BORLAMANIN ÇELİKLERDE EROZİV AŞINMA DAVRANIŞINA OLAN ETKİLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Tezi Hazırlayan

Kemal YILDIZLI

T21645

Tez Yöneticisi

Yrd. Doç. Dr. Durmuş ODABAŞ

121645

Erciyes Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü' ne

Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi

Olarak Sunulmuştur.

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

Temmuz 2002

KAYSERİ

Erciyes Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü' ne

Bu çalışma, jürimiz tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

01/ 08 / 2002

Başkan : Prof. Dr. M. Baki KARAMIŞ

Üye : Doç. Dr. Necdet ALTUNTOP

Üye : Yrd. Doç. Dr. Durmuş ODABAŞ

ONAY :

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

28 AĞUSTOS 2002
..../..../....

Prof. Dr. İlhan ÖZTÜRK

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdür V.

TEŞEKKÜR

Pratik anlamda bir çok uygulama içeren çalışmalarımın her aşamasında, öneri ve görüşleri ile destek sağlayan başta değerli hocam Yrd.Doç.Dr. Durmuş ODABAŞ'a, borlama ürünlerini sağlayan ETİBOR A.Ş. Bandırma Borik Asit Fabrikaları İşletmesine, aşındırıcı partikülleri temin eden BÜNSA A.Ş'ne katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Kemal YILDIZLI

ÖZET

Bu çalışmada, borlanmamış ve sıvı ortamda farklı sıcaklık (950, 1000 ve 1100 °C) ve sürelerde (1, 3, 5, 7 ve 9 Saat) borlanmış AISI 1020, 3315 ve 1390 çeliklerinin eroziv aşınma davranışları araştırılmıştır. Borür tabakalarının mikroyapıları, mikrosertlik değerleri, kalınlık ve morfolojik yapıları, metalografik teknikler ve taramalı elektron mikroskobu yardımı ile incelenmiştir.

Eroziv aşındırma testleri için yeni bir eroziv aşındırma deney seti tasarlanarak imal edilmiştir. Farklı sıcaklık ve sürelerde borlanan ve borlanmayan çelik numunelerin aşındırma testleri 30 m/s püskürtme hızı ve 90° çarpma açısında nominal 420 μm boyutlu grit partikül püskürtülerek gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın amaçlarından biri de çeliklerin eroziv aşınma oranlarını, borlama süresi ve sıcaklığının bir fonksiyonu olarak araştırmaktır. Çeliklerdeki eroziv aşınma olayları hususunda, sıvı borlama tekniğine özgü optimum borlama süresi ve sıcaklık değerleri belirlenmiştir.

Eroziv aşınma oranı, borlama sıcaklığının artışı ile artarken, aşındırma süresinin ve ortalama bor tabakası sertlik değerinin artışı ile azalmıştır. Bunun yanısıra, borlama süresinin artışına bağlı olarak dalgalı bir değişim göstermiştir. Aşınma oranının minimum olduğu borlama süresi ve sıcaklığı 950 °C'de 7 saat olarak belirlenmiştir. Borlanmış çelikler borlanmamış olanlara göre; AISI 1020 çeliğinde 9; AISI 3315 çeliğinde 5 ve AISI 1390 çeliğinde 3 kat daha yüksek eroziv aşınma direnci göstermiştir.

Sonuç olarak, borlanmış çeliklerin eroziv aşınma davranışlarının, oluşan borür tabakasının sertliği, kalınlığı, morfolojik yapısı ve borlanan malzeme ile ilişkili olduğu belirlenmiştir. Borlanmış AISI 3315 çeliğinin eroziv aşınma davranışının, borlanmış AISI 1020 ve 1390 çeliklerinin aşınma davranışlarından daha kötü olduğu tespit edilmiştir.

ABSTRACT

In this study, the erosive wear behaviour of the unborided and borided AISI 1020, 3315 and 1390 Steel at different temperatures (950, 1000 and 1100 °C) and durations (1, 3, 5, 7 and 9 hours) was investigated. The microstructures, microhardness, thickness and morphological structures of the borided layers for samples were studied by means of metallographic techniques and scanning electron microscope.

A new erosive wear test rig for wear tests was designed and manufactured. The erosion tests of the unborided samples and the samples borided by liquid boriding at different temperatures and durations were conducted with grit powder, 420 μm in nominal particle size, at an impact velocity of 30 m/s and an impact angle of 90°. Furthermore, The one of the purposes of this work was to investigate the erosive wear rates for the borided steels as a function of boriding temperature and duration. Optimum boriding temperatures and durations peculiar to liquid boriding techniques regarding erosive wear on the steels were found.

Although the erosive wear rate increased with increasing the boriding temperature, it decreased with increasing the test duration and the average hardness values of the boride layers. In addition, it fluctuated with increasing the boriding durations. The samples of borided steels at a temperature of 950° in 7 hours exhibited the lowest erosive wear. Furthermore, It was found that the erosive wear resistances of borided AISI 1020, 3315 and 1390 steel are higher 9 times; 5 times and 3 times than those of the unborided steels, respectively.

Consequently, It was found that the erosive wear behaviour of the borided steels related with hardness, thickness, morphological structure of the formated boride layer and borided materials. The erosive wear behaviour of the borided AISI 3315 Steel was worse than those of the borided AISI 1020 and AISI 1390 steel.

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 3.1. Kafes parametreleri 13

Tablo 3.2. Borür tabakasının karakteristik özellikleri 15

Tablo 3.3. Sıvı borlamada kullanılan bazı borlama kaynakları 27

Tablo 6.1. AISI 1020 çeliğinin kimyasal analizi 60

Tablo 6.2. AISI 3315 çeliğinin kimyasal analizi 60

Tablo 6.3. AISI 1390 çeliğinin kimyasal analizi 60

Tablo 7.1. Sabit tutulan eroziv aşındırma parametreleri 87

EKLER

Ek-1. Eroziv aşınmaya maruz bırakılan farklı süre ve sıcaklıklarda borlanmış AISI 1020 çeliğinin aşındırma sonucu belirlenen deneysel veri tabloları 139

Ek-2. Eroziv aşınmaya maruz bırakılan farklı süre ve sıcaklıklarda borlanmış AISI 3315 çeliğinin aşındırma sonucu belirlenen deneysel veri tabloları 143

Ek-3. Eroziv aşınmaya maruz bırakılan farklı süre ve sıcaklıklarda borlanmış AISI 1390 çeliğinin aşındırma sonucu belirlenen deneysel veri tabloları 147

Ek-4. Eroziv aşınmaya maruz bırakılan normalize edilmiş AISI 1020, 3315 ve 1390 çeliklerinin aşındırma sonucu belirlenen deneysel veri tabloları 151

Ek-5. Sabit süre ve sıcaklıklarda borlanan numunelerin mikrosertlik değerleri 153

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Demir-Bor Denge Diyagramı 14

Şekil 3.2. Fe_2B kristalinin birim kafesi ve (001) düzlemindeki projeksiyonu 15

Şekil 3.3. % Alaşım elementi miktarının tabaka kalınlığına etkileri 20

Şekil 3.4. Borlanmış 42CrMo4 (AISI 4140) çeliğinde bor tabakası altında aşırı perlit teşekkülü 22

Şekil 3.5. X38CrMo5 çeliğinde borür tabakası ve anametal arasında oluşmuş ferritik bölgenin mikroyapı görüntüsü 23

Şekil 3.6. Bir gaz borlama ünitesinin şematik görüntüsü 29

Şekil 4.1.a. Sünek ve kırılgan malzemelerde erozyon oranının çarpma açısı ile değişimi 36

Şekil 4.1.b. Küresel ve köşeli partikül şeklinin, çarpma açısı ile erozyon oranı değişimine etkisi 36

Şekil 4.2.a. Ortalama partikül çapının erozyon oranı ile değişimi 38

Şekil 4.2.b. AISI 1018 çeliğinin erozyon oranına aşındırıcı partikül akısının etkisi 38

Şekil 4.3. Eroziv aşınma sonuçlarına etki eden malzeme özellikleri ve test parametreleri 38

Şekil 4.4. Tek ya da çoklu partikül darbelerinden dolayı aşınma kaybı ile sonuçlanan erozyon mekanizmaları 40

Şekil 4.5. Metallerde eroziv aşınma türleri 41

Şekil 5.1. Eroziv aşındırma deney tesisatları 47

Şekil 5.2. Eroziv aşındırma deney tesisatının görünümü 53

Şekil 5.3. Teorik hız hesabında kurulan model 54

Şekil 6.1. Borlanmış AISI 1020 çeliğinin mikroyapı ve mikrosertlik izleri görüntüsü 58

Şekil 6.2. Borlanmış AISI 3315 çeliğinin mikroyapı ve mikrosertlik izleri görüntüsü 59

Şekil 6.3. Borlanmış AISI 1390 çeliğinin mikroyapı ve mikrosertlik izleri görüntüsü 59

Şekil 6.4. Deneysel çalışmada kullanılan numunenin şekli ve boyutu 60

Şekil 6.5. 950 °C'de 7 saat borlanmış AISI 1020 çeliğinde oluşan bor tabakasının kalınlığının SEM ile ölçümü 63

Şekil 6.6. 950 °C'de 7 saat borlanmış AISI 3315 çeliğinde oluşan bor tabakasının kalınlığının SEM ile ölçümü 64

Şekil 6.7. 950 °C'de 5 saat borlanmış AISI 1390 çeliğinde oluşan bor tabakasının kalınlığının SEM ile ölçümü 64

Şekil 6.8. 950 °C'de 3 saat borlanmış AISI 1390 çeliğinde oluşan bor tabakasının kalınlığının SEM ile ölçümü 65
Şekil 6.9. Mikroyapı üzerinde oluşan sertlik izlerinin görünümü (AISI 1020 950 °C'de 7 saat borlanmış) 65
Şekil 6.10. Mikroyapı üzerinde oluşan sertlik izlerinin görünümü (AISI 3315 950 °C'de 7 saat borlanmış) 66
Şekil 6.11. Mikroyapı üzerinde oluşan sertlik izleri (AISI 1390 950 °C'de 7 saat borlanmış) 66
Şekil 6.12. 950 °C'de 1 saat borlanmış AISI 1020 çeliğinin mikrofilmi 67
Şekil 6.13. 950 °C'de 3 saat borlanmış AISI 1020 çeliğinin mikrofilmi 68
Şekil 6.14. 950 °C'de 5 saat borlanmış AISI 1020 çeliğinin mikrofilmi 68
Şekil 6.15. 950 °C'de 7 saat borlanmış AISI 1020 çeliğinin mikrofilmi 69
Şekil 6.16. 950 °C'de 9 saat borlanmış AISI 1020 çeliğinin mikrofilmi 69
Şekil 6.17. 1000 °C'de 7 saat borlanmış AISI 1020 çeliğinin mikrofilmi 70
Şekil 6.18. 1100 °C'de 7 saat borlanmış AISI 1020 çeliğinin mikrofilmi 70
Şekil 6.19. 950 °C'de 1 saat borlanmış AISI 3315 çeliğinin mikrofilmi 71
Şekil 6.20. 950 °C'de 3 saat borlanmış AISI 3315 çeliğinin mikrofilmi 72
Şekil 6.21. 950 °C'de 5 saat borlanmış AISI 3315 çeliğinin mikrofilmi 72
Şekil 6.22. 950 °C'de 7 saat borlanmış AISI 3315 çeliğinin mikrofilmi 73
Şekil 6.23. 950 °C'de 9 saat borlanmış AISI 3315 çeliğinin mikrofilmi 73
Şekil 6.24. 1000 °C'de 7 saat borlanmış AISI 3315 çeliğinin mikrofilmi 74
Şekil 6.25. 1100 °C'de 7 saat borlanmış AISI 3315 çeliğinin mikrofilmi 74
Şekil 6.26. 950 °C'de 1 saat borlanmış AISI 1390 çeliğinin mikrofilmi 75
Şekil 6.27. 950 °C'de 3 saat borlanmış AISI 1390 çeliğinin mikrofilmi 76
Şekil 6.28. 950 °C'de 5 saat borlanmış AISI 1390 çeliğinin mikrofilmi 76
Şekil 6.29. 950 °C'de 7 saat borlanmış AISI 1390 çeliğinin mikrofilmi 77
Şekil 6.30. 950 °C'de 9 saat borlanmış AISI 1390 çeliğinin mikrofilmi 77
Şekil 6.31. 1000 °C'de 7 saat borlanmış AISI 1390 çeliğinin mikrofilmi 78
Şekil 6.32. 1100 °C'de 7 saat borlanmış AISI 1390 çeliğinin mikrofilmi 78
Şekil 6.33. Bor tabakası kalınlığının borlama süresi ile değişimi 80
Şekil 6.34. Bor tabakası kalınlığının sıcaklığa bağlı olarak değişimi 81
Şekil 6.35. Borlama süresi ile bor tabakası sertliğinin değişimi 82
Şekil 6.36. AISI 1390 çeliğinde yüzeyden itibaren mikrosertlik dağılımı 84
Şekil 6.37. Borlama sıcaklığı ile bor tabakası sertliğinin değişimi 85

Şekil 7.1. Eroziv aşındırma deney tesisatının şematik görüntüsü 87
Şekil 7.2. G-40 Partikül SEM görüntüsü ve EDX analizi yapılan 1 ve 2 numaralı partiküller 88
Şekil 7.3. Grit partiküllerin EDX analizleri sonucu içerdiği element miktarı ve çeşitleri 89
Şekil 7.4. AISI 1020 çeliğinde eroziv aşındırma öncesi borlanmış yüzeyin görünümü 90
Şekil 7.5. 10 dakikada aşındırılan yüzeyin görünümü 92
Şekil 7.6. 20 dakikada aşındırılan yüzeyin görünümü 92
Şekil 7.7. 30 dakikada aşındırılan yüzeyin görünümü 93
Şekil 7.8. 30 dakika aşındırma sonunda görülen yüzeye yapışmış siyah renkli partiküllerin (grit) EDX analizi 93
Şekil 7.9. Püskürtülen grit partiküllerinin EDX analizi sonucu belirlenen element türleri 94
Şekil 7.10. 40 dakikada aşındırılan yüzeyin görünümü 94
Şekil 7.11. 50 dakikada aşındırılan yüzeyin görünümü 95
Şekil 7.12. 60 dakikada aşındırılan yüzeyin görünümü 95
Şekil 7.13. Aşınma oyukları ve çevresinin pürüzlülük değişimi 96
Şekil 7.14. 10 dakikada aşındırılan yüzeyin görünümü (AISI 3315) 97
Şekil 7.15. 20 dakikada aşındırılan yüzeyin görünümü 97
Şekil 7.16. 30 dakikada aşındırılan yüzeyin görünümü 98
Şekil 7.17. 40 dakikada aşındırılan yüzeyin görünümü 99
Şekil 7.18. 50 dakikada aşındırılan yüzeyin görünümü 99
Şekil 7.19. 60 dakikada aşındırılan yüzeyin görünümü 100
Şekil 7.20. Borlanmış yüzeye saplanan grit partikül 100
Şekil 7.21. Grit partikül ve çevresinin detay görüntüsü 101
Şekil 7.22. Saplanmış partikülün EDX analizi 101
Şekil 7.23. Aşındırma sırasında çatlayan bor tabakasının mikrokesit görüntüsü 102
Şekil 7.24. 10 dakikada aşındırılan yüzeyin görüntüsü (AISI 1390) 104
Şekil 7.25. 20 dakikada aşındırılan yüzeyin görüntüsü 105
Şekil 7.26. 30 dakikada aşındırılan yüzeyin görüntüsü 105
Şekil 7.27. 40 dakikada aşındırılan yüzeyin görüntüsü 106
Şekil 7.28. 50 dakikada aşındırılan yüzeyin görüntüsü 106
Şekil 7.29. 60 dakikada aşındırılan yüzeyin görüntüsü 106
Şekil 7.30. Eroziv aşınma kaybının borlama süresi ile değişimi 108

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

Şekil 7.31. Erozyon oranının borlama süresi ile değişimi 108
Şekil 7.32. Eroziv aşınma kaybının borlama sıcaklığına bağlı olarak değişimi 109
Şekil 7.33. Erozyon oranının borlama sıcaklığı ile değişimi 110
Şekil 7.34. Eroziv aşınma kaybının aşındırma süresi ile değişimi (AISI 1020) 111
Şekil 7.35. Erozyon oranının aşındırma süresi ile değişimi 112
Şekil 7.36. Farklı sürelerde borlanmış AISI 1020 çeliğinin aşındırma süresine bağlı olarak erozyon oranının değişimi 112
Şekil 7.37. Farklı borlama sıcaklıklarında eroziv aşınma kaybının aşındırma süresi ile değişimi (AISI 1020) 113
Şekil 7.38. 7 saat sabit sürede borlanan AISI 1020 çeliğinde erozyon oranı-borlama sıcaklığı-aşındırma süresi arasındaki ilişki 114
Şekil 7.39. Eroziv aşınma kaybının aşındırma süresi ile değişimi (AISI 3315) 114
Şekil 7.40. Farklı sürelerde borlanmış AISI 3315 çeliğinin aşındırma süresine bağlı olarak erozyon oranının değişimi 115
Şekil 7.41. Farklı borlama sıcaklıklarında eroziv aşınma kaybının aşındırma süresi ile değişimi (AISI 3315) 116
Şekil 7.42. 7 saat sabit sürede borlanan AISI 3315 çeliğinde erozyon oranı- borlama sıcaklığı-aşındırma süresi arasındaki ilişki 116
Şekil 7.43. Eroziv aşınma kaybının aşındırma süresi ile değişimi 117
Şekil 7.44. Farklı sürelerde borlanmış AISI 1390 çeliğinin aşındırma süresine bağlı olarak erozyon oranının değişimi 118
Şekil 7.45. Farklı borlama sıcaklıklarında eroziv aşınma kaybının aşındırma süresi ile değişimi (AISI 1390) 119
Şekil 7.46. 7 saat sabit sürede borlanan AISI 1390 çeliğinde erozyon oranı-borlama sıcaklığı-aşındırma süresi arasındaki ilişki 120
Şekil 7.47. Normalize edilmiş fakat borlanmamış üç çeliğin aşındırma süresine bağlı olarak değişimi 120
Şekil 7.48. Erozyon oranının aşındırma süresi ile değişimi (Borlanmış halde AISI 1020,3315 ve 1390) 121
Şekil 7.49. Borlanmış AISI 1020 çeliğinde ortalama bor tabakası sertliği ile erozyon oranının değişimi 122
Şekil 7.50. 7 saat sabit sürede farklı sıcaklıklarda borlanmış AISI 1020 çeliğinde ortalama bor tabakası sertliğinin erozyon oranı ile değişimi 123

Şekil 7.51. Borlanmış AISI 3315 çeliğinde ortalama bor tabakası sertliği ile erozyon oranının değişimi 124
Şekil 7.52. 7 saat sabit sürede farklı sıcaklıklarda borlanmış AISI 3315 çeliğinde ortalama bor tabakası sertliğinin erozyon oranı ile değişimi 125
Şekil 7.53. Borlanmış AISI 1390 çeliğinde ortalama bor tabakası sertliği ile erozyon oranının değişimi 125
Şekil 7.54. 7 saat sabit sürede farklı sıcaklıklarda borlanan AISI 1390 çeliğinde ortalama bor tabakası sertliği ile erozyon oranının değişimi 126
Şekil 7.55. 950 °C'de borlanan her üç çelikte ortalama bor tabakası sertliğinin erozyon oranı ile değişimi 126

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR II

ÖZET III

ABSTRACT IV

BÖLÜM 1 GİRİŞ

1.1. TANITIM 1

1.2. KONUNUN ÖNEMİ 2

1.3. TEZİN AMACI 2

BÖLÜM 2 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. GİRİŞ 3

2.2. BORLAMA ÇALIŞMALARI 3

2.2.1.Ülkemizde Yapılan Araştırmalar 3

2.2.2.Yurtdışında Yapılan Araştırmalar 7

2.3. EROZİV AŞINMA KONUSUNDA YAPILAN ÇALIŞMALAR 8

BÖLÜM 3 BORLAMA İŞLEMİ

3.1. GİRİŞ 12

3.2. BOR HAKKINDA GENEL BİLGİ 13

3.2.1. Bor'un Tabiatta Bulunuşu 13

3.2.2. Bor Elementinin Özellikleri 13

3.2.3. Demir-Bor Denge Diyagramı 14

3.3. BORLAMA SONUCU OLUŞAN TABAKALAR 16

3.3.1. Bileşik Tabaka 16

3.3.2. Difüzyon Tabakası 16

3.4. BORLANMIŞ ÇELİKLERİN AŞINMA ÖZELLİKLERİ 17

3.4.1. Abrasiv Aşınma Özellikleri 17

3.4.2. Eroziv Aşınma Özellikleri 18

3.4.3. Adhesiv Aşınma Özellikleri 18

3.5. BORLANMIŞ ÇELİKLERİN KOROZYON ÖZELLİKLERİ 19

3.6. ALAŞIM ELEMENTLERİNİN BORÜR TABAKASINA TESİRLERİ 20

3.6.1. Karbon 21
3.6.2. Silisyum 22
3.6.3. Krom 23
3.6.4. Nikel 24
3.6.5. Manganez 24
3.6.6. Diğer Alaşım Elementlerinin Etkileri 25
3.7. BORLAMA METODLARI 25
3.7.1. Katı Ortamda Borlama 25
3.7.1.1. Toz Ortamda Borlama 26
3.7.1.2. Macun İle Borlama 26
3.7.2. Sıvı Ortamda Borlama 26
3.7.2.1. Normal Sıvı Ortamda Borlama 27
3.7.2.2. Elektroliz Metodu 28
3.7.3. Gaz Ortamda Borlama 29
3.7.4. Plazma Borlama 30
3.8. Çeliklerde Alaşım Elementi Olarak Bor 30
3.9. BORLAMANIN MALZEME ÖMRÜ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ 30
3.10. BORLAMANIN UYGULAMA ALANLARI 32

BÖLÜM 4 EROZİV AŞINMA

4.1. GİRİŞ 34
4.2. METALLERDE EROZİV AŞINMAYA TESİR EDEN FAKTÖRLER 35
4.3. KATI PARTİKÜL EROZYONUNDA AŞINMA MEKANİZMALARI 39
4.4. EROZİV AŞINMA TÜRLERİ 41
4.4.1. Yıkama Aşınması 41
4.4.2. Erozyon-Korozyon Aşınması 42
4.4.3. Erozyon-Kavitasyon Aşınması 42
4.4.4. Yağma Aşınması 43
4.4.5. Termal Erozyon 43
4.4.6. Püskürtme Aşınması 43
4.5. EROZİV AŞINMANIN DEĞERLENDİRİLMESİ 44

BÖLÜM 5 EROZİV AŞINDIRMA DENEY SETİNİN TASARIMI VE İMALATI

5.1. GİRİŞ 45

5.2. TASARIM ÖZELLİKLERİ 47
5.3. CİHAZIN ANA EKİPMANLARI 49
5.3.1.Kompresör 49
5.3.2. Hava Tüpü 49
5.3.3. Partikül Basınçlandırma Deposu 50
5.3.4. Ana Partikül Deposu 50
5.3.5. Karışım Borusu 51
5.3.6. Püskürtme Nozulu 51
5.3.7. Püskürtme Haznesi 51
5.4. Emniyet Testleri 52
5.5. Çalışma Prensibi 52
5.6. Püskürtme Hızı Hesabı 54

BÖLÜM 6 DENEYSEL ÇALIŞMA

6.1. GİRİŞ 57
6.2. MALZEME SEÇİMİ 58
6.3. NUMUNE HAZIRLAMA 60
6.4. SIVI ORTAMDA BORLAMA İŞLEMİ 61
6.4.1. Borlama Ortamının Hazırlanması 61
6.4.2. Sıvı Borlama İşleminin Yapılışı 62
6.4.3. Borlanmış Parçaların Temizlenmesi 62
6.5. METALOGRAFİK İNCELEME 62
6.6. BOR TABAKASI KALINLIK ÖLÇÜMLERİ 63
6.7. MİKROSERTLİK ÖLÇÜMLERİ 65
6.8. METALOGRAFİK BULGULAR 67
6.8.1. Borlanmış AISI 1020 Çeliğinin Mikroyapısı 67
6.8.2. Borlanmış AISI 3315 Çeliğinin Mikroyapısı 71
6.8.3. Borlanmış AISI 1390 Çeliğinin Mikroyapısı 75
6.9. BORLAMA SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ 79
6.9.1. Borlama Şartlarının Mikroyapı Üzerindeki Etkileri 79
6.9.1.1. Borlama Süresinin Etkisi 79
6.9.1.2. Borlama Sıcaklığının Etkisi 80
6.9.2. Borlama Şartlarının Mikrosertliğe Etkileri 81
6.9.2.1. Borlama Süresinin Etkisi 82

6.9.2.2. Borlama Sıcaklığının Etkisi 84
6.9.3. Numune Geometrisinin Mikroyapı Özelliklerine Etkisi 85

BÖLÜM 7 EROZYON AŞINMASI DENEYLERİ VE SONUÇLARININ YORUMLANMASI

7.1. GİRİŞ 86
7.2. DENEY TESİSATI 86
7.3. DENEYLERİN YAPILIŞI 87
7.4. AŞINDIRICI PARTİKÜL 88
7.5. AŞINMA DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ 90
7.5.1. Aşınan Yüzeylerin İncelenmesi 90
7.5.1.1. AISI 1020 Çeliğinin Eroziv Aşınma Davranışının İncelenmesi 90
7.5.1.2. AISI 3315 Çeliğinin Eroziv Aşınma Davranışının İncelenmesi 96
7.5.1.3. AISI 1390 Çeliğinin Eroziv Aşınma Davranışının İncelenmesi 103
7.5.2. Aşınma Miktarlarının Değerlendirilmesi 107
7.5.2.1. Borlama Süresinin Eroziv Aşınma Miktarına Etkileri 107
7.5.2.2. Borlama Sıcaklığının Eroziv Aşınma Miktarına Etkileri 109
7.5.2.3. Aşındırma Süresinin (Püskürtme Süresi) Eroziv Aşınma Miktarına Etkisi 110
7.5.3. Ortalama Bor Tabakası Sertliği İle Erozyon Oranının Değişimi 122

BÖLÜM 8 SONUÇLAR VE ÖNERİLER

8.1. Sonuçlar 127
8.2. Öneriler 130

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1. TANITIM

Günümüz teknolojisiyle üretilip farklı sektörlerde hizmet veren makine sistem ve ekipmanları, son derece mükemmel tasarlanmış olsalar bile, bir takım olumsuz faktörler sebebiyle zamanla iş yapabilme fonksiyonlarını yitirmektedirler. Bu sonucu hazırlayan en önemli etkenlerden biri olan aşınma, belli bir süreç içinde gelişen ya da ani olarak vuku bulan malzeme kaybıdır. Bir çok parametreye bağlı olmasına rağmen temel anlamda aşınma bir yüzey problemi olarak düşünülebilir. Malzeme yüzeyinin kimyasal terkibinde değişiklik meydana getirmek suretiyle aşınmaya karşı koruyucu bir tabaka oluşturarak malzemeye çeşitli aşınma mekanizmalarına karşı üstünlük kazandırılabilir. Borlama işlemi de bu maksatla kullanılan yüzey mühendisliği ısıl işlemlerinden biridir.

Bir sıvı ya da gaz akımı tarafından taşınan farklı geometrik boyut ve yapıdaki taneciklerin, temasta bulundukları katı yüzeylerinde sürekli darbe etkisi yaparak oluşturdukları hasar erozyon aşınması olarak tariflenmektedir. Pratikte en çok bu aşınma türü, pnomatik iletim hatları ve ekipmanlarında, türbün çarklarında, kumlama makinalarında, hidrolik pompalarda ve püskürtme lülelerinde karşımıza çıkar. Eroziv aşınmaya maruz kalan parçaları borlamak suretiyle işletme ömürlerinde kayda değer bir artış sağlamak mümkündür. Şimdiye kadar yapılmış çalışmaların bir çoğunda, borlama işlemlerinin, özellikle farklı türlerde aşınma olaylarına karşı üstünlük sağlamış etkili bir metod olduğundan söz edilmektedir. Ancak borlama parametrelerinin aşınma mekanizmaları esas alınarak seçilmesi gerekir.

1.2. KONUNUN ÖNEMİ

Bir çok mühendislik uygulamalarında, abrazyon ve erozyona maruz kalan parçaların ömrünü arttırmak için yüzey kaplamaları ve diğer yüzey işlem metodları kullanılmaktadır. Bu tür aşınma olaylarına karşı, ısıl işlemle veya kaplamak vasıtasıyla nitelik kazandırılan malzemelerin dirençlerini belirlemek, olayı iyi karakterize etmek açısından önemlidir. Dökümden çıkan parçaların temizlenmesi, buhar kazanı ve gemicilik sanayinde kullanılan sac yüzeylerindeki tufal ve kalıntıların temizleme işlemlerinde yararlanılan kumlama makinalarının lüle ve parçaları, işletmelerdeki pnomatik iletim hatları, özellikle borular ve boru dirsekleri, vantilatör kanatları, kırma ve öğütme tesisatları, pompa ve valfler eroziv aşınma sebebiyle fonksiyonlarını yitirmektedir. Bu olayların sebep olduğu hasar, üretimde duraklamaya işgücü ve zaman kaybına yol açarak mali külfet getirmesinin yanısıra işletmeleri bu tür aşınma olaylarına karşı dayanıklı, ithal ve yüksek maliyeti olan malzeme arayışına itmektedir. Eğer uygun bir borlama tekniği seçilirse bu ekipmanların ömrünü artırıp tasarruf sağlamak mümkündür. Ayrıca, erozyona maruz kalan tüm tesisat ekipmanlarının borlanması yerine kritik öneme sahip olanların borlanması da düşünülebilir. Duruma ülkemiz açısından bakıldığında sahip olduğumuz yüksek bor potansiyeli düşünülerek aşınmaya karşı direnç kazandırmak maksadıyla borlama tekniklerinin kullanılması büyük kazanç sağlayacaktır.

1.3. TEZİN AMACI

Bu çalışmada, az karbonlu, az alaşımlı ve yüksek karbonlu çelik sınıflarına dahil sırası ile AISI 1020, 3315 ve 1390 çeliklerinden hazırlanarak normalize edilen (borlanmamış) ve sıvı ortamda borlama tekniği ile farklı süre ve sıcaklıklarda borlanan numunelerin, yine bu araştırma için tasarlanıp üretilmesi planlanan eroziv aşındırma deney tesisatında, aynı şartlar altında erozyon aşınmasına maruz bırakılmaları sonucu, borlama işleminin, bu tür çeliklerde eroziv aşınma üzerindeki etkilerini belirleyerek, borlanmış ve borlanmamış durumda sergileyecekleri eroziv aşınma davranışlarının ve eroziv aşınmaya karşı optimum borlama parametrelerinin tespit edilmesi amaçlanmıştır.

BÖLÜM 2

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. GİRİŞ

Literatürler incelendiğinde, bir çok standart çelikten, polimerik ve kompozit malzemelere dökme demirden betona kadar çeşitli malzeme gruplarının erozyon aşınmasına karşı davranışları gerek yüksek sıcaklıklarda gerekse oda sıcaklığında yapılan deneylerle belirlenmeye çalışılmıştır. Ancak borlanmış malzemelerin erozyon aşınması çalışmalarına daha az rastlanılmaktadır. Bu çalışmalar daha ziyade eroziv aşınma türlerinden olan; erozyon-korozyon ve erozyon-kavitasyon mekanizmaları kapsamındadır. Eroziv aşınma türleri arasında yer alan püskürtme aşındırması olarak da adlandırılan ve yüksek hızda gaz akımı tarafından taşınan aşındırıcı taneciklerin sebep olduğu aşınma olaylarına karşı borlanımış malzemelerin dayanımları üzerine yapılan çalışmalar ise az sayıdadır. Bu bölümde borlama işlemi ve erozyon aşınması konusunda yapılmış çalışmalara iki alt başlık olarak değinilmiştir.

2.2. BORLAMA ÇALIŞMALARI

2.2.1. Ülkemizde Yapılan Araştırmalar

Dünyadaki toplam bor rezervlerinin % 64'ünün Türkiye'de, % 10'unun ABD'de olduğu dikkate alındığında, nükleer silahlar ve nükleer reaktörlerden, havacılık sanayiine, tekstil sektöründen, ilaç, kimya ve kağıt üretimi gibi yüzlerce alanda kullanılan bor cevherleri açısından ülkemiz oldukça zengindir. Duruma çeliklere uygulanan borlama teknikleri açısından bakılırsa, bu cevherlerin çok özel bir işleme gerek kalmadan kullanımlarına

imkan veren metodun sıvı ortamda borlama işlemi olduğu görülür. Nitekim bu durum öncelikle araştırmacıları bu tekniği kullanarak çalışma yapmaya yöneltmiştir. Katı ortamda borlama çalışmaları ikinci sırada yer alır. Özsoy [1], Ç 1045 çeliğini, termal çevrimli ısıl işlemli bir sıvı ortam borlama tekniği ile borlamak sureti ile, borür tabakası, geçiş bölgesi ve ana matriksin özelliklerini iyileştirmeyi amaçlamış ve termal çevrimli borlamada borür tabakası kalınlığının daha üniform ve daha az poroziteli olduğu; geçiş bölgesi ve matriksin tane boyutunun küçüldüğü, tabakanın sertlik değerlerinde ise bir değişimin olmadığını belirlemiştir. Bozkurt [2], bor minerallerinin metalurjide değerlendirilmesine yönelik bor bileşikleriyle çeliklerde yüzey sertleştirme işlemini sıvı ortamda uygulayıp; boraks, borik asit ve kalsine borik asitten oluşan banyodaki kalsine borik asit miktarının ağırlıkça % 18'den fazla olması durumunda Fe_2B fazının yanısıra arzu edilmeyen FeB fazının da meydana geldiğini tespit etmiştir. Aynı borlama tekniğini kullanan Bindal [3], az alaşımlı ve karbonlu çeliklerde, yüzeye kaplanan borürlerin özelliklerini belirlemeye çalışmıştır.

Aşınma direnci için, malzemenin aşındırıcıdan daha sert ve sürtünme katsayısının daha düşük olması istenir. Borlama ile bu özellikler büyük ölçüde sağlanabilmektedir. Taşçı [4], borlanmış çeliklerin aşınma ve korozyon dayanımları üzerine yaptığı çalışma sonunda, sıcaklık artması halinde borlanmış tabakaların sertliklerini muhafaza ettiklerini ve demir grubu malzemelerin borlanması durumunda bazı asit ve sıvı metallere karşı büyük dayanım kazandırıldığını buna ilaveten korozyonlu yorulma ömründe % 200 civarında bir artış sağlandığını bildirmiştir. Selçuk [5], sementasyon ile sertleştirilerek kam mili üretiminde kullanılmakta olan AISI 5115 çeliğinin yerine toz ortamda borlanarak sertleştirilen AISI 1020 çeliğinin kullanılabilirliğini deneysel olarak araştırmıştır. Çalışma sonunda borlama ile sertleştirmenin semente etmeye göre daha etkili olduğu; borlanarak yüzeyi sertleştirilen AISI 1020 çeliğinin düşük yüklerde, semente edilmiş AISI 5115 çeliğinin yerine kam mili üretiminde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Bir başka sıvı ortamda borlama çalışmasında Akgündüz [6], borlanan AISI 1020, 1040, 1050 ve 8620 çelik numunelerin, ister havada, ister suda soğutulması durumunda yüzey sertliklerinde herhangi bir değişimin olmadığını ancak, düşük karbonlu çeliklerin bünye sertlik değerlerinde, suda soğutulmaları halinde 50-100 HV kadar cüzi bir artış olduğunu bildirmiştir. Ayrıca aynı çalışmada, SAE 4140 çeliğinin yerine alternatif olacak ve en az bu çelik kadar mukavemet değerinde, daha ucuz bir çelik olarak 21MnBCr4 çeliği seçilmiştir. Borlanmış yüzeylerin asit korozyonuna dayanımı için, alaşımlı SAE 8620 ve düşük

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

alaşımlı SAE 1020 ile yapılan deneyde, SAE 8620 asitlere karşı dayanım gösterdiği; SAE 1020 çeliğinin ise borlanmış yüzeyinin asitlere dayandığı, borsuz kısmının korozyona uğradığı gözlenmiştir. Selçuk, İpek ve Karamış [7], borlama ile sertleştirilen AISI 1020 ve AISI 5115 çelik yüzeylerinde yaptıkları mikroyapı ve mikrosertlik incelemeleri yanısıra borlanmış çelik numuneleri çekme testlerine tabi tutarak, borlamanın bu özelliklere etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada, numunelerin borlanmış durumda yüzey sertlikleri karbonitrürlenmiş, semente edilmiş ve normalize edilmiş durumlarda elde edilen değerlere göre yüksek bulunmuş, mukavemet ve etkili sertlik derinliklerinin ise düşük olduğu belirlenmiştir. Yüksel, Can ve Özmen [8] X210Cr12, soğuk iş takım çeliğini sıvı ortamda 4 farklı banyo muhtevası kullanarak borladıkları çalışmada, çelik yüzeyindeki mikrosertlik değerlerinin 1600-2000 $VSD_{0,025}$; matriks sertliğinin 930-1000 $VSD_{0,025}$ olduğu ve borür tabakası kalınlığının 60-100 μm arasında değiştiğini tespit etmişlerdir. Şen [9], borlanmış küresel grafitli dökme demirlerin özelliklerini araştırmış, numuneler üzerinde yapılan mikroyapı çalışmaları sırasında, FeB ve Fe_2B fazlarının mevcut olduğu; FeB fazının çoğu zaman bor tabakasında geniş bir alanı kapladığı elektron mikroskobu görüntülerinde belirlenmiştir. Ayrıca bor tabakasındaki küre boyut değişimin, matrikste bulunan kürelere göre değişimini tespit ederek, borlama süresi ile oluşan tabaka kalınlıklarını belirlemeye çalışmıştır.

Dökme demirlerin borlanması konusunda bir diğer çalışmayı Selam [10] yapmıştır. Çalışmada gri dökme demirin borlanması neticesinde aşınma davranışı deneysel olarak incelenip metalografik ve mikrosertlik taramaları yapılmıştır. Sıvı ortamda 900-1000 ^0C gibi yüksek sıcaklıklarda borlanan dökme demir numunelerin mikrosertlikleri, borlanmış çeliklerin değerlerine yakın bulunmuş ve borlanmayan dökme demir numuneler aşınmaya karşı direçsiz olduğu halde, borlanan numunelerin yüksek direnç gösterdikleri pim-disk aşınma deney testleri doğrultusunda ortaya konmuştur.

Özellikle son on yıl zarfında yapılan borlama çalışmalarına bakılırsa, toz ortamda veya macun şeklinde tatbik edilebilme imkanı bulunan, uygulamada pratik, güvenli ve az sarfiyatlı oluşu gibi başlıca üstünlükleri olan, bir kısım yabancı firmaların patentli olarak ürettiği katı borlama kaynaklarının kullanıldığı çalışmaların hız kazandığı görülür. Nair [11], koruyucu gaz atmosferinde macun borlama tekniğiyle AISI 1020, 1040 ve 4140 çeliklerini borlamıştır. Aynı borlama işlemiyle Nair ve Karamış [12], farklı alaşım ve karbon oranlarına sahip çelikleri borlayarak 30-60 μm tabaka kalınlığı ve 700-1750 $HV_{0,06}$

arasında değişen sertlik değerlerini tespit edip, bu değerler yardımıyla farklı alaşım ve karbon oranlarına sahip çeliklerin farklı mikrosertlik değerlerinde oldukları ve sertlik dağılımlarının benzeşmediği sonucuna varmışlardır.

Sürtünen yüzeylerin sertlikleri çoğunlukla abrasiv aşınmaya etkimektedir. Özmen [13], X210Cr12 çeliğini toz ortamda borlayarak, bu çeliğin aşınması üzerinde borlama ile yüzey sertleştirmenin etkisini incelemek için yaptığı çalışmada, borlanan numunelerin aşınma dirençleri, temperlenmiş ve su verilmiş olanların dirençlerine göre yaklaşık 8-10 kat daha yüksek çıkmış, mikrosertlik taramaları sonuçları ise diğer araştırmacıların buldukları sonuçlar ile benzerlik göstermiştir. Meriç ve Arkadaşları [14], borlamanın kaynak bölgesine etkisini incelemek amacı ile elektrik ark kaynağı ve gaz altı kaynak yöntemleri ile birleştirilen AISI 1040 ve 8620 çeliklerinin katı ortamda borlama ürünlerinden biri olan Ekabor HM ile 4 saat süreyle farklı sıcaklıklarda borlanması sonucu kaynak bölgesi ve çevresinde borlamanın etkisini araştırmışlardır. Ölçülen borür tabakası kalınlıkları karşılaştırıldığında, borür tabakasının; kaynak bölgesinde, ısının tesiri altında kalan bölgede ve esas metalde aynı miktarda geliştiği gözlenmiştir. AISI 1040 ve 8620 çeliklerinin mikrosertlik değerleri kıyaslandığında ise, bu değerler açısından belirgin bir farklılık olmadığı görülmüştür. Demirci [15], demir esaslı malzemelerin borlanması ile kavitasyon dayanımının değişimi üzerine yaptığı deneysel araştırmada elde ettiği bulgulara dayanarak borlama ile kavitasyon dayanımında yaklaşık 4 katlık bir artış sağlanabileceğini belirtmiştir.

Literatürde spesifik borlama çalışmalarının yanısıra, borlanmış malzemelerin kullanım alanlarına yönelik ve genel karakteristik özelliklerinin anlatıldığı çalışmalara rastlamak mümkündür. Tezcan [16], borlama işlemi ve endüstriyel uygulama alanlarını bildirmiştir. Nair, Karamış ve Taşdemirci [17], endüstriyel uygulamalarda kullanılan borlanmış çeliklerinin aşınma davranışlarını irdelemişlerdir. Bir diğer çalışmada Karamış, Nair ve Selçuk [18], borlanmış malzemelerin tribolojik özellikleri konusunu incelemişlerdir. Selçuk ve Arkadaşları [19], borlanmış ve karbürlenmiş AISI 1020 ve 5115 çeliklerinin aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Aşınma testleri, kuru sürtünme şartları altında pleyt-on-disk aşındırma cihazında yapılmıştır. Çalışmada, borlanmış AISI 1020 çeliğindeki ağırlık kaybının, karbürlenmiş AISI 5115 çeliğindeki kayıptan daha düşük olduğu gözlenmiştir. Pektaş [20], AISI 1020 çeliğini katı ortamda B_4C ile borlaması neticesinde elde edilen borür tabakasının, aşınmaya ve sürtünmeye karşı mukavemetli olduğu

sonucuna varmıştır. Gaz borlama teknikleri ile borlama işlemleri ve bu tekniği kullanarak yapılan çalışmalara ise pek rastlanılmamıştır. Bunda işlemin can güvenliği açısından tehlikeli ve pahalı olmasının yanısıra yeterince tanınmamasının da payının büyük olduğu düşünülmektedir.

2.2.2. Yurtdışında Yapılan Araştırmalar

Bilinen borlama teknikleri kullanılarak yapılan çalışmaların yanısıra, plazma macun borlama, süper plastik borlama ya da geliştirilmiş modern gaz borlama prosesleri olarak tariflenen tekniklerin tanıtıldığı çalışmalarla beraber, bor elementinin sert elementlerle oluşturduğu karborit, vanadyum borür ve titanyum borürler gibi bileşik oluşturmaya yönelik çalışmalara ve borlama-kromlama, borlama-nitrürleme, borlama-karbürleme gibi iki veya daha fazla sayıda metodun birlikte kullanıldığı çalışmalara da rastlamak mümkündür.

Tsipas ve Rus [21], alaşımlı çelikleri borlayıp, Cr, Ni, Mn ve Karbon elementlerinin borür tabakasında ve dışında gösterdikleri davranışları araştırmışlardır. Habig ve Chatterjee-Fishert [22], alaşımlı çeliklerdeki borür tabakasının aşınma davranışını belirlemek amacıyla yaptıkları çalışma sonunda, abrasyon ve tribooksidasyonun temel aşınma mekanizması olduğu durumlarda borür tabakalarının en düşük aşınmayı sergileyeceklerini bildirmişlerdir. Hunger ve Trute [23], aşınmaya karşı dirençli yüzey tabakaları üretmek için macun veya toz halinde tatbik edilebilen katı borlama ürünlerini kullanarak abrasyon ve adhezyona karşı etkili bir koruma sağlanacağına dikkat çekmiş ve işlemin uygulama alanları hakkında bilgi vermişlerdir. Yine bu çalışmada alaşım elemanlarının etkileri de irdelenmiştir. Rebholz ve Arkadaşları [24], 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. Yoon ve Arkadaşları [25], AISI 304 çeliğini, plazma pasta borlama tekniği kullanarak borlamışlardır. Hacimce Ar/H_2: 2/1 olan bir gaz karışımı atmosferinde 1023 ve 1223 °K arasındaki birkaç farklı sıcaklıklarda gerçekleştirdikleri çalışmada, çelikte düz morfolojide bir borür tabakasının oluştuğu; XRD analizleri neticesinde de kromca ve nikelce zengin bölgelerin varlığı belirlenmiştir. Kullanılmış olan bu borlama tekniği, geleneksel borlama metodları ile kıyaslandığında borür tabakasının oluşum süresi ve aktivasyon enerjisi daha düşük bulunmuş ayrıca paslanmaz çelikler için plazma pasta borlama tekniğinin çok etkili ve ekonomik olacağına dikkat çekilmiştir. Lin ve Cheng [26],

borlanmış orta karbonlu çelikler üzerinde titanyum, aluminyum, bor ve hidrojenin, çeliğin sertleşebilme kabiliyetine olan etkilerini görebilmede kolaylık sağlayacak matematiksel bir model oluşturmaya çalışmışlardır. Araştırmada hidrojeni emmede titanyum kadar, bor elementinin de etkili olduğu görülmüştür. A. F. Sofroshenkov ve I. A. Sofroshenkov [27], kalıpların ve kesme takımlarının aşınma dirençlerini arttırmak için, hız çeliklerinin borlanması ile 20000 MPa sertliğinde FeB; 16000 MPa sertliğinde Fe_2B tabakalarının oluştuğunu ve bu tabakaların Fe-B denge diyagramıyla uyum gösterdiğini bildirmiştir. Kuper ve Arkadaşları [28], gaz borlama tekniğini ve plazma borlama işlemlerini AISI 4140, C1043 ve düşük karbonlu bir çeliğe uygulamışlardır. İşlem neticesinde oluşan borür tabakalarını X ışını diffraktometresi, optik, mekanik testler ve pin on disk aşınma testleri uygulayarak karakterize etmeye çalışmışlardır. Xu ve Arkadaşları [29], borür tabakalarının mekanik özelliklerini geliştirmek maksadıyla süperplastik borlama işlemi adı verilen esasen borlama ve süper plastik deformasyonun birlikte uygulandığı bir yöntemi kullanarak, düşük alaşımlı bir çeliği borlamışlardır. Bunu takiben buldukları sonuçları bilenen borlama yöntemleriyle ulaşılan mekanik özelliklerle kıyasladıklarında numunelerin kırılma dayanımlarında % 8, tokluklarında % 18'e varan bir artış kaydetmişlerdir. Xın ve Meng-lan [30], borlanmış çeliklerin aşınma dayanımlarına, artık gerilmelerin etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada, kromlu çeliklerin borlanmasına müteakip çeşitli ısıl işlemler uygulanarak, tek fazlı Fe_2B tabakasının aşınma direnci ve artık gerilmeler ile ilgili deneysel ölçümler alınması suretiyle, artık gerilmelerin ısıl işlemler ile düzenli olarak değişim gösterdikleri ve çeliklerin aşınma dirençlerine önemli derecede tesir ettikleri belirtilmiştir.

Bor elementi vanadyum ve titanyum gibi sert metallerle birleşerek çok sert karbürler oluşturabilir. Gidikova [31], 1200 °C ve 11 saati aşan sürelerde çelik yüzeylerine vanadyum'un termal diffüzyonunu sağlayarak 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 diffüzyon tabakası tespit edilmiştir. Sinha [32], borür tabakalarının karakteristik özellikleri, alaşım elementlerinin etkisi, demir esaslı ve demirdışı malzemelerin borlanması ve borlama teknikleri konularını kapsamlı bir biçimde ele almıştır.

2.3. EROZİV AŞINMA KONUSUNDA YAPILAN ÇALIŞMALAR

Malzeme özelliklerinin erozyon hasarı üzerindeki etkisini belirlemek, erozyona en iyi direnci veya en uygun direnci gösteren malzemeyi seçmek ve yahut da dirençlerine göre sıralama yapmak maksadı ile yola çıkan bir çok araştırmacı başta, metal ve polimerik esaslı malzemelerin erozyon davranışları olmak üzere, seramik, kompozit malzemeler ve kaplamaların yanısıra boya ve beton gibi farklı sınıf malzemelerin eroziv aşınma davranışları üzerinde araştırma yapmışlardır. Temel anlamda bakılırsa, bu çalışmalarda hedef malzeme özelliklerinin ve mikroyapısının tesiri, çarpan partiküllerin hızı, çarpma açısı ve geometrik şeklinin etkileri deneysel sonuçlarla ve matematiksel modeller oluşturularak ortaya konmaya çalışılmıştır. Bununla birlikte, erozyonun; korozyonla ve kavitasyonla birlikte meydana geldiği ayrıca termal aşınma olaylarının görüldüğü sistemlerde, sıcaklık ve eroziv çevrenin malzemedeki etkileri de bir kısım araştırmacılar [50,54,56,57] tarafından incelenmiştir.

Eroziv aşınma, farklı aşınma modlarını kapsar [34] ve katı taneciklerin veya sıvı damlacıklarının sürekli çarpma etkisi yapmaları sonucunda temasta bulundukları yüzeylerden malzeme kaybı olarak ifade edilir [35]. Eroziv aşınma olarak nitelenen deneysel amaçlı yapılmış çalışmaların büyük çoğunluğunda incelenen malzeme, katı partikül püskürtülmek suretiyle aşındırılmıştır. Esasen bu işlem püskürtme aşınması olarak bilinen eroziv aşınma türlerinden biridir. Sundararajan ve Roy [36], katı partikül erozyonuna maruz bırakılan metalik malzemelerin oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklarda gösterdikleri erozyon davranışlarını incelemişlerdir. Finnie ve Mcfadden [37], düşük çarpma açılarında düktil metallerin erozyonu üzerine araştırma yaparak kesme mekanizmasını matematiksel ve deneysel olarak analiz etmeye çalışmışlardır. Gürleyik [38,39], püskürtme aşınmasının (katı partikül erozyonu) meydana geliş yerleri, taneli minerallerin, püskürtme açısının ve hızının etkilerini irdelemiştir. Oka ve Arkadaşları [40], silika kumu kullanarak beş tür metalik malzeme ve birer tür plastik ve seramik malzeme üzerinde erozyon testleri yaparak, katı partiküllerin sebep olduğu erozyon hasarının çarpma açısına bağlılığını, sertlik ve çarpma açısının her ikisinin trigonometrik bir fonksiyonu olarak ifade ederek, test edilen malzemelerin normalize edilmiş erozyon hasarı eğrilerini temel olarak çarpma hızı hariç, çarpma koşullarına bağlı bazı sabitler ve üstel ifadelerle ilişkilendirmişlerdir. Aynı araştırmacı diğer bir çalışmasında [41], katı partikül çarpmalarının sebep olduğu erozyon hasarı ve yüzey sertliği arasındaki ilişkiyi

incelemiştir. Benchaita [42], bir sıvı içerisinde süzülen katı taneciklerin metalik yüzeyler üzerinde oluşturdukları eroziv-abrasiv aşınmayı ifade edecek tarzda matematiksel bir model oluşturup, deneysel bulgularla karşılaştırma yapmıştır. Stachowiak [43], partikül açısallığının eroziv ve abrasiv aşınma ile ilişkisini nümerik bir parametre ile tanımlamış, partikül açısallığının aşınma hızı üzerindeki etkisine, grit partiküllerin kırılma tokluğu ve mekanik özelliklerinin de tesiri olduğunu belirlemiştir. Shipway ve Hutchings [44], sinterlenmiş borkarbür'ün eroziv aşınmasına partikül özelliklerinin etkilerini inceleyerek, farklı cins aşındırıcı partiküllerin malzemede farklı aşınma hızları ve mekanizmaları oluşturduğunu tespit etmişlerdir. Rutherford ve Arkadaşları [45], galvenizlenmiş çelik ve polimer esaslı malzemeye kaplanan 20-70 μm kalınlıklı altı farklı boyanın, polimerik otomobil boya kaplamaları üzerinde abrasiv ve eroziv aşınma çalışmaları yapmışlardır. Çalışmada erozyon sürecinin kaplama tabakasından çok kaplanan malzeme ile bağlantılı olduğu bildirilmiştir. Wang ve Arkadaşları [46], silisyumkarbür seramiklerde, eroziv aşınmaya mikroyapının etkisini araştırmışlardır. Üç tür SiC yapılı seramik malzemenin, yine SiC tanecik püskürterek farklı çapma açıları ve üfleme hızlarında test edilmesi sonrası oluşan yüzey hasarlarını inceleyerek, eroziv aşınma direnci ve mekanizmasının mikroyapıyla ilişkili olduğu sonucuna varmışlardır. Li ve Hutchings [47], döküm poliüretan elastomerlerin katı partikül erozyonuna karşı direncini araştırmış, sertlik, gerilme modulü ve gerilme mukavemeti artışı ile erozyon oranının arttığını; olayın, eroziv aşınmaya maruz kalan diğer elastomerik malzemelerde görülen aşınma mekanizmalarına benzediğini bildirmişlerdir. Guo ve Arkadaşları [48], düşük kromlu beyaz dökme demirdeki eroziv aşınma üzerinde aşındırıcı partikül sertliğinin önemli derecede etkili olduğunu belirtmişlerdir.

Bunun yanısıra, ötektikaltı, ötektik ve ötektik üstü yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde küresel ve köşeli partiküller kullanarak eroziv aşınma olayını araştıran Adler ve Doğan [49], ötektik dökme demirin, ötektik altı dökme demire göre daha yüksek oranda aşındığı ve daha büyük boyuta ve yoğunluğa sahip olan WC-Co yapılı küresel taneciklerin, alumina partiküllere nispeten erozyon oranını daha fazla arttırıcı etkide bulunduğunu belirtmişlerdir. Friedrich [50], çeşitli türdeki polimerik malzemeler üzerinde eroziv aşınma deneyleri yaparak, yumuşak polietilen, polipropilen, polibütan gibi daha yumuşak polimerlerin lineer bir erozyon oranı göstermeden önce bir inkübasyon periyodu (kuluçka) sergilediklerini; polistiren gibi daha kırılgan olanlarda inkübasyon periyodu göstermediklerini ve en yüksek erozyon oranına sahip olduklarını tespit etmiştir. Momber

[51], grit partikül püskürterek betonun bu tür aşınmalara karşı direncini tespit etmeye çalışmıştır. Nair ve Karamış [52], ısıl işlemle sertleştirilmiş 50-52 HRC sertliğinde AISI 4140 çeliğinden imal edilmiş kum püskürtme nozulu ile maliyeti daha ucuz olan AISI 1020 çeliğinden imal edilerek borlanmış nozuldaki erozyonu kıyaslamışlardır. Yapılan değerlendirme neticesinde borlanmış nozulun ömrü, diğerine göre yirmi kat yüksek bulunmuştur. Mann [53], buhar türbün kanatlarında koruyucu tabakalar ve erozyon adlı çalışmasında, kanatlardaki erozyonun akış koşullarıyla ilişkili (özellikle akış ayrılması) olduğunu vurgulamıştır.

Aynı çalışmada borlama işlemi ile kanatçık üzerinde sert bir tabaka oluşturulması durumunda eroziv aşınma direncinin % 720-920 geliştiği gözlenmiştir. Wang ve Geng [54], 450-550 ^{0}C sıcaklığa sahip bir gaz-partikül karışımı kullanarak, su ile soğutulan 1018 çeliğinde erozyon-korozyon deneyleri yapmıştır. Sonuç olarak, soğutulan numunedeki metal zayiatı, soğutulmayan numuneye göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Erozyon kaybının metal yüzeyi ve ortam arasındaki sıcaklık farkıyla ilişkili olduğu ve bu farkın artışıyla, erozyonun artığı sonucuna varmışlardır. Fang ve Arkadaşları [55], Alümina-fiber ve TiB2 takviyeli alüminyum esaslı kompozitlerin, su - SiC partikül jeti kullanarak aşınma testlerini yaparak, alüminyum metal matriksli kompozitlerin erozyon direncinin Al alaşımı, matriks ve seramik fiberler ya da partiküller arasında bağı sağlayan takviye elemanlarıyla ilişkili olduğunu belirlemişlerdir. Stack ve Arkadaşları [56], yüksek sıcaklıklarda erozyon-korozyon etkili çevrelerde korozyon direnci ve hız arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Suckling ve Allen [57], 600 °C sıcaklığında 1Cr $\frac{1}{2}$Mo çelik kazan borusunun erozyonu üzerinde partikül boyut şekli, hızı ve akısındaki kritik değişimleri inceleyerek yüksek sıcaklıklarda eroziv aşınma çalışması yapmışlardır. Ambrosini ve Bahadur [58], değişik ısıl işlem görmüş AISI 4140 çeliğinin erozyonunu inceleyerek, ostemperleme şartlarında benyit oranının artışıyla erozyonun azaldığını bildirmişlerdir. Morrison ve Arkadaşları [59], 304 paslanmaz çeliğinin erozyonunu incelemiş ve paslanmaz çelikler gibi düktil metallerde tüm çarpma açılarında (10-90°) tek bir erozyon mekanizmasının etkili olduğunu bildirmişlerdir. Burnett ve Rickerby [60], çeliklerde TiN kaplamaların erozyonu konulu çalışmasında kalın tabakaların ince tabakalara göre daha yüksek erozyon direncine sahip olduklarını tespit etmişlerdir. Rutherford ve Hutchings [61], takım çeliğini PVD metoduyla TiN kaplayarak ince tabakaların erozyon test şartlarını karakterize etmeye çalışmışlardır.

BÖLÜM 3

BORLAMA İŞLEMİ

3.1. GİRİŞ

İlk kez 1895 yılında Moisson, çeliklerin borlanabileceğini söyleyip bu konuda çalışmalara başlamıştır. 1970'li yıllardan itibaren borlama konusundaki çalışmaların hız kazanması neticesinde, günümüzde geleneksel borlama metodları olarak adlandırılan katı, sıvı ve gaz borlama işlemleri doğup gelişme göstermiştir. Zaman geçtikçe borlama teknolojilerinde kaydedilen ilerleme, işlemin farklı malzemelere uygulanabilirliğine imkan sağlanmasına ve çalışma şartlarına uygun nitelikte direk veya dolaylı malzeme üretimine fırsat vererek prosesin endüstriyel anlamda kullanım sahasını genişletmiştir. Bu süreç içerisinde bir çok araştırmacı tarafından gerek borlama tekniklerini geliştirmek, gerekse borlanan malzemelerin özelliklerini iyileştirme amaçlı çok yönlü çalışmalar ortaya konmuştur. Bu çalışmaların büyük bir çoğunluğu, endüstriyel üretimin ve gelişimin temel elemanı olan çelikler üzerinedir. Borlama, çeliklerde çeşitli aşınma mekanizmalarına karşı korumada etkili bir metod olmasının yanında işlemin özünü oluşturan bor elementinin çeliklerde alaşım elemanı olarak da kullanılabilir oluşu özellikle sertlik kazandırma açısından büyük bir avantajdır. Borlama için başlangıçta alaşımsız veya düşük alaşımlı çelikler seçilmekte iken bugün artık bu işlem, karbonlu çelikler başta olmak üzere, alaşımlı çeliklere, nikel alaşımlarına, dökme demirlere, sert metallere ve hız çeliklerine [27] başarı ile uygulanabilmektedir.

3.2. BOR HAKKINDA GENEL BİLGİ

Türkiye'de bol miktarda bulunan bor mineralleri çeşitli makina parçaları, tekstil, kimya, seramik, plastik endüstrisi kollarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bunun yanısıra özellikle yüksek teknoloji uygulamalarında havacılık ve uzay sanayi başta olmak üzere nükleer reaktörlerde bor elementinin nötron toplayıcı özellikte olması sebebiyle kullanım ağı genişlemiştir.

3.2.1. Bor' un Tabiatta Bulunuşu

Bor, yerkabuğunun litosfer kayaçlarında [33] boratlar halinde bulunur. Tabiatta 60 çeşit bor minerali olmasına rağmen, ekonomik olarak kullanım imkanı sağlayan sadece bir kaç tane vardır. Ekonomik önemi olan Tinkal; kolemanit, kernit ve üleksit adı verilen minerallerden elde edilmektedir. Bu mineralllerden Borikasit (H_3BO_4), Anhidrik Borik Asit (BO_3), Boraks Pentahidrat ($Na_2O.\ 2B_2O_3\ .5H_2O$), Boraks Dekahidrat ($Na_2O.\ 2B_2O_3.\ 10H_2O$) ve Anhidrik boraks ($Na_2O.\ 2B_2O_3$) gibi satılabilir ürün haline getirilir. Bu ürünler % 99.5 veya daha da üzerinde saflıklarda olabilmekte ve kristalin granüler veya toz halinde arz edilebilmektedir. Metalik bor, % 90-99 arasında bor içerir. Ferrobor % 0,2-24 B içeriği ile üretilir. Bu, özellikle çelikte alaşım elamanı olarak kullanılmaktadır. Bornitrür (BN) ve Borkarbür (B_4C) en sert malzemeler arasındadır [4,16].

