

**BOR KARBÜR KAPLANMIŞ AISI 8620 VE HARDOX 400
ÇELİKLERİNİN ABRASİV AŞINMA DAVRANIŞLARININ
İNCELENMESİ**

Mehmet TABUR

**DOKTORA TEZİ
ENDÜSTRİYEL TEKNOLOJİ EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**EYLÜL 2008
ANKARA**

**BOR KARBÜR KAPLANMIŞ AISI 8620 VE HARDOX 400
ÇELİKLERİNİN ABRASİV AŞINMA DAVRANIŞLARININ
İNCELENMESİ**

Mehmet TABUR

**DOKTORA TEZİ
ENDÜSTRİYEL TEKNOLOJİ EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**EYLÜL 2008
ANKARA**

Mehmet TABUR tarafından hazırlanan BOR KARBÜR KAPLANMIŞ AISI 8620 VE HARDOX 400 ÇELİKLERİNİN ABRASİV AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ adlı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Mahmut İZCİLER

Tez Danışmanı, Endüstriyel Teknoloji Eğitimi A D.



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Endüstriyel Teknoloji Eğitimi Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Halis ÇELİK

Metal Eğitimi Anabilim Dalı, Fırat Ü.

Prof. Dr. Mahmut İZCİLER

Endüstriyel Teknoloji Eğitimi Anabilim Dalı, G. Ü.

Prof. Dr. H. Güçlü YAVUZCAN

Endüstriyel Teknoloji Eğitimi Anabilim Dalı, G. Ü.

Prof. Dr. Adem KURT

Metal Eğitimi Anabilim Dalı, G. Ü.

Prof. Dr. Ramazan ÇITAK

Metal Eğitimi Anabilim Dalı, G. Ü.



Tarih : 18 / 09 /2008

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nermin ERTAN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Mehmet TABUR

**BOR KARBÜR KAPLANMIŞ AISI 8620 VE HARDOX 400
ÇELİKLERİNİN ABRASİV AŞINMA DAVRANIŞLARININ
İNCELENMESİ
(Doktora Tezi)**

Mehmet TABUR

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
EYLÜL 2008**

ÖZET

Bu çalışmada numune olarak kepçe dişleri, kırıcılar ve kamyon kasalarının üretiminde kullanılan aşınmaya dayanıklı Hardox 400 çeliği ile dişlilerin üretiminde yaygın olarak kullanılan AISI 8620 sementasyon çelikleri borlanarak incelenmiştir. Borlama işlemi katı ortamda yapılmıştır. Borlama malzemesi olarak ticari şekilde piyasada bulunan EKabor® 2 tozu kullanılmıştır. Borlama ısıl işlemi sırası ile 2, 4 ve 6 saat sürelerde 850 °C, 900 °C ve 950 °C sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. Farklı süre ve sıcaklıklarda borlanan numunelerin abrasiv aşınma davranışları, borür katman kalınlıkları, mikro yapı ve mikro sertlikleri ile elektrik iletkenlikleri incelenmiştir. İşlem sıcaklık ve süresine bağlı olarak borür katmanının derinliği 70 µm ile 280 µm arasında değişmiştir. Çelik ana malzemelerin üzerinde oluşan borürlerin düzgün dallı bir morfolojiye sahip olduğu SEM ve optik incelemeler sonucu anlaşılmıştır. Borürlerin varlığı (FeB, Fe₂B) x-ışını kırınım analizi ile teyit edilmiştir. Bor katmanı ve alaşım elementlerinin dağılımı enerji ayrışma sistemli x-ışını spektroskopisi (EDS) yöntemi ile belirlenmiştir. Aşınma deneyleri pim disk (pin-on disk) abrasiv aşınma test cihazı kullanılarak yapılmıştır. Aşınma testlerinde 80 ve 120 mesh alüminyum oksit (Al₂O₃) aşındırıcı zımparalar kullanılmış ve numuneler 10, 20 ve 30 N yükler altında, 20 m. mesafede aşındırılmıştır. Test sonuçlarında borlanarak yüksek sertlik

kazandırılmış numunelerin aşınma direncinin de yüksek olduğu belirlenmiştir. En iyi abrasiv aşınma direncini 850 °C de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliği göstermiştir.

Bilim kodu : 705.3.014

Anahtar kelimeler : Abrasiv aşınma, Borlama, AISI 8620 sementasyon çeliği, Hardox 400 çeliği.

Sayfa adedi : 192

Tez yöneticisi : Prof. Dr. Mahmut İZCİLER

**EXAMINATION OF THE ABRASIVE WEAR BEHAVIOUR OF BORON
CARBIDE COATED AISI 8620 AND HARDOX 400 STEELS**

(Ph. D. Thesis)

Mehmet TABUR

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
SEPTEMBER 2008**

ABSTRACT

In this study, hardox 400 steels and AISI 8620 cementation steels, respectively used in manufacture of excavator tips, crushers and truck trailers, and in gear manufacturing were boronized and studied. The boronizing procedure was carried out in solid state. Commercially available EKabor ® 2 powder was used as the boronizing agent. The boronizing procedure was carried out for 2, 4 and 6 hours at 850°C, 900°C and 950°C. The abrasive wear behaviour, boride layer thickness, micro structure, micro hardness and conductivity characteristics of both steel specimens boronized for different durations and under different temperatures were examined. The boride layer thickness varied between 70 µm and 280 µm depending on the duration and temperature of the boronizing procedure. The boride formation on the steel substrate was observed to have a uniform dendritic morphology after SEM and optical testing. The boride formation (FeB, Fe₂B) was also verified with x-ray refraction analysis. The boride layer and alloy element distributions were studied using the energy dispersion system x-ray spectroscopy (EDS) method. The wear experiments were carried out using a pin-on disk abrasive wear testing device. 80 and 120 mesh aluminum oxide (Al₂O₃) abrasive materials were used during the wear tests and the specimens were tested under 10, 20 and 30 N loads at a displacement of 20 meters. The test results show that the wear resistance of materials boronized for maximum hardness was the highest. The best wear

resistance was observed in the Hardox 400 steel specimen boronized for 6 hours at 850°C.

Science Code : 705.3.014

Key Words : Abrasive wear, Boronizing, AISI 8620 cementation steel, Hardox 400 steel.

Page Number : 192

Adviser : Prof. Dr. Mahmut İZCİLER

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamda kıymetli fikirleriyle çalışmalarımı yönlendiren ve her konuda beni destekleyip yardımlarını esirgemeyerek yol gösteren sayın hocam Prof. Dr. Mahmut İZCİLER' e en içten teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim. Bu tezle ilgili aşınma deney cihazı ve aşınma deneylerinde desteğini gördüğüm Teknik Eğitim Fakültesi Döküm Bölümü Ana Bilim Dalı Başkanı Doç. Dr. Ferhat GÜL' e, kıymetli fikirleri ve tecrübeleri ile çalışmalarına destek veren, beni aydınlatan hocam Prof. Dr. H.Güçlü YAVUZCAN ve Prof. Dr. Adem KURT' a, tezin hazırlanmasında yakın desteğini gördüğüm Teknik Eğitim Fakültesi öğretim üyelerinden hocam Yrd. Doç. Dr. Behçet GÜLENÇ' e, numunelerin borlanması yardımlarını esirgemeyen VEZNELİ A.Ş. Fabrikasının çalışanlarına, tezin yazılmasında yardımını gördüğüm elektrik mühendisi Bülent SARIKAYA' ya ve tez çalışmalarında beni yalnız bırakmayan, her zaman moral kaynağım olan eşim, kızım ve 2008 yılı OKS sınavında Türkiye yedincisi, Ankara birincisi olarak bizleri çok mutlu eden oğluma teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Bor elementinin özellikleri	14
Çizelge 3.2. Bor kimyasal ve alaşımlarının kullanım alanları	16
Çizelge 4.1. Borlanmış çeliklerin sertlik değerlerinin diğer işlemlerle ve sert malzemelerle karşılaştırılması	25
Çizelge 4.2. EKabor borlama ürünleri.....	28
Çizelge 4.3. Katı ortam borlamada kullanılan bazı bor kaynakları.....	30
Çizelge 4.4. Koruyucu gaz atmosferin özellikleri.....	32
Çizelge 4.5. Sıvı ortam borlamasında kullanılan bazı bor kaynakları ve özellikleri.....	34
Çizelge 4.6. Gaz halindeki bor bileşikleri ve bazı özellikleri	38
Çizelge 4.7. Fe ₂ B ve FeB fazlarının tipik özellikleri.....	47
Çizelge 4.8. FeB ve Fe ₂ B fazı içerisinde bor difüzyonu için gerekli aktivasyon enerjileri.....	49
Çizelge 5.1. Borlanmış ve kromlanmış bazı çeliklerin sürtünme katsayıları.....	60
Çizelge 7.1. Ana malzeme olarak kullanılan AISI 8620 çeliğinin kimyasal analizi.....	63
Çizelge 7.2. Ana malzeme olarak kullanılan Hardox 400 çeliğinin kimyasal analizi.....	63
Çizelge 8.1. Borlanmış Hardox 400 ve AISI 8620 çeliklerinin bor katman kalınlıkları.....	93

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 4.1. Borlama işleminde kullanılan a) kutu, b) fırınların şematik görüşünü	30
Şekil 4.2. Gaz borlama ünitesi.....	37
Şekil 4.3. Endüstriyel uygulamalarda kullanılan plazma borlama ünitesi.....	39
Şekil 4.4. Fe-B ikili denge diyagramı	42
Şekil 4.5. Borür tabakalarında oluşan fazlar.....	43
Şekil 4.6. Borlanmış C 45 çeliğinin borür tabakası kalınlığının işlem süresi ve sıcaklığa bağlı değişimi.....	44
Şekil 4.7. Borür tabakasının şematik olarak gösterilişi.....	45
Şekil 4.8. Borlama sırasında borür tabaksının oluşum aşamaları.....	46
Şekil 4.9. Çeliklerde alaşım elementlerinin borür tabaka kalınlığına etkisi.....	50
Şekil 4.10. Çeliklerde borür tabakası boyunca alaşım elementlerinin şematik olarak dağılımı	54
Şekil 5.6. Çeşitli yayınma işlemleri uygulanmış EN1A çeliğinin aşınma davranışları	59
Şekil 7.1. a) Numune kutusunun hazırlanması b) Numunenin fırınlanması ..	64
Şekil 7.2. a) Çentik darbe deney numunesi. b) Numunenin darbe deneyinin gösterilmesi.....	67
Şekil 7.3. Aşınma cihazının şeması.....	68
Şekil 8.1. Borlanmamış AISI 8620 çeliğinin x400 büyütme SEM görüntüsü.....	69
Şekil 8.2. Borlanmamış Hardox 400 çeliğinin x400 büyütme SEM görüntüsü.....	70
Şekil 8.3. 850°C’de 2 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin kenardan x400 büyütme SEM görüntüsü	71
Şekil 8.4. 850°C’de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin kenardan x400 büyütme SEM görüntüsü	72

Şekil	Sayfa
Şekil 8.5. 900°C’de 2 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin kenardan x400 büyütme görüntüsü	73
Şekil 8.6. 900°C’de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin kenardan x400 büyütme görüntüsü	74
Şekil 8.7. 950°C’de 2 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin kenardan x400 büyütme görüntüsü	75
Şekil 8.8. 950°C’de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin kenardan x400 büyütme görüntüsü	75
Şekil 8.9. 950°C’de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin ortadan x400 büyütme görüntüsü	76
Şekil 8.10. 950°C’de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin kenara yakın x400 büyütme görüntüsü	77
Şekil 8.11. 850°C’de 2 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin kenardan x400 büyütme görüntüsü	78
Şekil 8.12. 850°C’de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin kenardan x400 büyütme görüntüsü	79
Şekil 8.13. 900°C’de 2 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin kenardan x400 büyütme görüntüsü	80
Şekil 8.14. 900°C’de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin kenardan x400 büyütme görüntüsü	80
Şekil 8.15. 950°C’de 2 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin kenardan x400 büyütme görüntüsü.....	81
Şekil 8.16. 950°C’de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin kenardan x400 büyütme görüntüsü	82
Şekil 8.17. 950°C’de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin ortadan x400 büyütme görüntüsü	83
Şekil 8.18: 950°C’de 6 saat borlanmış 8620 çeliğinin kenara yakın yerden (geçiş bölgesi) x400 büyütme görüntüsü	83
Şekil 8.19. 850 °C’de 2, 4 ve 6 saat borlanmış hardox 400 numunelerin mikro sertlikleri.....	86

Şekil	Sayfa
Şekil 8.20. 900 °C’de 2, 4 ve 6 saat borlanmış hardox 400 numunelerin mikro sertlikleri.....	86
Şekil 8.21. 950 °C’de 2, 4 ve 6 saat borlanmış hardox 400 numunelerin mikro sertlikleri.....	87
Şekil 8.22. 850 °C’de 2, 4 ve 6 saat borlanmış AISI 8620 numunelerin mikro sertlikleri.....	88
Şekil 8.23. 900 °C’de 2, 4 ve 6 saat borlanmış AISI 8620 numunelerin mikro sertlikleri.....	88
Şekil 8.24. 950 °C’de 2, 4 ve 6 saat borlanmış AISI 8620 numunelerin mikro sertlikleri.....	89
Şekil 8.25. 850°C’de a) 2, b) 4, c) 6 saat borlanmış hardox 400 numunelerin kenardan x100 büyötmeli göröntüsü.....	91
Şekil 8.26. 900°C’de a) 2, b) 4, c) 6 saat borlanmış hardox 400 numunelerin kenardan x100 büyötmeli göröntüsü.....	91
Şekil 8.27. 950°C’de a) 2, b) 4, c) 6 saat borlanmış hardox 400 numunelerin kenardan x100 büyötmeli göröntüsü.....	91
Şekil 8.28. 850°C’de a) 2, b) 4, c) 6 saat borlanmış AISI 8620 numunelerin x100 büyötmeli göröntüsü	92
Şekil 8.29. 900°C’de a) 2, b) 4, c) 6 saat borlanmış AISI 8620 numunelerin x100 büyötmeli göröntüsü	92
Şekil 8.30. 950°C’de a) 2, b) 4, c) 6 saat borlanmış AISI 8620 numunelerin x100 büyötmeli göröntüsü	92
Şekil 8.31. 850 °C , 900 °C , 950 °C ’de 2, 4 ve 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin borür katman kalınlıklarının karşılaştırılması	94
Şekil 8.32. 850 °C , 900 °C , 950 °C ’de 2, 4 ve 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin borür katman kalınlıklarının karşılaştırılması	94
Şekil 8.33. 850 °C , 900 °C , 950 °C ’de 2, 4 ve 6 saat borlanmış hardox 400 çeliğinin iletkenlik değęerlerinin karşılaştırılması.....	96
Şekil 8.34. 850 °C , 900 °C , 950 °C ’de 2, 4 ve 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin iletkenlik değęerlerinin karşılaştırılması.....	96

Şekil	Sayfa
Şekil 8.35. Borlanmamış Hardox 400 çelik numunenin x-ışını analizi.....	98
Şekil 8.36. Borlanmamış AISI 8620 çelik numunenin x-ışını	98
Şekil 8.37. 850 °C’de 6 saat borlanmış Hardox 400 çelik numunenin x-ışını analizi.....	99
Şekil 8.38. 900 °C’de 6 saat borlanmış Hardox 400 çelik numunenin x-ışını analizi.....	100
Şekil 8.39. 950 °C’de 6 saat borlanmış Hardox 400 çelik numunenin x-ışını analizi.....	100
Şekil 8.40. Demir-Bor denge diyagramı.....	101
Şekil 8.41. 950°C’de 6 saat borlanmış hardox 400 çeliğinin borlu yüzeyinin 150 µm aşındırıldıktan sonraki x-ışını analizi.....	102
Şekil 8.42. 950°C’de 6 saat borlanmış hardox 400 çeliğinin borlu yüzeyinin 250 µm aşındırıldıktan sonraki x-ışını analizi.....	102
Şekil 8.43. 950 °C’de 6 saat borlanmış AISI 8620 çelik numunenin x-ışını analizi.....	103
Şekil 8.44. 950°C’de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin borlu yüzeyinin 150 µm aşındırıldıktan sonraki x-ışını analizi.....	104
Şekil 8.45. 950°C’de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin borlu yüzeyinin 250 µm aşındırıldıktan sonraki x-ışını analizi.....	104
Şekil 8.46 850 °C’ de 2 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin mikroyapısının EDS yapılmış 1. noktanın analizi.....	106
Şekil 8.47. 850 °C’ de 2 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin mikroyapısının EDS yapılmış 2. noktanın analizi.....	107
Şekil 8.48. 850 °C’ de 2 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin mikroyapısının EDS yapılmış 3. noktanın analizi.....	107
Şekil 8.49. 850 °C’ de 2 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin mikroyapısının EDS yapılmış 4. noktanın analizi.....	108
Şekil 8.50. 950 °C’ de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin mikroyapısının EDS yapılmış 1. noktanın analizi.....	109

Şekil	Sayfa
Şekil 8.51. 950 °C’ de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin mikroyapısının EDS yapılmış 2. noktanın analizi.....	110
Şekil 8.52. 950 °C’ de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin mikroyapısının EDS yapılmış 3. noktanın analizi.....	110
Şekil 8.53. 950 °C’ de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin mikroyapısının EDS yapılmış 4. noktanın analizi.....	111
Şekil 8.54. 850 °C’ de 2 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin mikroyapısının EDS yapılmış 1. noktanın analizi.....	112
Şekil 8.55. 850 °C’ de 2 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin mikroyapısının EDS yapılmış 2. noktanın analizi.....	113
Şekil 8.56. 850 °C’ de 2 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin mikroyapısının EDS yapılmış 3. noktanın analizi.....	113
Şekil 8.57. 850 °C’ de 2 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin mikroyapısının EDS yapılmış 4. noktanın analizi.....	114
Şekil 8.58. 850 °C’ de 2 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin mikroyapısının EDS yapılmış 5. noktanın analizi.....	114
Şekil 8.59. 850 °C’ de 2 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin mikroyapısının EDS yapılmış 6. noktanın analizi.....	115
Şekil 8.60. 950 °C’ de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin mikroyapısının EDS yapılmış 1. noktanın analizi.....	116
Şekil 8.61. 950 °C’ de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin mikroyapısının EDS yapılmış 2. noktanın analizi.....	117
Şekil 8.62. 950 °C’ de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin mikroyapısının EDS yapılmış 3. noktanın analizi.....	117
Şekil 8.63. 950 °C’ de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin mikroyapısının EDS yapılmış 4. noktanın analizi.....	118
Şekil 8.64. 950 °C’ de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin mikroyapısının EDS yapılmış 5. noktanın analizi.....	118
Şekil 8.65. 950 °C’ de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin mikroyapısının EDS yapılmış 6. noktanın analizi.....	119

Şekil	Sayfa
Şekil 8.66. Farklı süre ve sıcaklıkta borlanmış Hardox 400 çelik numunelerin çentik darbe deneyi sonuçlarının gösterilmesi.....	120
Şekil 8.67. Farklı süre ve sıcaklıkta borlanmış AISI 8620 çelik numunelerin çentik darbe deneyi sonuçlarının gösterilmesi.....	120
Şekil 8.68. 850 °C’ de 2 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin x250 büyütme kırık yüzeyden SEM görüntüsü	122
Şekil 8.69. 850 °C’ de 2 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin x1000 büyütme kırık yüzeyden SEM görüntüsü	122
Şekil 8.70. 850 °C’ de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin x250 büyütme kırık yüzeyden SEM görüntüsü	123
Şekil 8.71. 850 °C’ de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin x1000 büyütme kırık yüzeyden SEM görüntüsü	124
Şekil 8.72. 950 °C’ de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin x1000 büyütme kırık yüzeyden SEM görüntüsü	125
Şekil 8.73. 950 °C’ de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin x1000 büyütme kırık yüzeyden SEM görüntüsü	125
Şekil 8.74. 850 °C’ de 2 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin x250 büyütme kırık yüzeyden SEM görüntüsü	126
Şekil 8.75. 850 °C’ de 2 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin x1000 büyütme kırık yüzeyden SEM görüntüsü	127
Şekil 8.76. 850 °C’ de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin x250 büyütme kırık yüzeyden SEM görüntüsü	128
Şekil 8.77. 850 °C’ de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin x650 büyütme kırık yüzeyden SEM görüntüsü	128
Şekil 8.78. 950 °C’ de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin x250 büyütme kırık yüzeyden SEM görüntüsü	129
Şekil 8.79. 950 °C’ de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin x1000 büyütme kırık yüzeyden SEM görüntüsü	130
Şekil 8.80. Borlanmamış hardox 400 çeliğinin 80 ve 120 mesh Al ₂ O ₃ zımparada aşınma durumu	131

Şekil	Sayfa
Şekil 8.81. Borlanmamış AISI 8620 çeliğinin 80 ve 120 mesh Al_2O_3 zımparada aşınma durumu	132
Şekil 8.82. 850 °C de farklı sürelerde borlanmış Hardox 400 Çeliğinin 80 mesh Al_2O_3 zımparada aşınma durumu.....	133
Şekil 8.83. 850 °C de farklı sürelerde borlanmış Hardox 400 Çeliğinin 120 mesh Al_2O_3 zımparada aşınma durumu.....	133
Şekil 8.84. 900 °C de farklı sürelerde borlanmış Hardox 400 Çeliğinin 80 mesh Al_2O_3 zımparada aşınma durumu.....	134
Şekil 8.85. 900 °C de farklı sürelerde borlanmış Hardox 400 Çeliğinin 120 mesh Al_2O_3 zımparada aşınma durumu.....	134
Şekil 8.86. 950 °C’de farklı sürelerde borlanmış Hardox 400 Çeliğinin 80 mesh Al_2O_3 zımparada aşınma durumu.....	135
Şekil 8.87. 950 °C’de farklı sürelerde borlanmış Hardox 400 Çeliğinin 120 mesh Al_2O_3 zımparada aşınma durumu.....	135
Şekil 8.88. 850 °C de farklı sürelerde borlanmış AISI 8620 çeliğinin 80 mesh Al_2O_3 zımparada aşınma durumu.....	136
Şekil 8.89. 850 °C de farklı sürelerde borlanmış AISI 8620 çeliğinin 120 mesh Al_2O_3 zımparada aşınma durumu.....	137
Şekil 8.90. 900 °C de farklı sürelerde borlanmış AISI 8620 çeliğinin 80 mesh Al_2O_3 zımparada aşınma durumu.....	137
Şekil 8.91. 900 °C de farklı sürelerde borlanmış AISI 8620 çeliğinin 120 mesh Al_2O_3 zımparada aşınma durumu.....	138
Şekil 8.92. 950 °C de farklı sürelerde borlanmış AISI 8620 çeliğinin 80 mesh Al_2O_3 zımparada aşınma durumu.....	138
Şekil 8.93. 950 °C de farklı sürelerde borlanmış AISI 8620 çeliğinin 120 mesh Al_2O_3 zımparada aşınma durumu.....	139
Şekil 8.94. Borlanmamış Hardox 400 ve AISI 8620 çeliklerinin 80 ve 120 Mesh Al_2O_3 zımparada aşınma oranlarının karşılaştırılması.	140
Şekil 8.95. Farklı süre ve sıcaklıklarda borlanmış Hardox 400 ve AISI 8620 çeliklerinin 120 Mesh Al_2O_3 zımparada aşınma oranlarının karşılaştırılması.	141

Şekil	Sayfa
Şekil 8.96. Farklı süre ve sıcaklıklarda borlanmış Hardox 400 ve AISI 8620 çeliklerinin 80 Mesh Al_2O_3 zımparada aşınma oranlarının karşılaştırılması.....	142
Şekil 8.97. Borlanmamış hardox 400 çeliğinin 120 mesh Al_2O_3 zımparada 10N yük altında aşınmış yüzeyinin X 200 büyütme görüntüsü.....	144
Şekil 8.98. Borlanmamış hardox 400 çeliğinin 80 mesh Al_2O_3 zımparada 10N yük altında aşınmış yüzeyinin X 200 büyütme görüntüsü.....	144
Şekil 8.99. Borlanmamış hardox 400 çeliğinin 120 mesh Al_2O_3 zımparada 30N yük altında aşınmış orta yüzeyinin X 200 büyütme görüntüsü.....	145
Şekil 8.100. Borlanmamış hardox 400 çeliğinin 120 mesh Al_2O_3 zımparada 30N yük altında aşınmış kenar yüzeyinin X 200 büyütme görüntüsü.....	146
Şekil 8.101. Borlanmamış hardox 400 çeliğinin 80 mesh Al_2O_3 zımparada 30N yük altında aşınmış orta yüzeyinin X 200 büyütme görüntüsü	146
Şekil 8.102. Borlanmamış hardox 400 çeliğinin 80 mesh Al_2O_3 zımparada 30N yük altında aşınmış kenar yüzeyinin X 200 büyütme görüntüsü.....	147
Şekil 8.103. Borlanmamış AISI 8620 çeliğinin 120 mesh Al_2O_3 zımparada 10N yük altında aşınmış yüzeyinin X 200 büyütme görüntüsü.....	148
Şekil 8.104. Borlanmamış AISI 8620 çeliğinin 80 mesh Al_2O_3 zımparada 10N yük altında aşınmış yüzeyinin X 200 büyütme görüntüsü.....	148
Şekil 8.105. Borlanmamış AISI 8620 çeliğinin 120 mesh Al_2O_3 zımparada 10N yük altında aşınmış orta yüzeyinin X 200 büyütme görüntüsü.....	149
Şekil 8.106. Borlanmamış AISI 8620 çeliğinin 120 mesh Al_2O_3 zımparada 10N yük altında aşınmış kenar yüzeyinin X 200 büyütme görüntüsü.....	150
Şekil 8.107. Borlanmamış AISI 8620 çeliğinin 80 mesh Al_2O_3 zımparada 10N yük altında aşınmış orta yüzeyinin X 200 büyütme görüntüsü	150
Şekil 8.108. Borlanmamış AISI 8620 çeliğinin 80 mesh Al_2O_3 zımparada 10N yük altında aşınmış kenar yüzeyinin X 200 büyütme görüntüsü.....	151
Şekil 8.109. 850 °C’de 2 saat borlanmış hardox 400 çeliğinin 120 mesh Al_2O_3 zımparada 30N yük altında aşınmış orta yüzeyinin X 200 büyütme görüntüsü.....	152

Şekil	Sayfa
Şekil 8.110. 850 °C’de 2 saat borlanmış hardox 400 çeliğinin 120 mesh Al_2O_3 zımparada 30N yük altında aşınmış kenar yüzeyinin X 200 büyütmeli görüntüsü.....	153
Şekil 8.111. 850 °C’de 2 saat borlanmış hardox 400 çeliğinin 80 mesh Al_2O_3 zımparada 30N yük altında aşınmış orta yüzeyinin X 200 büyütmeli görüntüsü.....	153
Şekil 8.112. 850 °C’de 2 saat borlanmış hardox 400 çeliğinin 80 mesh Al_2O_3 zımparada 30N yük altında aşınmış kenar yüzeyinin X 200 büyütmeli görüntüsü.....	154
Şekil 8.113. 850 °C’de 6 saat borlanmış hardox 400 çeliğinin 120 mesh Al_2O_3 zımparada 10N yük altında aşınmış yüzeyinin X 200 büyütmeli görüntüsü.....	155
Şekil 8.114. 850 °C’de 6 saat borlanmış hardox 400 çeliğinin 80 mesh Al_2O_3 zımparada 10N yük altında aşınmış yüzeyinin X 200 büyütmeli görüntüsü.....	155
Şekil 8.115. 850 °C’de 6 saat borlanmış hardox 400 çeliğinin 120 mesh Al_2O_3 zımparada 30N yük altında aşınmış orta yüzeyinin X 200 büyütmeli görüntüsü.....	156
Şekil 8.116. 850 °C’de 6 saat borlanmış hardox 400 çeliğinin 120 mesh Al_2O_3 zımparada 30N yük altında aşınmış kenar yüzeyinin X 200 büyütmeli görüntüsü.....	157
Şekil 8.117. 850 °C’de 6 saat borlanmış hardox 400 çeliğinin 80 mesh Al_2O_3 zımparada 30N yük altında aşınmış orta yüzeyinin X 200 büyütmeli görüntüsü.....	157
Şekil 8.118. 850 °C’de 6 saat borlanmış hardox 400 çeliğinin 80 mesh Al_2O_3 zımparada 30N yük altında aşınmış kenar yüzeyinin X 200 büyütmeli görüntüsü.....	158
Şekil 8.119. 950 °C’de 6 saat borlanmış hardox 400 çeliğinin 120 mesh Al_2O_3 zımparada 30N yük altında aşınmış orta yüzeyinin X 200 büyütmeli görüntüsü.....	159
Şekil 8.120. 950 °C’de 6 saat borlanmış hardox 400 çeliğinin 120 mesh Al_2O_3 zımparada 30N yük altında aşınmış kenar yüzeyinin X 200 büyütmeli görüntüsü.....	159

Şekil	Sayfa
Şekil 8.121. 950 °C’de 6 saat borlanmış hardox 400 çeliğinin 80 mesh Al_2O_3 zımparada 30N yük altında aşınmış orta yüzeyinin X 200 büyütme görüntüsü.....	160
Şekil 8.122. 950 °C’de 6 saat borlanmış hardox 400 çeliğinin 80 mesh Al_2O_3 zımparada 30N yük altında aşınmış kenar yüzeyinin X 200 büyütme görüntüsü.....	160
Şekil 8.123. 850 °C’de 2 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin 120 mesh Al_2O_3 zımparada 30N yük altında aşınmış orta yüzeyinin X 200 büyütme görüntüsü.....	162
Şekil 8.124. 850 °C’de 2 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin 120 mesh Al_2O_3 zımparada 30N yük altında aşınmış kenar yüzeyinin X 200 büyütme görüntüsü.....	162
Şekil 8.125. 850 °C’de 2 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin 80 mesh Al_2O_3 zımparada 30N yük altında aşınmış orta yüzeyinin X 200 büyütme görüntüsü.....	163
Şekil 8.126. 850 °C’de 2 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin 80 mesh Al_2O_3 zımparada 30N yük altında aşınmış kenar yüzeyinin X 200 büyütme görüntüsü.....	163
Şekil 8.127. 850 °C’de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin 120 mesh Al_2O_3 zımparada 10N yük altında aşınmış yüzeyinin X 200 büyütme görüntüsü.....	164
Şekil 8.128. 850 °C’de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin 80 mesh Al_2O_3 zımparada 10N yük altında aşınmış yüzeyinin X 200 büyütme görüntüsü.....	165
Şekil 8.129. 850 °C’de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin 120 mesh Al_2O_3 zımparada 30N yük altında aşınmış orta yüzeyinin X 200 büyütme görüntüsü.....	165
Şekil 8.130. 850 °C’de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin 120 mesh Al_2O_3 zımparada 30N yük altında aşınmış kenar yüzeyinin X 200 büyütme görüntüsü.....	166
Şekil 8.131. 850 °C’de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin 80 mesh Al_2O_3 zımparada 30N yük altında aşınmış orta yüzeyinin X 200 büyütme görüntüsü.....	167

Şekil	Sayfa
Şekil 8.132. 850 °C’de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin 80 mesh Al ₂ O ₃ zımparada 30N yük altında aşınmış kenar yüzeyinin X 200 büyütme görüntüsü.....	167
Şekil 8.133. 950 °C’de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin 120 mesh Al ₂ O ₃ zımparada 30N yük altında aşınmış orta yüzeyinin X 200 büyütme görüntüsü.....	168
Şekil 8.134. 950 °C’de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin 120 mesh Al ₂ O ₃ zımparada 30N yük altında aşınmış kenar yüzeyinin X 200 büyütme görüntüsü.....	169
Şekil 8.135. 950 °C’de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin 80 mesh Al ₂ O ₃ zımparada 30N yük altında aşınmış orta yüzeyinin X 200 büyütme görüntüsü.....	169
Şekil 8.136. 950 °C’de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin 80 mesh Al ₂ O ₃ zımparada 30N yük altında aşınmış kenar yüzeyinin X 200 büyütme görüntüsü.....	170

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 8.1. 850 °C’ de 2 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin mikroyapısının EDS yapılmış noktaların x250 büyütmede SEM görüntüsü	106
Resim 8.2. 950 °C’ de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin mikroyapısının EDS yapılmış noktaların x250 büyütmede SEM görüntüsü	109
Resim 8.3. 850 °C’ de 2 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin mikroyapısının EDS yapılmış noktaların x250 büyütmede SEM görüntüsü	112
Resim 8.4. 950 °C’ de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin mikroyapısının EDS yapılmış noktaların x250 büyütmede SEM görüntüsü.....	116

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
FeB	Demir Borür
B₂H₆	Diboran
B₄C	Bor Karbür
F	Aşınma Yüzeyi
S	Kayma Yolu
Wa	Aşınma Oranı
Wr	Aşınma Direnci

Kısaltmalar

CPS	Saniyedeki ışıma şiddeti birimi.
EDS	Enerji Dağılımlı X-Işınları Spetrokobisi
Ekabor ®2	Katı borlamada kullanılan ve patentlerle korunan bor alaşımları tozu.
SEM	Taramalı elektron mikroskobu.
SIEMENS	İletkenlik birimi ($1S=1\Omega^{-1}$).

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiv
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xxv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xxvi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	4
3. BOR ELEMENTİ HAKKINDA GENEL BİLGİLER.....	14
3.1. Bor'un Tarihçesi	15
3.2. Bor'un Kullanım Alanları	16
3.2.1. Cam ve cam elyafı sanayi.....	18
3.2.2. Seramik ve emaye sanayi	19
3.2.3. Temizleme ve beyazlatma sanayi	19
3.2.4. Tekstil sanayi.....	19
3.2.5. Metalurji sanayi	19
3.2.6. Tarım sanayi	20
3.2.7. Savunma sanayi	20
3.2.8. Tıp.....	20
3.2.9. Otomobil sanayi.....	20

Sayfa

3.2.10. Makine sanayi.....	20
3.2.11. Koruyucu	21
3.2.12. Kimya sanayi	21
3.2.13. Kağıt sanayi	21
3.2.14. İnşaat ve çimento sektörü	21
3.2.15. İletişim araçları	21
3.2.16. İlaç ve kozmetik sanayi	21
3.2.17. Enerji sektörü.....	21
3.2.18. Elektronik ve bilgisayar sanayi.....	22
4. BORLAMA VE ÖZELLİKLERİ	23
4.1. Borlama.....	23
4.1.1. Borlama işleminin avantajları	24
4.1.2. Borlama işleminin dezavantajları	26
4.2. Borlama Yöntemleri.....	27
4.2.1. Katı ortamda borlama	27
4.2.2. Sıvı ortamda borlama.....	32
4.2.3. Gaz ortamda borlama.....	37
4.2.4. Plazma ortamında yapılan borlama	39
4.3. Borlanabilen Malzemeler ve Borürlerin Genel Özellikleri.....	40
4.3.1. Fe-B ikili denge diyagramı	41
4.3.2. Borür tabakasının yapısı, bileşimi ve kalınlığı	43
4.3.3. Demir borürlerin büyüme mekanizmaları ve özellikleri	45
4.3.4. Borür tabakasının büyüme kinetiği.....	48

Sayfa

4.3.5. Borür tabakası ve arayüzey morfolojisine alaşım elementlerinin etkisi	49
5. AŞINMA	55
5.1. Aşınmanın Tanımı	55
5.2. Aşınma Deneyleri ve Ölçüm Yöntemleri	55
5.2.1. Ağırlık farkı metodu	56
5.2.2. Kalınlık farkı metodu	57
5.2.3. İz değişimi metodu	57
5.2.4. Radyoizotop metodu	58
5.3. Aşınma Mekanizmaları	58
5.4. Borlanmış Çeliklerin Aşınma Özellikleri	58
6. AISI 8620 ve HARDOX 400 ÇELİKLERİ	61
6.1. AISI 8620 Sementasyon Çeliğinin Tanımı	61
6.2. Sementasyon Çeliklerinin Özellikleri	61
6.3. Hardox 400 Çeliği	62
7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	63
7.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler	63
7.2. Metalografik Çalışmalar	65
7.3. Sertlik Ölçümleri	65
7.4. Elektrik İletkenliği	65
7.5. X-Işınları Difraksiyon Analizi	66
7.6. EDS Analizi	66
7.7. Çentik Darbe Deneyi	67
7.8. Aşınma Deneyleri	67

Sayfa

8. DENEY SONUÇLARI VE İRDELENMESİ.....	69
8.1. Metalografi Sonuçları	69
8.2. Sertlik Ölçümleri ve Borür Katmanı.....	85
8.3. Elektrik İletkenliği Sonuçları.....	95
8.4. X-Işınları Difraksiyon Analizi İncelemeleri	97
8.5. EDS Analizi İncelemeleri	105
8.6. Çentik Darbe Deneyi İncelemesi	119
8.7. Aşınma Deney Sonuçları	131
8.8. Aşınmış Yüzeylerin Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) İncelemeleri	143
9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	173
KAYNAKLAR	177
ÖZGEÇMİŞ	192

1. GİRİŞ

Dünyada son yıllardaki bilgi, iletişim, ulaşım, makine, teçhizat, donanım, üretim ve uzay teknolojisindeki olağanüstü gelişmeler yeni malzeme ve kaliteli ürünlerin arayışlarını da artırmıştır. Hızlı gelişen teknoloji, savaşlar, rekabet şartlarının gelişmesi, kaliteli ürün ihtiyacı gibi nedenlerden dolayı parça üretim yöntemleri hızlı bir şekilde gelişmek durumundadır. Özellikle her endüstri alanında çok ciddi ekonomik kayıplara neden olan aşınma mekanizması dikkatle incelenmesi gereken teknolojik öneme sahip bir konudur. Dünya sanayi her yıl, son derece lokalize olmuş birkaç milimetre aşınmaya sebep olan çeşitli aşınma olaylarından dolayı milyarlarca dolar değerindeki makine parçasını hurdaya atmaktadır. Eğer duruş kayıpları, montaj ve demontaj süreleri ve randıman kayıpları da göz önüne alınırsa bu milyarlarca dolar katlanarak daha da artar. Çünkü aşınma, endüstrinin pek çok alanındaki tesislerin ve makinelerin etkin çalışmasını azaltan, güç kayıplarını ve yedek parça kullanım oranını arttıran bir olaydır.

Aşınma yüzeylerinde oluşan malzeme taşınımı veya kaybı bu malzemelerin çalışma esnasındaki ömrünü ve çalışma performansını etkileyeceğinden ekonomik ve emniyet açısından çok önemlidir. Özellikle abrasiv aşınma endüstriyel cihazlarda malzeme kayıplarının başlıca sebebidir. Bu nedenle aşınmaya karşı daha dirençli çeliklerin işlenmesi de gittikçe önem kazanmaktadır. Çünkü çelikler bileşimleri nedeni ile özellikle abrasiv aşınmaya maruz kalan makine bileşenlerinde, mühendisliğin çeşitli alanlarında, raylar, elekler, bilyalar vb yerlerde çok geniş bir kullanım alanına sahiptir. Yüzey mühendisliğinin ana hedeflerinden biri de makine elemanlarındaki aşınmayı en aza indirerek bu elemanlardan gereksinim duyulan yararı en yüksek şekilde sağlamaktır. Çünkü malzemelerin yüzeyinde meydana gelen aşınma kayıpları makine elemanlarının istenilen etkinlikte çalışmasını engellemekte ve ciddi külfetler getirmektedir. Malzeme yüzeyindeki kütleli azalma genel olarak makine bileşenlerinin de zarar görmesine neden olmakta ve çok ciddi yapısal hasarların oluşmasına yol açmaktadır.

Yüzey işlem teknolojileri son yıllarda çok hızlı bir şekilde gelişmektedir. Yüzey işlemleri ile malzemelerin sertlik, süneklik ve yorulma gibi mekanik özellikleri, sürtünme ve aşınma gibi tribolojik özellikleri, oksidasyon ve korozyon özellikleri geliştirilmektedir. Malzemelerin yüzey sertliğini artırmak için yapılan sertleştirme işlemleri uzun yıllardır uygulanmaktadır. En yaygın olarak kullanılan nitrürasyon, karbürizasyon, sementasyon, borlama bunlardan birkaç tanesidir. Bugün modern dünyanın ilgilendiği yüzey sertleştirme konularından bir tanesi de borlamadır. Çünkü borlama işlemi demir esaslı malzemelere, demir dışı malzemelere ve toz metalurjisi ile üretilen malzemelere çok geniş bir alanda uygulanabilen bir termo-kimyasal yüzey sertleştirme işlemidir.

Modern teknolojide metal yüzeylerinin sert, aşınmaya dayanıklı, sürtünmenin en aza indirildiği, merkeze doğru yumuşak ve tok malzemelerin olması istenmektedir. İleri teknoloji malzemesi olan bor alaşımlarda özellikle çeliğin sertliğini artırıcı olarak kullanılmaktadır. Borlama işlemi aşınma ve sürtünmenin kontrolünün öncelikli öneme sahip olduğu bir çok triboloji uygulamasında en önde gelen seçeneklerden biridir. Yirminci yüzyılın başlarından itibaren çalışılmaya başlanan borlama ile çok sert, sürtünme katsayısı düşük, yüksek sıcaklıklardaki mukavemeti iyi olan ve korozyon dirençli malzeme yüzeyleri elde edilmesi mümkün olmaktadır. Bu nedenle borun en çok kullanıldığı alanlardan birisi de metal endüstrisidir.

Bu tez çalışmasında numune olarak kepçe dişleri, kırıcılar ve kamyon kasalarının üretiminde kullanılan aşınmaya dayanıklı Hardox 400 çeliği ile dişlilerin üretiminde yaygın olarak kullanılan AISI 8620 çelikleri borlanarak incelenmiştir. Borlama işlemi katı ortamda borlama tekniği kullanılarak yapılmıştır. Borlama malzemesi olarak ticari şekilde piyasada bulunan EKabor® 2 tozu kullanılmıştır. Yüzeyi borlanarak sertleştirilmiş olan çeliğin çekirdeğinin sathına göre yumuşak ve tok olması parçanın tüm olarak yüksek darbe mukavemeti göstermesini sağlamaktadır. Yüzey sertleştirme sırasında yüzey tabakalarında basma gerilmelerinin gelişmesi yüzünden çeliğin yorulma mukavemeti de artmaktadır.

Bu tezde kullanılan deney numuneleri farklı süre ve sıcaklıklarda VEZNELİ A.Ş. tarafından borlanmıştır. Deneysel olarak farklı süre ve sıcaklıklarda borlanan çeliklerin mikroyapıları, mikrosertlikleri, borür katman kalınlıkları, elektrik iletkenlikleri, darbe direnci, yüzeydeki borür fazları ve abrasiv aşınma davranışları incelenmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Çelik malzemeler, farklı amaçlarla çok farklı kullanım alanlarına sahip metalik malzemelerin başında gelmektedir. Bu nedenlerle farklı beklentilere sahip çeliklerin üretimi gerekmektedir. Bu malzemeler alaşım elementi ilavesi ve ısıtım işlem yoluyla bu farklı beklentileri karşılayabilecek hale getirilebilmektedirler. Bu amaçlar doğrultusunda çeliklere normalizasyon, tavlama, östemperleme, martemperleme, borlama gibi daha bir çok ısıtım işlem uygulanarak bu malzemelerin özellikleri geliştirilmekte ve hedeflenen amaçlara uygun malzemeler üretilmektedir [1-6].

Borlama işlemi de bu amaçla kullanılan yüzey mühendisliği ısıtım işlemlerinden biridir. Eğer uygun bir borlama tekniği seçilirse malzemelerin ömrünü artırıp tasarruf sağlamak mümkündür. Duruma ülkemiz açısından bakıldığında sahip olduğumuz yüksek bor potansiyeli düşünülerek aşınmaya karşı direnç kazandırmak amacıyla borlama tekniklerinin kullanılması büyük kazanç sağlayacaktır [7]. Literatürler incelendiğinde, bir çok standart çelikten polimerik ve kompozit malzemelere dökme demirden betona kadar çeşitli malzeme gruplarının aşınmasına karşı pek çok deneysel araştırmalar yapılmıştır.

C. Martini ve arkadaşları, borür kaplamaların kayma ve abrasiv aşınma özellikleri adlı çalışmalarında aşınma hızı borür kaplamasının üzerinde dış kısımdaki gevrek, kristal yapısı düzensiz katmandan dolayı hem kaydırma hem abrasiv aşınma koşullarında çok yüksek olmuştur. Ardından aşınma hızının, önce FeB sonra da Fe₂B fazlarının düzenli kristal yapılarının sağladığı dayanımdan dolayı azaldığını söylemişlerdir [8]. M. A. Bejar ve E. Moreno 1020, 1045, 4140 ve 4340 çeliklerinin abrasiv aşınma direncini incelemişler, test sonucunda borlanmış 1020 çeliğinin en yüksek aşınma direnci sergilediğini bulmuşlardır [9]. Wendong Wang ve arkadaşları, alaşımlarda borun difüzyonu adlı çalışmalarında, borun α -Fe ve γ -Fe içerisinde aralara yerleşme mekanizması ile alakalı noktalara yerleştini söylemişlerdir [10]. G. Çelebi ve arkadaşları, 8620 çeliğinin üzerinde oluşturulan borürlerin bazı mekanik özelliklerini incelemişler ve oluşan borürlerin düzgün dallı bir morfolojiye sahip olduğunu söylemişlerdir [11].

B. Venkataraman ve G. Sundararajan, borlanmış orta karbonlu çeliğin yüksek hızda kayma durumunda aşınma karakteristiklerini incelemiş ve çeliğin aşınma hızının borlama ile onda birine kadar düşürülebildiğini söylemişlerdir [12]. K. H. Habig ve R. Chatterjee-Fischert, C 45 ve 42 CrMo 4 çeliklerinin borlanması sonucunda borür katmanlarının düşük aşınma sergilediklerini ve alaşım elementlerinin de aşınma özelliklerine etkisinin büyük olduğunu söylemişlerdir [13]. A. G. Wang ve I. M. Hutchings, borlanmış çeliklerin silisyum karbür ve alüminyum oksit aşındırıcılardaki abrasiv aşınma direncini incelemişler ve silisyum karbür aşındırıcının, alüminyum oksit aşındırıcıya göre daha çok aşındırdığını söylemişlerdir [14]. V. I. Dybkov ve arkadaşları, borür katmanlarının oluşumunun eş zamanlı değil sıralı olduğunu ve ilk önce Fe_2B fazının oluştuğunu ve difüzyon büyüme kinetiklerinin neredeyse parabolik olduğunu söylemişlerdir [15]. C. Meriç ve arkadaşları, borlanmış dökme demirlerin abrasiv aşınma özelliklerini incelemişler ve kütle kaybının borür katman kalınlığı ile azaldığını söylemişlerdir [16]. B. S. Mann, 13Cr-4Ni çeliğini borlamış, mekanik özelliklerinde ciddi iyileşmelerin olduğunu, borlamanın aşınma ile başa çıkmakta önemli bir yöntem olduğunu ve borlama sonucunda, çeliğin aşınma direncinin arttığını söylemiştir [17].

V. Jain ve G. Sundararajan, kutu borlamada optimum özelliklere sahip bir borür katmanı elde etmek için 10 mm paket kalınlığının yeterli olduğunu söylemişlerdir [18]. J. Subrahmanyam, borlamanın yumuşak çeliğin aşınma direncini ciddi şekilde artırdığını yüzeyde tek fazlı borür katmanlarının, çift fazlı borür katmanlarına göre daha yüksek performans sergilediğini söylemiştir [19]. Kenneth G. Budinski, borlama işlemi sonucunda, nitrüleme ve karbürleme gibi klasik yayınma işlemlerine göre oldukça yüksek yüzey sertliği elde edildiğini söylemiştir [20]. Eyre, borlama ve karbürleme işlemi uygulanmış malzemelerin aşınma davranışlarını karşılaştırmış ve borlamanın karbürlemeye göre özellikle geçiş bölgesi üzerindeki yüklemelerde adhesiv aşınma direnci açısından çok daha iyi sonuçlar verdiğini ve bu özelliğini yüksek sıcaklıklarda dahi muhafaza ettiğini belirlemişlerdir [21]. R. Lakovou ve arkadaşları, takım çeliklerini plazma aktarımlı ark yöntemi ile borlamışlar, borlanmış tabakaların mikro yapılarının Fe_2B tabakası, borid ve martenzitin ötektik karışımından oluştuğunu gözlemişlerdir. Aşınmanın uygulanan yüke bağlı olarak

değiştiğini söylemişlerdir [22]. J. H. Yoon ve arkadaşları, AISI 304 çeliğini plazma pasta borlama tekniğini kullanarak borlamışlardır. Birkaç farklı sıcaklıkta gerçekleştirdikleri bu çalışmada, çelikte düz morfolojide bir borür tabakasının oluştuğunu, XRD analizleri sonucunda da krom ve nikel’ce zengin bölgelerin varlığını belirlemişlerdir [23].

H. J. Hunger ve G. Trute, aşınmaya karşı dirençli yüzey tabakaları üretmek için macun veya toz halinde tatbik edilebilen katı borlama ürünlerini kullanarak abrasiv ve adhesiv aşınmaya karşı etkili bir koruma sağlanacağını söylemişlerdir [24]. H. R. Lin ve Gwo-Hwa Cheng, borlanmış orta karbonlu çelikler üzerinde titanyum, alüminyum, bor ve hidrojenin, çeliğin sertleşebilme kabiliyetine olan etkilerini görebilmede kolaylık sağlayacak matematiksel bir model oluşturmaya çalışmışlar ve araştırma sonucunda hidrojeni emmede titanyum kadar bor elementinin de etkili olduğunu görmüşlerdir [25]. A. Kuper ve arkadaşları, gaz borlama ve plazma borlama işlemlerini AISI 4140, C1043 ve düşük karbonlu bir çeliğe uygulamışlardır. İşlem sonucunda oluşan borür tabakalarını X - ışını difraktometresi, optik, mekanik testler ve pin on disk aşınma testleri uygulayarak karakterize etmeye çalışmışlardır [26]. X. Cong-Xin ve O. Meng-Lan, borlanmış çeliklerin aşınma dayanımlarına, artık gerilmelerin etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada, kromlu çeliklerin, borlanmasına müteakip çeşitli ısı işlemler uygulanarak, tek fazlı Fe_2B tabakasının aşınma direnci ve artık gerilmeler ile ilgili deneysel ölçümler alınması suretiyle, artık gerilmelerin ısı işlemler ile düzenli olarak değişim gösterdikleri ve çeliklerin aşınma dirençlerine önemli derecede tesir ettikleri belirtilmiştir [27].

K. Genel ve arkadaşları, AISI W1 çeliğini 1-8 saat süreyle borlama işlemine tabi tutmuşlar ve borlanmamış çeliklerin yüzey sertliğinin 260 HV olmasına karşılık borlanmış AISI W1 çeliğinde 1690-1800 HV olduğunu bulmuşlardır. Tabaka kalınlığının borlama süre ve sıcaklığına bağlı olarak arttığını ve 6 saatin optimum sıcaklık olduğunu belirtmişlerdir [28]. M. Kulka ve A. Pertek, krom ve nikel esaslı düşük karbonlu çeliklerde borlama yapmış ve karbon miktarının aşınma dayanımına etkilerini incelemişlerdir. Deney sonucunda karbon miktarı %1,2’den düşük çeliklerde aşınma dayanımının en yüksek seviyeye geldiğini görmüşlerdir [29]. K.-T.

Rie, 750 °C 'de BC_3 kullanarak plazma borürleme yapmış ve 20-30 μm kalınlığında ve 1500 kg mm^{-2} sertliğinde tabakalar elde etmiş, bu yöntem ile otomobillerde kullanılan yağ pompası dişlilerinin sertleştirilebileceğini belirtmiştir [30]. L. Lin ve K. Han, A3 ve C1045 çeliklerini alev spreyle kaplama yapmış ardından da borlama yaparak mekanik özelliklerindeki değişimi incelemişlerdir. Co esaslı kaplamanın ardından yapılan borlama ile Fe ve Ni esaslı kaplamalara göre daha yüksek sertlik elde etmişlerdir. A3 çeliğinin Fe esaslı toz ile kaplanmasının ardından yapılan borlama sonrası aşınma, C1045 çeliğindeki aşınmadan daha yüksek bulunmuştur [31]. K. Genel ve arkadaşları, AISI W1 çeliğini 1-8 saat süreyle 850-1050 °C borlamışlar, bor tabakası, sertlik ve borlama prosesi parametrelerinin yapay sinir ağları ile tahmin edilebilirliğini incelemişler ve %95 oranında doğru sonuçlar elde etmişlerdir [32].

N. Uzunov ve R. Ivanov, karbon ve alaşım çeliklerine değişik bor bileşimi toz karışımlarıyla 1160 K'de 6 saat süreyle borlamışlar ve tabaka kalınlığı ile yüzeyde oluşan sertliklerin incelemesini yapmışlardır. Sonuç olarak, bor atomlarının çelik yüzeyine difüzyonu boronflorit ve BF_3 bileşiğinin yardımıyla oluştuğu, bor tabakasına ait tabaka kalınlığı, sertlik, faz kompozisyonu, yüzey temizliği gibi özellikler dikkate alındığında bor oluşturuca aktivatör olarak en iyi kombinasyonun $(NH_4)_2O-4BF_3$ karışımının olduğu, bu karışımın düşük karbonlu ve düşük alaşımlı çelikler için uygun olduğunu bulmuşlardır [33]. P. Goeuriot ve arkadaşları, "borudif" olarak isimlendirdikleri özel bir borlama yöntemi geliştirmişler ve aktivatör olarak KBF_4 yerine BF_3 ve SiC 'ün kullanılmasını önermişlerdir. Böylece daha az kırılğan ve borlama sonrası ısıt işlemlere uygun olan tek fazlı borür (Fe_2B) tabakasının elde edilmesinin kolaylaştığını söylemişlerdir [34]. E. Takeuchi ve arkadaşları, FeB ve Fe_2B tabakalarının benzer aşınma özellikleri gösterdiğini ve borlanmış çeliklerin aşınma davranışlarını etkileyen en önemli faktörün, yüzeyde oluşan koruyucu oksit filmleri olduğunu ileri sürmüşlerdir [35].

H. Uetz ve W. Wlassoww, borür tabakalarında oluşan aşınma mekanizmalarını incelemiş ve Fe_2B tabakasındaki aşınmanın yorulma sonucunda oluştuğunu belirtmişlerdir [36]. J. A. Davis ve arkadaşları, demir ve AISI M2 çeliğini iyon

implantasyonu ile borlamışlar ve bunların aşınma karakteristiklerini incelemişlerdir. Demir için 600 °C, M2 çeliği içinde 700 °C sıcaklıkta yapılan iyon implantasyonunun aşınmaya dayanıklı bir tabaka elde etmek için yeterli olduğunu belirtmişlerdir [37]. K. S. Nam ve arkadaşları, düşük karbonlu çeliklerde plazma borlamanın etkilerini incelemişler ve borlanmış tabaka oluşum hızının ve sertliğinin klasik borlamaya göre daha düşük olduğunu belirlemişlerdir [38]. P. J. Wilbur ve arkadaşları, iyon borlanmış demir disklerin karakteristiklerini incelemiş ve 900 °C’de oluşan α -Fe matrisindeki Fe_2B bileşiklerinin aşınmaya en dayanıklı yüzeyleri oluşturduğunu belirlemişlerdir [39]. P. X. Yan ve arkadaşları, C45 çeliğine borlama ve N+ iyon implantasyonu uygulamışlardır. Bu işlem sonucunda bor tabakasının kırılma dayanıklılığının azaltılabileceğini ve özelliklerinin artırılabilceği görülmüştür [40].

L. G. Yu ve arkadaşları, yumuşak çelikleri plazma sinterleme tekniği ile 700-1000 °C aralığında 30 dk ile borlamışlardır. Mikroyapı analizi sonucunda 700 °C’de yapılan borlamada 2-5 μm bor tabakası kalınlığı oluştuğunu görmüşler. Bu tabakanın genel olarak Fe_2B bileşiğinden oluştuğunu söylemişlerdir [41]. C.L. Ge ve R.C. Ye, C45, 40 Cr ve T10 çeliklerini borlamışlar ve bor tabakasında bazı Fe_2B ve $Fe_{23}(C,B)_6$ fazlarına ek olarak genelde α -Fe ve $Fe_3(C,B)$ fazlarının oluştuğunu gözlemişlerdir [42]. W.D. Man ve arkadaşları, WC-Co (kobalt eklenmiş tungsten karbür) malzemelere plazma bor-nitrürleme yapmışlar ve malzeme yüzeyinde elmas film elde etmişler. Plazma bor-nitrürlemenin kobaltın malzeme yüzeyindeki aktivasyonunu pasifize ettiğini, bu nedenle kobaltın malzeme içinde karbon grafitlerinin oluşmasını sağlayan etkisini azalttığını söylemişlerdir [43].

N. Gidikova, 1200 °C ve 11 saati aşan sürelerde çelik yüzeylerine vanadyumun termal difüzyonunu sağlamış, peşinden B_4C , $Na_2B_4O_7$, $NaCl$, NH_4Cl ve aktivatör olarak kloritler ilave edip, toz ortamda 950-1000 °C’de 5 ve 9 saat sürelerde borlama işlemini gerçekleştirmiştir. İncelemede yüzey kısmında 26000 MPa sertliğinde VB_2 bölgesi ile VC yoğunluklu tabakaların olduğu yaklaşık 400 μm kalınlığında bir difüzyon tabakası tespit edilmiştir [44]. L. Bourithis ve arkadaşları, plazma aktarımlı ark yöntemini kullanarak AISI 1018 çeliğini bor ve kromdiborit tozları kullanarak borlamışlardır. Bu çalışma sonucunda; bor tabakalarının “Bor” ve “Kromdiborit”

tozları kullanılarak plazma aktarımlı ark yöntemiyle elde edilebileceğini, kaplama kalınlığının 1-1,5 mm kalınlığında, sertliğin de bor tozları için 1000 ila 1300 HV aralığında değiştiğini, kromdiborit tozları için de 900 HV değerinde olduğunu, bor tozları ile borlanmış yüzeylerin sürtünme katsayılarının uygulanan yüke göre 0,8 ile 0,2 arasında değiştiğini, kromdiborit tozları ile borlanmış yüzeylerin sürtünme katsayılarının uygulanan yüke çok fazla bağlı olmadığını ve 0,15'ten düşük değerde olduğunu, aşınma miktarının her iki yöntem için de 10-15 mm³/m gibi çok düşük bir değerde olduğunu göstermişlerdir [45].

B. Selçuk ve arkadaşları, borlanmış ve karbürlenmiş AISI 1020 ve 5115 çeliklerinin aşınma davranışlarını incelemiştir. Aşınma testleri, kuru sürtünme şartları altında pin-on-disk aşındırma cihazında yapılmıştır. Çalışmada, borlanmış AISI 1020 çeliğindeki ağırlık kaybının, karbürlenmiş AISI 5115 çeliğindeki kayıptan daha düşük olduğu gözlenmiştir [46]. C. Rebholz ve arkadaşları, 170 °C sıcaklıkta, AISI 316 paslanmaz çelik malzeme yüzeyinde, magnetron-sputter metoduyla nominal olarak 2 µm kalınlığında TiAlB filmi oluşturup, yapı, sertlik ve mekanik özellikleri hakkında bilgi edinmeye çalışmışlardır [47].

C. Bindal, borlama süresi ve krom miktarına bağlı olarak krom borürler tespit etmiş ve kromun çok fazla olmasa bile kırılma tokluğunu düşürdüğünü belirlemiştir. AISI 1020 ve AISI 1050 karbon çeliklerinde tabaka kalınlığının borlama süresi ile değişiminin birbirlerine çok yakın olduğunu söylemiştir. [48]. A. Özsoy, termal çevrimli borlamayla tane boyutunun düştüğünü ve geçiş bölgesi/borür tabakası oranının azaldığını ayrıca bölgeler arasındaki özgül hacim farklarının azaldığını, aşınma gibi servis özelliklerinin iyi yönde etkilendiğini ve gevrekliğin azaldığını belirtmektedir [49]. B. Selçuk, toz ortamda borlanarak sertleştirilen AISI 1020 çeliğinin, sementasyonla sertleştirilerek kam mili üretiminde kullanılan AISI 5115 çeliğinin yerine kullanılabilirliğini deneysel olarak araştırmış ve borlamanın daha etkili olduğunu, borlanarak yüzeyi sertleştirilen AISI 1020 çeliğinin düşük yüklerde sement edilmiş AISI 5115 çeliğinin yerine kam mili üretiminde kullanılabileceğini söylemiştir [50]. S. Şahin, ASC 100.29 demir tozlarını borlamış ve bunların borür tabakası kalınlıklarının süre ve sıcaklığın artışına bağlı olarak arttığını söylemiştir

[51]. N. Bozkurt, bor bileşikleriyle çeliklerde yüzey sertleştirme işlemini sıvı ortamda uygulamış, boraks, borik asit ve kalsine borik asitten oluşan kalsine borik asit miktarının ağırlıkça % 18'den fazla olması durumunda Fe_2B fazının yanı sıra arzu edilmeyen FeB fazında meydana geldiğini tespit etmiştir [52].

Ş.Şen, AISI 5140, 4140 ve 4340 çeliklerini 2-8 sürelerle boraks esaslı sıvı banyoda termokimyasal metotla borlamış, borür tabakasında yer alan demir borürlerden FeB miktarının yüksek borlama sıcaklığı ve uzun borlama sürelerinde arttığını söylemiştir [53]. U. Şen, küresel grafitli dökme demirleri borlamış, matriste bulunan küre boyutu ile bor tabakasındaki küre boyut değişimini incelemiş, borlama süresine bağlı olarak tabaka kalınlıklarının arttığını belirlemiş, mikro yapıda FeB ve Fe_2B fazlarının olduğunu söylemiştir [54]. İ. Özbek, yüksek hız çelikleri (AISI M50, AISI M2) ile AISI W1 çeliğini borlamış, AISI W1 çeliğinin çeşitli mekanik ve metalografik özelliklerinin daha iyi sonuçlar verdiğini söylemiştir [55]. A. Taşçı, borlanmış çeliklerin aşınma ve korozyon dayanımları üzerine yaptığı çalışmada, sıcaklık artması halinde borlanmış tabakaların sertliklerini muhafaza ettiklerini ve demir gurubu malzemelerin borlanması durumunda bazı asit ve sıvı metallere karşı büyük dayanım kazandığını bildirmiştir [56].

T. Akgündüz, SAE 1020, SAE 1040, SAE 1050 ve SAE 8620 çeliklerini 940 °C'de çeşitli sürelerde borlamış ve suda soğutulmaları halinde yüzeyin aşırı sertliği, ani ve yüksek sıcaklık farkı karşısında, yüzeylerinin çatladığını belirlemiştir [57]. H. A. Uzun, Ç1040 çeliğini borlamış, bor katman kalınlığının borlama süresi ve sıcaklığının artması ile arttığını, bor tabakasının kolonsal bir yapı sergilediğini tespit etmiştir. Bunun oluşum mekanizmasını ise, bor atomlarının tane sınırlarına difüzyonu ile zorlaması ve malzeme merkezine doğru ilerlemesi şeklinde açıklamıştır. Borlanmış numunenin, borlanmamış numuneye göre aşınma dayanımının 6 kat daha yüksek olduğunu tespit etmiştir [58]. U. Yapar, termokimyasal borlama yöntemi kullanarak makine yapım çeliklerini borlamış, malzeme yüzeyinde ana malzeme sertliğinden 7-9 kat yüksek sertlikler bulmuştur. Ayrıca kullanılan borlanmış çelik malzemenin karbon içeriğinin artışıyla korozyon dirençlerinin arttığını tespit etmiştir [59]. C. Çifci, Ç1010, 1020, 1030, 1040, 1050,

1060 ve 1090 çelik malzemeleri sıvı banyoda 1000 °C sıcaklık ve 6 saat süre ile borlamış, ağırlıkça % karbon oranı arttıkça borür tabakalarının kalınlıklarının azaldığını, ayrıca girinti ve çıkıntılı olan iğnesel Fe₂B tabakalarının giderek düzleştiğini ve çizgisel hale dönüştüğünü belirtmiştir [60]. S. S. Yılmaz, Ç1020 Çeliğini katı ortamda borlamış, 1000 ve 1050 °C sıcaklıklarda bor tabakasının bozulduğunu, 950 °C’ de bor tabaka kalınlığının uygun olduğunu belirtmiştir [61].

B. Baçkır, küresel dökme demir, lamel grafitli dökme demir ve compact grafitli dökme demirleri borlamış ve en iyi aşınma direncini lamel grafitli dökme demirin gösterdiğini belirlemiştir [62]. U Yünker, St 37-2 ve st 60-2 genel yapı çeliklerine 900 °C’ de 8 saat borlama, X 155 CrVMo 12 1 soğuk iş takım çeliğine 900 °C’ de 4 saat borlama, X 5CrNi 18 9 çeliğine 900 °C’ de 6 saat borlama yapılmasının en iyi aşınma dayanımını verdiğini tespit etmiştir [63]. R. Tezcan, borlama işleminin endüstriyel uygulama alanları hakkında bilgiler vermiştir [64]. F. Nair, AISI 1020, 1040 ve 4140 çeliklerini borlamış ve borlanmış malzemelerin kullanımında darbeli ve titreşimli yüklemelerden kaçınılmasını belirtmiştir [65]. M. Türktekin, H13 sıcak iş takım çeliğini borlamış ve bunları 550 °C’ de 90 saat süreyle nitrürleme işlemi yapmış, bor tabakasının yüksek sıcaklıklarda özelliklerini koruduğunu, nitrürleme işlemi üzerine borlama işlemi yapmanın malzemeye mekanik özellikler yönünden hiçbir fayda sağlamadığını belirtmiştir [66].

T. Ayter, AISI 1020, 1040 ve 2344 çeliklerini katı ortamda borlamış ve borlama süresinin artması ile malzemelerdeki yüzey pürüzlülüğünün arttığını ve buna bağlı olarak da aşınmanın arttığını söylemiştir [67]. A. Uluköy, 21NiCrMo₂ çeliğinden imal edilmiş olan dişli çarkları karbürleme, dekarbürleme, borlama ve sertleştirme işlemleri yapmış, borkarbürleme ve karbürleme+dekarbürleme+borlama ile elde edilen sertlik değerlerinin sadece borlanmış numunelere göre 400-700HV daha yüksek çıktığını belirtmiştir [68]. M. Çetin, hadfield çeliklerine sıvı ortamda borlama işlemini uygulamış ve aşınma deneylerinde yüke bağlı olarak borlanmış çeliğin borlanmamış çeliğe göre aşınma oranının daha az olduğunu belirtmiştir [69]. Ö. Çeçil, 8620 çeliğini sıvı ortamda borlamış ve 900 °C’ de 4 saat borlanmış numuneleri 950 ve 1000 °C’ de vanadyumlama işlemi yapmıştır. Borlanmış numunelerin

vanadyumlanması işleminde borür tabakasının yüzeye yakın kısımlarında dönüşümlerin olduğunu, vanadyum-borür tabakasının farklı bileşenlerden oluşan tabakalı bir yapı sergilediğini tespit etmiştir [70]. M. Şimşek, Ç1050 çeliği ile çil döküm numuneyi borlamış, Ç1050 çeliğinden yapılmış numunede borür tabaka kalınlığının fazla olduğunu ve aşınma direncinin de yüksek olduğunu tespit ederek, supab iticilerinin borlanmış Ç1050 çeliğinden yapılmasının daha iyi mekanik ve korozyon direnci göstereceğini belirtmiştir [71].

Y. Karaman, Türkiye sanayinde önemli bir yer tutan tekstil sektöründe, borlama işleminin, sık aşınan parçaların kullanım ömrünü uzatmada ne kadar başarılı olabileceğini ortaya koymak için St 37 çeliğinden imal edilmiş olan iplik kılavuzlarını borlamış ve kullanım ömrünün yaklaşık 8 kat arttığını tespit etmiştir [72]. İ. Uslu, katı ortamda AISI 1040 ve AISI P20 çeliklerini Ekabor toz karışımı kullanarak borlamış, borür tabakası kalınlığının borlama süresi ve sıcaklığın artışı ile arttığını gözlemlemiştir [73]. F. Karakullukçu, AISI H13 çeliğini borlamış, yüzeyde oluşan borür tabakası sertliğinin 2000 kg/mm^2 'yi aştığını, dekarbürizasyon işlemiyle geçiş bölgesindeki sertlik düşüşünün geciktirildiğini belirtmiştir [74]. G. F. Çelebi, 31CrMoV9 ve 34CrAlNi7 nitrürasyon çeliklerini katı ortamda borlamış, çeliklerin yüzeyinde oluşan borürlerin kolonsal bir morfoloji sergilediğini, borür tabakası kalınlığının malzeme bileşimine, işlem süresi ve sıcaklığına bağlı olarak farklılık gösterdiğini belirtmiştir [75]. M. Selam, gri dökme demiri sıvı ortamda borlamış, borlanmış dökme demir numunelerin borlanmamış numunelere göre aşınma direncinin yüksek olduğunu belirtmiştir [76].

