

**T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**DÜŞÜK KARBONLU YÜKSEK MUKAVEMETLİ ÇELİKLERDE
BORLAMA**

Muhammet Gökhan ALBAYRAK

Doktora Tezi

METALÜRJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Metalürji ve Malzeme Mühendisliği

Malzeme Bilim Dalı

HAZİRAN 2021

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Metalürji ve Malzeme Mühendisliği

Doktora Tezi

DÜŞÜK KARBONLU YÜKSEK MUKAVEMETLİ ÇELİKLERDE BORLAMA

Tez Yazarı

Muhammet Gökhan ALBAYRAK

Danışman

Prof. Dr. Ertan EVİN

HAZİRAN 2021

ELAZIĞ

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Metalürji ve Malzeme Mühendisliği

Doktora Tezi

Başlığı:	Düşük Karbonlu Yüksek Mukavemetli Çeliklerde Borlama
Yazarı:	Muhammet Gökhan ALBAYRAK
İlk Teslim Tarihi:	17.05.2021
Savunma Tarihi:	23.06.2021

TEZ ONAYI

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

Danışman:	Prof. Dr. Ertan EVİN Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Yeşilyurt MYO	<i>İmza</i> Onayladım
Başkan:	Prof. Dr. Halis ÇELİK Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi	Onayladım
Üye:	Prof. Dr. Ali Kaya GÜR Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi	Onayladım
Üye:	Doç. Dr. Seval Hale GÜLER Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım
Üye:	Dr. Öğr. Üyesi Akın ODABAŞI Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun/...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

İmza
Doç. Dr. Kürşat Esat ALYAMAÇ
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “Düşük Karbonlu Yüksek Mukavemetli Çeliklerde Borlama” Başlıklı Doktora Tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

23.06.2021

Muhammet Gökhan ALBAYRAK



ÖNSÖZ

Karşılıklı çalışan makine elemanlarında, sistem gereksinimlerini karşılayabilecek kadar sertlik ve kütle kaybı kaynaklı birbirlerini hasara uğratmayacak kadar aşınma direnci önemli parametrelerdendir. Uyumsuzluk kaynaklı sorunların neticesinde maddi kayıplardan önce zaman kaybı gelmektedir. Bu durumun önüne geçebilmek için malzemelerin yüzeyinde bazı iyileştirmeler yapılmaktadır. Borlama gibi temel yüzey iyileştirme işlemleri, uygun tokluğa sahip malzemelerin yüzeyinde sert bir tabaka oluşturarak aşınma direncini artırmak amacıyla yıllardan beri yapılmaktadır. Bilim ve teknolojinin ilerlemesiyle birlikte kullanılan teknik ve malzemelere dayalı farklı borlama yöntemleri geliştirilmiştir. Bilim ve teknolojinin gelişimi ile birlikte eldeki imkân ve kabiliyetler daha verimli kullanılabilir hale gelmiş, yapılan araştırmalarla birlikte bu gelişim gün geçtikçe daha da verimli hale gelmektedir.

Ülkemiz bor rezervi olarak dünyada ilk sırada yer alması, bu kaynağın sonsuz olduğu anlamına gelmemektedir. Bor ‘un kullanıldığı her alanda olduğu gibi yüzey iyileştirme alanında da kaynaklarımızın verimli kullanılması gerekmektedir. Borlama ile demir esaslı malzemelerin yüzeyinde demir-bor alaşımı oluşmaktadır. Bor ‘un demir ile yaptığı intermetalik bileşikler olan FeB ve Fe₂B, yüksek sertlik ve aşınma dirençlerine sahiptirler. Borlama ile elde edilmek istenilen mekanik değerlere en iyi şekilde cevap veren intermetalik ise Fe₂B ‘dir. Uygun parametrelerle yapılmayan borlama işlemi neticesinde iki intermetalik de olduğu ve bunun aşınma direnci üzerinde olumsuz etkiler meydana getirdiği bilinmektedir. İntermetalik cinsiyle birlikte oluşan tabakanın kalınlığı da önem arz etmektedir. Bu bağlamda borlama için kullanılacak bor kaynağının seçimi elde etmek istenilen netice ile doğrudan bağlantılıdır.

Borlama işleminin verimini arttırmak amacıyla kullanılacak tozlara ön işlem uygulamanın, elde edilmek istenilen netice üzerinde etkili olacağı düşünülmüştür. Bu doğrultuda mekanik alaşımlama gibi bir ön işlem ile toz parçacıklarını plastik deforme etmek, tane büyüklüklerini düşürmek yani mekanik enerjiyi toz parçacıklarına aktararak tozların (iç enerjilerinin arttırılmasıyla) difüzyon mesafelerini arttırarak borlama işlemini daha verimli hale getirmenin mümkün olabileceği fikrinden yola çıkılarak bu tez çalışması yapılmıştır.

Tez çalışmam boyunca akademik olarak bana yol gösteren Tez Danışmanı ‘m Prof. Dr. Ertan EVİN ‘e teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmam süresince teknik destek sağlayan Dr. Oktay YİĞİT ve Dr. Taha Çağrı ŞENOCAK ‘a teşekkür ederim. Doktora çalışması gibi meşakkatli bir süreçte benden manevi desteklerini esirgemeyen başta ailem olmak üzere, özellikle eşim Kimya Yüksek Mühendisi Canan ALBAYRAK ve kızım Zeynep Ece ALBAYRAK ‘a ayrıca teşekkür ederim.

Muhammet Gökhan ALBAYRAK

ELAZIĞ, 2021

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	xviii
KISALTMALAR	xix
1. GİRİŞ.....	20
2. GENEL BİLGİLER	25
2.1. Bor.....	25
2.1.1. Tarihçe.....	25
2.1.2. Bor Maden ve Yatakları	26
2.1.3. Türkiye İçin Bor	27
2.1.4. Bor Üretim Metotları.....	28
2.1.5. Elementel Bor Üretimi	28
2.1.6. Bor 'un Kullanım Alanları	30
2.2. Borlama Yöntemleri	33
2.2.1. Borlama	33
2.2.2. Borlama Yöntemleri	33
2.2.3. Borür Yapısı, Borlama Kinetiği ve Karakteristiği	38
2.3. Mekanik Alaşımlama.....	43
2.3.1. Mekanik Alaşımlama	43
2.3.2. Mekanik Alaşımlamayı Etkileyen Parametreler	47
2.3.3. Fe-Fe ₃ C / Fe-C Denge Diyagramları	54
2.3.4. Demir-Bor Denge Diyagramı	56
3. AŞINMA VE TÜRLERİ	58
3.1. Abrasiv Aşınma	58
3.2. Adhesiv Aşınma	59
3.3. Oksidasyon Aşınması	60
3.4. Korozif Aşınma	61
3.5. Kavitasyon Aşınması	61
3.6. Yorulma Aşınması	62
3.7. Erozif Aşınma.....	62
3.8. Kazımalı aşınma	63
4. MATERYAL VE METOT	64
4.1. Deneysel Çalışma	64
4.1.1. Çelik Numunelerin Hazırlanması.....	64
4.1.2. Borlama Jelinin Hazırlanması	64
4.1.3. Borlama İşlemi	66
4.2. Numune Üretimi	67
4.2.1. Deney Numunelerinin Karakterizasyonu	69

5. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	70
5.1. MA İşlemleri Sonrası Toz Karakterizasyonu	70
5.2. Borür Tabakalarının Karakterizasyonu.....	75
5.3. Borür Tabakalarının Kinetik Analizleri.....	161
5.4. Aşınma Verilerinin İncelenmesi	173
6. SONUÇLAR.....	210
7. KAYNAKLAR.....	213
ÖZGEÇMİŞ	



ÖZET

Düşük Karbonlu Yüksek Mukavemetli Çeliklerde Borlama

Muhammet Gökhan ALBAYRAK

Doktora Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Metalürji ve Malzeme Mühendisliği
Haziran 2021, Sayfa: xix + 221

Sanayide birçok farklı sektörde kullanılan düşük karbonlu yüksek mukavemetli çeliklere yüzey iyileştirme işlemleri yapılarak kullanım sınırları genişletilebilmektedir. Sahip oldukları düşük karbon neticesinde yüzeyden içeri difüzyon yoluyla sertleştirici elementlerin difüzyonu ve bu işlemin mümkün olan en düşük sıcaklık ve sürede gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Yüzeyde yüksek sertlik ve aşınma direnci istenilen durumlarda borlama işlemi yapılması en doğru karardır. Mekanik alaşımlama gibi bir ön işleminden geçirilen borlayıcı toz karışımı ile yüzeyde oluşturulacak borür tabaka derinliğini mümkün olan en düşük sıcaklıklarda elde etmek amacıyla bu çalışma yapılmıştır. 0, 10 ve 20 saat planeter tipi bir öğütücü kullanılarak mekanik alaşımlama (MA) yapılan borlayıcı toz karışımı ile 650-700-750-800-850 °C sıcaklıklarda ve 3-6-12 saat borlama ısıtma işlem sürelerinde DIN St28 numuneler borlanmıştır. Elde edilen numunelere optik ve taramalı elektron mikroskoplarıyla mikroyapı incelemesi, x-ışınları ile toz ve borür tabaka karakterizasyonu, vicker sertlik ölçme metodu ile yüzeyden merkeze sertlik dağılımı ve Pin-On-Disk metodu kullanılarak ağırlık kaybı üzerinden aşınma incelemeleri yapılmıştır. Bulgular neticesinde mekanik alaşımlama uygulanmayan tozlarla elde edilen jel kullanılarak 650 °C 'de borür tabakası elde edilemezken 10 ve 20 saatlik işlemlerde 6 ve 12 saat borlama sonucunda borür tabakaları elde edilmiştir. Her bir mekanik alaşımlama işlemi ile tozların aktivasyon enerjileri hesaplanmış ve sırasıyla 113,555, 108,814 ve 106,746 kJ/mol olarak bulunmuştur. Artan sıcaklık ve borlama süreleriyle birlikte tabaka kalınlıklarında ve sertliklerinde ciddi artışlar gözlenmiş, buna bağlı olarak aşınmayla gerçekleşen ağırlık kayıplarında ciddi azalmalar elde edilmiştir. Borlama işlemi gibi difüzyonal süreçlerde kullanılacak tozların Mekanik Alaşımlama gibi bir ön işleminden geçirilmesiyle aktivasyon enerjisinde düşüş, buna paralel olarak tabaka kalınlıklarında ve mekanik özelliklerinde önemli artışlar elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Borlama, Mekanik Alaşımlama, Difüzyon.

ABSTRACT

Boronizing on Low Carbon-High Strength Steel

Muhammet Gökhan ALBAYRAK

Ph.D. Thesis

FIRAT UNIVERSITY

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Metallurgical and Materials Engineering

Metallurgical and Materials Engineering

June 2021, Pages: xix + 221

Low carbon-high strength steels used in many different sectors in industry can be expanded by surface treatment. As a result of their low carbon, hardener elements must be impregnated through diffusion from the surface and this process must be carried out at the lowest possible temperature and time. In cases boronizing is the best decision when high hardness and abrasion resistance is required on the surface. For this purpose, this study was carried out in order to obtain the boride layer depth to be formed on the surface with a boronizing powder mixture undergoing a pre-treatment such as mechanical alloying (MA) at the lowest possible temperatures. Samples DIN St28 were boronized at 650-700-750-800-850 °C temperatures and boronized 3-6-12 hours heat treatment times with mechanical alloying powder mixture using a planetary grinder of 0, 10 and 20 hours. The samples were examined in terms of wear values over weight loss using optical and scanning electron microscopes, powder and boride layer characterization with x-rays, surface-to-center hardness distribution with vicker hardness measurement method and Pin-on-Disk method. As a result of the findings, it was not possible to obtain a boride layer at 650 °C by using the gel obtained with the powders without mechanical alloying, while the boride layers were obtained as a result of 6 and 12 hours of boronization in 10 and 20 hour processes. The activation energies of the powders were calculated by each mechanical alloying process and found to be 113,555, 108,814 and 106,746 kJ/mol, respectively. With the increasing temperature and boronizing times, significant increases in layer thickness and hardness were observed, and consequently, significant reductions in weight loss due to abrasion were obtained. A decrease in activation energy and a significant increase in layer thickness and mechanical properties were achieved by pretreating the powders to be used in boronizing process, which is a diffusional process, such as mechanical alloying.

Keywords: Boronizing, Mechanical Alloying, Diffusion.

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Dünyadaki Bor Rezervleri (% olarak).....	26
Şekil 2.2. Bor 'un kullanım alanları ve yerleri	32
Şekil 2.3.a) Borlama işleminde kullanılan kutu (Temsili) b) Fırın (Temsili).....	34
Şekil 2.4. Borür Tabakaları İle Geçiş Bölgesi Temsili	38
Şekil 2.5. Borür Tabakası Boyunca Alaşım Elementlerinin Dağılım Şeması	40
Şekil 2.6. Konsantrasyonun Yüzeyden İtibaren Mesafeye Bağlı Olarak Değişimi.	42
Şekil 2.7. Montajlı durumda SPEX Sample Prep 8000 Serisi karıştırıcı / değirmen.....	45
Şekil 2.8. (a) Retsch marka PM 100 model tek istasyonlu bilyalı değirmen. (b) Bilyalı değirmen içindeki hareketi gösteren şematik.....	46
Şekil 2.9. a) Atritör tipi bir değirmen b) Öğütme kabı iç görseli	47
Şekil 2.10. Fe-Fe ₃ C Denge Diyagramı	56
Şekil 2.11. Fe-B Denge Diyagramı.	57
Şekil 3.1. a) Üç cisim aşınması b) İki cisim aşınması.....	58
Şekil 3.2. a) Kesme modu b) Kama oluşturma modu c) Sürüme aşındırıcı aşınma testleri deneysel görüntüsü	59
Şekil 3.3. Adhesiv aşınma.	60
Şekil 3.4. Oksidasyon aşınması.....	61
Şekil 3.5. Korozyon aşınma görseli.	61
Şekil 3.6. Kaviteleşme aşınmasına maruz kalmış bir pervane görseli.....	62
Şekil 3.7. Erozyon aşınma görseli.....	62
Şekil 5.1. 10 saat MA işlemi uygulanmış tozların XRD grafiği.	70
Şekil 5.2. 20 saat MA işlemi uygulanmış tozların XRD grafiği.	71
Şekil 5.3. 10 ile 20 saat MA işlemi uygulanmış tozların XRD grafiği.	72
Şekil 5.4. Sırasıyla 10 ve 20 saat MA işlemi uygulanmış tozların SEM görüntüleri (20.00 KX).	72
Şekil 5.5. MA süresi ile Toz Boyutu arasındaki ilişki.	74
Şekil 5.6. 0M65-3 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (500x).....	75
Şekil 5.7. 0M65-3 kodlu numuneye ait XRD grafiği.	76
Şekil 5.8. 10M65-3 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (500x).....	76
Şekil 5.9. 10M65-3 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.	77
Şekil 5.10. 10M65-3 kodlu numuneye ait XRD grafiği.	77
Şekil 5.11. 20M65-3 kodlu numuneye ait Mikroyapı görüntüsü (500x).	78
Şekil 5.12. 20M65-3 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.	79

Şekil 5.13. 20M65-3 kodlu numuneye ait XRD grafiği.	79
Şekil 5.14. 0M65-6 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (500x).....	80
Şekil 5.15. 0M65-6 kodlu numuneye ait XRD grafiği.	81
Şekil 5.16. 10M65-6 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (500x).....	81
Şekil 5.17. 10M65-6 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.	82
Şekil 5.18. 10M65-6 kodlu numuneye ait XRD grafiği.	83
Şekil 5.19. 20M65-6 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (500x).....	83
Şekil 5.20. 20M65-6 kodlu numuneye ait SEM-EDX görüntüsü.	84
Şekil 5.21. 20M65-6 kodlu numuneye ait XRD grafiği.	85
Şekil 5.22. 0M65-12 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (500x).....	86
Şekil 5.23. 0M65-12 kodlu numuneye ait XRD grafiği.	86
Şekil 5.24. 10M65-12 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (500x).....	87
Şekil 5.25. 10M65-12 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.	87
Şekil 5.26. 10M65-12 kodlu numuneye ait XRD grafiği.	88
Şekil 5.27. 20M65-12 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (500x).....	89
Şekil 5.28. 20M65-12 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.	89
Şekil 5.29. 20M65-12 kodlu numuneye ait XRD grafiği.	90
Şekil 5.30. 0M70-3 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (500x).....	91
Şekil 5.31. 0M70-3 kodlu numuneye ait XRD grafiği.	91
Şekil 5.32. 10M70-3 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (500x).....	92
Şekil 5.33. 10M70-3 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.	92
Şekil 5.34. 10M70-3 kodlu numuneye ait XRD grafiği.	93
Şekil 5.35. 20M70-3 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (500x).....	94
Şekil 5.36. 20M70-3 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.	94
Şekil 5.37. 20M70-3 kodlu numuneye ait XRD grafiği.	95
Şekil 5.38. 0M70-6 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (500x).....	96
Şekil 5.39. 0M70-6 kodlu numuneye ait XRD grafiği.	96
Şekil 5.40. 10M70-6 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (500x).....	97
Şekil 5.41. 10M70-6 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.	97
Şekil 5.42. 10M70-6 kodlu numuneye ait XRD grafiği.	98
Şekil 5.43. 20M70-6 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (500x).....	99
Şekil 5.44.20M70-6 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.	99
Şekil 5.45. 20M70-6 kodlu numuneye ait XRD grafiği.	100
Şekil 5.46. 0M70-12 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (200x).....	101

Şekil 5.47. 0M70-12 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.	101
Şekil 5.48. 0M70-12 kodlu numuneye ait XRD grafiği.	102
Şekil 5.49. 10M70-12 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (500x).	102
Şekil 5.50. 10M70-12 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.	103
Şekil 5.51. 10M70-12 kodlu numuneye ait XRD grafiği.	104
Şekil 5.52. 20M70-12 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (200x).	104
Şekil 5.53. 20M70-12 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.	105
Şekil 5.54. 20M70-12 kodlu numuneye ait XRD grafiği.	105
Şekil 5.55. 0M70-12, 10M70-12 ve 20M70-12 kodlu numunelere ait Mikrosertlik-Mesafe grafiği.	106
Şekil 5.56. 0M75-3 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (200x).	107
Şekil 5.57. 0M75-3 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.	107
Şekil 5.58. 0M75-3 kodlu numuneye ait XRD grafiği.	108
Şekil 5.59. 10M75-3 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (500x).	109
Şekil 5.60. 10M75-3 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.	109
Şekil 5.61. 10M75-3 kodlu numuneye ait XRD grafiği.	110
Şekil 5.62. 20M75-3 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (200x).	110
Şekil 5.63. 20M75-3 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.	111
Şekil 5.64. 20M75-3 kodlu numuneye ait XRD grafiği.	112
Şekil 5.65. 0M75-3, 10M75-3 ve 20M75-3 kodlu numunelere ait Mikrosertlik-Mesafe grafiği.	112
Şekil 5.66. 0M75-6 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (200x).	113
Şekil 5.67. 0M75-6 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.	113
Şekil 5.68. 0M75-6 kodlu numuneye ait XRD grafiği.	114
Şekil 5.69. 10M75-6 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (200x).	115
Şekil 5.70. 10M75-6 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.	115
Şekil 5.71. 10M75-6 kodlu numuneye ait XRD grafiği.	116
Şekil 5.72. 20M75-6 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (200x).	116
Şekil 5.73. 20M75-6 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.	117
Şekil 5.74. 20M75-6 kodlu numuneye ait XRD grafiği.	118
Şekil 5.75. 0M75-6, 10M75-6 ve 20M75-6 kodlu numunelere ait Mikrosertlik-Mesafe grafiği.	119
Şekil 5.76. 0M75-12 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (200x).	119
Şekil 5.77. 0M75-12 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.	120
Şekil 5.78. 0M75-12 kodlu numuneye ait XRD grafiği.	120
Şekil 5.79. 10M75-12 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (200x).	121
Şekil 5.80. 10M75-12 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.	121

Şekil 5.81. 10M75-12 kodlu numuneye ait XRD grafiği.	122
Şekil 5.82. 20M75-12 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (200x).....	123
Şekil 5.83. 20M75-12 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.	123
Şekil 5.84. 20M75-12 kodlu numuneye ait XRD grafiği.	124
Şekil 5.85. 0M75-12, 10M75-12 ve 20M75-12 kodlu numunelere ait Mikrosertlik-Mesafe grafiği.....	125
Şekil 5.86. 0M80-3 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (500x).....	125
Şekil 5.87. 0M80-3 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.	126
Şekil 5.88. 0M80-3 kodlu numuneye ait XRD grafiği.	126
Şekil 5.89. 10M80-3 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (200x).....	127
Şekil 5.90. 10M80-3 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.	127
Şekil 5.91. 10M80-3 kodlu numuneye ait XRD grafiği.	128
Şekil 5.92. 20M80-3 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (200x).....	129
Şekil 5.93. 20M80-3 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.	129
Şekil 5.94. 20M80-3 kodlu numuneye ait XRD grafiği.	130
Şekil 5.95. 0M80-3, 10M80-3 ve 20M80-3 kodlu numunelere ait Mikrosertlik-Mesafe grafiği.	131
Şekil 5.96. 0M80-6 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (200x).....	131
Şekil 5.97. 0M80-6 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.	132
Şekil 5.98. 0M80-6 kodlu numuneye ait XRD grafiği.	132
Şekil 5.99. 10M80-6 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (200x).....	133
Şekil 5.100. 10M80-6 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.	133
Şekil 5.101. 10M80-6 kodlu numuneye ait XRD grafiği.	134
Şekil 5.102. 20M80-6 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (200x).....	135
Şekil 5.103. 20M80-6 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.	135
Şekil 5.104. 20M80-6 kodlu numuneye ait XRD grafiği.	136
Şekil 5.105. 0M80-6, 10M80-6 ve 20M80-6 kodlu numunelere ait Mikrosertlik-Mesafe grafiği.	137
Şekil 5.106. 0M80-12 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (200x).....	137
Şekil 5.107. 0M80-12 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.	138
Şekil 5.108. 0M80-12 kodlu numuneye ait XRD grafiği.	138
Şekil 5.109. 10M80-12 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (200x).....	139
Şekil 5.110. 10M80-12 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.	139
Şekil 5.111. 10M80-12 kodlu numuneye ait XRD grafiği.	140
Şekil 5.112. 20M80-12 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (200x).....	141
Şekil 5.113. 20M80-12 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.	141
Şekil 5.114. 20M80-12 kodlu numuneye ait XRD grafiği.	142

Şekil 5.115. 0M80-12, 10M80-12 ve 20M80-12 kodlu numunelere ait Mikrosertlik-Mesafe grafiği.....	143
Şekil 5.116. 0M85-3 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (200x).....	143
Şekil 5.117. 0M85-3 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.	144
Şekil 5.118. 0M85-3 kodlu numuneye ait XRD grafiği.	144
Şekil 5.119. 10M85-3 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (200x).....	145
Şekil 5.120. 10M85-3 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.	145
Şekil 5.121. 10M85-3 kodlu numuneye ait XRD grafiği.	146
Şekil 5.122. 20M85-3 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (200x).....	147
Şekil 5.123. 20M85-3 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.	147
Şekil 5.124. 20M85-3 kodlu numuneye ait XRD grafiği.	148
Şekil 5.125. 0M85-3, 10M85-3 ve 20M85-3 kodlu numunelere ait Mikrosertlik-Mesafe grafiği.	149
Şekil 5.126. 0M85-6 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (200x).....	149
Şekil 5.127. 0M85-6 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.	150
Şekil 5.128. 0M85-6 kodlu numuneye ait XRD grafiği.	150
Şekil 5.129. 10M85-6 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (100x).....	151
Şekil 5.130. 10M85-6 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.	151
Şekil 5.131. 10M85-6 kodlu numuneye ait XRD grafiği.	152
Şekil 5.132. 20M85-6 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (100x).....	153
Şekil 5.133. 20M85-6 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.	153
Şekil 5.134. M2020M85-6 kodlu numuneye ait XRD grafiği.	154
Şekil 5.135. 0M85-6, 10M85-6 ve 20M85-6 kodlu numunelere ait Mikrosertlik-Mesafe grafiği.	154
Şekil 5.136. 0M85-12 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (200x).....	155
Şekil 5.137. 0M85-12 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.	155
Şekil 5.138. 0M85-12 kodlu numuneye ait XRD grafiği.	156
Şekil 5.139. 10M85-12 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (200x).....	157
Şekil 5.140. 10M85-12 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.	157
Şekil 5.141. 10M85-12 kodlu numuneye ait XRD grafiği.	158
Şekil 5.142. 20M85-12 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (100x).....	158
Şekil 5.143. 20M85-12 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.	159
Şekil 5.144. 20M85-12 kodlu numuneye ait XRD grafiği.	160
Şekil 5.145. 0M85-12, 10M85-12 ve 20M85-12 kodlu numunelere ait Mikrosertlik-Mesafe grafiği.....	160
Şekil 5.146. Borür tabaka kalınlığının borlama süresi ve sıcaklığa göre değişimi; a) MA Yapılmamış, b) 10 saat MA, c) 20 saat MA yapılmış.	163
Şekil 5.147. MA işlemi yapılmamış jel kullanılarak borlama yapılmış numunelere ait d^2-t grafiği.....	164

Şekil 5.148. 10 saat MA işlemi yapılmış jel kullanılarak borlama yapılmış numunelere ait d^2-t grafiği. ..	165
Şekil 5.149. 20 saat MA işlemi yapılmış jel kullanılarak borlama yapılmış numunelere ait d^2-t grafiği. ..	166
Şekil 5.150. MA işlemi yapılmamış jel kullanılarak borlama yapılan numunelere ait $LnD-1/T$ grafiği.....	167
Şekil 5.151. 10 saat MA işlemi yapılan numunelere ait $LnD-1/T$ grafiği.	168
Şekil 5.152. 20 saat MA işlemi yapılan numunelere ait $LnD-1/T$ grafiği.	169
Şekil 5.153. Farklı sıcaklıklarda borlama yapılmış numunelere ait Ortalama Tabaka Kalınlığı – MA İşlem Süresi grafiği.....	170
Şekil 5.154. Farklı sıcaklıklarda borlama yapılmış numunelere ait Ortalama Tabaka Kalınlığı – MA İşlem Süresi grafiği.....	171
Şekil 5.155. Borlanmamış referans St28 malzemesinin aşınma deneyleri a) Her 300m ‘de meydana gelen Ağırlık Kaybı-Mesafe, b) Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği.	174
Şekil 5.156. Borlanmamış DIN St28 malzemesinin 40N yük ve 3000m sonundaki aşınma SEM görüntüsü.	175
Şekil 5.157. 10M65-6 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.....	175
Şekil 5.158. 20M65-6 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.....	176
Şekil 5.159. 10M65-12 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.....	176
Şekil 5.160. 20M65-12 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.....	177
Şekil 5.161. 10M70-3 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.....	178
Şekil 5.162. 20M70-3 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.....	178
Şekil 5.163. 10M70-6 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.....	179
Şekil 5.164. 20M70-6 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.....	180
Şekil 5.165. 0M70-12 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.....	180
Şekil 5.166. 10M70-12 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.....	181
Şekil 5.167. 20M70-12 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.....	181
Şekil 5.168. 0M75-3 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.....	182
Şekil 5.169. 10M75-3 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.....	183

Şekil 5.170. 20M75-3 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.....	183
Şekil 5.171. 0M75-6 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.....	184
Şekil 5.172. 10M75-6 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.....	185
Şekil 5.173. 20M75-6 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.....	185
Şekil 5.174. 0M75-12 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.....	186
Şekil 5.175. 10M75-12 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.....	186
Şekil 5.176. 20M75-12 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.....	187
Şekil 5.177. 0M80-3 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.....	188
Şekil 5.178. 10M80-3 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.....	188
Şekil 5.179. 20M80-3 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.....	189
Şekil 5.180. 0M80-6 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.....	189
Şekil 5.181. 10M80-6 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.....	190
Şekil 5.182. 20M80-6 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.....	190
Şekil 5.183. 0M80-12 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.....	191
Şekil 5.184. 10M80-12 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.....	191
Şekil 5.185. 20M80-12 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.....	192
Şekil 5.186. 0M85-3 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.....	193
Şekil 5.187. 10M85-3 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.....	193
Şekil 5.188. 20M85-3 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.....	194

Şekil 5.189. 0M85-6 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.....	194
Şekil 5.190. 10M85-6 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.....	195
Şekil 5.191. 20M85-6 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.....	195
Şekil 5.192. 0M85-12 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.....	196
Şekil 5.193. 10M85-12 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.....	196
Şekil 5.194. 20M85-12 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.....	197
Şekil 5.195. 850 °C 12 saat süreyle borlama yapılmış numunelerin farklı yüklerdeki Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği.	198
Şekil 5.196. 850 °C 6 saat süreyle borlama yapılmış numunelerin farklı yüklerdeki Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği.	199
Şekil 5.197. 850 °C 3 saat süreyle borlama yapılmış numunelerin farklı yüklerdeki Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği.	199
Şekil 5.198. 800 °C 12 saat süreyle borlama yapılmış numunelerin farklı yüklerdeki Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği.	200
Şekil 5.199. 800 °C 6 saat süreyle borlama yapılmış numunelerin farklı yüklerdeki Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği.	201
Şekil 5.200. 800 °C 3 saat süreyle borlama yapılmış numunelerin farklı yüklerdeki Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği.	201
Şekil 5.201. 750 °C 12 saat süreyle borlama yapılmış numunelerin farklı yüklerdeki Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği.	202
Şekil 5.202. 750 °C 6 saat süreyle borlama yapılmış numunelerin farklı yüklerdeki Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği.	203
Şekil 5.203. 750 °C 3 saat süreyle borlama yapılmış numunelerin farklı yüklerdeki Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği.	203
Şekil 5.204. 850 °C 'de 12 saat borlamayla üretilmiş numunelere ait 40 N yükte Toplam Ağırlık Kaybı – MA İşlem Süresi – Sertlik grafiği.	204
Şekil 5.205. 20 saat MA işlemi, 850 °C 'de 12 saat borlamayla üretilmiş numuneye (20M85-12) ait 40 N yük altındaki aşınma yüzeyi SEM görüntüsü.	205
Şekil 5.206. 800 °C 'de 12 saat borlamayla üretilmiş numunelere ait 40 N yükte Toplam Ağırlık Kaybı – MA İşlem Süresi – Sertlik grafiği.	206
Şekil 5.207. 750 °C 'de 12 saat borlamayla üretilmiş numunelere ait 40 N yükte Toplam Ağırlık Kaybı – MA İşlem Süresi – Sertlik grafiği.	207

Şekil 5.208. 20 saat MA işlemi, 750 °C 'de 12 saat borlamayla üretilmiş numuneye (20M75-12) ait 40 N yük altındaki aşınma SEM görüntüsü.	207
Şekil 5.209. 700 °C 'de 12 saat borlamayla üretilmiş numunelere ait 40 N yükte Toplam Ağırlık Kaybı – MA İşlem Süresi – Sertlik grafiği.	208
Şekil 5.210. 20 saat MA işlemi, 700 °C 'de 12 saat borlamayla üretilmiş numuneye (20M70-12) ait 40 N yük altındaki aşınma SEM görüntüsü.	209



TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Dünya Bor Rezervlerinin 2014 Dağılımı	26
Tablo 2.2. Bor Kaynağı Olarak Kullanılan Malzemelerin Bazı Özellikleri	34
Tablo 2.3. Korumucu Gaz Atmosferlerinin Bazı Özellikleri.	35
Tablo 2.4. Uygun Bor Sağlayıcıları ve Bazı Özellikleri	36
Tablo 2.5. FeB / Fe ₂ B Fazı İçin Gerekli Aktivasyon Enerjileri	41
Tablo 2.6. Farklı Tipteki Değirmenlerin Kapasiteleri.	48
Tablo 4.1. DIN St28 Çeliğinin Kimyasal Kompozisyonu.	64
Tablo 4.2. Çelik Bilyelerin Kimyasal Kompozisyonu.	65
Tablo 4.3. Üretilen Numunelerin Parametreleri.	68
Tablo 5.1. 10 Saat MA İşlemi Uygulanmış Tozların XRD Analizine Ait Değerler.	73
Tablo 5.2. 20 Saat MA İşlemi Uygulanmış Tozların XRD Analizine Ait Değerler.	74
Tablo 5.3. Numunelerin Borür Tabakası Ortalama Kalınlıkları.	162
Tablo 5.4. Numunelere ait ortalama tabaka kalınlıkları ve bu kalınlıkların MA İşlemi Yapılmamış numunelerin ortalama tabaka kalınlıklarına göre % artış miktarları (Borlama süresine göre).	171
Tablo 5.5. Numunelere ait ortalama tabaka kalınlıkları ve bu kalınlıkların MA İşlemi Yapılmamış numunelerin ortalama tabaka kalınlıklarına göre % artış miktarları (Borlama sıcaklığına göre).	172
Tablo 5.6. Borlama ve mekanik alaşımlama süresinin fonksiyonu olarak tabaka büyüme hızı ve borür tabaka kalınlığının değişimi için ampirik yaklaşımlar.	173

KISALTMALAR

MA	: Mekanik Alaşımlama
BTO	: Bilye Toz Oranı
İKA	: İşlem Kontrol Ajanı
DIN	: Alman Standardizasyon Enstitüsü



1. GİRİŞ

Mühendislik tasarlanan bir sistemin uyum içinde çalışması hedefler. Tasarımın gereksinimlerini karşılayacak malzeme olmayışı sistemin sadece tasarımda kalması ve ortaya bir ürün çıkmaması anlamına gelmektedir. Sistemin sınırlarını kullanılacak malzemenin çizdiği anlamını çıkarmak mümkündür. Bu bağlamda gerek tasarım sahipleri, gerek bilim insanları malzemelerin geliştirilmesi konusuna önem vermektedir. Düşük karbonlu yüksek mukavemetli çeliklerin kullanım sınırlarını genişletmek adına, gerek yüzey sertleştirme metotları gerek aşınma direnci sağlamak adına yüzeyde borür tabakası oluşturma işlemi yıllardan beri yapılmaktadır. Malzeme yüzeyinde uygun sertlik ve aşınma direnci sağlanması karşılıklı çalışan makine parçalarının sistem içerisindeki kullanım ömürlerini artmaktadır. Düşük karbonlu çeliklerin yüzeyine emdirilen bor elementi ile borür tabakaları oluşturma işlemi “Borlama” olarak isimlendirilmektedir. Bor kaynağı olarak kullanılacak tozların mekanik alaşımlama (MA) gibi bir ön işleme tabi tutulması ile birlikte tozların aktivasyon enerjilerinin düşürülebileceği, borür tabakalarının kalınlıklarının arttırılabileceği ve bu avantajların sonucunda elde edilecek mekanik özelliklerin geliştirilebileceği hipotezi bu çalışmanın temelini oluşturmaktadır. MA ile aktivasyon enerjisindeki düşüş, borlama gibi difüzyonel bir işlemin daha düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilmesi anlamına gelmektedir. Ayrıca, demir esaslı malzemelerin iç yapısının mümkün olduğunca az değişmesi, istenilen tabaka kalınlıklarının daha düşük sürelerde elde edilmesi ve böylece ısı işlem süresinin daha da düşürülmesi anlamlarına da gelmektedir.