3.2.2. Bor Elementinin Özellikleri

Element olarak periyodik cetvelin 3. grubunda bulunan borun, atom numarası 5, atom ağırlığı 10.82, atom çapı 1,78 A^o ve ergime noktası 2400 °C'dir. Bor: 2,31-2,35 g/cm^3 yoğunlukta amorf olarak iki şekilde bulunur. Kristalin borun kristal şekilleri ve kafes parametreleri Tablo 3.1'de verilmiştir.

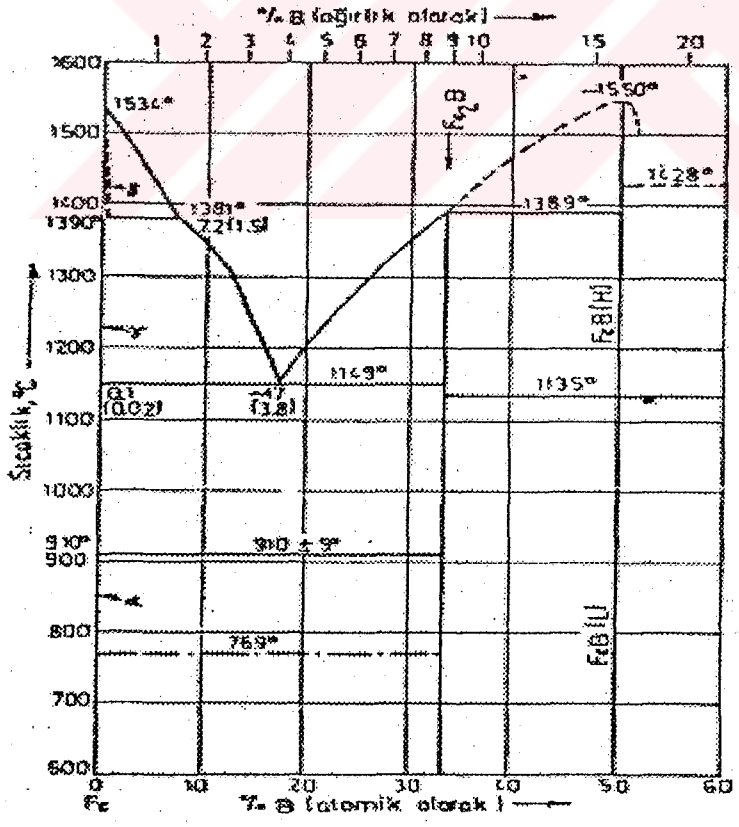
Tablo 3.1. Kafes Parametreleri [4].

Kristal Şekli	Kafes parametreleri (A^o)	
	B	C
Tetragonal Hegzagonal	8.13 9.54	8.57 11.98

Demir ve bor arasında değişen etki çok az açıklanabilmektedir. Bor atomu çapı, demir için arayer atomu olarak biraz büyüktür. Diğer taraftan yeralan atomu olabilmesi için küçüktür. Bu nedenle borun demir içerisinde çözünebilirliği çok azdır. A3 dönüşüm noktasında çözünebilirliği α demirinde, γ demirine oranla daha büyüktür. Buradan bor demir kafesinde değişken atom olarak bulunması gerektiği aksi halde çözünebilirlik oranının ters olması zorunluluğu görülür. O halde yüzey merkezli kafeste arayer atomu; hacim merkezli kafeste ise yer alan atomu halindedir. Bor daha çok yapısal hata olarak tane sınırlarında ve dislakasyonlarda bulunabilir. Borun yapı üzerine etkisi daha çok yüzey gerilmelerini çok fazla arttırma şeklinde görülür [16].

3.2.3. Demir-Bor Denge Diyagramı

Hansen'in belirttiği Fe-B denge diyagramına göre; ağırlık olarak % 8,83 bor oranında Fe_2B ve % 16,23 bor oranında FeB olmak üzere iki tür borür ve ergime noktası 1149 ^{0}C olan % 3,8 bor oranında bir ötektik oluşmaktadır. Fe-B sisteminde alaşım elementleri, örneğin % 1 C ötektik sıcaklığını 50 °C aşağıya düşürür. Şekil 3.1'de Fe-B denge diyagramı gösterilmiştir.

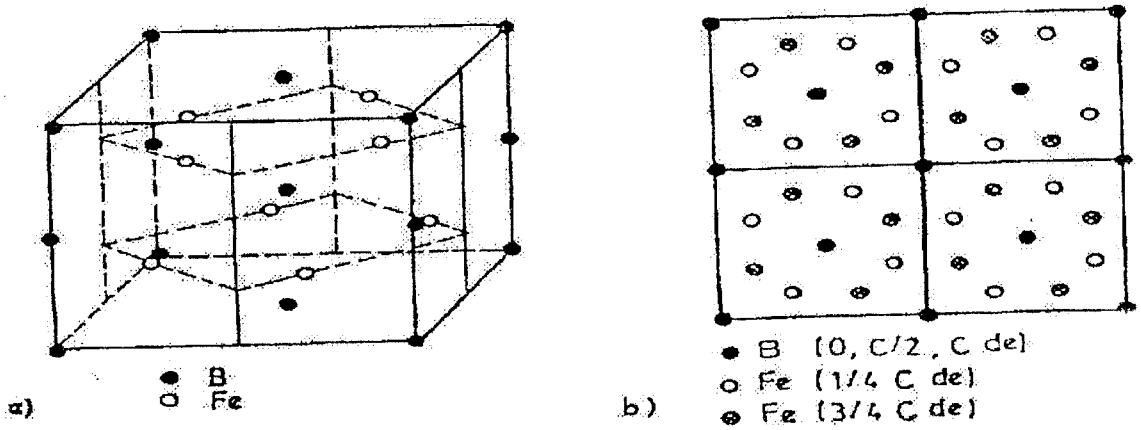


Şekil 3.1. Demir- Bor denge diyagramı [1].

Demir borürlerin yapısı birçok araştırmacı tarafından incelenmiş olup, FeB'un ortorombik yapıya sahip olduğu, birim kafesin 4Fe ve 4B atomundan meydana geldiği bilinmektedir. Bor atomları arasındaki mesafe (B-B) 1,77 A°dur. Fe_2B, 12 atomlu olup tetragonal yapıdadır [1]. Fe_2B kristalinin birim kafesi ve (001) düzlemindeki projeksiyonu Şekil 3.2'de, FeB ve Fe_2B'un bazı fiziksel özellikleri Tablo 3.2'de verilmektedir.

Tablo 3.2. Borür Tabakalarının Karakteristik Özellikleri [4].

Özellik	Fe_2B	FeB
Ergime noktası, °C	1390	1550
Genleşme katsayısı (1000 °C), K^{-1}	$8,0x10^{-6}$	$10\text{-}16x10^{-6}$
Isı iletkenlik katsayısı (1000 °C) W/cm °C	0,2-0,3	0,1-0,2
Özdirenç (20 °C), μohm cm	~38	~80
Teorik yoğunluk, g/cm^3	7,43	6,75
Kristal sistemi	tetragonal hacim merkezli	Ortorombik
Kafes parametreleri, A°	a=5,0,78	a=4,053
	c=4,249	b=5,495
		c=2,946



Şekil 3.2. (a) Fe_2B kristalinin birim kafesi ve (b) (001) düzlemindeki projeksiyonu [1].

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU DOKÜMANTASYON MERKEZİ

3.3. BORLAMA SONUCU OLUŞAN TABAKALAR

Borlama işleminde borun yüzeye yayılması sonucu borlanan parçanın en üst yüzeyinde bileşik tabaka adı verilen borürlü bölge, onun hemen altında yer alan diffüzyon bölgesi ve en iç kısımda ise çekirdek bölgesi yer alır [5,11,18].

3.3.1. Bileşik Tabaka

Borlama işlemi ile elde edilen borürlü tabaka Fe esaslı malzemelerde en dışta koyu renkli FeB ve onun altında da açık renkli Fe_2B fazlarından meydana gelir. Bu tabakanın görünüşü genellikle diş şeklindedir.

Yüksek bor potansiyeline sahip olan borlama maddesi ile çalışıldığında tabaka iki fazlı teşekkül eder. Bu fazlardan dıştaki FeB bor atomlarınca zengin; Fe_2B ise daha az bor ihtiva eder. FeB fazı Fe_2B fazına oranla daha serttir, ancak oldukça gevrektir. Yüksek iç gerilmeye sahip olduğundan ve Fe_2B tabakasından kavlayarak döküldüğünden FeB fazı pek arzu edilmez. Fakat böyle durumlarda difüzyon tavlamasına gidilebilir [11,18]. Yapıdaki bor miktarı (FeB, Fe_2B) oranına, borlama süresine ve borlama sıcaklığına bağlıdır. Tabakanın ve asıl malzemenin dişlenme derecesi ayrıca alaşım elementinin miktarına da bağlıdır. Kuvvetli dişlenmeler karbonlu çeliklerde ve düşük alaşımlı çeliklerde ortaya çıkmaktadır. Alaşımlı çeliklerde ise alaşım elementi miktarına bağlı olarak değişmektedir. Borürlü tabakalar diş şekilli olmalarından dolayı ana metale daha iyi bağlanır. Alaşımlı çeliklerde bu tabaka daha incedir hatta bazen hiç yoktur. Borürlü tabakanın kalınlığını sınırlayan faktörler alaşım elementlerinin yanısıra borürlü tabakanın gevrekliğidir. Borlanmış tabakanın kırılganlığı kalınlık arttıkça artar [11].

3.3.2. Difüzyon Tabakası

Literatürde geçiş bölgesi olarak da tariflenen bu tabaka; borun düşük konsantrasyonlardaki analiz zorluğu ve optik mikroskopta belirlenememe durumu sebebiyle çoğu araştırmacı tarafından fark edilememiş ve varlığını tespit edenler ise bu tabaka hakkında tam bir görüş birliğine varamamış olsalar bile, tabaka hakkında bazı karakteristik bulgular tespit edilmiştir [4]. Difüzyon tabakası, borür tabakasından yaklaşık 3 kat daha kalın ve ana malzemeye göre daha fazla perlit içerir. Tabaka derinliği alaşım elementlerine bağlı olarak değişebilen karbonca zengin ve borür tabakasının altında olup, borun bu bölgedeki çözünebilirliği % 0.003-0,005 olarak bildirilmiştir. Armco demirinde yapılan bir

araştırmada bu tabakada % 0,001 mertebesinde bor belirlenmiştir. Bazılarına göre ise bu tabaka Fe_3C'den (sementit) oluşmaktadır [4].

3.4. BORLANMIŞ ÇELİKLERİN AŞINMA ÖZELLİKLERİ

Aşınma sürtünerek çalışan bütün sistemlerde görülür ve bir malzeme problemi olmayıp pek çok değişkene bağlı bir sistem problemidir. Sistemin özelliğine göre çeşitli mekanizmalarda ortaya çıkar. Genellikle bu mekanizmalar sistemin aşınma davranışını belirlemede temel çıkış noktası olmasına rağmen, aynı anda oluşan aşınma mekanizmalarının birbirini etkilemesi sonucu konu oldukça karışık bir durum gösterir.

Aşınma çoğu zaman makine veya sistemin teknik ömrünü tayin eder. Aşınmanın meydana geldiği bütün sistemlerde aşınmaya karşı tasarım açısından bütün önlemler alındıktan sonra kullanılan konstrüksiyon elemanlarının ve takım malzemelerinin aşınmaya karşı korunması hem işletme ekonomisi hem de sistemin sağlıklı çalışabilmesi için son derece önemlidir. Aşınmaya karşı alınan tedbirler aşınmayı tamamen ortadan kaldırmayıp, aşınmanın türüne ve tribolojik faktörlere bağlı olarak aşınma hızını yavaşlatmak sureti ile malzemelerin çalışma ömrünü artırır.

Aşınma temelde bir malzeme yüzeyi problemi olduğu için aşınmanın önlenmesine veya yavaşlatılmasına yönelik tedbirler malzeme yüzeyinde yoğunlaştırılmıştır. Bu nedenle tribolojik faktörlere bağlı olarak aşınmaya maruz malzemelerin yüzey özellikleri çeşitli termal, termokimyasal işlemlerle PVD ve CVD gibi çeşitli kaplama yöntemleriyle iyileştirilmektedir [17].

3.4.1. Abrasiv Aşınma Özellikleri

Abrazyonun ve tribooksidasyonun temel aşınma mekanizması olduğu durumlarda borlanmış malzemeler en düşük aşınmayı sergiler. Her ne kadar sertlik ve aşınma dayanımı arasında doğrudan doğruya bir bağlantı yok ise de; borlama sonucu yüzeyin sertliğini ve akma direncinin artması sürtünen yüzeyler arasındaki temas yüzeyini azaltarak aşınma hızını düşürür [17]. Abrasiv aşınma genel olarak sürtünen yüzeylerin sertliğiyle orantılıdır [5,17].

3.4.2. Eroziv Aşınma Özelliği

Erozyon, bir yüzeye keskin partiküllerin çarpması sonucu hasara neden olan aşınma türüdür. Özellikle kum püskürtme nozullarında önemli arızalara yol açar. Bu parçaların borlanması sonucu kullanım ömürlerinin 20 kat arttığı gözlenmiştir [40]. Bir diğer çalışma da H13 sıcak iş takım çeliğinden hazırlanmış numuneler 1050 ^{0}C ye ısıtılarak havada soğutulmuş ve 590 ^{0}C de temperlendikten sonra 850 ^{0}C'de 2 saat borlanmıştır. Bu numuneler 20 200 ve 400 ^{0}C de 300 μm tane boyutunda SiC partikülleri tarafından hava akımında eroziv aşınmaya tabi tutulmuştur. Deney sonucunda borlanmış numunelerin bütün sıcaklıklarda aynı şartlarda deneye tabi tutulan nitrürlenmiş ve NiP kaplanmış numunelere nazaran en yüksek eroziv aşınma direnci sergilediği bildirilmiştir [17]. Borkarbür çeliklerin borlanarak sertleştirilmesinde kullanıldığı gibi sinterlenerek de kullanılabilmek tedir. Sinterlenmiş B_4C çok sert olup (< 35 GPa) yüksek aşınma direnci gerektiren kritik uygulamalarda kullanılmaktadır. Sinterlenmiş B_4C parçalar SiC partiküllerden oluşan katı püskürtme erozyonu karşısında çok yüksek bir eroziv aşınma direnci sergilemektedir [44]. Katı partiküllerin taşındığı çevrelere bağlı olarak erozyonun kavitasyonla beraber meydana geldiği ortamlarda da borlama işlemi fayda sağlayıcı bir metoddur. Fe-esaslı malzemelerin kavitasyon dayanımına etkisi seçilen bir çelik örneği yardımıyla gösterilmeye çalışılmıştır. Borlama ile 4 kat civarında bu tür aşınma olaylarına karşı kazanç elde edilmiştir [15]. Buhar türbünleri gibi yüksek sıcaklık uygulamalarında eroziv aşınma özellikle türbün kanatçıklarında büyük hasara neden olmaktadır. Bu sebeple türbün kanatları borür tabakaları ile kaplandığında kanatçıkların erozyon direnci artmaktadır. Bu amaçla yapılan bir deneyde %12 Cr'lu bir çelikten imal edilen türbün kanatçığı ile aynı çeliğin borlanması ile hazırlanan numune eşit şartlarda test edilmesi sonucu borlanan çeliğin eroziv aşınma direncinde 7- 9,25 katlık bir artış olduğu görülmüştür [53].

3.4.3 Adhesiv Aşınma Özellikleri

Adhesiv aşınma özelliği; tribooksidasyon ürünlerinin meydana getirdiği koruyucu reaksiyon tabakasının oluşup oluşmamasına bağlı olarak değişir. Borlanmış çelikler yüksek sıcaklık uygulamalarında çok iyi adhezyon direnci gösterir [17].

Adhesiv aşınma deneyleri öncelikle vakum altında yapılmaktadır. Çünkü temas yüzeylerinde oluşan tabii birikintiler ve oksidasyon ürünleri aşınmanın karakterini etkilemektedir. Vakum altında yapılan deneylerde borlanmış çeliklerin, nitrürlenmiş ve

sertleştirilmiş olanlara kıyasla daha fazla adhesiv aşınmaya maruz kaldıkları gözlenmiştir. Bu deneylerde borlanmış 42CrMo4 çeliği en fazla aşınırken; 145V33 borlandığında aşınma direncinde çok az bir iyileşme gözlenmiştir. Diğer taraftan X20Cr13 ve molibdenli çelikler daha az aşınma göstermiştir. Bu durum borlanmış tabaka içerisinde çözünmüş Cr ve Molibden'in adhezyon kuvvetlerini azaltmasından kaynaklandığı ifade edilmektedir [17,22].

Adhesiv aşınma direnci bakımından borür tabakalarının, diğer kaplamalar üzerindeki açık üstünlüğü, özellikle yüksek sıcaklıklarda yağsız şişirme testlerinde ortaya çıkmaktadır [17].

3.5. BORLANMIŞ TABAKANIN KOROZYON ÖZELLİKLERİ

Borlu tabakanın suya ve atmosfere karşı korozyon direnci düşüktür. H_2SO_4 (sülfirik asit) gibi oksitlenmeyen asitlere karşı korozyon direnci iyi, HNO_3 (Nitrik Asit) gibi oksitlenen asitlere karşı kötüdür. Borlu tabakaların korozyon direncini ölçmek için yapılan bir deneyde C_k 45 çeliğinden borlanmış ve borlanmamış numuneler hazırlanarak % 20 lik tuz asidi ortamında 8 saat bekletilmiş, bu süreden sonra borlanmamış numunelerde 320 mg/cm^3 ; borlanmış olanlarda ise 3,2 g/cm^3 lük bir ağırlık kaybı tesbit edilmiş aşınma oranının 0,01 olduğu görülmüştür. Aynı çelikler % 30'luk fosforik asit içinde 0,02 ve % 10'luk H_2SO_4 içinde ise 0,03'lük bir korozif aşınma oranı göstermişlerdir. X10CrNiTi189 yukarıda belirtilen ortamlarda korozif aşınmaya tabi tutulmuşlar ve sülfirik asidin aşınmasının fosforik aside göre daha az olduğu görülmüştür. Borlanmamış numunenin tuz asidi içindeki korozif kaybı 143 mg/cm^3; borlu numunede 0,9 mg/cm^3 ve kayıp oranı 0,006 olarak tesbit edilmiştir. Borlu numuneler için sülfirik asitten 3,8-5,55 mg/cm^3; fosforik asitte ise 0,01 mg/cm^3'lük bir aşınma tespit edilmiş olup bunun sebebinin borlu tabakada yer alan kromboritler olduğu sanılmaktadır. Kromboritten dolayı yüzeyde oluşan kromoksit yüzeyi korozyon aşınmasına karşı pasifleştirmektedir [4].

PVC imalatı yapan işletmelerde vinilklorit sevk eden borularda vinilklorit gazı 343-353 ^0K'lik sıcaklık ve 0,067-12 bar basınçla geçmektedir. Burada ve benzeri yerlerde viniklorit gazı rutubet ile birlikte aggresiv etki yaparak boruları 6 ayda bir değiştirilmelerini zorunlu kılar. Bu borular borlanarak ömürleri iki yıla kadar çıkarılabilir. Borür tabakalarının dökme

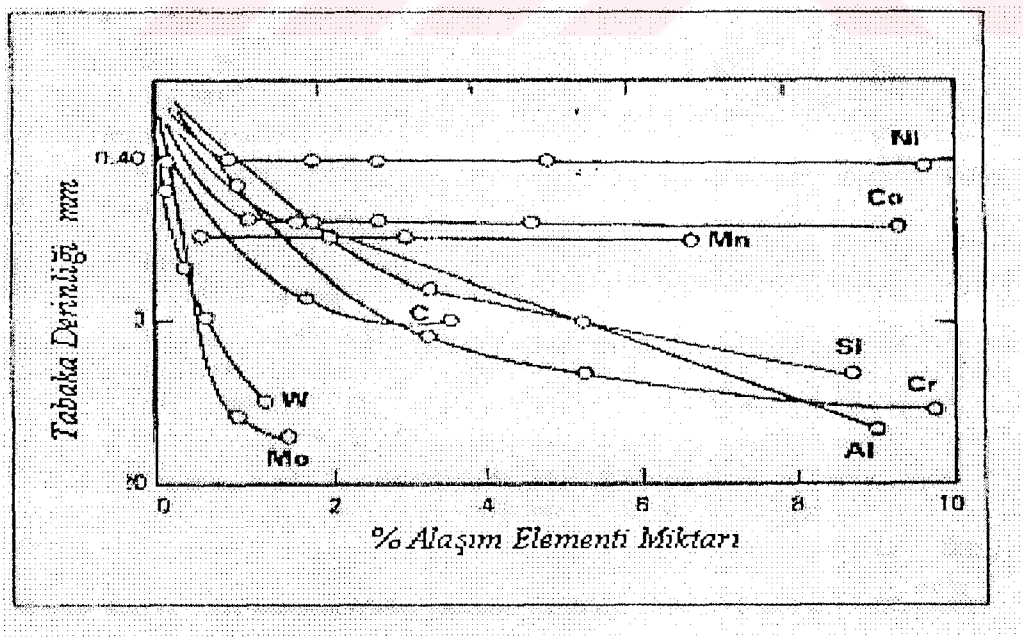
demiri korozyona karşı çok iyi koruduğu gözlenmiştir. Dökme demirlerin korozyonu, yapılarıyla alakalıdır [9].

3.6. ALAŞIM ELEMENTLERİNİN BORÜR TABAKASINA TESİRLERİ

Çeliklerin borlama işlemlerinde, alaşım elementlerinin etkilerini görebilmek maksadıyla gerek özel hazırlanmış numuneler gerekse ticari çelikler üzerinde yapılan çeşitli çalışmalar [1,2,3,21,22,23,25] vasıtasıyla C, Cr, Ni, Mn, Mo, Si ve Alüminyum gibi elementlerin, sertlik, morfolojik yapı ve tabaka kalınlığına etkileriyle; bu elementlerin ana metal, geçiş bölgesi ve borür fazları üzerindeki dağılımları belirlenmeye çalışılmıştır.

Bu elementler, FeB ve/veya Fe_2B kafes kenarlarında demir atomlarının yerine geçerek yada bazı hallerde demir borür tabakaları içerisinde farklı partiküllere dönüşerek yapıda yer almaktadırlar [1,21].

Genel olarak alaşım elementleri çelikteki bor difüzyonunu yavaşlatarak tabaka kalınlığını azaltmaktadır [2,21]. Alaşımlı ve yüksek karbonlu çeliklerde bor yayınımının daha az olması nedeniyle aynı şartlarda borlama yapılan düşük karbonlu çeliklere göre tabaka kalınlığının daha düşük olduğu vurgulanmaktadır [7,11,14]. Şekil 3.3'de % alaşım elementi miktarının borür tabakası kalınlığına etkileri görülmektedir.



Şekil 3.3. % Alaşım Elementi Miktarının Tabaka Kalınlığına Etkileri [1,2,23]

Alaşım elementleri tabaka kalınlığını azaltırken tabaka geometrisini de değişikliğe uğratmaktadır [2,5]. Çelik bünyesinde alaşım elementleri özellikle C, Cr ve Ni, bor difüzyonunun tercihli yönlenmesini etkileyerek tabaka-anametal ara yüzeyini çizgisel şekle sokar.

Borürlü tabakalar diş şeklinde olmalarından dolayı ana metale daha iyi bağlanırlar. Alaşım elementleri oranı arttıkça dişlenme azalmaktadır [7,14,18]. Bu elementlerin bir diğer etkisi ise, borür tabakasının sertliğini arttırması ve Fe-B denge diyagramında ötektik noktayı aşağı kaydırmasıdır. Fe-B sisteminde % 1 C, ötektik sıcaklığını 50 ^{0}C kadar düşürmektedir [2,5]. Malzeme yapısında yer alan alaşım elementleri miktarı aşınma dayanımına da etkir. Ancak bu etki üniform olmayıp daha ziyade aşınma mekanizmasına bağlıdır [22]. Bu miktarın az veya çok olmasının aşınmayı hızlandırdığı belirtilmiştir [18].

Bazı alaşım elamanlarının etkilerine aşağıda ayrı ayrı yer verilmiştir.

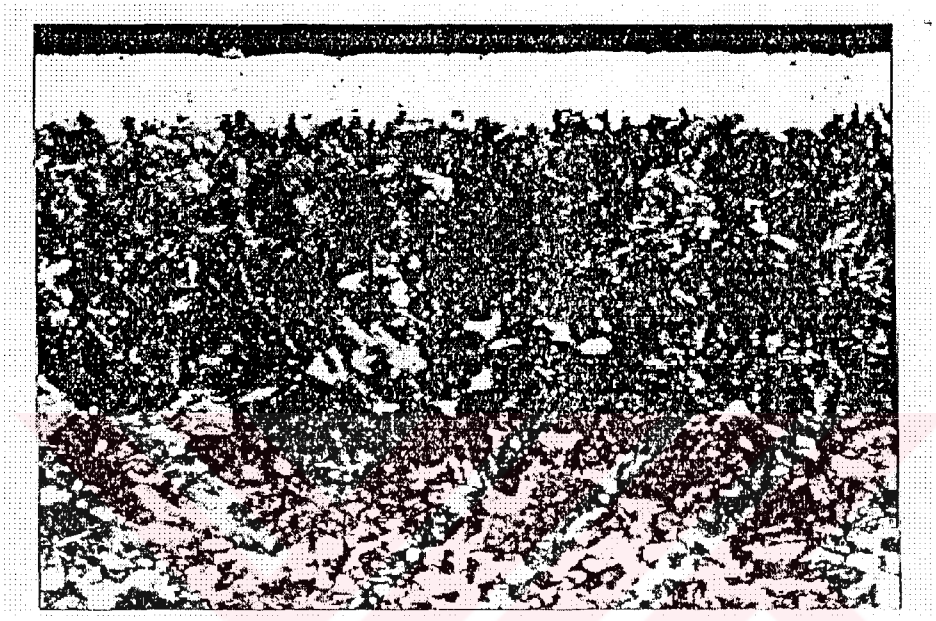
3.6.1. Karbon

Önemli bir alaşım elementi olan karbon, borür tabakası içerisinde erimez ve esas metale doğru yayınarak borür tabakası altında konsantre olur. Bunun sonucunda yüzeydeki karbon bileşimi azalırken geçiş bölgesinde zenginleşir [2]. Diğer taraftan, karbonun ana metale doğru itilmesi bu bölgede yüksek perlit teşekkülüne de yol açar [23]. Bu durum Şekil 3.4'de gösterilmektedir. Karbon konsantrasyonu borür dişleri arasında maksimum iken, borürlü iğne uçlarında daha düşüktür [1,14,23].

Malzemenin karbon içeriğinin artması yayınımı engellediği için borür tabakasının oluşumu engellenmiş olur [14]. Tabaka sınırında biriken karbon, karbür dönüşümüne neden olup, bunlar borür tabakasını büyütebilir [23]. Oluşan bu borürler, $Fe_3(C,B)$ ve $Fe_{2,3}(C,B)_6$ tipindeki karboritlerdir. Bor, sementit $Fe_3(C,B)$ ile 1000 ^{o}C'de % 80 C'a kadar yer alabilmektedir. $Fe_{2-3}(C,B)_6$, borun % 4,8 ila % 12,8'inde absorbe olabilmektedir [23]. Çeliklerde artan karbon ve diğer alaşım elemanları oranı tabaka sertliğini artırırken, tabaka derinliğini azaltmaktadır [11].

Mevcut borlama teknikleri ile karbon çeliklerinde asiküler (kolonsal) Fe_2B tek fazı her zaman oluşabilmektedir. Düşük ve orta karbonlu çeliklerde çok ince (<10 μm) rastgele yönlenmiş FeB-Fe_2B iki fazlı tabakalar ve yüzeyde borca zengin FeB_x (x>1) bileşikleri elde edilmiştir [3]. Bu çeliklerde iğnesel bir tabaka gözlenirken % 1-2 karbon içeren

çeliklerde düz morfolojideki Fe_2B tabakaları oluşur [1]. Karbon konsantrasyonu, borür tabakasının toplam kalınlığı ve sertliğinin azalmasına, demir borürlerin izafi dengelerinin değişmesine ve geçiş bölgesinde karbür ve bor karbürlerin oluşmasına sebep olur [1,14]. Karbon konsantrasyonunda artış olması durumunda borür tabakasının azaldığı ve Fe_2B fazı ile matrisk ara yüzeyinin oldukça düzenli olduğu gözlenmiştir [3].



Şekil 3.4. Borlanmış 42CrMo4 (AISI 4140) çeliğinde bor tabakası altında aşırı perlit teşekkülü [23]

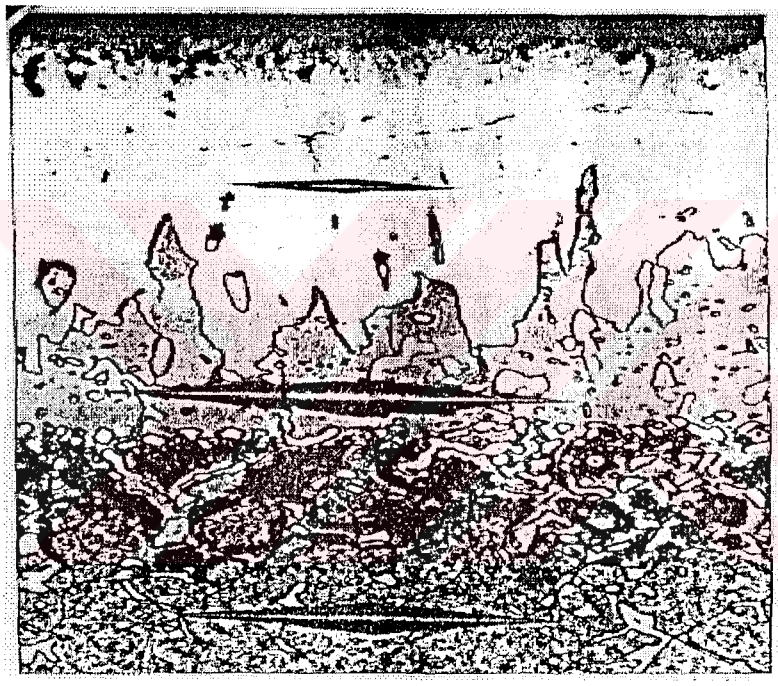
3.6.2. Silisyum

Silisyum, karbon elementi gibi demirborürlerde çözünme kabiliyetinin olmamasından dolayı ana metale doğru yayınır ve borür tabakası altında toplanır [2,5,14,23]. Tabakanın sertliğini etkilemez. Ancak geçiş bölgesi sertliği Si artmasıyla artar [1]. Ayrıca bu elementin, tabakanın asitlere karşı direncini de arttırdığı belirtilmektedir [5].

Silisyum konsantrasyonunun artışıyla, bor tabakası kalınlığı azalır. Alaşımda, silisyumun % 1'i kadarki oranlarında maksimum etki gözlenir. Tabaka kalınlığındaki azalma FeB miktarındaki eksilmeye bağlanmaktadır. Silisyumun Fe_2B'ye etkisi azdır. Silisyumun artışı ferrit oluşumuna da sebebiyet verebilir. Bu olay özellikle bor'a karşı afinitesi çok zayıf olan kuvvetli ferrit yapıcı elementleri içeren çeliklerde gözlenmektedir [1].

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

% 1'in üzerinde Si içeren çeliklerde borür tabakası altında ferrit çukuru olarak da adlandırılan [2] silisyumca zengin, yaklaşık 300 HV sertliğinde ferritik bir bölge (Şekil 3.5) hasıl olur [2,5]. Bu alan çok yumuşaktır ve sertleştirilemez. Bu nedenle bu tabaka ana metalin yeterli desteğinden yoksun kalır. Tabakaya gelen yük aşırı yüksek ise, borür tabakası ana metale doğru itilir ve işletme sırasında çatlar [23]. Bu olay genellikle darbe ve basınca maruz kalan borlanmış parçalarda bor tabakasının ezilip çökmesine neden olduğundan [2,5] bu tür parçalarda Si içeriğinin % 0.7'nin altında olması istenir [2]. Buna paralel olarak, % 0.8'den daha yüksek oranda Si bileşimli çelikler borlama için uygun değildir [23].



Şekil 3.5.X38CrMo5 çeliğinde borür tabakası ve anametal arasında oluşmuş ferritik bölgenin mikroyapısı [23]

3.6.3. Krom

Krom elementi ya demir borür tabakasına girer, ya da borür tabakası-ana metal arayüzeyinde birikir. Hatta bazı durumlarda borür tabakası tamamen CrB'den ibarettir. Kromun bu davranışları 5 Cr-1Mo ve AISI 304 çelikleri üzerinde yapılan çalışmalarda tesbit edilmiştir [21]. Her iki çelik aynı şartlar altında borlandığında; Cr, 5Cr-1Mo çeliğinde borür tabakasında ve tabaka ana metal arasında düzgün bir dağılım gösterirken; AISI 304 paslanmaz çelik malzemede, bor tabakası-anametal arasında çökeldiği görülmüştür [21]. Nitekim aynı çeliğin (AISI 304) plasma pasta borlama işlemi neticesinde

yapılan mikroyapı ve kompozisyon incelemeleri sonunda Cr 'un aynı davranışı gösterdiği tespit edilmiştir [25]. Kromun, demir borür tabakaların yapı ve özellikleri üzerinde oldukça etkisi vardır. Bu tabakaların hem morfolojisine hem de derinliğine etkimektedir. Esas metalde Cr bileşiminin artması, borür derinliğini azaltıp [18,32] kaplama-anametal ara yüzeyinin pürüzsüzleşme ve düzgünleşmesini sağladığı söylenebilir [32]. % 4 Cr ihtiva eden çeliklerde kolonsal (asiküler) karekterde ve derinliği 65-95 μm arasında değişen borür tabakası kalınlığı elde edilirken % 12 Cr ihtiva eden çeliklerde ise 65 μm kalınlığında ve düz karekterde % 26 Cr ihtiva eden çeliklerde ise borür tabakası kalınlığı 5 μm yi birkaçı hariç aşmamıştır [3]. Bir kıyaslama yapmak gerekirse, kromun bulunuşu ile etkilenen tabaka kalınlığındaki azalma aynı miktardaki nikelin sebep olduğu azalmadan daha fazladır [18].

Üç alaşım elemanlı Fe-12Cr-C çeliklerinde, karbon bileşiminin artışının tabaka kalınlığın da azalmaya sebep olduğu anlaşılmıştır [32].

3.6.4. Nikel

Nikel, demir atomuyla (Fe,Ni) B ve $(Fe,Ni)_2B$ formunda bileşikler yaparak bünyede bulunur [23]. Fe_2B fazına girebildiği gibi; [21] borür tabakasından aşağıda da toplanabilir [9,20]. Buna ilaveten bu halde de Ni_3B oluşmasına neden olabilir [21,32]. Nikelin tabaka oluşmasına etkisi çok değildir; ancak artan miktarı, dişlenme derecesini azaltır [5,32]. Aynı borlama şartları altında Ni bileşimi ne kadar yüksek ise, bulunan bor tabakası kalınlığı o derece düşüktür. Fakat bu etki, Cr bileşimiyle karşılaştırıldığında çok belirgin değildir. Nikel bileşiminin yükselen miktarı, borür tabakasının kolonsal yapısını azaltıp, yüksek poroziteyi ve kötü mekanik özellikleri beraberinde getirmektedir [3,24]. Ayrıca borür tabakasında mevcut nikel miktarının, ana metaldekinden daha az olduğu belirtilmektedir [23].

3.6.5. Manganez

Manganez, borlama işlemi esnasında borür tabakası içerisinde toplanır [5,21]. Genellikle Fe_2B fazında yeralıp [21] ve manganez konsantrasyonu borür tabakasından esas metale doğru kademe kademe artarak ana metale en yakın kısımda en büyük değerine ulaşır [23].

Düşük karbonlu çeliklerde, Cr ve Ni gibi manganez de borür tabaka kalınlığını azaltır ve diş şekli morfolojiye sebep olur. Manganezin tabaka oluşumuna etkisi azdır. Ancak artan miktarı ile dişlenme derecesinin azalacağı dikkate alınmalıdır [5].

3.6.6. Diğer Alaşım Elementlerinin Etkileri

Borlama işlemi uygulanmış, bünyesinde farklı alaşım elementi içeren birçok numune üzerinde yapılan incelemeler neticesinde, bu elementlerin borür tabakasında ya da dışında aynı tür davranışı sergileyip yapıda benzer etkiler bıraktıkları göze çarpmaktadır. Buradan yola çıkarak alaşım elementlerini sınıflandırmak mümkündür.

Alaşım elementleri, borür tabakasındaki davranışlarına göre iki ayrı grupta toplanabilir. Birinci gruptaki elementler yapıda daha güçlü veya daha zayıf olarak yer alırlar, diğer gruptakiler ise tabakada çözünmeden geçiş bölgesine doğru itilmektedirler. Cr, Ni, Mn, V, Mo ve Co ilk gruba ait elementlerdir. Buna karşın C, Si, Al ve Cu ise ikinci gruba dahildirler. Yapılan çalışmalardan yola çıkarak bazı küçük açıklamalar yapmak mümkün dür. Örneğin Alüminyum, daha önce de değinilen silisyumun etkisine benzer bir etki yapmaktadır. Molibden, borür tabakasında yer yer görülür ve tabakanın sertliğini artırır. Vanadyum, titanyum ve tungsten, borlama sıcaklığında erimeyip kararlı karbürler oluştururlar. Vanadyum, yüksek sıcaklıkta demir kafesinde erimeyerek yer yer borür tabakasında demirborürler ve vanadyumborürleri oluşturmaktadır [23,31]. Buna ilaveten V içeriğinin maksimum % 0,15 olması istenir [5].

Periyodik tablonun aynı bölgesinde yer alan O, N, Ti, Nb, Co'da karbon ve silisyum gibi etkimektedirler [2,5]. W, Cr ve Molibden miktarındaki artışın borlanmış parçanın yüzey pürüzlülüğünü azalttığı belirtilmektedir [5].

3.7. BORLAMA METODLARI

3.7.1. Katı Ortamda Borlama

Elle hazırlanabilmesi, güvenli oluşu, karışım kompozisyonunun kolayca değiştirilebilme imkanı, sınırlı ekipman gerektirmesi ve ekonomik oluşu sebebiyle uygulama alanı en geniş metoddur [1,32].

Borlama ortamının ana bileşeni borkarbür (B_4C), amorfbor ve ferrobordur. Diğer, katı borlama ürünlerine nisbeten daha ucuz olduğundan en çok borkarbür tercih edilmektedir [2,32]. Ana borlayıcı maddelere ilaveten NH_4Cl, BaF, $NaBF_4$, NaH_4F, Na_2CO_3, KBF_4 ve Na_2AlF_6 gibi aktivatörler [2] ile SiC ve Al_2O_3 gibi dolgu maddeleri yada reaktif olmayan bileşikler belli oranlarda katılarak işlem gerçekleştirilir [1,21,32]. Katı ortamda borlama işlemi ısıya dayanıklı, paslanmaz çelik veya alumüna'dan imal edilen [32] sıkı kapatılmış kutularda ya da koruyucu atmosfer altında, toz ortamda veya macunlama şeklinde tatbik edilerek gerçekleştirilebilir [1]. Bu iki yöntemde de kullanılan bor verici ortam aynıdır. Toz halinde kullanılanlar ince tanelerden oluşmakta iken, macunlama da ise, aynı maddeler macun haline getirilmiştir [2,5,11,18]. Bu işlemlerin yapılış şekli iki alt başlık olarak aşağıda verilmektedir.

3.7.1.1. Toz Ortamda Borlama

Yüzeyi borlanacak malzeme toz halindeki ortam içinde 800-1000 °C sıcaklıklarda 4-10 saat bekletilerek borlama işlemi yapılır. Isıya dayanıklı kutu içinde bulunan toz ortama parça gömülür. Borlanacak parça sayısı da göz önüne alınarak parçaların tüm yüzeylerinde en az 10 mm kalınlığında bir toz yığını olacak şekilde düzenleme yapılmalıdır. Kutuların ağzı bir kapak ile kapatılarak fırın içi sıcaklığı borlama sıcaklığına getirilip borlama süresi sonunda kutu fırından alınarak soğumaya terkedilir. Buna müteakip parça kutu içerisinden çıkarılır. Eğer işlem normal atmosferde yapılacak ise, kapak sıkıca kapatılmalıdır. Ancak bu durumda da kapak kutuya kaynayabilir. Yöntem ucuz olup özel bir teknik gerektirmez [2,5,11].

3.7.1.2. Macun İle Borlama

Borlamada kullanılacak tozlar macun haline getirilir. Borlanacak parça üzerine 2 mm kalınlığında sürülür. Parça yüzeyine sürülen macun derhal sıcak hava akımında, ön ısıtma odasında veya kurutma fırınında maksimum 150 ^{0}C de kurutulması gerekir. Gerektiği takdirde macun üzerine tekrar birkaç kez daha sürülebilir, kurutma işleminden, sonra macun ile kaplanmış parçalar önceden ısıtılmış fırına konulur ve fırın ağzı kapatılarak borlama sıcaklığına ısıtılır. Belirli bir süre bu sıcaklıkta tutulan parçalar dışarı alınıp, soğumaya bırakılır. Bu yöntemin önemli bir avantajı, kısmi borlama yapabilmeye, yani maskelemeye imkan vermesidir. İşlem mutlaka koruyucu gaz atmosferinde yapılmalıdır. Aksi takdirde kötü bir borür tabakası oluşur [5,11,18,23].

3.7.2. Sıvı Ortamda Borlama

Borlama sırasında bor kaynağı sıvı halde olup, elektrik akımı uygulanıp (elektroliz) uygulanmamasına göre iki farklı şekilde işlem tanımlanmaktadır. Elektrik akımı uygulanıyorsa, elektrolitik borlama uygulanmıyorsa normal sıvı ortam borlama söz konusudur [1-4,32]. Borlama banyosunda bor kaynağı olarak boraks ve redükleyici madde olarak da genelde B_4C ve SiC tozları kullanılmaktadır. Tablo 3.3'de sıvı ortam borlamasında kullanılan bor kaynakları gösterilmiştir.

Sıvı ortamda kimyasal reaksiyonların daha hızlı olmasından kaynaklanan yüksek aktivite nedeniyle, sıvı ortamda borlama geniş ölçüde kullanılmaktadır. Ayrıca işlemde kullanılan cihaz ve donanım basit olduğu gibi, gerekli kimyasal maddelerde ucuzdur. Ancak, borlama işlemi sonrası parçaların temizlenmesi önemli bir problemdir.

Tablo 3.3. Sıvı Borlamada Kullanılan Bazı Borlama Kaynakları [4].

Malzeme	Formül	Molekül ağırlığı	Teorik bor %
Boraks	$Na_2B_4O_7.10H_2O$	381.42	11.35
Susuz boraks	$Na_2B_4O_7$	201.26	21.50
Borik asit	HBO_2	43.83	24.69
Sodyum borflorür	$NaBF_4$	109.81	9.85
Borik asit(susuz)	B_2O_3	69.64	31.07
Borkarbür	B_4C	55.29	78.28
Metabor asidi	HBO_2	43.83	24.69

3.7.2.1. Normal Sıvı Ortamda Borlama

Borlama ortamının esas bileşimi borakstır [1,4]. Aktivatör olarak, B_4C, SiC, ZrB kullanılır. İşlem ucuzdur ve fazla ihtisas gerektirmez. Termal şok, borlamadan sonra parçanın temizlenmesi, büyük boyutlu ve kompleks parçalara uygulanamama durumu metodun kötü

yönleridir [4]. Çalışma sıcaklığı 800-1000 °C ve borlama süresi 2-6 saattir [1,2,4]. İşlem esnasında banyonun akışkanlığı iyi olmalıdır.

Literatürden derlenen bazı sıvı ortam banyo bileşimleri aşağıda verilmiştir.

%73-79 Boraks+%15-20NaCl+%6-7 B..... [2,4]
$NaCl+BaCl_2+B_4C$..... [4]
$NaCl+B_4C$..... [4]
$NaCl+NaBF_4+B_4C$..... [4]
%72 Boraks +%14 Ferrosilis+%14.borik asit..... [4]
%60-80 Boraks+%(20-40) B_4C+Ferro bor, Kalsiyum Hekzabor..... [1]
%70-73 $Na_2B_4O_7$+%27-30B_4C..... [1]
%65-90 $Na_2B_4O_7$+%(10-35)SiC..... [1]
%66 $Na_2B_4O_7$+%14 B_2O_3+%20Fe –Si..... [1]
%84 $Na_2B_4O_7$ + %10 B_2O_3 + %6 B..... [1]
%84 $Na_2B_4O_7$ + %10 NaCl + %6 B..... [1]
% (57-81) $Na_2B_4O_7$ + %9-20 B_4C + % (10-23) SiC..... [1]
%94.5 $BaCl_2$ + %2$Na_2B_4O_7$+%3.5 Mg_nB_m..... [1]
%80 $Na_2B_4O_7$ + %5 Krom oksit+%15 Ca-Si..... [1]
%15 KCl +%50 NaCl+%8 $Na_2B_4O_7$+%12 Mg_nB_m+%15NaF..... [1]
%10 Boraks + %40 B_4C ..... [2]
%70 $Na_2B_4O_7$ + %30 SiC ..... [2]
%65 (%85 $Na_2B_4O_7$ +%55 NaCl) +%35 Kalsit..... [2]
%45 NaCl+%45 $BaCl_2$ +%10 B_4C..... [2]
%80 NaCl +%15 $NaBF_4$+ B_4C (%5)..... [2]

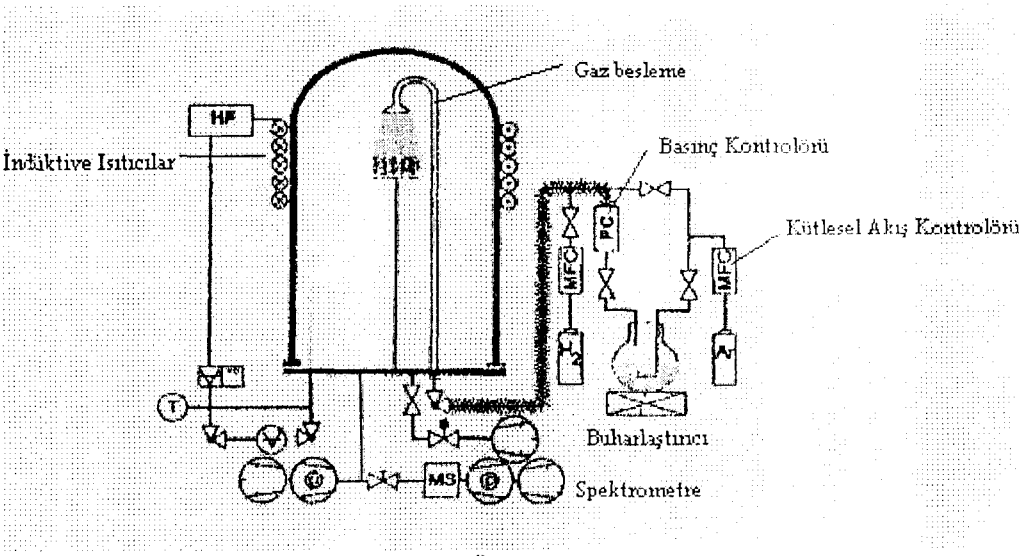
3.7.2.2 Elektroliz Metodu

İşlem yüksek sıcaklıkta tuz banyosu elektrolit kullanılarak, yapılan bir elektroliz uygulamasına benzer. Katod olarak iş parçası, anot olarak grafit kullanılır. Akım yoğunluğu, 0.1-0.7 A/cm^2, gerilim 2-14 volt olarak uygulanır [4]. Normal sıvı ortam da borlama yönteminin olumsuz yönlerine ilaveten tesisat pahalı ve karışık şekilli parçalarda, homojen kalınlıklı tabaka elde etme zorluğu vardır. İşlem 800-1000 °C sıcaklıklarda 0,5-5 saat süreyle yapılır. Elektrolitin ana bileşeni boraks ve borik asittir [4]. Ana bileşene ilaveten şu aktivatörler kullanılır: NaF, NaCl, $NaF+B_2O_3$, $B_2O_3+Na_2CO_3$, B_4C+NaCl

Bu aktivatörlerin ayrıca banyonun akışkanlığını arttırması beklenir.

3.7.3. Gaz Ortamda Borlama

Bor taşıyabilen gazlar, bor halejenürleri ve bor hidrürleridir [4]. Bunlardan biri olan diboran (B_2H_6), H_2 ile ya da % 75 N_2 + % 25 H_2 gaz karışımıyla birlikte, gaz borlama işlemlerinde bor verici kaynak olarak kullanılmaktadır. Bu proseste $(CH_3)_3B$ ve $(C_2H_5)_3B$ gibi organik bor bileşikleri de bor verici kaynak olarak birer alternatif oluşturmaktadır [32]. Gaz borlayıcıların en önemli üstünlüğü, bu metot ile, gaz sirkülasyonunun sonucu olarak daha üniform bir bor dağılımının sağlanabilmesidir. Prensipte gaz ortamda borlama işlemi bor potansiyelinin ayarlanabilmesinden dolayı, tek fazlı homojen bir tabaka elde etmek mümkündür [16]. Bu teknikte kullanılan temel bileşik olan diboran çok zehirlidir [1-16]. Diboran için en düşük zehirlilik sınırı 0,1 ppm dir. Çok tehlikeli olarak bilinen hidrojen siyanür için bile, 10 ppm e kadar müsaade edilmektedir [1]. B_2H_6-H_2 karışımıyla yapılan borlama işlemi yüksek toksit ve patlayıcı oluşu sebebiyle ticari değildir [32] ve de pahalıdır [1]. Organik bor bileşikleri kullanıldığında karbür ve borür tabakaları aynı anda oluşabilir [32]. Trimetilbor $(CH_3)_3B$ ve Trietilbor $(C_2H_5)_3B$ ile çalışılan gaz ortamda borlama işlemlerinde bu bileşiklerin yüksek oranda karbon içermeleri karbürizasyon oluşturur [1,5]. Bütün bunların yanısıra bor halojenürleri korozyona sebep olabilir [1,5,16]. Gaz ortamın bileşimi, basıncı ve gazın tanktan akış hızı borlamayı etkileyen faktörlerdir [1,2,4,5]. Edinilen tüm bu bilgiler ışığında gaz ortamda borlama tekniğini kullanmak, komplike cihazlarla çalışmayı zorunlu hale getirmiştir [1]. Şekil 3.6'da bir gaz ortamda borlama tesisatı gösterilmektedir.



Şekil.3.6. Bir Gaz Borlama Ünitesinin Şematik Görüntüsü [28].

3.7.4. Plazma Borlama

B_2H_6 (Diboran)-H_2 ve BCl_3-H_2-Ar karışımı ile 600 ^{0}C gibi borlama için düşük sayılabilecek sıcaklıklarda, bir gaz karışım düzenleyici kullanmak suretiyle borür tabakaları oluşturulur. BCl_3-H_2-Ar gaz karışımı kullanarak yapılan plazma borlama işleminde BCl_3 'ün konsantrasyonu kontrol edilerek yapıda gözeneklilik ve iki fazlı tabaka oluşma ihtimallerinin minimize edilebileceği iddia edilmektedir [32]. Bu teknikle 200 μm kalınlığa varan borür tabakaları 700-850 ^{0}C sıcaklıklarda 6 saat borlama süresinde ve 270-800 Pa (2-6 torr) basınçta oluşturulabilir. İşlem süresinin ve sıcaklığının düşük olması, yüksek sıcaklık fırın ve ekipmanları gerektirmemesi, borür tabakası derinliği ve kompozisyonunun kontrol edilebilişi, enerji ve gaz tüketiminin ekonomikliği gibi özelliklerine sahip bir borlama işlemidir. Çalışılan atmosferin zehirli olması ise işlemin en büyük dezavantajıdır [25,32].

3.8. Çeliklerde Alaşım Elementi Olarak Bor

Az alaşımlı çeliklerdeki bor, ostenitin dönüşümünü önemli ölçüde yavaşlatarak sertleşme kabiliyetinin yükselmesine ve çelik bünyesinde ince dağılmış bulunan partiküllerin kısmen azalması sonucu ise, ostenit tane irileşmesine sebep olur [4]. Bor içeren çelikler, az alaşımlı çeliklere nazaran iyi sertleşme kabiliyeti, iyi darbe direnci ve iyi kaynak kabiliyeti gibi üstünlüklere sahiptirler. Ancak temperleme esnasında, yumuşamaya karşı gösterdikleri direnç ve daha yüksek ostenitleme sıcaklığı borlu çeliklerin dezavantajıdır [4].

20-50 ppm seviyesinde bor, genellikle alaşımlı ve paslanmaz çeliklere katılır. Düşük alaşımlı çeliklerde borun sertleşebilirliği arttırdığı, bununla beraber darbe özelliğini olumsuz yönde etkilediği bilinmektedir. Sertleşebilirlikte en büyük artış 20-40 ppm bor miktarlarında sağlanır. 120 ppm'in üzerinde bor ilavesi süneklik vb. özellikleri kötü yönde etkiler. Düşük karbonlu bir çeliğe bor ilave edildiğinde ostenitik sıcaklıkta sünekliğin kötü yönde etkilendiği belirtilmiştir [1]. Sonuç olarak borun çelikteki optimum miktarının 3-30 ppm olduğu belirtilmektedir [4].

3.9. BORLAMANIN MALZEME ÖMRÜ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Birçok endüstriyel alanda kullanılan teknik ekipman ve sistemler, borlanarak kullanıldıklarında, normal dayanımlarının kat kat üzerinde bir dayanım gösterdikleri yapılan değişik çalışmalar [2,4,5,10,11,13,16,17,20,22,23,32] ile ortaya konmaktadır.

Çamur pompalarının yatak burçları borlandığında, indüksiyonla yüzey sertleştirme, nitrürleme veya krom kaplamayla karşılaştırıldığında çalışma ömürlerinin 4 kat arttığı gözlemlenmiştir. Özellikle plastik endüstrisinde şiddetli abrasiv aşınmanın olduğu ekstrüder ve injeksiyon preslerinde, borlama işlemi başarıyla uygulanmaktadır [1].

Kahve öğütmede kullanılan aşındırıcı diskler, borlamanın uygulama alanlarından biridir. Başlangıçta bu diskler, yüksek orandaki aşınmayı engellemek için yüksek alaşımlı çeliklerden imal edilmekteyken, C 45 malzemeden imal edilip borlandıklarında hem maliyetleri azalmakta hem de çalışma ömürleri 5 kat artmaktadır [1,17,23]. St 37 malzemeden yapılmış döküm potaları borlandığında, orijinal durumlarına göre ömürleri 4-6 kat artmaktadır. Seramik pota yapımında kullanılan ve 90 MnCrV8 çeliğinden imal edilen pres kalıpları borlandığında ömürleri 3 kat artar. Besleme suyu ayar valfleri erozyona maruz kalırlar ve bu çalışma şartları altında 200 saat sonra değiştirilmeleri zorunlu hale gelir. Bu valflere borla yüzey sertleştirme işlemi uygulandığında ömürleri 18000 saate çıkmaktadır. Yine bu metodla, tel çekme kalıplarının ömürlerinin 10 kat arttığı bildirilmiştir [1]. 1970'li yıllarda endüstriyel manada petrol makinalarının dişlilerini sertleştirmede kullanılarak ömür artışı sağlanmıştır. St 30 çeliğinden imal edilen yatak plakalarının yağlama kanalları normal şartlarda 3000 çalışma saatinden sonra aşınarak kaybolmaktadır. Aynı plaka 200 μm tabaka kalınlığı elde edilecek şekilde borlandığında aynı şartlar altında 9000 saat çalışmış ve hala görevini yerine getirebilecek durumda olduğu görülmüştür. Borlama yoluyla sertleştirilen DIN No: 1.4571 çeliğinden imal edilmiş küresel valf parçalarında abrasiv aşınmaya karşı son derece etkin bir koruma sağlanmıştır. Bu tür valfler petrol endüstrisinde olduğu gibi, yüksek miktarda katı aşındırıcı (abrasiv) tanecik içeren gaz ya da sıvıları taşıma sistemlerinde kullanılmaktadır. Cam sanayinde kullanılan DIN No: 1.2080 çeliğinden yapılan koniler borlandığında aşınma dirençleri artmakla birlikte erimiş camın üzerine yapışmasına da izin vermezler [17].

Bir gaz akımı ile üflenen katı parçacıkların çarptığı veya sürtünerek kaydığı katı cisim yüzeylerinde püskürtme aşınması tahribatı gerçekleşmektedir [38,39]. Gübre, kömür, cevher ve kum gibi taneli malzemelerin iletildiği pnomatik sistem ve tesisatlarında (Örneğin silolardan malzeme nakil hatları) eroziv aşınma meydana gelir. AISI 4140 çeliğinden yapılıp termal yöntemle sertleştirilen bir kum püskürtme lülesi 50-52 HRC sertliğinde olup 7 bar basınçta 183 kg/saat debide SiC tanecikleri püskürtmekte olup lüleler

bu şartlar altında 30 saat çalışma süresi sonunda kullanılmaz hale gelmekteyken, AISI 1020 çeliğinden yapılıp 7 saat borlanarak 60 μm bir tabaka kalınlığına erişmiş bir lüleyle, ömrü 20 kat arttırmak mümkün olmuştur [17]. Ayrıca, çinkonun sürekli dökümünde kullanılan döküm tüpleri borlanarak 15 katlık bir ömür artışı sağlandığı belirtilmiştir [23].

3.10. BORLAMANIN UYGULAMA ALANLARI

Borlanmış parçalar, borür tabakaların pek çok avantaj sağlayıcı özelliğinden dolayı, endüstriyel uygulamalarda geniş çapta kullanım imkanı sunmaktadırlar. Burada, gerçek işletme şartlarında kullanılan borlanmış parçalara örnekler verilmeye çalışılmıştır.

Kayma ve adhesiv aşınmaya maruz kalan parçalar için, Borlama;

- DIN St 37 çeliğinden yapılmış çelik halatlar, tel çekme kovanlarına
- Kanallı gri dökme demir tamburlara (Tekstil makinaları için)
- Su besleme ayar vanalarına (DIN 1.4571, veya AISI 316 çeliğinden yapılmış)
- Yanma nozulları ve kimya endüstrisinde kullanılan, çelik malzemelerden yapılan yağ yakıcı enjektör uçlara
- Yüksek performanslı taşıtlarda kullanılan helisel açılı çelik dişlilere uygulanır.

Abrasiv aşınma durumlarında ise;

- Ekstrüzyon vidaları, silindirler, nozullar, plastik üretiminde kullanılan ters akış blokları (Ekstrüzyon ve İnjeksiyon kalıplama makinalarında)
- AISI 4317 çeliğinden yapılmış vidalar, düz ve konik Dişliler
- AISI 4140 çeliğinden yapılmış ekstrüzyon kalıpları
- SI takım çeliğinden yapılmış baskı ve çekme matrisleri borlamanın uygulandığı yaygın sahalardır [32].

Plastik üretiminde kullanılan estrüder mil ve kovanları, plastiğin içerdiği mineral ve cam liflerinin yüksek aşındırıcı etkisi altında, aşınmaya uğrarlar. Ekstrüder mil ve kovanları borlanarak ömürleri önemli ölçüde arttırılabilir [17,32].

Eğme kalıpları, tel çekme blokları, boru kelepçeleri, basma ve şekillendirme merdaneleri, mandreller, basma takımları, klavuz çubuklar, diskler, sıcak şekillendirme, enjeksiyon kalıplama, sıcak dövme, sıvama ve kabartma işlemlerinde kullanılmak üzere seçilen A2, A6, D2, D6, H10, HI 1.02 ve diğer takım çeliklerine borlama uygulanmaktadır.

Ayrıca DIN St 37 çeliğinden yapılmış borlanmış çelik boru ve ekipmanları, alüminyum gibi bazı demir dışı malzemelerin ergimiş haldeyken taşıma işlemlerinde de kullanılmaktadır [32].

Bir diğer hususta, borlamanın birden çok alaşımlama teknikleriyle birlikte uygulanmasıdır. Örneğin, borlama-kromlama, ostenitik çeliklerde aşınma karşı direnç kazandırmak maksadı ile yapılırken, borlama-kromlama-titanyumlama, plastik işleme makine parçalarına yine aşınmaya karşı direnç kazandırmak için tercih edilen alaşımlama teknikleridir [32].

Borlanmış yüzeylerin soğuk kaynak eğiliminin çok düşük olması adhesiv aşınmayı azaltmada önemli bir faktördür. Bu özelliğinden dolayı, sıvama, derin çekme vb. soğuk şekillendirme işlemlerinde öncelikle borlanmış takımlar tercih edilmektedir [17,23].

Kule tipi siloların taşıma sistemlerinde kullanılan dövme zincirler borlanarak abrasiv aşınmaya ve erozyona karşı son derece dirençli hale getirilmiştir [17]. DIN C_k 45 malzemeden yapılan taşlama diskleri de endüstriyel anlamda borlanan malzemeler arasında yer almaktadır [4,32].

BÖLÜM 4

EROZİV AŞINMA

4.1. GİRİŞ

Makine terminolojisinde erozyon, katı yüzey ve akışkan (tek veya çok bileşimli) arasındaki mekanik etkileşimden kaynaklanan, katı tanelerin veya sıvı damlacıkların sürekli çarpma etkisi yapmaları sonucunda katı bir yüzeyden malzeme kaybı olarak tanımlanmaktadır [35]. Bir çok mühendislik malzemesinin bu tür aşınmaya karşı gösterdikleri davranış farklı olur. Sözgelimi polimer yüzeylerin erozyon mekanizmaları seramik veya metalik malzemelerinkinden farklıdır. Ancak eroziv aşınma direnci, malzemenin bir özelliği olmamasına rağmen yüzey fonksiyonlarına oldukça bağlıdır [50].