İ. H. Arslan, ülkemizdeki ve dünyadaki bor rezervleri hakkında yapmış olduğu araştırmada en çok bor rezervinin ülkemizde olduğunu ve son yıllarda borla ilgili çalışmaların hızla geliştiğini belirtmiştir [77]. S. Gençoğlu, bor karbür seramiklerinin alumina seramik ve AISI H13 sıcak takım çeliği ile mukayeseli olarak aşınma performanslarını incelemiş, bor karbür ve alumina seramik malzemelerin AISI H13 çeliğine nazaran çok yüksek bir aşınma performansı sergilediğini seramik numunelerin çeliğe nazaran daha az aşınırken karşı malzemeyi daha fazla aşındırdığını belirtmiştir [78]. M. Barış, Ç1040 çeliğini farklı süre ve sıcaklıklarda

borlanmış çelik yüzeyinde sert borür tabakalarının oluştuğunu, sıcaklığın artmasıyla bor tabaka kalınlığının arttığını, borlanmış numunelerin borlanmamış numunelere göre aşınma direncinin yüksek olduğunu belirtmiştir [79]. H. Toprak, Ck 45 çeliğinden elde edilen kam milleri ile KGDD'den dökerek üretmiş, borlanmış ve borlanmış yüzeyi PVD ile TiN kaplamıştır. Borlanmış ve TiN kaplanmış KGDD'nin hem diğer KGDD numunelere kıyasla, hem de Ck 45 çelik dövme kam millerine kıyasla üstün bir aşınma direnci gösterdiğini belirtmiştir [80]. M. Saygın, AISI 1020 çeliğini borlanmış, AISI 1020 çeliğinin yorulma çevrim sayılarına bakıldığında tüm sıcaklık ve sürelerde borlanmış olan deney numunelerinin, ısıtılma işlemi yapılmamış numunelere oranla daha kısa sürede yorulduklarını gözlemlemiştir [81].

3. BOR ELEMENTİ HAKKINDA GENEL BİLGİLER

Periyodik sistemin üçüncü grubunun başında bulunan ve atom numarası 5 olan bor elementi, kütle numarası 10 ve 11 olan iki kararlı izotopundan oluşur [82-83].

Yer kabuğunun 51. yaygın elementi olan bor tabiatta boratlar şeklinde okyanuslarda, tortu kayalarda, kömürde, katmanlarına ayrılan yumuşak kayalarda ve bazı topraklarda bulunmaktadır. Yer kabuğunda ortalama 10 mg/kg oranında ve okyanuslarda 4,5 mg/kg oranında bor mevcuttur [84]. Metal ile ametal arası yarı iletken özelliklere sahip olan bor elementi doğada tek başına değil, başka elementlerle bileşikler halinde bulunur [85]. Bor tabiatta her zaman oksijene bağlı olarak bulunmaktadır. Oda sıcaklığında katı halde bulunan bor elementi, 3 ppm'lik konsantrasyon değerine sahiptir [86]. Bor elementinin özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Bor elementinin özellikleri [79,83,87]

Özellikler	Değeri
Atom Numarası	5
Atom Ağırlığı	10,811 ±0,005
Ergime Noktası	2190+20°C
Kaynama Noktası	3660°C
Isıl Genleşme Katsayısı (25-1050°C arası, 1°C için)	5x10 ⁻⁶ -7x10 ⁻⁶
Proton ve Elektron Sayısı	5
Nötron Sayısı	6
Yoğunluk	2,46 g/cm ³
Molar Hacim (cm ³)	4,39
Knoop Sertliği	2100-2580 HK
Mohs Sertliği (Elmas – 15)	11
Vickers Sertliği	5000 HV
Atom Yarıçapı	0,46 Å
İyon Yarıçapı	0,23 Å

Bor, biri amorf ve altısı kristalin polimorf olmak üzere, çeşitli allotropik formlarda bulunur. Alfa ve beta rombohedral formlar en çok çalışılmış olan kristalin polimorflardır. Bor elementinin kimyasal özellikleri morfolojisine ve tane büyüklüğüne bağlıdır. Bor yüksek sıcaklıkta su ile reaksiyona girerek borik asitleri ve diğer ürünleri oluşturur [83,]. Bor elementi genellikle hem tetragonal ve hegzagonal kristal yapıda, hem de amorf yapıda olabilir [48,49].

3.1. Bor'un Tarihçesi

İlk boraks kaynağının yaklaşık 4000 yıl önce Tibet göllerinden elde edildiğine dair bilgiler bulunmuştur. Sümerler ve Etiler tarafından altın ve gümüş işçiliğinde kullanılmıştır. Babilliler tarafından Uzak Doğu'dan getirilerek altın işlemede kullanılan boraks, Mısırlılar tarafından da mumyalamada, tıpta ve metalurji işlerinde kullanılmıştır. Himalayalar'dan koyunlara bağlanan torbalarla Hindistan'a getirilen boraks, Romalılar tarafından cam yapımında, eski Yunanlılar tarafından da temizlik işlerinde kullanılmıştır [83,88,89].

İlaç olarak ilk kez Arap doktorlar tarafından M.S. 875 yılında kullanılmıştır. Çinliler tarafından seramik ve cam üretiminde kullanılmıştır. Avrupa'ya ise 12.-13. yüzyılda Marco Polo tarafından Tibet'ten getirilmiştir. Amerika'da ise ilk kez 18. yüzyılda And Dağları'nda bulunmuştur [83,88]. Elementer bor 1808 yılında Fransız Kimyacı Gay-Lussac ile Baron Louis Thenard ve bağımsız olarak İngiliz kimyacı Sir Humphry Davy tarafından bulunmuştur [90]. Ancak %99 saflıktaki ilk kristalize bor 1909 yılında elde edilebildi [85].

Türkiye'de ilk işletmenin 1861 yılında çıkartılan Maadin Nizannamesi uyarınca 1865 yılında bir Fransız şirketine işletme imtiyazı verilmesiyle başladığı bilinmektedir [89]. 1935 yılında MTA ve Etibank gibi kamu kuruluşlarına arama ruhsatı verilmiş, 1944'de millileştirmelere girişilmiş ve son olarak Türk Boraks adı altında faaliyet gösteren İngiliz Borax Consolidated Ltd. Şti.'nin imtiyazlarının 1968'de Etibank'a devredilmesiyle de maden işletmeciliği tamamen Türk firmalarına geçmiştir [91].

1983 yılında çıkartılan 2840 sayılı kanunla devletçe işletilecek madenler kapsamında bor madeninin işletme hakkı Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü'ne verilmiştir.

Dünyadaki önemli bor yataklarının Türkiye, ABD ve Rusya'da olduğu bilinmektedir. Dünyada toplam 1176 milyon ton B_2O_3 olup bu rezervin %72,2'si Türkiye'dedir. ABD %6,8, Rusya %8,5, Çin %3,1 ve Şili %3,5'lik rezerve sahiptir [92]. Türkiye bor konsantreleri ve bor kimyasalları üretimi ve satışında da dünya lideridir.

3.2. Bor'un Kullanım Alanları

Endüstride çok yaygın ve çeşitli kullanım alanlarına sahip bor bileşiklerinin, önemi ve kullanım alanları gün geçtikçe artmaktadır. Ticari anlamda borlar, genelde içerdikleri B_2O_3 içeriğine göre tanımlanmakta ve satılmaktadır. Diğerleri içinde en fazla ticareti yapılan bor ürünleri “boraks penhidrat” ve “borik asit” olmaktadır. Kullanım alanları bölgelere göre değişiklikler göstermektedir [83]. Çizelge 3.2.'de bor kimyasal ve alaşımlarının kullanım alanları verilmiştir.

Çizelge 3.2. Bor kimyasal ve alaşımlarının kullanım alanları [93].

ÜRÜN	KULLANIM ALANLARI
Amorf ve Kristal Bor	Askeri Piroteknik, Nükleer Silahlar ve Nükleer Güç Reaktörlerinde, Metallerde Alaşım Elemanı ve Deoksidan, Bakır ve Alaşımlarında Gaz Giderici, Alüminyum Dökümlerinde Tane Rafinasyonu, Yarı İletkenlerde,
Boranlar	Roketlerde ve Atmosfer Üstü Uçaklarda Yakıt
Bor Fiberleri (Cam Elyaf)	Tekstil Tipi Cam Elyaf: Dokuma, Kompozit Oluşturma, Otomobillerin Dış ve Aksamalarında, Motor ve Hava Giriş Manifoldlarında, Elektronik Baskı Devrelerinde, Elektrik Yalıtım Uygulamalarında, İnşaat Duvarlarında, Mahfaza Panellerinde, Sıhhi Tesisatlarda, Banyo Malzemelerinde, Duvar Kaplamalarında, Alev Geciktirici Örtülerde, Yüzme Havuzlarında, Yaya Köprülerinde, Kapı İmalinde, Boru Yapımında, Yakıt Tanklarında, Kimyasal Depolarda, Tarımsal Aletlerde, Endüstriyel Makinelerde, Koruyucu Kasklarda, Deniz Ulaşım Araçlarında,

Çizelge 3.2. (Devam) Bor kimyasal ve alaşımlarının kullanım alanları

	İzolasyon Tipi Cam Elyaf: Isı Yalıtıcı Olarak Binalarda, Akustik İzolasyon Amacıyla Boru, Kazan ve Tank Kaplamalarında, Otomobillerin İzolasyon Panellerinde, Optik Tipi Cam Elyaf: Telekomünikasyon Alanında
Disodyum Oktaborat Tetrahidrat	Borlu Gübre Olarak, Toprakta Bor Eksikliğini Gidermede, Kumlu veya Gevşek Yapılı Toprakta Verimi Artırmada, Yabani Otların Kontrol Altında Tutulmasında, Kereste Korunmasında Böcek ve Mantar Öldürücü Olarak,
Bor Flamentleri	Havacılık ve Spor Malzemeleri İçin Kompozitler
Bor Karbür	Askeri Araçlarda Zırh Plakaları, Uzay Mekiklerinde Kimyasal Korrozif Ortamlarda Dış Yüzey Koruyucu, Regülasyon, Kontrol ve Zırhlama Amacıyla Nükleer Reaktörlerde, Nükleer Sanayinde Nötron Absorblayıcı, Serbest Partiküllü Aşındırıcılar, Kumlama Nozülleri, Tel Hadde Lokmaları, Ekstrüder Memeleri, Otomatik Havanlar, Tekstilde İplik Yönlendiriciler, Filtreler, Bujiler, Tesviye Aksamaları, Yüzey Polisaj Pastaları, Transformatörlerde Silisli Saç Yerine, Kesme Ekipman Bileycileri, Endüstriyel Yataklar, Çok Yüksek Sıcaklıklarda Korozyon ve Oksitlenme Direnci Gerektiren Ekipmanlar, Refrakter Malzeme Olarak,
Bor Nitrür	Sıcak ve Ergimiş Metallerle Temas Eden Yüzeylerin Kaplamalarında, Aşınmaya Maruz ve Kimyasal Korozyona Karşı Yüzeylerde, Özel Abrasivler, Seramik Silikon Yarı İletken Wafer'larda Bor Dop Malzemesi, Nükleer Uygulamalarda Nötron Yakalamada, Vakum Ergitme Potaları, CVD Potaları, Mikro Devre Paketleme, Yüksek Hassasiyet Contaları, Mikro Dalga Tüpleri, Dökümde Stoper Halkaları, Plazma Ark Yalıtkanları, Metalurjik Fırınlarda Destekleyici İskeletler, Yüksek Sıcaklıklarda Yağlayıcı Olarak, Yüksek Isıl Şok Direncinin ve Yüksek Tokluğun İstendiği Uygulamalarda, Dielektrik Malzeme Olarak, Nozul Pota, Termokupul Kılıfı ve Cam Kalıplarla İlgili Refrakter Malzeme Olarak, Pota ve Refrakterde Astar Uygulamaları, Diğer Seramik Malzemelerle Birlikte Kompozit Yapımında, Kozmetik Endüstrisinde, Seramik ve Cam Endüstrisinde, Yüksek Sıcaklıklarda Kesme Aletlerinde, Aşındırıcı Olarak, Dökümle ve Dövme ile Üretilen Parçaların İşlenmesinde,
	Sıvı Metaller ve Metal Buharlarına Karşı, Yüksek Emisyon Gerektiren Elektriksel Uygulamalar, Alüminyum Ergitilmiş Tuz Elektrolizinde İnert Elektrotu Olarak (TiB_2), Termoelement Kılıflar

Çizelge 3.2. (Devam) Bor kimyasal ve alaşımlarının kullanım alanları

Metal Borürler	(ZrB ₂), Alüminyum ve Alaşımlarında Nükleant Olarak (TiB), Refrakter Metallerle Katıldıklarında Tane İnceltici, Magneto-Hidrokinamik Jeneratörlerin Elektrot Malzemesi, Borlu Çeliklerin Üretiminde, Helikopterler İçin Hafif Zırh Malzemesi, Yüksek Sıcaklığa ve Kimyasal Atığa Maruz Kalan Kısımlarda Kaplama veya Parça Olarak, Silisyum Karbür (SiC) Kompozitlerinin Mukavemetlerini Arttırmak İçin (TiB ₂), Yüksek Sıcaklık Elektrik Kontak Malzemesi,
Ferrobör	Çeliklerde Tane İnceltici ve Su Alma Kabiliyetini Arttırıcı, Yüksek Oranda Mn, Ni, Cr ve Mo'ın Sağlayabileceği Sertleşebilirlik Özelliğini Sağlamada, Paslanmaz Çeliklerde Kaynak Kabiliyetini Yükseltmede, Nükleer Reaktörlerde Regülatör Çubuğu, Hadde Merdaneleri Üretiminde, Çeliklerde Yüzey Sertleştirmede, Nötron Absorbsiyonunu Arttırıcı Olarak, Yassı ve Derin Çekme İşlemine Tabi Tutulacak Çeliklerde, Otomobillerin Silecek ve Marş Motorlarında, Manyetik Ayırımında, Cep Telefonlarında, Sensörlerde, Neodyum-Demir-Bor (Nd-Fe-B) Mıknatıslarında, Metalik Cam Üretiminde,
Borazon	Yüksek Hızlı Kesiciler
Susuz Borik Asit (Bor Oksit)	Özel Bor Kimyasallarının ve Organik Bor Bileşiğinin Üretiminde, Organik Sentezde Katalizör veya Katalizör Taşıyıcısı Olarak, Metalurji Sanayinde Flaks, Metallerin Borürlendirilmesinde ve Boronizasyonunda, Borlu Alaşımlarının Hazırlanmasında, Cam ve Seramik Sanayinde, Elektrik-Elektronik Sanayinde
Borik Asit	Antiseptikler, Göz Damlaları, Bor Alaşımları, Yangın Geciktirici, Naylon, Fotoğrafçılık, Tekstil, Dericilik, Gübre, Nikel Kaplama, Kimyasal Katalist, Cam, Cam Elyafı, Emaye, Sır, vb.
Çinko Borat	PVC, Halojenli Polyester ve Naylonlarda Alev Geciktirici, Duman Bastırıcı ve Korozyon.

3.2.1. Cam ve cam elyafı sanayi

Bor, pencere camı, şişe camı vb. sanayilerinde ender hallerde kullanılmaktadır. Özel camlarda ise borik asit vazgeçilemeyen bir unsur olup, rafine sulu/susuz boraks, borik asit veya kolemanit/boraks gibi doğal haliyle kullanılmaktadır. Çok özel durumlarda potasyum pentaborat ve borik oksitler kullanılmaktadır. Bor, ergimiş

haldeki cam ara mamulüne katıldığında onun viskozitesini artırıp, yüzey sertliğini ve dayanıklılığını yükselttiğinden ısıya karşı izolasyonunun gerekli görüldüğü cam mamullerine katılmaktadır [94].

3.2.2. Seramik ve emaye sanayi

Bor, özellikle seramiklerin sırlanmasında ve emaye sanayinde kullanılır. Sırın kıvamlılığını ve yüzey gerilimini düşürür, parlaklığı ve saydamlığı artırır [83]. Çelik, alüminyum, bakır, altın ve gümüş emayeyle kaplanabilir.

3.2.3. Temizleme ve beyazlatma sanayi

Sabun ve deterjanlara mikrop öldürücü ve su yumuşatıcı etkisi sebebiyle %10 boraks dekahidrat ve beyazlatıcı etkisini arttırmak için toz deterjanlara %10-20 oranında sodyum perborat katılmaktadır. Çamaşırın yıkanma süresini düşürür, su tüketimini azaltır. Makinelerdeki çeliğin aşınmasını ve matlaşmasını azaltır [83,94].

3.2.4. Tekstil sanayi

Isıya dayanıklı kumaşlar, yanmayı geciktirici ve önleyici selülozik malzemeler, izolasyon malzemeleri, tekstil boyaları deri renklendiricileri, dericilikte kireç çöktürücü, suni ipek parlatma malzemelerinde kullanılmaktadır [93].

3.2.5. Metalurji sanayi

Boratlar yüksek sıcaklıklarda düzgün, yapışkan, koruyucu ve temiz, çapaksız bir sıvı oluşturma özelliği nedeniyle demir dışı metal sanayinde koruyucu bir cüruf oluşturu ve ergitmeyi hızlandırıcı madde olarak kullanılmaktadır [95]. Bor bileşikleri, elektrolit kaplama sanayinde, elektrolit elde edilmesinde sarf edilmektedir. Borik asit nikel kaplamada, fluoboratlar ve fluoborik asitler ise; kalay, kurşun, bakır, nikel gibi demir dışı metaller için elektrolit olarak kullanılmaktadır. Alaşımlarda, özellikle çeliğin sertliğini arttırıcı olarak kullanılmaktadır. Bu konuda

ferrobor oldukça önem kazanmıştır. Çelik üretiminde 50 ppm bor ilavesi çeliğin sertleştirilebilme niteliğini geliştirmektedir [96].

3.2.6. Tarım sanayi

Sentetik gübreler, biyolojik gelişim ve kontrol kimyasalları, küf ve mantar önleyiciler, böcek-bitki öldürücüleri ve yabancı otlarla mücadelede kullanılmaktadır [88].

3.2.7. Savunma sanayi

Zırh plakalar, seramik plakalar, ateşli silah namluları, fişek vb. yerlerde kullanılmaktadır [93].

3.2.8. Tıp

Yapay organlar, kemik gelişiminde ve artiritte, menopoz tedavisinde ve manyetik rezonans görüntüleme cihazlarında kullanılmaktadır [93].

3.2.9. Otomobil sanayi

Titreşim söndürücü malzemeler, hava yastığı şişirme mekanizmaları, ısı enerjisi depolayıcılar, bor hidrür yakıtları, hidrojen depolayıcılar, yağlarda ve metal aksamalarda, hidroliklerde, antifrizde kullanılmaktadır [93].

3.2.10. Makine sanayi

Manyetik cihazlar, zımpara ve aşındırıcılar, kompozit malzemeler, motorlar, yüksek sıcaklık sızdırmazlık contaları, yüksek performanslı motor yağlarında kullanılmaktadır [93].

3.2.11. Koruyucu

Ahşap malzemeler ve ağaçlarda koruyucu olarak, boya ve vernik kurutucularında kullanılmaktadır [97].

3.2.12. Kimya sanayi

Elektrolitik işlemler, flatasyon ilaçları, bayo çözeltileri, petrol boyaları, yanmayan ve erimeyen boyalar, yapıştırıcılar, korozyon önleyiciler, mürekkep, kibrit, kozmetikler, mumyalama vb. yerlerde kullanılmaktadır [93].

3.2.13. Kağıt sanayi

Beyazlatıcı olarak kullanılmaktadır [97].

3.2.14. İnşaat ve çimento sektörü

Mukavemet artırıcı ve izolasyon amaçlı olarak kullanılmaktadır [97].

3.2.15. İletişim araçları

Cep telefonları, modemler, televizyonlar vb. yerlerde kullanılmaktadır [97].

3.2.16. İlaç ve kozmetik sanayi

Dezenfekte ediciler, antiseptikler, diş macunları ve lens solüsyonlarında kullanılmaktadır [97].

3.2.17. Enerji sektörü

Hidrojen taşıyıcı, güneş enerjisinin depolanması, güneş pillerinde koruyucu olarak kullanılmaktadır [97].

3.2.18. Elektronik ve bilgisayar sanayi

Bilgisayarların mikro çiplerinde, CD-sürücülerinde, bilgisayar ağlarında; ısıya-aşınmaya dayanıklı fiber optik kablolar, yarı iletkenler, vakum tüpler, dielektrik malzemeler, elektrik kondansatörleri, gecikmeli sigortalarda kullanılmaktadır [97].

4. BORLAMA VE ÖZELLİKLERİ

4.1. Borlama

Demir ve çeliğin yüzey özelliklerini iyileştirmek amacı ile kullanılan yöntemlerden biri de borlamadır [16]. Borlanmış çelik parçalar makine mühendisliği ve otomotiv sektörlerinde çeşitli tribolojik uygulamalarda mükemmel performans sergilemektedir [8]. Son yirmi yılda borlama giderek daha da etkin bir yüzey koruma yöntemi haline gelmiştir [13]. Çeliklerin borlanması adhesiv ve abrasiv aşınma ile başa çıkmak için kullanılmaktadır ve bu hususta başarılı bir yöntemdir [17]. Çelik yüzeyinde demir borür oluşturulması borlama işleminin en bilinenlerindendir [12]. Borlama işlemi aşınma ve sürtünmenin kontrolünün öncelikli öneme sahip olduğu bir çok triboloji uygulamasında en önde gelen seçeneklerden biridir [11].

Borlama işlemi bor atomlarının numune yüzeyine difüzyonunu sağlayıp ana metal ile borürler oluşturmasını amaçlayan bir kimyasal ısıtılma işlemidir [11,18,98,99,100].

Borlama, Alman Endüstri Standardı DIN 17014'e göre de "termokimyasal işlem yoluyla iş parçasının yüzeyinin bor atomlarıyla zenginleştirilmesi" olarak tarif edilen termo-difüzyonal yüzey işlemidir. Yani, borlama, termal enerji yoluyla bor atomlarının iş parçasının yüzeyindeki metal latisin (kafesin) içerisine yayınması ve orada ana malzemenin atomları ile borürlerin oluşturulmasıdır [55].

Borlama işlemiyle oluşan borürler alt tabaka çeliğinin tribolojik davranışlarını geliştirir [101]. Bor birçok mineralleri ve bileşikleri olan bir elementtir[21]. Nispeten küçük ebatlı bir element olduğundan birçok demir esaslı ve demirdışı metallere [102], nikel ve kobalt alaşımları, metal bağlı karbürler, refrakter alaşımları [9] ve bazı süper alaşımlarda dahil olmak üzere birçok türde malzemeye uygulanmıştır [18].

Demir ürünlerinin borlanması işlemi genellikle 840 °C ile 1050 °C sıcaklık aralığında yapılır [11,18]. Yüzeylerde bor zenginleştirilmesi işlemi için çeşitli teknikler mevcuttur [19,103]. İşlem katı, sıvı, gaz [11,18,101] plazma ve iyon implantasyonu

[9,40] ortamlarından herhangi biri kullanılarak yapılır [102]. Borlama ortamı, bor kaynağı (amorf bor, B_4C , $Na_2B_4O_7$, B_2H_6), aktivatörler (KBF_4 , NH_4F) dolgu ve deoksidantlardan (SiC , Al_2O_3) oluşur. Aktivatörler borür tabakasının düzenli gelişmesine etki ederler. Dolgu malzemesi ve deoksidantlar ise borlama esnasında oksijeni tutarak indirgeyici bir ortam oluştururlar ve borlama malzemesinin ana malzemeye yapışmasını önlerler. Borlama işlemi esnasında kullanılan yöntem, borlama malzemesinin kompozisyonu, borlanacak malzeme cinsi, işlem süresi ve işlem sıcaklığı elde edilen tabakaya etki eden faktörlerdir [51,52,53,55,104].

4.1.1. Borlama işleminin avantajları

- Borlama işleminin en önemli karakteristik özelliği, elde edilen borür tabakasının çok yüksek sertlik (1450-5000 HV) ve ergime sıcaklığına sahip olmasıdır. Sade karbonlu çelikler üzerinde oluşturulan borür tabakalarının sertliği, diğer geleneksel sertleştirme yöntemleri olan sementasyon ve nitrürasyona göre çok daha yüksektir. Hatta bu sertlik, sertleştirilmiş takım çeliklerinin ve sert krom kaplamanın sertliklerinden daha yüksek, tungsten karbürüne ise eşdeğerdedir. Bor kaplanmış çeliklerin ve diğer sert metallerin yüzey sertlikleri Çizelge 4.1’de verilmektedir [53,54,55,104].
- Borür tabakalarının yüksek yüzey sertliğine ve düşük sürtünme katsayısına sahip olmaları; adhesiv, tribo-oksidasyon (kimyasal), yüzey yorulması ve abrasiv aşınma gibi temel aşınma mekanizmalarının oluşumunu önlemede çok önemli fayda sağlar.
- Borür tabakası, 550-660 °C sıcaklıklarda bile sertliğini korumaktadır.
- Oksitleyici ve korozyif ortamlarda parçanın yorulma ömrünü artırır.
- Borlama, bir iş parçasının sertleştirilmesi istenen seçilmiş bölgelerine, düzensiz karmaşık şekillere üniform bir şekilde uygulanabilir.
- Borlama yüzeyi, çok hassas bir şekilde parlatılabilir.
- Borlanmış yüzeyler çok yüksek sıcaklıklarda (850 °C) orta seviyede oksidasyon direncine ve oldukça yüksek ergimiş metal korozyon direncine sahiptir.

Çizelge 4.1. Borlanmış çeliklerin sertlik değerlerinin diğer işlemlerle ve sert malzemelerle karşılaştırılması [53,54,55,104].

Malzeme	Mikrosertlik, HV (kg/mm ²)
Borlanmış yumuşak çelik	1600
Borlanmış AISI H13 kalıp çeliği	1800
Borlanmış AISI A2 çeliği	1900
Su verilmiş çelik	900
Su verilmiş ve temperlenmiş H13 çeliği	540-600
Su verilmiş ve temperlenmiş A2 çeliği	630-700
Yüksek hız çeliği BM 42	900-910
Nitrülenmiş çelik	650-1700
Sementasyonlu düşük alaşımlı çelik	650-950
Sert krom kaplama	1000-1200
Sementit karbürler, WC+Co	1160-1820 (30 kg)
Al ₂ O ₃ +ZrO ₂ seramikler	1483 (30 kg)
Al ₂ O ₃ +TiC+ ZrO ₂ seramikler	1730 (30 kg)
Sialon seramikler	1768 (30 kg)
TiN	2000
TiC	3500
SiC	4000
B ₄ C	5000
Elmas	~ 10000

- Isıl işlem uygulanabilen malzemeler performanslarını optimize etmek için borlama sonrası tamamen sertleştirilebilirler.
- Borlama işlemi, demir esaslı malzemelerin oksitleyici olmayan seyreltik asitlere karşı korozyon direncini ve bu malzemelerin erozyon dirençlerini artırmaktadır. Bu özellikleri sebebiyle de endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır.
- Borlama işlemi, yağlayıcı kullanımını azaltmakta, soğuk birleşme eğilimini ve

sürtünme katsayısını düşürmektedir.

- Borlama işlemi ile düşük alaşımlı çeliklerin H_2SO_4 , H_3PO_4 ve HCl gibi asitlere karşı direncini artırmak mümkündür [53,54,55,104].

4.1.2. Borlama işleminin dezavantajları

Borlama işlemi, birçok avantajının yanında bazı sınırlamaları da beraberinde getirmektedir.

- Borlama işlemi uygulanan malzemelerde bor tabaka kalınlığının %5-20'si oranında boyutsal olarak artış gözlenmektedir. Örneğin, 25 μm ' lik bir tabaka kalınlığı 1,25-6,25 μm ' lik bir büyümeye neden olmaktadır. Bu kalınlık artışı borlanan malzemenin cinsine ve borlama şartlarına bağlıdır. Çok hassas toleranslarla çalışmak gerektiği zaman, kaplamanın işlenmesi elmas takımlarla mümkün olmaktadır. Çünkü yüzeyin geleneksel tekniklerle işlenmesi sırasında kaplama tabakasında kırılmalar meydana gelmektedir. Bu da kaplama kalitesinde bozulmalara ve çatlamalara yol açmaktadır.
- Borlama sonrası ısıtıl işlem görecektir olan çeliklerde borür tabakasının özelliklerinin korunması için inert atmosfer veya vakum gerekmektedir.
- Genelde borlanmış alaşımlı çelik parçaların döner temaslı yorulma özellikleri yüksek basınçlı yüzeylerde (2000N) karbürizasyon ve nitrürasyonla kıyaslandığı zaman, çok zayıftır. Borlamanın bu özelliği sebebiyle, dişli üretiminde bir sınırlama söz konusudur.
- Borlama teknikleri esnek değildir ve gaz ortamında sementasyon ve plazma nitrürasyonu gibi diğer termokimyasal yüzey sertleştirme işlemlerine göre işçilik ve işletim maliyeti daha yüksektir. Daha esnek olan gaz karbürizasyonu ve plazma nitrürasyonu işlemlerinin kısa sürede ve daha kolay gerçekleşmesi borlamaya göre avantajlar sağlamaktadır. Buna rağmen; yüksek sertlik ve kalıcı yüksek aşınma ve korozyon direncinin arzu edildiği durumlarda borlama işlemi tercih edilmektedir. Ucuz iş gücü temin edilebilen yerlerde de borlama tercih edilen bir işlemdir [53,54,55,104].

4.2. Borlama Yöntemleri

Borlama işlemleri, termokimyasal ve termokimyasal olmayan yöntemler olarak iki ana gruba ayrılmaktadır. Bu yöntemlerden en çok kullanılanı termokimyasal yöntemlerdir [53]. Termokimyasal bor kaplama yöntemleri sıcaklık ve zamanın bir fonksiyonu olarak bor atomunun metale difüzyonu prensibine dayanmaktadır. Bu yöntemler; kutu borlama, sıvı borlama, pasta borlama ve gaz ortamda borlama şeklinde sıralanabilir [55]. Termokimyasal olmayan fiziksel buhar biriktirme (PVD), kimyasal buhar biriktirme (CVD), plazma sprey ve iyon biriktirme gibi yöntemler ile de son yıllarda borlama işlemi gerçekleştirilebilmektedir [104].

4.2.1. Katı ortamda borlama

Bor verici ortamın toz halinde olduğu bu yöntem işlem kolaylığı, temiz yüzey elde edilmesi, gerekli cihaz ve donanımın basitliği gibi etkenlerden dolayı geniş bir uygulama alanına sahiptir. İşlem parametreleri 800-1000° C sıcaklık ve 1-8 saat arasında değişir. Kutu sementasyona benzeyen katı ortam borlama yöntemi, koruyucu atmosfer altında yapıldığı gibi sıkı kapatılmış kutularda da yapılabilir. Bor verici tozlar ısıya dayanıklı kutu içerisine konur ve borlanacak numuneler bu tozun içine gömülür. Borlanacak numunelerin etrafı 5-10mm toz kalınlığı olacak şekilde bu tozlarla kapatılır. Kutunun üstü sızdırmaz bir kapakla kapatılıp işlem normal atmosferde yapılabilir; yada işlem, kutunun veya fırının içinin koruyucu gaz atmosferiyle korunduğu ortamlarda yapılabilir [51].

Fırın kapağı kapatılarak fırın içi sıcaklığı borlama sıcaklığına yükseltilir. Kutu fırında borlama süresine kadar bekletildikten sonra çıkartılır ve soğutulur. Soğutma işlemlerinden sonra parça kutudan çıkartılır.

Bu yöntemin avantajları; gerekli ekipmanların kolay bulunabilmesi ve ucuz olmaları, emniyetli ve toz bileşiminin kolayca değiştirilebilir olması, işlemin basit olması, işlem sonrası parça yüzeyinin kolay temizlenebilmesi ve düzgün yüzeylerin elde

edilmesidir. EKabor borlama ürünleri Çizelge 4.2.'de verilmiştir. Dezavantajları ise; atık ürünlerin çevreye zararlı olması, işlem parametrelerinin kontrol yeteneğinin kötü olması, otomasyonun mümkün olmamasıdır [49].

Çizelge 4.2. EKabor borlama ürünleri [55].

Tip	Tane Boyutu (μm)	Yoğunluk Kompakt, g/cm^3	Özellik
EKabor 1	≤ 150	1,80	Yüzey kalitesi en yüksek tabaka için; parça yüzeyine yapışmaya eğilimli.
EKabor 2	≤ 850	1,50	Mükemmel yüzey kalitesi, işlem sonrası parçadan kolaylıkla ayrılma.
EKabor 3	$\leq 1,450$	0,95	Çok iyi yüzey kalitesi, işlem sonrasındaki toz akıcılığı hala iyidir.
EKabor HM	≤ 150	0,95-1,50	Çok iyi yüzey kalitesi, sert metal, küçük delik ve kalın tabakalar için.
EKabor WB	220-350	0,95	Oksijensiz gaz atmosferde, akışkan yatakta borlama için.
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.

Ticari alanda katı ortam borlama maddeleri kullanım alanlarına göre sınıflandırılarak satılmaktadır.

EKabor 1: Tozdur. Optimum tabakanın elde edilmesinde kullanılır. Yüzey pürüzlülüğü açısından yüksek kaliteye erişilir ve genel maksatlı, demir ve çelik malzemelerde kullanılır.

EKabor 2: Granüldür. Yüzey pürüzlülüğü açısından çok yüksek kaliteye sahiptir. Düşük alaşımlı çelikler ile Pik ve Spero düküm için kullanılır.

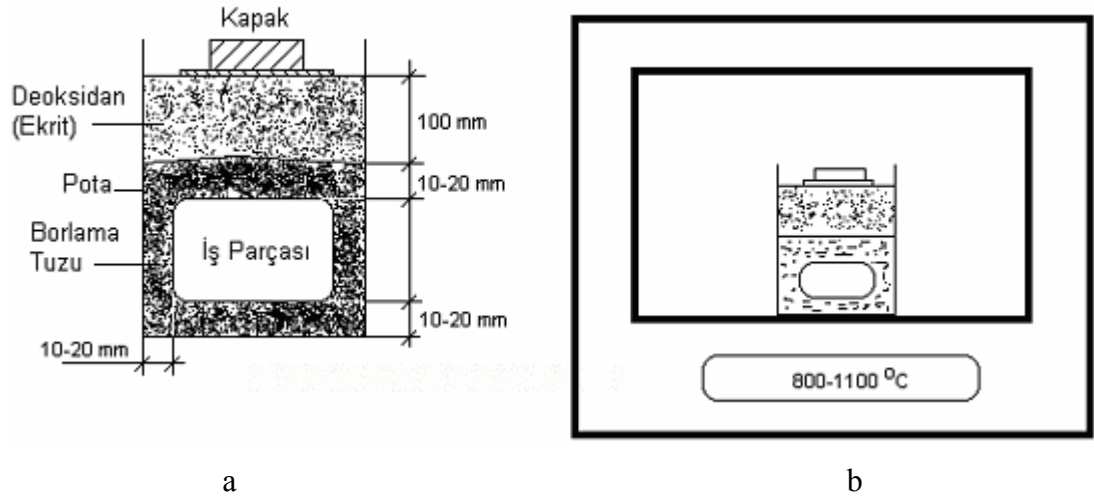
EKabor HM: Sert malzemelerin borlanması için özel olarak üretilmiştir.

Durborid-Pasta: Pasta şeklinde genel amaçlı olup kullanma esnasında koruyucu gaz ihtiyacı vardır [56].

Katı ortamda borlama iki farklı şekilde yapılmaktadır. Bunlar; toz ortamda borlama ve macun ile borlamadır. Her iki yöntemde de kullanılan bor verici ortam aynıdır. Toz ortamda kullanılanlar 90 mesh'lik ince tanelerden oluşmaktadır. Macunlamada ise aynı maddeler macun haline getirilmiştir. Her iki yöntemde de kullanılan borlama maddelerine ekabor denir.

Toz ortamda borlama

Borlanacak olan malzemenin, toz halindeki bor verici ortam içinde 800-1100°C sıcaklıklarda ve 2-10 saat arasında bekletilmesi ile yapılan bir işlemdir [105]. Şekil 4.1'de borlama işleminde kullanılan kutu ve fırınların şematik görünüşü görülmektedir. Çizelge 4.3.'de de katı ortam borlamada kullanılan bazı bor kaynakları verilmiştir.



Şekil 4.1. Borlama işleminde kullanılan a) kutu, b) fırınların şematik görünüşü.

Kutu sementasyona benzeyen bu yöntem soy gaz atmosferinde yapılabildiği gibi, sıkı kapatılmış kutularda normal atmosfer altında da yapılabilir. Borlama işleminin ana bileşeni borkarbür (B_4C), amorf bor (B), ferrobordur (Fe-B). Borkarbür (B_4C) diğerlerine göre daha ucuz olduğundan yaygın olarak kullanılmaktadır [55].

Çizelge 4.3. Katı ortam borlamada kullanılan bazı bor kaynakları [54,55].

Malzeme	Kimyasal Formülü	Molekül Ağırlığı (g/mol)	Teorik Bor Miktarı (%)	Ergime Sıcaklığı (°C)
Amorf bor	B	10,82	95-97	2050
Ferrobör	Fe-B	---	17-19	---
Borkarbür	B_4C	55,29	77,28	2450

Literatürde bulunan katı ortam borlama bileşiklerine ait bazı örnekler aşağıda verilmiştir [51].

- 1- Ferrobor + %10-15 NBF₆
- 2- %95 B₄C + %5 NaF
- 3- %33 Amorf bor + %2 NH₄Cl + %65 Al₂O₃
- 4- %80 B₄C + %20 Na₂CO₃
- 5- %98 B₄C + %2 KBF₄
- 6- %50 Amorf bor + %1 NH₄F.HF + % 49 Al₂O₃
- 7- %(7.5-40) B₄C + %(2.5-10) KBF₄ + (50-90) SiC
- 8- %84 B₄C + %16 Na₂B₄O₇
- 9- %95 Amorf bor + %5 KBF₄
- 10- %20 B₄C + %5 KBF₄ + %75 Grafit
- 11- %(40-80) B₄C + %(20-60) Fe₂O₃
- 12- %100 B₄C

Pasta (macun) ile borlama

Kutu borlamanın zor ve daha pahalı olduğu veya fazla zaman kaybının olduğu durumlarda kullanıldığı bir yöntemdir [53]. Katı ortam borlama yönteminde kullanılan tozların macun haline getirilerek kullanıldığı borlama yöntemidir [51]. Bu yöntemde, %45 B₄C (200-400 mesh tane boyutu) ve %55 Kriyolit (Na₃AlF₆, flaks ilaveli) veya geleneksel borlama toz karışımı B₄C + SiC + KBF₄ iyi bir bağlayıcı ajan ile (Butil asetatla çözünmüş nitroselülozun sulu çözeltisi veya hidrolize edilmiş etil silikat) uygulanmaktadır [55].

Borlama için kullanılacak tozlar macun haline getirilir ve borlanacak parçanın üzerine 2-5 mm kalınlıkta sürülür [51]. Parçanın yüzeyine sürülen macun derhal sıcak hava akımında, ön ısıtma odasında veya kurutma fırınında maksimum 150 °C' de kurutulması gerekir. Gerektiği taktirde macun üzerine tekrar birkaç kez daha sürülebilir. Kurutma işleminden sonra macun ile kaplanmış parçalar önceden ısıtılmış fırına konur ve fırın ağzı kapatılarak borlama sıcaklığına ısıtılır. Belirli süre bu sıcaklıkta tutulduktan sonra parçalar, dışarı alınarak soğumaya terk edilir. Parçalar soğuduktan sonra yüzeyinde yapışmış olan artıklar temizlenir ve böylece borlama yapılmış olur [106].

Borlama işleminden sonra numune üzerine macunun yapışması bu yöntemin önemli bir sakıncasıdır [51]. Bu etkiyi azaltmak için sulu sodyum silikat çözeltisi, %3 polivinil alkol veya %0.5 metil selüloz içeren sulu çözeltiler kullanılabilir [62].

Bu yöntemle borlama mutlaka koruyucu gaz ortamında yapılması gerekir. Aksi takdirde kötü bir borür tabakası oluşur. Bu yöntemle kısmi borlama yapılabilir. Bu yöntemde kullanılan koruyucu gazlar Argon, Formier Gazı, NH_3 , ve saf azottur [106].

Çizelge 4.4. Koruyucu gaz atmosferin özellikleri [50].

Koruyucu gazın adı	Bileşimi
Argon	%99,996 Ar
Formier Gazı (Kalıp Gazı)	%5-30 B_2 , geri kalanı N_2
Amonyak (NH_3) (Spolt Gazı)	%75 H_2 , %25 N_2
Saf Azot	%99 N_2 , %1 H_2

4.2.2. Sıvı ortamda borlama

Borlama şartlarında ortam sıvıdır. Borlama işlemi, 800-1000 °C arasındaki sıcaklıkta 2-6 saat süre bekletilerek gerçekleştirilir [50]. Borlama banyosunda, bor kaynağı olarak boraks ve redükleyici madde olarak genelde B_4C ve SiC tozları kullanılır. Borlama sırasında elektrik akımı uygulanıyorsa elektrolitik borlama uygulanmıyorsa normal sıvı ortamda borlama söz konusudur [7].

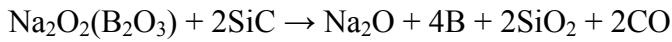
Normal sıvı ortamda borlama

Sıvı ortam borlamasında banyo bileşimi olarak genelde; boraks, bor karbür, ferrabor, kalsiyum hegzabor gibi bor verici bileşikler ile SiC , Fe-Si, Fe-Mn, Ca-Si, Al-Mg, Li-Zr, Be ve toprak alkali metallerine sahip redükleyici maddelerin karışımı kullanılır. Sıvı ortam borlamasında redükleyici maddeler zamanla banyonun dibine çökerek

banyo akıcılığını olumsuz etkiler. Bunu önlemek amacıyla banyo özgül hacminin (numunenin birim yüzey alanı başına düşen banyo hacmi) 10-20 cm³ veya üzerinde olması gerekir. Normal sıvı ortam borlamasında, borlanan metal ve redükleyici madde arasında anodik ve katodik reaksiyonlar meydana gelir. Bor ile kaplanan metal yüzeyinde katodik, redükleyici madde yüzeylerinde ise anodik reaksiyon oluşmaktadır. Bu reaksiyonların etkinliği aşağıdaki şartlara bağlıdır.

1. Metal ve redükleyici madde arasındaki elektrod potansiyel farkına.
2. Banyonun direncine.
3. Metal ile redükleyici madde arasındaki temas direncine.
4. Galvalik elemanın toplam omik direncine.

Difüzyon reaksiyonu esnasında katod potansiyeli, yüzeyde oluşan fazın potansiyel işaretini alır. Difüzyon ile yüzey bileşiminin değişimi yüzeyin elektrot potansiyeli anod potansiyeline eşitleninceye kadar devam eder. Örneğin demirin borlanması Si, B₄C, Ti gibi redükleyici maddelerin kullanılması durumunda demir tabakası üzerinde FeB, Fe₂B fazlarının her ikisine de teşekkül eder [51]. Çünkü bahsedilen redükleyici maddelerin elektrod potansiyelleri Fe₂B, FeB fazının her ikisinden de daha negatiftir. Aynı şekilde demirin borlanması SiC'ün redükleyici madde olarak kullanılması durumunda borlanan yüzeyde yalnızca Fe₂B fazı oluşur. Çünkü SiC'ün elektrod potansiyeli Fe₂B fazı potansiyelinden daha negatif, FeB fazı potansiyelinden ise daha pozitif bir değerdedir. Normal sıvı ortam borlamasında sıvı boraks ve SiC karışımı içeren banyo ortamında aşağıdaki reaksiyon meydana gelir.



Reaksiyon gereğince serbest haldeki bor aktif duruma geçerek malzeme yüzeyine yayılmaktadır [54]. Çizelge 4.5.'te sıvı ortam borlamasında kullanılan bazı bor kaynakları ve özellikleri verilmiştir. Bu yöntemin zehirlilik, patlayıcı doğa ve çevresel kirlilik gibi dezavantajları da kullanımını sınırlamaktadır [23,107].

Çizelge 4.5. Sıvı ortam borlamasında kullanılan bazı bor kaynakları ve özellikleri [54].

Bor Sağlayıcılar	Kimyasal Formülü	Molekül Ağırlığı (g)	Teorik Bor Miktarı (%)	Ergime Sıcaklığı (°C)
Boraks	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7, 10 \text{ H}_2\text{O}$	381,42	11,35	---
Susuz Boraks	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	201,26	21,50	741
Metabor Asidi	HB O_2	43,83	24,69	---
Sodyum Bor Florür	NaBF_4	109,81	9,85	---
Bor Oksit	B_2O_3	69,64	31,07	450
Bor Karbür	B_4C	55,29	78,28	2450
Potasyum Bor Florür	KBF_4	69,67	15,52	---

Sıvı ortam borlamasının başarıyla uygulanabilmesi aşağıdaki şartlara bağlıdır.

1. Ergimiş banyo ortamı bir difüzyon elementi içermeli ve çok iyi bir iletkenlik özelliği göstermelidir.
2. Ergimiş banyo içerisinde redükleyici maddenin potansiyeli difüzyon uygulanan metalin potansiyeline göre daha negatif olmalı.
3. Ergimiş banyo içerisinde redükleyici madde katı halde bulunmalı ve homojen bir dağılım göstermelidir.

Aşağıda sıvı ortam borlamasında demir gurubu malzemeler için kullanılan bazı borlama ortamları verilmiştir [51].

1. %70 Boraks + %13 Borikasit + %10 Ferrosilis + %7 Al (Şen ve arkadaşları, 1995)
2. %70 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ + %30 SiC (Yüksel ve arkadaşları, 1991)
3. %40 B_4C + %60 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ (Yüksel ve arkadaşları, 1991)

4. %2.5 B₄C + %10 KBF₄ + %87.5 SiC (Yüksel ve arkadaşları, 1991)
5. %10 B₂O₃ + %20 SiC + %70 Na₂B₄O₇ (Yüksel ve arkadaşları, 1991)
6. %66 Boraks + %20 Ferrosilis + %14 Kalsine borikasit (Bozkurt, 1984)
7. %73-79 Na₂B₄O₇ + %15-20 NaCl + %6-7 B (Venkatasubramanian and Iyer, 1977)
8. %80 NaCl + %20 NaBF₄ (Matuschka, 1980)
9. %45 NaCl + %45 BaCl₂ + %10 B₄C (Matuschka, 1980)
10. %80 NaCl + %15 NaBF₄ + %5 B₄C (Matuschka, 1980)

Akışkan yatakta borlama

İri taneli silisyum karbür parçacıkları, EKabor WB gibi özel bir borlama tozu ve N₂ – H₂ karışımı gibi bir oksijensiz gazın taban malzemesini içeren akışkan yatak içinde borlama işlemi yeni bir yöntemdir. Elektrik, ısı kaynağı olarak kullanıldığı zaman, taban daha hızlı bir ısı transfer ortamı oluşturur. Bu nedenle sistem soğutma ve tavlama fırınlarıyla donatılmıştır [64]. Macun ve sıvı borlama yönteminin bir karışımı olarak uygulanan bir yöntemdir.

Bu sistemin avantajları şunlardır.

1. Borlama sıcaklığına aniden çıkma ve daha kısa süreli işlem görecektir parçaları doğrudan dışarıya alma ile birlikte malzemede daha az ısıl gerilme oluşmaktadır.
2. Bor ve borlanan malzeme arasındaki çok yüksek ısı transfer hızı sebebi ile mükemmel ısıl kararlılığa sahip olunmaktadır.
3. Sürekli seri ve otomatik çalışma imkanı vardır.
4. Borlanacak parçalar aralıklı bir şekilde şarj edilir ve fırından alınabilir.
5. Borlama sonrası parçaya doğrudan su verilebilir. Bu ise borlama ve su verme işlemlerini tek bir kademede yapmak demektir.
6. Seri üretilmiş parçaların işlemlerinde zaman ve enerji tasarrufu sağlar.

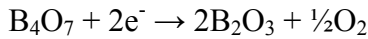
Bu yöntemin önemli bir dezavantajı, soygaz vasıtası ile damıtma kabı içerisinde damıtma maddesinin sürekli çalkalanmasıdır. Zenginleşmiş florür bileşimleri ihtiva eden atık gazlar kesinlikle temizlenmelidir. Ancak çevre ile ilgili problemleri

önlemek için; kuru CaCO_3 döküntüleri ile doldurulmuş bir emici ile veya titreşimli bir havalandırma tesisatı ile atık gazların oranı azaltılabilir. Buda ilave maliyet meydana getirir [64].

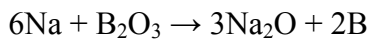
Elektrolitik borlama

Tuz banyosunda elektrolizle borlama işleminde katot olarak, borlanacak demir esaslı malzeme, ve anot olarak grafit elektrot kullanılmakta elektrolit olarak ise boraks kullanılmaktadır. Borlama işlemi $900-950^\circ\text{C}$ sıcaklık aralığında 4-6 saat süre ile $0.15-0.20 \text{ A/cm}^2$ akım altında gerçekleştirilmektedir. Parçanın her tarafında homojen bir kaplama tabaka kalınlığı elde edebilmek için elektroliz sırasında parça döndürülmektedir. Düşük alaşımlı çeliklerde çok ince kaplamaların eldesinde, yüksek akım yoğunluğu kullanılarak çok kısa sürelerde borlama yeterli olmaktadır. Alaşımlı çeliklerde ise kalın kaplama tabakalarının elde edilmesi için düşük akım yoğunluğu ve uzun sürelerde borlama işlemi gerekmektedir. Yapılan araştırmalar borür tabaka kalınlığının borlama süresi, borlama sıcaklığı ve akım yoğunluğundaki artışa bağlı olarak arttığı gözlenmiştir. Ancak tabakanın yapısal karakteri bu durumdan etkilenmemektedir [53].

Elektrolizle sıvı borlama işlemi sırasında, ergimiş halde tetraborat, borik asit ve serbest oksijene dönüşmektedir [64].



Aynı zamanda sodyum iyonları katot çevresinde nötürleştikten sonra borik asitle reaksiyona girerek serbest bor meydana getirir.



Bu durumda katoda yakın bölgede bol miktarda bor oluşturulmaktadır. Benzer şekilde iyi sonuçlar veren elektrolit bileşiklerinden bazıları şunlardır [64].

Bunun yanında bazı dezavantajları ise şunlardır. Di-boran (B_2H_6), H_2 ile beraber uygulanırsa çok olumlu sonuçlar verir, fakat zehirli ve patlayıcıdır. Trimetil bor ($(CH_3)_3B$) ise; borlama ile birlikte C yayınına da sebep olarak tabaka kalitesini bozar. Ortamın zehirliliği, patlama tehlikesi ve tesisatın pahalı oluşu prosesin kötü yönleridir (Çizelge 4.6).

Çizelge 4.6. Gaz halindeki bor bileşikleri ve bazı özellikleri [63].

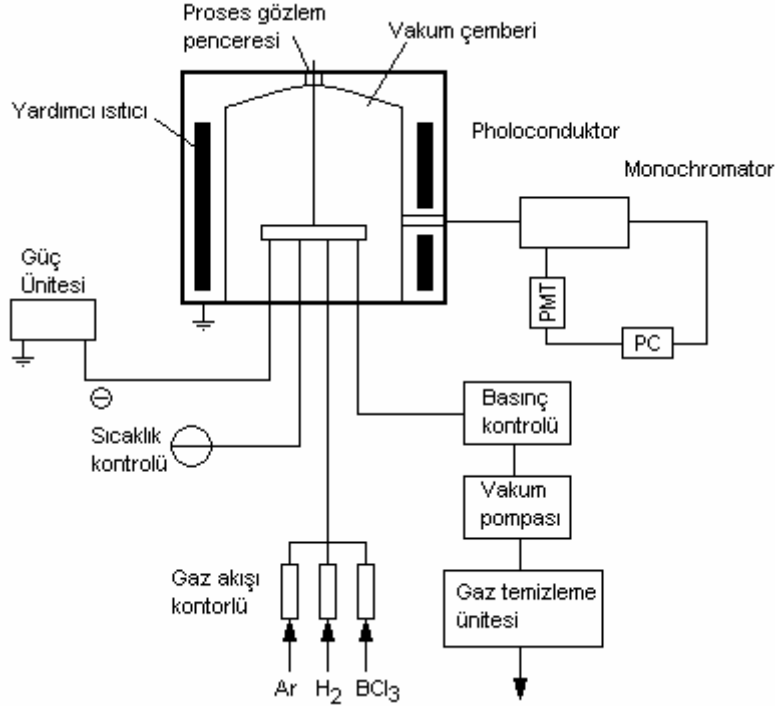
Malzeme	Formül	Molekül Ağırlığı	Teorik Bor Miktarı (%)	Donma Noktası
Bor triflorid	BF_3	67,82	15,95	-128,8
Bor triklorid	BCl_3	117,19	9,23	-107,3
Bor tribromid	BBr_3	250,57	4,32	-46
Di-boran	B_2H_6	27,69	39,08	-165,5
Bor trimetil	$(CH_3)_3B$	55,92	19,35	-161,5
Bor trietil	$(C_2H_5)_3B$	98,01	11,04	-95

(B_2H_6) - H_2 karışımı, zehirli ve patlayıcı olma özellikleri sebebiyle ticari olarak kullanılmamaktadır. Organik malzemeler kullanıldığı takdirde borür ve karbür bileşikleri birlikte oluşmaktadır. BBr_3 , çok pahalı ve suyla olan kuvvetli reaksiyonu ayrıca yüksek sıcaklıkta kararlılığının ayarlanması için BF_3 'e ihtiyaç duyulması sebebiyle kullanım açısından tercih edilmemektedir. Gaz borlama işlemi için en çok BCl_3 tercih edilmektedir [109]. Parça gaz borlamaya tabi tutulacağı zaman 1:15 BCl_3 + H_2 gaz karışımında 700-950 °C arasında ve 67 KPa basınç altında (0.67 bar) borlanmaktadır. Son çalışmalar, H_2 yerine 75:25 oranında $N_2:H_2$ kullanılmasıyla FeB fazının azaldığını ve daha iyi kalitede tabakaların elde edildiğini göstermiştir. Bu işlem titanyum ve alaşımlarına da uygulanabilmektedir [55].

4.2.4. Plazma ortamında yapılan borlama

Demir esaslı ve demir dışı metalik malzemelere uygulanan Ar, H₂ gazları ile birlikte bor kaynağı olarak BCl₃, B₂H₆, BF₃, B(OCH₃)₃ (trimetilborat) kullanarak 800-1000 °C sıcaklıkta, yaklaşık 10⁻² Pa gibi düşük bir basınçta oluşturulmuş plazma içerisinde yapılan borlamadır [38,110]. Mikroyapı ve demirbor tabakalarının büyümesi işlem sıcaklığı, gaz karışım oranları, malzeme kompozisyonları, işlem basınç değişim oranları ve uygulanan akım yoğunluğuyla kontrol edilebilmektedir [108].

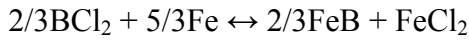
Yüzey difüzyonu ve kimyasal emilme gibi yüzey işlemlerinin büyük ölçüde yükseltilmiş yüzey enerjisinden dolayı yüzeydeki kimyasal olaylar katalitik etki ile hızlanırlar. Bunun sonucu oluşan iyon ve elektronlar ise elektrik alana etkide bulunurlar. Sistemi besleyen enerji, bu iyon ve elektronlar tarafından iletilir. Elektriksel alanın etkisi altında iyon ve elektronlar gaz moleküllerinin bu sıcaklığa ait ortalama enerjisinden daha yüksek bir enerji kazanırlar (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. Endüstriyel uygulamalarda kullanılan plazma borlama ünitesi [111].

Gaz ortamda termik aktiflenme sonucu meydana gelen kimyasal reaksiyonlar aktiflenmiş malzeme yüzeyinin katalitik etkisi ile hızlanırlar. Bu yöntem genelde BCl_3 , buharı ile hidrojenin oluşturduğu gaz karışımında yapılmaktadır. Bu ortamda BCl_3 , buharı ve hidrojenden oluşan atmosfer içinde plazma (iyon) borlama esnasında kloritin hidrojen ile indirgenmesi borür tabakasının oluşumuna ait ayrıntılı rolü oynar.

BCl_3 buharı ve hidrojen karışımının kullanılmasında hacmin %10'unu teşkil eden BCl_3 miktarı ile gaz fazındaki kimyasal reaksiyonlar ile kimyasal emilmiş bor miktarı ve hatta iş parçasının kenar tabakasına borun yayılması arasındaki dinamiksel denge elde edilir. Karışımında FeCl_2 kısmının artması gevrek ve gözenekli tabakaların oluşmasına neden olur. Karışımında BCl_3 buhar miktarı %20'ye çıkarılırsa o zaman,



reaksiyonuna göre, gevrek borür tabakası meydana gelir. Bu tabakada Fe ve Cl bulunur. Tabakadaki FeCl_2 ise mevcut işlem şartlarında buharlaşır. Eğer BCl_3 buharı ile hidrojen karışımında BCl_3 buhar miktarı %10'u geçmez ise, tabakada klorun varlığı tespit edilmez, yani oluşan borür tabakası klordan etkilenmez [69].

4.3. Borlanabilen Malzemeler ve Borürlerin Genel Özellikleri

Borlama işlemi, sade karbonlu çelikler, düşük alaşımlı çelikler, takım çelikleri, paslanmaz çelikler ve dökme demirlere uygulanabilmektedir. Buna ilaveten, nikel, kobalt, molibden ve titanyum esaslı alaşımlara da uygulanmaktadır. Ayrıca, sinterlenmiş karbürlerin yüzeyleri borlanarak, aşınma dirençleri artırılabilir. Yumuşak kobalt ve nikel bağlayıcıların yüzeylerinde borür fazları oluşturmak mümkün olup, son yıllarda seramiklere de bor kaplamalar uygulanmaktadır [112].

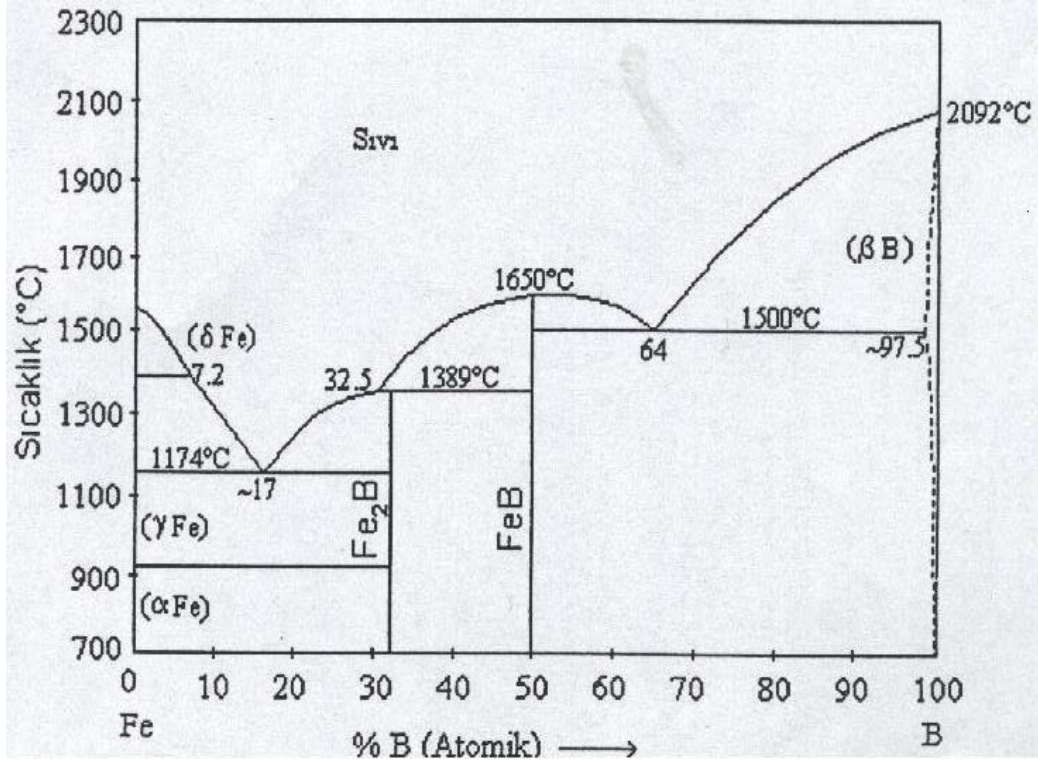
Endüstriyel olarak borlama işlemi, alüminyum ve silisyum ihtiva eden yatak çelikleri haricinde yüzeyi sertleştirilmiş, temperlenmiş, takım ve paslanmaz çelikler gibi

yapısal çeliklere, döküm çeliklerine, Armco demire (ticari saflıkta), gri ve küresel grafitli dökme demirlere, sinterlenmiş demir ve çeliklere uygulanabilmektedir [55].

Borlama işleminin ostenit fazında gerçekleşmesi sebebiyle havada sertleşen çelikler, borlama sonrasında anında sertlik kazanırlar. Suda sertleşen parçalar borür tabakasının termal şoka maruz kalması sebebiyle su verilmesi gerekli olduğu durumlarda borlanmazlar. Benzer şekilde sülfürlenmiş ve kurşunlanmış çelikler yüzeylerde çatlak oluşturma eğilimleri, nitrürlenmiş çelikler ise çatlak hassasiyetlei sebebiyle borlama işlemine tabi tutulmamaktadır[53].

4.3.1. Fe-B ikili denge diyagramı

Bor, rombohedral kristal yapısına sahiptir ve latis parametreleri sırasıyla $a=1,093$ nm ve $c=2,381$ nm 'dir. Ayrıca bor amorf yapıda da olabilmektedir. Bir alaşımda katı eriyik oluşum şartları arasında en önemli olanı, atomik boyut faktörüdür [53]. Bor elementi α -Fe 'de atom çapına bağlı olarak hem arayer hem de yer alan konumunda bulunabilmektedir. Fe-B sisteminde bor'un atom çapının demir'in atom çapından %27 oranında daha küçük olması, bu elementle katı eriyik yapma imkanı sağlamaktadır (Şekil 4.4). Demir alaşımlarında bor elementinin yer alan ve arayer katı eriyikleri yapabilecekleri iç sürtünme deneyleri ile belirlenmektedir. Bor difüzyonu için gerekli aktivasyon enerjisi 62 kcal/mol olarak tespit edilmiştir [113].



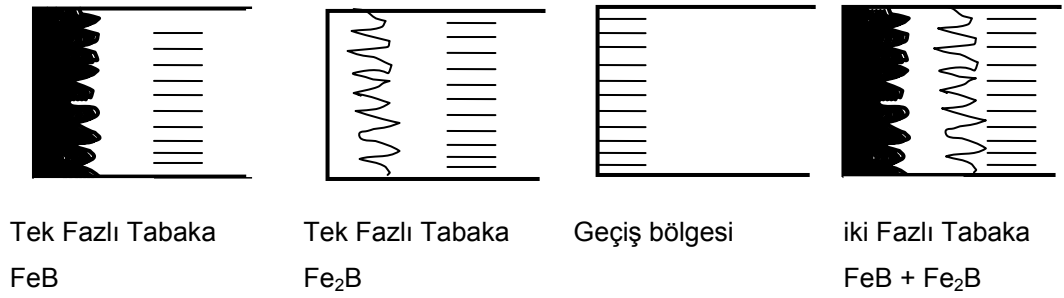
Şekil 4.4. Fe-B ikili denge diyagramı [53,55].

Fe-B ikili denge diyagramının α -Fe fazına yakın bölgesi, son 50 yıl içerisinde birçok kez değişikliğe uğramış, fakat yapılan son çalışmalarda, borun α -Fe ve γ -Fe fazları içerisinde %0,5B (a/o) kadar çözündüğü tespit edilmiş, δ -Fe fazı içerisindeki çözünürlüğü ise tam olarak tespit edilememiştir.

Denge diyagramından demir ile bor arasında Fe₂B (a/o8,83 B) ve FeB (a/o16,23 B) bileşikleri oluşmaktadır. Ötektik reaksiyon bor iyon difüzyonunun hakim olduğu γ -Fe tane sınırlarında ve/veya Fe₂B, Fe₃(C,B) 'de başlamaktadır. Ötektiğin yapısı ve özellikleri, bileşimin yanında sıvı tabakanın soğuma hızına da bağlıdır. Yüksek soğuma hızında ince mikroyapı, yüksek sertlik ve tokluk elde edilmektedir. İncelemeler sonucunda, Fe₂B fazının ergime sıcaklığının 1389-1410 °C arasında ve FeB fazının ise 1540-1657 °C arasında yer aldığı görülmektedir. Fe₂B peritektik reaksiyon sonucu 1407 °C' de oluşmaktadır [53,55].

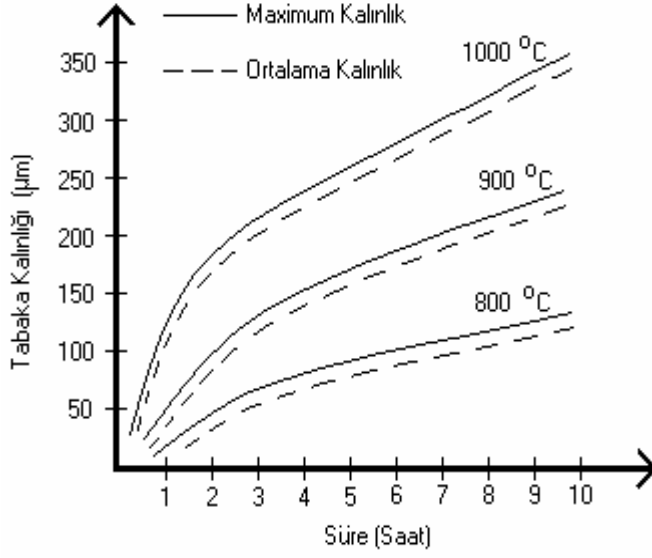
4.3.2. Borür tabakasının yapısı, bileşimi ve kalınlığı

Borür tabakasının özellikleri; borlanacak malzemenin bileşimine, borlama metoduna, borlama ortamına, borlama sıcaklığı ve borlama süresi gibi işlem şartlarına bağlıdır. Borlama işlemi sonucunda çeliklerde başlıca iki tabaka meydana gelmektedir. Bunlar; borür tabakası ve geçiş zonudur [53,55].



Şekil 4.5. Borür tabakalarında oluşan fazlar [79].

Bor elementinin çelik içerisine difüzyonu ile demir borürleri (FeB, Fe₂B) oluşur (Şekil 4.5) ve borür katmanının kalınlığını işlemin sıcaklığı ve süresi belirler (Şekil 4.6.) [102,114]. Her iki katmanda difüzyon doğrultusunda konumlanmış kolon biçimli kristal yapıya sahiptir [15].

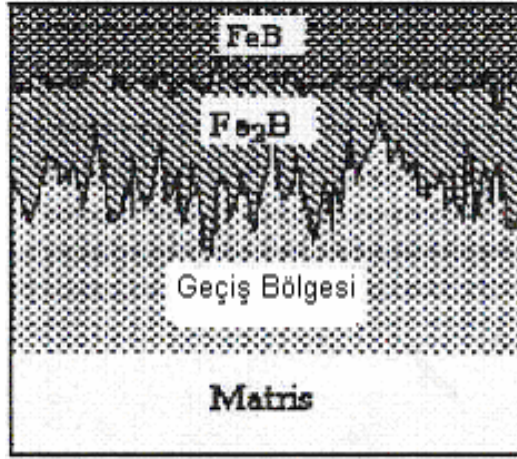


Şekil 4.6. Borlanmış C 45 çeliğinin borür tabakası kalınlığının işlem süresi ve sıcaklığa bağlı değişimi [79].

Genel olarak testere dişi morfolojisine sahip tek fazlı (Fe_2B) katmanın oluşması hem FeB hem de Fe_2B içeren çift fazlı bir katmanın oluşmasına göre tercih sebebidir [18,114]. Yaklaşık ağırlıkça % 16,23 B içeren bor bakımından zengin olan FeB fazı tercih edilmemektedir. Çünkü ağırlıkça % 8,83 B içeren Fe_2B fazına göre daha kırılgandır [115]. Borür katmanları diş biçiminden dolayı ana malzemeye daha iyi yapışır. Borlanmış katmanın kırılganlığı katman kalınlığı ile artar [16,116]. Ayrıca FeB ve Fe_2B fazları birbirinden farklı ısıl genleşme katsayılarına sahip olduklarından ($\text{IGK}; \alpha_{\text{FeB}}=23 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, $\alpha_{\text{Fe}_2\text{B}}=7.85 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$), çift fazlı katmanların $\text{FeB} / \text{Fe}_2\text{B}$ faz ara yüzeylerinde çatlak oluşumlarına sıklıkla rastlanır. Bu çatlaklar mekanik bir yük uygulandığında sıklıkla pullanmaya ve kavlanmaya yol açar [115]. Genellikle $\text{FeB} / \text{Fe}_2\text{B}$ arayüzeyinde, FeB fazının çekme gerilmelerine Fe_2B fazının ise basma gerilmelerine maruz kaldığı ileri sürülmektedir. Bu yüzden termal şok veya mekanik etkiler altında ayrılımlar ve tabaka halinde kalkmalar meydana gelmektedir. Bu sebeple, minimum FeB içeriğine sahip kaplama tabakaları elde edilmeye çalışılmaktadır [55].

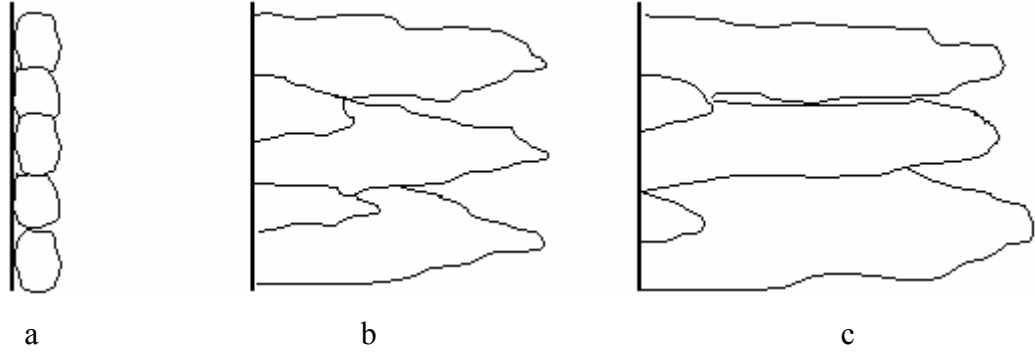
4.3.3. Demir borürlerin büyüme mekanizmaları ve özellikleri

Borlama işleminde hangi yöntem kullanılırsa kullanılsın karbon çeliklerinde yüzeyde iki tür borür fazı oluşabilmektedir. Genellikle, oluşan borürlerin kolon şeklinde büyüdüğü görülmektedir. Oluşan borür tabakasında en dış yüzeyde FeB fazı, matrise doğru Fe₂B fazı ve bu fazın altında geçiş zonu yer almaktadır. FeB fazı ile Fe₂B ve Fe₂B ile matris ara yüzeyindeki yapının kolonsal olduğu bilinmektedir (Şekil 4.7.). Ancak, yüksek alaşımlı çeliklerde alaşım elementlerinin borür tabakası ve büyüme mekanizmasına etkisinden dolayı, ara yüzey yapısının kolonsal yerine düz ve kompakt olduğu belirtilmektedir [117,118]. Alaşım elementlerinin matris ve borür tabakası içerisindeki çözünürlüklerine bağlı olarak, matrisin yakınında oluşturdukları bileşiklerin borlama mekanizmasını etkilemesinden dolayı borür tabakasının yapısı değişmektedir. Alaşım elementleri genellikle borun difüzyonunu engellemektedir [119].



