı noktalarda da bor ve krom elementlerinin "1" numaralı alana kıyasla düşük (%15.95 B – 0.76 Cr aralığındaki) oranda görülmüştür. Bu nedenle "2"noktalarının yer aldığı bölgenin de (Fe,Cr)B faz yapısında olduğu söylenebilir.

950 °C'de 7,5 saat borlanan Ø11 mm DIN 20MnCr5 numunesinin bor kaplama tabakasının SEM görüntüleri Şekil 5.6'da verilmiştir. Şekil 5.6'da SEM görüntüsü üzerinde belirtilen "1" numaralı bölgenin büyük ölçekli görüntüsü Şekil 5.6 (a)'da,

“2” numaralı bölgenin büyük ölçekli görüntüsü Şekil 5.6 (b)’de ve “3” numaralı bölgenin büyük ölçekli görüntüsü Şekil 5.6. (c)’de verilmiştir.



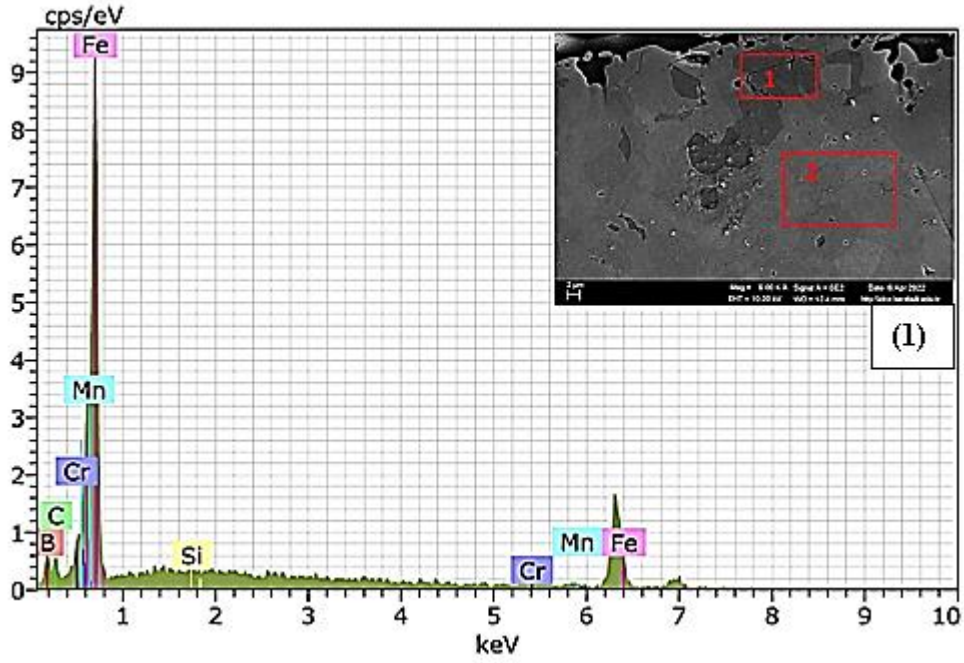


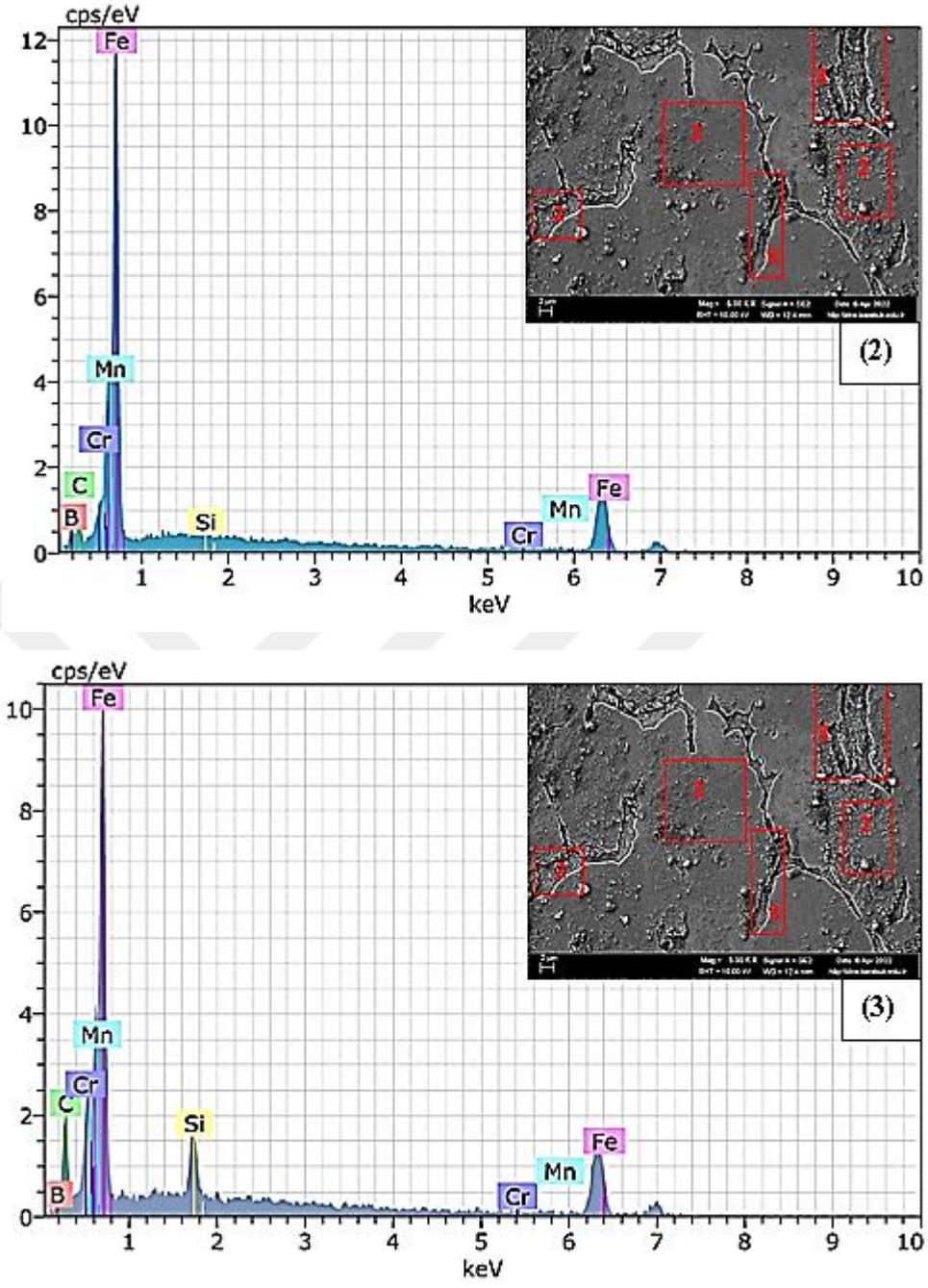
Şekil 5.6. Ø11 mm DIN 20MnCr5 çeliğin 7,5 saat 950ºC sıcaklıkta borla sonucu oluşan borür tabakasının (a) 500 x büyütmedeki görüntüsü ve a şıkkındaki (b) 1 numaralı, (c) 2 numaralı ve (d) 3 numaralı bölgelerin 5.00 K X büyütülmüş SEM görüntüsü

Şekil 5.6 (a)' da ki SEM görüntüsü üzerinde kaplama tabakasında yer alan koyu gri ve açık parlak kontrastındaki bölgeler sırasıyla kırmızı ve sarı çizgi ile gösterilmiştir.

Literatüre [55] göre bor tabakasının kırmızı çizgi ile gösterilen parçası FeB, sarı ile gösterilen kısmı Fe_2B olduğu düşünülmektedir. "1, 2 ve 3" numaralı noktalar borür kaplama tabakasında yer almaktadır. 3 numaralı bölgenin 5.00 K X ölçekli Şekil 5.6 (d),'de ki görüntüsünde yapıda borür kaplaması ile birlikte lamelli perlit yapıları görülmektedir. Bu nedenle 3 numaralı bölgenin difüzyon bölgesi (kaplama ile matris geçiş bölgesi) olduğu görülmektedir.

950 °C'de 7,5 saat borlanan Ø11 mm DIN 20MnCr5 numunesinin EDX analizi Şekil 5.7'de ve spektrum değeri Çizelge 5.4'te verilmiştir.





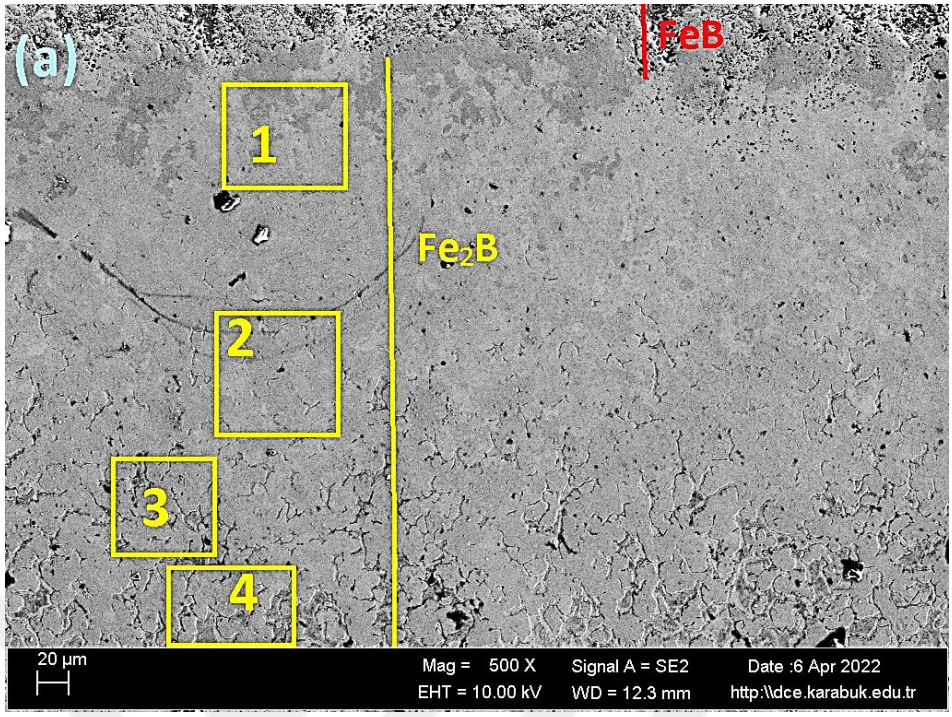
Şekil 5.7.Ø11 mm DIN 20MnCr5 çeliğin 7,5 saat 950^{o}C sıcaklıkta borla sonucu oluşan borür tabakasının EDX analiz sonucu

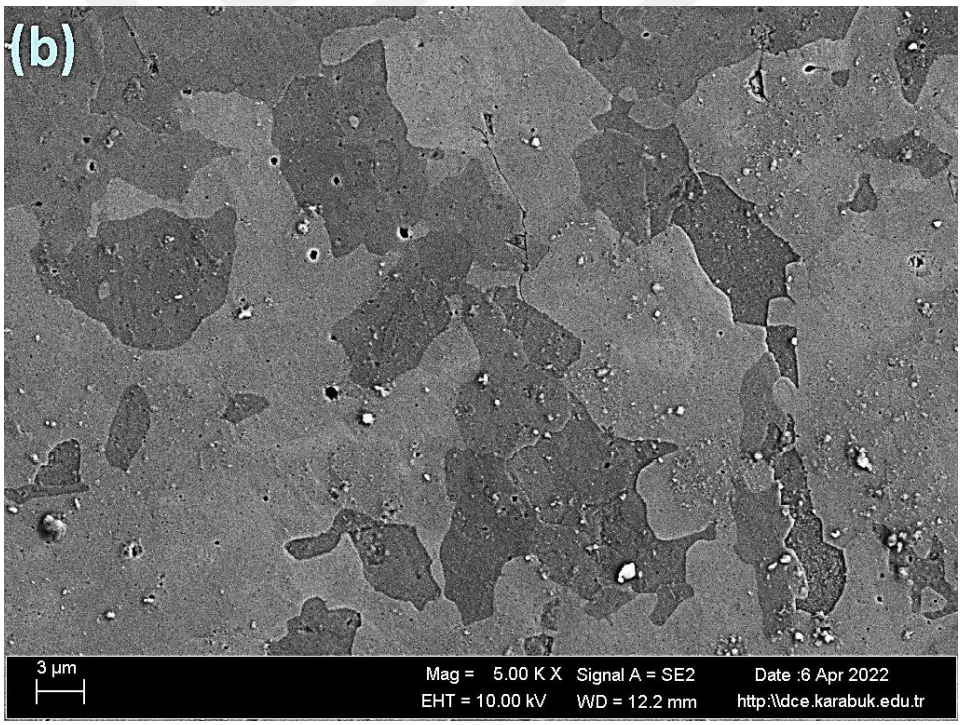
Çizelge 5.4. Ø11 mm DIN 20MnCr5 çeliğin 7,5 saat 950°C sıcaklıkta borla sonucu oluşan borür tabakasının EDX analiz sonucu

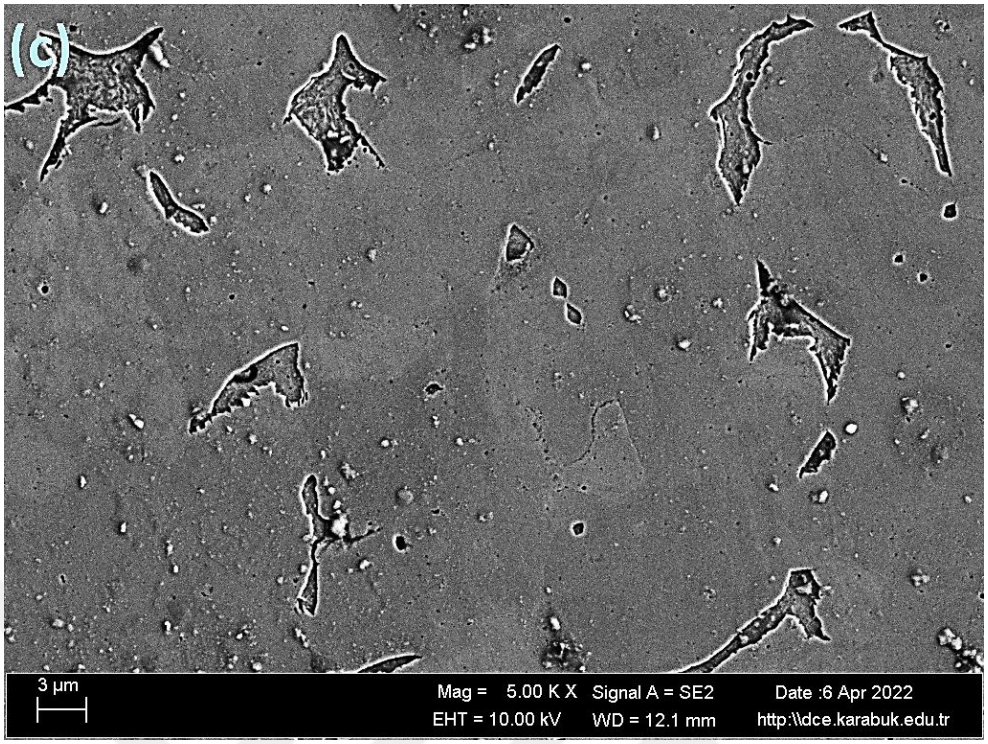
Spektrum	B	C	Si	Cr	Mn	Fe
1	20.49	3.85	0.12	1.34	1.95	72.47
2	14.82	11,60	0.07	0.87	0.87	73.28
3	6.45	14.77	2.14	0.43	0.00	76.21

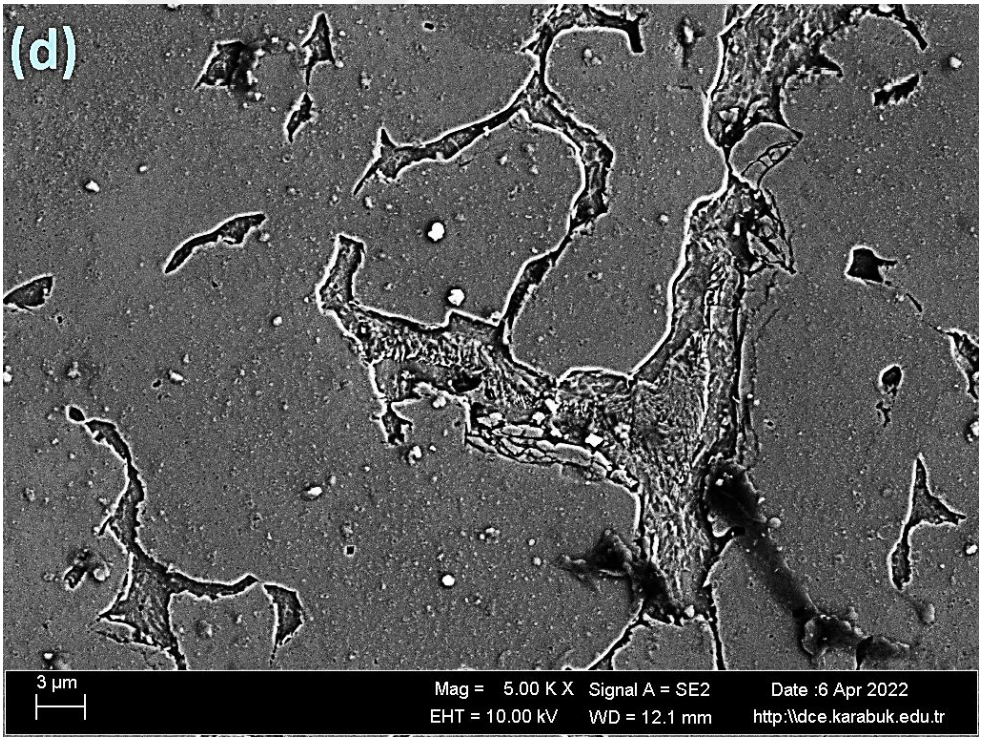
Şekil 5.7 ve Çizelge 5.4'te ki "1" numaralı bölgenin diğerlerine kıyasla B ve Cr içeriği yüksek olup sırasıyla % 20.49 ve %1.34 kimyasal içerikli (Fe,Cr)B borür katmanı olduğunu göstermektedir. "1 ve 2" numaralı noktalar borür tabakasından ve "3" numaralı nokta ana matrise yakın borür kaplama tabakasından alınan noktasal analiz yerlerini göstermektedir. "2 " numaralı nokta da bor ve krom elementinin "3" numaralı bölgeye kıyasla yüksek oranda ancak yüzeye yakın "1" numaralı alana kıyasla düşük (%14.82 B - % 0.87 Cr aralığındaki) oranda bor ve krom elementleri görülmüştür. Bu nedenle "2" noktasının yer aldığı bölgenin ise $(Fe,Cr)_2B$ faz yapısında olduğu söylenebilir. 1.nokta ile 4.nokta arasında giderek azalan bir bor miktarı tespit edilmiştir. Ana matriste yakın kaplama tabakasındaki "3" numaralı alan da ise yaklaşık % 6 bor elementi tespit edilmiştir. Bu nedenle Şekil 5.6 (d)'de yapıda perlit yapısı görülmesi ve Çizelge 5.4'te yaklaşık % 6 bor elementine sahip olması "3" noktasının difüzyon bölgesine (kaplama ile matris geçiş bölgesi) yakın kaplama tabakası olduğunu göstermektedir.

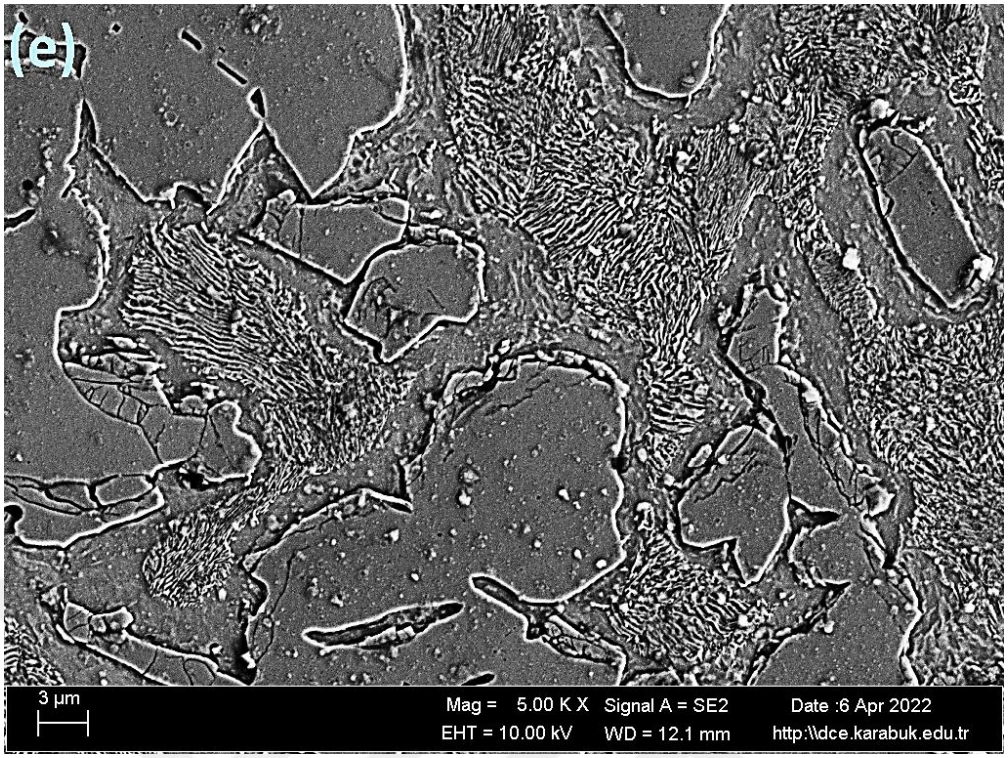
950 °C'de 7,5 saat borlanan Ø14 mm DIN 20MnCr5 numunesinin bor kaplama tabakasının SEM görüntüleri Şekil 5.8'de verilmiştir. Şekil 5.8 (a)'da SEM görüntüsü üzerinde belirtilen "1" numaralı bölgenin büyük ölçekli görüntüsü Şekil 5.8 (b)'de, "2" numaralı bölgenin büyük ölçekli görüntüsü Şekil 5.8 (c)'de, "3" numaralı bölgenin büyük ölçekli görüntüsü Şekil 5.8 (d)'de ve "4" numaralı bölgenin büyük ölçekli görüntüsü Şekil 5.8 (e)'de verilmiştir.


(a)
FeB
1
Fe2B
2
3
4
20 µm
Mag = 500 X
Signal A = SE2
Date :6 Apr 2022
EHT = 10.00 kV
WD = 12.3 mm
http:\\dce.karabuk.edu.tr


(b)
3 µm
Mag = 5.00 K X
Signal A = SE2
Date :6 Apr 2022
EHT = 10.00 kV
WD = 12.2 mm
http:\\dce.karabuk.edu.tr


(c)
3 µm
Mag = 5.00 K X Signal A = SE2 Date :6 Apr 2022
EHT = 10.00 kV WD = 12.1 mm http:\\dce.karabuk.edu.tr

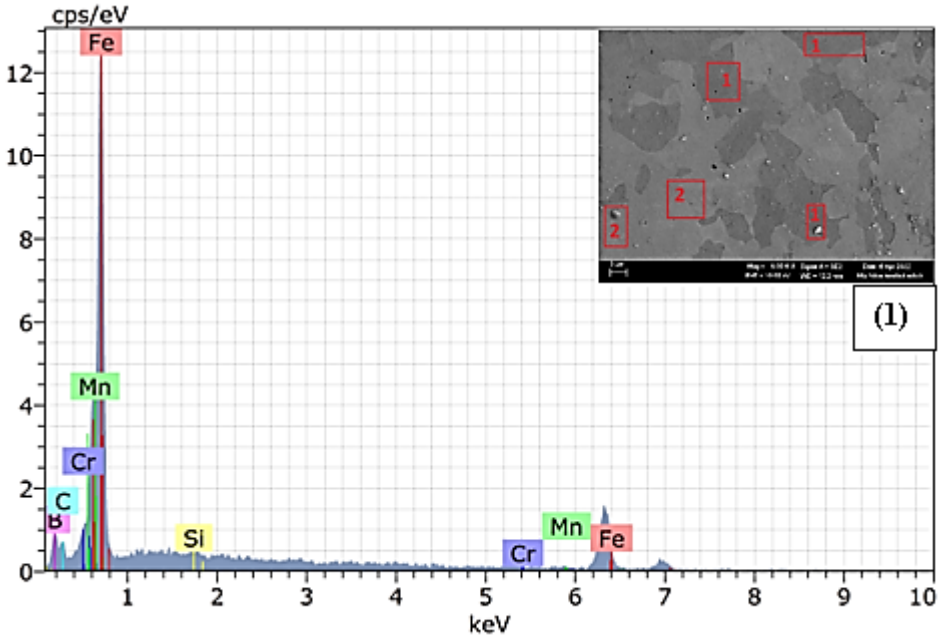

(d)
3 µm
Mag = 5.00 K X Signal A = SE2 Date :6 Apr 2022
EHT = 10.00 kV WD = 12.1 mm http:\\dce.karabuk.edu.tr

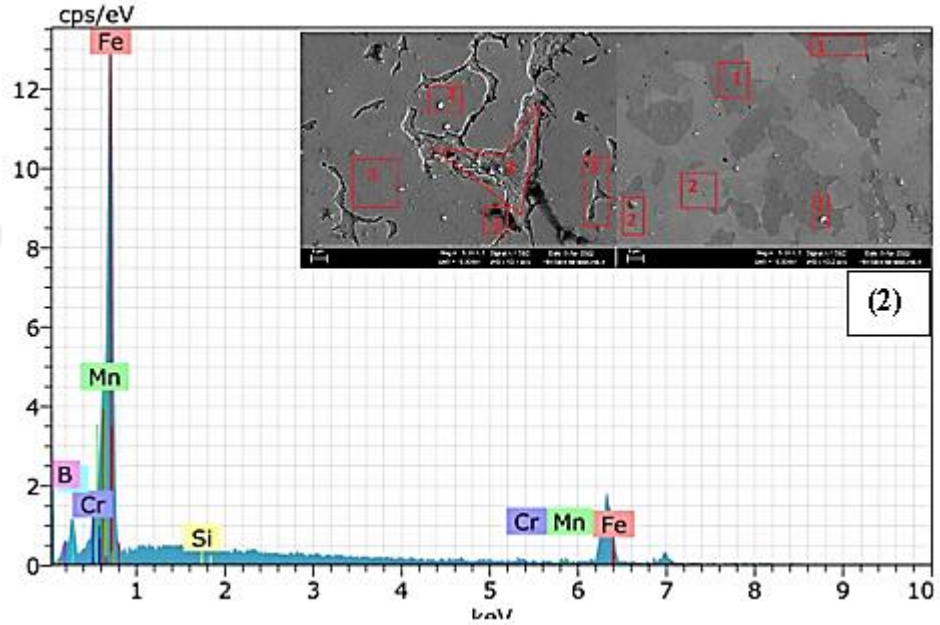


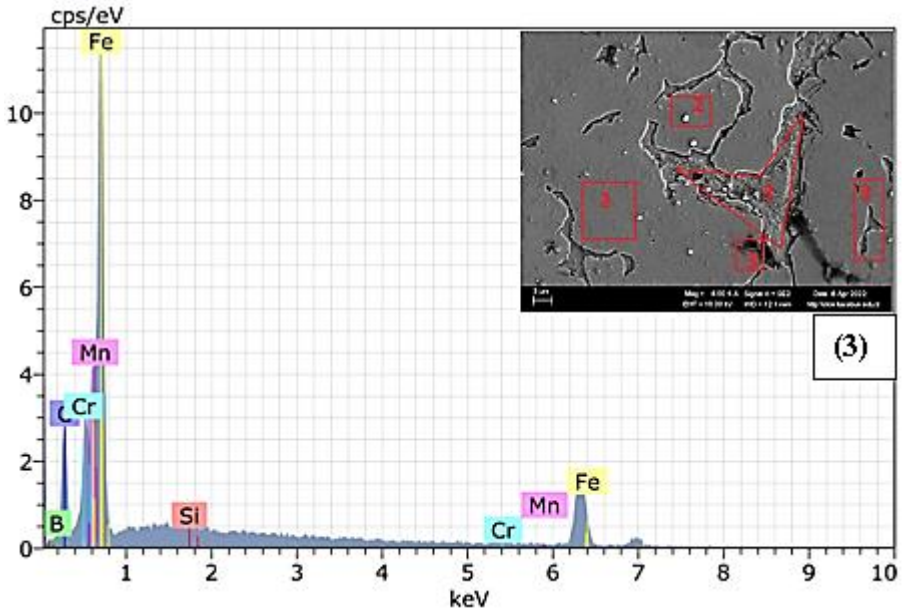
Şekil 5.8.Ø14 mm DIN 20MnCr5 çeliğin 7,5 saat 950^{o}C sıcaklıkta borla sonucu oluşan borür tabakasının (a) 500 x büyütmedeki görüntüsü ve (a) şıkkındaki (b) 1 numaralı, (c) 2 numaralı, (d) 3 numaralı ve (e) 4 numaralı bölgelerin 5.00 KX büyütülmüş SEM görüntüsü

Şekil 5.8 (a)'da ki SEM görüntüsü üzerinde kaplama tabakasında yer alan koyu gri ve açık parlak kontrastındaki bölgeler sırasıyla kırmızı ve sarı çizgi ile gösterilmiştir. Literatüre [55] göre bor tabakasının kırmızı çizgi ile gösterilen parçası FeB, sarı ile gösterilen kısmı Fe_2B olduğu düşünülmektedir. "1 ve 2" numaralı noktalar borür kaplama tabakasında yer almaktadır. "3 ve 4" numaralı bölgenin 5.00 KX ölçekli sırasıyla Şekil 5.8 (d) ve Şekil 5.8 (e)'de ki görüntülerinde yapıda borür kaplaması ile birlikte lamelli perlit yapıları görülmektedir. "3" numaralı bölge, "4" numaralı bölgeye kıyasla düşük oranda perlit içermektedir. Bu nedenle "4" numaralı bölgenin difüzyon bölgesi (kaplama ile matris geçiş bölgesi) olduğu ve "3"numaralı bölgenin difüzyon bölgesine yakın kaplama tabası olduğu görülmektedir. Kaplama tabakası ile perlit fazı arasındaki sınırın tane sınırı ferriti olduğu düşünülmektedir.