Bu tür aşınma proseslerini içeren malzeme kaldırma mekanizmaları, yinelenen yoğun çarpma olayları ve/veya karşı cismin aşırı çizilmesi olarak düşünülebilir [63]. Malzeme yüzeyi ile temas ortamı arasındaki bağıl hızların yüksek değerlere ulaştığı sistemlerde, sıvılar ve gazlar akış sırasında yüzeyden parçacıklar koparır ve erozyona özgü yüzey şekilleri oluşur. Bu akışkanların ve taşıdıkları partiküllerin fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlı olarak, katı yüzeylerde bıraktıkları hasar şekli ve boyutu da farklı olur. Olaya bir de yüksek sıcaklık faktörü ilave edilirse durum oldukça karmaşık bir hal alır. Bu sebeple eroziv aşınma olayları çeşitli aşınma modları altında toplanarak incelenir [34].

Uygulamada eroziv aşınmaya maruz kalan tribolojik sistemler açık sistemler gibi karakterize edilebilir. Yani karşı cisim sürekli bir akış gösterir ve üzerindeki aşınma

çoğunlukla ihmal edilir. Ancak, bu olayların görüldüğü oldukça büyük ve kompleks sistemlerdeki hasarların büyük kayıba yol açacağı bilinmelidir.

4.2. METALLERDE EROZİV AŞINMAYA TESİR EDEN FAKTÖRLER

Genelde eroziv aşınma; katı, sıvı, gaz ya da bu maddelerin kombinasyonlarının katı cisimler üzerinde kayma, çizme veya sürekli darbe etkisi ile oluşur [35]. Katı bir cisme çarpan köşeli partiküllerin meydana getirdiği hasar, abrazyon ile üretilene benzerdir. Erozyonda, cismin yüzey pürüzlülüğü abrazyona göre daha yüksek olabilir. Çünkü çarpan partiküller yüzey üzerindeki alçak noktalardan da malzeme kaldırabilir [63]. Eroziv aşınma oranı üzerinde esas sürtünme malzemesi özelliklerinin ve mikroyapısının yanısıra çarpan partiküllerin hızı, yüzeye çarpma açısı ve boyutu etkili olur [34,36,50]. Nitekim 1960 yılında Finnie, (M) kütlesindeki ve (v) hızına sahip aşındırıcı taneciklerin yüzeyden kaldırdığı malzeme hacmi (*V*) arasında bir bağıntı kurmuş [50] ve bunu

$$V = k\,M\,v^2 \qquad (1)$$

denklemi ile ifade etmiştir. Bu denklemdeki k terimi, aşındırıcı (malzeme, geometri), nominal çarpma açısı (α) ve hedef malzemenin mekanik özellikleri hesaba katılarak bulunan bir parametredir. Finnie, yaptığı diğer bir çalışmada [37], sünek metallerde erozyon sebebiyle oluşan kütle kaybının hızın karesiyle orantılı olduğunu, seramik gibi kırılgan malzemelerde ise hızın altıncı kuvvetine kadar yükselebileceğini tespit etmiştir.

Esas malzemedeki erozyon oranı, aşınan malzemedeki ağırlık kaybının, aşındırıcı partiküllerin ağırlığına oranı şeklinde tanımlanmaktadır. Erozyon oranı ile hız ilişkisi aşağıdaki bağıntı ile karakterize edilmektedir [36].

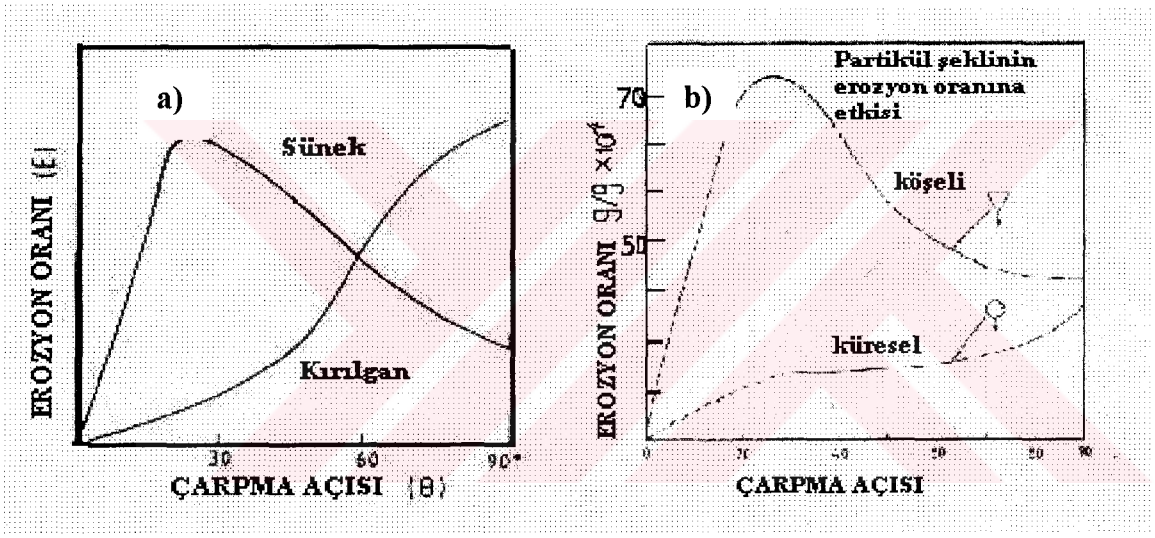
$$E = E_0\,V^p \qquad (2)$$

Burada, E_0 sabit, V çarpma hızı, p sabit ve E erozyon oranıdır.

Metalik malzemelerin erozyonu konusunda çok sayıda deneysel çalışma mevcuttur. Bu çalışmalara dayanarak metallerde hız üsteli: eğik çarpma koşulları altında 2,4; dik çarpma koşullarında ortalama 2,55 olarak hesaplanmıştır. Bu değerin seramikler için 3 civarında; polimer matriks kompozitler için 5'i aşan değerlerde olduğu tespit edilmiştir [36]. Bunun yanısıra, hız üsteli (p); çarpma açısı ve partikül boyutuna göre de değişmektedir. Örneğin

partikül boyutunun küçülmesi ile (p) değeri azalır. Ayrıca bu değer partikül şekline de bağlıdır.

Eroziv aşınma üzerindeki bir diğer etken de esas malzeme ve partikülleri ileten nozul arasındaki çarpma açısıdır [37-41]. Erozyon oranının çarpma açısıyla ilişkisini daha çok esas malzemenin özellikleri belirler [36]. Sünek malzemeler (metal ve alaşımlar) 15, 30° gibi orta düzey grubuna giren çarpma açılarında maksimum erozyon oranını sergilerler. Buna karşın kırılgan bir malzemenin (cam gibi) maksimum erozyon oranı genel olarak dik çarpma açısında (90 °) elde edilir (Şekil 4.1).



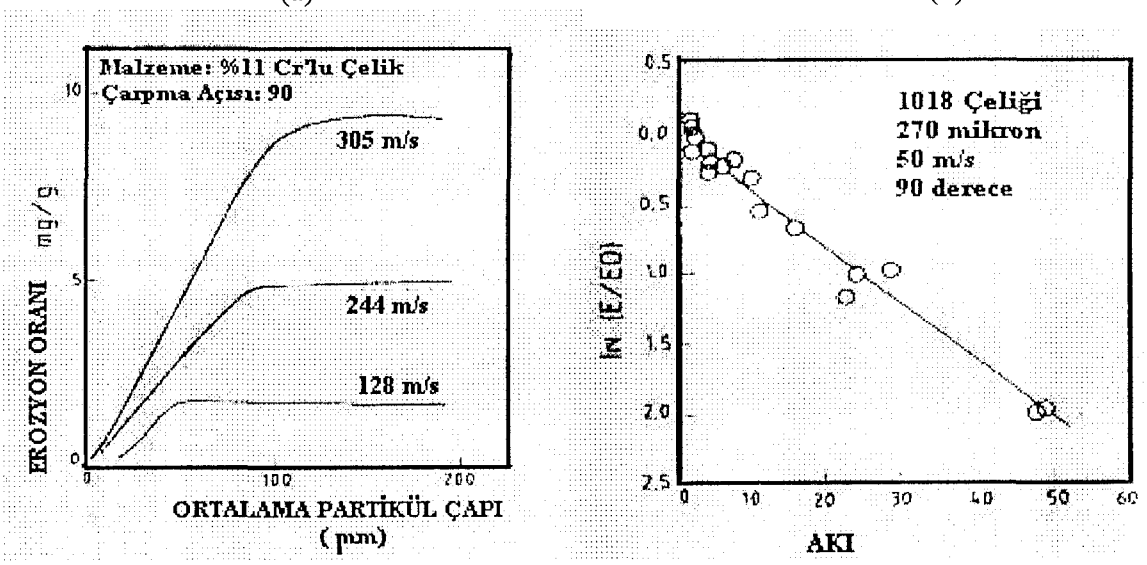
Şekil 4.1.a) Sünek ve kırılgan malzemelerde erozyon oranının çarpma açısıyla değişimi [36].
b) Küresel ve köşeli partikül şeklinin, çarpma açısı ile erozyon oranı değişimine etkisi [36].

Aşındırıcı tane ile ilgili değişkenler arasında, erozyon oranı-çarpma açısı davranışına en çok etki eden parametre, partikülün şeklidir. Küresel partiküller kullanıldığında, yumuşak çelik ve bakır gibi sünek malzemelerde dik çarpma açısında maksimum bir erozyon oranı ortaya çıkar. Çarpma açısı ile erozyon oranının değişimi üzerinde etkili olan, aşındırıcı partikülün sertliği, boyutu ve gevrekliği ve çarpma hızının etkisi hususunda veriler yetersiz kalmaktadır [36].

Erozyon davranışına etki eden bir diğer önemli faktör ise partikül boyutudur. Şekil 4.2.a' da gösterildiği gibi, 50-100 μm sınırlı bir partikül boyutuna kadar erozyon oranı partikül

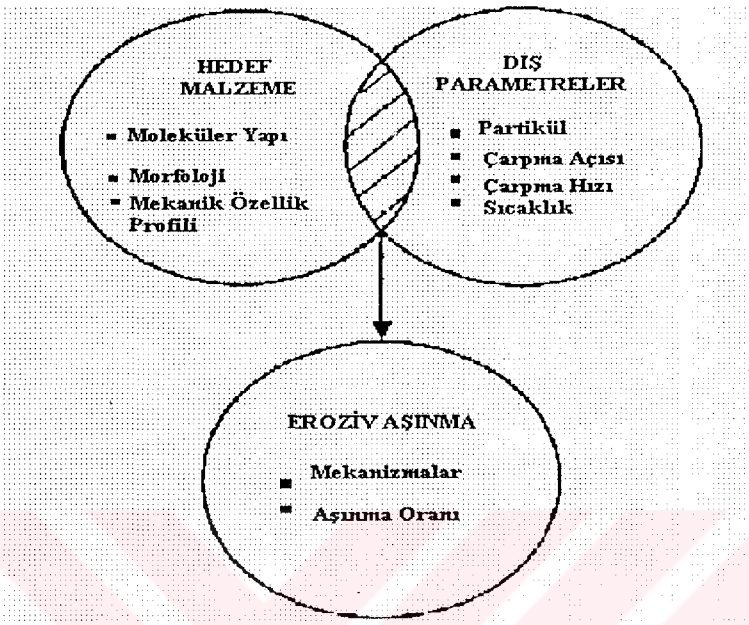
boyutuyla artış göstermektedir. Bu aralık ötesinde ise erozyon oranı partikül boyutunda bağımsız bir hal almaktadır. Partikül şeklinin erozyon oranı üzerinde etkisi bazı araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Bir çok metalik malzeme küresel partikül yerine köşeli partiküller ile aşındırıldığında erozyon oranı daha yüksek olmaktadır [36]. Reddy ve Sundararajan, aşındırıcı olarak gevrek olmayan küresel çelik bilyalar kullanarak dik çarpma açısında bakır ve bakır esaslı malzemeler üzerinde yaptıkları testlerde maksimum bir erozyon oranı belirlediler. Bunun aksine köşeli SiC partiküller kullanıldığında aynı bakır ve bakır alaşımlarının cevabı sünek bir malzemenin gösterdiği erozyon davranışı şeklinde olmuştur (Şekil 4.1.b). Böylece aşındırıcı partiküllerin köşelilik meyilinin artışından dolayı erozyon oranı artar. Aşındırıcı partiküllerin sertliğinin çeliğin erozyon üzerindeki etkisi, Wellinger ve Uets tarafından yapılan çalışmada incelenmiştir. Aşındırıcı malzemenin sertliği hedef malzemenin sertliğinin en az iki katı olmak koşuluyla erozyon oranının partikül sertliğinden bağımsız olduğunu ve aşındırıcı partiküller, hedef malzemeye göre sert olduğunda erozyon oranının kayda değer bir şekilde azaldığı bildirilmiştir. Bunun yanısıra gevrek aşındırıcı partiküller kullanılırsa daha yüksek erozyon oranı sonuçlarının gözlenebileceğine dikkat çekilmektedir [36]. Genelde aşındırıcı partiküllerin akısı metalik malzemelerin erozyon oranı üzerinde önemli bir etkiye sahip değildir. Ancak çok yüksek partikül akısı oranlarında diğer partiküllerle etkileşim ve geri sıçrama, erozyon oranının azalmasına neden olmaktadır (Şekil 4.2.b).

(a) (b)



Şekil 4.2.a) Ortalama partikül çapının erozyon oranı ile değişimi [36]
b) AISI 1018 çeliğinin erozyon oranına aşındırıcı partikül akısının etkisi [36]

Sonuç olarak, eroziv aşınma etkenlerini, malzeme ile ilişkili olanlar ve dış parametreler şeklinde iki grup altında toplamak mümkündür. Bu iki etken erozyon oranına etki etkidiği kadar aşınma mekanizmalarına tesir etmektedir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. Eroziv aşınma sonuçlarına etki eden malzeme özellikleri ve test parametreleri [50]

4.3. KATI PARTİKÜL EROZYONUNDA AŞINMA MEKANİZMALARI

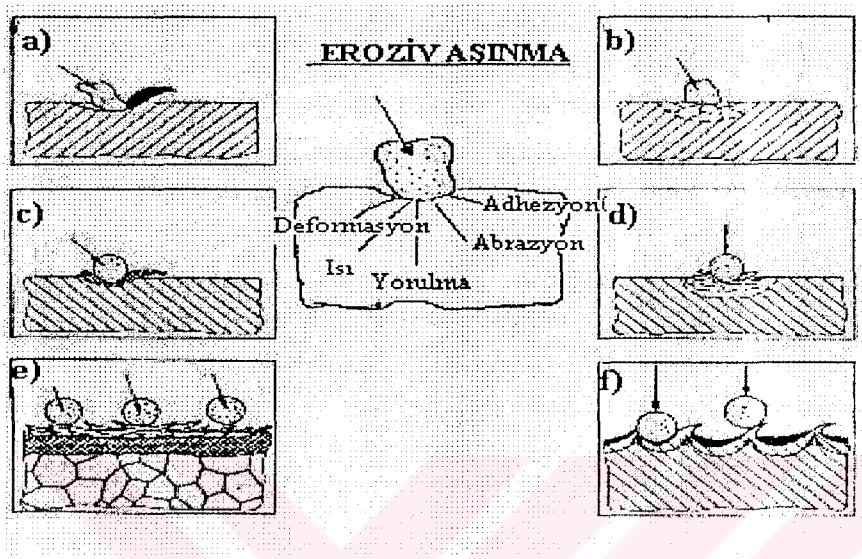
Eroziv aşınma mekanizmaları hakkındaki pek çok bilgi tek partikül çarpma olaylarına dayandırılmaktadır. Çok partiküllü püskürtme olayları, partiküllerin etkileşimlerini, yüzeye gömülmüş partikülleri ve bu partiküllerin aynı andaki geliş açıları gibi kompleks durumları kapsar. Yüksek hıza sahip tanecikler kinetik bir enerji oluştururlar. Dolayısıyla çarptıkları yüzeylerde bir takım değişimlere neden olurlar. Bu değişim esas malzemede adhezyon ve abrazyonun oluşumuna, yüzeyde plastik deformasyona ve ısınmaya sebep olabildiği gibi esas malzeme özellikleri ve dış parametrelere bağlı olarak farklı aşınma mekanizmalarının oluşumuna yol açar. Bununla birlikte malzemedeki erozyon oranı da değişir [34].

Her malzemenin erozyona karşı göstereceği davranışta aşınma mekanizmalarının rolü büyüktür. Farklı malzemelerde farklı aşınma mekanizmaları görülür ve dolayısıyla erozyon oranı farklı olur. Şekil 4.4'de eroziv aşınma mekanizmaları şematik olarak gösterilmek

tedir. Bu aşınma mekanizmaları ile ilgili modeller çeşitli araştırmacıların çalışmalarına dayanmaktadır. Finnie kırılgan malzemeler de çatlama mekanizması, sünek malzemelerde bir kesme mekanizması ileri sürmüştür. Bitter, tekrarlanmış deformasyon ve kesmenin kombinasyonu şeklinde eroziv aşınmayı incelemiştir. Buradan hareketle kesme mekanizması, katı yüzeye dar açıda çarpan partiküllerin kesme ve sürüme ile yüzeyden talaş kaldırma olayı olarak nitelendirilmiştir (Şekil 4.4.a). Tilly, darbe sonucu yüzeylerde oluşan kraterlerin kenarlarında dudak biçiminde yığınların oluştuğunu ve bunların diğer partiküller vasıtasıyla taşındığını belirtmiştir. Bu konu üzerinde çalışan Hutching ve Arkadaşları, yığınların kendilerine yakın kısımlarda yüzey altında oluşmuş bölgesel adyabatik kesme bantları boyunca koparıldıklarını tespit etmişlerdir [34]. Ayrıca bu gerilmeli yığılma alanları, plastik akış sebebiyle bölgesel sıcaklığın artmasından ve gerilmiş malzemenin mikroyapısının değişimi sonucunda oluştuğu belirtilmiştir. Hutching ve Winter, krater kenarlarında yükselen yığınların oluşmasında, çarpan bir partikül ile hedef yüzey arasındaki adheziv kuvvetlerin, önemli rol oynadığını delil olarak göstermişlerdir. Oluşan bu malzeme yığınları çoğunlukla tek bir partikül tarafından kopartılamaz ve taşınmaları birbirini takip eden çarpma hallerinde meydana gelebilir. Çarpan partiküllerin parçalayıcı özellikleri, ekstrüze olmuş malzemenin kaldırılmasına katkı sağlayabilir. Bellman ve Levy, eroziv aşınmada bir plakacık mekanizması önermişlerdir. Bu mekanizmaya göre, esas malzemenin etkilenmesi istenmeyen hacimce büyük olan çekirdek kısmı üzerinde oluşan pekleşmiş bölgenin desteklenmesi ile yumuşak bir yüzey tabakası oluşur [34]. Bu tabakada sürekli rejimde erozyon aşınması meydana gelir.

Yumuşak yüzey şiddetli plastik deformasyon ve sürtünme nedeni ile rekristalizasyon ve ıslah etme işlemlerindeki gibi ısıl aktiviteli işlemlere maruz kalır. Çarpan partiküller çekiç gibi etki yaparken, ısınan ve yumuşayan yüzey, bir örs görevi yapan pekleşmiş bölge üzerinde dövülür ve ekstrüze edilir. Cousen ve Hutchings, dik çarpma şartları altında ters yönlü ekstrüzyon işlemi modeli kurmuşdur. Bu modele göre malzeme, darbe kraterlerinin hemen altında, pekleşmiş tabakadaki ince çatlaklardan yüzeye doğru zorlanarak çıkmaya çalışır. Pekleşmiş tabakadaki kırıklar, yüzey topografyasındaki piklerle uyum içindedir. Ekstrüze olan yumuşak yüzey plakacıklar şeklinde ayrılır ve sonunda birbirini izleyen partikül çarpmaları ile yüzeyden uzaklaşır. Tek veya çoklu partikül darbeleri sonucu aşınmaya neden olan esas mekanizmalar Şekil 4.4.'deki gibi özetlenebilir. Özellikle 40° den daha düşük çarpma açılarında hedef yüzeylere çarpan köşeli partiküller mikroçizme

ve/veya mikrokesme ile malzeme kaldırır (Şekil 4.4.a). Metallerin yinelenen çarpışmaları sırasında artık gerilmeli bölgelerin oluşması ve yüzey yorulması yüzey altı mikroçatlakların oluşmasına neden olur [50]. Yüzeyde çatlama, çarpma açısı, partikül boyutu, partikül hızı ve/veya hedef malzemenin kırılganlığına bağlıdır [36].

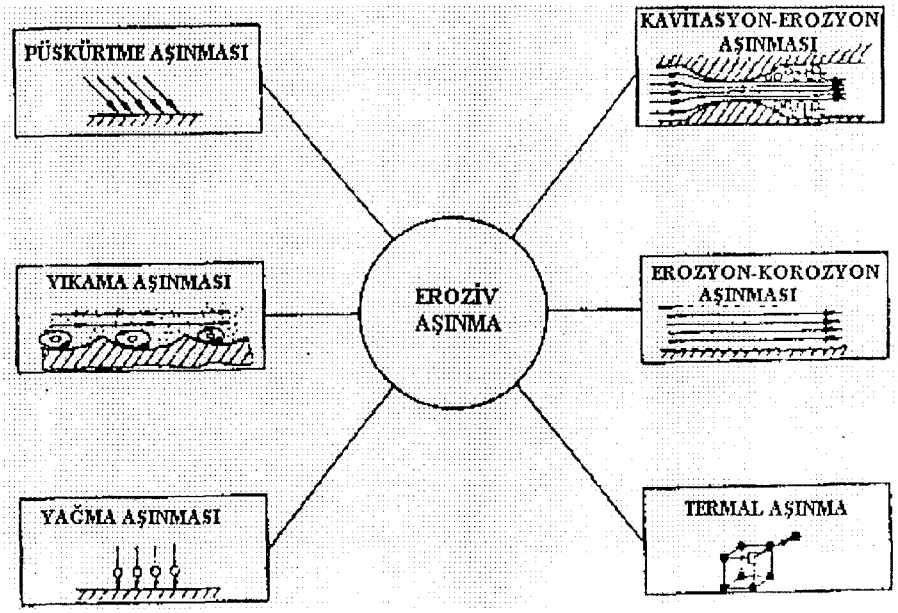


Şekil 4.4.Tek ya da çoklu partikül darbelerinden dolayı aşınma kaybı ile sonuçlanan erozyon mekanizmaları [34].

(a) Mikrokesme ve mikroçizme
(b) Yüzeyde çatlama (mikroçatlama)
(c) Darbe kraterlerinin çıkış ucunda malzemenin ekstrüzyonu
(d) Sürekli darbelerden dolayı yüzeyde ve yüzeyaltında yorulma çatlakları
(e) Sürekli darbelerden dolayı dövme ve ekstrüzyon sebebiyle ince plakacıkların oluşumu
(f) Geri yönlü (ters) ekstrüzyon işlemiyle plakacıkların oluşumu

4.4. EROZİV AŞINMA TÜRLERİ

Eroziv aşınma olaylarının, partiküllerin ve bunların taşındığı akışkanın fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlı olması nedeniyle katı yüzeylerle eroziv çevre arasındaki etkileşim aynı olmaz. Dolayısıyla yüzeylerde bırakacağı hasar türü, boyutu ve meydana geliş şekli de değişim gösterir. Bu sebeple eroziv aşınma olaylarına daha iyi yaklaşım getirmek maksadı ile çeşitli alt kollar altında toplanmıştır. Şekil 4.5.'de eroziv aşınma türleri şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Metallerde eroziv aşınma türleri [34].

4.4.1. Yıkama Aşınması

Katı partikülleri taşıyan sıvı akışkanın akma eylemi sırasında temasda olduğu yüzeylerde bıraktığı hasardır [34,62]. Suların beraberinde sürüklediği kum ve çakıl gibi benzeri maddeler veya teknikte uygulanması yaygınlaşan kömür ve cevher gibi taneli maddelerin borular ile bir yerden bir yere sevk edilmesi ayrıca su pompası ve türbünleri, cevher hazırlama, ziraat, inşaat ve harfiyat makinalarının makine parçaları yıkama aşınması ile zorlanmaktadır. Kum içeren bir sıvı akışkan içerisinde tutulan parçaların yüzeyinde karakteristik dalgalı çukurlaşmalar görülür. Bu çukurlaşmalar, aşınmaya zorlanan yüzeylerinde çözünmeler ve girdaplar nedeniyle oluşur. Parça yüzeyindeki çok küçük her yükseltinin arkasında bir girdap akımı oluşarak merkezkaç kuvvetle katı tanecikler yüzeye çarpar ve dolayısıyla hızlı bir aşınma olur [39]. Boru hatlarıyla çamurlu suyun taşınması olayında karşılaşılan aşınma cinsi bu gruba girer [34].

4.4.2. Erozyon-Korozyon Aşınması

Erozyonun korozyon ile birlikte meydana gelmesi ile oluşan aşınma türüdür [42,54,56]. Örneğin kimyasal içerikli malzemelerin taşınması sırasında, bu sıvıların agresiv etkilere sahip nitelikte olmalarının sonucu, temasta bulundukları yüzeylerde erozyon-korozyon aşınmasına neden olmaktadır. Bu tür aşınma, kömür dönüştürme işlemlerinden nükleer güç

iletiminde kullanılan buhar türbinlerine kadar geniş bir sahayı kapsayan bir çok endüstriyel ortamda katı partikül tarafından yada sıvı darbeleri etkisiyle oluşur. Erozyon-korozyon aşınmasının etkisi partikülün, hedef malzemenin ve korozif çevrenin özelliklerine bağlıdır. Ayrıca erozyonunun daha baskın olduğu ya da korozyonun daha baskın olduğu akım rejimleri de tanımlanabilir [41].

4.4.3. Erozyon-Kavitasyon Aşınması

Malzemelerde kavitasyon tahribatı sıvı ortam içinde, teşvik edici izafi hareket sonucu boş denebilecek (düşük basınçlı) küçük hacimlerin ve bunların sıvı tarafından ani doldurulması (kabarcık patlaması) esasına dayanan tekrarlı zorlanmalarla malzeme yüzey bölgesinin yorulması sonucu meydana gelir. Sıvı içindeki boş hacimlerin malzeme yüzey bölgesinde tekrarlı oluşması ve bunların patlaması sonucu yayılan basınç dalgalarının etkisi ile oluşabildiği gibi, doğrudan sıvı jeti (mikrojet) etkisiyle ortaya çıkan kabarcıkların sıvı içinde belirli bir bölgedeki hidrostatik basıncın, kritik basınç altına düşmesi durumunda da meydana gelebilir. Bunun için gereken basınç düşümü ya hidrolik sistemlerde olduğu gibi kesit daralması sonucu veya sıvı içindeki bir titreşimde, bir sıvı bölgesinin titreşim genleşmesi safhasında parçalanması sonucu doğabilir [26,34]. Kavitasyon erozyonu teknikte bir çok uygulama alanlarında değişik görünümlerde ve sık ortaya çıkan malzeme tahribatı şeklidir. İzafi hareketin söz konusu olduğu malzeme/sıvı çiftini içeren bütün teknik sistemlerde özellikle su türbinlerinde, gemi pervanelerinde, hidrolik iletim sistemlerinde, pompalarda vana ve supaplarda, dizel motoru silindirlerinin soğutma kısımlarında görülür. Çoğu zamanda makina veya sistemin teknik ömrünü tayin eder [26].

4.4.4. Yağma Aşınması

Katı bir yüzey üzerine çarpan sıvı damlacıklar yağma erozyonuna yol açar. Örneğin uçakların üzerine yağmur damlacıklarının veya buhar türbünü kanatçıklarının üzerine sıvı damlacıkların nufus etmesi vasıtasıyla tahribata sebep olmaları şeklinde tanımlanmaktadır [34].

4.4.5. Termal Erozyon

Termal erozyon; ısıl, mekanik, elektriksel veya mağnetik kuvvetlerin etkisiyle erime ve/veya buharlaşma meydana gelmesi sonucunda malzeme kaybına sebep olan elektro kimyasal işlemleri kapsamaktadır [34].

4.4.6. Püskürtme Aşınması (Katı Partikül Erozyonu)

Püskürtme aşınması, belirli kuvvetlerle hızlandırılmış katı partiküllerin sebep olduğu eroziv aşınma türüdür [34]. Püskürtme aşınması; yıkama aşınması, kavitasyon-erozyon ve erozyon-korozyon aşınmasından farklıdır. Yüzeyden malzeme taşınımı, benzer darbe etkilerine sahip, aslında birbirinden bağımsız bir seri olayın sonucunda gerçekleşir. Sert partiküller ve yüzey arasındaki temas süresi çok kısadır. Erozyona bu açıdan bakıldığında sürtünme aşınması, abrazyon ve taşlama işlemleri gibi hedef malzeme/iş parçası ve takım/aşındırıcı arasındaki temasın sürekli olduğu diğer işlemlerden tamamen farklılık arzeder [36]. Her malzemenin püskürtme aşınma direnci, püskürtme açısı ile ilişkilidir.

Yumuşak ve deforme olabilen malzemeler küçük püskürtme açısında büyük bir aşınma gösterirken dik püskürtme halinde sert malzemelere göre çok daha az aşınmaktadır [38,39]. Pratikte en çok bu aşınma türü, kimyasal fabrikalardaki hava akımıyla abrasiv malzemeleri taşıyan nakil borularında, hidrolik maden kazma makinalarının pompa ve valflerinde, kumlama makinaları parçaları ve nozullarında karşılaşılır [36]. Bunun yanısıra yüksek sıcaklık gerektiren uygulamalarda da katı partikül erozyonu önemli hasarlar bırakabilir. Buna örnek olarak itici sistemlerdeki, roket motoru itici nozulu, yanma sistemlerinde yakma nozulu, ekonomizer, akışkanlı yatak yanmasında kazan eşanjör tüpleri, genleşme türbünü, yatak boruları, kömür buharlaştırma sistemlerinde kullanılan türbünler ve kömür sıvılaştırma sistemlerinde kullanılan valfler, uçak motorları kompresör ve türbün kanatçıkları helikopter motorunda rotor ve gaz türbün kanatçıkları örnek olarak verilebilir [41-44].

4.5. EROZİV AŞINMANIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Eroziv aşınma miktarının ölçme büyüklüğü numune ağırlık kaybından hesaplanan, hacimsel kayıp, her defasında üflenen taneli malzemenin miktarına oranlanır. Bir çok defa belirli miktarda taneli malzeme püskürtülmesinin oluşturduğu aşındırılan hacim bir mukayese malzemesinin aşınma miktarına bölünür. ASTM G 76-95'e göre [35], mukayese malzemesi AISI 1020 çeliğidir. DIN normuna göre [38], St 37 ve sert malzemeler için C60N çeliğine oranlanır. Elde edilen değer normalizeli erozyon değeri olarak adlandırılmaktadır [35]. Erozyon oranı ise mm^3/g olarak verilmektedir. Özellikle de püskürtme aşındırmaları değerlendirmesinde bir çok araştırmacı genel yaklaşım aynı olmakla birlikte erozyon oranını hacimsel malzeme kaybını esas almalarının yanısıra

ağırlıksal kaybın toplam püskürtülen partikül ağırlığına bölerek de değerlendirmişlerdir. Bu durumda, erozyon oranının birimi g/g, mg/g, mg/kg şeklinde verilmiştir. Ayrıca numune yüzeylerindeki alçalma ölçülerek de değerlendirme yapılmaktadır [50].

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

BÖLÜM 5

EROZİV AŞINDIRMA DENEY SETİNİN TASARIMI VE İMALATI

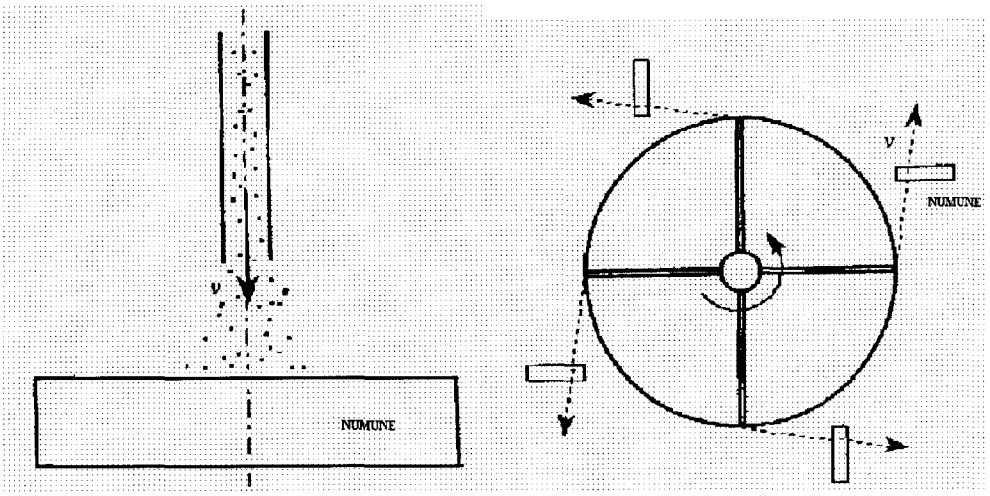
5.1. GİRİŞ

Eroziv aşınma testlerini gerçekleştiren deney tesisatlarının çeşitli türleri olmasına rağmen, kullanımda gaz üfleme üniteli ve santrifüj ivmelendirmeli adları verilen iki temel tipi yaygındır. Gaz üfleme deney tesisatlarında (Şekil 5.1), aşındırıcı partiküller, gaz akışı içinde (genellikle hava) bir nozul boyunca ivmelendirilir [66]. Nozul, ASTM standardında [35] verilen özelliklerde veya daha kompleks şekillerde olabilir [66,67]. Bu tür cihazlarda aşındırmaya maruz bırakılacak numuneler nozul ucundan sabit uzaklıkta bir mesafede bir tutucuya yerleştirilir. Santrifüj ivmelendiricili tasarımlarda (Şekil 5.1.b) partikülleri hızlandırmak için genellikle yatay düzlemde bir partikül akışı üretmek maksadı ile rotor merkezinden beslenen partiküllere hız kazandırmak için dönme eyleminden faydalanılır. Bu tesisatlarda, birden fazla sayıda numunenin aynı anda aşındırma işlemlerini gerçekleştirmek mümkündür [66]. Jönsson ve Arkadaşları [68], bu tipte bir eroziv aşındırma deney tesisatı kurarak çelik üzerindeki sert kaplamaların erozyona olan direncini belirlemeye çalışmışlardır.

Bahsedilen cihaz türlerinden gaz üfleme üniteli eroziv aşındırma amaçlı kurulan deney tesisatlarının kullanıldığı bir çok çalışma mevcuttur. Bu deney setlerinin karakteristik özelliklerinden biri, düşey ve yatay düzlem üzerinde konumlandırılmış olmalarıdır. Anand ve Arkadaşları [69], yatay düzlemde silindirik bir boruyu, partikül deposu ve hava tedarik sistemleri ile irtibatlandırarak, partiküllerin hava vasıtası ile hızlandırıp numune yüzeyine

çarpmasını sağlayan basit bir düzenek kurmuşlardır. Fredrich [50] tarafından polimerik malzemelerin erozyonu konusunda yapılan çalışmalarda da benzer şekilde tasarlanmış bir tesisattan faydalanılmıştır. Bell ve Rogers [67], tarafından kullanılan tasarımda, basınçlandırılmış bir partikül deposu ve bu depoyu basınçsız durumda partiküllerle besleyen ana partikül deposu olmak üzere iki tür depo kullanılmıştır. Basınçlandırılmış deponun bağlantı borusu yatay düzlemde konumlandırılmış ve çıkış ucunda konik bir şekilde daralan ve çalışma esnasında içinden yüksek hızda hava akımı geçen bir boruya dik bağlantılıdır. Burnett ve Rickerby [60], iş parçasını, püskürtme nozulu eksenine göre açı verilmesini sağlayan bir tablo üzerindeki tutucuya sabitleyerek yatay hat üzerinde montajı yapılmış iletim borusu vasıtası ile, partikül ve hava karışımını parça üzerine yönlendirmişlerdir. Fang ve Arkadaşları [55], su ve kumdan ibaret çamurun bir pompa yardımı ile yatay konumda yerleştirilen bir iletim hattı üzerinden yüksek hızda partikül üzerine püskürtülmesini sağlayan bir tesisat hazırlamışlardır.

Gaz üfleme tertibatlı eroziv aşındırma cihazları düşey konumda da tasarlanabilir. Oka ve Arkadaşları [40], kapalı bir hazne içerisine açılı formda yerleştirdikleri numune üzerine, hava-partikül karışımını düşey konumda tasarlanan iletim borusu yardımı ile numune üzerine yönlendiren bir tesisat kurmuşlardır. Tasarımda sürekli gaz tedariği, hava tüpü ile, kontrolü ise tüp çıkışına yerleştirilen manometre ile sağlanmıştır. Li ve Hutchings [43], tarafından tasarlanan deney tesisatında ise hava tedariği iki ayrı tedarik kolundan sağlanmıştır. Bunlardan biri konik şekilli ve bir miktar açı verilerek eğik konuma getirilen partikül deposu üzerine yönlendirilerek hava geçiş hızına göre depodan partikül taşıması sağlanmıştır. Diğer kolu ise karışım odasına irtibatlandırılmıştır. Yine iş parçasına açılı olarak aşındırmak ya da iş parçası ile nozul arasındaki mesafeyi büyültme veya küçültme imkanı sağlayan ekipmanlar tasarlanmıştır. Temel anlamda bu tasarım tipine benzemekle beraber, Shipway ve Hutchings [70]'in tasarladıkları deney tesisatında ise partikül besleme ünitesinin farklı oluşu göze çarpar. Burada, koni şeklindeki iki ayrı depo üzerinden geçerek gelen partiküller belli bir açısal hızda dönen dairesel bir tablo üzerine düştükten sonra, düşey hatta konumlandırılmış karışım odası ve iletim hatlarından oluşan bir düzenek içerisinden geçen havanın sebep olduğu vakum etkisi ile bu dönen disk üzerinde biriken partiküllerin emilerek iletim hattına alınması sureti ile oluşturulan hava-partikül karışımı, açılı veya dik konumda yerleştirilmiş numune üzerine yönlendirilmiştir. Numune üzerine çarparak geri saçılan partiküllerin depolanması amacı ile numune tutucu altına kaba taneli ve ince taneli partiküllerin birikmesini sağlayan iki ayrı toplama ünitesi tasarlanmıştır.



(a) (b)

Şekil 5.1 Eroziv aşındırma deney tesisatları [66].

5.2. TASARIM ÖZELLİKLERİ

Eroziv aşındırma cihazının tasarımında, aşınması değerlendirilecek malzemenin türü birinci rol oynamaktadır. Cihazın, özellikle çelik ve sert kaplamalar başta olmak üzere bu malzemelerde aşınma olaylarını oluşturacak güce sahip nitelikte olması tasarımdan beklenen temel özelliktir. Eroziv aşındırma sonuçlarının daha kapsamlı değerlendirilmesi için cihazın belli bir aşındırma gücüne sahip olmasının yanında bu gücün şiddetini de kontrol edebilme imkanını sağlayacak özelliklere sahip olması istenmiştir. Teste tabi tutulacak bir malzeme için ayarlanan deney şartları bir başka malzeme için uygun olmayabilir. Örneğin malzemede aşınma olayı hiç gerçekleşmez ve yahut da çok uzun süre alır. Bu durum zaman kaybına ve maliyet artışına neden olur. 50 μm kalınlığın altında malzeme yüzeylerinde oluşan ince ve sert tabakaların erozyon testleri için uygun olmayan parametreler seçilirse, bu tabakaların erozyon davranışlarını görmek mümkün olmayabilir.

Eroziv aşındırma cihazının yukarıda sayılan niteliklere sahip olmasının yanında operatör ve çalışma ortamının emniyeti için güvenli olması düşünülmüştür. Kumlama makinalarında olduğu gibi nozul ağzından yüksek hızda çıkan saniyede onlarca katı partikülün korumasız bir ortamda çarptıkları bir yüzeyden geri sıçraması, çalışma çevresinde tehlike oluşturur. Nozuldan çıkan bu partiküllerin hem emniyet açısından hem de testlerde tekrar kullanılacağı düşüncesi ile saçılmadan dolayı olan aşındırıcı partikül kaybını minimum

seviyeye indirmek için dört tarafı kapalı bir hazne tasarlanmıştır. Çalışma esnasında 200 μm altında aşındırıcı olarak kullanılan partiküller uzun süre dibe çökmez ve havada asılı kalır. Bu durum, her ne kadar partiküller belli bir hacimde kontrol altına alınmış olsa bile numunenin tartım işlemleri vs. gibi tutucudan sökümünü gerektirecek durumlarda operatörün çalışma şartlarını olumsuzlaştırır ve zaman kaybına neden olur. Buna önlem olarak tutucu ve tutucuya yerleştirilen numune sadece havanın geçmesine izin veren sık dokunmuş bir torba içerisine yerleştirilmiştir. Nozul ve numune arasındaki mesafenin istenen değerlere ayarlanabilmesi için tutucu, çelik çubuk üzerinde alçalıp yükselecek tarzda vidalı tasarlanmıştır.

Cihazda hava-partikül karışımının gerçekleşeceği çelik borunun yerleştirilme düzenine ise borunun düşey ve yatay düzlemde montajı yapılarak karar verilmiştir. Yatay konumda yerleştirilme durumunda belli bir akış süresi sonunda düşük ve orta hız akış değerlerinde bir miktar partikülün nozuldan çıkamayıp boru içerisinde biriktiği tespit edilmiştir. Bu duruma aynı borunun düşey konumda monte edilmesi halinde ise rastlanmamıştır. Buna bağlı olarak karışım borusunun düşey bir düzlem üzerine yerleştirilmesine karar verilmiştir. Ayrıca sistemin diğer ekipmanları düşey bir eksenden geçecek şekilde ve bu eksene simetrik olarak tasarlanmıştır.

Katı partikül-hava karışımının istenen sabit çıkış hızı ve sabit debide olması için, karışım oranlarını kontrol altında tutmak gerekir. Bunu sağlamak için, cihazın çeşitli noktalarına yerleştirilen gaz akış vanaları, basınç regülatörleri ve manometrelerden faydalanılmıştır.

Cihaz, kolayca montaj ve demontaj sağlanmasına imkan verecek şekilde tesis edilebilen parçalardan oluşmaktadır. Bu durum kurulum ve kontrol aşamalarında çıkan problemlerin sebeplerini araştırmaya imkan vererek yerinde müdahale edebilme ve gerektiğinde ekipman değişikliğine gidebilme fırsatı vermiştir. Tesis edilen ana parçaların birbirleri ile olan bağlantılarında kaynaklı birleştirmeler yerine boru bağlantılarına pafta ve kılavuz dişleri açılarak nipel, redüksiyon ve manşonlar kullanmak sureti ile bağlantı sağlanmıştır. Sistemin tam kapasite çalışması durumuna göre, (maksimum basınçta ve partikül depoları tam dolu iken) cihazın tüm ağırlığını taşıyacak şekilde ana partikül depolarının üst yan kenarlarına simetrik olarak kaynaklı birleştirme ile tutturulan köşebent formundaki kulakçıkların temas yüzeyleri, yeterli genişlikte yine köşebent demirlerinden hazırlanan ve ana taşıyıcı çelik konstrüksiyon üzerine kaynaklı birleştirilmiş dikdörtgen çerçevenin yan

yüzeyleri üzerine yerleştirilip cıvatalarla monte edilmiştir. Kulakçıkların temas yüzeyleri geniş tutularak, cihazın ağırlığı nedeni ile çerçeveye gelen basınç azaltılmıştır. Gerek kulakçıklara gerek ise çerçeveler üzerine açılan cıvata delikleri, delik çapından biraz yüksek çaplı bir pim ile çekiçlenerek, açılan deliklerde kalan artık gerilmeler uyarılmıştır.

5.3. CİHAZIN ANA EKİPMANLARI

Eroziv aşındırma cihazı; kompresör, hava tüpü, ana partikül deposu, partikül basınçlandırma deposu, karışım borusu, nozul ve püskürtme haznesinden oluşmaktadır. İmal edilen deney setinin montajı tamamlanmış görüntüsü Şekil 5.2'de görülmektedir.

5.3.1. Kompresör

Sistemdeki hava tedariği, azami 10 kg/cm^3 basınçta çalışabilen 200 lt. hava depolama kapasiteli, 800 d/d dönüş hızlı çift pistonlu bir hava kompresörü vasıtası ile sağlanmıştır. Cihazın maksimum aşındırma süresini belirlemede kompresör en önemli faktördür. Bu kapasitede bir kompresör, deneysel çalışmalarda seçilen püskürtme hızına ulaşmayı sağlayacak yeterliliktedir. 70 ve 110 m/s gibi yüksek püskürtme hızı değerlerine ulaşmak ve ulaşılan bu hız değerlerinde uzun süre kararlı bir akış sağlamak için yüksek kapasiteli depolama tankı ve 16-20 bar gibi yüksek çalışma basınçlarına dayanıklı vidalı veya pistonlu bir kompresör kullanma yoluna gidilmeli ya da kompresörde üretilen havanın kompresörün kendi hava tankı dışında ayrı bir hava tüpünde depolanmasının sağlanması gerekir. Eğer kullanılan kompresörün hava sıkıştırma kapasitesi düşük ise bu olay uzun zaman alır.

5.3.2. Hava Tüpü

Sisteme direk olarak kompresörden hava tedarik etmenin birtakım sakıncaları vardır. Birincisi, kompresör çalışır durumda iken sisteme yollanan basınçlı hava, sabit bir hızda ilerlemeyip, akışta bir dalgalanmaya sebep olur. Bu durum, sisteme verilen havanın düzensiz olmasına ve buna bağlı olarak partiküllerin nozuldan çıkarken düzensiz hız değerlerine sahip olmalarına yol açar. Boya tabancası kullanarak gerçekleştirilen boyama işlemlerinde direk olarak kompresörden sisteme hava verilmesi durumlarında, boya püskürtme hızının periyodik olarak artıp azalan şekilde değişmesi bu olaya bir örnektir. Bu sakıncalardan diğeri ise su yoğuşmasıdır. Bir çok pnomatik sistemlerde tesisat üzerindeki

ekipmanların korozyon vs. etkileri nedeni ile işlevsel fonksiyonlarını yitirmelerine engel olmak için tesisat üzerinde çeşitli noktalara yerleştirilen cihazlar yardımı ile biriken su tahliye edilir. Tasarlanan deney tesisatında, sistem ekipmanlarını ve depolardaki katı partiküllerin nemden uzak tutulması için sadece kompresörün hava çıkışından suyun tahliye edilmesi yetmez. Ayrıca kompresörün hava depolama kapasitesi yüksek bile olsa tedarik edilen havanın depolandığı ikinci bir ekipmana ihtiyaç vardır. Bu olaylar dikkate alınarak 50 lt. hava depolama ve azami 25 bar basınçta çalışma kapasiteli bir hava tüpü tasarlanıp imal edilerek, kompresörle bağlantısı sağlanmıştır. Hava tüpünün hava giriş ve çıkış bağlantıları arasında 1 m kod farkı oluşturulmuştur. Kompresörden gelen yüksek basınçtaki havanın nemini almak için tüp içinde hava kırma kanatçıkları tasarlanmıştır. Belli bir süre sonra yoğuşarak tüp altında biriken suyu almak maksadı ile en alt noktaya manşon kaynak edilerek körtapa ile kapatılmıştır.

5.3.3. Partikül Basınçlandırma Deposu

Azami 150 kg ağırlıkta 50 μm-1 mm arasında değişen farklı geometrik boyuttaki köşeli katı partikülleri (kum, grit vs.) depolayacak ve 2-5 bar gibi düşük basınçlarda çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Eroziv aşındırma cihazı çift hava girişli olarak tasarlanmıştır. Hava girişlerinden biri partikül basınçlandırma deposuna diğeri ise karıştırma borusu üzerinde nozula yakın bir mesafede irtibatlandırılmıştır. Kontrol testleri sırasında özellikle yüksek püskürtme hızlarında partikül deposu atmosfere açık bırakıldığı takdirde geri tepme olaylarının meydana geldiği ve katı partiküllerin karışım borusuna inmediği gözlenmiştir. Bu sebeple katı partiküllerin üzerine düşük basınçlarda belirli bir zorlayıcı kuvvet tatbik etmek gerektiği sonucuna varılmış ve hava tüpünden alınan bir iletim hattı depo ile irtibatlandırılarak basınçlı kap niteliklerine sahip olacak tarzda bir partikül basınçlandırma deposu tasarlanıp imal edilmiştir.

5.3.4. Ana Partikül Deposu

Basınçlı partikül deposundaki katı partiküllerin tükenmesi durumda basınçlı partikül deposunu doldurmak için bir ana partikül deposu tasarlanmıştır. Ana partikül deposu içerisinde depolanan partiküller, bu deponun hemen altına yerleştirilmiş konumda bulunan partikül basınçlandırma deposunun basıncı alınıp aralarındaki vana açıldığında deponun konik şekilde daralacak tarzda tasarlanmış olması ve yerçekimi etkisi ile aşağıdaki depoya

akmaya başlar. Yeterli dolum yapıldıktan sonra bu iki depo arasına yerleştirilmiş vana kapatılarak hava sızdırmazlığı sağlanmaktadır.

5.3.5. Karışım Borusu

Karışım borusu, hava jeti ve katı partiküller ile beslenmektedir. Hava jeti, dar bir kesite sahip ejektörden havanın geçirilmesi sureti ile hızlandırılarak nozul ucu yönünde yerleştirilmiştir. Partikül basınçlandırma deposundan vana vasıtası ile kontrollü bir şekilde salınan katı partiküllerin, düşey olarak konumlandırılan karışım borusu içerisinde, partikül basınçlandırma deposuna göre daha alçak bir noktada nozul yönünde yerleştirilen ejektörden sağlanan hava jetinin oluşturduğu çekiş etkisi ile boru içerisine inmesi sağlanarak hava-katı partikül karışımı oluşturulmuştur.

5.3.6. Püskürtme Nozulu

Püskürtme nozulları genellikle borkarbür, titanyumkarbür gibi sert ve dayanıklı malzemelerden imal edilir. Erozyon aşınması olayı cihazın ekipmanları arasında en çok bu parçada hasar bırakır. Bu sebeple dizayn edilen nozulun aşınmaya karşı dirençli olması gerekir. Cihaz için birden çok sayıda AISI 4140 çeliğinden nozullar yapılarak nozul delikleri macun borlama tekniği kullanılarak koruyucu gaz atmosferinde 3 saat borlanmıştır. Nozulun imalatı ise Bell ve Rogers [67], tarafından yapılan çalışmada kullanılan nozulun geometrik özellikleri dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir.

Karışım borusunda gerçekleştirilen hava-katı partikül karışımı püskürtme nozuluna yönlendirilmiştir. Bu iki ekipmanın bağlantısı boru üzerine açılan pafta ve buna uygun nozul girişine kılavuz dişleri açılarak yapılmıştır. Katı partiküller nozul içerisinden geçerken aynı zamanda nozulda erozyon hasarına sebep olmaktadır. Bunun sonucunda nozul belli bir süre sonunda hassasiyetini kaybeder. Bu gibi durumlarda nozulun karışım borusu ile kılavuz bağlantılı olarak tasarlanmış olması, parçaya kolayca sökülerek değiştirilebilme olanağı sağlamıştır.

5.3.7. Püskürtme Haznesi

Püskürtülen partiküller, açık bir ortama bırakıldığında oldukça uzak mesafelere dağılmaktadır. Ayrıca, cihazın çalışması esnasında nozuldan çıkıp numune yüzeyine çarptıktan sonra saçılan partiküller yüksek hızlarda olmaları nedeni ile çevre için tehlike arz etmektedir. Diğer taraftan, küçük boyutlarda aşındırıcı tanecik püskürtmek sureti ile

aşındırma yapmayı amaçlayan çalışmalarda bu partiküller numune yüzeyine çarptıktan sonra bir süre yere çökelmeyip havada kalmaları çalışma şartlarını olumsuz hale sokar. Püskürtülen partiküller, açık bir ortama bırakıldığında nozuldan oldukça uzak mesafelere dağılmaktadır. Püskürtme işlemi sonrası, hazne tabanında biriken partikül yığınının kolayca toplanmasını sağlamak amacı ile sadece havanın çıkışına izin verecek sıklıkta dokunmuş içine numune tutucunun yerleştirildiği ve 75 kg ağırlığında katı partikül alabilen bir torbadan faydalanılmıştır. Alınan bu önlemlerin yanında hazne kapağı kenarları ve haznenin tüm köşeleri toz sızdırmasına karşı sünger ile kaplanmıştır.

5.4. Emniyet Testleri

Basınçlı kaplar imal edildikten sonra emniyet ve sızdırmazlık testlerine tabi tutulur. Bu testler büyük tanklarda depolanan suyun cendere ile kap içerisine basılması sureti ile gerçekleştirilir. Kurulan deney tesisatı ekipmanları arasında bu açıdan önemli iki ekipman mevcuttur. Bunlardan biri hava tüpü, diğeri ise partikül basınçlandırma deposudur. Bu ekipmanlara güvenlik ve sızdırmazlık kontrolleri işletme basınçları dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. 50 lt hava depolama kapasitesinde üretilen tüpün kaynak işlemleri bittikten sonra maksimum işletme basıncının iki katı (35 bar) basınçlandırılarak test edilmiştir. Diğer taraftan 2-5 bar seviyesinde çalışacak partikül basınçlandırma deposunun testleri ise kaynak işlemlerinden sonra 15 bar basınca kadar su basılarak bekletmek sureti ile yapılmıştır.

5.5. Çalışma Prensibi

İlk olarak kompresör çalıştırılarak 10 kg/cm^2 basınç seviyesine kadar hava ile doldurulur. Bu işlemden sonra kompresör ile hava tüpü arasındaki vana açılarak hava tüpünün işletme basıncına getirilmesi sağlanır. Hava tüpünde istenen basınç değerine ulaşıldıktan sonra ana hava vanası açık konuma getirilerek partikül basınçlandırma deposu ve karışım borusuna hava götüren iletim hattına hava verilir. Partikül basınçlandırma deposu girişinde açma kapama vanası ve basınç regülatörü bulunmaktadır. Bu vana açık konuma getirilir ve partikül basınçlandırma deposunda basınç regülatörü vasıta ile istenen miktarda basınç oluşturulur. Karışım borusuna hava taşıyan hat üzerinde bulunan vana açılarak yine bu vanadan sonra yerleştirilmiş diğer bir basınç regülatörü ile ejektörden akış halinde istenen basınç değerine ayarlanmış havanın geçip nozuldan çıktığı gözlenir. Son olarak partikül basınçlandırma borusu çıkışındaki vana istenen kademede açılarak karışım borusuna katı

partiküllerin karışması sağlanır. Aşındırma süresi boyunca cihaz püskürtme işlemine devam eder. Aşındırma süresi sonunda ana hava iletim vanası kapalı konuma getirilerek işlem sonlandırılır.



Şekil 5.2. Eroziv aşındırma deney tesisatının görünümü

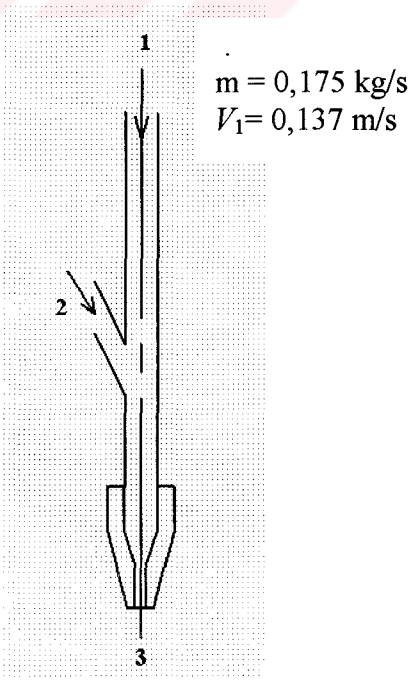
5.6. Püskürtme Hızı Hesabı

Bir gaz akımı yardımı ile püskürtülen katı partiküllerin nozul çıkışındaki hızlarını uygulamada pratik olarak ölçebilmek için ASTM G76-95 standardınca [35], üç yol önerilmektedir. Bunlar:

- Yüksek hızlarda görüntü alabilen kameralar
- Lazer dopler anonometresi ya da
- Çift disk metodu dur.

Kurulan deney tesisatı için yukarı sayılan bu cihazdan biri ile hız tespiti imkanı bulunmadığı için bazı giriş noktalarından pitot tüpü yardımı ile havanın hızı belirlenmiş ve katı partiküllerin kütlesel debileri pratik olarak bulunmuştur. Alınan bu değerler deney seti için oluşturulan modelde Bernolli ve Süreklilik denklemlerinde yazılarak teorik bir püskürtme hızı hesabı yapılmıştır.

Erozyon testlerinde aşındırma işlemleri genel olarak 30, 70, 110 m/s püskürtme hızlarında yapılmaktadır [35]. Bu sebeple teorik hesaplarda kompresörün kapasitesi de dikkate alınarak 30 m/s püskürtme hızı değerine ulaşılacak şekilde cihazın basınç ve debi ayarları yapılmıştır.



Şekil 5.3. Teorik hız hesabında kurulan model

Şekil 5.3'de verilen model için, (V: hız (m/s) , d: boru iç çapı (mm), P : basınç (kPa)

1 Noktasında	2 Noktasında	3 Noktasında
d_1 = 15 mm	d_2=5 mm	d_3 = 7 mm
P_1 = 200 kPa	P_2 = 200 kPa	P_3 = 101 kPa

değerleri tespit edilmiştir. Lokal, sürtünme ve geometriden kaynaklanan kayıplar ihmal edilirse, bu sistem için süreklilik denklemi:

$\dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 = \dot{Q}_3$ .....(1) dir.

$A_1V_1 + A_2V_2 = A_3V_3$..... (2) ve 2 ve 3 noktaları arasında bernolli denklemi uygulanırsa;

$P_2\text{-}P_3 = \frac{\rho}{2}\left(V_2^2 - V_3^2\right)$.....(3) denklemi elde edilir.

(2) denkleminden $V_2 = \frac{A_3V_3 - A_1V_1}{A_2}$ olarak çekilip (3) denkleminde yerine yazılırsa

$P_2\text{-}P_3 = \frac{\rho}{2}\left(\left(\frac{A_3V_3 - A_1V_1}{A_2}\right)^2 - V_3^2\right)$.....(4) denklemi bulunur.

(4) denkleminden V_3 değeri çekilirse,

$V_3 = \sqrt{\left(\frac{A_3V_3 - A_1V_1}{A_2}\right)^2 - \frac{2(P_2 - P_3)}{\rho}}$ .....(5) eşitliği elde edilir. Burada eşitliğin her iki tarafında V_3 değeri vardır. Excel programında girilen V_3 değerleri arasında enterpolasyon yapılarak en uygun V_3 değeri yani çıkış hızı hesaplanmıştır.

Bilinen değerler formülde yerine yazıldığında hız değerinin 30-31 m/s arasında olacağı tespit edilmiştir. Bu değerler arasında enterpolasyon yapılarak sıralandırılırsa en uygun hız değerinin 30,02 m/s olacağı görülmektedir.

V_3	$V_3 = \sqrt{\left(\frac{A_3V_3 - A_1V_1}{A_2}\right)^2 - \frac{2(P_2 - P_3)}{\rho}}$
30,7	31,35877
30,65	31,2607
30,6	31,16262
30,55	31,06455
30,5	30,96648
30,45	30,86841
30,4	30,77033
30,35	30,67226
30,3	30,57419
30,25	30,47611
30,2	30,37804
30,15	30,27996
30,1	30,18189
30,09	30,16227
30,08	30,14266
30,07	30,12304
30,06	30,10343
30,05	30,08381
30,04	30,0642
30,03	30,04458
→ 30,02	30,02497
30,01	30,00535
30	29,98573

V_1 değeri uygulamalı olarak alınan ölçümler ile kütlesel debiden 0,137 m/s olarak hesaplanmıştır. V_1 ve V_3 bilindiğine göre (2) denkleminde bilinen tüm değerler yerine yazılırsa V_2=29,85 m/s olarak hesaplanmış olur.

BÖLÜM 6

DENEYSEL ÇALIŞMA

6.1. GİRİŞ

Deneysel çalışma iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, AISI 1020, 3315 ve 1390 çeliklerinden hazırlanan numunelere sıvı ortamda borlama işlemi uygulanmış olup, ikinci aşamada, borlanan numuneler erozyon aşınmasına maruz bırakılmıştır. Her bir borlama işlemi için iki gurup deney numunesi hazırlanmıştır. Bu guruplardan biri metalografik incelemek için diğeri de eroziv aşındırma için kullanılmıştır.

Borlama işleminin çelik bünyelerinde meydana getirdiği yapısal değişim ve aşınma yüzeyleri, optik ve elektron mikroskobu ile incelenerek, mikrosertlik dağılımı tespit edilmiştir. Böylece borlama işleminin tesirleri ve erozyon aşınma mekanizmasına olan etkileri teknik olarak incelenmiştir. Bu bölümde, borlama işleminin yapılış şekli, değerlendirmede kullanılan metodlar ve borlanan çeliklerde rastlanan metalografik bulgulara değinilmektedir.