Tez çalışması için literatür taraması yapılmış ve önceden yapılan çalışmaların bir bölümü aşağıda kısaca özetlenmiştir.

SAE 1020 çeliği ile yapılan çalışmada, 850, 900 ve 950 °C sıcaklıklarda 2, 4 ve 6 saat işlem süreleriyle kutu borlama tekniği kullanılarak borlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Farklı sıcaklık ve işlem sürelerinde borlanan numunelerin borür karakterizasyonu, yüzey sertlikleri ve aşınma davranışları incelenmiştir. Borür tabakalarının karakterizasyonu neticesinde FeB ve Fe₂B borürleri tespit edilmiş, sertlik değeri olarak 1600 Hv_{0,1} ölçülmüştür. Borlanmamış numune ile kıyaslama yapıldığında aşınma değerlerinde 500 kata varan sonuçlar elde etmişlerdir [1].

C15 ve C70W2 standardına sahip çeliklerle yapılan çalışmada, kutu borlama işlemi 870 - 970 ° C sıcaklık aralığında ve 4 - 8 saatlik sürelerle gerçekleştirilmiştir. Borür tabakalarının ortalama kalınlıkları sırasıyla 69,9 - 239,2 µm ve 60,6 - 181,2 µm arasında değişmektedir. Borür tabakalarının kinetiği için, deneysel denklemler türetilmiştir[2].

SAE 1020 çeliği ile yapılan çalışmada, bor kaynağı olarak H₃BO₃ içeren alternatif bir toz kutu borlama için hazırlanmıştır. Borlama işlemi, 4 ila 12 saat arasında değişen süre boyunca 850-950 C sıcaklık aralığında gerçekleştirilmiştir. Optik incelemeler neticesinde çelik numuneler üzerinde testere dışı morfolojisine sahip tek fazlı bir borür tabakası görülmüştür. Ortalama tabaka

kalınlıklarının 43 ile 214 μm arasında olduğu tespit edilmiştir. Borür tabakasının kalınlığını sıcaklık ve zamanın bir fonksiyonu olarak tahmin etmek için diyagramlar çizilmiştir. SAE 1020 çeliği için bor aktivasyon enerjisinin değeri 183,15 kJ/mol olarak tahmin edilmiştir [3].

AISI 310 ve AISI 430 çelikleriyle yapılan çalışmada ticari olarak satın alınmış Ekabor-II tozu borlayıcı toz olarak kullanılmıştır. Çalışmada çeliklerin borlama durum özellikleri ve difüzyon kinetikleri 850, 950 ve 1050 $^{\circ}\text{C}$ sıcaklıklarda 2, 4 ve 6 saat süreyle yapılan deneyler boyunca incelenmiştir. Alt tabakaların kimyasal bileşimine bağlı olarak, AISI 310 ve AISI 430 yüzeyindeki borid tabakası kalınlıkları sırasıyla 50,48 ve 91,62 μm olarak ölçülmüştür. AISI 310 ve AISI 430 çeliklerinin yüzeyinde oluşan borür bileşiklerinin sertlikleri sırasıyla 1658 $Hv_{0,1}$ ile 2284 $Hv_{0,1}$ ve 1762 $Hv_{0,1}$ ile 2165 $Hv_{0,1}$ arasında değışirken, işlenmemiş çeliklerin AISI 310 ve AISI 430 sertlik değeri sırasıyla 276 $Hv_{0,1}$ ve 328 $Hv_{0,1}$ olarak ölçülmüştür. Sıcaklık ve tabaka kalınlığına bağlı olarak, borun aktivasyon enerjileri AISI 310 ve AISI 430 çelikte sırasıyla 165,45 ve 134,95 kJ/mol olarak bulunmuştur [4].

Kam mili üretiminde kullanılan AISI 5115 yerine yüzeyi borlanarak sertleştirilen AISI 1020 çeliğinin kullanılabilirliğinin irdelendiği bir çalışmada borlanmış AISI 1020 çeliğinin mikro sertliğinin AISI 5151 çeliğine yakın çıktığı ve sırasıyla 2700 $Hv_{0,08}$ ve 2850 $Hv_{0,08}$ olduğu ölçülmüştür. Aşınma deneyleri sonucunda AISI 5115 çeliğinin verilerinin daha iyi olduğu gözlemlenmiş olmasına rağmen sertlik ve aşınma değeri arasındaki farkların çok büyük olmadığı not edilmiştir. Genel olarak AISI 5115 çeliği yerine borlanmış AISI 1020 çeliğinin de kullanılabileceği sonucuna varılmıştır [5].

DIN GGG50 rumuzlu dökme demirle yapılan çalışmada kırılma tokluk değeri araştırılmıştır. Borlama, boraks, borik asit ve ferro-silikondan oluşan bir tuz banyosunda 850 ile 950 $^{\circ}\text{C}$ arasında atmosferik basınç altında 2–8 saat süreyle gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlar, daha uzun borlama süresinin daha kalın borid tabakalarına neden olduğunu ortaya koymuştur. Sfero dökümde oluşan borür tabakalarının 1160 – 2140 $Hv_{0,1}$ sertlik aralığında, kırılma tokluğu ise borlama süresi ve sıcaklığa bağlı olarak 2.19 – 4.47 MPa. $\sqrt{m}$ aralığında olmuştur [6].

AISI 8620 ve HARDOX 400 çelikleri ile yapılan çalışmada Ekabor-II tozu borlayıcı toz olarak kullanılmış, borlama ısıl işlemi 2, 4 ve 6 saat sürelerde 850, 900 ve 950 $^{\circ}\text{C}$ sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. Isıl işlem sıcaklık ve sürelerine bağlı olarak 70 ile 280 μm arasında borür tabaka kalınlıkları ölçülmüş, abrasiv aşınma deneyleri sonucunda yüksek sertliğin aşınma direnci üzerinde olumlu etkisi olduğu sonucuna varılmıştır [7].

SAE 1040 ile yapılan başka bir çalışmada 950 ve 1000 $^{\circ}\text{C}$ sıcaklık, 3 ve 5 saat sürelerde susuz boraks ve ferrosilisyum tozları karışımıyla kutu borlama işlemi yapılmış, üretilen numunelerin aşınma ve korozyon davranışları incelenmiştir. Artan sıcaklık ve sürelerde borür tabaka kalınlıklarında artış olduğu tespit edilmiş, borlanmış ve borlanmamış numuneler korozyon

ve aşınma davranışları açısından kıyaslanmış ve korozyon direnci değerlerinde 8, aşınma direnci değerlerinde ise 6 kat iyileşme olduğu sonucuna varılmıştır [8].

EN-TS-C10E, EN-TS-C35E, EN-TS-C60E ve 41Cr4 gibi imalat çelikleri kullanılarak yapılan bir çalışmada ise 850, 950 ve 1050 °C sıcaklıklarda, 2, 4, 6 ve 8 saat sürelerde termokimyasal borlama yöntemi ile yüzey sertleştirme işlemi yapılmıştır. Elde edilen numunelerin yüzeyden merkeze doğru sertlik profilleri çıkartılmış ve ana malzeme ile yüzeyler arasında yaklaşık 9 kata varan sertlikler bulunmuştur. Korozyon deneyleri sonucunda 73 kata kadar koruma sağlandığı sonucuna varılmıştır. Kırılma toklukları açısından yapılan incelemelerde 3,12 ile 4,54 MPa $\sqrt{m}$ sonuçları ayrıca tespit edilmiştir [9].

Saf kobalt (%99,95 saflıkta) ile yapılan çalışmada 850, 900 ve 950 °C sıcaklıklarda 2, 4, 6 ve 8 saat ısıtım işlem süreleri boyunca kutu borlama tekniğiyle LSB-II ticari bor kaynağı (SiC içerikli) kullanılarak borlama işlemi gerçekleştirilmiş, borlanmış numunelerde, proses sıcaklıklarına bağlı olarak Co₂B veya Co₂B + Co₂Si fazlarının varlığı gözlemlenmiştir. Modifiye edilmiş katmanın derinliği, işlem sıcaklığına ve süresine bağlı olarak 40 ila 186 µm arasında değişmektedir. Kobaltın borid tabakasının sertliği, silis tabakası ve alt tabakanınkinden çok daha yüksek ve borid tabakasının aşınma direnci, silis tabakasınınkinden daha mükemmel olduğu sonucuna varılmıştır [10].

DIN 34CrNiMo6 çelikle yapılan çalışmada Ekabor-II tozlarından oluşan katı bir ortamda 850, 900 ve 950 °C sıcaklıklarda, 2, 4 ve 6 saat süreyle borlama işlemi yapılmış, kinetik ve morfolojik açıdan incelemeler yapılmıştır. Borür tabakalarının kalınlığı, borlama sıcaklığına ve zamanına bağlı olarak $22 \pm 2,3$ ile $145 \pm 4,1$ arasında değiştiği, borür tabakasının sertliği, 950 °C da 6 saat borlamadan sonra yaklaşık 1857 Hv_{0,1} iken, alt tabakanın sertliğinin sadece 238 Hv_{0,1} civarında olduğu ortaya konulmuştur. Büyüme hızı sabitleri sıcaklığa bağlı olarak $1,2 \times 10^{-13}$ - $9,8 \times 10^{-13}$ m²/s arasında bulunmuştur. Bor difüzyonu için aktivasyon enerjisi $239,4 \pm 8,6$ kJ/mol olarak hesaplanmıştır [11].

AISI 1020 çeliğe ile yapılan bir diğer çalışmada 1000 °C sıcaklıkta 4 saat borlama işlemi uygulanmış, borlanmış tabakanın 177 µm kalınlığında ve 2100 Hv_{0,01} sertliğine sahip olduğu sonucuna varılmıştır. SiC tozu kullanılarak hazırlanan aşındırıcı ile yapılan aşınma deneyleri neticesinde AISI 1020 çeliğinin borlama işleminin, mikro ölçekli aşınma koşulları altında malzemenin aşınma direncini Fe₂B tabakasının kırılma ve kullanılan aşındırıcıya benzer bir sertliğe sahip olmasından dolayı azalttığı ve Fe₂B tabakasının aşınma işlemi sırasında kırılmaya neden olduğu sonucuna varılmıştır [12].

ASTM A36 çeliği kullanılarak yapılan bir çalışmada 850-1000 °C sıcaklık aralığında 2 ile 8 saatlik işlem süreleri boyunca kutu borlama yöntemi kullanılarak borlama yapılmış ve Fe₂B 'nin aktivasyon enerjisi üzerine 2 farklı matematiksel modelleme geliştirilmiştir. İlk modelleme arayüzdeki (Fe₂B / substrat) kütle dengesi denklemine ve Fick 'in ikinci yasasının sabit durumda

(zamana bağılı olmaksızın) çözümüne, ikinci modelleme ise sabit olmayan durumda tek boyutlu analiz için ilk yaklaşımla aynı matematiksel ilkelere dayanmaktadır. Sonuç olarak, ASTM A36 çeliği için bor aktivasyon enerjisi 161 kJ/mol olarak hesaplanmış. Bu enerji değeri, her iki model arasında ve diğer literatür verileriyle karşılaştırılmış. Son olarak, 2.5 saatlik bir uygulama süresi ile 850 °C 'de elde edilen Fe₂B tabakasının kalınlığının deneysel değeri, bu iki model kullanılarak tahmin edilen kalınlıklar ile karşılaştırılmış ve deneysel veriler ile simüle edilen sonuçlar arasında iyi bir uyum sağlandığı görülmüştür [13].

AISI D2 soğuk iş takım çeliği ile yapılan çalışmada 700-750 °C sıcaklıklarda 2-4 saat sürelerde plazma pasta yöntemiyle borlama işlemi gerçekleştirilmiş, %70 H₂-%30 Ar gaz karışımı ile 10 mbar basınç altında ve borlayıcı olarak boraks pasta kullanılmıştır. Karakterizasyon için XRD ve optik mikroskop kullanılmıştır. Artan sıcaklık ve sürelerle birlikte numune yüzeyinde oluşan borür tabakalarında artış meydana geldiği, mikro sertlik değerlerinin 452 'den 1789 Hv_{0,05} 'ye kadar yükseldiği sonucuna varılmıştır. Artan sıcaklık ve süreyle birlikte mikro sertliklerde artışın görüldüğü fakat aşınma direnci için aynı tespitin geçerli olmadığı not edilmiştir. Elektrokimyasal deneyler sonucunda, borlanmış çeliklerdeki korozyon direnci, borlanmamış çeliğe göre artmıştır. Fakat artan borlama sıcaklığı ve süresi ile birlikte korozyon direnci biraz düşmüştür [14].

AISI 1045 (C45) çeliği kullanılarak yapılan çalışmada 870-970 °C sıcaklıklarda 4-8 saat arasında kutu borlama tekniğiyle borlama yapılmıştır. Sonuçlar borid fazının hacim payındaki enine kesit değişikliklerinin borlanma sıcaklığına ve süresine bağlı olduğunu göstermiş, frekans faktörü ($4,51 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$) ve aktivasyon enerjisi (199,63 kJ/mol) değerleri Arrhenius denklemi ile belirlenmiştir [15].

AISI H13 sıcak iş takım çeliği ve AISI 304 paslanmaz çeliğiyle yapılan çalışmada oluşan borürlerin mekanik özellikleri incelenmiş, borlama işlemi, boraks, borik asit ve ferrosilikondan oluşan tuz banyosunda 800–950 °C sıcaklık aralığında 3, 5 ve 7 saat süreyle gerçekleştirilmiştir. Çeliklerin yüzeyindeki borür katmanlarının X ışını analizi neticesinde çeşitli FeB, Fe₂B, CrB ve Ni₃B pikleri ortaya çıkmış, metalografik çalışmalar, borür tabakasının 304 çelikte düz ve pürüzsüz bir morfolojiye sahip olduğunu, H13 çeliğinde ise düzensiz bir morfolojide olduğunu göstermiştir [16].

Al_{0.1}CoCrFeNi gibi yüksek entropili alaşım (HEA) ile yapılan çalışmada tribolojik özellikleri tek fazlı FCC yapısıyla iyileştirmek için 900 °C 'de sırasıyla 2, 4, 6 ve 8 saat süreyle kutu borlama yöntemi kullanılarak borlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Borlanmış alaşımların kuru ve deiyonize suda Si₃N₄ bilyelerine karşı ileri geri kayma aşınma davranışı ile alaşımların yapısı ve faz oluşumu incelenmiştir. HEA yüzeyinde kalınlığı yaklaşık 17,3–58,5 µm olan çift katmanlı yapıya sahip borlanmış bir tabaka oluşturulmuştur. Borlanmış alaşımın aşınma mekanizması, borlanma süresi artırılarak aşındırıcı ve delaminasyon aşınmasından parlatma etkisine dönüştürülmüştür. Bunun tersine, deiyonize sudaki borlanmış alaşımların aşınma mekanizması,

borlanma süresi arttıkça kademeli olarak iki cisimli aşınmadan üç cisimli aşınmaya değişmiştir. Bu esnada, Si_3N_4 karşı yüzeyinin aşınma mekanizmasının da kademeli olarak üç cisimli aşınmaya dönüştüğü sonucuna varılmıştır [17].

AISI 4140 çeliği kullanılarak yapılan bir başka çalışmada, 750 ile 975 °C arasındaki sıcaklıklarda 2–8 saat zaman aralığında pasta borlama tekniği ile borlama yapılmış, elde edilen numunelerin aşınma özellikleri 0,2-1,85 m/s kayma hızlarında 20, 40 ve 60 Newton 'luk bir block-on-pin konfigürasyonunda bir tribometre kullanılarak incelenmiştir. Yüksek yük (60 N) ve düşük kayma hızlarında (0,95 m/s) kaplama katmanları, düşük yük ve yüksek kayma hızlarında yapılan deney sonuçlarına göre daha fazla aşınma direnci göstermiş ve numunelerin aşınma mekanizmasının oksidatif aşınma olduğu belirlenmiştir. Numunelerin aşınma hızı, yükün ve kayma mesafesinin üstel bir fonksiyonu olarak arttığı sonucuna varılmıştır [18].

AISI 4140 çeliği kullanılarak yapılan başka bir çalışmada ferrobora + ($\text{SiO}_2 - \text{Na}_2\text{O}$) tozları ile sırasıyla 600 – 900 °C sıcaklıkta ve 2, 4, 6 ve 8 saat süreyle borlama yapılmıştır. Bu çalışmada bor kaynağı olarak kullanılan tozlar 1-2 ve 4 saatlik mekanik alaşımlama (MA) süreçlerinden geçirilmiştir. Optimum MA süresi olarak 2 saat bulunmuştur. Borlama ısı işlemi için artan sıcaklık ve sürelerde bor tabaka kalınlığında artış gözlemlenmiş ve en yüksek tabaka kalınlığı 145 µm olarak saptanmıştır. 1, 2 ve 4 saatlik MA işlemi neticesinde aktivasyon enerjileri 106, 78 and 178 kJ/mol olarak tespit edilmiştir. Sonuç olarak, mekanik aktivasyon kullanılarak borlama uygulama koşullarının iyileştirildiği saptanmıştır [19].

Yapılan literatür taraması neticesinde mekanik alaşımlama ile birlikte difüzyonel bir işlem olan borlamanın genel itibarıyla 800 °C ve üzeri sıcaklıklarda uygulandığı görülmektedir. Bu bağlamda ortaya konulan hipotezi desteklemek adına farklı sürelerde MA işlemi yapılarak borlama üzerine olan etkilerini incelemek için 650-850 °C arası ısı işlem sıcaklığı ve 3-6-12 saat işlem süreleri temel alınmıştır. Borlayıcı toz kaynağı olarak satın alınan elementel bor, SiC ve KBF_4 tozları uygun stokiyostride karıştırılarak kullanılmıştır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Bor

Atom numarası 5, atom ağırlığı 10,81 ve simgesi “B” olan bor elementi, periyodik cetvelde 3A grubunda yer almaktadır. Doğada tek başına bulunmayan bor yer kabuğunun yapısında %0,0001 oranında bulunur. Bor, 19,57:80,43 oranında B10 ve B11 [20] olarak adlandırılan iki kararlı izotop şeklinde bulunmaktadır. Oksijene olan ilgisi sebebiyle de doğada çeşitli oksit bileşikleriyle bulunmakta ve genel olarak “borat” ismini almaktadır. Yarı metal ve yarı iletken özelliğe sahiptir. Elementer bor amfor yapıda iken koyu kahverengi, kristal formda iken sert ve gevrek yapıda [21], ergime noktası 2300 °C ‘dır. Ergime sıcaklığından soğutulması neticesinde çok sert ve gevrek bir hal alır, havada ısıtıldığında ise yeşil renkte bir alev ile yanar [22]–[24]. Oksijene karşı afinitesi çok yüksektir.

Atomik yarıçapı yaklaşık olarak 1A mertebesindedir. Bor, bileşiklerinde metal dışı gibi davranır ki bu özellikleri Karbon “C” ‘a benzemektedir. Karbona benzeyen bir diğer özelliği ise saf haliyle elektriği iletmesidir. Kristalize halde ise görünümünün yanında optik özellikleri ve yaklaşık sertliği bakımından elmasa benzemektedir.

2.1.1. Tarihçe

Babilliler, 4.000 yıldan fazla süre önce Uzak Doğu'dan boraksı altın işleme esnasında kullanmak üzere getirdiler. Bor ‘un mumyalama gibi tıbbi ve metalürjik uygulamalarda kullanılması eski Mısırlılara atfedilmektedir. Bu çok eski boraks tarihinin doğrulanma konusunda çelişkiler yaşanırken tinkalin ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, mineral boraks) ilk kez sekizinci yüzyılda Mekke ve Medine çevresinde kullanıldığına dair kesin kanıtlar mevcuttur [25]. En eski boraks kaynağının Tibet gölleri olduğuna inanılmaktadır. Boraks, Himalayalar üzerinden Hindistan'a taşınmıştır [26].

Modern bilimde kullanılan elementel bor 1808 yılında Gay Lussac, Thenard ve Sir Humphry Davy tarafından aynı zamanda keşfedilmiştir. Doğal bor mineralleri (Boratlar) insanlık tarihinde yaklaşık 2000 yıldır kullanılmaktadır. Bunun bir ispatı olarak İran ve Arabistan ‘da bulunan eski yazıtlarda Arapça “burag” kelimesi gösterilebilir. Daha da eskilere gidildiğinde M.Ö. 300 yıllarında Çin seramiklerinde boratların altın dökümü için ergitici olarak kullanıldığı görülmektedir. Boraks Avrupa ‘ya 13. Y.Y. ‘ın ünlü kâşifi Marco Polo tarafından getirilmiştir. Tibet ‘ten getirilen mineral Avrupa ‘da lehimleme ve sırlama malzemesi olarak kullanılmıştır. Dünyanın en zengin bor minerallerine sahip ülkesi olan Türkiye ‘de ise borun varlığı 13. Y.Y. ‘dan itibaren bilinmekle beraber günümüze dek pek fazla kullanılmamıştır. 1772 yılında İtalya ‘da Sasolit minerali keşfedilmiş, 1836 yılında Güney Amerika ülkelerinden Şili ve Arjantin ‘de borat yatakları keşfedilerek 19. Y.Y. ‘a kadar en çok işletilen madenler halini almıştır[27].

2.1.2. Bor Maden ve Yatakları

Bor, bilinen diğer elementler gibi dünyanın çeşitli bölgelerinde büyük kümeler halinde dağılmamıştır. Dünyada 4 ana merkezde toplandığını söylemek mümkündür. Bunlar büyüklükleri ile orantılı olarak sıralanırsa Türkiye, Rusya, Amerika ve Çin olmaktadır. 2014 yılına ait verilere bakıldığında yukarıdaki ülkelerin sahip olduğu bor rezervlerinin toplam rezerve oranları sırasıyla %72.8, %7.6, %6.1 ve %3.6 olmaktadır. Geri kalan yaklaşık %10 'lu rezerv ise Şekil 2.1. 'deki gibi çeşitli ülkelere dağılmıştır.



Şekil 2.1. Dünyadaki Bor Rezervleri (% olarak) [28].

Dünyadaki ticari bor rezervleri; Amerika-Kaliforniya Eyaleti “Mojave Çölü”, Güney Amerika ‘da “And Kemer” bölgesi, Doğu Rusya ve Türkiye ‘nin de yer aldığı “Güney-Orta Asya Orojenik Kemer” üzerinde toplanmaktadır. Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü ‘nün 2014 verilerine göre ülkelerin sahip oldukları bor mineralleri Tablo 2.1. ‘de verilmiştir.

Tablo 2.1. Dünya Bor Rezervlerinin 2014 Dağılımı[28].

ÜLKE	TOPLAM REZERV (BİN TON B ₂ O ₃)	TOPLAM REZERV (%B ₂ O ₃)
Türkiye	953.300	72.8
Rusya	100.000	7.6
A.B.D.	80.000	6.1
Çin	47.000	3.6
Şili	41.000	3.1

Tablo 2.1. 'in devamı.

Sırbistan	24.000	1.8
Peru	22.000	1.7
Bolivya	19.000	1.5
Kazakistan	15.000	1.1
Arjantin	9.000	0.7
TOPLAM	1.310.300	100,0

2.1.3. Türkiye İçin Bor

Birçok kültüre beşiklik yapan Anadolu toprakları, Konya-Çatalhöyük kazılarında bulunan bulgulara bakılınca M.Ö. 6000 yıllarında madencilik faaliyetlerinin yapıldığı tahmin edilmektedir. Tokat-Erbaa yakınlarındaki kazılarda M.Ö. 3800, Kütahya-Gümüşköy yakınlarındaki kazılarda M.Ö. 2400 yıllarına ait çeşitli metal eşyalara rastlanmıştır. Eşyaların bazıları saf metal şeklindeyken bazıları da alaşım halinde olduğu tespit edilmiştir. Türkiye 'nin üzerinde bulunduğu coğrafya madencilğe ve metalürjiye yabancı bir coğrafya olmadığı görülmektedir.

Anadolu coğrafyası üzerinde bor cevherinin ilk olarak Romalılar döneminde keşfedildiği tahmin edilse de [29] bor madenciliği 1861 yılında başlayıp 1979 yılına kadar yerli-yabancı özel şirket ortaklığı şeklinde sürmüştür. 1923 yılında ilan edilen Cumhuriyet 'den sonra iktisadi olarak Türkiye Cumhuriyeti 'nde önemli adımlar atılmıştır. Bu adımlar içinde madencilik üzerine atılan ilk adım 1934 'de Isparta –Keçiborlu 'da kurulan Kükürt İşletmesi olmuştur. Dünyanın bor madeni açısından en zengin ülkesi olan Türkiye Cumhuriyeti 'nde 1935 yılında Gazi Mustafa Kemal ATATÜRK' ün direktifiyle madencilik üzerine yapılacak bankacılık işlemleri için ETİBANK kurulmuştur. Kurumun adı günümüzde ETİ MADEN olarak değişmiş olsa da faaliyetlerine devam etmektedir. 1979 yılına kadar bor işletmeleri hem özel hem de kamu eliyle yürütülmekteydi. Bu yıldan sonra çıkarılan bir kararname ile özel müteşebbislerin işletmeleri devletleştirilmiştir. Bu tarihten sonra bor madenlerinde tek işletme hakkı ETİ MADEN kurumuna aittir [30]. Türkiye'de ilk ticari faaliyetin, 1861 yılında çıkartılan "Maadin Nizamnamesi" uyarınca 1865 yılında "Desmaures Company" adlı bir Fransız şirketine işletme imtiyazı verilmesiyle başladığı bilinmektedir [31]. İleriki tarihlerde kurulan İtalyan-İngiliz ortaklık şirketi "Cove-Hansun Company", Fransız şirketinin yönetimini devralma yoluyla günümüz Türkiye 'si, topraklarında madencilik çalışmalarına devam etmiştir. 1872 Nevada-ABD 'de üleksit cevheri ile 1881 yılında Death Valley 'de bulunan boraks cevherleriyle bor madeninin önemi artmış ve kullanım alanları çeşitlenmiştir. 1899 yılında ABD menşei "US Borax Consolidated Incorporated Company" kurulmasıyla Türkiye 'de yatırım yapmaya başlamıştır. US Borax firması Desmaures Company 'ye ait hisseleri satın alma yoluyla Türkiye 'deki saha çalışmalarına başlamış ve isim değişikliği

yaparak Türk Boraks A.Ş. adını almıştır [29]. Bu şirketin hissedarları sırasıyla %94 US Borax, %4 İngiliz ve %2 Türk ortaklara aittir [32]. 1978 yılında yayımlanan resmi gazetede 2172 Sayılı Kanunla [30] özel işletmelere ait olan maden ocaklarının işletmesi kamulaştırılmış, böylelikle günümüze kadar Eti Maden tarafından Türkiye 'nin bor madenleri işletilmektedir.

Ülkemiz ve dünya sanayisi için bor; Cam ve Seramik, Temizlik ve Beyazlatma, Alev Geciktiriciler, Tarım, Metalurji, Enerji, Sağlık ve Çimento Sanayi 'si için önemlidir. Eti Maden tarafından internet sitesinde paylaşılan finansal verilere göre 2002 yılında 790.000 ton olan bor satışı, 2017 yılında yaklaşık olarak 2,2 milyon tona ulaşmıştır. Bu da 2017 yılı için 879 milyon Amerikan Doları (\$) olarak ekonomiye katkı sağlamıştır [33].

2.1.4. Bor Üretim Metotları

Dünyada bor üretimi yapan ülkeler ve üretim miktarları sırasıyla Türkiye, ABD, Arjantin, Rusya ve Çin 'dir. Rezerv olarak bakıldığında her ne kadar toplam rezervin yaklaşık olarak %75 'ine Türkiye sahip olsa da borun endüstride kullanımı üretim aşamaları dikkate alınarak sınıflandırılmaktadır. Ham bor, konsantre bor, rafine bor ve özel (uç ürün) bor olarak dört ana kısma ayrılmaktadır. Ham bor; ocaktan çıkarılmış, harici hiçbir fiziksel-kimyasal işlem görmemiş haline verilen isimdir. Tinkal, kolemanit, üleksit ham bora örnek olarak gösterilebilir. Konsantre bor; ocaktan çıkarılmış ham borun cevher hazırlama-zenginleştirme işlemleri (kıırma, eleme, öğütme, yıkama ve sınıflandırma) görmüş, ihtiva ettiği gang minerallerinden ayrılmış haline denir. İsimlendirilirken ham bor mineralinin önüne "konsantre" kelimesi eklenir. Rafine bor; ham veya konsantre borun uygun kimyasallarla işleme tabi tutularak ana mineralin içindeki bor harici diğer maddelerin uzaklaştırılma işlemi görmüş halidir. Boraks dekahidrat, boraks pentahidrat, susuz boraks gibi mamüller rafine bora örnek gösterilebilir. Özel (uç ürün) boraks ise rafine borun daha uç ürünlerine indirgenmesi ile kullanıma özel hazırlanmasıyla elde edilen ürünlerdir. Çinko borat, bor nitrür ve bor karbür özel borlara örnek olarak gösterilebilir [34].