950 °C'de 7,5 saat borlanan Ø14 mm DIN 20MnCr5 numunesinin EDX analizi Şekil 5.9'da ve spektrum değeri Çizelge 5.5'te verilmiştir.


cps/eV
Fe
Mn
Cr
C
B
Si
Mn
Fe
Cr
keV
(1)


cps/eV
Fe
Mn
B
Cr
Si
Cr
Mn
Fe
(2)



Şekil 5.9.Ø14 mm DIN 20MnCr5 çeliğin 7,5 saat 950ºC sıcaklıkta borla sonucu oluşan borür tabakasının EDX analiz sonucu

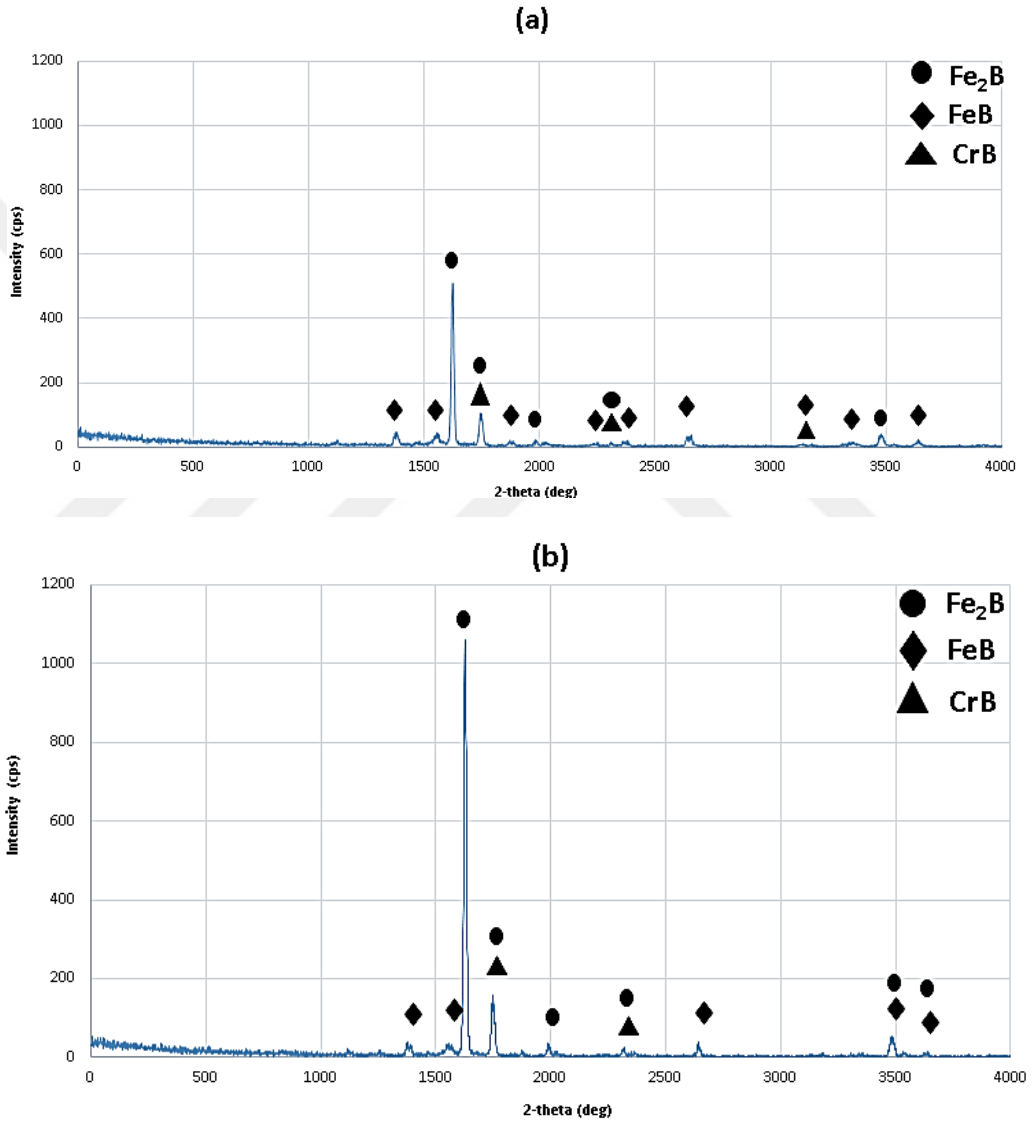
Çizelge 5.5.Ø14 mm DIN 20MnCr5 çeliğin 7,5 saat 950ºC sıcaklıkta borlama sonucu oluşan borür tabakasının EDX analiz sonucu

Spektrum	B	C	Si	Cr	Mn	Fe
1	24.75	9.5	0.07	1.15	0.53	63.5
2	17.75	10.18	0.01	0.67	1.03	68.08
3	8.22	18.10	1.40	1.72	0.84	69.76

Şekil 5.9 ve Çizelge 5.5'te ki "1" numaralı bölgenin diğerlerine kıyasla B içeriği yüksek olup % 24.75 ve Cr içeriği % 1.15 kimyasal içerikli (Fe,Cr)B borür katmanı olduğunu göstermektedir. "2" numaralı noktalar borür tabakasından ve "3" numaralı nokta difüzyon bölgesine yakın bölgeden alınan noktasal analiz yerlerini göstermektedir. "2" numaralı nokta da bor elementinin "3" numaralı bölgeye kıyasla yüksek oranda ancak yüzeye yakın "1" numaralı alana kıyasla düşük (%17.75 B aralığındaki) oranda bor elementi görülmüştür. Bu nedenle "2" noktasının yer aldığı bölgenin ise $(Fe,Cr)_2B$ faz yapısında olduğu söylenebilir.1.nokta ile 3.nokta arasında giderek azalan bir bor miktarı tespit edilmiştir. Şekil 5.8 (d)'ye göre "3" noktasının difüzyon bölgesine yakın kaplama tabası olduğu görülmektedir.

5.3. XRD SONUÇLARI

Şekil 5.10'da 950 °C'de 7,5 saat borlanan Ø11 ve Ø 14 mm DIN 20MnCr5 numunelerinin sırasıyla bor kaplama tabakasının XRD analizi verilmiştir. Çizelge 5.4 ve Çizelge 5.5 EDX verilerine uyumlu olarak bor kaplama tabakasında FeB, Fe_2B ve CrB pikleri Şekil 5.10'da ki gibi bulunmuştur.



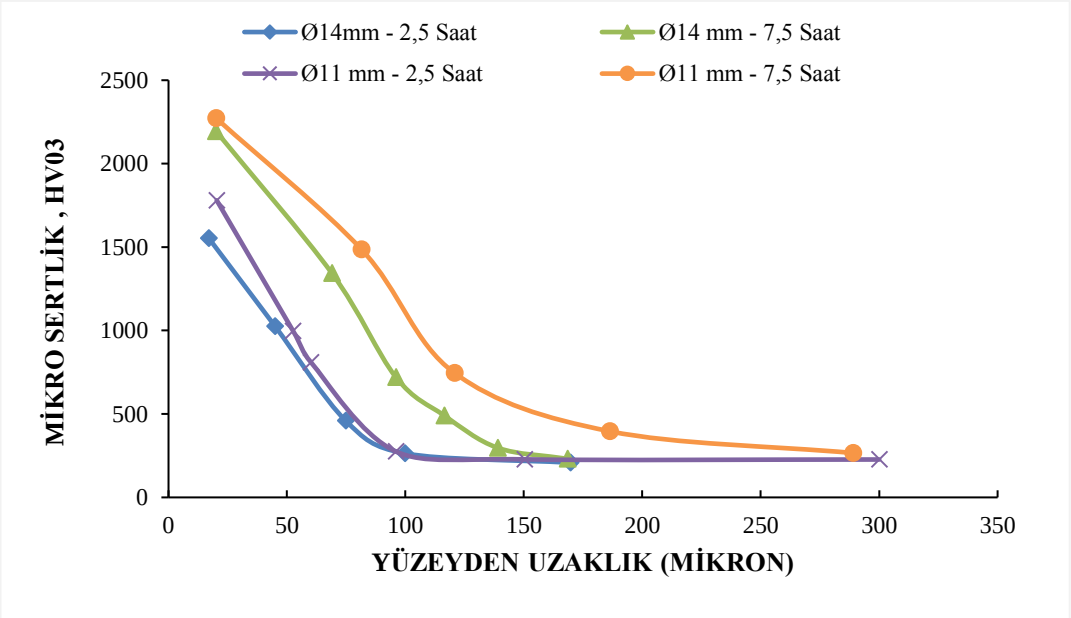
Şekil 5.10.950 ºC'de 7,5 saat borlanan a) Ø11 mm ve b) Ø14 mm çapındaki DIN 20MnCr5 çubuklarının XRD analizi

5.4. SERTLIK SONUÇLARI

Mikro sertlik ölçümleri, sırasıyla borür tabakası, geçiş bölgesi ve matristeki değişimleri görmek için yüzeyden içe doğru bir çizgi boyunca gerçekleştirilmiştir. Borür tabakasının yüzeyden itibaren mesafeye bağlı olrak sertlik değerleri Çizelge 5.6'da verilmiştir. Çizelge 5.6'da ki değerlerden yola çıkılarak Şekil 5.11'de borlanmış Ø11 mm ve Ø14 mm çapındaki DIN 20MnCr5 çelik çubukların sertlik derinliğinin değişimini gösteren eğriler çizilmiştir.

Çizelge 5.6. Kutu borlama işlemi görmüş Ø11 mm ve Ø14 mm çapındaki DIN 20MnCr5 çelik çubukların yüzeyden merkeze mikro sertlik derinliği değerleri

	YÜZEYDEN İTİBAREN SERTLİK DEĞERLERİ			
	2,5 SAAT		**7,5 SAAT**	
	Yüzeyden İtibaren Mesafe (mmikrom)	**$HV_{0,3}$**	**Yüzeyden İtibaren Mesafe (mmikrom)**	**$HV_{0,3}$**
Ø11 mm	20,34	1780	20,14	2272
	52,56	998	81,47	1486
	60,12	810	120,69	746
	95,99	275	186,32	396
	150,33	228	289,03	266
	300	227	-	-
Ø14 mm	17	1553	20	2195
	45	1025	68,94	1344
	74,77	460	95,95	721
	99,77	264	116,48	490
	169,73	208	138,96	297
	-	-	168,45	231



Şekil 5.11. Ø11 mm ve Ø14 mm çapındaki DIN 20MnCr5 çeliğinin 950 ^{o}C sıcaklıkta 2,5 saat ve 7,5 saat kutu borlama sonucu mikro sertlik eğrileri

DIN 20MnCr5 çeliği üzerinde oluşan borür tabakasının sertliği Ø11 mm çapındaki çelik çubuklar için 2,5 saat borlama sonucu 1780 HV ve 7,5 saat borlama sonucu 2272 HV dir. Ø14 mm çapındaki çelik çubuklar için 2,5 saat borlama sonucu 1553 HV ve 7,5 saat borlama sonucu 2188 HV ölçülmüştür. Her iki çap için matrisin sertliği ise sırasıyla 244 ve 231 HV olarak bulunmuştur. Sert borür fazlarının varlığından dolayı borür tabakasının sertliğinin matrisinkinden çok daha yüksek olduğu açıktır.

Borür tabakasının sertliği matris ile karşılaştırıldığında, borür tabakasının sertliği matrisinkinden yaklaşık sekiz kat daha fazladır. Ø11 mm ve Ø14 mm çapındaki çelik çubuklar için sabit sıcaklıkta artan borlama süresiyle borür tabakasının sertliğinin arttığı görülmüştür. Bununla birlikte sabit sıcaklık ve sürelerde yapılan kutu borlama işlemi sonucunda Ø11 mm çapındaki DIN 20MnCr5 çelik çubukların sertliğinin Ø14 mm çapındaki DIN 20MnCr5 çelik çubukların sertliğinden sırasıyla % 681 ve %754 daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

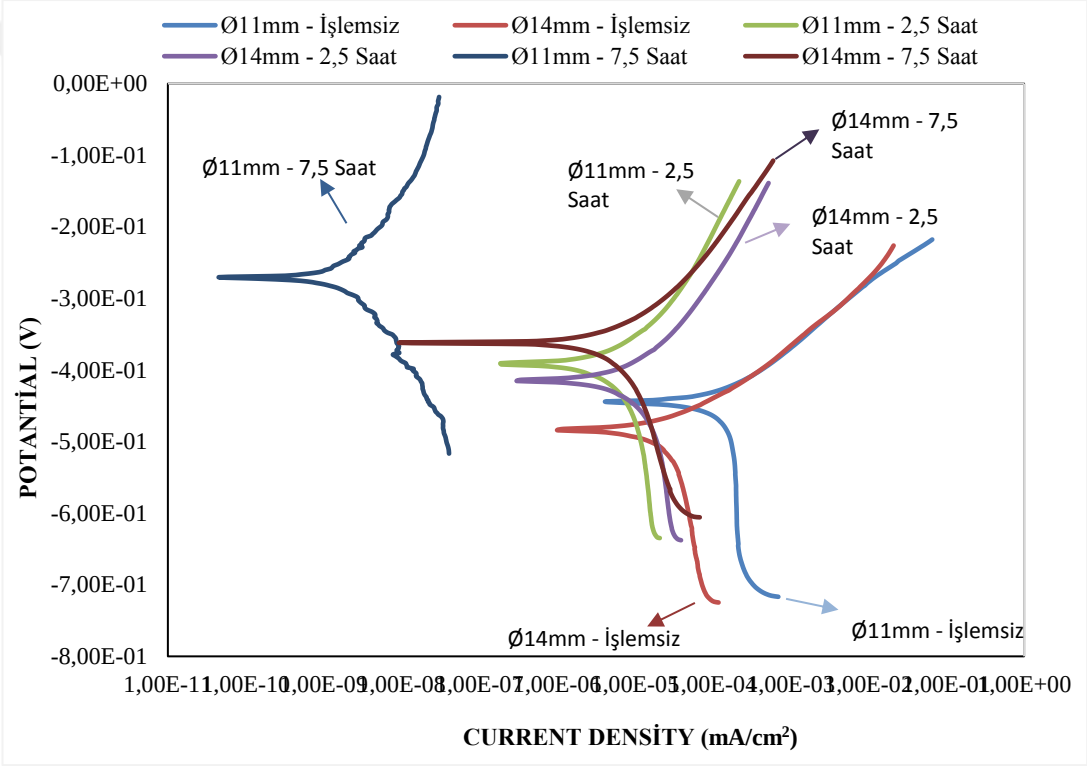
Ø11 mm ve Ø14 mm çapındaki DIN 20MnCr5 çubukların matris sertlikleri karşılaştırıldığında yaklaşık %10 oranında Ø11 mm çapındaki çelik, Ø14 mm

çapındaki çelikten daha yüksektir. Bu durum üretim sırasında ezme oranına maruz kaldığından kaynaklanmıştır.

5.5. KOROZYON TESTI SONUÇLARI

5.5.1. Potansiyodinamik Polarizasyon

Potansiyodinamik polarizasyon deneyi anodik ve katodik bölgeleri içeren tafel eğrileri Şekil 5.12' de verilmiştir.



Şekil 5.12.Potansiyodinamik polarizasyon deney grafikleri

Şekil 5.12'de verilen elektrot potansiyel eğrileri DIN 20MnCr5 çeliklerinin korozyon eğilimini göstermektedir. Şekil 5.12'de verilen grafikte anodik bölgedeki potansiyel değerler değerlendirildiğinde işlem görmemiş numuneler yakın potansiyal değerler göstermektedir. Ø11 ve Ø14 mm çapındaki 2,5 ve 7,5 saat borlanmış bütün çeliklerin işlemsiz çeliklere göre denge potansiyel yani korozyon potansiyel değerlerinin (E_{cor}) daha yüksek olduğu yani daha pasif alanda bulunarak korozyon eğiliminin daha düşük

olduğu görülmektedir. Böylece borlama sonucu DIN 20MnCr5 çeliklerinin korozyon eğilimi azalmaktadır.

Sabit 2,5 saat borlanmış Ø11 ve Ø14 mm çapındaki numunelere ve sabit 7,5 saat borlanmış Ø11 ve Ø14 mm çapındaki numunelere bakıldığında, Ø11 mm çapındaki çeliklerin potansiyel değerlerinin (E_{cor}) Ø14 mm çapındaki çeliklerin potansiyel değerlerinden (E_{cor}) daha yüksektir. Böylece sabit sıcaklık ve borlama sürelerinde artan deformasyon oranıyla çeliğin daha pasif davranış göstererek korozyon eğiliminde azalma görülmektedir.

Sabit Ø11 mm çapında 2,5 ve 7,5 saat borlanmış çeliklere bakıldığında, artan borlama süresiyle potansiyal değerlerde artış görülmektedir. Böylece artan borlama süresiyle çeliklerin korozyon eğiliminde azalma meydana gelmiştir. Aynı şekilde Ø14 mm çapında ki 2,5 ve 7,5 saat borlanmış çeliklere bakıldığında da artan borlama süresiyle korozyon eğiliminde azalma tespit edilmiştir.Bunların dışında grafiklerde herhangi bir aktif, pasif yada transpasif bölgesi oluşmamıştır.

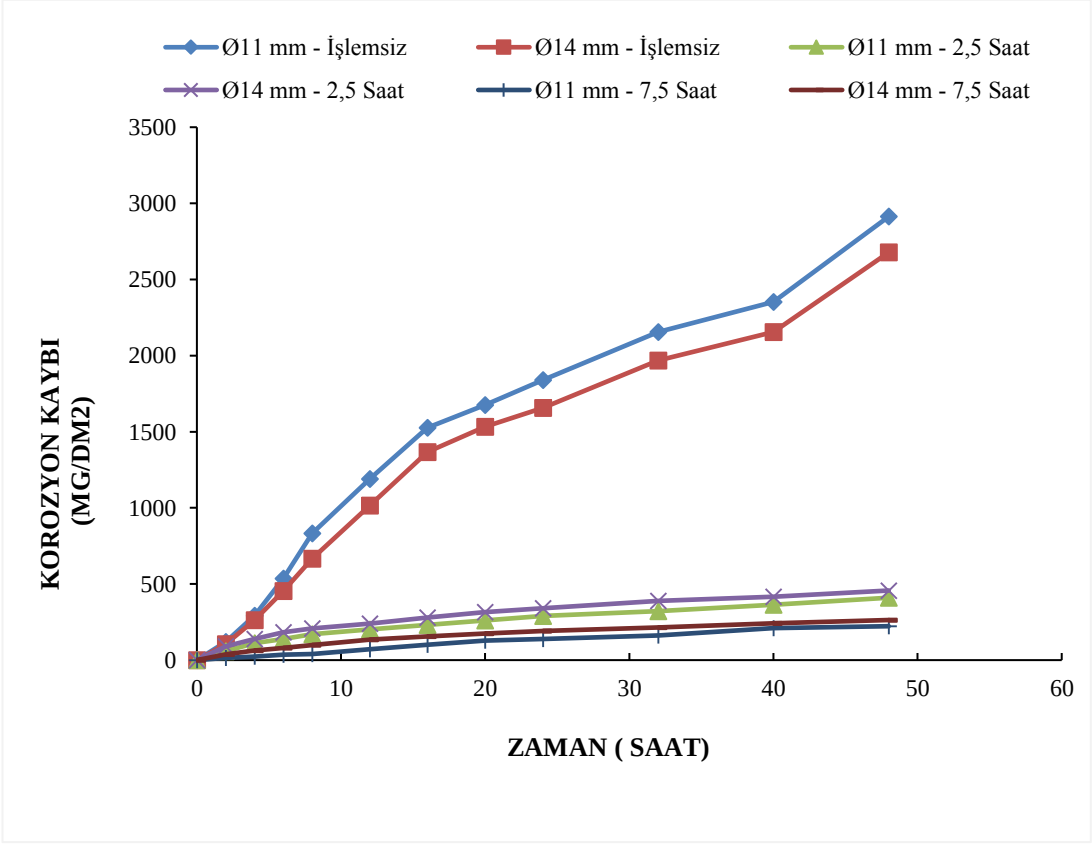
Grafikte x-ekseninde bulunan I_{cor} ($\mu A/cm^2$) değerleri korozyon hızını vermektedir. DIN 20MnCr5 çelik numunelerinin korozyon hızı (I_{cor} ($\mu A/cm^2$)) ve potansiyel (E_{cor} (V)) değerleri Çizelge 5.7'de verilmiştir. İşlemsiz çeliklerde Ø11 mm çapında ki çeliğin, Ø14 mm çapında ki çeliğe göre korozyon hızı daha yüksektir. Bunun nedeni üretim sırasında daha yüksek deformasyona maruz kalan Ø11 mm çubuğun ince taneli olması ve korozyon mekanizmasının taneler arası korozyon mekanizmasının gelişmesidir. Ø11 ve Ø14 mm çapındaki 2,5 ve 7,5 saat borlanmış bütün çeliklerin işlemsiz çeliklere göre korozyon hızı daha düşüktür. Her iki farklı sürede borlanmış çeliklerde, Ø11 mm çapında ki çeliklerin korozyon hızının Ø14 mm'ye göre daha düşük olduğu görülmektedir. Böylece artan deformasyon oranlarında korozyon hızında azalma meydana gelmektedir. Bunun nedeni ince taneli çelikte difüzyon olayı daha hızlı olduğu için ince çaplı numunelerde sabit sıcaklık ve sürelerde daha yüksek kaplama tabakası elde edilmesidir. Ø11 mm çapında 2,5 ve 7,5 saat borlanmış çeliklere bakıldığında artan borlama süresiyle korozyon hızında azalma görülmektedir.

Çizelge 5.7.DIN 20MnCr5 çelik numunelerinin I_{cor} ve E_{cor} değerleri

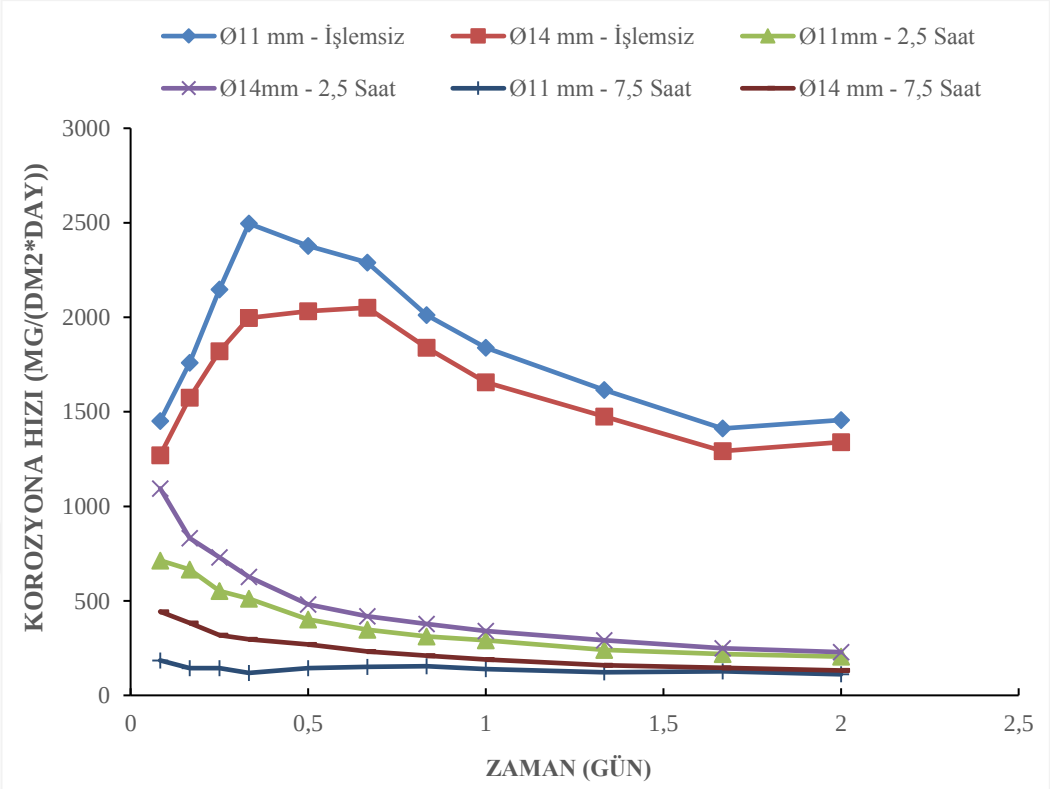
	İşlemsiz Numune		2.5 saat Borlama		7.5 saat Borlama	
	Ø11 mm	**Ø 14 mm**	**Ø 11 mm**	**Ø 14 mm**	**Ø 11 mm**	**Ø 14 mm**
E_{cor} (mV)	-445	-483	-391	-415	-271	-362
I_{cor} (A/cm^2)	209 x 10^{-6}	47,77 x 10^{-6}	19 x 10^{-6}	30,99 x 10^{-6}	0,004 x 10^{-6}	10,7 x 10^{-6}

5.5.2. Daldırma Korozyonu

İşlem görmemiş ve farklı sürelerde borlanmış DIN 20MnCr5 çeliği %3,5 NaCl çözeltisi içerisinde daldırma korozyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sonucunda ağırlık kaybı-zaman eğrileri Şekil 5.13 'te , numunelerin korozyon hızının zamanla değişimi mdd cinsinden Şekil 5.14'te ve numunelerin kararlı durum korozyon hızları sütun grafiği formunda Şekil 5.15'te verilmiştir.