Şekil 4.7. Borür tabakasının şematik olarak gösterilişi [55].

Borlama işlemi sırasında ilk borür çekirdeği numunenin yüzeyinde oluşmaktadır (Şekil 4.8.).



Şekil 4.8. Borlama sırasında borür tabaksının oluşum aşamaları [79]. a) İlk borür çekirdeğinin oluşumu (Fe_2B), b) FeB ve Fe_2B 'nin 001 doğrultusu boyunca yönlenmesi, c) Son aşamada FeB fazının oluşumu.

İlk olarak a'da oluşan borür çekirdeği b ve c'deki gibi numune içinde büyür. Bor atomları kafes yapının (001) doğrultusunda daha hızlı yayıldığı için FeB ve Fe_2B (001) boyunca yönlenir. Bu yüzden borür tanelerinin (001) yönünde en kolay şekilde yüzeye difuze olduğu belirtilmektedir [79]. Diğer taraftan kuvvetli bir kolonsal büyümenin (002) düzleminde ortaya çıktığı açıklanmaktadır. Önce Fe_2B fazı oluşur, ortamda yeterince bor konsantrasyonu varsa FeB fazı da oluşur. İlk önce oluşan Fe_2B fazı uzun bir sürede büyümektedir. Borür tabakaları çeliğin yüzeyinden içeriye doğru FeB_x , FeB , Fe_2B yapısında oluşur. Borlamanın son aşamasında sadece FeB fazı oluşur. FeB fazı Fe_2B fazından daha kısa sürede büyür. Bu yüzden FeB fazının dokusu Fe_2B fazı kadar güçlü değildir [105]. Kaplama yüzeyinden iç kısımlara doğru gidildikçe Fe_2B fazının varlığı artmaktadır. Bu durum, yüzeyden belirli oranlarda tabakalar kaldırılarak yapılan x-ışınları analizleri ile ispatlanmaktadır [53]. Amulevicius ve arkadaşlarının Fe-B sisteminde yapmış olduğu çalışmalarda, Fe_3B , Fe_2B ve FeB fazlarının varlığı lazer radyasyon tekniği ile belirlenmiştir [120].

Fe_2B tabakasının büyümesi konusunda iki mekanizma ileri sürülmektedir.

1. *Difüzyon kanalı büyüme mekanizması*; bor kaynağından borür ve ana metal ara yüzeyine sürekli olarak yayılan bor atomlarının bor tabakasına dik doğrultuda Fe_2B kristallerini oluşturması ve bu kristallerin kolonsal bir şekilde içeriye doğru ilerlemesiyle gerçekleşmektedir. Fe_2B fazı kuvvetli bir şekilde tercihli yönlenmeye

sahip olmasına rağmen, Fe₂B/FeB ara yüzeyinde düşük veya ihmal edilebilir bir kolonsallaşma görülmektedir. Bu yüzden kolonların ucunda büyüme mekanizmasının daha geçerli olduğu ileri sürülmektedir [53].

2. *Uçtan büyüme mekanizması*; ana malzemenin bileşimine ve işlem şartlarına bağlı olarak başlangıçta oluşan Fe₂B çekirdeği iğnesel bir şekilde büyümekte ve bor gradyanti boyunca ilerlemektedir. Bu durumda Fe₂B çekirdeğinin ucu civarında oluşan bölgesel yüksek gerilme alanları ve kafes distorsiyonları tabakanın kolonsal olarak büyümesini sağlamaktadır. FeB fazının büyüme mekanizması Fe₂B fazı ile benzerlik göstermektedir. FeB/Fe₂B ara yüzeyindeki kolonsallık Fe₂B/matris ara yüzeyine nazaran daha azdır. FeB/ Fe₂B ara yüzeyindeki kolonsallığın az olmasının nedeni, Fe₂B fazının nispeten sünek olan bir malzeme üzerinde büyüyen bir faz olması, ancak FeB fazının daha sert bir tabaka üzerinde büyümesidir. Böylece daha sert bir FeB fazı elde edilmektedir. Çizelge 4.7’de Fe₂B ve FeB fazlarının tipik özellikleri verilmektedir [53-55,104].

Çizelge 4.7. Fe₂B ve FeB fazlarının tipik özellikleri [53-55,104].

Özellik	Fe ₂ B	FeB
Kristal Yapı	Hacim Merkezli Tetragonal	Ortorombik
Latis Parametresi (Å)	a=5,099, c=4,240	a=4,053, b=5,495, c=2,946
Bor içeriği (% Ağırlıkça)	8,83	16,23
Yoğunluk (g/cm ³)	7,43	6,75
Elastisite Modülü (GPa)	284	343
Mikrosertlik (GPa)	18-20	19-21
Oluşum Entalpisi (ΔH) (kJ/mol)	-71,13 (298 °K) -77,82 (1000 °K)	-71,13 (298 °K) -72,96 (1000 °K)
Gibbs Serbest Enerjisi (kJ/mol)	-71,75 (298 °K) -68,19 (1000 °K)	-69,47 (298 °K) -68,05 (1000 °K)
Ergime Sıcaklığı (°C)	1389-1410	1540-1657
Termal Genleşme Katsayısı (10 ⁻⁶ /K)	7,65 (200-600 °C) 9,20 (1000-800 °C)	23 (200-600 °C)
Termal İletkenlik (W/m.K)	30,1 (20 °C)	12,0 (20 °C)
Elektriksel Direnç (10 ⁻⁶ Ω.cm)	38	80

4.3.4. Borür tabakasının büyüme kinetiği

Difüzyon işleminin gerçekleşebilmesi için itici güç önemlidir. Kaplama işlemlerinde bu özellik, hem ana metalin, hem de kaplama tabakasının yapısına bağlı olmaktadır. Bu temel özellikler difüzyonla metal kaplama işlemlerinde, kaplama kinetiğinin temelini teşkil etmektedir. Dislokasyonlar, tane sınırları, yüzeyler ve ara yüzeyler gibi başlıca malzeme yapı hataları ile difüzyon olayı arasında yakın bir ilişki mevcuttur [10].

Borür tabakasının büyümesi FeB ve Fe₂B fazlarında bor atomlarının difüzyon hızı tarafından kontrol edildiği ve bor atomlarının numune yüzeyine dik doğrultuda yayınması sonucu tabakanın büyüme gösterdiği kabul edilmektedir. Çeliklerde yayınma mekanizmasını etkileyen en önemli faktör, yayınmanın gerçekleştirildiği sıcaklıktır. Borlama sıcaklığına bağlı olarak borür tabakasının büyüme kinetiği Eş. 4.1’de verilen bağıntı yardımıyla incelenerek yaklaşık tabaka kalınlığı belirlenebilmektedir [55].

$$D=D_0 \cdot e^{-Q/RT} \quad (4.1)$$

Eşitlik 4.1’de D, yayınma katsayısı; D₀, yayınan atomların yayınma sabitini (cm²/sn); Q, aktivasyon enerjisini (cal/mol); R, gaz sabitini (1,987cal/mol.K) ve T, mutlak sıcaklığı (K) ifade etmektedir.

Aynı şekilde borlama süresine bağlı olarak borür tabakasının büyüme kinetiğinde meydana gelen değişimleri incelemek için, tabaka kalınlığı (x, cm) ve işlem süresi (t, s) arasındaki parabolik ilişkiden faydalanmak mümkündür (Eşitlik 4.2) [53].

$$X^2 = D \cdot t \quad (4.2)$$

FeB ve Fe₂B fazı içerisinde bor difüzyonu için gerekli aktivasyon enerjisinin aynı değere sahip olacağı ileri sürülmektedir. FeB ve Fe₂B fazı içerisinde bor difüzyonu için gerekli aktivasyon enerjileri arasında çok az bir fark vardır (Çizelge 4.8). Çelik

içersindeki alaşım elementlerinin oranı arttıkça aktivasyon enerjileri arasındaki fark da artmaktadır. Bu fark, B ile Fe atomları arasındaki bağlanma farklılığından kaynaklanmaktadır. Fe-B arasındaki en kısa mesafe FeB fazında Fe₂B fazına nazaran biraz daha küçük olduğundan (0,215nm'ye karşılık 0,218nm), Fe-B bağının kovalentlik derecesi ve dolayısıyla mukavemeti, FeB fazı için daha büyük olabilir. Ayrıca FeB fazı içerisinde en kısa B-B mesafesi B atomunun kovalent yarıçapının yaklaşık iki katıdır. Buna karşılık aynı değer Fe₂B fazı içerisinde belirgin olarak daha büyüktür (0,180nm'ye karşılık 0,212nm). Ayrıca, bor atomlarının en yakın komşu bor atomları ile arasındaki bağın kopması FeB fazı içerisinde Fe₂B fazına nazaran daha zor olduğu belirtilmektedir [55].

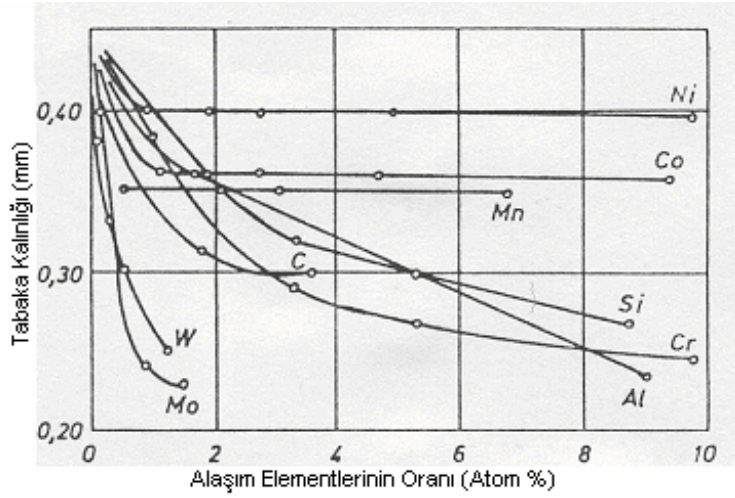
Çizelge 4.8. FeB ve Fe₂B fazı içerisinde bor difüzyonu için gerekli aktivasyon enerjileri [55].

Malzeme	QFeB (kJ/mol)	Q Fe ₂ B (kJ/mol)	QFeB/ Q Fe ₂ B
Fe	175	157	1,11
Fe-0.8C	176	154	1,14
Fe-0.5Cr	177	155	1,14
Fe-4Cr	289	210	1,38
Fe-4Ni	311	178	1,75
Fe-10Ni	286	157	1,82

4.3.5. Borür tabakası ve arayüzey morfolojisine alaşım elementlerinin etkisi

Matris malzemesindeki alaşım elementleri hem borür tabakasının morfolojisini hem de kalınlığını etkilemektedir. Borür tabakası içerisindeki alaşım elementlerinin cins ve miktarına bağlı olarak mekanik özelliklerde önemli ölçüde değişiklik görülür [53].

Şekil 4.9'da çeliklerde alaşım elementlerinin borür tabaka kalınlığına etkisi görülmektedir [79].



Şekil 4.9. Çeliklerde alaşıım elementlerinin borür tabaka kalınlığına etkisi [79].

Karbon: Borür tabakasında önemli bir çözünürlüğü olmayan karbon atomları, borür tabakası boyunca difüzyona uğrayamaz ve borlama süresince yüzeyden matrise doğru sürüklenirler ve borla birlikte borosementit $Fe_3B(B,C)$ şeklinde Fe_2B -matris ara yüzeyinde yer alır [104].

Karbon hem borür tabaka yapısına, hem de tabaka/matris ara yüzey morfolojisine etki etmektedir. Az ve orta karbonlu çeliklerde borür tabakası kolonsal bir yapıya sahip olurken, yüksek karbonlu çeliklerde borür tabakası/matris ara yüzeyinin düz bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Nispeten düz bir borür tabakası elde edilen %2 C ihtiva eden çeliklerde, borür tabakası/matris ara yüzeyinde (002) düzleminde, Fe_2B fazı büyüme göstermektedir. Yani çelikteki karbon miktarı arttıkça, borür tabakasındaki Fe_2B fazının kararlılığı artmaktadır [55].

Karbon elementi kaplama tabakası içerisinde çözünmeyip, matrise doğru difüze olmakta [119,121] ve kaplama tabakasının hemen altındaki geçiş bölgesine Fe_3C , $Cr_{23}C_6$, Fe_6C_3 gibi karbürlerin oluşuma sebep olarak [49], borür tabakasının hemen altında tamamen perlitik bir yapı oluşmaktadır. Karbon, geçiş bölgesi denilen bu bölgenin yapısını etkilemekte ve daha düzenli ve sert bir yapı oluşmasına neden olmaktadır [119]. Karbon konsantrasyonundaki bu artış, dengeli su vermeyi ve çok

sert borür tabakasından, yumuşak olan matrise doğru daha dengeli bir geçişi sağlamaktadır [55].

Çeliklerde, borür tabakasinda oluşan FeB , Fe_2B fazlarının sertlikleri karbon yüzdesinin artışına bağlı olarak artmaktadır. Bu artış %0.4 C'a kadar devam etmekte, bu değerin üzerinde ise hemen hemen sabit kalmaktadır. Bu durum FeB , Fe_2B veya diğer borürlerde daha çok karbon çözünürlüğünün mümkün olmamasından kaynaklanmaktadır. Karbon miktarının artışına bağlı olarak, tabaka kalınlığında bir azalmanın olduğu ve bu azalmaya, FeB fazının kararlılığının azalmasının neden olduğu belirtilmektedir [119].

Krom: Kromun, atom numarası demirin atom numarasından düşük olduğundan altlık malzemedenden ziyade borür tabakasinda yani $(\text{Fe,Cr})\text{B}$ ve $(\text{Fe,Cr})_2\text{B}$ ' de daha fazla çözünür ve yüzeye doğru yayılır. Kromda, karbon gibi borür tabakasının hem morfolojisine hem de kalınlığına etki etmektedir. Matrisdeki krom miktarı arttıkça, borür tabakası/matris ara yüzeyinin kolonsal yapıdan düz hale gelmesi, alaşım elementinin borür tabakası içerisinde demir atomlarının yerini alması sebebiyledir [55].

Demir esaslı malzemelerde krom, borür tabakasının kalınlığını azaltmaktadır [48]. Bu azalma karbon içeriğine bağlı olarak farklılıklar göstermektedir. Carbucicchio ve arkadaşları ise, krom artışına bağlı olarak toplam tabaka kalınlığının değişmediğini, buna karşılık FeB ' nin arttığını Fe_2B 'nin ise azaldığını ileri sürmüşlerdir [122]. Bir takım çalışmalarda ise kromun, demir borür tabakası içerisinde katı eriyik yaptığı veya geçiş bölgesinde konsantre olduğu, ayrıca %26 gibi çok yüksek krom içeriklerinde CrB fazının ancak oluştuğu belirtilmektedir [55].

Bindal, düşük krom yüzdellerinde dahi, krom borürler tespit ettiğini, çok fazla olmasa bile, kırılma tokluğunu düşürdüğünü belirtmektedir [48]. Goueriot ve arkadaşları borür tabakası boyunca krom konsantrasyonunun nispeten sabit kaldığını, yalnızca, %12 Cr içeren çelik yüzeyindeki FeB zonunda az miktarda kromca fakirleşme gözlediklerini belirtmişlerdir. Kromun, $(\text{FeCr})_2\text{B}$ oluşturmak için Fe_2B zonuna

girdiğini, fakat FeB tarafından kabul edilmediğini gösteren bu davranış, Cr_2B ve Fe_2B 'nin aynı, oysa FeB ve CrB 'nin farklı kristal yapıda olmalarından kaynaklanmaktadır. Krom tabaka boyunca hemen hemen homojen bir dağılım gösterir ve kromlu çeliklerde oldukça düzgün bir geçiş bölgesi oluşur. Krom içeren borür tabakasının sertliği, krom miktarı ile doğru orantılı olarak artar [55,119].

Çelik içerisinde krom miktarının artışına bağlı olarak, Fe_2B fazına nazaran borca daha zengin olan FeB tabakasının kalınlığı artış göstermektedir. Bunun yanında FeB/FeB_x oranı da artmaktadır. Bu ise borür tabakasının dış kısmının, iç kısma göre yoğunluğunun daha da düşük olmasına sebep olmaktadır [104].

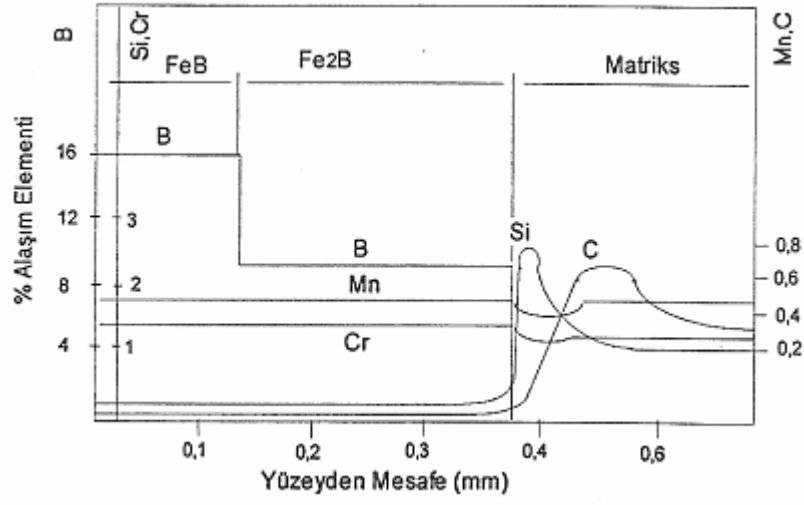
Nikel: Nikel, hem borür tabaka kalınlığı hem de tabaka morfolojisi üzerinde olumsuz etkiye sahiptir. Altlık malzeme ağırlıkça %9'a kadar nikel bulunması tabaka geometrisini olumsuz olarak etkilememektedir [55]. Borür tabakasında nikel miktarının artması, kaplama/matris ara yüzeyinde kolonsal yapının düzlemsel yapıya dönüşmesine ve porozitenin artmasına neden olurken, kaplama tabakasının sertliğini de düşürmektedir [119]. Nikel içeren çeliklerin yüzeyindeki borür tabakası, belirli bir yönelme olmaksızın FeB ve Fe_2B fazlarından oluşmuştur.

Bor tabakasındaki nikel dağılımı ise Fe_2B altından bor tabakası yüzeyine doğru artış eğilimindedir. Bu yüzden Fe_2B fazındaki nikel konsantrasyonu, FeB fazından daha düşük olmaktadır. Borlayıcı ortamın bor konsantrasyonu ve sıcaklık arttıkça, yüzeyde oldukça yüksek nikel konsantrasyonuna sahip olan zonun kalınlığında artış görülür. Nikelce zengin olan yüzey zonu bu parametrelere bağlı olarak 3 μm 'den 8 μm 'ye kadar artar. Ostenitik paslanmaz çeliklerin borlanmasıyla yüzeyde elde edilen borür tabakasında FeB ile birlikte muhtemelen çözünmesi zor olan Ni_3B fazı bulunmaktadır [55]. Çeliklerde nikel konsantrasyonunun artması, $(\text{Fe,Ni})_2\text{B}$ fazının sertliğini azaltırken $(\text{Fe,Ni})\text{B}$ fazının sertliğinde herhangi bir azalmaya sebep olmamaktadır [119].

Manganez: Manganez, borür tabakasında kroma benzer bir davranış sergiler. Borür tabakası içerisinde çözünebilir manganez, yüzeye doğru yayılır ve borür tabakasının kalınlığını azaltıcı yönde etki yapar. Ancak, Dukarevich ve Mozharov gibi araştırmacılar manganezin kaplamanın yüzeye yakın kısmında yer alan FeB fazında daha fazla çözüldüğünü söylerken, Tsipas ve Rus ise çözünmenin iç kısımdaki Fe₂B fazında olduğunu iddia etmektedirler. Vilsmeier ve arkadaşları ise manganezin Fe₂B fazı içerisinde matristen daha fazla çözüldüğünü belirtmişlerdir. Artan manganez oranına bağlı olarak, tabaka morfolojisindeki değişim hakkında da farklı ifadeler mevcuttur [55]. Carbucicchio ve arkadaşları, manganez oranı arttıkça kaplama/matris ara yüzey morfolojisinde kolonsallığın arttığını, Özsoy ise düzleştiğini belirtmektedir [49]. Yine Carbucicchio ve arkadaşları, manganlı çeliklerin borlanması sonucunda, tabakada mangan borürlere rastlanmadığını söylerken, Bindal, düşük manganlı çeliklerde, borlama süresine bağlı olarak mangan borürler (MnB, Mn₂B) tespit ettiğini belirtmektedir [55].

Silisyum: Karbon elementi gibi silisyumda borür tabakası içerisinde çözünürlüğü olmadığından borlama işlemi sırasında çeliğin iç kısımlarına doğru itilerek borür tabakası ile metal ara yüzeyinde yoğunlaşır ve burada ferrit fazı meydana gelir. Bu bölgede meydana gelen FeSi_{0.4}B_{0.6} ve Fe₄SiB₂ bileşikleri ise mekanik özelliklerin olumsuz yönde etkilenmesine neden olmaktadır. Bu, çok yumuşak bir faz olduğu için tabakada çatlamalara, dökülmelere ve çökmelere neden olabilir [55]. Şekil 4.10'da çeliklerin borlanması sonucunda, borür tabakası boyunca alaşım elementlerinin dağılımları şematik olarak verilmektedir [53].

Belirtilen bu alaşım elementlerinin dışında alüminyumun davranışı silisyuma benzer şekildedir. Tungusten, molibden, vanadyum, titanyum ve kobalt borür tabakasının kırılganlığını azaltarak düzlemsel yapıda borür tabakası oluşumunu teşvik eder [55].



Şekil 4.10. Çeliklerde borür tabakası boyunca alaşım elementlerinin şematik olarak dağılımı [55].

5. AŞINMA

5.1. Aşınmanın Tanımı

1979’da DIN 50320’ye göre aşınma, “Kullanılan malzemelerin başka malzemelerle (katı,sıvı, gaz) teması neticesinde mekanik etkenlerle yüzeyden küçük parçacıkların ayrılması sonucu meydana gelen ve istenilmeyen yüzey bozulmasıdır” [123,124,125]. Bu tanıma göre aşınmadan söz etmek için; mekanik bir etkinin olması, sürtünmenin olması, istenilmediği halde meydana gelmesi, yavaş fakat devamlı olması, malzeme yüzeyinde değişiklik meydana getirmesi gerekmektedir [126].

5.2. Aşınma Deneyleri ve Ölçüm Yöntemleri

Ne zaman iki yüzey temas etse aşınma oluşur. Özellikle endüstride sık sık karşılaşılan yüzeylerdeki aşınmaya bağlı malzeme kaybı ekonomik olarak önemli bir güç ve maddi kayba neden olmaktadır [127,128]. Bu sebepten dolayı makine imalatında aşınmaya maruz kalabilecek yerlerde aşınma direnci yüksek malzemeler kullanılmaktadır. Bu malzemelerin tespiti için de mutlaka bir çok laboratuvar deneylerinin yapılması gerekir [124,125]. Aşınma deney yöntemlerini genel olarak iki grupta toplamak mümkündür.

- a) Yağlamalı ve yağlamasız bir ortamda ana ve karşı malzemenin adhesiv (metal-metal) aşınma değerlerinin ölçüldüğü yöntemler.
- b) Katı, sıvı ve gaz halindeki maddelerin etkisi altında yalnız karşı malzemenin aşınma değerinin ölçüldüğü yöntemler.

5.2.1. Ağırlık farkı metodu

Ekonomik olması ve ölçülen büyüklüğün, alet duyarlılık kapasitesi dahilinde bulunması sebebi ile en çok kullanılan yöntemdir. Ağırlık kaybının ölçülmesi 10^{-4} veya 10^{-5} g hassasiyetinde oldukça duyarlı bir terazi yardımı ile yapılır.

Bu metoda göre, aşınma miktarı gram veya miligram olarak ifade edildiğinde, birim sürtünme yoluna karşılık gelen ağırlık kaybı miktarı (g/km), (mg/m) ile ifade edilebilir. Ağırlık kaybı birim alan için hesap edilecekse (g/cm^2) gibi bir birim kullanılabilir. Ağırlık kaybı hacimsel aşınma miktarı olarak belirtilmek istendiğinde, yine ağırlık kaybından hareketle kullanılan malzemenin yoğunluğu ve deney numunesi üzerine etki eden yükleme ağırlığı hesaba katılmak suretiyle birim yol ve birim yükleme ağırlığına karşılık gelen hacim kaybından gidilerek de bulunabilir [123].

Ağırlık farkı ölçme yönteminde en çok kullanılan bağıntılar şunlardır.

$$W_a = \frac{\Delta G}{d.M.S} \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{N.m}} \right] \quad (5.1)$$

Burada;

W_a : Aşınma oranı ($\text{mm}^3 / \text{N.m}$)

ΔG : Ağırlık kaybı (mg)

M : Yükleme ağırlığı (N)

S : Aşınma yolu (m)

d : Yoğunluk (g / cm^3)

olarak verilmiştir. Aşınma oranının (W_a) ters değeri de aşınma direnci (W_r) olarak gösterilir.

$$W_r = \frac{1}{W_a} \left[\frac{\text{N.m}}{\text{mm}^3} \right] \quad (5.2)$$

5.2.2. Kalınlık farkı metodu

Aşınma esnasında oluşacak boyut değişikliğinin ölçülmesi, başlangıç değeri ile karşılaştırılması sureti ile elde edilir. Kalınlık farkı olarak tespit edilen bu değerden gidilerek hacimsel kayıp değeri ve birim hacimdeki aşınma miktarı hesaplanır. Kalınlık, hassas ölçme aletleri yardımıyla $\pm 1 \mu\text{m}$ duyarlılıkta ölçülmelidir [123,124,125].

5.2.3. İz değişimi metodu

Sürtünme yüzeyinde plastik deformasyon metodu ile, geometrisi belirli bir iz oluşturulur. Deney boyunca bu izin karakteristik bir boyutunun (çapının) değişimi ölçülür.

Uygulamalarda iz bırakıcı olarak en çok kullanılan alet Vickers veya Brinell sertlik ölçme ucudur. Elmas piramit veya bilyanın bıraktığı iz boyutlarındaki değişme mikroskop vasıtasıyla ölçülerek belirlenir [123].

5.2.4. Radyoizotop metodu

Sürtünme yüzey bölgesinin proton, nötron veya yüklü α – parçacıklarıyla bombardıman edilerek radyoaktif hale getirilmesi esasına dayanır.

Aşınmanın büyük hassasiyetlerle ölçülebilmesi ve sistem içerisinde çalışma şartlarını değiştirmeden ölçü alınabilmesi avantajlı yönleridir. Fakat ekonomik olmaması nedeniyle ancak özel amaçlarla kullanılır. Özel problemlerin çözümü dışında yaygın olarak kullanılan bir metot değildir [123].

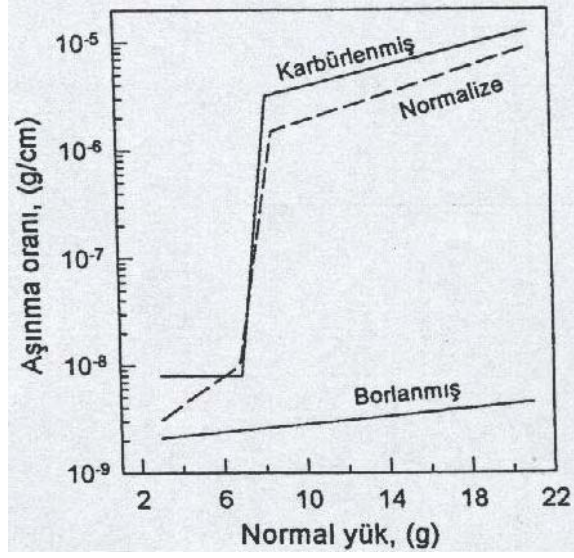
5.3. Aşınma Mekanizmaları

Tipik aşınma mekanizmalarını dört ana grupta toplamak mümkündür. Bunlar;

- 1- Adhesiv aşınma
- 2- Abrasiv aşınma
- 3- Tribooksidasyon aşınması
- 4- Yorulma aşınması'dır.

5.4. Borlanmış Çeliklerin Aşınma Özellikleri

Makine elemanlarının aşınma dayanımlarını artırmanın önemli yöntemlerinden birisi de, bor yayınımlı ile yüzeylerinde oldukça sert borür tabakalarının oluşturulmasıdır. Metalik malzemelerin abrasiv aşınma direnci ile sertlikleri arasında doğrusal bir ilişki vardır, ancak malzeme mikroyapısının, aşınma dayanımına etkisi, sertliğine olan etkisinden çok daha fazladır [55]. Borlama işlemi sonucunda ise, malzemenin yüzey sertliğinde muazzam bir artış meydana gelmektedir. Bu ise borlanan parçanın abrasiv aşınma dayanımını artırmaktadır [20].



Şekil 5.6. Çeşitli yayınma işlemleri uygulanmış EN1A çeliğinin aşınma davranışları [55].

Eyre, karbürleme ve borlama işlemi uygulanmış EN1A (AISI 1100 serisi) çeliklerinin aşınma davranışları karşılaştırıldığında (Şekil 5.6); borlamanın karbürlemeye göre özellikle geçiş bölgesi üzerindeki yüklemelerde adhesiv aşınma direnci açısından çok daha iyi sonuçlar verdiğini ve bu özelliği yüksek sıcaklıklarda dahi muhafaza ettiğini belirtmektedir. Şekil 5.6'da karbürizasyon işlemi uygulanmış çelikteki (800 HV) adhesiv aşınma direncinin daha düşük olduğu görülmektedir. Sertlikle adhesiv aşınma arasında doğrudan bir ilişki kurulamayacağını belirten Eyre, adhesiv aşınmanın yüzeyler arasındaki kimyasal uyumsuzlukla ilgili olduğunu iddia etmektedir [21].

Borür tabakalarının abrasiv aşınma dayanımları, yüksek sertliklerinden dolayı oldukça iyidir. Borlanmış numunelerde sürtünme katsayısında meydana gelen değişimleri inceleyen çeşitli araştırmacıların hepsi borlamanın sürtünme katsayısını düşürdüğü sonucuna varmışlardır. Goeuriot ve arkadaşlarının ölçtüğü statik sürtünme katsayıları Çizelge 5.1'de verilmektedir [34].

Çizelge 5.1. Borlanmış ve kromlanmış bazı çeliklerin sürtünme katsayıları [34].

Çelik	İşlem uygulandıktan sonraki sürtünme katsayıları	
	Borlanmış	Kromlanmış
XC10	0,57	0,64
XC38	0,55	0,74
Z200 C12	0,54	0,75
Z6 Cn 18-10	0,50	0,63

Borlanmış yüzeylerin aşınma açısından diğer bir üstünlüğü, gerek çalışma ortamından kaynaklanan, gerekse kayma sürtünmesi sonucunda ortaya çıkan ısının, borlu tabakaların sertliklerinde ve aşınma dayanımlarında büyük bir düşüşe neden olmamasıdır [21]. Luigi, değişik sıcaklıklarda ve kuru sürtünme şartlarında yaptığı deneyler sonucunda 200 °C sıcaklıkta aşınma dayanımları arasında belirgin bir fark yok iken, 300 °C sıcaklıkta borlama işlemi uygulanmış yüzeylerin aşınma dayanımının, nitrüleme ve karbo nitrüleme uygulanmış yüzeylere göre oldukça yüksek olduğunu bulmuştur [55].

Borlanmış çelik yüzeylerin aşınma davranışlarını inceleyen araştırmacıların çoğunluğu, tek fazlı (Fe_2B) tabakalarının, çift fazlı ($\text{FeB} + \text{Fe}_2\text{B}$) tabakalarından daha üstün aşınma direncine sahip olduğu konusunda görüş birliği içerisindeyler. Takeuchi, FeB ve Fe_2B tabakalarının aşınma özellikleri ile ilgili olarak, maksimum aşınmanın metalik ve oksidatif aşınmanın birlikte etki ettiği durumda meydana geldiğini, hafif aşınma veya yüksek kayma hızlarındaki aşınma kayıplarının ise esas olarak oksidatif aşınmadan kaynaklandığını ve borlanmış çeliklerin aşınma davranışlarını etkileyen en önemli faktörün, yüzeyde oluşan koruyucu oksit filmleri olduğunu ileri sürmektedir [35].

6. AISI 8620 ve HARDOX 400 ÇELİKLERİ

6.1. AISI 8620 Sementasyon Çeliğinin Tanımı

AISI 8620 çelikleri piyasada sementasyon çeliği olarak bilinmektedir. Sementasyon çelikleri, yüzeyde sert ve aşınmaya dayanıklı, çekirdekte ise daha yumuşak ve tok özelliklerin istendiği, değişken ve darbeli zorlamalara dayanıklı parçaların imalinde kullanılan, düşük karbonlu, alaşımsız veya alaşımlı çeliklerdir [129,130].

6.2. Sementasyon Çeliklerinin Özellikleri

Alaşımsız veya düşük alaşımlı olan bu çelikler; hem kütle halinde üretilen kaliteli çelik hem de asil çelik sınıfından olabilirler. Oksijen konverterlerinde, Siemens Martin ocaklarında ve elektrik ocaklarında üretilerek sönük olarak dökülürler ve haddeme, dövme ve presleme yoluyla sıcakta şekillendirilirler.

Sementasyon çelikleri piyasaya sıcakta haddelenmiş veya dövülmüş olarak blum, slab, kütük, yuvarlak, dört köşe, altı köşe, lama şeklinde çubuk; filmaşın, sıcak çekilmiş saç, band ve geniş lama; dikişsiz boru, elde veya kalıpta dövülmüş parçalar halinde verilirler. Sıcakta şekillendiği gibi; yumuşatma tavı görmüş; belirli bir dayanım verecek biçimde su verilmiş veya belirli ferritik-perlitik yapı elde edecek biçimde tavllanmış olarak teslim edilirler [131].

Yapıları esas olarak ferritik-perlitiktir.

Sementasyon çelikleri dişliler, miller, piston pimleri, zincir baklavaları, zincir dişlileri ve makaraları, diskler, kılavuz yatakları, rulmanlı yataklar, merdaneler, bir kısım ölçü ve kontrol aletleri, orta zorlamalı veya zorlamalı parçalar, soğuk şişirilerek veya fişkırtılarak (ekstürüzyon) şekillendirilen parçalar, kesici takımlar gibi parçaların imalinde kullanılırlar [129].

6.3. Hardox 400 Çeliği

Hardox, demir cevherinden imal edilmiştir. Bu ham maddenin saf olarak kullanılması sebebiyle, çok iyi süneklik ve kullanımda kolaylık sağlamaktadır [132]. Hardox çeliği, aşınma direnci oldukça yüksek olan bir malzemedir. Hardox 400 aynı cins malzeme ile bozulabilir (kırılabilir) ve aynı malzeme ile kaynaklanabilir [133].

Hardox çelik plakaları ve dönüştürülme teknolojileri sınıflandırma topluluklarının kabul edilmiş prosedürleri arasında verilmiştir. Hardox çeliklerinin yüksek sertliği kesintisiz bir ısıtma işlemiyle sağlanmaktadır. Hardox çeliğinin sertliği aşınma direncinin iyi bir ölçüsüdür. Bu malzeme ile yapılan ürünlerin uzun ömürlü olmasını sağlayan Hardox 400 çeliklerinin en önemli özelliği Hardox 400 plakalarının tam sertleştirilmiş olmasıdır. Hardox 400 çeliklerinin çarpma mukavemeti ve plastik esnekliği çok yüksektir [134].

Yüksek aşınmaya dayanıklılık, kolay soğuk şekillendirme, kolay kaynaklanma sağlayan ve yoğun aşınmanın olduğu yerlerde kullanılan levhalardır [135].

Sağlamlığı ve iyi yapısıyla Hardox orman endüstrisinden yol yapımına kadar birçok uygulama alanları ve endüstride kullanılır. Hardox 400 ekskavatör kepçeleri, damper, kamyon kasalarının zemini, kepçe dişleri, kırıcılar ve benzeri ekipmanlarda yaygın olarak kullanılır [132].

7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

7.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada kullanılan AISI 8620 ve Hardox 400 çelikleri Ostim Organize Sanayiinde satıcı firmalardan temin edilmiştir. Ana malzeme olarak kullanılan AISI 8620 ve Hardox 400 çeliklerinin kimyasal analizleri KOSGEB’te (Küçük ve Orta Ölçekli Sanayi Geliştirme Eğitimi Birliği) yaptırılmış ve sonuçları Çizelge 7.1 ve 7.2’de verilmiştir. Çalışmada abrasiv aşınma ve çentik darbe deneyleri için 3’er tane işlemsiz 27’şer tane borlanmış olmak üzere toplam 60 tane numune kullanılmıştır. Borlanmış numuneler farklı süre ve sıcaklıklarda borlama işlemine tabi tutulmuşlardır.

Çizelge 7.1. Ana malzeme olarak kullanılan AISI 8620 çeliğinin kimyasal analizi (% ağırlık)

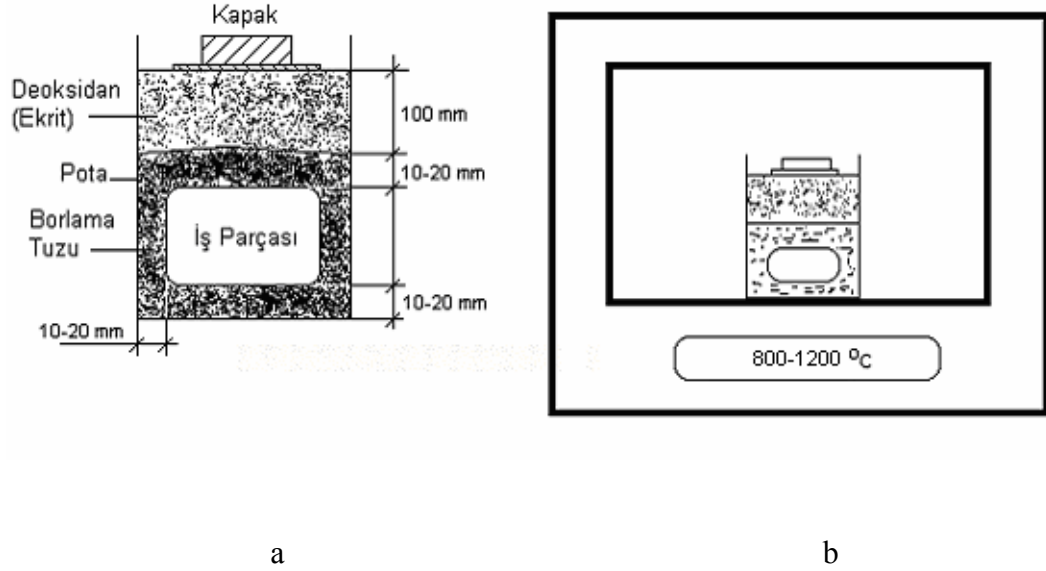
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
0,20	0,24	0,85	0,019	0,009	0,55	0,21	0,50

Çizelge 7.2. Ana malzeme olarak kullanılan Hardox 400 çeliğinin kimyasal analizi (% ağırlık)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	B
0,12	0,50	1,40	0,008	0,002	0,04	0,013	0,50	0,002

Çentik darbe deneyi için numuneler ODTÜ Malzeme ve Metalurji Mühendisliği Atölyesi’nde 10x10x55 mm boyutlarında TS 269’a göre hazırlanmıştır [136]. Aşınma numuneleri, 6 mm çapında ve 50 mm uzunluğunda hazırlanmıştır. Numuneler borlama işleminden önce 500’lük zımpara kağıdı ile zımparalanıp

yüzeyleri aprenlenmiştir. Çentik darbe deneyi ve aşınma için hazırlanan numunelere katı ortamda kutu sementasyonu ile borlama yapılmıştır. Çeliğin borlanması bor karbürün bor kaynağı olarak kullanılması yaygın bir uygulamadır [13,17]. Bu durum çeliğin karbürlenmesine yol açmaz. Ancak, borlama yapılırken üst katmanlardaki karbon, bor tarafından iç kısımlara itilir. Borlama işlemi 1200 °C sıcaklık kapasiteli ± 5 °C hassasiyetli mikro işlemci kontrollü, elektrik rezistanslı, dijital göstergeli 200x150x250 mm kapasiteli fırında gerçekleştirilmiştir (Şekil:7.1. a). Kutu borlama işleminde borlanacak tüm numuneler toz karışımı içerisine yüzeylerden 10 mm'den az olmayacak şekilde yerleştirilmiş ve paslanmaz çelik kap içerisine kapatılmıştır (Şekil:7.1. b). Borlama ısıtıl işlemi atmosfer basıncında 850 °C, 900 °C, 950 °C sıcaklıkta, 2, 4 ve 6 saat sürelerde yüksek borlama potansiyeline sahip Ekabor-II ile yapılmış ve ardından havada soğutulmuştur. Hava oksijeninin olumsuz etkilerinden parçayı korumak için, argon gazı kullanılmıştır.



Şekil 7.1. a) Numune kutusunun hazırlanması
b) Numunenin fırınlanması [105,137]

7.2. Metalografik Çalışmalar

Deneyde kullanılan numuneler ODTÜ Malzeme ve Metalurji Mühendisliği Metalografi laboratuvarı'nda sırasıyla 200, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 numaralı silisyum karbür su zımparası ile, gerekli metalografik kurallara uyarak, her biri çizgiler tek yönde olana kadar zımparalama işlemine tabi tutuldu. Zımparalanmış numuneler, mikro yapılarını görmek amacıyla 3 μ m'lik elmas pasta ile parlatılmış ve % 2 nital çözeltisinde 5 saniye bekletilerek dağlanmıştır.

Dağlama işleminden sonra numuneler Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi Bölümü Malzeme laboratuvarı'ndaki PRIOR marka x1000 büyütme kapasiteli optik mikroskop ve JEOL JSM-6060 LV marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile gerekli büyütmelerde görüntülenmişlerdir.

7.3. Sertlik Ölçümleri

Numunelerin mikro sertlikleri G. Ü. Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi Bölümü Malzeme laboratuvarı'ndaki HMV Micro Hardness Tester Shimadzu marka test cihazı ile yapılmıştır. Aynı katmanlardan (FeB, Fe₂B, borür kolonlarının bitip geçiş bölgesinin başladığı yer ve matris kısmı) üçer tane sertlik alındıktan sonra ortalamaları alınmıştır. Ölçümler dıştan içeriye doğru yapılmış olup sertliğin matrise doğru azaldığı görülmüştür. Deneyler Vickers sertlik ölçüm yönteminde 100 g yük uygulanarak gerçekleştirilmiştir.

7.4. Elektrik İletkenliği

Elektrik iletkenliği deneyleri ODTÜ Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü laboratuvarları'nda normal oda sıcaklıklarında yapılmıştır. Deneyler Agilent 4294A Precision Impedance Analyzer 40 Hz-110 MHz iletkenlik ölçüm cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

7.5. X-Işınları Kırınım Analizi

Borür tabakasındaki fazların belirlenmesi için kullanılan x-ışınları kırınım analizi, analiz edilecek numune üzerine genellikle bakır veya kobalt gibi hedef bir elementten elde edilen K_{α} karakteristik x-ışını demetinin gönderilmesi esasına dayanır. Gönderilen ışın demeti numunenin üç boyutlu kristal yapısında kırınımına uğrayarak, desenler halinde elde edilmektedir. Bu desenler bileşimi belirli standart malzemelerden elde edilen desenler ile karşılaştırılarak incelenmektedir.

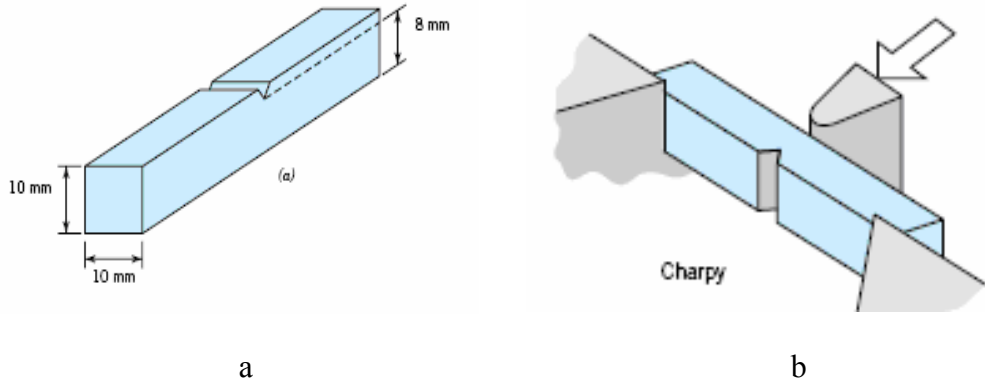
Farklı sıcaklıklarda 6 saat borlama işlemine tabi tutulan Hardox 400 çelik numunenin yüzeyinde oluşan borür tabakasındaki mevcut fazların tayini ve 950 °C sıcaklıkta 6 saat borlanmış Hardox 400 ile AISI 8620 çelik numunelerinin borlu yüzeyden itibaren 150 µm ve 250 µm aşındırıldıktan sonra borür tabakasındaki mevcut fazların tespiti için Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Metalurji Mühendisliği Bölümü laboratuvarı'ndaki x-ışınları kırınım analizi kullanılmıştır. Analizler Philips marka cihazda CuK_{α} kaynaklı ışın demeti ($\lambda=1.54053 \text{ Å}$) kullanılarak yapılmıştır. Rigaku D/Max-2200/PC Model XRD cihazı 200 VAC, 3-phase, 50/60 Hz güç kapasitesine, Cu kaynaklı X ışını tüpü ve tüpün ani sıcaklık değişimlerini kontrol eden su soğutucusuna sahiptir. X-Işını Kırınım Deseni verilerinin Jade 3.1 yazılım ile elde edilen kırınım desenleri, PDF kart numaralarına sahip yaklaşık 17.000 civarında madde ile karşılaştırılması sonucu Kalitatif Mineral Analizi yapılmaktadır.

7.6. EDS Analizi

850 °C'de 2 saat ve 950 °C'de 6 saat borlanmış AISI 8620 ve Hardox 400 çelik numunelerin yüzeylerinin EDS spektrum analizleri Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Malzeme ve Metalurji Bölümü laboratuvarları'nda JEOL JSM-6060 LV markalı tarama elektron mikroskobuna bağlı cihazla yapılmıştır. Alaşım elementlerinin dağılımı borlama katmanından itibaren EDS spektrumu ile belirlenmiştir. Her bir noktanın element dağılım değerleri grafik olarak alınmıştır.

7.7. Çentik Darbe Deneyi

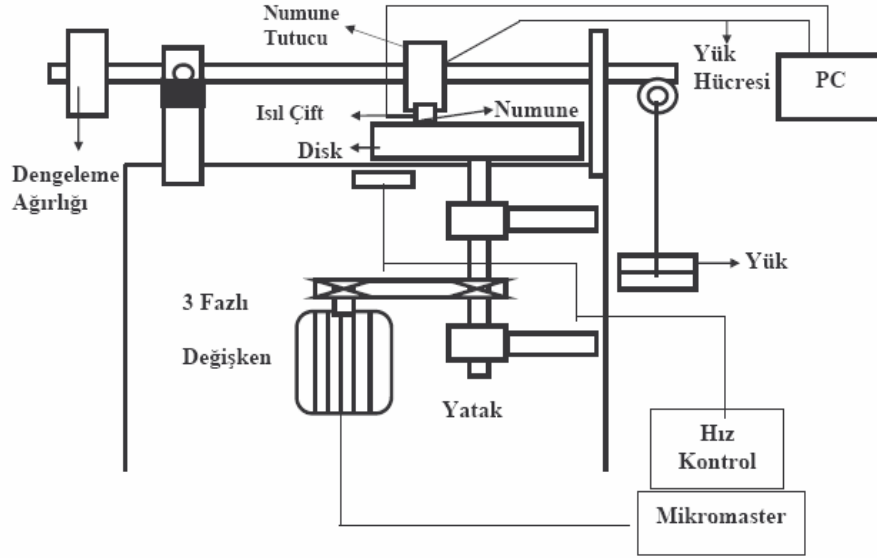
Çentik darbe deneyleri G.Ü Teknik Eğitim Fakültesi, Metalurji Eğitimi Bölümü, Malzeme laboratuvarları'nda normal oda sıcaklıklarında yapılmıştır (Şekil 7.2.a-b). Deneyler Instron Wolpet PW30 çentik darbe cihazı ile gerçekleştirilmiştir. 850 °C , 900 °C , 950 °C'de 2, 4 ve 6 saat sürelerde borlanmış numunelerin her birinden üçer tane hazırlanmıştır. Bu üç numunenin ortalama değerleri alınarak darbe deneyi grafiği elde edilmiştir.



Şekil 7.2. a) Çentik darbe deney numunesi.
b) Numunenin darbe deneyinin gösterilmesi. [138]

7.8. Aşınma Deneyleri

Aşınma testleri disk üzerinde pim kullanılarak kuru ve yağsız kaydırma koşulları altında oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Borlanmış ve borlanmamış numunelerin aşınma testleri Şekil 7.3'te gösterilen iki gövdeli pim disk üzerinde 10, 20, ve 30 N yükler altında ve 0.2 m/sn kayma hızında, 80 ve 120 mesh alüminyum oksit (Al_2O_3) zımpara aşındırıcılar üzerinde yapılmıştır. Abrasiv zımpara üzerinde aşınma numuneleri, aşınma yönüne dik şekilde hareket ettirilmiş ve böylece numuneler daima yeni zımpara yüzeyine temas ettirilmiştir. Abrasiv zımpara üzerinde numunelerin toplam kayma mesafesi 20 m'dir. Aşınma deneyinden önce ve sonra numuneler 10^{-4} g hassasiyetinde elektronik terazi ile tartılarak aşınma kayıpları, ağırlık kaybı (mg) cinsinden bulunmuştur.



Şekil 7.3. Aşınma cihazının şeması [139].

Ağırlık kayıpları bilinen numunelerin aşınma oranları daha önce verilmiş olan,

$$W_a = \Delta G/dMS \quad (\text{mm}^3/\text{Nm}) \quad \text{ile,}$$

aşınma dirençleri ise

$$W_r = 1/W_a \quad (\text{Nm/mm}^3)$$

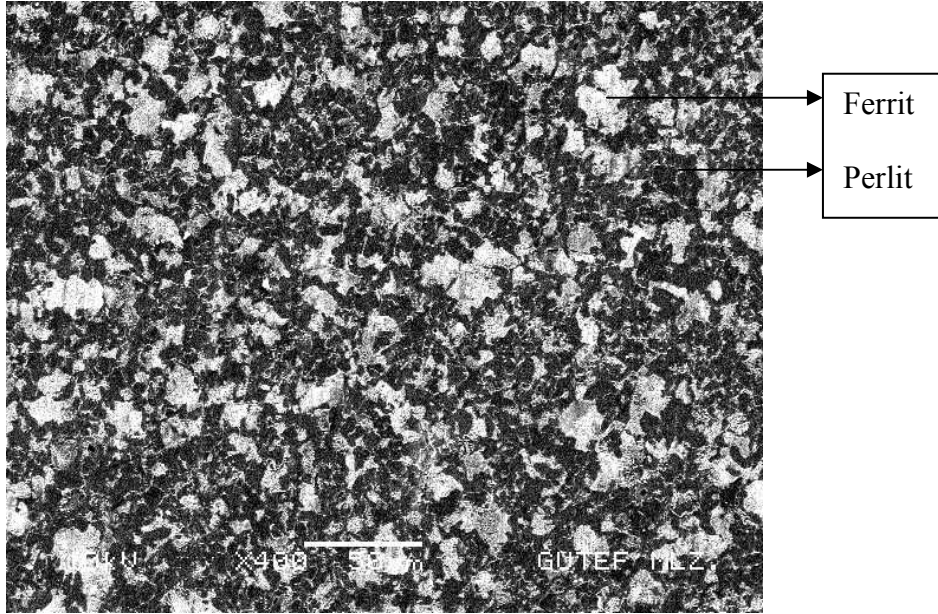
formülleri ile hesaplanmıştır.

8. DENEY SONUÇLARI VE İRDELENMESİ

8.1. Metalografi Sonuçları

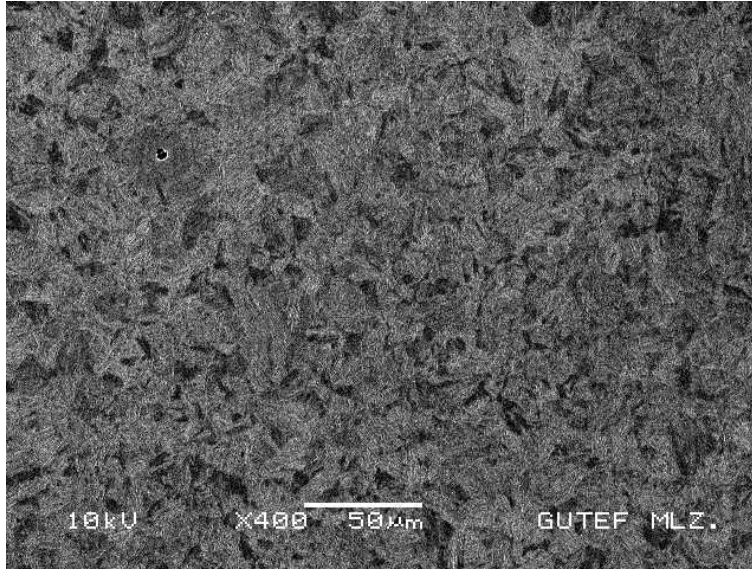
Bu çalışmada farklı süre ve sıcaklıkta borlanmış numuneler ile, borlanmamış numuneler metalografik incelemeler için hazırlanarak % 2 nital dağlayıcı ile dağlanmışlardır. Dağlanmış numuneler taramalı elektron mikroskobunda ve optik mikroskopta incelenmiştir. Borlama sonrası yapıdaki değişmelerin incelenmesi için iç yapı görüntüleri alınmış ve bu numunelerin iç yapı incelemeleri aşağıda sırası ile açıklanmıştır.

Isıl işlemsiz malzeme



Şekil 8.1. Borlanmamış AISI 8620 çeliğinin x400 büyütmeli SEM görüntüsü.

Şekil 8.1’de borlanmamış AISI 8620 çeliğinin taramalı elektron mikroskobunda 400 büyütmede çekilmiş mikroyapı fotoğrafı incelendiğinde beyaz kısımların ferrit, siyah kısımların ise perlit olduğu görülmektedir. Parça yapısında ferrit+perlit homojen olarak dağılmışlardır. Yani parçadaki ferrit+perlit yapısı uygundur. Bantlaşma yoktur. Bantlaşmada perlit tanecikleri belli bir sıra dahilinde dizilirler [140,141].



Şekil 8.2. Borlanmamış Hardox 400 çeliğinin x400 büyütme SEM görüntüsü.

Hardox çeliklerinin yüksek sertliği, kesintisiz bir ısıtım işlemi ile sağlanmaktadır. Hardox çeliğinin sertliği, aşınma direncinin iyi bir ölçüsüdür. Hardox 400 çeliklerinin en önemli özelliği Hardox 400 plakalarının tam sertleştirilmiş olmasıdır [134]. Mikroyapısı incelendiğinde martenzitik bir yapı olduğu görülmektedir.

Korkut (1991)'de yapmış olduğu deney sonucuna göre şöyle demektedir:

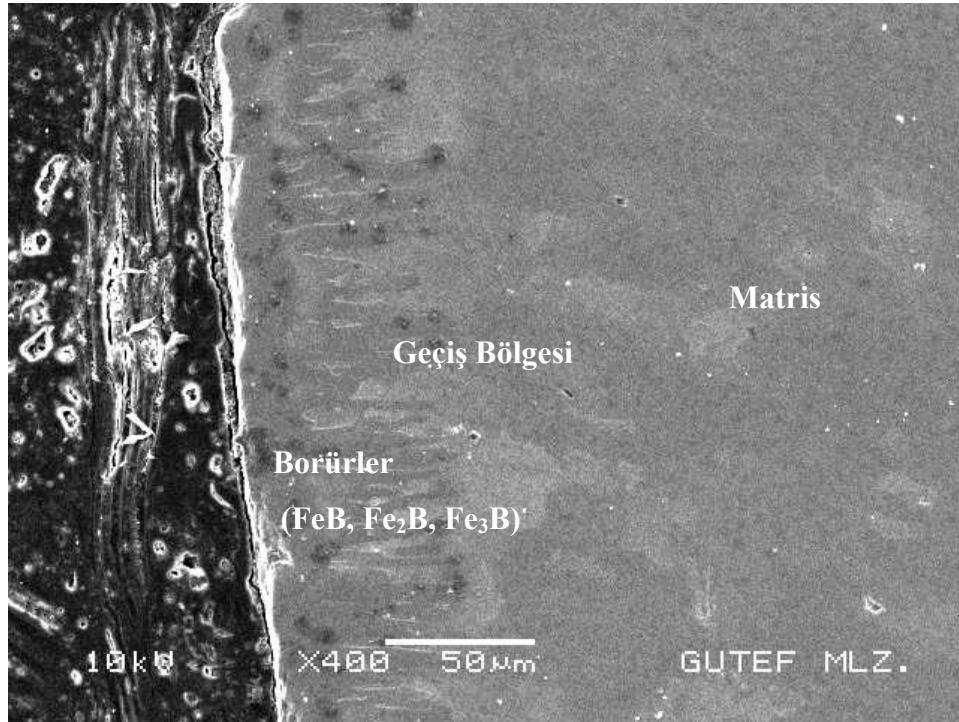
“Bir çok araştırmacının da ortaya koyduğu gibi aşınma davranışının sertlikle ilgisinin olduğu kadar malzemenin metalografik yapıları ile de yakından ilgilidir” [142].

Malzemelerin yüzeylerinin durumları değiştirilerek korozyona, çarpmaya ya da abrasiv aşınmaya karşı direnci artırılabilir [143].

Birçok uygulamada bileşenlerin kullanım ömürlerini aslında yüzey özellikleri belirler. Çeliklerin karbon, azot ya da bor gibi elementlerin difüzyonuna dayalı ısıtım kimyasal işlenmesine dair önemli çalışma alanında, borlamanın yeri kendisine

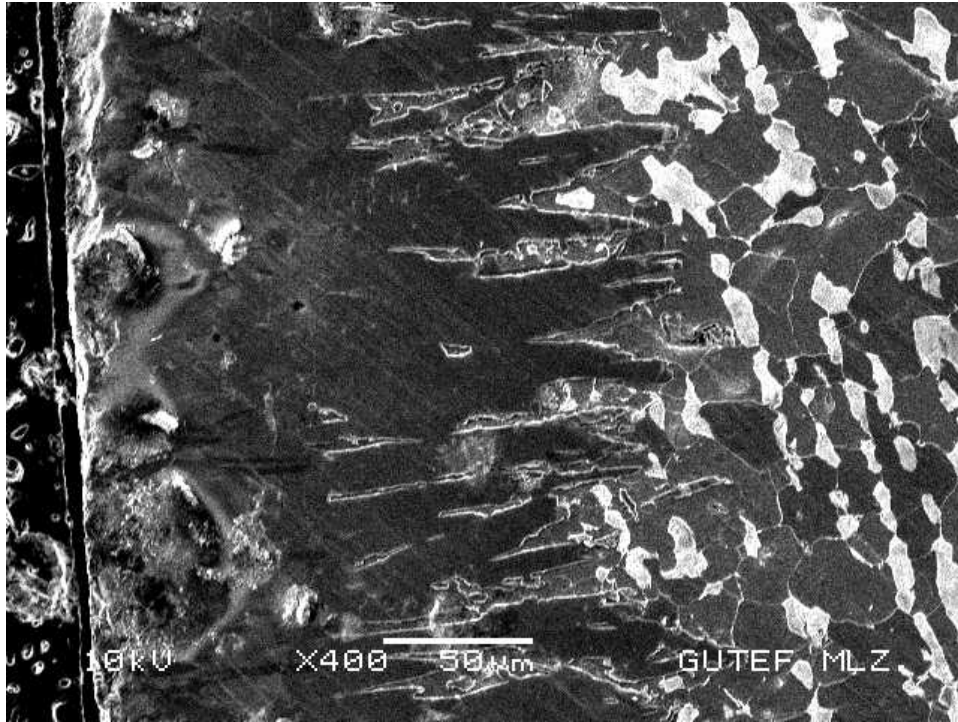
özgüdür [8]. Borlama işlemi endüstride yüzey sertleştirme yöntemi olarak karbürlenmiş ve nitratlanmış çelik ile karşılaştırıldığında borlanmış çeliklerin olağanüstü triboloji karakteristikleri olduğu gösterilmiştir [16,18,144-146]. Borlanmış demir ve çelik yüzeyler yüksek sertlik, mükemmel aşınma, iyi korozyon ve güçlü kimyasal kararlılıktadır [40,99]. Borlamanın diğer yüzey sertleştirme metodlarına göre avantajları arasında, yüzey katmanının çok sert olması, sürtünme katsayısının çok düşük olması, borlamadan sonra herhangi bir fazladan ısıtılma işlemi gerekmemesi; borlamanın bazı asitler, bazlar, metal çözeltileri ve yüksek sıcaklıkta gerçekleşen oksitlenmeye çok ciddi dayançlı olması sayılabilir [16,46].

Borlanmış Hardox 400 numuneleri



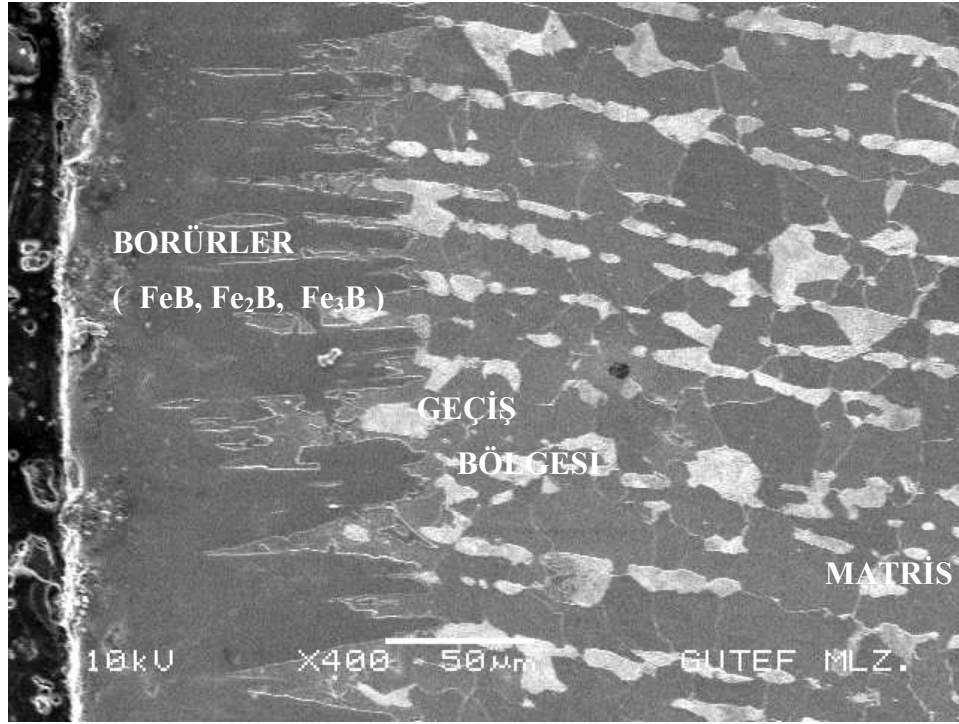
Şekil 8.3. 850°C’de 2 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin kenardan x400 büyütme görüntüsü.

Şekil 8.3 incelendiğinde borlanmış Hardox 400 çeliğinin yüzeyinde üç bölge görülmektedir. Bunlar; en dıştaki borürlerden oluşmuş borür katmanı, bor katmanının bitip matrisin başladığı yer olan geçiş bölgesi ve ana matristen oluşmaktadır.



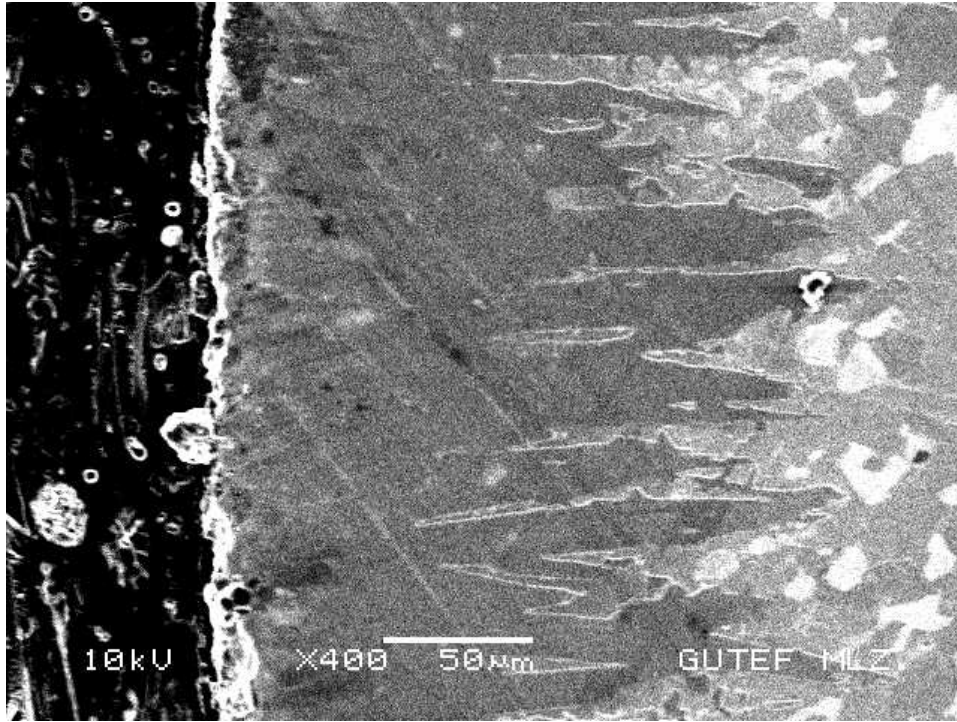
Şekil 8.4. 850°C’de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin kenardan x400 büyütme görüntüsü.

Şekil 8.3 ile 8.4 karşılaştırıldığında aynı sıcaklıkta sürenin artması ile birlikte bor katman kalınlığının da arttığı görülmektedir.



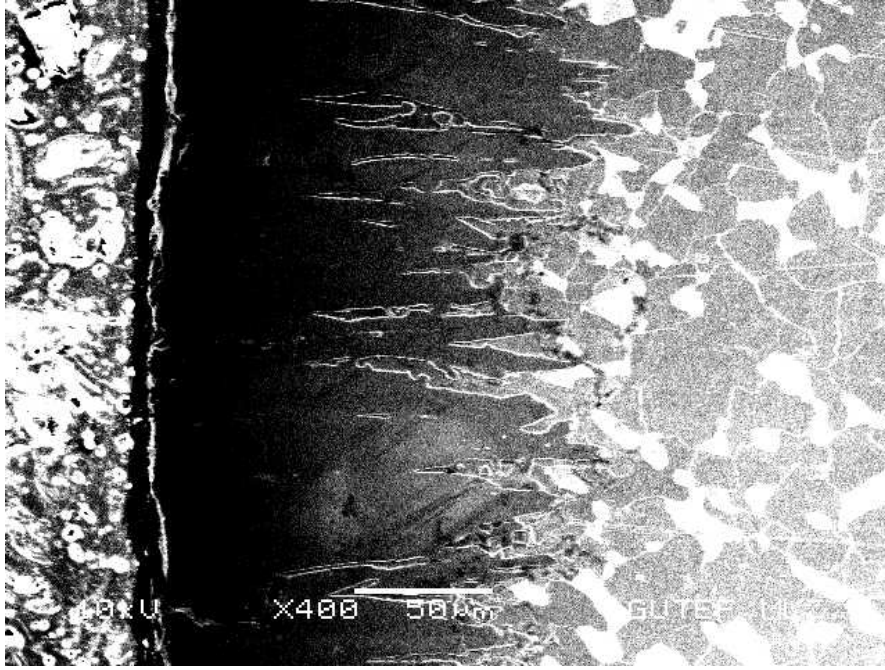
Şekil 8.5. 900°C’de 2 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin kenardan x400 büyütme görüntüsü.

Şekil 8.3 ile 8.5 incelendiğinde aynı borlama süresinde farklı sıcaklıklarda, sıcaklığın artması ile bor katman kalınlığı artmıştır.