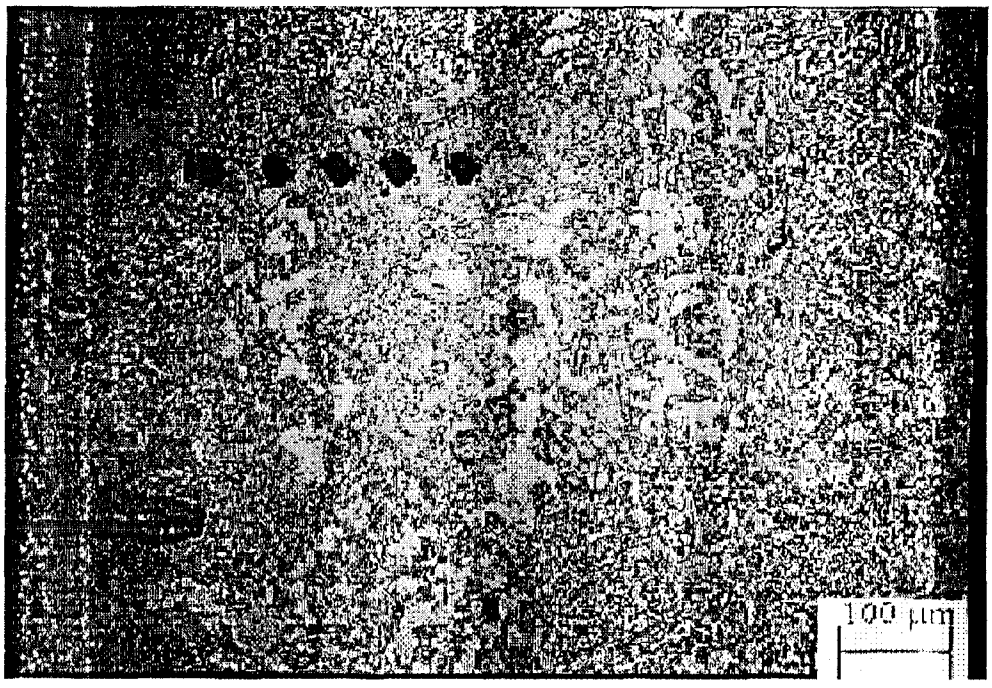
Borlanmış ikinci gurup numunelerin eroziv aşınmaya maruz bırakılma işlemlerine ve aşındırma süresince, numunelerde meydana gelen aşınma miktarının, püskürtülen toplam aşındırıcı partikül ağırlığına bölünerek hesaplanan erozyon oranı değerlerine göre çizilen grafikler ile birlikte aşınma yüzeylerinin incelenmesi için kullanılan tekniklerden yararlanılarak, borlanmış ve borlanmamış durumlarda AISI 1020, 3315 ve 1390 çeliklerinin eroziv aşınma davranışlarının değerlendirilmesine Bölüm 7'de detaylı şekilde değinilmektedir.

6.2. MALZEME SEÇİMİ

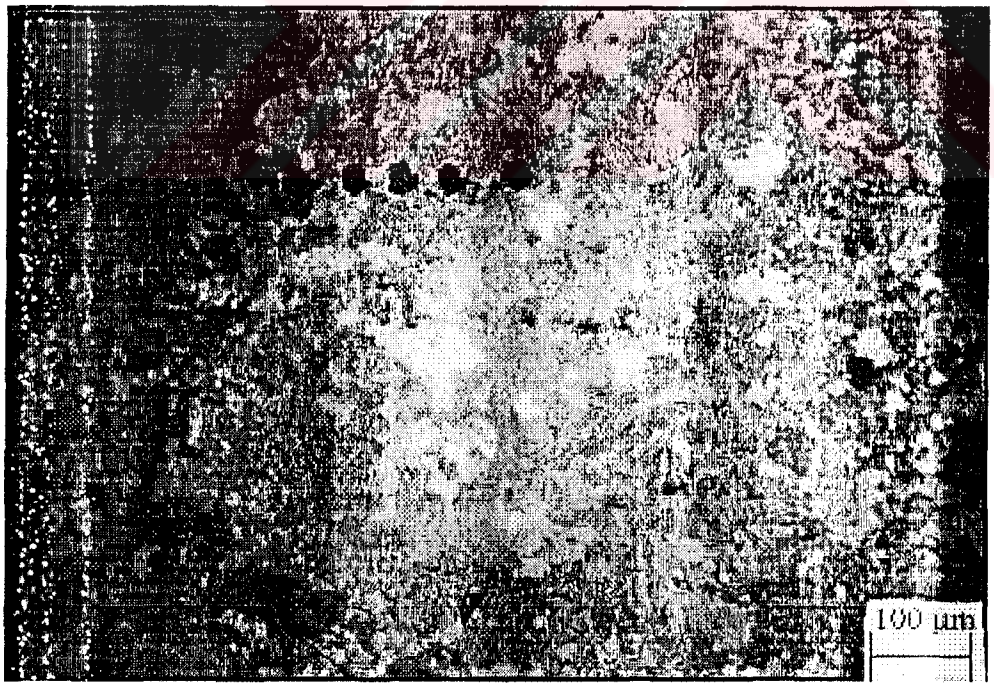
Bu çalışmada, borlanmış ve borlanmamış durumlarda eroziv aşınma davranışlarını karakterize edebilmek maksadı ile üç farklı çelik türü seçilmiştir. Bu çeliklerden AISI 1020, az karbonlu ve sünek, AISI 3315, az karbonlu ve az alaşımlı sünek, AISI 1390 çeliği ise, yüksek karbon ve manganlı gevrek davranış gösteren bir malzemedir. Tablo 6.1'de kimyasal analizi verilen AISI 1020 çeliği düşük karbonlu oluşu itibari ile yeterince sünek ve kolay şekil alabilen bir malzemedir. % 0,9 C içeren eğe ve takım yapımında kullanılan AISI 1390 çeliği, kırılgan bir çeliktir. Süneklik ve kırılganlık etkenlerinin yanında sünek bir çeliğin eroziv aşınma davranışına alaşım elemanlarının tesirlerini görebilmek için Tablo 6.2'de kimyasal analizi verilen AISI 3315 çeliği deneysel çalışmada üçüncü farklı çelik olarak tercih edilmiştir. Seçilen bu çeliklerin metalografik işlemlerinden sonra Janevert marka metal mikroskobunda çekilen mikroyapı görüntüleri ve 40 g yük altında alınmış mikrosertlik izleri Şekil 6.1-3'de görülmektedir.



Şekil 6.1. Borlanmamış AISI 1020 çeliğinin mikroyapı
ve mikrosertlik izleri görüntüsü



Şekil 6.2. Borlanmamış AISI 3315 çeliğinin mikroyapı ve mikrosertlik izleri görüntüsü



Şekil 6.3. Borlanmamış AISI 1390 çeliğinin mikroyapı ve mikrosertlik izleri görüntüsü

Tablo 6.1. AISI 1020 Çeliğinin Kimyasal Analizi [64].

C %	Mn %	Si %	P %	S %
0,15 0,24	0,30 0,60	0,10 0,30	0,040 ençok	0,050 ençok

Tablo 6.2. AISI 3315 Çeliğinin Kimyasal Analizi [64].

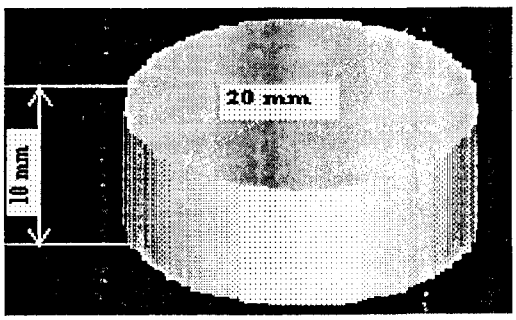
C %	Mn %	Si %	P %	S %	Cr %	Ni %
0,10 0,17	0,50 0,90	0,15 0,35	0,040 ençok	0,040 ençok	0,55 0,95	3,25 3,75

Tablo 6.3. AISI 1390 Çeliğinin Kimyasal Analizi [64].

C %	Mn %	Si %	P %	S %
0,35 0,94	1,60 1,90	0,15 0,35	0,040 ençok	0,040 ençok

6.3. NUMUNE HAZIRLAMA

Şekil 6.4'de deneysel çalışmada kullanılan numunelerin şekli ve boyutları verilmiştir. Standart olarak 20 mm çapında üretilen çelik mamüller öncelikle kendi çelik sınıfları için önerilen sıcaklıklarda kül fırınında normalize tavına tabi tutularak havada soğumaya bırakılmıştır. Normalize etme işlemi, AISI 1020 çeliği için 880 ^{0}C; AISI 3315 için, 850 ^{0}C ve AISI 1390 için, 800 ^{0}C'de gerçekleştirilmiştir. Tavlama sonrası çelik mamuller torna tezgahında 10 mm kalınlığında kesilerek mekanik olarak hazırlandıktan sonra numune yüzeyleri, su zımparasında 240, 400 ve 600 numara SiC tanecikli diskler vasıtasıyla 600 dev/dak dönüş hızında zımparalanmak suretiyle borlama işlemine hazır hale getirilmiştir.



Şekil 6.4. Deneysel çalışmada kullanılan numunenin şekli ve boyutları

6.4. SIVI ORTAMDA BORLAMA İŞLEMİ

6.4.1. Borlama Ortamının Hazırlanması

Sıvı ortamda numunelerin borlanması işleminde kullanılan borlama kaynakları ve bu maddelerin borlama öncesi hazırlanış şekli, [3] numaralı literatürde yapılan deneysel çalışmada verildiği tarzda hazırlanmıştır.

Borlama banyosu, ağırlık itibariyle % 66 Susuz boraks, % 14 Kalsine borik asit ve % 20 ferro-silisyumdan ibarettir. Etibank'ın Bandırma Bor ve Asit Fabrikaları'ndan temin edilen ticari saflıktaki Boraksdekahidrat'ın ($Na_2B_4O_7.10\ H_20$) kül fırınında 300 °C'de 1 saat beklemeye müteakip 600 °C'de 3 saat tutulması ve bu suretle kristal suyunun uçurulması ile elde edilmiştir. İşlem sırasında kül fırını kapak kenarlarında damlacık yoğunlaşmaları gözlemlenmiştir. Oda sıcaklığında stabil olan boraks, kuru ortamda sürekli su kaybeder ve matlaşır. Boraksın ısıtılması sonucu su kaybı aşağıdaki şekilde olmaktadır [3].

$$Na_2B_4O_7.10H_2O \xrightarrow{62\ ^\circ C} 5H_2O \xrightarrow{130\ ^\circ C} 3H_2O \xrightarrow{150\ ^\circ C} H_2O \xrightarrow{180\ ^\circ C} H_20 \xrightarrow{318\ ^\circ C} Na_2B_4O_7\ (toz)$$

Boraksın ergime noktası 741 °C'dir. Kimyasal formülü $Na_2B_4O_7.10H_2O$ olan boraks teorik olarak % 36,52 B_2O_3, % 16.25 Na_2O ve % 47,23 H_20 ihtiva etmektedir. Yoğunluğu 1,73 g/cm^3'tür.

İkinci bor verici kaynak olarak Etibank Bandırma Bor ve Asit Fabrikaları'ndan temin edilen toz borik asit (Asitborik [71]) kalsine edilerek kullanılmıştır. Borik asit teorik olarak % 56,3 B_2O_3 ihtiva etmektedir. Yoğunluğu 1,51 g/cm^3 'tür [3]. Toz borik asit 110 °C'de 3 saat kül fırınında bekletilerek 400 °C'ye kadar ağır ağır ısıtılarak elde edilmiştir. Başlangıçta pudra görünümünde olan madde işlem sırasında önce strafor görünümünde sert bir hal alnıış, 400 °C'ye ısıtılma esnasında sıvı kıvama geçerek büyük hava kabarcıkları şeklinde kabın dışına doğru taşma eğilimi göstermiştir. Kalsine etme işleminin ardından havada soğumaya bırakılan madde sertleşerek kirli sarı renkte cam kadar keskin bir hal almıştır. Kap içinden çıkartılan kalsine borik asit dövülerek daha sonra 100 μm elek altında elenmiş ve borlama ortamına katılmak üzere depolanmıştır.

Borlama banyosuna katılan üçüncü madde ise, Kaydöksan Döküm Fabrikası'ndan temin edilen 100 mesh elek altı tane boyutunda olacak şekilde elenerek hazırlanan ferro-

silisyum'dur. Ticari saflıkta olan bu maddenin kimyasal bileşimi: % 70 Si, % 0,1 C, % 1 Al, % 0,05 P, % 0,04 S olup geri kalan kısım Fe 'den ibarettir [3].

6.4.2. Sıvı Borlama İşleminin Yapılışı

Borlama işlemi ± 5 °C hassasiyete sahip 1200 °C ısıtma kapasiteli kül fırınında grafit pota içerisinde yapılmıştır. Yukarıda hazırlanış şekilleri verilen borlama maddeleri ± 0.1 hassasiyetinde tartılarak, ağırlıkça % 66 Boraks, % 14 Kalsine Borik Asit ve % 20 Ferro-Silisyum bileşimde hazırlanmıştır. Boraks ve Kalsine borik asit, verilen yüzde oranlarında homojen bir şekilde karıştırılarak potanın ağız seviyesine kadar doldurulmasından sonra işlem sıcaklığına önceden getirilen kül fırınına yerleştirilerek karışım sıvı hale gelene kadar beklenmiş ve ergimiş banyoya son olarak ferro-silisyum ilave edilerek krom-nikelli bir tel ile homojenlik elde edilene kadar karıştırılmıştır. Borlama işlemi, sabit 7 saat'lik borlama süresi için 950 °C, 1000 °C ve 1100 °C sıcaklıklarda; sabit 950 °C borlama sıcaklığı için 1, 3, 5, 7, ve 9 saat farklı borlama sürelerinde uygulanmıştır. Numuneler sıvı eriyik içine daldırmak suretiyle borlanmıştır. Borlama işlemi sonunda numuneler paslanmaz çelik bir maşa vasıtasıyla potadan çıkartılarak oda sıcaklığında soğumaya terk edilmiştir.

6.4.3. Borlanmış Parçaların Temizlenmesi

Sıvı ortamda borlama işlemi sonunda hemen potadan çıkartılan numunelerin yüzeylerinin, viskozitesi yüksek, bal kıvamında sıvı eriyik ile kaplı halde olduğu gözlenmiştir. Numunelerin çıkarılmasından az bir süre sonra numuneyi saran bu tabaka katılaşarak parlak, siyah renkte, camsı bir hal almıştır. Bu tabakanın büyük bir kısmı soğuma sırasında çatlayarak numuneden ayrılmıştır. Kalan diğer kalıntılar ise önce hafifçe çekiçlenerek, daha sonra Bosch marka parça yüzeyi temizleme fırfırı ile kaldırılmıştır.

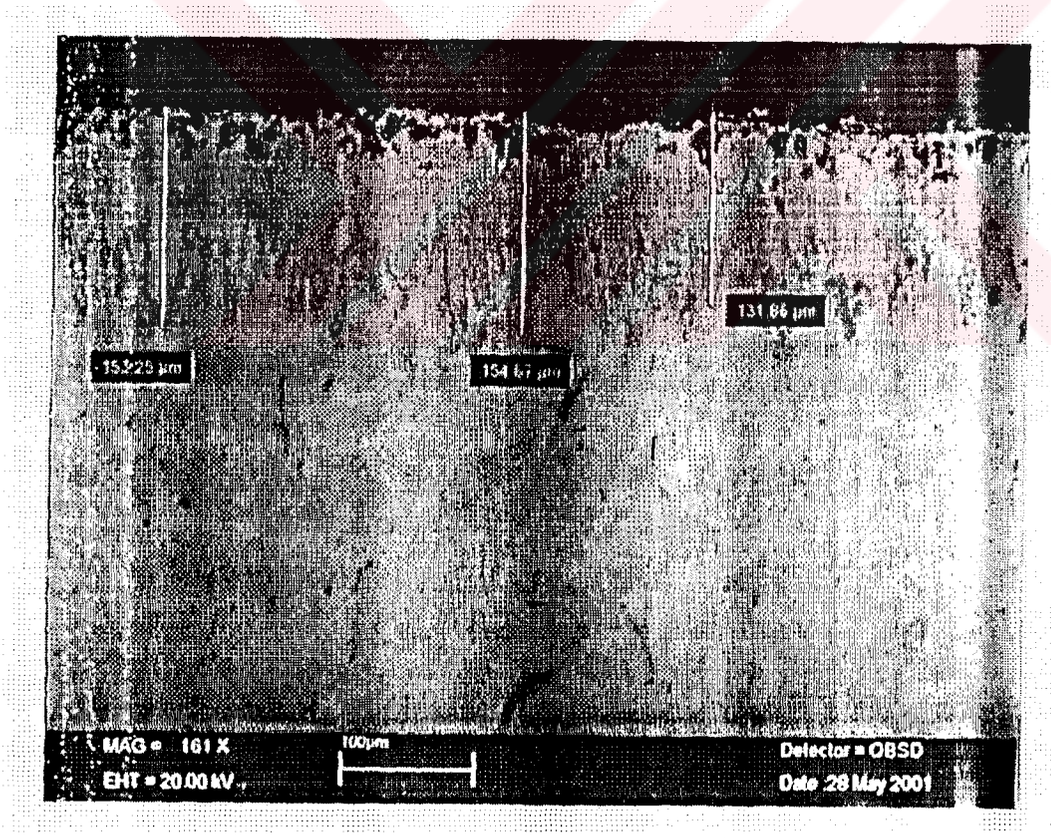
6.5. METALOGRAFİK İNCELEME

Borlanmış parçalardan metalografik inceleme için ayrılan kısmı metal kesme cihazında merkezlerinden ikiye kesilerek, kesit yüzeyleri su zımparasında 240, 320, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 numara zımparalar ile 600 d/d devir hızında zımparalanmış ve son aşamada kadife çuha üzerinde alümüna pasta ile 250 d/d devir hızında parlatılmıştır. Parlatılan yüzeyler saf alkol ile yıkanarak sıcak hava akımında kurutulmuştur.

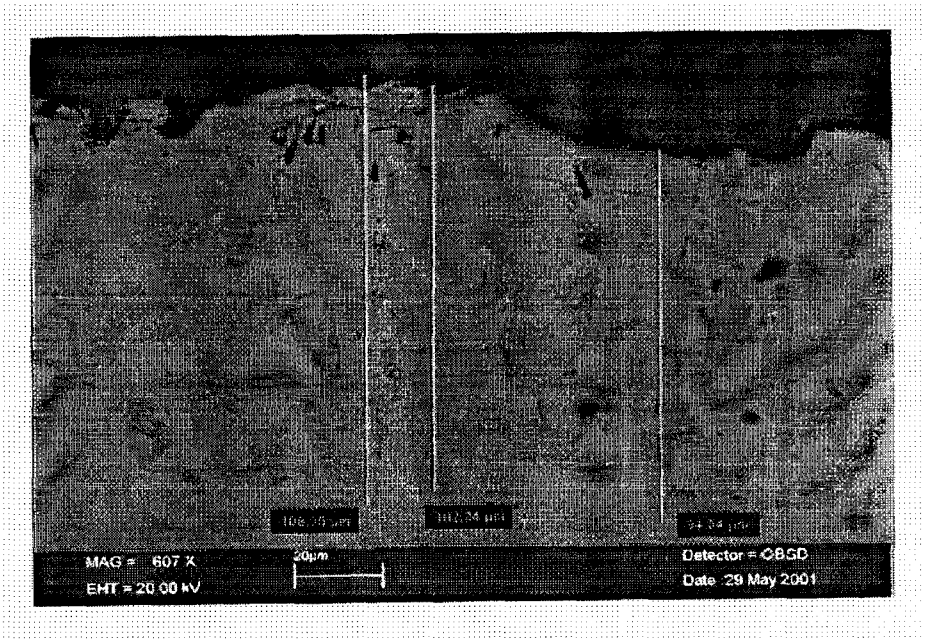
Parlatma işlemlerinden sonra numunelerin kesit yüzeyleri % 2' lik Nital ile dağlanmıştır. Dağlama işleminde çelik yapısının fazla yanmasına engel olmak için ayrı tür borlanmış çelikler için ayrı dağlama süreleri belirlenmiştir. Buna göre AISI 1020 çelik numuneler 10 s, AISI 3315 numuneler 8 s ve AISI 1390 numuneler ise 4 s sürelerinde dağlanmıştır.

6.6. BOR TABAKASININ KALINLIK ÖLÇÜMÜ

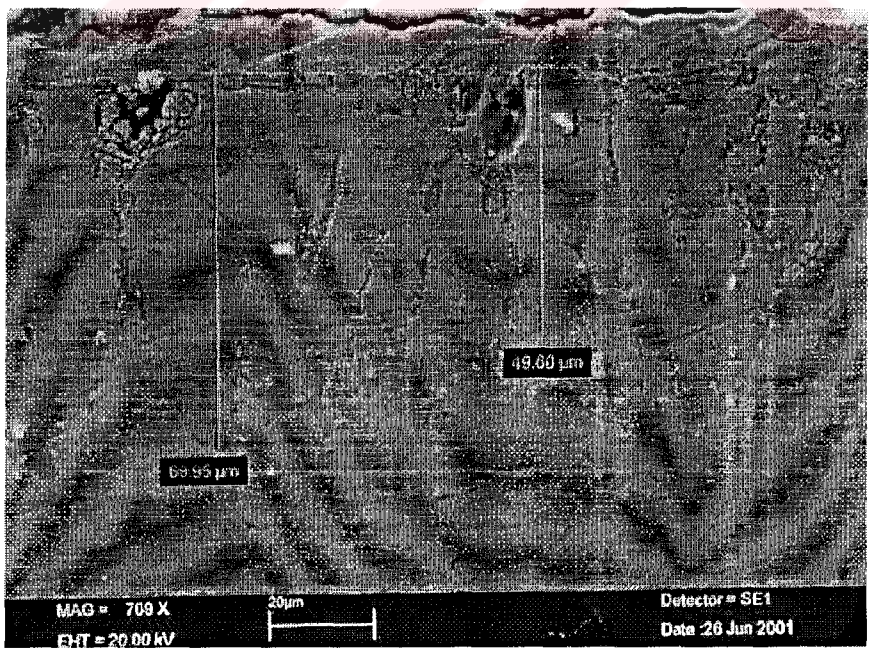
Çelik yüzeylerinde oluşan bor tabakası kalınlık miktarlarının ölçümleri Leo 440 marka elektron mikroskobunda gerçekleştirilmiştir. Yüzey boyunca rastlanan en derin on adet bor dişinin uzunlukları cihaz yardımı ile tespit edildikten sonra, bu ölçümlerin aritmetik ortalaması alınması ile tabaka kalınlıkları bulunmuştur. Şekil 6.5-8'de tabaka kalınlık ölçüm görüntüleri verilmiştir.



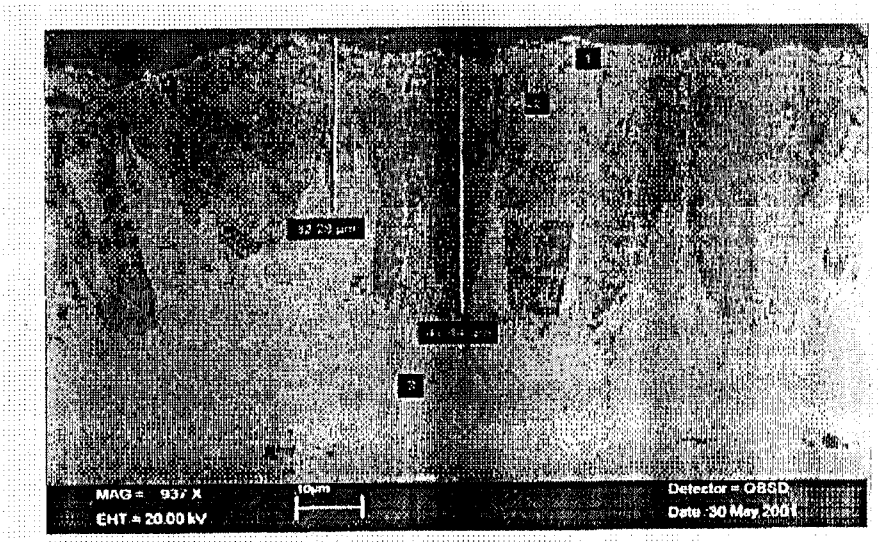
Şekil 6.5. 950 °C'de 7 saat borlanmış AISI 1020 çeliğinde oluşan bor tabakasının kalınlığının SEM ile ölçümü



Şekil 6.6. 950 °C'de 7 saat borlanan AISI 3315 çeliğinde oluşan bor tabakası kalınlığının SEM ile ölçümü



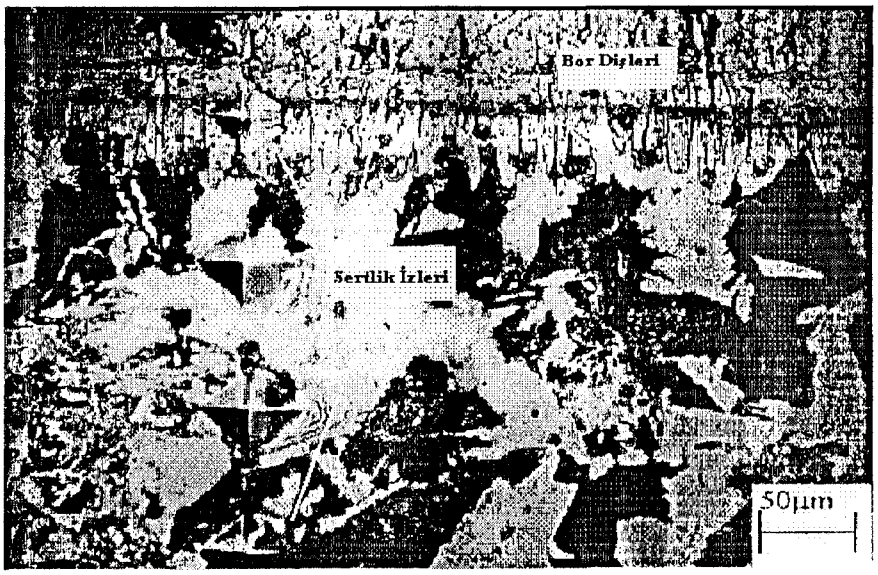
Şekil 6.7. 950 °C'de 5 saat borlanmış AISI 1390 çeliğinde oluşan bor tabakası kalınlığının SEM ile ölçümü



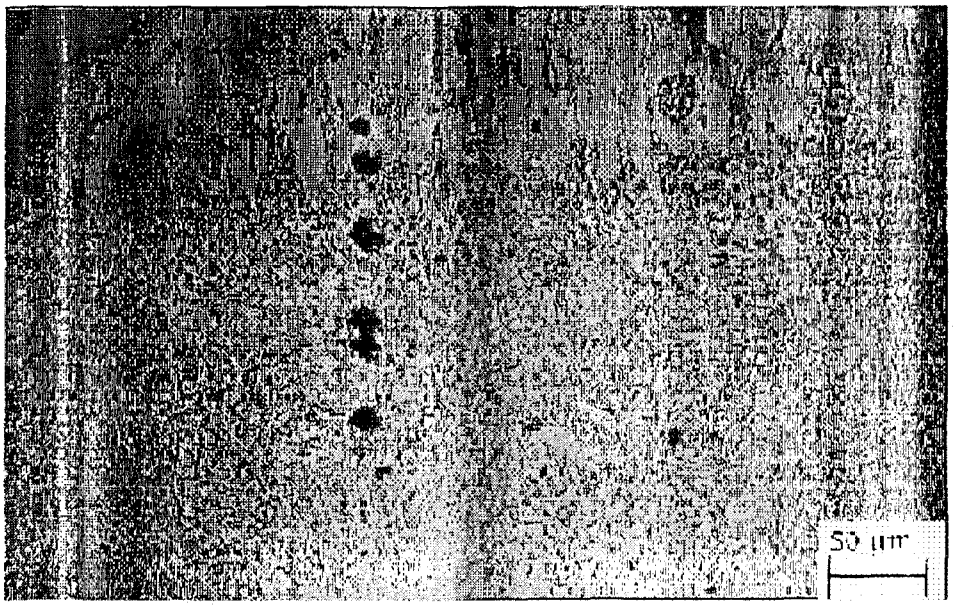
Şekil 6.8. 950 °C'de 3 saat borlanmış AISI 1390 çeliğinde oluşan bor tabakasının SEM ile tabaka kalınlığının ölçümü

6.7. MİKROSERTLİK ÖLÇÜMLERİ

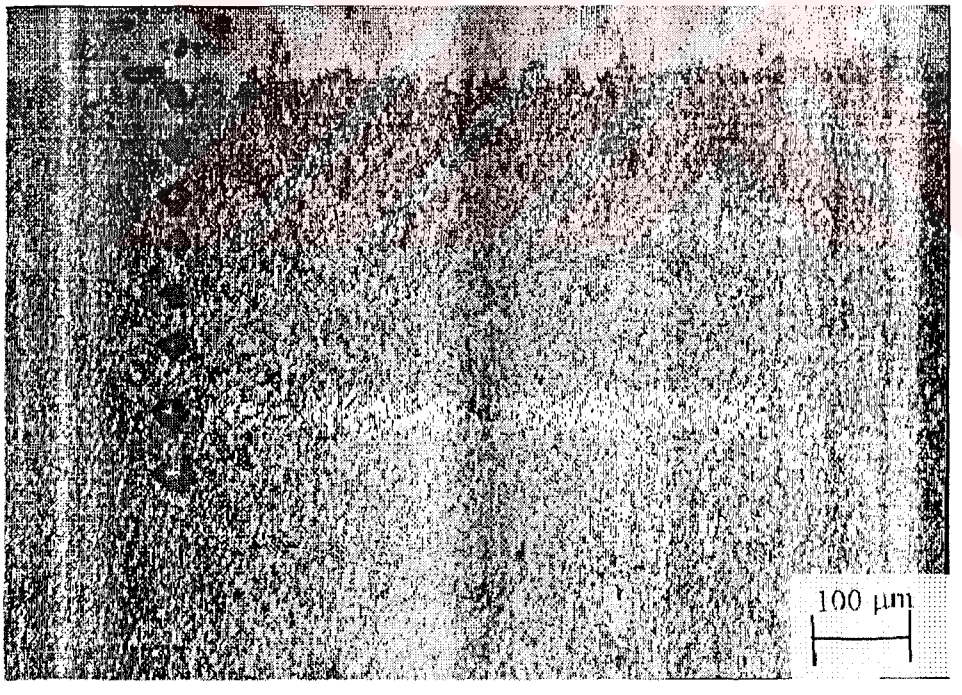
Borlanan numunelerin içyapılarının mikrosertlik ölçümleri, Janevert marka metal mikroskobuna monte edilebilen mhp 160 model mikrosertlik test aparatı kullanılarak ölçülmüştür. Sertlik ölçümleri içyapının ana metal kısmından itibaren difüzyon bölgesi ve bor tabakası üzerinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.9. Mikroyapı üzerinde oluşan sertlik izlerinin görünümü (AISI 1020 950 ^{0}C'de 7 saat borlanmış)



Şekil 6.10 . Mikroyapı üzerinde oluşan sertlik izlerinin görünümü
(AISI 3315 950 ^{0}C'de 7 saat borlanmış)

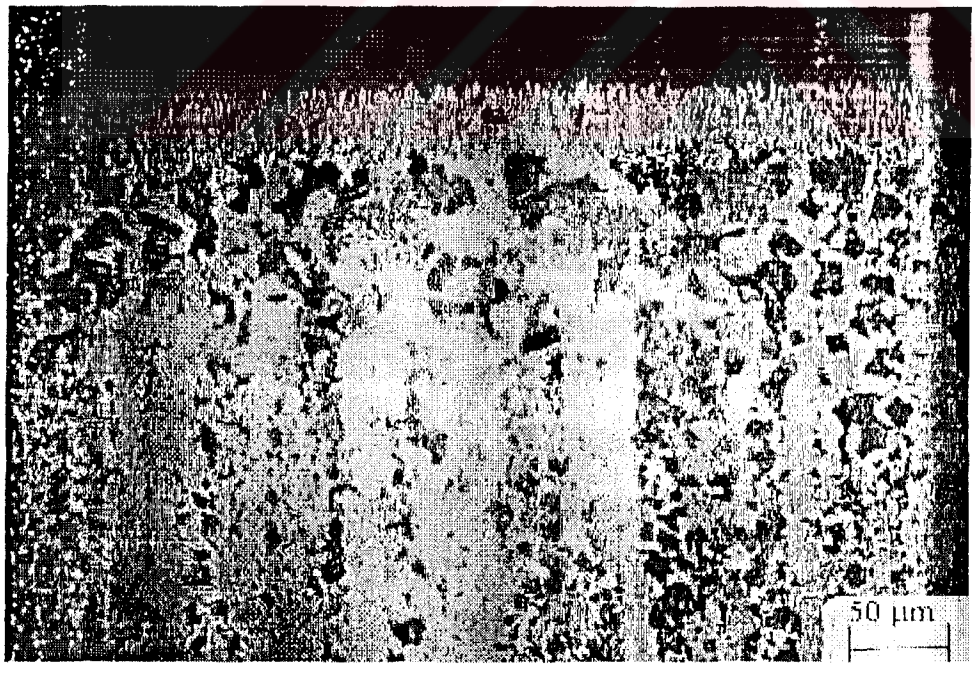


Şekil 6.11. Mikroyapı üzerinde oluşan sertlik izleri
(AISI 1390, 950 ^{0}C'de 7 saat borlanmış)

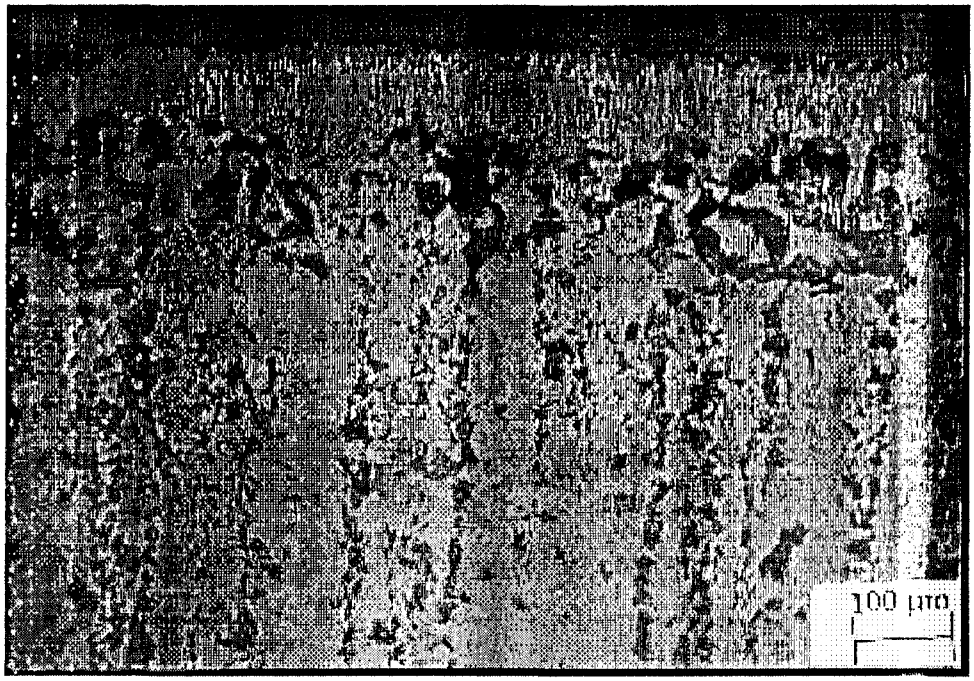
6.8. METALOGRAFİK BULGULAR

6.8.1. Borlanmış AISI 1020 Çeliğinin Mikroyapısı

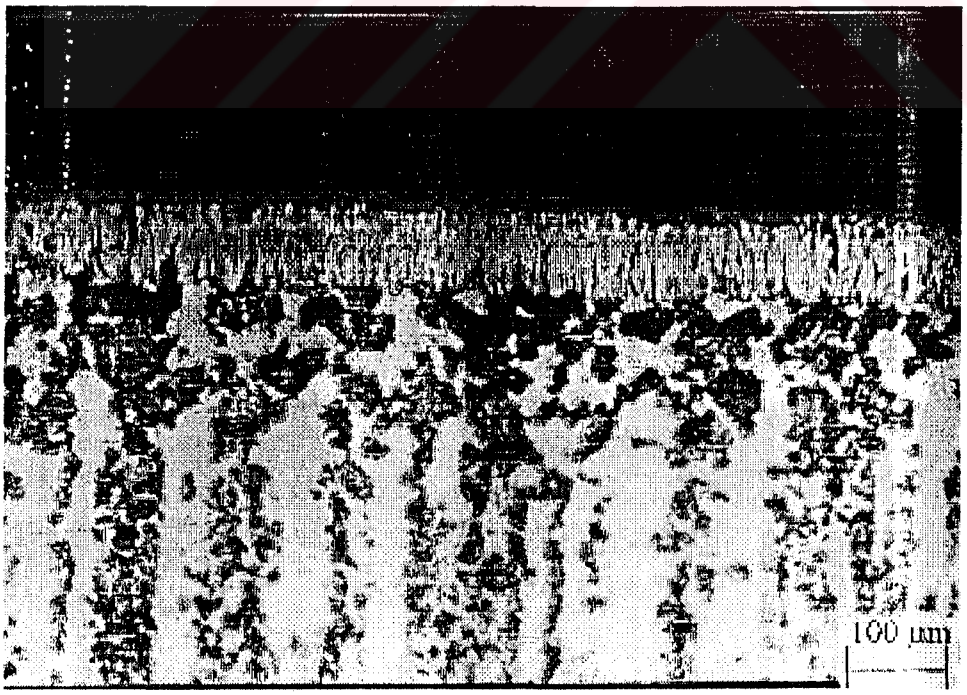
Borlanan numunelerin tabakadan çekirdek bölgesine kadar uzanan alan üzerinde yapılan metalografik incelemelerde, sade karbonlu bir çelik olan ve az miktarda C içeren (% 0.2) AISI 1020 çeliğinin ferrit ve perlit tanelerinden teşekkül olan mikroyapısında tane sınırları belirgin bir şekilde görülmektedir. Farklı sıcaklık ve sürelerde borlama işlemleri gerçekleştirilen bütün numunelerde borür tabakalarının oluştuğu ve oluşan bor tabakalarının derin ve sık yapıda bor dişlerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu dişler ferrit ve perlit taneleri içlerine kadar uzanarak tabakanın ana metal ile yüzey temas alanını oldukça arttırmaktadır. Tüm borlama şartları altında borlanan numunelerde genel olarak borlanmış malzemelerde, bor tabakasının altında oluşabilen belirgin bir geçiş bölgesine rastlanmamıştır. Ancak dişlerin bittiği yerden itibaren ana metale kadar uzanan kısımda tane irileşmesi olduğu gözlenmiştir. Şekil 6.12-16'da 950 °C sabit sıcaklıkta 1-9 saat borlanan; Şekil 6.17 ve 6.18'de, 7 saat borlama süresinde 1000 ve 1100 °C'de borlanan çeliklerinin mikrofilmleri görülmektedir.



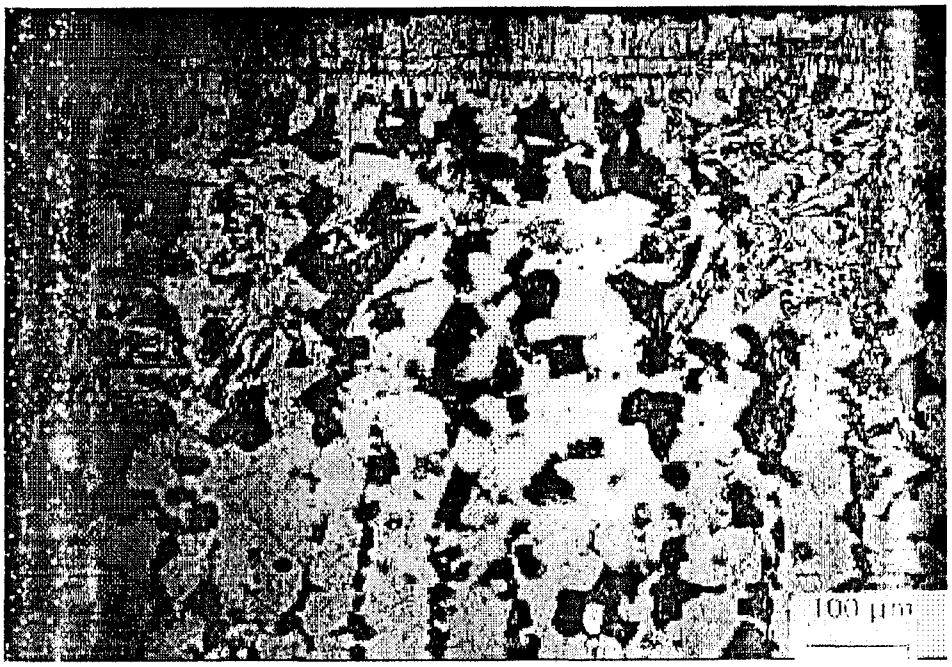
Şekil 6.12. 950 °C'de 1 Saat borlanmış AISI 1020 çeliğinin mikrofilmi



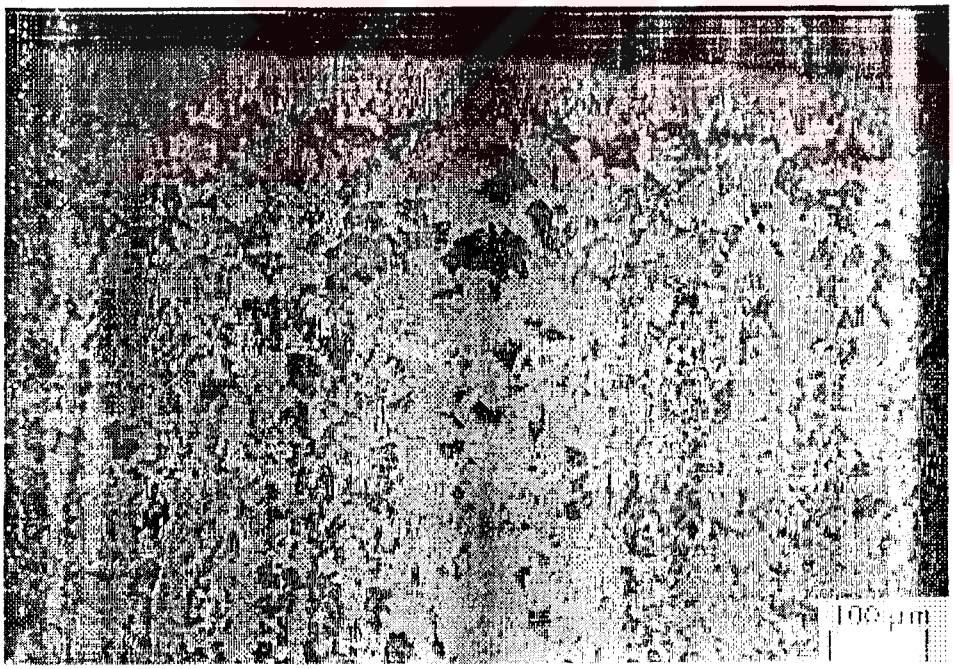
Şekil 6.13. 950 °C'de 3 Saat borlanmış AISI 1020 çeliğinin mikrofilmi



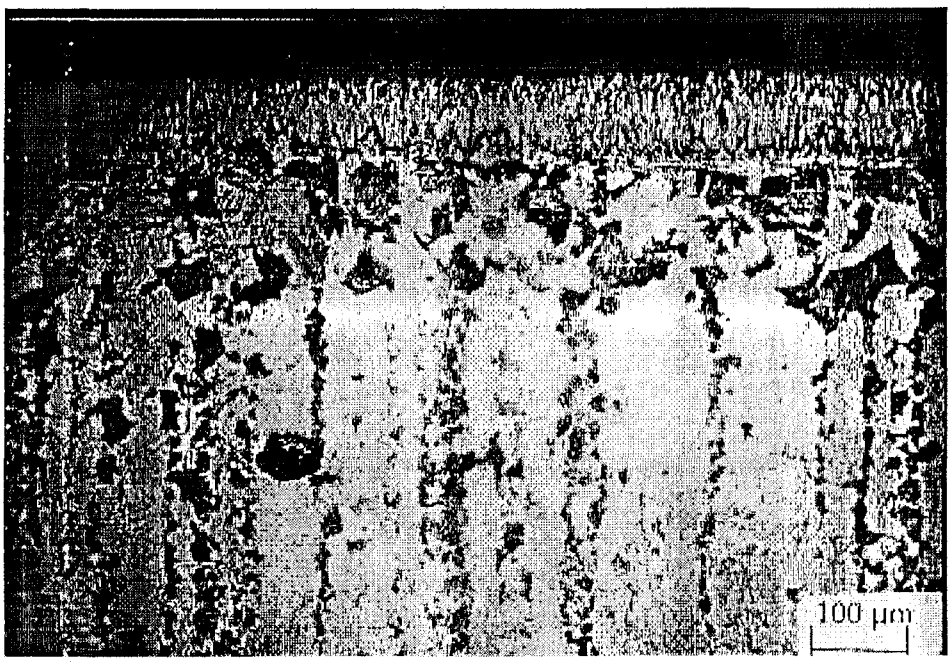
Şekil 6.14. 950 °C'de 5 Saat borlanmış AISI 1020 çeliğinin mikrofilmi



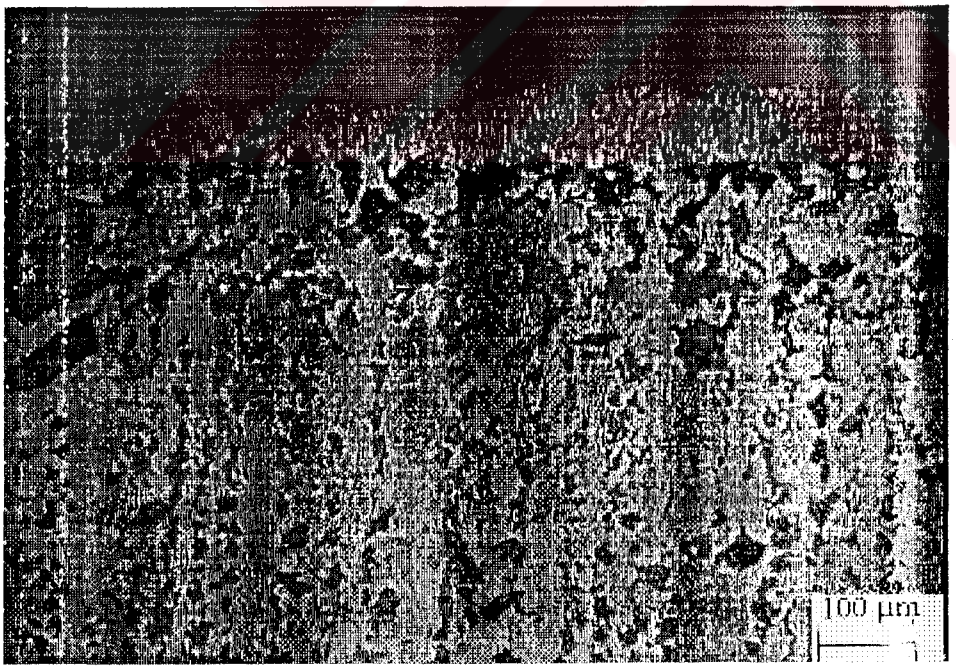
Şekil 6.15. 950 °C'de 7 Saat borlanmış AISI 1020 çeliğinin mikrofilmi



Şekil 6.16. 950 °C'de 9 Saat borlanmış AISI 1020 çeliğinin mikrofilmi



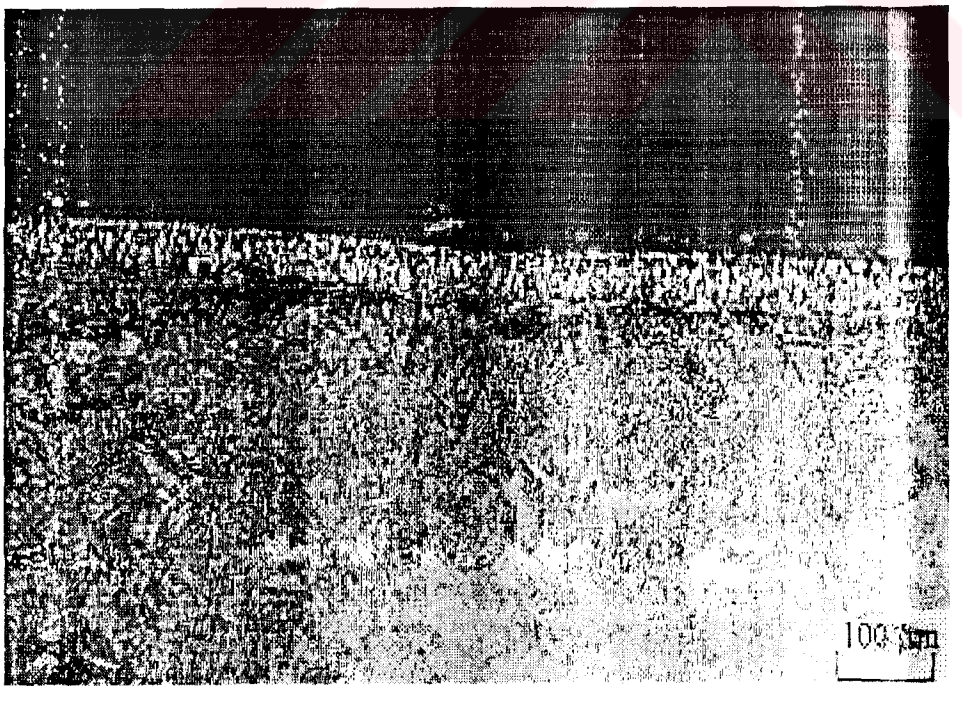
Şekil 6.17. 1000 °C'de 7 Saat borlanmış AISI 1020 çeliğinin mikrofilmi



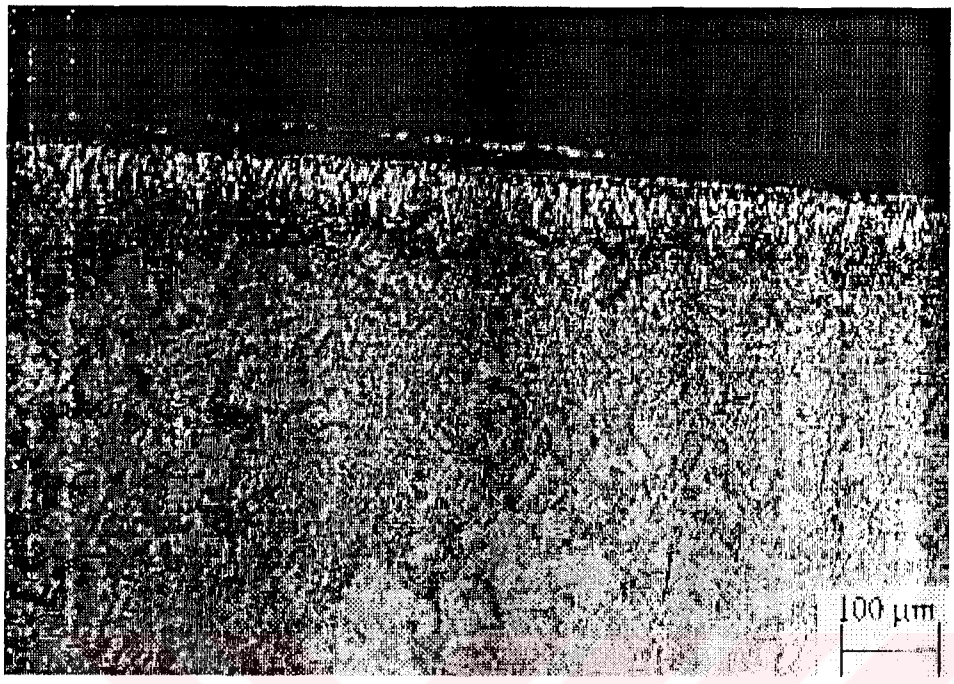
Şekil 6.18. 1100 °C'de 7 Saat borlanmış AISI 1020 çeliğinin mikrofilmi

6.8.2. Borlanmış AISI 3315 Çeliğinin Mikroyapısı

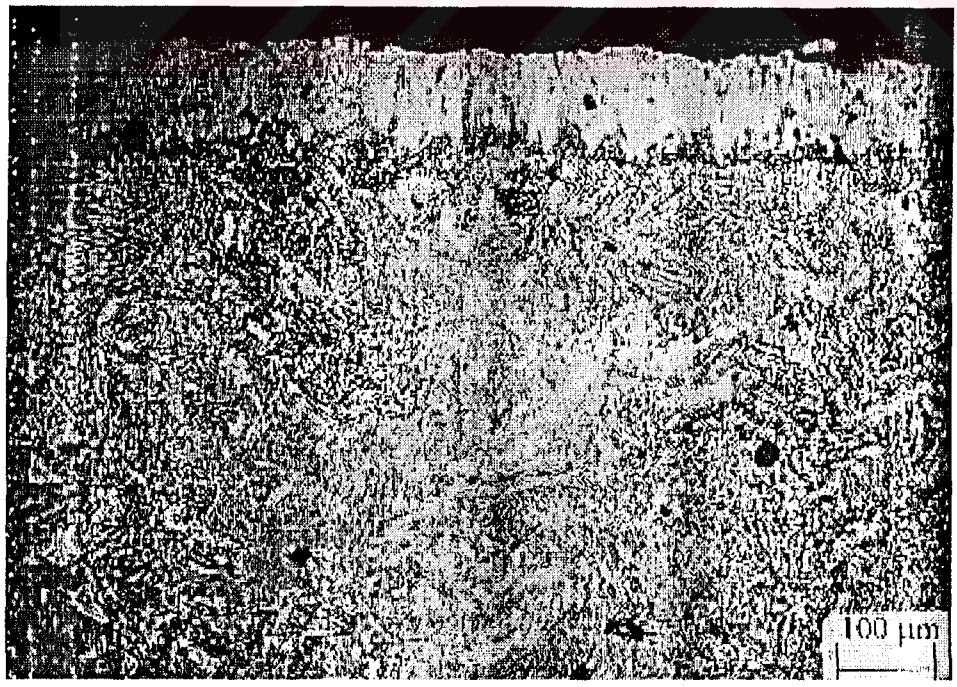
AISI 3315 çeliklerinde borlama işlemi öncesi metalografik yapıda rastlanan asiküler (iğnesel) ferrit yapısının borlama sonrası çelik yüzeylerinde oluşan bor tabakasının altında da yoğun bir şekilde hakim olduğu görülmektedir. Bu tür çeliklerde seçilen tüm borlama şartları altında gerçekleştirilen borlama işlemleri sonucunda farklı kalınlıklarda borür tabakalarının oluştuğu gözlenmiştir. Ayrıca bor dişlerinin aralarının oldukça seyrek oluşu ve yer yer birbirinden kopuk parçalar şeklinde olmalarından ötürü tabaka-ana metal arasında kuvvetli bir bağlantının oluştuğu söylenemez. Tabaka morfolojik yapısı, seçilen borlama parametreleri altında benzerlik göstermek ile beraber bazı farklılıklarda göze çarpmaktadır. Örneğin, 950 °C'de 1, 3 ve 9 saat sürelerde borlanan çeliklerde gözeneksiz ve bor dişlerinin araları seyrek olan bir tabaka görüntüsü sergilenmektedir (Şekil 6.19, 6.20 ve 6.23). Yine 7 saat sürede 1000 ve 1100 °C'de borlanan numunelerdeki yapı anlatılan tarzdadır (Şekil 6.24-25). Ancak, 950 °C'de 5 ve 7 saat borlama sürelerinde borlanan numunelerde oluşan bor tabakası dişleri birbirlerine daha yakın formda oluştuklarından diğer şartlarda oluşan tabaka tiplerine göre farklılık arz etmektedir. (Şekil 6.21-22)



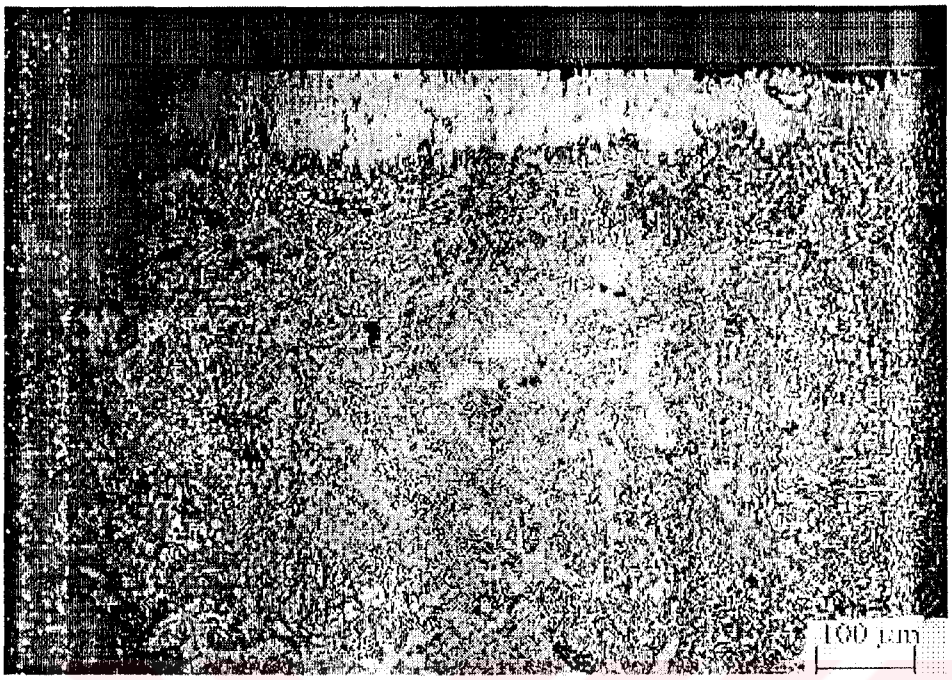
Şekil 6.19. 950 °C'de 1 Saat borlanmış AISI 3315 çeliğinin mikrofilmi



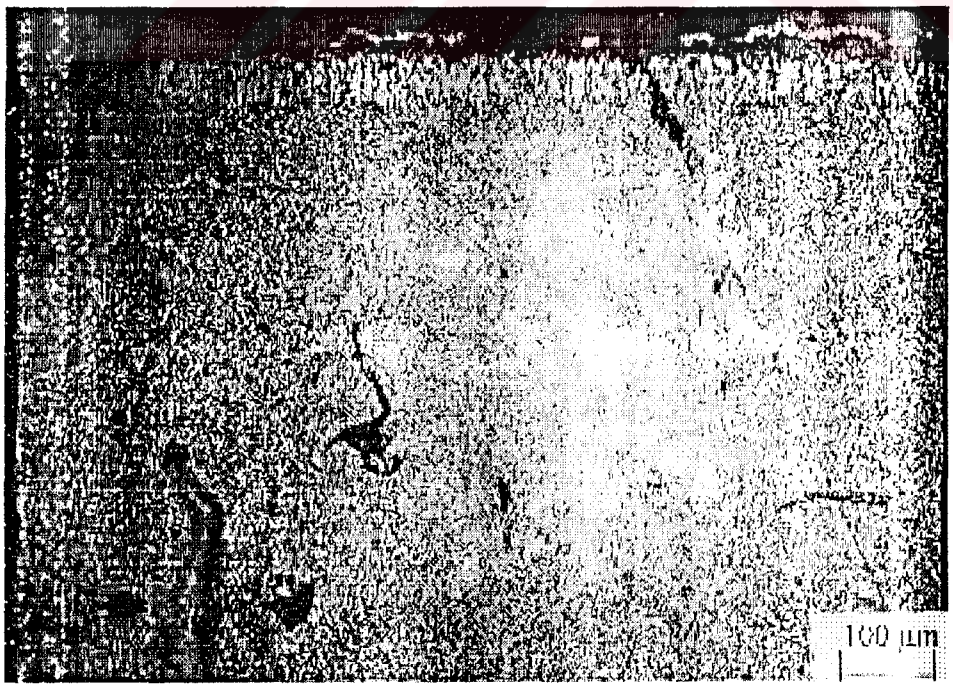
Şekil 6.20. 950 °C'de 3 Saat borlanmış AISI 3315 çeliğinin mikrofilmi



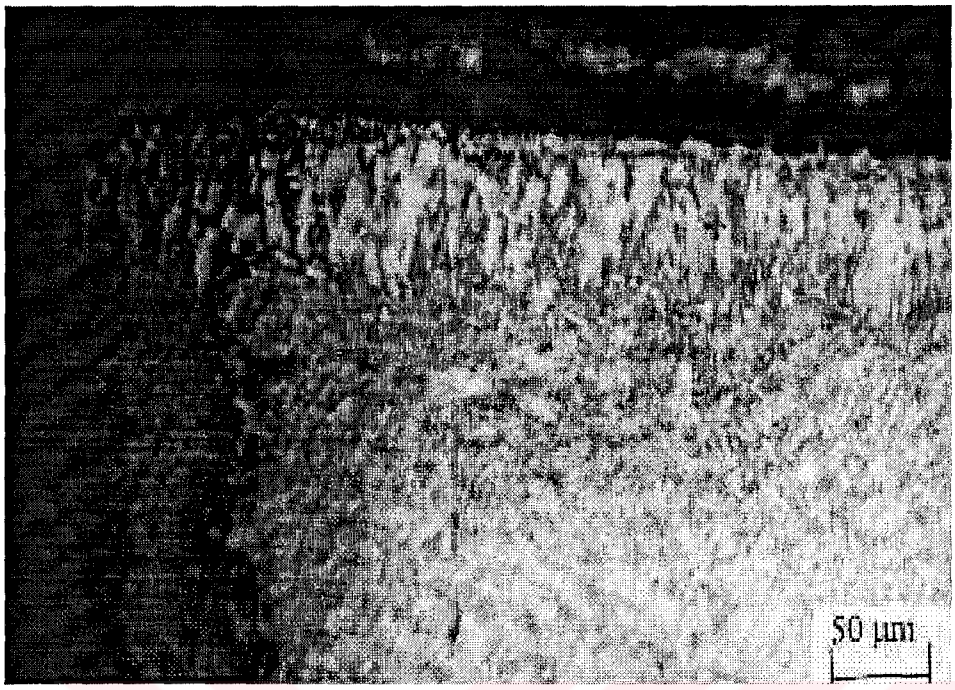
Şekil 6.21. 950 °C'de 5 Saat borlanmış AISI 3315 çeliğinin mikrofilmi