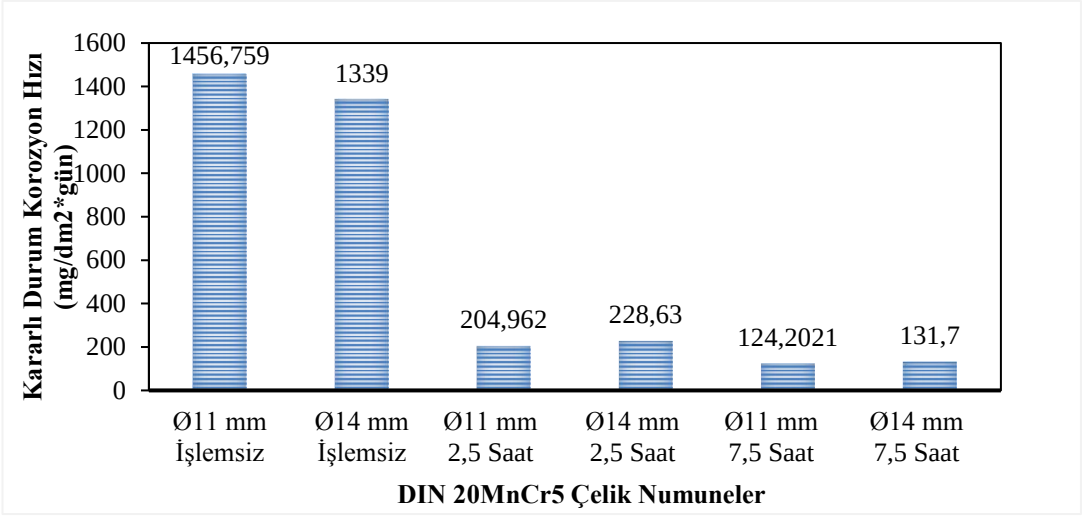


Şekil 5.13.Ø11 ve Ø14 mm çaplarındaki DIN 20MnCr5 çelik numunelerin daldırma korozyonu sonucu ağırlık kaybı – zaman eğrileri



Şekil 5.14.DIN 20MnCr5 çeliğinin % 3.5 NaCl ortamında daldırma korozyon hızının zamanla değişim grafiği

Şekil 5.13'e bakıldığında işlem görmemiş numunelerde 0,5 güne kadar korozyon hızında ani bir artış ardından 0,5-1.5 gün aralığı boyunca korozyon hızında azalma ve sonrasında korozyon hızı sabit kalmış olup kararlı durum sergilemiştir. Borlanmış numunelerde ise işlem görmemiş numunelere kıyasla başlangıçta herhangi bir artış gözlenmemiştir. Borlanmış Ø11 ve Ø14mm çapındaki numunelerde artan borlama süresiyle korozyon hızı yaklaşık 1 güne kadar hızlı bir şekilde azalmış ve sonrasında korozyon hızı sabit kalmış olup kararlı duruma ulaşmıştır. Şekil 5.15'te incelenmiş numumelerin kararlı durum korozyon hızlarının karşılaştırılması yer almaktadır.



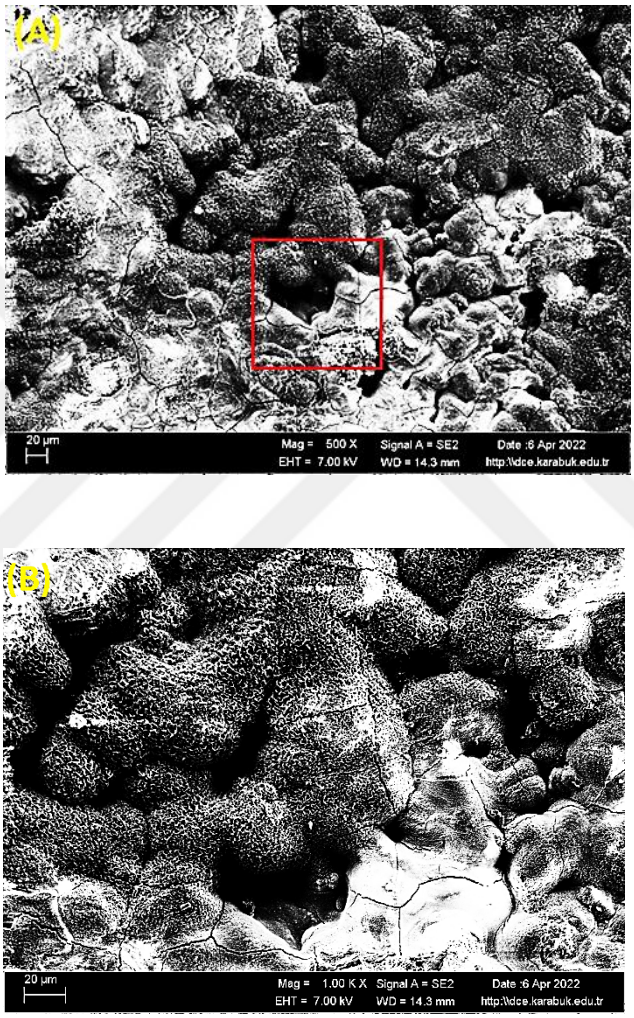
Şekil 5.15.İncelenen numunelerinin kararlı durum korozyon hızlarının değişimi

İşlem görmemiş Ø11mm çapındaki numunenin korozyon hızı işlem görmemiş Ø14mm çapındaki numunenin korozyon hızından yüksek olmasına rağmen 2,5 ve 7,5 saat borlanmış numunelerde Ø14mm çapındaki numunelerin korozyon hızı Ø11mm çapındaki numunelerin korozyon hızından yüksektir (Şekil 5.14). Bunun nedeni korozyon borlama işlemine tabi tutulmamış malzemenin yüksek enerjili, mikro hatalarından başlamaktadır. İşlem görmemiş numunlerden Ø11mm çapındaki numune Ø14 mm'e göre daha çok deformasyona maruz kaldığından daha ince taneli bir yapıya sahiptir. Böylece Ø11 mm'de yüksek enerjili tane sınırları Ø14mm'e göre daha çoktur. Borlama sırasında ise borür yapısı malzemenin tane sınırlarında çekirdeklenmeye başlamaktadır. Bu nedenle Ø11mm' de çekirdek oluşumu için gerekli tane sınırları Ø14mm'ye göre daha yüksek olduğundan daha kalın kaplama tabakası oluşarak korozyona karşı dayanım sağlamaktadır. Bununla birlikte malzeme yapısında düzensizlik arttıkça (dislokasyon, tane sınırı, vb.,) (1) denkleminde ki D (difüzyon katsayısı) değerinin arttığı bilinmektedir. Artan difüzyon katsayısı ile akı yani difüzyon hızında artma meydana gelmektedir. Bu nedenle Ø11 mm'de borlama sürecinde Ø14mm'e göre difüzyon akısı daha yüksek olacağından borür kaplama tabaka kalınlığının daha yüksek ve korozyon hızınında daha düşük olduğu görülmüştür.

$$J = -D * (\Delta_c/\Delta_x) \quad (1)$$

Burada; J akı-hız (atomlar/m^2s), D difüzyon katsayısı (m^2s) ve $\Delta c/\Delta x$ konsantrasyon gradyantı

İşlem Görmemiş Ø11 mm DIN 20MnCr5 çeliğin daldırma korozyon yüzeyinin morfolojisi Şekil 5.16'da sunulmuştur. Şekil 5.16 (A)'da kırmızı kare olarak işaretlenen bölgenin 1.00 KX büyütmeli SEM görüntüsü Şekil 5.16 (B)'de verilmiştir.

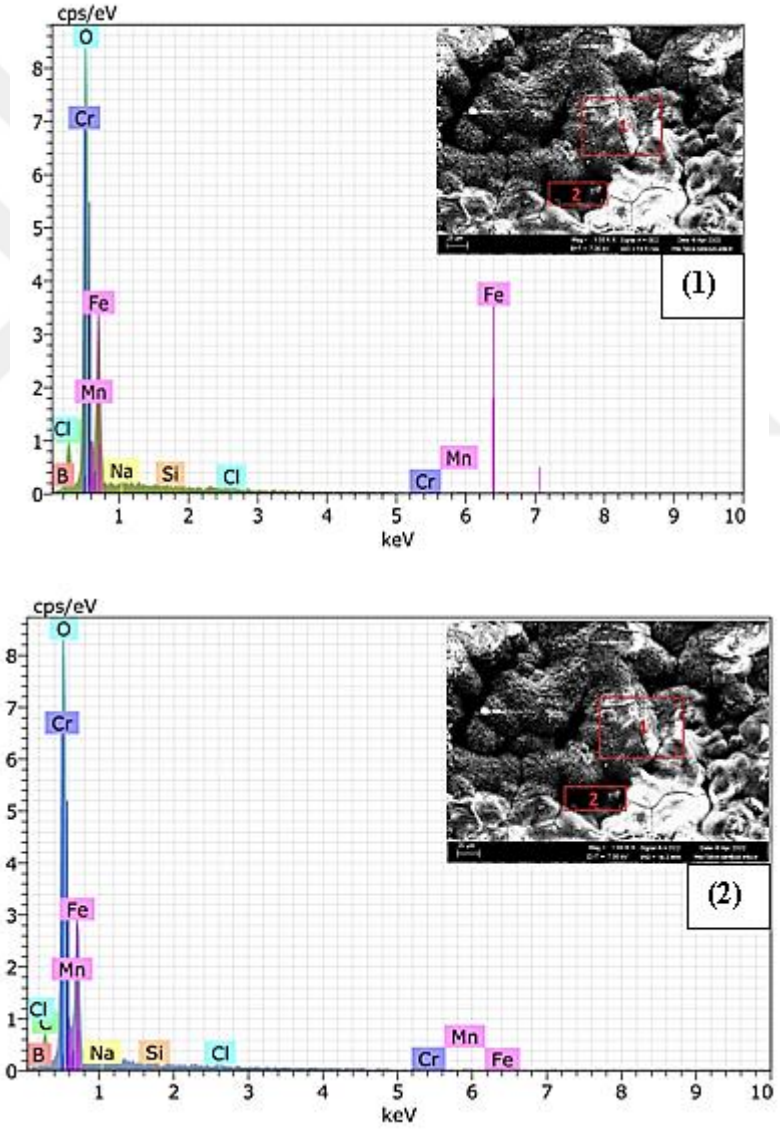


Şekil 5.16.İşlem görmemiş Ø11 mm DIN 20MnCr5 çeliğin daldırma korozyon yüzeyinin (A) 500 X ve (B) seçili alanın 1.00 KX büyütmeli SEM görüntüsü

Şekil 5.16 (A)'dan görüldüğü gibi arada vadilerin olduğu tümsek görünümünde korozyon hasar morfolojisi ortaya çıkmıştır. Vadi olarak görünen bölgeler tane sınırı ferriti olarak bilinen alanlara denk gelmektedir. Korozyon deneyi sırasında ferrit

çözünerek yer yer oyuk oluşumuna neden olduğu düşünülmektedir. Perlit bölgesinde ise kütlesel olarak korozyon meydana gelip siyahımsı ve çok az pembemsi görünümde demiroksit oluşmuştur.

Şekil 5.16 (B)'de verilen Ø11 mm DIN 20MnCr5 çeliğin 1.00 KX büyütmedeki korozyon yüzeyinin SEM görüntüsü üzerinde "1 ve 2" nolu bölgelerin EDX analiz grafikleri Şekil 5.17'de verilmiş olup spektrum değerleri ise Çizelge 5.8'de listelenmiştir.



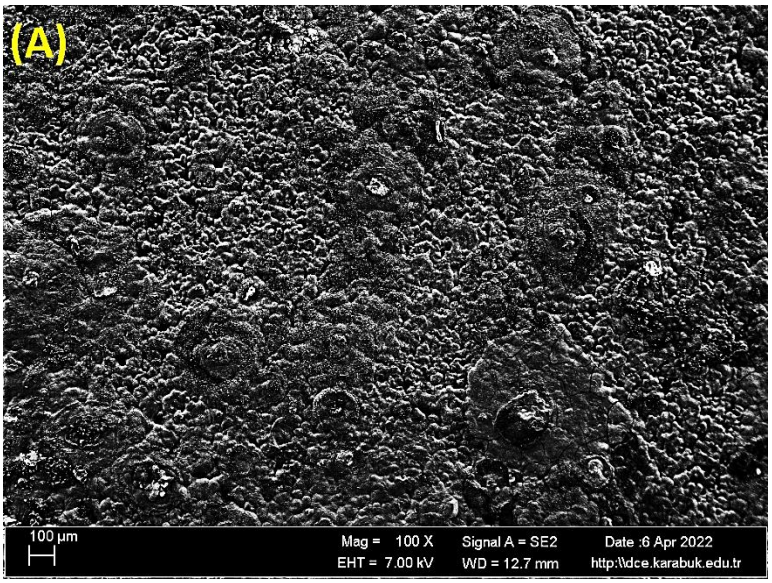
Şekil 5.17.İşlem görmemiş Ø11 mm DIN 20MnCr5 çeliğin daldırma korozyon yüzeyinin EDX analizi

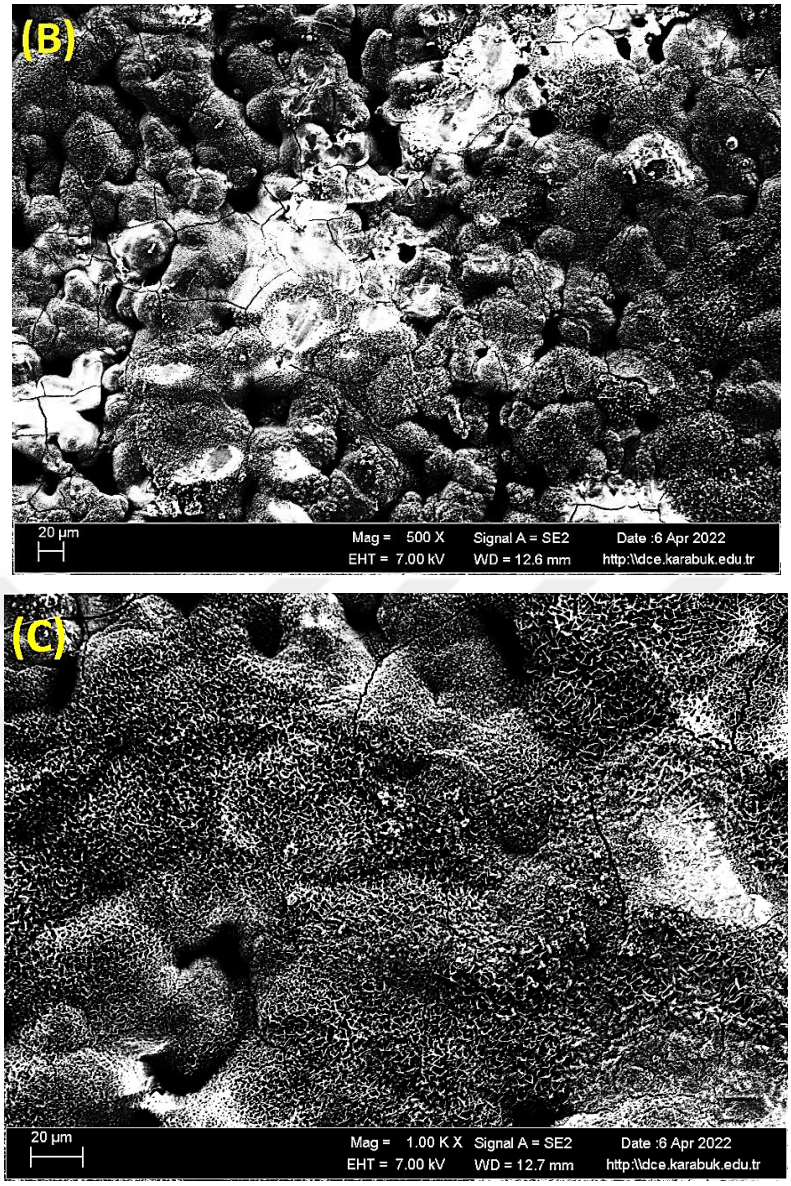
Çizelge 5.8. İşlem görmemiş Ø11 mm DIN 20MnCr5 çeliğin daldırma korozyon testi sonrası yüzeyinden alınan (A) 1 numaralı ve (B) 2 numaralı EDX analiz sonucu

Spektrum	H	B	C	O	Na	Si	Cl	Cr	Mn	Fe
1	0.003	0.91	4.46	34.54	0.18	0.14	0.23	15.47	0.00	44.05
2	46.28	0.56	4.42	0.17	0.03	0.28	0.26	0.78	0.00	24.25

Çizelge 5.8'den görüldüğü gibi tümsek bölgelelerde (1 numaralı bölge) H elementince fakir, O ve Fe elementlerince zengin EDX spektrumu alınmıştır. Bu durum tümsek bölgelerde demiroksit oluşumunu desteklemektedir. Vadilerden alınan (2 numaralı bölge) EDX analizleri ağırlıkça %46.28 H içeriğinin bulunduğunu vermektedir. H atomunun daha yüksek olması korozyonun o bölgelerde daha hızlı olmuş ve çukur oluşumuna yol açmıştır.

İşlem görmemiş Ø14 mm DIN 20MnCr5 çeliğin daldırma korozyon yüzeyinin morfolojisi Şekil 5.18'de sunulmuştur. Şekil 5.18 (A)'da 100X ve Şekil 5.18 (B)'de 500X ölçekli büyütmeli SEM görüntüsü Şekil 5.18 (B)'de verilmiştir.

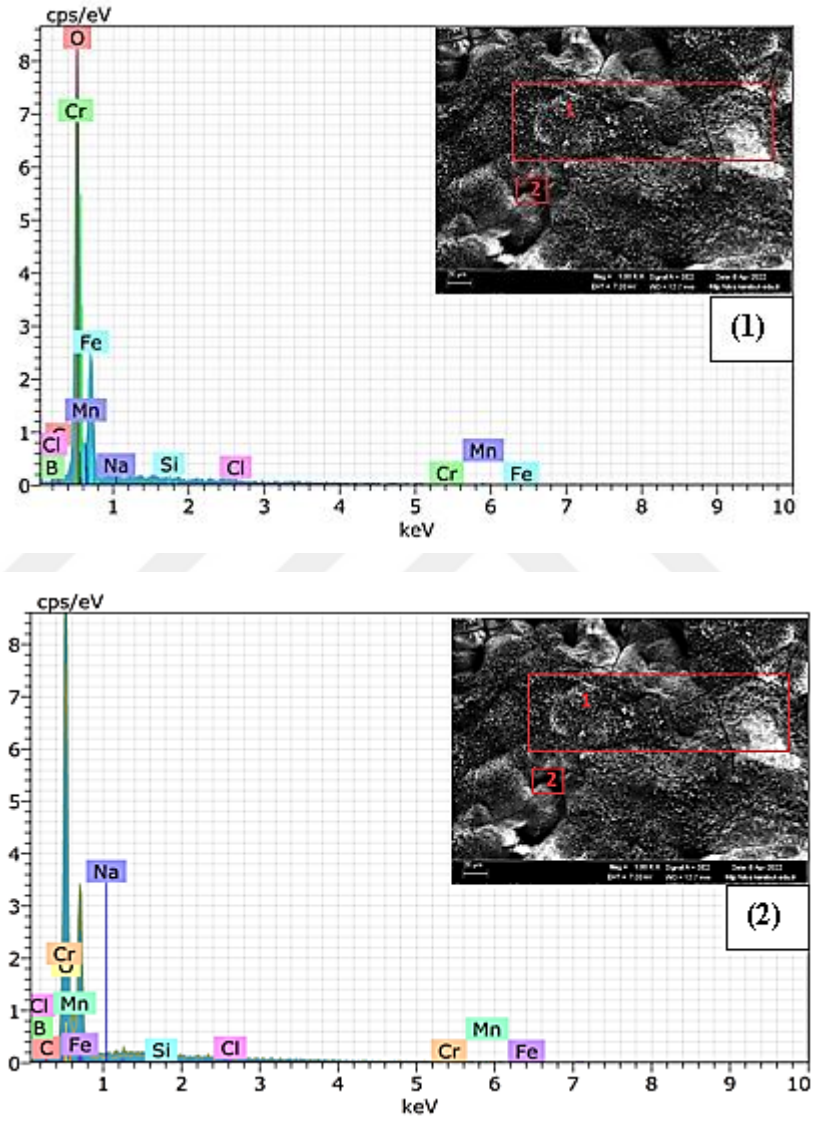




Şekil 5.18. İşlem görmemiş Ø14 mm DIN 20MnCr5 çeliğin daldırma korozyon yüzeyinin (A) 100 X , (B) 500 X ve (C) 1.00 KX büyütmeli SEM görüntüsü

Şekil 5.18 (A) ‘dan görüldüğü gibi arada vadilerin olduğu tümsek görünümünde korozyon hasar morfolojisi ortaya çıkmıştır. Vadi olarak görünen bölgeler tane sınırı ferriti olarak bilinen alanlara denk gelmektedir. Korozyon deneyi sırasında ferrit çözünerek yer yer oyuk oluşumuna neden olduğu düşünülmektedir. Perlit bölgesinde ise kütlesel olarak korozyon meydana gelip siyahımsı ve çok az pembemsi görünümde demiroksit oluşmuştur.

Şekil 5.18 (C)'de verilen Ø14 mm DIN 20MnCr5 çeliğin 1.00 KX büyütmedeki korozyon yüzeyinin SEM görüntüsü üzerinde "1 ve 2" nolu bölgelerin EDX analiz grafikleri Şekil 5.19'da verilmiş olup spektrum değerleri ise Çizelge 5.9'da listelenmiştir.



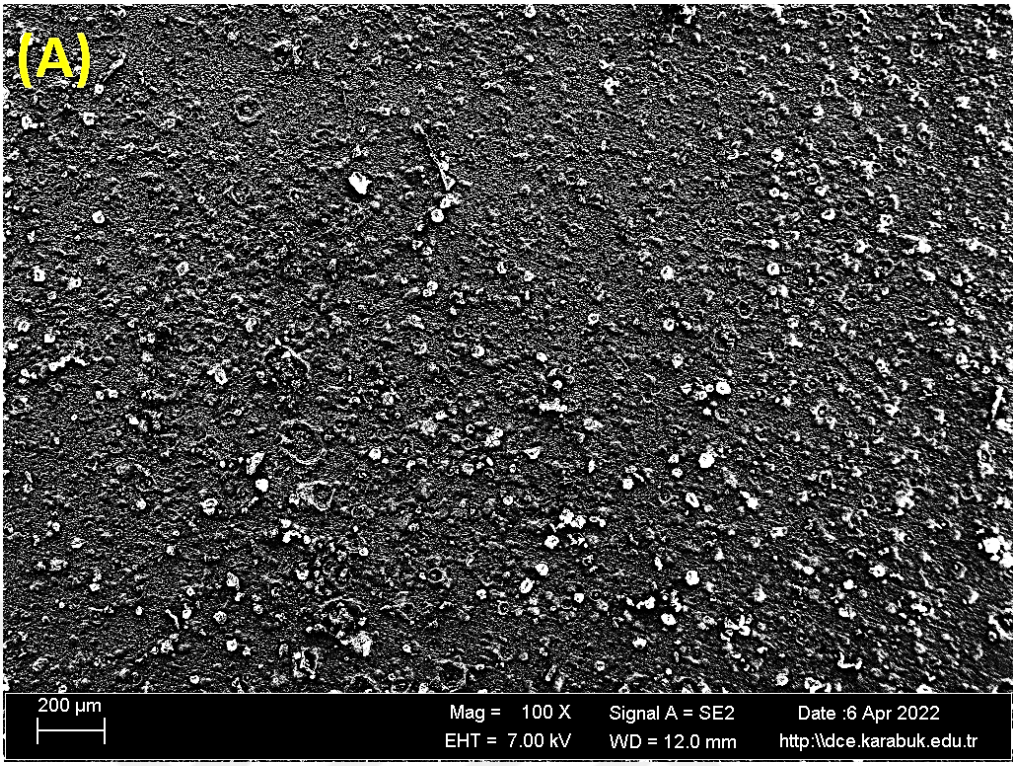
Şekil 5.19.İşlem görmemiş Ø14 mm DIN 20MnCr5 çeliğin daldırma korozyon yüzeyinin EDX analizi

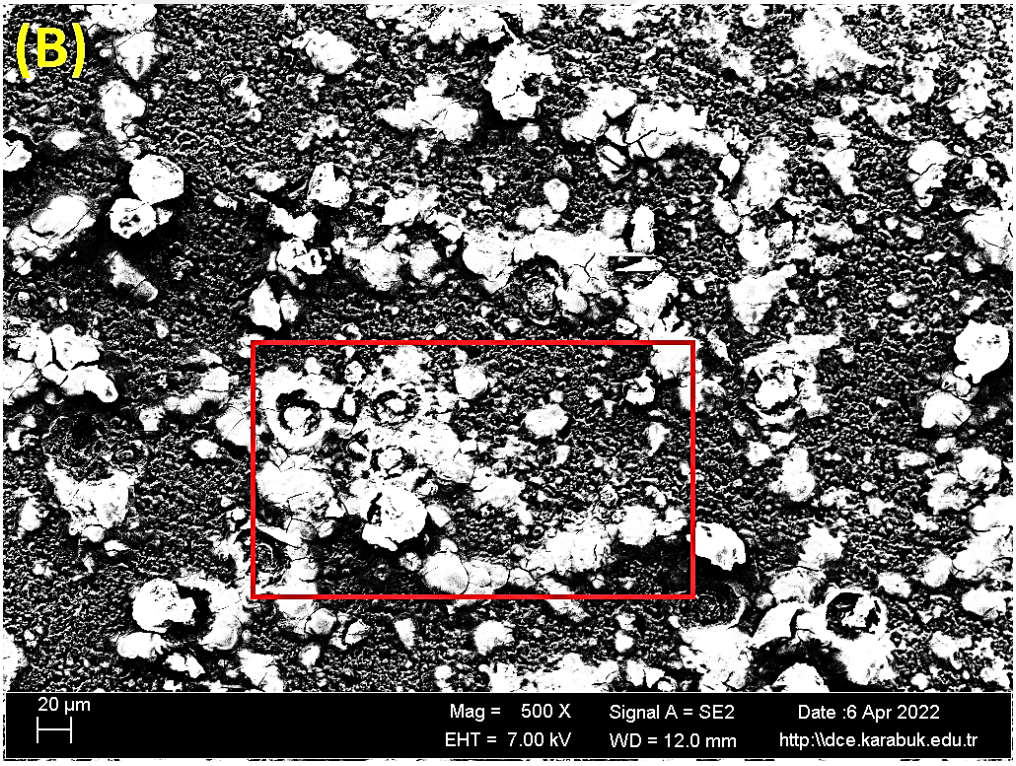
Çizelge 5. 9. İşlem görmemiş Ø14 mm DIN 20MnCr5 çeliğin daldırma korozyon testi sonrası yüzeyinden alınan (A) 1 numaralı ve (B) 2 numaralı EDX analiz sonucu

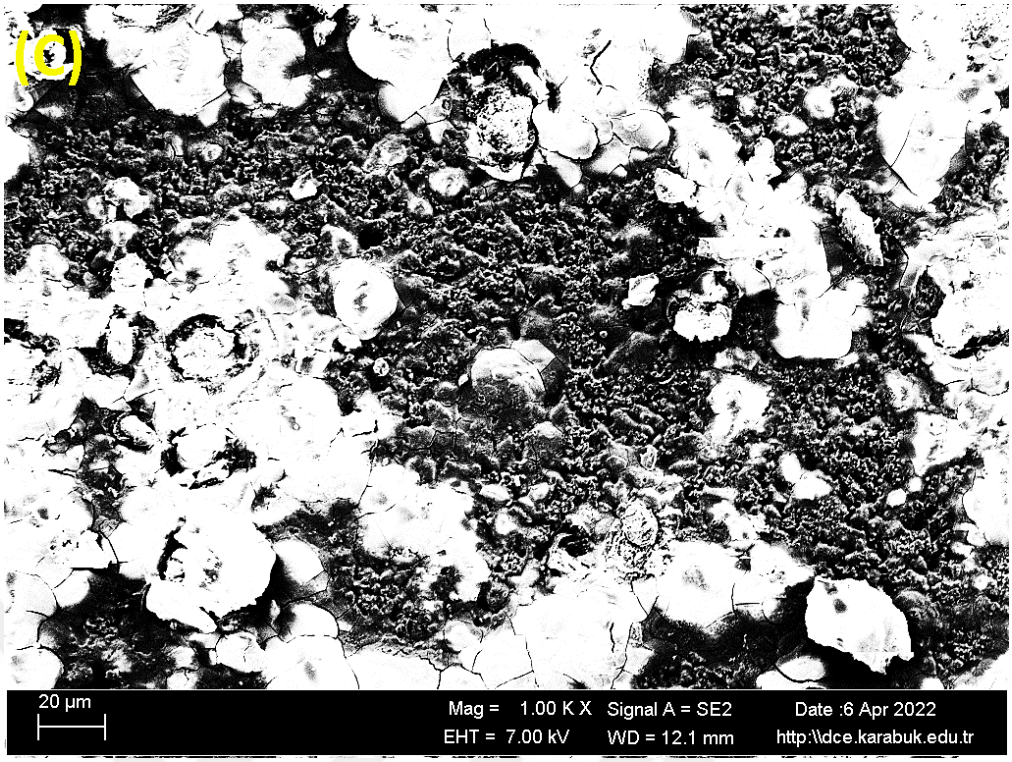
Spektrum	H	B	C	O	Na	Si	Cl	Cr	Mn	Fe
1	1,02	1.81	2.4	36.44	0.02	0.03	1.38	13.97	0.00	44.20
2	72.93	0.00	1.77	19.98	0.00	0.85	4.27	7.02	0.00	0.19

Çizelge 5.9'da görüldüğü gibi tümsek bölgelerde (1 numaralı bölge) H elementince fakir, O ve Fe elementlerince zengin EDX spektrumu alınmıştır. Bu durum tümsek bölgelerde demiroksit oluşumunu desteklemektedir. Vadilerden alınan (2 numaralı bölge) EDX analizleri ağırlıkça %72.93 H içeriğinin bulunduğunu vermektedir. H atomunun daha yüksek olması korozyonun o bölgelerde daha hızlı olmuş ve çukur oluşumuna yol açmıştır. Korozyon deneyi sonrası işlem görmemiş Ø11 mm DIN 20MnCr5 çeliğinin yüzey görünümü ile karşılaştırıldığında işlem görmemiş Ø14 mm DIN 20MnCr5 çeliğin yüzeyinde daha az olduğu tespit edilmiştir.