2.1.5. Elementel Bor Üretimi

Bor elementine bakıldığında yüksek sertlik, ergime sıcaklığı, mukavemet, kimyasal direnç gibi mekanik ve kimyasal özelliklerinin yanı sıra bünyesinde depolayabildiği hidrojen (H) sayesinde çoğu araştırmacıların ve sanayicilerin ilgisini çekmektedir. Borun üretiminden itibaren elementel seviyeye indirilmesi esnasında saflığı kullanım alanına göre oldukça önemlidir. Elementel bor eldesi dört ana başlık altında yapılabilmektedir. Bunlar metalotermik redüksiyon, mekanokimyasal sentezleme, ergimiş tuz elektrolizi ve gaz fazından redüksiyondur.

Metalotermik redüksiyon ile bor üretimi; bilinen en geleneksel yöntemdir. Metalotermik redüksiyon; oksijene afinitesi daha yüksek olan bir metalle oksijen içerikli metaloksitin yer

değiştirme reaksiyonu olarak tarif edilebilir. Yüksek sıcaklığa maruz kalan bor içeren oksitli bileşikler, redükleyici bir metal ile indirgenir ve yapıda yüksek empürite içeren bor bulunur. Bazı proseslerde yüksek sıcaklığın yanında yüksek basınçta bulunmaktadır. Elde edilen yüksek impüriteli ürün sıcak lıç işlemine tabi tutularak saflaştırılabilmektedir. Son ürün yüksek saflıkta olmamakla birlikte kristal yapıda da değil, amorf yapıdadır [35]–[37] Metalotermik reaksiyon;



şeklinde gösterilebilir.

Ergimiş Tuz Elektrolizi ile bor üretimi; bor kaynağı olarak ergimiş bor tuzlarının kullanıldığı yöntemdir. Bor tuzlarının bileşimi borun oksitli bir bileşiğinin alkali metal florür veya klorürünün içerisinde ısıtılmasıyla oluşturulur. Yapılan elektroliz işlemi neticesinde metal ya da karbon katot üzerinde elementel bor birikmesi ile işlem sonlanır. Elektroliz reaksiyonu;



şeklinde gösterilebilir [38]–[42].

Mekanokimyasal sentezleme ile bor üretimi; bir değirmen ya da öğütücü kullanılarak bor içeriğinin bilyeler yardımıyla istenilen boyut, tane ve mikro yapıya getirilmesi işlemine dayanmaktadır. Kimyasal reaksiyonlar ve indirgenme işlemi öğütme esnasında gerçekleşmektedir. Daha sonra kimyasal çözündürme ile bor tozları saflaştırılmaktadır [43], [44].

Gaz fazdan redüksiyon ile bor üretimi; ısıtılmış altlık üzerinden redükleyici gaz ile karıştırılmış bor içeren bir gaz karışımı geçirilerek yüzeyde bor tanelerinin çökertilmesi esasına dayanmaktadır. Bu gaz karışımının ısıtılmış kızgın yüzey üzerinden geçtiği esnada borun toz halinde kızgın yüzeyde topaklanmasıdır. Altlık yüzeyde termal olarak parçalanarak borun amorf ya da kristal yapıda olması reaksiyon sıcaklığına bağlıdır. Üretimin saflığı gaz karışımında kullanılan bor içerikli gazın saflığına bağlıdır. Üretimlerin saflık derecelerine bakıldığında en iyi verimi yüksek saflıkta bor gazı kullanılmak suretiyle gaz fazdan redüksiyon ile bor üretim metodu vermektedir. Örnek olarak; bor kaynağı olarak BCl_3 ve redükleyici gaz olarak H_2 kullanılarak hazırlanan gaz karışımı için ürün olarak B, BH_3 , $BHCl_2$ ve HCl elde edilir. Reaksiyonlar;



olmaktadır.

Elementel borun elde edildiği 1 numaralı reaksiyon haricinde elde edilen B içerikli ürünler istenmeyen ürünlerdir ve impürite olarak davranırlar. Burada etkin parametre BCl_3/H_2 oranıdır. Prosesin önemli parametreleri reaksiyon sıcaklığı, ortam saflığı, gazların oranı ve debisi olarak yazılabilir[45]–[50].

2.1.6. Bor ‘un Kullanım Alanları

Bor ‘un sanayiye girişi madenden mineralin çıkarılmasıyla birlikte başlamaktadır. Kullanım alanının büyük bölümü mineral - mineral konsantresi, geri kalan kısmı ise rafineri olsa da gelişen teknoloji ile rafineri ürün kullanımı ham mineral kullanımını geride bırakmıştır. Boraks pentahidrat, Boraks dekahidrat, Susuz Boraks, Borik asit, Bor oksit, zenginleştirilmiş Kolemanit ve zenginleştirilmiş Üleksit gibi Bor ürünleri tüketilen toplam Bor'un yüksek bir oranını oluşturmaktadır [51].

Hafiflik, kimyasal dayanım ve gerilme direnci gibi mekanik özellikleri sebebiyle plastik, elyaf, kâğıt, lastik gibi endüstriyel alanlarda kullanım alanı bulmaktadır. Cam sanayisinde borun cama kattıkları ile ki bunlar sıcaklık değişimlerinde genleşmeyi azalttığı, güçlü kimyasallara ve çizilme gibi mekanik etkilere karşı koruduğu için uzay ve elektronik sanayisinde önemli bir yere sahiptir. Çok yüksek derecede (Mohs:9) sertliğe sahip olması sebebiyle sanayide kullanılan kesici uç ve takımların yapımında ve bunların soğutulmasında kullanılmaktadır.

Magnezyum diborid ‘in süper iletkenlik özelliği 21. YY. ‘da keşfedilmiştir. Süper iletkenlik; kritik sıcaklığın altında malzemenin elektriksel direncinin ortadan kalkması ile açıklanabilir. Temin edilebilme kolaylığı açısından bakılınca magnezyum diborid ‘in ucuz oluşu, piyasada kullanılan süper iletkenler arasında kendine yer bulmuştur. Çok yüksek akım kaynaklarını üzerinde taşıırken hiçbir kayba uğratmaması sebebiyle enerji santrallerinde, Maglev, MR gibi güçlü mıknatıs uygulamalarında ve elektronik cihazlarda ısınma problemine karşı kullanım alanlarına da sahiptir [52]. Cep telefonu, tablet, diz üstü ve masa üstü bilgisayarlar gibi günümüz vazgeçilmezleri bilişim cihazlarımızın akım levhalarında yine bor kullanılmaktadır.

Sivil - askeri havacılık ve uzay sanayinde özellikle yakıt sistemlerinde kullanılan bor uçakların uçuş mesafelerinin yanı sıra havada kalma sürelerini de artırmıştır. 60 ‘lı yıllarda kullanılmaya başlayan bor türevi yakıtlar uçakların ardından füze sistemlerine de uyarlanmıştır. XB-70 Valkyrie ve F-117 Stealth Fighter bombardıman, SR-71 Blackbird casus uçakları ve Tomahawk füzeleri bunların en bilinen örnekleridir. Askeri havacılık ve uzay sanayisinin yakıt temelini oluşturan borun stratejik önemi bu konularla birlikte artmıştır. SSBC ‘nin Sputnik I ve II numaralı projelerinde kullanılan borun Türkiye menşei olduğu anlaşıldıktan sonra bor taşıyan Türk yük gemileri uluslararası sularda ABD donanma gemileri tarafından durdurulup arama faaliyetleri yapılması yöntemiyle taciz edilmiştir. 1958-61 yılları arasında ise bor NATO (North Atlantic Treaty Organization) tarafından stratejik maden olarak ilan edilmiş ve satışı COCOM tedbirleri

kapsamında Sosyalist Blok ‘a yasaklanmıştır [53]. Sahip olduğu üstün mekanik özellikleri kompozit yapılarda başka malzemelerle birleşerek farklı özellikler ortaya koymakta ve böylelikle havacılık sektöründe yakıt olmanın yanı sıra mekanik aksamalarda da kullanılmaya başlanılmıştır. Yüksek sıcaklığa dayanımı, hafifliği, üretim kolaylığı ve esnekliği gibi özellikleri havacılık sektörü için can alıcı niteliktedir. Bor katkılı kompozit malzemelerin radara yakalanmaması sebebiyle askeri uçak ve füze gövdelerinde sıklıkla kullanılmaktadır[32].

Sanayinin çeşitli sektörlerinde kullanılan bor, sağlık sektöründe de kendisine yer bulmuştur. BNCT (Boron Neutron Capture Therapy) kanser tedavilerinde bor kullanılmaktadır. Kanserli hücrelerin sağlıklı hücrelere en az zarar vererek yok edilmesi tedavisinde bor kullanılmaktadır [54]. Borun bitkiler üzerinde ki etkisi de büyüktür. Köklerin büyümesine katkı sağladığı, fotosentez verimini ve karbondioksit emilim miktarını arttırdığı gözlemlenmiştir[32].

Nükleer santrallerde nötron absorbe edebilme yeteneğinden dolayı titanyum-bor ve bor-karbürlü çelikler kullanılmaktadır. Paslanmaz borlu çelik buna en iyi örnektir. Her bir bor atomu bir nötron soğurabildiğinden reaktörlerin kontrol sistemlerinde ve kapaklarında bor kullanılmaktadır [32]. Şekil 2.2. ‘de Bor ‘un kullanım alanları ve yerleri verilmiştir.

KULLANIM ALANI	KULLANIM YERLERİ
Askeri & Zırhlı Araçlar Cam Sanayi	Zırh levhaları, Seramik levhalar, Silah namluları vb. Borosilikat camlar, Laboratuvar camları, Uçak camları, Borcam, Pyrex, İzole Cam elyafı, Tekstil cam elyafı, Optik lifler, Cam seramikleri, Şişe, diğer düz camlar, Otomotiv camları vb.
Elektronik ve Bilgisayar Sanayi	İşlemciler, LCD Ekranları, CD Sürücüler, Akım levhaları, Bilgisayar ağırları, sıcaklığa-aşınmaya dayanıklı Fiber Optik kablolar, Yarı iletkenler, Vakum tüpleri, Dielektrik malzemeler, Elektrik kondansatörleri, Kapasitörler, Gecikmeli sigortalar, Bataryalar, Lazer yazıcı tonerleri vb.
Enerji Sektörü	Güneş enerjisinin depolanması, Güneş pillerinde koruyucu olarak, Hücre yakıtları vb.
Fotoğrafçılık ve Görüş Sistemleri	Kamera ve objektif camları, Fotoğraf makinaları, Dürbünler, Banyo ve film İmalatı
İlaç ve Kozmetik Sanayi	Dezenfekte ediciler, Antiseptikler, Diş macunları, Lens solüsyonları, Kolonya, Parfüm, Şampuan vb.
İletişim Araçları	Cep telefonları, Modemler, Televizyonlar vb.
İnşaat Sektörü	Çimentoda direnç arttırıcı ve izolasyon amaçlı olarak
Kağıt Sanayi	Beyazlatıcı olarak
Kauçuk ve Plastik Sanayi	Naylon ve Plastik malzemeler vb.
Kimya Sanayi	Bazı kimyasalların indirgenmesi, Elektrolitik işlemler, Flotasyon ilaçları, Banyo çözeltileri, Katalistler, Atık temizleme amaçlı olarak, Petrol boya, Yanmayan ve Erimeyen boyalar, Tekstil boya, Yapıştırıcılar, Soğutucu kimyasallar, Korozyon önleyiciler, Mürekkep, Pasta ve cilalar, Kibrit, Kireçlenme önleyicileri, Dezenfektan sıvılar, Sabun, Toz deterjanlar, Toz beyazlatıcılar, Parlatıcılar vb.
Koruyucu	Ahşap malzemeler ve ağaçlarda koruyucu olarak, Boya ve vernik kurutucularında vb.
Makine Sanayi	Manyetik cihazlar, Zımpara ve aşındırıcılar Kompozit malzemeler, vb.
Metalürji	Kaplama sanayiinde Elektrolit olarak, Paslanmaz ve alaşımlı Çelik, Sürtünmeye - Aşınmaya karşı dayanıklı malzemeler, Kaynak elektrotları, Metalurjik Flaks, Refrakterler, Briket malzemeleri, Lehimleme, Döküm malzemelerinde katkı maddesi olarak, Kesiciler.
Nükleer Sanayi	Reaktör aksamaları, Nötron emiciler, Reaktör kontrol çubukları, Nükleer kazalarda güvenlik amaçlı ve nükleer atık depolayıcı olarak,
Otomobil Sanayi	Hava yastıklarında, Hidroliklerde, Plastik aksamda, Yağlarda ve metal aksamalarda, Sıcaklık ve ses Yalıtımı sağlamak amacıyla, antifrizler vb.
Patlayıcı Maddeler	Fişek vb.
Seramik Sanayi	Emaye, Sır, Fayans, Porselen boya vb.
Spor Malzemeleri	Kayak aksamaları, Tenis raketleri, Balık oltaları, Golf sopaları, Darbe koruyucular vb.
Tarım Sektörü	Biyolojik gelişim ve kontrol kimyasalları, Gübreler, Böcek - bitki öldürücüler, Yabani ot mücadelesi vb.
Tekstil Sektörü	Sıcaklığa dayanıklı kumaşlar, Yanmayı geciktirici ve önleyici selülozik malzemeler, İzolasyon malzemeleri, Tekstil boya, Deri renklendiricileri, Yapay ipek parlatma malzemeleri, vb.

Şekil 2.2.Bor ‘un kullanım alanları ve yerleri [51].

2.2. Borlama Yöntemleri

2.2.1. Borlama

Borlama; yüksek sıcaklıkta ana metalin yüzeyinde bor atomlarının difüzyonuyla borür tabakası oluşturulması işlemidir[55]. Demir ve çeliğin yüzey özelliklerini iyileştirmek amacı ile kullanılan yöntemlerden biri de borlamadır [56]. Borlama işlemi temelde kimyasal bir işlemdir ve amacı bor atomlarının numune yüzeyine difüzyon ile ana matris yüzeyinde borür ya da borürler oluşturmaktır[57]–[61]. Farklı çalışmalarda farklı tanımlamalar yapılmış olsa da genel itibariyle borlama; bor atomlarının iş parçası üzerinden difüzyon ile içeri girerek yüzeydeki metal kafesin içerisine yayılması ve ana malzemenin atomları ile borür/borürleri oluşturması demektir. Alman Standartları (DIN17014) ‘e göre borlama *“termokimyasal işlem yoluyla iş parçasının yüzeyinin bor atomlarıyla zenginleştirilmesi”* olarak tanımlanmıştır[62]. Yüzey ile yüzey dışındaki atomsal yoğunluk farkı, ısı güç ve zaman gibi difüzyon mekanizmaları bu proseste de etkin bir şekilde çalışmaktadır. Demir dışı metaller, Ni ve Co alaşımları, metal bağlı karbürler, refrakter alaşımları ve bazı süper alaşımlar gibi demir esaslı olmayan malzemelere de borlama işlemi uygulanabilmektedir [58], [63]–[65].

Demir ve ürünlerinin sanayide kullanılmasıyla birlikte farklı ihtiyaçlar doğurmuştur. Doğan ihtiyaçlara cevap verebilmek adına farklı yöntemler denenmiş ve uygulanmıştır. Bu süreç günümüzde de devam etmektedir. Yüzey sertliği, tokluk, aşınma ve korozyon direncinin bir arada olmasının gerektiği durumlarda düşük karbonlu çeliğin yüzeyinin borlanması ile ihtiyaca cevap verebildiği anlaşılmıştır. Borlama işlemi termokimyasal bir işlem olsa da difüzyon mekanizması ile yürüdüğünden sıcaklığın itici gücü kullanılmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda, işlem sürelerinin uzatılmasıyla borlama işlemi yapılabilir. Katı, sıvı ve gaz gibi farklı uygulamaların[66], [67] yanısıra plazma, elektrokimyasal, fiziksel veya kimyasal buhar biriktirme ve iyon implantasyonu[65], [68], [69] gibi yeni metotlarla da borlama işlemleri yapılabilir.

2.2.2. Borlama Yöntemleri

Temelde yüzey sertleştirme işlemlerinden olan borlama, nitrürleme veya karbonlamaya benzer bir süreçtir. Uygun şartlar (difüzyon mekanizması şartları) altında bor kaynağından iş parçasının üzerine tutunan ve içeriye difüze olan bor, metal ile bir ya da birkaç intermetalik faz oluşturarak yüzeyde bir tabaka meydana getirir.

Kutu Borlama Yöntemi; kolay uygulanabilirliği, emniyetli olması, faz değişimlerinin çok az olması ve ihtiyaç duyulan ekipmanların az oluşu gibi avantajlardan dolayı oldukça kullanışlı bir yöntemdir. Kutu Borlama Yöntemi temelde, ısıya dayanıklı ve ağız tam kapatılabilen bir kap içine konulan iş malzemesinin her yanına bor kaynağının temas ettirilmesiyle işleme başlanır. Önceden belirlenmiş ısı ve zaman parametrelerine göre işlem uygulanır ve tamamlanır. Kutu borlama için

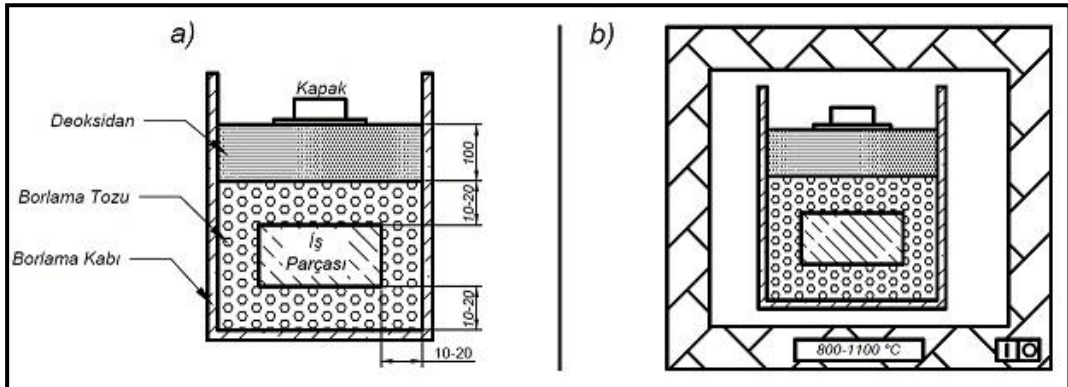
ferro bor, bor karbür (B_4C) ya da amorf bor (B) gibi bir bor kaynağı, aktivatör ve katı yol gibi davranacak bir akışkan gereklidir. Tablo 2.2. ‘de borlamada kullanılan bazı bor kaynaklarının özellikleri verilmiştir.

Tablo 2.2. Bor Kaynağı Olarak Kullanılan Malzemelerin Bazı Özellikleri[70].

İsim	Kimyasal Formül	Molekül Ağırlığı (gr)	Stokiyometrik Bor Yüzdesi	Ergime Noktası (°C)
Amorf Bor	B	10,82	95-97	2050
Ferro Bor	-	-	17-19	-
Bor Karbür	B_4C	55,29	77,28	2450

Tablo 2.2. ‘de verilen bor kaynakları borlama işleminde kullanılan en genel kaynaklardır. Amorf Bor ‘ve Ferro Bor ‘un saflaştırılması hem pahalı hem de zahmetlidir. Bu iki bor kaynağının eldesinde yaşanan zorluklar, nispeten daha ucuz ve kolay bulunabilen Bor Karbür ‘ün borlamada tercih edilme sebeplerinden biridir. Bor Karbür ile elverişli tane boyutu ve uygun aktivatör seçimiyle verimli bir bor katmanı elde edilebilmektedir[8].

Kutu borlama, sementasyon işlemine benzer bir işlemdir. İş parçasının içinde bulunduğu ortamda atmosfer gazlarının özellikle oksijenin olmaması gerekmektedir. Ortamda bulunan oksijen, borlamanın verimini düşürdüğü gibi işlemin tamamen başarısız olmasına da sebep olmaktadır. Oksijen ile teması kesmek için kutunun içini tamamen doldurup ağzını hava alışverişi olmayacak şekilde kapatma veya borlama atmosferini kontrol etme gibi çeşitli yöntemler kullanılabilir. Kutu içinde kalan oksijenin giderilmesi için işlem kutusunun hazırlaması koruyucu gaz atmosferi veya vakum altında ya da kutu içerisine deoksidan ilavesiyle sağlanabilir. İşlemler Şekil 2.3. ‘de temsili olarak gösterilmiştir. Koruyucu gaz atmosferlerinin bazı özellikleri Tablo 2.3. ‘de verilmiştir.



Şekil 2.3.a) Borlama işleminde kullanılan kutu (Temsili) **b)** Fırın (Temsili).

Tablo 2.3. Koruyucu Gaz Atmosferlerinin Bazı Özellikleri.

Gaz İsmi	Kimyasal Bileşimi
Argon (Ar)	%99,996 Ar
Kalıp Gazı (Formier)	%5-30 B ₂ , (%100- B ₂) N ₂
Amonyak (NH ₃)	%75 H ₂ , %25 N ₂
Azot (N)	%99 N ₂ , %1 H ₂

Literatürde yapılmış ve yayınlanmış çalışmalarda kullanılan katı ortam borlama bileşikleri aşağıdaki gibidir[8].

- %100 B₄C.
- %(40-80) B₄C + %(20-60) Fe₂O₃.
- %20 B₄C + %5 KBF₄ + %75 C(grafit).
- %95 B + %5 KBF₄.
- %84 B₄C + %16 Na₂B₄O₇.
- %(7,5-40) B₄C + %(2,5-10) KBF₄ + (50-90) SiC.
- %50 B + %1 NH₄F.HF + % 49 Al₂O₃.
- %98 B₄C + %2 KBF₄.
- %80 B₄C + %20 Na₂CO₃.
- %33 B + %2 NH₄Cl + %65 Al₂O₃.
- %95 B₄C + %5 NaF.
- Fe-B + %10-15 NBF₆.

SiC ve Al₂O₃ dolgu malzemesi olarak kullanılır yani işlem sırasında reaksiyonlarda yer almaz. SiC ‘ün bir diğer vazifesi, borlayıcı kaybını önlemektir. Yukarıdaki listede verilen KBF₄, NH₄Cl, Na₂CO₃, Na₂B₄O₇, NH₄F.HF, NBF₆ ve NaF gibi NaBF₄, BaF₂ ve (NH₄)₃BF₄ aktivatörleri de kullanılabilir. Amorf Bor ve Al₂O₃ ile yapılan borlamada bor tabakası ince ve homojen derinlikte olmaktadır. B₄C ile CaCl₂, BaCl₂ veya H₃BO₃ (borik asit) kullanılması durumunda borlama gerçekleşmemekte, NaCl, HCl, (NH₄)Cl veya Na₂B₄O₇ (boraks) kullanıldığı zaman ise tabaka oluşumu gözlemlenmektedir[71].

Pasta (Macun) Borlama Yöntemi; borlamada kullanılan borlayıcı tozların macun haline getirilerek kullanıldığı yöntemidir. Bu yöntemin en önemli avantajı, iş parçasının belirli bir alanının kısmi olarak borlanabilmesidir. Bu yöntemde, %45 B₄C, (200- 400 mesh tane boyutu) ve %55 kriyolit (Na₃AlF₆ flaks ilaveli) kullanılır ya da iyi bir bağlama ajanı içinde (bütil asetat içinde çözünmüş nitro selüloz) geleneksel borlama tozu karışımı (B₄C-SiC-KBF₄) kullanılır[9]. Macun haline getirilen borlayıcı ve diğer karışım kaplanacak iş parçasının üzerine belirli bir kalınlıkta (3-6mm gibi) sürülerek kül fırına konulmadan önce kurutulur. Kurutma bittikten sonra önceden ayarlanmış parametrelere göre borlama işlemi için fırına konulur. Fırın içi atmosferik olduğu için

borlama kalitesi ve performansı etkilenecektir. Bu yöntemde borlama esnasında koruyucu gaz kullanılması gerekmektedir. Bu yöntemin önemli bir dezavantajı, borlama işleminden sonra numune yüzeyine macunun yapışmasıdır. Bu etkiyi en aza indirmek için sulu sodyum silikat çözeltisi, organik karakterli çözeltiler ve % 3 polivinil alkol ya da % 0,5 metil selüloz içeren sulu çözeltiler kullanılabilir[72].

Elektrolitik Sıvı Borlama Yöntemi; demir esaslı malzemeler için uygun bir yöntemdir. Tablo 2.4. 'deki borlayıcı kaynakların boraks bazlı ergiyik içeren banyo içinde yapılır. %30 B₄C banyoya ilave edilir. Borlama işlemi, B₄C 'nin çok etkili bir indirgeyici olan ferro alüminyum ile değiştirilmesiyle de geliştirilebilir. En iyi sonuçlar %55 boraks, %40-50 ferro boron ve %4-5 ferro alüminyum içeren banyo ile elde edilir. Ayrıca %75 KBF₄ ve %25 KF tuz banyosu ile 670°C altındaki sıcaklıklarda nikel alaşımlarının borlanması kullanılır[9], [55], [73]. Sıvı borlama ayrıca, boraks, ferro silis, borik asit ve sodyum sülfat (NaSO₄) esaslı tuz banyolarında da gerçekleştirilmektedir[74], [75]. Atmosfere açık olmamasından dolayı ortamdaki oksijenden etkilenmemesi prosesin avantajından birisidir. Tuz banyosu sıcaklığının 850°C 'nin altına düşmesiyle banyo içindeki boraksın viskozitesi artar ve difüzyon mekanizması durur. Bu da prosesin en önemli dezavantajıdır.

Tablo 2.4. Uygun Bor Sağlayıcıları ve Bazı Özellikleri [73].

Bor Kaynağı	Kimyasal Bileşim	Molekül Ağırlığı (gr)	Yüzde Bor Miktarı	Ergime Sıcaklığı (°C)
Boraks	Na ₂ B ₄ O ₇ .10H ₂ O	381,42	11,35	-
Susuz Boraks	Na ₂ B ₄ O ₇	201,26	21,50	741
Metabor Asidi	HBO ₂	43,83	24,69	-
Sodyum Bor Florür	NaBF ₄	109,81	9,85	-
Bor Oksit	B ₂ O ₃	69,64	31,07	450
Bor Karbür	B ₄ C	55,29	78,28	2450
Potasyum Bor Florür	KBF ₄	69,67	15,52	-

Elektroliz Sıvı Borlama Yöntemi; iş parçası katot grafit ise anot olarak devreye bağlanır. Elektron akışını sağlayacak iletken yani elektrolit olarak boraks bazlı bor sağlayıcı tuzlar kullanılır. Borlama işlemi, 900-950°C aralığında 4-6 saat süre ile ve 0.15-0.20 A/cm² akım yoğunluğunda gerçekleştirilmektedir[9], [55], [76]. Bor tabakasının homojen bir kalınlıkta olması için sistem içerisindeki iş parçasının belirli devirde sürekli döndürülmesi gerekmektedir. Bor tabaka kalınlığı için akım yoğunluğu ve işlem saati etkin parametrelerdir.

Elektrolizle sıvı borlama işlemi sırasında ergimiş halde tetraborat;



2.6 reaksiyonuna göre borik asit ve elementel oksijene dönüşmektedir. Boraks 'ın içerisinde bulunan Na iyonları sayesinde denklem 2.7 'deki borik asit bor iyonlarını oluşturur.



Denklem 2.6 ve 2.7 'den de görüldüğü üzere katodun yanında zincirleme gerçekleşen reaksiyonlar neticesinde difüzyon için gerekli bor kaynağı elde edilmiş olur. Literatürde yapılmış çalışmalar içinde en iyi sonuçları veren bileşim, sıcaklık ve ortam listesi aşağıdaki gibidir [55].

- $\text{KBF}_4 + \text{LiF} + \text{KF} <600-900^\circ\text{C}>$
- $\%20\text{KF} + \%30\text{NaF} + \%50\text{LiF} + 0.7\text{BF}_2 <800-900^\circ\text{C}>, 9:1 \text{ N}_2:\text{H}_2$
- $\%90(\text{KF}-\text{LiF}) + \%10 \text{KBF}_4, \text{Ar}$
- $\%90(\%30\text{LiF} + \%70 \text{KF}) + \%10 \text{KBF}_4 <700-850^\circ\text{C}>$
- $\%80 \text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 + \%20\text{NaCl}, <800-900^\circ\text{C}>$

Gaz Borlama Yöntemi; bor kaynakları diğer metotlarda katı olarak kullanılmaktadır. Gaz borlamada ise bor kaynağı olarak Bor Halojenler veya Bor Hidritler gibi gaz karışımları kullanılır [9], [55]. Bor hidritlerin veya halojenlerin termal parçalanması sonucu elde edilen gaz fazındaki borun iş parçasına tutunmasıyla borlama işlemi gerçekleşir.

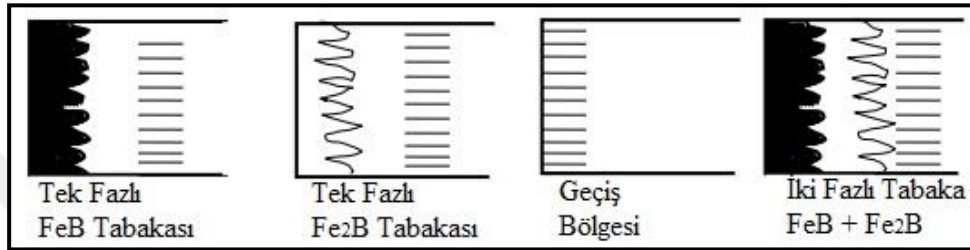
- Diborane (B_2H_6) + H_2 karışımı,
- Bor halid + H_2 veya (75:25) N_2 + H_2 gaz karışımı,
- $(\text{CH}_3)_3\text{B}$ ve $(\text{C}_2\text{H}_5)_3\text{B}$ gibi organik bor bileşikler.

B_2H_6 + H_2 oranı 1:75 ve gaz akış hızı 75-100 litre/saat olduğunda, aşınma direnci ve sertliği yüksek olan bor kaplamalar elde edilmektedir [77]. Diğer yandan, B_2H_6 + H_2 karışımı insan sağlığı açısından olumsuz etkiler sergilediği (hem zehir hem de parlayıcı etkisi) için ticari olarak da kullanılmamaktadır. $(\text{CH}_3)_3\text{B}$ ise ortamda C kirliliği oluşturduğu için tabaka kalitesini bozmaktadır. Genel olarak dezavantajlarının özeti olarak; ortamın zehirli bir ortam oluşu ve sistemin oldukça pahalı olması söylenebilir. Gaz borlamanın homojen bir bor tabaka kalınlığı sağlaması, işlemden sonra temizleme gerektirmemesi, bor potansiyelinin ayarlanabilir olması sayesinde tek tabaka bor kaplaması elde edilebilmesi ve karmaşık geometriye sahip parçaların kolayca borlanabilmesi gibi oldukça önemli avantajları da vardır.

Plazma Borlama Yöntemi; demir ve demir dışı metalik malzemelere uygulanan Ar, H_2 gazları ile birlikte bor kaynağı olarak BCl_3 , B_2H_6 , BF_3 , $\text{B}(\text{OCH}_3)_3$ (trimetilborat) kullanılan ve 800-1000°C sıcaklıkta, yaklaşık 10^{-2} Pa gibi düşük bir basınçta oluşturulmuş plazma içerisinde yapılan bir borlama yöntemidir [78], [79]. Mikroyapı ve demir-bor tabakalarının büyümesi; işlem sıcaklığı, gaz karışım oranları, malzeme kompozisyonları, işlem basınç değişim oranları ve uygulanan akım yoğunluğuyla kontrol edilebilmektedir [7], [80].

2.2.3. Borür Yapısı, Borlama Kinetiği ve Karakteristiği

Borür tabakasının özelliklerini etkileyen birkaç önemli faktör vardır. Bunlar; iş parçasının bileşimi, borlama prosesi, ortamı, ısıtılma sıcaklığı ve süresi olarak sıralanabilir. Borlanmış demir esaslı malzemelerin içyapıları Şekil 2.4. 'de gösterilmiştir. Bu malzeme FeB, Fe₂B veya FeB + Fe₂B ve geçiş bölgesi olmak üzere 3 ana bölümden meydana gelir[7], [81]. Bor elementinin çelik yüzeyinde oluşturduğu her iki katmanın da difüzyon doğrultusunda konumlanmış kolon biçimli kristal yapıya sahip olduğu bilinmektedir.