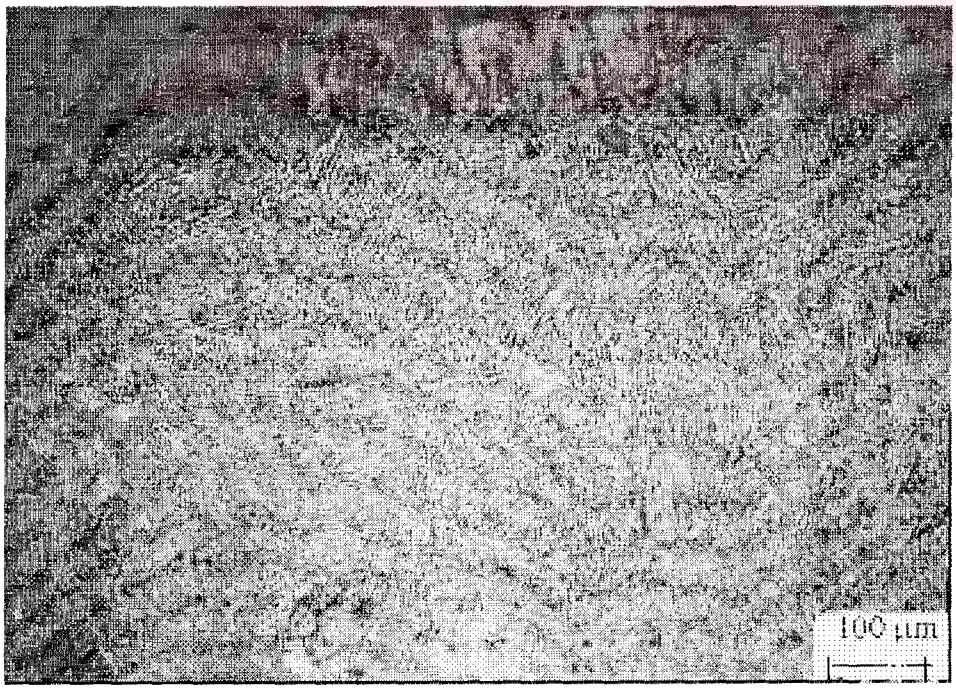
Şekil 6.22. 950 °C'de 7 Saat borlanmış AISI 3315 çeliğinin mikrofilmi



Şekil 6.23. 950 °C'de 9 Saat borlanmış AISI 3315 çeliğinin mikrofilmi



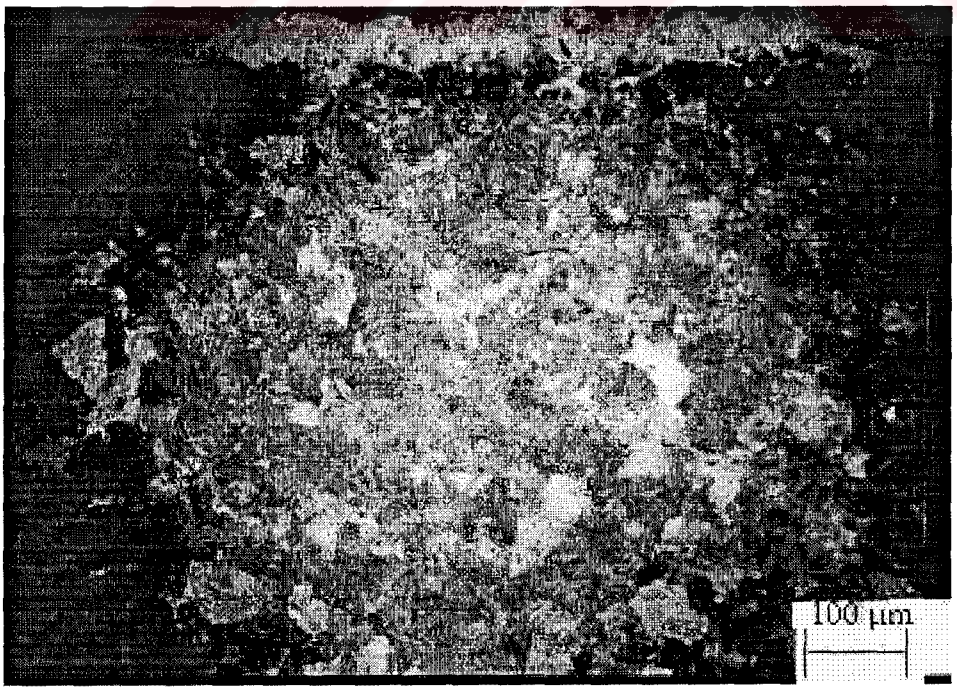
Şekil 6.24. 1000 °C'de 7 Saat borlanmış AISI 3315 çeliğinin mikrofilmi



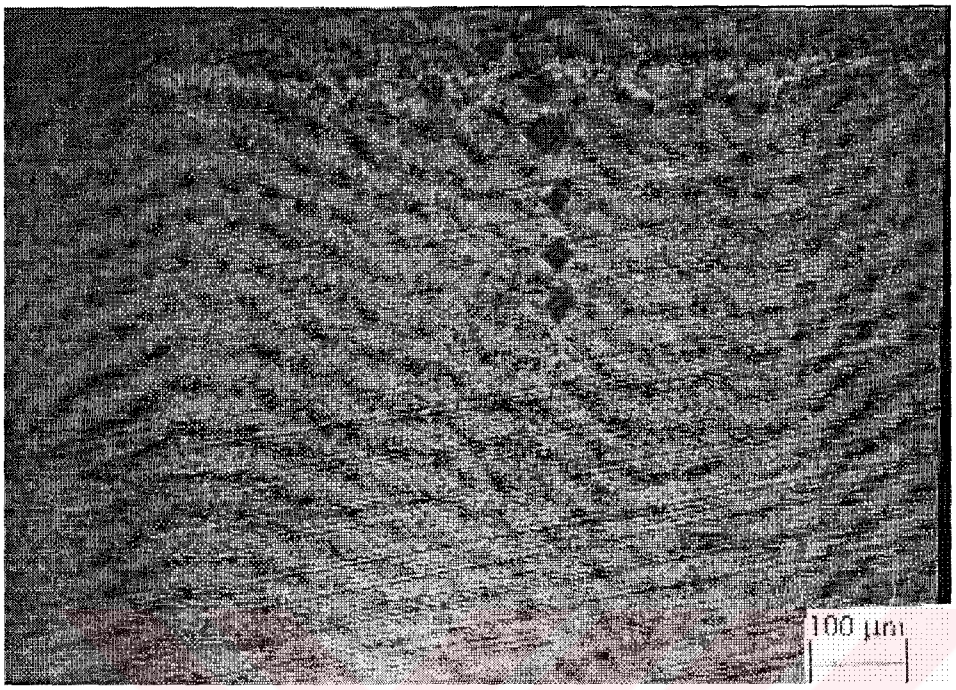
Şekil 6.25. 1100 °C'de 7 Saat borlanmış AISI 3315 çeliğinin mikrofilmi

6.8.3. Borlanmış AISI 1390 Çeliğinin Mikroyapısı

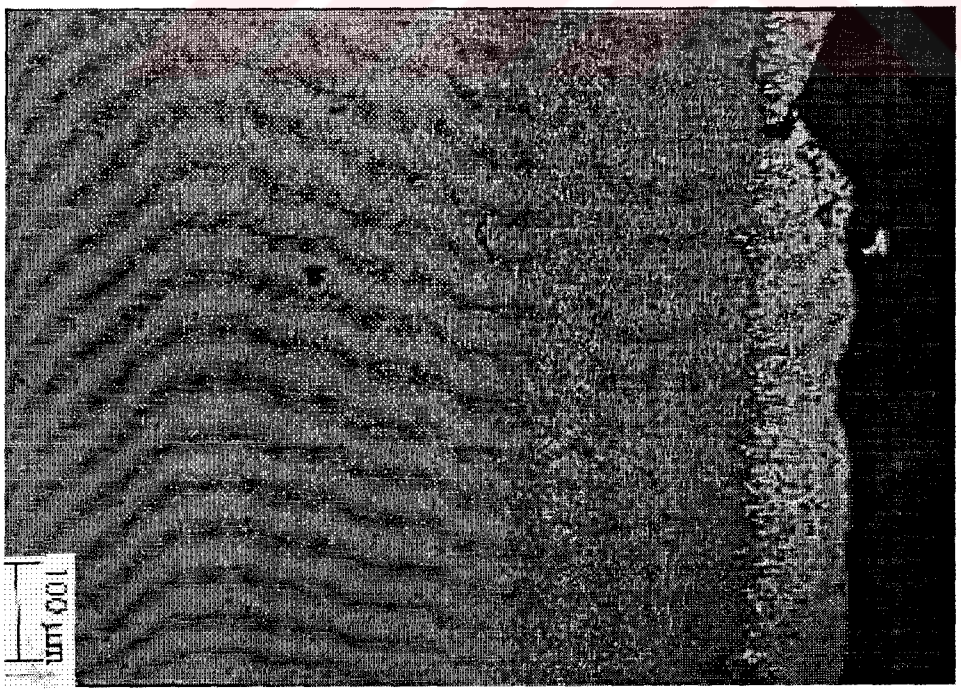
AISI 1390 çeliklerinden hazırlanan numunelerin borlanması sonucu diğer çelik numunelerde olduğu gibi yüzey boyunca borür tabakalarının oluştuğu gözlenmiştir. AISI 1020 ve 3315 borlanmış çeliklerinde rastlanan dişlenme derecesi yüksek tabaka yapısı, AISI 1390 çeliği için gözlenmemiştir. Oluşan bor tabakası gözeneksiz, dişlenme derecesi düşük ve çoğu durumda bir katmanı andırmaktadır. 950 °C'de 3 saat ve 1000 °C'de 7 saat süre ile borlanan numunelerde dişlerin hemen altında beyaz renkte tane sınırlarını belirgin hale getiren ferritik yapıların oluştuğu gözlenmiştir. Başlangıçta farklı bir borür fazı olduğu düşünülmüş ancak bu bölgenin sertlik ölçümleri neticesinde ana metalde elde edilen sertlik değerine benzer olmasından dolayı ferritik yapılar olduğu sonucuna varılmıştır (Şekil 6.27 ve 6.31). AISI 1020 ve 3315 çeliklerinin borlanması sonucu görülmeyen difüzyon bölgesi 5 saat 950 °C'de borlama şartlarında tespit edilmiştir (Şekil 6.28). Bu durumun, AISI 1390 çeliğinin yüksek karbonlu ve alaşımlı çelik olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Yüksek karbonlu ve alaşımlı çeliklerde tabakanın ana metal ile bağlantısı bir geçiş bölgesi üzerinden gerçekleşir [11]. Çeliğin ana metal kısmında ise borlama öncesi varolan perlitik mikroyapı özelliklerinin korunduğu görülmüştür.



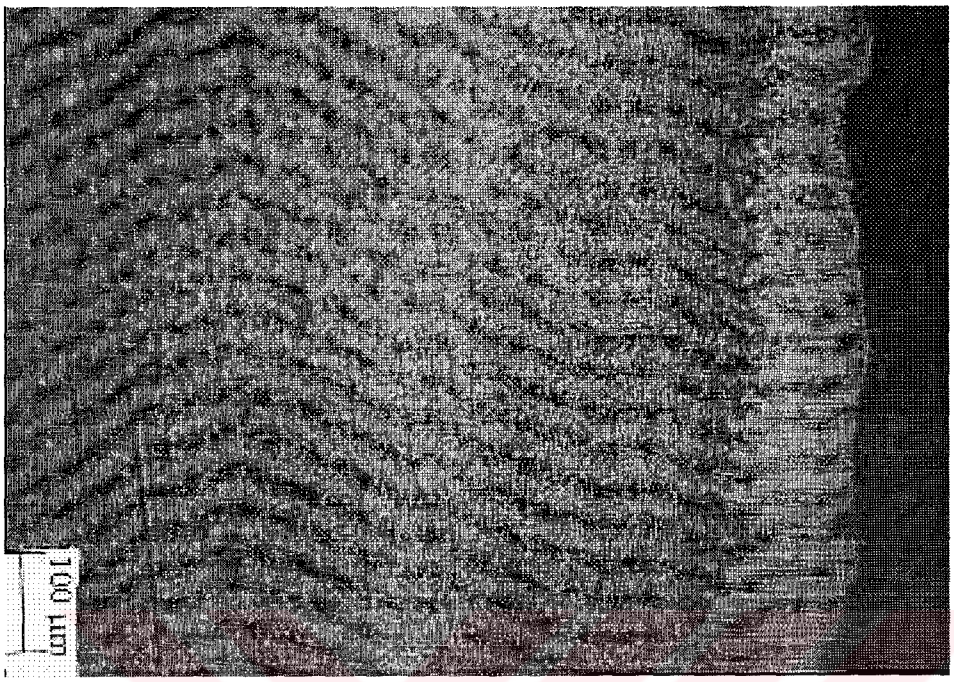
Şekil 6.26. 950 °C'de 1 Saat borlanmış AISI 1390 çeliğinin mikrofilmi



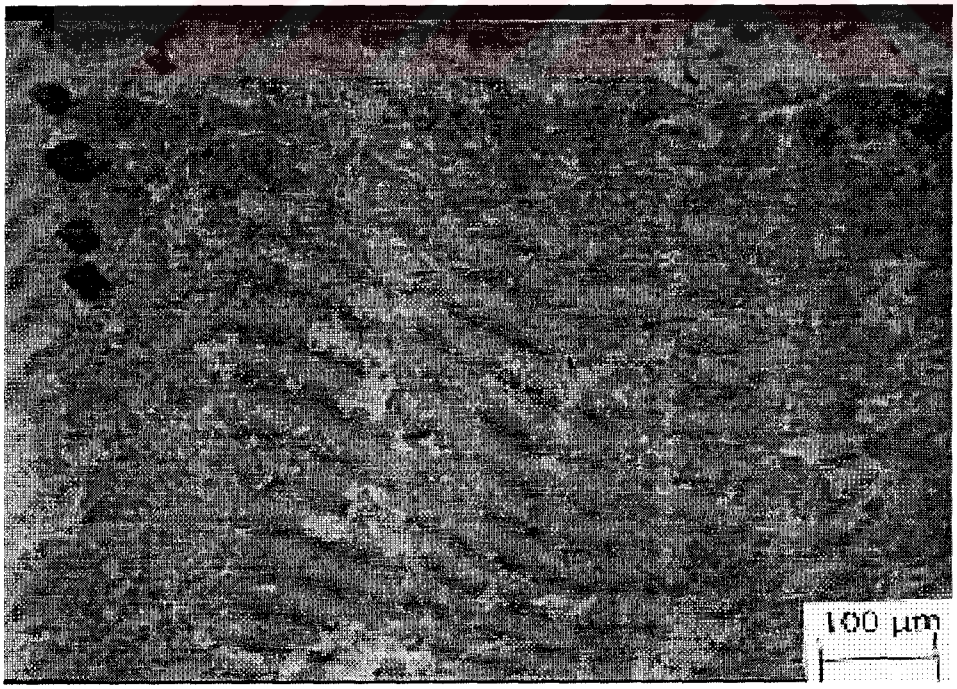
Şekil 6.27. 950 °C'de 3 Saat borlanmış AISI 1390 çeliğinin mikrofilmi



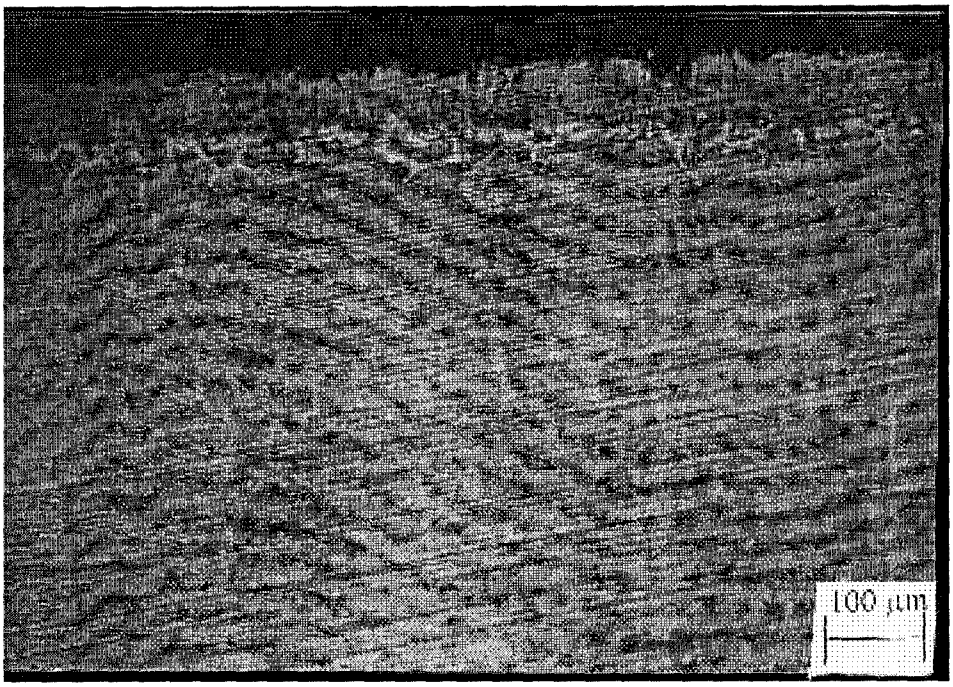
Şekil 6.28. 950 °C'de 5 Saat borlanmış AISI 1390 çeliğinin mikrofilmi



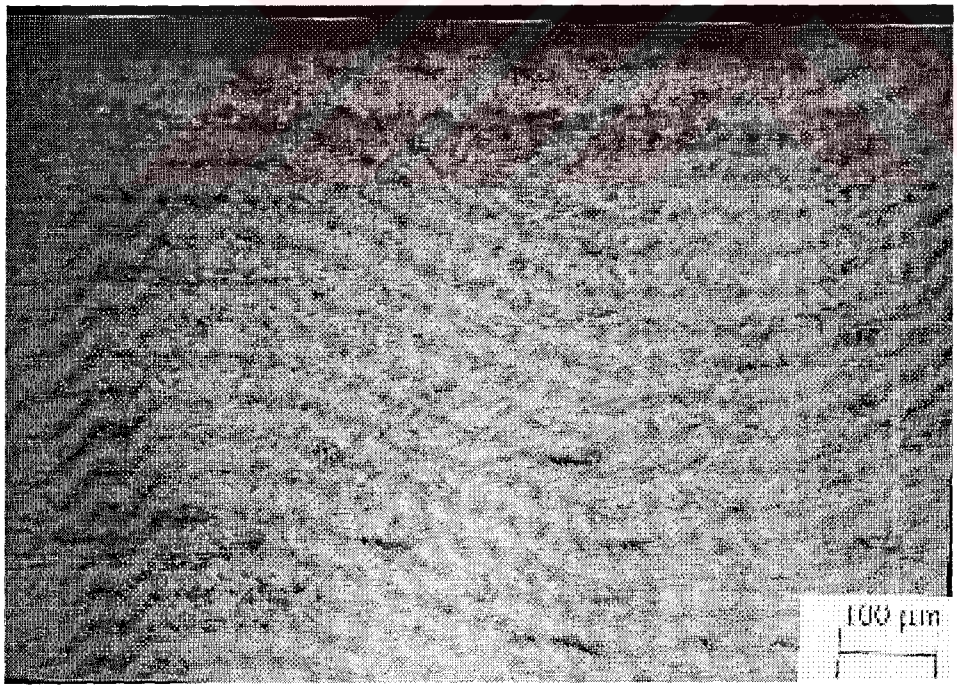
Şekil 6.29. 950 °C'de 7 Saat borlanmış AISI 1390 çeliğinin mikrofilmi



Şekil 6.30. 950 °C'de 9 Saat borlanmış AISI 1390 çeliğinin mikrofilmi



Şekil 6.31. 1000 °C'de 7 Saat borlanmış AISI 1390 çeliğinin mikrofilmi



Şekil 6.32. 1100 °C'de 7 Saat borlanmış AISI 1390 çeliğinin mikrofilmi

6.9. BORLAMA SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

6.9.1. Borlama Şartlarının Mikroyapıya Etkileri

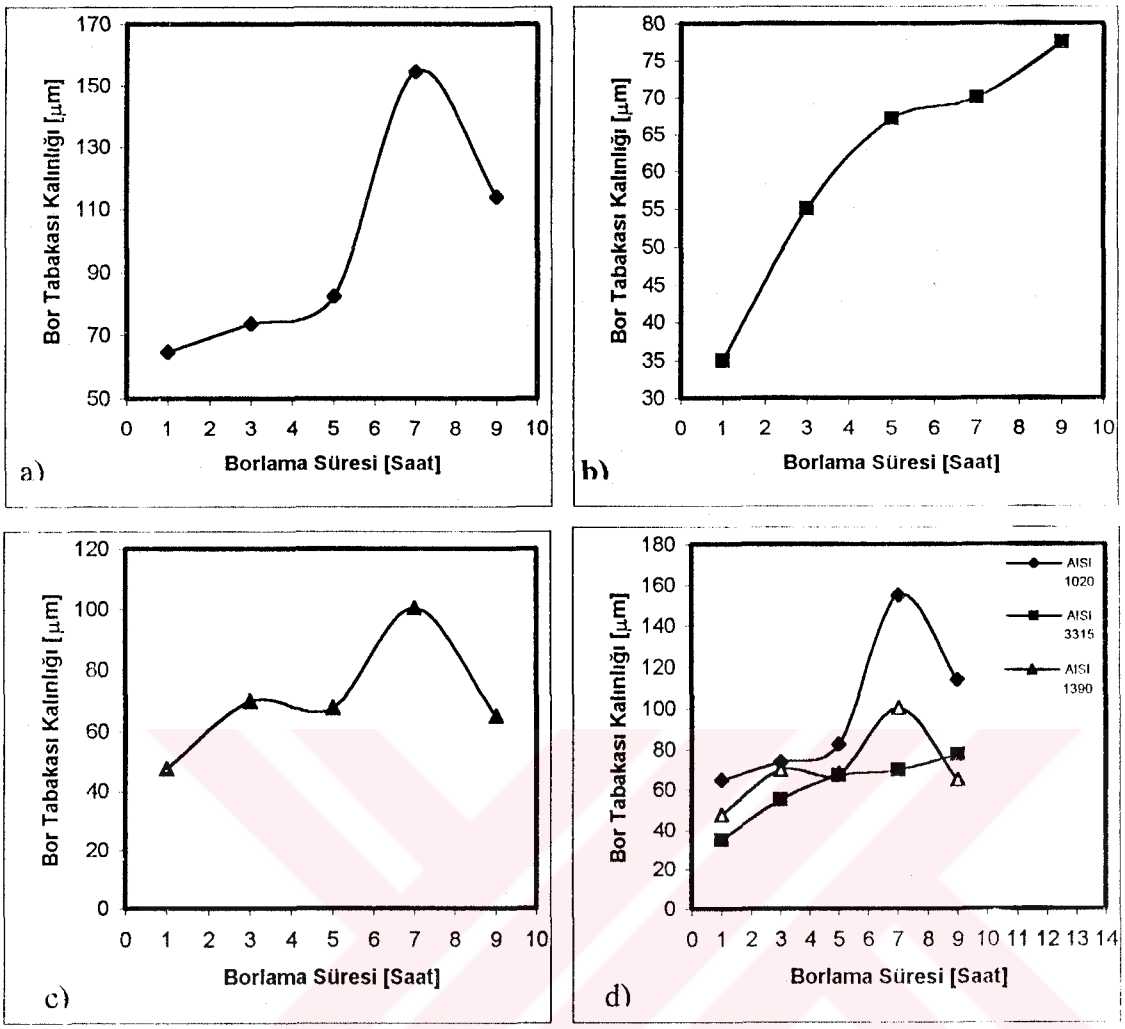
6.9.1.1. Borlama Süresinin Etkisi

950 °C sabit sıcaklıkta 1, 3, 5, 7 ve 9 saat sıvı ortamda borlanan çeliklerin tümünde yüzey boyunca borür tabakalarının oluştuğu gözlenmiştir.

AISI 1020 çeliğinde oldukça sık dokuda ve derin bor dişleri olan bir tabaka oluşmuştur. 1-7 süre ile borlanan numunelerde bor tabakası kalınlığı artış göstererek 7 saat süresinden sonra tabaka kalınlığında önemli derecede düşüş meydana geldiği tespit edilmiştir (Şekil 6.33.a). Borür tabakalarının hemen altında ana metalde rastlanan tane yapısına göre oldukça büyük olan ferrit ve perlit yapılarının oluştuğu görülmüştür. Tane irileşmesinin sebebi, bu bölgedeki sıcaklığının rekristalizasyon sıcaklığına ulaşması sonucu atomların yeniden düzenlenmesi ile açıklanabilir. Borlama süresinin artışı, bor tabakası altında, iri perlit tanelerinin ferrite göre daha çok yer almasına neden olmuştur.

Ana metal kısmında asiküler ferrit yapısı hakim AISI 3315 çeliğinde bor tabakası altında borlanmış AISI 1020 çeliğindeki gibi bir yapıya rastlanmamıştır. Çelik yüzeyinde oluşan bor tabakası kalınlığı, borlama süresinin artışı ile artmaktadır. Borlanmış AISI 3315 çeliğinde bor tabakası kalınlık miktarı, borlanmış AISI 1020 çeliğinde tespit edilenlerden daha düşüktür (Şekil 6.33.d). Bu durum, AISI 3315 çeliğinin başta Cr ve Ni ve Mn gibi alaşım elementleri içermesinden kaynaklanmaktadır.

950 °C'de sıvı ortamda borlanan yüksek karbonlu AISI 1390 çeliğinde, 7 saat noktasına kadar bor tabakası kalınlığında artış meydana gelirken, çelikte oluşan bor tabakasının, az gözenekli ve diğer borlanmış çelik türlerinde rastlanan diş derinliği yüksek bir yapıdan uzak, daha çok katman şeklinde yüzey boyunca uzandığı dikkat çekmiştir. Şekil 6.33'de her üç çelikte borlama süresi ile bor tabakası kalınlığındaki değişim görülmektedir.

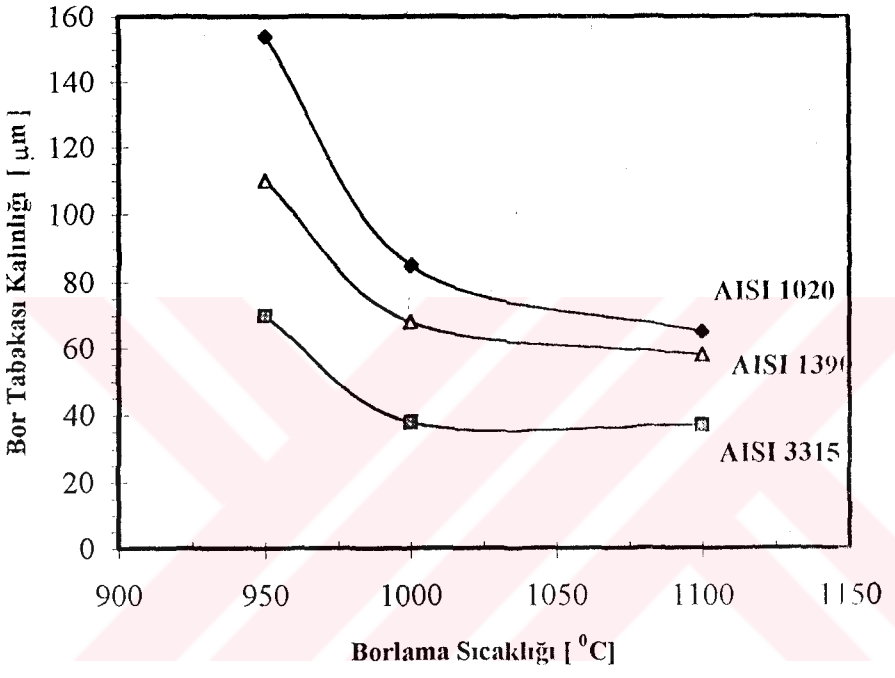


Şekil 6.33. Bor tabakası kalınlığının borlama süresi ile değişimi
a) AISI 1020 çeliği
b) AISI 3315 çeliği
c) AISI 1390 çeliği
d) Üç çelik için tabaka kalınlıklarının borlama süresine göre değişim grafiği

6.9.1.2. Borlama Sıcaklığının Etkisi

Sabit 7 saat borlama süresinde 950, 1000 ve 1100 °C' de borlanan numunelerde sıcaklık artışı en çok bor tabakası kalınlığını etkilemiştir. Ana metalde bir değişikliğe ise rastlanmamıştır. 7 saat sabit sürede borlanan her üç çelikte de oluşan bor tabakası kalınlık miktarı borlama sıcaklığının artışı ile azalmıştır (Şekil 6.34).

Düşük karbonlu AISI 1020 çeliğinde borlama sıcaklığının artışı ile çelik yüzeyi üzerinde tabakanın daha homojen bir şekilde yayıldığı gözlenmiştir. AISI 3315 çeliğinde oluşan bor tabakasının gözenekli yapıda olduğu görülmüştür. Sıcaklık artışı ile tabaka kalınlığı azalmakla birlikte gözenek sayısının da azaldığı belirlenmiştir. Aynı şekilde AISI 1390 çeliğinde sıcaklık artışı ile tabaka kalınlığı azalmıştır. Bu azalma lineer olmayıp parabolik eğri şeklindedir.



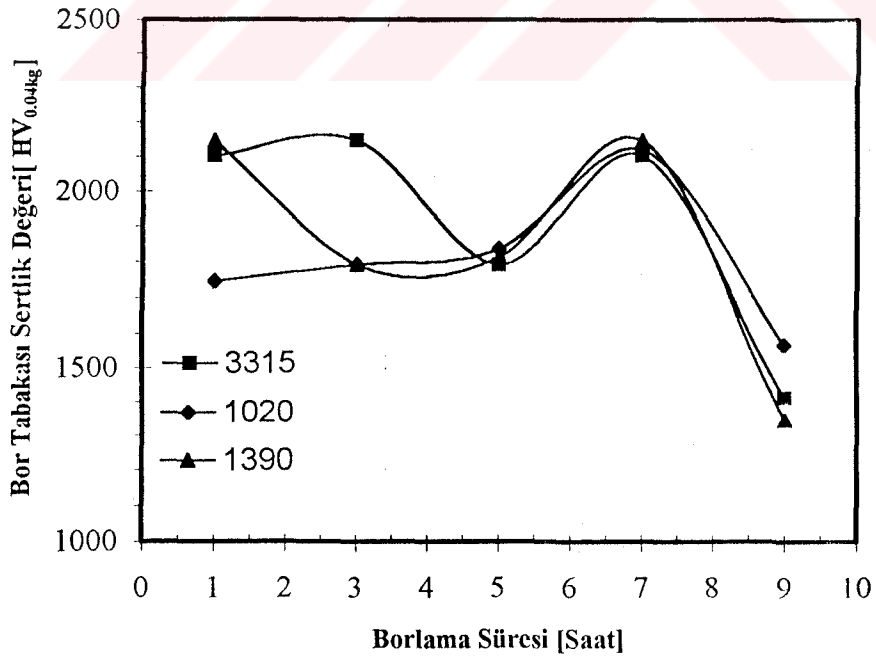
Şekil 6.34. Bor tabakası kalınlığının borlama sıcaklığına bağlı olarak değişimi (Borlama Süresi: 7 Saat)

6.9.2. Borlama Şartlarının Mikrosertliğe Etkileri

Mikrosertlik taraması bor tabakası üzerinde, tabaka altında ve ana metal kısmında gerçekleştirilmiştir. Mikrosertliğe ait grafikler bu bölümde, sayısal değerleri ise Ek-5'de verilmiştir. Borlanmamış çelikler için ölçülen ortalama sertlik değerleri, AISI 1020 için 219 HV; AISI 3315 için 280 HV ve AISI 1390 için 340 HV olarak tespit edilmiştir.

6.9.2.1. Borlama Süresinin Etkisi

Borlama süresinin yüzeyin mikrosertlik özelliklerine etkisi sabit borlama sıcaklığında (950 °C) değişen borlama sürelerinde (1, 3, 5, 7 ve 9 saat) yapılan borlama şartları için tespit edilmiştir (Şekil 6.35). Sabit sıcaklıkta 1 saat borlanan numunelerden alınan sertlik değerlerine göre AISI 1020 çeliğinde oluşan bor tabakasında ortalama 1745 HV iken; 7 saat borlanan numunede 2118 HV dir. 1-7 saat aralığında sertlik değeri borlama süresi ile artar. Bor tabakası sertlik değerleri arasında AISI 1020 çeliği için en düşük sertlik değeri (1568 HV) 9 saat borlama koşulunda elde edilmiştir. Malzeme yüzeyinin uzun süre yüksek sıcaklığa maruz kalması oluşan borür fazlarını olumsuz şekilde etkilemiş olması bu duruma neden olabilir. Bor dişlerinin bitiş kısmından itibaren bor tabakasının yaklaşık 6 katı kalınlığındaki alanın ortalama sertlik değerinin borlama süresine bağlı olarak 325-572 HV arasında değiştiği ve çeliğin ana metal kısmı sertliğinin 1,5-2 katı civarında olduğu tespit edilmiştir. Borlanmış AISI 1020 çeliğinin ana metal sertliği aynı çeliğin normalize edilmiş haldeki sertliğinden bir miktar yüksektir. Bunun nedeni borlama işlemimden sonra malzemenin havada soğutulmuş olmasıdır.



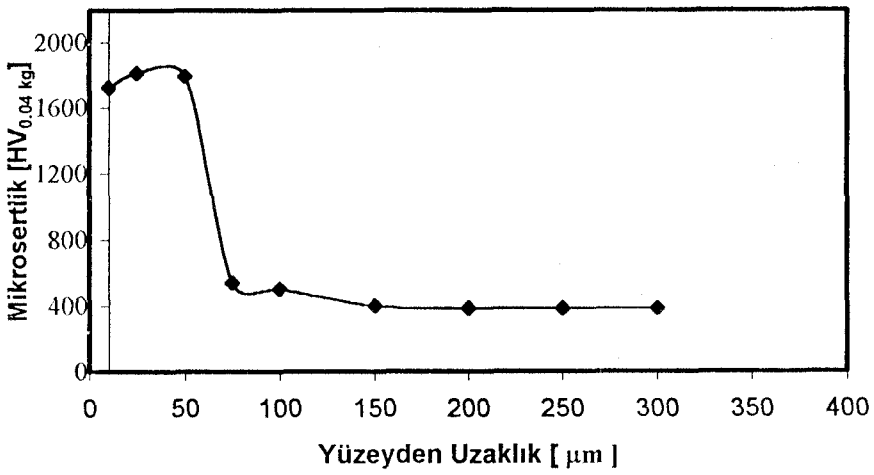
Şekil 6.35. Borlama süresi ile bor tabakası sertliğinin değişimi

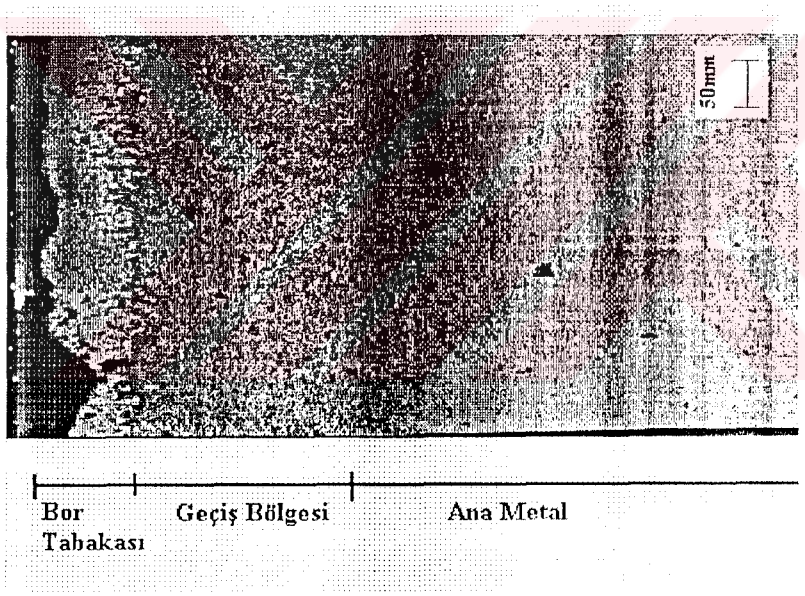
Borlanmış AISI 3315 çelik numune yüzeylerinde oluşan bor tabakalarının sertlik değerleri 1410-2145 HV arasında değişmektedir. Borür tabakalarının sertlik değerleri borlama süresine göre farklılık göstermektedir. Borür tabakalarının hemen altından başlayan kısımdan itibaren yüzeye dik bölgenin (bor tabakasının 7-10 katı) 525-625 HV sertliğinde olduğu belirlenmiştir. Borlamış AISI 3315 çeliğinin ana metal kısmının sertliği, borlanmamış fakat normalize edilmiş haldeki sertliğinden yaklaşık 50 HV daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Borlanmamış AISI 1390 çeliğinin normalize edilmiş haldeki sertlik değeri ortalama 340 HV olarak ölçülmüştür. Yüksek karbon içermesi ve borun karbon elementlerini ana metale doğru itmesi neticesinde iç yapıda yüksek perlit teşekkülü [23] itibari ile, bu değer aynı şartlarda normalize edilmiş diğer grup çeliklere göre daha yüksektir.

Şekil 6.35'den de görüldüğü gibi borür tabakalarının ortalama mikrosertlik değerlerinin borlama süresi ile değişim meyilleri AISI 1390, 1020 ve 3315 çelikleri için benzerdir. AISI 1390 çeliği için en düşük borür tabakası sertlik değeri 9 saat için 1345 HV bulunmuştur. 5 saat sürede borlanan numunede ise geçiş bölgesine rastlanmıştır (Şekil 6.36). Bu bölgedeki sertlik değeri 500-540 HV arasında olduğu tespit edilmiş olup, diğer borlama şartlarında geçiş bölgesi tam olarak ayırt edilememiştir. AISI 1390 çeliğinde bor tabakası altında yer alan tabaka kalınlığının yaklaşık 3-4 katı bir bölgenin ortalama sertliği 400-500 HV olarak bulunmuştur. Ana metal kısmının sertliği geçiş bölgesine göre 150 HV daha düşük olup, borlanmamış haldeki sertlik değerine göre 70-80 HV daha yüksektir.

Dikkat edilirse, 950 °C-9 saat sürede borlanan her üç çelikte de borür tabakası sertlik değerleri diğer borlama süreleri sonunda elde edilen tabaka sertlik değerlerine göre düşüktür. Bununla beraber borlama işlemi ile elde edilen sertlik değerleri, karbürleme ve nitrürleme işlemleri ile elde edilen sertlik değerlerine göre yüksektir.

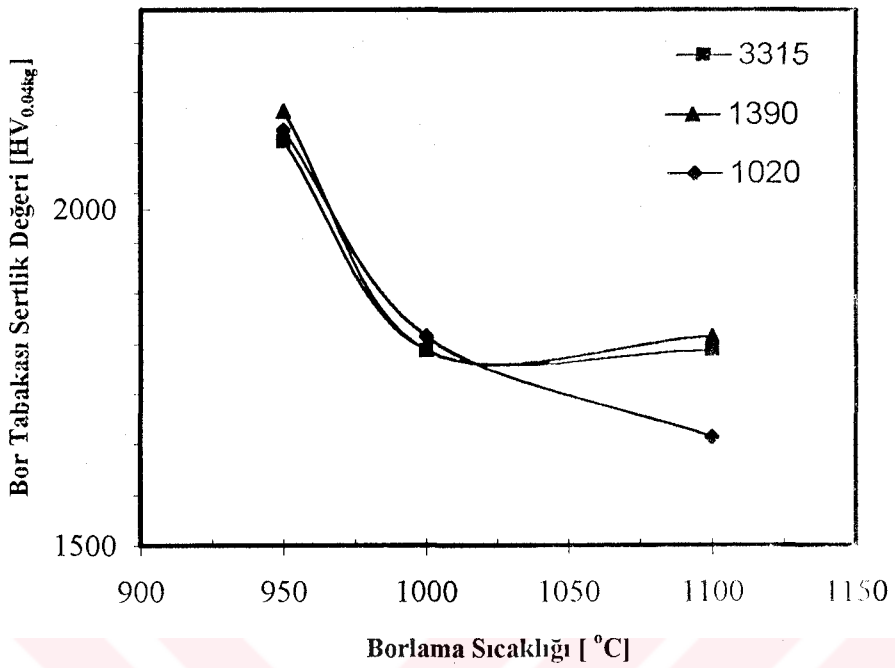




Şekil 6.36. AISI 1390 çeliğinde yüzeyden itibaren mikrosertlik dağılımı (950 ^{0}C'de 5 saat borlanmış)

6.9.2.2. Borlama Sıcaklığının Etkisi

Borlama sıcaklığının çeliklerde içyapı sertliklerini azaltıcı yönde etki yaptığı görülmüştür. Sabit 7 saat borlama süresinde 950, 1000 ve 1100 °C'de borlanan her üç çeliğin bor tabakası sertlik değerlerin sıcaklık artışına paralel olarak azaldığı görülür (Şekil 6. 37). En yüksek sertlik değerlerine 7 saat sürede borlama sürelerinde ulaşıldıktan sonra sıcaklık arttırıldığında borür tabakası sertlik değerlerinde azalma meydana gelmektedir.



Şekil 6.37. Borlama sıcaklığı ile bor tabakası sertliğinin değişimi

6.9.3. Numune Geometrisinin Mikroyapı Özelliklerine Etkisi

Borlanan numunelerin dairesel kesitte olması bu geometrideki numunelerin taban, tavan yanal yüzeyleri ile birbirine dik yüzeylerde oluşacak bor tabakasının karakteristik özelliklerini mukayese edebilme imkanı sağlamıştır. Sıvı ortamda yapılan borlama neticesinde numunenin tüm yüzeyi banyo ile temas halinde olduğu için, bor; tüm yüzey boyunca difüze olabilir. Seçilen şartlarda borlanan her üç tür çelik numunelerin tüm yüzeylerinde borür tabakasının oluştuğu gözlenmiştir. Oluşan tabakaların özellikle silindirik numunelerin tavan ve taban merkez hattı çevresinde homojen bir dağılım göstermekle beraber, köşe kısımlarına doğru farklı kalınlıkta ve homojen olmayan bir bor tabakası dağılımına sahip oldukları tespit edilmiştir. Bazı hallerde ise, aynı numunede oluşan borür tabakasının morfolojik açıdan yüzeydeki görüntüsü ve kalınlık miktarı ile köşe kısımlarında sahip olduğu morfolojik yapı farklı olmuştur. Köşe kısımlarında oluşan bor tabakası, yüzeylerde oluşan bor tabakasından daha kalın, daha gözenekli ve diş derinliği düşüktür. Bu olay, yüzeylerde tek yönlü difüzyon olmakta iken; köşelerde iki yönlü difüzyon olmasından kaynaklanır.

BÖLÜM 7

EROZYON AŞINMASI DENEYLERİ VE SONUÇLARININ YORUMLANMASI

7.1. GİRİŞ

Farklı borlama koşullarında borlanan üç ayrı çelikten hazırlanan numunelerin düz yüzeylerine hava jeti ile hızlandırılmış köşeli katı partikül (grit) püskürtülmek sureti ile erozyona maruz bırakılmıştır. Borlama sıcaklığı ve borlama süresi ile püskürtme süresinin borlanmış ve borlanmamış AISI 1020, 3315 ve 1390 çeliklerinin erozyon aşınmasına olan etkileri incelenmiş olup; aşınan yüzeylerde meydana gelen hasar şekli ve aşınma mekanizmaları araştırılmıştır. Aşınma miktarı ağırlık kayıpları hassas terazide ölçülerek belirlenmiş, bu değerler erozyon oranı = Aşınma miktarı/toplam püskürtülen aşındırıcı miktarı [mg/kg] kullanılarak hesaplanmıştır. Bulunan değerlere göre çizilen grafikler yardımı ile AISI 1020, 3315 ve 1390 çeliklerinin eroziv aşınma davranışları birbirleri ile mukayese edilmiştir. Böylece çeliklerde en az aşınmanın meydana geldiği borlama şartları belirlenerek sebepleri araştırılmıştır.

7.2. DENEY TESİSATI

Akış halinde 1-10 bar basınca sahip bir gaz akımı (hava) tarafından taşınan 50 μm-1,5 mm arasında değişen ve farklı geometriye sahip köşeli (grit) veya küresel (bilya) partiküllerin çeşitli metal ve alaşımların yüzeylerinde darbe etkisi yaparak aşındırma sağlayacak özellikte tasarlanıp üretilmiştir. Cihaz 5-45 m/s' lik partikül çıkış hızı sağlayabilmektedir. Ancak püskürtme hızı; başta partiküllerin yapı ve geometrisiyle birlikte kullanılan

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

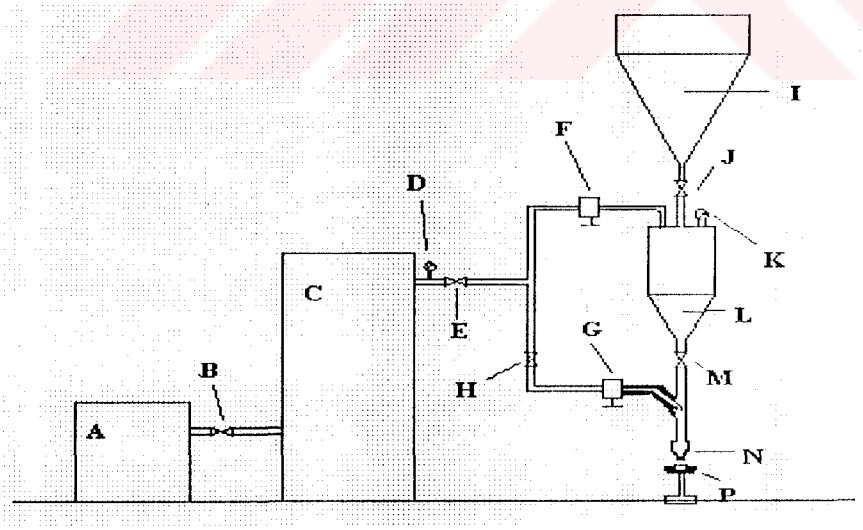
püskürtme lülesi özelliğine göre değişim göstermektedir. Deney tesisatının şematik görüntüsü Şekil 7.1'de verilmiştir. Eroziv aşındırma cihazı hakkında daha detaylı bilgi Bölüm 5' de verilmiştir.

7.3. DENEYLERİN YAPILIŞI

Deneylerde üç ayrı çelikten hazırlanmış, borlama işlemi görmeyen numuneler ve farklı sıcaklık ve sürelerde borlanan numunelerin aşınma testleri, Tablo 7.1'de verilen sabit tutulan aşındırma parametreler altında gerçekleştirilmiştir. Deneyler esnasında, test süresi, borlama sıcaklığı ve borlama süresi değiştirilmiştir. 60 dakika süresince 420 μm nominal boyutlu SAE NO: G-40 grit partikülleri püskürtülerek eroziv aşındırmaya maruz bırakılmıştır.

Tablo 7.1. Sabit Tutulan Eroziv Aşındırma Parametreleri

Püskürtme Hızı	30 m/s
Çarpma Açısı	90^0
Aşındırıcı Partikül	G 40 Grit
Partikül Deposu Basıncı	2 Bar
Lüle Hava Giriş Basıncı	2 Bar
Lüle Çapı	7 mm
Lüle Boyu	10 mm
Numune ve Lüle Arasındaki Mesafe	10 mm



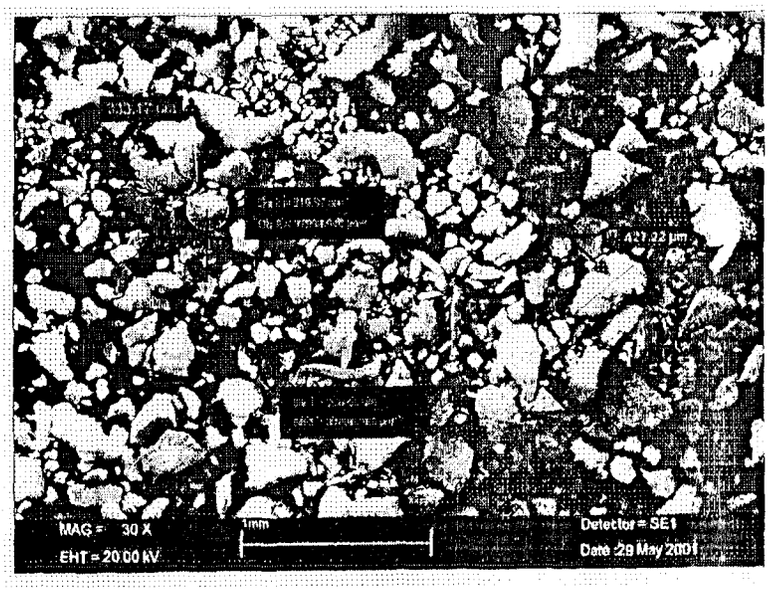
Şekil 7.1. Eroziv Aşındırma Cihazının Şematik Görüntüsü

A:Kompresör; B, E, J, H, M: Vana; C: Hava Deposu;
D,K: Basınç Manometresi; F,G: Basınç Regülatörü,
I: Ana Partikül Deposu; L: Basınçlı Partikül Deposu,
N: Nozul; P: Numune Tutucu

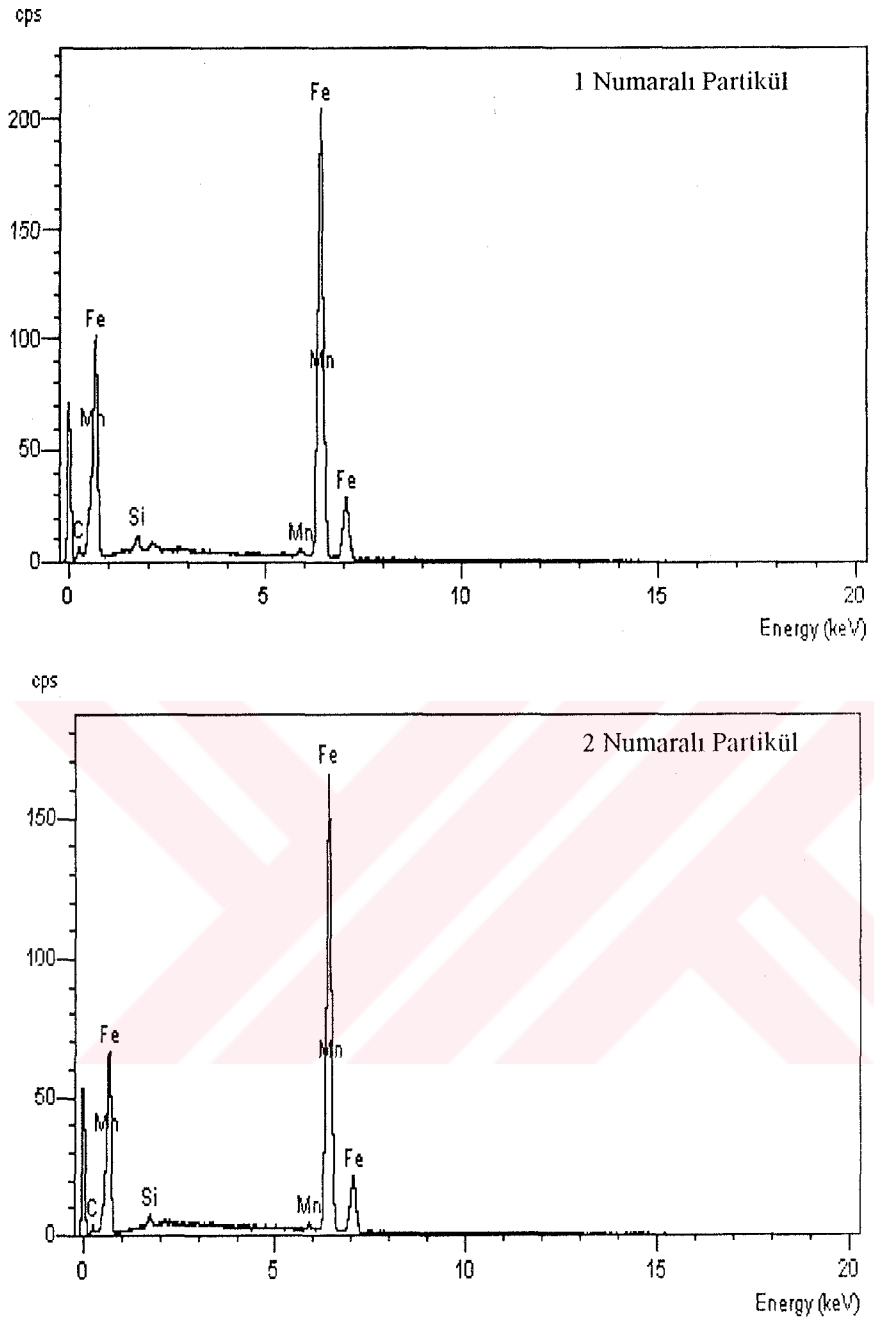
7.4. AŞINDIRICI PARTİKÜL

Katı partikül püskürterek yapılan eroziv aşındırma deneylerinde çoğunlukla ASTM G 76-95 standardının [35] önerdiği 50 μm boyutlu alüminyum oksit toz kullanılmaktadır. Ancak bu toz oldukça pahalıdır (80$/kg). Eroziv aşınma testleri için yaklaşık 500 kg toza ihtiyaç olduğu düşünüldüğünde sadece toz maliyeti çalışmaya büyük bir külfet getirmektedir. Bu sebeple aşındırma deneylerinde 50 μm ve altında demir tozu piyasadan temin edilmeye çalışılmıştır. Ancak bu boyuttaki demir tozu borlanmış çelikler üzerinde yeterli derecede aşındırma etkisi yapmamakla birlikte gerek işlemin aşırı zaman almasına, püskürtme sonrası numuneden ayrılan partiküllerin çok küçük boyutta olmaları itibari ile eroziv aşınma cihaz haznesinin her tarafını kolaylıkla kaplayarak numunelerin tartımı ve değiştirme işlemleri sırasında toz uzun süre çökelmediği için çalışma şartlarını olumsuz yönde etkilemesine neden olmuştur. Bu boyuttaki bir toz SAE No olarak G-80 altı olarak söz edilmektedir.

Bu sayılan sebeplerden dolayı BÜNSA Döküm Makine Sanayi tarafından standart olarak üretilen üniform martenzit mikroyapılı, 55-65 HRC sertliğinde ve yoğunluğu minimum 7,2 g/cm^3 olan [66] SAE NO: G-40 grit partiküller (Şekil 7.2) kullanılmıştır. Bu partiküllerin boyutu SEM ile ve kimyasal analiz işlemleri EDX analizi yapılarak Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde belirlenmiştir (Şekil 7.3).



Şekil 7.2 G-40 Partiküllerin SEM görüntüsü ve EDX analizi yapılan 1 ve 2 numaralı partiküller



Şekil 7.3. Grit partiküllerin EDX analizleri sonucu içerdiği element miktarı ve çeşitleri

1.Element	Spect. Type	Inten. Corrn.	Std Corrn.	Element %	Sigma %	Atomik %
C K	ED	0.538	1.46	3.11	0.26	12.86
Si K	ED	0.744	1.04	1.10	0.06	1.95
Mn K	ED	0.972	1.00	1.01	0.12	0.91
Fe K	ED	0.993	1.00	94.78	0.29	84.28
Toplam				100.00		100.00

2.Element	Spect. Type	Inten. Corrn.	Std Corrn.	Element %	Sigma %	Atomic %
C	K ED	0.544	1.46	3.25	0.22	13.44
Si	K ED	0.743	1.04	0.67	0.06	1.18
Mn	K ED	0.972	1.00	0.73	0.13	0.66
Fe	K ED	0.993	1.00	95.35	0.25	84.72
Toplam				100.00		100.00

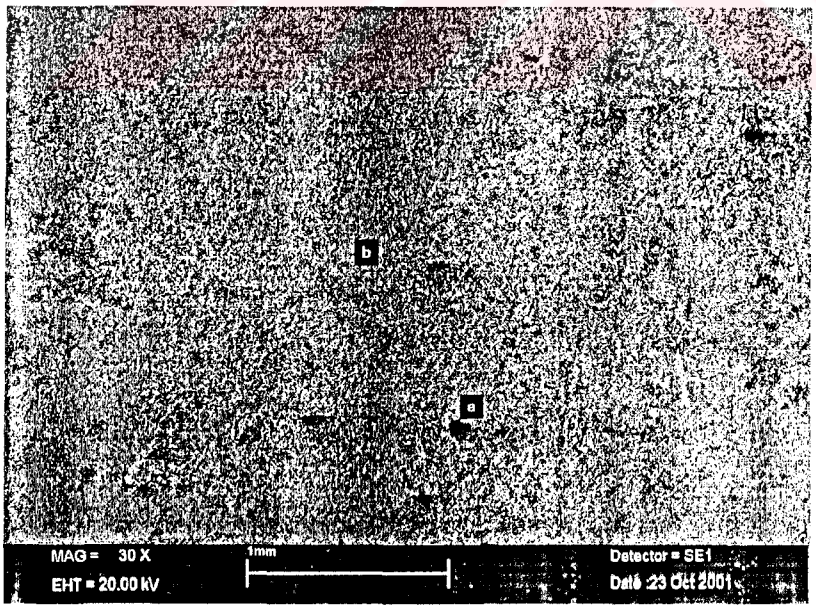
EDX analizi sonucunda, iki ayrı partikül tanesinin element miktarları bakımından benzer olduğu belirlenmiştir.

7.5. AŞINMA DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

7.5.1. Aşınan Yüzeylerin İncelenmesi

7.5.1.1. AISI 1020 Çeliğinin Eroziv Aşınma Davranışının İncelenmesi

Borlanmış AISI 1020 çeliğinde aşındırma öncesi yüzey görünüşü Şekil 7.4'de gösterilmektedir. Deneysel çalışmalarda 950 °C'de 5 saat borlanmış AISI 1020 çelik numune kullanılmıştır.



Şekil 7.4. AISI 1020 çeliğinde eroziv aşındırma öncesi borlanmış yüzeyin görünümü (a,b: borlama kalıntıları)

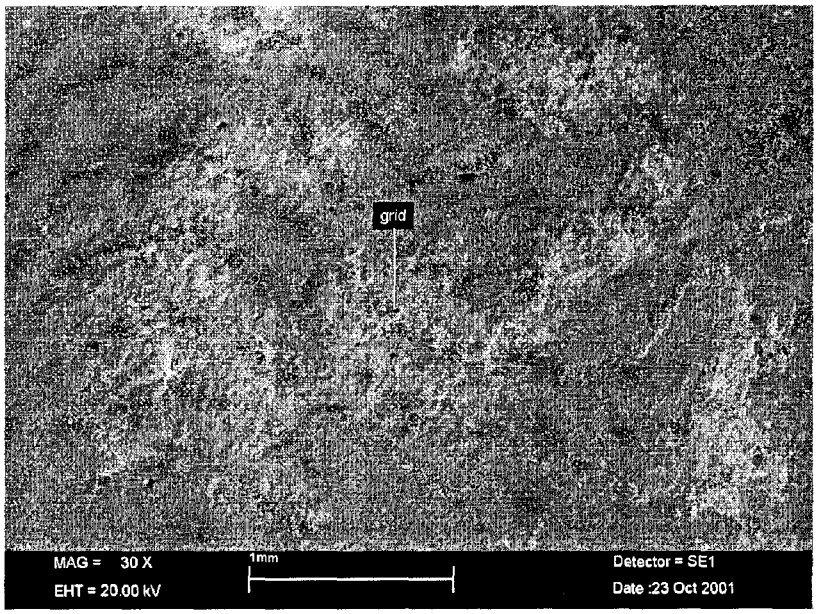
Şekil 7.5'den de görüldüğü gibi 10 dakika süren eroziv aşındırma işlemi sonunda borlanmış numunenin yüzey üzerinde, nozulun izdüşüm alanı ile sınırlı bölgesi içinde dağınık noktalarda oyukların oluştuğu görülmektedir. Bu oyuk oluşumlarına neden olan faktörler şunlar olabilir:

(1). Sıvı ortamda borlama banyosundan geçen cüruf ve yabancı maddeler vs. gibi süreksizlikler, borlanmış yüzey üzerinde zayıf noktalar oluşturmaktadır. Bu süreksizlikler, ilk katı partikül darbeleri neticesinde bulundukları konumdan kolayca ayrılarak yüzeyde çok küçük boşluklara sebep olurlar. Dolayısı ile yüzey topografyası da değişerek mikro ve makro düzeyde girintiler oluşur. Erozyon aşınması esnasında yüksek hızda yüzeye dik çarpan katı partiküller, düz sayılabilecek yüzey satıhlarından farklı, girintilerden farklı miktarlarda talaş kaldırdıkça eroziv aşınmaya özgü yeni yüzey şekillerinin oluşumuna yol açar. Neticede, aşındırma süresi ilerlemesi ile, bu girintiler büyüyerek oyuklara dönüşmektedir.