950 ^{o}C'de 2,5 saat borlanan Ø11 mm DIN 20MnCr5 çeliğin daldırma korozyon yüzeyinin morfolojisi Şekil 5.20'de sunulmuştur. Şekil 5.20 (A)'da 100 X büyütmede, Şekil 5.20 (B)'de 500 X büyütmede ve Şekil 5.20 (B)'deki kırmızı kare olarak işaretlenen bölgenin 1.00 KX büyütülmüş SEM görüntüsü Şekil 5.20 (C)'de verilmiştir.


(A)
200 µm
Mag = 100 X
Signal A = SE2
Date :6 Apr 2022
EHT = 7.00 kV
WD = 12.0 mm
http:\\dce.karabuk.edu.tr

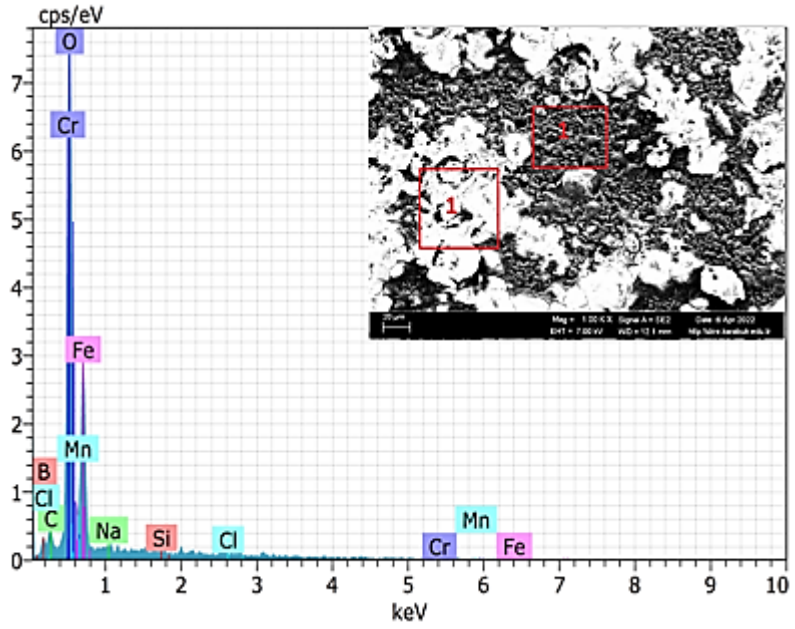

(B)
20 µm
Mag = 500 X
Signal A = SE2
Date :6 Apr 2022
EHT = 7.00 kV
WD = 12.0 mm
http:\\dce.karabuk.edu.tr



Şekil 5.20. 2.5 saat 950^{o}C sıcaklıkta borlanan Ø11 mm DIN 20MnCr5 çeliğin daldırma korozyon yüzeyinin (A) 100 X , (B) 500 X ve (C) seçili alanın 1.00 KX büyütmeli SEM görüntüsü

Şekil 5.20 (A)'dan görüldüğü gibi tek düze homojen korozyon mekanizması gerçekleşmiştir. İşlemsiz numunelerde meydana gelen vadi ve tümsek görünümlü korozyon yerine düz yüzeyli homojen korozyon meydana gelmiştir.

Şekil 5.20 (B)'de verilen 950 ^{o}C'de 2,5 saat borlanmış Ø11 mm DIN 20MnCr5 çeliğin 1.00KX büyütmedeki korozyon yüzey SEM görüntüsü üzerinde "1" nolu bölgenin EDX analiz grafiği Şekil 5.21'de verilmiş olup spektrum değerleri ise Çizelge 5.10'da listelenmiştir.



Şekil 5.21. 2.5 saat 950ºC sıcaklıkta borlanan Ø11 mm DIN 20MnCr5 çeliğin daldırma korozyon yüzeyinin EDX analizi

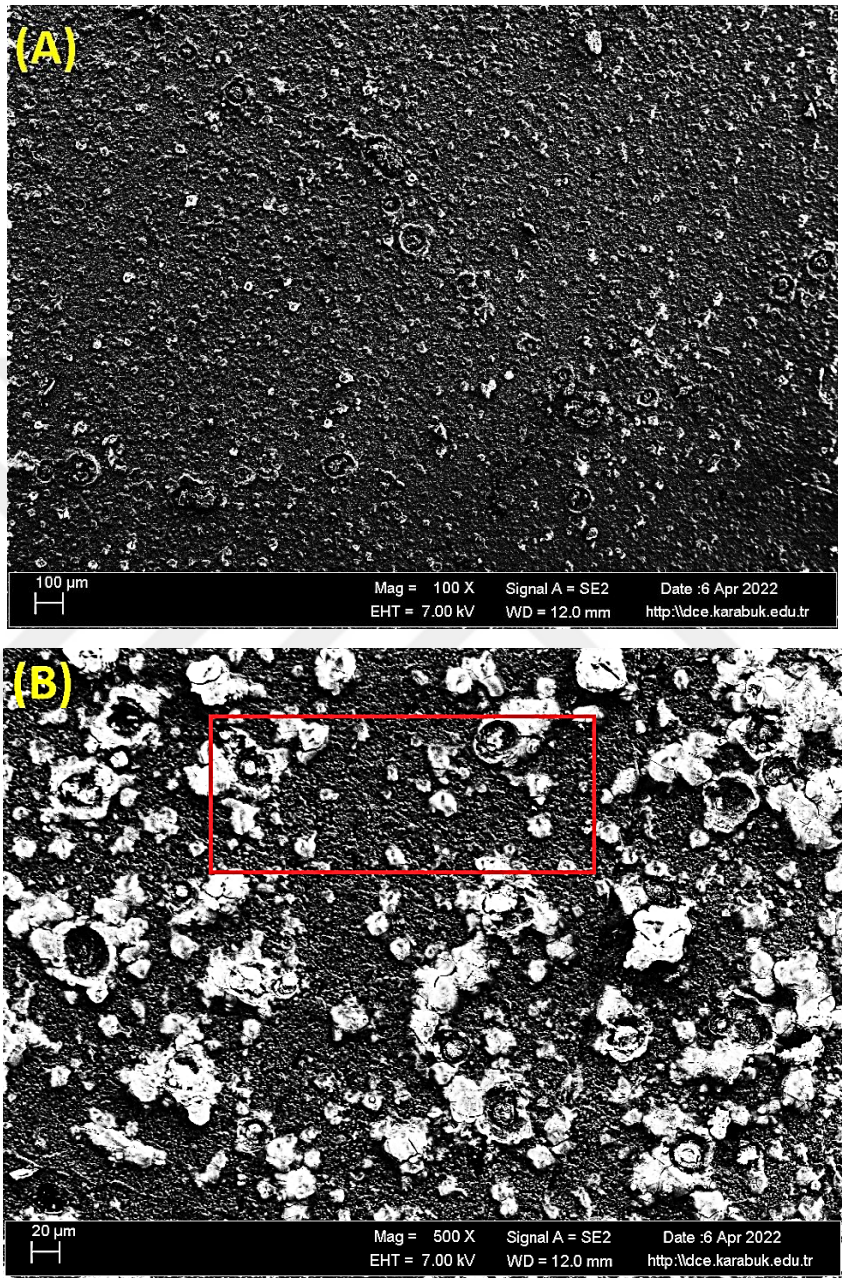
Çizelge 5. 10. Ø11 mm DIN 20MnCr5 çeliğin 2,5 saat 950ºC sıcaklıkta borla sonucu oluşan borür tabakasının EDX analiz sonucu

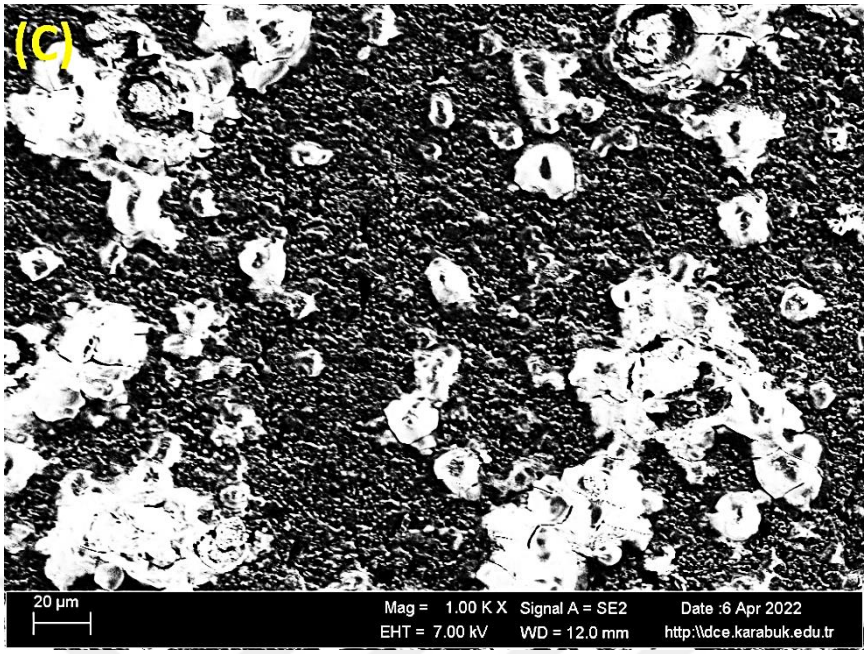
Spektrum	**H**	**B**	**C**	**O**	**Na**	**Si**	**Cl**	**Cr**	**Mn**	**Fe**
1	0.00	7.28	2.73	39.87	0.21	0.02	0.46	9.22	0.00	40.21

Çizelge 5.10'da verilen EDX analiz sonuçları korozyon testi sonrası yüzeyde %7.3 B, %39.9 Oksijen, %40.2 Fe ve %9.2 Cr elementlerinin bulunduğunu göstermektedir. Bu durum yüzeyde (Fe,Cr,B)O içerikli oksit filmlerinin oluştuğunu ortaya koymaktadır. Burada oluşan oksit filminin krom ve bor elementlerini içermesi borlanan çeliğin korozyon direncinin artmasına yol açmıştır.

950 C'de 2,5 saat borlanan Ø14 mm DIN 20MnCr5 çeliğin daldırma korozyon yüzeyinin morfolojisi Şekil 5.22'de sunulmuştur. Şekil 5.22 (A)'da 100 X büyütmede, Şekil 5.22 (B)'de 500 X büyütmede ve Şekil 5.22 (B)'deki kırmızı kare olarak işaretlenen bölgenin 1.00 KX büyütmesi Şekil 5.22 (C)'de SEM görüntüsü verilmiştir.

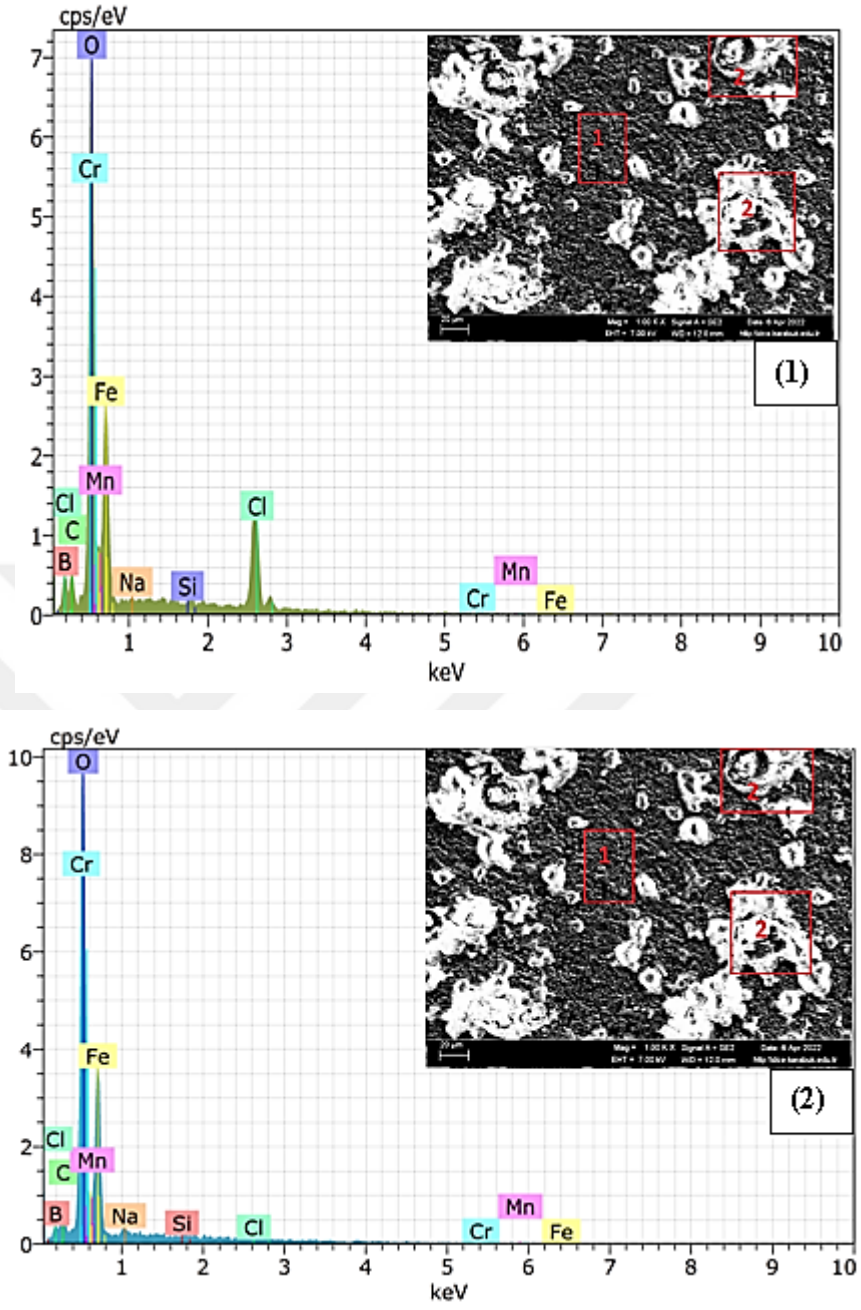
Şekil 5.22 (A)'dan görüldüğü gibi tek düze homojen korozyon mekanizması gerçekleşmiştir. İşlemsiz numunelerde meydana gelen vadi ve tümsek görünümlü korozyon yerine düz yüzeyli homojen korozyon meydana gelmiştir.





Şekil 5.22. 2,5 saat 950^{o}C sıcaklıkta borlanan Ø14 mm DIN 20MnCr5 çeliğin daldırma korozyon yüzeyinin (A) 100 X , (B) 500 X ve (C) seçili alanın 1.00 KX büyütmeli SEM görüntüsü

Şekil 5.22 (B)'de verilen 950 ^{o}C'de 2,5 saat borlanmış Ø14 mm DIN 20MnCr5 çeliğin 1.00KX büyütmedeki korozyon yüzey SEM görüntüsü üzerinde "1" nolu bölgenin EDX analizi Şekil 5.23'te verilmiş olup spektrum değerleri ise Çizelge 5.11'de listelenmiştir.



Şekil 5.23.2.5 saat 950°C sıcaklıkta borlanan Ø14 mm DIN 20MnCr5 çeliğin daldırma korozyon yüzeyinin EDX analizi

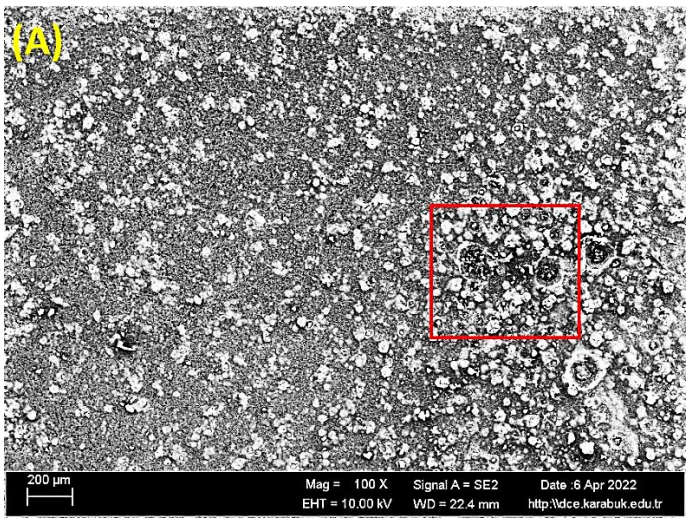
Çizelge 5.11. Ø14 mm DIN 20MnCr5 çeliğin 2,5 saat 950ºC sıcaklıkta borla sonucu oluşan borür tabakasının EDX analiz sonucu

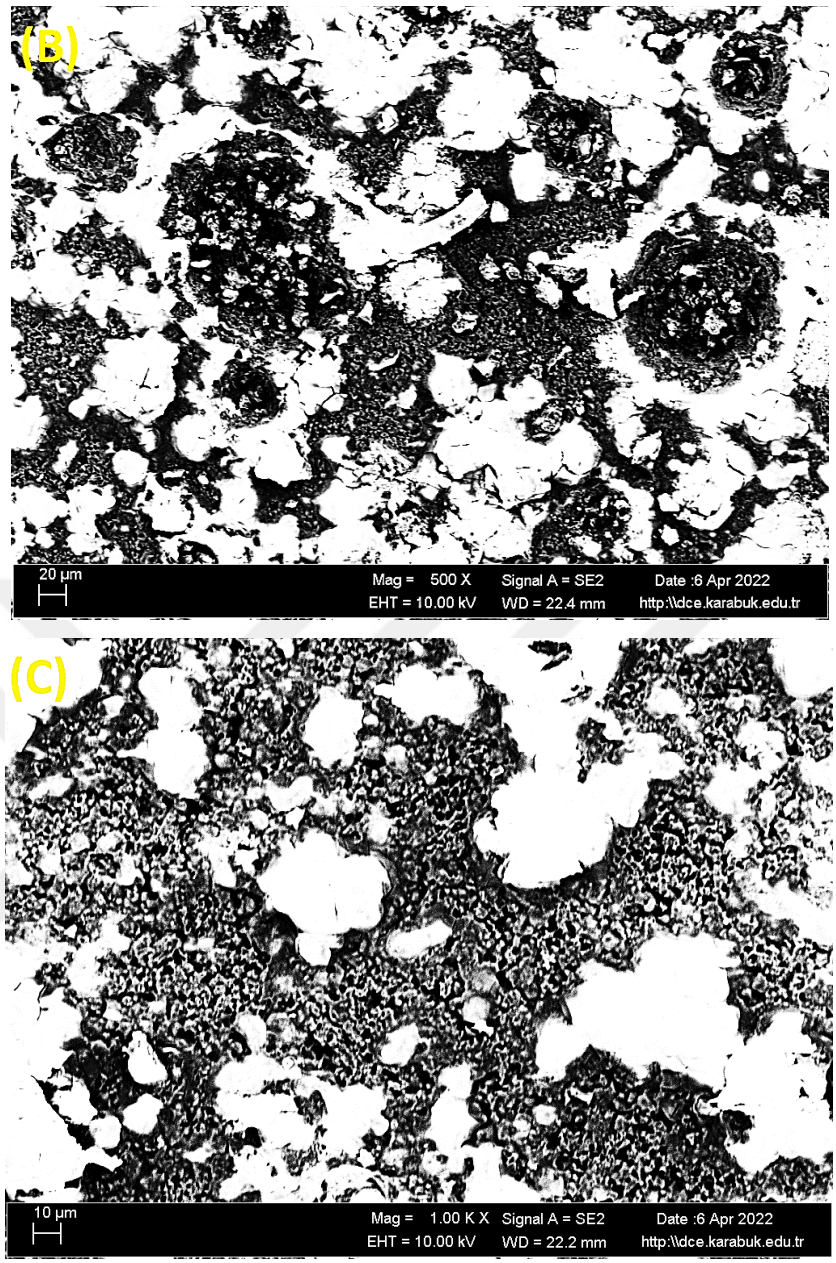
Spektrum	H	B	C	O	Na	Si	Cl	Cr	Mn	Fe
1	0.00	6.49	3.20	35.50	0.57	0.11	0.18	12.84	0.00	41.12
2	0.00	1.02	2.52	36.06	0.43	0.10	11.95	11.84	0.00	39.93

Çizelge 5.11'de verilen EDX analiz sonuçları korozyon testi sonrası yüzeyde %6.49 B, %35.5 Oksijen, %41.12 Fe ve %12.84 Cr elementlerinin bulunduğunu göstermektedir. Bu durum yüzeyde (Fe,Cr,B)O içerikli oksit filmlerinin oluştuğunu ortaya koymaktadır. Burada oluşan oksit filminin krom ve bor elementlerini içermesi borlanan çeliğin korozyon direncinin artmasına yol açmıştır.

950 ºC 'de 7,5 saat borlanan Ø11 mm DIN 20MnCr5 çeliğin daldırma korozyon yüzeyinin morfolojisi Şekil 5.24'te sunulmuştur. Şekil 5.24 (A)'da 100 X büyütmede, Şekil 5.24 (A)'daki kırmızı kare olarak işaretlenen bölgenin 500 X büyütmesi Şekil 5.24 (B)'de ve Şekil 5.24 (C)'de 1.00 KX büyütmede SEM görüntüsü verilmiştir.

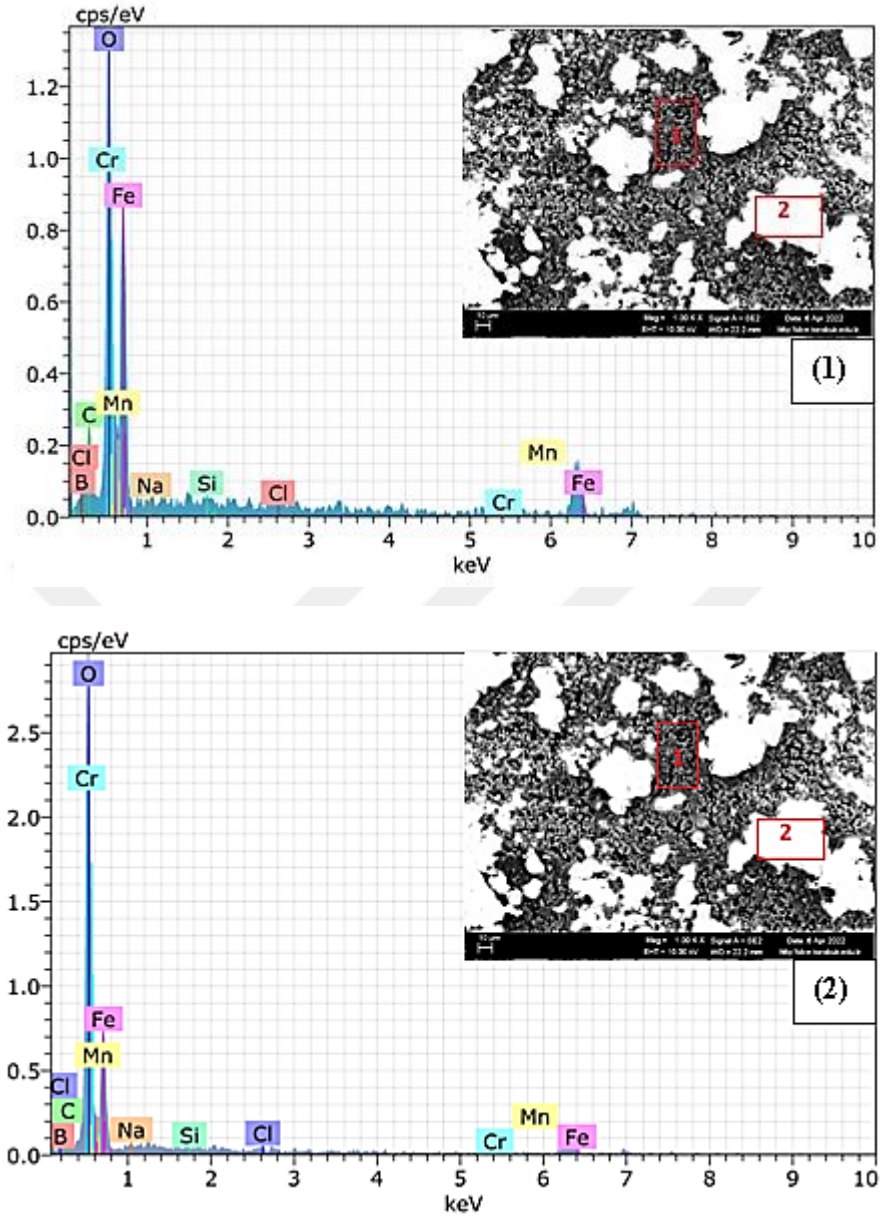
Şekil 5.24 (A)'dan görüldüğü gibi tek düze homojen korozyon mekanizması gerçekleşmiştir. İşlemsiz numunelerde meydana gelen vadi ve tümsek görünümlü korozyon yerine düz yüzeyli homojen korozyon meydana gelmiştir.





Şekil 5.24.7,5 saat 950ºC sıcaklıkta borlanan Ø11 mm DIN 20MnCr5 çeliğin daldırma korozyon yüzeyinin (A) 100 X , (B) seçili alanın 500 x büyütmeli ve (C) 1.00 KX SEM görüntüsü

Şekil 5.24 (C)'de verilen 950 ºC'de 7,5 saat borlanmış Ø11 mm DIN 20MnCr5 çeliğin 1.00KX büyütmedeki korozyon yüzey SEM görüntüsü üzerinde "1 ve 2" nolu bölgelerin EDX analiz grafiği Şekil 5.25'te verilmiş olup spektrum değerleri ise Çizelge 5.12'de listelenmiştir.