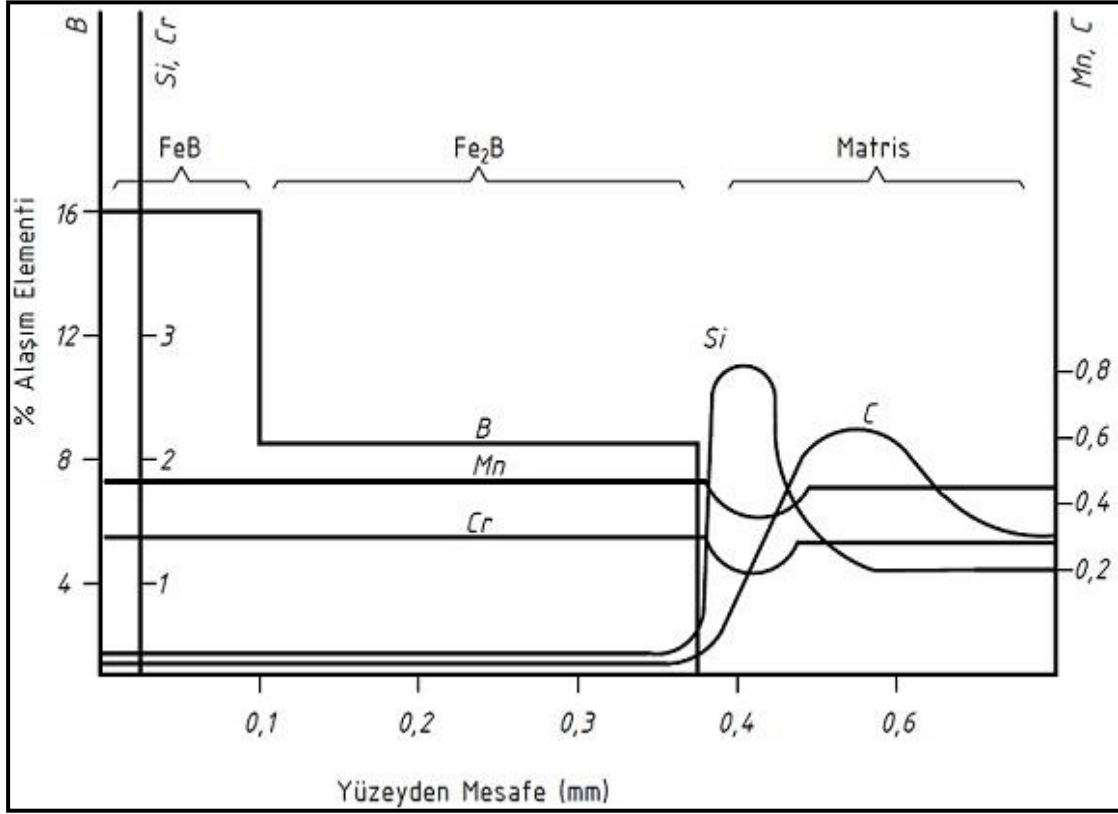
Şekil 2.4. Borür Tabakaları İle Geçiş Bölgesi Temsili [7].

Bor elementinin çelik içerisine difüzyonu ile demir borürleri (FeB, Fe₂B) oluşur ve borür katmanının kalınlığını işlemin sıcaklığı ve süresi belirler. Her iki katmanda difüzyon doğrultusunda konumlanmış kolon biçimli kristal yapıya sahiptir. Ağırlıkça % 8,83 B içeren FeB fazı, Fe₂B fazına göre daha kırılgan [82] olduğu için genel olarak testere dişi morfolojisine sahip tek fazlı Fe₂B katmanının oluşması FeB + Fe₂B içeren çift fazlı bir katmanın oluşmasına göre tercih sebebidir [58], [83]. Borür tabakaları mikroskop altında morfolojik olarak diş köküne benzer görüntüler oluştururlar. İş parçası yüzeyine paralel şekilde oluşmasındansa diş kökü gibi yüzeyin derinliklerine nüfuz etmesi tutunma yüzey alanını arttırdığından yapısal mukavemetleri oldukça iyidir. Fakat literatüre göre artan tabaka kalınlığı ve farklı ısı genleşme katsayıları (FeB / Fe₂B) sebebiyle borür tabakalarında ve derinliklerinde kırılmalar da artmaktadır [7], [58], [84]. Çift fazlı yapılar üzerinde yapılan aşınma çalışmalarında aşınma yüzeylerinde meydana gelen pullanma görüntülerinin kaynağı aşınma ile ortaya çıkan ısının tabakalar tarafından farklı oranlarda absorblanmasıyla ve FeB 'nin çekme, Fe₂B 'nin ise basma gerilmelerine maruz kalmasıyla gerçekleştiği düşünülmektedir [7], [62]. Bu sebepler neticesinde tek tabakalı ya da çift tabakada düşük FeB kalınlığına sahip yapılar hedeflenmektedir.

İş parçasının yüzeyinde oluşan borür tabakaları yüzeydeki makro (çizik, çatlak, boşluk vs.) veya mikro (tane sınırı, dislokasyon) hataların olduğu bölgelerde çekirdeklenmeye başlar. Araştırmacılar ilk çalışmalarında, en dış yüzeyde bulunan fazın FeB_x olduğunu, ancak daha sonra ki çalışmalarda, bu fazın FeB_{1+x} şeklinde ve buradaki x katsayısının 1'den büyük olduğunu belirtmektedirler[9], [82], [85]. Mössbauer elektron spektroskopu ile yapılan ölçümlerde ilk oluşan

borür fazının Fe_2B fazı üzerinde FeB fazının bulunduğu ve en dış yüzeyde ise FeB_{1+x} fazının yer aldığı literatürde ayrıca belirtilmiştir[9], [86]. Bu durumda, bor difüzyonunun Fe_2B ile matris ve FeB ile Fe_2B arasında gerçekleştiği görülmektedir. Kaplama yüzeyinden iç kısımlara doğru gidildikçe Fe_2B fazının ağırlık kazandığı düşünülmektedir. Konuyla ilgili olarak yapılan çalışmada, yüzeyden belirli oranlarda tabakalar kaldırılarak yapılan x-ışınları analizinde bu durum kanıtlanmaktadır[9], [87]. Ayrıca Fe-B denge diyagramına göre borlayıcının bor içeriğinin bu hususta önemli bir kriter olduğu aşıkardır. Çalışmalarda borlama işleminin difüzyon/termodifüzyon basamaklarına göre ilerlediği görülmektedir. Bor tabakalarının farklı büyüme mekanizmaları hakkında çeşitli çalışmalar da bulunmaktadır[9], [55], [67], [88]. Bor atomlarının yayınmasını kolaylaştıran en büyük ara kesitli yapı ortagonal prizmatik yapıdır. [001] doğrultusu boyunca bor atomları yayınır. Bu doğrultuda yayınan bor atomları borür tabakalarından geçiş bölgesine doğru Fe_2B kristallerini oluşturur. Buna difüzyon kanallı büyüme mekanizması denilir[89]. Bir diğer büyüme mekanizması da uçtan büyüme olarak adlandırılmıştır. Bor kaynağı ve borlama prosesi koşullarına göre ilk çekirdeklenen Fe_2B iğnesel olarak büyür ve bor doğrultusu boyunca yönelir [89], [90]. Oluşan iğnesel bor tabakalarının uçlarında meydana gelen gerilmeler ve neticesinde oluşan çarpılmalar yeni tabakanın kolonsal olarak büyümesini ortaya çıkarır. FeB ve Fe_2B 'nin C ve Si çözündürme özelliği yoktur. Borlanan iş parçasının içeriğinde bulunan bu alaşım elementleri yüzeyden aşağı doğru baskılanır. Özellikle Fe_2B tane sınırları üzerinde silisyumca zengin bölgeler oluşur ve bu bölgeler yapıda kaba bir şekilde görülür[74]. Bu bölgeye geçiş bölgesi denilmektedir. Geçiş bölgeleri üzerinde otoradyografik yöntem ile yapılan çalışmada bilinenin aksine geçiş bölgesinin mikroyapıda görünenden daha büyük bir alan olduğu ortaya konulmuştur [74], [91]. İş parçasının kimyasalında yer alan alaşım elementleri borür tabakasının büyüme mekanizmasını etkilediği gibi tabakanın cinsini ve büyüme tipini de etkilemektedir. Karbonun borlama üzerindeki etkileri iş parçasındaki miktarına göre değişmektedir. Düşük ve orta karbonlu çeliklerde dış kökü şeklinde büyüme gerçekleşirken yüksek karbonlu çeliklerde büyüme düzlemseldir. Ortak özellikleri ise büyük oranda Fe_2B tek fazının oluşmasıdır. Kromun borür tabakasının büyümesi üzerine olan etkisi, tıpkı karbon gibi matris malzemesinin kimyasalındaki varlığı ile ilişkili olduğu görülmektedir. Artan krom miktarına göre borlama derinliği azalmakta ve yapı kolonsaldan düzlemsel doğru evrilmektedir. Krom bor ile CrB bileşiği oluşturarak Fe-B muhtemel bileşik oluşumlarını azalttığı düşünülmektedir. Kolonsallıktan düzlemselliğe geçiş ise kromun demir atomlarının yerini alması ile açıklanmaktadır. Nikelin etkisi ise kromun tersi yönünde olduğu, nikelin borür tabakasının yüzeyinde, kromun ise iç kısımlarında olduğu yapılan çalışmalarda ortaya konulmuştur. Manganın da krom gibi borür tabakası içerisine girdiği ve yüzeye doğru yayıldığı yapılan çalışmalarda belirlenmiştir. Borür tabaka kalınlığını azaltıcı bir etkisi vardır. Artan mangan oranıyla borür tabakalarının kolonsallaştığını[92] ve düzlemselleştğini [93] ortaya koyan çalışmalarda bulunmaktadır. Mikroyapı görüntülerinde geçiş bölgesinde görünen ferrit fazının

temel sebebi Silisyum varlığıdır. Alüminyum ve silisyum borlama esnasında borür tabakası içerisinde çözünmediği için geçiş bölgesine doğru baskılanır. Demir ve bor ile birleşerek kompleks bileşik oluşturma eğilimindedir. Alaşım elementlerinin borlama prosesine olan etkisi Şekil 2.5. 'de verilmiştir.



Şekil 2.5. Borür Tabakası Boyunca Alaşım Elementlerinin Dağılım Şeması [8].

Difüzyonun gerçekleşebilmesi için itici güçlere ihtiyaç vardır. Yüzey modifikasyonlarında itici güç hem iş parçasının özelliklerine, hem de bor kaynağının bileşimine bağlıdır. Malzemedeki makro ve mikro hatalar (0, 1, 2 ve 3 boyutlu hatalar) ile difüzyon arasında yakın bir ilişki vardır. Borlama için bakıldığında borür tabakalarının büyümesi difüzyon hızı ile kontrol edilmektedir ve bor atomlarının iş parçası yüzeyinden merkezine dikey doğrultudaki hareketleriyle yayınması sonucunda olduğu yapılan çalışmalarda ortaya konulmuştur. Difüzyon mekanizmalarından en önemlisi şüphesiz işlem sıcaklığı parametresidir. Sıcaklığa bağlı kinetiği veren ifade denklem 2.8 'de verilmiştir [62].

$$D = D_0 \cdot e^{-Q/RT} \quad (2.8)$$

D; yayınma katsayısı, D₀; yayınan atomların yayınma sabiti (cm²/sn), Q; aktivasyon enerjisini (cal/mol), R; üniversal gaz sabitini (1.987 cal/mol.K) ve T; ortam sıcaklığını (K) temsil etmektedir.

Borlama süresiyle borür tabaka kalınlığını veren ifade ise denklem 2.9 'da verilmiştir [81].

$$d^2 = D \cdot t \quad (2.9)$$

d ; borür tabaka kalınlığı (cm), t ; işlem süresi (sn) ve D ; yayınma katsayısı olarak parabolik bir ifadeden faydalanılır. FeB ve Fe₂B fazı içerisinde bor difüzyonu için gerekli aktivasyon enerjisinin neredeyse aynı değere sahip olacağı ileri sürülmektedir [7]. Bunun sebebinin ise B ile Fe atomlarının bağlanma farklılıklarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Tablo 2.5. 'de çeşitli iş parçaları üzerinde FeB / Fe₂B faz oluşumları için gerekli aktivasyon enerjileri verilmiştir.

Tablo 2.5. FeB / Fe₂B Fazı İçin Gerekli Aktivasyon Enerjileri [7].

İş parçası	Q_{FeB} (kJ/mol)	Q_{Fe_2B} (kJ/mol)	$(Q_{FeB} - Q_{Fe_2B})$	Q_{FeB} / Q_{Fe_2B}
Fe	175	157	8	1,11
Fe-0.8C	176	154	12	1,14
Fe-0.5Cr	177	155	22	1,14
Fe-4Cr	289	210	79	1,38
Fe-4Ni	311	178	133	1,75
Fe-10Ni	286	157	129	1,82

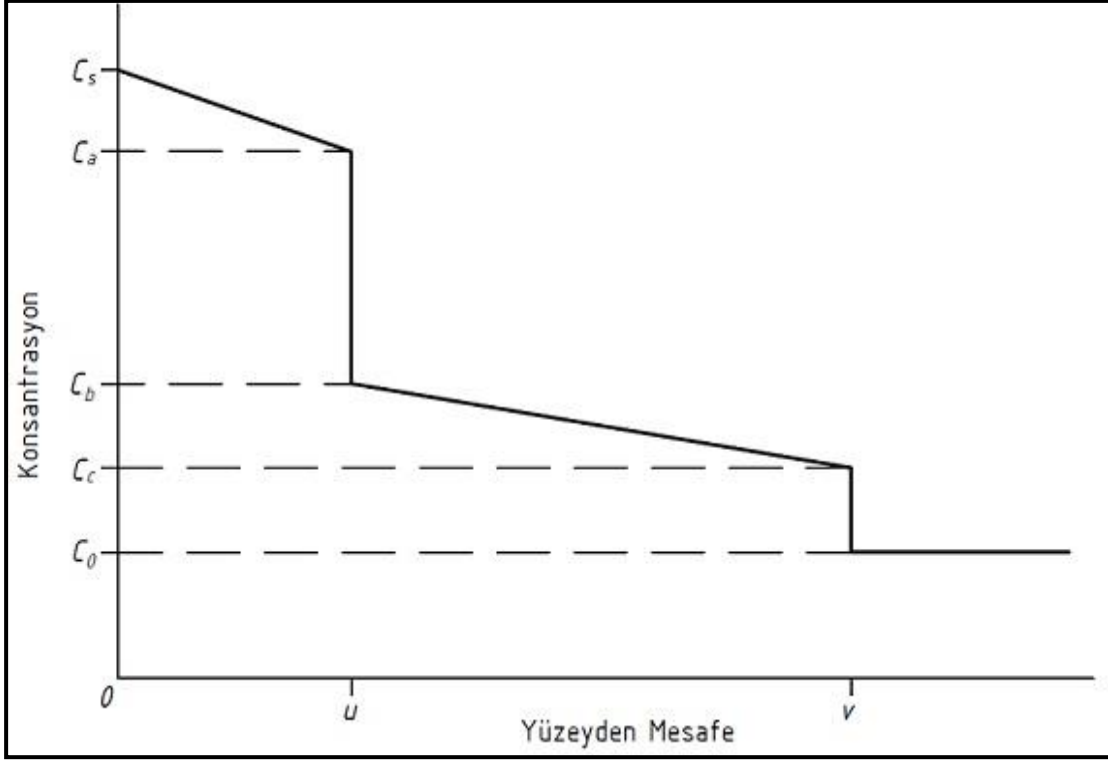
Difüzyonun bir diğer temel mekanizması olan konsantrasyon farkı da itici güç olarak çalışmaktadır. Borlama işlemi sırasında yüzey ile ara yüzey arasında bor konsantrasyonu farkının olmadığı kabul edilerek Denklem 2.10 ve 2.11 elde edilmiştir.

$$C_0 = 0 \quad \text{ve} \quad C_b - C_c = 0 \text{ kabul edildi;}$$

$$C_{FeB} = D_{FeB}(C_s - C_a) \quad (2.10)$$

$$C_{Fe_2B} = D_{Fe_2B}(C_b - C_c) \quad (2.11)$$

Konsantrasyonun yüzeyden itibaren mesafeye bağlı olarak değişimi Şekil 2.6. 'da verilmektedir.



Şekil 2.6. Konsantrasyonun Yüzeyden İtibaren Mesafeye Bağlı Olarak Değişimi.

$C_s - C_a$ ve $C_b - C_c$ sıcaklığa önemli ölçüde bağlı değildir. C_{FeB} ve C_{Fe_2B} 'nin sıcaklığa bağımlılığı D_{FeB} ve D_{Fe_2B} difüzyon katsayılarından kaynaklanmaktadır. Bundan dolayı,

$$C_{FeB} = K_{FeB} \cdot e^{-Q_{FeB}/RT} \quad (2.12)$$

$$C_{Fe_2B} = K_{Fe_2B} e^{-Q_{Fe_2B}/RT} \quad (2.13)$$

şeklinde yazılabilir. Burada " K_{FeB} " ve " K_{Fe_2B} " sabit değerlerdir.

Sonuç olarak, FeB ve Fe_2B fazlarında bor difüzyonu için gerekli olan aktivasyon enerjisi Q ve ön eksponansiyel K faktörü değerleri, sıcaklığın tersi ($1/T$) ile $\ln C_{FeB}$ ve $\ln C_{Fe_2B}$ ile arasında çizilen eğriler yardımıyla ordinatı kesim noktasından ve eğiminden bulunabilmektedir [9].

Borlama işleminin uygulanmasındaki temel amaç yüzey sertliğinin artırılması ve aşınma direnci kazandırılmasıdır. Bor tabakalarının sertlik ölçümleri Vickers mikrosertlik ölçümü ile yapılmaktadır. Genellikle iki farklı bor tabakası olduğundan tabakaların karakteristiğine göre sertlik ölçümünde uygulanacak yük belirlenmektedir. FeB fazı Fe_2B 'ye göre daha sert ve bir o kadar da kırılgan olduğu için uygulanacak yük Fe_2B 'ye göre düşük seçilir. Sertlik değerlerinin 2000 kg/mm^2 vickers ve üzeri olduğu yapılan çalışmalarda görülmektedir. Borür tabakaları yüksek aşınma dayanımı ve sertliklerinin yanında 900°C 'a kadar ısıl dayanım da sergilemektedir. Bunun sebebi 913°C civarında $\alpha\text{Fe} \rightarrow \gamma\text{Fe}$ dönüşümüdür. Kırılma tokluğu deneyleri borlanmış çelikler

üzerinde uygulanabilmektedir. Çift fazlı yapılarda meydana gelen kılcal çatlaklar kırılma tokluğunu olumsuz etkilemektedir. Çift fazlı tabakalara sonradan uygulanan ısıl işlemle tek fazlı tabakalar elde edilebilmektedir fakat çalışmalarda tek fazda porozitenin arttığı ve bunun da kırılma tokluğunu düşürdüğü ortaya konulmuştur. Bu sebeple tek fazlı borür tabaka tercih edilmektedir [94]. Borun oksijene olan ilgisi yüksektir. Borlanmış yüzeylerin atmosfere açık kısımlarında bor oksitlenerek ince bir oksit tabakası oluşturur. Borlama esnasında ortamda oksijen varlığı istenmese de sonrasında çalışan iş parçasının yüzeyinde oluşan ince oksit tabakası yağlayıcı etki göstererek sürtünme katsayısını düşürmekte ve yüzeylerin kaynamalarını engellemektedir. Kısaca atmosfere açık ve yüksek sıcaklıklarda çalışan iş parçalarında bile güvenle kullanılabilir.

2.3. Mekanik Alaşımlama

2.3.1. Mekanik Alaşımlama

Gelişmiş malzemeler, zorlu uygulamalar için tam olarak uyarlanmış bir özellik kümesi sağlamak amacıyla malzemelerin yapısının sistematik sentezine ve kontrolüne ilk dikkatin verildiği malzemeler olarak tanımlanabilir. Gelişmiş malzemelerin yapısının, denge-dışı koşullar altında işlenerek daha iyi kontrol edilebileceği artık iyi bilinmektedir. Ticari olarak kullanılan sıvı fazdan hızlı katılaştırma, mekanik alaşımlama, plazma ve buhar çöktürme gibi teknikler araştırmacıların da ilgisini çekmektedir. Tüm bu tekniklerin altında yatan ana tema, “enerjilendirme ve söndürme” ile dengede olmayan bir durumda malzemeleri sentezlemektir [95]. Enerjilendirme, malzemenin dış dinamik zorlama örneğin; erime, buharlaşma, ışınlama, basınç uygulaması veya mekanik enerjinin plastik deformasyon yoluyla depolanması gibi yüksek derecede denge dışı bir duruma getirilmesini içerir.

Mekanik alaşımlama (MA), yüksek enerjili bir bilyalı değirmende toz parçacıklarının tekrarlanan kırılma-kaynaklanma döngüsünü içeren katı hal toz işleme tekniğidir [95]. Bu işlem sırasında dışarıdan ortama ısı girdisi veya içeride olması beklenen muhtemel bir kimyasal reaksiyon yoktur. Bu işlem esnasında inert gaz atmosferinde parçacıkların birbiriyle kırılma-soğuk kaynak tekrarıyla yoğun bir plastik deformasyona uğraması olarak da tanımlanabilir.

Toz parçacıklarının yüksek enerjili bilyeli öğütme prosesini açıklamak için literatürde genel olarak kullanılan iki terim vardır. *Mekanik Alaşımlama (MA)*, toz (farklı metaller veya alaşım/bileşikler) karışımlarının birlikte öğütülmesi işlemi tarif eder. Homojen bir alaşım elde etmek için bu işlemde malzeme atomlarının karşılıklı transferi söz konusudur.

Öte yandan homojenleştirme için malzeme transferinin gerekli olmadığı tek tip bileşim tozlarının, örneğin; saf metaller veya intermetalikler gibi tozların öğütülmesine ise *Mekanik Öğütme (MÖ)* denir. Düzensiz intermetalik veya amorf bir faz üretmek için intermetaliklerde düzenin bozulması

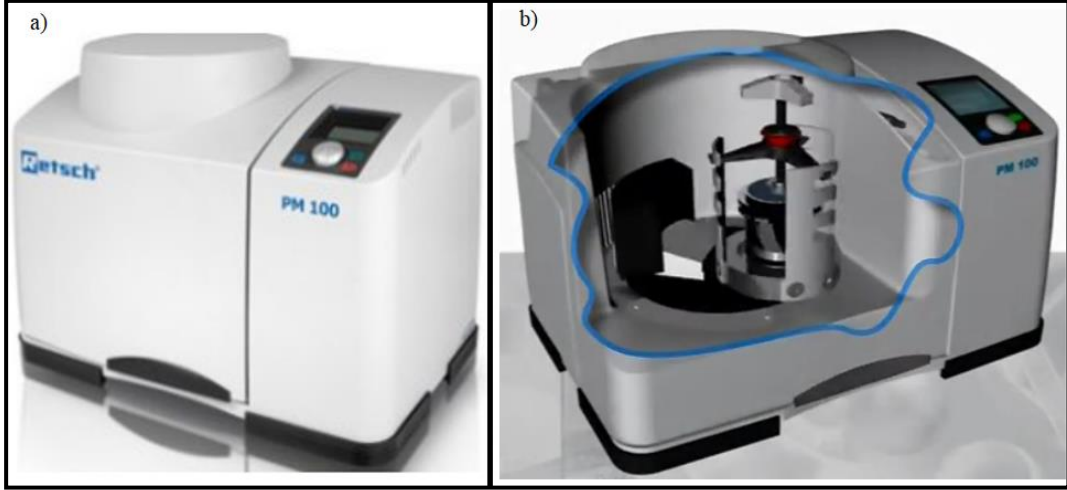
J. S. Benjamin [96] tarafından 1970 yılında, daha önce Anders tarafından oksit dispersiyonu ile güçlendirilmiş alaşımlar oluşturmak için geliştirilen mekanik işleme tekniklerinin bir uzantısı olarak gelişen ve bu isimle anılmasına sebep olan (MA) yeni bir süreç başlatmıştır. MA işlemi, tozların doğru oranda karıştırılması ve toz karışımının öğütme ortamı (genellikle çelik bilyeler) ile birlikte değirmene yüklenmesi ile başlar. Daha sonra bu karışım, her toz parçacığının bileşimi başlangıç toz karışımındaki elementlerin oranı ile aynı olduğu kararlı bir duruma ulaşılan kadar istenen süre boyunca öğütülür. Öğütülmüş toz daha sonra istenen mikroyapı ve özellikleri elde etmek için ısıtılıp işlemden geçirilir. Bu nedenle MA sürecinin önemli bileşenleri hammaddeler, değirmen ve proses değişkenleridir. MA için kullanılan hammaddeler, $1 \pm 200 \mu\text{m}$ aralığında tane boyutlarına sahip, piyasada yaygın olarak bulunan saf tozlardır. Ancak, toz tane boyutu, bilye boyutundan daha küçük olması dışında çok kritik değildir. Bunun nedeni, toz parçacık boyutunun eksponansiyel azalması ve sadece birkaç dakikalık öğütmeden sonra birkaç mikronluk küçük bir değere ulaşmasıdır. Dispersiyonla güçlendirilmiş malzemeler genellikle karbür, nitrür ve oksit ilavelerini içerir. Oksitler en yaygın olanlarıdır ve bu alaşımlar oksit dispersiyonuyla güçlendirilmiş (ODS) malzemeler olarak bilinir.

Mekanik alaşımlı tozlar üretmek için farklı tipte yüksek enerjili öğütme ekipmanları kullanılmaktadır. Bu ekipmanlar kapasiteleri, öğütme verimliliği soğutma ve ısıtma gibi ek özellikleri bakımından farklılık gösterirler. Bir seferde yaklaşık 10 - 20 g toz öğüten SPEX değirmenleri gibi çalkalayıcı değirmenler laboratuvar araştırmaları ve alaşım tarama amaçları için yaygın olarak kullanılmaktadır. Değirmen; kelepçeye sabitlenmiş ve dakikada birkaç bin kez ileri geri sallanan numune ve öğütme bilyelerini içeren bir kapalı kaptan ibarettir. İleri-geri sallama hareketi, kabın uçlarının yanal hareketleri ile birleştirilir, böylece kap, hareket ederken bir 8 şekli veya sonsuzluk işaretini tasvir ediyor gibi görünür. Kabın her salınımında bilyeler numuneye ve cidara çarparak hem öğütme hem de karıştırma işlemini gerçekleştirir. 8 hareketinin genliği (yaklaşık 5 cm) ve hızı (yaklaşık 1200 rpm) nedeniyle, bilye hızları yüksektir (5 m/s gibi) ve sonuç olarak bilyenin çarpma kuvveti normalden daha büyüktür. Bu nedenle, bu değirmenler yüksek enerjili olarak düşünülebilir. Şekil 2.7. 'de yüksek enerjili Spex Sample Prep 8000 Series Mixer \ Mill 'e ait bir cihaz gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Montajlı durumda SPEX Sample Prep 8000 Serisi karıştırıcı / değirmen [97].

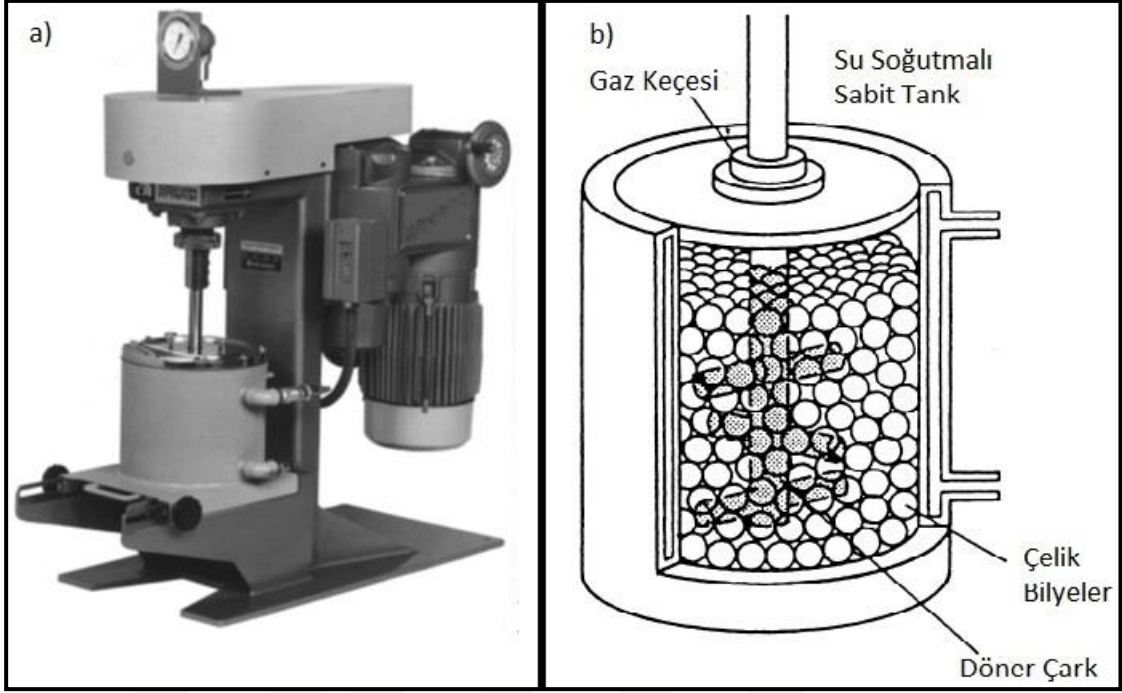
MA deneylerini yürütmek için bir başka popüler değirmen, bir kerede birkaç yüz gram tozun öğütülebildiği gezegen tipi bilyeli değirmenidir. Planet bilyeli değirmen, adını haznelerin gezegen benzeri hareketinden almaktadır. Bunlar, dönen bir destek diski üzerinde düzenlenmiştir ve özel bir tahrik mekanizması, kendi eksenleri etrafında dönmelerine sebep olur. Kendi eksenleri etrafında dönen kabın ürettiği ve dönen destek diski tarafından üretilen merkezkaç kuvveti, öğütülecek malzemeden ve öğütme bilyelerinden oluşan hazne içeriğine etki eder. Kap ve destek diski zıt yönlerde döndüğünden, merkezkaç kuvvetleri dönüşümlü olarak benzer ve zıt yönlerde hareket eder. Bu, öğütme bilyelerinin kabın iç duvarından aşağı hareketine neden olur, sürtünme/darbe etkisinin ardından malzeme öğütülür ve öğütme bilyeleri kabın iç kısmında serbestçe hareket eder ve karşı cidara çarpar. Disk ve kabın dönme hızları önceki sürümlerde bağımsız olarak kontrol edilemese de, modern cihazlarda bunu yapmak mümkündür. Bu tip değirmenlerdeki bilyelerin doğrusal hızı SPEX değirmenlerinden daha yüksek olmasına rağmen, SPEX değirmenlerinde darbe sıklığı çok daha fazladır. Bu nedenle, SPEX değirmenlerine kıyasla, gezegen tipi değirmenler düşük enerji değirmen olarak düşünülebilir. Şekil 2.8. 'de planet tipi değirmen ve iç haznesinin dönme görselleri verilmiştir.



Şekil 2.8. (a) Retsch marka PM 100 model tek istasyonlu bilyalı değirmen [98]. **(b)** Bilyalı değirmen içindeki hareketi gösteren şematik [99].

Geleneksel bir bilyeli değirmen, küçük çelik bilyelerle yarı dolu bir yatay tamburdan oluşur. Tambur döndükçe bilyeler metal tozunun üzerine düşer; öğütme hızı dönüş hızı ile artar. Bununla birlikte, yüksek hızlarda çelik bilyelere etki eden merkezkaç kuvveti, yerçekimi kuvvetini aşar ve bilyeler, tamburun cidarına çarpar.