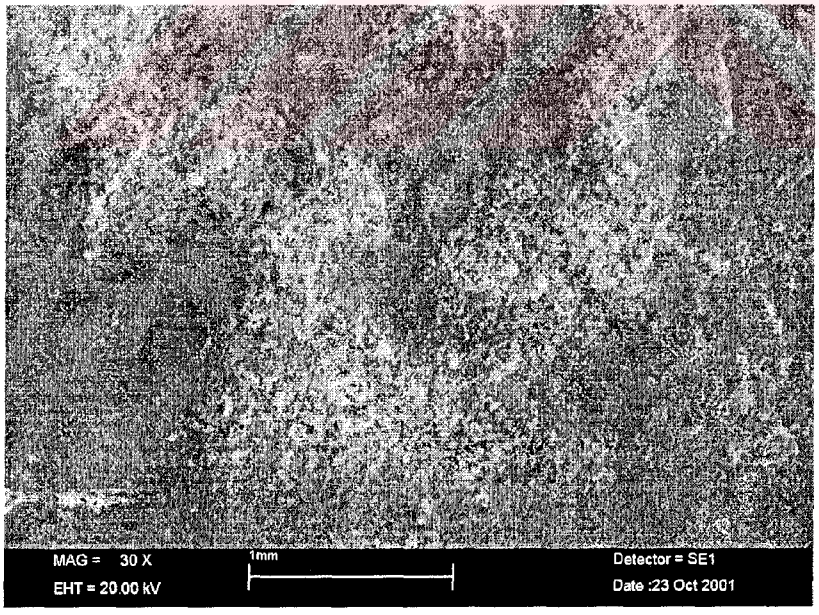
(2). Aşırı bor verici ortamlarda çalışıldığında çok kırılgan olan FeB fazı oluşabilmektedir. Sıvı ortamda borlama tekniği ile yapılan borlama işlemi de bu tür ortamlardandır. Yukarıdaki varsayımda olduğu gibi oyuk oluşumlarına süreksizliklerin ve/veya yüzeydeki FeB fazının kırılarak kolayca yüzeyde bulundukları alanlardan katı partikül darbeleri ile kaldırılmaları sonucu yüzeyde bu tür şekiller oluşmuştur.

(3). Dik konumlandırılmış nozuldan yüksek hızda çıkarak yüzeye çarpan katı partiküller yüzey üzerine tam dik çarpmayıp bir kısmı eğik açı altında gelmektedir. Farklı açıda çarpan partiküller farklı oranda talaş kaldırır. Bunun sonucunda aynı açı altında yüzeye çarpan partiküller çarptıkları noktalarda benzer hasar şekillerinin oluşumlarına sebep olur.

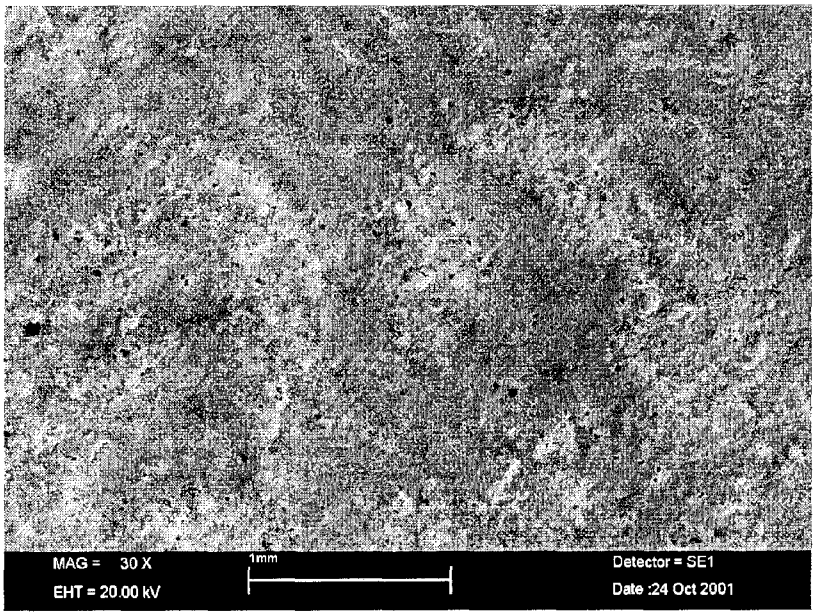
20. dakika sonunda bu oyukların alanları artarak derinleşmesi neticesinde erozyon hasarının bir önceki duruma göre büyüdüğü tespit edilmiştir (Şekil 7.6).



Şekil 7.5. 10 dakikada aşındırılan yüzeyin görünümü

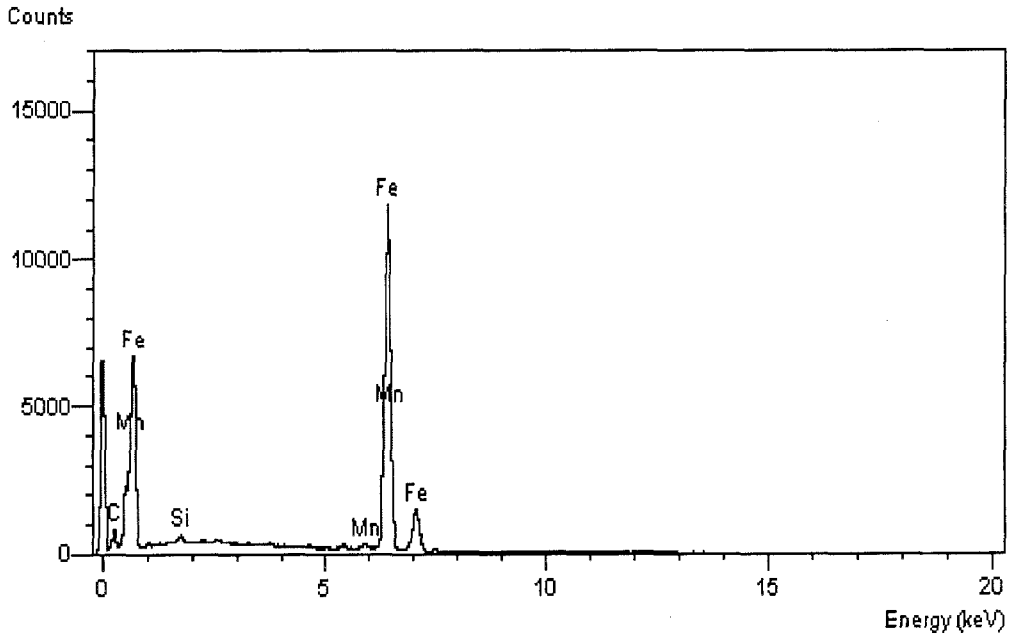


Şekil 7.6. 20 dakikada aşındırılmış yüzeyin görünümü

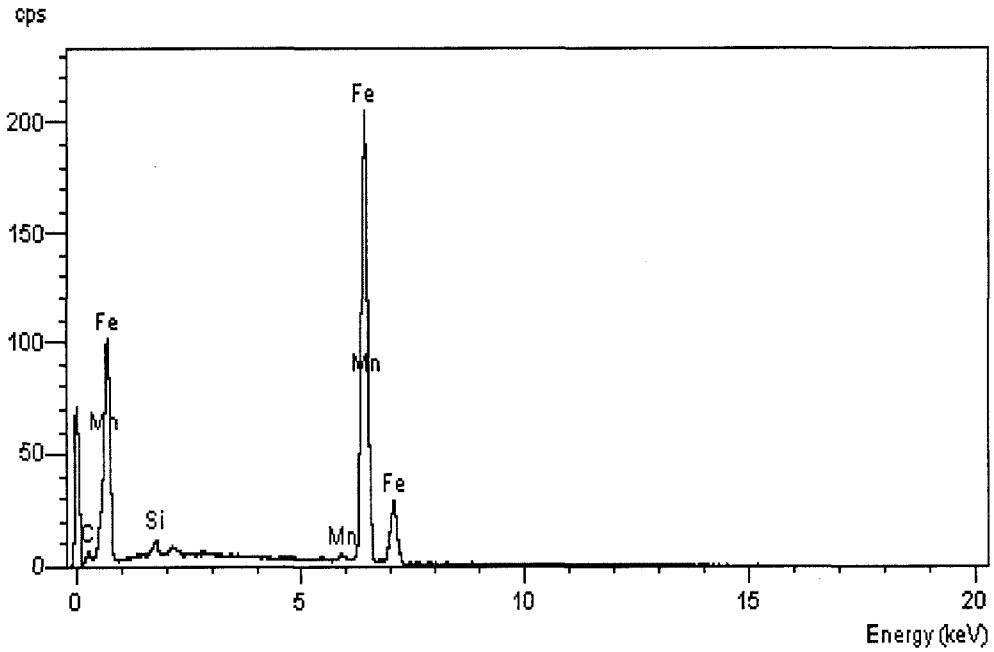


Şekil 7.7. 30 dakikada aşındırılan yüzeyin görünümü

Şekil 7.7'de 30 dakikalık test süresi sonunda aşınan yüzey görülmektedir. Aynı yüzey üzerinde siyah renkte görünen cisimlerin EDX analizi Şekil 7.8'de verilmiştir. Bu analizler aşındırıcı partiküllerin analizleri (Şekil 7.9) ile karşılaştırdığında, benzer oranlarda element içermelerinden dolayı, numune yüzeylerine saplanmış ya da parçalanmış aşındırıcı tanecikler olduğu sonucuna varılmıştır.

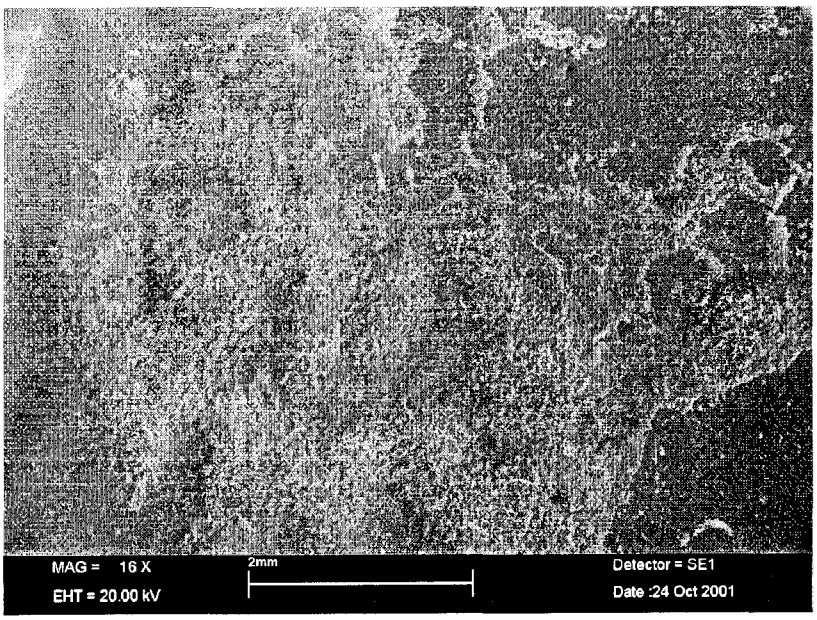


Şekil 7.8. 30 dakika aşındırma süresi için yüzeye yapışmış siyah partiküllerin (grit) EDX analizi

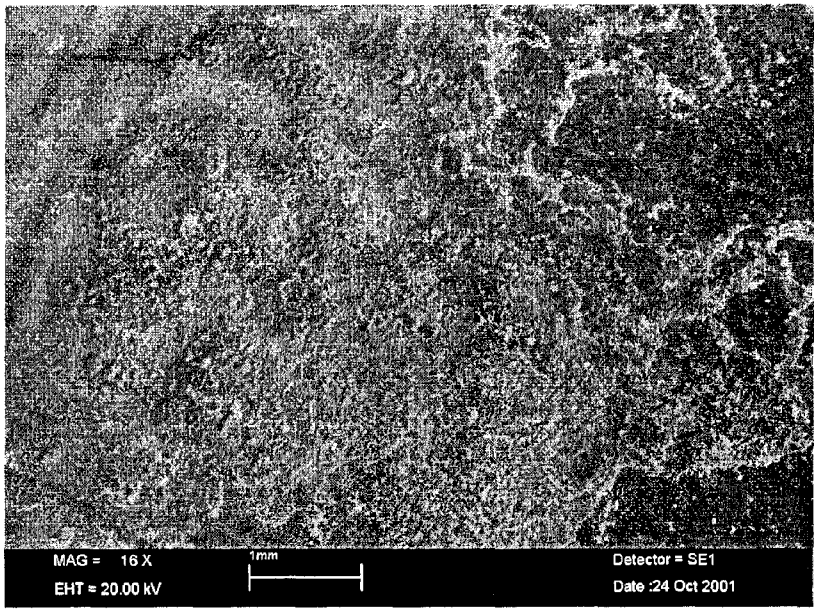


Şekil 7.9. Püskürtülen grit partiküllerinin EDX analizi sonucu belirlenen element türleri

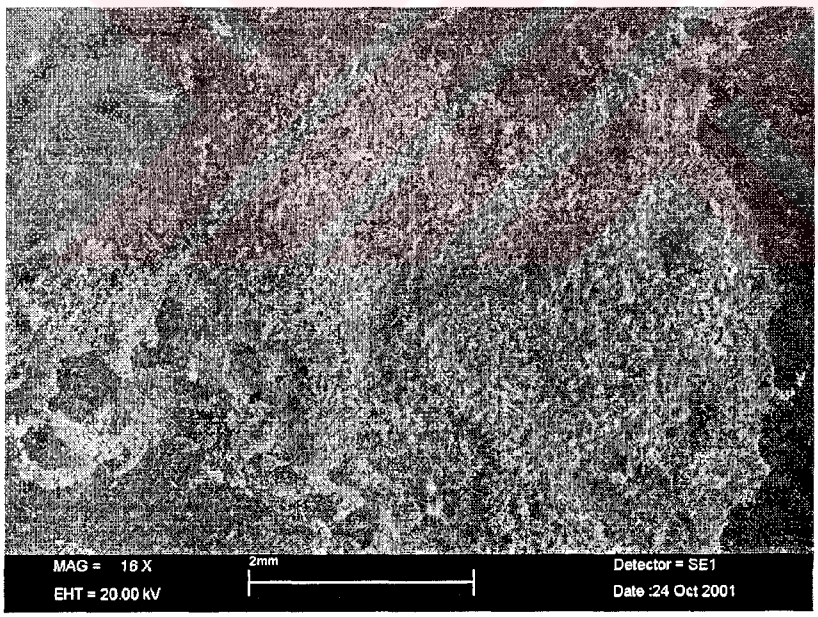
Püskürtülen taneciklerden belirli bir kısmının numune yüzeylerine yapışması erozyon oranlarının azalmasına neden olarak erozyon oranını etkilemiştir. 30. dakikadan itibaren bu küçük oyukların genişleyerek birleşmiş olup, 60 dakika sonunda nozul iz düşüm alanını kaplar hale gelmiştir. (Şekil 7.10-12).



Şekil 7.10. 40 dakikada aşındırılan yüzeyin görünümü



Şekil 7.11. 50 dakikada aşındırılan yüzeyin görünümü



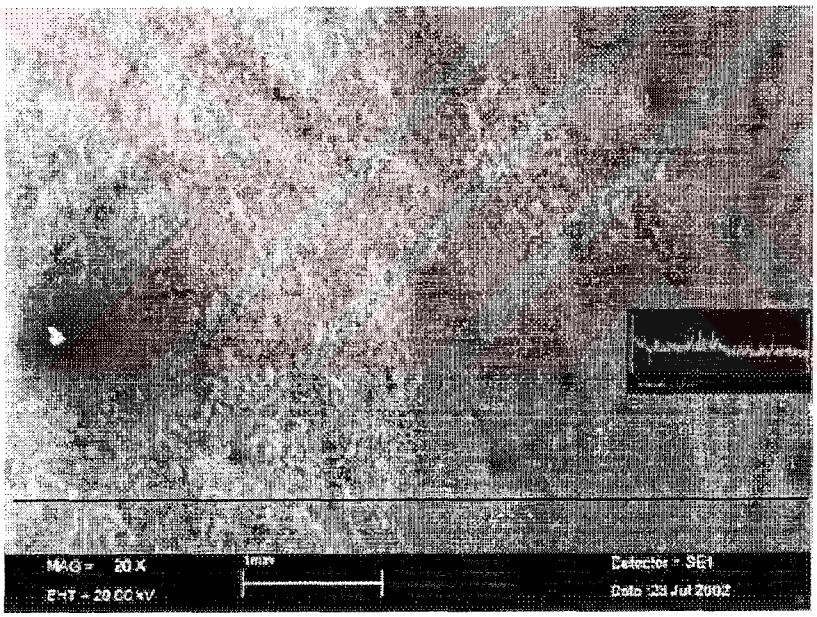
Şekil 7.12. 60 dakikada aşındırılan yüzeyin görünümü

Yukarıdaki bulgulara göre borlanmış AISI 1020 çeliğinin eroziv aşınma davranışı aşağıdaki gibi belirlenmiştir:

- Borlanmış yüzeyde erozyon hasarına neden olan malzeme kaldırma işlemi, yüksek hızda yüzeye çarpan katı partiküllerin nüfuz ettiği alan üzerinde bazı noktalarda

oluşturduğu düşük derinlikli oyuklar ve bunların aşındırma süresinin ilerleyişi ile büyüyüp genişlemesi sonucunda, bor tabakası ve tabaka altından kaldırılan malzemenin taşınması sureti ile gerçekleşmektedir.

- Püskürtülen partiküllerden bir miktarı yüzey üzerinde gömülü kalmaktadır. Yüzeyde katı partikül birikmesi çelikteki erozyon oranını aşınma süresi artışı ile azaltmaktadır. Farklı noktalarda gelişip büyüyen aşınma oyuklarının dışında kalan bazı kısımlarda ise yüzeye çarpan partiküller parlatma etkisi yaparak bu alanlardaki malzeme kaybının çok daha az olmasına sebep olmaktadır. Aşınmanın ilk anlarında bor tabakasının yüzeyden kavlanarak kopması ve yüzeye eğik açı altında gelip daha uzun süre temasta bulunarak çizme etkisi yapan partiküllerin, bu oyuklar dışındaki alanlarda yüzey pürüzlülüğünü azaltıcı etki yaptığı düşünülmektedir (Şekil 7.13).

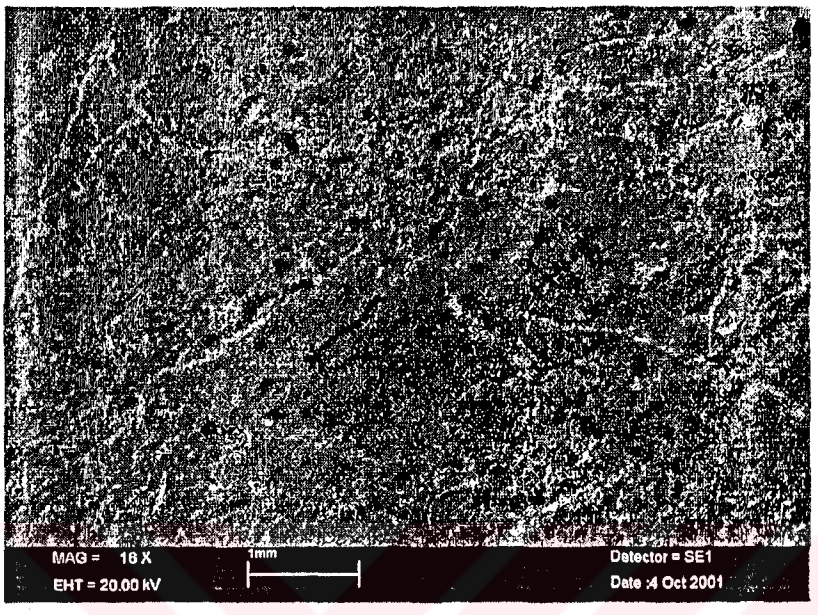


Şekil 7.13. Aşınma oyukları ve çevresinin pürüzlülük değişimi

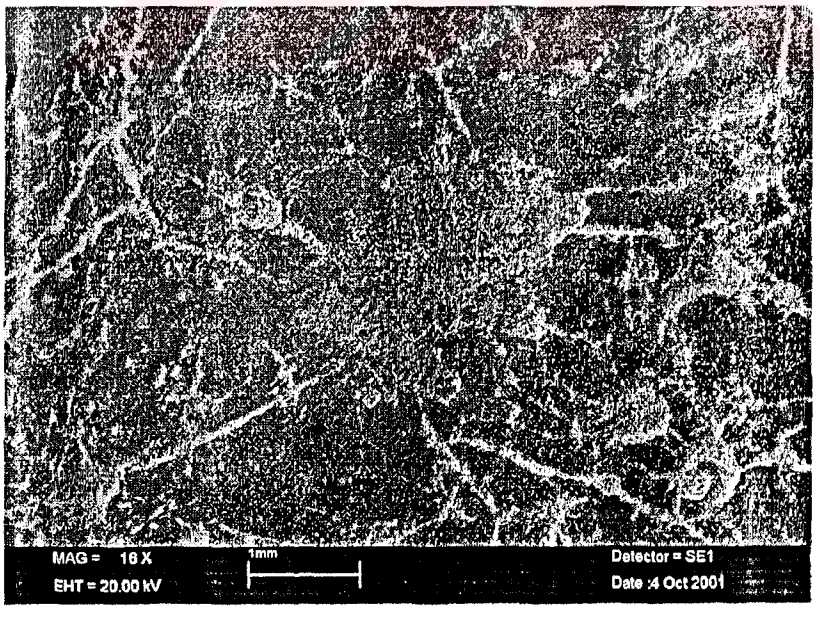
7.5.1.2. AISI 3315 Çeliğinin Eroziv Aşınma Davranışının İncelenmesi

Bu deneysel çalışmada 950 ^{0}C 'de 5 saat borlanmış AISI 3315 çelik numune kullanılmıştır. Şekil 7.14'den de görüldüğü gibi 10 dakika süren eroziv aşındırma işlemi sonunda borlanmış numune yüzeyinde hafif derinlikte çizik şeklinde uzanan çatlamalara rastlanmıştır. Bunun yanısıra borlanmış yüzey üstünde birbirinden bağımsız küçük çaplarda oyuklar göze çarpmaktadır. Aynı parametreler altında erozyon devam ettiğinde

20. dakika sonunda numune merkezinde 1-2 mm çaplı düşük derinlikli bir krater oluşmuştur (Şekil 7.15).

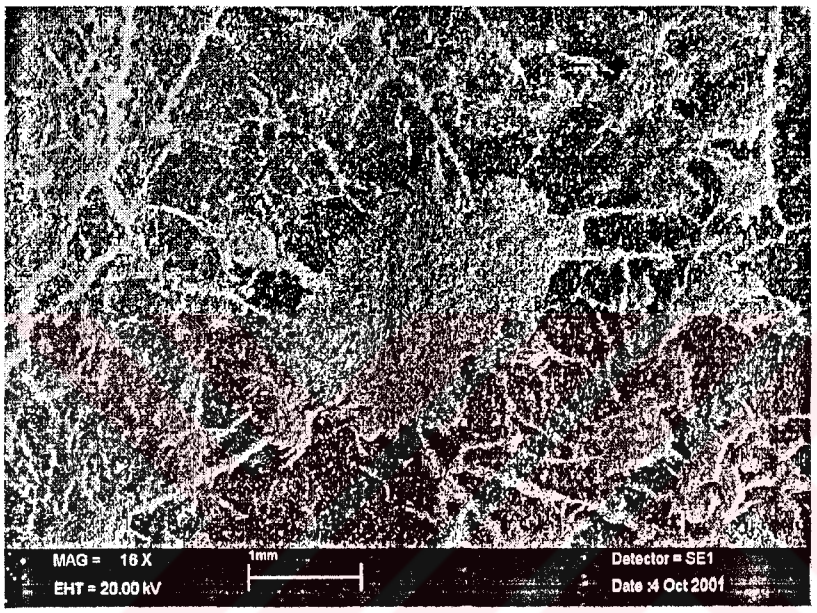


Şekil 7.14. 10 Dakikada Aşındırılan Yüzeyin Görüntüsü



Şekil 7.15. 20 Dakikada Aşındırılan Yüzeyin Görüntüsü

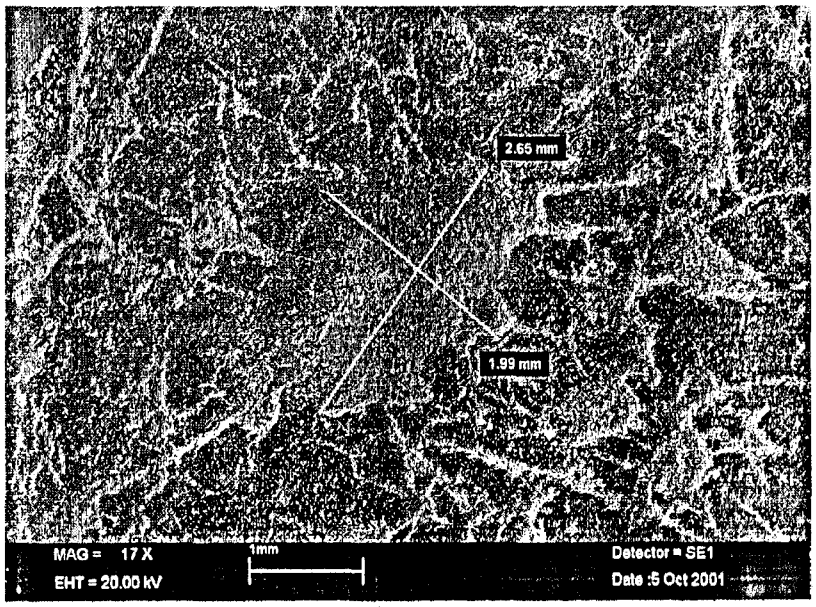
Ayrıca bu krater etrafında daha önce görülen çizikler biraz daha derinleşip uzamıştır. Aşındırma süresinin artışı ile birlikte yüzeyde meydana gelen çiziklerin üzerinde boyları daha kısa ve numune merkezinde oluşmuş aşınma kraterine doğru uzanan düşük derinlikli ikincil çizik kollarının oluştuğu belirlenmiştir. Bu durum 30 dakikalık aşındırma sonunda alınan yüzey görüntüsünden görülebilir (Şekil 7.16).



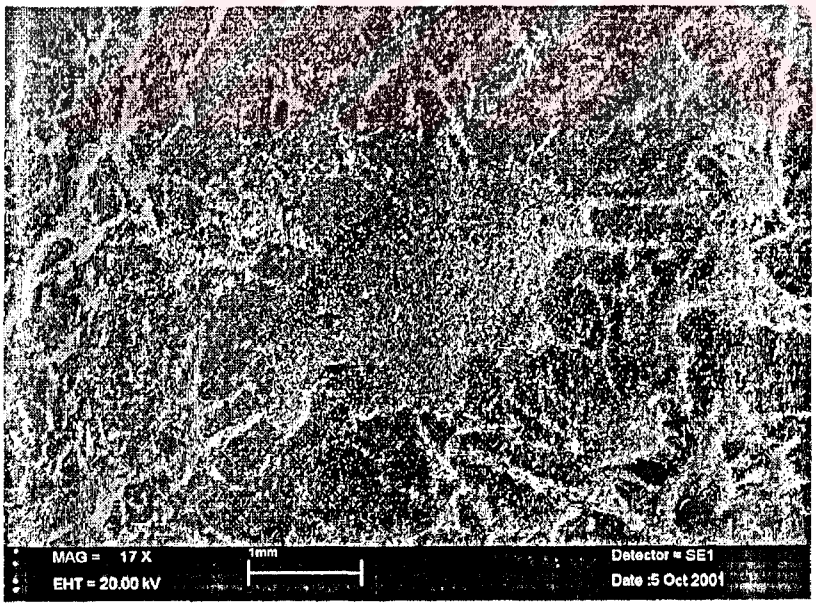
Şekil 7.16. 30 Dakikada Aşındırılan Yüzeyin Görüntüsü

40 dakika sonunda bir önceki yüzey baz alındığında daha önce oluşan ana çatlaklar ve merkez kratere doğru uzanan kısa çatlak kollarının derinleşerek kalınlıklarının arttığı görülmüştür. Merkez kraterin çapı yaklaşık 2,6 mm' ye çıkarak bağıl olarak derinliği de artmıştır (Şekil 7.17).

50 dakika sonunda yüzey merkezindeki kraterin çıplak gözle rahatlıkla görülebilecek kadar derinleştiği ve tüm yüzeydeki çatlakların derinlik ve kalınlıkları bir öncesi duruma göre daha da arttığı tespit edilmiştir (Şekil 7.18).

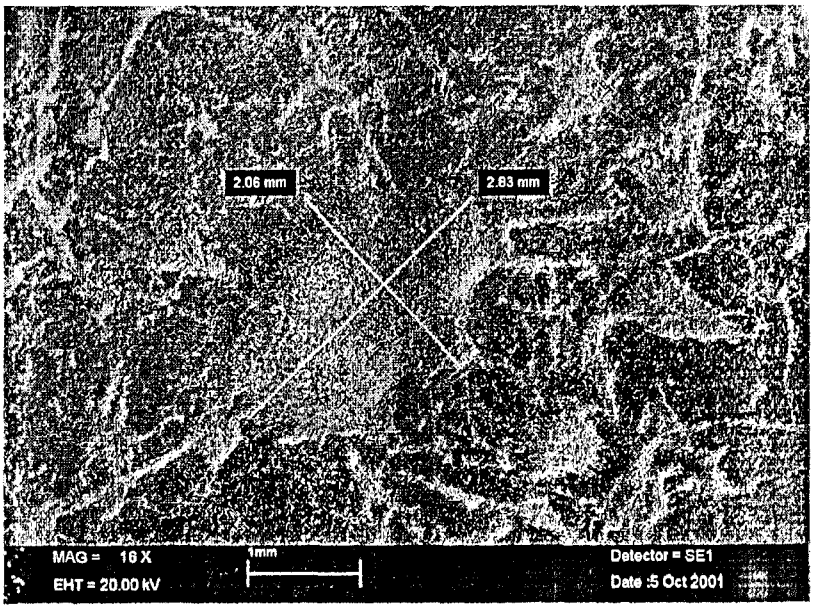


Şekil 7.17. 40 Dakikada Aşındırılan Yüzeyin Görüntüsü



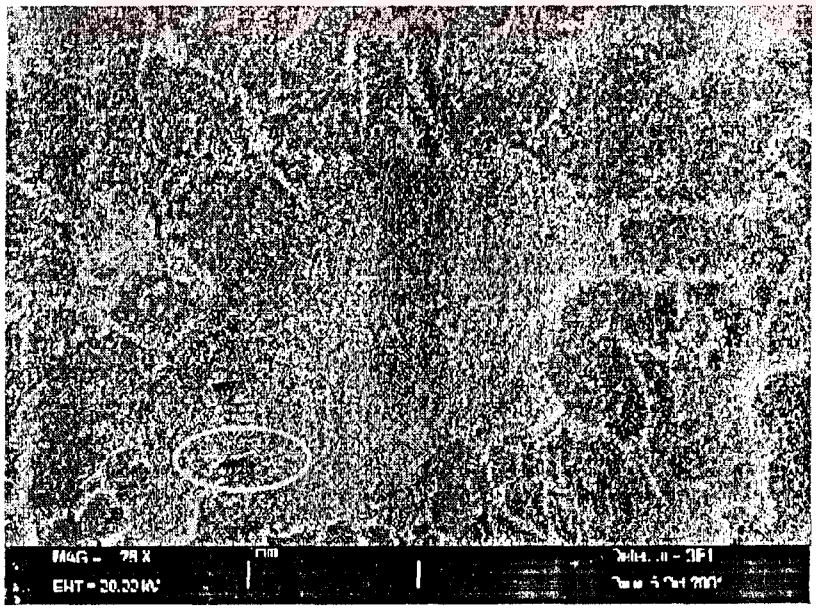
Şekil 7.18. 50 Dakikada Aşındırılan Yüzeyin Görüntüsü

60 dakika sonunda ise aşınmanın ilerleyiş şekli önceki kademelere benzer nitelikte olmuştur (Şekil 7.19).

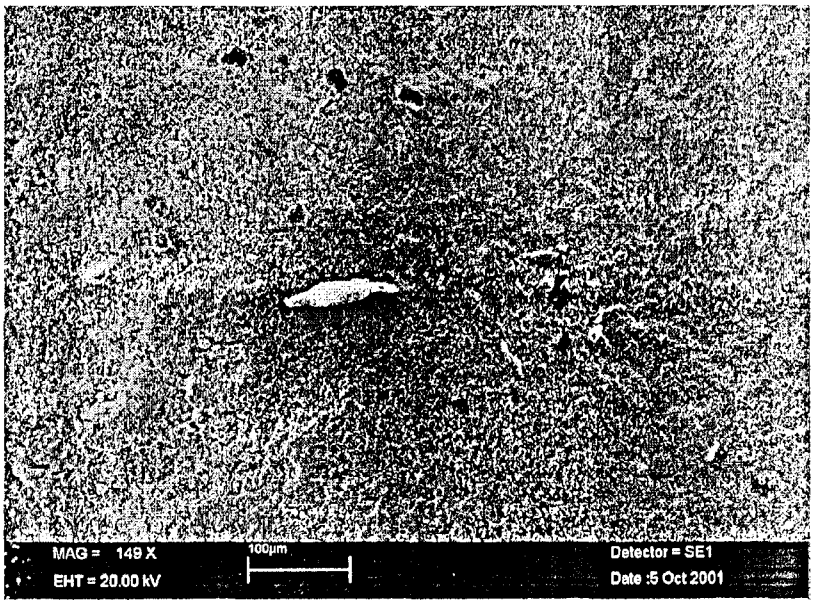


Şekil 7.19. 60 Dakikada Aşındırılan Yüzeyin Görüntüsü

Bunun yanında, yüzey üzerine saplanmış irili ufaklı bazı katı cisimlere rastlanmıştır (Şekil 7.20-21).

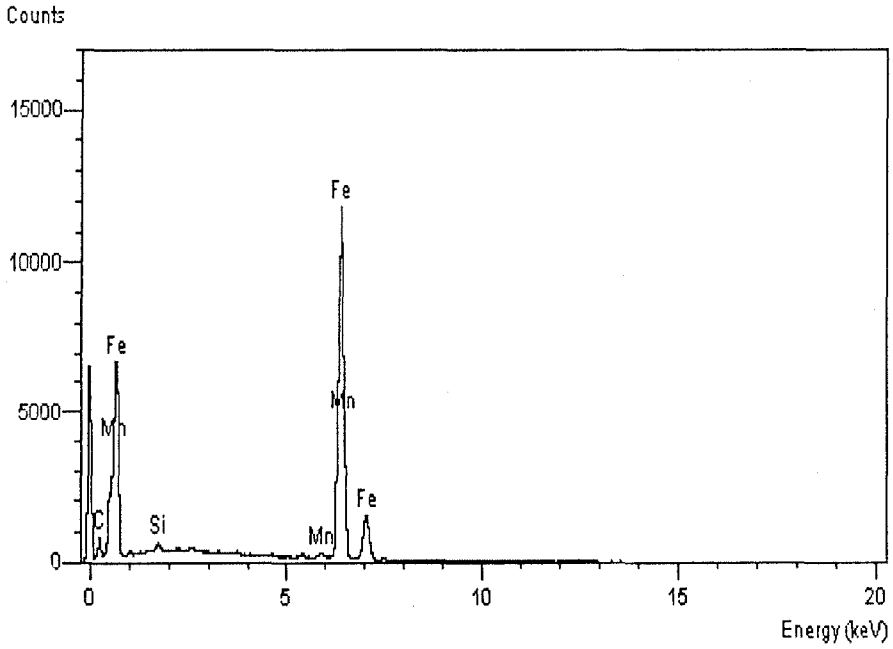


Şekil 7.20. Borlanmış Yüzeye Saplanan Grit Partikül



Şekil 7.21. Grit Partikül ve Çevresinin Detay Görüntüsü

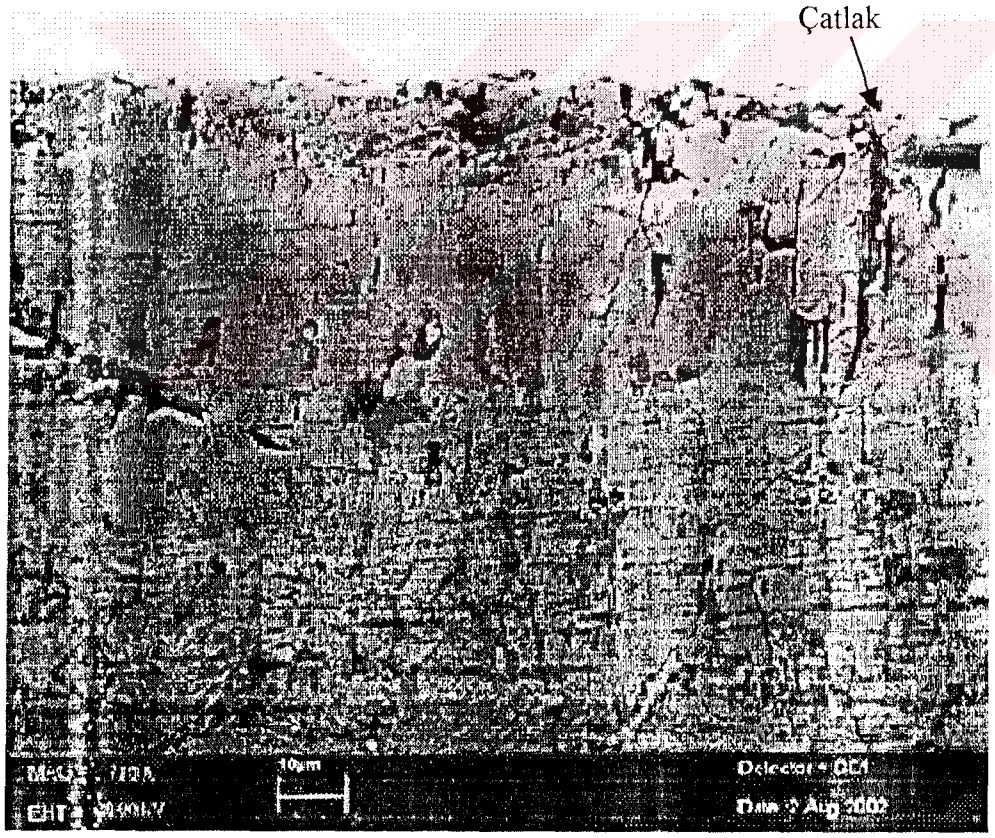
Bu katı cisimlerin EDX analizleri neticesinde eroziv aşınma deneylerinde kullanılan G-40 grit partiküller olduğu sonucuna varılmıştır (Şekil 7.22). Aşındırma deneylerinde kullanılan partiküllerin boyutları nominal 420 µm olması itibari ile bu boyut değerinden daha küçük olan birtakım katı partiküllerinde borlanmış yüzeye yapıştığı tespit edilmiştir. Bunların EDX analiz sonuçlarında grit partiküller için önceden alınan analiz neticeleri ile karşılaştırılması sonucu en küçüğü yaklaşık 50 µm boyutunda olan bu cisimlerin yüzeye



Şekil 7.22. Saplanmış partikülün EDX analizi

yüksek hızda çarpan grit partiküllerin parçalanması sonucu yüzeyde kalan kısımları oldukları sonucuna varılmıştır. Erozyona maruz kalan yüzey üzerinde oluşan krater ve çatlaklar dışında kalan bölgelerde ise malzeme kaybının olduğu yönde intiba bırakacak bir yapı gözlenmemiştir. Ancak aşınmanın bu alanlarda çok az olması ihtimali büyüktür. Buna neden olarak bu alanlarda, çarpan katı partiküllerin yüzey pürüzlülüğünü azaltması sonucu parlaklaşma sağlamasının etkili olduğu düşünülmektedir.

Aşındırma sırasında borlanmış çelik yüzeyinde çizik olarak adlandırılan oluşumların yapı itibari ile çatlak karakteri taşıdığı, borlanmış yüzeyin üstten çekilmiş görüntüleri (Şekil 7.14-20) yanısıra aşındırma işlemi sonunda numunede yapılan eninekesit incelemesi sonrasında belirlenmiştir (Şekil 7.23). Bu durum, yüzeydeki bor tabakasının aşındırma işlemi sırasında çatladığını göstermektedir.



Şekil 7.23. Aşındırma sırasında çatlayan bor tabakasının mikrokesit görüntüsü

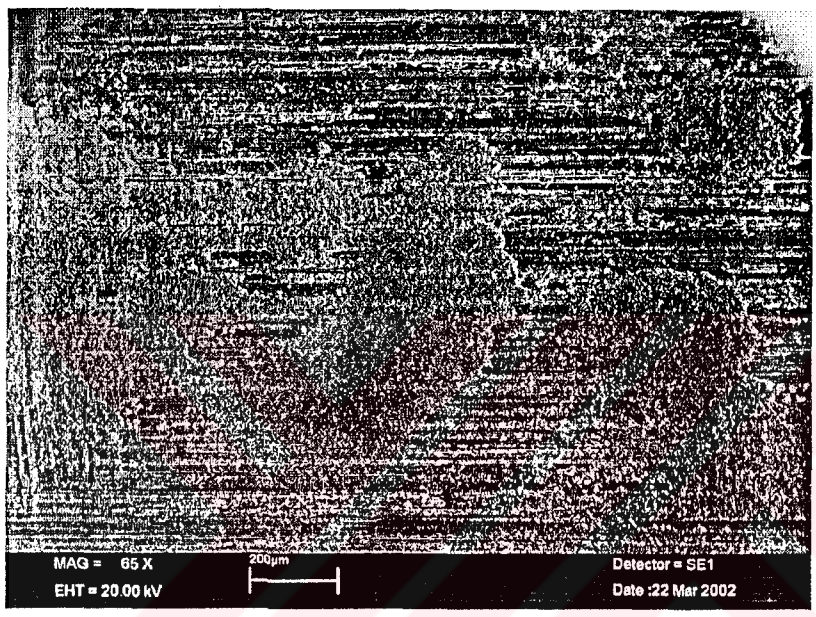
Dik çapma açısında borlanmış yüzeyin merkez ve yakın çevresinde en yüksek erozyon hasarı meydana gelmektedir. Bu durum nozuldan çıkıp yüzey merkezi civarına çarpan partiküllerin en yüksek hıza sahip olduklarını göstermektedir. Merkez ve yakın çevresi dışında numune kenarlarına doğru gidildikçe çatlak sayısı artmaktadır. Krater yapısında oluşumlara ise rastlanmamaktadır. Bu durum, nozulun merkezinden kenara doğru gidildikçe partikül hızının ve dolayısı ile kinetik enerjisinin azaldığını ya da nozul kenarlarından çıkan partiküllerin numune yüzeyine eğik açıda çarptığını göstermektedir. Metalografik incelemede bor tabakası kalınlığının numune merkezine yaklaştıkça artış gösterdiği tespit edilmiştir. Dolayısıyla merkez civarında tabakanın ince olmasından ötürü çabuk aşınıp tükenerek direnç sağlamamış olması çok zayıf bir ihtimaldir. Deneysel veriler ve yüzey görüntülerinden elde edilen bulgulara dayanarak borlanmış AISI 3315 çeliğinde dik çarpma açılarında eroziv aşınma davranışı aşağıdaki şekilde karakterize edilmiştir:

- Borlanmış yüzeyden malzeme kaldırılması, numune merkezinde oluşan krater ve birincil ve ikincil çatlaklardan olmaktadır. Geriye kalan bölgelerdeki malzeme kaybı çok daha düşüktür.
- Merkezdeki krater derinliği dikkate alındığında bor tabakası merkez civarında süratli bir şekilde tükenir.
- Borlanmış yüzey üzerine çarpan partiküllerin bir kısmı yüzeye saplanarak ve yahut da parçalanarak yüzeyde kalmaktadır. Ancak bu olay malzemede ağırlık yönünden aşırı bir artış meydana getirmez.
- Katı partikül erozyonuna maruz borlanmış yüzey üzerinde oluşan çatlakların arasında bazı bölgelerde katı partiküllerin yinelenen darbe etkisi ile parlatma tesiri yapması neticesinde pürüzlülük değerlerinin azalması sonucu çok az miktarda malzeme kaldırma işlemi meydana gelmiştir.

7.5.1.3. Borlanmış AISI 1390 Çeliğinin Eroziv Aşınma Davranışının İncelenmesi

Borlanmamış ancak normalize edilmiş AISI 1020, 3315 ve 1390 çeliklerinin eroziv aşınma testlerinden elde edilen sonuçlara göre en az aşınma borlanmış AISI 1390 çeliğinde meydana gelmiştir. Bunun sebebi AISI 1390 çeliğinin yüksek karbonlu ve perlitik bir bünyede olması ve yüzey sertliğin AISI 1020 ve 3315 çeliklerine göre daha yüksek oluşundan ileri gelir.

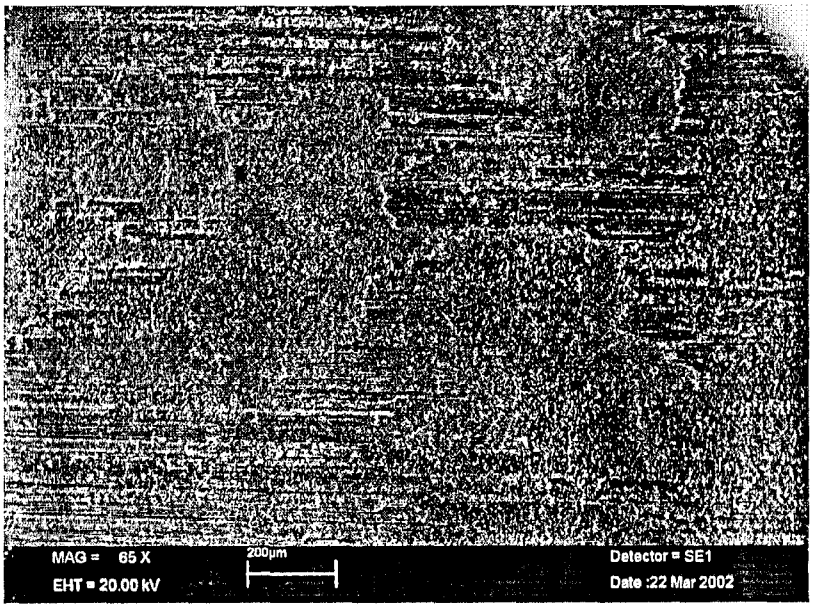
Bu çalışmada, 950 ^{0}C'de 5 saat Borlanmış AISI 1390 çelik numune kullanılmıştır. Çeliğin aşınma yüzeyinden, altmış dakika aşındırma süresince onar dakika aralıklar ile çekilen görüntüler aşağıda verilmiştir. Diğer borlanmış çeliklerde olduğu gibi aşındırma işlemleri aynı şartlarda gerçekleştirilmiştir. Katı partikül darbelerine maruz kalan yüzeyde, borlanmış AISI 1020 çeliğindekine benzer karakterde, oyuk oluşumlarının başladığı gözlenmiş ve bu oluşumlar yüksek büyütme yapılarak daha yakından incelenmiştir (Şekil 7.24-29).



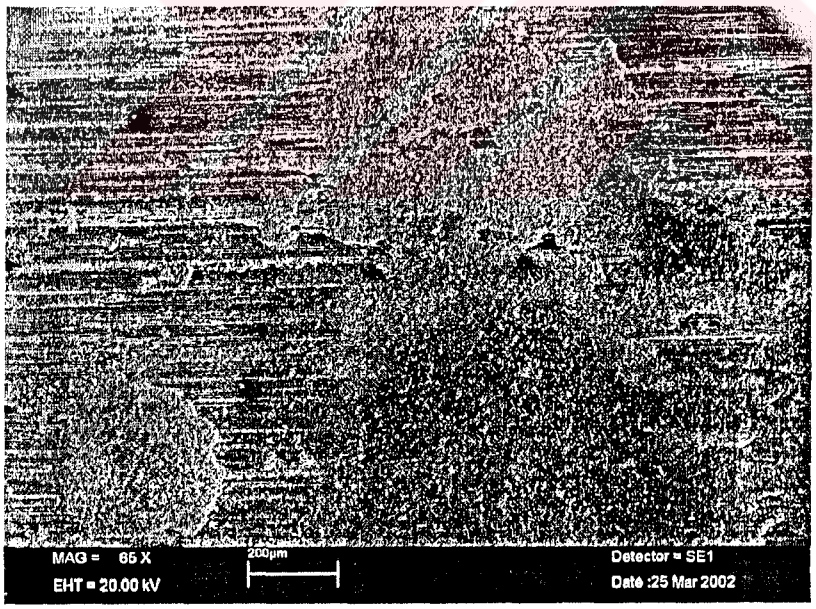
Şekil 7.24. 10 dakikada aşındırılan yüzeyin görünümü

Aşınmanın ilerleme mekanizması öncelikle hafif derinlikte malzeme yüzeyinde bölgesel oyukların oluşması ve aşınma süresi ilerleyişine paralel olarak bu oyuklardan malzeme kaldırılması şeklindedir.

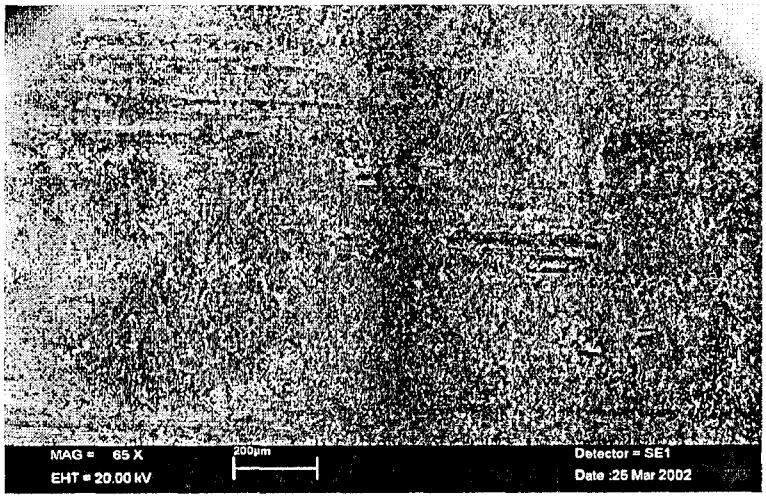
Aşınma oyuklarının sığ olmasının nedeni AISI 1390 çeliğinin çekirdek kısmının daha sert ve plastik deformasyon kabiliyetinin düşük olmasından ileri gelebilir. Çünkü yüzeye püskürtülen partiküller yukarıdaki nedenden dolayı geri sıçrayarak çarpma enerjisini bir miktar kaybeder. Borlanmış numunenin temizleme işleminden kalan yüzey çiziklerinin yüksek hızda grit partiküllerin çarpması etkisi ile daha pürüzlü bir yüzeye sebep olduğu ve bu yüzeye çarpan partiküllerden bir kısmının saplanarak yüzeyde kaldıkları düşünülmektedir (Şekil 7.26).



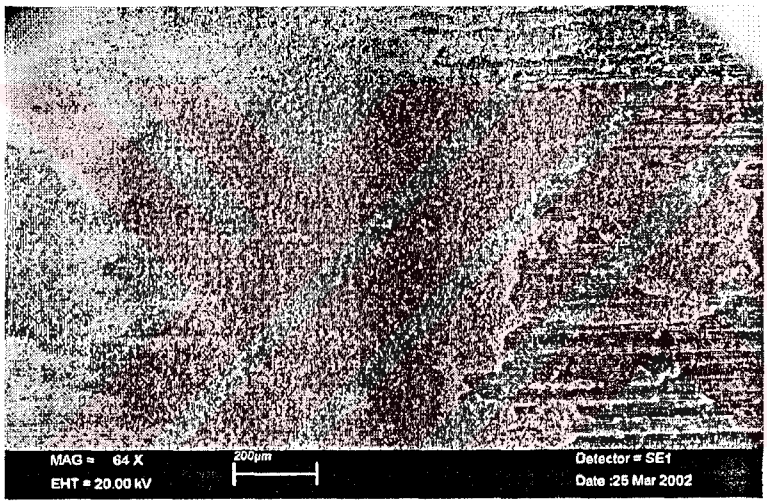
Şekil 7.25. 20 dakikada aşındırılan yüzeyin görüntüsü



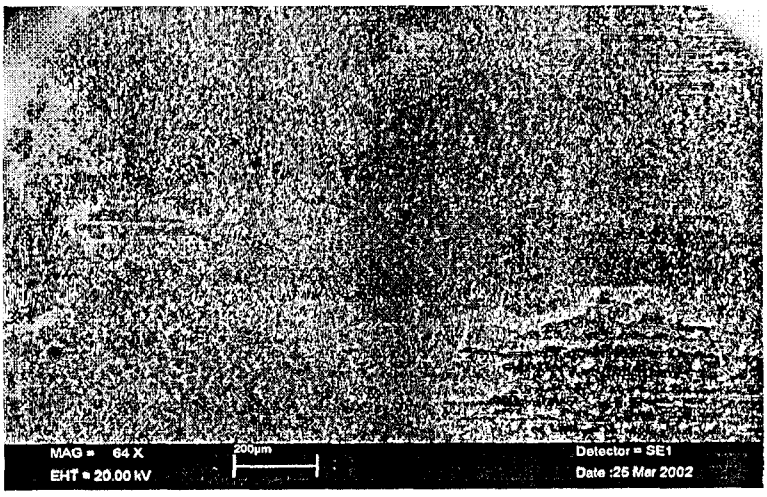
Şekil 7.26. 30 dakikada aşındırılan yüzeyin görüntüsü



Şekil 7.27. 40 dakikada aşındırılan yüzeyin görüntüsü



Şekil 7.28. 50 dakikada aşındırılan yüzeyin görünümü



Şekil 7.29. 60 dakikada aşındırılan yüzeyin görünümü

7.5.2. Aşınma Miktarlarının Değerlendirilmesi

7.5.2.1. Borlama Süresinin Eroziv Aşınma Miktarına Etkileri

Şekil 7.30'dan da görüldüğü gibi eroziv aşınma miktarı borlama süresinin artışı ile genel olarak dalgalı bir değişim seyretmiştir. Bunun sebebi şunlar olabilir: (1). Malzemenin homojen bir iç yapıya sahip olmaması, (2). Borlama işleminde ısıtma ortamının homojen olmaması (3). Meydana gelen bor tabakasının üniform kalınlıkta olmaması (4). Püskürtmenin saçılarak gerçekleşmesi

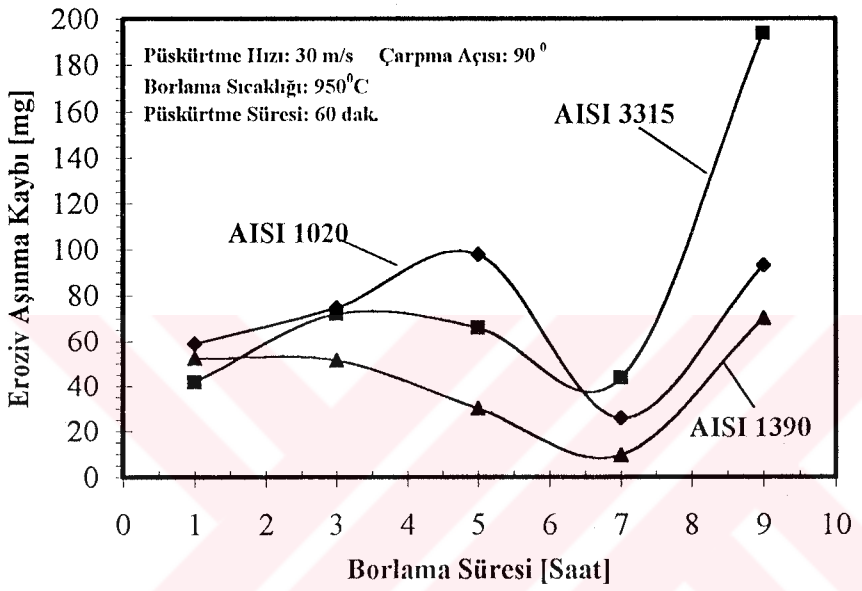
Borlama süresinin artışına bağlı olarak AISI 1020 çeliğinin aşınma miktarı 5 saate kadar arttıktan sonra azalarak 7 saatte minimum değerine ulaşmış ve 9 saat için ani bir artış göstermiştir. AISI 3315 çeliğinin aşınma miktarı ise 3 saat noktasına kadar arttıktan sonra 3-7 saat arasında genel bir azalma göstererek bu noktadan sonra hızlı bir şekilde artmıştır. AISI 1390 çeliğindeki aşınma 1-7 saat arasında azaldıktan sonra 9 saat noktasında ani bir artış göstermiştir.

Yapılan incelemede her üç çeliğin minimum aşındığı borlama süresinin 7 saat olduğu görülür.

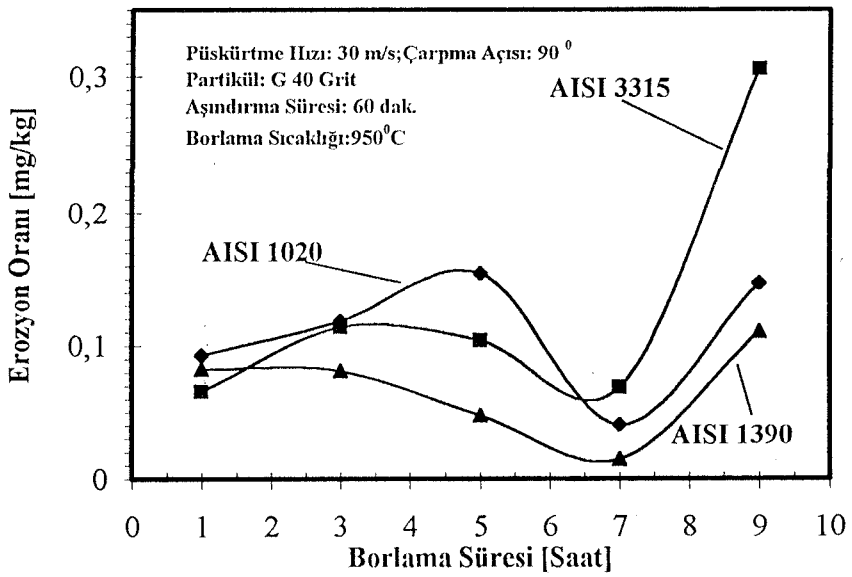
Daha önce verilen Şekil (6.33)'den de görüleceği gibi AISI 1020 çeliği için en yüksek bor tabakası kalınlığı bu sıcaklıkta elde edilmiştir. Seçilen borlama şartları için, AISI 1020 çeliğinde, derin ve sık dokulu bir morfolojik yapıda bor dişleri olan borür tabakalarının kalınlığı, borlama süresine bağlı olarak artarak bu noktada en yüksek değerlerine ulaşmıştır. Şekil 6.35'de verilen sertlik değerleri her üç çelik için 1-7 saat arasında artarak 7 saat noktasında maksimum (2100 HV) olduktan sonra ani bir düşüş (1410 HV) göstermiştir. Bu borlama şartları altında (950 ^{0}C'de 7 saat) oluşan bor tabakasının daha kalın ve sertliğinin diğer şartlarda oluşanlara göre yüksek oluşu eroziv aşınmaya karşı en düşük aşınma davranışı sergilemesine neden olduğu düşünülmektedir.

AISI 3315 çelik yüzeylerinde oluşmuş borür tabakalarının dişlenme derecesi, AISI 1020 çeliğinde rastlanan tarzdaki gibi yüksek oluşuna rağmen, bor dişleri arasındaki mesafenin daha fazla ve yüzeye dik uzanan bor dişlerinin genel olarak kopuk olması, erozyon davranışı üzerinde etkili olmuştur. Aşındırma işlemi esnasında, borlanan numunenin yüzey merkezinde oluşan krater ile birlikte ayrıca makro çatlaklardan aşırı malzeme ayrılması

sebebi ile (Şekil 7.15-18) borlanmış çelik numune, 7 saat noktasında diğer borlanmış çeliklere göre daha fazla aşınmıştır. Makro çatlakların oluşma sebebi ana malzemenin aşırı sünek olması ve bor tabakası dişlerinin seyrek ve aşırı sert olmasından ileri gelen artık yüzey gerilmelerine dayandırılabilir. Şekil 7.30'dan da görüldüğü gibi 9 saatlik borlama noktasında her üç çeliğin eroziv aşınma kaybının ani olarak yükselmesinin nedeni bor tabakası kalınlığı ve mikrosertlik değerlerinin düşmesidir.