Şekil 5.25. 7,5 saat 950ºC sıcaklıkta borlanan Ø11 mm DIN 20MnCr5 çeliğin daldırma korozyon yüzeyinin EDX analizi

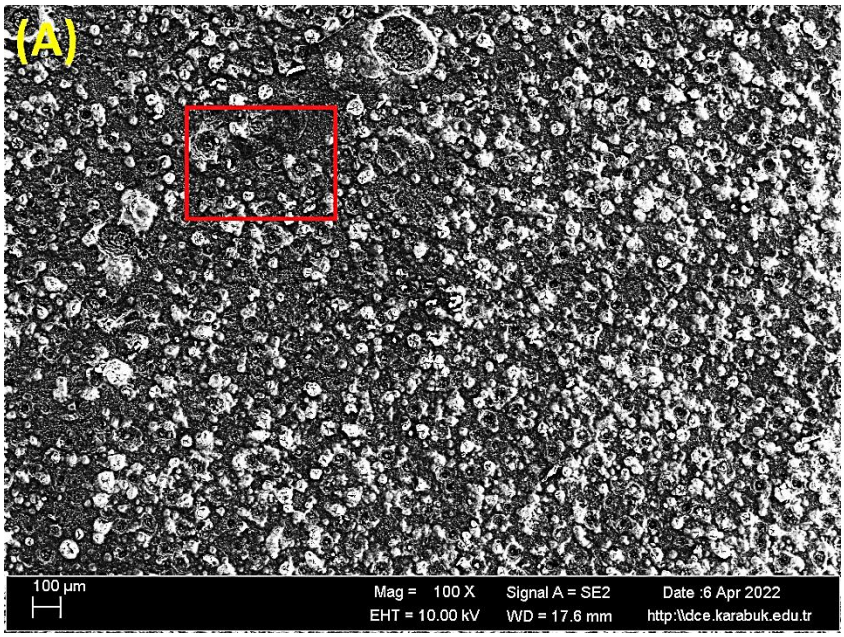
Çizelge 5.12.Ø11 mm DIN 20MnCr5 çeliğin 7,5 saat 950ºC sıcaklıkta borlama sonucu oluşan borür tabakasının EDX analiz sonucu

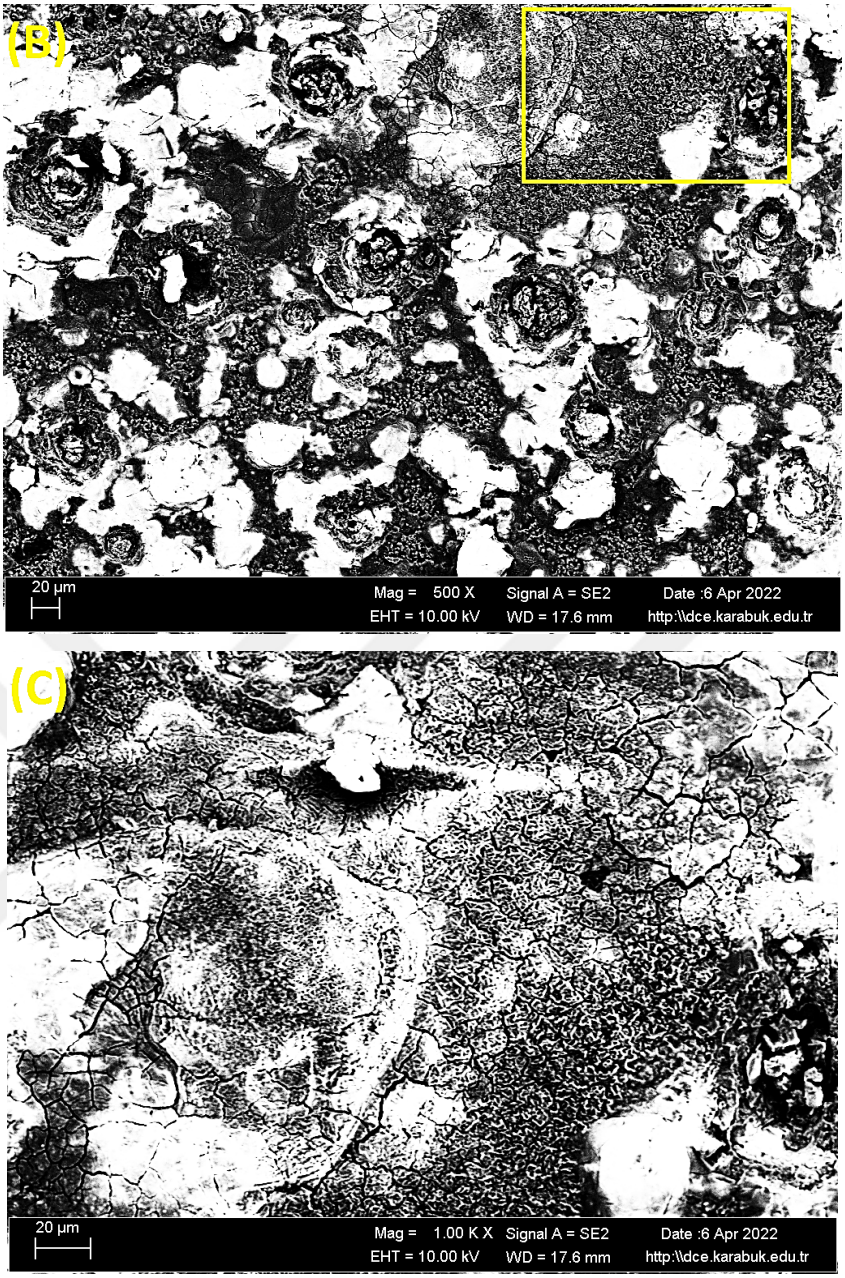
Spektrum	H	B	C	O	Na	Si	Cl	Cr	Mn	Fe
1	0.00	6.49	3.20	35.50	0.57	0.11	0.18	12.84	0.00	41.12
2	0.00	1.02	2.52	36.06	0.43	0.10	11.95	11.84	0.00	39.93

Çizelge 5.12'de verilen EDX analiz sonuçlarına göre "1" numaralı bölge, "2" numaralı bölgeye kıyasla bor elementince zengin (Sırasıyla %6.49 ve % 1.02) ve klor elementince fakir (Sırasıyla %0.18 ve % 11.95) EDX spektrumu alınmıştır . Bununla birlikte "1 ve 2" numaralı bölgede sırasıyla % 12.84 ve %11.84 yaklaşık Cr elementi görülmüştür. Bu durum yüzeyde (Fe,Cr,B)O içerikli oksit filmlerinin oluştuğunu ortaya koymaktadır. Burada oluşan oksit filminin krom ve bor elementlerini içermesi borlanan çeliğin korozyon direncinin artmasına yol açmıştır.

950 C'de 7,5 saat borlanan Ø14 mm DIN 20MnCr5 çeliğin daldırma korozyon yüzeyinin morfolojisi Şekil 5.26'da sunulmuştur. Şekil 5.26 (A)'da 100 X büyütmede, Şekil 5.26 (A)'daki kırmızı kare olarak işaretlenen bölgenin 500 X büyütmesi Şekil 5.26 (B)'de ve Şekil 5.26 (B)'deki sarı kare olarak işaretlenen bölgenin Şekil 5.26 (C)'de 1.00 KX ölçekli SEM görüntüsü verilmiştir.

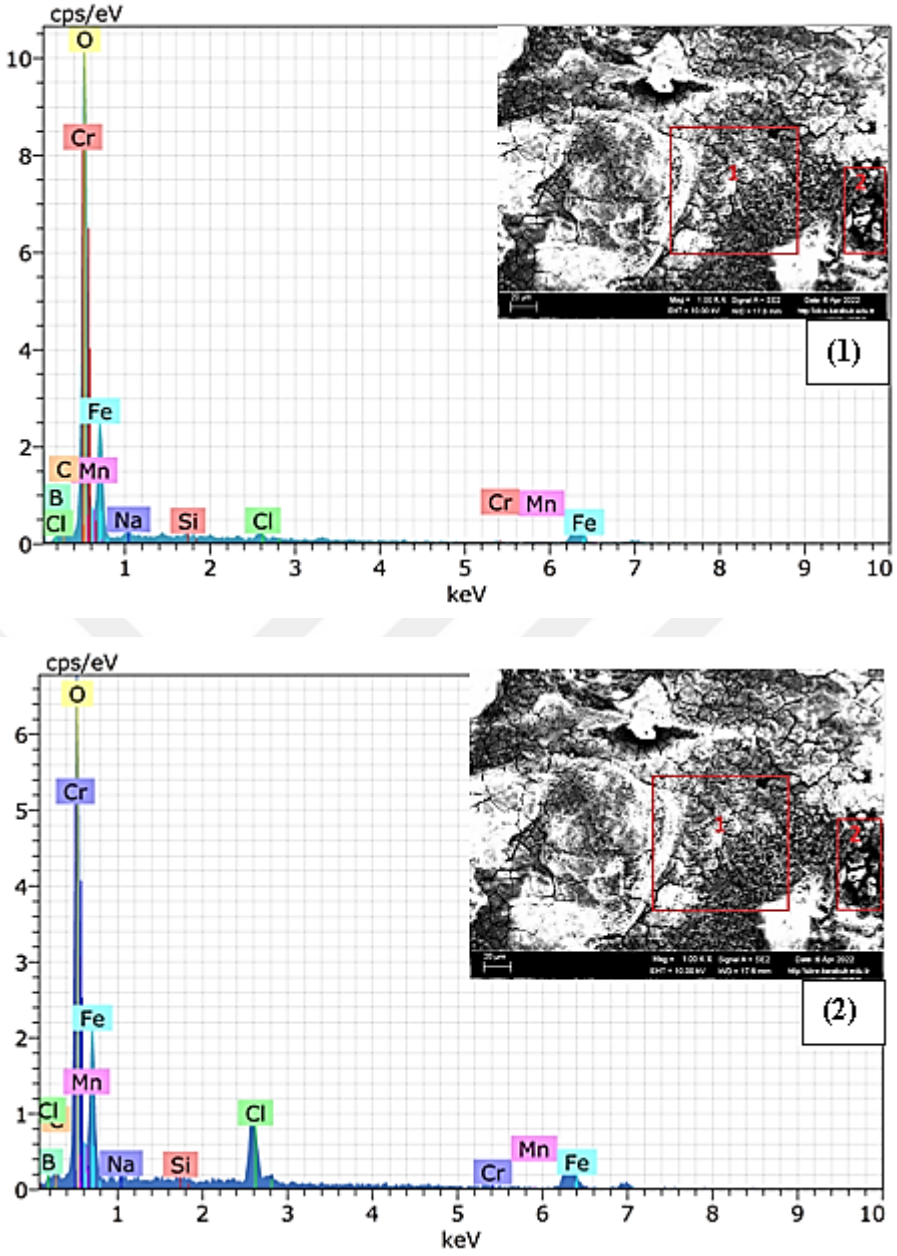
Şekil 5.26 (A)'dan görüldüğü gibi tek düze homojen korozyon mekanizması gerçekleşmiştir. İşlemsiz numunelerde meydana gelen vadi ve tümsek görünümlü korozyon yerine düz yüzeyli homojen korozyon meydana gelmiştir.





Şekil 5.26.7.5 saat 950ºC sıcaklıkta borlanan Ø14 mm DIN 20MnCr5 çeliğin daldırma korozyon yüzeyinin (A) 100 X , (B) seçili kırmızı alanın 500 X büyütmeli ve (C) seçili sarı alanın 1.00 KX büyütmeli SEM görüntüsü

Şekil 5.26 (C)'de verilen 950 ºC'de 7,5 saat borlanmış Ø14 mm DIN 20MnCr5 çeliğin 1.00KX büyütmedeki korozyon yüzey SEM görüntüsü üzerinde "1 ve 2" nolu bölgelerin EDX analiz grafiği Şekil 5.27'de verilmiş olup spektrum değerleri ise Çizelge 5.13'te listelenmiştir.



Şekil 5.27.7,5 saat 950ºC sıcaklıkta borlanan Ø14 mm DIN 20MnCr5 çeliğin daldırma korozyon yüzeyinin EDX analizi

Çizelge 5.13.Ø14 mm DIN 20MnCr5 çeliğin 7,5 saat 950ºC sıcaklıkta borlama sonucu oluşan borür tabakasının EDX analiz sonucu

Spektrum	**H**	**B**	**C**	**O**	**Na**	**Si**	**Cl**	**Cr**	**Mn**	**Fe**
1	17.18	0.00	4.12	39.26	0.26	0.13	0.48	0.61	0.03	37.13
2	21.37	0.00	1.51	28.60	0.16	0.09	5.71	0.52	0.03	42.02

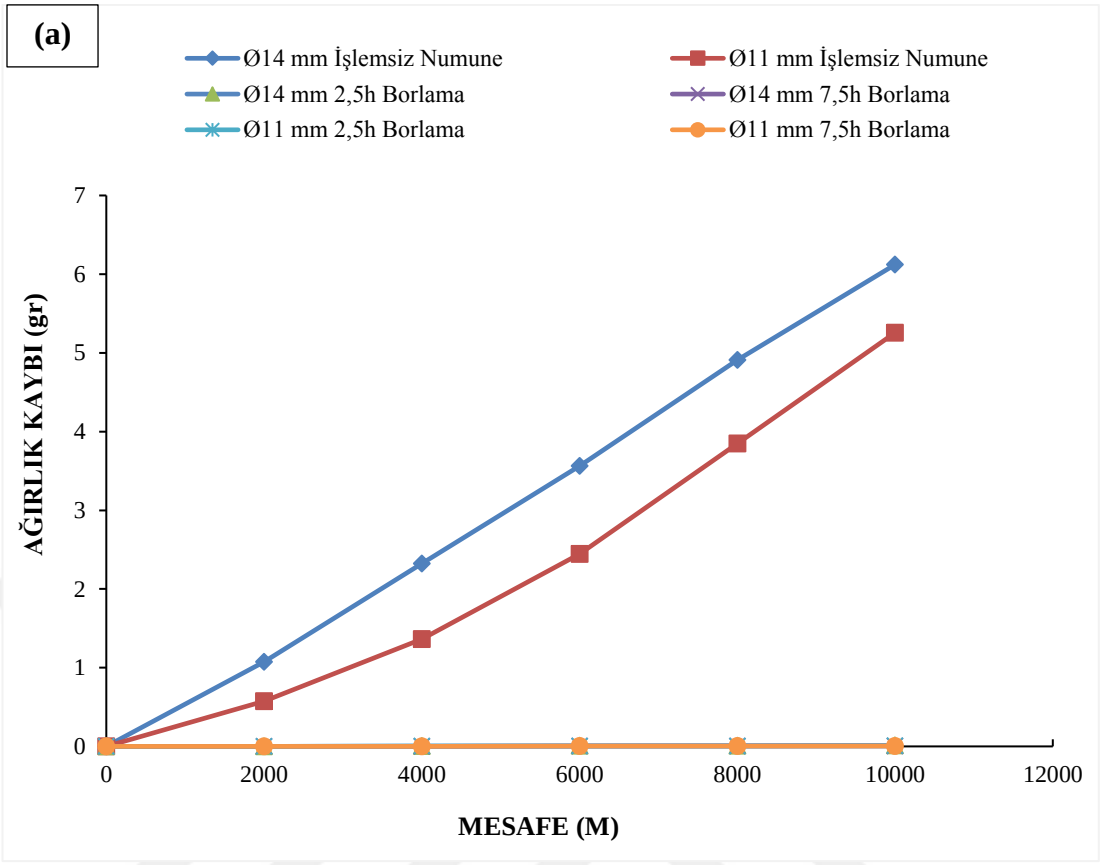
Çizelge 5.13'te verilen EDX analiz sonuçlarına göre "1" numaralı bölge, "2" numaralı bölgeye kıyasla C elementince zengin (Sırasıyla %4.12 ve % 1.51) ve klor elementince fakir (Sırasıyla %0.48 ve % 5.71) EDX spektrumu alınmıştır . Bununla birlikte "1 ve 2" numaralı bölgede sırasıyla % 17.18 ve %21.37 yaklaşık H elementi görülmüştür. Bu durum yüzeyde (Fe)OH içerikli oksit filmlerinin oluştuğunu ortaya koymaktadır.

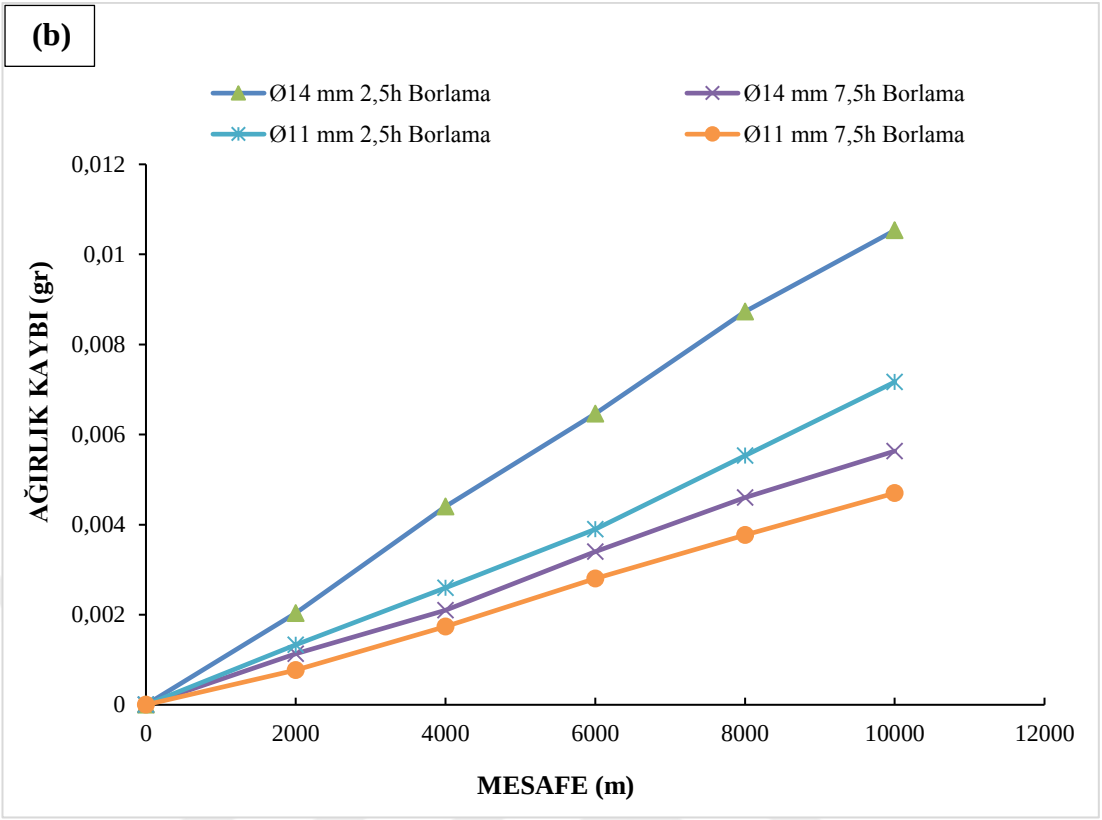
5.6. AŞINMA TEST SONUÇLARI

Çizelge 5.14'te işlem görmemiş ve 950^{o}C sıcaklıkta farklı sürelerde borlanan numunelerin kayma mesafeleri ile ağırlık kayıplarının değişim değerleri listelenmiştir. Çizelge 5.14'te ki değerlerden yola çıkılarak işlem görmemiş ve 950 ^{o}C sıcaklıkta farklı sürelerde borlama işlemi uygulanmış DIN 20MnCr5 çeliğinin pin on ring aşınma test sonucu Şekil 5.28'de verilmiştir. Şekil 5.28 (a)'da işlem görmemiş numuneler ile borlanmış numunelerin eğrileri ve Şekil 5.28 (b)'de ise sadece borlanmış numunelerin aşınma ağrileri gösterilmiştir.

Çizelge 5.14.İşlem görmemiş ve 950 ^{o}C sıcaklıkta farklı sürelerde borlanan DIN 20MnCr5 çelik numunelerin aşınma testinde meydana gelen ağırlık kaybı

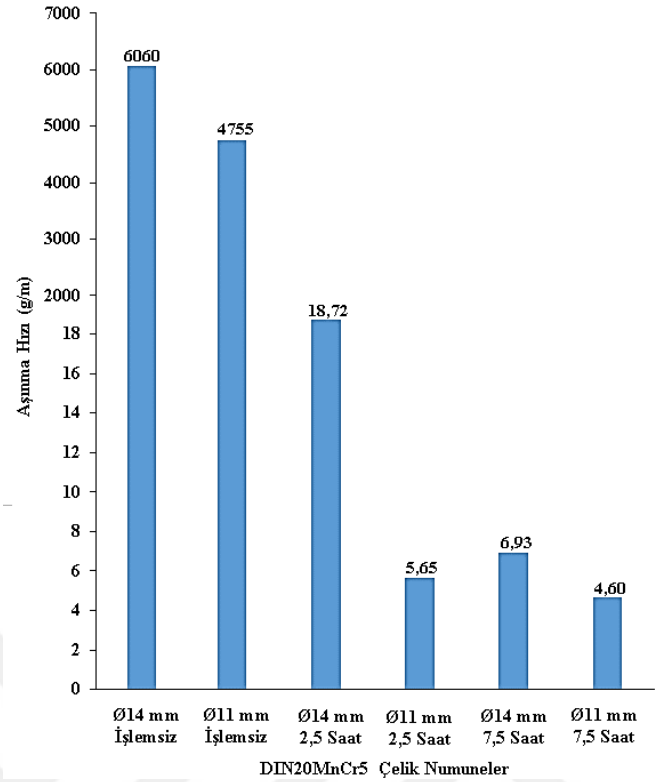
AŞINMA TEST SONUÇLARI (*10000 m , 6.8 m/sn Dönme Hızı, 20 N Yük, 53 dk*)						
Numune Kodları	**İşlemsiz Numune**		**2,5 Saat Borlama**		**7,5 Saat Borlama**	
Çap (mm)	Ø14 mm	Ø11 mm	Ø14 mm	Ø11 mm	Ø14 mm	Ø11 mm
0	0	0	0	0	0	0
2000	1,073767	0,572267	0,002033	0,001333	0,001133	0,000767
4000	2,3231	1,3627	0,0044	0,0026	0,0021	0,001733
6000	3,564333	2,444267	0,006467	0,0039	0,0034	0,0028
8000	4,911167	3,848733	0,008733	0,005533	0,0046	0,003767
10000	6,121167	5,256133	0,010533	0,007167	0,005633	0,0047


(a)
Ø14 mm İşlemsiz Numune
Ø11 mm İşlemsiz Numune
Ø14 mm 2,5h Borlama
Ø14 mm 7,5h Borlama
Ø11 mm 2,5h Borlama
Ø11 mm 7,5h Borlama
AĞIRLIK KAYBI (gr)
0
1
2
3
4
5
6
7
0
2000
4000
6000
8000
10000
12000
MESAFE (M)



Şekil 5.28. DIN 20MnCr5 çelik numunelerinin (a) İşlem görmemiş ve 950 ºC'de farklı sürelerde borlama işlemi uygulanan , (b) 950 ºC'de farklı sürelerde borlama işlemi uygulanan numunelerin aşınma testi eğrileri

Şekil 5.28'de verilen ağırlık kaybı – kayma mesafesi eğrilerinin eğimi gr/metre cinsinden aşınma hızı değerlerini vermektedir. Şekil 5.29'da incelenen numunelerin aşınma hızları karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur.



Şekil 5.29.İncelenen numunelerinin aşınma hızlarının değişimi

Şekil 5.28 (a) eğrisine göre Ø11 ve Ø14 mm işlemsiz numunelerin aşınma sonucu ağırlık kayıpları borlama işlemi uygulanmış numunelere kıyasla daha yüksektir. Çizelge 5.14'te de 10000 m kayma sonucu ağırlık kayıplarına bakıldığında Ø14 mm ve Ø11 mm işlemsiz numunelerde sırasıyla 6,121167 g ve 5,256133 g , 950 ^{o}C sıcaklıkta 2,5 saat borlanan Ø14 ve Ø11 mm numunelerde sırasıyla 0,010533 g ve 0,007167 g ve 950 ^{o}C sıcaklıkta 7,5 saat borlanan Ø14 ve Ø11 mm numunelerde sırasıyla 0,005633 g ve 0,0047 g ağırlık kaybı meydana gelmiştir. Burada borlama işlemi ile birlikte aşınma sonucu numunelerin ağırlık kaybında bir azalma görülmüş olup borlama sonucu malzemenin aşınma dayanımının arttığı görülmektedir.

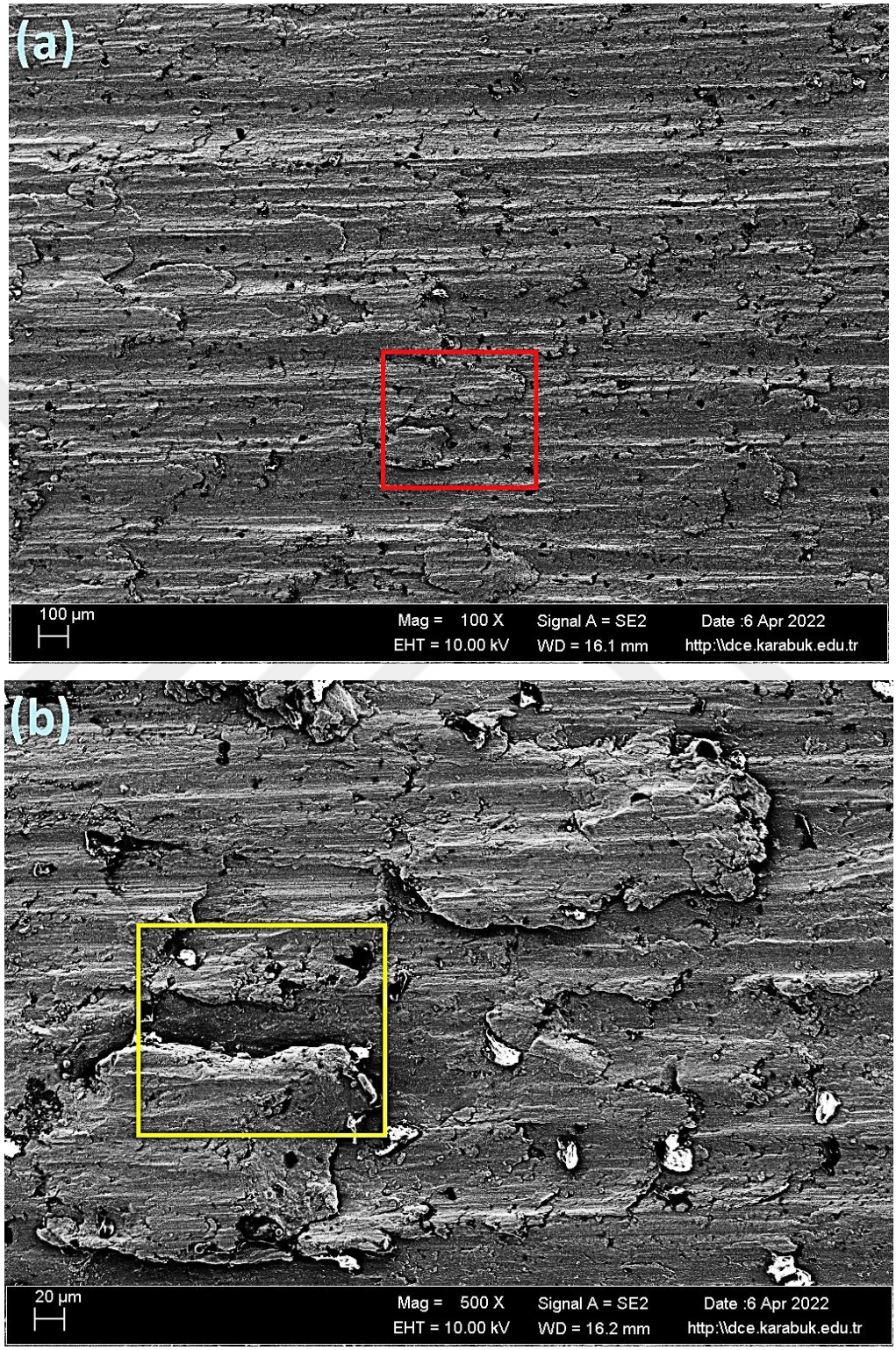
Şekil 5.28 (a) eğrisinde ve Çizelge 5.14'te Ø14 mm işlemsiz numunesinin Ø11 mm işlemsiz numunesine kıyasla ağırlık kaybının daha çok olduğu görülmektedir. Bunun nedeni Ø14 mm'ye kıyasla daha yüksek oranda deformasyona maruz kalan Ø11 mm numunesinin ince taneli yapısı nedeniyle daha yüksek sertliğe sahip olmasıdır. Bu yüzden işlemsiz Ø11 mm numunesinde ağırlık kaybı işlemsiz Ø14 mm numunesine kıyasla daha düşüktür.