Bir karıştırıcı (atritör), içinde şafta bağlı bir dizi karıştırıcı kollar bulunan dikey bir öğütme kabından oluşur. Birbirlerine dik açılarda kademeli olarak yerleştirilen kollar şaft vasıtasıyla tahrik edilerek bilyeleri tahrik eder yani enerji verir. Metal tozlarının bilyelerle, öğütme kabı cidarı, şaftı ve kolları arasındaki çarpışmalar nedeniyle öğütülerek boyutunun küçülmesine neden olur. Bazı boyut küçültmenin, tanecikler arası çarpışmalar ve bilyelerin birbiri üzerinde kayması ile gerçekleştiği de bilinmektedir. Güçlü bir motor, şaftı ve dolayısıyla kolları döndürür ve bu da öğütme kabındaki çelik bilyeleri karıştırır. Atritörler, bir seferde büyük miktarlarda tozun öğütülebildiği değirmenlerdir. Öğütme ortamının hızı planeter veya SPEX öğütücülerinden çok daha düşüktür (yaklaşık 0.5 m/s). Şekil 2.9. 'da atritör tipi bir değirmen gösterilmektedir.



Şekil 2.9. a) Atritör tipi bir değirmen b) Öğütme kabı iç görseli [95].

Öğütülecek toz öğütme ortamı ile sabit bir öğütme kabına yerleştirilir. Bu karışım daha sonra yaklaşık 250 rpm 'lık yüksek bir hızda dönen kolları olan bir şaft tarafından karıştırılır. Bu, ortamın malzeme üzerinde hem kesme hem de darbe kuvvetleri uygulamasına neden olur. Atritörler geleneksel bilyeli değirmenlerden 10 kat daha hızlı çalışır.

2.3.2. Mekanik Alaşımlamayı Etkileyen Parametreler

Mekanik alaşımlama karmaşık bir süreçtir ve bu nedenle istenen ürün fazını ve/veya mikro yapıyı elde etmek için bir dizi değişkenin optimizasyonunu içerir. Tozun nihai oluşumunu etkileyen önemli parametrelerden bazıları şunlardır:

- Öğütme tipi
- Öğütücü kabı
- Öğütme hızı
- Öğütme zamanı
- Öğütme ortamının tipi, boyutu ve boyut dağılımı
- Bilye-toz ağırlık oranı
- Haznenin doluluk derecesi
- Öğütme atmosferi
- Yağlayıcı-Yüzey aktif maddeler
- Öğütme sıcaklığı.

Tüm bu yukarıda yazılı olan süreç değişkenleri tamamen bağımsız değildir. Örneğin, uygun değerdeki öğütme süresi değirmen tipine, öğütme ortamının boyutuna, öğütme sıcaklığına, bilye-toz oranına vb. bağlıdır.

Öğütme Tipi;

Yukarıda açıklandığı gibi, MA yapmak için birkaç farklı tipte değirmen vardır. Bu değirmenler, kapasiteleri, çalışma hızları ve öğütme sıcaklığını ve tozların kirlenmesini en aza indirme kapsamını değiştirerek işlemi kontrol etme kabiliyetleri bakımından farklılık gösterir. Tozun türüne, toz miktarına ve gerekli son yapıya bağlı olarak uygun bir değirmen seçilebilir. Bununla birlikte mekanik alaşımlama amacıyla en yaygın olarak SPEX karıştırıcı değirmenler kullanılır. Planeter bilyeli değirmenler veya aşındırıcılar büyük miktarlarda öğütülmüş toz üretmek için kullanılır. Özel uygulamalar için özel olarak tasarlanmış değirmenler kullanılır. Tablo 2.6. 'da farklı tipteki değirmenlerin kapasiteleri verilmiştir.

Tablo 2.6. Farklı Tipteki Değirmenlerin Kapasiteleri[100].

Öğütücü Tipi	Ürün Ağırlığı
Karıştırıcı	2 x 20 gr 'a kadar
Planeter	4 x 250 gr 'a kadar
Atritör	0.5 – 100 kg.
Tek Bilyeli Değirmen	4 x 2000 gr 'a kadar.

Öğütme Kabı;

Öğütme kabı için kullanılan malzeme (öğütme kabı, hazne, kavanoz veya çanak kullanılan diğer terimlerden bazılarıdır) önemlidir, çünkü öğütme ortamının kabın iç duvarları üzerindeki etkisi nedeniyle, bazı malzemeler yerinden çıkacak ve toza dâhil olmuş olacaktır. Bu durum tozu kirlitebilir veya tozun kimyasını değiştirebilir. Öğütme kabının malzemesi tozunkinden farklı ise, bu durumda toz, öğütme kabı malzemesi ile kontamine olabilir. Öte yandan, eğer iki malzeme aynı ise, o zaman toza eklenen elementin ilave miktarını telafi etmek için uygun önlemler alınmadıkça kimya değiştirilebilir. Öğütme kapları için kullanılan en yaygın malzeme türleri sertleştirilmiş çelik, takım çeliği, sertleştirilmiş krom çeliği, tavlanmış çelik, paslanmaz çelik, WC - Co, WC astarlı çelik ve yatak çeliğidir [101]. Bazı özel malzemeler özel amaçlar için kullanılır; bunlar arasında bakır, titanyum [102], sinterlenmiş korondum, yitriya ile stabilize edilmiş zirkonya (YSZ)[103], kısmen stabilize zirkonya + yitriya [104], [105], safir [106], [107], akik [108]–[110], sert porselen, Si₃N₄ [111] ve Cu - Be[112]–[116] sayılabilir. Kabın şekli, özellikle kabın iç tasarımı da önem teşkil etmektedir. Hem dik hem de yuvarlak köşe tabanlı SPEX değirmen kapları kullanılmaktadır. Dik tabanlı kaba göre, yuvarlak köşe tabanlı kapta önemli ölçüde daha yüksek oranlarda alaşımlama meydana geldiği rapor edilmiştir [117].

Öğütme Hızı;

Değirmenin hızına bakarak içerisindeki toza verilen enerji miktarı kabaca tahmin edilebilir. Ancak değirmenin tasarımına bağlı olarak, kullanılabilecek maksimum hızda belirli sınırlamalar vardır. Örneğin, geleneksel bir bilyeli değirmende dönme hızını arttırmak, bilyelerin hareket hızını arttıracaktır. Kritik bir hızın üzerinde, bilyeler kabın iç duvarlarına sabitlenecek ve bir darbe kuvveti uygulamak için düşmeyecektir. Bu nedenle, maksimum hız, maksimum çarpışma enerjisini üretmek için bilyelerin maksimum yükseklikten düşmesi için bu kritik değerin hemen altında olmalıdır.

Maksimum hızın bir başka sınırlaması, yüksek hızlarda (veya öğütme yoğunluğunda), öğütme kabı sıcaklığının yüksek bir değere ulaşmasıdır. Bu durum, tozlarda homojenleşmeyi ve / veya alaşımlaşmayı desteklemek için difüzyonun gerekli olduğu bazı durumlarda avantajlı olabilir. Ancak, bazı hallerde ise, sıcaklıktaki bu artış bir dezavantaj olabilir çünkü artan sıcaklık dönüşüm sürecini hızlandırır ve aşırı doymuş katı çözeltilerin veya öğütme sırasında oluşan diğer yarı kararlı fazların ayrışmasına neden olur [118]. Ek olarak, üretilen yüksek sıcaklıklar tozları kirlitebilir. Nanokristal oluşumu sırasında, daha yüksek öğütme yoğunluklarında, dinamik yeniden kristalleşmenin artması nedeniyle ortalama kristal boyutunun arttığı ve iç gerilimin azaldığı bildirilmiştir [119]. Ulaşılan maksimum sıcaklık, farklı değirmen türlerinde farklıdır ve değerler büyük ölçüde değişir.

Öğütme Zamanı;

Öğütme zamanı en önemli parametredir. Normalde zaman, toz parçacıklarının kırılması ve soğuk kaynaklanması arasında sabit bir duruma ulaşılacak şekilde seçilir. Gereken süreler, kullanılan değirmen tipine, öğütme yoğunluğuna, bilye-toz oranına ve öğütme sıcaklığına bağlı olarak değişir. Bu süreler, yukarıdaki parametreler doğrultusunda belirlenmelidir. Ancak, tozun gerekenden daha uzun süre öğütülmesi durumunda kontaminasyon seviyesinin arttığı ve istenmeyen bazı fazların oluştuğu dikkate alınmalıdır [120]. Bu nedenle toz, gerekli sürede öğütülmelidir.

Öğütme Ortamı;

Sertleştirilmiş çelik, takım çeliği, sertleştirilmiş krom çeliği, tavllanmış çelik, paslanmaz çelik, WC - Co ve yatak çeliği, öğütme ortamı için kullanılan en yaygın malzeme türleridir. Öğütme ortamının yoğunluğu, bilyelerin toz üzerinde yeterli darbe kuvveti oluşturmaları için yeterince yüksek olmalıdır. Bununla birlikte, öğütme kabında olduğu gibi, öğütme ortamı için bazı özel malzemeler kullanılır ve bunlar arasında bakır [121], titanyum [102], niyobyum [122], zirkonya (ZrO_2) [123], [124], akik [109], [110], yitriya stabilize zirkonya (YSZ)[103], kısmen stabilize edilmiş zirkonya + yitriya [104], [105], safir [107], silikon nitrit (Si_3N_4) [111] ve Cu-Be [116] sayılabilir. Çapraz kontaminasyonu önlemek için, mümkün olduğunca, öğütme kabının ve öğütme ortamının öğütülmekte olan tozla aynı malzemeden yapılması her zaman arzu edilir. Öğütme

ortamının boyutu da öğütme verimliliği üzerinde bir etkiye sahiptir. Genel olarak, öğütme ortamının büyüklüğü (ve yüksek yoğunluğu) bilyelerin daha büyük ağırlığı toz parçacıklarına daha fazla darbe enerjisi aktaracağından dolayı kullanışlıdır. Tozun nihai oluşumunun kullanılan öğütme ortamının boyutuna bağlı olduğu da bildirilmiştir. Örneğin, harmanlanmış temel Ti-Al toz karışımını öğütmek için 15 mm çapında bilyeler kullanıldığında, titanyum içinde katı bir alüminyum çözeltisi oluşmaktadır. Öte yandan, 20 ve 25 mm çaplı bilyelerin kullanılması, uzun bir öğütme süresinden sonra bile yalnızca titanyum ve alüminyum fazlarının bir karışımına yol açmaktadır [125]. Başka bir araştırmada [126], [127], Ti - Al alaşımlarında, 3/16" çaplı çelik bilyeler yerine 3/4" çaplı bilyeler kullanılarak amorf bir fazın daha hızlı üretilebileceği bildirilmiştir. Aslında, bazı durumlarda amorf bir faz üretilmediği ve büyük çelik bilyelerle öğütme yapıldığında yalnızca kararlı kristalli bileşikler oluşur [126]. Yine bir başka araştırmada, sadece Ti-Al toz karışımı 5 veya 8 mm çaplı bilyeler kullanılarak öğütüldüğünde amorf bir fazın oluştuğu bildirilmiş; öğütme için 12 mm çaplı bilyeler kullanıldığında amorf bir fazın oluşmadığı rapor edilmiştir [127], [128]. Benzer bir durum, daha küçük bilye boyutunun amorf faz oluşumunu desteklediği Pd-Si sisteminde de bildirilmiştir [129]. Daha küçük bilyelerin amorf faz oluşumunu teşvik eden yoğun sürtünme hareketi ürettiği rapor edilmektedir. Aslında, "yumuşak" öğütme koşullarının (küçük bilye boyutları, daha düşük enerjiler ve daha düşük bilye-toz oranları) amorfizasyonu veya yarı kararlı faz oluşumunu desteklediği görülmektedir [95], [128], [130], [131]. Araştırmacıların çoğu genellikle yalnızca sabit bir boyutta öğütme ortamı kullansa da, aynı araştırmada farklı boyutlarda bilyelerin kullanıldığı durumlar da olmuştur [132]. Farklı çaplara sahip bilyeler kullanıldığında en yüksek çarpışma enerjisinin elde edilebileceği tahmin edilmiştir [133]. Öğütmenin ilk aşamalarında öğütülmekte olan toz, öğütme ortamının yüzeyine kaplanır ve ayrıca soğuk kaynak olur. Bu avantajlıdır çünkü öğütme ortamının aşırı aşınmasını önler ve ayrıca öğütme ortamının aşınmasına bağlı olarak tozun kirlenmesini önler. Bununla birlikte, heterojen bir nihai ürünün oluşumunu önlemek için bu tabakanın kalınlığı minimumda tutulmalıdır [134]. Ancak bu toz kaplamanın dezavantajı, bu tozu ayırmanın zor olması ve dolayısıyla toz veriminin düşük olmasıdır. Öğütme sırasında büyük ve küçük boyutlu bilyelerin kombinasyonunun, soğuk kaynak miktarını ve bilyelerin yüzeyine kaplanan toz miktarını en aza indirdiği bildirilmiştir [135]. Bu koşullar altında artan verim için özel bir açıklama yapılmamış olsa da, farklı boyuttaki bilyelerin, tozu bilyelerin yüzeyinden ayırmaya yardımcı olabilecek kesme kuvvetleri üretmesi mümkündür. Yuvarlak veya düz tabanlı bir öğütme kabında aynı boyuttaki öğütme bilyelerinin kullanımının izler oluşturduğu gösterilmiştir. Sonuç olarak, bilyeler yüzeylere rastgele çarpmak yerine iyi tanımlanmış bir yörünge boyunca yuvarlanır. Bu nedenle, bilyelerin hareketini "rastgele" hale getirmek için genellikle daha küçük ve daha büyük bilyelerin bir kombinasyonu olan birkaç farklı çap kullanmak gerekir [136].

Bilye-Toz Ağırlık Oranı;

Bazen yük oranı olarak adlandırılan bilyelerin ağırlığının toza oranı, 1:1 'den 220:1 'e kadar değişkenlik gösterebilen öğütme işleminde önemli bir değişkendir. Genel olarak, bir SPEX değirmeni gibi küçük kapasiteli bir değirmende tozu öğütürken en yaygın olarak 10:1 oranı kullanılır. Ancak öğütme büyük kapasiteli bir değirmende gerçekleştirildiğinde, 50:1 veya hatta 100:1 'e kadar daha yüksek bir oranda kullanılır. Bilye-toz oranı (BTO), öğütülmekte olan tozda belirli bir faza ulaşmak için gereken süre üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. BTO ne kadar yüksekse, gereken süre o kadar kısadır. Yüksek bir BTO 'de, bilyelerin ağırlık oranındaki artış nedeniyle, birim zamanda çarpışma sayısı artar ve sonuç olarak toz parçacıklarına daha fazla enerji aktarılır, böylece alaşımlama daha hızlı gerçekleşir. Daha yüksek enerji nedeniyle daha fazla ısı üretilmesi de mümkündür ve bu da tozun yapısını değiştirebilir. Oluşan amorf faz, sıcaklık artışı fazla ise kristalleşebilir. Daha önce bahsedildiği gibi, MA 'nın "yumuşak" koşulları (örneğin, düşük BTO değerleri, düşük dönme hızları, vb.) yarı kararlı fazlar üretirken "sert" koşullar denge fazlarını üretir. Bu, ilk olarak Zr-Co sisteminde, "yumuşak" öğütme koşulları altında bir amorf faz elde edilirken "sert" öğütme koşulları altında denge kristalli fazların bir karışımı elde edildiğinde çok açık bir şekilde gösterilmiştir[130]. Diğer alaşım sistemleri için de benzer sonuçlar bildirilmiştir[95], [128], [131]. Örneğin, düşük BTO 'da yarı kararlı bir kübik faz oluşurken, mekanik olarak alaşımlı Cu-In-Ga-Se toz sisteminde daha yüksek BTO 'da kararlı denge tetragonal faz oluşmuştur[95].

Haznenin Doluluk Derecesi;

Toz parçacıkları arasında alaşımlama, üzerlerine uygulanan darbe kuvvetleri nedeniyle meydana geldiğinden, öğütme kabı içinde bilyelerin ve toz parçacıklarının serbestçe hareket edebilmesi için yeterli alan olması gerekir. Bu nedenle haznenin toz ve bilyelerle doldurulma derecesi önemlidir. Bilyelerin ve tozun miktarı çok küçükse, üretim oranı çok azdır. Öte yandan, miktar büyükse, bilyelerin hareket etmesi için yeterli alan yoktur ve bu nedenle çarpmanın enerjisi daha azdır. Bu nedenle, kabı fazla doldurmamaya özen gösterilmelidir; genellikle kap iç hacminin yaklaşık % 50'si boş bırakılır.

Öğütme Atmosferi;

Öğütme atmosferinin en büyük etkisi, tozun kirlenmesi üzerinedir. Bu nedenle tozlar, vakum, argon veya helyum gibi bir inert gazla doldurulmuş kaplarda öğütülür. Önemli bir nokta da; Nitrojenin metal tozlarıyla reaksiyona girdiği bulunmuştur ve sonuç olarak, nitrür üretmekle ilgilenilmedikçe, öğütme sırasında kontaminasyonu önlemek için kullanılamaz. Yüksek saflıkta argon, tozun oksitlenmesini ve/veya kirlenmesini önlemek için en yaygın ortamdır. Ayrıca, oksidasyonun bir nitrojen ortamı varlığında genel olarak önlenilebileceği veya en aza indirilebileceği de not edilmiştir. Ancak, titanyum veya alaşım tozları gibi reaktif tozlar öğütüldüğünde bu doğru olarak görünmemektedir. Normalde, tozların hazneye yüklenmesi ve boşaltılması atmosfer

kontrollü kapalı kutular/ortamlar (Glove Box) içinde gerçekleştirilir. Bu kutular genellikle tekrar tekrar boşaltılır ve argon gazı ile yeniden doldurulur. Öğütme sırasında belirli amaçlar için farklı atmosferler kullanılmaktadır. Nitrür üretmek için azot veya amonyak atmosferleri, hidritleri üretmek için hidrojen atmosferi kullanılmaktadır. Kap içindeki havanın varlığının, özellikle tozlar reaktif ise, yapıda oksit ve nitrür oluşturduğu da bilinmektedir. Bu nedenle, öğütme sırasında inert bir atmosfer kullanmaya özen gösterilmelidir.

Atmosfer tipi aynı zamanda son fazın doğasını da etkiliyor görünmektedir. Örneğin, Cr-Fe toz karışımları farklı atmosfer türlerinde öğütüldüğünde, nihai tozun yapısının farklı olduğu gösterilmiştir [137]. Toz bir argon atmosferinde öğütüldüğünde, X ışını kırınım modelinde hiçbir amorf faz oluşmadığı ve Cr tepeleri kalmadığı tespit edilmiştir. Öte yandan, toz, argon içeren havada veya bir nitrojen atmosferinde öğütüldüğünde, tamamen amorf hale geldiği görülmüştür. Benzer şekilde, oksijenin Ni-Nb sistemindeki amorflaştırma kinetiğini artırdığı da gözlenmiştir[138].

Yağlayıcı-Yüzey Aktif Maddeler;

Toz parçacıkları, öğütme sırasında uğradıkları ağır plastik deformasyon nedeniyle, özellikle sünek iseler birbirlerine soğuk kaynaklanır. Ancak, toz parçacıkları arasında gerçek alaşımlama, yalnızca soğuk kaynak ve parçacıkların kırılması arasında bir denge sağlandığında gerçekleşebilir. Soğuk kaynağın etkisini azaltmak için öğütme sırasında toz karışımına bir işlem kontrol ajanı (İKA) ki bunlar yağlayıcı veya yüzey aktif olarak da adlandırılabilir, eklenir. İKA 'lar katı, sıvı veya gaz olabilir. Bunlar zorunlu olmamakla birlikte çoğunlukla yüzey aktif maddeler olarak işlev gören organik bileşiklerdir. İKA, toz partiküllerinin yüzeyinde adsorbe olur ve partiküller arasındaki soğuk kaynağı en aza indirir ve böylece aglomerasyonu engeller. Parçacık yüzeylerine adsorbe edilen yüzey aktif maddeler, soğuk kaynak işlemini engeller ve katı malzemenin yüzey gerilimini düşürür. Fiziksel boyut küçültme işlemi için gereken enerji;

$$E = \gamma \cdot \Delta S \quad (2.14)$$

γ , spesifik yüzey enerjisi ve ΔS , yüzey alanının artışıdır. Yüzey enerjisindeki bir azalma, daha kısa öğütme sürelerinin kullanılması ve/veya daha ince tozların üretilmesi ile sonuçlanır. Pratikte toplam toz yükünün ağırlıkça yaklaşık% 1-5'i seviyesinde geniş bir İKA aralığı kullanılır. İKA 'ların en önemlileri stearik asit, hekzan, metanol ve etanolüdür. Bu bileşiklerin çoğu, öğütme sırasında ayrışır, toz ile etkileşime girer, bileşikler oluşturur ve bunlar, öğütme sırasında toz partiküllerine katılır ve/veya dispersoidler şeklinde dâhil edilir. Bu nedenle, hidrojen ve karbon içeren hidrokarbonlar ve hidrojen, karbon ve oksijen içeren karbonhidratların toz partiküllerine karbon ve/veya oksijen katması muhtemeldir, bu da matriste homojen bir şekilde dağılmış karbür ve oksitlerin oluşumuyla sonuçlanır. Bunlar, malzemenin dispersiyon ile mukavemetlenmesine katkıda bulunabileceğinden, daha yüksek mukavemet ve daha yüksek sertlik sonucuna

götürdüğünden alaşım sistemine her zaman zararlı değildir [139]. Hidrojen daha sonra bir gaz olarak ortamı terk eder veya ısıtma ya da sinterleme sırasında metal kafes içine emilir. Hidrojen gazı öncelikle bir yüzey aktif madde olarak hizmet ederek ve genellikle alaşımlama sürecine katılmasa da [140], bazı çalışmalar hidrojenin titanyumca zengin alaşımlarda amorf faz oluşumu için bir katalizör görevi gördüğünü göstermektedir [141], [142]. İKA 'ların son faz oluşumunu etkilediği, katı çözünürlük seviyelerini [143], camsı faz oluşturma aralığını [143]–[145] ve kontaminasyon seviyelerini değiştirdiği de bildirilmiştir. Öğütme kabında havanın varlığı veya tozların çok düşük sıcaklıklarda öğütülmesinin (kriyomilling) de, büyük olasılıkla düşük sıcaklıklarda toz parçacıklarının artan kırılabilirliğine bağlı olarak kaynağı en aza indirdiği gösterilmiştir [146], [147]. Bir hidrojen atmosferinde öğütülmüş metal tozlarının (YMK yapılı) kırılabilir hale geldiği ve kendilerine veya kaba yapışmadığı bulunmuştur; muhtemelen bir hidrit fazının oluşumundan kaynaklandığı ifade edilmektedir [148]. Kullanılan İKA 'nın doğası, miktarı ve öğütülen tozun türü, toz parçacıklarının nihai boyutunu, şeklini ve saflığını belirlemektedir. Daha büyük miktarda İKA kullanımı normalde toz boyutunu 2-3 derece azaltır. Örneğin, Lu ve Lai [125], alüminyumun 5 saat boyunca öğütülmesinin, İKA olarak ağırlıkça% 1 stearik asit kullanıldığında yaklaşık 500 µm'lik bir partikül boyutu ürettiğini bildirmişlerdir. Ancak ağırlıkça% 3 stearik asit kullanıldığında, partikül boyutu sadece yaklaşık 10 µm ölçülmüştür. Diğer İKA 'lar için de benzer sonuçlar bildirilmiştir. Ayrıca, İKA içeriğindeki bir artışın, belirli bir öğütme süresi için toz boyutunda üstel bir azalmaya yol açtığı da bildirilmiştir. Örneğin, toz partikül boyutu, İKA kullanılmadan 1000 µm'lik bir değere ulaşılmasına rağmen ağırlıkça% 2.3 İKA ile, ortalama toz partikül boyutu 18 µm'ye düşürülmüştür [149]. Gevrek malzemeler öğütüldüğünde yukarıdakine benzer sonuçlar gözlenmeyebilir. Aslında, kırılabilir malzemelerin öğütülmesi için bir İKA kullanımı gerekli değildir.

Öğütme için bir İKA seçimi, öğütülmekte olan tozun yapısına ve istenen nihai ürünün saflığına bağlıdır. Öğütme sırasında kullanılan İKA 'nın niteliği ve miktarı, nihai toz partikül boyutunu ve toz verimini de belirler. Aslında, İKA 'nın etkinliğini belirlemenin bir yolu, MA 'dan sonra toz verimini belirlemektir. Toz verimi yüksekse, İKA etkilidir. Toz verimi yüksek değilse, ya kullanılan İKA miktarı yeterli değildir ya da muhtemelen doğru İKA değildir. 15 saat öğütüldükten sonra, ağırlıkça %2 polietilen glikol kullanıldığında tozun sadece %50 'sinin geri kazanıldığı, stearik asit kullanılması halinde ise tozun neredeyse %100'ünün geri kazanıldığı bildirilmiştir [125]. Genel olarak kullanılabilen tek bir İKA olmadığı, İKA miktarı, (a) toz partiküllerinin soğuk kaynak özelliklerine, (b) İKA 'nın kimyasal ve termal stabilitesine ve (c) kullanılan toz ve öğütme ortamının miktarına bağlı olduğu anlaşılmaktadır. İKA 'nın toza ağırlık oranı kritik bir değerin altındaysa toz partikül boyutu artma eğilimi gösterirken, bu değerin üzerinde partikül boyutu azalma eğilimi gösterir.

Öğütme Sıcaklığı;

Öğütme sıcaklığı, öğütülmüş tozun yapısına karar vermede bir diğer önemli parametredir. Nihai ürün fazının katı bir çözelti, metaller arası, nanoyapı veya amorf bir faz olup olmadığına bakılmaksızın, difüzyon prosesleri alaşım fazlarının oluşumunda yer aldığından, öğütme sıcaklığının herhangi bir alaşım sisteminde önemli bir etkiye sahip olması beklenir. Öğütme sıcaklığının kasıtlı olarak değiştirildiği sadece birkaç araştırma bildirilmiştir. Bu, sıcaklığı düşürmek için öğütme kabına sıvı nitrojen damlatılarak veya öğütme sıcaklığını artırmak için öğütme haznesini elektrikle ısıtarak yapılmıştır. Bu araştırmalar, öğütme sıcaklığının katı çözünürlük seviyelerindeki değişim üzerindeki etkisini incelemek veya farklı sıcaklıklarda amorf bir fazın mı yoksa nanokristal bir yapının mı oluştuğunu belirlemek için yapılmıştır. Nanokristallerin oluşumu sırasında, daha yüksek sıcaklıklarda öğütülmüş malzemeler için malzemedeki gerilimin karekökünün daha düşük ve tane boyutunun daha büyük olduğu bildirilmiştir [150]. Katı çözünürlüğün derecesinin daha yüksek öğütme sıcaklıklarında azaldığı bildirilmiştir. Örneğin, bir Cu-Ag (ağırlıkça %37 Ag) toz karışımının planeter bilyeli öğütülmesinde, oda sıcaklığında öğütme sırasında amorf ve kristalli (süper doymuş katı çözelti) fazların bir karışımı elde edilmiş, bunun yerine tozun 200 °C öğütülmesiyle sadece Cu-Ag (ağırlıkça %8 Ag) katı solüsyonu elde edilmiştir [151]. Benzer sonuçlar, Cu-Ag [152], Zr-Al [153] ve Ni-Ag [154] alaşım sistemlerinde başkaları tarafından da bildirilmiş ve daha yüksek öğütme sıcaklıklarında artan difüzyon ve dengeleme etkileri temelinde açıklanmıştır. Daha yüksek öğütme sıcaklıkları, amorfizasyon kinetiğini geliştirmelidir. Bu durum Ni-Ti [155] ve Ni-Zr [156] sistemlerinde gözlenmiştir. Titreşimli bir değirmende Ni-Zr (50:50) toz karışımının öğütülmesi sırasında, toz sıvı nitrojen sıcaklığında 15 saat öğütüldüğünde amorf faz oluşumu söz konusudur. Aynı sürede öğütmede, 200 °C 'de tamamen amorf bir faz üretilirken; oda sıcaklığında öğütme sırasında kısmen amorf bir faz üretilmiştir. MÖ tarafından üretilen amorf bir fazın oluşumu, MA sırasında olduğundan farklı bir mekanizma ile gerçekleşir. Bir nanokristal yapının oluşumu yoluyla antisite kimyasal bozukluk veya artan tane sınır alanı gibi kusurların ortaya çıkmasıyla kristal fazın serbest enerjisindeki artış, MÖ sırasında amorfizasyondan sorumlu kabul edilir. Bu nedenle, daha düşük öğütme sıcaklıklarının amorfizasyonu desteklemesi beklenmektedir. Bununla birlikte, hem artan hem de azalan kinetik rapor edilmiştir. NiTi 'nin 170 ve 60 °C sıcaklıklarda aynı sürede öğütülmesiyle amorfizasyon süresinin kısaltıldığı gözlenmiştir[155].

2.3.3. Fe-Fe₃C / Fe-C Denge Diyagramları

Saf demir kırılğan olduğu için başka bir/birkaç element ile alaşımlandırılarak kullanılmaktadır. Demirin en önemli alaşımı karbon ile yaptığı alaşımdır. Demir-karbon alaşımında artan karbon oranı alaşımın özelliklerini değiştirmektedir. Yapılan incelemeler neticesinde %2 'ye kadar karbon içeren alaşımını Çelik, 2 ile 6,67 arasında kalan alaşımına da Dökme Demir 'dir.

Çeliğin şekillendirilmesi dökme demirlere göre daha kolaydır. Dökümle şekillendirildiklerinden dolayı isimlerini buradan almaktadır. Karbon oranının %6,67 ‘den büyük olan alaşımların teknik olarak kullanılabiliirliği yoktur. Demirin içerisinde elementel karbon (grafit) ya da kimyasal olarak bağ yapmış bir şekilde (Fe_3C) bulunur. Bu iki durumun arasında temelde büyük bir fark olmamasından dolayı faz diyagramlarında da küçük farklar bulunmaktadır. Bu diyagramlar Fe-C ve Fe- Fe_3C faz diyagramları olarak ifade edilmektedir. Şekil 2.10. ‘de Fe- Fe_3C denge (faz) diyagramı verilmiştir. Fe- Fe_3C yarı kararlı, Fe-C ise kararlı hallerini belirtmektedir.

Demir-sementit denge diyagramında dikey sol eksen %100 demir, sağ eksen ise %6,67 seimentiti temsil etmektedir. Sementitin ortorombik birim kafesinde 4 molekül Fe_3C , yani 12 demir ve 4 karbon atomu bulunmaktadır. Yapısı oldukça sert (800 HV) ve yoğunluğu demirden düşüktür. Diyagram üzerindeki önemli sınırlar kısaltmalar ile adlandırılmıştır. Östenit, yüzey merkezli kübik (YMK) kristal yapıya sahip demir için bir faz terimidir ve bu faz, 723°C ötektoid sıcaklığının üzerindeki Fe-C sisteminde meydana gelir. “ γ ” sembolü ile gösterilir. Östenit, Fe – C denge diyagramında 723°C ’nin altına soğutulduğunda kararsız hale gelir, yavaş soğutma sırasında ferrit ve seimentit (α -Fe + Fe_3C) 'ye allotropik bir dönüşüm geçirdiğinde kararsız hale gelir. Ferrit, demirin diğer birçok kristalli yapısı gibi, HMK (hacim merkezli kübik) kristal yapısına sahip bir demir şeklidir. Bu yapı 910°C ’nin altında ve 1390 - 1540°C ’nin üzerindedir - bu iki sıcaklık bölgesinde sadece ferrit elde edebiliriz. Çeliğe manyetik özellik kazandırır. Perlit ise Ferrit ve Sementit fazlarının karışımından oluşan bir yapıdır. 723°C ’nin altındaki ötektoid reaksiyon ürünlerinden bir ya da bir kaçından biridir. Tam ötektoid noktada %100 Perlit oluşur.

A₀: Fe_3C (seimentit) ‘nin manyetik özelliğini kaybettiği sıcaklığı temsil eder.