Şekil 7.30. Eroziv Aşınma Kaybının Borlama Süresi İle Değişimi

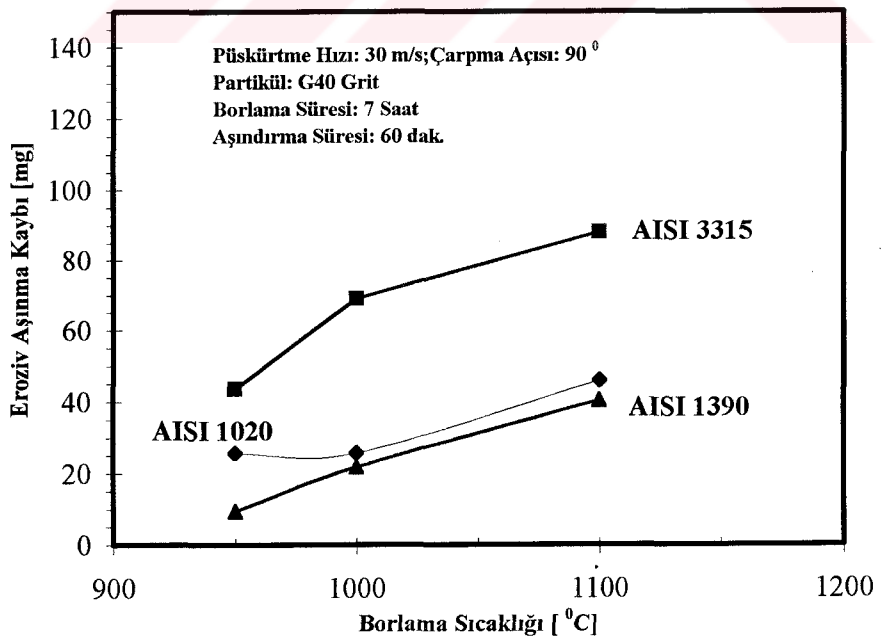


Şekil 7.31. Erozyon Oranının Borlama Süresi ile Değişimi

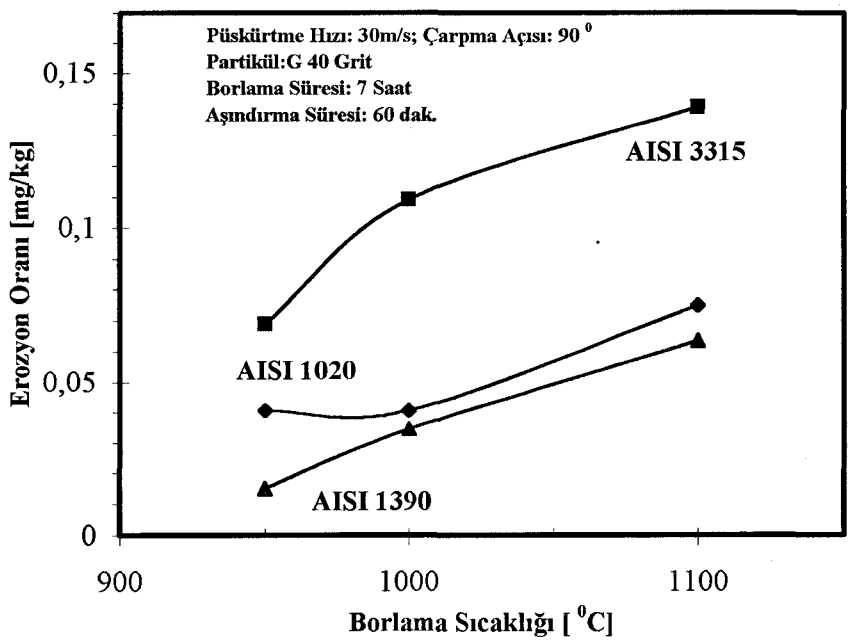
Şekil 7.30'daki aşınma kaybı değerleri püskürtülen toplam aşındırıcı miktarına bölünerek Şekil 7.31'de görülen aşınma oranının borlama süresi ile değişim grafiği elde edilmiştir. Bu grafikteki değişim Şekil 7.30 ile aynıdır. Erozyon aşınmasının değerlendirilmesinde genel olarak eroziv aşınma oranı kullanılmaktadır.

7.5.2.2. Borlama Sıcaklığının Eroziv Aşınma Miktarına Etkileri

Borlama sıcaklığının eroziv aşınmaya olan etkisini anlamak için, üç tür çelikten hazırlanan numuneler, sabit 7 saat sürede 950, 1000 ve 1100 °C'de borlanmalarına müteakip eroziv aşınmaya maruz bırakılmışlardır. Şekil 7.32'de görüldüğü gibi borlama sıcaklığı arttıkça eroziv aşınma kaybı da lineer olarak artmaktadır. Bu artışın nedeni borlama sıcaklığının artışına bağlı olarak borür tabakası kalınlığı (Şekil 6.34) ve bu tabakaların sertliklerinin (Şekil 6.37) azalmasıdır. AISI 3315 çeliğinin diğer iki çelikten daha çok aşınmasının nedeni aşınmaya yüzey çatlaklarının da (Şekil 7.14) iştirak etmesi ve oluşan bor tabakası kalınlığının düşük olmasıdır. AISI 1390 çeliğinin borlama sıcaklığına göre en az aşınan çelik olmasının sebebi, bor tabakasının altında, tabaka açıldıktan sonra bile difüzyon bölgesi kalınlığının sertlik değerlerinin AISI 1020 ve 3315 çeliklerindekinden yüksek olmasıdır (Şekil 6.35).



Şekil 7.32. Eroziv aşınma kaybının borlama sıcaklığına bağlı olarak değişimi



Şekil 7.33. Erozyon oranının borlama sıcaklığı ile değişimi

Şekil 7.33'den de görüldüğü gibi erozyon aşınma oranı borlama sıcaklığının artışı ile yaklaşık lineer bir artış göstermektedir. Çeliklerin aşınma sırası ile AISI 1390, 1020 ve 3315 şeklinde minimumdan maksimuma doğru bir sıralama gösterir. Sonuç olarak sıvı ortamda borlama sıcaklığının artışı bir dezavantaj göstermektedir.

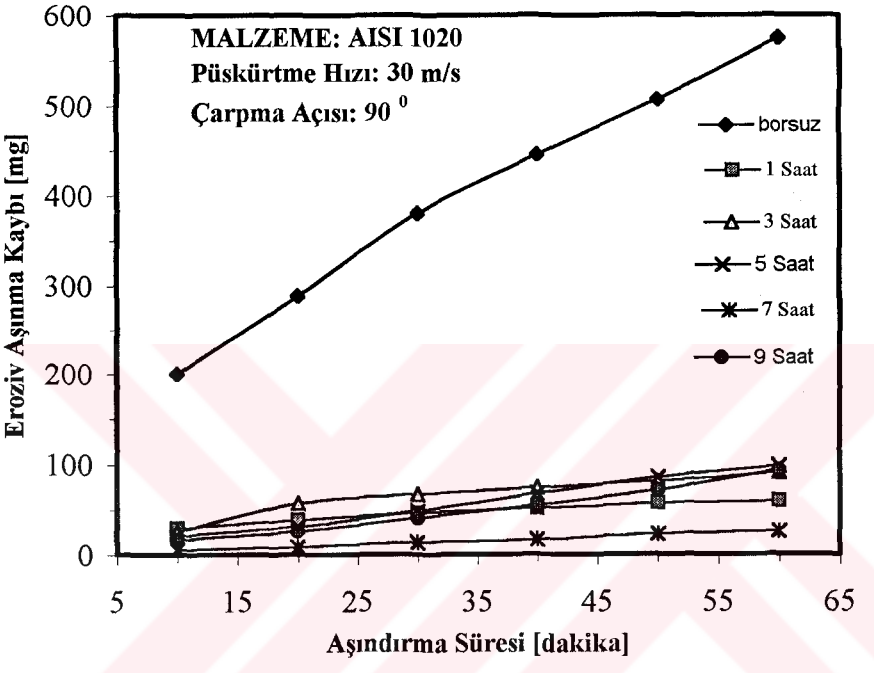
7.5.2.3. Aşındırma Süresinin (Püskürtme Süresi) Eroziv Aşınma Miktarına Etkisi

Deney şartlarında borlanmış ve borlama işlemi görmemiş (normalize edilmiş) AISI 1020, 3315 ve 1390 çeliklerinde meydana gelen erozyonun aşınma süresine bağlı olarak nasıl bir davranış sergilediklerini gözlemlemek maksadı ile aşındırma süresinin başlangıç anından itibaren 5 dakikada bir, her numune ayrı ayrı hassas terazide tartılarak toplam 60 dakikada meydana gelen aşınma kayıpları tespit edilmiş ve bu süreç içinde meydana gelen erozyon oranları hesaplanmıştır. Çeliklerin erozyon oranlarının, borlanmış ve borlanmamış halde aşındırma süresine göre değişim nedenlerine, incelenen üç çelik türü için aşağıda değinilmektedir.

(1) AISI 1020 Çeliğinde

Bu çalışmada borlanmış ve borlanmamış tüm numuneler kullanılmıştır. Aşınma miktarının püskürtme süresine göre değişimi Şekil 7.34'de görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi eroziv aşınma miktarı püskürtme süresinin artışı ile lineer olarak artmaktadır. Sıvı ortamda

borlama işlemi AISI 1020 çeliğine eroziv aşınmaya karşı bir hayli üstünlük kazandırmıştır. Sabit sıcaklıkta (950 °C) 7 saat borlanan numune erozyona karşı en yüksek direnci sergilemiştir. Bunun sebebi, Şekil 6.33 ve 35'den de görüleceği gibi bor tabakası kalınlığının ve sertlik değerinin 7 saatlik borlama süresinde maksimum olmasından ileri gelir.

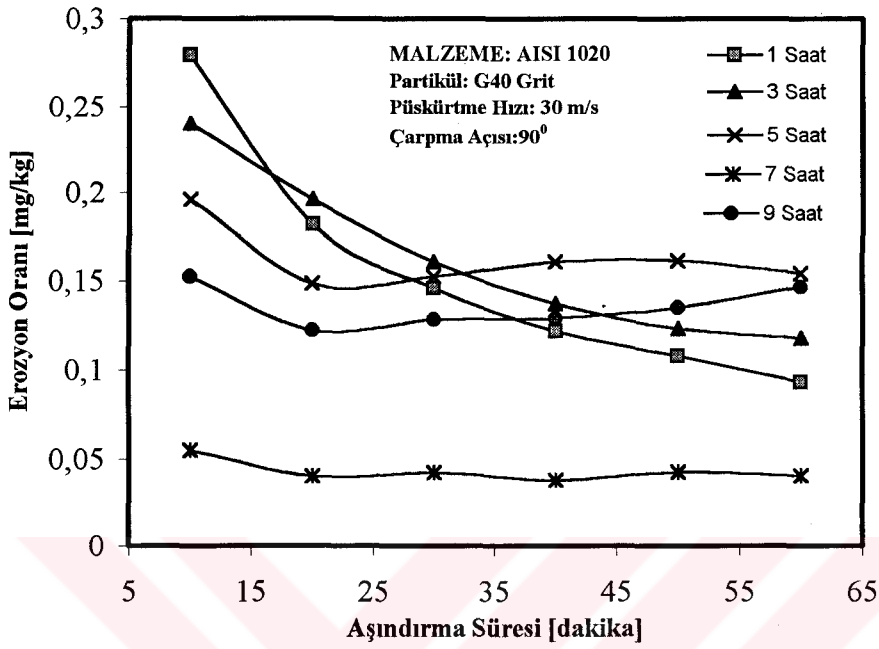


Şekil 7.34. Eroziv aşınma kaybının aşındırma süresi ile değişimi

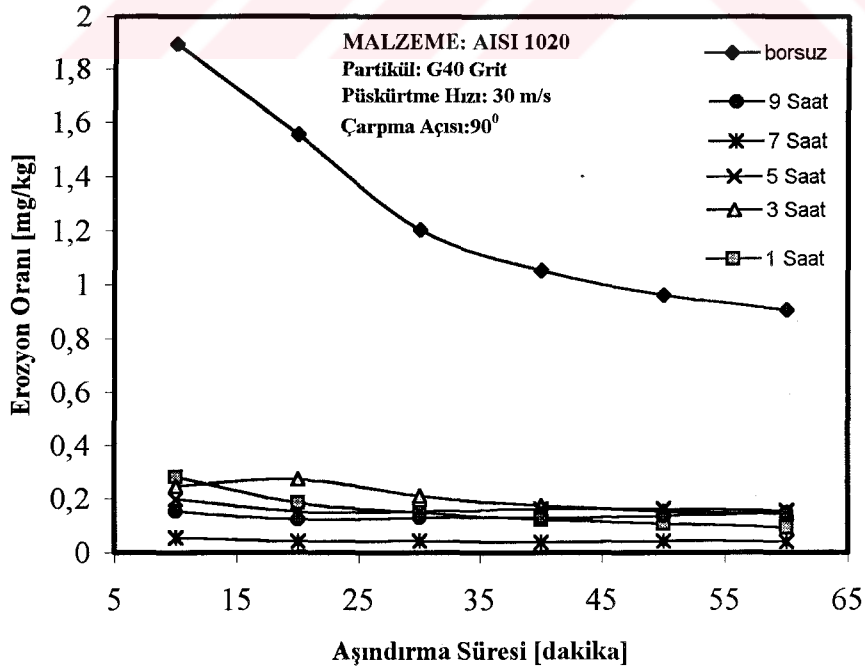
Şekil 7.35'de erozyon oranının püskürtme süresi ile değişimi görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi borlanmış malzemenin aşınma oranı, püskürtme süresinin artışı ile genel bir azalma göstermiştir. Sabit aynı sıcaklıkta 1 ve 3 saat borlanmış numunelerde belirgin bir azalma olmuştur. Yüksek hızda yüzeye çarpan katı partiküllerin yüzeye saplanarak kalmaları sonucu aşınma miktarının olması gerekenden daha düşük tartılması erozyon oranının azalmasına sebep olabilir. Ancak 5 ve 9 saat borlanan numunelerde 10-20 dakika arasında azalma 20-60 dakika arasında ise hafif bir artış vardır. Bunun sebebi Şekil 6.35'den de görüleceği gibi 5 ve 9 saat borlama süresinde AISI 1020 çeliğinde oluşan bor tabakası sertlik değerlerinin düşük olmasından ileri gelir.

Normalize edilmiş AISI 1020 çeliği deney şartlarında erozyona maruz bırakıldığında malzemede meydana gelen erozyon, seçilen borlama parametreleri için aynı çeliğin sıvı

ortamda borlama işlemi sonrası maruz kalacağı erozyon miktarından yaklaşık 9 kat daha yüksek bulunmuştur.

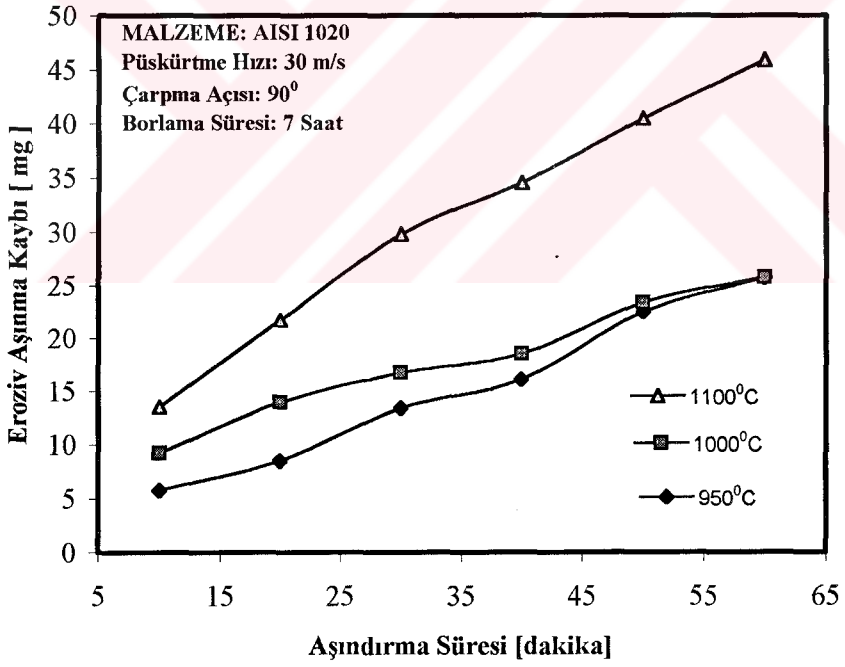


Şekil 7.35. Erozyon oranının aşındırma süresi ile değişimi



Şekil 7.36. Farklı sürelerde borlanmış AISI 1020 çeliğinin aşındırma süresine bağlı olarak erozyon oranının değişimi

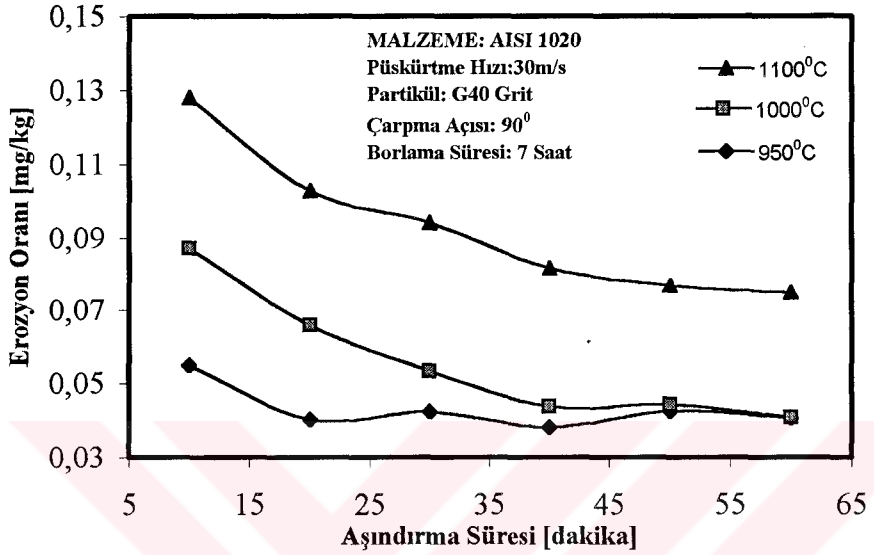
Şekil 7.36'da borlanmamış ve borlanmış AISI 1020 çeliğinin erozyon oranının aşındırma süresi ile değişimi birlikte görülmektedir. Borlanmamış malzemenin aşınma oranı, borlanmış malzemelerin erozyon oranlarından yaklaşık 9 kat daha yüksek bulunmuştur. Hiç borlama işlemi görmeyen normalize edilmiş AISI 1020 çeliğinde aşındırma süresine bağlı olarak daha belirgin bir azalma göze çarpar. Bunun sebebi erozyon aşınma mekanizmasına bağlı olarak sünek AISI 1020 çeliğinin yüksek hızda yüzeye çarpan partiküller tarafından dövülerek pekleşmeye yol açmasından ileri gelebilir. Şekil 7.37, 7 saat süre ile 950, 1000 ve 1100 °C'de borlanmış AISI 1020 çelik numunelerin eroziv aşınma kayıplarının aşındırma süresine bağlı olarak değişimini göstermektedir. Şekilde de görüldüğü gibi aşınma miktarı püskürtme süresinin artışı ile artmaktadır. 950 °C'de borlanan AISI 1020 çeliğindeki aşınma miktarı, 1000 ve 1100 °C'de borlanmış numunelerinin aşınma kayıplarından daha düşüktür. Bunun sebebi bor tabakası kalınlığının (Şekil 6.34) ve sertlik değerinin (Şekil 6.37) sıcaklık artışı ile azalmasıdır.



Şekil 7.37. Farklı borlama sıcaklıklarında eroziv aşınma kaybının aşındırma süresi ile değişimi

Şekil 7.38'de sabit 7 saat sürede borlanan AISI 1020 çeliğinin erozyon oranının aşındırma süresi ile değişimi görülmektedir. Sıcaklık artışı ile birlikte erozyon oranı yükselirken test süresi ilerledikçe azalan şekilde seyretmektedir. Fakat bu azalma 10-30 dakika arasında

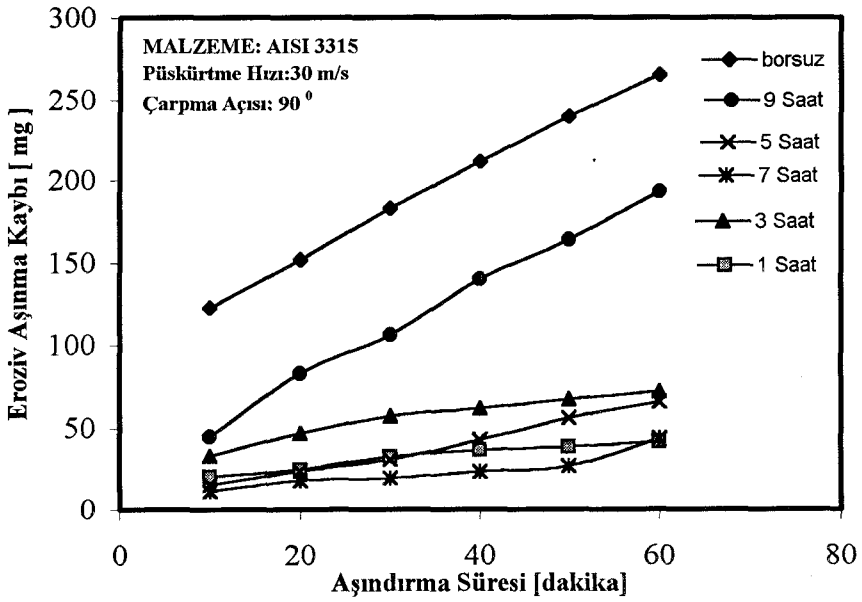
yüksek olup, 30-60 dakika arasında daha düşük seyretmektedir. Bunun nedeni, aşınmanın ilk periyodunda aşınma miktarının yüksek, püskürtülen tane miktarı ağırlığının düşük olmasındandır. Bu duruma aşınmanın ilk anlarında, FeB gibi kırılgan borür fazlarının ve yüzey ile bağlantısı zayıf süreksizliklerin yüzeyden ayrılmasının neden olduğu düşünülmektedir.



Şekil 7.38. 7 saat sabit sürede borlanan AISI 1020 çeliğinde erozyon oranı-borlama sıcaklığı-aşındırma süresi arasındaki ilişki

(2) AISI 3315 Çeliğinde

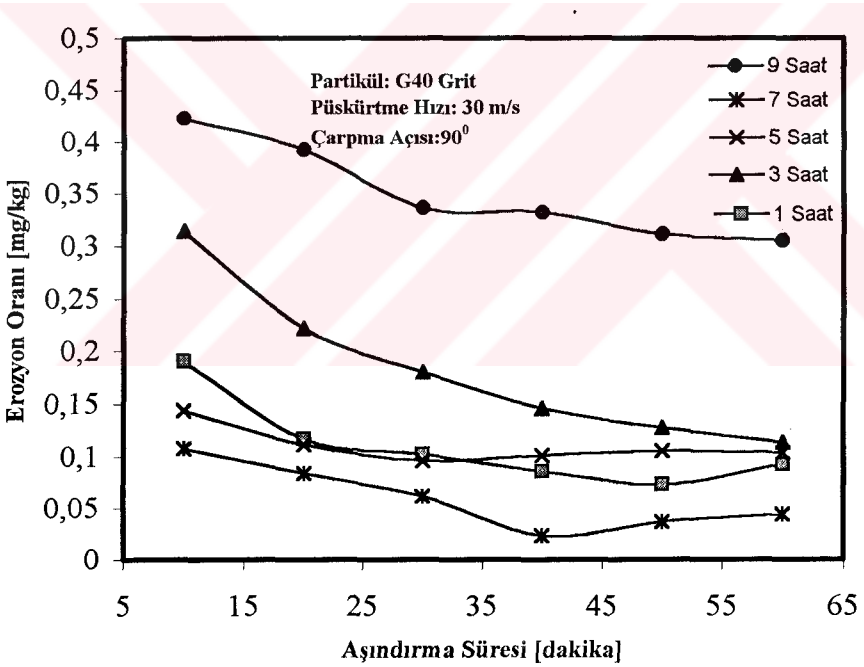
Bu çalışmada borlanmış ve borlanmamış tüm numuneler kullanılmıştır. Aşınma miktarının püskürtme süresine göre değişimi Şekil 7.39'da görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi



Şekil 7.39. Eroziv aşınma kaybının aşındırma süresi ile değişimi

eroziv aşınma miktarı püskürtme süresinin artışı ile lineer olarak artmaktadır. Sıvı ortamda borlama işlemi AISI 3315 çeliğine eroziv aşınmaya karşı üstünlük kazandırmıştır. Fakat 950 °C'de 9 saat borlanan numunenin aşınma miktarı artan süre sonucu borlanan diğer numunelerden daha yüksek olmuştur. Bunun sebebi daha önce verilen Şekil 6.35 den görüldüğü gibi bor tabakası sertlik değerinin minimum olmasından ileri gelir. 7 saatte borlanan numune eroziv aşınmaya karşı en yüksek direnci göstermiştir.

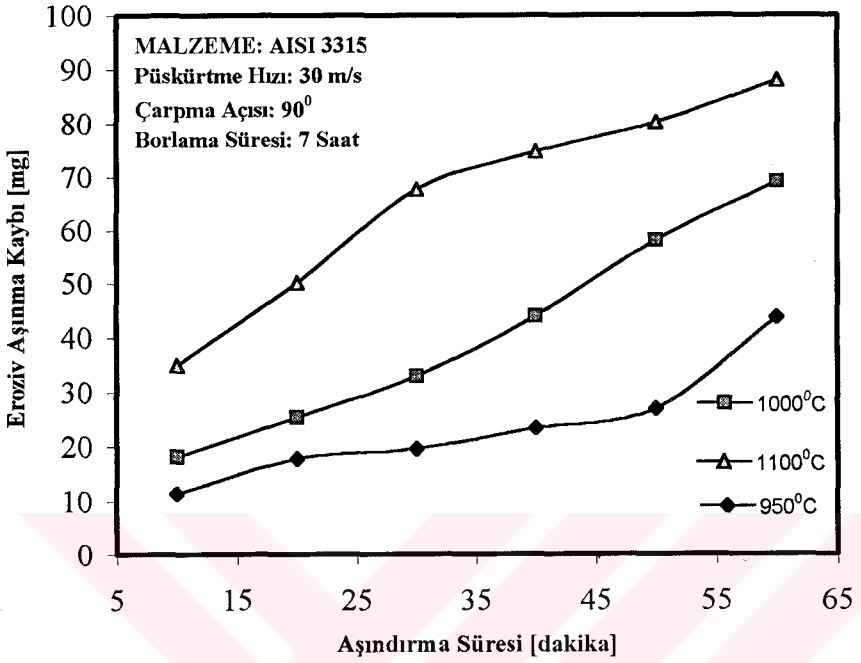
Şekil 7.40'da erozyon oranının püskürtme süresi ile değişimi görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi borlanmış malzemenin aşınma oranı püskürtme süresinin artışı ile genel bir azalma göstermiştir. Aşınma oranı değerleri 1, 3 ve 5 saat borlanmış numunelerde birbirine yakındır. En yüksek aşınma oranı 9 saat borlanan çelikte en düşük aşınma oranı ise 7 saat borlanan numunede görülmektedir.



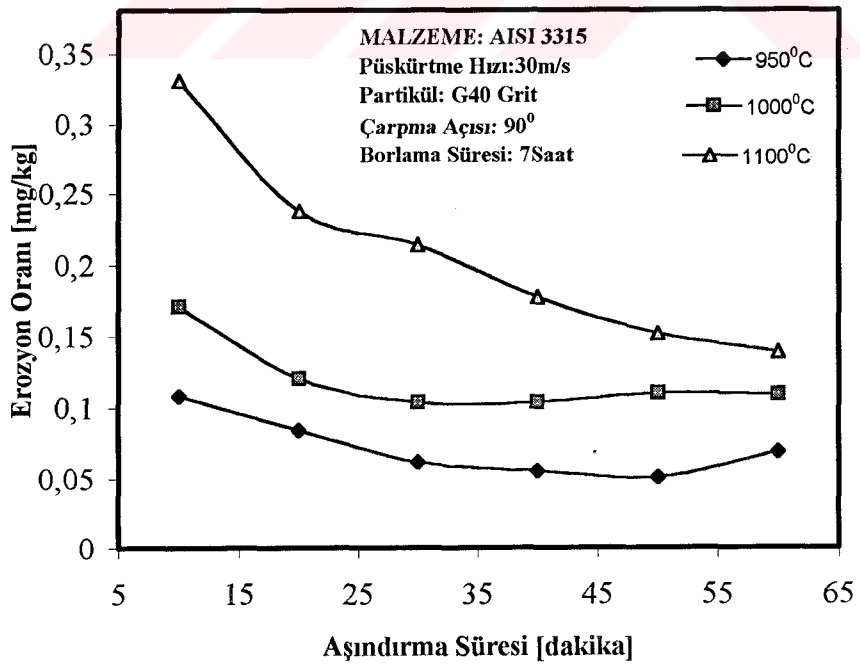
Şekil 7.40. Farklı sürelerde borlanmış AISI 3315 çeliğinin aşındırma süresine bağlı olarak erozyon oranının değişimi

Şekil 7.41, 7 saat süre ile 950, 1000 ve 1100 °C'de borlanmış AISI 3315 numunelerin eroziv aşınma kayıplarının aşındırma süresine bağlı olarak değişimini göstermektedir. Şekilde de görüldüğü gibi aşınma miktarı püskürtme süresinin artışı ile artmaktadır. 950 ve 1000 ve 1100 °C sıcaklıklarında borlanan AISI 3315 çelik numunelerdeki aşınma

miktarları sıcaklık artışı ile birlikte artmaktadır. 1100 ^{0}C'de borlanmış numunenin aşınma kaybı ise maksimumdur. Bunun sebebi bor tabakası kalınlığının (Şekil 6.34) ve sertlik değerinin (Şekil 6.37) sıcaklık artışı ile azalmasıdır.



Şekil 7.41. Farklı borlama sıcaklıklarında eroziv aşınma kaybının aşındırma süresi ile değişimi

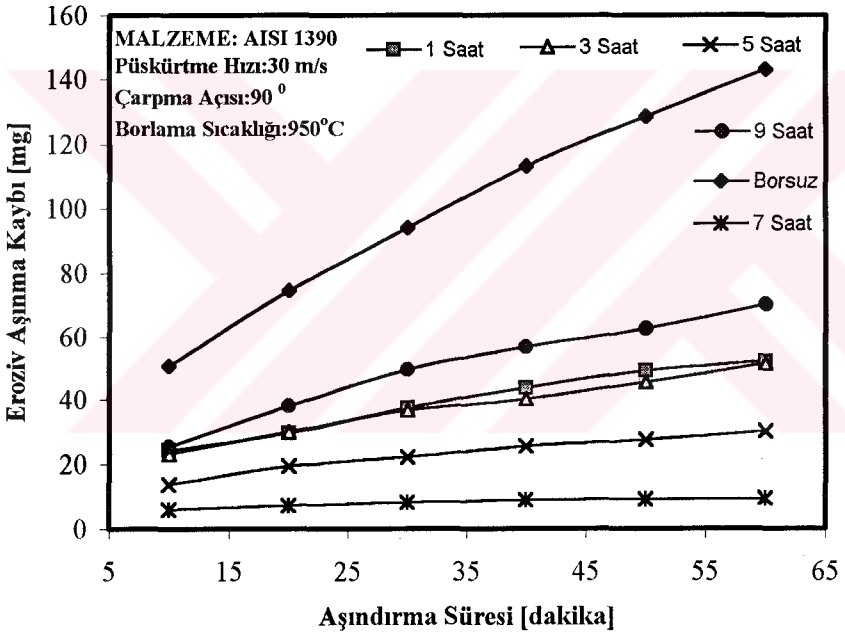


Şekil 7.42. 7 saat sabit sürede borlanan AISI 3315 çeliğinde erozyon oranı-borlama sıcaklığı-aşındırma süresi arasındaki ilişki

Şekil 7.42'de sabit 7 saat sürede borlanan AISI 3315 çeliğinin erozyon oranının aşındırma süresi ile değişimi görülmektedir. Aşındırma süresinin artışı ile birlikte erozyon oranı azalmaktadır. 7 saat sabit borlama süresinde, 950 ve 1000 °C borlama sıcaklıklarında borlanmış numunelerin erozyon oranları birbirine benzer niteliktedir. Borlama sıcaklığı 1100 °C'ye arttırıldığında ise çeliğin erozyon oranı değerleri yükselerek 950 ve 1000 °C'deki erozyon oranlarının birkaç katına çıkmıştır.

(3) **AISI 1390 Çeliğinde**

Bu çalışmada borlanmış ve borlanmamış tüm numuneler kullanılmıştır. Aşınma miktarının püskürtme süresine göre değişimi Şekil 7.43'de görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi



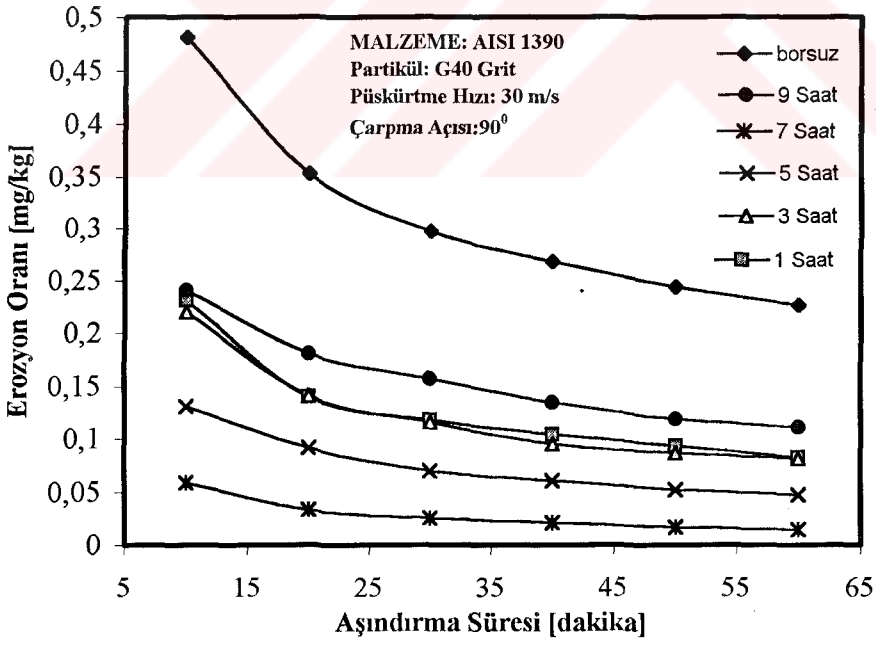
Şekil 7.43. Eroziv aşınma kaybının aşındırma süresi ile değişimi

eroziv aşınma miktarı püskürtme süresinin artışı ile yaklaşık lineer olarak artmaktadır. Sıvı ortamda borlama işlemi AISI 1390 çeliğine eroziv aşınmaya karşı bir hayli üstünlük kazandırmıştır. Sabit sıcaklıkta (950 °C) 7 saat borlanan numune erozyona karşı en yüksek direnci sergilemiştir. Bunun sebebi daha önce verilen Şekil 6.33 ve 35'den de görüldüğü gibi bor tabakası kalınlığının ve sertlik değerinin 7 saat lik borlama süresinde maksimum olmasından ileri gelir.

Şekil 7.44'de erozyon oranının aşındırma süresi ile değişimi görülmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi erozyon oranı aşındırma süresine bağlı olarak azalmaktadır. Bu azalış, AISI 1020 ve 3315 çeliklerindekine benzemektedir.

En düşük erozyon oranı 7 saat borlama şartlarında sağlanmıştır. Aynı sıcaklıkta 5 saat borlanan numune için tespit edilen erozyon oranı ise bu değerden biraz daha yüksek çıkmıştır. 5 ve 7 saat borlama şartları için morfolojik olarak az gözenekli ve katman şekline sahip olan bor tabakasının (Şekil 6.28-29) diğer şartlarda oluşanlara göre en yüksek kalınlık miktarlarına eriştiği tespit edilmiştir (Şekil 6.33).

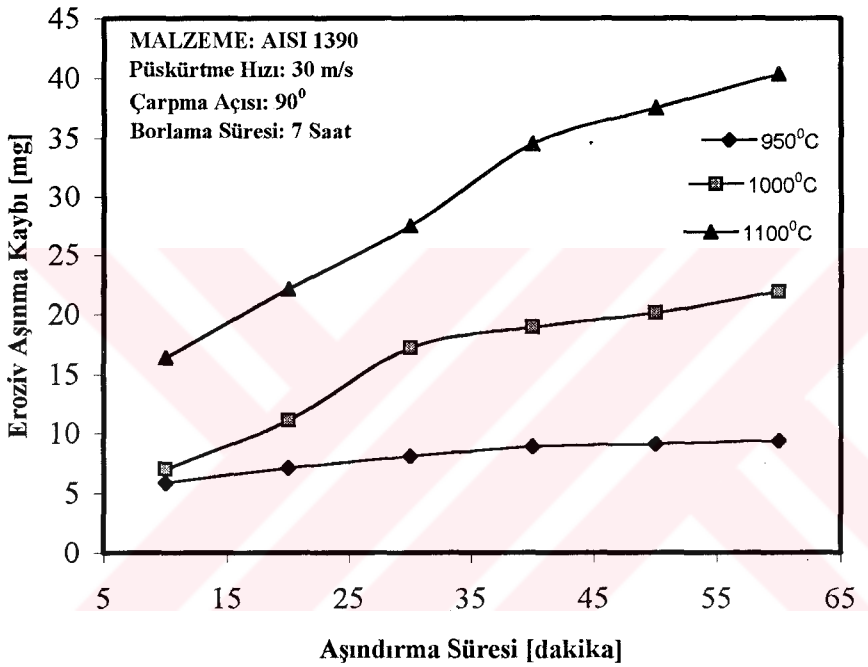
Sertlik açısından bakıldığında ise bu sürelerde 1800-2150 HV arasında değişen sertlik değerine sahip bor tabakalarının (Şekil 6.35) oluşmuş olması diğer borlama şartlarına göre erozyon oranı bakımından en düşük aşınma davranışı sergilemelerine neden olmuştur. Borlanmamış durumda AISI 1390 çeliğinde meydana gelen erozyon oranı, borlanmış olanlara göre yaklaşık 3 kat yüksektir (Şekil 7.44).



Şekil.7.44. Farklı sürelerde borlanmış AISI 1390 çeliğinin aşındırma süresine bağlı olarak erozyon oranının değişimi

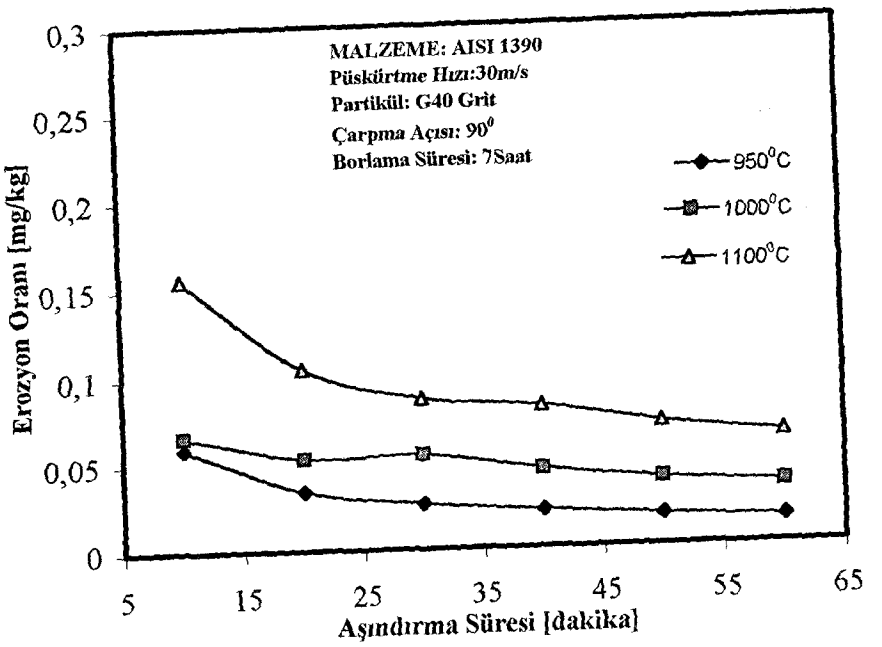
Şekil 7.45, 7 saat süre ile 950, 1000 ve 1100 °C'de borlanmış AISI 1390 numunelerin eroziv aşınma kayıplarının aşındırma süresine bağlı olarak değişimini göstermektedir.

Şekilde de görüldüğü gibi aşınma miktarı püskürtme süresinin artışı ile artmaktadır. 950 °C'de borlanan AISI 1390 çeliğindeki aşınma miktarı, 1000 ve 1100 °C'de borlanmış numunelerinin aşınma kayıplarından daha düşük ve yavaş olmuştur. 1000 ve 1100 °C'de borlanmış numunelerde ise hızlı bir aşınma meydana gelmiştir. En fazla aşınmayı 1100 °C'deki borlanmış numune göstermiştir. Bunun sebebi bor tabakası kalınlığının (Şekil 6.34) ve sertlik değerinin (Şekil 6.36) sıcaklık artışı ile azalmasıdır.



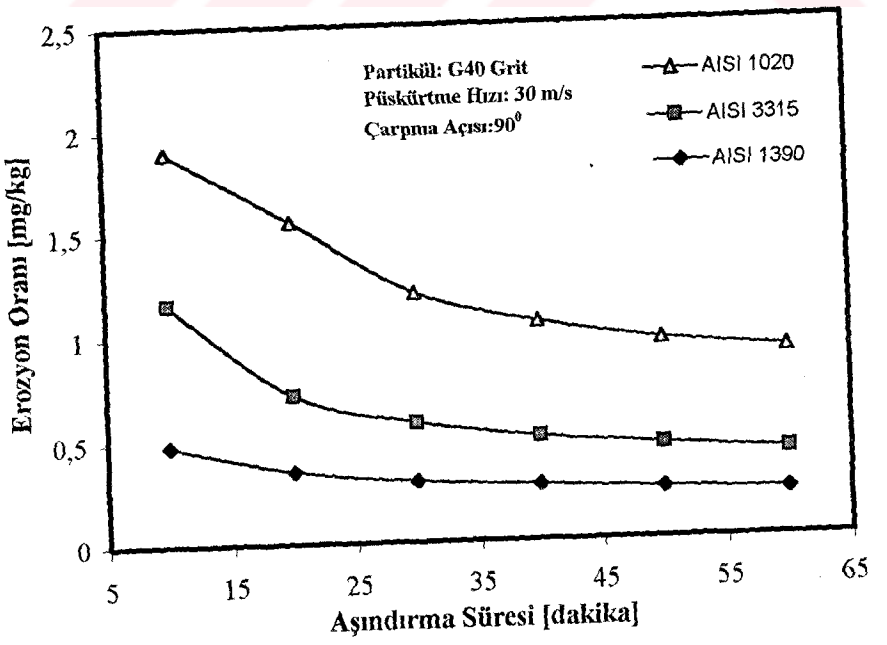
Şekil 7.45. Farklı borlama sıcaklıklarında eroziv aşınma kaybının aşındırma süresi ile değişimi

Şekil 7.46'da sabit 7 saat sürede borlanan AISI 1390 çeliğinin erozyon oranının aşındırma süresi ile değişimi görülmektedir. Sıcaklık artışı ile birlikte erozyon oranı azalmaktadır. Fakat bu azalma 1100 °C'de borlanmış numunede daha hızlı diğer numunelerde daha yavaş seyretmiştir.



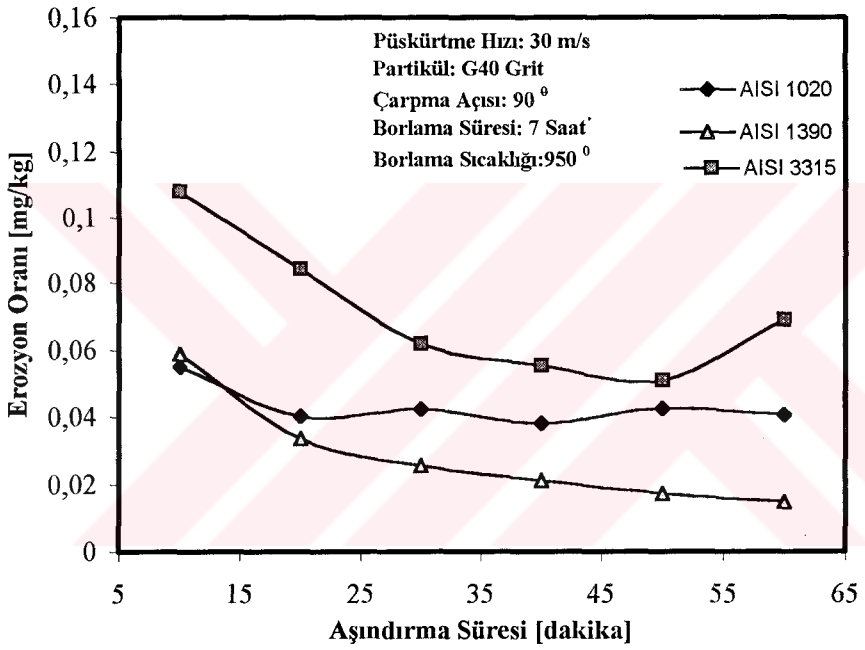
Şekil 7.46. 7 saat sabit sürede borlanan AISI 1390 çeliğinde erozyon oranı-borlama sıcaklığı–aşındırma süresi arasındaki ilişki

Şekil 7.47' den de görüldüğü gibi, borlanmamış fakat normalize edilmiş her üç tür çelikte aşınma oranı püskürtme süresinin artışı ile bir azalma göstermektedir.



Şekil 7.47. Normalize edilmiş fakat borlanmamış üç çeliğin aşındırma süresine bağlı olarak erozyon oranlarının değişimi

Borlanmamış halde AISI 1020 çeliği en yüksek erozyon oranı gösterirken, AISI 1390 çeliği ise en düşük erozyon oranına sahip olmuştur. AISI 3315 çeliğinin erozyon oranı ise AISI 1390 çeliğinin yaklaşık iki katı daha yüksektir. Erozyon oranları bakımından çeliklerin bu tür bir sıralanış göstermelerinin nedeni, içerdikleri Mn oranı ile ilişkilendirilebilir. Mn dövüldükçe çeliği pekleştiren bir alaşım elementidir. Yüksek hızda yüzeye çarpan katı partiküller çelik yüzeylerinde dövme etkisi gerçekleştirmektedir. Çelik bünyesindeki Mn oranı artışı ile erozyon oranı azalmıştır. Mn oranı: AISI 1020 çeliğinde en çok % 0,6; AISI 3315 çeliğinde % 0,9 ve AISI 1390 çeliğinde % 1.9'dur [64].

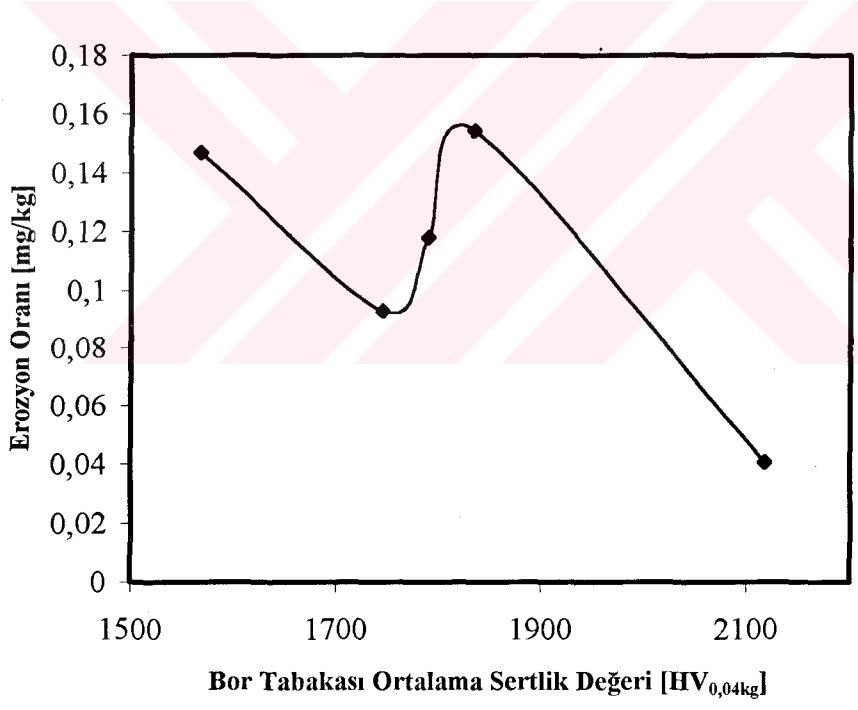


Şekil 7.48. Erozyon oranının aşındırma süresi ile değişimi

Şekil 7.48'de görüldüğü gibi borlanmış haldeki çelik numunelerdeki erozyon oranları 5-30 dakika aşınma süresi arasında azalmaktadır. Borlanmış halde her üç çelikte gözlenen erozyon oranları, genel olarak aşındırma süresi boyunca belirli bir azalış göstermiştir. Borlanmış AISI 3315 çeliği, en yüksek aşınma oranını gösterirken AISI 1390 çeliği en düşük aşınma oranına sahip olmuştur. Borlanmış AISI 1020 çeliğinin davranışı AISI 1390 çeliğine yaklaşmıştır. Daha öncede bahsedildiği gibi, AISI 3315 çeliğinin aşınma oranının yüksek oluşunun sebebi, erozyon mekanizması ile birlikte çatlama mekanizmasının oluşmasıdır.

7.5.3. Ortalama Bor Tabakası Sertliği İle Erozyon Oranının Değişimi

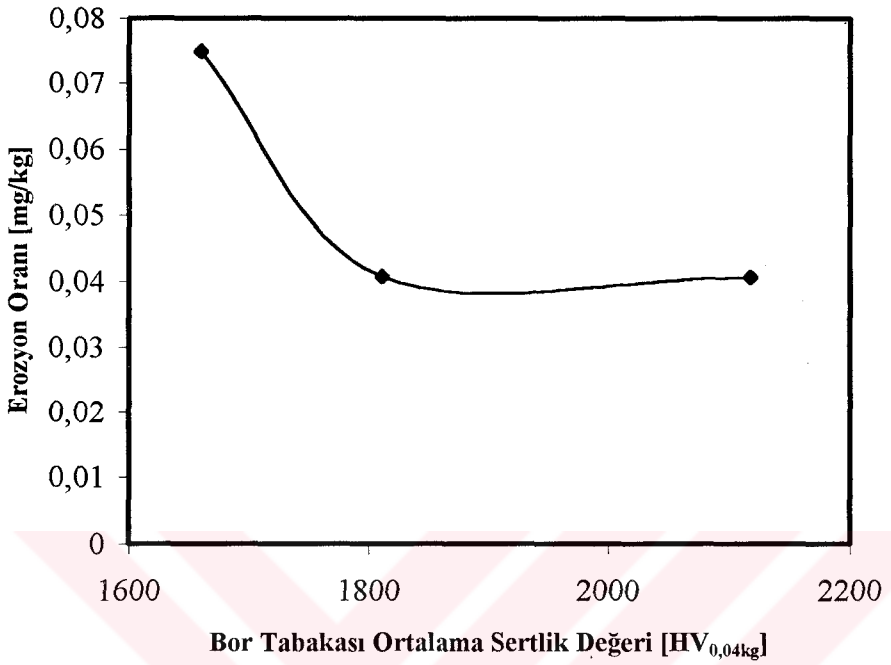
Genel olarak, incelenen borlanmış üç çelik için, bor tabakasının ortalama sertlik değerleri artışı ile birlikte çeliklerin erozyon oranı değerleri azalma göstermektedir. Şekil 7.49'da 950 °C'de 1, 3, 5, 7 ve 9 saat borlanan AISI 1020 çelik numunelerde oluşan bor tabakalarının mikrosertlik taramaları sonucunda tespit edilen ortalama tabaka sertlik değerleri ile çeliğin erozyon oranındaki değişim görülmektedir. Bu çelikte oluşan bor tabakası ortalama sertlik değerleri 1500-2100 $HV_{0,04kg}$ arasındadır. Ortalama bor tabakası sertliği artıkça erozyon oranı azalmaktadır. Ancak, 1700-1900 HV aralığında erozyon oranının yükseldiği görülür. Bu değerler, 1 ve 3 saat sürelerinde borlanmış AISI 1020 çelik numunelerdeki bor tabakalarının ortalama sertlikleridir. Bu aralıkta erozyon oranının ani şekilde yükselmesi, bor tabakası kalınlığının 1 ve 3 saat sürelerinde düşük olmasından (Şekil 6.33) ileri gelmektedir.



Şekil 7.49. Borlanmış AISI 1020 Çeliğinde Ortalama Bor tabakası sertliği ile erozyon oranının değişimi

Sabit 7 saat borlama süresinde 950, 1000 ve 1100 °C'de borlanan AISI 1020 çelik numunelerinde oluşan ortalama bor tabakası kalınlığının erozyon oranı ile değişimi Şekil 7.50'de görülmektedir. Burada ortalama bor tabakası sertlik değerinin artışı erozyon oranını azalmaktadır. 950 °C'de oluşan bor tabakası kalınlığı (Şekil 6.33) ve ortalama

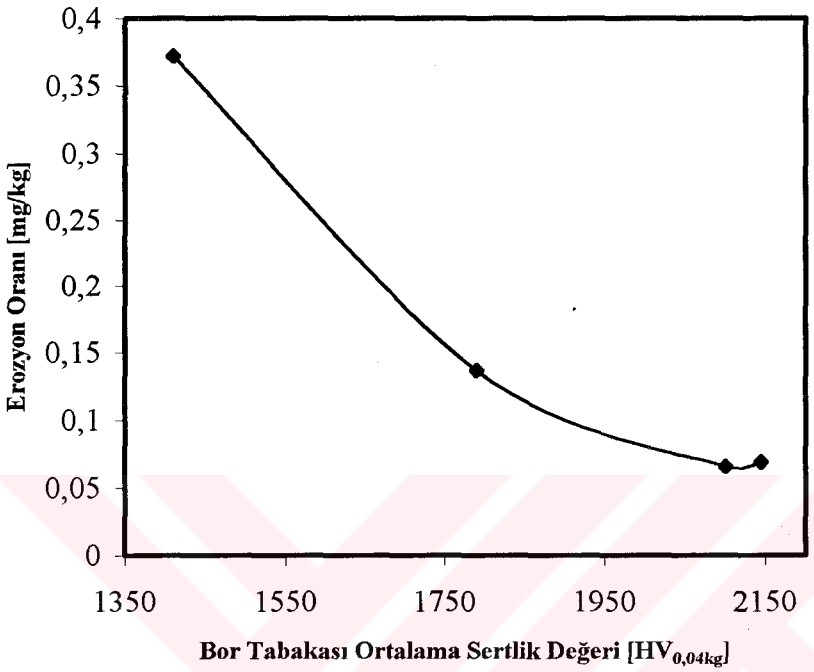
sertlik değeri (Şekil 6.35) diğer iki sıcaklıkta elde edilenlere kıyasla daha yüksektir. Bu durum, çeliğin düşük erozyon oranı sergilemesine ve aşınma direncinin yükselmesine sebep olmaktadır.



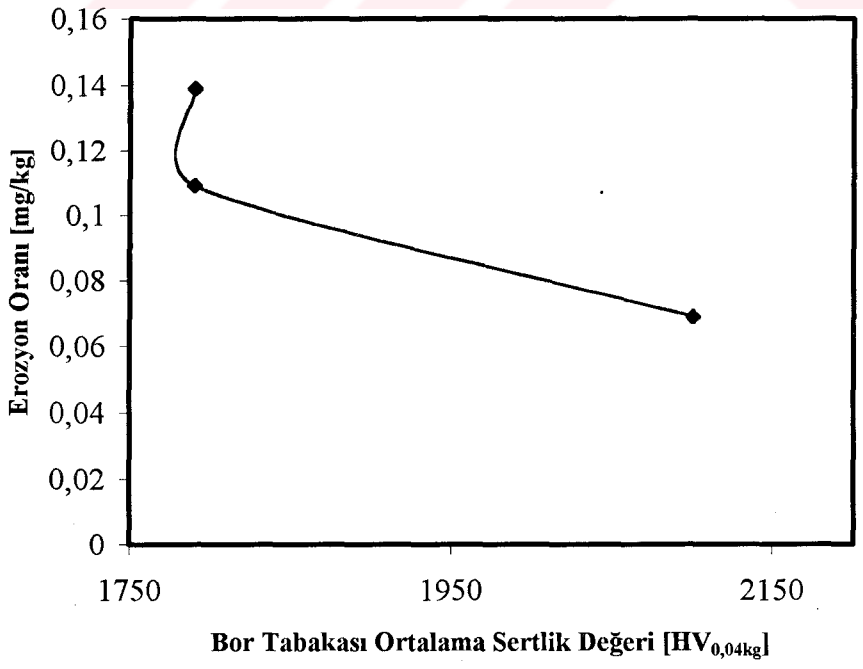
Şekil 7.50. 7 saat sabit sürede borlanmış AISI 1020 çeliğinde ortalama bor tabakası sertliğinin erozyon oranı ile değişimi

Şekil 7.51'de 950 °C'de 1, 3, 5, 7 ve 9 saat borlanan AISI 3315 çelik numunelerde oluşan bor tabakalarının mikrosertlik taramaları sonucunda tespit edilen ortalama tabaka sertlik değerleri ile çeliğin erozyon oranındaki değişim görülmektedir. Bu çelikte oluşan bor tabakası ortalama sertlik değerleri 1410-2145 $HV_{0,04kg}$ arasındadır. Ortalama bor tabakası sertliği artıkça erozyon oranı azalmaktadır. Sabit 7 saat borlama süresinde 950, 1000 ve 1100 °C'de borlanan AISI 3315 çelik numunelerinde oluşan ortalama bor tabakası kalınlığının erozyon oranı ile değişimi Şekil 7.52'de görülmektedir. Ortalama bor tabakası sertlik değerinin artışı erozyon oranını azalmaktadır. 950 ve 1000 °C'de borlanan numunelerin bor tabakası ortalama sertlik değerleri aynı olmakla birlikte 950 °C'de borlanan numunenin erozyon oranının daha düşük olmasının nedeni, bu şartlarda oluşan bor tabakası kalınlığının yüksek olması (Şekil 6.33.b) ve genel olarak diğer borlanmış AISI 3315 çelik numunelerde gözlenen bor dişi aralığı seyrek ve bazen kopuk bor dişleri morfolojik yapısı (Şekil 6.19,20,23,24,25) yerine diş derinliği benzer olmakla birlikte daha sıkı dizilmiş bor dişi dokulu tabaka karakteri taşıması (Şekil 6.22) çeliğe, eroziv aşınmaya karşı daha yüksek bir dayanım kazandırmıştır. Ancak borlanmış AISI 3315 çeliğinin

erozyon oranı üzerinde çatlama mekanizması da etkili olmaktadır. Dolayısı ile borlanmış bu çeliğin eroziv aşınma davranışına, oluşan bor tabakası kalınlığı ve sertliğinin yanısıra bor tabakası morfolojisi ve çatlama mekanizmasının (Şekil 7.23) ortaya çıkması tesir etmektedir.

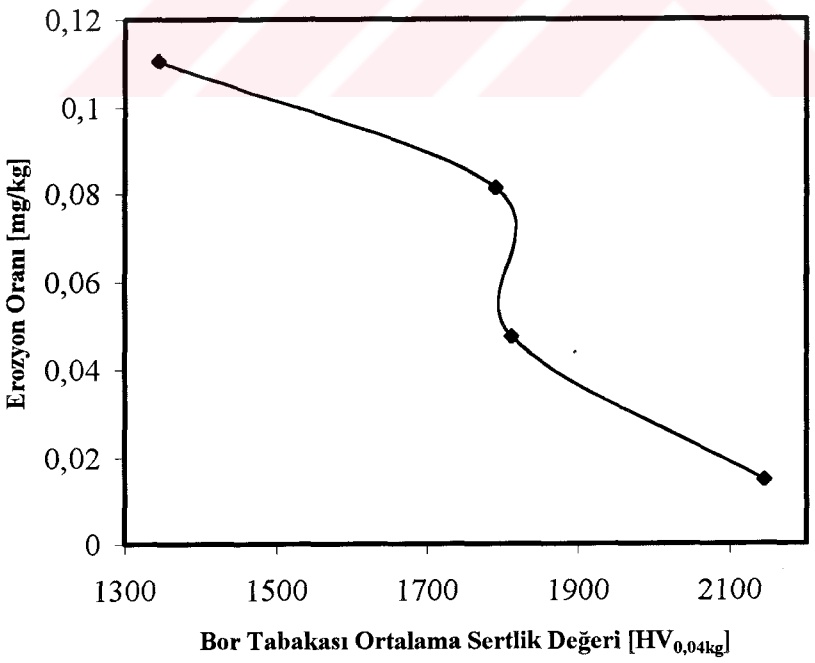


Şekil 7.51. Borlanmış AISI 3315 çeliğinde ortalama bor tabakası sertliği ile erozyon oranının değişimi

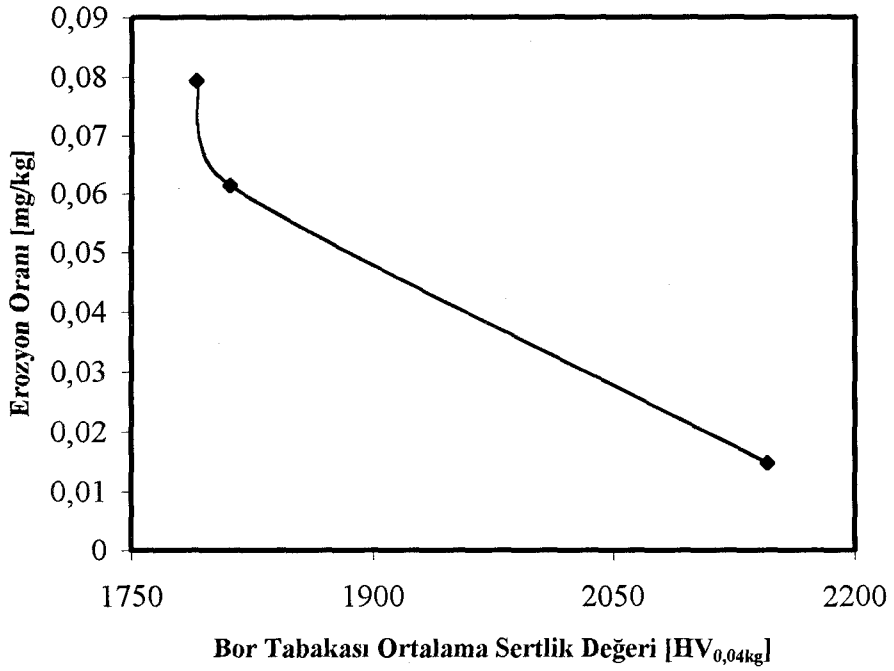


Şekil 7.52. 7 saat sabit sürede borlanmış AISI 3315 çeliğinde ortalama bor tabakası sertliğinin erozyon oranı ile değişimi

Şekil 7.53'de 950 °C'de 1, 3, 5, 7 ve 9 saat borlanan AISI 1390 çelik numune yüzeylerinde oluşan bor tabakalarının mikrosertlik taramaları sonucunda tespit edilen ortalama tabaka sertlik değerleri ile çelik numunelerin erozyon oranındaki değişim görülmektedir. Bu çelikte oluşan bor tabakası ortalama sertlik değerleri 1345-2145 $HV_{0,04kg}$ arasındadır. Bu değer aralığında ortalama bor tabakası sertliğinin artışı ile çeliğin erozyon oranı azalmaktadır. Sabit 7 saat borlama süresinde 950, 1000 ve 1100 °C'de borlanan AISI 1390 çelik numunelerinde oluşan ortalama bor tabakası kalınlığının erozyon oranı ile değişimi Şekil 7.54'de görülmektedir. 1000 ve 1100 °C'de borlanan numunelerde oluşan bor tabakası sertlik değerleri sırası ile 1790 ve 1811 HV gibi birbirine yakın değerler olmasına rağmen 1100 °C'de borlanan numunenin erozyon oranı biraz daha yüksektir. Sıcaklık artışı sonucu, borlanan çelik numunede bor tabakası kalınlığının (Şekil 6.34) ve sertliğinin azalması (Şekil 6.37), çelikte erozyon oranının yükselmesine sebep olmuştur. Bor tabakası ortalama sertlik değeri 1850-2000 HV arasında, erozyon oranı lineer bir şekilde azalarak 2000 HV üzerinde en düşük değerine ulaşmaktadır. 1 saat borlanmış AISI 1390 çeliğinde oluşan bor tabakası sertliği 2145 olmakla birlikte tabaka kalınlık değerinin düşük olmasından (47μm) dolayı erozyon oranını yükseltmektedir.