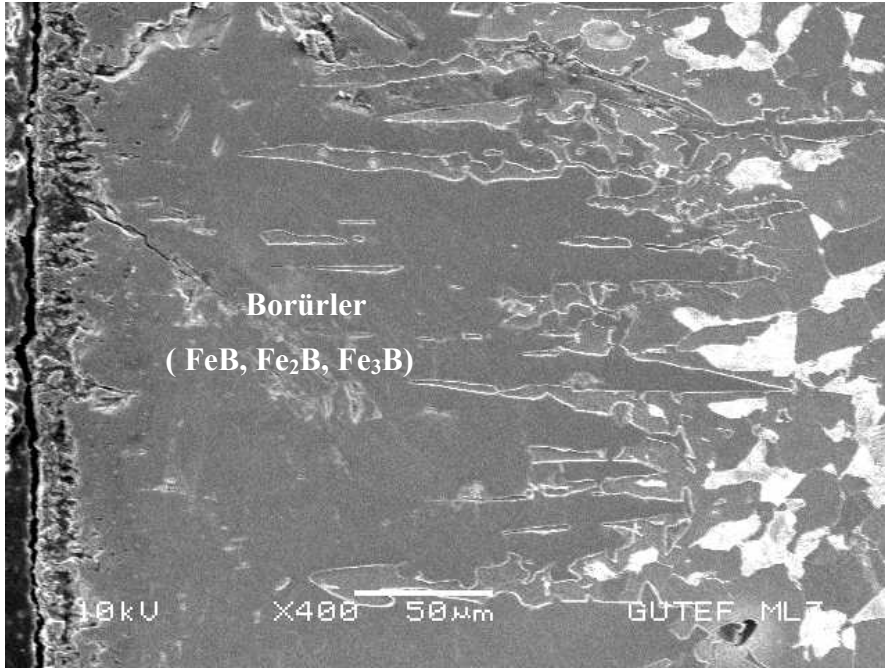


Şekil 8.6. 900°C’de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin kenardan x400 büyütme görüntüsü.

Şekil 8.3’den 8.6’ya kadar incelendiğinde sıcaklık ve sürenin artması ile bor katman kalınlığının arttığı görülmektedir. Ayrıca geçiş bölgesinde yine sıcaklığın ve sürenin artışı ile tane yapısında büyüme görülmektedir. Tane yapılarının geçiş bölgesinde daha büyük, matrise doğru ise küçüldüğü görülmektedir. Mann yapmış olduğu çalışmada, borlama sonrası çeliğin yapısının çok kaba hale geldiğini söylemiştir [17].



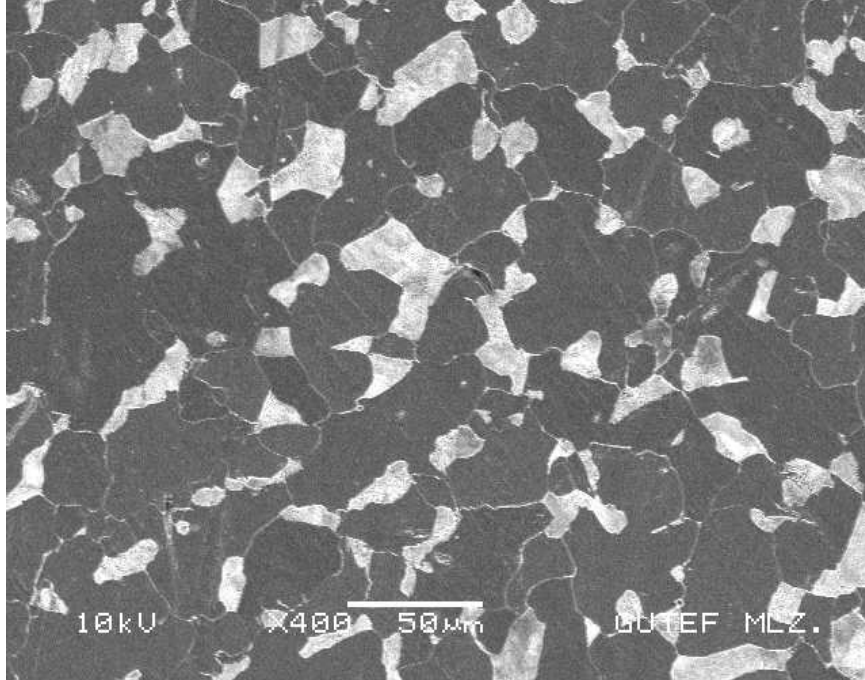
Şekil 8.7. 950°C’de 2 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin kenardan x400 büyütmeli görüntüsü.



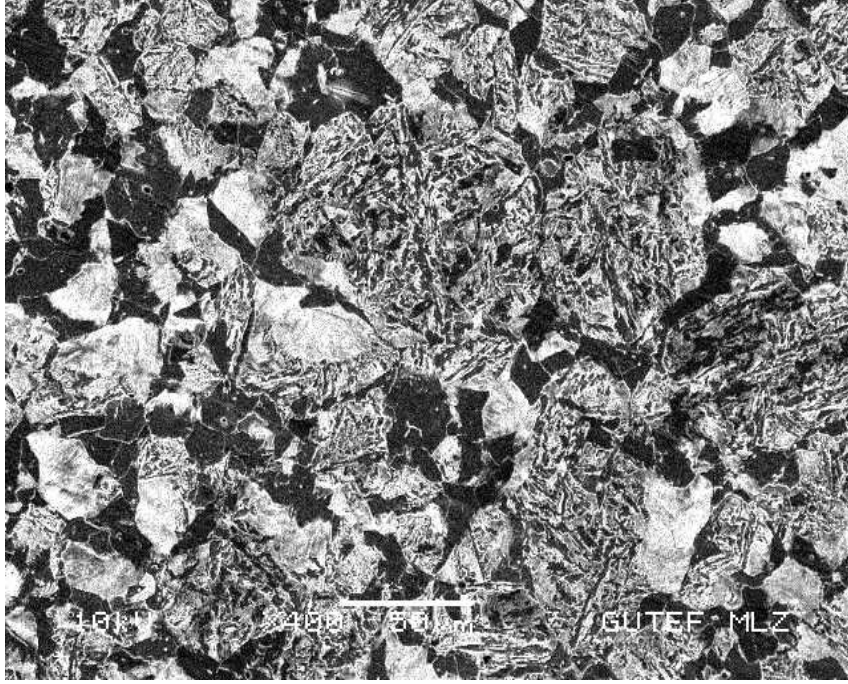
Şekil 8.8. 950°C’de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin kenardan x400 büyütmeli görüntüsü.

Farklı sıcaklık ve sürelerde borlanmış numunelerin Şekil 8.3-8.8’de de görüldüğü gibi kolonsal bir yapıda olduğu ve malzemenin yüzeyinde homojen bir yapı sergilediği tespit edilmiştir. Bu durumun malzemenin bileşimindeki alaşım elementlerinden olduğu düşünülmektedir. Pek çok araştırmacı, termokimyasal yöntemlerle borlanan düşük alaşımlı çeliklerin borür tabakasının kolonsal bir yapı sergilediğini belirtmektedir [53-55]. Kolonsal yapı borür katmanının karakteristik özelliğidir. Kaplama ve ana malzeme arasında dış biçimli geçişin oluşma miktarı işlem sıcaklığı ve süresine bağlı olduğu kadar alaşım içerisindeki alaşım elementlerinin konsantrasyonuna da bağlıdır [16]. Çelik ve dökme demirlerde alaşım elementlerinin oranı yükseldikçe kolonsal yapı azalır. Borür katmanları kolonsal yapıdan dolayı ana malzemeye daha iyi yapışır [116].

Aşağıda 950°C’de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin Şekil 8.9’da matrisinden ve Şekil 8.10’da da geçiş bölgesinden çekilmiş SEM fotoğrafları görülmektedir.



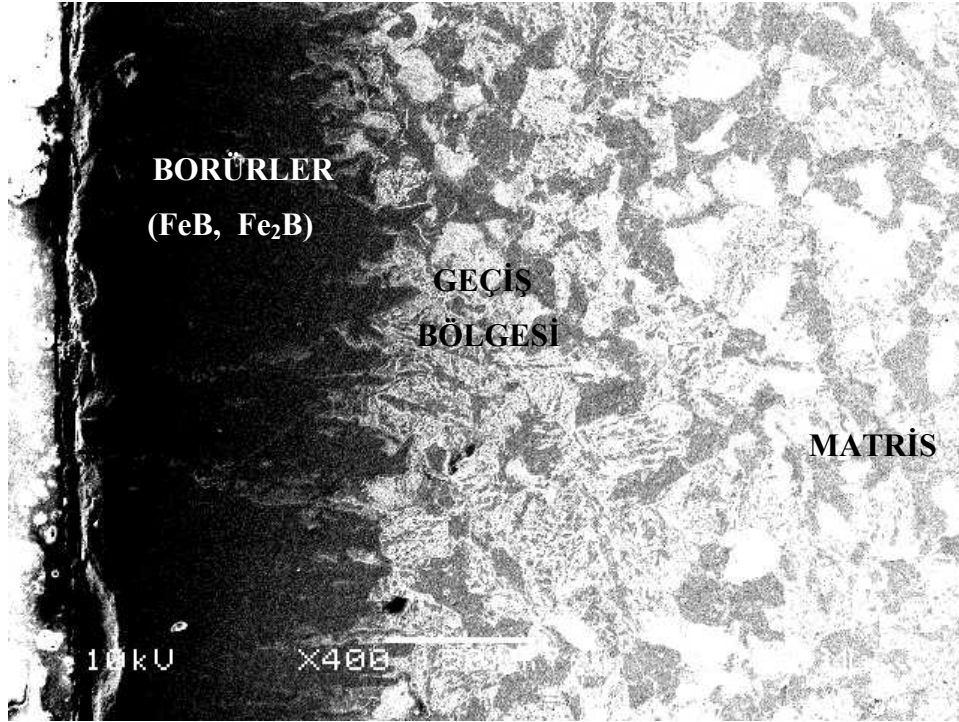
Şekil 8.9. 950°C’de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin matristen x400 büyütme görüntüsü.



Şekil 8.10. 950°C’de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin geçiş bölgesi) x400 büyütmeli görüntüsü.

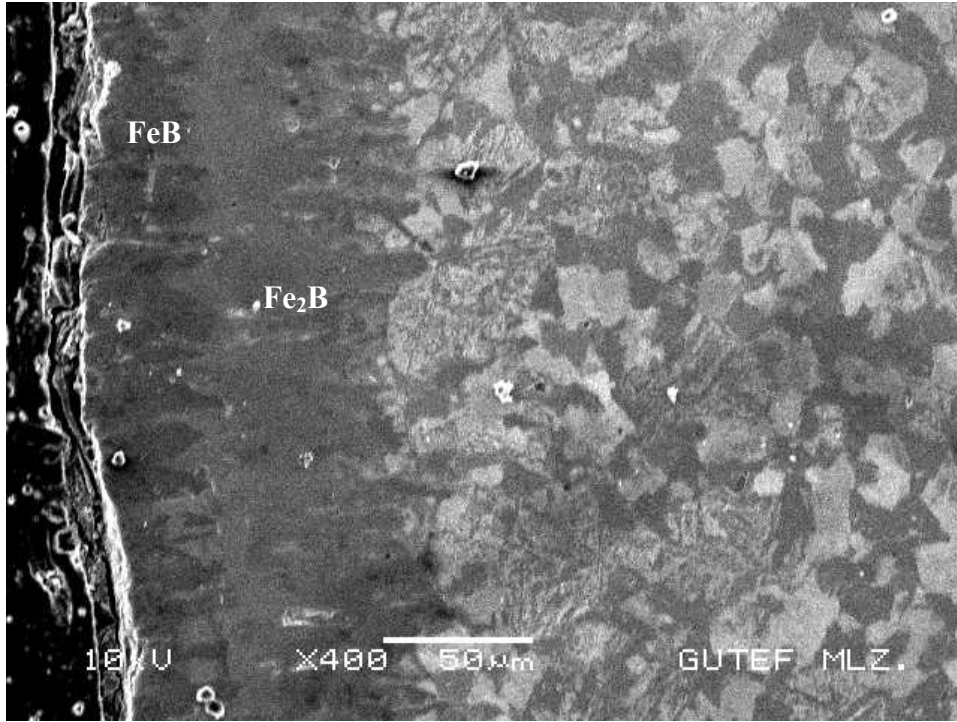
Şekil 8.9 ile 8.10 incelendiğinde, geçiş bölgesinde tane yapısının matrise göre çok daha büyük olduğu görülmektedir. Ayrıca Şekil 8.3’ten 8.10’a kadar incelendiğinde, sıcaklık ve sürenin artması ile birlikte geçiş bölgesindeki tane yapısının büyüdüğü dikkat çekmektedir. Yüksek borlama sıcaklığı ve uzun borlama sürelerinde tane yapısının büyümesi, borlama ısıtma işlemi sonucunda atomların yeniden düzenlenmesi ile açıklanabilir.

Borlanmış AISI 8620 numuneleri



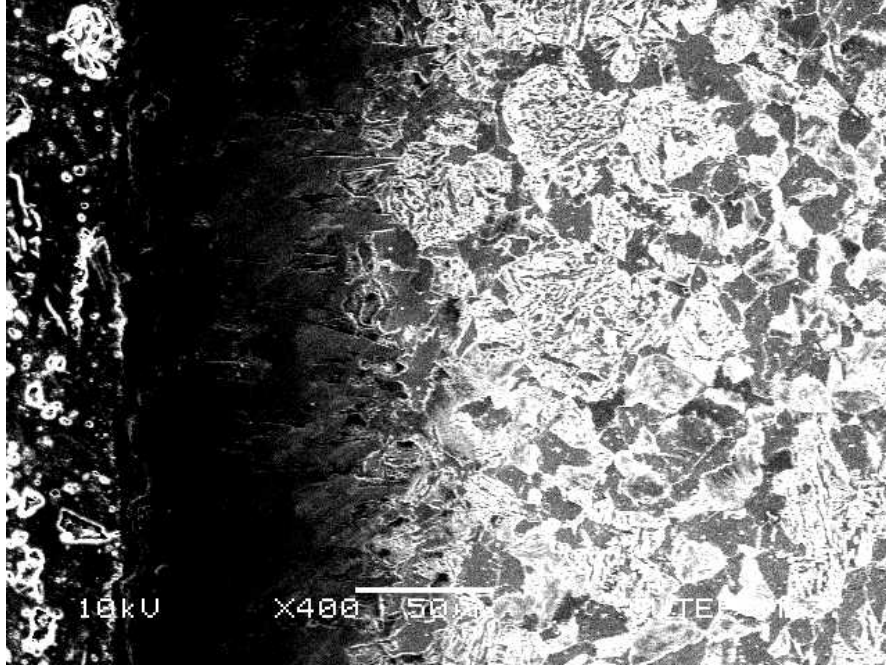
Şekil 8.11. 850°C’de 2 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin kenardan x400 büyütmeli görüntüsü.

Şekil 8.11 incelendiğinde borlanmış AISI 8620 çeliğinin yüzeyinde üç bölge görülmektedir. Bunlar; en dıştaki borürlerden oluşmuş borür katmanı, bor katmanının bitip matrisin başladığı yer olan geçiş bölgesi ve ana matristen oluşmaktadır.

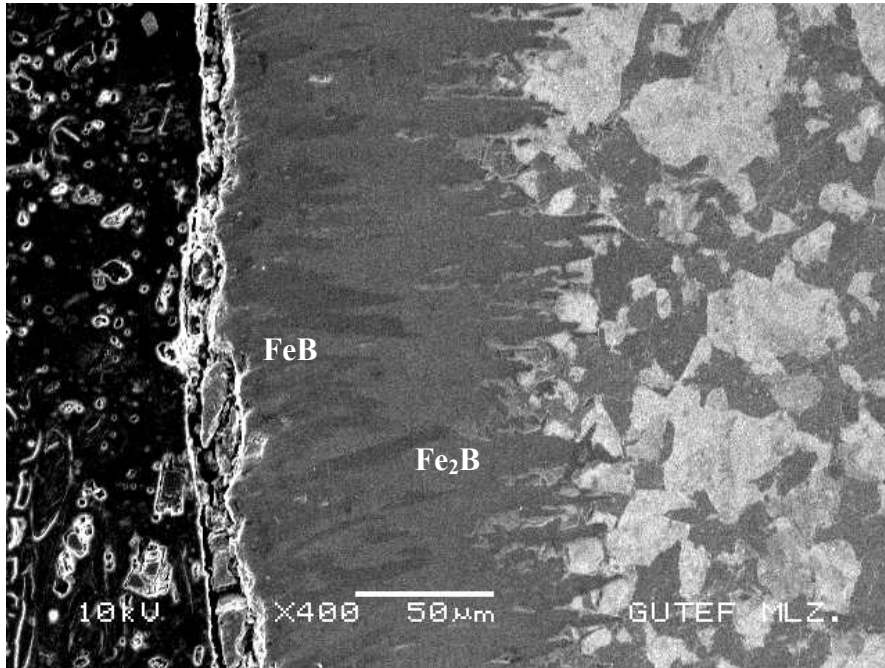


Şekil 8.12. 850°C’de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin kenardan x400 büyütmeli görüntüsü.

Şekil 8.11 ile Şekil 8.12 incelendiğinde aynı sıcaklıkta artan borlama zamanı ile bor katman kalınlığının arttığı görülmektedir. Ayrıca borlanmış AISI 8620 çeliğinin yüzeyinde oluşmuş FeB ve Fe₂B fazları görülmektedir. En dıştaki koyu renkli olan kısım FeB fazı, onun altında ve daha açık renkli görülen kısımda Fe₂B fazı olarak tespit edilmiştir.

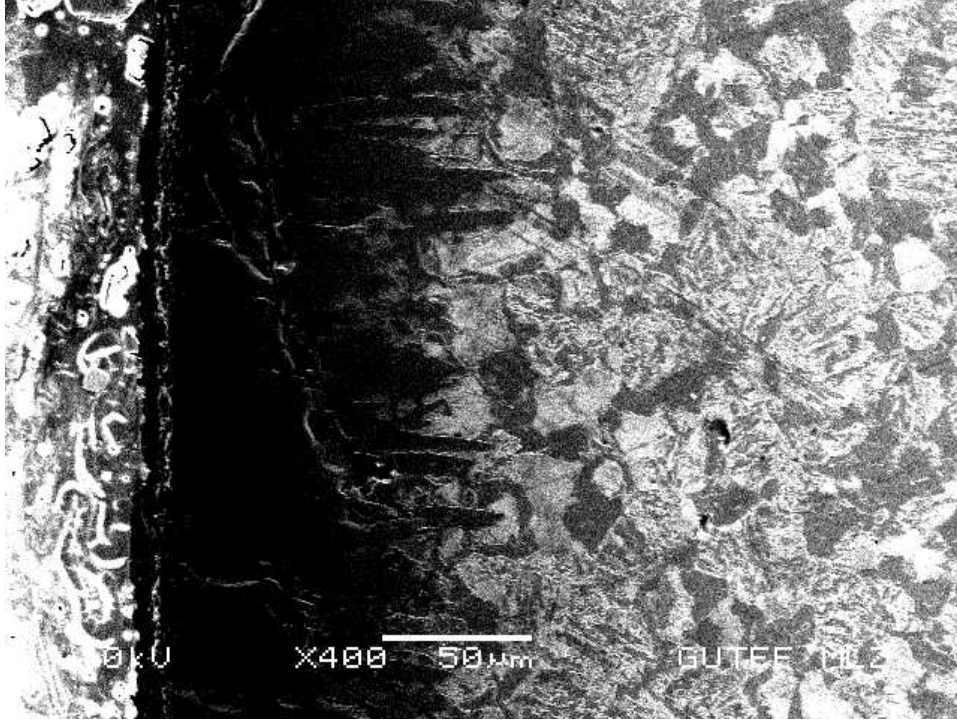


Şekil 8.13. 900°C’de 2 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin kenardan x400 büyütme görüntüsü.

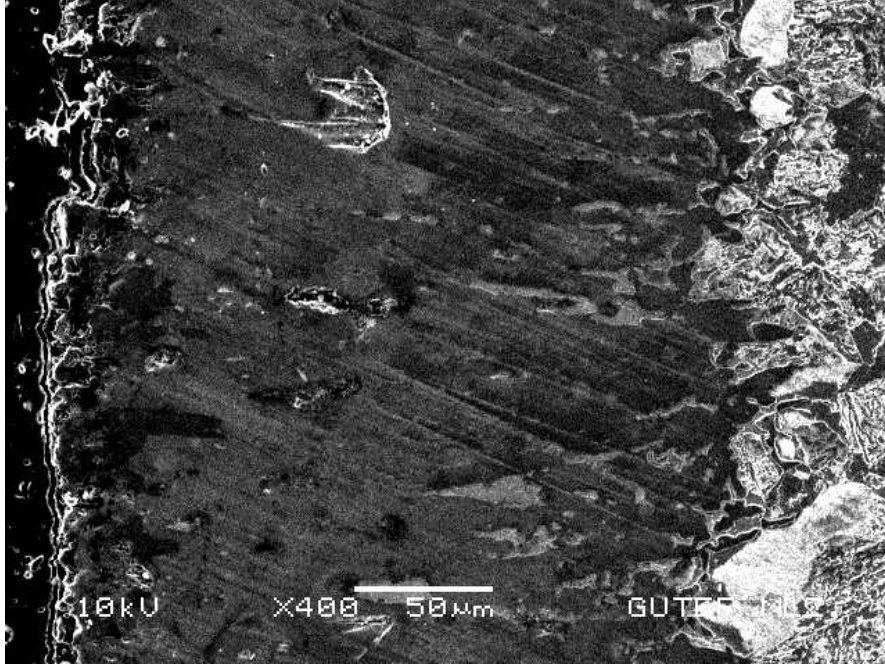


Şekil 8.14. 900°C’de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin kenardan x400 büyütme görüntüsü.

Şekil 8.11’den 8.14’e kadar incelendiğinde borlama sıcaklığının ve süresinin artması ile birlikte borür tabaka kalınlığının iki kattan fazla arttığı görülmektedir. Ayrıca sıcaklığın ve sürenin artmasına bağlı olarak tane yapısında büyüme olmuş, ferrit ve perlit yapının büyüdüğü görülmüştür. Şekil 8.14’te görüldüğü gibi önce Fe_2B fazı daha sonrada FeB fazı oluşmuştur. Dybkov ve arkadaşları (2005) yapmış oldukları çalışma sonucunda “borür katmanlarının oluşumunun eş zamanlı değil sıralı olduğunu ve ilk önce Fe_2B fazının oluştuğunu” belirtmişlerdir [15].

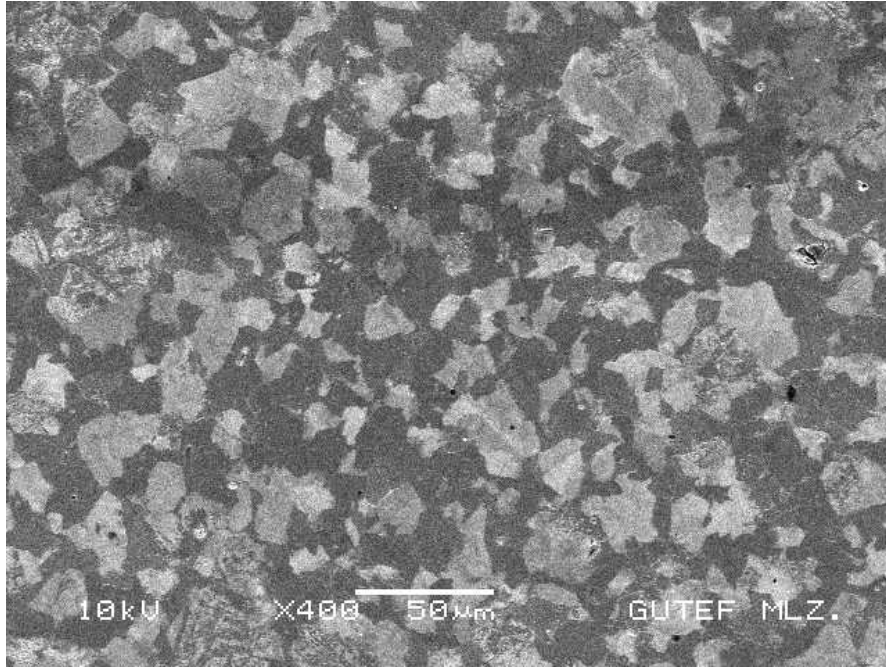


Şekil 8.15. 950°C’de 2 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin kenardan x400 büyütme görüntüsü.

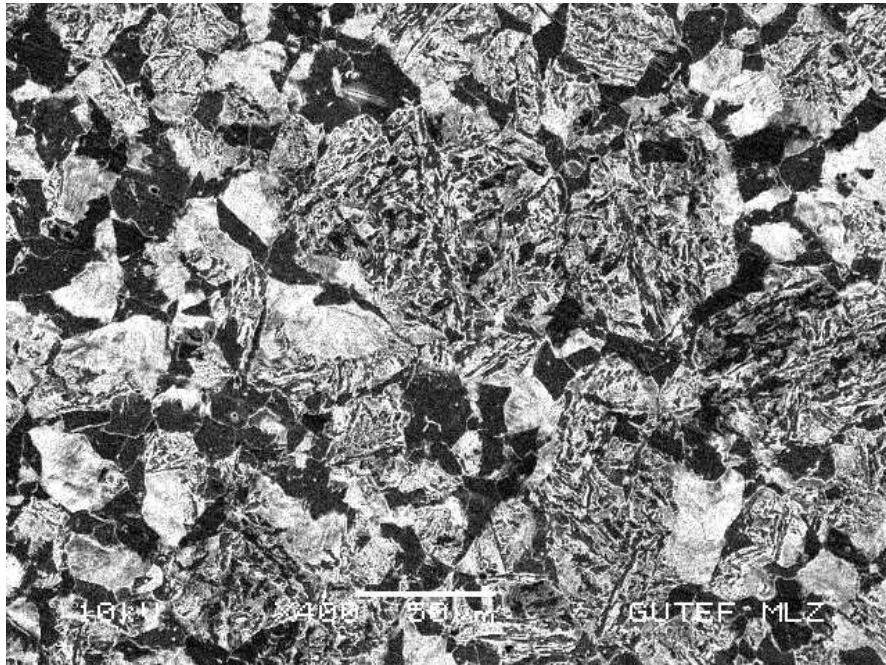


Şekil 8.16. 950°C’de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin kenardan x400 büyütme görüntüsü.

AISI 8620 çeliğinin farklı sıcaklık ve sürelerde borlanmış numunelerinin, Şekil 8.11-8.16’da da görüldüğü gibi, kolonlu bir yapıda olduğu ve malzemenin yüzeyinde homojen bir yapı sergilediği tespit edilmiştir. Bu durumun malzemenin bileşimindeki alaşım elementlerinden ileri geldiği düşünülmektedir. Pek çok araştırmacı, termokimyasal yöntemlerle borlanan düşük alaşımlı çeliklerin borür tabakasının kolonlu bir yapı sergilediğini belirtmektedir [53-55]. Kolonlu yapı borür katmanının karakteristik özelliğidir. Kaplama ve ana malzeme arasında dış biçimli geçişin oluşma miktarı işlem sıcaklığı ve süresine olduğu kadar alaşım içerisindeki alaşım elementlerinin konsantrasyonuna da bağlıdır [16]. Çelik ve dökme demirlerde alaşım elementlerinin oranı yükseldikçe kolonlu yapı azalır. Borür katmanları kolonlu yapıdan dolayı ana malzemeye daha iyi bağlanır [116].



Şekil 8.17. 950°C’de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin matrinden x400 büyütme görüntüsü.



Şekil 8.18: 950°C’de 6 saat borlanmış 8620 çeliğinin geçiş bölgesinden x400 büyütme görüntüsü.

Farklı süre ve sıcaklıkta borlanmış Hardox 400 ve AISI 8620 çelik malzemelerinin kesit yüzeylerinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemelerinde (Şekil 8.3-8.8, 8.11-16) borlanmış çeliklerin yüzeylerindeki borürlerin düzgün dallı homojen bir morfolojiye sahip oldukları görülmüştür. Ancak Hardox 400 çelik malzemenin yüzeylerinin, AISI 8620 çelik malzemenin yüzeylerine göre, daha fazla testere dişi morfolojisine benzeyen yapıda olduğu görülmektedir. Bu durumun malzemelerin bileşimindeki alaşım elementlerinden kaynaklanabileceği düşünülmüştür. Çünkü, alaşım elementlerinin matris ve borür tabakası içerisindeki çözünürlüklerine bağlı olarak, matrisin yakınında oluşturdukları bileşiklerin borlama mekanizmasını etkilemesinden dolayı borür tabakasının yapısı değişmektedir. Alaşım elementleri genellikle borun difüzyonunu engellemektedir [119]. Kaplama yüzeyinden iç kısımlara doğru gidildikçe Fe_2B fazının varlığı artmaktadır [53]. Amulevicius ve arkadaşları Fe-B sisteminde yapmış olduğu çalışmalarda, Fe_3B , Fe_2B ve FeB fazlarının varlığını lazer radyasyon tekniği ile belirlemiştir [120].

Her iki çelik numunelerinin borlanmış yüzeyinde üç ayırt edilebilir bölge gözlenmiştir. Bunlar (i) FeB ve Fe_2B borürleri içeren katman, (ii) borür katmanının altında kalan ve borun çelik ile katı hal çözeltisi yaptığı, difüzyon bölgesi (geçiş bölgesi), (iii) bordan etkilenmeyen çelik matrisi şeklindedir [11,53-55,147]. Bahsedilen ilk iki bölge (i,ii), tüm çelikler için homojen bir yapı sergilerken, kolonlu yapı malzemelerin bileşimine bağlı olarak değişiklik arz etmektedir. Kolonların meydana getirdiği girinti çıkıntılar kaplama/matris ara yüzeyini genişletmektedir ve bu durum aşınma ile sertlik hususunda göz önünde bulundurulmalıdır. Çünkü, borür tabakasının matrise yapışmasında kohezif kuvvetler etkin olduğundan, kaplama/matris ara yüzeyinin artması, tutunma mukavemetini artırır [55].

Borlama süresi ve sıcaklığına bağlı olarak borür tabakasının kalınlığı değişmektedir. Bor katmanlarının kalınlığının borlama süresine ve sıcaklığa bağlı olarak arttığı görülmüştür. Bu sonuç literatürle de uyumludur [48-56,102,147,148].

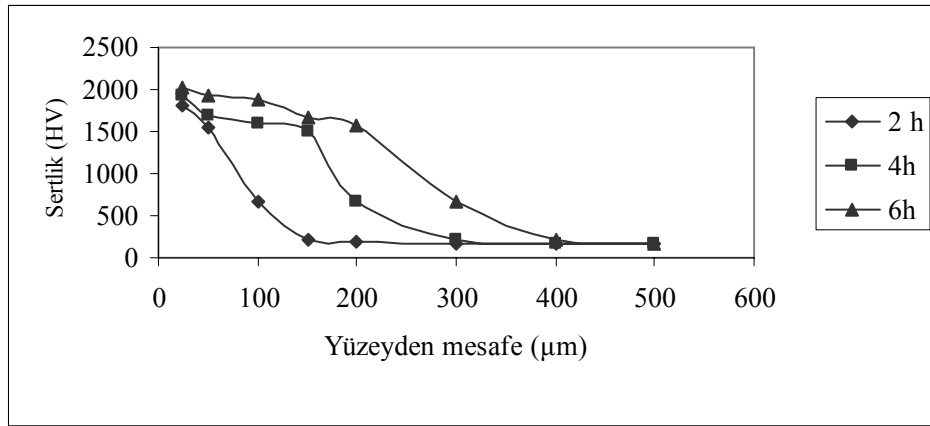
Şekil 8.9-8.10 ve Şekil 8.17-8.18 incelendiğinde, geçiş bölgesinde tane büyümesinin olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni, bu bölgedeki sıcaklığın rekristalizasyon sıcaklığına ulaşması sonucu atomların yeniden düzenlenmesi ile açıklanabilir. Tane büyümesi geçiş bölgesinde en fazla, matriste ise az olmuştur. Genel olarak borlanmış tüm şekiller incelendiğinde düşük sıcaklık ve kısa süreli borlanmış malzemelerde tane boyutunun daha küçük, uzun süre ve yüksek sıcaklıklarda borlanan malzemelerin tane boyutunun daha büyük olduğu görülmektedir. Borür tabakasında yer alan demir borürlerden FeB miktarının yüksek borlama sıcaklığı ve uzun borlama sürelerinde arttığı görülmektedir. En yüksek borür tabaka kalınlığının 950°C’de 6 saat borlanmış Hardox 400 çelik malzemedeki meydana geldiği tespit edilmiştir.

8.2. Sertlik Ölçümleri ve Borür Katmanı

Numunelerin mikro sertlikleri G. Ü. Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi Bölümü Malzeme laboratuvarı’ndaki HVM Micro Hardness Tester Shimadzu marka test cihazı ile yapılmıştır. Aynı katmanlardan (FeB, Fe₂B, borür kolonlarının bitip ana matrisin başladığı yer ve matrisli kısım) ikişer tane sertlik alındıktan sonra ortalamaları alınmıştır. Ölçümler dıştan içeriye doğru yapılmış olup, sertliğin beklenildiği gibi matrise doğru azaldığı görülmüştür. Deneyler Vickers sertlik ölçümünde 100 g yük uygulanarak gerçekleştirilmiştir.

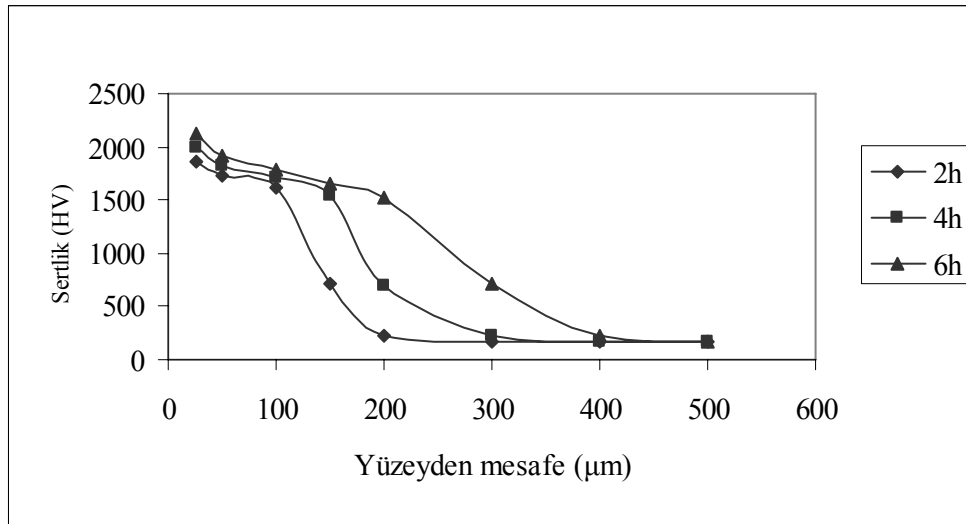
Borlanmamış Hardox 400 çeliğinde zaten önceden % 0,002 oranında bor elementi bulunduğundan ve daha fazla manganez içerdiğinden, bu çelik AISI 8620 çeliğinden daha serttir. Nitekim borlanmamış Hardox 400 çeliğinin sertliği 470 HV ve borlanmamış AISI 8620 çeliğinin sertlik değeri 220 HV olarak elde edilmiştir.

Aşağıdaki şekillerde (Şekil 8.19-21) borlanmış Hardox 400 çelik numunelerin borür katmanlarının sertlikleri verilmiştir.



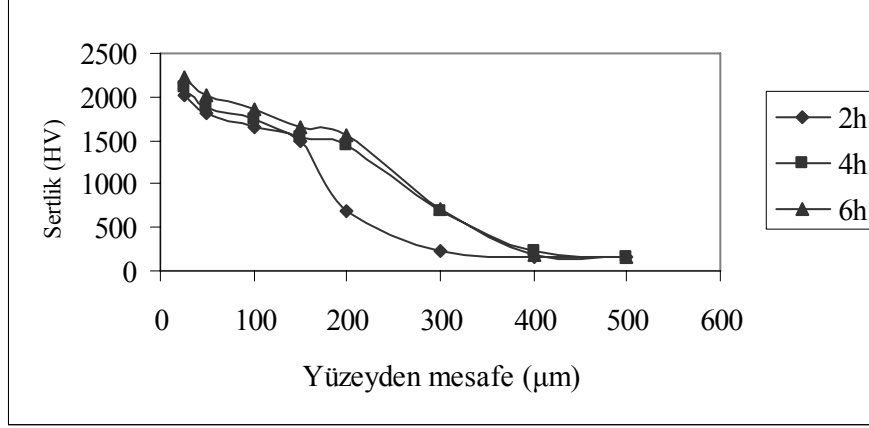
Şekil 8.19. 850 °C'de 2, 4 ve 6 saat borlanmış Hardox 400 numunelerinin mikro sertlikleri.

850 °C'de 2 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin en dış kısmındaki sertlik 1808 HV, 4 saat borlanmış numunede 1924 HV, 6 saat borlanmış numunede 2020 HV, matris sertlikleride 170 HV olarak ölçülmüştür.



Şekil 8.20. 900 °C'de 2, 4 ve 6 saat borlanmış Hardox 400 numunelerinin mikro sertlikleri.

900 °C’de 2 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin en dış kısmındaki sertlik 1868 HV, 4 saat borlanmış numunede 1998 HV, 6 saat borlanmış numunede 2120 HV, matris sertlikleride 165 HV olarak ölçülmüştür.



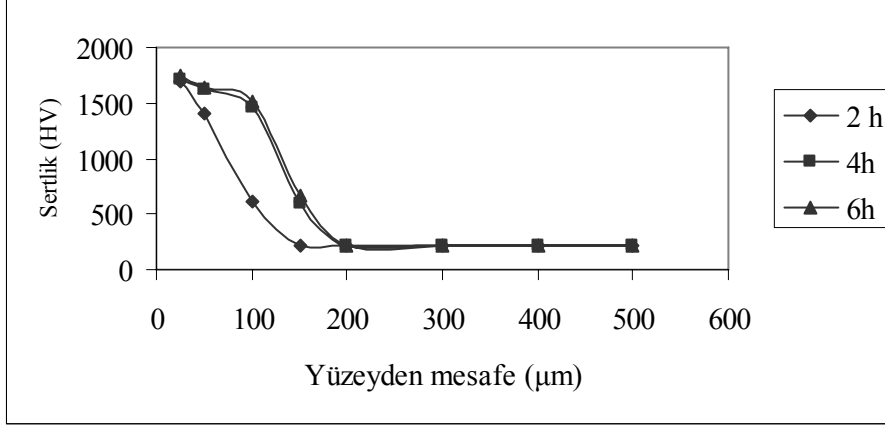
Şekil 8.21. 950 °C’de 2, 4 ve 6 saat borlanmış Hardox 400 numunelerin mikro sertlikleri.

950 °C’de 2 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin en dış kısmındaki sertlik 2018 HV, 4 saat borlanmış numunede 2112 HV, 6 saat borlanmış numunede 2235 HV, matris sertlikleride 165 HV olarak ölçülmüştür.

Şekil 8.19-21 incelendiğinde en fazla borür katman sertliğinin 950 °C’de 6 saat borlanmış numunede olduğu görülmektedir. Şen ve arkadaşları yapmış oldukları araştırmada, borlama sıcaklığının ve süresinin artması ile bor katmanı sertliğinin arttığını belirtmişlerdir [149]. Ancak yüksek sıcaklıklarda yüzeydeki borür tabakası bozulmakta ve sertlikte de düşüşler olmaktadır. Şen, AISI 5140, 4140 ve 4340 çelikleri 1050 °C’de 6 ve 8 saat borlamış, sonunda yüzeydeki borür tabakasının bozularak gözenekli bir yapıya dönüştüğünü, sertliğin azaldığını ve tabakada mikro çatlakların meydana geldiğini belirtmiştir [53]. Şekillerden de anlaşılacağı gibi borlanmış Hardox 400 çelik numunelerin matris sertliği (170 HV), borlanmamış numunenin sertliğinden (470 HV) çok düşük olmuştur. Bunun nedeninin işlemsiz olan Hardox 400 çelik plakalarının tam sertleştirilmiş olması ve borlamadan sonra da havada soğutulmuş olmasıdır. Çünkü ana malzeme olan Hardox 400 çelikleri,

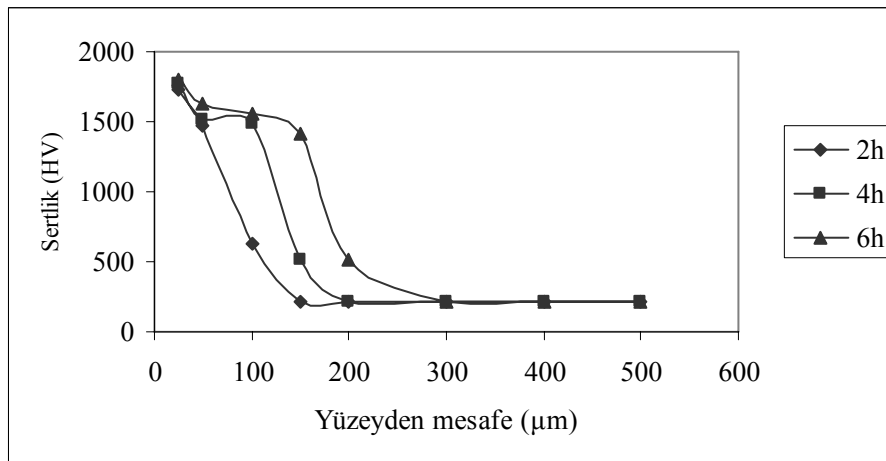
mukavemeti çok yüksek olan sert çeliklerdir [150]. Tüm numunelerde artan sıcaklık ve süreye bağlı olarak FeB miktarı arttığından, sertleşme derinliği de artmaktadır.

Aşağıdaki şekillerde (Şekil 8.22-24) borlanmış AISI 8620 çelik numunelerin borür katmanlarının sertlikleri verilmiştir.



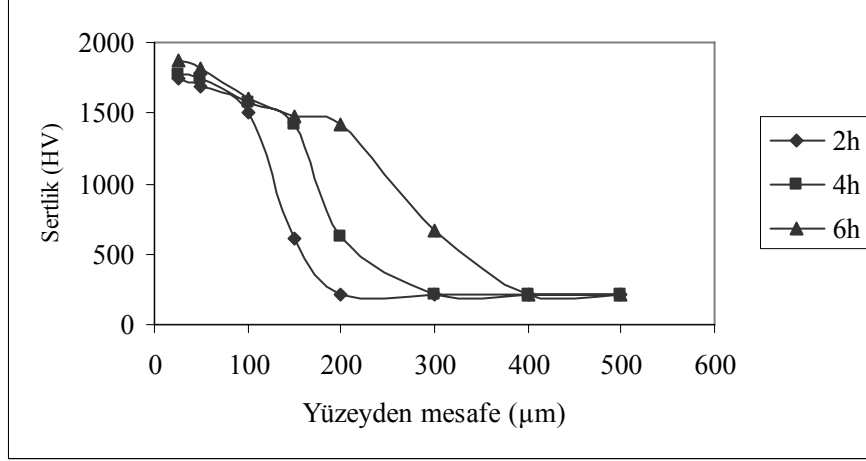
Şekil 8.22. 850 °C'de 2, 4 ve 6 saat borlanmış AISI 8620 numunelerin mikro sertlikleri.

850 °C'de 2 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin en dış kısmındaki sertlik 1690 HV, 4 saat borlanmış numunede 1719 HV, 6 saat borlanmış numunede 1753 HV, matris sertlikleride 220 HV olarak ölçülmüştür.



Şekil 8.23. 900 °C'de 2, 4 ve 6 saat borlanmış AISI 8620 numunelerin mikro sertlikleri.

900 °C’de 2 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin en dış kısmındaki sertlik 1726 HV, 4 saat borlanmış numunede 1768 HV, 6 saat borlanmış numunede 1806 HV, matris sertlikleride 215 HV olarak ölçülmüştür.



Şekil 8.24. 950 °C’de 2, 4 ve 6 saat borlanmış AISI 8620 numunelerin mikro sertlikleri.

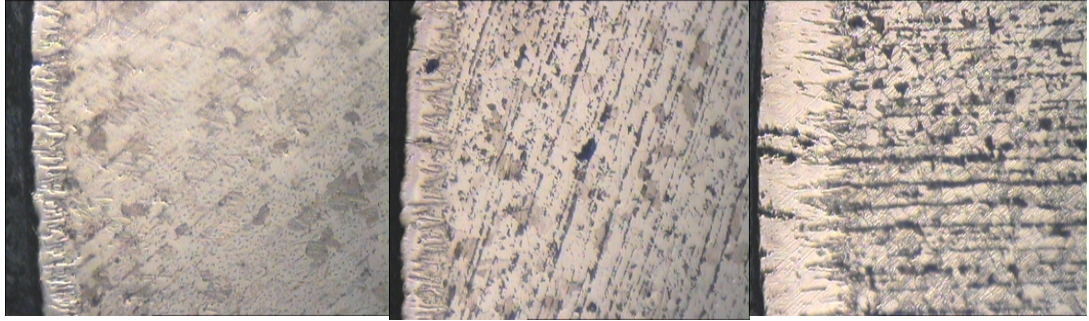
950 °C’de 2 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin en dış kısmındaki sertlik 1738 HV, 4 saat borlanmış numunede 1779 HV, 6 saat borlanmış numunede 1872 HV, matris sertlikleride 215 HV olarak ölçülmüştür.

Şekil 8.22-24 incelendiğinde en fazla borür katman sertliğinin 950 °C’de 6 saat borlanmış numunede, en düşük sertliğin ise 850 °C’de 2 saat borlanmış numunede olduğu görülmektedir. AISI 8620 çeliğinde de artan sıcaklık ve süreye bağlı olarak sertleşme derinliği artma göstermektedir.

Her iki çelik mikro sertlik açısından karşılaştırıldığında borlanan Hardox 400 çeliğinin borür bölgesinin AISI 8620 çeliğinin borür bölgesinden daha yüksek sertliğe sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu da AISI 8620 çeliğinin yapısında bulunan krom elementinin bor’un bir kısmını kendisine bağlayarak daha fazla FeB oluşmasını önlemesinden ileri gelmektedir. En fazla sertlik 950 °C’de 6 saat borlanmış Hardox

400’de meydana gelirken, en az sertlik ise 850 °C’de 2 saat borlanmış AISI 8620’de meydana gelmiştir. Ancak borlanmış çeliklerin matris sertliklerine bakıldığında ise AISI 8620 çeliğinin matris sertliğinin, Hardox 400 çeliğinin matris sertliğinden fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeninin işlemsiz olan Hardox 400 çelik plakalarının tam sertleştirilmiş olması ve borlamadan sonrada havada soğutulmuş olmasıdır. Çünkü ana malzeme olan Hardox 400 çelikleri, mukavemeti çok yüksek olan sert çeliklerdir [150]. Sertlik dağılımlarından da (Şekil 8.19-8.24) görüleceği gibi, borürlerin sertliği matrisin sertliğinden oldukça yüksektir. Sertlik dağılım diyagramında üç bölge vardır ve bunlar (i) borürlerden müteşekkil bölge, (ii) bor bakımından zengin geçiş bölgesi, (iii) matris şeklindedir [11,147]. Borürlerin olduğu yer (i) bölgede, en yüksek sertlik gözlenmektedir. En dışta FeB fazı bulunduğundan en sert tabaka burasıdır. Daha sonra Fe₂B fazı bulunduğundan Fe₂B fazının sertliği FeB fazından biraz düşüktür. Bor bakımından zengin (ii) bölge ise geçiş bölgesidir ve sertlik burada fazla düşüş göstermektedir. Matriste (iii) bölgesinde ise, sertlik ana malzemenin sertliğine yakın bir değer almaktadır. Elde edilen sertlik değerleri kolonların hemen bitiminden matrise doğru gidildikçe önemli ölçüde azalma göstermektedir. Pek çok araştırmacının yapmış olduğu deneyler bunu doğrulamaktadır [8,9,11,147,149,151,152,153]. Bunun nedeni, kolonların dışında bor atomlarının matrise doğru difüze olmaları ve katı eriyik sertleşmesi oluşmasıdır [53].

Aşağıda Şekil 8.25’den, 8.27’ye kadar farklı süre ve sıcaklıklarda borlanmış, Hardox 400 çelik numunelerin ve Şekil 8.28’den Şekil 8.30’ a kadar AISI 8620 çelik numunelerin optik mikroskopta kenardan (borlu katmanın olduğu yerden) çekilmiş resimleri verilmiştir.



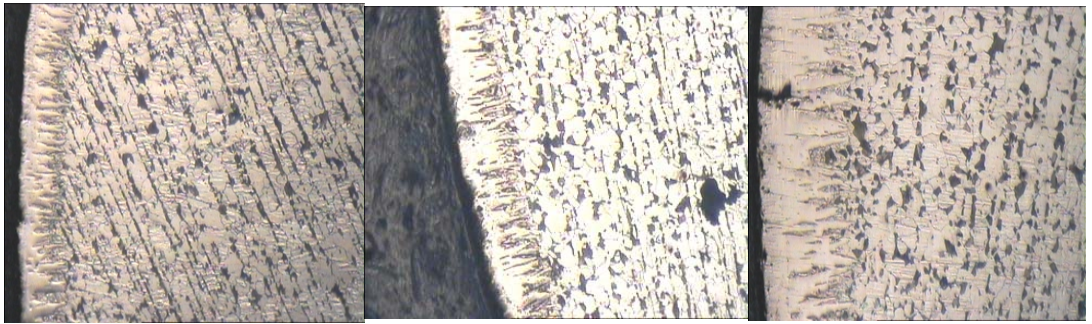
— 200 μm

a

b

c

Şekil 8.25. 850°C’de a) 2, b) 4, c) 6 saat borlanmış Hardox 400 numunelerin kenardan x100 büyütme görüntüsü.

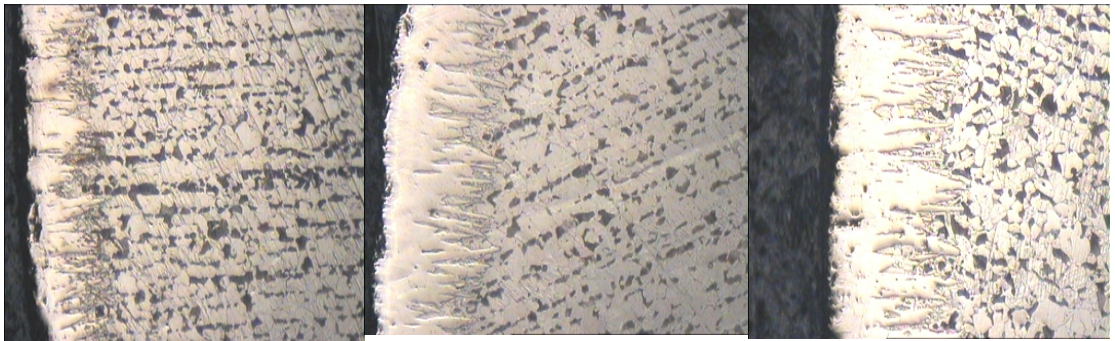


a

b

c

Şekil 8.26. 900°C’de a) 2, b) 4, c) 6 saat borlanmış Hardox 400 numunelerin kenardan x100 büyütme görüntüsü.

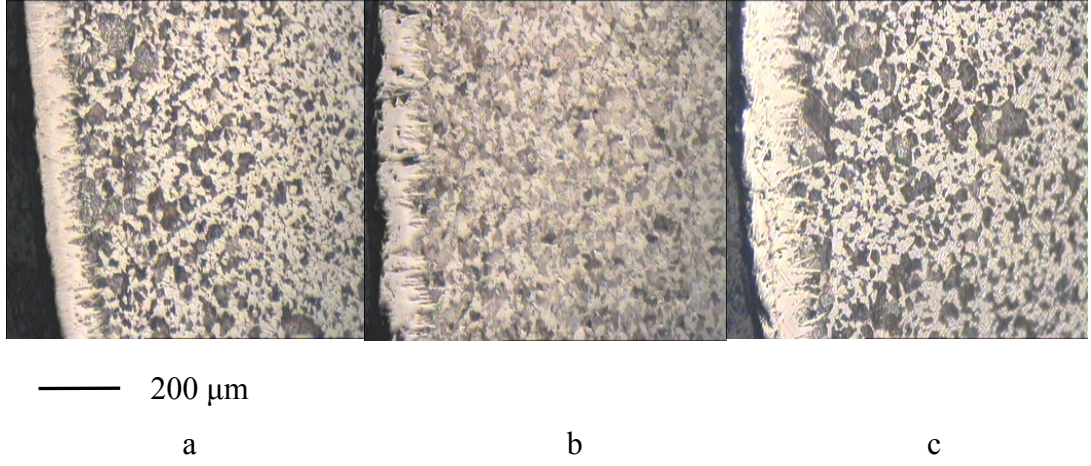


a

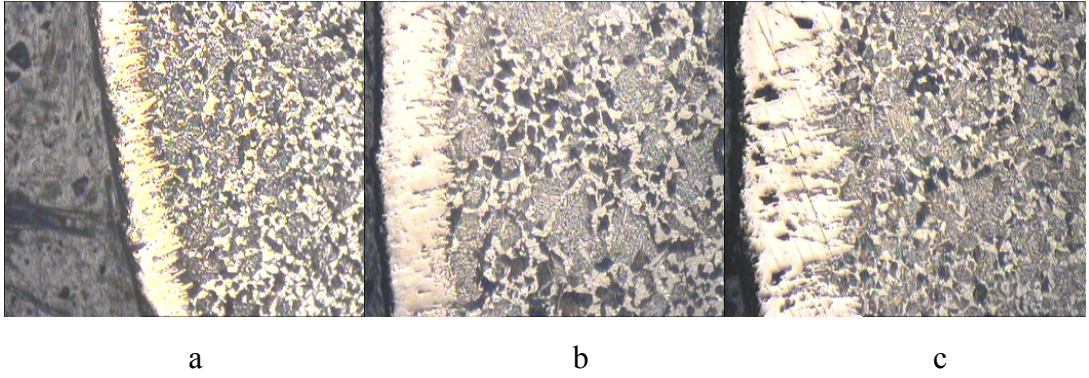
b

c

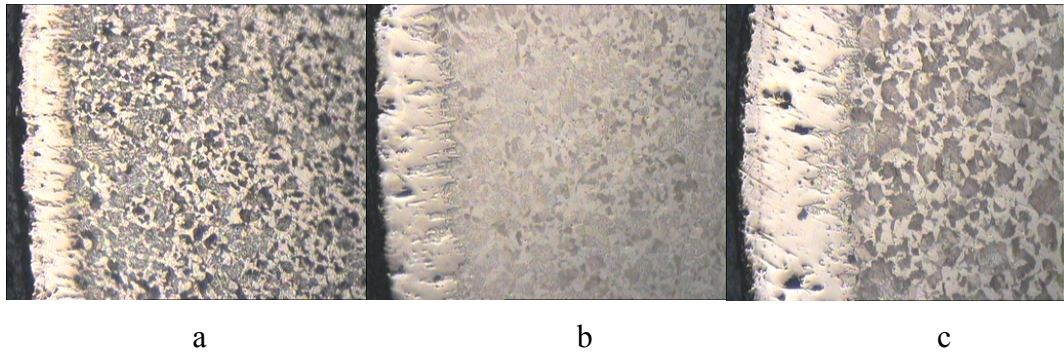
Şekil 8.27. 950°C’de a) 2, b) 4, c) 6 saat borlanmış Hardox 400 numunelerin kenardan x100 büyütme görüntüsü.



Şekil 8.28. 850°C’de a) 2, b) 4, c) 6 saat borlanmış AISI 8620 numunelerin x100 büyütme görüntüsü.



Şekil 8.29. 900°C’de a) 2, b) 4, c) 6 saat borlanmış AISI 8620 numunelerin x100 büyütme görüntüsü.



Şekil 8.30. 950°C’de a) 2, b) 4, c) 6 saat borlanmış AISI 8620 numunelerin x100 büyütme görüntüsü.

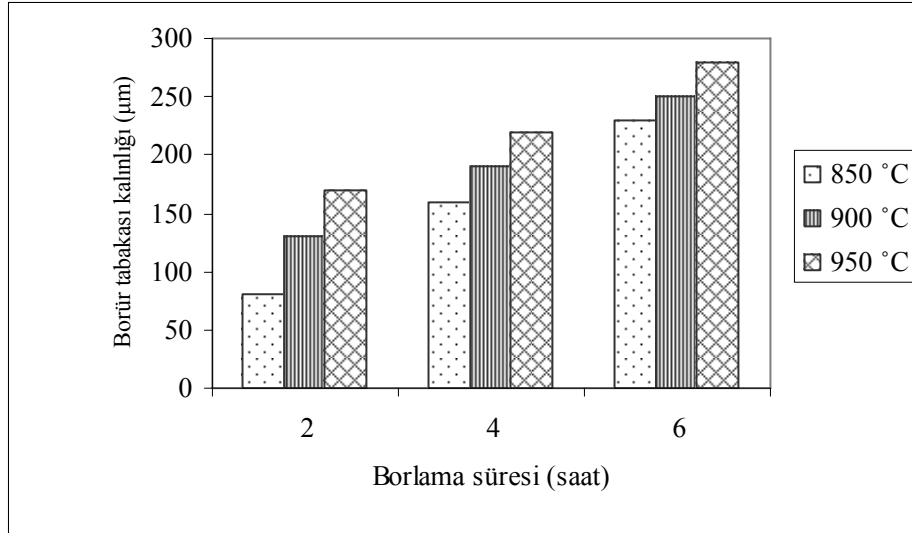
Her iki çelik numuneler içinde, Şekil 8.25 (a, b, c)'den Şekil 8.30 (a, b, c)' ye kadar optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde, aynı sıcaklıkta sürenin artması ile bor katman kalınlığının arttığı görülmektedir. Ayrıca sıcaklığın artması ile de bor katman kalınlığının arttığı görülmektedir. Borlama süresi ve borlama sıcaklığının doğru orantılı olduğu görülmektedir. Bor atomları her iki çelikte de numune yüzeyinden içeriye doğru testere dişlileri şeklinde ilerlemektedir. Süre ilerledikçe testere uçlarının sivrilerek uzadığı görülmektedir. Oluşan borür tabakasında en dış yüzeyde FeB fazı, matrise doğru Fe₂B fazı ve bu fazın altında geçiş zonu yer almaktadır. FeB fazı ile Fe₂B ve Fe₂B fazı ile matris ara yüzeyindeki yapının kolonsal (testere dişlileri şeklinde) olduğu görülmektedir. Çünkü, kolonsallık malzemelerin bileşimine bağlı olarak değişiklik arz etmektedir [53-55].

Aşağıda Çizelge 8.1'de farklı süre ve sıcaklıklarda borlanmış Hardox 400 ve AISI 8620 çeliklerinin bor katman kalınlıkları verilmiştir.

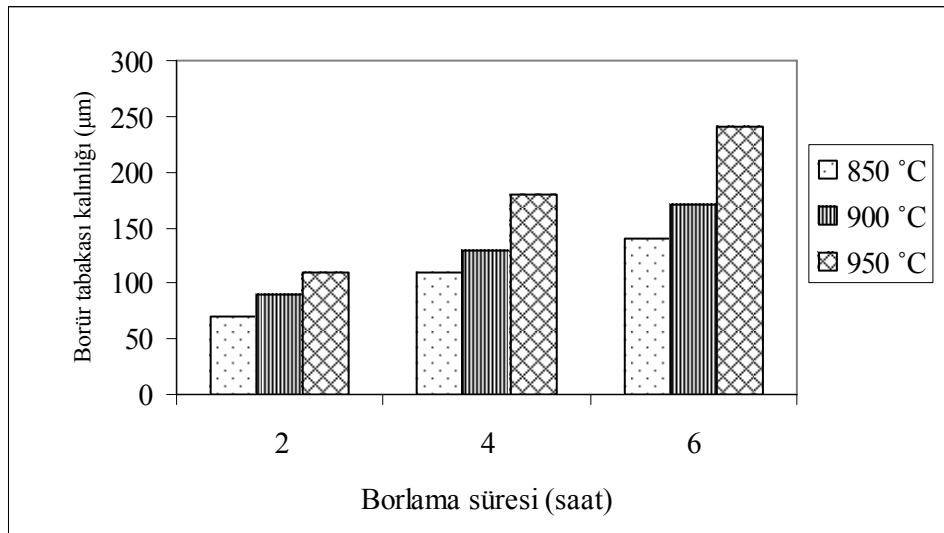
Çizelge 8.1. Borlanmış Hardox 400 ve AISI 8620 çeliklerinin bor katman kalınlıkları

Sıcaklık	Borlanmış Hardox 400		Borlanmış AISI 8620	
	Süre (Saat)	Bor Katman Kalınlığı (µm)	Süre (Saat)	Bor Katman Kalınlığı (µm)
850°C	2	80	2	70
	4	160	4	110
	6	230	6	140
900°C	2	130	2	90
	4	190	4	130
	6	250	6	170
950°C	2	170	2	110
	4	220	4	180
	6	280	6	240

Aşağıda Şekil 8.31’de, farklı süre ve sıcaklıklarda borlanmış, Hardox 400 çelik numunelerin ve Şekil 8.32’de AISI 8620 çelik numunelerin borür katman kalınlıklarının grafikleri verilmiştir.



Şekil 8.31. 850 °C , 900 °C , 950 °C ’de 2, 4 ve 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin borür katman kalınlıklarının karşılaştırılması.

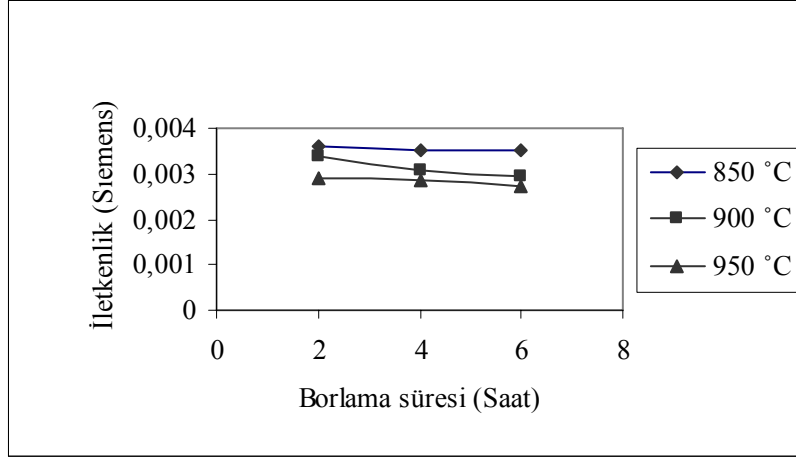


Şekil 8.32. 850 °C , 900 °C , 950 °C ’de 2, 4 ve 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin borür katman kalınlıklarının karşılaştırılması.

Her iki çelik numunede de en fazla borür katman kalınlığı, en yüksek sıcaklık ve en fazla sürede borlanan numunelerde elde edilmiştir. Borlama işlemi ısı kimyasal bir difüzyon işlemi olduğundan, borür katman kalınlığı hem sıcaklık hem de zamana bağlı olarak artacaktır [9]. Sıcaklığın artırılması ile borür katman kalınlığı artmıştır. Diğer yandan, borlama süresini artırmak sureti ile de borür katmanı kalınlığı artmıştır. 850 °C’de 2 saat borlanan Hardox 400 numunenin borür katman kalınlığı 80 µm iken, 950 °C’de 6 saat borlanan numunenin borür katman kalınlığı 280 µm olarak ölçülmüştür. Aynı şekilde 850 °C’de 2 saat borlanan AISI 8620 numunenin borür katman kalınlığı 70 µm iken, 950 °C’de 6 saat borlanan numunenin borür katman kalınlığı 240 µm olarak ölçülmüştür (Çizelge 8.1). Mikroyapı resimlerinden ve Şekil 8.31-32’de de görüldüğü gibi borür katmanının kalınlığı işlem sıcaklığına, ana malzemenin kimyasal kompozisyonuna ve borlama süresine şiddetle bağlıdır. İşlem süresi ile katman kalınlığı arasında yaklaşık olarak parabolik bir ilişki vardır.

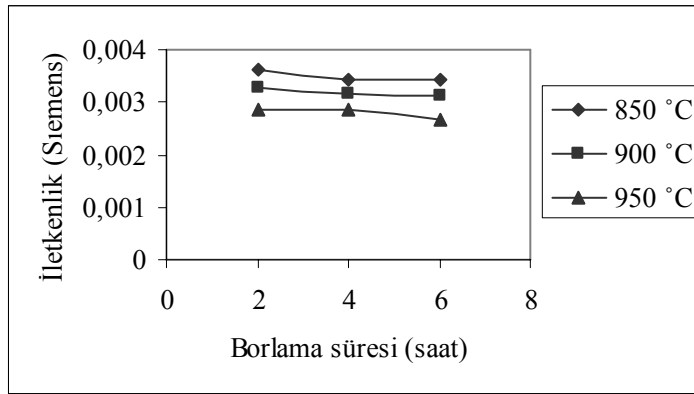
8.3. Elektrik İletkenliği Sonuçları

Elektrik iletkenliği deneyleri ODTÜ Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünün laboratuvarları’nda normal oda sıcaklıklarında yapılmıştır. Deneyler Agilent 4294A Precision Impedance Analyzer 40 Hz-110 MHz iletkenlik ölçüm cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Aşağıda Şekil 8.33’de, farklı süre ve sıcaklıklarda borlanmış, Hardox 400 çelik numunelerin ve Şekil 8.34’de AISI 8620 çelik numunelerin elektrik iletkenlikleri verilmiştir. Ölçümler her sıcaklık ve süre için üçer defa alınmış ve bunların ortalamaları alınarak sonuçlar bulunmuştur.



Şekil 8.33. 850 °C , 900 °C , 950 °C 'de 2, 4 ve 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin iletkenlik değerlerinin karşılaştırılması.

Borlanmamış Hardox 400 numunenin iletkenlik değeri 0,002806 Siemens olarak bulunmuştur. En fazla iletkenlik değeri, 0,003600 Siemens olarak 850 °C 2 saat borlanmış numunede, en az iletkenlik değeri ise, 0,002726 Siemens olarak 950 °C 6 saat borlanmış numunede bulunmuştur. Borlama sonucunda Hardox 400 çeliğinin borlanmamış numuneye göre iletkenlik değerinin belirgin bir artış göstermediği tespit edilmiştir. Şekil 8.33'den de görüldüğü gibi, aynı koşullarda borlama süresinin iletkenliği etkilemediği anlaşılmaktadır.



Şekil 8.34. 850 °C , 900 °C , 950 °C 'de 2, 4 ve 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin iletkenlik değerlerinin karşılaştırılması.

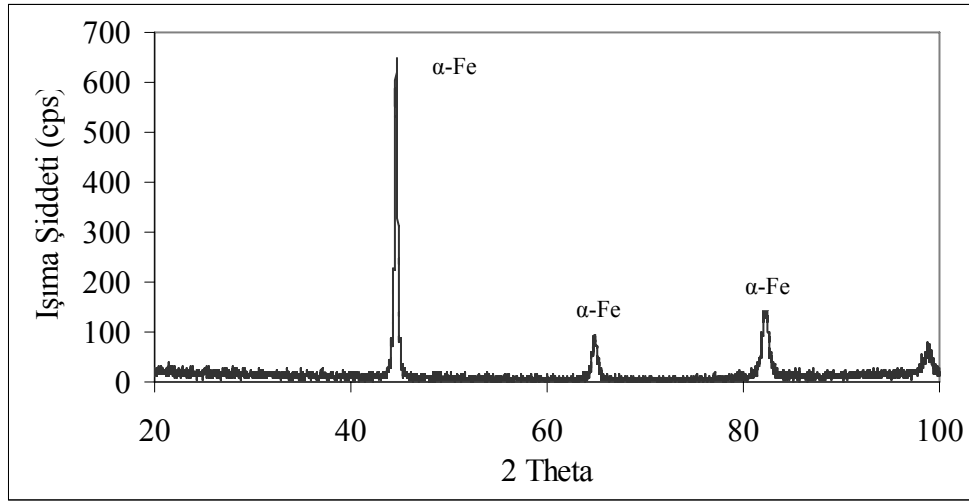
Borlanmamış AISI 8620 numunenin iletkenlik değeri 0,002048 Siemens olarak bulunmuştur. En fazla iletkenlik değeri, 0,003612 Siemens olarak 850 °C 2 saat borlanmış numunede, en az iletkenlik değeri ise, 0,002663 Siemens olarak 950 °C 6 saat borlanmış numunede bulunmuştur. Borlama sonucunda, AISI 8620 çeliğinin borlanmamış numuneye göre iletkenlik değerinin belirgin bir artış göstermediği tespit edilmiştir. Şekil 8.34'ten de görüldüğü gibi, aynı koşullarda borlama süresinin iletkenliği etkilemediği anlaşılmaktadır.

Borlanmış Hardox 400 ve AISI 8620 çeliklerinin her ikisinde de elektrik iletkenliği borlanmamış numunelere göre belirgin bir artış göstermemiştir. Her iki çelikte de aynı koşullarda borlama süresinin ve sıcaklığının iletkenliği etkilemediği deney sonucunda anlaşılmıştır.

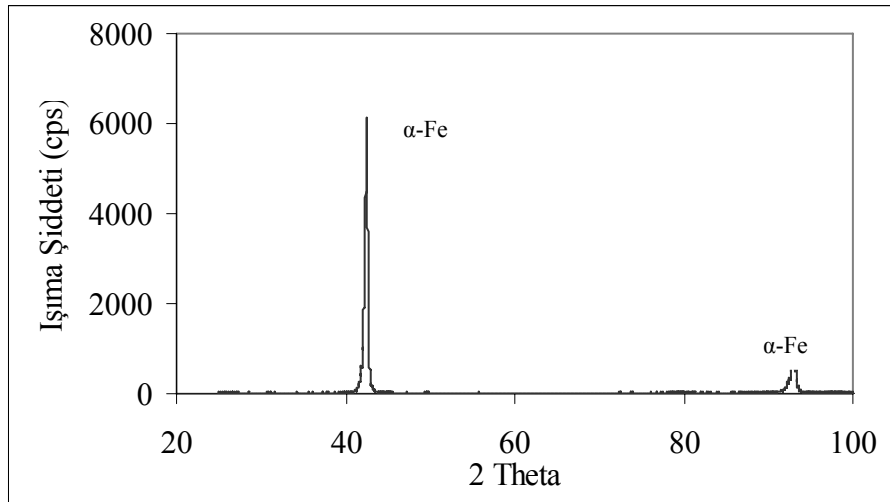
Genelde borürlerin ısı iletkenlik katsayıları ve termal şok dirençleri oldukça yüksektir. Birçok borür, 5-80 $\mu\Omega$ -cm aralığında elektriksel dirence sahiptir ve seramikler arasında iyi elektriksel iletkenlik gösterir [154].