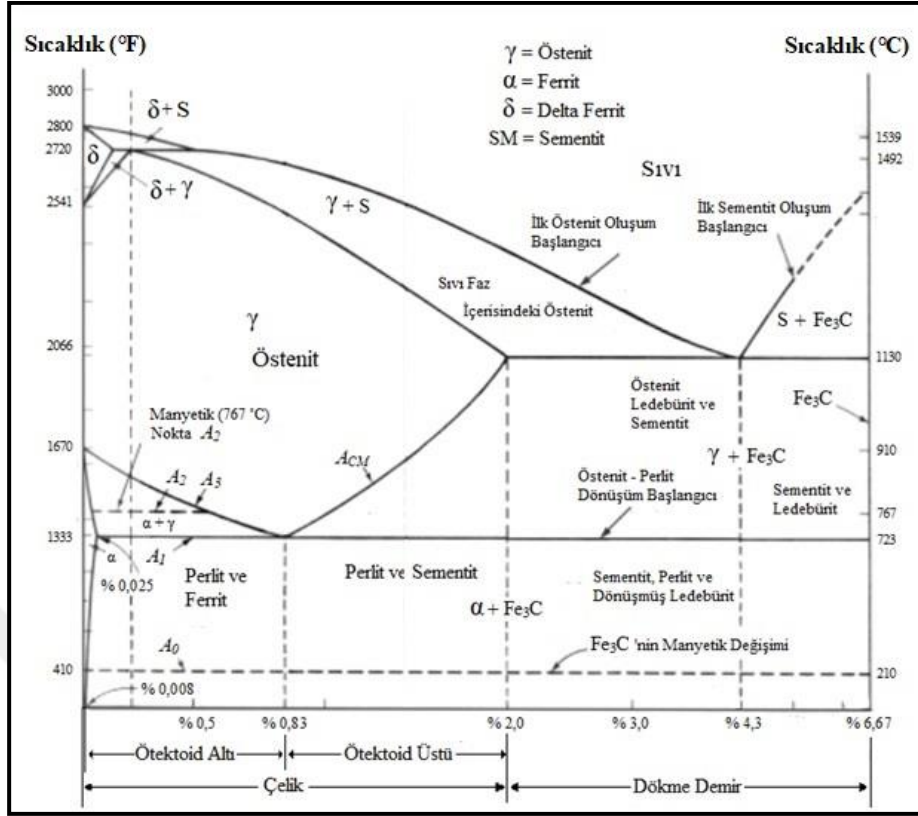
A₁: Perlit/Ferrit faz sınırının üst noktası olarak isimlendirilmiştir. Peritektoid reaksiyondur. A_1 sıcaklığı altındaki değerlerden itibaren yükselen sıcaklıklarda iki farklı katıdan bir farklı katı oluşumunu, A_1 sıcaklığı üzerinden düşen sıcaklıklarda ise bir farklı katıdan iki farklı katının oluştuğunu temsil eder.

A₂: Demirin manyetik özelliğini kaybettiği sıcaklığı temsil etmektedir. “Curie Sıcaklığı” olarak da bilinir.

A₃: Östenit ve östenit/ferrit sınır çizgisini temsil eder. % 0.8 Fe_3C ‘nin altındaki değerlerde geçerlidir.

A₄: α -ferrit ‘in δ -ferrit ‘e dönüştüğü sıcaklığı temsil eder.

A_{CM}: Östenit ve östenit/seimentit sınır çizgisini temsil eder. % 0.8 – 2.0 Fe_3C ‘nin arasındaki değerlerde geçerlidir.



Şekil 2.10. Fe-Fe₃C Denge Diyagramı[157].

Denge diyagramında 3 adet reaksiyon bulunmaktadır. Bunların azalan sıcaklık değerlerine göre sıralanışı;

Peritektik Reaksiyon: Bunun sıcaklıktaki mevcut bir sıvı ile katının başka bir katıya dönüşmesi olarak tanımlanmıştır. Reaksiyon sıcaklığı 1492 °C ‘dir. Reaksiyon $\delta + S \leftrightarrow \gamma$ (östenit) oluşumudur.

Ötektik Reaksiyon: Bunun sıcaklıktaki mevcut bir sıvının iki farklı katıya dönüşmesi olarak tanımlanmıştır. Reaksiyon sıcaklığı 1130 °C ‘dir. . Reaksiyon $S \leftrightarrow Fe_3C + \gamma$ (östenit) oluşumudur.

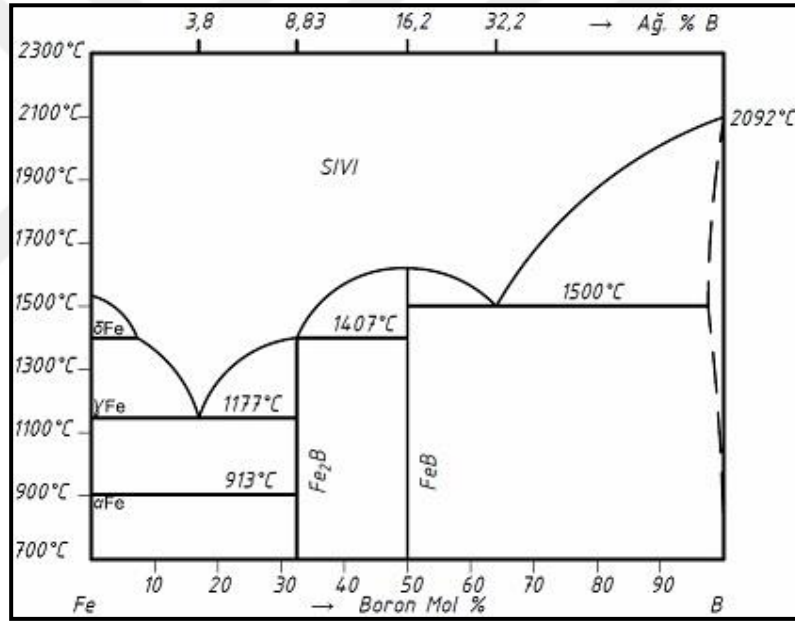
Ötektoid Reaksiyon: Bunun sıcaklıktaki mevcut bir katının iki farklı katıya dönüşmesi olarak tanımlanmıştır. Reaksiyon sıcaklığı 723 °C ‘dir. Reaksiyon γ (östenit) $\leftrightarrow Fe_3C / \alpha + \text{Perlit}$ oluşumudur. Bu reaksiyonda karşımıza iki tane kavram çıkmaktadır. Ötektoid Altı (% 0.8 C ve altı) ve Ötektoid Üstü (% 0.8 C ve üzeri).

Bu kavramlar sahip olunan C değerine göre ötektoid reaksiyon neticesindeki ürünleri tayin etmektedir. Ötektoid altı çeliklerde ötektoid reaksiyon ürünü α (ferrit) + Perlit, ötektoid üstü çeliklerde ise $Fe_3C + \text{Perlit}$ olmaktadır.

2.3.4. Demir-Bor Denge Diyagramı

Demir çelik sanayisinde Bor ‘un önemi büyüktür. Gerek cevher içinde gerekse çelik üretim esnasında katılan Bor çeliğin mekanik ve kimyasal özelliklerini değiştirmektedir. Düşük karbonlu

çeliklerde Bor ile yüzey sertleştirme de yapılmaktadır. Şekil 2.11. ‘deki Demir-Bor Denge Diyagramı ‘na bakıldığında FeB ve Fe₂B olan 2 bileşik görülmektedir. 1538°C ‘de ergiyen Fe ile 2092°C ‘de ergiyen B ‘nin oluşturduğu FeB ortonombik kristal yapıdadır. 4 Fe ve 4 B atomundan meydana gelmektedir [158]. 12 atom noktası ile tetragonal yapıya sahip olan bileşik ise Fe₂B ‘dir[73]. Alaşımlarda, alaşım elementlerinin yer alan katı eriyiği veya arayer katı eriyiği olarak davranacakları Hume-Rothery kuralları çerçevesinde belirlenebilmektedir. Bu kurallar içersinde en önemli olanı, atomik boyut faktörüdür. Fe-B sisteminde borun atom çapı, demire kıyasla %27 daha küçük olması sebebiyle, bu elementle katı eriyik yapabilmektedir. Demir alaşımlarında bor elementinin yer alan veya arayer katı çözelti yapabilecekleri iç sürtünme deneyleri ile belirlenebilmektedir. Bor ‘un tane inceltici olarak dökümden önce ocakta ilavesi mümkündür. Ppm mertebesinde ilaveler ile bu husus oluşabilmektedir. Mukavemet açısından bakıldığında bor ilavesi ile çeliğin mukavemeti artırılabilir.



Şekil 2.11. Fe-B Denge Diyagramı.

Diyagramda görüntülenmesi çok zor olmasından dolayı Bor ‘un α , γ ve δ içersinde çözünmesi ppm seviyesindedir[159]. Fe-B denge diyagramına göre tetragonal Fe₂B %8,83 B içerirken ortonombik FeB %16,2 oranında B içermektedir. Diyagrama göre %9-16 arasında B ihtiva eden alaşımlarda Fe₂B ve FeB faz dağılımı görülmektedir. 1177°C, %3,8 B noktasında “S ↔ γ Fe + Fe₂B” şeklinde ötektik bir reaksiyon olduğu görülmektedir. 1500°C, %32,2 B noktasında da “S ↔ B + Fe₂B” şeklinde bir başka ötektik reaksiyon olduğu görülmektedir. Bor demir elementinin atom çapından yaklaşık olarak %25 daha küçük olduğu için demirle katı eriyik oluşturabilmektedir [160].

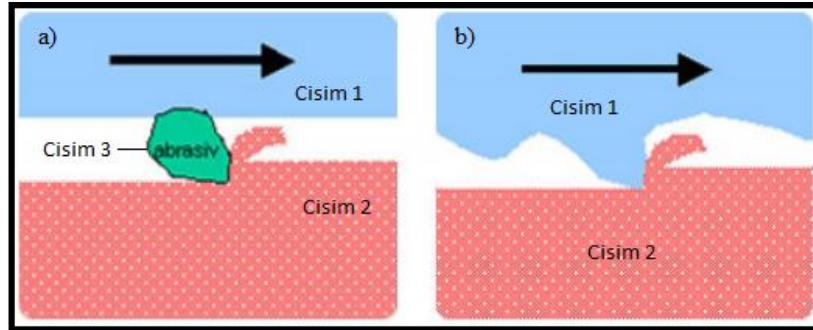
3. AŞINMA VE TURLERİ

Aşınma kısaca, katı yüzeylerde kademeli olarak malzemenin kaybı, zarar görmesi veya deformasyonu olarak tanımlanmaktadır. Aşınma nedenleri iki başlık altında mekanik (Erozyon) veya kimyasal (Korozyon) olarak ayrılabilir. Aşınma ve ilgili süreçlerin incelenmesi triboloji olarak adlandırılır. Yorulma ve sürünme gibi diğer işlemlerle birlikte makine elemanlarındaki aşınma, işlevsel yüzeylerin bozulmasına neden olur ve neticesinde malzeme arızasına veya işlevsellik kaybına (hasara) yol açar. Bu nedenle, ilk olarak “Jost Raporu” ‘nda belirtildiği gibi, aşınmanın büyük ekonomik önemi vardır [161]. Tek başına aşındırıcı aşınmanın sanayileşmiş ülkelerin gayri safi milli hasılasının% 1-4'üne mal olduğu tahmin edilmektedir [162].

Metallerin aşınması, yüzeyin ve yüzeye yakın malzemenin plastik şekil değiştirmesi ve aşınma esnasında kopan parçacıkların yüzeyden ayrılmasıyla oluşur. Kopan parçacık boyutu milimetreden nanometreye kadar değişebilir [163]. Aşınma oranı, yükleme türü (darbe, statik, dinamik), hareket türü (kayma, yuvarlanma), sıcaklık ve yağlama gibi faktörlerden etkilenir [164].

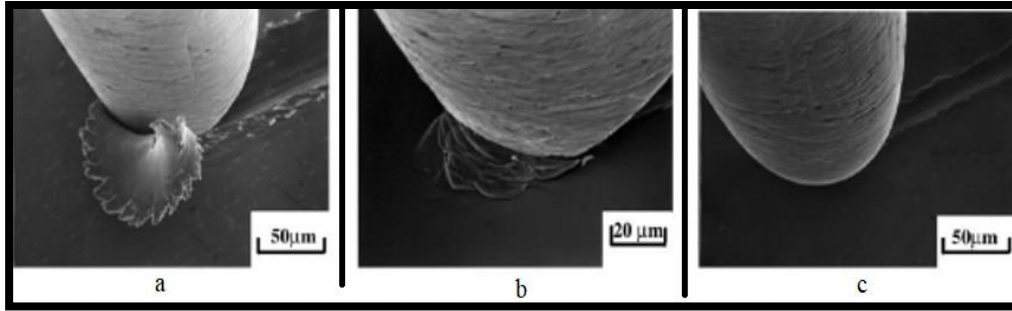
3.1. Abrasiv Aşınma

Aşındırıcı aşınma olarak da bilinen abrasiv aşınma, ASTM tarafından "*katı bir yüzeye zorlanan ve bu yüzey boyunca hareket eden sert parçacıklar veya sert çıkıntılardan kaynaklanan aşınma*" olarak tanımlanır [163]. Yabancı sert parçacık yoksa iki yüzeyden en sertindeki çıkıntılar veya pürüzler daha yumuşak yüzeyi sürükler veya keser. Bu, iki cisim aşınması olarak bilinir. Yabancı sert parçacıklar varsa, bu parçacıklar kayarken iki yüzey arasında sıkışır. Sonuç olarak, yabancı parçacıklar her iki yüzeyi de aşındırabilir veya daha yumuşak yüzeye gömülebilir ve karşıt yüzeyi aşındırabilir. Bu, üç cisim aşınması olarak bilinir [164], [165]. İki cisim aşınmasını ve üç cisim aşınmasını gösteren görseller aşağıda Şekil 3.1. 'de verilmiştir.



Şekil 3.1. a) Üç cisim aşınması b) İki cisim aşınması [165].

Çoğunlukla, iki numune birbirine karşı aşındığında, hem iki hem de üç cisim aşınması gözlemlenebilir. Kuvvet ve teğetsel hareketin başlamasından önce yüzeyde yabancı parçacıklar varsa, üç cisim aşınması geçerli olacaktır. Tersine, kuvvet ve teğetsel hareketin başlangıcından önce her iki yüzeyin de yabancı parçacıklardan arınmış olduğu durumda, başlangıçta iki cisim aşınması geçerli olacaktır. Zamanla, kayan sürtünmenin bir sonucu olarak iki cisim aşınması ve ısı, işle sertleşmiş parçacık/parçacıklar oluşturabilir. Bu parçacıklar kendilerini iki malzemedan daha yumuşak olanına yerleştirebilir ve birincil aşınma mekanizması haline gelerek aşınma mekanizmasını iki cisim aşınmadan üç cisim aşınmaya dönüştürür [165]. Abrasiv aşınma mikro kesme (Şekil 3.2. a), kama oluşturma (Şekil 3.2. b) ve sürüme (Şekil 3.2. c) gibi üç farklı çeşitte olabilir. Mikro kesme, iki malzeme arasında düşük kayma sürtünmesi olduğunda meydana gelir ve kıvrılmış, şerit benzeri aşınma parçacıkları ile sonuçlanır. Kama oluşumu, parçacığın ucunda bir malzemenin birikmesi veya diğer malzemedan çıkıntı oluşması durumunda meydana gelir. Bu malzemenin (kalıntı parçacığın) alt ucu, karşıt materyal boyunca kayarken, yapışkan transferiyle kalıntı parçacığın ön kenarında ince karşı materyal katmanları oluşur. Kama oluşumu tipik olarak, malzemeler yüksek sürtünmeye ve güçlü yapışmaya sahip olduğunda meydana gelir. Sürerken aşınma parçacığı oluşmaz, bunun yerine, karşıt malzemedan geçen yol istikametinde, karşıt malzemeyi yanlara doğru iter ve yer değiştiren malzemedan oluşan yükseltilmiş kenarlara sahip bir oluk oluşturur. Bu aşınma çeşidi, batma derinliği sıg olduğunda meydana gelir [166], [167].

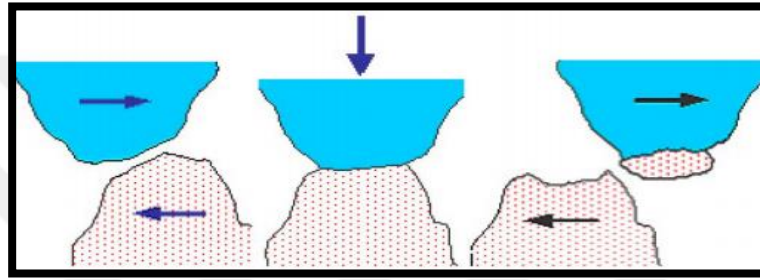


Şekil 3.2. a) Kesme modu b) Kama oluşturma modu c) Sürüme aşındırıcı aşınma testleri deneysel görüntüsü [167].

3.2. Adhesiv Aşınma

Adhesiv aşınma, ASTM tarafından "iki yüzey arasında malzeme transferine veya her iki yüzeyden de kayba yol açan katı yüzeyler arasındaki bölgesel bağlanmadan kaynaklanan aşınma" olarak tanımlanır [168]. İki malzemenin yüzleri aşınma sırasında mükemmel şekilde paralel otursa dahi, mikro ölçekteki pürüzler ve yüzey kusurları, her malzemenin yüzeyinin yalnızca küçük bir yüzdesinin diğeriyle temas etmesine neden olur. Sonuç olarak, bu temas noktalarında önemli miktarda güç vardır. Adhesiv aşınma durumunda, iki malzeme yüzeyi arasındaki kayan temas, iki

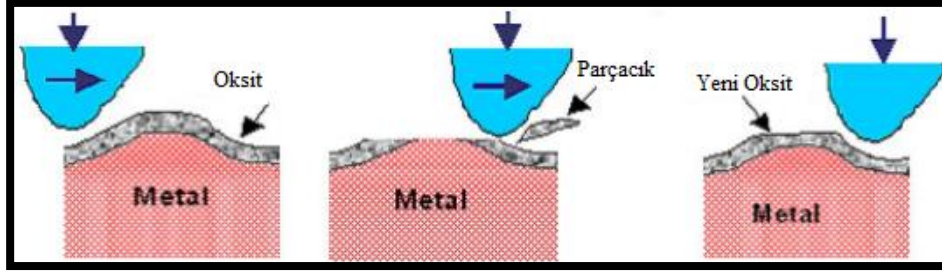
pürüz birbiriyle temas ettiğinde, genellikle bir dislokasyon veya tane sınırı boyunca bir çatlak oluşmasına neden olur. Bu çatlak, aynı anda gerilim ve kesme ile yüklenir ve ilerledikçe malzeme plastik olarak deforme olur. Çatlak sonunda temas ara yüzüne ulaşır ve bu noktada aşınmış ve kopmuş parçacık bir malzemeden diğerine bağlanır [165], [166]. Hemen hemen tüm durumlarda, iki malzemeden daha yumuşak olanı plastik deformasyona uğrar ve daha sert malzemedeki pürüzlere bağlanır. Bu aktarılan parça diğer malzemeye gevşek bir şekilde yapışır ve plaka benzeri bir şekil oluşturmak için karşı malzemeyle tekrarlanan darbelerle kademeli olarak plastik deforme olur. Bu plakalar sonunda daha sert malzemeyi pullar ve daha yumuşak malzeme üzerine plakalar veya pullar halinde geri çöker. Şekil 3.3. adhesiv aşınma sürecini göstermektedir [165].



Şekil 3.3. Adhesiv aşınma [165].

3.3. Oksidasyon Aşınması

Oksidasyon aşınması, aşınma meydana geldikçe aşınma yüzeylerinden birinde veya her ikisinde açıkta kalan metal oksitlendiğinde meydana gelir. Bir veya her iki yüzey, bir oksit filminin oluşmasına ve yapışmasına izin verecek kadar yüksek bir sertliğe sahip olduğunda meydana gelir. Aşınma başlangıcında yüzeyde bulunan oksit içeren veya içermeyen malzemelerde meydana gelebilir [165]. İki malzeme birbirine karşı kayarken, oksit tabakası yapışkan aşınma yoluyla kazınır. Yük yüksekse veya alttaki malzeme (aşınan) düşük bir sertlik değerine sahipse, bu altta yatan malzemenin plastik deformasyonu aşındırıcı veya adhesiv aşınmayla da meydana gelebilir. Alttaki malzeme havaya maruz kaldığında, oksijenle hızla reaksiyona girerek yeni bir oksit tabakası oluşturur. Oksit oluşumu, numunenin sıcaklığına ve oksidasyon reaksiyon hızına bağlıdır. Oksit tabakasının bu kazıma ve yeniden şekillendirme döngüsü tekrar eder ve aşınma başlangıcında oksit tabakası olmayan malzemelerin yüzeyinde zamanla bir oksit tabakası oluşabilir. Şekil 3.4. oksidasyon aşınma sürecini göstermektedir [165], [166].



Şekil 3.4. Oksidasyon aşınması [165].

3.4. Korozi Aşınma

Korozyon ve aşınmanın birlikte meydana geldiği aşınma olarak bilinen korozi aşınmada kütle kayıpları çok daha fazladır. Soy gaz veya vakum ortamı haricindeki ortamlarda korozyon kaçınılmazdır ve aşınma ile birlikte gerçekleşmesi de malzemenin hasara uğraması çok olasıdır. Malzeme çalışması esnasında ortamdaki atmosfer gazlarıyla veya akışkanlarla tepkimeye girer. Tepkimeler neticesinde malzeme yüzeyinde oksit tabakaları oluşabilir. Aşınma neticesinde yüksek sertlikteki oksitler malzeme yüzeyinden kopar ve aşındırıcı yüzeyi vasıtasıyla aşınan parçada aşındırıcı etkiler oluşturabilir. Böylece malzeme yüzeyinde olması beklenenden daha fazla aşınma meydana gelebilir [169]. Şekil 3.5. 'de korozi aşınmaya ait bir görsel verilmiştir.



Şekil 3.5. Korozi aşınma görseli [170].

3.5. Kavite Aşınması

Çukurcuk aşınması olarak da bilinen kavite aşınması metal yüzeyine çarpan kabarcıkların dış basınç vasıtasıyla patlaması olarak kendini göstermektedir. Patlama ile birlikte mikron mertebesinde meydana gelen büyük lokal basınçla malzeme yüzeyinden parça kopar. Genel olarak su taşıtlarının, akışkan pompalarının pervanelerinde ve kompresör silindir cidarlarında meydana gelmektedir. Şekil 3.6. 'da kavite aşınmasına ait bir görsel verilmiştir.



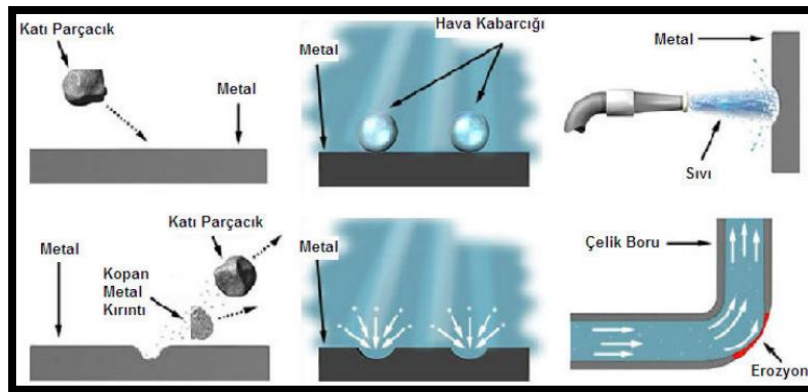
Şekil 3.6. Kavitasyon aşınmasına maruz kalmış bir pervane görseli [171].

3.6. Yorulma Aşınması

Yorulma aşınması, farklı gerilmelere maruz kalan malzemelerde meydana gelen en önemli aşınma türlerinden biridir. Malzeme üzerine etki eden değişken (çekme-basma) gerilmeler ve kayma gerilmelerinin en yüksek olduğu bölgelerde oluşan plastik deformasyonlar neticesinde yüzeyde mikro çatlaklar oluşur. Çatlakların kırılmasıyla yüzeyden parça kopması gerçekleştiğinde kopan parçaların yeri boş kalmaktadır [172].

3.7. Eroziyon Aşınma

Eroziyon aşınmada aşındırıcı parçacıklar bulundukları ortam (sıvı veya gaz) vasıtasıyla aşınan malzemeye çarparak malzemenin yüzeyinden parçaların kopartıldığı aşınma çeşididir. Soğuk plastik şekillendirme bölgesinde çalışan parçalar sıcak plastik şekillendirme bölgelerinde çalışan parçalara göre daha az miktarda aşınmaya maruz kalır. Eroziyon aşınma türbin elemanlarında, boru hatlarında ve parçacık taşıyan sistemlerin valf elemanlarında genellikle görülmektedir. Şekil 3.7. 'de eroziyon aşınmaya ait bir görsel verilmiştir



Şekil 3.7. Eroziyon aşınma görseli [173].

3.8. Kazımalı aşınma

Kazımalı aşınma da korozyon aşınma ile birlikte malzemelerde görülen en yaygın aşınma türüdür. Titreşimle birlikte iki yüzey arasında meydana gelen aşınma türüdür. Oksitlenmiş yüzeylerde oyuklar görülür. Bu aşınma türü yüzeylerde hali hazırda bulunan düzensizliklerin birbirine yapışması ve titreşimin devamı ile yapışan yüzeylerin koparak malzemeden parça ayrılması esasına dayanmaktadır. Dar bir alanda meydana gelen bu kopmalar neticesinde kopan parçacıkların yüzeyden tahliyesi söz konusu değildir. Oksitlenerek sertleşmiş kopan parçacıklar abrasiv karakterli davranarak malzemede aşırı aşınmalara sebebiyet verir. Uzun süreli karşılıklı çalışan makine parçalarında, uzun yol giden araçlarda görülen bir aşınma türüdür [174].



4. MATERİYAL VE METOT

Yapılan araştırmalar neticesinde dünyada en fazla bor cevherine sahip ülkenin Türkiye olduğu görülmüştür. Gelişen teknoloji ile birlikte kullanılan malzemelerden beklentiler de artmaktadır. Bor 'un sahip olduğu gerek fiziksel ve kimyasal özellikler bu madenlerin önemini bir kat daha artırmıştır. Bor madeni veya borlu bileşikler farklı birçok sanayi dalında hammadde olarak kullanılmaktadır. Bu durum ekonomik teknolojik ve akademik açıdan önemli bir husustur.

Borlanmış çeliklerde; aşınma, tokluk, korozyon direnci, yorulma gibi mekanik ve kimyasal özelliklerde ciddi iyileşmeler görülmektedir. Bu çalışmada bor kaynağının etkin bir şekilde kullanılabilmesi için mekanik alaşımlama metodu kullanılarak elde edilebilecek optimum borlama parametreleri üzerinde durulmuştur. Bu amaçla DIN St28 çeliği ve kullanılan toz bileşenleri ticari olarak temin edilmiş, farklı mekanik alaşımlama süreleri kullanılarak elde edilen borlama jeli ile farklı ısıtma işlem sıcaklık ve süreleri kullanılarak çelik numunelerin yüzeyleri borlanmıştır. Borür tabakasının kalınlığı, sertliği, aşınma ve kinetik özellikleri incelenmiş, optik, SEM ve XRD incelemeleri ile oluşan fazlar karakterize edilmiştir.

4.1. Deneysel Çalışma

4.1.1. Çelik Numunelerin Hazırlanması

Bu çalışmada borlama işlemi uygulanan malzeme olarak DIN St28 malzemesi seçilmiş ve kimyasal kompozisyonu Tablo 4.1. 'de verilmiştir. Ø25mm çapındaki St28 malzemesi sulu kesme yöntemiyle ısıtılmadan 7 mm kalınlığında disk şeklindeki numuneler talaşlı imalat yöntemiyle üretilmiştir. Devamında her numunenin yüzeyleri 600-800-1000 ve 1200 mesh 'lik zımparalardan geçirilmiş ve aseton ile temizlenerek kirliliklerden arındırılmış ve borlanmaya hazır hale getirilmiştir.

Tablo 4.1. DIN St28 Çeliğinin Kimyasal Kompozisyonu.

Standart Kodu	% C	% S	% P	% Fe
DIN St28	0,13	Max 0,5	Max 0,5	Kalan

4.1.2. Borlama Jelinin Hazırlanması

Borlayıcı toz olarak elementel bor tozu (MERCK- CAS No.7440-42-8), aktivatör olarak Potasyum Tetrafloroborat - KBF_4 - (SIGMA-CAS No.14075-53-7) ve seyreltici olarak %99 saflıkta SiC ($D_{50} = 9,2\mu m$) tozu ticari olarak (AKTAŞ Tic.) temin edilmiştir. Çelik ile borlayıcı toz karışımı

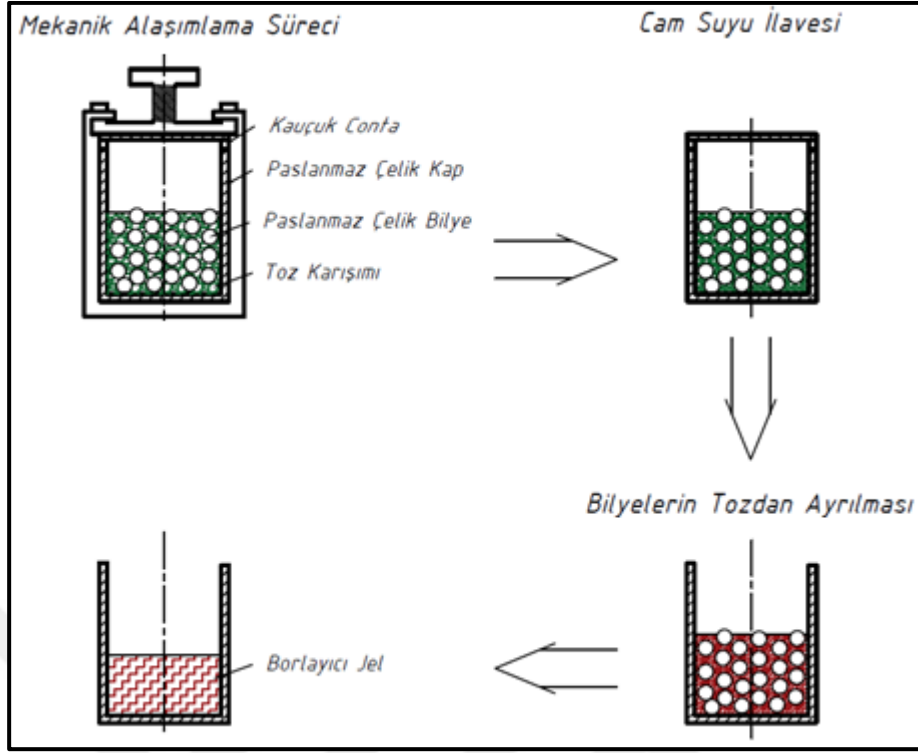
arasındaki katı yolu sağlamak amacıyla cam suyu, sodyum silikat, ($Na_2O_3.SiO_2$) ticari olarak (REFSAN, R5127) temin edilmiştir. Mekanik alaşımlama (MA) amacıyla RETSCH marka PM 200 model planeter tip değirmen kullanılmış olup, işlemler mevcut cihaz ve alaşımlama kapları için önceden tespit edilmiş etkin alaşımlama parametereleri olan 400 RPM devirde ve 7:1 bilye-toz oranında (BTO) gerçekleştirilmiştir. MA için Ø10mm çaplı Tablo 4.2. 'de verilen kompozisyonda paslanmaz çelik bilyeler (ASTM 52100) kullanılmıştır. Alaşımlama kabı olarak RETSCH firmasından temin edilen paslanmaz çelik kaplar kullanılmıştır.

Tablo 4.2. Çelik Bilyelerin Kimyasal Kompozisyonu.