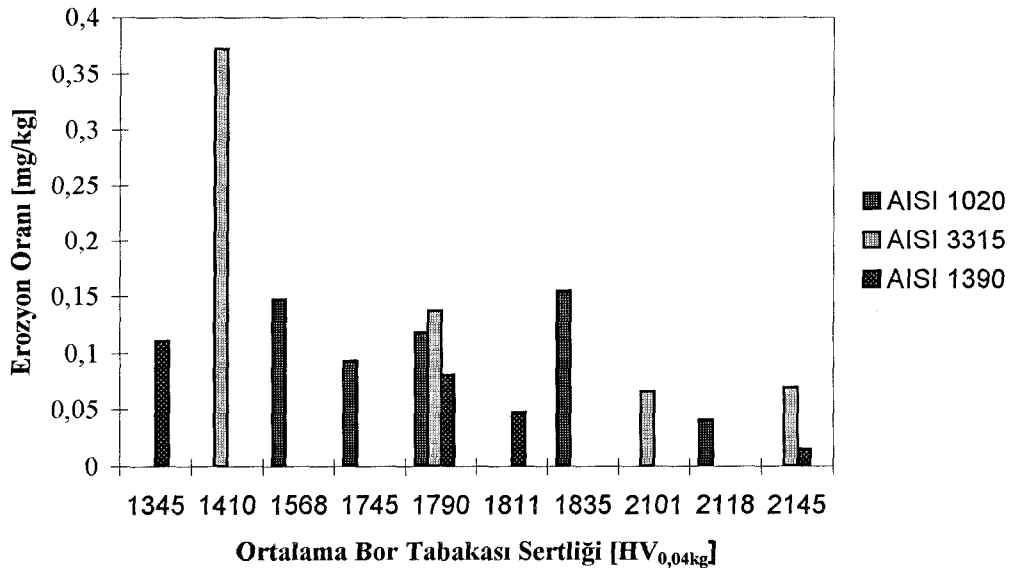


Şekil 7.53. Borlanmış AISI 1390 çeliğinde ortalama bor tabakası sertliği ile erozyon oranının değişimi



Şekil 7.54. 7 saat sabit sürede borlanmış AISI 1390 çeliğinde ortalama bor tabakası sertliğinin erozyon oranı ile değişimi

Yukarıda açıklanan ifadeler doğrultusunda Şekil 7.55, sabit 950 °C sıcaklıkta borlanan AISI 1020, 3315 ve 1390 çeliklerinde, ortalama bor tabakası sertlik değişimi ile erozyon oranı arasındaki ilişkiyi özetlemektedir. Görüldüğü gibi, ortalama bor tabakası sertliği arttıkça, borlanmış her üç çeliğinde erozyon oranı değerleri azalmaktadır.



Şekil 7.55. 950 °C'de borlanan her üç çelikte ortalama bor tabakası sertliğinin erozyon oranı ile değişimi

BÖLÜM 8

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

8.1. SONUÇLAR

Esas itibari ile borlanmış AISI 1020, 3315 ve 1390 çeliklerinin eroziv aşınma davranışlarını belirlemek amacı ile yapılan bu çalışmada bulunan sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

1. Sıvı ortamda borlama işleminde oluşturulan borlama banyosu malzemenin her tarafını kaplayarak yüzeyi yüksek sıcaklıkta oksidasyondan korur. Bu teknik kullanılarak yapılan çalışmalar 950-1100 °C sıcaklık sahasında gerçekleştirilmiştir. 900 °C'den daha düşük sıcaklıklarda borlama banyosunun viskozitesi oldukça artmıştır. İşlem sıcaklığı 1100 °C üzerine çıkarıldığında özellikle borlanacak malzemelerin küçük boyutta olması durumunda malzemede çarpılmalar ve bölgesel ergimeler olduğu gözlenmiştir.

2. Borlanmış AISI 1020 çeliğinde, bor tabakası altında, tabaka dişlerinin bittiği yerden itibaren yüzeydeki bor tabakasının yaklaşık 5 katı büyüklüğünde ve tabakaya paralel olarak uzanan perlitik yapının baskın olduğu iri taneli bir bölge oluşmuştur. Borlanmış yüksek karbonlu AISI 1390 çeliğinde oluşan borür tabakalarına, tabakanın hemen altında ince ve tane sınırlarına doğru uzanan ferritik yapılar zemin oluşturmuştur.

3. Sıvı ortamda borlama tekniği, çeliklerin eroziv aşınma direncini arttırmak maksadı ile faydalı bir biçimde kullanılabilir.

4. Borlama işlemi sonucu çelik yüzeylerinde oluşan borür tabakalarının kalınlığı, sertlik ve morfolojik özellikleri, çeliğin erozyon direncini belirleyen önemli faktörlerdir.

5. Çalışmada seçilen sıcaklık değerleri için, borlama sıcaklığının artışı, her üç çelikte oluşan bor tabakasının sertlik değerleri ve kalınlık miktarlarında azaltıcı yönde etki yapmaktadır.

6. Borlanmış AISI 1020 çeliğinde, erozyona maruz kalan yüzeyin merkez ve çevresinde katı partiküllerin nüfuz ettiği aynı yüzeydeki farklı noktalarda oyuklar meydana gelmiştir. Aşındırma süresi ilerleyişine paralel olarak, katı partiküllerin bu noktalardan mikroçizme ve mikrokesme etkisi yapmaları sureti ile malzeme kaldırma işlemi gerçekleşmektedir.

7. Eroziv aşınmaya maruz kalan her üç çelikte de aşındırma süresi boyunca bor tabakası tamamen tükenmemiştir. Ancak çelik numunelerin yüzey merkezlerinde meydana gelen aşınma daha büyük olmuş ve aşındırma işleminin ilk safhalarında bu bölgelerde borür tabakalarının kalkması fazla uzun zaman almamıştır. Borlanan numunenin merkez kısmındaki tabaka oyularak tamamen kalktıktan sonra, tabaka altından malzeme kaldırılması sureti ile aşınmanın ilerleyişi sürmüştür. Eş zamanlı olarak yüzey üzerindeki bu merkez oyuk etrafında da irili ufaklı oyuklar oluşmuş ve bu oyuklardan malzeme kaybının devamı sonucu aşındırma süresine bağlı olarak oyuklar büyüyüp birleşerek borlanmış yüzey üzerinde büyük kraterler şeklinde görülen bir hasara sebep olmuşlardır.

8. Oluşan borür tabakalarının, numune yüzeylerinin merkez ve civarındaki kısımlarında, erozyona maruz kalan tüm yüzey boyunca benzer kalınlıkta hatta bir miktar daha kalın oldukları belirlenmiştir. En yüksek erozyon hasarının, bu bölgede başlayıp gelişerek AISI 3315 çeliğindeki gibi büyük ve derin krater alanlarına dönüşmesi, erozyon oranın çarpma açısı ve çarpma hızı ile yakından ilişkili olduğunu düşündürmektedir. Bir boru içerisindeki laminer veya türbülanslı katı partikül-hava karışımı akışında, en yüksek hız değerine simetri merkezinde ulaşılır [72]. Buna dayanarak, nozul merkezinden çıkan partiküller, yüzeye çarpan diğer partiküllere göre daha yüksek hıza sahiptir. Bu durum, pitot tüpü yardımı ile nozuldan çıkan hava jeti hızının, nozul merkezinde ve kenarlarındaki değişimine bakılarak da tespit edilmiştir. Sonuç olarak, tabaka kalınlığı aşındırılan yüzey boyunca benzer kalınlıkta olmasına rağmen, nozulun numune üzerindeki izdüşüm alanının

merkezinde aşınma daha hızlı olmaktadır. Bu sebeple dik çarpma açılarında, borür tabakalarının erozyona karşı düşük direnç gösterdikleri sonucuna varılmıştır.

9. Erozyona maruz bırakılan AISI 3315 çelik yüzeyini kaplayan bor tabakasının çatladığı tespit edilmiştir. Yinelenen şekilde, katı partiküllerin yüzey üzerinde oluşmuş bu çatlaklar arasından malzeme kaldırmaları sonucu çatlaklar büyüyerek derinleşmektedir.

10. Sabit aşındırma parametreleri altında erozyona maruz bırakılan her üç çeliğin erozyon oranı aşındırma süresi artışı ile azalma eğilimi göstermiştir. Bu durum bir miktar katı partikülün gerek yüzeye çarpıp parçalanarak gerek ise bozulmadan yüzeye gömülerek numunede ağırlık artışına sebep olmasından dolayı erozyon oranının değişimini etkilemektedir. Aşırı bor verici ortamlarda borür tabakaları çift veya daha kompleks fazlardan teşekkül olmaktadır. Sıvı ortamda borlama tekniğinde yüzey sathında daha kırılgan FeB tabakasının oluştuğu durumlarda ilk olarak bu fazın katı partiküller darbelerine maruz kalarak ardı sıra devam eden darbe etkisi yapan katı partiküller vasıtası ile taşındığı düşünülmektedir.

11. Borlanmış AISI 3315 çeliğinde oluşmuş borür tabakası, araları seyrek ve yer yer kopuk bor dişlerinden ibarettir. Bu morfolojik yapı, çeliğin akma direnci yüksek yüzey sathında değişken gerilmelere yol açarak borür tabakasının çatlamasına neden olduğu kanaatine varılmıştır.

12. Her üç çelikte en düşük erozyon 950 °C'de 7 saat borlanmış numunelerde meydana gelmiştir. Bu sıcaklık değerinde 7 saat borlama durumunda AISI 1390 çeliği erozyona karşı en yüksek direnci göstermiştir. Bu çeliğin erozyon oranı, seçilen tüm borlama şartları altında bulunan en düşük değerdir.

13. Borlama sıcaklığının artışına paralel olarak çeliklerde oluşan borür tabakası kalınlığı ve bu tabakanın ortalama sertlik değerlerinin azalması sonucu eroziv aşınma miktarları artış göstermiştir.

14. AISI 1020, 3315 ve 1390 çeliklerinin borlanması durumunda eroziv aşınma dirençlerinin yükseldiği tespit edilmiştir. Bu direnç, çeliklerin borlama süresi ve sıcaklığına bağlı olarak farklılık göstermektedir. Borlama işlemi, çeliğe hiç borlanmamış durumuna

göre, AISI 1020 çeliğinde yaklaşık 9 kat; AISI 3315 çeliğinde 5 kat ve AISI 1390 çeliğinde 3 kat artış sağlamıştır. 950 °C'de 1-3 saat süre borlama işlemi bile çeliklerin eroziv aşınmaya karşı dayanımlarını birkaç kat arttırmaktadır.

15. Bu çalışmada kullanılan üç çeliğin sıvı ortamda borlanması durumunda çelik yüzeylerinde oluşan ortalama bor tabakası sertlik değerleri 1300-2145$HV_{0,04kg}$ arasında değişmektedir. Bu aralıkta ortalama bor tabakası sertliğinin artışı ile erozyon oranının genel olarak azaldığı belirlenmiştir. Sertlik artışının meydana getirdiği bu etkinin yanısıra, bor tabakası kalınlık miktarının değişimi, borlanan çeliklerin erozyon oranını belirleyici ikinci bir unsurdur.

16. Borlanmış halde AISI 3315 çeliğinin eroziv aşınma davranışı, borlanmış AISI 1020 ve 1390 çeliklerinin aşınma davranışlarından daha kötü olduğu belirlenmiştir. Dolayısı ile borlanmış AISI 3315 çeliğinde bor tabakasının çatlamasından ötürü eroziv ortamda kullanılmaya uygun değildir.

8.2. ÖNERİLER

Bu çalışma yapılan tüm aşındırma deneyleri, sabit eroziv aşındırma parametreleri altında borlama işleminin çeliklerin eroziv aşınma davranışları üzerindeki etkilerini belirlemek amacı ile gerçekleştirilmiştir. Sadece çeliklerde değil, çeşitli alaşımlar, dökme demir, kompozit ve polimerik esaslı malzemelerin sergiledikleri erozyon davranışlarını karakterize etmek için de bu deneysel çalışmada kullanılan aşındırma parametrelerini kullanmak veya değiştirmek sureti ile araştırma yapmak mümkündür.

Aşındırıcı boyutu, cinsi, püskürtme hızı ve partikül çarpma açısı gibi eroziv aşınma olaylarında önemli yeri olan parametreleri değiştirme yoluyla çeliklerin aşınma davranışlarını daha kapsamlı karakterize etmek mümkün olacaktır.

Yapılan bu çalışmada çelikler sıvı ortamda borlama tekniği kullanmak sureti ile borlanmıştır. Farklı borlama tekniklerini deneyerek borlanmış parçaların erozyon davranışları gözlemlenebilir. Ayrıca, borlama işleminin yanısıra çeliklerde yüzey sertleştirme işlemlerinde kullanılan nitrürleme, karbürleme başta olmak üzere aşınmaya karşı direnç sağlamak için yapılan çeşitli kaplamalar üzerinde farklı erozyon testleri uygulanabilir.

Mühendislik uygulamalarında kullanılacak aynı cins malzemeler, erozyon aşınması adı altında toplanan farklı aşındırma işlemlerine maruz bırakılıp, dayanıklılık testleri yapılarak malzemenin uygunluk durumları belirlenebilir.

Eroziv aşınma olaylarında bir diğer önemli faktör ise sıcaklıktır. Ortam sıcaklığı değiştirme imkanı sağlayacak deney setleri kurularak araştırma kapsamı genişletilebilir.

Farklı alaşım gruplarından seçilmiş çeliklere ya da kaplanmak sureti ile nitelik kazandırılan çeşitli malzemelere, deneysel olarak uygulanan eroziv aşınma testleri ile birlikte, bilgisayar destekli aşınma modelleri kurarak elde edilecek neticelerin kıyaslanması yapılan çalışmaların hassasiyetini artıracaktır.

KAYNAKLAR

[1]. A. Özsoy, Çeliğin Borlanmasında Borür Tabakası, Geçiş Zonu ve Ana Matriksin Özelliklerinin İyileştirilmesi, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, 1991

[2]. N.Bozkurt, Bor Yayınımıyla Çeliklerde Yüzey Sertleştirme, Doktora Tezi, İTÜ, İstanbul, 1984

[3]. C. Bindal, Az Alaşımlı ve Karbon Çeliklerinde Borlama İle Yüzeye Kaplanan Borürlerin Bazı Özelliklerinin Tesbiti, Doktora Tezi, İTÜ, İstanbul, 1991

[4]. A. Taşcı, Borlanmış Çeliklerin Aşınma ve Korozyon Dayanımları, Y.Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, 1993

[5]. B.Selçuk, Borlanmış AISI 1020 ve 5115 Çeliklerinin Sürtünme ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 1994

[6]. T. Akgündüz, Çelikte Alaşım Elementi Olarak Bor ve Borlama İle Yüzey Sertleştirme, Y.Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, 1991

[7]. B. Selçuk, R. İpek, M.B. Karamış, AISI 5115 ve AISI 1020 Çeliklerinin Çekme Özelliklerine Borlamanın Etkisi, S:60-69, 6. Denizli Malzeme Sempozyumu, 12-13-14 Nisan 1995

[8]. M. Yüksel, A.Ç. Can, Y. Özmen, X210Cr12 Takım Çeliğinin Tuz Banyosunda Borlanması, Akdeniz Ün. Isparta Müh. Fak. Makine Müh. Böl. Dergisi, Sayı:7, Sayfa:68-69, 1993

[9]. U. Şen, Küresel Grafitli Dökme Demirin Borlanması ve Özellikleri, Doktora Tezi, İTÜ, İstanbul, 1997

[10]. M. Selam, Borlanmış Gri Dökme Demirin Aşınma Davranışının Deneysel Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 1996

[11]. F. Nair, Koruyucu Gaz Atmosferinde Macun Borlama Tekniği İle Çelik Yüzeylerin Sertleştirilmesi, Y.Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 1996

[12]. F. Nair, M.B. Karamış, Borlanmış Çeliklerde Malzeme Bileşiminin Mikrosertliğe Etkileri, S. 354-360, 7. Denizli Malzeme Sempozyumu Bildiri Kitabı, 2-3-4 Nisan 1997

[13]. Y.Özmen, The Effect of Surface Hardening With Boriding on The Wear Resistance In X210Cr12 Steel, M.Sc.Thesis, 9 Eylül University, İzmir, 1990

[14]. C. Meriç, S. Şahin, M. Uzkut, Borlamanın Kaynak Bölgesine Etkisinin İncelenmesi, S: 211-220, Kaynak Teknolojisi II. Ulusal Kongresi, 1999

[15]. A. H. Demirci, Fe-Esaslı Malzemelerin Borlanması İle Kavitasyon Dayanımının Değişimi, S. 261-269, 7. Uluslararası Makine Tasarım ve İmalat Kongresi, 11-13 Eylül 1996, ODTÜ, Ankara

[16]. R. Tezcan, Borlama İşlemi ve Endüstriyel Uygulamaları, Y.Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, 1996

[17]. F. Nair, M.B. Karamış, A. Taşdemirci, Endüstriyel Uygulamalarda Borlanmış Çeliklerin Aşınma Davranışının İncelenmesi, S:334-343, 8. Denizli Malzeme Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 26-27-28 Nisan 2000

[18]. M.B. Karamış, F.Nair, B.Selçuk, Borlanmış Malzemelerin Tribolojik Özellikleri, S:446-454, 6. Denizli Malzeme Sempozyumu Bildiri Kitabı, 12-14 Nisan 1995

[19]. B. Selçuk, R. İpek, M.B. Karamış, V. Kuzucu, An Investigation on Surface Properties of Treated Low Carbon and Alloyed Steels (Boriding and Carburizing), Journal of Materials Processing Technology, 103, 310-317, (2000)

[20]. N. Pektaş, Borlanmış AISI 1020 Çeliğinin Sulu Ortamda İki Cisimli Abrasiv Aşınma ve Sürtünme Davranışlarının Deneysel Olarak Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon, 1996

[21]. D.N. Tsipas, J. Rus, Boronizing of Alloy Steels, Journal of Materials Science Letters, Vol: 6, 116-120, (1987)

[22]. K.H. Habig and R. Chatterjee-Fischert, Wear Behaviour of Boride Layers on Alloyed Steels, Tribology International, August (1981)

[23]. H.J. Hunger and G. Trute, Boronizing to Produce Wear-Resistant Surface Layers, Heat Treatment of Metals, 2, 31-39, (1994)

[24]. C. Rebholz, A. Leyland, J.M. Schneider, A.A. Voevodin, A. Matthews, Structure, Hardness and Mechanical Properties of Magnetron-Sputtered Titanium-Aluminium Boride Films, Surface and Coatings Technology,120-121, 412-417,(1991)

[25]. J.H. Yoon, Y.K. Jee, S.Y. Lee, Plasma Paste Boronizing Treatment of The Stainless Steel AISI 304, Surface and Coatings Technology, 112, 71-75, (1999)

[26]. H.R. Lin, Gwo-Hwa Cheng, Hardenability Effect of Boron on Carbon Steels, Materials Science and Technology, Vol:3, 855-859, (1987)

[27]. A.F. Sofroshenkov and I.A. Sofroshenkov, Technology of Boronizing High-Speed Steels, Steels in Translation, Vol:27, No:6, pp.62-65, (1997)

[28]. A. Küper, X. Qiao, H. R. Stock, P. Mayr, A Novel Approach to Gas Boronizing, Surface and Coatings Technology, 130, 87-94, (2000)

[29]. C. H. Xu, J. K. Xi, W. Gao, Improving The Mechanical Properties of Boronized Layers by Superplastic Boronizing, Journal of Materials Processing Technology, 65, 94-98, (1997)

[30]. X. Cong-Xın and O. Meng-lan, A Mechanical Explanation for The Influence of Residual Stress on The Wear Resistance of Borided Steel, Wear, 137, 151-159, (1990)

[31]. N. Gidikova, Vanadium Boride Coatings on Steel, Materials Science and Engineering, A 278, 181-186, (2000)

[32]. A.K. Sinha, B.P. Division, "Boriding (Boronizing)" Vol.4, p.437-447, ASM Handbook, Heat Treating ASM International Materials, Park, Ohio, 1991

[33]. B.D.P.T. Yayın No: DPT: 2123-ÖİK: 327, Madencilik Ana Planı Özel İhtisas Komisyonu Bor Madenleri Çalışma Grubu Raporu, 1988

[34]. K. H. Zum Gahr, Microstructure and Wear of Materials, Tribology Series, 10, p.531-558, Elsevier, Amsterdam-Oxford-Newyork-Tokyo, 1987

[35]. ASTM Designation: G76-95, Standard Test Method for Conducting Erosion Tests By Solid Particle Impingement Using Gas Jets, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.-02., 2000

[36]. G. Sundararajan and M. Roy, Solid Particle Erosion Behaviour of Metallic Materials at Room and Elevated Temperatures, Tribology International, 30, No: 5, 339-359, (1997)

[37]. I. Finnie and D. H. McFadden, On The Velocity Dependence of The Erosion of Ductile Metals By Solid Particles at Low Angles of Incidence, Wear, 48, 181-190, (1978)

[38]. M.Y.Gürleyik, Püskürtme Aşındırması, S.134-152, Malzeme ve İmalat Sempozyumu, 2-3 Mart 1987

[39]. M. Y. Gürleyik, Makina Mühendisliğinde Aşınma Olayları, Mühendis ve Makina, 27, Sayı: 323, 3-13, (1986)

[40]. Y. I. Oka, H. Ohnogi, T. Hosokowa, M. Matsumura, The Impact Angle Dependence of Erosion Damage Caused By Solid Particle Impact, Wear, 203-204, 573-579, (1997)

[41]. Y. I. Oka, M. Matsumura and T. Kawabata, Relationship Between Surface Hardness and Erosion Damage Caused By Solid Particle Impact, Wear, 162-164, 688-695, (1993)

[42]. M. T. Benchaita, Some Observations on Erosive-Abrasive Wear of Metallic Surfaces in Particular Geometries, STLE Transactions, 31, 1, 133-140, (1987)

[43]. G. W. Stachowiak, Particle Angularity and its Relationship to Abrasive and Erosive Wear, Wear, 241, 214-219, (2000)

[44]. P. H. Shipway and I. M. Hutchings, The Influence of Particle Properties on The Erosive Wear of Sintered Boron Carbide, Wear, 149, 85-98, (1991)

[45]. K. L. Rutherford, R. I. Trezona, A. C. Ramamurthy, I. M. Hutchings, The Abrasive and Erosive Wear of Polymeric Paint Films, Wear, 203-204, 325-334, (1997)

[46]. D. F. Wang, J. H. She, Z. Y. Ma, Effect of Microstructure on Erosive Wear Behaviour of SiC Ceramics, Wear, 180, 35-41, (1995)

[47]. J. Li and I. M. Hutchings, Resistance of Cast Polyurethane Elastomers to Solid Particle Erosion, Wear, 135, 293-303, (1990)

[48]. D. Z. Guo, L. J. Wang and J. Z. Li, Erosive Wear of Low Chromium White Cast Iron, Wear, 161, 173-178, (1993)

[49]. T. A. Adler and Ö. N. Doğan, Erosive Wear and Impact Damage of High-Chromium White Cast Irons, Wear, 225-229, 174-180, (1999)

[50]. K. Friedrich, Erosive Wear of Polymer Surfaces By Steel Ball Blasting, Journal of Materials Science, 21, 3317-3332, (1986)

[51]. A. W. Momber, The Erosion of Cement Paste, Mortar and Concrete By Gritblasting, Wear, 246, 46-54, (2000)

[52]. F. Nair and M. B. Karamış, An Evaluation of Erosion Behaviour of Boronised Sand Blast Nozzle, P.239-245, Balkantrib Conference, Bucherist, Romania, 1999

[53]. B. S. Mann, Solid- Particle Erosion and Protective Layers for Steam Turbine Blading, Wear, 224, 8-12, (1999)

[54]. B. Wang and G. Geng, Erosion and Corrosion of Cooled 1018 Steel, Wear, 161, 41-52, (1993)

[55]. Q. Fang, P. Sidky, M. G. Hocking, Erosive Wear Behaviour of Aluminium Based Composites, Materials & Desing, 18, Nos.4/6, 389-393, (1997)

[56]. M. M. Stack, J. Chacon-Nava, F. H. Stott, Relationship between The Effects of Velocity and Alloy Corrosion Resistance in Erosion-Corrosion Environments at Elevated Temperatures, Wear, 180, 91-99, (1995)

[57]. M. Suckling, C. Allen, Critical Variables in High Temperature Erosive Wear, Wear, 203-204, 528-536, (1997)

[58]. L. Ambrosini and S. Bahadur, Erosion of AISI 4140 Steel, Wear, 117, 37-48, (1987)

[59]. C. T. Morrison, R. O. Scattergood and J. L. Routbort, Erosion of 304 Stainless Steel, Wear, 111, 1-13, (1986)

[60]. P. J. Burnett, D. S. Rickerby, The Erosion Behaviour of TiN Coatings on Steels, Journal of Materials Science, 23, 2429-2443, (1988)

[61]. K. L. Rutherford, I. M. Hutchings, Development of The Erosion Durability Technique for Thin Coatings, Surface and Coatings Technology, 86-87, 542-548, (1996)

[62]. M.Y.Gürleyik, Yıkama Aşındırması, S.297-312, Malzeme ve İmalat Sempozyumu, 2-3 Mart 1987

[63]. E. Rabinowicz, Friction and Wear of Materials, Tribology Series, Section 5, p.109-193, Elsevier, Amsterdam- Oxford-Newyork-Tokyo, 1987

[64]. MKE Normu Özel Nitelikte Çelik Türleri Kataloğu, Makine ve Kimya Endüstrisi Kurumu, MKE Basımevi, 1978

[65]. Bünsa Döküm Makina Alet San. ve Tic. A.Ş.,Ürün Kataloğu, Bünyan-Kayseri, 2001

[66]. I. M. Hutchings, Abrasive and erosive wear tests for thin coatings: a unified approach, Tribology International Vol.No: 31, Nos: 1-3, 5-15, (1998)

[67]. J. F. Bell, Laboratory Scale Erosion Testing of a Wear Resistant Glass-Ceramics, Materials Science and Technology, 3, 807-813, (1987)

[68]. B. Jönsson and L. Akre, Evaluation of Hard Coatings on Steel by Particle Erosion, Thin Solid Films, 137, 65-77, (1986)

[69]. K. Anand, S. K. Hovis, H. Conrad and R.O. Scattergood, Flux Effects In Solid Particle Erosion, Wear, 118, 243-257, (1987)

[70]. P. H. Shipway and I.M. Hutchings, Influence of Nozzle Roughness on Conditions In a Gas-Blast Erosion Rig, Wear, 162-164, 148-158, (1993)

[71]. B.02.2.ETİ.2.20.00.00.ME 100/4458 Bandırma Bor ve Asit Fabrikaları İşletmesi Müdürlüğü Bilgilendirme Yazısı, 28 Aralık 2001

[72]. S. K. Ahuja, Surface Deformation of Polymer-Coated Metal Spheres, Wear, 35, 379-382, (1975)

EK-1 EROZİV AŞINMAYA MARUZ BIRAKILAN FARKLI SÜRE VE SICAKLIKLARDA BORLANMIŞ AISI 1020 ÇELİĞİNİN AŞINDIRMA SONUCU BELİRLENEN DENEYSEL VERİ TABLOLARI

TABLO 1
Aşındırıcı Partikül: G 40 (420 μm)
Püskürtme Hızı: 30 m/s
Borlama Süresi: 1 Saat
Borlama Sıcaklığı: 950 ^{0}C

Süre (dak.)	İlk Ağırlık (g)	Son Ağırlık (g)	Ağırlık Kaybı (g)	Toplam Ağırlık Kaybı (g)	Erozyon Oranı (mg/kg)
5	34,8699	34,8473	0,0226	0,0226	0,4284
10	34,8473	34,8404	0,0069	0,0295	0,2796
15	34,8404	34,8356	0,0048	0,0343	0,2167
20	34,8356	34,8315	0,0041	0,0384	0,1819
25	34,8315	34,8268	0,0047	0,0431	0,1634
30	34,8268	34,8236	0,0032	0,0463	0,1462
35	34,8236	34,8206	0,0030	0,0493	0,1335
40	34,8206	34,8185	0,0021	0,0514	0,1218
45	34,8185	34,8158	0,0027	0,0541	0,1139
50	34,8158	34,8130	0,0028	0,0569	0,1078
55	34,8130	34,8120	0,0010	0,0579	0,0997
60	34,8120	34,8110	0,0010	0,0589	0,0930

TABLO 2
Aşındırıcı Partikül: G 40 (420 μm)
Püskürtme Hızı: 30 m/s
Borlama Süresi: 3 Saat
Borlama Sıcaklığı: 950 ^{0}C

Süre (dak.)	İlk Ağırlık (g)	Son Ağırlık (g)	Ağırlık Kaybı (g)	Toplam Ağırlık Kaybı (g)	Erozyon Oranı (mg/kg)
5	35,7449	35,7354	0,0095	0,0095	0,1800
10	35,7354	35,7192	0,0162	0,0257	0,2436
15	35,7192	35,7155	0,0037	0,0294	0,1857
20	35,7155	35,6878	0,0277	0,0414	0,1962
25	35,6878	35,6820	0,0058	0,0472	0,1789
30	35,6820	35,6783	0,0037	0,0509	0,1609
35	35,6783	35,6749	0,0034	0,0543	0,1470
40	35,6749	35,6711	0,0038	0,0581	0,1376
45	35,6711	35,6680	0,0031	0,0612	0,1289
50	35,6680	35,6641	0,0039	0,0651	0,1234
55	35,6641	35,6604	0,0037	0,0688	0,1185
60	35,6575	35,6515	0,0060	0,0748	0,1181

TABLO 3
Aşındırıcı Partikül: G 40 (420 μm)
Püskürtme Hızı: 30 m/s
Borlama Süresi: 5 Saat
Borlama Sıcaklığı: 950 ^{0}C

Süre (dak.)	İlk Ağırlık (g)	Son Ağırlık (g)	Ağırlık Kaybı (g)	Toplam Ağırlık Kaybı (g)	Erozyon Oranı (mg/kg)
5	33,9344	33,9160	0,0184	0,0184	0,3488
10	33,9160	33,9137	0,0023	0,0207	0,1962
15	33,9137	33,9056	0,0081	0,0288	0,1819
20	33,9056	33,9030	0,0026	0,0314	0,1488
25	33,9030	33,8970	0,0060	0,0374	0,1418
30	33,8970	33,8861	0,0109	0,0483	0,1526
35	33,8861	33,8761	0,0100	0,0583	0,1578
40	33,8761	33,8665	0,0096	0,0679	0,1609
45	33,8665	33,8599	0,0066	0,0745	0,1569
50	33,8599	33,8490	0,0109	0,0854	0,1618
55	33,8490	33,8442	0,0048	0,0902	0,1554
60	33,8442	33,8366	0,0076	0,0978	0,1545

TABLO 4
Aşındırıcı Partikül: G 40 (420 μm)
Püskürtme Hızı: 30 m/s
Borlama Süresi: 7 Saat
Borlama Sıcaklığı: 950 ^{0}C

Süre (dak.)	İlk Ağırlık (g)	Son Ağırlık (g)	Ağırlık Kaybı (g)	Toplam Ağırlık Kaybı (g)	Erozyon Oranı (mg/kg)
5	31,9125	31,9075	0,0050	0,0050	0,0947
10	31,9075	31,9067	0,0008	0,0058	0,0549
15	31,9067	31,9049	0,0018	0,0076	0,0480
20	31,9049	31,9040	0,0009	0,0085	0,0402
25	31,9040	31,9011	0,0029	0,0114	0,0432
30	31,9011	31,8991	0,0020	0,0134	0,0423
35	31,8991	31,8973	0,0018	0,0152	0,0411
40	31,8973	31,8964	0,0009	0,0161	0,0381
45	31,8964	31,8930	0,0034	0,0195	0,0410
50	31,8930	31,8900	0,0030	0,0225	0,0426
55	31,8900	31,8888	0,0012	0,0237	0,0408
60	31,8888	31,8868	0,0020	0,0257	0,0406

TABLO 5
Aşındırıcı Partikül: G 40 (420 μm)
Püskürtme Hızı: 30 m/s
Borlama Süresi: 9 Saat
Borlama Sıcaklığı: 950 ^{0}C

Süre (dak.)	İlk Ağırlık (g)	Son Ağırlık (g)	Ağırlık Kaybı (g)	Toplam Ağırlık Kaybı (g)	Erozyon Oranı (mg/kg)
5	28,7906	28,7805	0,0101	0,0101	0,1914
10	28,7805	28,7745	0,0060	0,0161	0,1526
15	28,7745	28,7701	0,0044	0,0205	0,1295
20	28,7701	28,7648	0,0053	0,0258	0,1222
25	28,7648	28,7599	0,0049	0,0307	0,1163
30	28,7599	28,7449	0,0100	0,0407	0,1285
35	28,7449	28,7403	0,0046	0,0453	0,1226
40	28,7403	28,7311	0,0092	0,0545	0,1291
45	28,7311	28,7230	0,0081	0,0626	0,1318
50	28,7230	28,7141	0,0089	0,0715	0,1355
55	28,7141	28,7080	0,0061	0,0776	0,1337
60	28,7080	28,6925	0,0155	0,0931	0,1470

TABLO 6
Aşındırıcı Partikül: G 40 (420 μm)
Püskürtme Hızı: 30 m/s
Borlama Süresi: 7 Saat
Borlama Sıcaklığı: 1000 ^{0}C

Süre (dak.)	İlk Ağırlık (g)	Son Ağırlık (g)	Ağırlık Kaybı (g)	Toplam Ağırlık Kaybı (g)	Erozyon Oranı (mg/kg)
5	29,9176	29,9110	0,0066	0,0066	0,1251
10	29,9110	29,9084	0,0026	0,0092	0,0872
15	29,9084	29,9057	0,0027	0,0119	0,0751
20	29,9057	29,9037	0,0020	0,0139	0,0658
25	29,9037	29,9027	0,0010	0,0149	0,0564
30	29,9027	29,9009	0,0018	0,0167	0,0533
35	29,9009	29,9000	0,0009	0,0176	0,0476
40	29,9000	29,8991	0,0009	0,0185	0,0438
45	29,8991	29,8986	0,0005	0,0200	0,0421
50	29,8986	29,8952	0,0034	0,0234	0,0443
55	29,8952	29,8945	0,0007	0,0241	0,0415
60	29,8945	29,8908	0,0037	0,0258	0,0407

TABLO 7
Aşındırıcı Partikül: G 40 (420 μm)
Püskürtme Hızı: 30 m/s
Borlama Süresi: 7 Saat
Borlama Sıcaklığı: 1100 ^{0}C

Süre (dak.)	İlk Ağırlık (g)	Son Ağırlık (g)	Ağırlık Kaybı (g)	Toplam Ağırlık Kaybı (g)	Erozyon Oranı (mg/kg)
5	29,9164	29,9078	0,0086	0,0086	0,1630
10	29,9078	29,9029	0,0049	0,0135	0,1279
15	29,9029	29,9003	0,0026	0,0161	0,1017
20	29,9003	29,8947	0,0056	0,0217	0,1028
25	29,8947	29,8913	0,0034	0,0251	0,0951
30	29,8913	29,8866	0,0047	0,0298	0,0941
35	29,8866	29,8845	0,0021	0,0319	0,0863
40	29,8845	29,8819	0,0026	0,0345	0,0817
45	29,8819	29,8790	0,0029	0,0374	0,0787
50	29,8790	29,8759	0,0031	0,0405	0,0767
55	29,8759	29,8731	0,0028	0,0433	0,0780
60	29,8731	29,8705	0,0026	0,0459	0,0748

EK-2 EROZİV AŞINMAYA MARUZ BIRAKILAN FARKLI SÜRE VE SICAKLIKLARDA BORLANMIŞ AISI 3315 ÇELİĞİNİN AŞINDIRMA SONUCU BELİRLENEN DENEYSEL VERİ TABLOLARI

TABLO 8
Aşındırıcı Partikül: G 40 (420 μm)
Püskürtme Hızı: 30 m/s
Borlama Süresi: 1 Saat
Borlama Sıcaklığı: 950 ^{0}C

Süre (dak.)	İlk Ağırlık (g)	Son Ağırlık (g)	Ağırlık Kaybı (g)	Toplam Ağırlık Kaybı (g)	Erozyon Oranı (mg/kg)
5	35,9900	35,9724	0,0176	0,0176	0,3336
10	35,9724	35,9699	0,0025	0,0201	0,1905
15	35,9699	35,9665	0,0034	0,0235	0,1484
20	35,9665	35,9653	0,0012	0,0247	0,1170
25	35,9653	35,9592	0,0061	0,0308	0,1167
30	35,9592	35,9575	0,0017	0,0325	0,1026
35	35,9575	35,9565	0,0010	0,0335	0,0907
40	35,9565	35,9533	0,0032	0,0367	0,0869
45	35,9533	35,9528	0,0005	0,0372	0,0783
50	35,9528	35,9513	0,0015	0,0387	0,0733
55	35,9513	35,9413	0,0100	0,0487	0,0839
60	35,9413	35,9310	0,0103	0,0590	0,0930

TABLO 9
Aşındırıcı Partikül: G 40 (420 μm)
Püskürtme Hızı: 30 m/s
Borlama Süresi: 3 Saat
Borlama Sıcaklığı: 950 ^{0}C

Süre (dak.)	İlk Ağırlık (g)	Son Ağırlık (g)	Ağırlık Kaybı (g)	Toplam Ağırlık Kaybı (g)	Erozyon Oranı (mg/kg)
5	34,4039	34,3748	0,0291	0,0291	0,5516
10	34,3748	34,3708	0,0040	0,0331	0,3137
15	34,3708	34,3629	0,0079	0,0410	0,2590
20	34,3629	34,3571	0,0058	0,0468	0,2218
25	34,3571	34,3529	0,0042	0,0510	0,1933
30	34,3529	34,3468	0,0061	0,0571	0,1804
35	34,3468	34,3441	0,0027	0,0598	0,1619
40	34,3441	34,3422	0,0019	0,0617	0,1462
45	34,3422	34,3385	0,0037	0,0654	0,1377
50	34,3385	34,3366	0,0019	0,0673	0,1275
55	34,3366	34,3332	0,0034	0,0707	0,1218
60	34,3332	34,3319	0,0013	0,0720	0,1137

TABLO 10
Aşındırıcı Partikül: G 40 (420 μm)
Püskürtme Hızı: 30 m/s
Borlama Süresi: 5 Saat
Borlama Sıcaklığı: 950 ^{0}C

Süre (dak.)	İlk Ağırlık (g)	Son Ağırlık (g)	Ağırlık Kaybı (g)	Toplam Ağırlık Kaybı (g)	Erozyon Oranı (mg/kg)
5	32,3921	32,3816	0,0105	0,0105	0,1990
10	32,3816	32,3769	0,0047	0,0152	0,1440
15	32,3769	32,3718	0,0051	0,0203	0,1282
20	32,3718	32,3685	0,0033	0,0236	0,1118
25	32,3685	32,3657	0,0028	0,0264	0,1000
30	32,3657	32,3615	0,0042	0,0306	0,0966
35	32,3615	32,3564	0,0051	0,0357	0,0966
40	32,3564	32,3492	0,0072	0,0429	0,1016
45	32,3492	32,3410	0,0082	0,0511	0,1076
50	32,3410	32,3362	0,0048	0,0559	0,1059
55	32,3362	32,3299	0,0063	0,0622	0,1071
60	32,3299	32,3264	0,0035	0,0657	0,1037

TABLO 11
Aşındırıcı Partikül: G 40 (420 μm)
Püskürtme Hızı: 30 m/s
Borlama Süresi: 7 Saat
Borlama Sıcaklığı: 950 ^{0}C

Süre (dak.)	İlk Ağırlık (g)	Son Ağırlık (g)	Ağırlık Kaybı (g)	Toplam Ağırlık Kaybı (g)	Erozyon Oranı (mg/kg)
5	36,2352	36,2250	0,0102	0,0102	0,1933
10	36,2250	36,2238	0,0012	0,0114	0,1080
15	36,2238	36,2212	0,0026	0,0140	0,0884
20	36,2238	36,2200	0,0038	0,0178	0,0843
25	36,2200	36,2187	0,0013	0,0191	0,0724
30	36,2187	36,2182	0,0005	0,0196	0,0619
35	36,2182	36,2163	0,0019	0,0215	0,0582
40	36,2163	36,2144	0,0019	0,0234	0,0554
45	36,2144	36,2124	0,0020	0,0254	0,0535
50	36,2124	36,2109	0,0015	0,0269	0,0509
55	36,2109	36,2031	0,0078	0,0347	0,0598
60	36,2031	36,1941	0,0090	0,0437	0,0690

TABLO 12
Aşındırıcı Partikül: G 40 (420 μm)
Püskürtme Hızı: 30 m/s
Borlama Süresi: 9 Saat
Borlama Sıcaklığı: 950 ^{0}C

Süre (dak.)	İlk Ağırlık (g)	Son Ağırlık (g)	Ağırlık Kaybı (g)	Toplam Ağırlık Kaybı (g)	Erozyon Oranı (mg/kg)
5	35,2677	35,2359	0,0318	0,0318	0,6028
10	35,2359	35,2231	0,0128	0,0446	0,4227
15	35,2231	35,1949	0,0282	0,0728	0,4600
20	35,1949	35,1850	0,0099	0,0827	0,3919
25	35,1850	35,1700	0,0150	0,0977	0,3704
30	35,1700	35,1615	0,0085	0,1062	0,3355
35	35,1615	35,1525	0,0090	0,1152	0,3119
40	35,1525	35,1276	0,0249	0,1401	0,3319
45	35,1276	35,1082	0,0194	0,1595	0,3359
50	35,1082	35,1037	0,0045	0,1640	0,3109
55	35,1037	35,0883	0,0154	0,1794	0,3091
60	35,0883	35,0747	0,0136	0,1930	0,3049

TABLO 13
Aşındırıcı Partikül: G 40 (420 μm)
Püskürtme Hızı: 30 m/s
Borlama Süresi: 7 Saat
Borlama Sıcaklığı: 1000 ^{0}C

Süre (dak.)	İlk Ağırlık (g)	Son Ağırlık (g)	Ağırlık Kaybı (g)	Toplam Ağırlık Kaybı (g)	Erozyon Oranı (mg/kg)
5	35,4574	35,4444	0,0130	0,0130	0,2464
10	35,4444	35,4393	0,0051	0,0181	0,1715
15	35,4393	35,4350	0,0043	0,0224	0,1415
20	35,4350	35,4320	0,0030	0,0254	0,1203
25	35,4320	35,4291	0,0029	0,0283	0,1072
30	35,4291	35,4245	0,0046	0,0329	0,1039
35	35,4245	35,4203	0,0042	0,0371	0,1004
40	35,4203	35,4135	0,0068	0,0439	0,1037
45	35,4135	35,4047	0,0088	0,0527	0,1110
50	35,4047	35,3993	0,0054	0,0581	0,1101
55	35,3993	35,3923	0,0070	0,0651	0,1121
60	35,3923	35,3883	0,0040	0,0691	0,1091

TABLO 14
Aşındırıcı Partikül: G 40 (420 μm)
Püskürtme Hızı: 30 m/s
Borlama Süresi: 7 Saat
Borlama Sıcaklığı: 1100 ^{0}C

Süre (dak.)	İlk Ağırlık (g)	Son Ağırlık (g)	Ağırlık Kaybı (g)	Toplam Ağırlık Kaybı (g)	Erozyon Oranı (mg/kg)
5	37,9672	37,9402	0,0270	0,0270	0,5118
10	37,9402	37,9323	0,0079	0,0349	0,3308
15	37,9323	37,9269	0,0054	0,0403	0,2546
20	37,9269	37,9171	0,0098	0,0501	0,2374
25	37,9171	37,9084	0,0087	0,0588	0,2229
30	37,9084	37,8995	0,0089	0,0677	0,2139
35	37,8995	37,8933	0,0062	0,0739	0,2001
40	37,8933	37,8871	0,0062	0,0748	0,1777
45	37,8871	37,8783	0,0088	0,0779	0,1661
50	37,8783	37,8726	0,0057	0,0802	0,1520
55	37,8726	37,8682	0,0044	0,0832	0,1433
60	37,8682	37,8634	0,0048	0,0880	0,1390

EK-3 EROZİV AŞINMAYA MARUZ BIRAKILAN FARKLI SÜRE VE SICAKLIKLARDA BORLANMIŞ AISI 1390 ÇELİĞİNİN AŞINDIRMA SONUCU BELİRLENEN DENEYSEL VERİ TABLOLARI

TABLO 15
Aşındırıcı Partikül: G 40 (420 μm)
Püskürtme Hızı: 30 m/s
Borlama Süresi: 1 Saat
Borlama Sıcaklığı: 950 ^{0}C

Süre (dak.)	İlk Ağırlık (g)	Son Ağırlık (g)	Ağırlık Kaybı (g)	Toplam Ağırlık Kaybı (g)	Erozyon Oranı (mg/kg)
5	32,6596	32,6390	0,0206	0,0206	0,3905
10	32,6390	32,6352	0,0038	0,0244	0,2312
15	32,6352	32,6324	0,0028	0,0272	0,1718
20	32,6324	32,6301	0,0023	0,0295	0,1398
25	32,6301	32,6271	0,0030	0,0325	0,1232
30	32,6271	32,6221	0,0050	0,0375	0,1184
35	32,6221	32,6187	0,0034	0,0409	0,1107
40	32,6187	32,6157	0,0030	0,0439	0,1040
45	32,6157	32,6122	0,0035	0,0474	0,0998
50	32,6122	32,6104	0,0018	0,0492	0,0932
55	32,6104	32,6090	0,0014	0,0506	0,0872
60	32,6090	32,6073	0,0017	0,0523	0,0826

TABLO 16
Aşındırıcı Partikül: G 40 (420 μm)
Püskürtme Hızı: 30 m/s
Borlama Süresi: 3 Saat
Borlama Sıcaklığı: 950 ^{0}C

Süre (dak.)	İlk Ağırlık (g)	Son Ağırlık (g)	Ağırlık Kaybı (g)	Toplam Ağırlık Kaybı (g)	Erozyon Oranı (mg/kg)
5	31,2502	31,2325	0,0177	0,0177	0,3355
10	31,2325	31,2270	0,0055	0,0232	0,2199
15	31,2270	31,2232	0,0038	0,0270	0,1706
20	31,2232	31,2204	0,0028	0,0298	0,1412
25	31,2204	31,2188	0,0016	0,0314	0,1190
30	31,2188	31,2136	0,0052	0,0366	0,1156
35	31,2136	31,2122	0,0014	0,0380	0,1029
40	31,2122	31,2100	0,0022	0,0402	0,0952
45	31,2100	31,2080	0,0020	0,0422	0,0888
50	31,2080	31,2045	0,0035	0,0457	0,0866
55	31,2045	31,2030	0,0015	0,0472	0,0813
60	31,2030	31,1987	0,0043	0,0515	0,0813

TABLO 17
Aşındırıcı Partikül: G 40 (420 μm)
Püskürtme Hızı: 30 m/s
Borlama Süresi: 5 Saat
Borlama Sıcaklığı: 950 ^{0}C

Süre (dak.)	İlk Ağırlık (g)	Son Ağırlık (g)	Ağırlık Kaybı (g)	Toplam Ağırlık Kaybı (g)	Erozyon Oranı (mg/kg)
5	33,5254	33,5165	0,0089	0,0089	0,1687
10	33,5165	33,5116	0,0049	0,0138	0,1308
15	33,5116	33,5071	0,0045	0,0183	0,1156
20	33,5071	33,5061	0,0010	0,0193	0,0914
25	33,5061	33,5047	0,0014	0,0207	0,0784
30	33,5047	33,5033	0,0014	0,0221	0,0698
35	33,5033	33,5012	0,0021	0,0242	0,0655
40	33,5012	33,4999	0,0013	0,0255	0,0604
45	33,4999	33,4986	0,0013	0,0268	0,0564
50	33,4986	33,4980	0,0006	0,0274	0,0519
55	33,4980	33,4962	0,0018	0,0292	0,0503
60	33,4962	33,4953	0,0009	0,0301	0,0475

TABLO 18
Aşındırıcı Partikül: G 40 (420 μm)
Püskürtme Hızı: 30 m/s
Borlama Süresi: 7 Saat
Borlama Sıcaklığı: 950 ^{0}C

Süre (dak.)	İlk Ağırlık (g)	Son Ağırlık (g)	Ağırlık Kaybı (g)	Toplam Ağırlık Kaybı (g)	Erozyon Oranı (mg/kg)
5	38,1108	38,1075	0,0033	0,0033	0,0625
10	38,1075	38,1049	0,0026	0,0059	0,0589
15	38,1049	38,1039	0,0010	0,0069	0,0436
20	38,1039	38,1037	0,0002	0,0071	0,0336
25	38,1037	38,1032	0,0005	0,0076	0,0288
30	38,1032	38,1027	0,0005	0,0081	0,2555
35	38,1027	38,1026	0,0001	0,0082	0,0222
40	38,1026	38,1019	0,0007	0,0089	0,0210
45	38,1019	38,1019	0,0000	0,0089	0,0187
50	38,1019	38,1017	0,0002	0,0091	0,0172
55	38,1017	38,1015	0,0002	0,0093	0,0160
60	38,1015	38,1014	0,0001	0,0094	0,0148

TABLO 19
Aşındırıcı Partikül: G 40 (420 μm)
Püskürtme Hızı: 30 m/s
Borlama Süresi: 9 Saat
Borlama Sıcaklığı: 950 ^{0}C

Süre (dak.)	İlk Ağırlık (g)	Son Ağırlık (g)	Ağırlık Kaybı (g)	Toplam Ağırlık Kaybı (g)	Erozyon Oranı (mg/kg)
5	34,3726	34,3550	0,0176	0,0176	0,3336
10	34,3550	34,3472	0,0078	0,0254	0,2407
15	34,3472	34,3402	0,0070	0,0324	0,2047
20	34,3402	34,3345	0,0057	0,0381	0,1805
25	34,3345	34,3299	0,0046	0,0427	0,1618
30	34,3299	34,3230	0,0069	0,0496	0,1567
35	34,3230	34,3210	0,0020	0,0516	0,1397
40	34,3210	34,3159	0,0051	0,0567	0,1343
45	34,3159	34,3131	0,0028	0,0595	0,1253
50	34,3131	34,3100	0,0031	0,0626	0,1186
55	34,3100	34,3070	0,0030	0,0656	0,1130
60	34,3070	34,3025	0,0045	0,0701	0,1107

TABLO 20
Aşındırıcı Partikül: G 40 (420 μm)
Püskürtme Hızı: 30 m/s
Borlama Süresi: 7 Saat
Borlama Sıcaklığı: 1000 ^{0}C

Süre (dak.)	İlk Ağırlık (g)	Son Ağırlık (g)	Ağırlık Kaybı (g)	Toplam Ağırlık Kaybı (g)	Erozyon Oranı (mg/kg)
5	35,6379	35,6346	0,0033	0,0033	0,0625
10	35,6346	35,6309	0,0037	0,0070	0,0663
15	35,6309	35,6296	0,0013	0,0083	0,0524
20	35,6296	35,6268	0,0028	0,0111	0,0526
25	35,6268	35,6219	0,0049	0,0160	0,0606
30	35,6219	35,6207	0,0012	0,0172	0,0543
35	35,6207	35,6199	0,0008	0,0180	0,0487
40	35,6199	35,6190	0,0009	0,0189	0,0447
45	35,6190	35,6186	0,0004	0,0193	0,0406
50	35,6186	35,6178	0,0008	0,0201	0,0381
55	35,6178	35,6169	0,0009	0,0210	0,0361
60	35,6169	35,6160	0,0009	0,0219	0,0345

TABLO 21
Aşındırıcı Partikül: G 40 (420 μm)
Püskürtme Hızı: 30 m/s
Borlama Süresi: 7 Saat
Borlama Sıcaklığı: 1100 ^{0}C

Süre (dak.)	İlk Ağırlık (g)	Son Ağırlık (g)	Ağırlık Kaybı (g)	Toplam Ağırlık Kaybı (g)	Erozyon Oranı (mg/kg)
5	35,3993	35,3879	0,0114	0,0114	0,2160
10	35,3879	35,3829	0,0050	0,0164	0,1554
15	35,3829	35,3797	0,0032	0,0196	0,1238
20	35,3797	35,3772	0,0025	0,0221	0,1047
25	35,3772	35,3746	0,0026	0,0247	0,0936
30	35,3746	35,3718	0,0028	0,0275	0,0868
35	35,3718	35,3686	0,0032	0,0307	0,0831
40	35,3686	35,3648	0,0038	0,0345	0,0817
45	35,3648	35,3633	0,0015	0,0360	0,0758
50	35,3633	35,3618	0,0015	0,0375	0,0710
55	35,3618	35,3604	0,0014	0,0389	0,0670
60	35,3604	35,3590	0,0014	0,0403	0,0636

EK-4 EROZİV AŞINMAYA MARUZ BIRAKILAN BORLANMAMIŞ ÇELİKLERİN AŞINDIRMA SONUCU BELİRLENEN DENEYSEL VERİ TABLOLARI

TABLO 22

MALZEME: AISI 1020
Aşındırıcı Partikül: G 40 (420 μm)
Püskürtme Hızı: 30 m/s

Süre (dak.)	İlk Ağırlık (g)	Son Ağırlık (g)	Ağırlık Kaybı (g)	Toplam Ağırlık Kaybı (g)	Erozyon Oranı (mg/kg)
5	32,3244	32,1799	0,1445	0,1445	2,7582
10	32,1799	32,1244	0,0555	0,2000	1,8957
15	32,1244	32,0787	0,0457	0,2457	1,5526
20	32,0787	32,0360	0,0427	0,2884	1,3668
25	32,0360	31,9774	0,0586	0,3470	1,3156
30	31,9774	31,9442	0,0332	0,3802	1,2012
35	31,9442	31,9090	0,0352	0,4154	1,1249
40	31,9090	31,8799	0,0291	0,4445	1,0533
45	31,8799	31,8461	0,0338	0,4783	1,0074
50	31,8461	31,8174	0,0287	0,5070	0,9611
55	31,8174	31,7823	0,0351	0,5421	0,9342
60	31,7823	31,7503	0,0320	0,5741	0,9069

TABLO 23

MALZEME: AISI 3315
Aşındırıcı Partikül: G 40 (420 μm)
Püskürtme Hızı: 30 m/s

Süre (dak.)	İlk Ağırlık (g)	Son Ağırlık (g)	Ağırlık Kaybı (g)	Toplam Ağırlık Kaybı (g)	Erozyon Oranı (mg/kg)
5	39,7854	39,6893	0,0961	0,0961	1,8218
10	39,6893	39,6754	0,0139	0,1226	1,1620
15	39,6754	39,6628	0,0126	0,1352	0,8543
20	39,6628	39,6461	0,0167	0,1519	0,7199
25	39,6461	39,6318	0,0143	0,1662	0,6301
30	39,6318	39,6150	0,0168	0,1830	0,5781
35	39,6150	39,5980	0,0170	0,2000	0,5416
40	39,5980	39,5862	0,0118	0,2118	0,5018
45	39,5862	39,5725	0,0137	0,2255	0,4749
50	39,5725	39,5585	0,0140	0,2395	0,4540
55	39,5585	39,5462	0,0123	0,2518	0,4339
60	39,5462	39,5326	0,0136	0,2654	0,4192

TABLO 24

MALZEME: AISI 1390
Aşındırıcı Partikül: G 40 (420 μm)
Püskürtme Hızı: 30 m/s

Süre (dak.)	İlk Ağırlık (g)	Son Ağırlık (g)	Ağırlık Kaybı (g)	Toplam Ağırlık Kaybı (g)	Erozyon Oranı (mg/kg)
5	32,7038	32,6659	0,0379	0,0379	0,7184
10	32,6659	32,6530	0,0129	0,0508	0,4815
15	32,6530	32,6388	0,0142	0,0650	0,4107
20	32,6388	32,6293	0,0095	0,0745	0,3530
25	32,6293	32,6200	0,0093	0,0838	0,3177
30	32,6200	32,6098	0,0102	0,0940	0,2969
35	32,6098	32,6000	0,0098	0,1038	0,2811
40	32,6000	32,5907	0,0093	0,1131	0,2680
45	32,5907	32,5843	0,0064	0,1195	0,2517
50	32,5843	32,5753	0,0090	0,1285	0,2436
55	32,5753	32,5671	0,0082	0,1367	0,2355
60	32,5671	32,5608	0,0063	0,1430	0,2259

EK-5 SABİT SÜRE VE SICAKLIKLARDA BORLANAN NUMUNELERİN MİKROSERTLİK DEĞERLERİ

	AISI 1020 Çeliği	Bor Tabakası $HV_{0.04kg}$	Difüzyon Bölgesi $HV_{0.04kg}$	Ana Metal $HV_{0.04kg}$
Borlama Sıcaklığı (950 ^{0}C)	1 Saat Borlanmış	1745	325	209
	3 Saat Borlanmış	1790	336	222
	5 Saat Borlanmış	1835	501	233
	7 Saat Borlanmış	2118	484	240
	9 Saat Borlanmış	1568	477	247
Borlama Süresi (7 Saat)	1000^{0}C de Borlanmış	1811	469	219
	1100^{0}C de Borlanmış	1660	572	233
***Normalize edilmiş durumdaki numunenin sertlik değeri :219 $HV_{0.04kg}$**				

	AISI 3315 Çeliği	Bor Tabakası $HV_{0.04kg}$	Difüzyon Bölgesi $HV_{0.04kg}$	Ana Metal $HV_{0.04kg}$
Borlama Sıcaklığı (950 ^{0}C)	1 Saat Borlanmış	2101	525	315
	3 Saat Borlanmış	1790	525	289
	5 Saat Borlanmış	1790	486	289
	7 Saat Borlanmış	2101	525	292
	9 Saat Borlanmış	1410	514	292
Borlama Süresi (7 Saat)	1000^{0}C de Borlanmış	1790	572	339
	1100^{0}C de Borlanmış	1790	625	386
*** Normalize edilmiş durumdaki numunenin sertlik değeri :280 $HV_{0.04kg}$**				

	AISI 1390 Çeliği	Bor Tabakası $HV_{0.04}$	Difüzyon Bölgesi $HV_{0.04}$	Ana Metal $HV_{0.04}$
Borlama Sıcaklığı (950 ^{0}C)	1 Saat Borlanmış	2145	500	385
	3 Saat Borlanmış	1790	448	386
	5 Saat Borlanmış	1811	445	388
	7 Saat Borlanmış	2145	415	386
	9 Saat Borlanmış	1345	470	400
Borlama Süresi (7 Saat)	1000^{0}C de Borlanmış	1790	500	394
	1100^{0}C de Borlanmış	1811	540	400
***Normalize edilmiş durumdaki numunenin sertlik değeri :340 $HV_{0.04kg}$**				

ÖZGEÇMİŞ

Kemal YILDIZLI, 04.09.1977 tarihinde Samsun'un Bafra ilçesinde doğdu. İlk, Orta ve Lise Öğrenimini bu ilçede tamamladı. 1998-1999 öğretim yılında Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünden iyi derece ile mezun oldu. 1999-2000 öğretim yılında Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Eğitimine başladı. Bir süre özel sektörde mühendis olarak çalıştı. Halen Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Konstrüksiyon ve İmalat Anabilim Dalında Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.

Adres: Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi

Makine Mühendisliği Bölümü/ KAYSERİ

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