8.4. X-Işınları Kırınım Analizi İncelemeleri

Borlanmamış ve borlanmış numuneler x-ışını kırınım analizine tabi tutulmuştur (XRD). Test malzemelerinin yüzeylerinde oluşan borürler FeB-Fe₂B ve Fe₃B x-ışını kırınım cihazı ile Şekil 8.35-38'de ve Şekil 8.40-8.41'de görüldüğü gibi teyit edilmiştir. Hardox 400 çelik numunenin yüzeyinde oluşan borür tabakasındaki mevcut fazlar Şekil 8.36'dan 8.38'e kadar verilmiştir. Farklı sıcaklıklarda 6 saat borlama işlemine tabi tutulan fazların tayini ile borlanmamış ve 950 °C sıcaklıkta 6 saat borlanmış Hardox 400 ile AISI 8620 çelik numunelerinin borlu yüzeyden itibaren 150 μ m ve 250 μ m aşındırıldıktan sonra borür tabakasındaki mevcut fazların tespiti için, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Metalurji Mühendisliği Bölümü laboratuvarı'ndaki Rigaku D/Max-2200/PC Model XRD Cihazı kullanılmıştır.

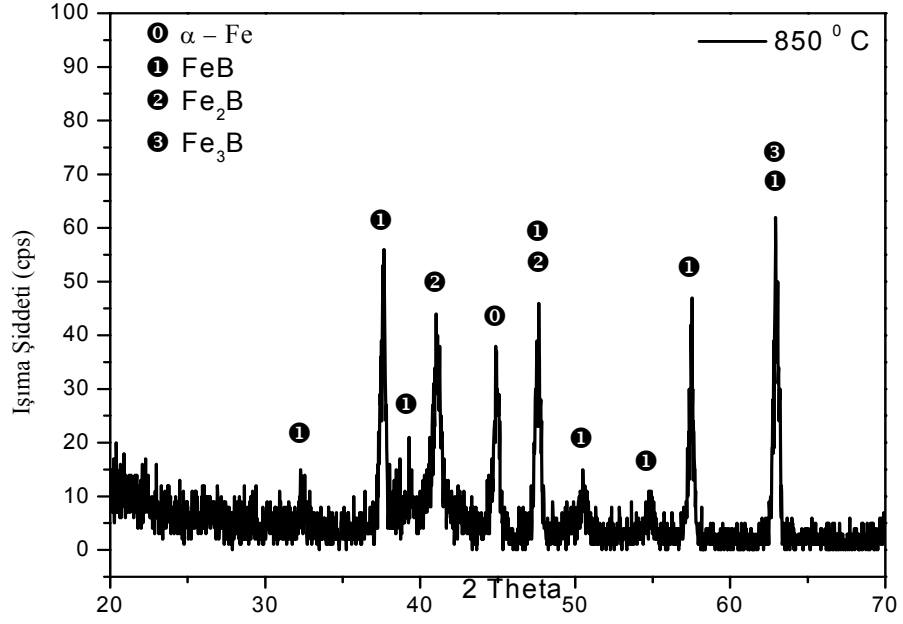


Şekil 8.35. Borlanmamış Hardox 400 çelik numunenin x-ışını analizi.



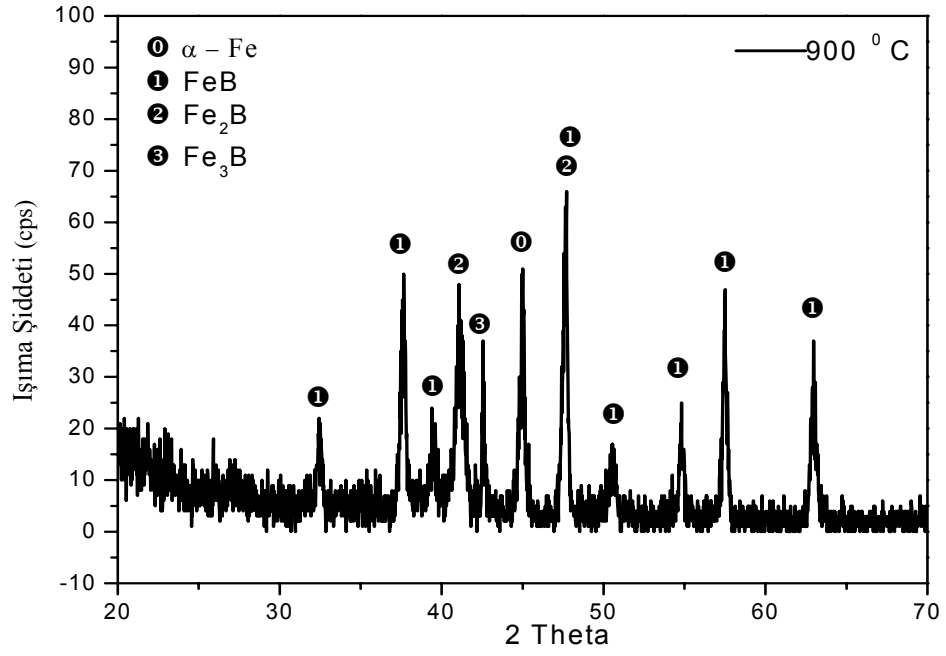
Şekil 8.36. Borlanmamış AISI 8620 çelik numunenin x-ışını analizi.

Şekil 8.35 ile 36 incelendiğinde borlanmamış Hardox 400 ve AISI 8620 çelik numunelerinin α -Fe olduğu analiz sonuçlarından anlaşılmaktadır.

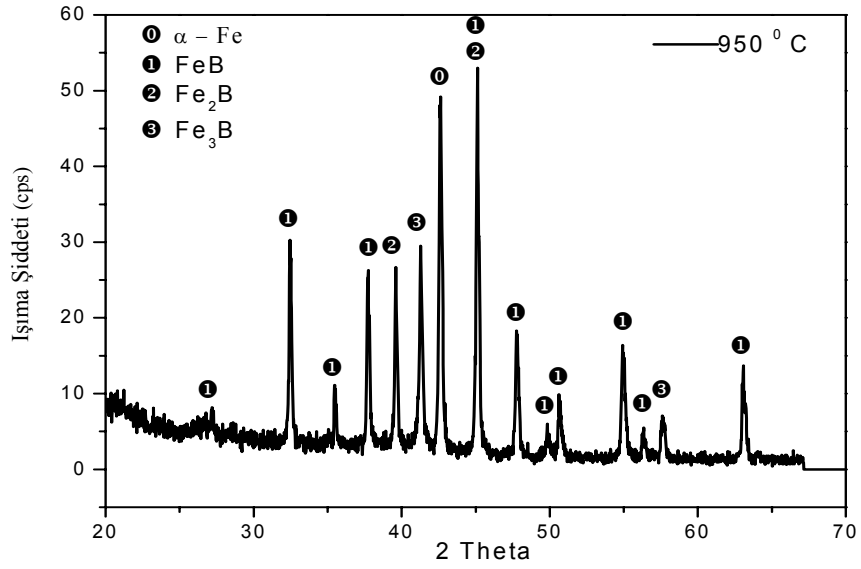


Şekil 8.37. 850 °C’de 6 saat borlanmış Hardox 400 çelik numunenin x-ışını analizi.

Şekil 8.37’de görüldüğü gibi yüzeyde α -Fe, FeB, Fe₂B fazlarının yanında Fe₃B fazına da rastlanmıştır.

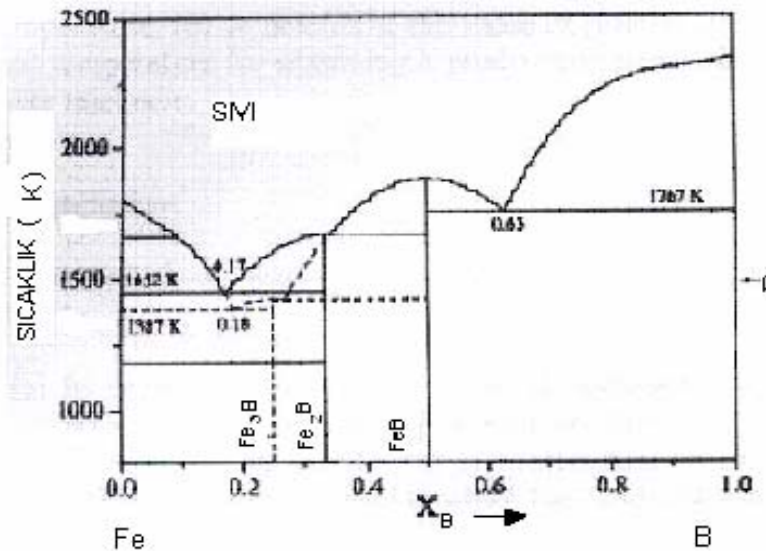


Şekil 8.38. 900 °C’de 6 saat borlanmış Hardox 400 çelik numunenin x-ışını analizi.



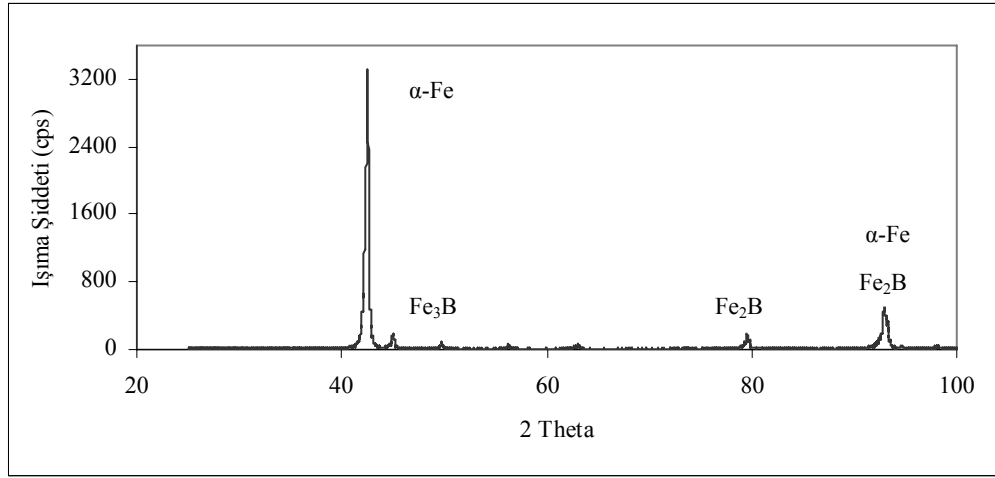
Şekil 8.39. 950 °C’de 6 saat borlanmış Hardox 400 çelik numunenin x-ışını analizi

X-Işını kırınım analizleri (Şekil 8.37-8.39) sonucunda da görüldüğü gibi, borür tabakasında FeB, Fe₂B ve Fe₃B türünde borürler oluşmuştur. Bazı araştırmacılar da yapmış oldukları çalışmanın sonucunda Fe₃B fazına rastlamışlardır. Selçuk ve arkadaşları, 5155 çeliğini 930°C ve 950 °C’de borlamışlar ve x-ışını kırınım analizlerinde Fe₃B fazına rastlamışlardır [151]. İpek ve arkadaşları, gri demirler üzerindeki borlama çalışmalarında Fe₃B fazına rastladıklarını belirtmişlerdir [16,155]. Galvanetto ve arkadaşları, 1040 çeliğini borlamışlar ve yüzeyde FeB, Fe₂B ve α -Fe fazlarının yanında Fe₃B fazına da rastlamışlardır [152]. Uslu ve arkadaşları, AISI P20 çeliğini borlamışlar ve yüzeyde FeB, Fe₂B fazlarının yanında Fe₃B fazına da rastlamışlardır. Demir-Bor denge diyagramında (Şekil 8.40) bu durumu önce Fe₃B fazının oluştuğu, daha sonra Fe₂B fazının ve en son olarak FeB fazının oluştuğunu göstermişlerdir [147].



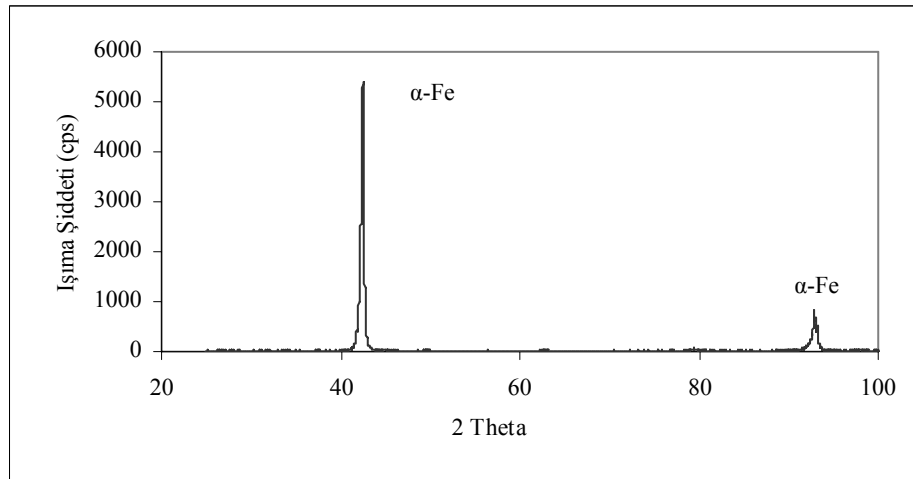
Şekil 8.40. Demir-Bor denge diyagramı [147].

Aşağıda, 950 °C sıcaklıkta 6 saat borlanmış Hardox 400 ile AISI 8620 çelik numunelerinin, borlu yüzeyden itibaren 150 μ m ve 250 μ m aşındırıldıktan sonra, borür tabakasındaki mevcut fazların sonuçları verilmiştir.



Şekil 8.41. 950°C’de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin borlu yüzeyinin 150 μm aşındırıldıktan sonraki x-ışını analizi.

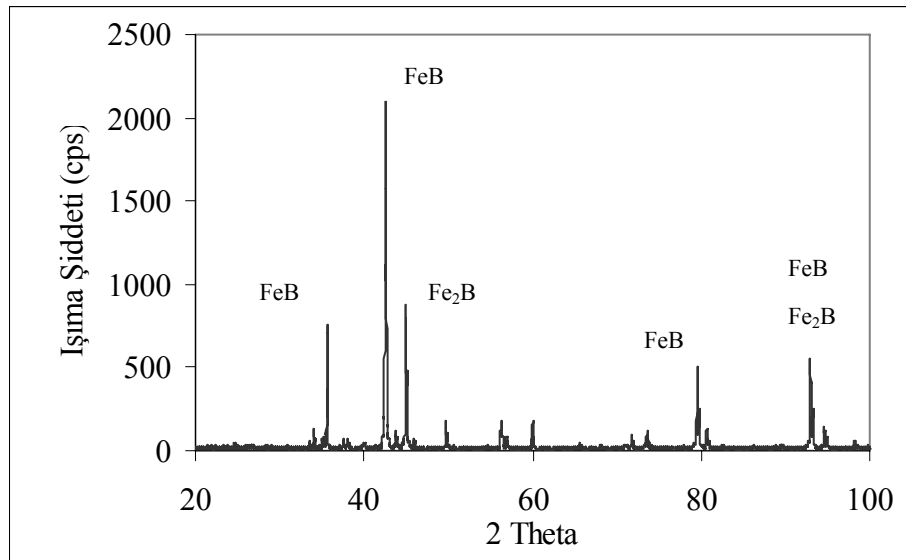
Şekil 8.41’deki 950°C’de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin borlu yüzeyinin 150 μm aşındırıldıktan sonraki x-ışını analizi incelendiğinde FeB fazının aşınma sonucunda çok az kaldığı anlaşılmaktadır. Kaplama yüzeyinden iç kısımlara doğru gidildikçe Fe₂B fazının varlığı artmaktadır. Bu durum, yüzeyden belirli oranlarda tabakalar kaldırılarak yapılan x-ışınları analizleri ile ispatlanmaktadır [53].



Şekil 8.42. 950°C’de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin borlu yüzeyinin 250 μm aşındırıldıktan sonraki x-ışını analizi

Şekil 8.42'deki 950 °C'de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin borlu yüzeyinin 250 μm aşındırıldıktan sonraki x-ışını analizinde, $\alpha\text{-Fe}$ dışında hiçbir faza rastlanmamıştır. Bu da yüzeydeki fazların aşınma neticesinde çok az kaldığının ve ana malzeme matrisinin ortaya çıktığının bir göstergesidir. E.Galvanetto ve arkadaşları, 1040 çeliğine VPS tekniği ile borlamışlar yüzeyde oluşan FeB fazını 35 μm kadar aşındırdıktan sonra FeB, Fe_3B ve $\alpha\text{-Fe}$ fazlarına rastlamışlardır [152].

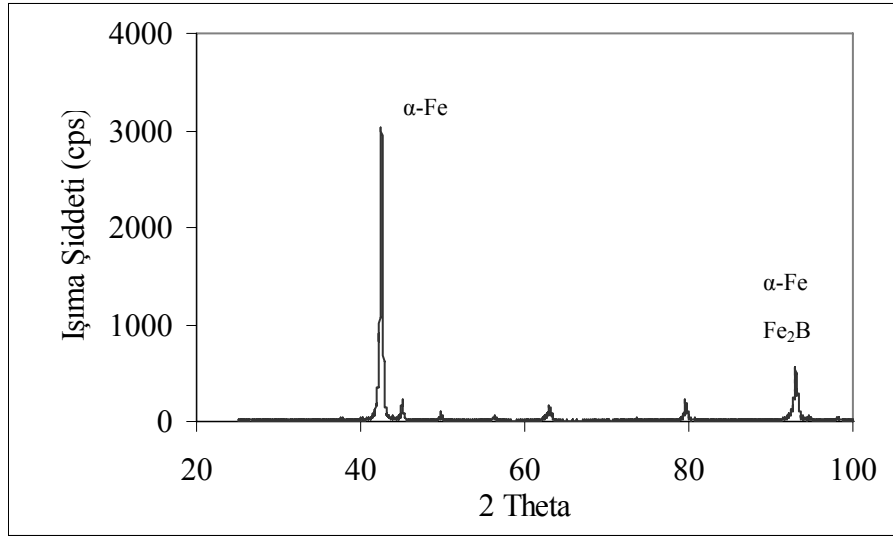
Aşağıda Şekil 8.43'de 950 °C sıcaklıkta 6 saat borlanmış AISI 8620 çelik numunenin borlu yüzeyinin x-ışını analizi verilmiştir.



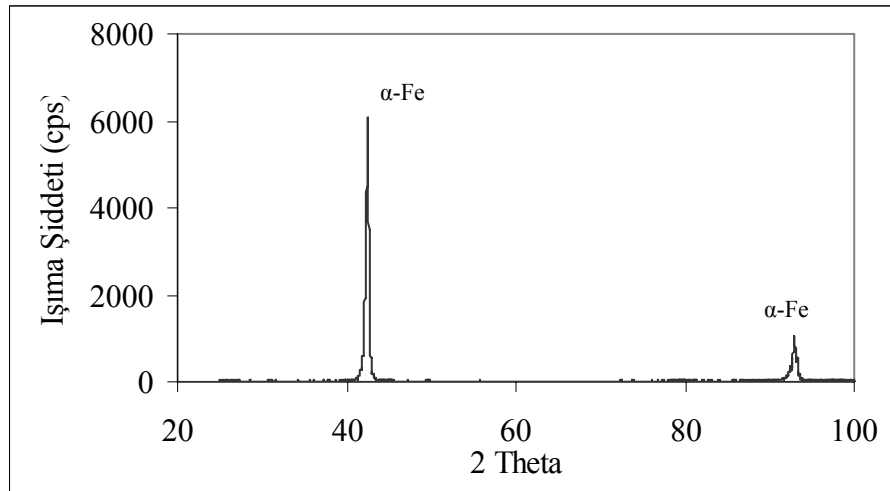
Şekil 8.43. 950 °C'de 6 saat borlanmış AISI 8620 çelik numunenin x-ışını analizi

Şekil 8.43'de 950 °C'de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin borlu yüzeyinin x-ışını kırınım analizi grafikleri incelendiğinde yüzeylerde borür tabakası olarak FeB ve Fe_2B fazlarının olduğu görülmektedir. Benzer çalışma yapan Çelebi ve arkadaşları [11] ile Uluköy'de [68], AISI 8620 çeliğini borlamışlar ve borlanmış çeliğin yüzeyinde FeB ve Fe_2B fazlarına rastlamışlardır.

Aşağıda Şekil 8.44 ve 45’de 950 °C sıcaklıkta 6 saat borlanmış AISI 8620 çelik numunelerinin borlu yüzeyden itibaren 150 μm ve 250 μm aşındırıldıktan sonra borür tabakasındaki mevcut fazların x-ışını analizleri verilmiştir.



Şekil 8.44. 950°C’de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin borlu yüzeyinin 150 μm aşındırıldıktan sonraki x-ışını analizi



Şekil 8.45. 950°C’de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin borlu yüzeyinin 250 μm aşındırıldıktan sonraki x-ışını analizi

Şekil 8.43’de 950°C’de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin borlu yüzeyinin x-ışını kırınım analizi grafikleri incelendiğinde yüzeylerde borür tabakası olarak FeB ve Fe₂B fazlarının olduğu görülmektedir. Şekil 8.48’de 950°C’de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin borlu yüzeyinin 150 µm aşındırıldıktan sonraki x-ışını analiz grafiği incelendiğinde yüzeyde α -Fe ve Fe₂B fazlarının olduğu tespit edilmiştir. FeB fazı aşınma sonucunda az kaldığından inceleme sonucunda görülmemiştir. Şekil 8.45’de 950°C’de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin borlu yüzeyinin 250 µm aşındırıldıktan sonraki x-ışını analiz grafiği incelendiğinde yüzeyde α -Fe dışında hiçbir faza rastlanmamıştır. Bu da yüzeydeki fazların aşınma neticesinde çok az kaldığının ve ana malzeme matrisinin ortaya çıktığının bir göstergesidir.

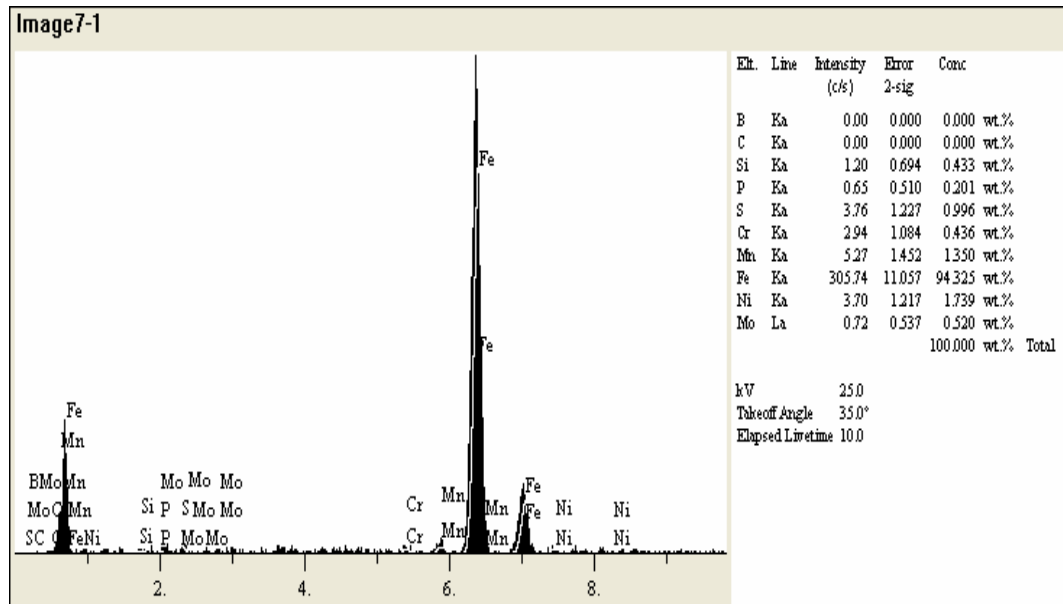
8.5. EDS Analizi İncelemeleri

850 °C’de 2 saat ve 950 °C’de 6 saat borlanmış AISI 8620 ile Hardox 400 çelik numunelerin yüzeylerinin EDS spektrum analizleri Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Malzeme ve Metalurji Bölümü laboratuvarları’nda JEOL JSM-6060 LV markalı tarama elektron mikroskobuna bağlı cihazla yapılmıştır. Alaşım elementlerinin dağılımı borlama katmanından itibaren EDS spektrumu ile belirlenmiştir. Yapılan her bir noktanın element dağılım değerleri grafiklerin yanında görülmektedir.

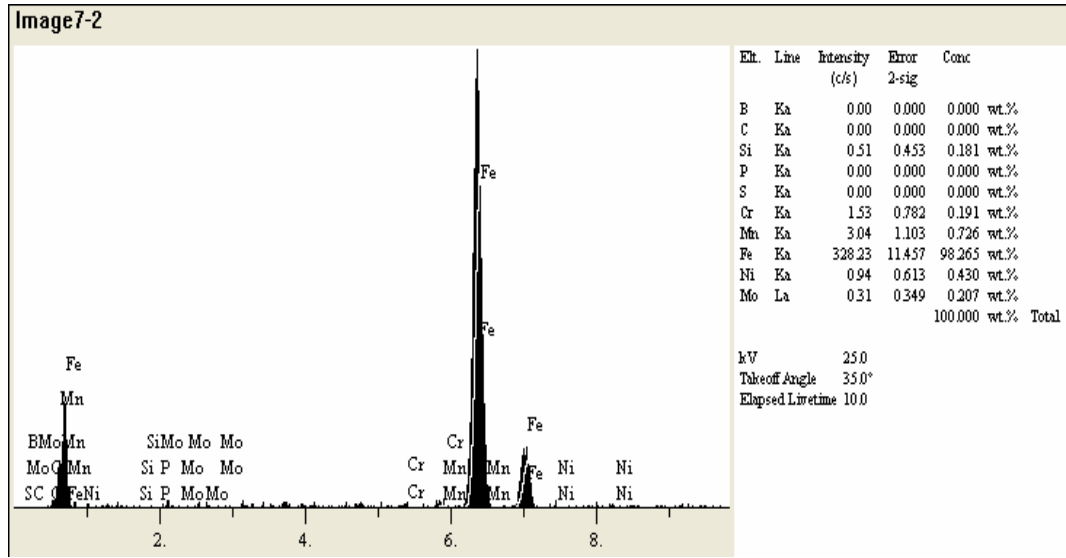
Resim 8.1 850 °C’ de 2 saat borlanmış ve Resim 8.2 950 °C’ de 6 saat borlanmış Hardox 400 çelik numunenin EDS spektro analizi görülmektedir. Şekil 8.46’dan 8.49’a kadar 850 °C’ de 2 saat borlanmış Hardox 400 çelik numunenin her bir noktasının element dağılım değerleri, Şekil 8.50’den 8.53’e kadar 950 °C’ de 6 saat borlanmış Hardox 400 çelik numunenin her bir noktasının element dağılım değerleri verilmiştir.



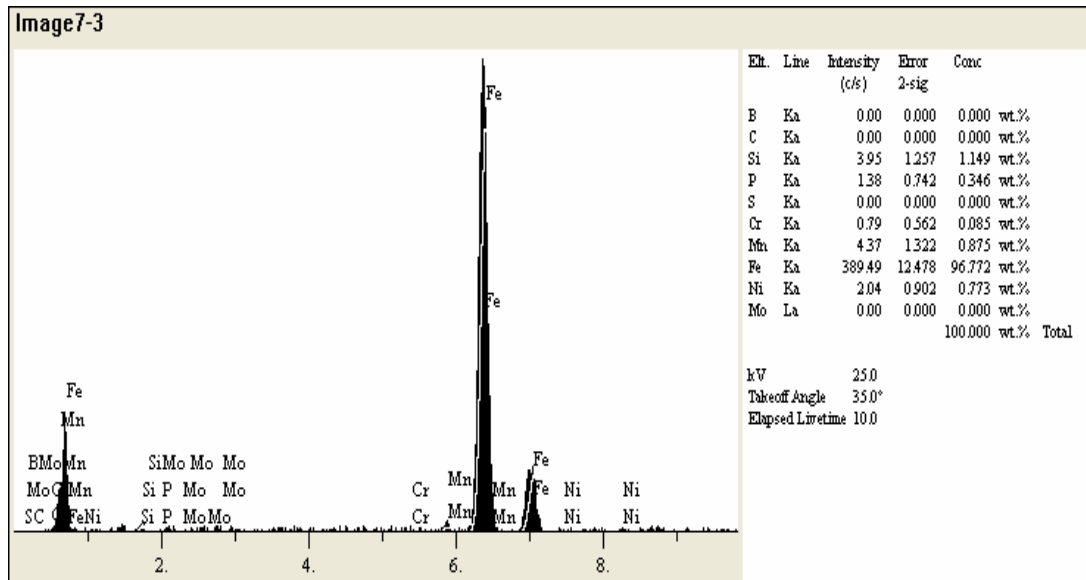
Resim 8.1. 850 °C’ de 2 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin mikroyapısının EDS yapılmış noktaların x250 büyütmede SEM görüntüsü.



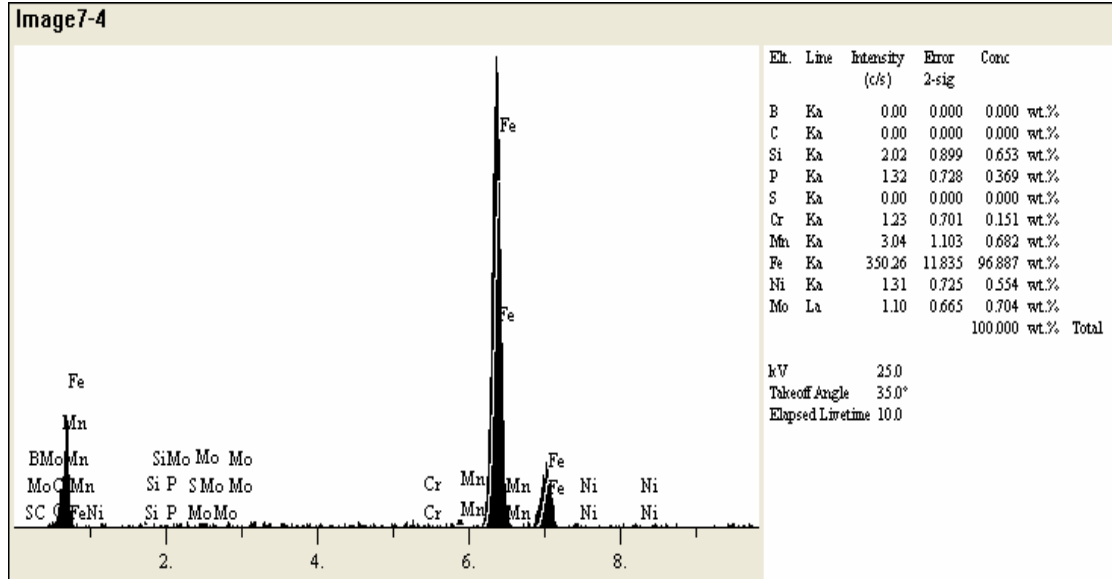
Şekil 8.46. 850 °C’ de 2 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin mikroyapısının EDS yapılmış 1. noktanın analizi.



Şekil 8.47. 850 °C’ de 2 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin mikroyapısının EDS yapılmış 2. noktanın analizi.



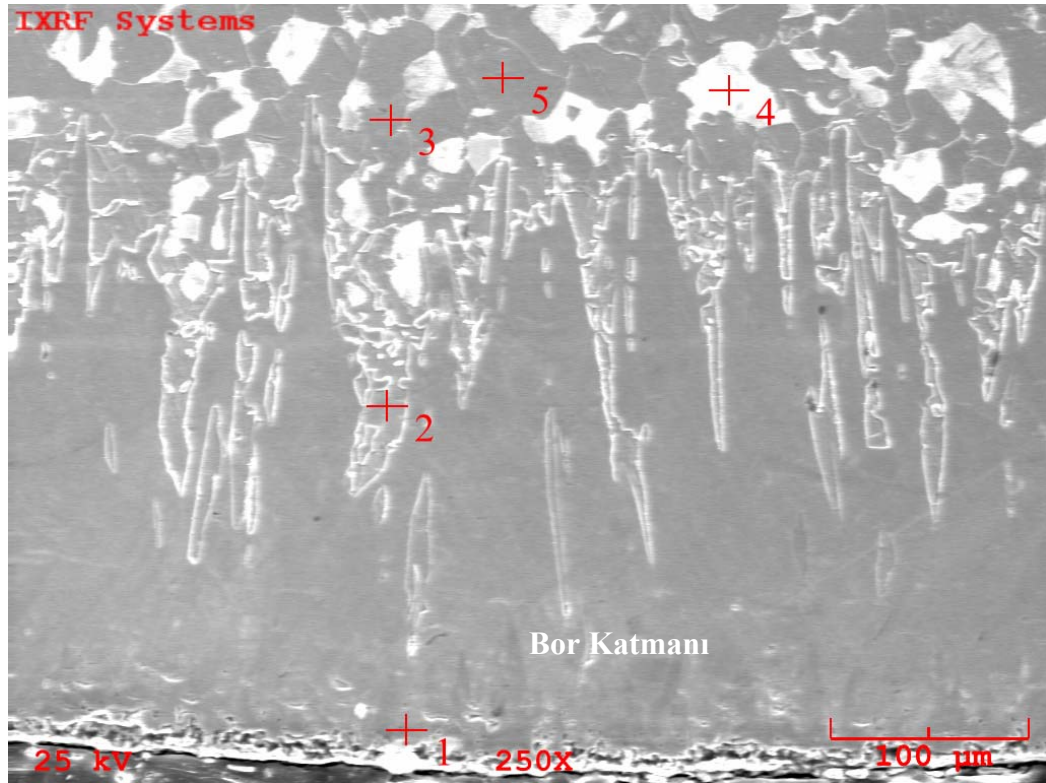
Şekil 8.48. 850 °C’ de 2 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin mikroyapısının EDS yapılmış 3. noktanın analizi.



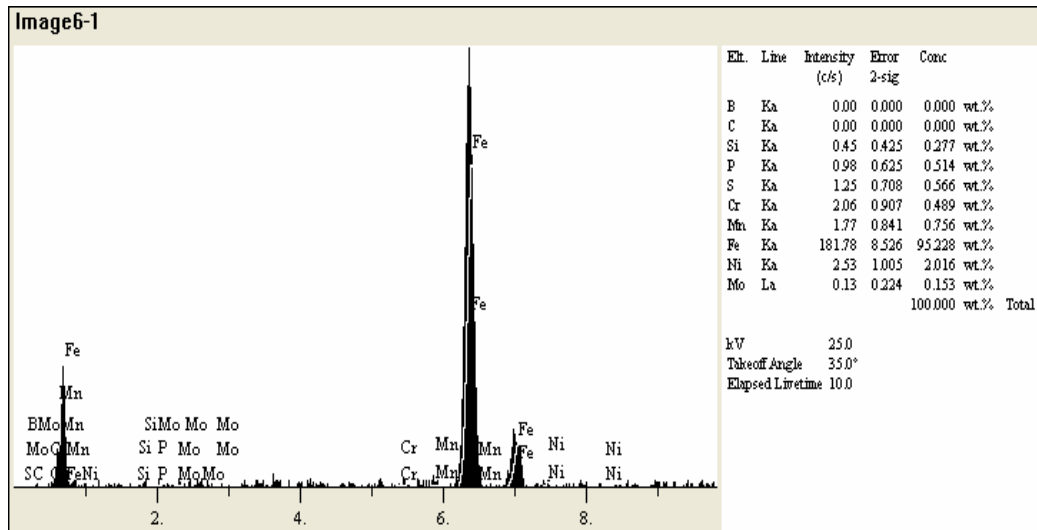
Şekil 8.49. 850 °C’ de 2 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin mikroyapısının EDS yapılmış 4. noktanın analizi.

Resim 8.1’de 850 °C’ de 2 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin EDS analizleri Şekil 8.46’den Şekil 8.49’a kadar incelendiğinde, genel olarak belirgin bir farklılığın olmadığı söylenebilir. Yapılan EDS spektromu analizleri sonucunda, bor elementine rastlanılamamasının nedeni, bor elementinin atom çapının küçük olmasıdır.

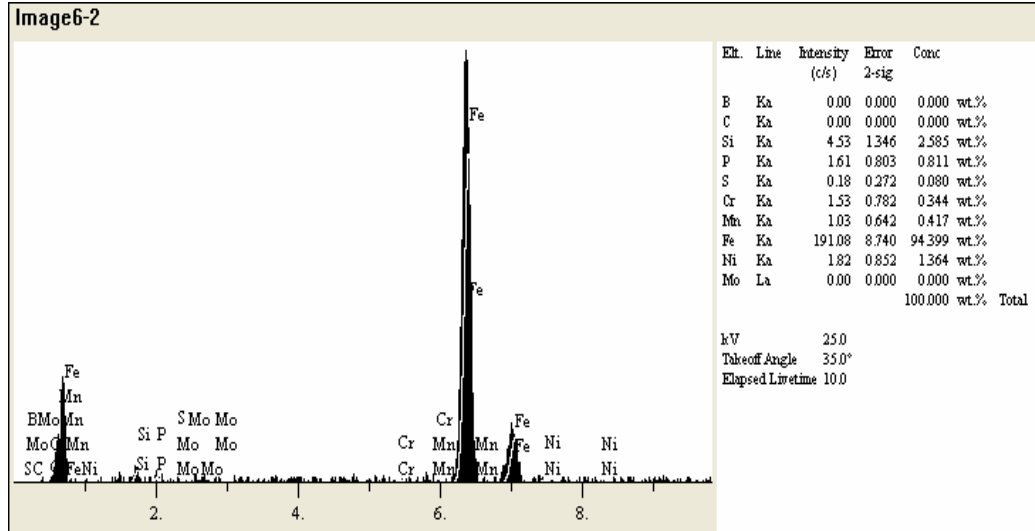
Aşağıda Resim 8.2’de 950 °C’ de 6 saat borlanmış Hardox 400 çelik numunenin EDS spektro analizi görülmektedir. Şekil 8.50’den 8.53’e kadar 950 °C’ de 6 saat borlanmış Hardox 400 çelik numunenin her bir noktasının element dağılım değerleri verilmiştir.



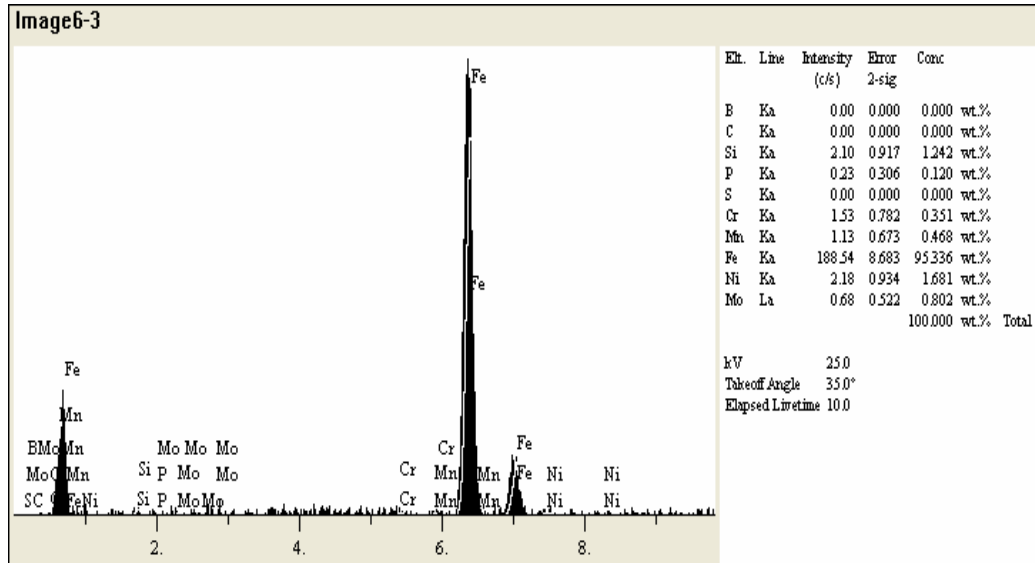
Resim 8.2. 950 °C’ de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin mikroyapısının EDS yapılmış noktaların x250 büyütmede SEM görüntüsü.



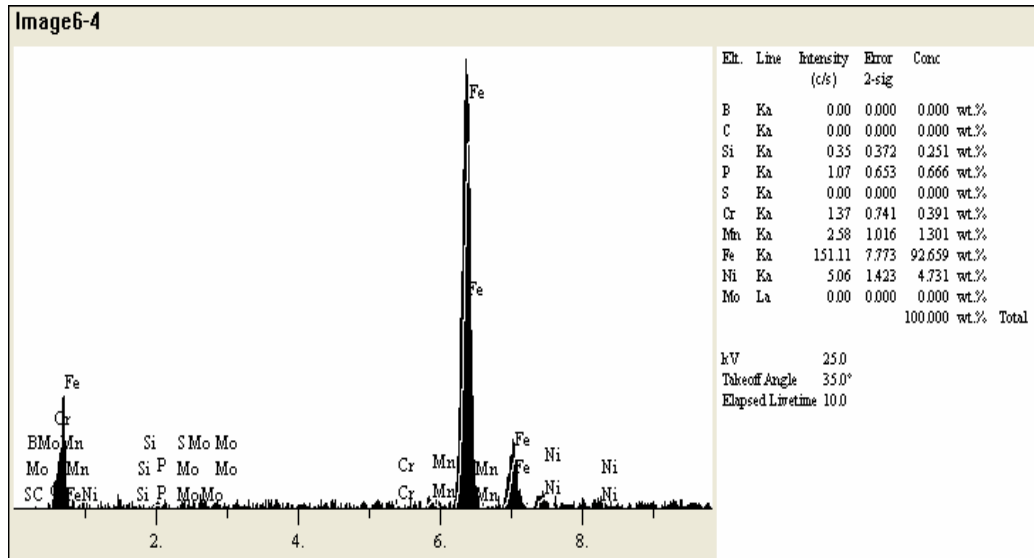
Şekil 8.50. 950 °C’ de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin mikroyapısının EDS yapılmış 1. noktanın analizi.



Şekil 8.51. 950 °C’ de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin mikroyapısının EDS yapılmış 2. noktanın analizi.



Şekil 8.52. 950 °C’ de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin mikroyapısının EDS yapılmış 3. noktanın analizi.

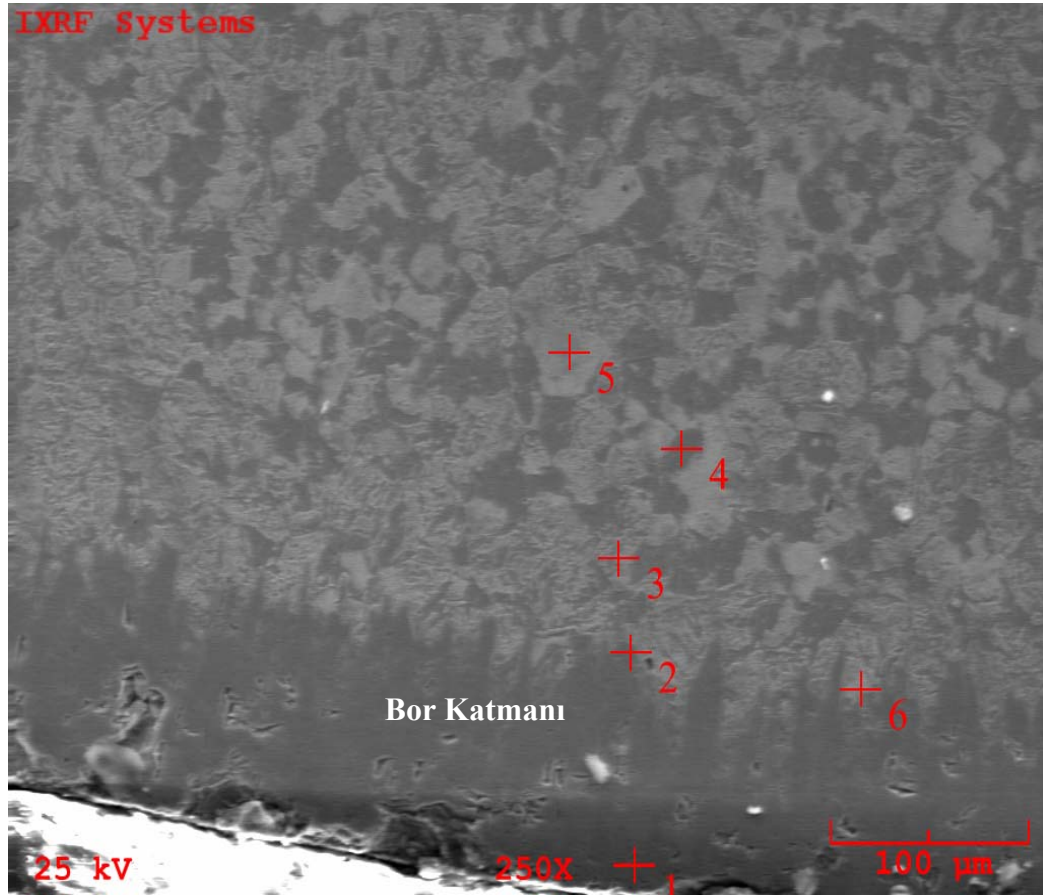


Şekil 8.53. 950 °C’ de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin mikroyapısının EDS yapılmış 4. noktanın analizi.

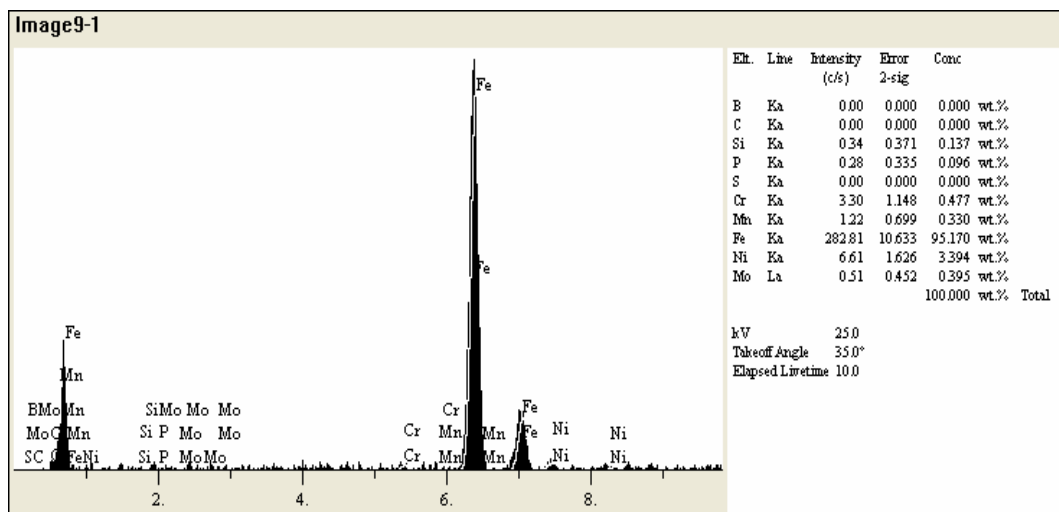
Resim 8.2’de 950 °C’ de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin EDS analizleri Şekil 8.50’den Şekil 8.53’e kadar incelendiğinde, genel olarak belirgin bir farklılığın olmadığı söylenebilir.

Resim 8.1’de 850 °C’ de 2 saat borlanmış ve Resim 8.2’de 950 °C’ de 6 saat borlanmış Hardox 400 çelik numunelerinin EDS spektro analizleri incelendiğinde Şekil 8.42’den 8.49’a kadar, EDS spektrumu analizindeki her bir noktadaki elementlerin dağılımının belirgin bir farklılık göstermediği görülmektedir.

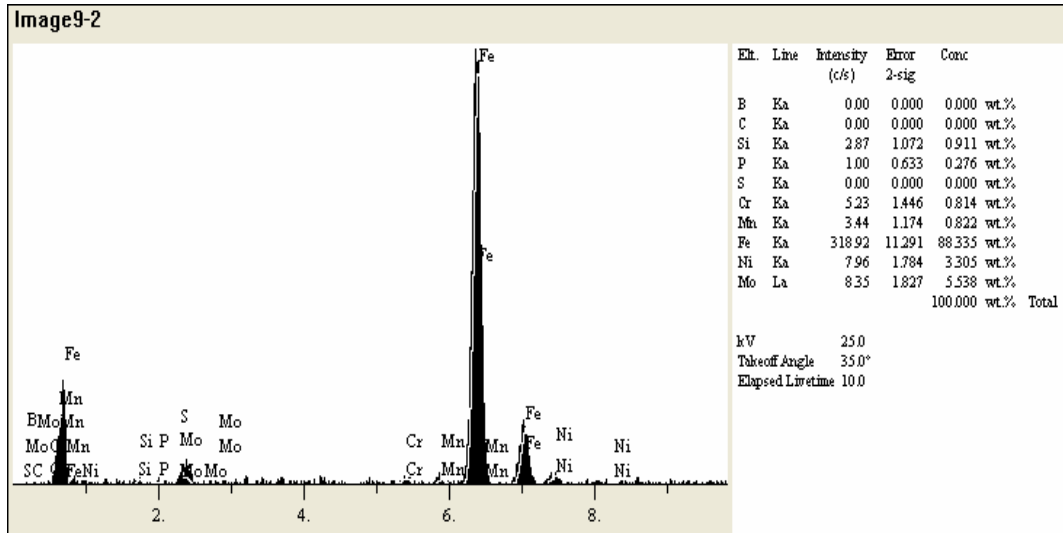
Resim 8.3, 850 °C’ de 2 saat borlanmış ve Resim 8.4, 950 °C’ de 6 saat borlanmış AISI 8620 çelik numunenin EDS spektro analizini görülmektedir. Şekil 8.54’den 8.59’a kadar 850 °C’ de 2 saat borlanmış AISI 8620 çelik numunenin her bir noktasının element dağılım değerleri, Şekil 8.60’tan 8.65’e kadar 950 °C’ de 6 saat borlanmış AISI 8620 çelik numunenin her bir noktasının element dağılım değerleri verilmiştir.



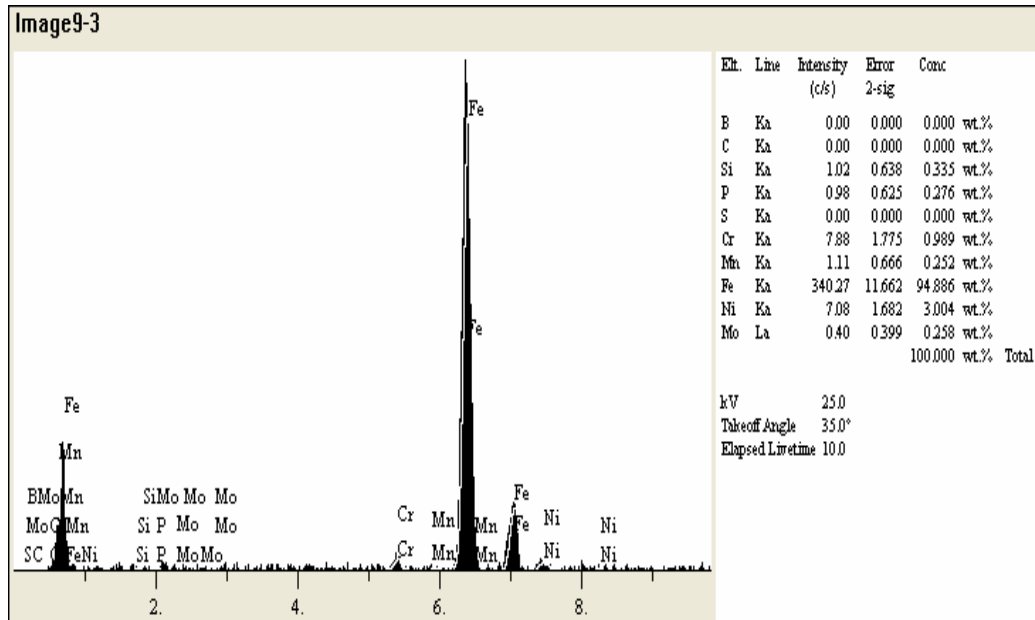
Resim 8.3. 850 °C’ de 2 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin mikroyapısının EDS yapılmış noktaların x250 büyütmede SEM görüntüsü.



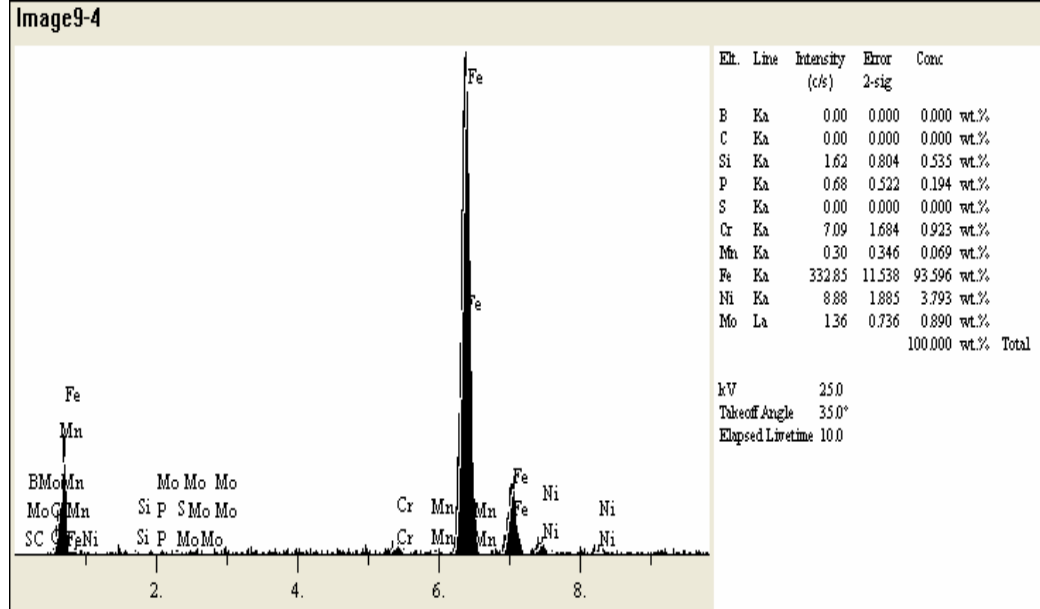
Şekil 8.54. 850 °C’ de 2 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin mikroyapısının EDS yapılmış 1. noktanın analizi.



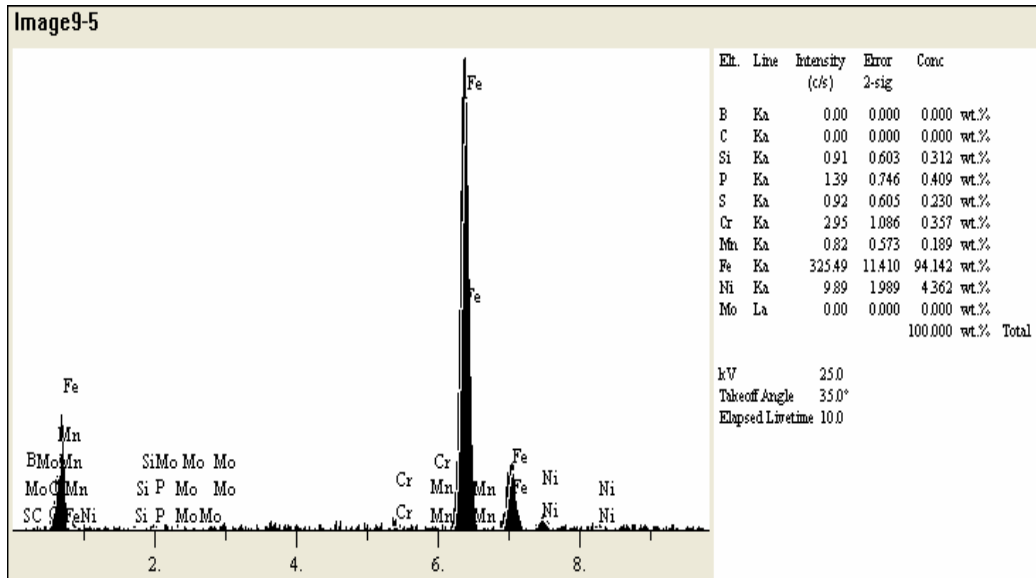
Şekil 8.55. 850 °C’ de 2 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin mikroyapısının EDS yapılmış 2. noktanın analizi.



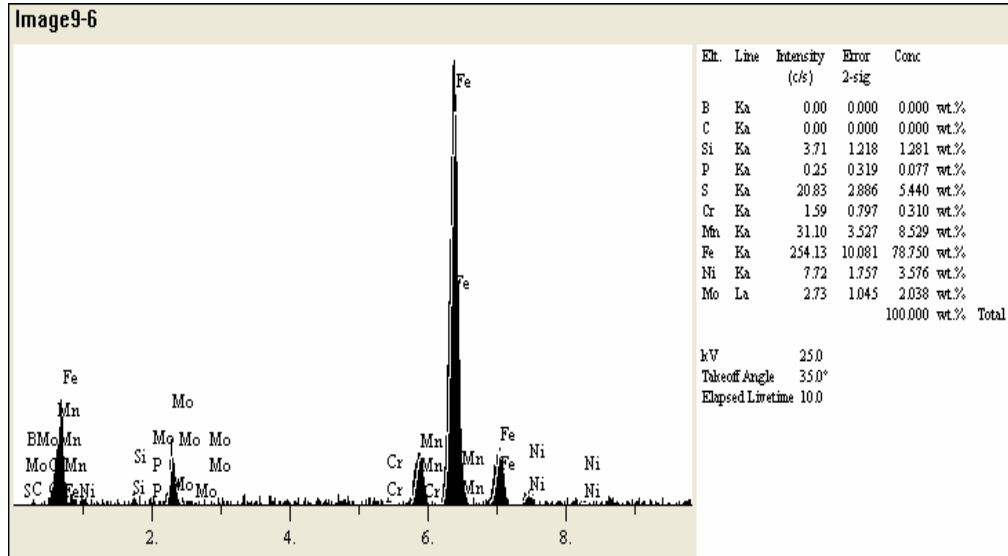
Şekil 8.56. 850 °C’ de 2 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin mikroyapısının EDS yapılmış 3. noktanın analizi.



Şekil 8.57. 850 °C’ de 2 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin mikroyapısının EDS yapılmış 4. noktanın analizi.



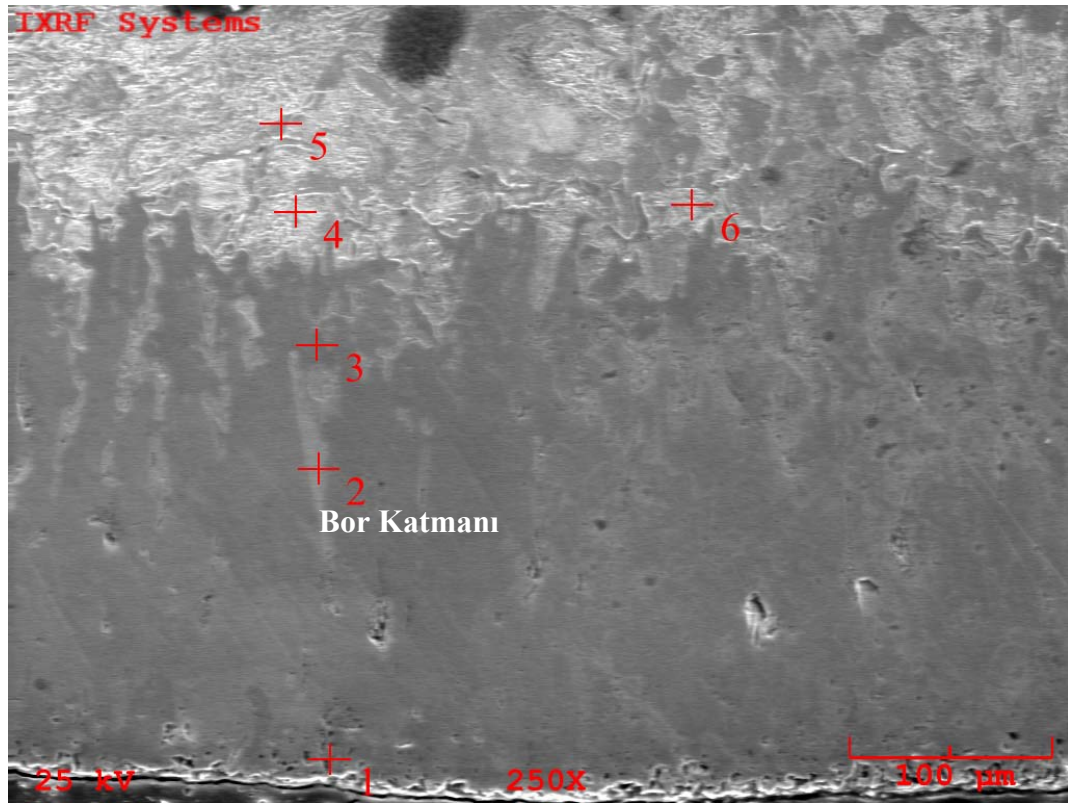
Şekil 8.58. 850 °C’ de 2 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin mikroyapısının EDS yapılmış 5. noktanın analizi.



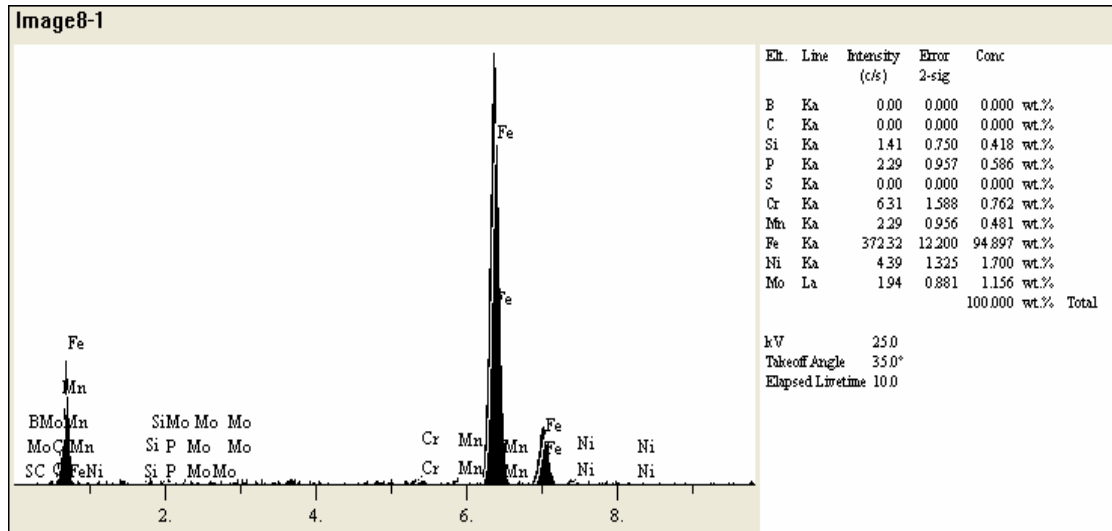
Şekil 8.59. 850 °C’ de 2 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin mikroyapısının EDS yapılmış 6. noktanın analizi.

Resim 8.3’deki 850 °C’ de 2 saat borlanmış AISI 8620 çelik numunenin EDS spektro analizi Şekil 8.54’den Şekil 8.59’a kadar incelendiğinde, genel olarak belirgin bir farklılığın olmadığı söylenebilir. Yapılan EDS spektrumu analizleri sonucunda, bor elementine rastlanılamamasının nedeni, bor elementinin atom çapının küçük olmasıdır.

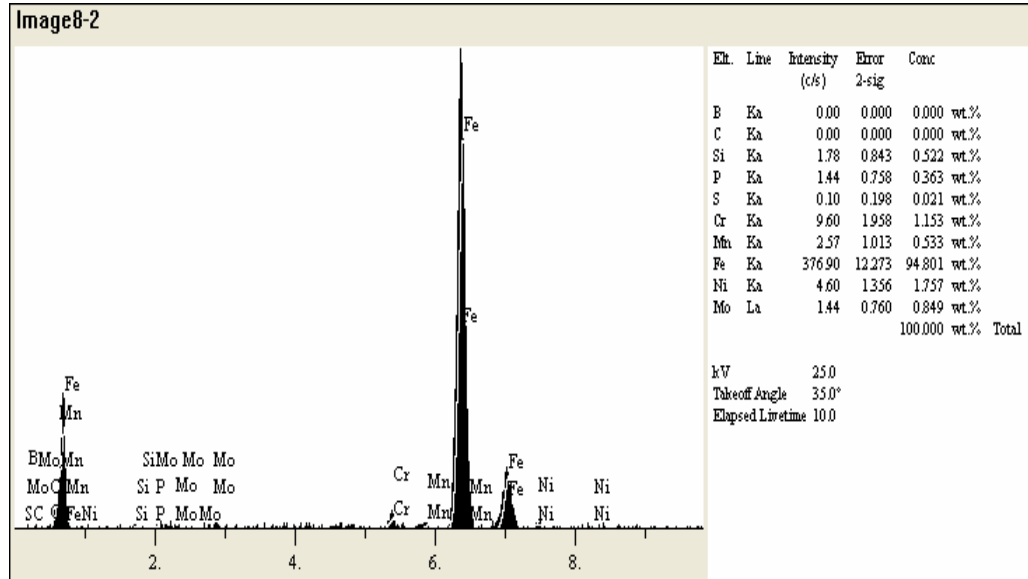
Aşağıda Resim 8.4’te 950 °C’ de 6 saat borlanmış AISI 8620 çelik numunenin EDS spektro analizini görülmektedir. Şekil 8.60’tan 8.65’e kadar 950 °C’ de 6 saat borlanmış AISI 8620 çelik numunenin her bir noktasının element dağılım değerleri verilmiştir.



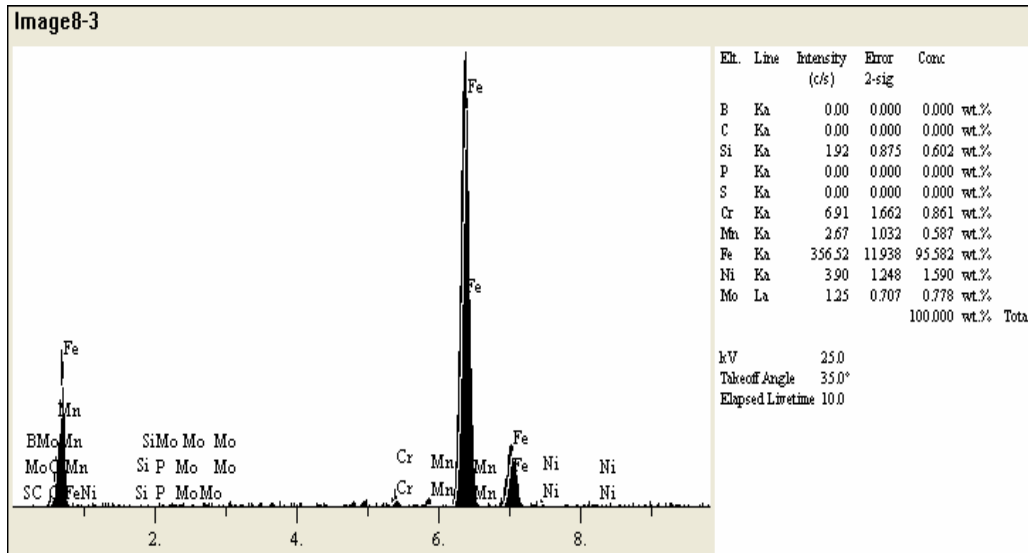
Resim 8.4. 950 °C’ de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin mikroyapısının EDS yapılmış noktaların x250 büyütmede SEM görüntüsü.



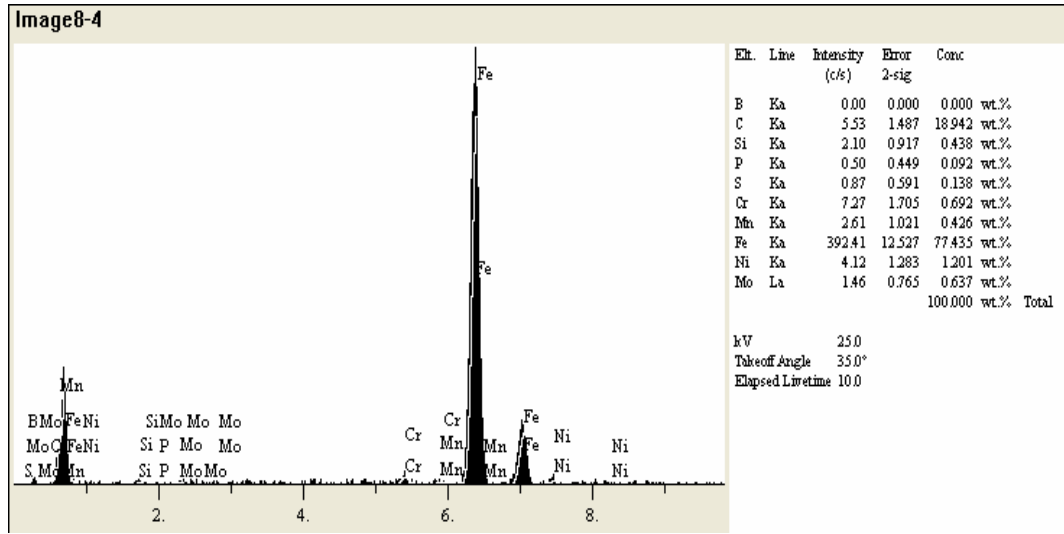
Şekil 8.60. 950 °C’ de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin mikroyapısının EDS yapılmış 1. noktanın analizi.