Standart Kodu	% C	% Cr	% Mn	% Si	% P	% S
ASTM 52100	0.98 - 1.1	1.3 - 1.6	0.25 - 0.45	0.15 - 0.30	Max 0.025	Max 0.025

Şekil 4.1. 'de borlayıcı toz karışımı ve bu tozdan jel hazırlama işlemi şematik olarak verilmiştir. %90 SiC, %5 KBF₄ ve %5 B tozlarının hassas terazide tartımları yapıldıktan sonra her bir kap için 140 gr bilye – 20 gr toz olacak şekilde alaşımlama kaplarına konulmuştur. Bilyeler ve kaplar deneylerden önce alkol sonra aseton ile temizlenerek muhtemel kirlerden arındırılmıştır. MA işlemi alaşımlama kaplarının soğumasına fırsat vermek amacıyla fasılalı bir şekilde yapılmış, her 30 dakikada 15 dakika ara verilerek toplamda, net süre 10 ve 20 saat olarak belirlenmiştir. Atmosfere maruz kalmadan kap içerisine 9,6 gr (jelin yaklaşık %48 'ini oluşturacak şekilde) sodyum silikat enjekte edilmek suretiyle MA yapılmış toz karışımı jel formu hazırlanmıştır. Alaşımlama kabı içerisinde bulunan bilyeler çıkarılmıştır. Alaşımlama kabında kalan jel, jel kabı (Şekil 4.2.) içerisine dökülerek borlanacak numunenin jel kabı içerisine daldırıp yüzeylerinin jel ile sıvanması sağlanmış ve böylece borlama ısıl işlemine hazır hale getirilmiştir.

MA işlemi yapılmamış tozlar kullanılarak üretilen numuneler de ise tozların uygun oranda tartım işlemleri yapılmış ve harmanlama işlemi sonrasında yukarıda belirtilen miktarda cam suyu ile karıştırılıp jel kıvamına getirilmiştir. Ardından yapılan bütün işlemler, her bir numune için aynı işlem adımlarıyla tamamlanmıştır.

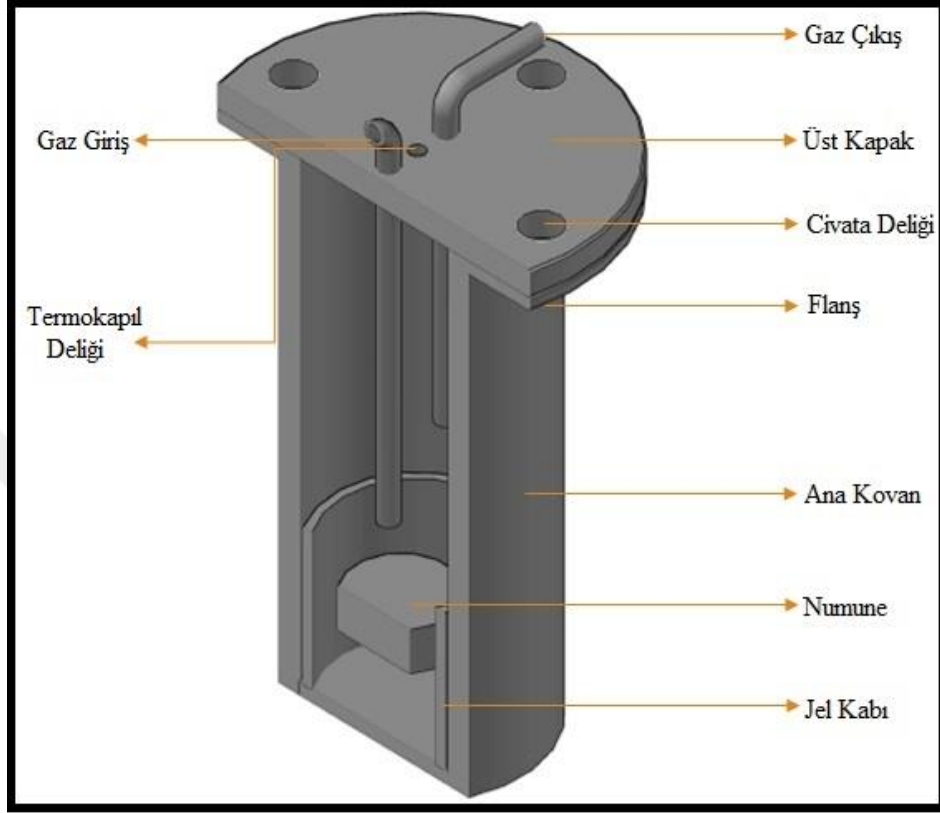


Şekil 4.1. Borlayıcı jel hazırlama işlemi.

4.1.3. Borlama İşlemi

Borlama işlemlerinde ± 10 °C hassasiyetli Heraeus marka 1100 °C 'a çıkabilen kuyu tipi rezistanslı fırın kullanılmıştır. Borlama işlemleri için kullanılan ekipmanlar, daha önceden borlama işlemlerinin yapıldığı TSE Ç1020 'den imal edilmiş 45 mm yükseklik, 40 mm iç ve 45 mm dış çaplı jel kabı ve AISI 316L paslanmaz çelikten imal edilmiş reaktör görseli Şekil 4.2. 'de verilmiştir. Reaktör üst kapak ve ana kovan olmak üzere iki kısma ayrılmaktadır. Ana kovan 250 mm yükseklik, 52 mm iç, 60 mm dış çapa ve üzerinde 145 mm çapında 4 noktadan bağlantı elemanı için civata deliği bulunan bir flanşa sahiptir. Üst kapak üzerinde ise alt flanş hizasında civata delikleri, 13 mm çaplı uzun gaz giriş ve kısa çıkış boruları ve sıcaklık ölçümü yapabilmek için 2 mm çaplı termokapıl giriş deliği bulunmaktadır. Ana kovan ile üst flanşın sızdırmazlığını sağlamak amacıyla iki eleman arasına yüksek sıcaklığa dayanıklı silikon conta uygulaması her bir borlama işlemi için ayrı ayrı yapılmıştır. Daha sonra civatalar sıkılarak tam bir sızdırmazlık sağlanmıştır. Reaktör içerisindeki atmosfer yüksek saflıktaki azot gazı (Linde, Azot (N 5.0) $\geq 99.999\%$) ile temizlenmiş ve devamında borlama deneyleri süresince bu gaz 0.1 L/h sabit debide işlemler boyunca reaktör içerisine verilmiştir. Borlama ısısal işlem sıcaklığı olarak 650-700-750-800-850 °C ve süre olarak 3-6-12 saat tercih edilmiştir. Bu parametreler mukayeseli bir değerlendirme yapabilmek amacıyla literatür incelemeleri sonucu seçilmiştir. Borlama ısısal işlemleri bittiğinde,

fırın kapatılarak numuneler kendi halinde soğumaya bırakılmıştır. İşlem sonunda numuneler çıkarılmıştır.



Şekil 4.2. Borlama işleminin gerçekleştirildiği reaktör.

4.2. Numune Üretimi

Tablo 4.3. 'de numunelerin kodları ve üretim parametreleri verilmiştir. Her bir numuneye ait isimlendirmede sırasıyla uygulanan borlama ısı işlem sıcaklığı, borlama süresi ve mekanik alaşımlama süresi dikkate alınarak kodlama yapılmıştır. Numune isimleri mekanik alaşımlama işlem süresini temsil eden M harfi ile başlamaktadır. Ardından gelen rakam ise mekanik alaşımlama işlem süresini saat olarak göstermektedir. Rakamın ardından ise numuneye ait "N" kodu standart olarak bütün numunelerde gelmektedir. "N" harfinden sonra isimlendirmelerde bulunan iki basamaklı sayı ile borlama yapılan ısı işlem sıcaklığının ilk iki hanesi betimlenmektedir. Sonrasında "-" işaretinin ardından gelen sayı ise yapılan borlama ısı işleminin saat cinsinden süresini tasvir etmektedir. Bu çalışmada MA işlemi yapılmadan kullanılan tozlar kullanılarak aynı sıcaklık ve sürelerde referans olabilecek numune üretimleri de yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar bu referans numunelere ait değerlerle de kıyaslanmıştır.

Tablo 4.3. Üretilen Numunelerin Parametreleri.

Numune Adı	MA Süresi (Saat)	Borlama Süresi (Saat)	Borlama Sıcaklığı
0M65-3	0	3	650 °C
10M65-3	10		
20M65-3	20		
0M65-6	0	6	
10M65-6	10		
20M65-6	20		
0M65-12	0	12	
10M65-12	10		
20M65-12	20		
0M70-3	0	3	700 °C
10M70-3	10		
20M70-3	20		
0M70-6	0	6	
10M70-6	10		
20M70-6	20		
0M70-12	0	12	
10M70-12	10		
20M70-12	20		
0M75-3	0	3	750 °C
10M75-3	10		
20M75-3	20		
0M75-6	0	6	
10M75-6	10		
20M75-6	20		
0M75-12	0	12	
10M75-12	10		
20M75-12	20		
0M80-3	0	3	800 °C
10M80-3	10		
20M80-3	20		
0M80-6	0	6	
10M80-6	10		
20M80-6	20		
0M80-12	0	12	
10M80-12	10		
20M80-12	20		
0M85-3	0	3	850 °C
10M85-3	10		
20M85-3	20		
0M85-6	0	6	
10M85-6	10		
20M85-6	20		
0M85-12	0	12	
10M85-12	10		
20M85-12	20		

4.2.1. Deney Numunelerinin Karakterizasyonu

Borlama işlemi neticesinde reaktörden çıkarılan numuneler borlayıcı jelden temizlendikten sonra soğutma sıvısı kullanılarak ısı tesirine maruz bırakılmadan kesme tezgâhı ile tam ortalarından ikiye bölünmüş ve elde edilen kesit yüzeyler üzerinde incelemeler yapılmıştır.

Kesit yüzeyler sırasıyla 600-800-1000 ve 1200 mesh 'lik zımparadan geçirildikten sonra elmas pasta (TechDiamondTools 14,000 grit / 0-1 microns) ile parlatılmıştır.

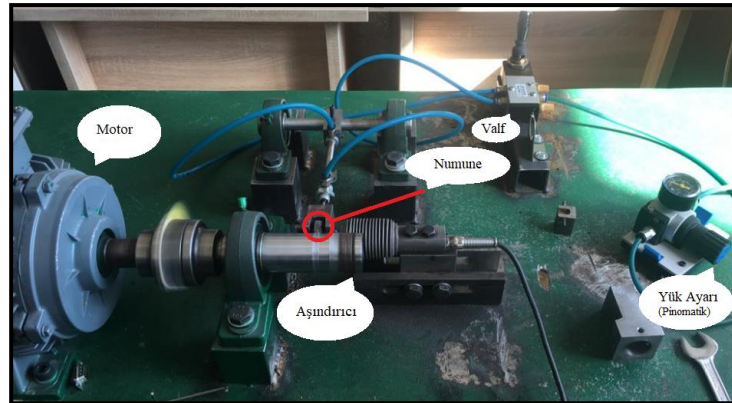
Borlanmış numunelerin karakterizasyon amaçlı incelemeleri aşağıda açıklanmıştır. Borlama deneyi sonrası, metalografik inceleme için hazırlanmış numunelerin optik mikroskop görüntüleri Nikon ECLIPSE MA200 marka optik mikroskop ile alınmıştır.

Borlama işlemi uygulanmış numunelerin yüzeylerinde oluşan fazların tayininde X-ışınları difraksiyon (XRD) analiz tekniği kullanılmıştır. XRD incelemelerinde GI-XRD PANalytical Empyrean marka difraktometre kullanılmıştır. Analiz sırasında Cu K α ($\lambda = 1,79021 \text{ \AA}$) ışıması ve 2θ ($20-90^\circ$) açıları kullanılmıştır. Analizlerde JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards) kartları ile X-Pert High Score yazılımı kullanılarak faz yapıları incelenmiştir.

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) incelemeleri Zeiss Sigma 300 (DAYTAM Lab.) ve EVO40 (İBTAM Lab.) model cihazlar yardımıyla yapılmıştır. SEM görüntüleri üzerinden tabaka kalınlıkları ölçülmüştür.

Mikrosertlikler Kronic HV-1000 model cihaz ile 10 saniye boyunca 100 gr yük altında Vickers Sertliği cinsinden alınmıştır. Yüzeyden ana matris bölgesine doğru (kesit boyunca) sabit aralıklarla Mikrosertlikler ölçülerek sertlik taramaları yapılmıştır. Her bir numunenin borür tabakası kalınlığının bir miktar fazlası Mikrosertlik ölçüm mesafesi olarak tespit edilmiştir.

Aşınma deneyleri için Şekil 4.3. 'deki blok-on-disk tipinde kuru kaymalı aşınma deney cihazı kullanılmıştır. Toplam aşınma yolu olarak 3000m seçilmiş ve her 300m 'de bir ağırlık tartımları yapılarak aşınma miktarı-aşınma mesafesi grafikleri çizilmiştir. Tartımlar SHIMADZU marka AUW200D model 10^{-5} hassasiyete sahip hassas terazi ile yapılmıştır.

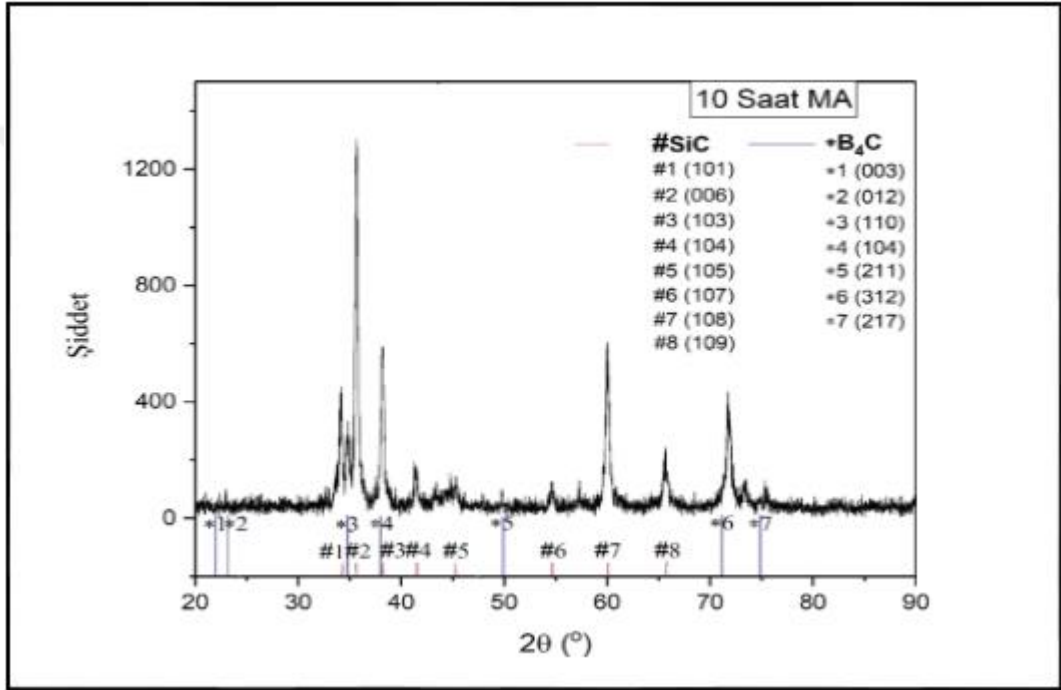


Şekil 4.3. Aşınma deney düzeneği.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. MA İşlemleri Sonrası Toz Karakterizasyonu

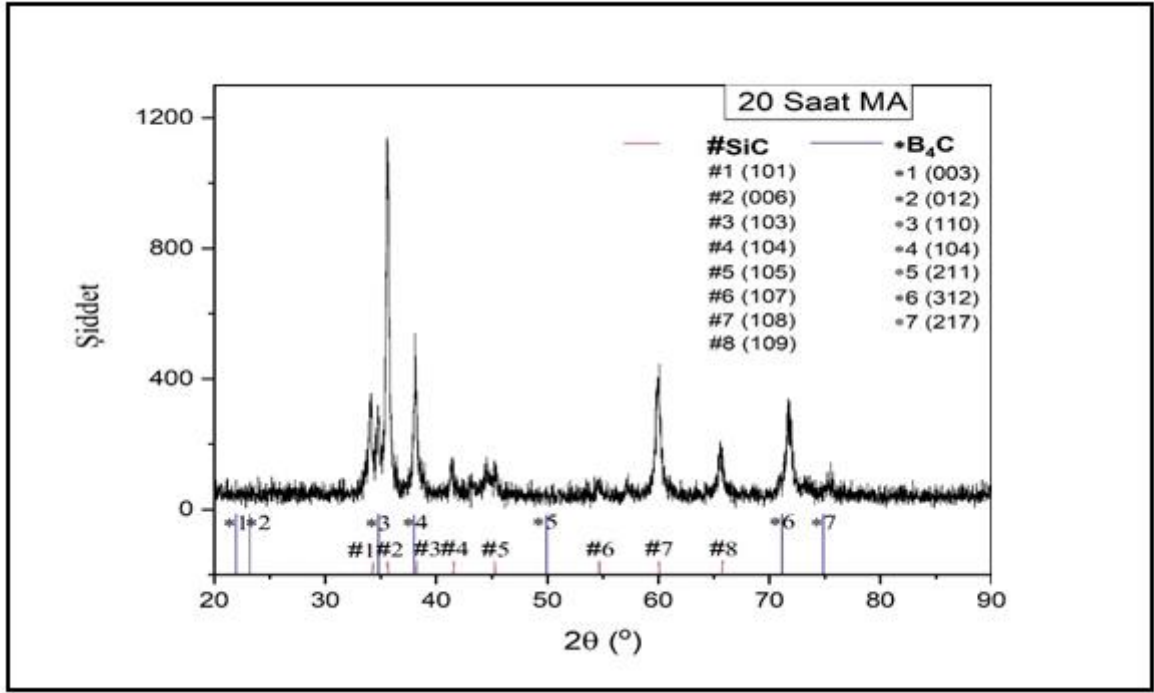
Öncelikle, Mekanik Alaşımlama (MA) işlemi yapılmış tozların karakterizasyonu için 10 ve 20 saat işlem görmüş tozlardan 20-90 ° açılar arasında XRD analizleri alınmış ve Şekil 5.1. ve 5.2. 'de elde edilen grafikler sırasıyla verilmiştir Şekil 5.3. 'de ise her iki grafik karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekil 5.1. 'de 10 saat MA işlemi yapılmış tozların XRD grafiği verilmiştir.



Şekil 5.1. 10 saat MA işlemi uygulanmış tozların XRD grafiği.

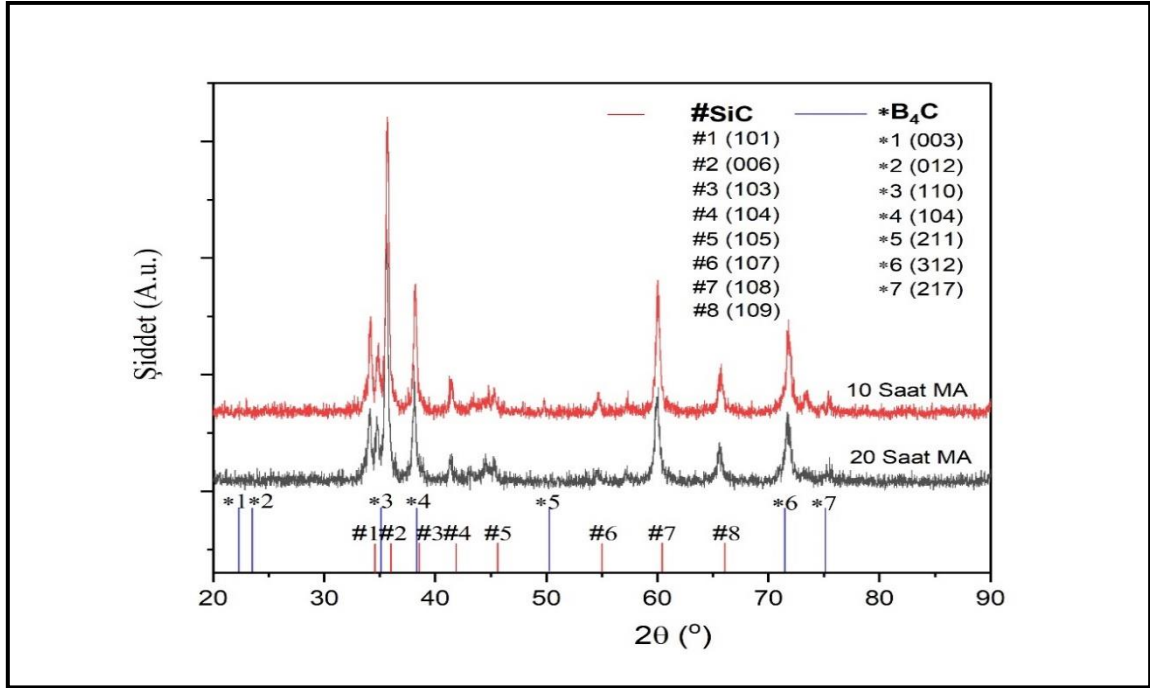
Grafiğin yatay eksenini (2θ) kestiği noktalarda “ * ” işaretiyle B₄C (Ref. Kod: 00-006-0555) ve “ # ” işaretiyle de SiC (Ref. Kod: 00-049-1623) bileşiklerinin piklerine ait indisler gösterilmiştir. MA işlemi öncesi yapıda elementel B olduğu halde MA işlemi sonrası XRD analizinde yapıda B₄C pikleri görülmektedir. Ayrıca piklerin genişliklerinin (broadening) artmış olması yapılarının kısmen amorf halde olduğuna işaret etmektedir.

Şekil 5.2. 'de 20 saat MA işlemi yapılmış tozların XRD grafiği verilmiştir. Grafiğin yatay eksenini (2θ) kestiği noktalarda “ * ” işaretiyle B₄C (Ref. Kod: 00-006-0555) ve “ # ” işaretiyle de SiC (Ref. Kod: 00-049-1623) bileşiklerinin piklerine ait indisler gösterilmiştir. Piklerin genişliklerinin (broadening) artmış olması yapılarının kısmen amorf halde olduğuna işaret etmektedir.



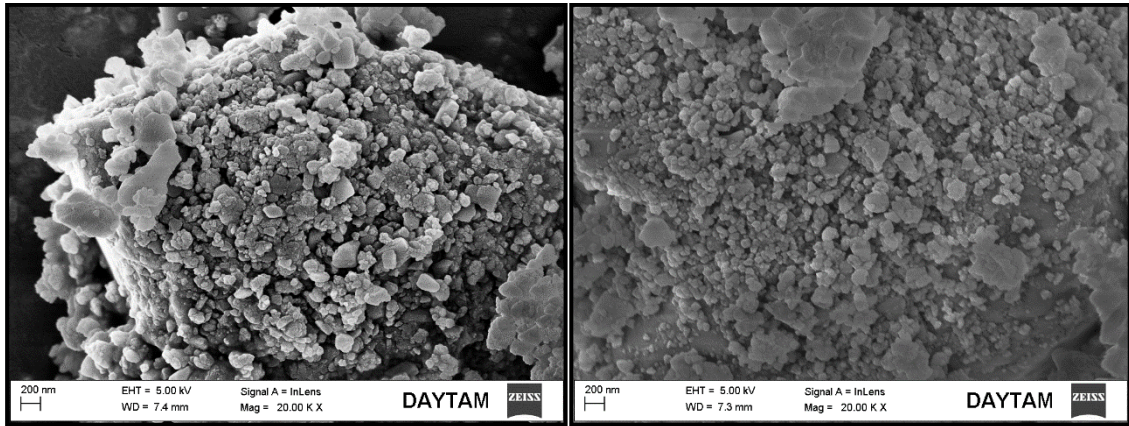
Şekil 5.2. 20 saat MA işlemi uygulanmış tozların XRD grafiği.

Şekil 5.3. 'de 10 ile 20 saat MA işlemi uygulanmış tozların XRD grafiği verilmiştir. Artan MA süresi ile birlikte pik şiddetlerinin düştüğü hatta bazı piklerin kaybolduğu ve pik genişliklerinin arttığı görülmektedir. 20 saat alaşımlama ile birlikte *1,*2, *5 ve *7 numaralı B₄C piklerinin şiddetlerinin düştüğü görülmektedir. Şiddetleri düşen, kaybolan veya genişleyen piklerin varlığı literatüre göre mekanik alaşımlama işleminin gerçekleştiğinin bir göstergesi olarak kabul edilir[175], [176]. 10 saat MA işlemi ile B₄C 'nin oluştuğu ve devamında 20 saat MA işlemi ile de oluşan B₄C 'nin şiddetleri SiC pikleri gibi azalmıştır.



Şekil 5.3. 10 ile 20 saat MA işlemi uygulanmış tozların XRD grafiği.

Şekil 5.4. 'de mekanik alaşımlanmış tozlara ait SEM görüntüleri verilmiştir. Görüntülerden de anlaşılacağı üzere ortalama toz parçacık boyutları 100nm 'nin altındadır. Bu durum tanelerin birbiriyle ya da bilyelerle veya cidarla yaptıkları çarpışmalar neticesinde kırılmaları tekrar kaynamaları sonucunda boyutlarının küçülmesiyle açıklanabilir.



Şekil 5.4. Sırasıyla 10 ve 20 saat MA işlemi uygulanmış tozların SEM görüntüleri (20.00 KX).

Artan alaşımlama süresi tozların parçacık boyutunda bir azalmaya sebep olmuştur. 20 saat alaşımlamadan sonra toz parçacıklarının 10 saat MA işlemi yapılmış toz parçacıklarına göre daha fazla topaklaştığı da ayrıca söylenebilir.

Scherrer denklemi kullanılarak toz parçacık boyutu, dislokasyon yoğunluğu ve mikro gerilme değerleri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$D = \frac{k\lambda}{\beta_D \cos\theta} \text{ (Scherrer Denklemi)} \quad (5.1)$$

Burada; D: Parçacık Boyutu K: 0,9 (Scherrer Sabiti) λ : 0,15406nm (X-ray Dalgaboyu)

β : FWHM θ : Pik açısı (rad) olduğunu simgelemektedir.

Benzer şekilde mikro gerilme;

$$\epsilon = \frac{\beta}{4 \tan\theta} \quad (5.2)$$

Olarak tanımlanır.

Tablo 5.1. ve 5.2. 'de MA işlemi uygulanmış tozların XRD analizleri kullanılarak β (FWHM) ve θ değerleri “Origin 2017” programı kullanılarak hesaplanmıştır. Her bir pik için 2θ ve β değerleri Tablo 5.1. 'de gösterilmiştir.

Tablo 5.1. 10 Saat MA İşlemi Uygulanmış Tozların XRD Analizine Ait Değerler.

<u>Pik Açıları</u> (2Theta)	<u>β</u> (FWHM)	<u>Parçacık</u> <u>Boyutu</u> (nm)	<u>δ</u> (nm ⁻²)	<u>ϵ</u>
34,22025	0,39702	20,9364197	0,002281367	0,005627477
35,56088	0,39702	21,01353435	0,002264654	0,005401901
35,88007	0,39702	21,0324034	0,002260592	0,005350601
34,77884	0,39702	20,96813287	0,002274471	0,00553144
38,21021	0,3975	21,15061375	0,002235394	0,005007266
41,30643	0,39723	21,37279652	0,002189159	0,004598246
60,0912	0,39741	23,09326571	0,001875121	0,002997912
65,83675	0,39707	23,83391524	0,001760391	0,002676224
71,78979	0,3975	24,67076122	0,00164299	0,002396458
34,22025	0,39702	20,9364197	0,002281367	0,005627477
35,56088	0,39702	21,01353435	0,002264654	0,005401901

Ortalama toz parçacık boyutu tayini için her bir pik açısı değerinde hesaplanan parçacık boyutunun ortalaması alındığında;

$$\sum_{i=0}^{11} \text{Parçacık Boyutu} / 11 = 22,00798 \text{ nm olarak hesaplanmıştır.}$$

Dislokasyon yoğunluğu için bulunan δ değerlerinin ortalaması alınarak;

$$\sum_{i=0}^{11} \text{Dislokasyon Yoğunluğu} / 11 = 0,00212 \text{ (nm}^{-2}\text{) olarak hesaplanmıştır.}$$

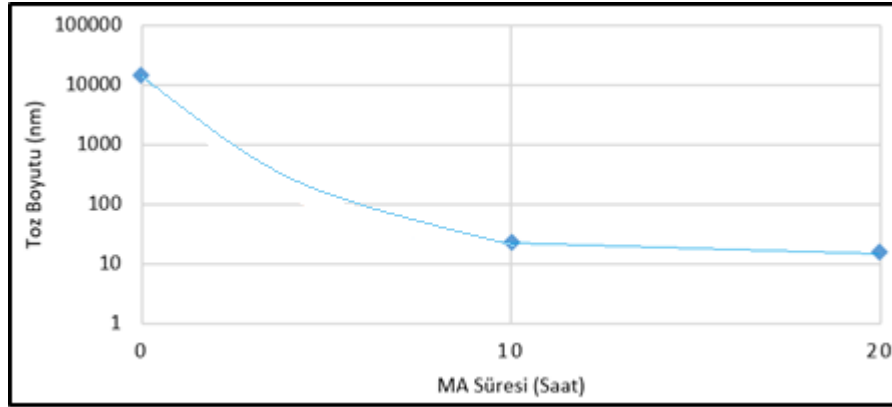
Boyutsuz bir sayı olan Mikro Gerilme “ ϵ ” için bulunan değer ise;

$$\sum_{i=0}^{11} \varepsilon /_{11} = 0,00460 \text{ olarak hesaplanmıştır.}$$

Tablo 5.2. 20 Saat MA İşlemi Uygulanmış Tozların XRD Analizine Ait Değerler.

<u>Pik Açıları</u> (2Theta)	<u>β</u> (FWHM)	<u>Parçacık Boyutu</u> (nm)	<u>δ</u> (nm ⁻²)	<u>ε</u>
34,05369	0,45273	18,3519285	0,00296918	0,006450455
34,816	0,57562	14,46373316	0,004780124	0,008010657
35,61455	0,36857	22,63897652	0,001951131	0,005006741
38,1081	0,43564	19,29294406	0,0026866	0,005503563
41,39103	0,45699	18,58307955	0,002895774	0,005278204
54,60698	0,38466	23,24218383	0,001851169	0,003251346
57,18447	0,32591	27,76125973	0,001297543	0,002609067
59,96678	0,56523	16,22656278	0,00379793	0,004274586
65,60655	0,57498	16,43789359	0,003700903	0,003892443
71,72585	0,68185	14,37657907	0,004838256	0,004115588
75,37063	0,6743	14,8873251	0,004511975	0,003808765

Tablo 5.2. kullanılarak yapılan hesaplamalar neticesinde 20 saat MA işlemi için; Toz Parçacık Boyutu: 16,03 nm, Dislokasyon Yoğunluğu: 0,00321 nm⁻², Mikro Gerilme: 0,00475 olarak bulunmuştur. Şekil 5.5. 'de MA süresi ile toz boyutu arasındaki ilişki gösterilmiştir.



Şekil 5.5. MA süresi ile Toz Boyutu arasındaki ilişki.

Tablo 5.1. ve 5.2. 'den hesaplanan değerler birbirleriyle kıyaslandığında toz parçacık boyutunda %27,13 oranında azalış görülmektedir. Dislokasyon yoğunluğunda %51,42 ve mikro gerilmede ise %3,26 oranında artış görülmektedir. Yapılan bu hesaplamalarla MA işleminin bir sonucu olarak parçacık boyutunda azalma, dislokasyon yoğunluğu ve mikro gerilmede ise artışlar

görülmüştür. Yapıda bulunan bileşiklerin kristal yapılarının MA işleminin plastik deformasyon etkileri neticesinde eski hallerine göre bozulduğu anlamını taşımaktadır. Dislokasyon yoğunluğu ve mikro gerilme değerlerindeki artış beklenen bir sonuç olup MA işleminin içyapıdaki düzensizliği artırdığı, iç enerjiyi yükselttiği yani tozların daha düzensiz ve iç enerjilerini daha yüksek hale getirdiği anlamına gelmektedir. Bu durumda; aynı difüzyon şartlarında atomların gidebilecekleri yolun yani difüzyon derinliğinin artması beklenmektedir.