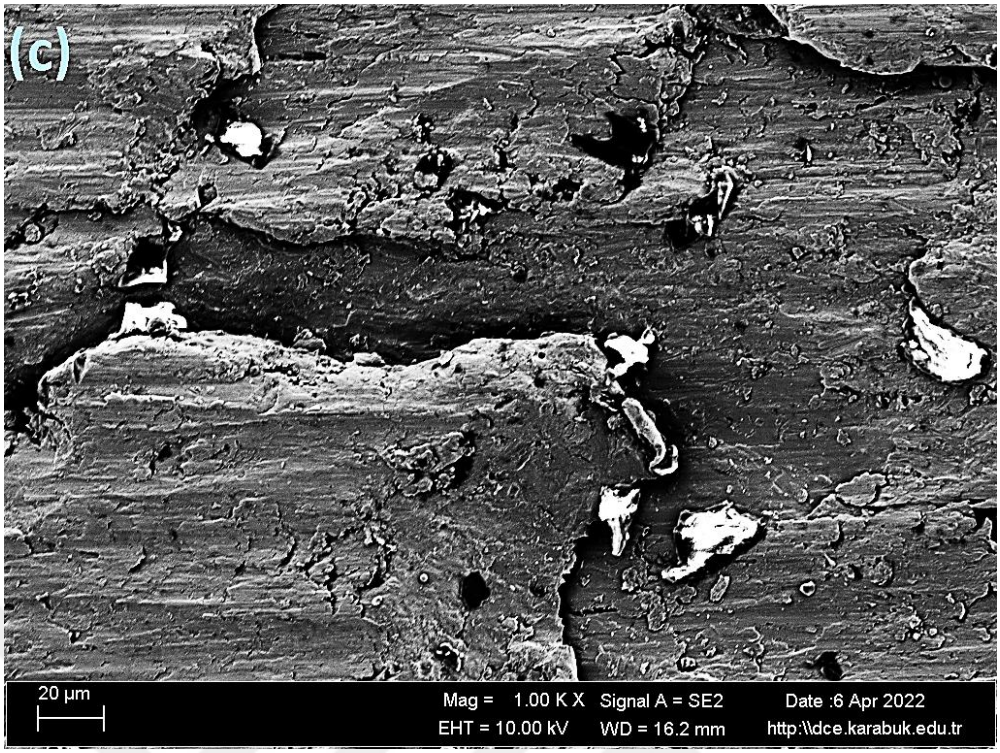
Şekil 5.28 (b) eğrisinde ve Çizelge 5.14'te 950 ºC'de 2,5 saat borlanan Ø11 mm ve Ø14 mm numunelerine bakıldığında Ø11 mm numunesinin ağırlık kaybı 10000 m kayma mesafesi sonucu 0,007167 g olmasına karşı, Ø 14 mm numunesinde ağırlık kaybı 10000 m kayma mesafesi sonucu 0,010533 g'dır. Buradan 950 ºC'de 2,5 saat borlanan Ø11 mm numunesinin ağırlık kaybının Ø14 mm numunesine kıyasla daha düşük olduğu böylece aşınmaya karşı daha dirençli olduğu sonucuna varılmaktadır. Aynı durum 950 ºC'de 7,5 saat borlanan Ø11 mm ve Ø14 mm numuneleri içinde geçerli olmuştur. Açıklamak gerekirse 950 ºC'de 7,5 saat borlanan Ø11 mm numunesinin aşınma sonucu ağırlık kaybı 0,0047 g ve Ø14 mm numunesinin aşınma sonucu ağırlık kaybı 0,0047 g ölçülmüştür. Hem 2,5 saat hemde 7,5 saat borlama sürelerinde Ø11 mm numunesinin, Ø14 mm numunesine kıyasla aşınma sonucu ağırlık kaybının daha düşük yani aşınma dayanımının daha yüksek olmasının nedeni Ø11 mm numunelerinin ince tane yapısına sahip olmasıdır. İnce taneli yapı difüzyon için daha aktif bölgeler oluşturduğundan ince taneli numunelerde borlama sonucu daha yüksek tabaka kalınlığı elde edilmektedir. Artan tabaka kalınlığında kaplama tabakası sertliğinin arttığı Şekil 5.11 ve Çizelge 5.6'da görülmüştür ve yüksek kaplama sertliği beraberinde ince taneli Ø11 numunelerine yüksek aşınma dayanımı getirmiştir.

950 ºC'de sabit numune çaplarında farklı borlama sürelerine Şekil 5.28 (b) eğrisinde ve Çizelge 5.14'te bakıldığında Ø11 mm ve Ø14 numunesinde artan borlama süresinin artması ile aşınma sonucu ağırlık kaybının azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni Şekil 5.11 ve Çizelge 5.6'da görüldüğü üzere artan borlama süreleriyle yüzey sertliğinin artmasıdır. Sonuç olarak sabit çap (Ø11 mm veya Ø14 mm) ve sabit (950 ºC) borlama sıcaklığında borlama süresinin artması, Çizelge 5.1'de görüldüğü üzere kaplama tabaka kalınlığının artmasına, artan kaplama kalınlığı Şekil 5.11'de ve Çizelge 5.6'da görüldüğü üzere beraberinde yüksek kaplama sertliğine, artan kaplama sertliği de Şekil 5.28 (b)'de ve Çizelge 5.14'te verildiği üzere beraberinde aşınmaya karşı dayanımı getirmişdir.

İşlem görmemiş Ø11 mm DIN 20MnCr5 çeliğin aşınma yüzeyinin morfolojisi Şekil 5.30'da sunulmuştur. Şekil 5.30 (a) 'da 100 X büyütmede, Şekil 5.30 (a) 'daki kırmızı kare olarak işaretlenen bölgenin 500 X büyütmesi Şekil 5.30 (b) 'de ve Şekil 5.30 (b)

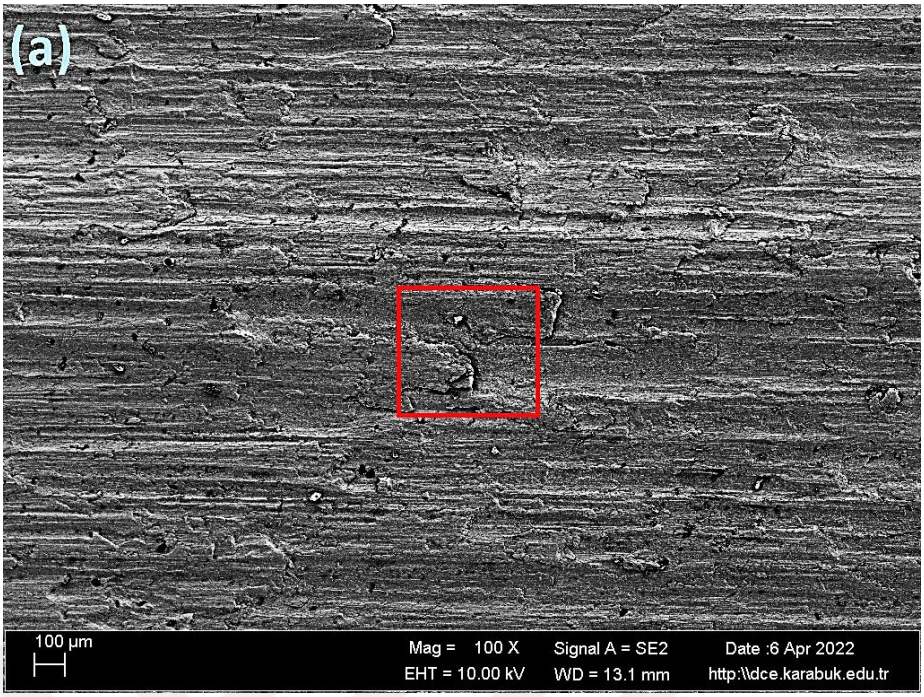
‘deki sarı kare ile gösterilen alanın 1.00 KX ölçekli SEM görüntüsü Şekil 5.30 (c)’de verilmiştir.

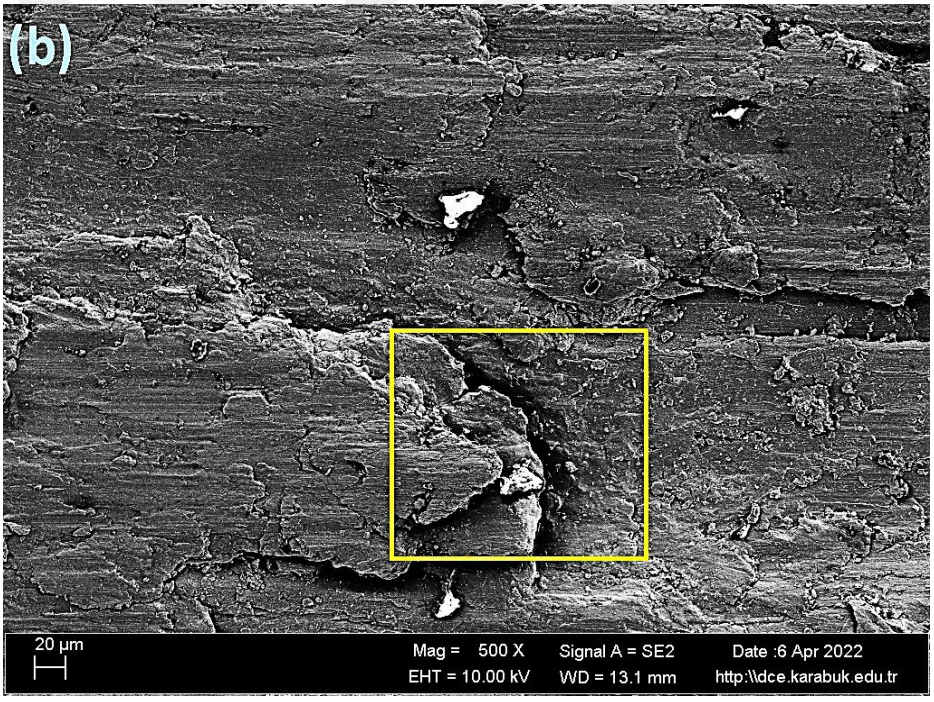


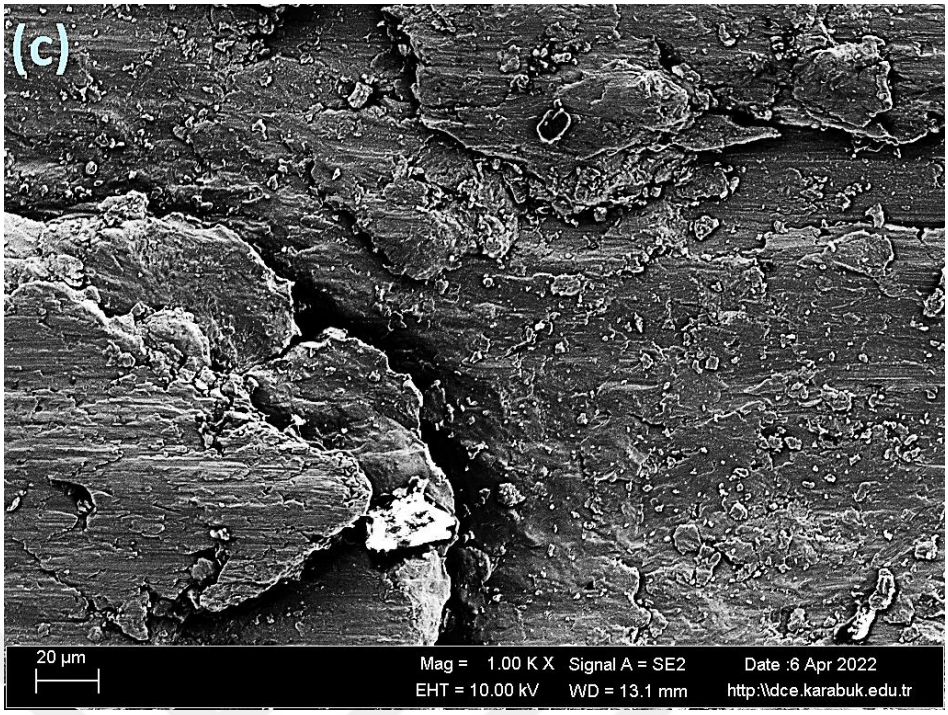


Şekil 5.30.İşlem görmemiş Ø11 mm DIN 20MnCr5 çeliğinin aşınma yüzeyinin (a) 100 X , (b) Şekil 5.30 (a)'daki kırmızı kare ile gösterilen alanın 500 X ve (c) Şekil 5.30 (b)'deki sarı kare ile gösterilen alanın 1.00 KX büyütmeli SEM görüntüsü

İşlem görmemiş Ø14 mm DIN 20MnCr5 çeliğin aşınma yüzeyinin morfolojisi Şekil 5.31'de sunulmuştur. Şekil 5.31 (a) 'da 100 X büyütme, Şekil 5.31 (a) 'daki kırmızı kare olarak işaretlenen bölgenin 500 X büyütmesi Şekil 5.31 (b) 'de ve Şekil 5.31 (b) 'deki sarı kare ile gösterilen alanın 1.00 KX ölçekli SEM görüntüsü Şekil 5.31 (c)'de verilmiştir.

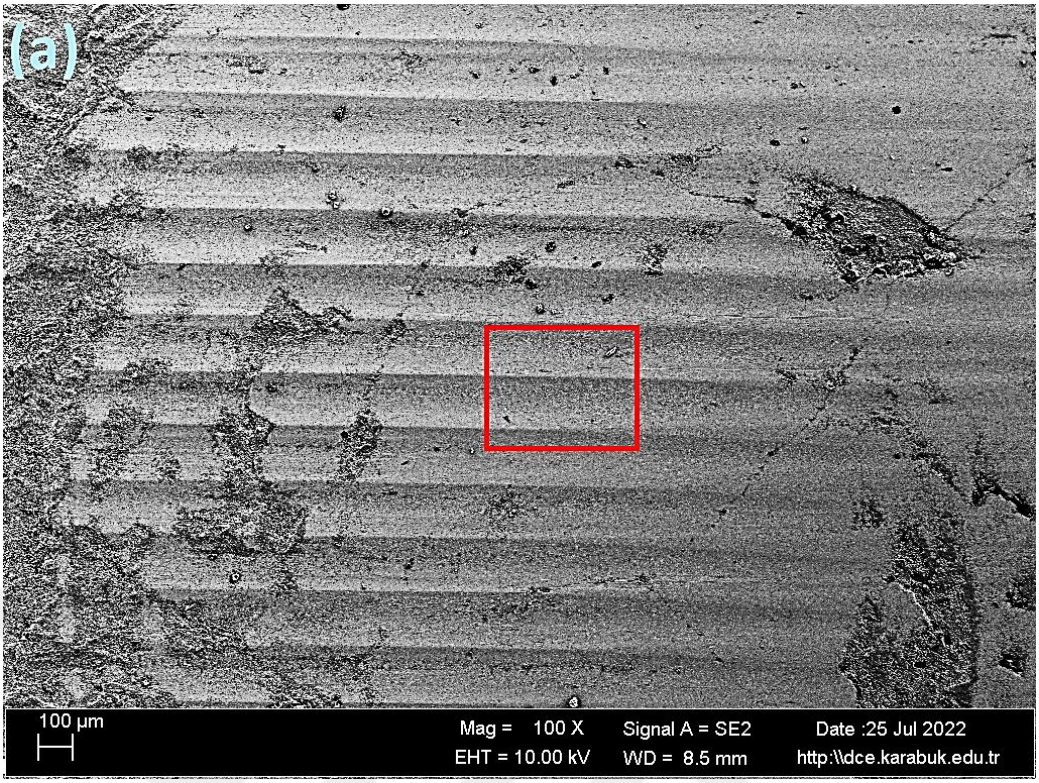

(a)
100 µm
Mag = 100 X
Signal A = SE2
Date :6 Apr 2022
EHT = 10.00 kV
WD = 13.1 mm
http:\\dce.karabuk.edu.tr

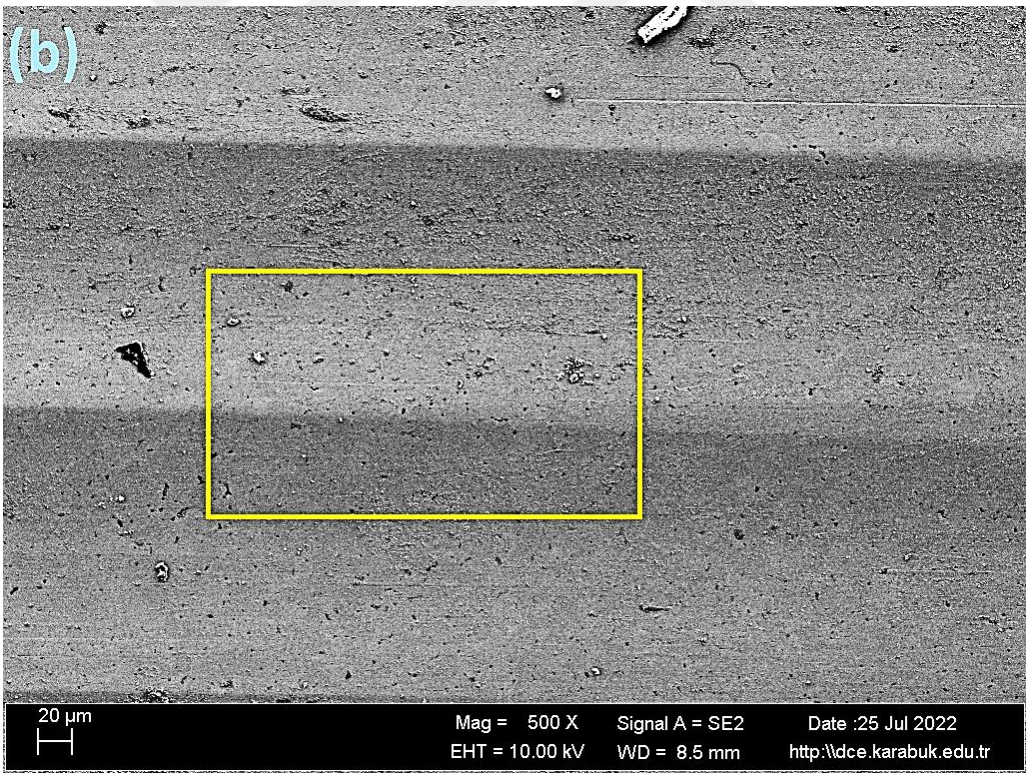

(b)
20 µm
Mag = 500 X
Signal A = SE2
Date :6 Apr 2022
EHT = 10.00 kV
WD = 13.1 mm
http:\\dce.karabuk.edu.tr

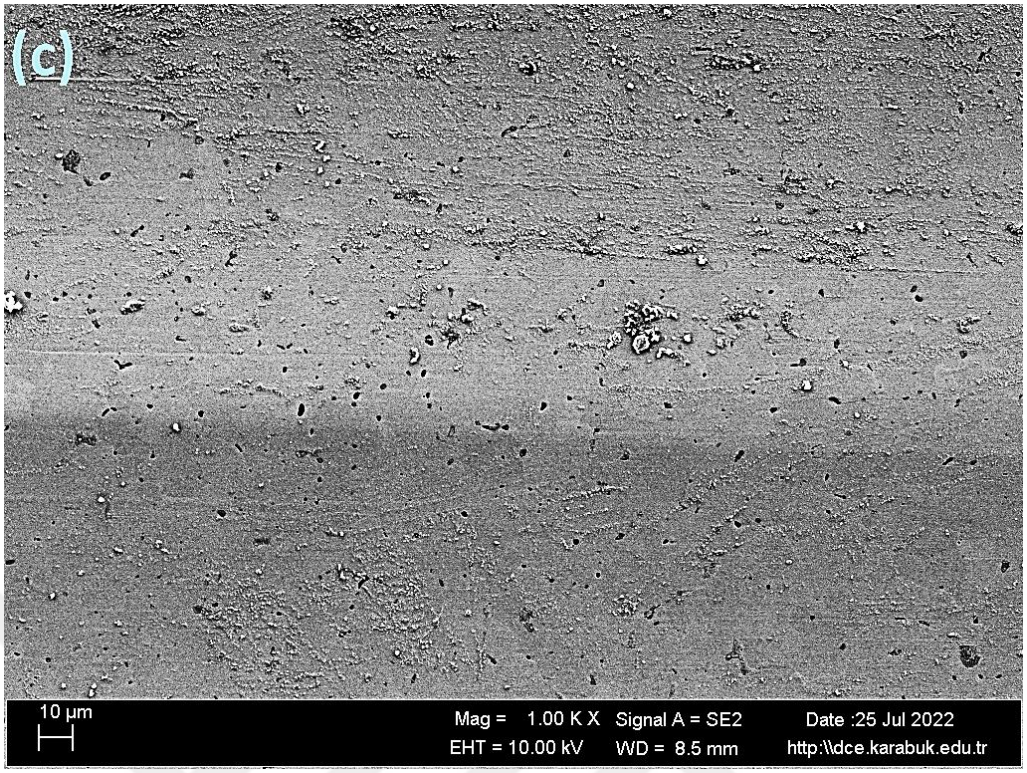


Şekil 5.31. İşlem görmemiş Ø14 mm DIN 20MnCr5 çeliğinin aşınma yüzeyinin (a) 100 X , (b) Şekil 5.31 (a)'daki kırmızı kare ile gösterilen alanın 500 X ve (c) Şekil 5.31. (b)'deki sarı kare ile gösterilen alanın 1.00 KX büyütmeli SEM görüntüsü

950 ºC sıcaklıkta 2,5 saat borlanan Ø11 mm DIN 20MnCr5 çeliğin aşınma yüzeyinin morfolojisi Şekil 5.32'de sunulmuştur. Şekil 5.32 (a) 'da 100 X büyütmede, Şekil 5.32 (a) 'daki kırmızı kare olarak işaretlenen bölgenin 500 X büyütmesi Şekil 5.32 (b) 'de ve Şekil 5.32 (b) 'deki sarı kare ile gösterilen alanın 1.00 KX ölçekli SEM görüntüsü Şekil 5.32 (c)'de verilmiştir.

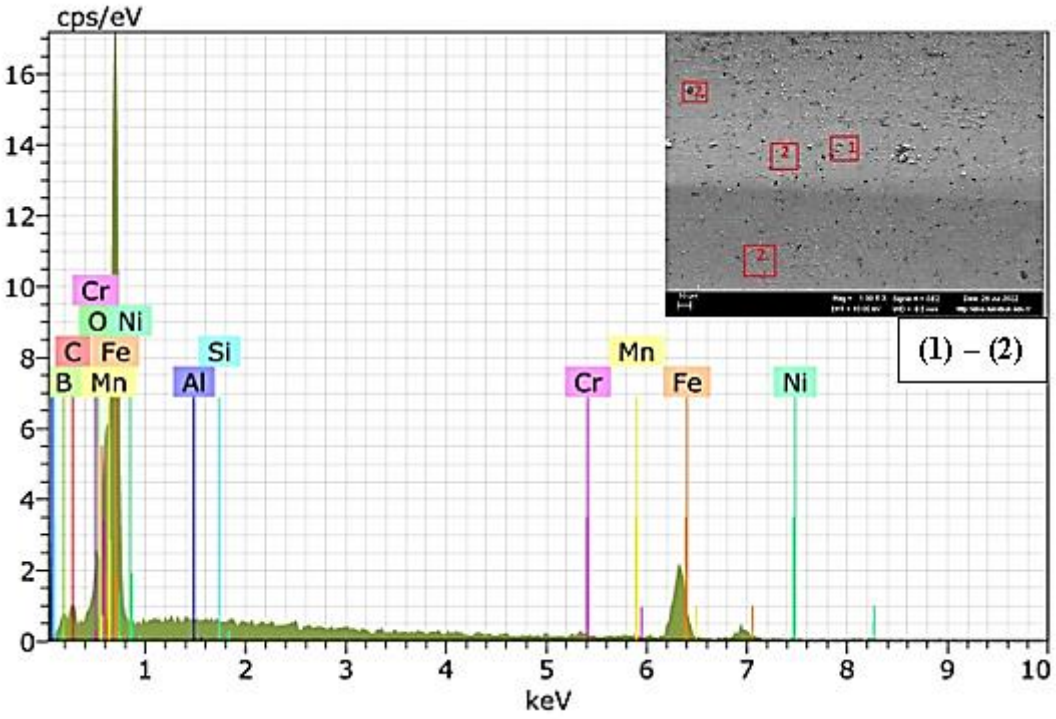

(a)
100 µm
Mag = 100 X
Signal A = SE2
Date :25 Jul 2022
EHT = 10.00 kV
WD = 8.5 mm
http:\\dce.karabuk.edu.tr


(b)
20 µm
Mag = 500 X
Signal A = SE2
Date :25 Jul 2022
EHT = 10.00 kV
WD = 8.5 mm
http:\\dce.karabuk.edu.tr



Şekil 5.32. 950 ºC sıcaklıkta 2,5 saat borlanan Ø11 mm DIN 20MnCr5 çeliğinin aşınma yüzeyinin (a) 100 X , (b) Şekil 5.32. (a)'daki kırmızı kare ile gösterilen alanın 500 X ve (c) Şekil 5.32. (b)'deki sarı kare ile gösterilen alanın 1.00 KX büyütmeli SEM görüntüsü

Şekil 5.32 (C)'de verilen 950 ºC'de 2,5 saat borlanmış Ø11 mm DIN 20MnCr5 çeliğin 1.00KX büyütmedeki aşınma yüzey SEM görüntüsü üzerinde "1 ve 2" nolu bölgelerin EDX analiz grafiği Şekil 5.33'te verilmiş olup spektrum değerleri ise Çizelge 5.15'te listelenmiştir.