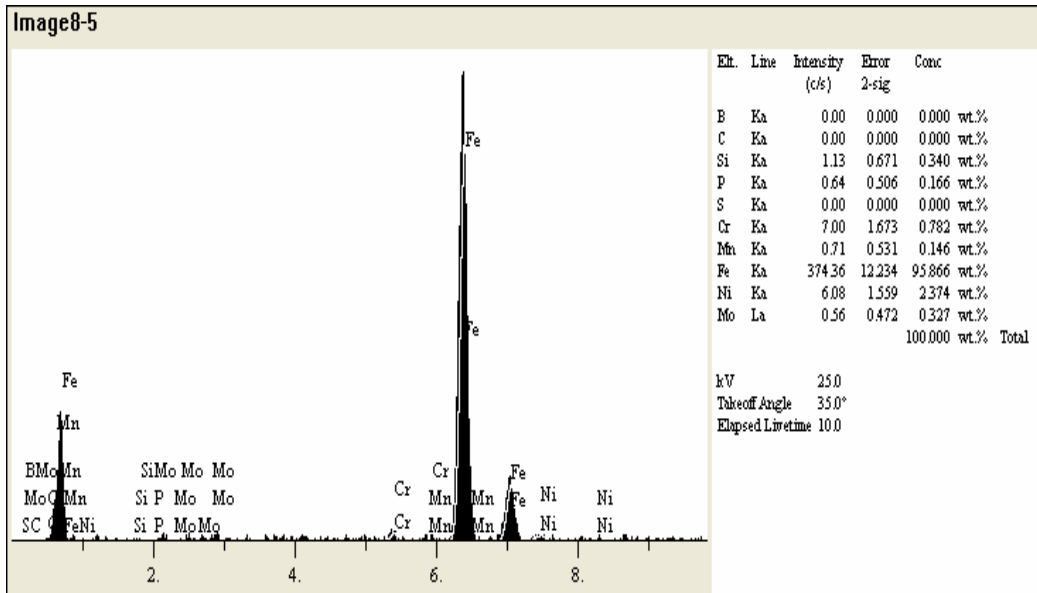
Şekil 8.61. 950 °C’ de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin mikroyapısının EDS yapılmış 2. noktanın analizi.



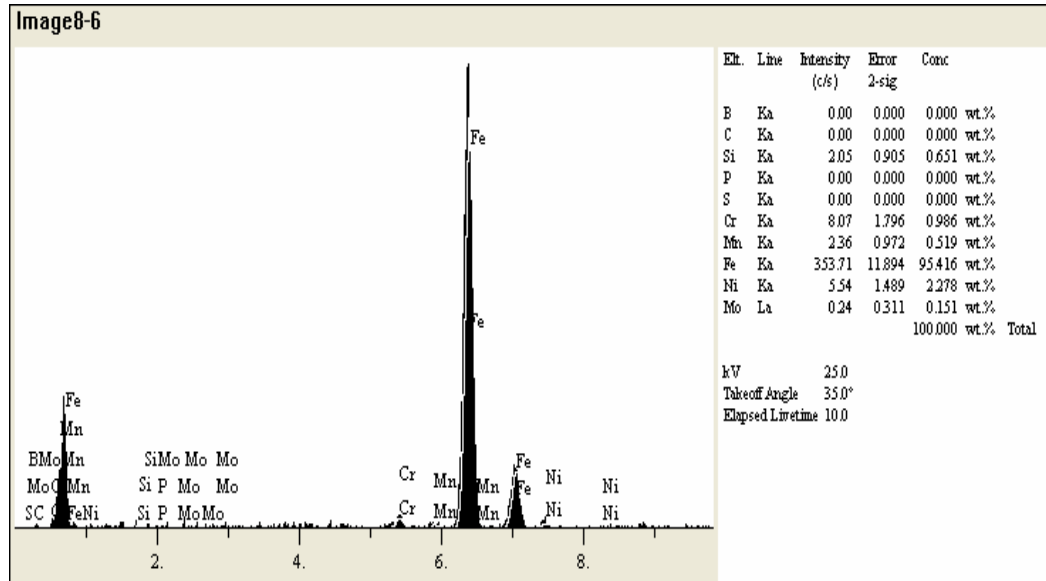
Şekil 8.62. 950 °C’ de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin mikroyapısının EDS yapılmış 3. noktanın analizi.



Şekil 8.63. 950 °C’ de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin mikroyapısının EDS yapılmış 4. noktanın analizi.



Şekil 8.64. 950 °C’ de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin mikroyapısının EDS yapılmış 5. noktanın analizi.



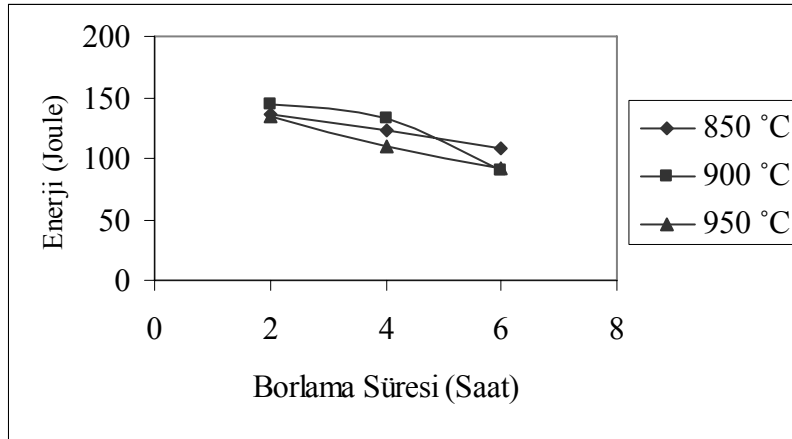
Şekil 8.65. 950 °C’ de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin mikroyapısının EDS yapılmış 6. noktanın analizi.

Resim 8.4’te 950 °C’ de 6 saat borlanmış AISI 8620 çelik numunelerinin EDS spektro analizleri incelendiğinde Şekil 8.60’tan 8.65’e kadar, EDS spektrumu analizindeki her bir noktadaki elementlerin dağılımının belirgin bir farklılık göstermediği söylenebilir.

8.6. Çentik Darbe Deneyi İncelemesi

Çentik darbe deneyleri G.Ü Teknik Eğitim Fakültesi, Metalurji Eğitimi Bölümü Malzeme laboratuvarlarında normal oda sıcaklığında yapılmıştır (Şekil 7.2.a-b). Deneyler Instron Wolpet PW30 Çentik Darbe Cihazı ile gerçekleştirilmiştir. 850 °C, 900 °C, 950 °C’de 2, 4 ve 6 saat sürelerde borlanmış numunelerin her birinden üçer tane hazırlanmıştır. Bu üç numunenin ortalama değerleri alınarak darbe deneyi grafiği elde edilmiştir.

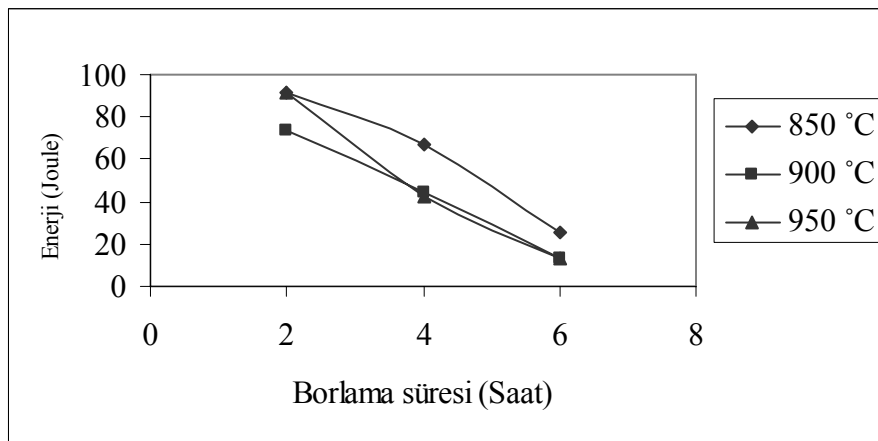
Şekil 8.66’da farklı süre ve sıcaklıklarda borlanmış Hardox 400 çelik numunelerin çentik darbe deneyinin sonuçları grafik olarak verilmiştir.



Şekil 8.66. Farklı süre ve sıcaklıkta borlanmış Hardox 400 çelik numunelerin çentik darbe deneyi sonuçlarının gösterilmesi.

İşlemsiz Hardox 400'ün darbe direnci 149,5 Joule olarak bulunmuştur. Şekil 8.66'da de görüldüğü gibi her bir işlem süresi için 950 °C sıcaklıkta borlanan Hardox 400 çelik numunenin kırılma dayanımının, 850 °C sıcaklıkta borlanan Hardox 400 çelik numunenin kırılma dayanımından düşük olduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 8.67'de farklı süre ve sıcaklıklarda borlanmış AISI 8620 çelik numunelerin çentik darbe deneyinin sonuçları grafik olarak verilmiştir.



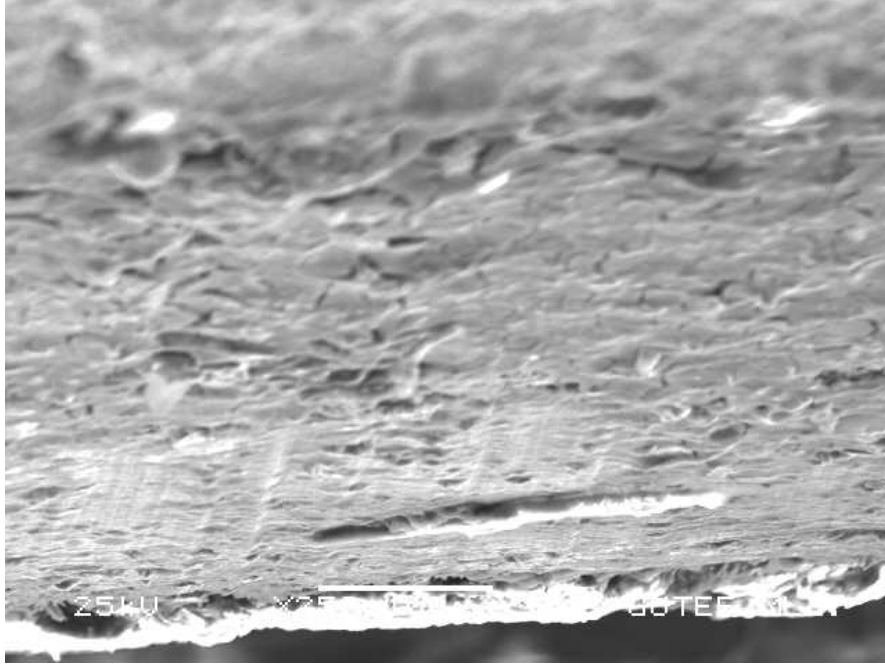
Şekil 8.67. Farklı süre ve sıcaklıkta borlanmış AISI 8620 çelik numunelerin çentik darbe deneyi sonuçlarının gösterilmesi.

Borlanmamış AISI 8620 çeliğinin darbe direnci 39 Joule olarak bulunmuştur. Şekil 8.67’de de görüldüğü gibi her bir işlem süresi için 950 °C sıcaklıkta borlanan AISI 8620 çelik numunenin kırılma dayanımının, 850 °C sıcaklıkta borlanan AISI 8620 çelik numunenin kırılma dayanımından düşük olduğu gözlemlenmiştir.

Borlamanın en büyük etkisi sertlik üzerine olup, ana malzeme cinsine ve yüzeyde oluşacak FeB ve Fe₂B fazlarına bağlıdır. FeB fazı, Fe₂B fazından daha sert ve gevrek [12,16,156]. Borlama sıcaklığı ve süresine bağlı olarak, kırılma tokluğu değerlerinin düşmesi muhtemelen daha gevrek karaktere sahip olan FeB fazının oluşumunun artması ve FeB- Fe₂B ara yüzeyinde her iki fazın farklı özelliklere sahip olmasından kaynaklanmaktadır [53].

Her iki çelik de kırılma dayanımı açısından karşılaştırıldığında, borlanan Hardox 400 çelik numunenin kırılma dayanımının, borlanan AISI 8620 çelik numunenin kırılma dayanımından, çok daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Her iki çelikte de daha uzun süreli borlamanın daha düşük kırılma direncine yol açtığı gözlemlenmiştir. Bunun, çelik ana malzeme üzerinde sert FeB fazı oluşmasının bir sonucu olduğunu iddia etmek mümkündür.

Aşağıdaki Şekil 8.68’den 8.79’ a kadar çentik darbe deneyinin sonunda kırılmış yüzeylerden alınmış SEM resimleri verilmiştir. Kırık yüzeylerin resimleri; Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Malzeme ve Metalurji Bölümü laboratuvarlarında, JEOL JSM-6060 LV marka taramalı elektron mikroskobu ile gerekli büyütmelemlerde görüntülenmişlerdir.



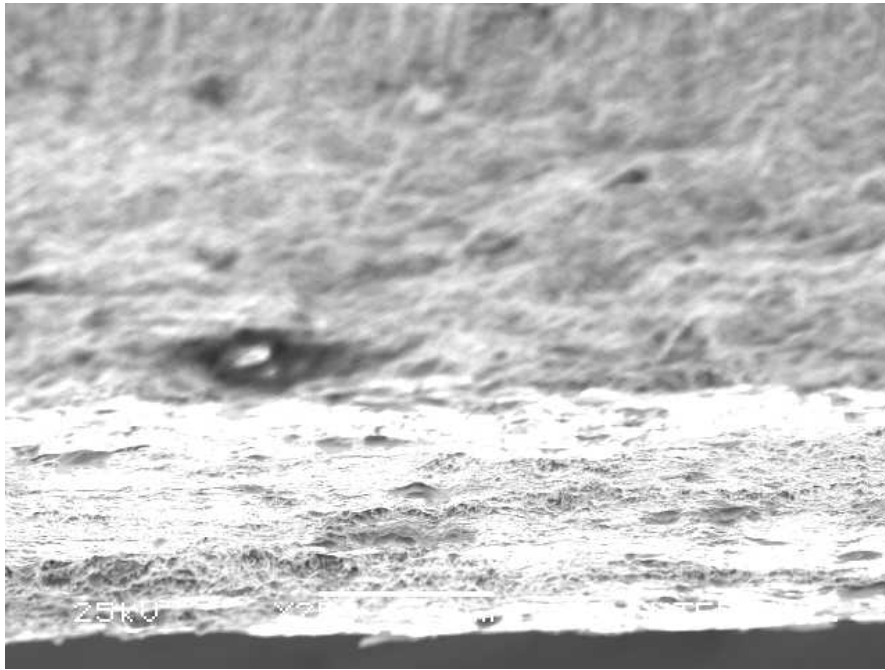
Şekil 8.68. 850 °C’ de 2 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin x250 büyütmeli kırık yüzeyden SEM görüntüsü.



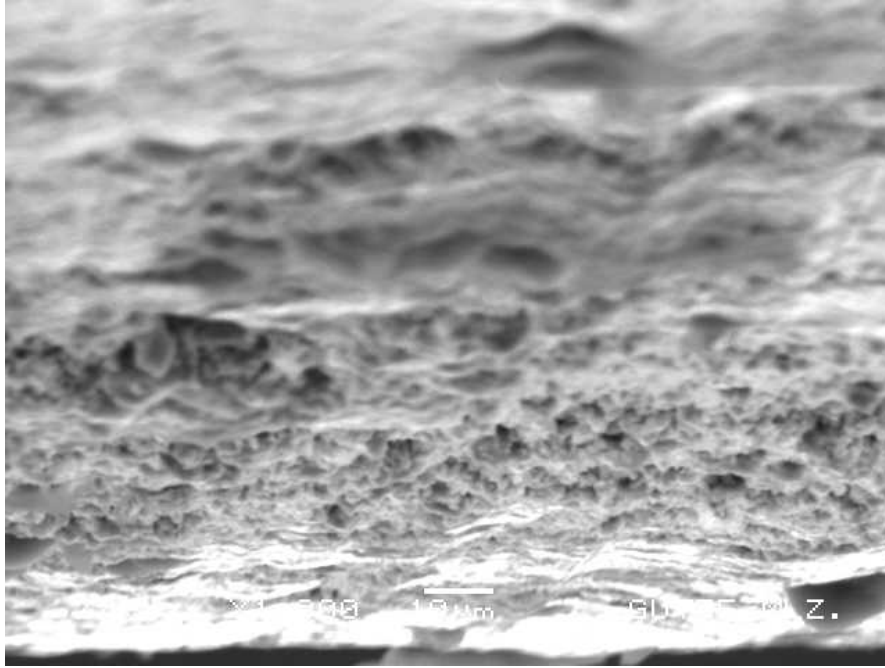
Şekil 8.69. 850 °C’ de 2 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin x1000 büyütmeli kırık yüzeyden SEM görüntüsü.

850 °C’ de 2 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin borlanmış kırık yüzeylerinin SEM fotoğrafları (Şekil 8.68 ve Şekil 8.69) incelendiğinde borlu kısmın gevrek kırılma, iç kısımların ise iyi bir plastik deformasyon kabiliyetine sahip, sünek bir kırılma yüzey görüntüsünün olduğu söylenebilir.

Aşağıda Şekil 8.70 ve 8.71’de 850 °C’ de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin SEM fotoğrafları verilmiştir.



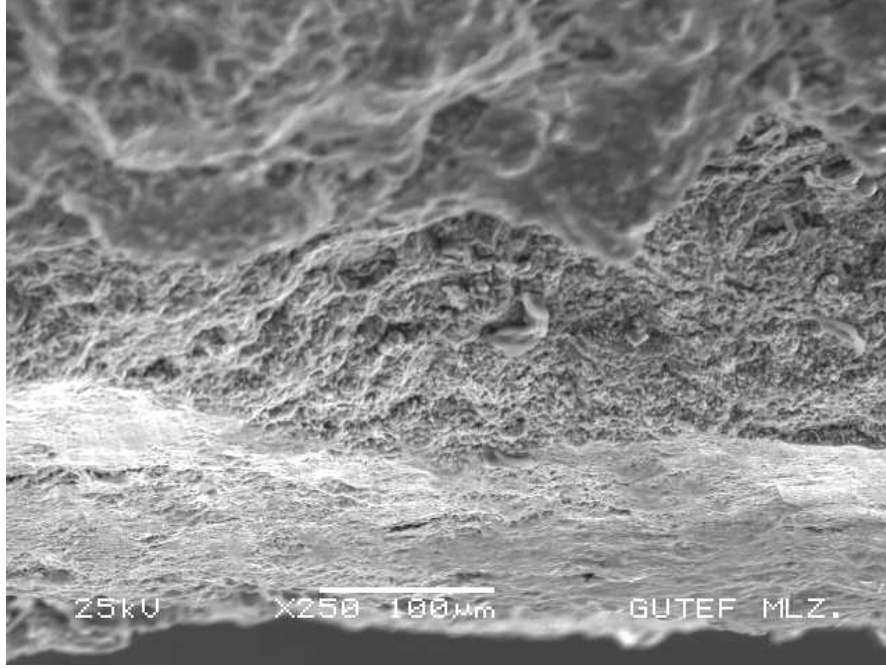
Şekil 8.70. 850 °C’ de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin x250 büyütme kırık yüzeyden SEM görüntüsü.



Şekil 8.71. 850 °C’ de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin x1000 büyütmeli kırık yüzeyden SEM görüntüsü.

850 °C’ de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin kırık yüzeylerinin SEM fotoğrafları (Şekil 8.70 ve Şekil 8.71) incelendiğinde, bor katmanının olduğu kenar kısmının gevrek kırılma, iç kısımlarda ise plastik deformasyon kabiliyetine sahip sünek bir kırılma yüzey görüntüsünün olduğu söylenebilir. Ancak 850 °C’ de 2 saat borlanmış Hardox 400 ile (Şekil 8.68 ve Şekil 8.69) karşılaştırıldığında biraz daha gevrek bir kırılmanın olduğunu söyleyebiliriz.

Aşağıda Şekil 8.72 ve 8.73’de 950 °C’ de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin SEM fotoğrafları verilmiştir.



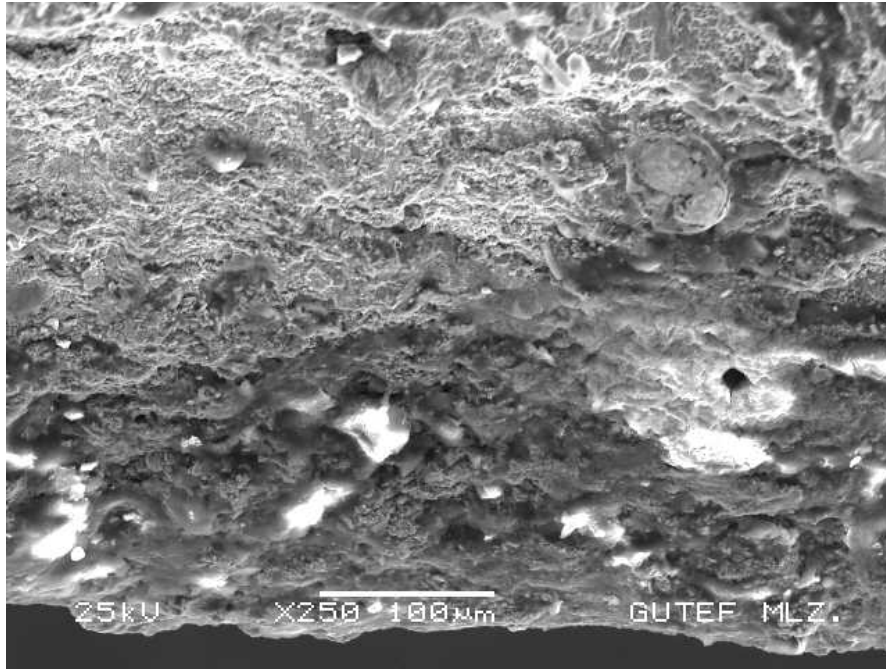
Şekil 8.72. 950 °C’ de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin x250 büyütmeli kırık yüzeyden SEM görüntüsü.



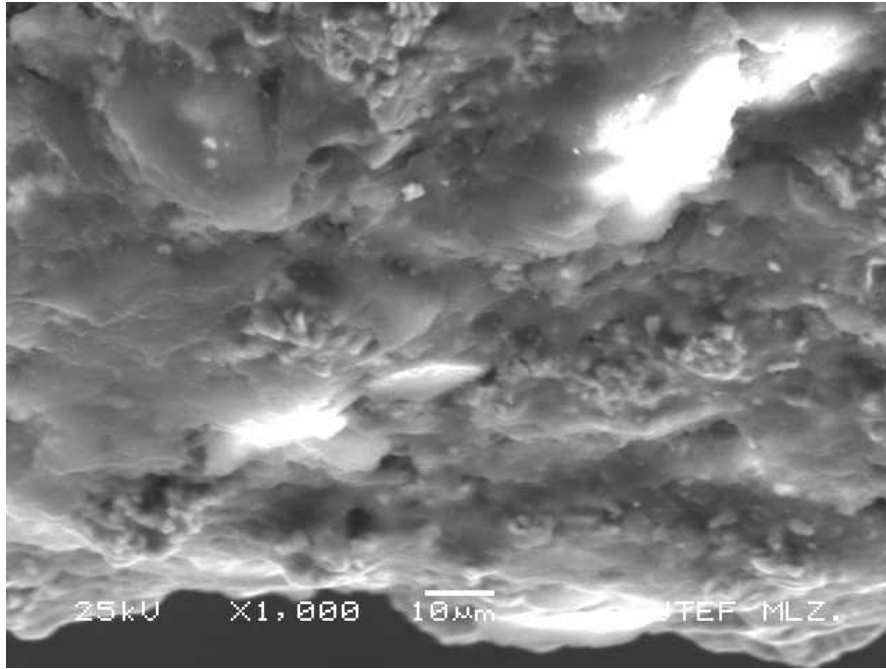
Şekil 8.73. 950 °C’ de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin x1000 büyütmeli kırık yüzeyden SEM görüntüsü.

Şekil 8.68'den 8.73' e kadar borlanmış Hardox 400 çeliğinin çentik darbe deneyinin sonunda kırılmış yüzeylerin SEM görüntüleri incelendiğinde, düşük sıcaklık ve sürelerde borlanmış çelik numunelerin (Şekil 8.68-8.69) iyi bir plastik deformasyon kabiliyetine sahip sünek kırılma yüzeyinin görüntüsü yer almaktadır. Sıcaklık ve sürenin artması ile birlikte (Şekil 8.72-8.73) kırılmaların gevrek kırılmaya benzer bir karakteristikte olduğu görülmektedir. Bu durum daha uzun süre borlama zamanında ve yüksek sıcaklıklarda, kırılğan ve gevrek bir yapıya sahip olan FeB fazının oluşması ile açıklanabilir (Bkz. Şekil 8.39). Ayrıca zamanın ve sürenin artmasına bağlı olarak malzemenin yapısındaki tane büyümelerinin de etkili olduğu söylenebilir (Bkz. Şekil 8.9-8.10).

Aşağıdaki Şekil 8.74'den 8.79' a kadar borlanmış AISI 8620 çeliğinin çentik darbe deneyinin sonunda kırılmış yüzeylerden alınmış SEM resimleri verilmiştir.



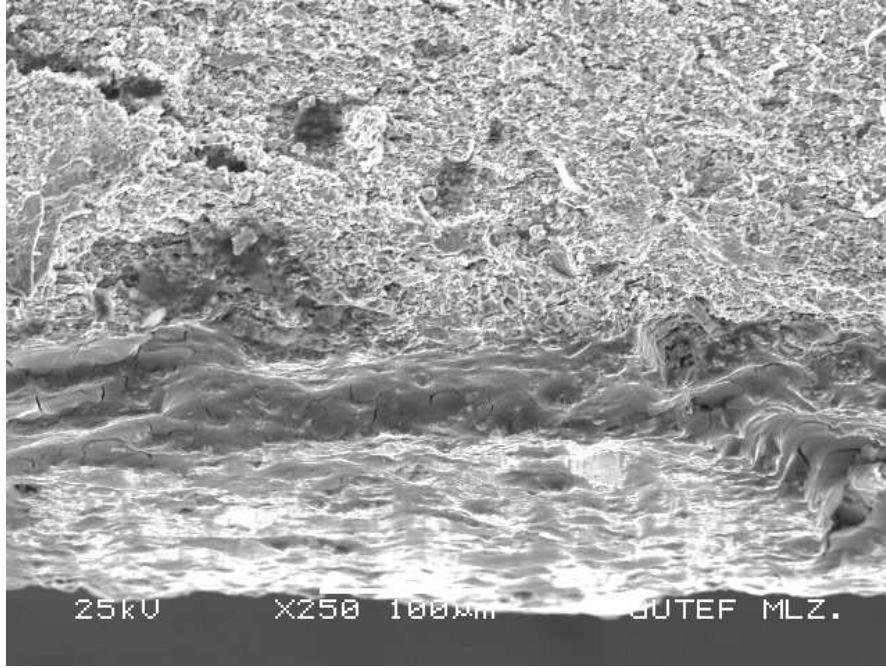
Şekil 8.74. 850 °C' de 2 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin x250 büyütmeli kırık yüzeyden SEM görüntüsü.



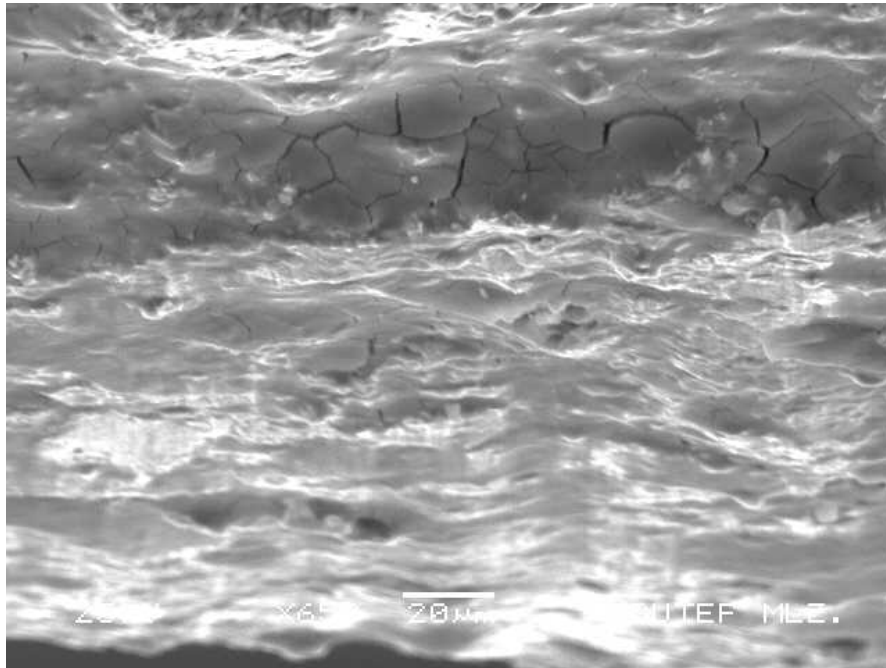
Şekil 8.74. 850 °C’ de 2 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin x1000 büyütmeli kırık yüzeyden SEM görüntüsü.

850 °C’ de 2 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin kırık yüzeylerinin SEM resimleri (Şekil 8.74 ve Şekil 8.75) incelendiğinde, bor katmanının olduğu kenar kısmın gevrek kırılma, iç kısımlarda ise plastik deformasyon kabiliyetine sahip sünek bir kırılma yüzey görüntüsünün olduğu söylenebilir. Ancak 850 °C’ de 2 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin kırık yüzeyleri (Şekil 8.68 ve Şekil 8.69) ile karşılaştırıldığında; AISI 8620 çeliğinin iç kısımlarının gevrek kırılma karakteristiğinde olduğu, borlu yüzeyinin ise biraz daha plastik ve sünek bir yüzey görünümünde olduğu söylenebilir.

Aşağıdaki Şekil 8.76 ve 8.77’ de 850 °C’ de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin çentik darbe deneyinin sonunda kırılmış yüzeylerden alınmış SEM resimleri verilmiştir.



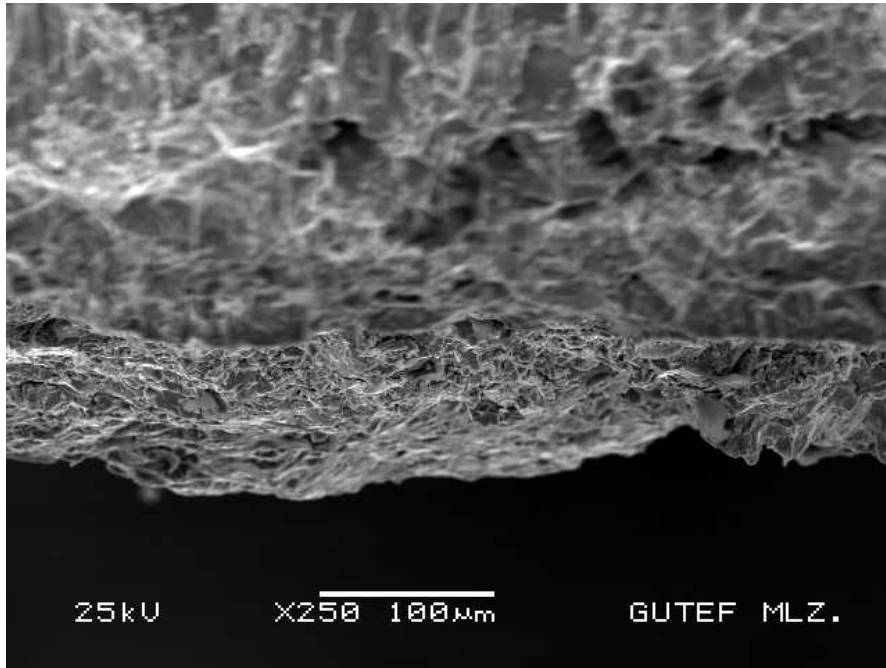
Şekil 8.76. 850 °C’ de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin x250 büyütmeli kırık yüzeyden SEM görüntüsü.



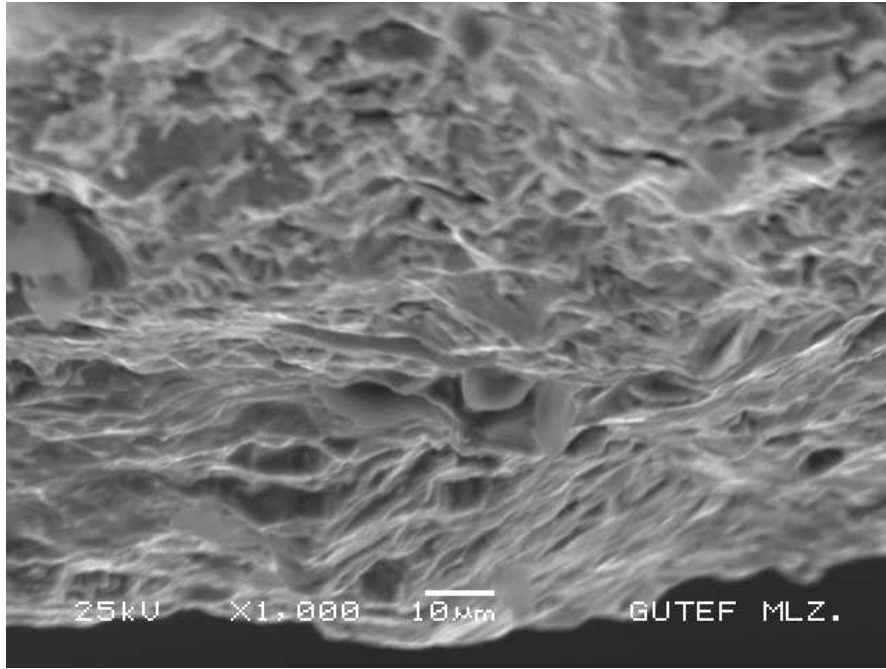
Şekil 8.77. 850 °C’ de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin x650 büyütmeli kırık yüzeyden SEM görüntüsü.

850 °C’ de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin kırık yüzeylerinin SEM resimleri (Şekil 8.76 ve Şekil 8.77) incelendiğinde gevrek kırılma yüzey görüntüsünün olduğu söylenebilir. Şekil 8.74 ve 8.75’deki aynı sıcaklıkta borlanan çelik numune yüzeyleri ile karşılaştırıldığında, artan borlama zamanı ile gevrekliğin arttığı ve kırılmanın da gevrek olduğu, Şekil 8.76 ve Şekil 8.77’den de anlaşılmaktadır.

Aşağıda Şekil 8.78 ile 8.79’ da 950 °C’ de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin çentik darbe deneyinin sonunda kırılmış yüzeylerden alınmış SEM resimleri verilmiştir.



Şekil 8.78. 950 °C’ de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin x250 büyütmeli kırık yüzeyden SEM görüntüsü.



Şekil 8.79. 950 °C’ de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin x1000 büyütmeli kırık yüzeyden SEM görüntüsü.

Şekil 8.74’den 8.79’ a kadar borlanmış AISI 8620 çeliğinin çentik darbe deneyinin sonunda kırılmış yüzeylerin SEM görüntüleri incelendiğinde, düşük sıcaklık ve sürelerde borlanmış çelik numunelerin (Şekil 8.74-8.75) plastik deformasyon kabiliyetine sahip sünek kırılma yüzeyinin görüntüsü yer almaktadır. Sıcaklık ve sürenin artması ile birlikte (Şekil 8.68-8.69) kırılmaların gevrek kırılmaya benzer bir karakteristikte olduğu görülmektedir. Bu durum daha uzun süre borlama zamanında ve yüksek sıcaklıklarda, kırılma ve gevrek bir yapıya sahip olan FeB fazının oluşması ile açıklanabilir (Bkz. Şekil 8.43). Ayrıca sıcaklığın ve sürenin artmasına bağlı olarak malzemenin yapısındaki tane büyümelerinin de etkili olduğu söylenebilir (Bkz. Şekil 8.17-8.18).

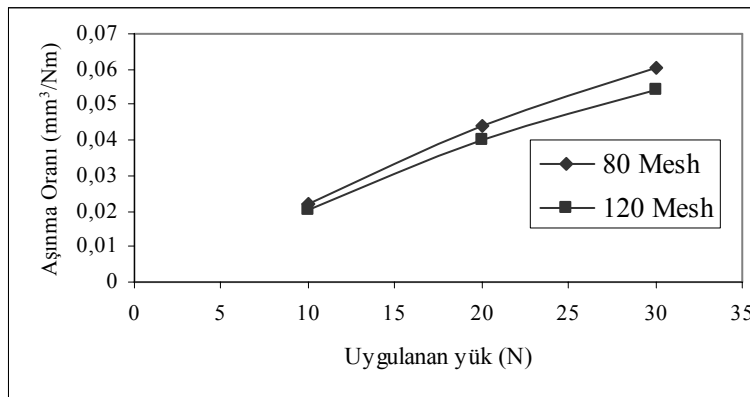
Her iki çelik numunenin kırık yüzeyleri incelendiğinde, borlanmış Hardox 400 çeliğinin bor katmanının olduğu kenar kısmın gevrek kırılma, iç kısımlarda ise iyi bir plastik deformasyon kabiliyetine sahip, daha tok kırılma özelliği sergilediği görülmüştür. AISI 8620 çelik numunelerin ise, Hardox 400 çelik numunelere göre

bor katmanının olduğu kenar kısmın daha sünek, iç kısımların ise daha gevrek kırılmaya benzer bir karakteristikte olduğu kırılma deneylerinden (Şekil 8.66-8.67) ve yüzey incelemesinden görülmüştür.

Genel olarak tüm kırılma yüzeyleri incelendiğinde, kırılmanın arzulandığı gibi tipik çökelti ile sertleşen matrislere özgü, tok ve benzeri bir karakteristikte gerçekleştiğini söyleyebiliriz.

8.7. Aşınma Deney Sonuçları

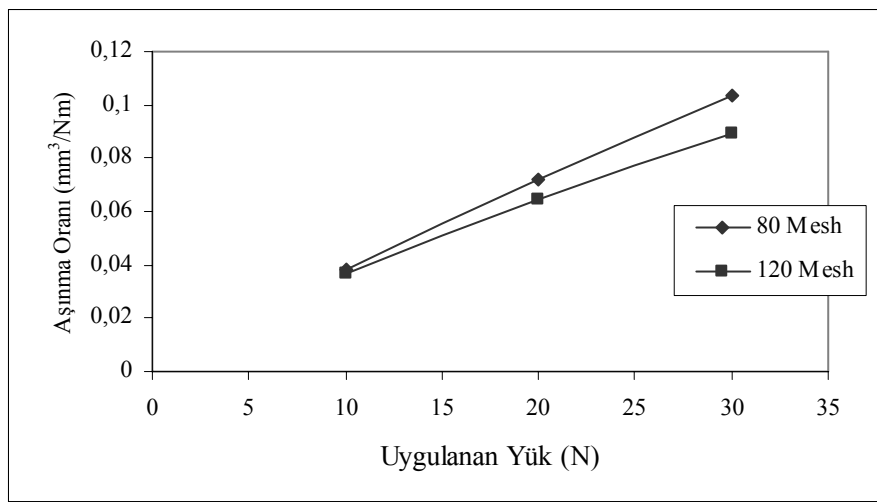
Pim-disk aşınma deneylerinde üç farklı ağırlık (10, 20, 30 N) ve 80 ile 120 mesh Al_2O_3 aşındırıcılar kullanılmıştır. Deneyler aynı şartlarda aynı koşullarda ve aynı oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan malzemelerin aşınma oranı ve aşınma direnci daha önce Bölüm 5.3.1’de verilen bağıntılar kullanılarak bulunmuştur. Pim-disk ile yapılan aynı şartlarda ve oda sıcaklığındaki aşınma deneylerinde, aşınma kayıpları aşağıda Şekil 8.80’den 8.93’e kadar verilmiştir. Aşınma deneylerinde 80 mesh aşındırıcı kağıtla yapılan deneylerdeki aşınma kayıpları, 120 mesh aşındırıcı kağıtlara göre daha fazladır. Bunun nedeni aşındırıcının tane boyutunun artması ile ilgilidir. Aşındırıcının tane boyutu arttıkça, pürüzler kırıldığı için aşınma oranı da artmıştır.



Şekil 8.80. Borlanmamış Hardox 400 çeliğinin 80 ve 120 mesh Al_2O_3 zımparada aşınma durumu.

Şekil 8.80’de de görüldüğü gibi 80 mesh Al_2O_3 zımparada aşınma oranı, 120 mesh Al_2O_3 zımparadaki aşınma oranından daha fazladır. Yapılan araştırmalar sonucunda aşındırıcı tane büyüklüğü arttıkça, malzemenin aşınmaya karşı direncinin azaldığı tespit edilmiştir. Bu bulgular da literatürle uyum içerisindedir [157,158,159].

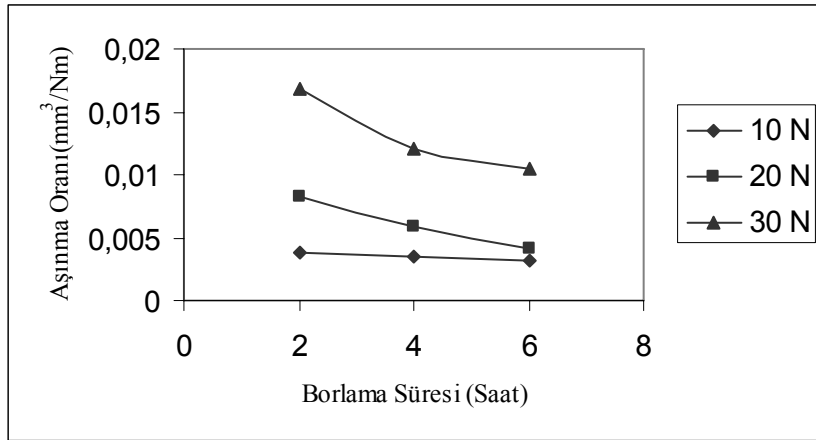
Borlanmamış AISI 8620 çeliğinin 80 ve 120 mesh Al_2O_3 zımparada aşınma durumu aşağıda Şekil 8.81’de gösterilmiştir.



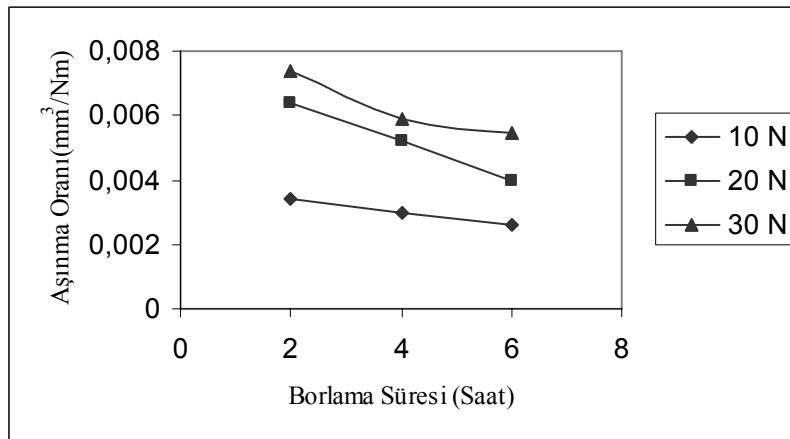
Şekil 8.81. Borlanmamış AISI 8620 çeliğinin 80 ve 120 mesh Al_2O_3 zımparada aşınma durumu.

Şekil 8.81 incelendiğinde, aşındırıcı tane boyutunun büyüklüğü arttıkça aşınma oranının da arttığı görülmektedir. Tane büyüklüğü arttıkça, tanenin malzemeyi çizme genişliği büyür ve dolayısıyla aşınma hacmi de artar. Goddard ve Wilman yaptıkları araştırmada aşındırıcının ortalama tane çapı ile aşınmanın değiştiğini tane çapı büyüdükçe aşınmanın arttığını bulmuşlardır [124,157,160,161]. Ayrıca artan yüke bağlı olarak aşınmanın da arttığı görülmektedir.

Aşağıda Şekil 8.82’den 8.87’ye kadar Hardox 400 Çeliğinin 850 °C, 900 °C ve 950 °C de farklı sürelerde borlanmış numunelerin 80 ve 120 mesh Al_2O_3 zımparada aşınma durumları görülmektedir.

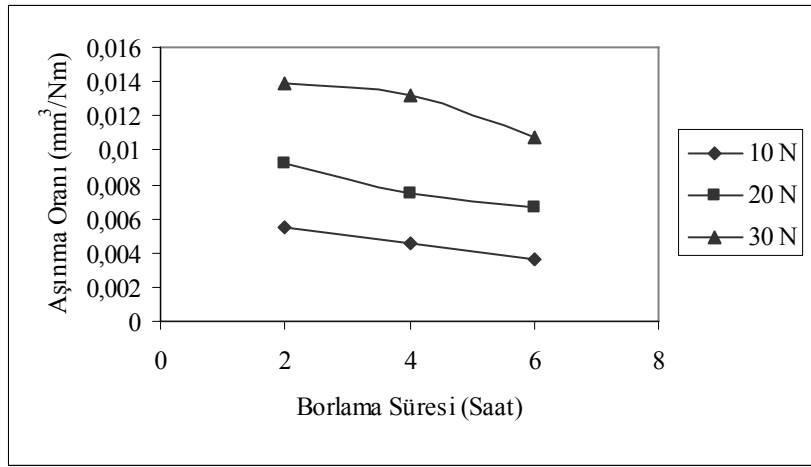


Şekil 8.82. 850 °C de farklı sürelerde borlanmış Hardox 400 çeliğinin 80 mesh Al_2O_3 zımparada aşınma durumu.

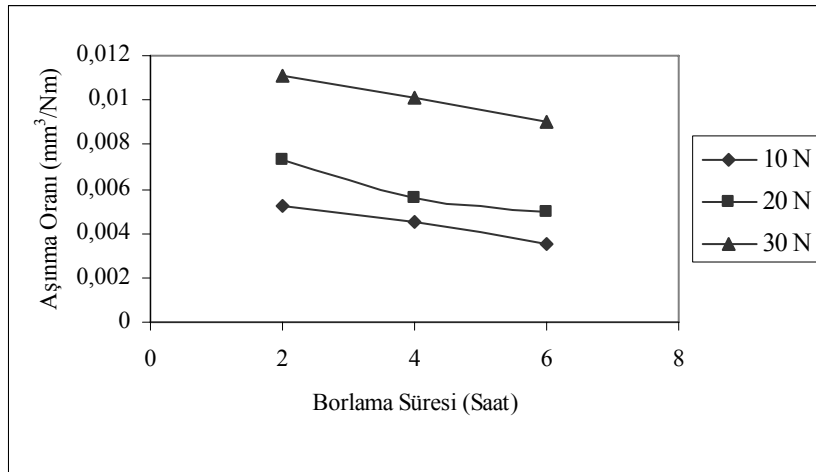


Şekil 8.83. 850 °C de farklı sürelerde borlanmış Hardox 400 çeliğinin 120 mesh Al_2O_3 zımparada aşınma durumu.

Şekil 8.82 ve Şekil 8.83 incelendiğinde, aynı sıcaklıkta borlanmış Hardox 400 numunelerin aşındırıcı tane boyutunun büyümesi ile aşınma oranında da artış olmaktadır. Ayrıca artan yüke bağlı olarak da aşınma oranı artmıştır. Yük ile birlikte hacimsel aşınmanın yaklaşık doğrusal olarak arttığını Richardson ve diğer çalışmacılar da belirlemiştir [159,162,163].

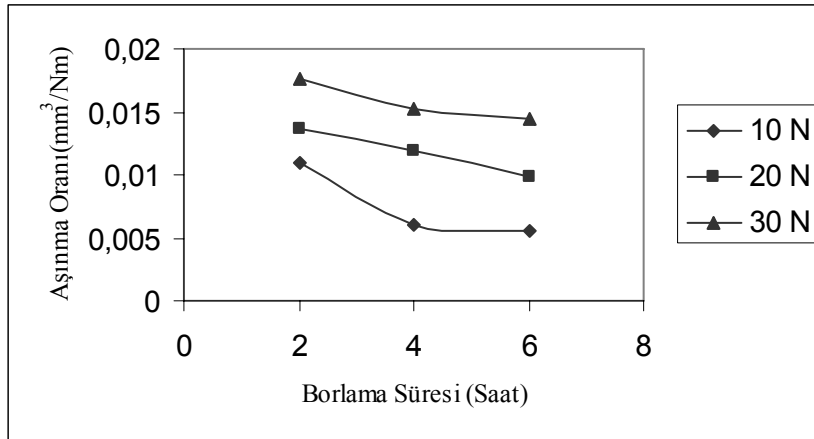


Şekil 8.84. 900 °C de farklı sürelerde borlanmış Hardox 400 çeliğinin 80 mesh Al_2O_3 zımparada aşınma durumu.

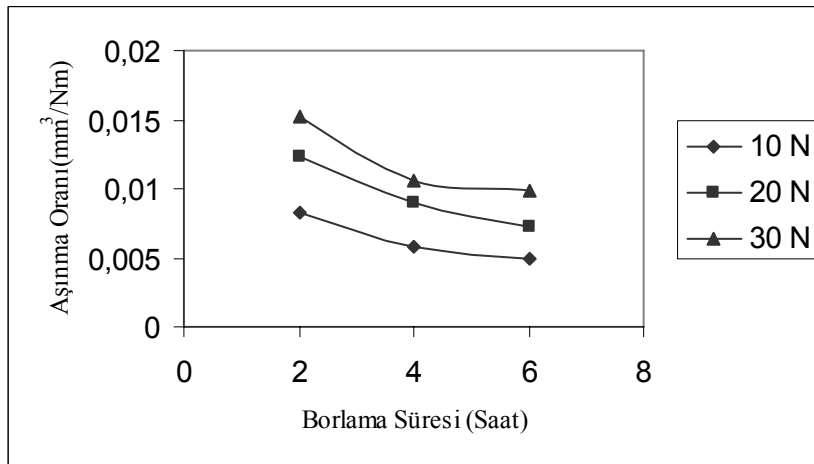


Şekil 8.85. 900 °C de farklı sürelerde borlanmış Hardox 400 çeliğinin 120 mesh Al_2O_3 zımparada aşınma durumu.

Şekil 8.82'den Şekil 8.85'e kadar incelendiğinde artan borlama zamanına bağlı olarak aşınma oranında azaldığı görülmektedir. En iyi aşınma direncini 6 saat borlanmış numuneler göstermektedir. Bu durum, daha uzun süre borlama ile malzeme yüzeyindeki FeB oluşumuna bağlı sertliğin ve borür katman kalınlığının artması ile açıklanabilir.



Şekil 8.86. 950 °C’de farklı sürelerde borlanmış Hardox 400 çeliğinin 80 mesh Al_2O_3 zımparada aşınma durumu.

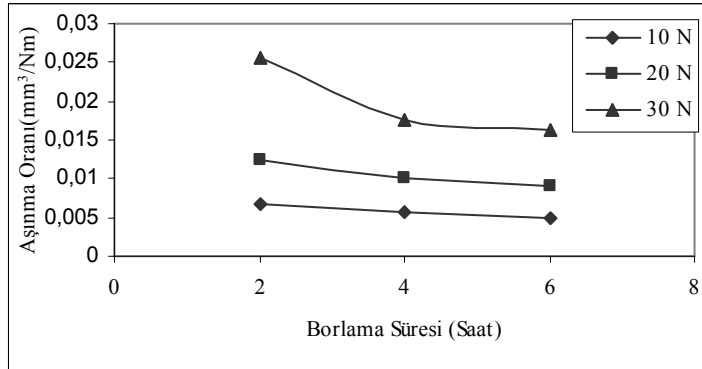


Şekil 8.87. 950 °C’de farklı sürelerde borlanmış Hardox 400 çeliğinin 120 mesh Al_2O_3 zımparada aşınma durumu.

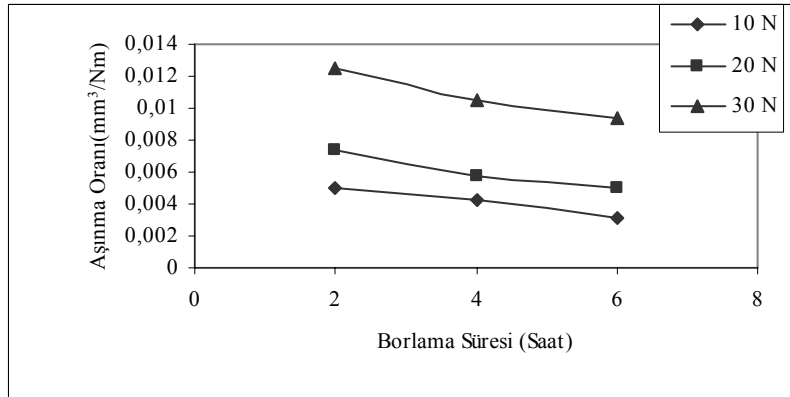
Şekil 8.82’den 8.87’ye kadar incelendiğinde, en fazla aşınma 950 °C de 2 saat borlanmış numunede, en az aşınmanın da 850 °C de 6 saat borlanmış numunede bulunmuştur. Genel olarak tüm numunelerde artan borlama zamanına bağlı olarak aşınma oranında azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni uzun süre ve sıcaklıkta borlanan numune yüzeyinde oluşan FeB katmanının daha sert bir yapıya sahip olmasıdır. C. Martini ve arkadaşları, “Borür kaplamalarının adhesiv ve abrasiv aşınma tutumları” konulu çalışmalarında aşınma hızı borür kaplaması üzerinde dış

kısımdaki gevrek, kristal yapısı düzensiz katmandan dolayı hem adhesiv hem abrasiv aşınma koşullarında çok yüksek olduğu sonucuna varmışlardır. Aşındırıcı zımpara dişlerinin aşınma üzerindeki etkisi de yine Şekil (8.80'den 8.87'ye kadar) görüldüğü gibi iri taneli (80 mesh) abrasiv taneciklerin aşındırıcı etkilerinin ince taneli (120 mesh) abrasiv taneciklerin aşındırıcı etkilerinden daha fazla olduğu gözlenmiştir. Tüm bu bulgular literatürle uyumludur [8,9,12-14,16,]. Şekilden (8.80'den 8.87'ye kadar) anlaşılabileceği gibi birim yüzeye uygulanan kuvvetin artması ile aşınma da artmaktadır. Modi ve arkadaşları, (2003)'de ortak yapmış oldukları çalışmanın sonucunda “Yüke bağlı olarak aşınma oranında değişmelerin olduğunu, aşınma oranının yükün artması ile arttığını azalması ile de azaldığını” belirtmişlerdir [164].

Aşınma mekanizmalarında sertlik, abrasiv malzemenin şekil ve ebadı ya da pürüzlülük, çarpma açısı, uygulanan normal yük, kaydırma hızı ve malzemenin kırılma direnci önemli faktörler arasındadır [16]. Aşağıda Şekil 8.88'den 8.93'e kadar AISI 8620 çeliğinin 850 °C, 900 °C ve 950 °C de farklı sürelerde borlanmış numunelerin 80 ve 120 mesh Al₂O₃ zımparada aşınma durumları görülmektedir.

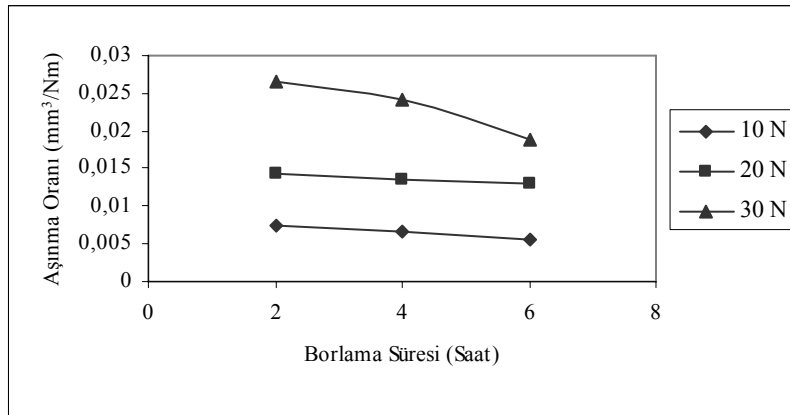


Şekil 8.88. 850 °C de farklı sürelerde borlanmış AISI 8620 çeliğinin 80 mesh Al₂O₃ zımparada aşınma durumu.

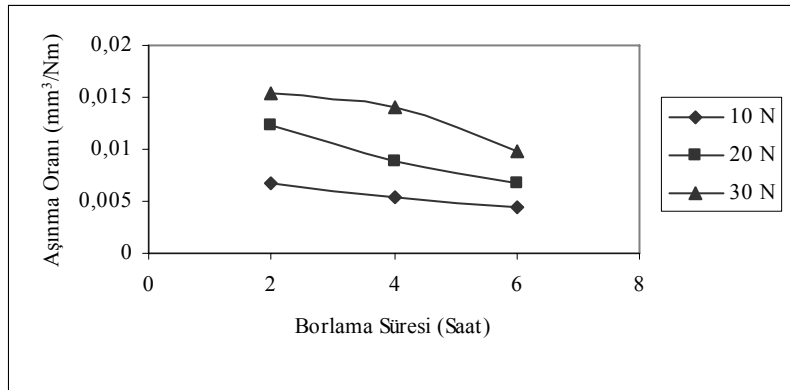


Şekil 8.89. 850 °C de farklı sürelerde borlanmış AISI 8620 çeliğinin 120 mesh Al_2O_3 zımparada aşınma durumu.

Şekil 8.88 ile Şekil 8.89 incelendiğinde, aynı sıcaklıkta artan borlama zamanı ile aşınma direncide artmıştır. Yükün ve aşındırıcı boyutunun artması ile aşınma oranında artış olmuştur.

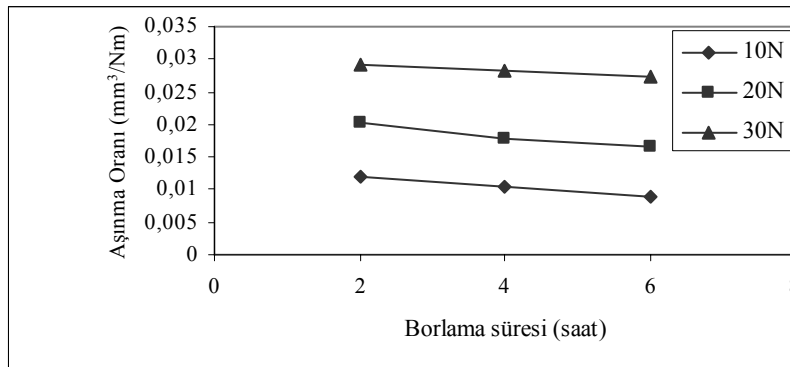


Şekil 8.90. 900 °C de farklı sürelerde borlanmış AISI 8620 çeliğinin 80 mesh Al_2O_3 zımparada aşınma durumu.

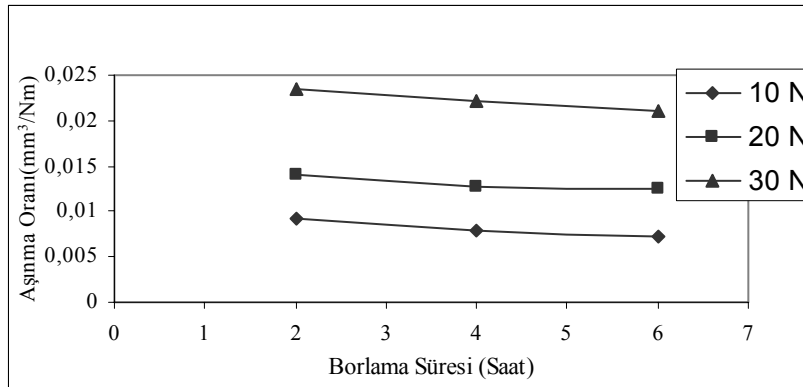


Şekil 8.91. 900 °C de farklı sürelerde borlanmış AISI 8620 çeliğinin 120 mesh Al_2O_3 zımparada aşınma durumu.

Şekil 8.88'den Şekil 8.91'e kadar incelendiğinde aynı borlama zamanında sıcaklığın artması ile aşınma oranında artış olmuştur. Bu durumun, artan borlama sıcaklığı ile çelik yüzeyinde oluşan gevrek ve kırılğan yapıya sahip FeB fazından oluştuğu söylenebilir.



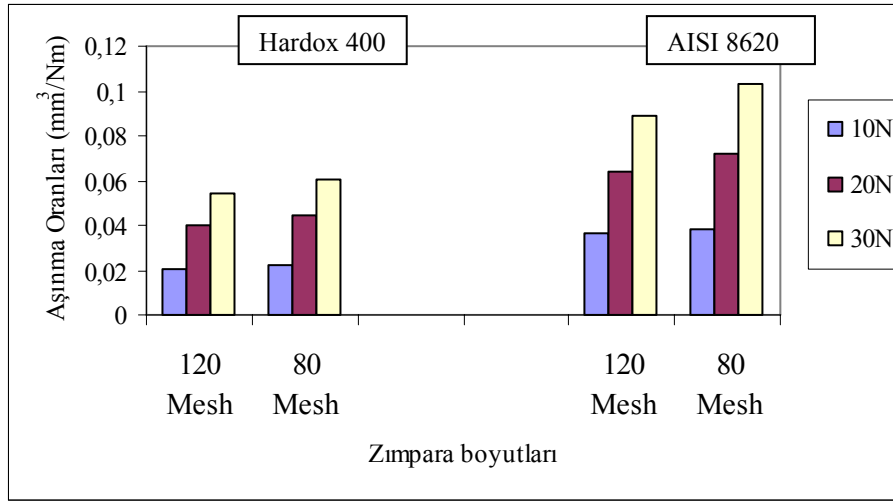
Şekil 8.92. 950 °C de farklı sürelerde borlanmış AISI 8620 çeliğinin 80 mesh Al_2O_3 zımparada aşınma durumu.



Şekil 8.93. 950 °C de farklı sürelerde borlanmış AISI 8620 çeliğinin 120 mesh Al_2O_3 zımparada aşınma durumu.

Şekil 8.88'den 8.93'e kadar incelendiğinde en fazla aşınma 950 °C de 2 saat borlanmış numunede, en az aşınmanın da 850 °C de 6 saat borlanmış numunede bulunmuştur. Bunun nedeninin uzun süre ve sıcaklıkta borlanan numune yüzeyinde oluşan FeB katmanının gevrek ve kırılgan bir yapıya sahip olmasındandır [14,16,115]. Borlanmış katmanın kırılganlığı katman kalınlığı ile artar [16]. Bölüm 4.3.3'de de bahsedildiği gibi önce Fe_2B fazı, daha sonrada FeB fazı oluştuğundan, dış yüzeydeki FeB fazının kırılgan ve gevrek yapıya sahip olması yüksek sıcaklıklarda borlanmış numunelerin aşınma direncini azaltmaktadır. Çelebi ve arkadaşları, AISI 8620 çeliği üzerinde yapmış oldukları borlama çalışması sonucunda 950 °C'de borlanan çeliğin yüzeyinde oluşan borürlerin kırılma direncinin, FeB oluşumuna bağlı olarak, 850 °C sıcaklıkta borlanan çeliğin yüzeyinde oluşan borürlerin kırılma direncinden düşük olduğunu gözlemlemişlerdir [11].

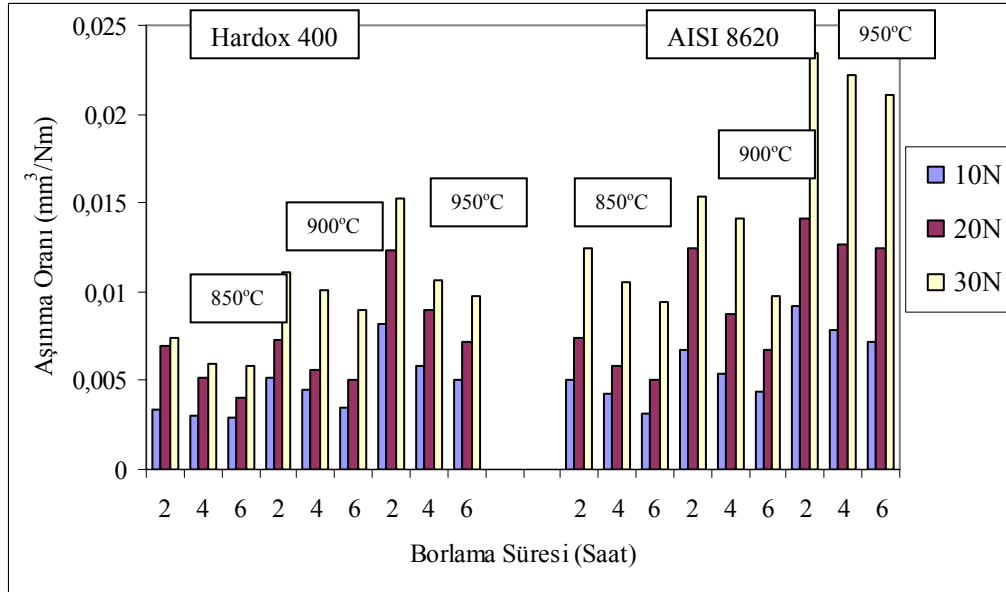
Aşağıda Şekil 8.94'den Şekil 8.96' ya kadar Hardox 400 ve AISI 8620 çeliklerinin aşınma oranlarının karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 8.94. Borlanmamış Hardox 400 ve AISI 8620 çeliklerinin 80 ve 120 Mesh Al_2O_3 zımparada aşınma oranlarının karşılaştırılması.

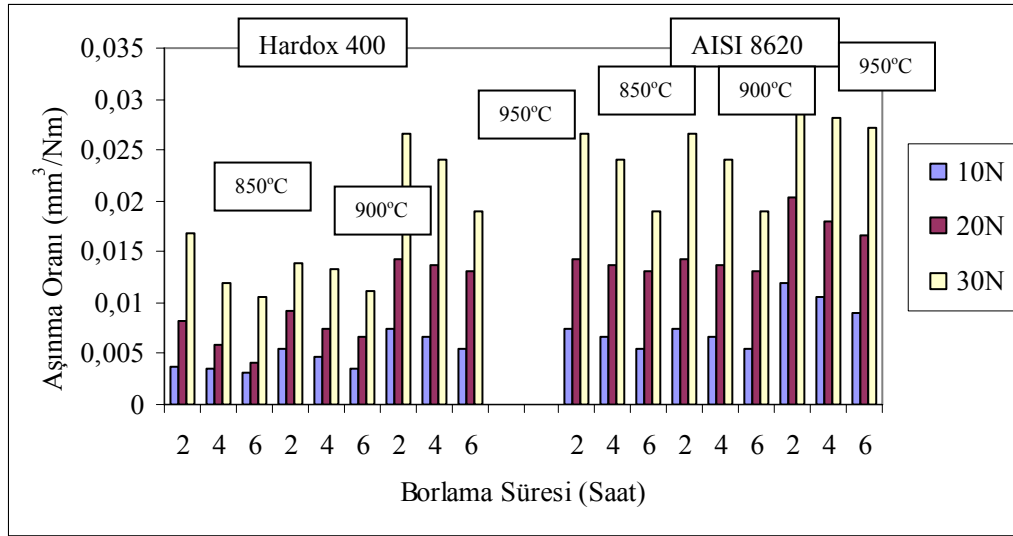
Şekil 8.94 incelendiğinde borlanmamış AISI 8620 çeliğinin aşınma oranının, Hardox 400 çeliğinin aşınma oranından yaklaşık iki katı fazla olduğu görülmektedir. Bunun nedeni borlanmamış Hardox 400 çeliğinin, borlanmamış AISI 8620 çeliğinden daha sert olmasıdır. Hardox 400 çeliğinin sertliği, aşınma direncinin iyi bir ölçüsüdür. Şekil incelendiğinde, artan aşındırıcı zımpara boyutu ve yükün artması ile aşınma oranının da arttığı görülmektedir.

Aşağıda Şekil 8.95’de ve Şekil 96’ da farklı süre ve sıcaklıklarda borlanmış Hardox 400 ve AISI 8620 çeliklerinin 120 Mesh ve 80 Mesh Al_2O_3 aşındırıcı zımparalarda aşınma oranlarının sonuçları verilmiştir.



Şekil 8.95. Farklı süre ve sıcaklıklarda borlanmış Hardox 400 ve AISI 8620 çeliklerinin 120 Mesh Al_2O_3 zımparada aşınma oranlarının karşılaştırılması.

Şekil 8.95’ deki farklı süre ve sıcaklıklarda borlanmış Hardox 400 ve AISI 8620 çeliklerinin 120 Mesh Al_2O_3 zımparada aşınma oranları incelendiğinde en fazla aşınmanın 950 °C’de 2 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinde, en az aşınma oranının ise 850 °C’de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinde olduğu görülmektedir. AISI 8620 çeliğinin aşınma oranının, Hardox 400 çeliğinin aşınma oranından yaklaşık iki katı fazla olduğu görülmektedir. Bunun nedeninin, borlanmış Hardox 400 çeliğinin yüzeyinde oluşan borür tabakasının, AISI 8620 çeliğinin yüzeyinde oluşan borür tabakasından daha sert ve kalın olmasıdır. Ayrıca miroyapılardan da görüldüğü gibi (Bkz. Şekil 8.3’ den 8.16’ ya kadar) borlanmış Hardox 400 çeliğinin yüzeyinde oluşan bor katmanının, AISI 8620 çeliğinin yüzeyinde oluşan bor katmanından daha kolonlu bir yapıda olduğu görülmektedir. Her iki çelik numunede de yüksek borlama sıcaklıklarında aşınma oranlarının fazla olduğu görülmüştür. Bunun nedeninin uzun süre ve sıcaklıkta borlanan numune yüzeyinde oluşan FeB katmanının gevrek ve kırılgan bir yapıya sahip olmasındandır [14,16,115]. Borlanmış katmanın kırılganlığı katman kalınlığı artan gevrekleşme nedeniyle artar [16].