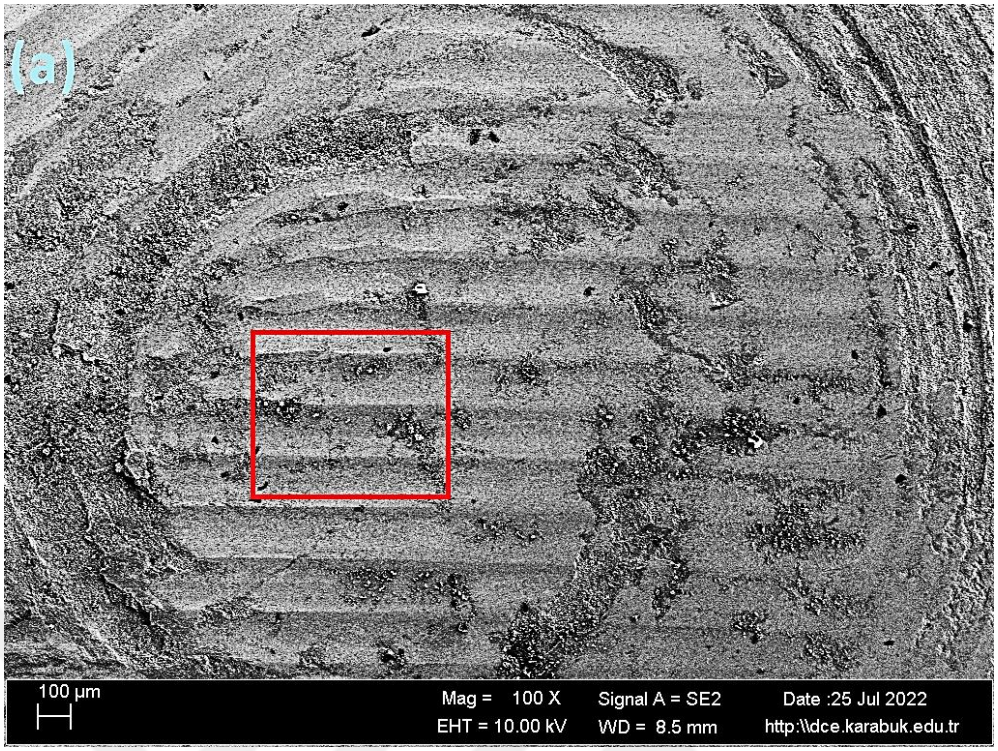


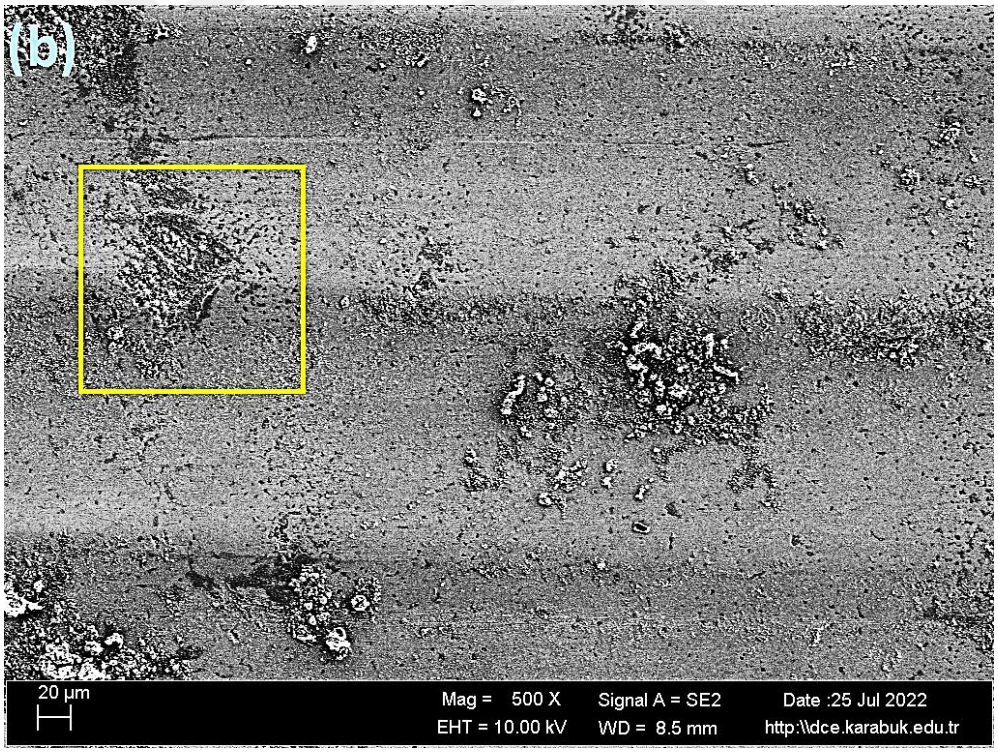
Şekil 5. 33. 2,5 saat 950ºC sıcaklıkta borlanan Ø11 mm DIN 20MnCr5 çeliğin aşınma yüzeyinin EDX analizi

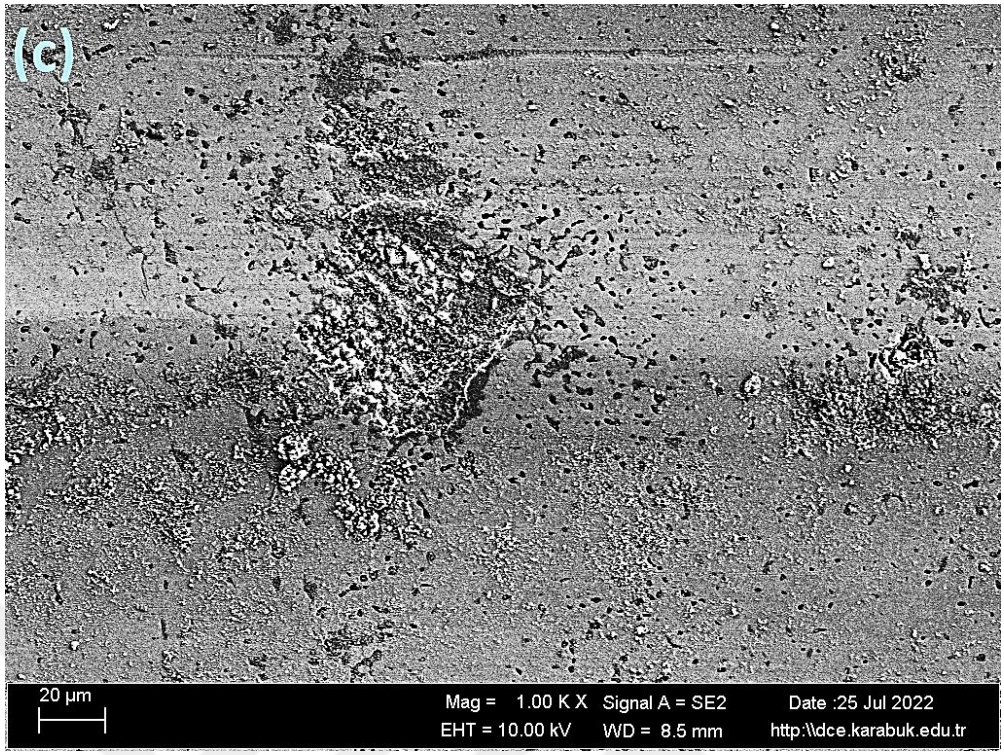
Çizelge 5.15.Ø11 mm DIN 20MnCr5 çeliğin 2,5 saat 950ºC sıcaklıkta borlama sonucu oluşan borür tabakasının EDX analiz sonucu

Spektrum	H	B	C	O	Al	Si	Cr	Mn	Fe	Ni
1	0.00	18.48	5.33	1.59	0.00	0.00	1.69	1.59	71.19	0.13
2	0.00	10.09	6.89	23.66	0.12	0.19	2.18	0.59	56.28	0.08

950 ºC sıcaklıkta 2,5 saat borlanan Ø14 mm DIN 20MnCr5 çeliğin aşınma yüzeyinin morfolojisi Şekil 5.34'te sunulmuştur. Şekil 5.34 (a) 'da 100 X büyütmede, Şekil 5.34 (a) 'daki kırmızı kare olarak işaretlenen bölgenin 500 X büyütmesi Şekil 5.34 (b) 'de ve Şekil 5.34 (b) 'deki sarı kare ile gösterilen alanın 1.00 KX ölçekli SEM görüntüsü Şekil 5.34 (c)'de verilmiştir.

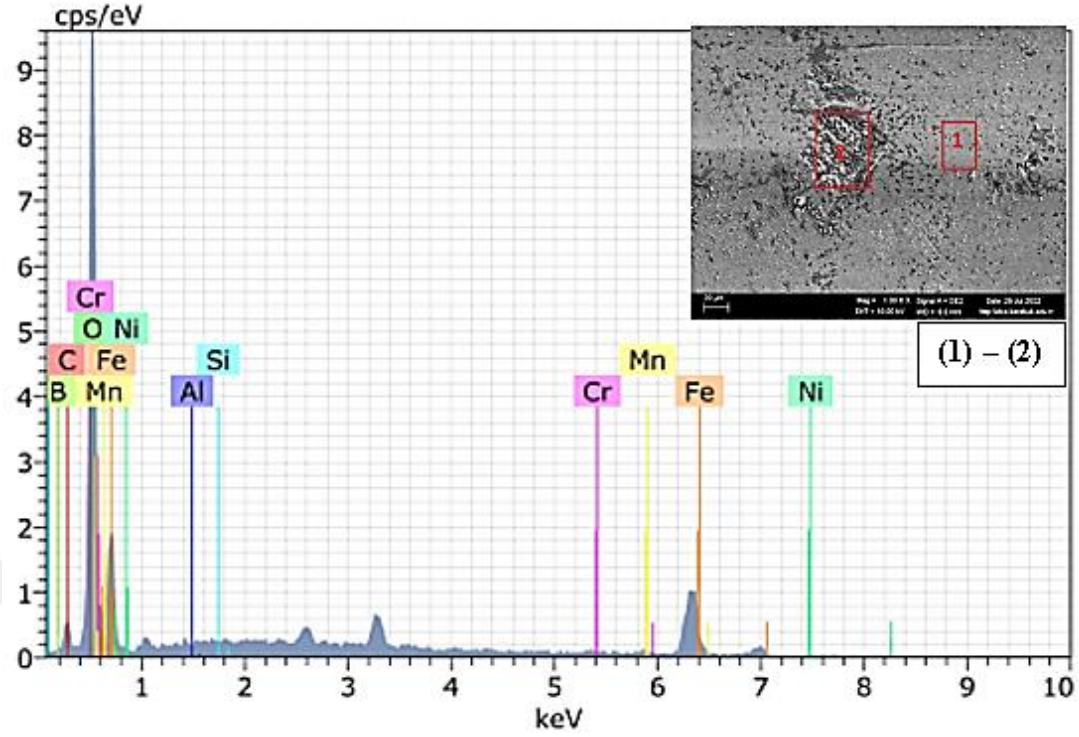

(a)
100 µm
Mag = 100 X
EHT = 10.00 kV
Signal A = SE2
WD = 8.5 mm
Date :25 Jul 2022
http:\\dce.karabuk.edu.tr


(b)
20 µm
Mag = 500 X
EHT = 10.00 kV
Signal A = SE2
WD = 8.5 mm
Date :25 Jul 2022
http:\\dce.karabuk.edu.tr



Şekil 5.34. 950ºC sıcaklıkta 2,5 saat borlanan Ø14 mm DIN 20MnCr5 çeliğinin aşınma yüzeyinin (a) 100 X , (b) Şekil 5.34. (a)'daki kırmızı kare ile gösterilen alanın 500 X ve (c) Şekil 5.34. (b)'deki sarı kare ile gösterilen alanın 1.00 KX büyütmeli SEM görüntüsü

Şekil 5.34 (c)'de verilen 950 ºC'de 2,5 saat borlanmış Ø14 mm DIN 20MnCr5 çeliğin 1.00KX büyütmedeki aşınma yüzey SEM görüntüsü üzerinde "1 ve 2" nolu bölgelerin EDX analiz grafiği Şekil 5.35'te verilmiş olup spektrum değerleri ise Çizelge 5.16'da listelenmiştir.

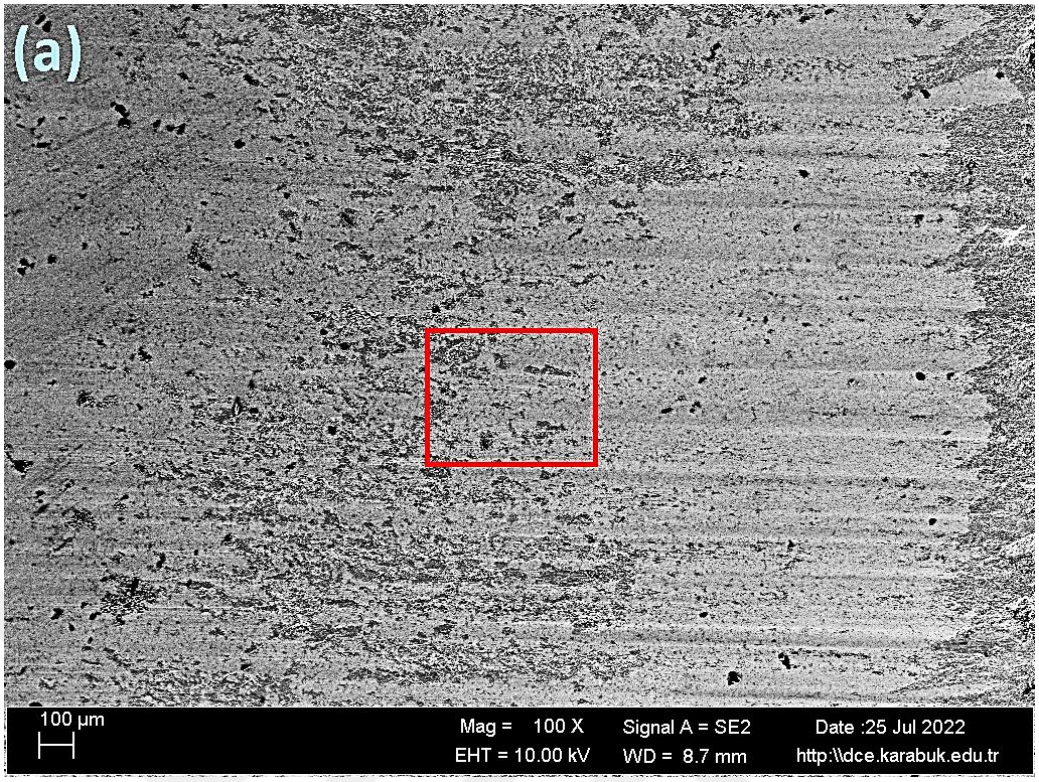


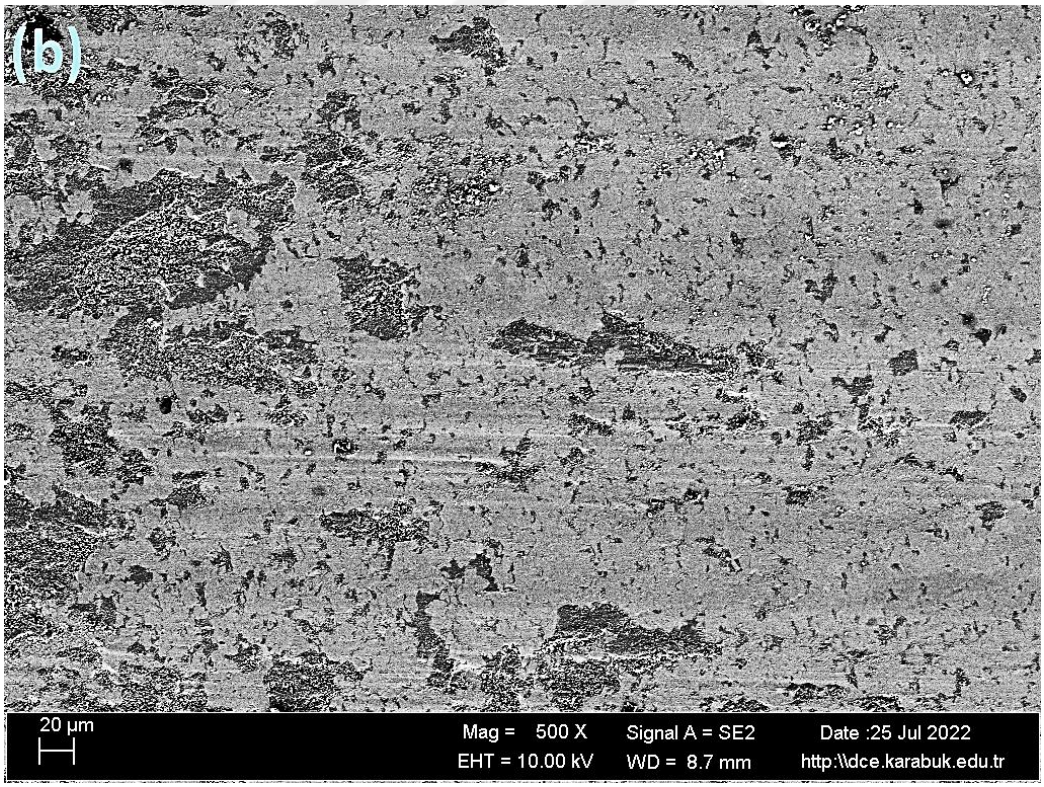
Şekil 5.35. 2,5 saat 950ºC sıcaklıkta borlanan Ø14 mm DIN 20MnCr5 çeliğin aşınma yüzeyinin EDX analizi

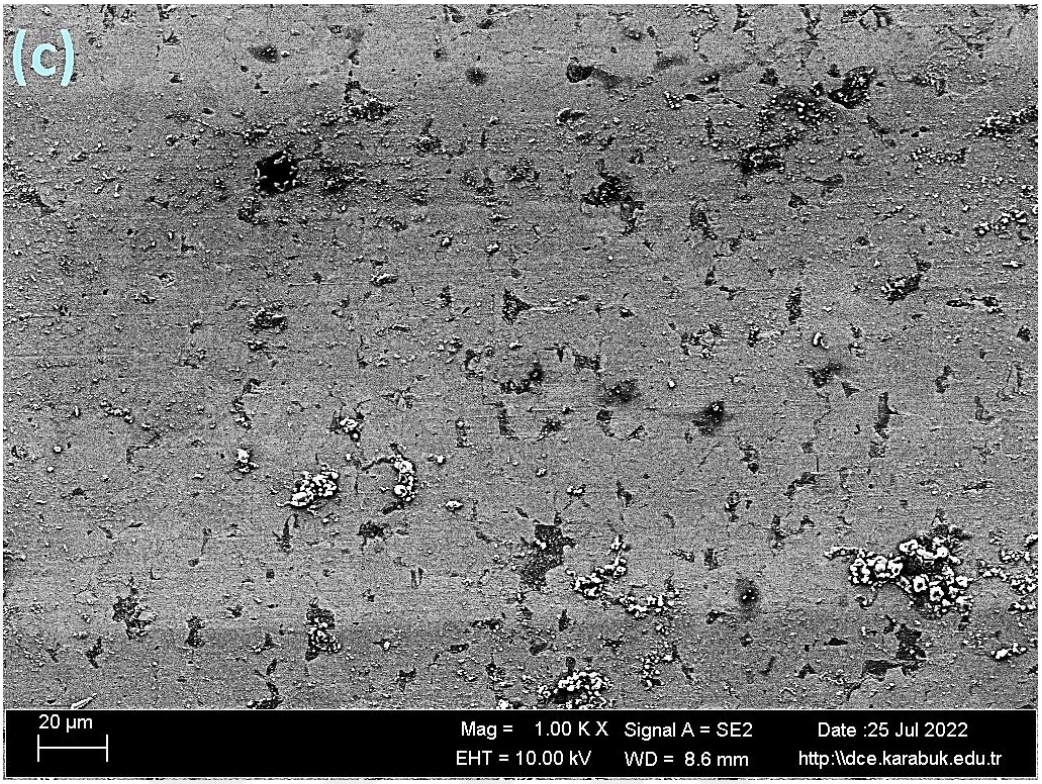
Çizelge 5.16.Ø14 mm DIN 20MnCr5 çeliğin 2,5 saat 950ºC sıcaklıkta borlama sonucu oluşan borür tabakasının EDX analiz sonucu

Spektrum	**H**	**B**	**C**	**O**	**Al**	**Si**	**Cr**	**Mn**	**Fe**	**Ni**
1	0.00	17.63	5.8	4.62	0.09	0.00	1.15	1.75	68.1	0.14
2	1.30	5.2	4.42	36.06	0.05	0.10	2.14	1.41	46.35	0.15

950 ºC sıcaklıkta 7,5 saat borlanan Ø11 mm DIN 20MnCr5 çeliğin aşınma yüzeyinin morfolojisi Şekil 5.36'da sunulmuştur. Şekil 5.36 (a) 'da 100 X büyütmede, Şekil 5.36 (a) 'daki kırmızı kare olarak işaretlenen bölgenin 500 X büyütmesi Şekil 5.36 (b) 'de ve 1.00 KX ölçekli SEM görüntüsü Şekil 5.36 (c)'de verilmiştir.

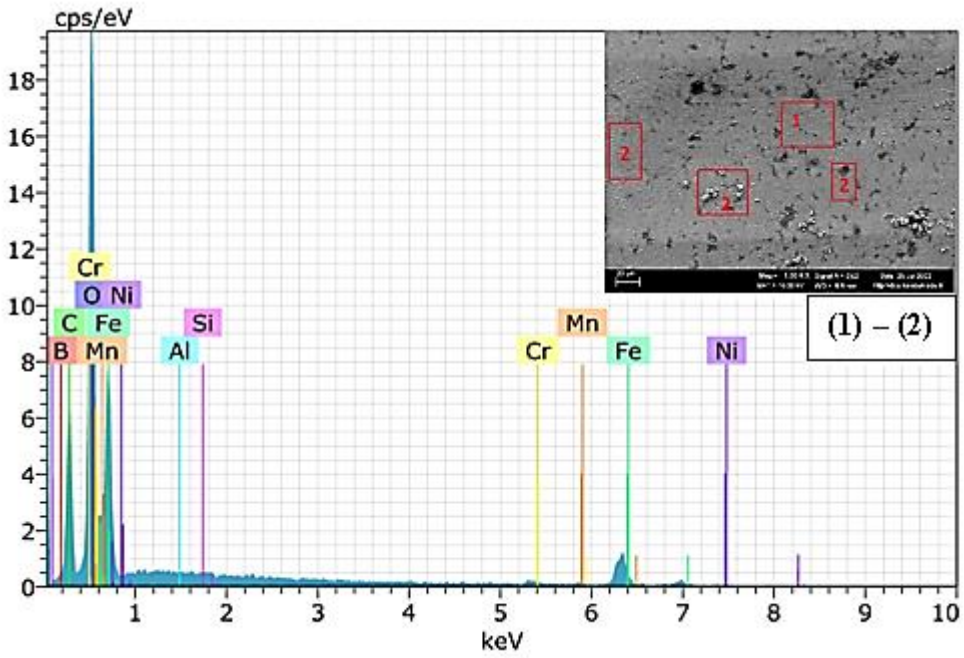

(a)
100 µm
Mag = 100 X
Signal A = SE2
Date :25 Jul 2022
EHT = 10.00 kV
WD = 8.7 mm
http:\\dce.karabuk.edu.tr


(b)
20 µm
Mag = 500 X
Signal A = SE2
Date :25 Jul 2022
EHT = 10.00 kV
WD = 8.7 mm
http:\\dce.karabuk.edu.tr



Şekil 5.36. 950 ºC sıcaklıkta 7,5 saat borlanan Ø11 mm DIN 20MnCr5 çeliğinin aşınma yüzeyinin (a) 100 X , (b) Şekil 5.36 (a)'daki kırmızı kare ile gösterilen alanın 500 X ve (c) 1.00 KX büyütmeli SEM görüntüsü

Şekil 5.36 (c)'de verilen 950 ºC'de 7,5 saat borlanmış Ø11 mm DIN 20MnCr5 çeliğin 1.00KX büyütmedeki aşınma yüzey SEM görüntüsü üzerinde "1 ve 2" nolu bölgelerin EDX analiz grafiği Şekil 5.37'de verilmiş olup spektrum değerleri ise Çizelge 5.17'de listelenmiştir.

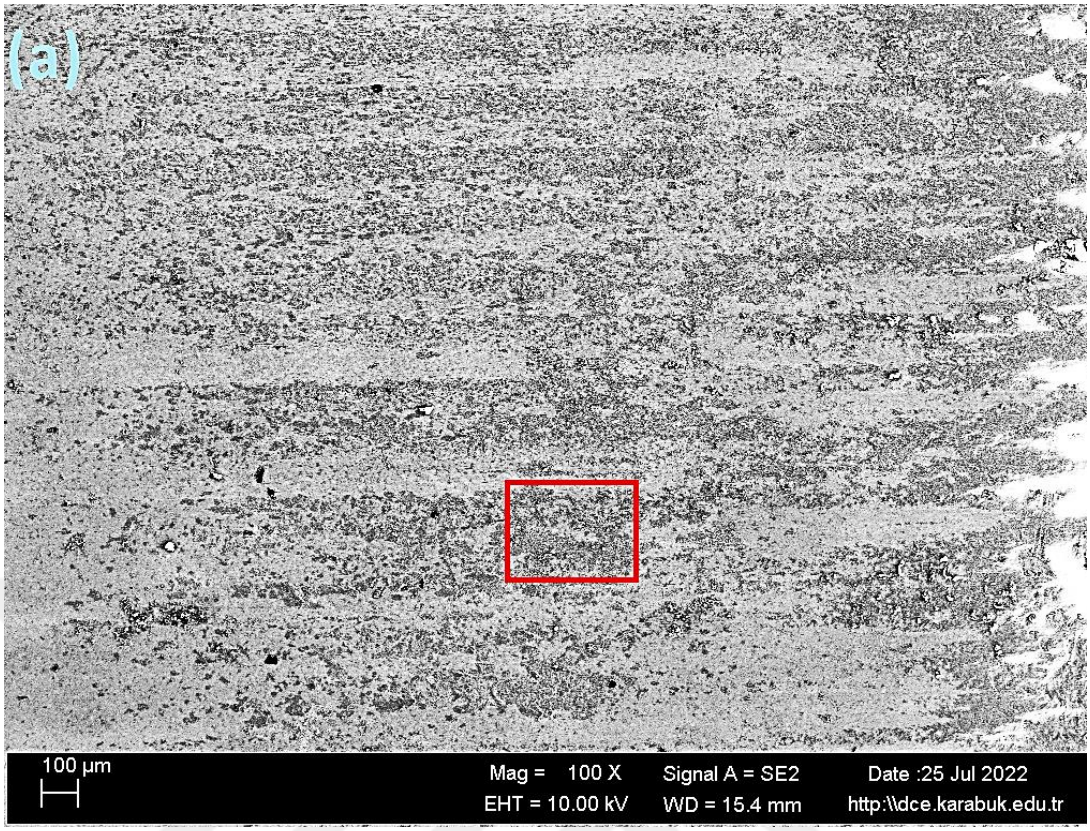


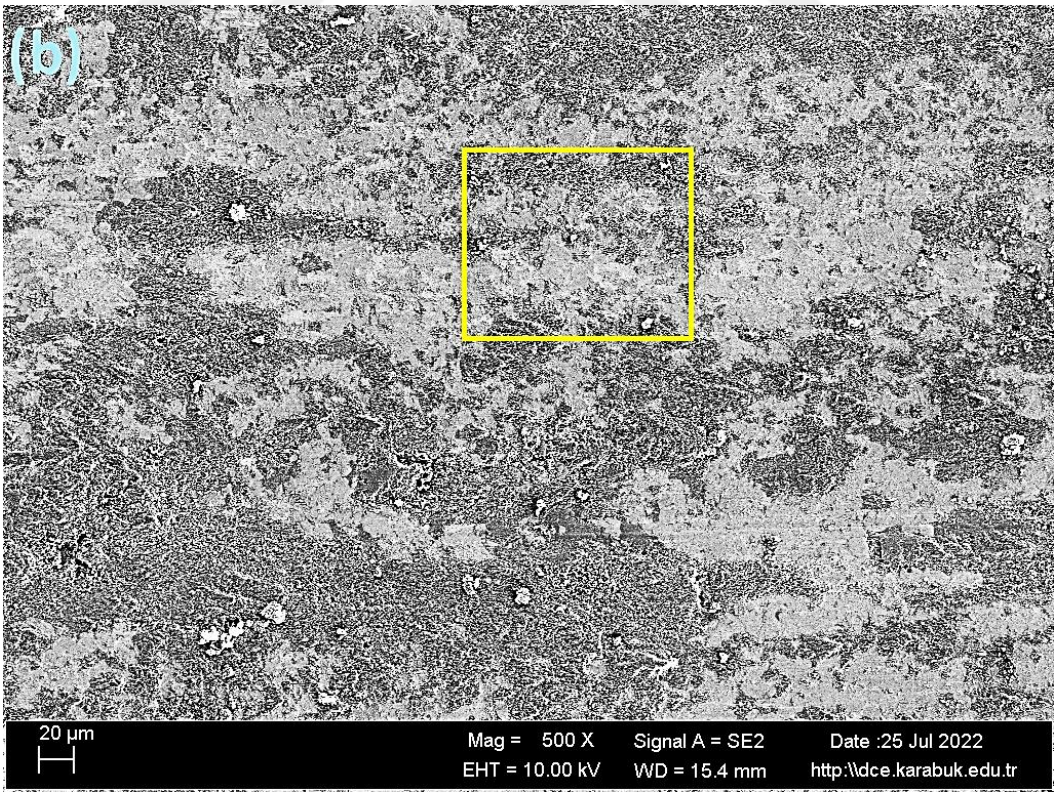
Şekil 5.37. 7,5 saat 950^{o}C sıcaklıkta borlanan Ø11 mm DIN 20MnCr5 çeliğin aşınma yüzeyinin EDX analizi