Şekil 8.96. Farklı süre ve sıcaklıklarda borlanmış Hardox 400 ve AISI 8620 çeliklerinin 80 Mesh Al_2O_3 zımparada aşınma oranlarının karşılaştırılması.

Şekil 8.96’ daki farklı süre ve sıcaklıklarda borlanmış Hardox 400 ve AISI 8620 çeliklerinin 80 Mesh Al_2O_3 zımparada aşınma oranları incelendiğinde en fazla aşınmanın 950 °C’de 2 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinde, en az aşınma oranının ise 850 °C’de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinde olduğu görülmektedir. AISI 8620 çeliğinin aşınma oranının, Hardox 400 çeliğinin aşınma oranından yaklaşık iki katı fazla olduğu görülmektedir. Şekil 8.95 ile Şekil 8.96 karşılaştırıldığında zımpara boyutunun artması ile birlikte aşınma oranında arttığı görülmüştür. Borlanmış çelikler içerisinde en fazla aşınmanın, 950 °C’de 2 saat borlanmış, 30 N yük altında ve 80 Mesh zımparada aşındırılmış numunede olduğu görülmüştür. Aşındırıcı zımpara boyutu ve yük arttıkça aşınma da artmıştır. Şekillerden de görüldüğü gibi borlanmış Hardox 400 çeliği, borlanmış AISI 8620 çeliğine göre yaklaşık iki katı kadar aşınma direnci göstermiştir.

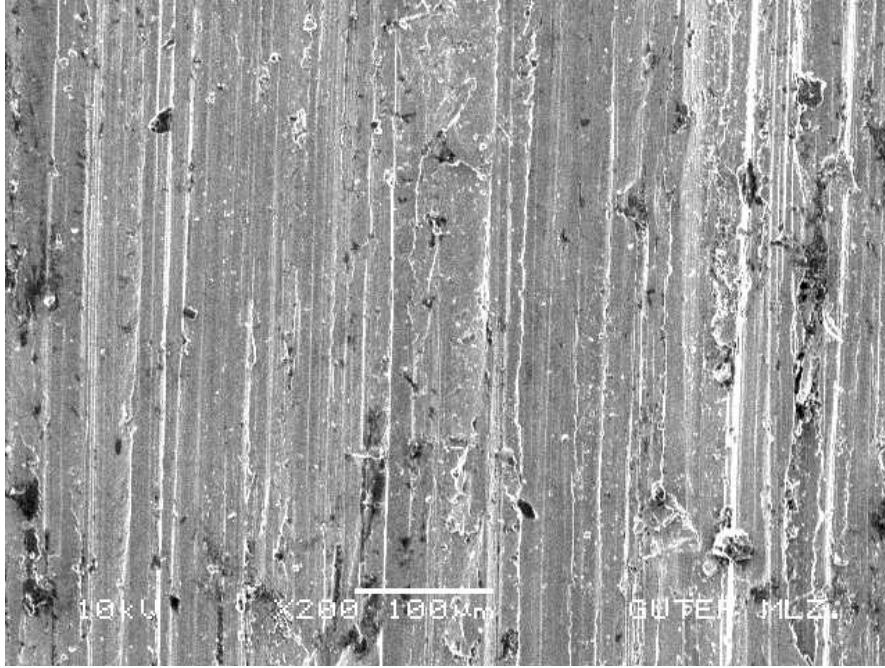
Şen ve arkadaşları, yapmış oldukları çalışmada en az aşınmanın 850 °C sıcaklıkta borlanan numunede, en fazla aşınmanın ise 950 °C’de borlanan numunede olduğunu söylemişlerdir [149]. Meriç ve arkadaşları, yapmış oldukları çalışmada yükün artması ile aşınma miktarının arttığını ve en az aşınmanın 6 saat borlanmış numunede

meydana geldiğini belirtmişlerdir [16]. Ayrıca kısa süreli borlanmış numunelerin aşınma oranlarının fazla olmasının nedeni de muhtemelen bor katman kalınlığının az olmasındandır. Bejar ve Moreno, “Borlanmış Karbon ve Düşük Alaşım Çeliklerinin Abrasiv Aşınma Direnci” isimli çalışmalarında, kısa süreli borlanmış çelik numunelerin, uzun süreli borlanmış numunelere göre daha fazla aşındığı sonucuna varmışlar ve bunun nedeninin bor katman kalınlığının az olmasından kaynaklandığını söylemişlerdir [9]. Aynı sıcaklıkta kütle kaybının borür katman kalınlığı ile azaldığı söylenebilir. Şekil 8.95 ile Şekil 8.96 incelendiğinde bizim bulgularımızın da, aynı sıcaklıkta, kütle kaybının borür katman kalınlığı ile azaldığı şeklindedir.

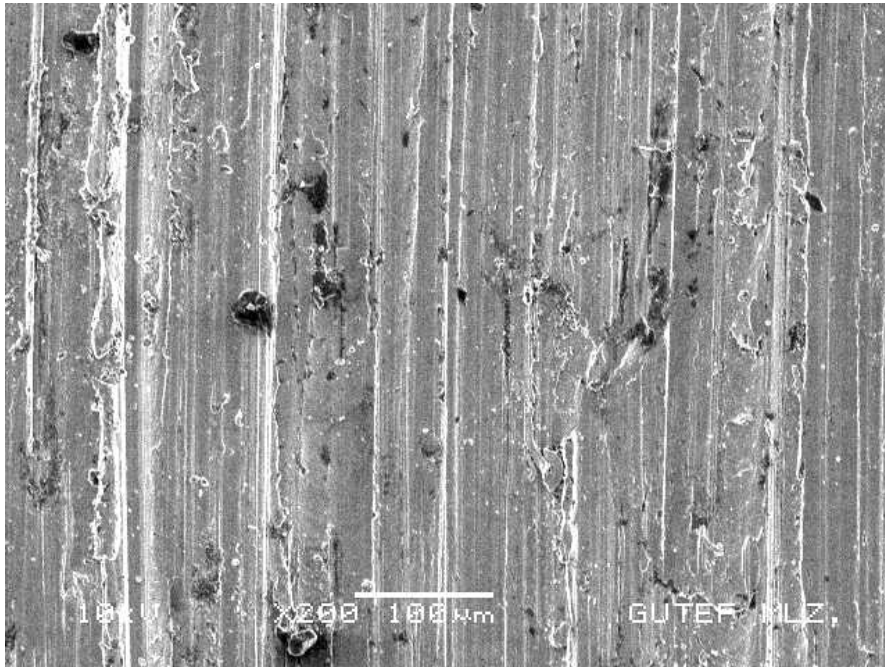
8.8. Aşınmış Yüzeylerin Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) İncelemeleri

Aşınma deneyleri sırasında abrasiv taneciklerin aşındırılan malzeme yüzeyine batarak aşınmayı etkilediği bazen de malzemeye batan abrasiv partikülün karbür vazifesi görerek, abrasiv ile malzeme yüzeyi arasındaki teması kestiği ve aşınmayı azaltıcı rol oynadığı bilinmektedir. Test şartlarında aşınma oranı ve yük arasındaki ilişki abrasiv partikülün ve malzeme içerisindeki karbürlerin dağılımı da aşınmayı etkileyen unsurlardan biridir. Kullanılan abrasiv aşındırıcının sertliği aşınma için önemli bir unsurdur. Yükün ve bunun yanı sıra abrasiv partikül sertliğinin artması aşınma kanallarının derinliğinin de artmasına sebep olmaktadır [123].

Pin-on disk aşınma deney cihazında 10, 20 ve 30 N yük altında, oda sıcaklığında, normal ve aynı şartlar altında “80” mesh ile “120” mesh Al_2O_3 aşındırıcı zımpara kullanılarak yapılan aşınma deneylerindeki numunelerin aşınmış yüzeyleri taramalı elektron mikroskobunda incelenerek yüzey durumları Şekil 8.97 – 8.136’da verilmiştir.



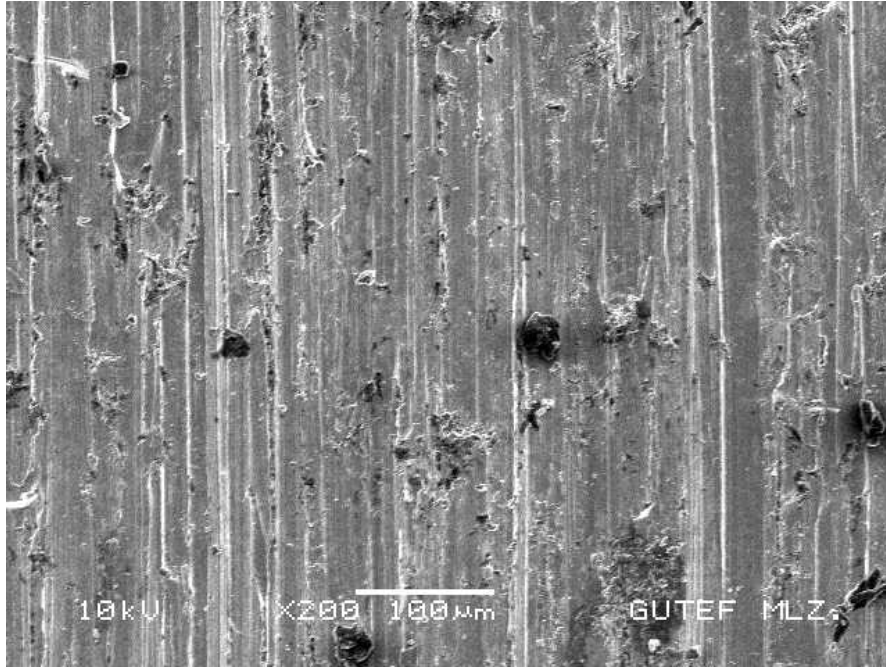
Şekil 8.97. Borlanmamış Hardox 400 çeliğinin 120 mesh Al₂O₃ zımparada 10 N yük altında aşınmış yüzeyinin X 200 büyütmeli görüntüsü.



Şekil 8.98. Borlanmamış Hardox 400 çeliğinin 80 mesh Al₂O₃ zımparada 10 N yük altında aşınmış yüzeyinin X 200 büyütmeli görüntüsü.

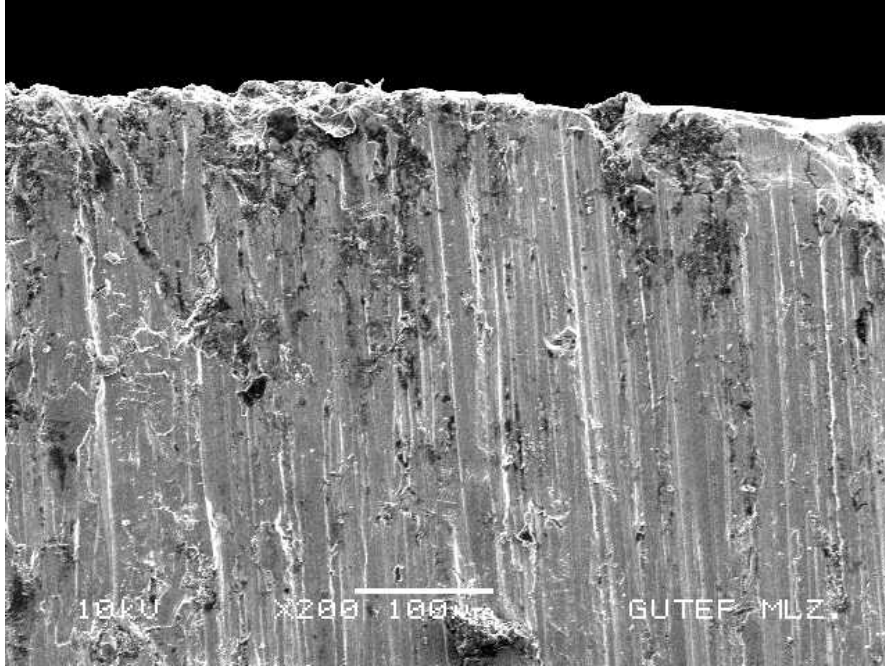
Şekil 8.97 ile Şekil 8.98 incelendiğinde aynı yük altında (10 N) farklı zımpara boyutlarında aşındırılmış Hardox 400 çeliğinin 120 mesh zımpara ile aşındırılmış yüzeyinin 80 mesh ile aşındırılmış yüzeyine göre aşınma kanallarının daha ince olduğu görülmektedir.

Aşağıda Şekil 8.99'dan Şekil 8.102'ye kadar borlanmamış Hardox 400 çeliğinin 120 ve 80 mesh aşındırıcı zımparalarda ve 30N yük altında aşındırılmış yüzeylerinin görüntüleri verilmiştir.

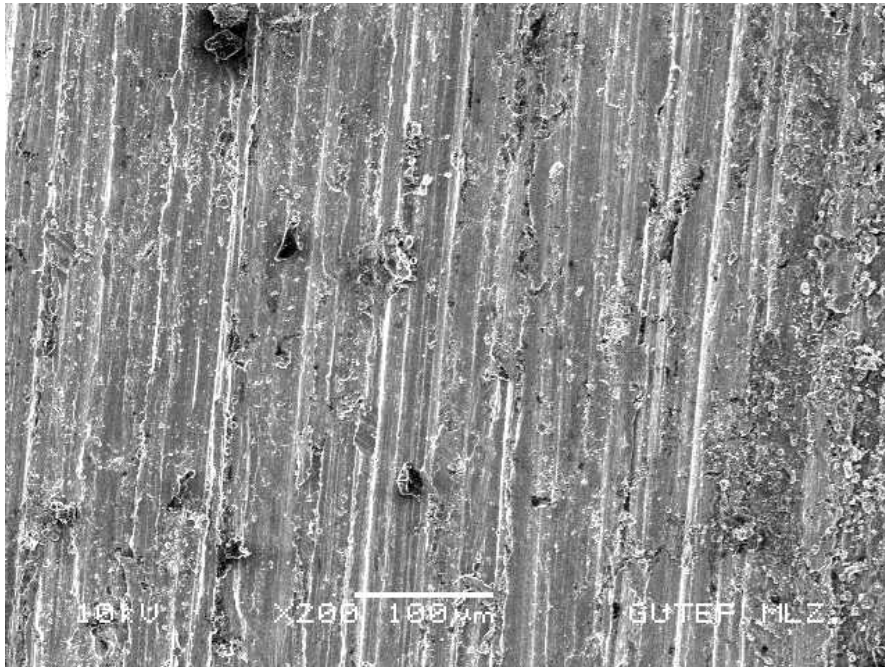


Şekil 8.99. Borlanmamış Hardox 400 çeliğinin 120 mesh Al_2O_3 zımparada 30 N yük altında aşınmış orta yüzeyinin X 200 büyütme görüntüsü.

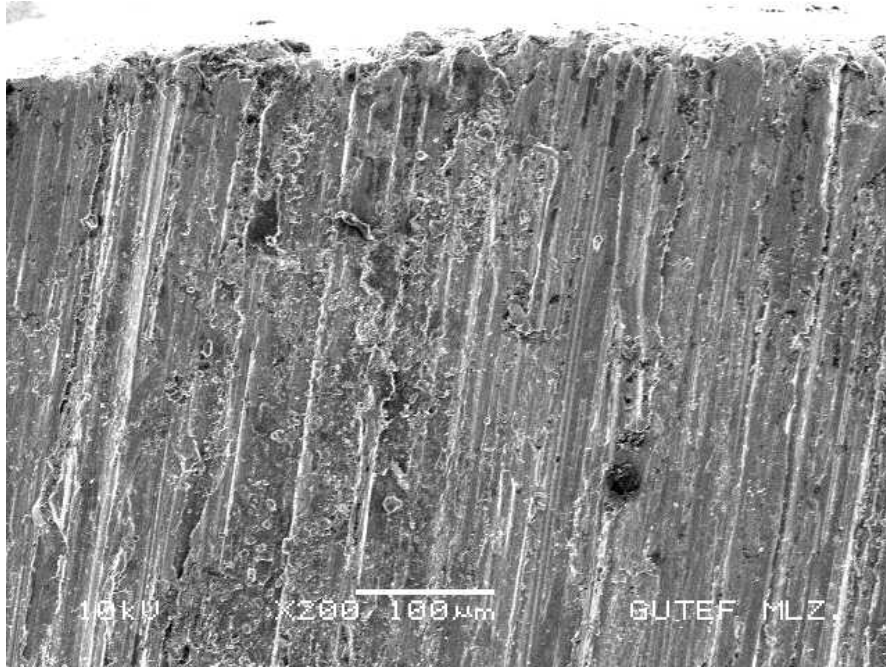
Şekil 8.97 ile 8.99 incelendiğinde aynı aşındırıcı zımpara boyutunda yükün artması ile aşınma kanallarının daha derin ve geniş olduğu görülmektedir.



Şekil 8.100. Borlanmamış Hardox 400 çeliğinin 120 mesh Al_2O_3 zımparada 30 N yük altında aşınmış kenar yüzeyinin X 200 büyütmeli görüntüsü.



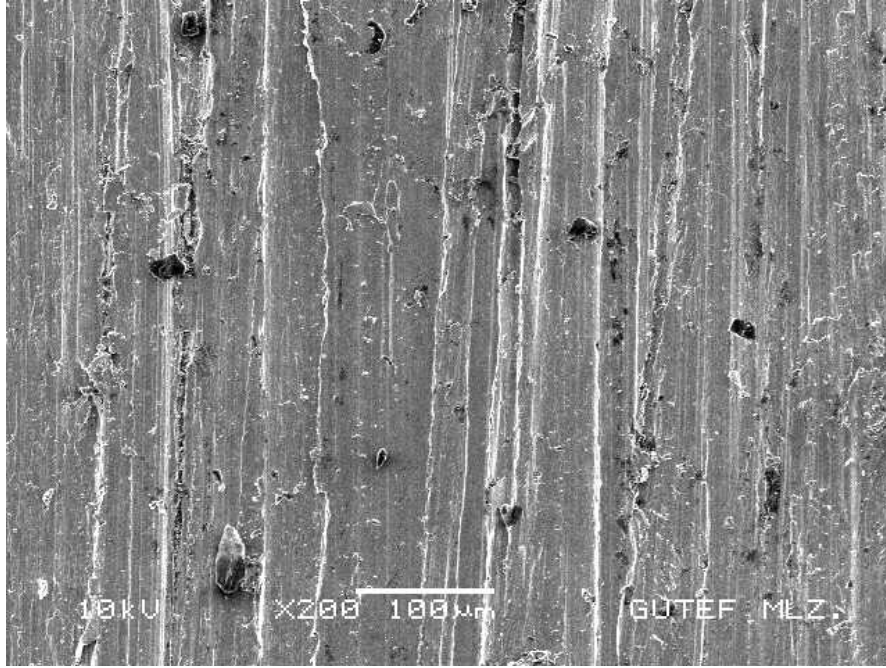
Şekil 8.101. Borlanmamış Hardox 400 çeliğinin 80 mesh Al_2O_3 zımparada 30 N yük altında aşınmış orta yüzeyinin X 200 büyütmeli görüntüsü.



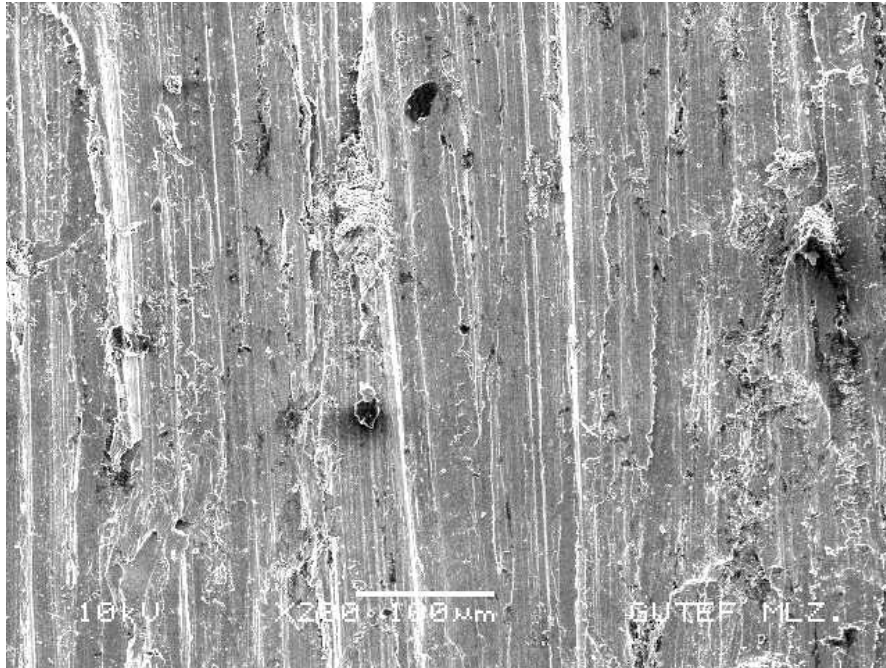
Şekil 8.102. Borlanmamış Hardox 400 çeliğinin 80 mesh Al_2O_3 zımparada 30 N yük altında aşınmış kenar yüzeyinin X 200 büyütmeli görüntüsü.

Şekil 8.97'den 8.102'ye kadar borlanmamış Hardox 400 çeliğinin aşınmış yüzeyleri incelendiğinde, artan yüklerle birlikte aşınma kanallarının da daha geniş ve derin olduğu görülmektedir. Ayrıca zımpara boyutunun artması ile de aşınma kanallarının genişliklerinin fazla olduğu görülmektedir. Kenardan alınan görüntüler incelendiğinde, aşındırıcı boyutunun ve yükün artması ile birlikte kopmalar ve deformasyonda artmıştır.

Aşağıda Şekil 8.103'den 8.108'e kadar borlanmamış AISI 8620 çeliğinin 10 N ve 30 N yükler altında aşınmış yüzey görüntüleri verilmiştir.



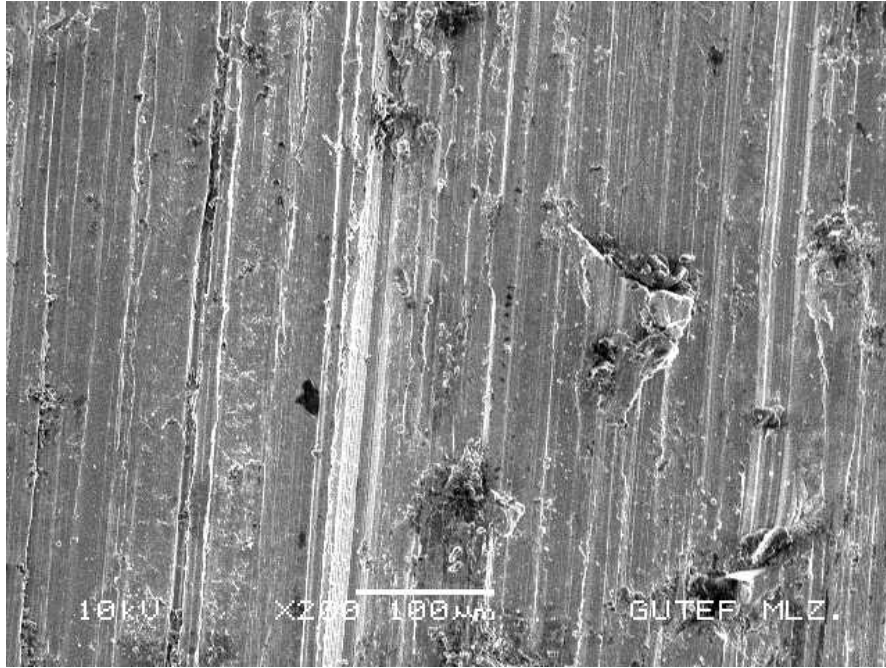
Şekil 8.103. Borlanmamış AISI 8620 çeliğinin 120 mesh Al_2O_3 zımparada 10 N yük altında aşınmış yüzeyinin X 200 büyütmeli görüntüsü.



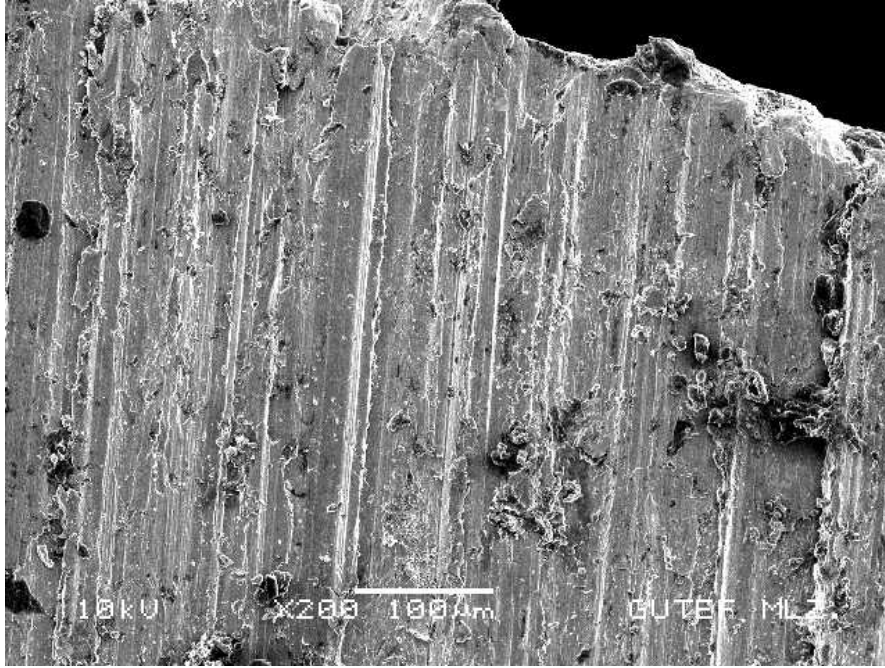
Şekil 8.104. Borlanmamış AISI 8620 çeliğinin 80 mesh Al_2O_3 zımparada 10 N yük altında aşınmış yüzeyinin X 200 büyütmeli görüntüsü.

Şekil 8.103 ile 8.104 incelendiğinde aynı yükte (10N), 80 mesh aşındırıcı zımparada aşındırılan numunenin (Şekil 8.104) aşınma kanallarının, 120 mesh aşındırıcı zımpara ile aşındırılan numunenin (Şekil 8.103) aşınmış yüzeyi ile kıyaslandığı zaman daha derin ve geniş olduğu görülmektedir.

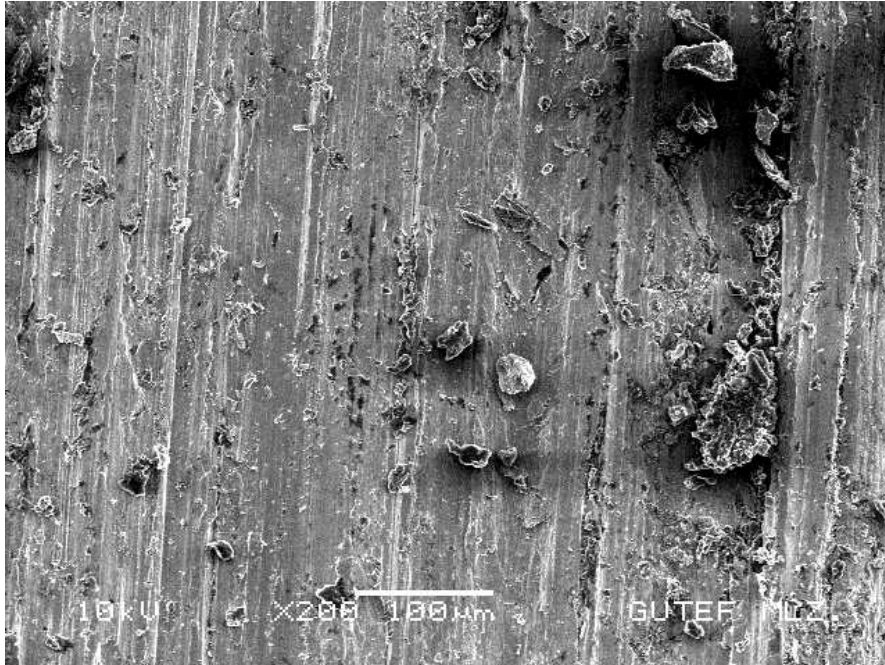
Aşağıda Şekil 8.105’den Şekil 8.108’e kadar borlanmamış Hardox 400 çeliğinin, 120 ve 80 mesh aşındırıcı zımparalarda ve 30 N yük altında aşındırılmış yüzeylerinin görüntüleri verilmiştir.



Şekil 8.105. AISI 8620 çeliğinin 120 mesh Al_2O_3 zımparada 30 N yük altında aşınmış orta yüzeyinin X 200 büyütmeli görüntüsü.

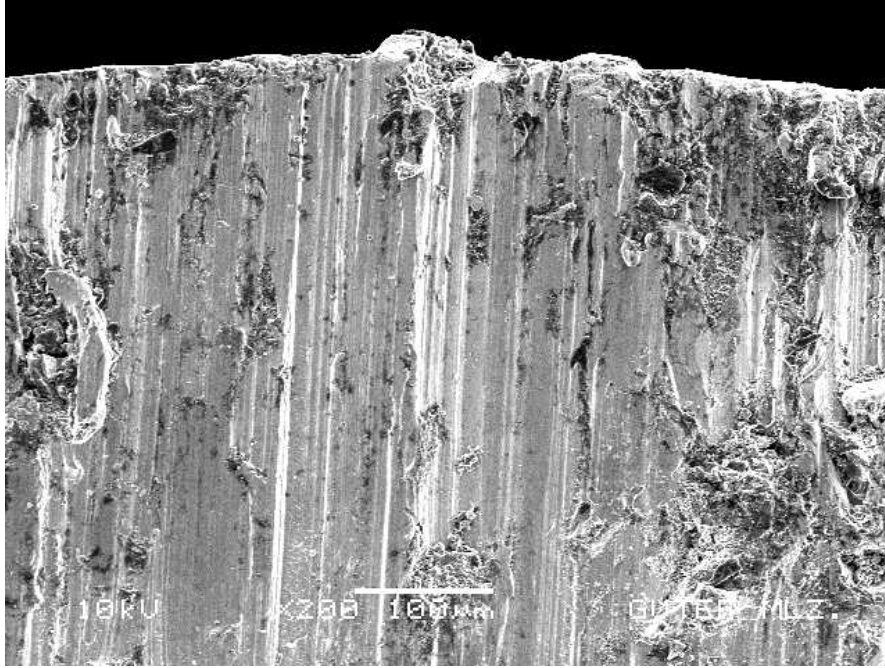


Şekil 8.106. Borlanmamış AISI 8620 çeliğinin 120 mesh Al_2O_3 zımparada 30 N yük altında aşınmış kenar yüzeyinin X 200 büyütme görüntüsü.



Şekil 8.107. Borlanmamış AISI 8620 çeliğinin 80 mesh Al_2O_3 zımparada 30 N yük altında aşınmış orta yüzeyinin X 200 büyütme görüntüsü.

Şekil 8.104. ile 8.107 incelendiğinde, aşınma yüzeylerini uygulanan yükler bakımından değerlendirdiğimizde, yükün artması ile birlikte aşınma yüzeylerinde daha derin ve geniş deformasyon izlerine rastlanmıştır.

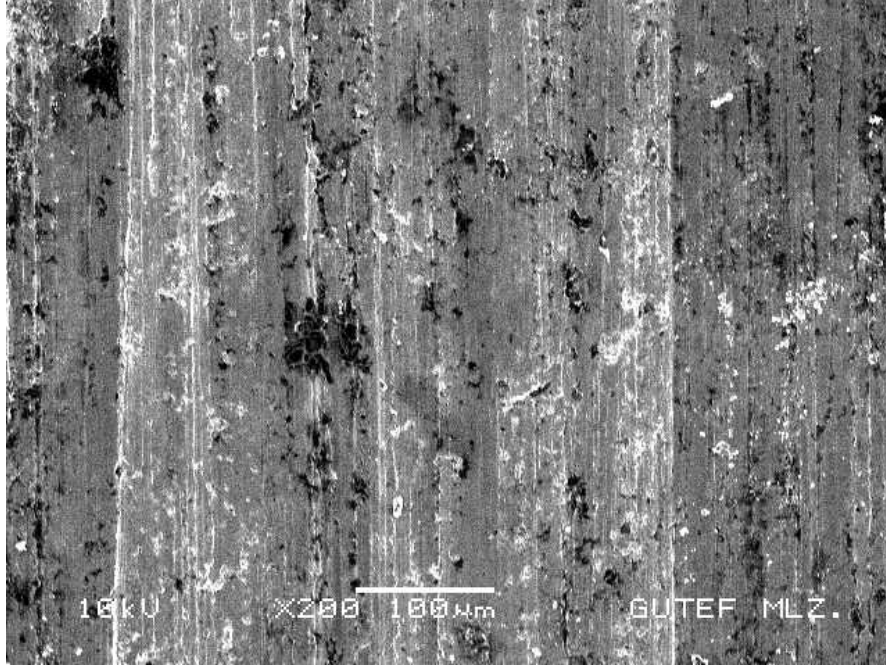


Şekil 8.108. Borlanmamış AISI 8620 çeliğinin 80 mesh Al_2O_3 zımparada 30 N yük altında aşınmış kenar yüzeyinin X 200 büyütmeli görüntüsü.

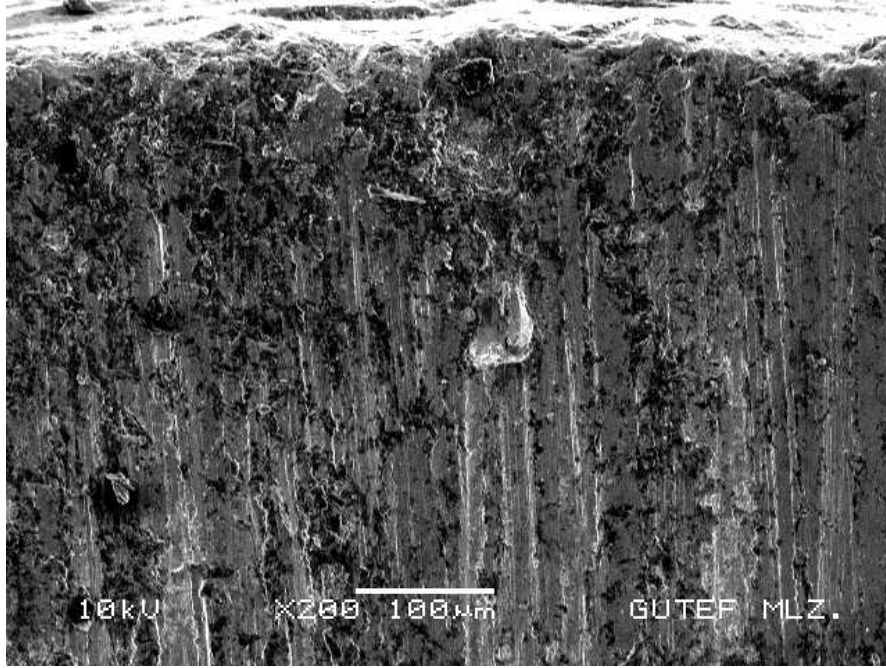
Şekil 8.103'den 8.108'e kadar borlanmamış AISI 8620 çeliğinin 10 N ve 30 N yükler altında aşınmış yüzey görüntüleri incelendiğinde, yükün artması ve zımpara boyutunun büyümesi ile kanallarda daha büyük, geniş ve derin olmuştur. Kenarlardan alınan görüntüler incelendiğinde, zımpara boyutu ile yükün artmasına paralel olarak kopmaların ve kırılmaların da daha fazla olduğu görülmektedir.

Hardox 400 ve AISI 8620 çeliklerinin borlanmamış numunelerinin aşınmış yüzeyleri (Şekil 8.97'den 8.108'e kadar) incelendiğinde, borlanmamış Hardox 400 çeliğinin aşınmış yüzeylerindeki aşınma kanallarının daha ince ve küçük olduğu görülmüştür. Buda borlanmamış Hardox 400 çeliğinin aşınma direncinin, borlanmamış AISI 8620 çeliğine göre fazla olduğunu göstermektedir. Şekil 8.94'deki aşınma sonuçları da bunu doğrulamaktadır.

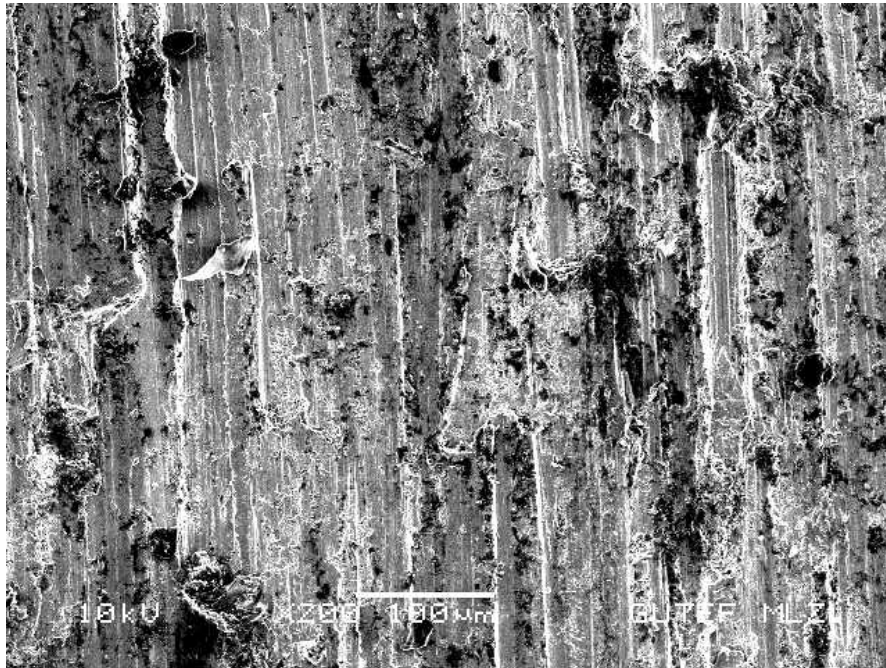
Aşağıdaki Şekil 8.109'dan 8.122'ye kadar 850 °C'de 2 ve 6 saat, 950 °C'de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin aşınmış yüzey görüntüleri verilmiştir.



Şekil 8.109. 850 °C'de 2 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin 120 mesh Al_2O_3 zımparada 30 N yük altında aşınmış orta yüzeyinin X 200 büyütmeli görüntüsü.

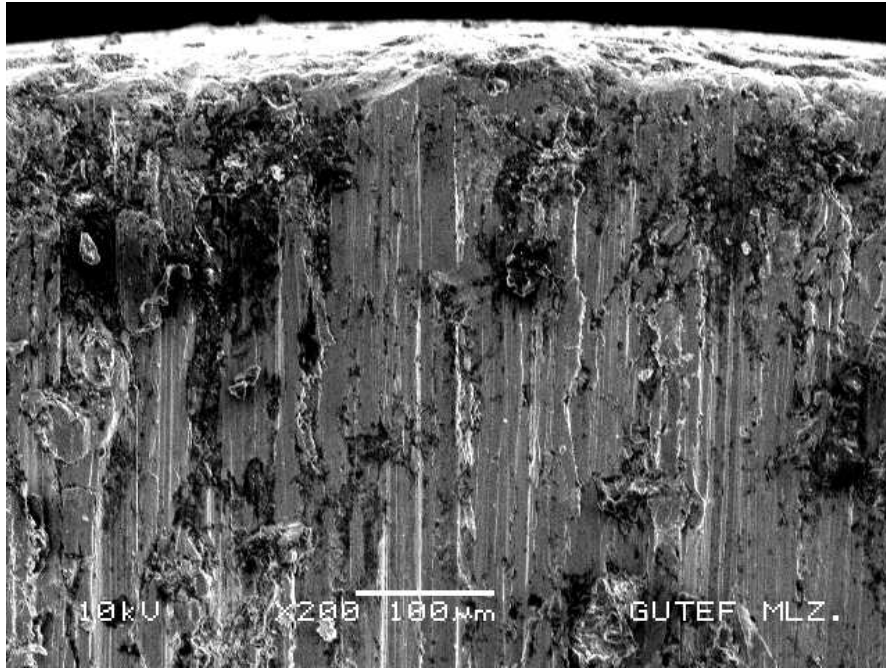


Şekil 8.110. 850 °C’de 2 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin 120 mesh Al_2O_3 zımparada 30 N yük altında aşınmış kenar yüzeyinin X 200 büyütmeli görüntüsü.



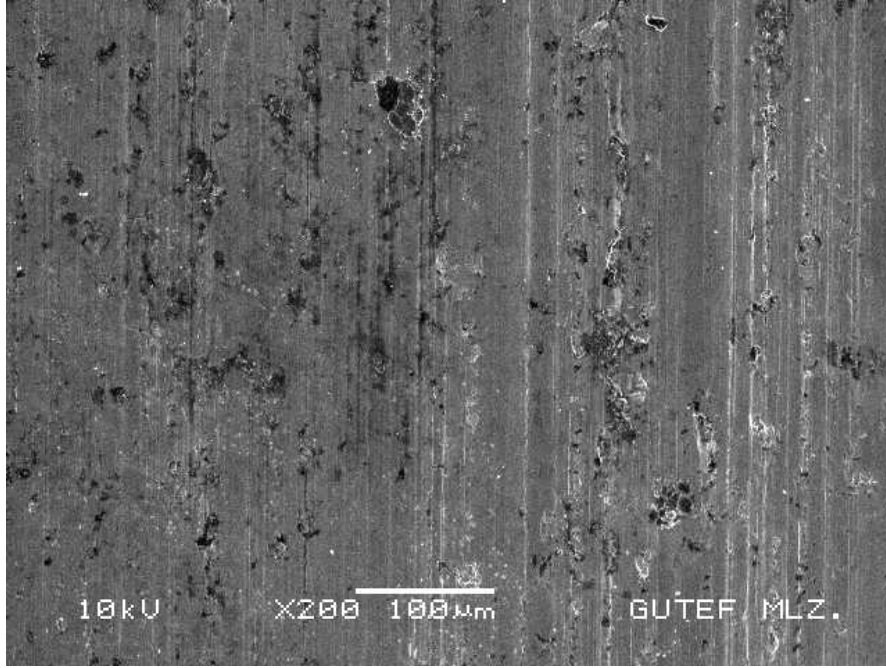
Şekil 8.111. 850 °C’de 2 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin 80 mesh Al_2O_3 zımparada 30 N yük altında aşınmış orta yüzeyinin X 200 büyütmeli görüntüsü.

Şekil 8.109. ile 8.111 incelendiğinde 850 °C’de 2 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin aynı yükte (30 N) 120 mesh aşındırıcı zımparada aşınmış yüzeyinin (Şekil 8.109) 80 mesh aşındırıcı zımparada aşınmış yüzeyine (Şekil 8.111) göre aşınma izlerinin daha ince olduğu görülmektedir.

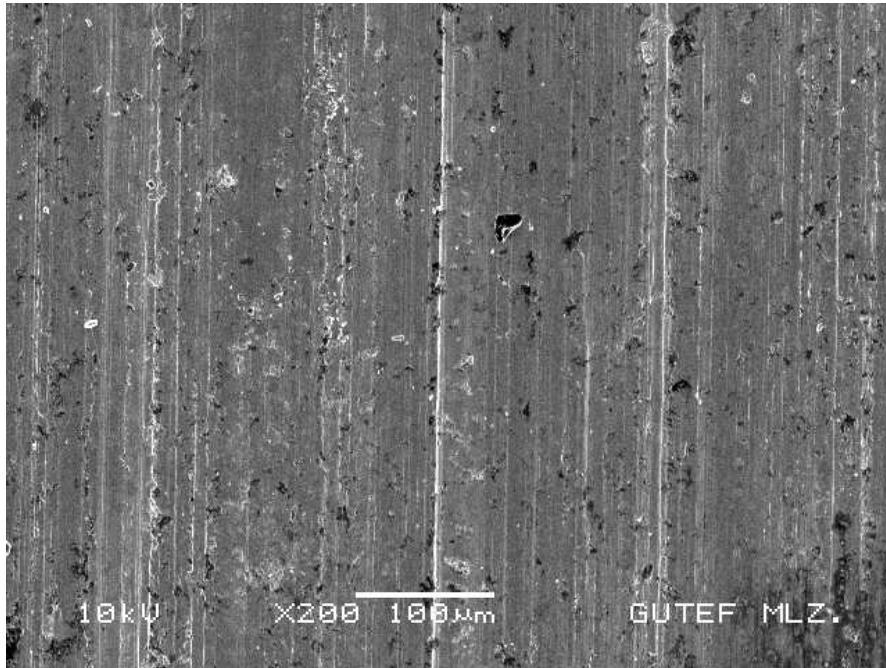


Şekil 8.112. 850 °C’de 2 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin 80 mesh Al_2O_3 zımparada 30 N yük altında aşınmış kenar yüzeyinin X 200 büyütme görüntüsü.

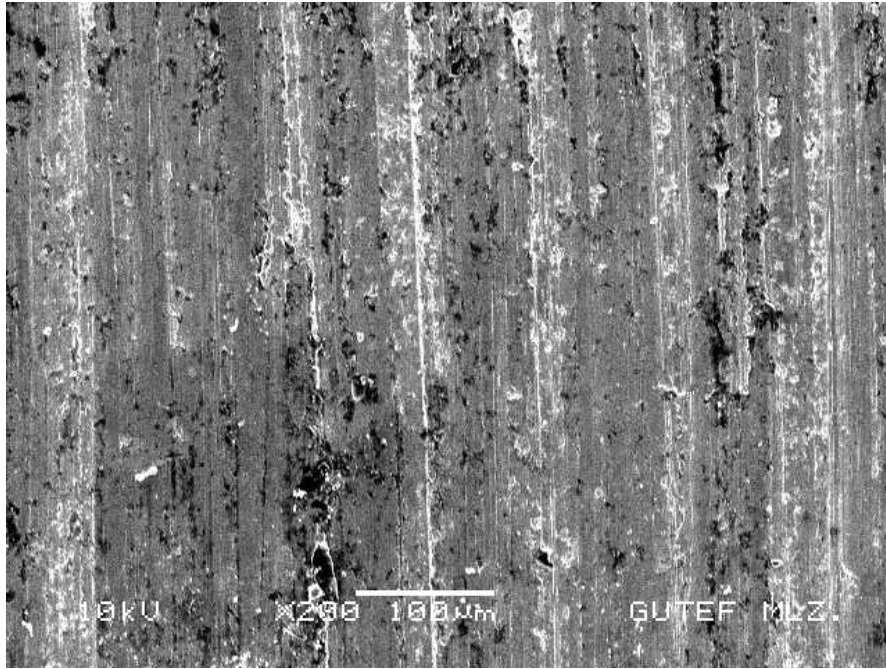
Şekil 8.110 ile 8.112 incelendiğinde, 850 °C’de 2 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin aynı yükte (30 N) 120 mesh aşındırıcı zımparada aşınmış kenar yüzeyinin 80 mesh aşındırıcı zımparada aşınmış kenar yüzeyine göre deformasyon izlerinin ve kırıkların daha az olduğu görülmektedir.



Şekil 8.113. 850 °C’de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin 120 mesh Al₂O₃ zımparada 10 N yük altında aşınmış yüzeyinin X 200 büyütmeli görüntüsü.



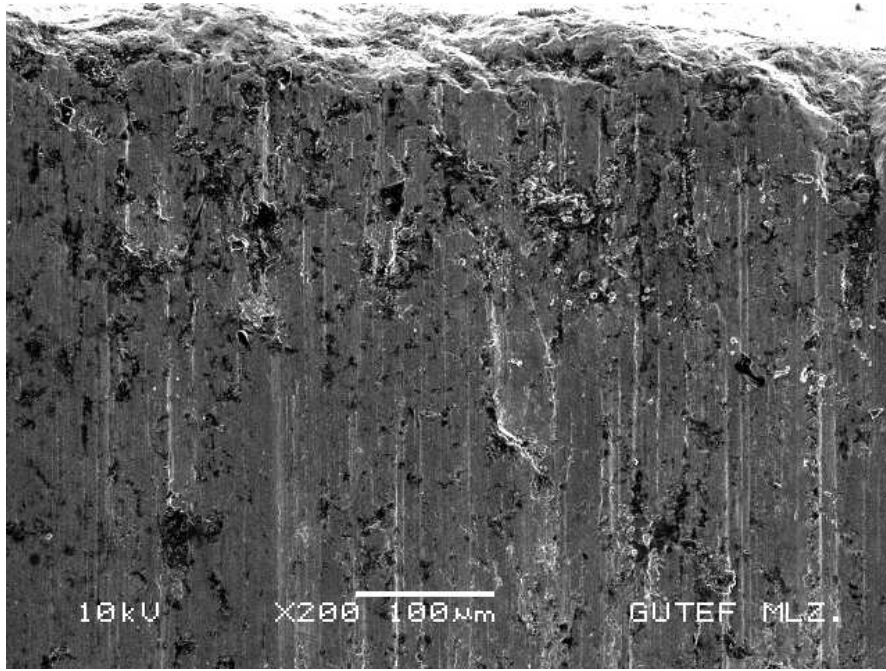
Şekil 8.114. 850 °C’de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin 80 mesh Al₂O₃ zımparada 10 N yük altında aşınmış yüzeyinin X 200 büyütmeli görüntüsü.



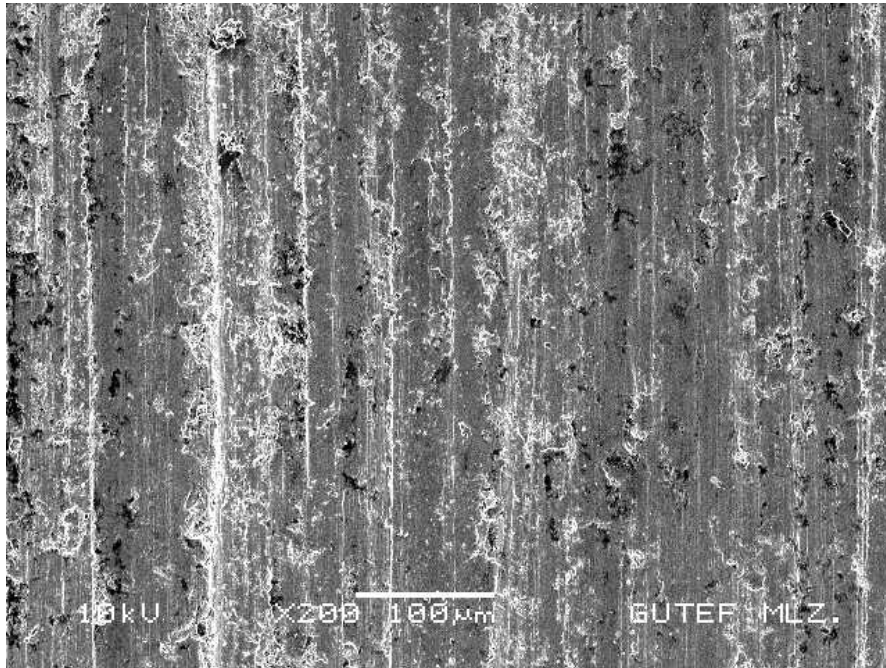
Şekil 8.115. 850 °C’de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin 120 mesh Al_2O_3 zımparada 30 N yük altında aşınmış orta yüzeyinin X 200 büyütmeli görüntüsü.

Şekil 8.109’den 8.115’e kadar incelendiğinde, aynı aşındırıcı zımpara boyutu (120 mesh) ve aynı yükte (30N), 850 °C’de 2 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin aşınmış yüzeylerinin aşınma izlerinin, 850 °C’de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin aşınmış yüzeyindeki aşınma izlerinden daha derin ve geniş olduğu görülmektedir.

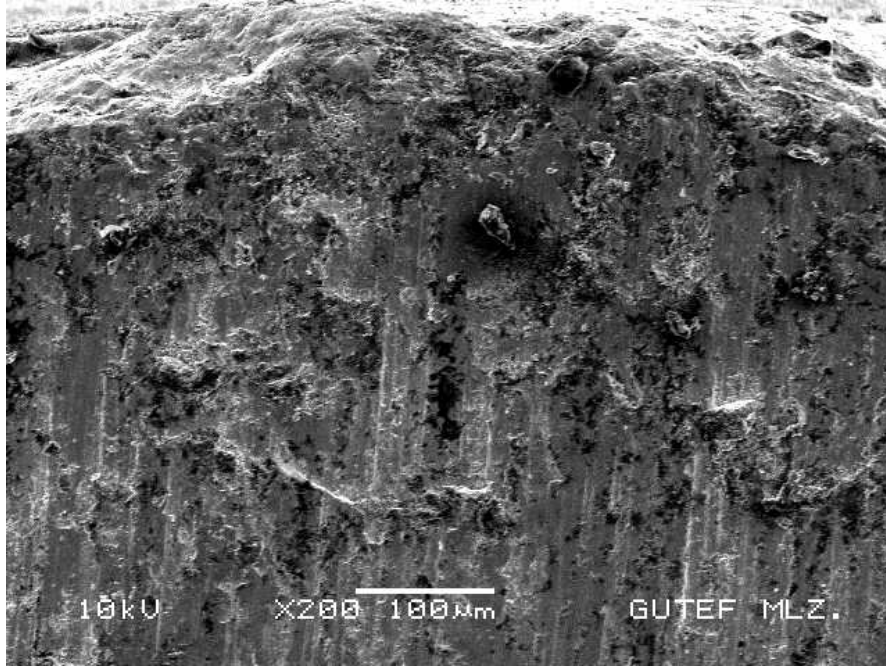
Şekil 8.110 ile 8.116’daki aynı yük (30 N) ve aşındırıcı zımpara boyutundaki (120 mesh) kenarlardan aşındırılmış yüzeyler incelendiğinde, aynı sıcaklıkta artan borlama süresi ile aşınma izlerinin daha ince olduğu görülmektedir.



Şekil 8.116. 850 °C’de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin 120 mesh Al_2O_3 zımparada 30 N yük altında aşınmış kenar yüzeyinin X 200 büyütmeli görüntüsü.



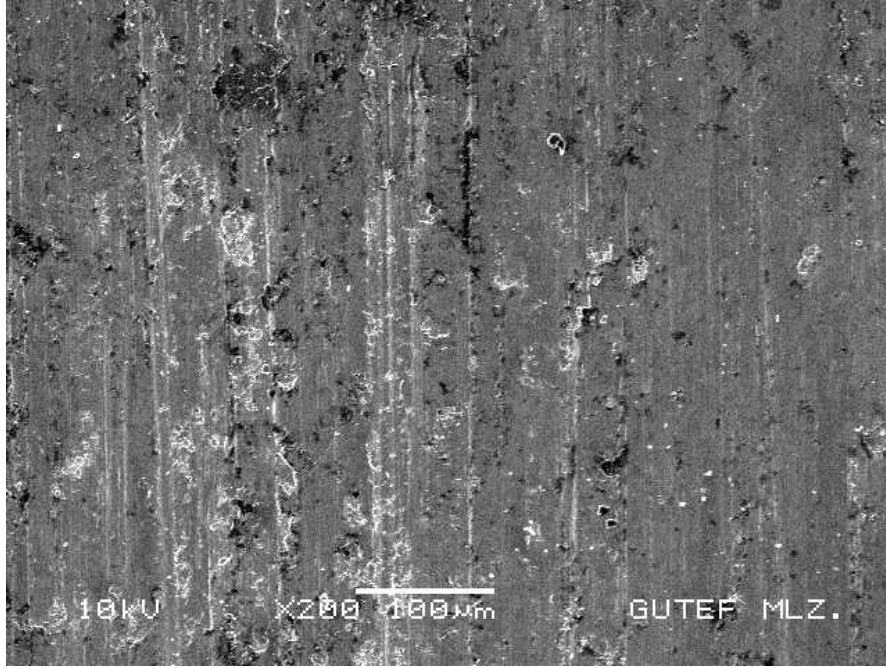
Şekil 8.117. 850 °C’de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin 80 mesh Al_2O_3 zımparada 30 N yük altında aşınmış orta yüzeyinin X 200 büyütmeli görüntüsü.



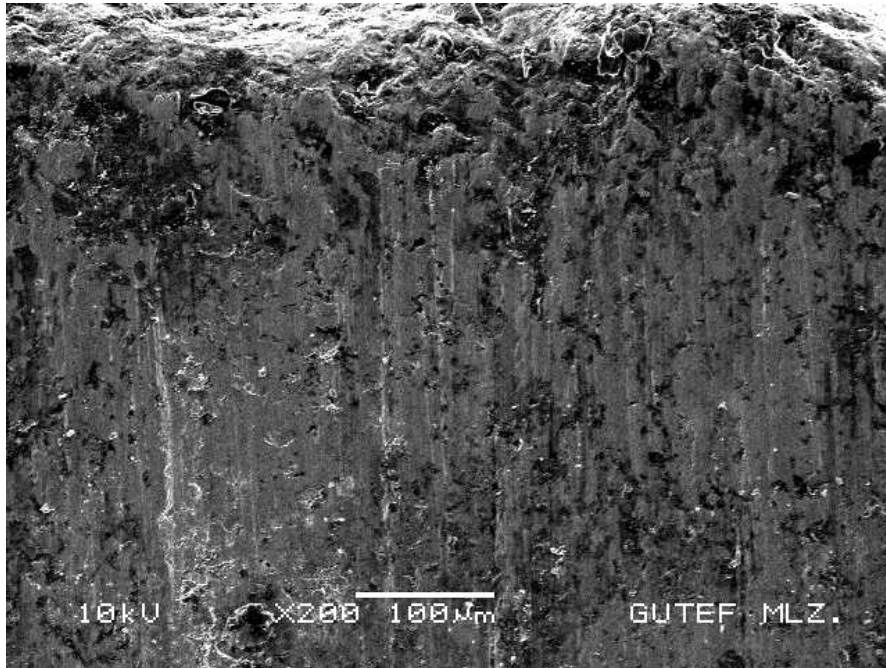
Şekil 8.118. 850 °C’de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin 80 mesh Al_2O_3 zımparada 30 N yük altında aşınmış kenar yüzeyinin X 200 büyütmeli görüntüsü.

Şekil 8.109’den 8.118’e kadar 850 °C’de 2 ve 6 saatlerde borlanmış Hardox 400 çeliğinin aşınmış yüzey görüntüleri incelendiğinde, aynı sıcaklıkta artan borlama zamanı ile aşınma direncinin arttığı aşınma kanallarının 6 saat borlanmış numunede daha ince ve küçük olduğundan anlaşılmaktadır. Bunun düşük sıcaklıklardaki bor katman kalınlığının daha az olmasından kaynaklandığı söylenebilir.

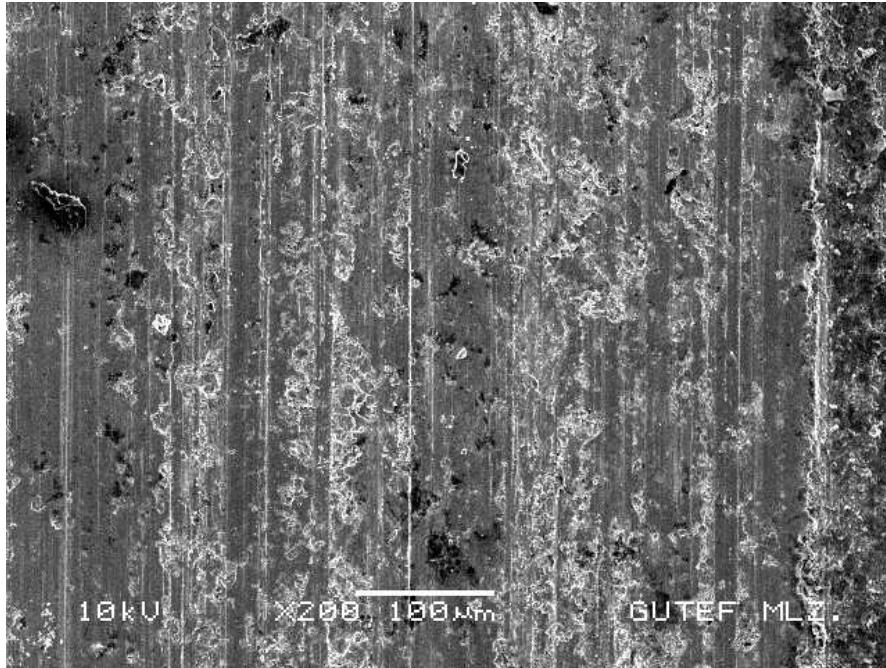
Aşağıda Şekil 8.119’den 8.122’ye kadar 950 °C’de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin aşınmış yüzey görüntüleri verilmiştir.



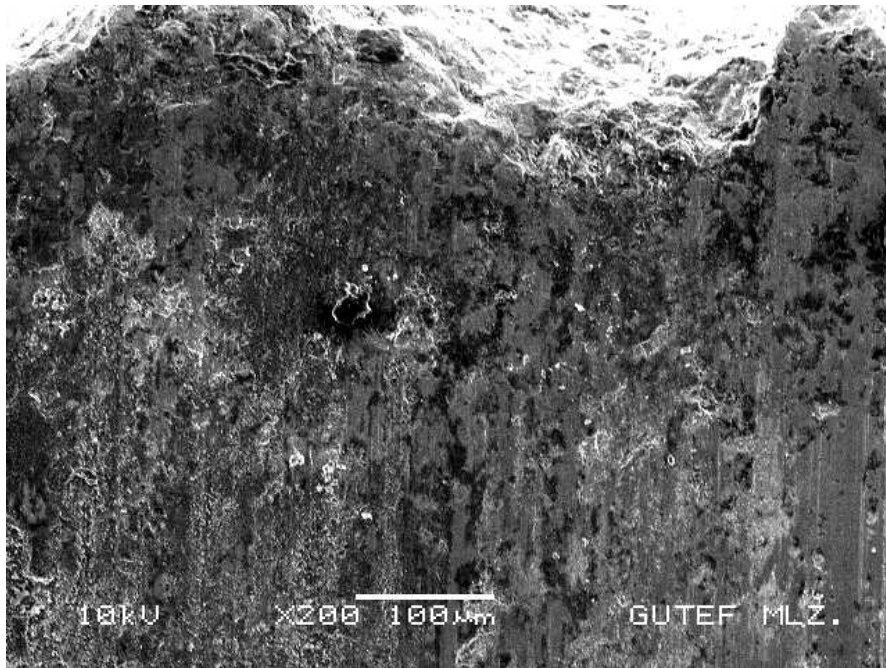
Şekil 8.119. 950 °C’de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin 120 mesh Al_2O_3 zımparada 30 N yük altında aşınmış orta yüzeyinin X 200 büyütmeli görüntüsü.



Şekil 8.120. 950 °C’de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin 120 mesh Al_2O_3 zımparada 30 N yük altında aşınmış kenar yüzeyinin X 200 büyütmeli görüntüsü.



Şekil 8.121. 950 °C’de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin 80 mesh Al_2O_3 zımparada 30 N yük altında aşınmış orta yüzeyinin X 200 büyütmeli görüntüsü.

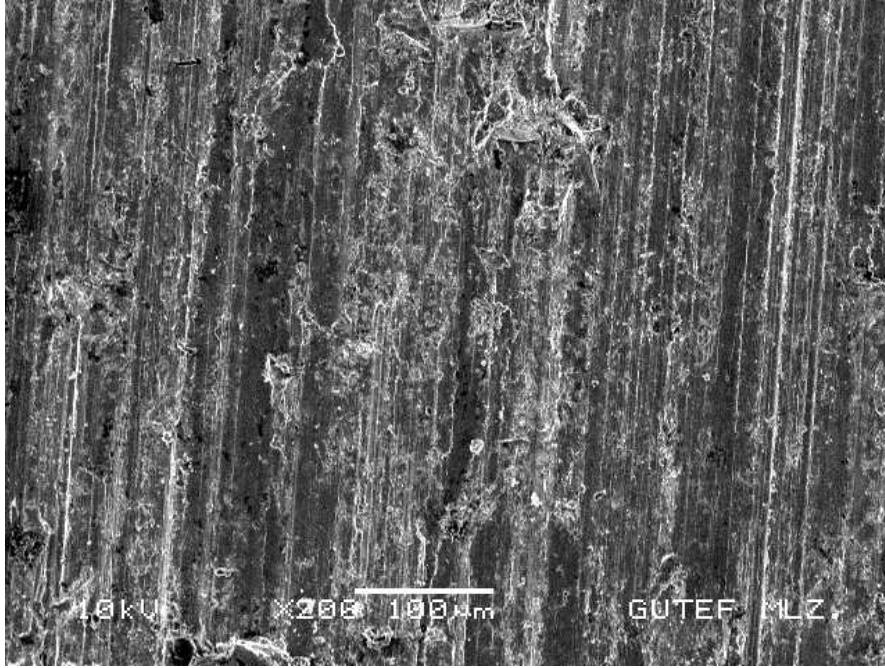


Şekil 8.122. 950 °C’de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin 80 mesh Al_2O_3 zımparada 30 N yük altında aşınmış kenar yüzeyinin X 200 büyütmeli görüntüsü.

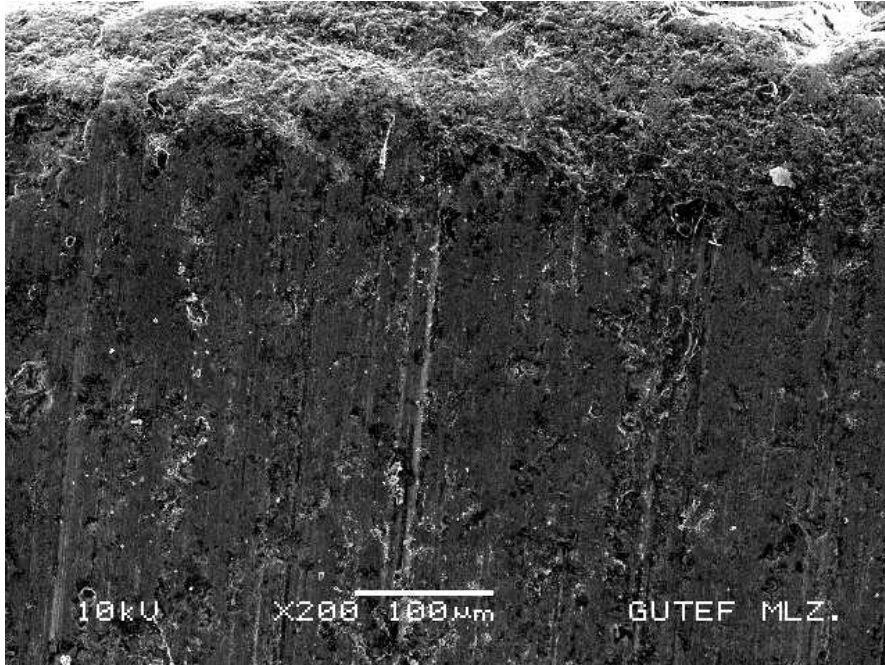
Şekil 8.119'dan 8.122'ye kadar 950 °C'de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin aşınmış yüzey görüntüleri incelendiğinde, aynı yükte aşındırıcı zımpara boyutunun artması ile aşınma kanallarının arttığı, kanalların daha derin ve geniş olduğu görülmektedir. Aynı sıcaklıkta borlama zamanının artması ile de aşınma kanallarının daha ince ve küçük olduğu tespit edilmiştir. Aynı sıcaklık ve sürede borlanmış, aynı zımpara boyutu ve yük altında aşındırılmış numunenin kenarından ve ortasından alınan (Şekil 8.125-8.126), SEM görüntüleri incelendiğinde; kenarlardaki kırılma ve kopmaların, orta kısımlara göre fazla olduğu şeklindedir. Bu da FeB fazının daha gevrek ve kırılgan olduğundan ileri gelmektedir.

Şekil 8.109'dan 8.122'ye kadar 850 °C'de 2 ve 6 saat, 950 °C'de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin aşınmış yüzey görüntüleri incelendiğinde ise en ince ve küçük aşınma kanallarının 850 °C'de 6 saat borlanmış numunede olduğu görülmüştür. 950 °C'de 6 saat borlanmış numune yüzeylerindeki kanalların daha derin ve geniş olduğu tespit edilmiştir. Bununda, artan borlama sıcaklığı ile numune yüzeyindeki gevrek ve kırılgan bir yapıya sahip, FeB fazının oluşmasından ileri geldiğini söyleyebiliriz. Ayrıca borlanmış katmanın kırılganlığı katman kalınlığı ile artacağından [16,116] dolayı 950 °C'de 6 saat borlanmış numunenin katman kalınlığı 280 µm iken 850 °C'de 6 saat borlanmış numunede katman kalınlığı 230 µm olarak bulunmuştur. Kenarlardan alınmış görüntüler incelendiğinde (Şekil 8.116, 8.118, 8.122), en fazla kırılmanın Şekil 8.122'deki 950 °C'de 6 saat borlanmış numunede olduğu, en az kırılganlığın ise Şekil 8.118'deki 850 °C'de 6 saat borlanmış numunede olduğu görülmüştür.

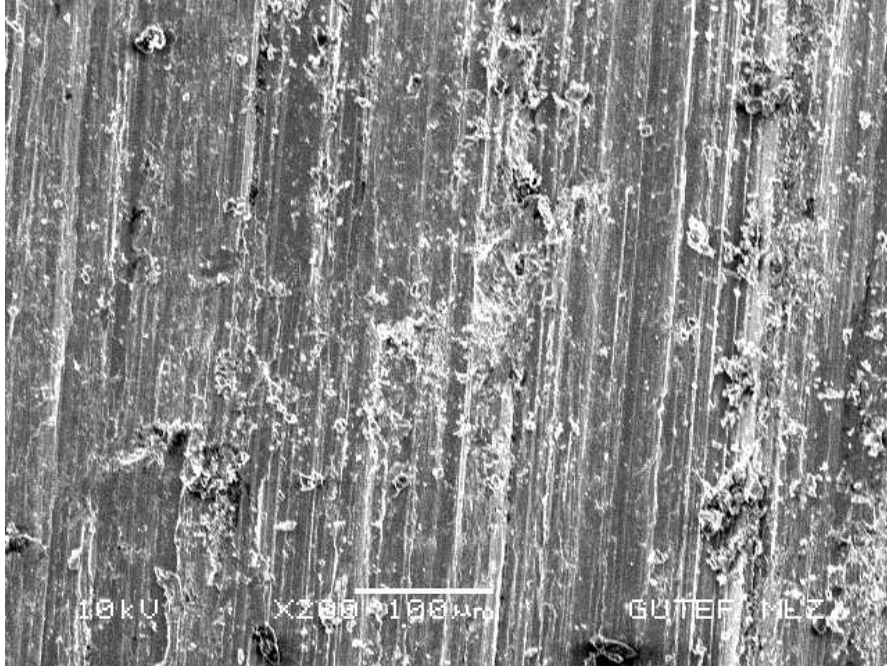
Aşağıdaki Şekil 8.123'den 8.136'ya kadar 850 °C'de 2 ve 6 saat, 950 °C'de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin aşınmış yüzey görüntüleri verilmiştir.



Şekil 8.123. 850 °C’de 2 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin 120 mesh Al_2O_3 zımparada 30 N yük altında aşınmış orta yüzeyinin X 200 büyütmeli görüntüsü.



Şekil 8.124. 850 °C’de 2 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin 120 mesh Al_2O_3 zımparada 30 N yük altında aşınmış kenar yüzeyinin X 200 büyütmeli görüntüsü.



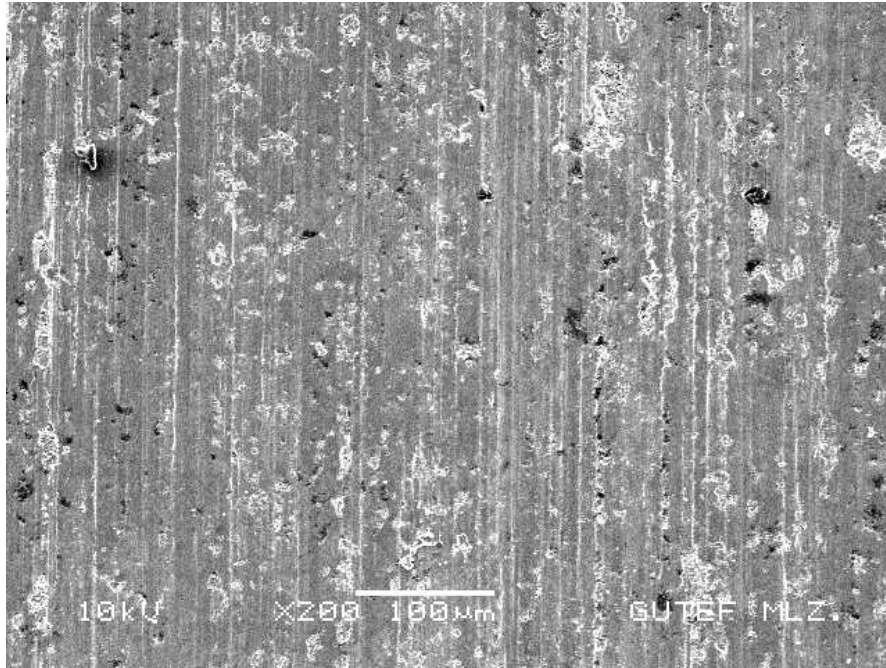
Şekil 8.125. 850 °C’de 2 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin 80 mesh Al_2O_3 zımparada 30 N yük altında aşınmış orta yüzeyinin X 200 büyütmeli görüntüsü.



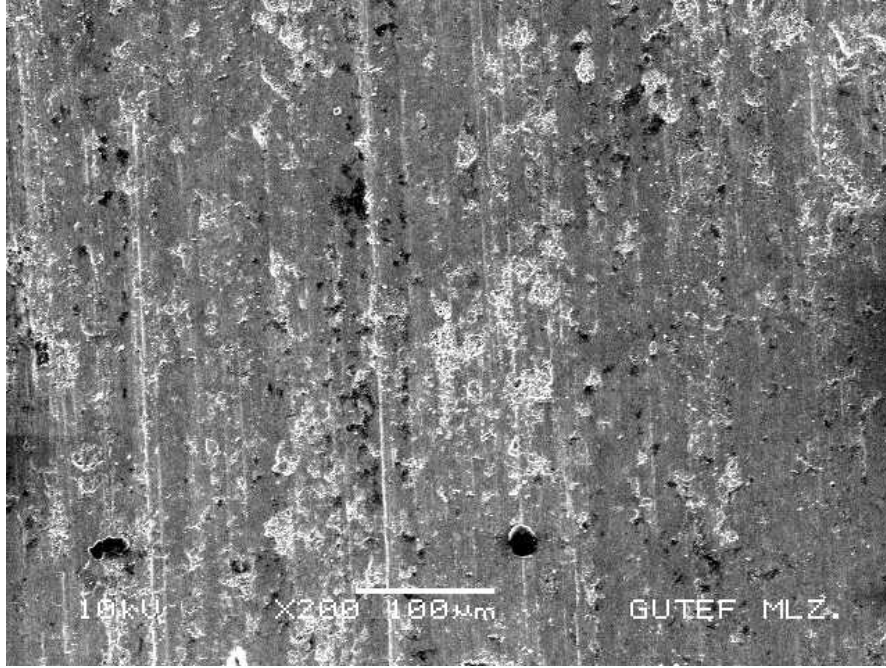
Şekil 8.126. 850 °C’de 2 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin 80 mesh Al_2O_3 zımparada 30 N yük altında aşınmış kenar yüzeyinin X 200 büyütmeli görüntüsü.

Şekil 8.123 ile 8.125 incelendiğinde aynı borlama sıcaklığı ve süresinde zımpara boyutunun artması ile aşınma kanallarının daha derin ve geniş olduğu görülmektedir.

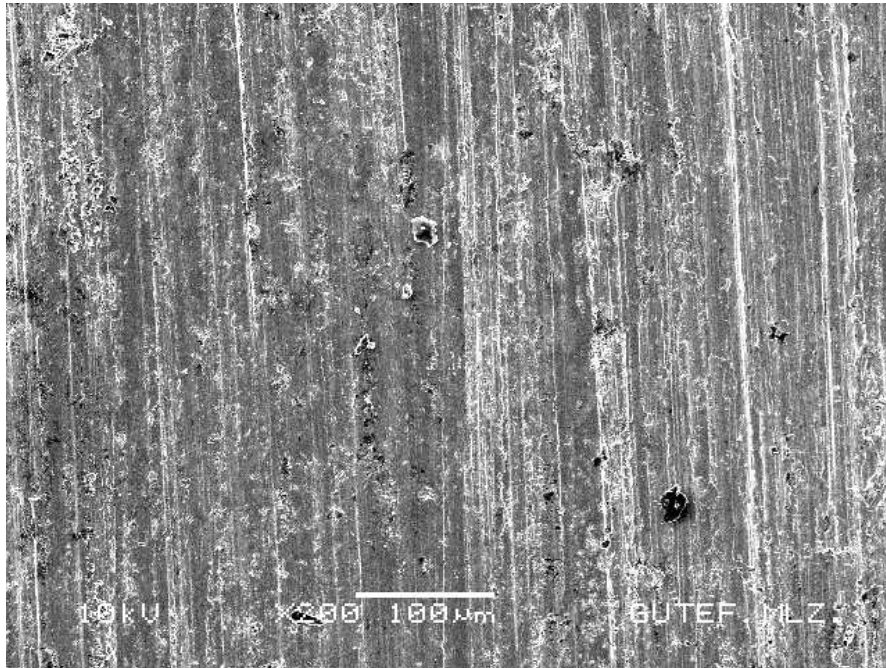
Şekil 8.124 ile 8.126'daki kenardan alınan görüntülerden de görüldüğü gibi aşındırıcı zımpara boyutunun artması ile kırılma ve deformasyonun fazla olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 8.127. 850 °C'de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin 120 mesh Al_2O_3 zımparada 10 N yük altında aşınmış yüzeyinin X 200 büyütmeli görüntüsü.

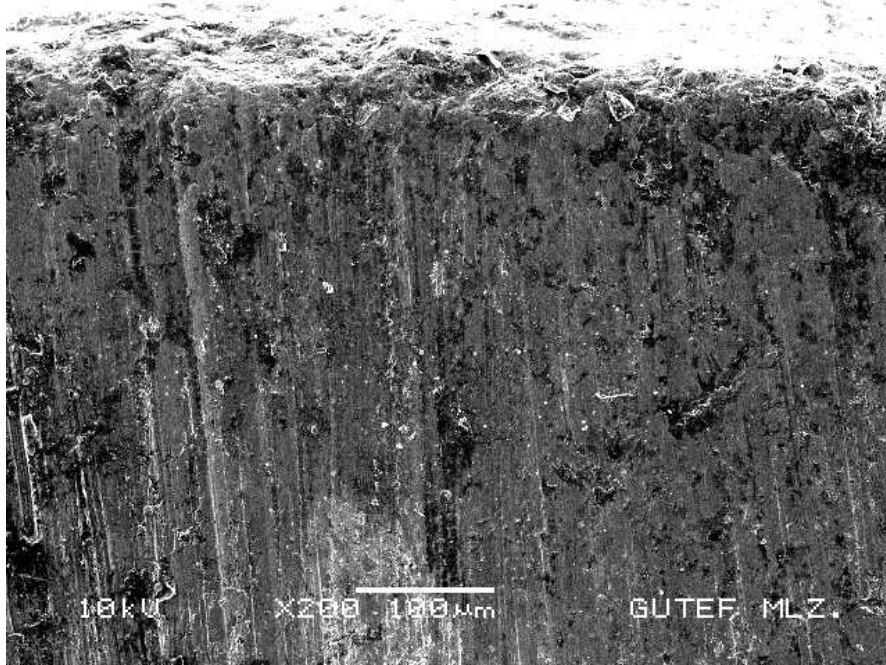


Şekil 8.128. 850 °C’de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin 80 mesh Al₂O₃ zımparada 10 N yük altında aşınmış yüzeyinin X 200 büyütmeli görüntüsü.

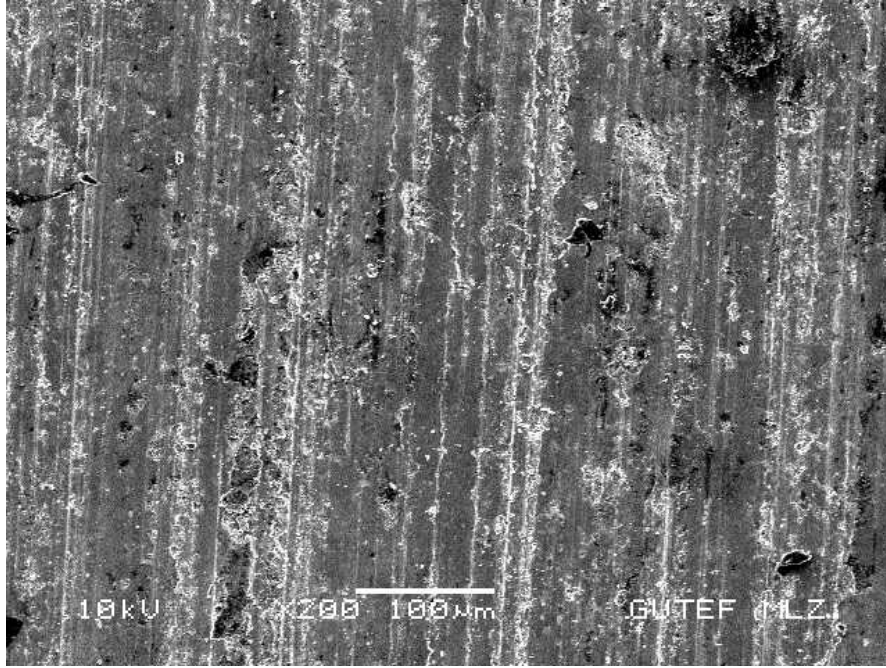


Şekil 8.129. 850 °C’de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin 120 mesh Al₂O₃ zımparada 30 N yük altında aşınmış orta yüzeyinin X 200 büyütmeli görüntüsü.

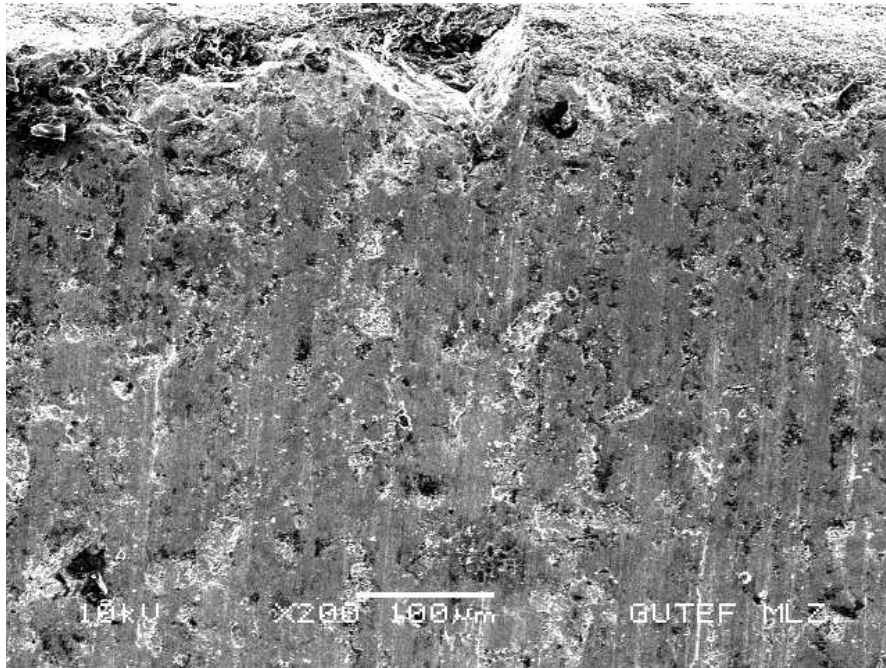
Şekil 8.123'den 8.129'a kadar incelendiğinde, aynı yük ve aşındırıcı zımpara boyutunda artan borlama sıcaklığı ile aşınma izlerinin daha ince ve deformasyonun az olduğu görülmüştür (Şekil 8.125. ve 8.128.). Aynı aşındırıcı zımpara boyutunda artan yük ile birlikte aşınma yüzeylerinde daha derin ve geniş deformasyon izlerine rastlanmıştır (Şekil 8.127 ile 8.129). Aynı sıcaklık ve borlama süresinde aşındırıcı boyutunun artması ile aşınma kanallarının daha derin aşınma oyukları içerdiği görülmektedir (Şekil 8.124 ile 8.125).



Şekil 8.130. 850 °C'de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin 120 mesh Al_2O_3 zımparada 30 N yük altında aşınmış kenar yüzeyinin X 200 büyütmeli görüntüsü.



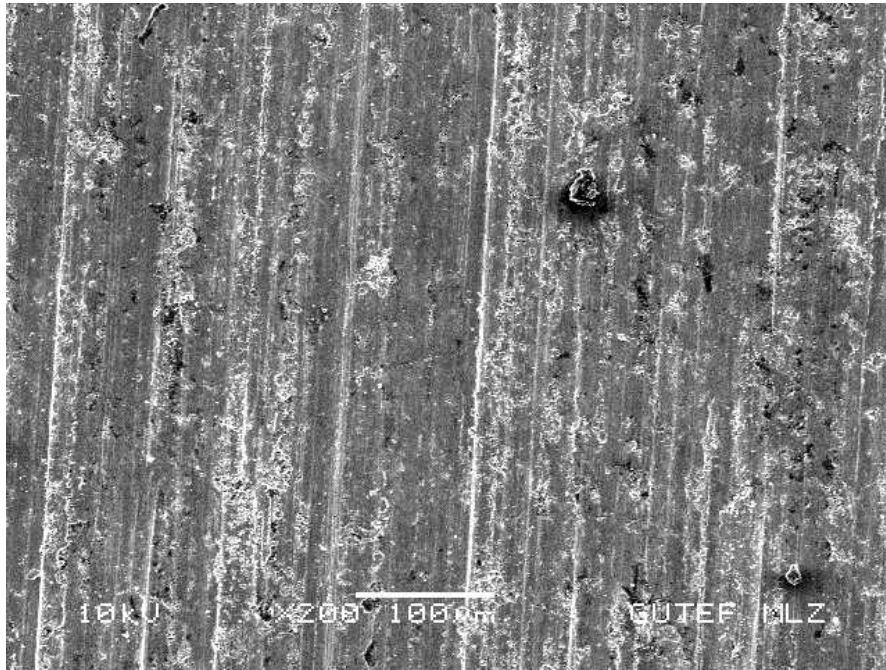
Şekil 8.131. 850 °C'de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin 80 mesh Al_2O_3 zımparada 30 N yük altında aşınmış orta yüzeyinin X 200 büyütmeli görüntüsü.



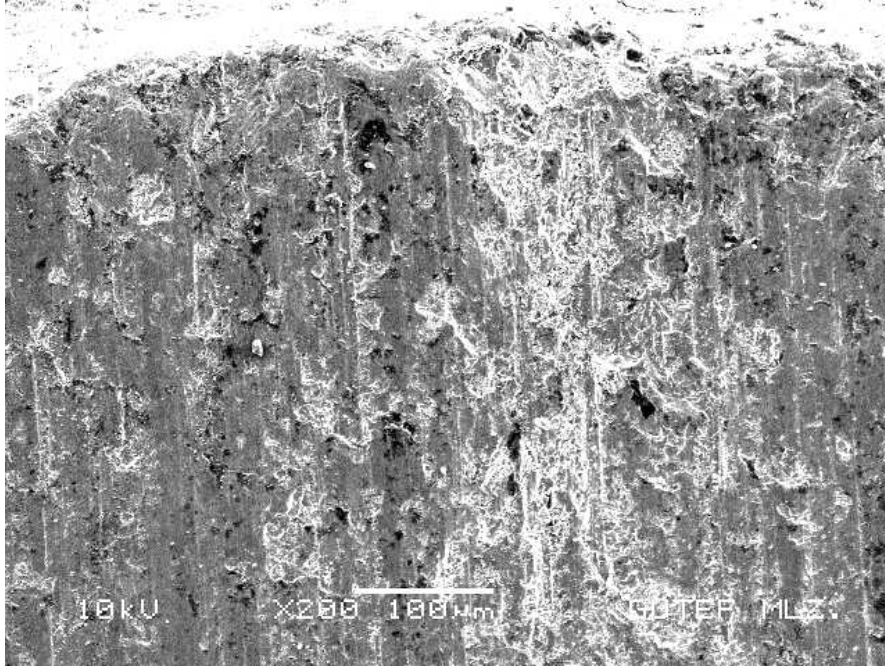
Şekil 8.132. 850 °C'de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin 80 mesh Al_2O_3 zımparada 30 N yük altında aşınmış kenar yüzeyinin X 200 büyütmeli görüntüsü.

Şekil 8.123'den 8.132'ye kadar 850 °C'de 2 ve 6 saat, borlanmış AISI 8620 çeliğinin aşınmış yüzey görüntüleri incelendiğinde, aynı sıcaklıkta artan borlama zamanı ile aşınma direncinin arttığı aşınma kanallarının 6 saat borlanmış numunede daha ince ve küçük olduğundan anlaşılmaktadır. Bunun düşük sıcaklıklardaki bor katman kalınlığının daha az olmasından kaynaklandığını söyleyebiliriz. Kenarlardan alınmış görüntüler incelendiğinde (Şekil 8.124, 8.126, 8.130, 8.132), en fazla kırılmanın Şekil 8.126'daki 850 °C'de 2 saat borlanmış numunede olduğu, en az kırılmanın ise Şekil 8.132'deki 850 °C'de 6 saat borlanmış numunede olduğu görülmüştür. Bu durum yukarıda açıklandığı gibi, aynı sıcaklıkta artan borlama zamanı ile aşınma direncinin arttığı, aşınma kanallarının daha ince ve küçük olduğu görüntülerden de anlaşılmıştır.

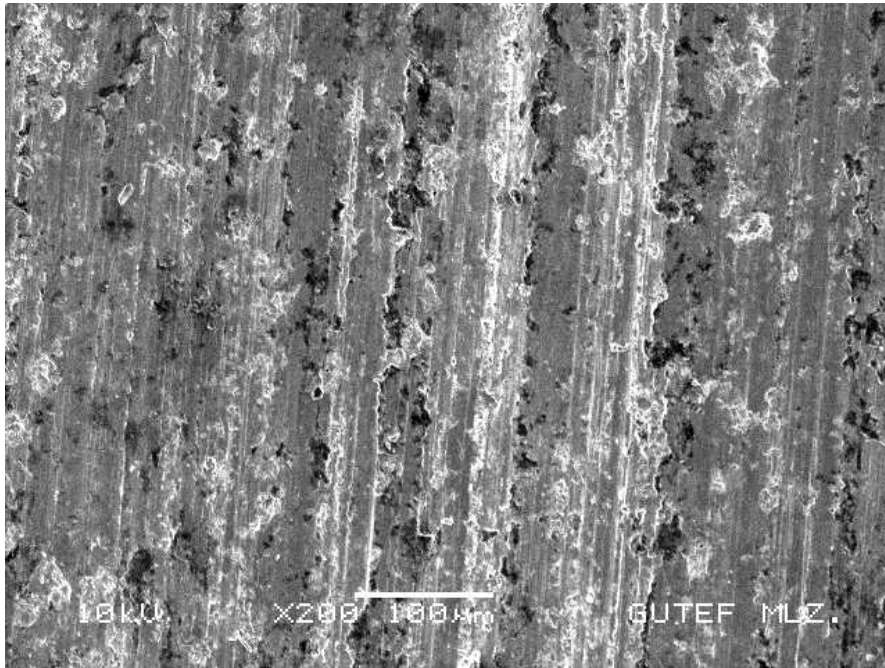
Aşağıda Şekil 8.133'den 8.136'ya kadar 950 °C'de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin aşınmış yüzey görüntüleri verilmiştir.



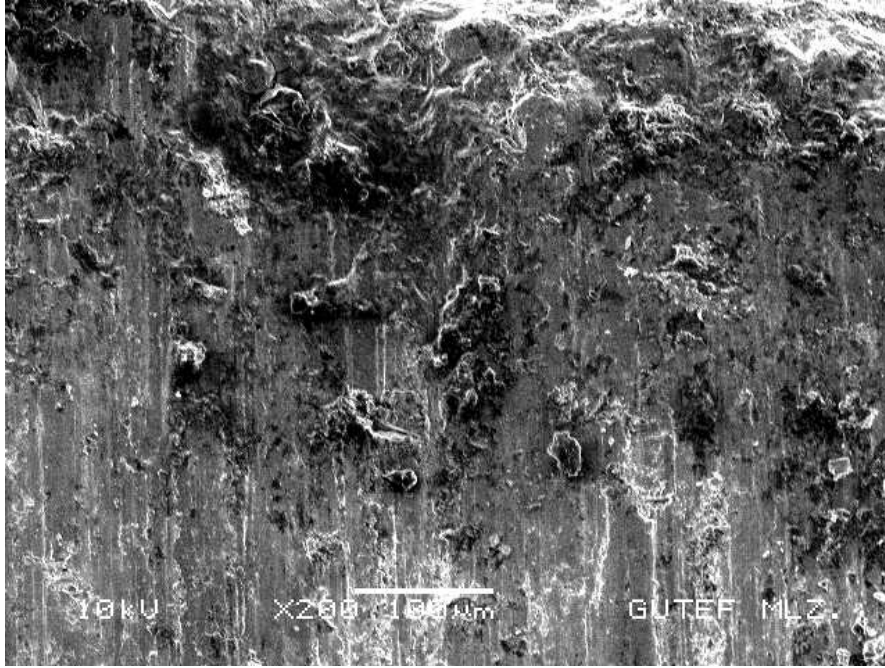
Şekil 8.133. 950 °C'de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin 120 mesh Al_2O_3 zımparada 30 N yük altında aşınmış orta yüzeyinin X 200 büyütmeli görüntüsü.



Şekil 8.134. 950 °C’de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin 120 mesh Al_2O_3 zımparada 30 N yük altında aşınmış kenar yüzeyinin X 200 büyütmeli görüntüsü.



Şekil 8.135. 950 °C’de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin 80 mesh Al_2O_3 zımparada 30 N yük altında aşınmış orta yüzeyinin X 200 büyütmeli görüntüsü.



Şekil 8.136. 950 °C’de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin 80 mesh Al_2O_3 zımparada 30 N yük altında aşınmış kenar yüzeyinin X 200 büyütmeli görüntüsü.

Şekil 8.133’den 8.136’ya kadar 950 °C’de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin aşınmış yüzey görüntüleri incelendiğinde, aynı yükte aşındırıcı zımpara boyutunun artması ile aşınma kanallarının arttığı, kanalların daha derin ve geniş olduğu görülmektedir. Aynı sıcaklıkta borlama zamanının artması ile de aşınma kanallarının daha ince ve küçük olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 8.123’den 8.136’ya kadar 850 °C’de 2 ve 6 saat, 950 °C’de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin aşınmış yüzey görüntüleri incelendiğinde ise en ince ve küçük aşınma kanallarının, 850 °C’de 6 saat borlanmış numunede olduğu görülmüştür. 950 °C’de 6 saat borlanmış numune yüzeylerindeki kanalların, daha derin ve geniş olduğu tespit edilmiştir. Bunun da, artan borlama sıcaklığı ile numune yüzeyindeki gevrek ve kırılğan bir yapıya sahip, FeB fazının oluşmasından ileri geldiği söylenebilir. Ayrıca borlanmış katmanın kırılğanlığı katman kalınlığı ile artacağından [16,116] dolayı, 950 °C’de 6 saat borlanmış numunenin katman kalınlığı 240 μm iken, 850 °C’de 6 saat borlanmış numunede katman kalınlığı 140 μm olarak

bulunmuştur. Kenarlardan alınmış görüntüler incelendiğinde (Şekil 8.130 - 8.136), en fazla kırılmanın Şekil 8.136'daki 950 °C'de 6 saat borlanmış numunede olduğu, en az kırılmanın ise Şekil 8.130'daki 850 °C'de 6 saat borlanmış numunede olduğu görülmüştür.

Her iki çeliğin borlanmış numunelerinin aşınmış yüzeyleri karşılaştırıldığında, 950 °C'de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliğinin aşınma kanallarının daha derin ve geniş olduğu, yüzeydeki kırılma ve deformasyonun fazla olduğu görülmektedir. 850 °C'de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin aşınmış yüzeyleri en ince ve küçüktür. En iyi aşınma direncini 850 °C'de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliği göstermiştir. Artan borlama sıcaklığında numunelerin aşınma direnci, artan borlama zamanı ile artmaktadır. Kanallar 850 °C'de 6 saat borlanmış numunelerde çok daha incedir ve aşınma yüzeyleri daha düzgündür. Numunelerin aşınma direnci aynı borlama zamanında artan borlama sıcaklığı ile azalmaktadır. Kanallar daha yüksek borlama sıcaklığı için daha geniş ve daha derindir.

Şekil 8.97'den 8.136'ya kadar incelendiğinde 30 N yük altında aşındırılmış numunelerdeki aşınma kanallarının daha derin ve geniş olduğu görülmektedir. Aşınma yük arttıkça artmıştır. İzçiler ve Tabur, yapmış oldukları çalışmada yükün artması ile aşınmanın da arttığını söylemişlerdir [165]. Artan yük ile birlikte aşınma kanallarının da daha geniş ve derin olduğu gözlemlenmiştir. 80 mesh aşındırıcı zımpara ile 120 mesh aşındırıcı zımparaların aşındırması olduğu yüzeyler incelendiğinde 80 mesh aşındırıcı zımpara ile aşınmış yüzeylerin aşınma kanallarının daha derin ve kalın oldukları görülmektedir. Burada da aşındırıcının tane yapısının büyük olması aşınma kanallarının geniş ve derin olmasına yol açmaktadır.

Aşınma şekillerinden de anlaşılacağı gibi malzemelerin sertlik değerleri de değiştiğinden aşınma izlerine bakılarak yumuşak malzemelerde beklenildiği gibi aşınmanın fazla olduğu anlaşılmaktadır. Bunun nedeni abrasiv partiküllerin malzemedeki derine batması ve daha çok malzeme kaldırmasıdır [123]. Her iki çelikte de borlanmış numuneler, borlanmamış numunelere göre çok yüksek aşınma direnci göstermişlerdir. Bu durum Hardox 400 çeliğinde yaklaşık 7 kat, AISI 8620

elięinde ise 11 kata yakın bulunmuştur. Bu,da borlamanın çeliklerde abrasiv aşınma direncini artırdığını doğrulamaktadır. Mann, “eliklerde borlamanın abrasiv ve adhesiv aşınma ile başa çıkmakta kullanılan başarılı bir yöntem olduğunu” söylemiştir [17].

9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada AISI 8620 ve Hardox 400 çelikleri katı ortamda borlama tekniği kullanılarak borlanmıştır. Borlama işlemi 850 °C, 900 °C ve 950 °C sıcaklıklarda 2, 4 ve 6 saat sürelerde yapılmıştır. Borlanmış ve borlanmamış numunelerin aşınma davranışları pim-disk test cihazında, aynı koşullarda, farklı yükler altında, farklı aşındırıcılarda ve daima yeni zımpara yüzeyine temas ettirilerek yapılmıştır. Numunelerin elektrik iletkenliği, mekanik özellikleri, sıcaklık ve süreye bağlı olarak çelik yüzeyi ve matris özellikleri, EDS, SEM, optik mikroskobu ve x-ışınları kırınım analizi yardımıyla incelenmiştir. Seçilen çeliklerin borlama sonrasında elde edilen yüzey özelliklerinin belirlenmesi işlemin teknolojik bakımdan önemini ortaya koymak açısından büyük önem taşımaktadır. Bu araştırmada elde edilen bulgulara dayanılarak ulaşılan sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

1. Hazırlanan her iki çelik numune üzerinde yapılan optik mikroskop ve SEM incelemeleri sonucunda, borlama işlemine tabi tutulan bütün numunelerde borür tabakası, kaplama-matris ara yüzeyi ve matris açık bir şekilde ortaya çıkmıştır.

2. Metalografik incelemeler sonucunda borlanmış yüzeylerde üç ayırt edilebilir bölge gözlenmiştir. Bunlar;

- i) En dışta demir borürleri (FeB ve Fe₂B) içeren katman,
- ii) Borür katmanının altında kalan ve borun çelik ile katı hal çözeltisi yaptığı borürlerden düşük sertliğe sahip olup ana metalden daha yüksek sertlik sergileyen difüzyon bölgesi,
- iii) Bordan etkilenmeyen ana malzeme matrisi şeklindedir.

3. SEM ve optik mikroskop görüntüleri incelenmiş, borlanmış çeliklerin yüzeylerindeki borürlerin düzgün dallı bir morfolojiye sahip oldukları görülmüştür. Her iki katman da (FeB, Fe₂B) difüzyon doğrultusunda konumlanmış kolon biçimli kristal yapıya sahiptir.

4. Bor katmanlarının kalınlığının borlama süresi ve sıcaklığa bağlı olarak arttığı görülmüştür. İşlem süresi ile katman kalınlığı arasında parabolik bir ilişkinin olduğu gözlemlenmiştir. Borür tabakasında yer alan demir borürlerden FeB miktarının

yüksek borlama sıcaklığı ve uzun borlama sürelerinde arttığı görülmektedir. Her iki çelik de borür katmanı açısından karşılaştırıldığında, borlanan Hardox 400 çeliğinin borür bölgesinin, AISI 8620 çeliğinin borür bölgesinden çok az miktarda daha kalın olduğu tespit edilmiştir.

5. Tespit edilen sertlik değerlerinin borür fazlarından oluşan kaplama tabakasında en yüksek değerde olduğu, geçiş zonundan itibaren sertliğin düştüğü tespit edilmiştir. Her iki çelik de mikro sertlik açısından karşılaştırıldığında borlanan Hardox 400 çeliğinin borür bölgesinin, AISI 8620 çeliğinin borür bölgesinden fazla sertliğe sahip olduğu tespit edilmiştir. Ancak matris sertliklerine bakıldığında, AISI 8620 çeliğinin matris sertliğinin Hardox 400 çeliğinin matris sertliğinden fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bordan etkilenmeyen çelik matrisi kısmında AISI 8620 çeliğinde bu değer işlemsiz numunenin sertliği ile aynı değerdedir. Hardox 400 çeliğinde ise, işlemsiz numunenin sertliğinin çok altında olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeninin işlemsiz Hardox 400 çelik plakalarının tam sertleştirilmiş olması ve borlamadan sonra havada soğutulmuş olmasıdır.

6. EDS spektrumu analizindeki her bir noktadaki elementlerin dağılımının belirgin bir farklılık göstermediği anlaşılmıştır.

7. Çeliklerin kırılma tokluğu değerleri borlama süresi ve sıcaklığa bağlı olarak değişiklik göstermiştir. En yüksek kırılma tokluğu değerinin 850 °C sıcaklıkta borlanan numunelerde olduğu tespit edilmiştir. Borlama sıcaklığı ve süresine bağlı olarak, kırılma tokluğu değerlerinin düşmesi muhtemelen daha gevrek karaktere sahip olan FeB fazının oluşumunun artması ve FeB - Fe₂B ara yüzeyinde her iki fazın farklı özelliklere sahip olmasından ve kılcal çatlakların varlığından kaynaklanmaktadır. Her iki çelik de kırılma direnci açısından karşılaştırıldığında,

borlanan Hardox 400 çeliğinin kırılma direncinin AISI 8620 çeliğinin kırılma direncinden biraz daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

8. Sertlik arttıkça kırılma direnci düşmüş ve borlanmış katmanın kırılma direnci katman kalınlığı ile artmıştır. 850 °C sıcaklıkta borlanan çeliğin yüzeyinde oluşan borürlerin kırılma direncinin 950 °C sıcaklıkta borlanan çeliğin kırılma direncinden fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum SEM analizleriyle doğrulanmıştır.

9. Her iki çeliğin mikro yapı görüntüleri incelendiğinde borlama sonrasında tane irileşmesinin olduğu tespit edilmiştir. Borür tabakalarının hemen altında oldukça büyük olan ferrit ve perlit yapılarının olduğu görülmüştür. Tane irileşmesinin sebebi, bu bölgedeki sıcaklığın rekristalizasyon sıcaklığına ulaşması sonucu atomların yeniden düzenlenmesi ile açıklanabilir.

10. Her iki çelikte de aynı koşullarda, borlama süresinin ve sıcaklığının elektrik iletkenliğini önemli ölçüde etkilemediği deney sonucunda anlaşılmıştır.

11. Aşındırıcının boyutunun, uygulanan yükün ve aşınma yolunun aşınma direncini önemli ölçüde etkilediği bir kez daha görülmüştür.

12. Yükün artışı ile birlikte aşınmanın da doğrusal olarak arttığı görülmüştür.

13. Borlanmış çeliklerin yüzeyinde oluşan borür tabakasının aşınma oranı, borlama sıcaklığının artmasına bağlı olarak artış göstermiştir. Aynı borlama sıcaklığında numunelerin aşınma direnci artan borlama zamanı ile artmıştır.

14. Borlama işlemi her iki çeliğin aşınma dayanımlarında önemli ölçüde artışa sebep olmuştur.

15. Aşınma izlerinin optik mikroskop ve SEM görüntüleri incelendiğinde 950 °C sıcaklıkta borlanan çeliğin aşınmış yüzeylerinde iz boyunca derin çizgiler görülmektedir. Bu derinliklerin artan yüke ve aşındırıcının tane boyutuna göre daha

derin ve geniş olduğu görülmüştür. Kanallar 850 °C’de 6 saat borlanmış numunelerde çok daha incedir ve aşınma yüzeyleri daha düzgündür.

16. X-ışını kırınım analizleri sonucunda, borlanmış Hardox 400 çeliğinin borür tabakasında FeB, Fe₂B, Fe₃B türünde borürler oluşmuştur. Borlanmış AISI 8620 çeliğinin borür tabakasında FeB, Fe₂B, türünde borürler oluşmuştur. Yine analiz neticesinden anlaşıldığı üzere FeB fazının sıcaklığın artması ile daha kararlı durumda olduğu görülmüştür. Sıcaklığın artması ile borür tabakasındaki fazların kararlılığı da artmaya başlamıştır.

Tüm bu veriler ve sonuçların ışığında şunlar söylenebilir.

Matematiksel modellemeler yapılarak elde edilen sonuçlar deneysel çalışmanın verileriyle karşılaştırılabilir.

Aynı çeliklerin borlama işlemi sonrasında korozyon ve oksidasyon özellikleri araştırılabilir.

Borür tabakalarının büyüme termodinamiği ve kinetiği incelenebilir.

Borlama yöntemleri değiştirilerek farklı borlama yöntemlerinin borür tabaka yapısı üzerine olan etkisi araştırılarak, özellikle tek fazlı Fe₂B borür tabakası oluşturulmaya çalışılabilir.

Gelişen teknolojiye kullanım olanağı bulan ve ileri teknolojiye de geniş bir kullanım alanı bulacak olan bor ve borürler; gösterdikleri yüksek sertlik, üstün aşınma direnci, iyi mekanik özellikleri ile diğer karbürlerle tercih edilecektir. Bu nedenle farklı kristal kafeslere sahip olan bor tozları, değişik borlama yöntemleri ile araştırma ve incelemeye değer bir konudur.

KAYNAKLAR

1. İnternet :Boğaziçi Üniversitesi, “heat treatment.doc”
http://www.boun.edu.tr/undergraduate/engineering/mechanical_engineering.html
(2002).
2. Ozcatalbas Y., Ercan F., “The effects of heat treatment on the machinability of mild steels” *Journal of Materials Processing Technology*, 136: 227–238 (2003).
3. İnternet: Heat Treatment Procedure Qualification Final Technical Report The Pennsylvania State University University Park, PA, Work Performed Under Contract No. DE-FC07-99ID13841, Work Prepared for U.S. Department of Energy, <http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/836878-AegKF8/836878.PDF>
(2001).
4. İnternet : Media wiley, “Part 1 Materials”, “http://media.wiley.com/product_data/excerpt/03/04714499/0471449903.pdf” (2002).
5. Massachusetts Institute of Technology Department of Mechanical Engineering Cambridge, MA 02139.002 Mechanics and Materials II Spring 2004 Laboratory Module No. 5 Heat Treatment of Plain Carbon and LowAlloy Steels:Effects on Macroscopic Mechanical Properties, “Heat treatment of carbon steel and low alloy steel.pdf” (2004).
6. Jokhio, M. H., Memon, S. A., Sangi, M. J., “Effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of low carbon SEA 1010 steel” Quaid-E-Awam Universty Research, *Journal of Engeenering Science and Technology* January-June, 1 (1): 78-85, (2000).
7. Yıldızlı, K., “Borlamanın çeliklerde eroziv aşınma davranışına olan etkilerinin deneysel olarak incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri, 2-33, (2002).
8. Martini, C., Palombarini, G., Poli G., Prandstraller, D., “Sliding and abrasive wear behaviour of boride coatings”, *Wear*, 256: 608-613, (2004).
9. Bejar, M. A., Moreno, E., “Abrasive wear resistance of boronized carbon and low-alloy steels”, *Journal Of Materials Processing Technology*, 173: 352-358, (2006).
10. Wendong, W., Sangong, Z., Xinlai, H. E.,” Diffusion Of Boron In Alloys”, *Acta Metallurgica Mater.* 43 (4) : 1693-1699, (1995).

11. Çelebi, G., İpek M., Bindal, C., Ücisik, A. H., “Some mechanical properties of borides formed on AISI 8620 steel”, *Materials Forum*, 29-Published, 456-460, (2005).
12. Venkataraman B., Sundararajan, G., “The high speed sliding wear behaviour of boronied medium carbon steel”, *Surface and Coat. Technol.*, 73 : 177-184, (1995).
13. Habig K.H., Chatterjee-Fischert R., “Wear behaviour of boride layers alloyed steels”, *Tribology International*, August, 209-215, (1981).
14. Wang, A.G., Hutchings, I.M., “Mechanisms of abrasive wear in a boronized alloy”, *Wear*, 124: 149-163, (1988).
15. Dybkov, V. I., Lengauer, W., Barmak, K., “Formation of boride layers at the Fe-10% Cr alloy-boron interface”, *Journal of Alloys and Compounds*, 398: 113-122, (2005).
16. Meriç, C., Şahin, S., Backir, B., Köksal, N.S., “Investigation of the boronizing effect on the abrasive wear behaviour in cast irons”, *Materials and Design*, 27: 751-757, (2006).
17. Mann, B.S., “Boronizing of cast martensitic chromium nickel stainless steel and its abrasion and cavitation-erosion behaviour”, *Wear*, 208: 125-131, (1997).
18. Jain, V., Sundararajan, G., “Influence of the pack thickness of the boronizing mixture on the boriding of steel”, *Surface and Coat. Technol.*, 149: 21-26, (2002).
19. Subrahmanyam, J., “Wear studies on boronized mild steel”, *Wear*, 95: 287-292, (1984).
20. Budinski, K. G., “The wear resistance of diffusion treated surfaces”, *Wear*, 162-164 (2): 757-762, (1993).
21. Eyre, T. S., “Effect of boronising on friction and wear of ferrous metals”, *Wear*, 34 (3) : 383-397, (1975).
22. Lakovou, R., Bourithis, L., Papadimitriou, G., “Synthesis of boride coatings on steel using plasma transferred arc (PTA) Process and its wear performance”, *Wear*, 252: 1007-1015, (2002).

23. Yoon, J. H., Jee, Y. K., Lee, S. Y., "Plasma paste boronizing treatment of the stainless steel AISI 304", *Surface and Coatings Technology*, 112: 71-75, (1999).
24. Hunger, H. J., Trute, G., "Boronizing to produce wear-resistant surface layers", *Heat Treatment of Metals*, 2: 31-39, (1994).
25. Lin, H. R., Gwo-Hwa, C., Hardenability effect of boron on carbon steels, *Materials Science and Technology*, 3 : 855-859, (1987).
26. Kuper, A., Qiao, X., Stock, H. R., Mayr, P., "A novel approach to gas boronizing", *Surface and Coatings Technology*, 130: 87-94, (2000).
27. Cong-Xin, X., Meng-Lan, O., "A mechanical explanation for the influence of residual stress on the wear resistance of borided steel", *Wear*, 137 (2) : 151-159, (1990).
28. Genel, K., Özbek, İ., Bindal, C., "Kinetics of boriding of AISI W1 steel", *Materials Science And Engineering A*, 347 (1-2) : 311-314, (2003).
29. Kulka, M., Pertek, A., "The importance of carbon content beneath iron borides after boriding of chromium and nickel-based low-carbon steel", *Applied Surface Science*, 214 (1-4) : 161-171, (2003).
30. Rie, K.-T., "Recent advances in plasma diffusion processes", *Surface and Coatings Technology*, 112 (1-3) : 56-62, (1999).
31. Lin, L., Han, K., "Optimization of surface properties by flame spray coating and boriding", *Surface and Coatings Technology*, 106 (2-3) : 100-105, (1998).
32. Genel, K., Özbek, İ., Kurt, A., Bindal C., "Boriding response of AISI W1 steel and use of artificial neural network for prediction of borided layer properties", *Surface and Coatings Technology*, 160 (1) : 38-43, (2002).
33. Uzunov, N., Ivanov, R., "Aluminothermic powder boriding of steel", *Applied Surface Science*, 225 (1-4) : 72-77, (2004).
34. Goeuriot, P., Thévenot, F., Driver, J. H., Magnin, T., "Methods for examining brittle layers obtained by a boriding surface treatment (borudif)", *Wear*, 86: 1-10, (1983).

35. Takeuchi, E., Fujii, K., Katagiri, T., “Sliding wear characteristics of gas boronized steel”, *Wear*, 55: 121-130, (1979).
36. Uetz, H., Wlassow, W., “Kinetik und mechanismen des Verschleisses von boridschichten by trockener gleitreibung”, *Wear*, 64: 231-243, (1980).
37. Davis, J. A., Wilbur, P. J., Williamson, D. L., Wei, R. , Vajo, J. J., “Ion implantation boriding of iron and AISI M2 steel using a high-current density, low energy, broad-beam ion source”, *Surface and Coatings Technology*, 103-104, 52-57, (1998).
38. Nam, K. S., Lee, S. R., Lee, K. H., Kwon, S. C., “A study on plasma-assisted boriding of steels”, *Surface and Coatings Technology*, 98 (1-3) : 886-890, (1998).
39. Wilbur, P. J., Davis, J. A., Williamson, D. L., Vajo, J. J., Wei, R., “High current-density broad-beam boron ion implantation”, *Surface and Coatings Technology*, 96 (1) : 52-57, (1997).
40. Yan, P. X., Wei, Z. Q., Wen, X. L., Wu, Z. G., Xu, J. W., Liu, W. M., Tian, J., “Post boronizing ion implantation of C45 steel”, *Applied Surface Science*, 195 (1-4) : 74-79, (2002).
41. Yu, L. G., Khor, K. A., Sundararajan, G., “Boriding of mild steel using the spark plasma sintering (SPS) technique”, *Surface and Coatings Technology*, 157 (2-3) : 226-230, (2002).
42. Ge, C. L., Ye, R. C., “Research on self-propagating eutectic boriding”, *Journal of Materials Processing Technology*, 124 (1-2) : 14-18, (2002).
43. Man, W. D., Wang, J. H., Ma, Z. B., Wang, C. X., “Plasma boronitriding of WC (Co) substrate as an effective pretreatment process for diamond CVD”, *Surface and Coatings Technology*, 171 (1-3) : 241-246, (2002).
44. Gidikova, N., “Vanadium boride coatings on steel”, *Materials Science and Engineering*, A 278 : 181-186, (2000).
45. Bourithis, L., Papaefthymiou, S., Papadimitriou, G. D., “Plasma transferred arc boriding of a low carbon steel: microstructure and wear properties”, *Applied Surface Science*, 200 (1-4) : 203-218, (2002).

46. Selçuk, B., İpek, R., Karamış, M. B., Kuzucu, V., “An investigation on surface properties of treated low carbon and alloyed steels (boriding and carburizing)”, *Journal of Materials Processing Technology*, 103: 310-317, (2000).
47. Rebholz, C., Leyland, A., Schneider, J. M., Voevodin, A. A., Matthews, A., “Structure, hardness and mechanical properties of magnetron-sputtered titanium-aluminium boride films”, *Surface and Coatings Technology*, 120 : 412-417, (1999).
48. Bindal, C., “Az alaşımlı ve karbon çeliklerinde borlama ile yüzeye kaplanan borürlerin bazı özelliklerinin tesbiti”, Doktora Tezi, *İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 4-35, (1991).
49. Özsoy, A., “Çeliğin borlanması borür tabakası, geçiş zonu ve ana matriksin özelliklerinin iyileştirilmesi”, Doktora Tezi, *Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, 2-11, (1991).
50. Selçuk, B., “Borlanmış AISI 1020 ve 5115 çeliklerinin sürtünme ve aşınma davranışlarının incelenmesi”, Doktora Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri, 47-70, (1991).
51. Şahin, S., “Katı borlama yöntemi ile ferrobör üretimi ve özelliklerinin belirlenmesi”, Doktora Tezi, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Manisa, 37-39, (1999).
52. Bozkurt, N., “Bor yayınımla çeliklerde yüzey sertleştirme”, Doktora Tezi, *İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2-17, (1984).
53. Şen, Ş., “Termokimyasal borlama işlemiyle AISI 5140, AISI 4140, ve AISI 4340 çeliklerinin yüzey performanslarının geliştirilmesi”, Doktora Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 3-40, (1998).
54. Şen, U., “Küresel grafitli dökme demirlerin borlanması ve özellikleri”, Doktora Tezi, *İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 6-74, (1997).
55. Özbek, İ., “Borlama yöntemiyle (AISI M50, AISI M2) yüksek hız çeliklerinin ve W1 çeliğinin yüzey performanslarının geliştirilmesi”, Doktora Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 6-54, (2000).
56. Taşçı, A., “Borlanmış çeliklerin aşınma ve korozyon dayanımları”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 3-16, (1993).

57. Akgündüz, T., “Çelikte alaşım elementi olarak bor ve borlama ile yüzey sertleştirme”, Yüksek Lisans Tezi, **İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 11-44, (1991).
58. Uzun, H. A., “Borlama ile yüzeyleri sertleştirilen çeliklerin aşınma ve korozyona karşı dayanımları”, Yüksek Lisans Tezi, **Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Isparta, 5-39, (2002).
59. Yapar, U., “Düşük ve orta karbonlu çeliklerin termokimyasal borlama ile yüzey özelliklerinin geliştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 4-53, (2003).
60. Çifci, C., “Sade karbonlu çeliklerin borlanması, borür tabakası özelliklerine, karbon miktarının etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 8-54, (1999).
61. Yılmaz, S. S., “Çeliklerde bor ile yüzey sertleştirme”, Yüksek Lisans Tezi, **Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Manisa, 6-23, (1997).
62. Bağcı, B., “Borlanmış dökme demirlerin aşınma davranışının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Manisa, 11-21, (2001).
63. Yünker, U., “Borlanmış çeliklerin aşınma davranışlarının belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Manisa, 28-44, (2000).
64. Tezcan, R., “Borlama işlemi ve endüstriyel uygulamaları”, Yüksek Lisans Tezi, **Osman Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Eskişehir, 4-24, (1996).
65. Nair, F., “Koruyucu gaz atmosferinde macun borlama tekniği ile çelik yüzeylerinin sertleştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kayseri, 24-43, (1996).
66. Türktekin, M., “H13 sıcak iş takım çeliklerine borlama ve nitrüleme işlemlerinin birlikte uygulanması”, Yüksek Lisans Tezi, **Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kayseri, 25-36, (1998).
67. Ayter, T., “Borlama işleminin çeliklerin yüzey kalitesi ve aşınma davranışına etkisinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Manisa, 14-32, (2005).

68. Uluköy, A., “21NiCrMo₂ çeliğinden yapılmış dişli çarklara karbürleme ile beraber borlama işleminin uygulanması”, Yüksek Lisans Tezi, **Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Denizli, 29-52, (2005).
69. Çetin, M., “Borlanmış hadfield çeliklerinin aşınma dayanımının incelenmesi ”, Yüksek Lisans Tezi, **Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kütahya, 3-36, (2003).
70. Çeğil, Ö., “AISI 8620 çeliğinin bor-vanadyumlanması ve yüzey özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Sakarya, 13-29, (2002).
71. Şimşek, M., “İçten yanmalı motorlarda borlama ile mukavemet özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Isparta, 22-54, (2005).
72. Karaman, Y., “Endüstriyel borlama ve tekstil endüstrisinde bir uygulama”, Yüksek Lisans Tezi, **Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Isparta, 37-63, (2003).
73. Uslu, İ., “AISI 1040 ve AISI P20 kalıp çeliklerinin borlama kinetiği”, Yüksek Lisans Tezi, **Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Sakarya, 4-26, (2004).
74. Karakullukçu, F., “Dekarbürize işleminin AISI H13 çeliğinin borlanma davranışına etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, **Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Sakarya, 2-24, (2002).
75. Çelebi, G. F., “31CrMoV9 ve 34CrAlNi7 çeliklerinin borlama kinetiklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Sakarya, 13-56, (2005).
76. Selam, M., “Borlanmış gri dökme demirin aşınma davranışının deneysel araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, **Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kayseri, 13-27, (1996).
77. Arslan, İ. H., “Türkiye ve dünyada bor”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 65-71, (1997).

78. Gençoğlu, S., “Bor karbür esaslı seramik zırh ve adhesiv aşınma uygulamaları”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 2-8, (2006).
79. Barış, M., “Farklı borlama sürelerinin transmisyon çeliğinde abrasiv aşınma davranışlarına etkisinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 27-43, (2006).
80. Toprak, H., “Borlanmış ve PVD yöntemiyle TiN kaplanmış KGDD kam milleri ile kaplamasız ve sertleştirilmiş çelik dövme kam millerinin çalışma performanslarının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 27-48, (2002).
81. Saygın, M., “AISI 1020 çeliklerinde borlamanın yorulma dayanımına etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, **Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Eskişehir, 20-26, (2006).
82. T.C. Devlet Planlama Teşkilatı, Sekizinci 5 yıllık kalkınma planı, 2608-ÖİK: 619, **Sanayi hammaddeleri çalışma grubu raporu, Cilt: II**, Ankara. 8,19,21,34 (2001).
83. İnternet : Türk Kimya Sanayisinin Mühendislik ve Bilgi Kaynağı, “Bor ve bor ürünlerinin üretimi, kullanım alanları” www.kimyamuhendisi.com (2006).
84. Smallwood, C., “Environmental Health Criteria 204 Boron”, International Programme On Chemical Safety, **World Health Organization**, Geneva, 1-13 (1998).
85. Yılmaz, A., “Her Derde Deva Hazinemiz Bor”, **TÜBİTAK-Bilim Teknik Dergisi**, Ankara, 38-48 (2002).
86. Delikanlı, K., Ulusoy, N., Uzun, H. A., “Yüzeyleri borlama ile sertleştirilen Ç1040 çeliğinin abrasiv aşınma ve korozyona karşı dayanımı”, **II. Ulusal Demir-Çelik Sempozyumu ve Sergisi Bildiriler Kitabı**, Yayın No: E/2003/336, Zonguldak, 61-66, (2003).
87. Roskill, “The Economics Of Boron”, **Roskill Information Services Ltd.**, London, 6, 7, 149-201 (2006).

88. İnternet : Ödev Arşivi Sitesi, “Borlama ile yüzeyi sertleştirilen çeliklerin aşınma ve korozyona karşı dayanımları”, http://www.odevarsivi.com/dosyaara2.asp?islem=ara&kelime=borun%20tarihçesi&r=3&nerden=0&kackayit=&dil=&sayfa_alt=1&sayfa_ust=1000&tur=&kaynakca=&resim=&tablo=&sayfa=1 (2005).
89. İnternet: Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü “Bor” <http://www.etiholding.gov.tr> (2006).
90. Bayar, G., Atilla, A., “Dünyada ve Türkiye’de Bor ve Toryum”, *T.C. Dış Ticaret Müsteşarlığı, Ekonomik Araştırmalar ve Değerlendirme Genel Müdürlüğü*, Ankara, 1-2 (2003).
91. T.C. Başbakanlık DPT Müsteşarlığı, Yedinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Bor Bileşikleri Alt Komisyonu Raporu, *Kimya Sanayi Özel İhtisas Komisyonu*, Yayın No: DPT: 2427-ÖİK:485, Ankara, 2-8, (1996).
92. Barış, M., “İlgi odağındaki maden: Bor” ENERJİ, Ekonomik Sosyal Araştırmalar, *ESAM-Stratejik Araştırma Dergisi*, Yıl:1, Sayı:1, 49-57, (2007).
93. TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası, “Bor Raporu”, *Metalurji Dergisi*, 134 : 9-11, (2003).
94. İnternet: DPT, Sekizinci beş yıllık kalkınma planı, Madencilik ÖİK Raporu, “Bor ürünlerinin başlıca kullanım alanları”, <http://ekutup.dpt.gov.tr/madencil/sanayiha/oik619.pdf> , Ankara, (2001).
95. T.C. Devlet Planlama Teşkilatı Müsteşarlığı, Dokuzuncu Kalkınma Planı, Kimya Sanayi Özel İhtisas Komisyonu, *Bor Çalışma Grubu Raporu*, Ankara, 9-15,16-37 (2006).
96. Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, *Faaliyet Raporu*, Ankara, 18-22, (2005).
97. İnternet : Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü, “Bor’un kullanıldığı yerler”, <http://www.boren.gov.tr/kulyer.htm> (2008).
98. Özbek, İ., Şen, S., İpek, M., Bindal, C., Zeytin, S., Üçışık, A. H., “A Mechanical aspect of borides formed on the AISI 440C stainless-steel”, *Vacuum*, 73: 641-648, (2004).

99. Lee, S. Y., Kim, G. S., Kim, B-S., “Mechanical properties of duplex layer formed on AISI 403 stainless steel by chromizing and boronizing treatment”, *Surface and Coat. Technol.*, 178-184, 177-178 (2004).
100. Çelikyürek, İ., Baksan, B., Torun, O., Gürler, R., “Boronizing of iron aluminide Fe₇₂Al₂₈”, *Intermetallics*, 14: 136-141, (2006).
101. Maragoudakis, N. E., Stergioudis, G., Omar, H., Pavlidou, E., Tsipas, D.N., “Boro-nitriding of steel US 37-1”, *Materials Letters*, 57: 949-952, (2002).
102. Özbek, İ., Bindal, C., “Mechanical properties of boronized AISI W4 steel”, *Surface and Coat. Technol.*, 154: 14-20, (2002).
103. Singhal, S. C., “A hard diffusion boride coating for ferrous materials”, *Thin Solid Films*, 45: 321-329, (1977).
104. Sinha, A. K., “Boriding (Boronising)”, ASM Handbook, *J. Heat Treating*, 4 : 437-447, (1991).
105. Bayça, S. U., Şahin, S., “Borlama”, *Mühendis ve Makine Dergisi*, Mayıs, 532 : 51-59, (2004).
106. Uzun, H. A., “Borlama ile yüzeyleri sertleştirilen çeliklerin aşınma ve korozyona karşı dayanımları”, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, 14-28, (2002).
107. Cobeo, E R., Laudien, G., Biemer, S., Rie, K. T., Hoppe, S., “Plasma-assisted boriding af Industrial Components in a pulsed D.C. glow discharge”, *Surface and Coating Technology*, 116-119, 229-233, (1999).
108. Karakan, M., Akgün, A., Çelik, A., “Plazma borlama”, *Mühendis ve Makine Dergisi*, Eylül, 512 : 51-54 (2002).
109. Pengxun, Y., “Gaseous Boronising With Solid Boron-Yielding Agents”, *Thin Solid Films*, 214 : 44-47 (1992).
110. Hunger, H. J., Löbig, G., “Generation of boride layers on steel and nickel alloys by plasma activation of boron trifluoride” *Thin Solid Films*, 310: 244-250, (1997).

111. Sever, K., “Demir Dışı Metal ve Alaşımlarda İyonitasyon ile Sertleştirme ve Sertleştirme Sonucu Oluşan Malzeme Özelliklerinin Tespiti”, Yüksek Lisans Tezi, **Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İzmir, 28-30, (2003).
112. Knitek, O., Lugscheider, E., Leuschen, K., “Surface Layer on Cobalt Base Alloys by Boron Diffusion”, **Thin Solid Films**, 45 : 331-339, (1983).
113. Hayashi, Y., Sugeno, T., “Nature of Boron in a Iron”, **Acta Metallurgica**, June, 18 : 693-697, (1970).
114. Ozdemir, O., Usta, M., Bindal, C., Ucişik, A.H., “Hard iron boride (Fe₂B) on 99.97 wt % pure iron”, **Vacuum**, 80: 1391-1395, (2006).
115. Galibois, A., Boutenko, O., Voyzelle, B., “Mecanisme de formation des couches borurees sur les aciers a haut carbone technique des pates”, **Acta Metall.**, 28: 1753, (1980).
116. Şen S., Özbek, I., Şen, U., Bindal, C., “Mechanical behavior of borides formed on borided cold work tool steel”, **Surface and Coat. Technol.**, 135: 173-177, (2001).
117. Özsoy, A., Yaman, Y. M., “The Effect of Thermocycling Liquid Boronising on the Thickness of the Boride Layer and the Transition Zone”, **Scripta Met.**, 29 : 231-236, (1993).
118. Goeuriot, F. P., Thevenot, J., Driver, H., “Surface Treatment of Steels: Borudif, a New Boriding Process”, **Thin Solid Films**, 78 : 67-76, (1981).
119. Badini, C., Cianoglio, C., Paradelli, G., “The Effect of Carbon and Chromium on the Hardness of Borided Layers”, **Surface and Coatings Technology**, 30 : 157-170, (1987).
120. Amulevicius, A., Balciuniune, M., Petretis, B., Pileckis, R., “On The Synthesis of Fe-B System Thin Films From Powder Mixtures Under The Influence of Laser Radiation”, **Thin Solid Films**, 229 : 192-195, (1993).
121. Galibolis, A., Boutenko, O., Voyzelle, B., “Mécanisme de Formation des Couches Borur”es Sur la Aciers a Haut Carbone –II (Techniques des Poudres)”, **Acta Metallurgica**, 28 : 1765-1771, (1980).
122. Carbucicchio, M., Sambogna, G., “Influence of Chromium on the Boride Coatings Produced on Iron Alloys”, **Thin Solid Films**, 126 : 299-305, (1985).

123. İzçiler, M., “Yüksek krom alaşımlı dökme demirlerin farklı sıcaklıktaki abrasiv aşınma davranışına alaşım katkı oranının ve ısıtma şartlarının etkileri”, Doktora Tezi, **Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Elazığ, 50-122, (1997).
124. Çelik, H., “Kaynak edilebilen kobalt ve demir esaslı alaşımların yüksek sıcaklıktaki aşınma davranışları”, Doktora Tezi, **İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 3-35, (1992).
125. Yılmaz, F., “Sürtünme ve Aşınma”, **Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi Bildiriler Kitabı**, Cilt 1, İstanbul, 229-246, (1997).
126. Türker, M., Kurt, A., Gülenç, B., Karataşoğlu, F., “Monoblok tekerlerin aşınan kısımlarının MAG kaynağı ile yapılan dolgu metalinin aşınma davranışlarının incelenmesi”, **2. Uluslararası Kaynak Teknolojisi Sempozyumu, IWTS 98**, Haziran, İstanbul, 232-239, (1998).
127. Joseph, H., Tylczak., Oregon, A., “Abrasive Wear”, **ASM**, 18: 184-185 (1992).
128. Gülenç, B., Kahraman, N., “Wear Behaviour of Bulldozer Roller Welded By Using Submerged Arc Welding Process”, **Materials and Design**, 24: 537-542 (2003).
129. Asil Çelik, “Sementasyon çelikleri”, **Teknik Yayınlar**, Bölüm 5, Mayıs, İstanbul, 132-160 (2000).
130. Şanlı, M., “İnce taneli sementasyon çeliklerinde sıcak şekil verme ve ısıtma işleminin östenit tane büyüklüğüne etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, **Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Bursa, 59-70 (1987).
131. Alkın, S.G., “Sementasyon çeliklerinin ısıtma işlemi”, Yüksek Lisans Tezi, **Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 9-78 (1993).
132. İnternet : Metaloks Ltd. Şti. Çelikte Uzman Kuruluş, “Aşınmaya dayanıklı çelikler”, <http://metaloks.com.tr/Hardox.html> (2005).
133. Yılmaz, R., Gedikli, M., Barlas, Z., “Hardox 400 çeliğinin sert dolgu kaynağında pas sayısının sertliğe, aşınmaya ve mikroyapıya etkisi” **Teknoloji**, 8 : 1, 57-64, (2005).
134. Buglacki, H., Smajdor, M., “Mechanical properties of abrasion-resistant Hardox 400 steel and their welded joints”, **Advances in Materials Science**, December, 4 : 2 (4), 64-71 (2003).

135. İnternet : Makinateknik, “Aşınmaya dayanıklı çelikler”
<http://www.makinateknik.org/makaleler/Hardox.php> (2006).
136. TSE 269, Vurma Deneyi, *TSE Yayını*, Ankara, 4-9, (1974).
137. Uluköy, A., Can, A. Ç., “Çeliklerin Borlanması” , *Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12 : 2, 189-198 (2006).
138. İnternet : TOBB ETÜ, Mühendislik Fakültesi, “Darbe deneyi”,
<http://www.mak.etu.edu.tr/dersler/mak2071/mak2071/Darbe%20deneyi.doc>
(2006).
139. Çetin, M., Gül, F., “Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirin abrasiv aşınma davranışına östemperleme işleminde soğutmanın etkisi”, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 21 (2): 359-366, (2006).
140. Thelning, K.E., “Çelik ve Isıl İşlemi” , *Bofors el kitabı*, Çeviren: Adnan TEKİN, İstanbul, 6-29: 344-373 (1984).
141. Bargel, H. J., Schulze, G., “Malzeme Bilgisi”, Cilt 1-2, Çevirenler: Prof. Dr. Şefik Güleç, Doç. Dr. Ahmet Aran, *TÜBİTAK, Marmara Bilimsel ve Endüstriyel Araştırma Enstitüsü*, Gebze, İzmit, 159-160, (1987).
142. Korkut, M. H., “Sürtünmeye maruz metalik ,disklerin aşınmış bölgelerinde dolgu kaynak işleminden sonra aşınma özelliklerinin değişiminin deneysel araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 63-66, (1991).
143. Carry, H. B., “Metal Surfacing” *Modern Welding Technology*, Second Education, A.W.S., 24: 563-564 (1981).
144. Allaoui, O., Bouaouadja, N., Saindernan, G., “Characterization of boronized layers on a XC38 steel” *Surface & Coatings Technology*, 201: 3475-3482, (2006).
145. Sert, H., Can, A., Arıkan, H., Selçuk, B., Toprak, H., “Wear behavior of different surface treated cam spindles”, *Wear*, 260: 1013-1019, (2006).
146. Makışlı, T., Nakata, K., “Surface hardening of nickel alloys by means of plazma nitriding”, *Metallurgical and Materials Transactions A*, January, 35A: 227, (2004).

147. Uslu, I., Comert, H., Ipek, M., Ozdemir, O., Bindal, C., “Evaluation of borides formed on AISI P20 steel”, *Materials and Design*, 28: 55-61, (2007).
148. Ozdemir, O., Usta, M., Bindal, C., Ucişik, A.H., “Hard iron boride (Fe_2B) on 99.97 wt % pure iron”, *Vacuum*, 80: 1391-1395, (2006).
149. Sen, S., Sen, U., Bindal, C., “Tribological properties of oxidised boride coatings on AISI 4140 steel”, *Materials Letters*, 60: 3481-3486, (2006).
150. Hardox, Weldox, “Bükme / Makasta Kesme”, *Metal-Oks broşürü*, 2-5, (2005).
151. Selçuk, B., Ipek, R., Karamış, M.B., “A Study on friction and wear behaviour of carburized, carbonitrided and borided AISI 1020 and 5115 steels” *Journal of Materials Processing Technology*, 141: 189-196, (2003).
152. Galvanetto, E., Borgioli, F., Bacci, T., Pradelli, G., “Wear behaviour of Iron boride coatings produced by VPS technique on carbon steels”, *Wear*, 260: 825-831, (2006).
153. Ingole, S., Liang, H., Usta, M., Bindal, C., Ucişik, A.H., “Multi-scale wear of a boride coating on tungsten”, *Wear*, 259: 849-860, (2005).
154. Reymond, A.C., “Engineering properties of borides”, *Engineering Materials Handbook*, Vol.4, Ceramic and Glasses, ASM International, Dec., 787-803, (1991).
155. Sahin, S., Meric, C., “Investigation of the Effect of Boronizing on Cast Irons”, *Materials Research Bulletin*, 37: 971-979, (2002).
156. Yılmaz, S. S., Ünlü, B. S., “Borlanmış Ç 1020 Çeliğinin Yüzey Tabakasının İncelenmesi”, *MakinaTek.*, Eylül, 78-80, (2005).
157. Yıldırım, S., “27 Mn Si 5 ve 23 Mn Ni MoCr 5 4 Kalite zincir çeliklerinin mekanik ve aşınma özellikleri”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 11-43 (1992).
158. Tabur, M., “Farklı Isıl İşlemlerdeki 8620 Sementasyon Çeliğinin Abrasiv Aşınma Davranışları”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 63-85, (2003).

159. Kılınç, Y., “Yağlı sürtünme şartlarında çelik ince zırh yataklarında üretim tekniklerinin aşınmaya etkisinin araştırılması”, Doktora Tezi, **Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kayseri, 39-61 (1993).
160. Keleştimur, M. H., “Makine yapı çeliklerinin abrasiv aşınma direncine yüzey sertliğinin etkisi ve diğer mekanik özelliklerle ilişkisinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, **Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Elazığ, 14-43 (1989).
161. Elhan, S. M., “Aynı sertliğe getirilmiş çeliklerin aşınma davranışları”, Yüksek Lisans Tezi, **Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kocaeli, 23-65, (1996).
162. Karataşoğlu, F., “Demiryollarında çalışan monoblok tekerleklerin çalışmaları sırasında aşınan kısımlarının MIG-MAG kaynağı ile değişik elektrot kompozisyonlarında yapılan dolgu kaynağının aşınma özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 8-89 (1997).
163. Karamış, M. B., “Toprak işleme aletlerinde iş organının aşınmasının etüdü”, Doktora Tezi, **Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kayseri, 18-60, (1985).
164. Modi, O. P., Mondal, D.P., Prasad, B.K., Singh, M., Khaira, H. K., “Abrasive wear behaviour of a high carbon steel: effects of microstructure and experimental parameters and correlation with mechanical properties”, **Materials Science and Engineering**, A 343 : 235-242 (2003).
165. İzçiler, M., Tabur, M., “Abrasive wear behavior of different case depth gas carburized AISI 8620 gear steel”, **Wear**, 260 : 90-98, (2006).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : TABUR, Mehmet
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 01.02.1965 Kırşehir
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (312) 3272060
 e-mail : mehmettabur65@hotmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi /End.Tek.Eğt. A D.	2003
Lisans	Gazi Üniversitesi/ End.Tek.Eğt. A D.	1991
Lise	Kaman Ticaret Lisesi	1982

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
1991-2008	Milli Eğitim Bakanlığı	Öğretmen

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. İZCİLER, M., **TABUR, M.**, “Abrasive Wear Behaviour of 8620 Different Case Depth Gas Carburized Gear Steel” Vol 260-1,2, Pg. 90-98, 2006, Wear.
2. F. GÜL, **M. TABUR, M. İZCİLER**, “AISI 4140 Çeliğinin Abrasiv Aşınma Davranışı Üzerine Farklı Sürelerde Borlama İşleminin Etkisinin İncelenmesi” 2. Ulusal Bor Çalıştayı Bildiriler Kitabı, Sayfa 505-511,17-18 Nisan 2008, Ankara.

Hobiler

Satranç, Bilgisayar Teknolojileri, Voleybol.