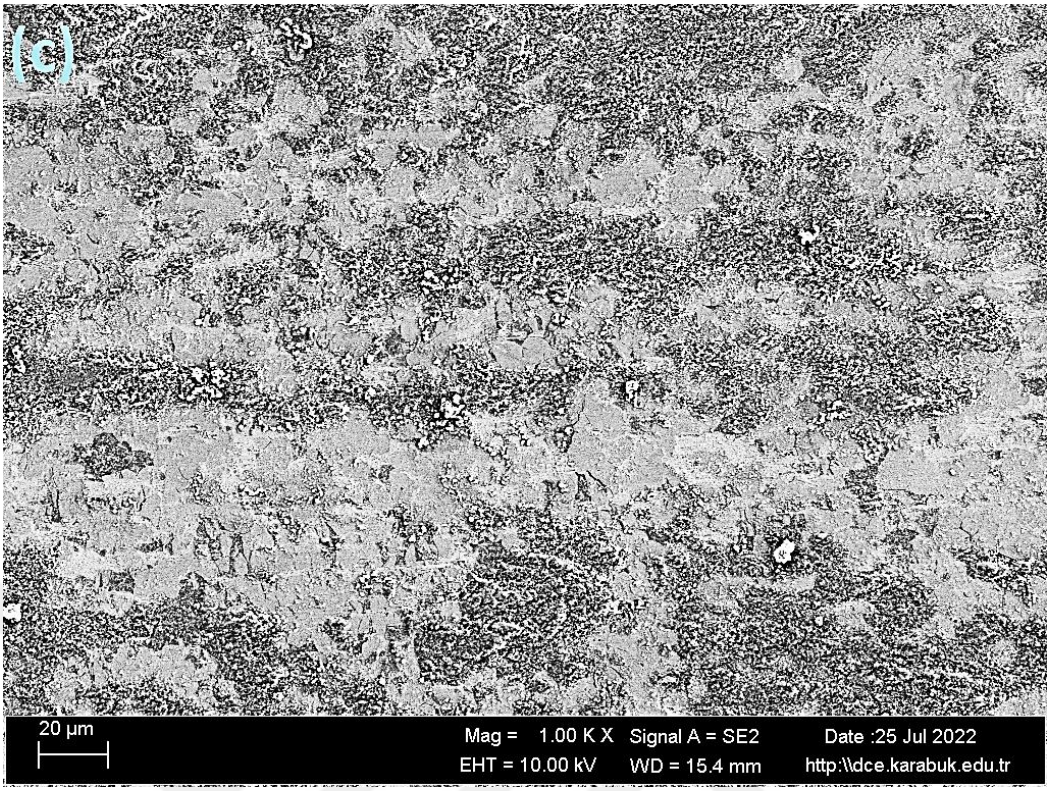
Çizelge 5.17. Ø11 mm DIN 20MnCr5 çeliğin 7,5 saat 950^{o}C sıcaklıkta borlama sonucu oluşan borür tabakasının EDX analiz sonucu

Spektrum	H	B	C	O	Al	Si	Cr	Mn	Fe	Ni
1	0.00	14.12	18.85	1.94	0.14	0.00	1.13	0.98	62.83	0.00
2	0.00	5.84	12.18	40.09	0.03	0.22	1.44	0.64	39.34	0.20

950 ^{o}C sıcaklıkta 7,5 saat borlanan Ø14 mm DIN 20MnCr5 çeliğin aşınma yüzeyinin morfolojisi Şekil 5.38'de sunulmuştur. Şekil 5.38 (a) 'da 100 X büyütmede, Şekil 5.38 (a) 'daki kırmızı kare olarak işaretlenen bölgenin 500 X büyütmesi Şekil 5.38 (b) 'de ve Şekil 5.38 (b) 'deki sarı kare ile gösterilen alanın 1.00 KX ölçekli SEM görüntüsü Şekil 5.38 (c)'de verilmiştir.

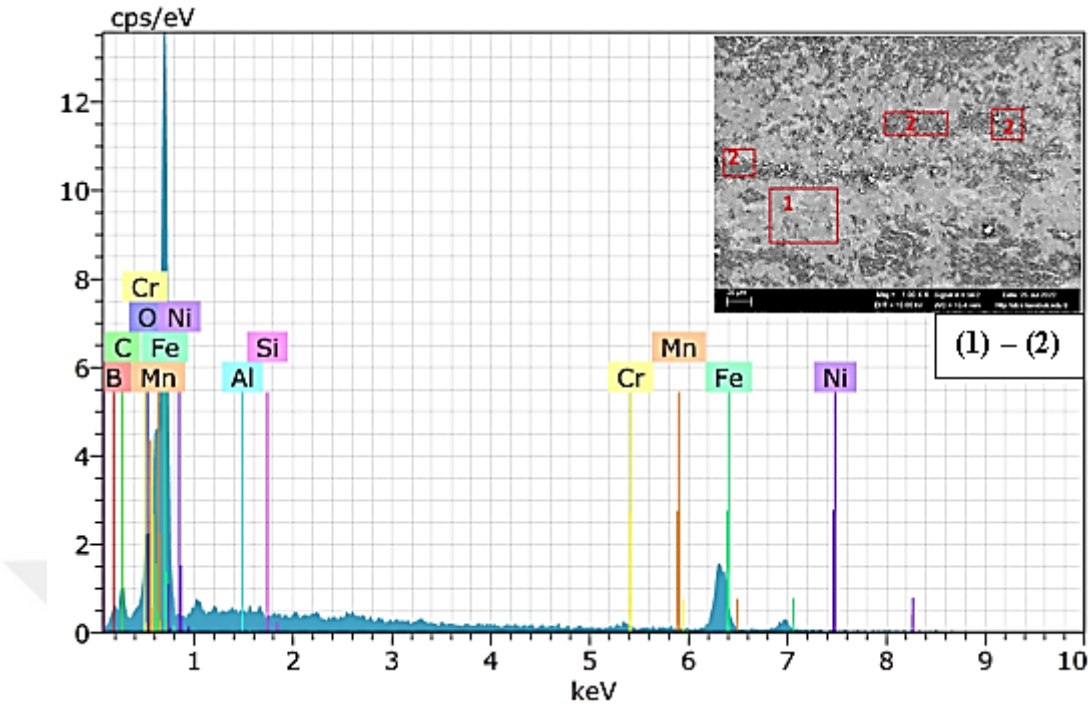

(a)
100 µm
Mag = 100 X
Signal A = SE2
Date :25 Jul 2022
EHT = 10.00 kV
WD = 15.4 mm
http:\\dce.karabuk.edu.tr


(b)
20 µm
Mag = 500 X
Signal A = SE2
Date :25 Jul 2022
EHT = 10.00 kV
WD = 15.4 mm
http:\\dce.karabuk.edu.tr



Şekil 5.38. 950ºC sıcaklıkta 7,5 saat borlanan Ø14 mm DIN 20MnCr5 çeliğinin aşınma yüzeyinin (a) 100 X , (b) Şekil 5.38 (a)'daki kırmızı kare ile gösterilen alanın 500 X ve (c) Şekil 5.38 (b)'deki sarı kare ile gösterilen alanın 1.00 KX büyütmeli SEM görüntüsü

Şekil 5.38 (c)'de verilen 950 ºC'de 7,5 saat borlanmış Ø14 mm DIN 20MnCr5 çeliğin 1.00KX büyütmedeki aşınma yüzey SEM görüntüsü üzerinde "1 ve 2" nolu bölgelerin EDX analiz grafiği Şekil 5.39'da verilmiş olup spektrum değerleri ise Çizelge 5.18'de listelenmiştir.



Şekil 5.39.7,5 saat 950ºC sıcaklıkta borlanan Ø14 mm DIN 20MnCr5 çeliğin aşınma yüzeyinin EDX analizi

Çizelge 5.18. Ø14 mm DIN 20MnCr5 çeliğin 7,5 saat 950ºC sıcaklıkta borlama sonucu oluşan borür tabakasının EDX analiz sonucu

Spektrum	H	B	C	O	Al	Si	Cr	Mn	Fe	Ni
1	0.05	17.34	6.57	3.54	0.00	0.00	1.69	0.55	70.22	0.04
2	0.02	5.22	5.2	47.01	0.35	0.17	2.75	1.02	67.37	0.37

Şekil 5.30 (a), Şekil 5.31 (a), Şekil 5.32 (a), Şekil 5.34(a), Şekil 5.36(a) ve Şekil 5.38 (a) görüntülerine bakılacak olursa Şekil 5.30 (a)'da Ø11 mm çapındaki işlemsiz numune yüzeyinde, yatay yönde çiziklerin oluştuğu abrazif aşınma meydana gelmiştir. Bununla birlikte aşınan partiküllerin yüzeyden uzaklaşmayıp yüzeye yapıştığı adhezif aşınmanın da meydana geldiği görülmektedir. Şekil 5.31 (a) görüntüsüne bakılacak olursa Ø14 mm çapındaki işlemsiz numune yüzeyinde yatay yönde çiziklerin oluştuğu abrazif aşınma meydana gelmiştir. Şekil 5.32 (a) ve Şekil 5.34 (a) görüntülerine bakıldığında Şekil 5.30 (a) görüntüsüne kıyasla artan borlama süresi ile yüzeyde oluşan adhezif ve abrazif aşınma etkilerinin azaldığı görülmektedir.

Aynı durum Şekil 5.31 (a) - Şekil 5.34 (a) ve Şekil 5.38 (a) harfleri ile gösterilen SEM görüntüleri içinde geçerlidir. Şekil 5.30 (a)- Şekil 5.31 (a), Şekil 5.32 (a)- Şekil 5.34 (a) ya da Şekil 5.36 (a) - Şekil 5.38 (a) görüntülerine bakıldığında artan numune çapı ile yüzeyde meydana gelen aşınma izlerinin arttığı görülmektedir. Bir önceki slaytta ağırlık kaybının en düşük yani aşınma dayanımının en yüksek olduğu numunenin 7,5 saat borlanan Ø11 mm çapındaki numuneye ait olduğunu belirtmiştim. Bu slaytta Şekil 5.36 (a) ile gösterilen sem görüntüne bakıldığında diğer aşınan numunelere kıyasla abrazif ve adhezif aşınmanın minimum olduğu düz bir yüzey görülmektedir.

BÖLÜM 6

GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Ø11 ve Ø14 mm çaplarındaki farklı oranda deformasyona maruz kalmış DIN 20MnCr5 çelik çubuklarına, 950 ^{o}C sıcaklıkta ve 2,5 ve 7,5 saat farklı borlama sürelerinde kutu borlama işlemi uygulanmıştır. Kaplama sonrası malzemelere aşınma, korozyon ve sertlik testleri uygulanmıştır ve ardından aşınma ve korozyon yüzeylerine SEM-EDX analizleri yapılmıştır. Ayrıca borlama işlemi uygulanmış numunelerin kaplama kalınlıklıkları optik mikroskop çalışmaları ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma sonucunda;

1. Optik mikro yapı görüntülerine göre 950^{o}C'de 2,5 saat borlanan Ø11 ve Ø14 mm numunelerinin borür kaplama kalınlığı sırasıyla 195.6 µ, 168.3 µ ve 950^{o}C'de 7,5 saat borlanan Ø11 ve Ø14 mm numunelerinin borür kaplama kalınlığı sırasıyla 371.5 µ, 260.6 µ olduğu görülmüştür.
2. İşlem görmemiş Ø11 mm numunesinin sertliği 244 HV, Ø14 numunesinin 231 HV görülmüştür.
3. Ana matris ile borür kaplama ara yüzeyi artan kaplama tabaka kalınlığı ile birlikte düz bir ara yüzeyden süreksiz dalgalı ara yüzey morfolojisine geçiş olmuştur.
4. Borlama işlemi uygulanan Ø11 ve Ø14 mm numunelerinin XRD faz analizi sonucunda, FeB, Fe_2B ve CrB fazları görülmüştür.
5. 950^{o}C'de 2,5 saat borlanan Ø11 ve Ø14 mm numunelerinin borür kaplama sertliği sırasıyla 1780 HV, 1553 HV ve 950^{o}C'de 7,5 saat borlanan Ø11 ve Ø14 mm numunelerinin borür kaplama sertliği sırasıyla 2272 HV , 2188 HV olduğu görülmüştür.
6. Daldırma korozyonu sonuçlarına göre işlem görmemiş Ø11mm çapındaki numunenin mdd cinsinden korozyon hızı (1456,75 mg/dm^2 x gün) işlem

7. görmemiş Ø14mm çapındaki numunenin korozyon hızından (1338,99 mg/dm^2 x gün) yüksek çıkmıştır.
8. Ø14mm çapındaki 950ºC sıcaklıkta 2,5 ve 7,5 saat borlanan numunelerde korozyon hızı sırasıyla 229 , 132 mg/dm^2x gün, Ø11 mm çapındaki 950ºC sıcaklıkta 2,5 ve 7,5 saat borlanan numunelerde korozyon hızı sırasıyla 205 , 112 mg/dm^2 x gün ölçülmüştür.
9. Daldırma korozyon sonrası yüzeylerin SEM görüntüsüne bakıldığında işlemsiz numunelerde tümsek ve vadi morfolojisinde , borlama işlemi uygulanmış numunelerde tek düze homojen korozyon mekanizması gerçekleşmiştir.
10. Potansiyodinamik polarizasyon testleri daldırma korozyonuna paralel sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Korozyon hızı değerleri (I_{cor}) işlemsiz Ø11 ve Ø14 mm numunelerinde sırasıyla 209 x 10^{-6} , 48 x10^{-6} , 950ºC'de 2,5 saat borlanan Ø11 ve Ø14 mm numunelerinde sırasıyla 19 x 10^{-6} , 31 x 10^{-6} ve 950ºC'de 7,5 saat borlanan Ø11 ve Ø14 mm numunelerinde sırasıyla 0,0039 x 10^{-6} , 11 x 10^{-6} olarak bulunmuştur.
11. Aşınma sonuçlarına göre 950ºC sıcaklıkta 7,5 saatte borlanan Ø11 mm numunesinin ağırlık kaybı en düşük (0.0047 g), işlemsiz Ø14 mm numunesinin ise (6,12 g) en yüksek çıkmıştır ve aşınma sonuçlarının sertlik sonuçlarına parallel olduğu saptanmıştır.

KAYNAKLAR

1. Karagöz, İ., "Sementasyon Çeliklerinde Difüzyon Ve Sertlik Derinliğini Arttıracak Isıl İşlem Koşullarının İncelenmesi", Yüksek Lisans, ***Marmara Üniversitesi***, İstanbul, .
2. Kayabaşi, M., "Sae 8620 Sementasyon Çeliklerinde Sertlik Derinliğinin Abrasif Aşinma Davranişina Etkisinin İncelenmesi", Yüksek Lisans, ***Zonguldak Karaelmas Üniversitesi***, Zonguldak, (2011).
3. Üçkardeşler, A., "Çelik Dökümlerde Borlama Isil İşleminin Abrasif Aşinma Direnci Üzerine Etkisi", Yüksek Lisans, ***Gazi Üniversitesi***, (2013).
4. Emre, İ. E., "Kirma Ve Öğütme Sistemlerinde Hardox 450 Ve 20mncr5 Çeliklerinin Mekanik Özelliklerinin Geliştirilmesi Ve Karakterizasyonu", Yüksek Lisans, ***Sakarya Uygulamali Bilimler Üniversitesi***, (2019).
5. Yang, J., Wang, L., Zheng, Y., And Zhong, Z., "Strain Modified Constitutive Equation And Processing Maps Of High Quality 20mncr5(Sh) Gear Steel", ***Crystals***, 11 (5): 536 (2021).
6. Bozbay, A. B., "Lastik Koruyucu Zincirlerinde Kullanilan 20mncr5 Ve 8620 Malzemelerinin Farkli Isil İşlem Şartlari İçin Yorulma Ve Aşinma Dirençlerinin İyileştirilmesi", Yüksek Lisans, ***Sakarya Üniversitesi***, (2019).
7. Ambekar, S., Kadam, S., And Sonawane, S. A., "Comparative Study Of Effect Of Cryogenics Heat Treatment And Case Hardening On The Wear Property Of 20mncr5", ***Applied Mechanics And Materials***, 798: 435–439 (2015).
8. Bariş, M., "Farkli Borlama Sürelerinin Transmisyon Çeliğinde Abrasiv Aşinma Davranişlarina Etkisinin İncelenmesi", Yüksek Lisans, ***Gazi Üniversitesi***, (2007).
9. Ayter, T., "Borlama İşleminin Çeliklerin Yüzey Kalitesi Ve Aşinma Davranişina Etkisinin İncelenmesi", Yüksek Lisans, ***Celal Bayar Üniversitesi***, (2005).
10. Ersöz, A., "Elektrokimyasal Borlama İle Çeliklerin Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesi", Yüksek Lisans, ***İstanbul Teknik Üniversitesi***, (2008).
11. Topuz, P., "Akişkan Yatakli Firinda Farkli Çeliklerin Borlanmasi Ve Borlama Parametrelerinin Geliştirilmesi", Doktora, ***Marmara Üniversitesi***, (2009).

12. Şeşen, F. E., "Çelik Yüzeylerinde Elektrotermokimyasal Ve Termokimyasal Difüzyon Tabakasi Oluşumuna Ve Difüzyon Tabakalarinin Özelliklerine İşlem Parametrelerinin Etkisi", Doktora, ***İstanbul Teknik Üniversitesi***, (2015).

13. Toprak, M., "Kati Borlamanin Hardox 450 Ve Hardox Hituf Çeliklerin Yüzey Özelliklerine Etkisi", Yüksek Lisans, ***Harran Üniversitesi***, Şanliurfa, (2019).

14. Sinha, A. K., "Boriding (Boronizing)", Asm Metals Handbook: Heat Treating, ***Asm Internationa***, Abd, 437–447 .

15. Uluköy, A. And Can, A. Ç., "Çeliklerin Borlanması", ***Pamukkale Üniveristesi***, 12(2): 12(2) (2006).

16. Jain, V. And Sundararajan, G., "“Influence Of The Pack Thickness Of The Boronizing Mixture On The Boriding Of Steel", ***Surface And Coatings Technology***, 21–26 (2002).

17. Kulka, M., "Current Trends In Boriding Techniques", Part Of The Engineering Materials Book Series, ***Springer***, Cham, Switzerland, 282 (2019).

18. Bolat, Ç., "Orta Karbonlu Din Ck45 Çeliğinin Elektrokimyasal Yöntemle Borlanmasi", Yüksek Lisans, ***İstanbul Teknik Üniversitesi***, (2016).

19. Kara, G., "Farkli Kristal Yapilardaki Titanyum Ve Alaşimlarinin Borlanmasi Ve Borlamanin Bu Malzemelerin Mikroyapi, Mekanik Ve Biyouyumluluk Özellikleri Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi", Doktora, ***Karadeniz Teknik Üniversitesi***, (2017).

20. Koçaslan, A., "16mncr5 Çeliğinin Borlama Ve Termal Çevrimli Borlama Özelliklerinin Araştirilmasi", Yüksek Lisans, ***Süleyman Demirel Üniversitesi***, (2016).

21. Sari, M., "Sementasyon Çeliğinin Kutu Borlama Yöntemiyle Kaplanmasi Mikroyapi Ve Mekanik Özelliklerinin Araştirilmasi", Yüksek Lisans, ***Adiyaman Üniversitesi***, (2019).

22. Kulka, M., Makuch, N., Pertek, A., And Piasecki, A., "An Alternative Method Of Gas Boriding Applied To The Formation Of Borocarburized Layer", ***Materials Characterization***, 72: 59–67 (2012).

23. Küper, A., Qiao, X., Stock, H. R., And Mayr, P., "A Novel Approach To Gas Boronizing", ***Surface And Coatings Technology***, 130: 87–94 (2000).

24. Panus, D. A., "In-Vitro Characterization Of Boronized Titanium Alloy Bymeans Of Corrosion And Electrochemical Impedance Spectroscopy Methods In Simulated Body Fluids", Master, ***New Jersey Institute Of Technology***, (2006).

25. Kondul, B., "Borlama İle Yüzeyi Sertleştirilmiş Ray Çeliğinin Aşinma Davranişinin İncelenmesi", Yüksek Lisans, ***Karabük Üniversitesi***, (2020).

26. Yang, H. P., Wu, X. C., Min, Y. A., Wu, T. R., And Gui, J. Z., "Plasma Boriding Of High Strength Alloy Steel With Nanostructured Surface Layer At Low Temperature Assisted By Air Blast Shot Peening", ***Surface And Coatings Technology***, 228: 229–233 (2013).

27. Boztepe, M. H., "Effect Of Boronizing Temperature And Time On Abrasion And Corrosion Resistance Of Aisi 1050 Steel", Msc Thesis, ***Çukurova University***, (2014).

28. Matuschka, A. G., ."Boronizing", Carl Hanser Verlag, München Wien, 1980.

29. Carbucicchio, M. And Palombarini, G., "Effects Of Alloying Elements On The Growth Of Iron Boride Coatings", ***Journal Of Materials Science Letters***, 6 (10): 1147–1149 (1987).

30. Badini, C., Gianoglio, C., And Pradelli, G., "The Effect Of Carbon, Chromium And Nickel On The Hardness Of Borided Layers", ***Surface And Coatings Technology***, 30 (2): 157–170 (1987).

31. Aydoğmuş, T., "Tungsten Karbür Kesici Takimlarin Borlanmasi Ve Karakterizasyonu", Doktora, ***Eskişehir Osmangazi Üniversitesi***, (2019).

32. Arslan, D., "Mikrodalga Hibrit Ve Konvansiyonel Isitma İle Kutu Borlama Uygulanmiş Aisi 304l Çeliğinin Yüzey Karakterizasyonu Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi", Doktora, ***Manisa Celal Bayar Üniversitesi***, (2020).

33. Goeuriot, P., Fillit, R., Thevenot, F., Driver, J. H., And Bruyas, H., "The Influence Of Alloying Element Additions On The Boriding Of Steels", ***Materials Science And Engineering***, 55 (1): 9–19 (1982).

34. Lin, H. R. And Cheng, G.-H., "Hardenability Effect Of Boron On Carbon Steels", Materials Science And Technology, 855–859 (1987).

35. Tsipas, D. N. And Rus, J., "Boronizing Of Alloy Steels", Journal Of Materials Science Letters, .

36. Permyakov, V. G., Yakovchuk, Y. E., Cherepin, V. T., Amirkhanova, T. V., And Maifet, Y. P., "Effect Of Silicon On Formation Of Boride Coatings", ***Metal Science And Heat Treatment***, 15 (3): 251–253 (1973).

37. Fichtl, W., "Boronizing And Its Practical Applications", ***Materials & Design***, 2 (6): 276–286 (1981).

38. Tarakci, M., Gencer, Y., And Calik, A., "The Pack-Boronizing Of Pure Vanadium Under A Controlled Atmosphere", ***Applied Surface Science***, 256 (24): 7612–7618 (2010).

39. Kayali, Y., "Investigation Of Diffusion Kinetics Of Borided Aisi P20 Steel In Micro-Wave Furnace", ***Vacuum***, 121: 129–134 (2015).

40. Dearnley, P. And Bell, T., "Engineering The Surface With Boron Based Materials", ***Surface Engineering***, 1: 203–217 (1985).

41. Öztürk, K., "Plastik Kalip Çeliklerinin Korozyona Karşi Korunmasinda Kutu Borlama İşleminin Etkileri", Yüksek Lisans, ***Dokuz Eylül Üniversitesi***, (2021).

42. Genel, K., Ozbek, I., And Bindal, C., "Kinetics Of Boriding Of Aisi W1 Steel", ***Materials Science And Engineering: A***, 347 (1): 311–314 (2003).

43. Sen, S., Sen, U., And Bindal, C., "The Growth Kinetics Of Borides Formed On Boronized Aisi 4140 Steel", ***Vacuum***, 77: 195–202 (2005).

44. Sen, S., Özbek, İ., Sen, U., And Bindal, C., "Mechanical Behavior Of Borides Formed On Borided Cold Work Tool Steel", ***Surface And Coatings Technology***, 135: 173–177 (2001).

45. Carbucicchio, M. And Sambogna, G., "Influence Of Chromium On Boride Coatings Produced On Iron Alloys", ***Thin Solid Films***, 126: 299–305 (1985).

46. Han, S. H. And Chun, J. S., "A Study On The Electroboronizing Of Steel By Superimposed Cyclic Current", ***Journal Of Materials Science***, 15 (6): 1379–1386 (1980).

47. Lovshenko, F., Vysotskii, V., .Voroshnin, L., And Lovshenko, Z., "Diffusional Boronizing Of Sintered Steels", ***Powder Metallurgy And Metal Ceramics***, 17: 113–115 (1978).

48. Albayrak, M. G., "Düşük Karbonlu Yüksek Mukavemetli Çeliklerde Borlama", Doktora, ***Firat Üniversitesi***, (2021).

49. Çali, T., "Inconel 718 Süper Alaşiminin Farkli Yöntemlerle Borlanmasi", Yüksek Lisans, ***Afyon Kocatepe Üniversitesi***, (2021).

50. Campos-Silva, I., Balankin, A. S., Sierra, A. H., López-Perrusquia, N., Escobar-Galindo, R., And Morales-Matamoros, D., "Characterization Of Rough Interfaces Obtained By Boriding", ***Applied Surface Science***, 255 (5, Part 2): 2596–2602 (2008).

51. Linial, A. V. And Lavella, J. P., "Proceses For Obtaining Increased Metal Hardness And Reduce Friction Properties By Boronizing", ***Industrial Heating***, (1974).

52. Ergun, Y., Güneş, İ., Erdoğan, M., And Cankaya, N., "Effect Of Boriding Treatment On The Corrosion Behavior Of Steels", ***Journal Of Nanoscience And Nanotechnology***, 17 (12): 8946–8951 (2017).

53. Liszewski, M., Kasprzycka, E., Krupicz, B., And Tarasiuk, W., "The Analysis Of The Selected Processes Of Thermo Chemical Heat Treatment Of 20mncr5 Steel In The Context Of Abrasive Wear", ***Tribologia International***, (269(5)): 183–193 (2016).

54. Krumes, D., Stubičar, M., Kladarić, I., Milinović, A., And Ducu, C., "Improvement Of Surface Layer Properties Of Some Constructional Steels Induced By Applying Thermodiffusional Duplex Treatment", ***Int. J. Of Microstructure And Materials Properties***, 6 (5): 425–434 (2011).

55. López Perrusquia, N., Doñu Ruiz, M., García Bustos, E. D., Flores, M., Calderón, G. M., And Torres San Miguel, C., "Duplex Surface Treatment On Microalloy Steels By Dehydrated Paste Pack Boriding And Pack Carburizing", ***Materials Letters***, 280: 128573 (2020).

ÖZGEÇMİŞ

Nurullah ŞAHİN; ilk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladı. Karabük Anadolu İmam Hatip Lisesi ’nden mezun oldu. 2016 yılında Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü’nde öğrenime başlayıp 2020 yılında bölümü birincilikle bitirerek mezun oldu. 2020 yılında Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü’nde başlamış olduğu yüksek lisans programını Karabük Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü’nde tamamladı. Yüksek lisans eğitimi sürecinde Çağ Çelik Demir ve Çelik Endüstri Anonim Şirketinde Üretim Mühendisi olarak çalıştı. Şuan TADD (Tüm Afrika’nın Dostları Derneği) Karabük Temsilciliği Koordinatörü olarak görev yapmaktadır.