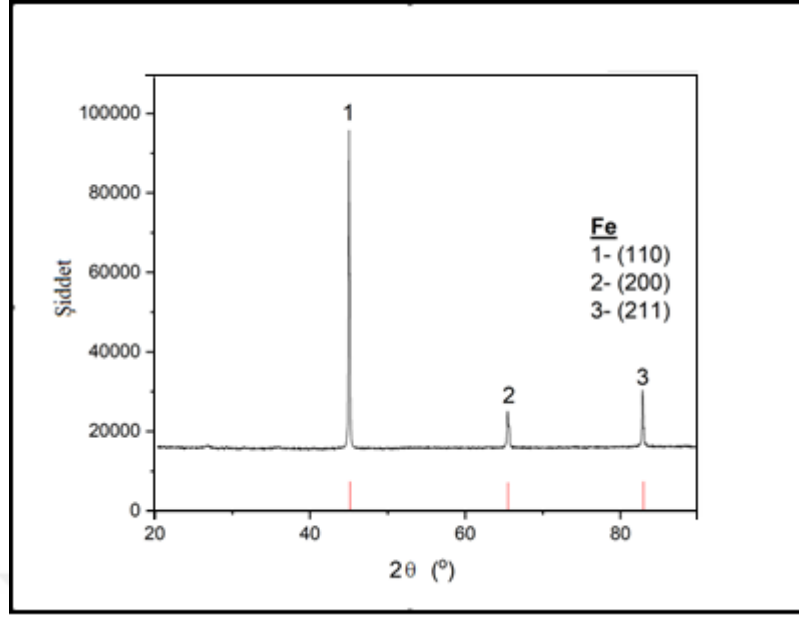
5.2. Borür Tabakalarının Karakterizasyonu

650 °C ‘den başlanılarak 50 °C artışlarla 850 °C borlama sıcaklığına kadar, MA ön işlemi ile hazırlanan borlayıcı jel kullanılarak borlanan çelik numunelerin Optik, SEM ve XRD analizleri ile aynı sıcaklık ve borlama ısı işlem sürelerinde üretilmiş numune gruplarının aşınma grafikleri sırasıyla aşağıda verilmiştir. MA işlemi yapılmamış jel kullanılarak, 650 °C ‘de 3 saat borlama ısı işlemi yapılmış 0M65-3 kodlu numuneye ait mikroyapı Şekil 5.6. ‘da verilmiştir. Bu şartlar altında yüzeyde oluşması beklenen borür tabakasının oluşmadığı mikroyapı görüntüsünden anlaşılmaktadır.



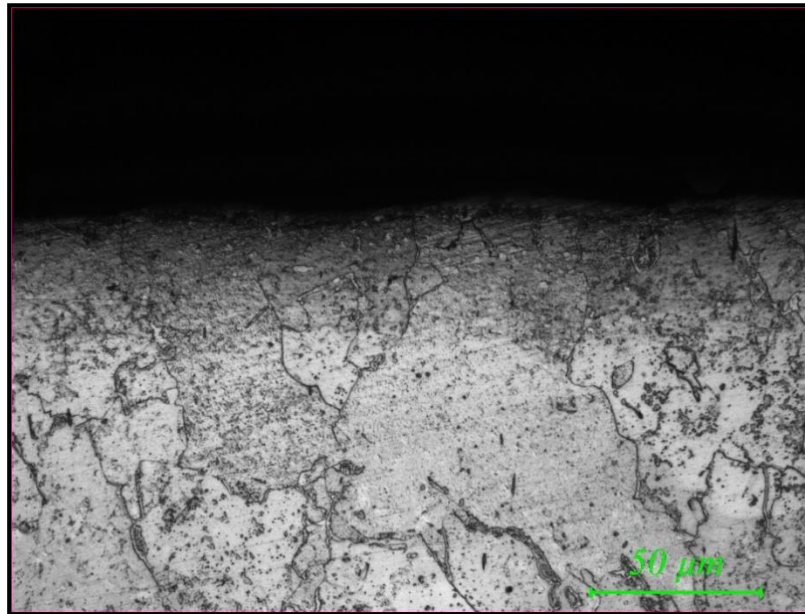
Şekil 5.6. 0M65-3 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (500x).

Şekil 5.7. ‘de 0M65-3 kodlu numunenin XRD analiz sonucu verilmiştir. Grafikte Fe elementine ait pikler tespit edilmiştir. Yapıda herhangi bir borür oluşumuna XRD analizi sonucunda da rastlanılamamıştır. MA işlemi yapılmadan, 650 °C ‘de 3 saat borlama şartları altında numune yüzeyinde borür tabakasının oluşturulamadığı sonucuna ulaşılmıştır.



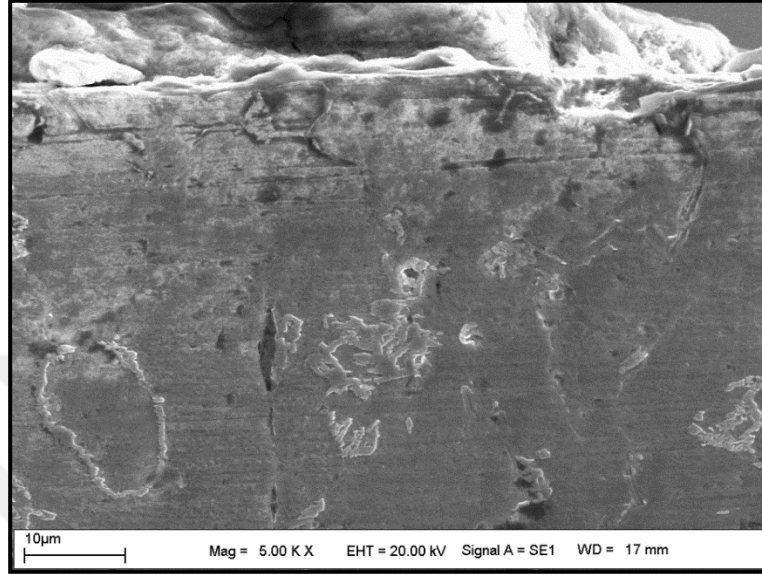
Şekil 5.7. 0M65-3 kodlu numuneye ait XRD grafiği.

10 saat MA işlemi sonucu elde edilen jel kullanılarak, 3 saat 650°C 'da borlama yapılmış 10M65-3 kodlu numuneye ait mikroyapı Şekil 5.8. 'de verilmiştir. Bu şartlar altında yüzeyde oluşması beklenen borür tabakasının oluşmadığı mikroyapı görüntüsünden tespit edilmiştir.



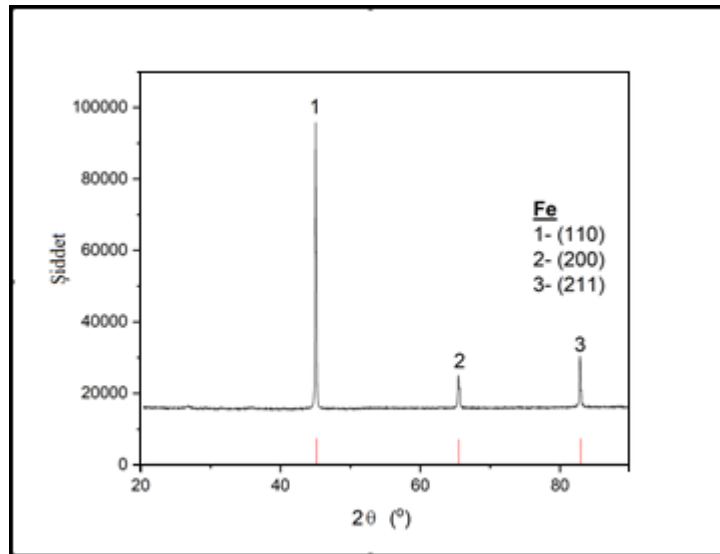
Şekil 5.8. 10M65-3 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (500x).

Şekil 5.9. 'da 10M65-3 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü verilmiştir. Numuneye ait mikroyapı görüntüsünde olduğu gibi numune yüzeyinde oluşması beklenen borür tabakasına SEM görüntüsünde de rastlanılmamıştır.



Şekil 5.9. 10M65-3 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.

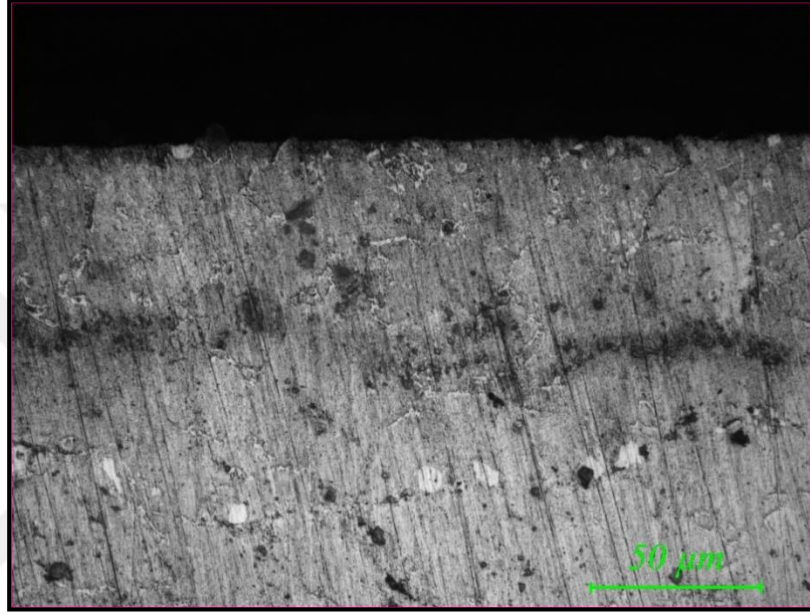
Şekil 5.10. 'da 10M65-3 kodlu numunenin XRD analiz sonucu verilmiştir. Grafiğe bakıldığında numune üzerinde sadece Fe elementine ait pikler tespit edilmiştir. 10 saat MA işlemi yapılarak, 650 °C ve 3 saat işlem şartları altında numune yüzeyinde borür tabakası oluşturulmadığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 5.10. 10M65-3 kodlu numuneye ait XRD grafiği.

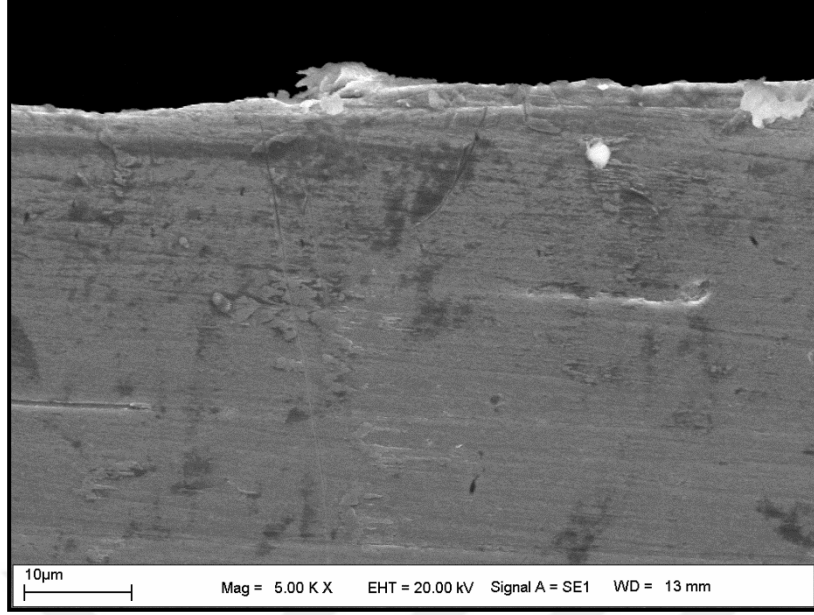
650 °C gibi borlama için düşük bir sıcaklık ve 3 saat ısıtılma süresinde, 10 saat MA işlemi ile bile numune yüzeyinde borür tabakası oluşturulamamıştır. Elde edilen bu veriler doğrultusunda borlama işlemi için yukarıda yazılan şartların uygun olmadığı sonucuna varılmıştır.

20 saat MA işlemi sonucu elde edilen jel kullanılarak, 3 saat 650°C 'da borlama yapılmış 20M65-3 kodlu numuneye ait mikroyapı Şekil 5.11. 'de verilmiştir. Bu şartlar altında yüzeyde oluşması beklenen borür tabakasının oluşmadığı mikroyapı görüntüsünden tespit edilememiştir.



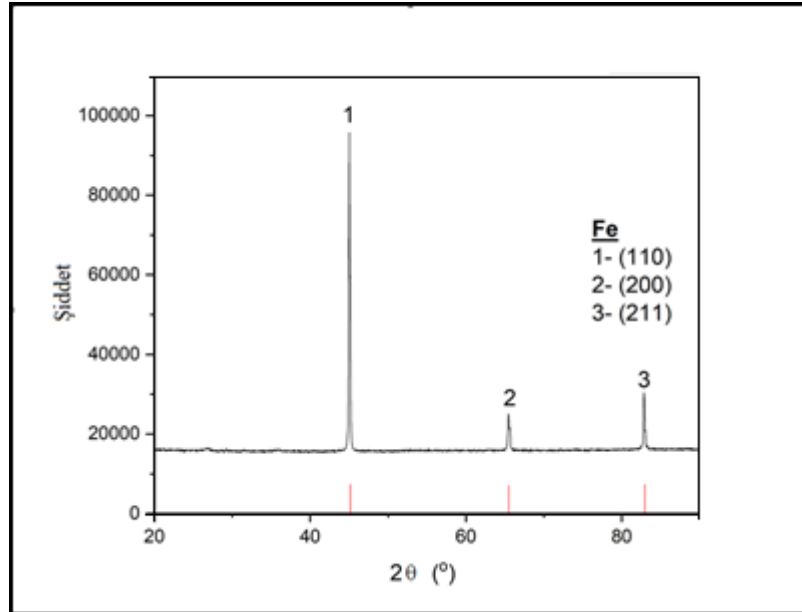
Şekil 5.11. 20M65-3 kodlu numuneye ait Mikroyapı görüntüsü (500x).

Şekil 5.12. 'de 20M65-3 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü verilmiştir. Numuneye ait mikroyapı görüntüsünde de olduğu gibi numune yüzeyinde oluşması beklenen borür tabakasına SEM görüntüsünde de rastlanılmamıştır.



Şekil 5.12. 20M65-3 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.

Şekil 5.13. 'de 20M65-3 kodlu numunenin XRD analiz sonucu verilmiştir. Grafiğe bakıldığında numune üzerinde sadece Fe elementine ait pikler belirlenmiştir. 20 saat MA işlemi yapılarak, 650 °C ve 3 saat işlem şartları altında numune yüzeyinde borür tabakasının oluşturulamadığı çıkarımına varılmıştır.



Şekil 5.13. 20M65-3 kodlu numuneye ait XRD grafiği.

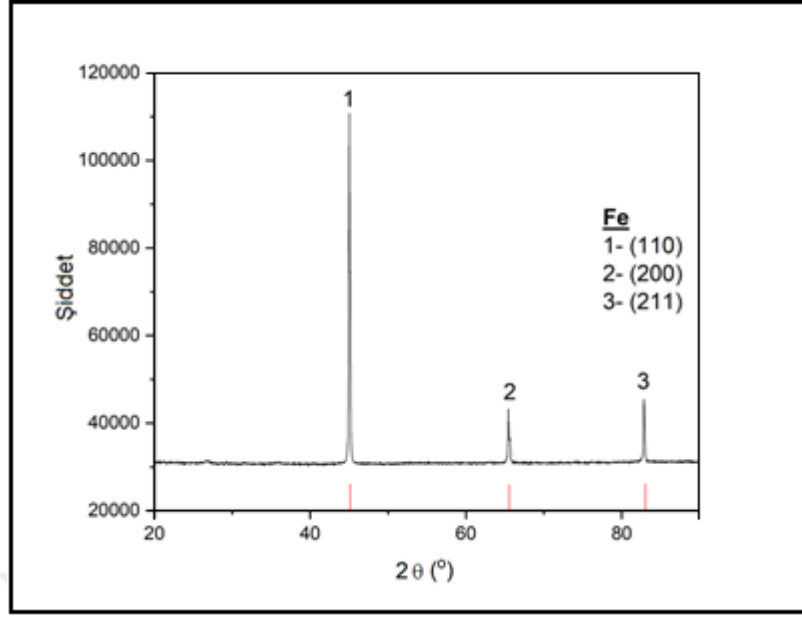
650 °C ‘da farklı MA işlem parametreleri ile yapılan borlama işlemleri neticesinde numune yüzeylerinde borür tabakası oluşmadığı XRD grafiklerinde açıkça ortaya konulmuştur. Bu sonucu mikroyapı ve SEM görüntüleri de doğrulamaktadır. Borür tabakalarının oluşmamasının sebebi, yeterli süre ve sıcaklığın olmamasından kaynaklanmaktadır. MA işleminin bu sonucu değiştirmede yetersiz kaldığı anlaşılmıştır.

MA işlemi yapılmamış tozla üretilen jel kullanılarak, 650 °C ‘de 6 saat borlama ısıt işlemi yapılmış 0M65-6 kodlu numuneye ait mikroyapı Şekil 5.14. ‘de verilmiştir. Bu şartlar altında yüzeyde oluşması beklenen borür tabakasının oluşmadığı mikroyapı görüntüsünden anlaşılmaktadır.



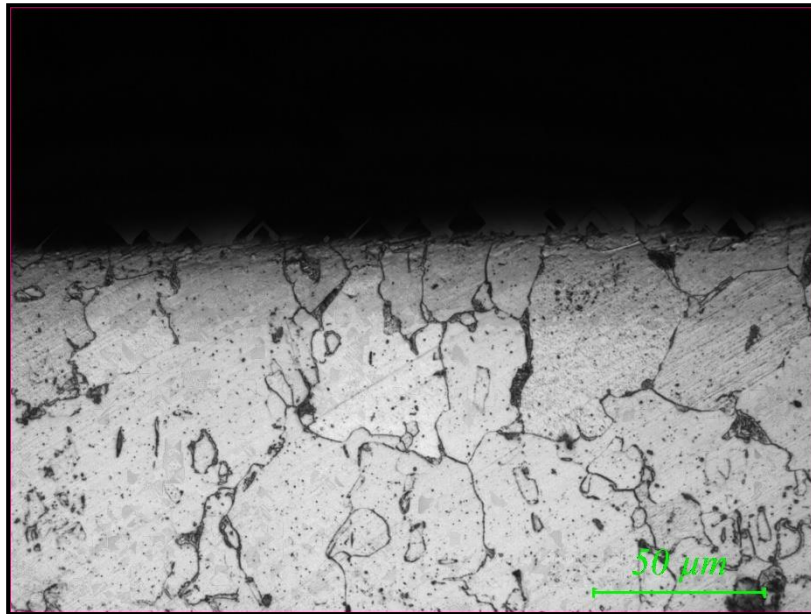
Şekil 5.14. 0M65-6 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (500x).

Şekil 5.15. ‘de 0M65-6 kodlu numunenin XRD analiz sonucu verilmiştir. Grafikte Fe elementine ait pikler tespit edilmiştir. Yapıda herhangi bir borür tabakasının oluşumuna XRD analizi sonucunda da rastlanılamamıştır. MA yapılmadan, 650 °C ve 6 saat işlem şartları altında yapılan borlama neticesinde numune yüzeyinde borür tabakasının oluşturulamadığı sonucuna varılmıştır.



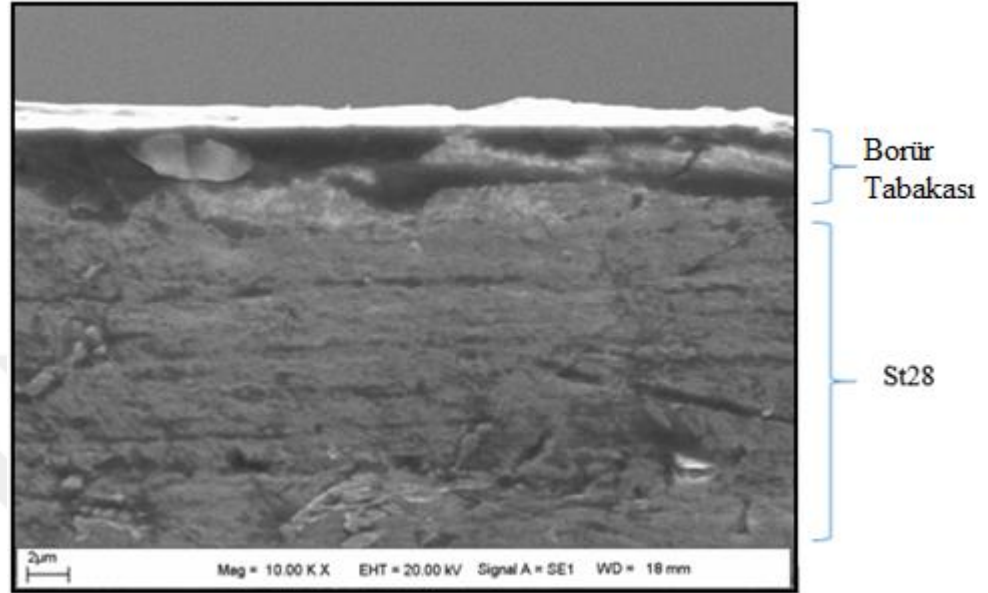
Şekil 5.15. 0M65-6 kodlu numuneye ait XRD grafiği.

10 saat MA işlemi sonucu elde edilen jel kullanılarak, 650°C 'de 6 saat borlama ısıt işlemi yapılmış 10M65-6 kodlu numuneye ait mikroyapı Şekil 5.16. 'da verilmiştir. Bu şartlar altında yüzeyde adacıklar halinde borür yapıları görülmektedir.



Şekil 5.16. 10M65-6 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (500x).

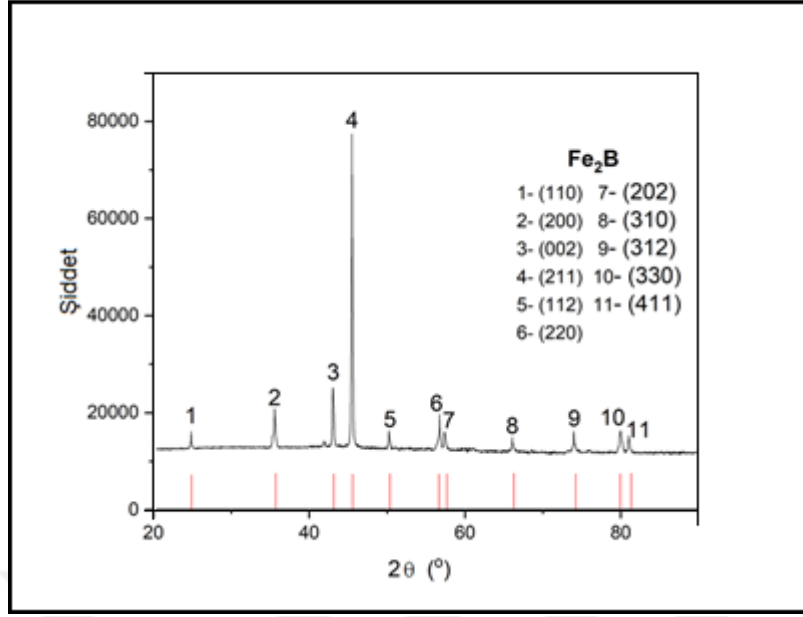
Şekil 5.17. 'de 10M65-6 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü verilmiştir. Numuneye ait mikroyapı görüntüsünde olduğu gibi yüzeyde oluşması beklenen borür tabakası SEM görüntüsünde de belirlenmiştir.



Şekil 5.17. 10M65-6 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.

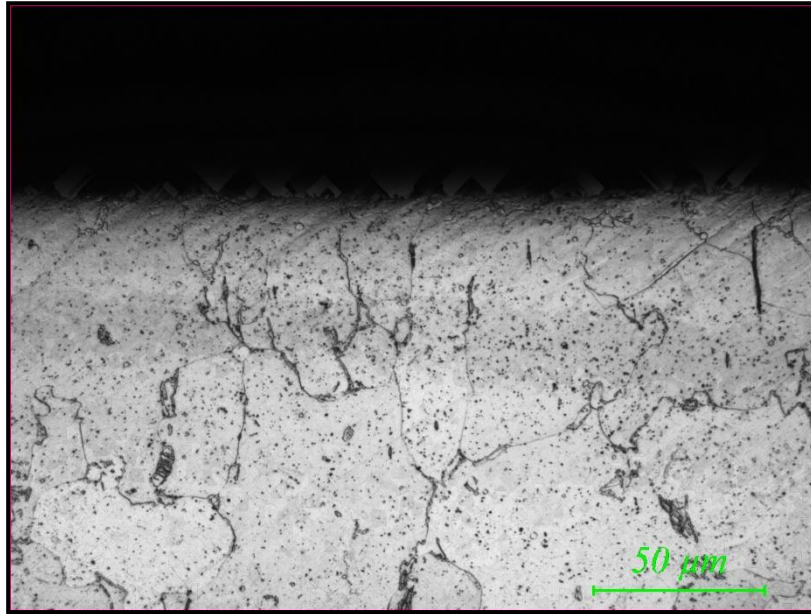
Mikroyapı görüntüsü açıklanırken “adacık”, SEM görüntüsünde ise “tabaka” terimleri kullanılmıştır. Bu fark; mikroyapı ve SEM görüntülerinin ölçekleri arasındaki farktan kaynaklanmaktadır. Resmin ölçeği büyüdükçe adacık şekilleri tabakalar gibi görünmektedir. Bu durumla ilerleyen numunelerde de karşılaşılacaktır.

Şekil 5.18. 'de 10M65-6 kodlu numunenin XRD analiz sonucu verilmiştir. Grafiğe bakıldığında numune üzerindeki piklerin sadece Fe_2B bileşiğine ait olduğu saptanmıştır. XRD incelemesiyle borun yapıya difüze olduğu ve yüzeyde Fe_2B tabakasının oluştuğu tespit edilmiştir. 10 saat MA işlemi yapılarak, 650 °C ve 6 saat işlem şartları altında numune yüzeyinde borür tabakasının oluşturulduğu sonucuna varılmıştır. Çok ince bir tabaka olmasına rağmen 650 °C gibi düşük sıcaklıklarda MA işleminin katkısıyla borlama gerçekleştirilmiştir.



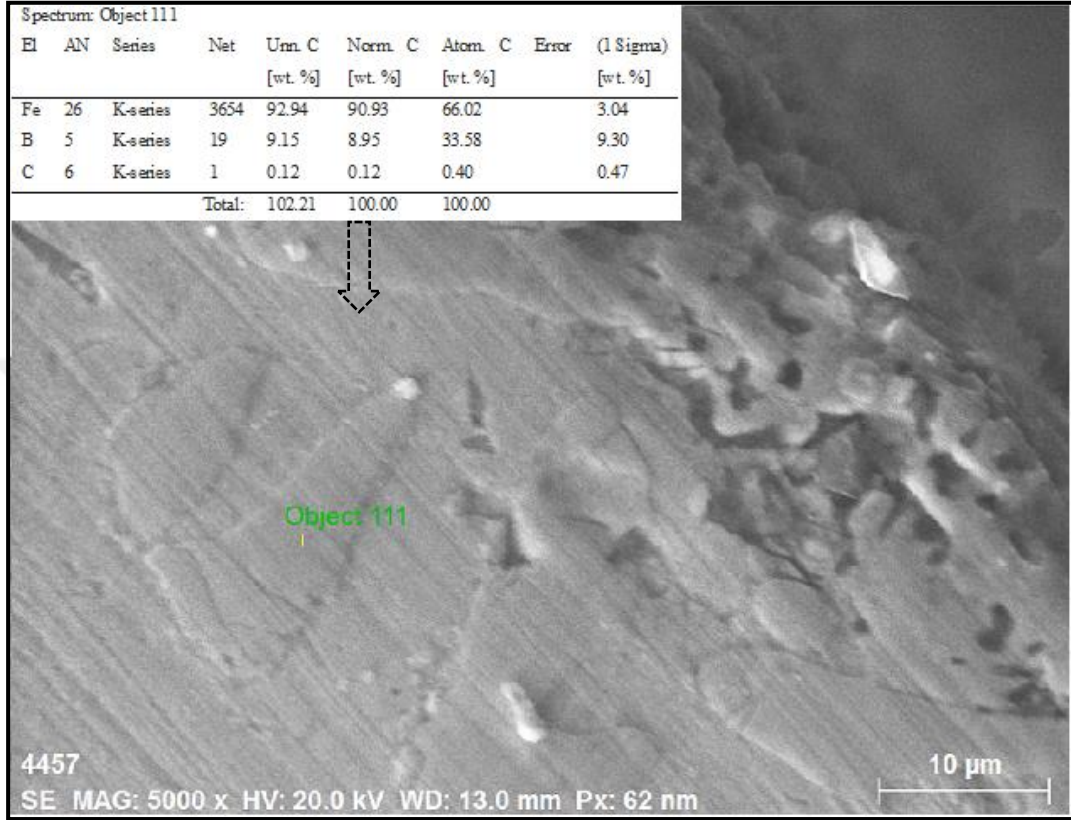
Şekil 5.18. 10M65-6 kodlu numuneye ait XRD grafiği.

20 saat MA işlemi sonucu elde edilen jel kullanılarak, 650°C 'de 6 saat borlama ısıt işlemi yapılmış 20M65-6 kodlu numuneye ait mikroyapı Şekil 5.19. 'da verilmiştir. Bu şartlar altında yüzeyde oluşması beklenen borür tabakasının küçük adacıklar halinde oluştuğu anlaşılmaktadır.



Şekil 5.19. 20M65-6 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (500x).

Şekil 5.20. 'de 20M65-6 kodlu numuneye ait SEM-EDX analizinde de, XRD ve Mikroyapı görüntüsü ile benzer neticeler elde edilmiştir. Numuneye ait mikroyapı görüntüsünde de olduğu gibi, yüzeyde adacıklar halinde borür yapılarına rastlanılmıştır.



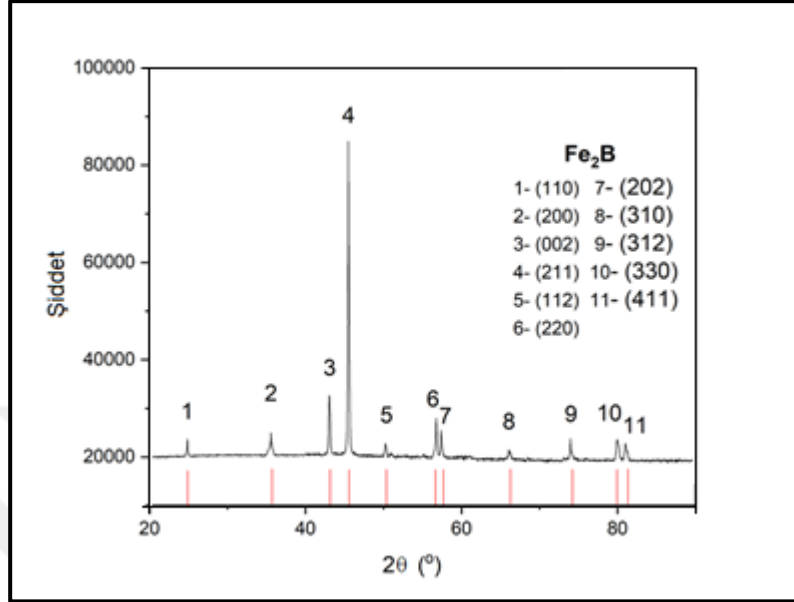
Şekil 5.20. 20M65-6 kodlu numuneye ait SEM-EDX görüntüsü.

Borür yapıları yüzeyden içeriye doğru, farklı açılarda büyümektedir. Silindirik geometriye sahip numunelerin düz yüzeyinin merkezine dik doğrultuda kesildiği ve kesicinin yüzeyi ile borür yapılarının büyüme doğrultuları paralel olmayabilir. Bu durumda, yüzeyden içeriye farklı açılarla büyüyen borür yapılarının bir kısmı kesilen parça içerisinde, kalan kısmı da bir diğer numune parçası üzerinde kalmaktadır.

Şekil 5.20. 'de ok ile gösterilen adacıktan nokta EDX analizi alınmış ve elde edilen veriler şeklin üzerinde verilmiştir. Adacığın nasıl oluştuğu yukarıda detaylı olarak anlatılmış olup çalışmadaki SEM görüntülerinde görülen bu gibi adacıkların Fe_2B yapısında olduğu kanıtlanmıştır. 20M65-6 kodlu numuneye benzer SEM ve mikroyapı görüntüleri 10M65-6 kodlu numunede de görülmektedir.

Şekil 5.21. 'de 20M65-6 kodlu numunenin XRD analiz sonucu verilmiştir. Grafiğe bakıldığında numune üzerindeki piklerin sadece Fe_2B bileşiğine ait olduğu tespit edilmiştir. XRD incelemesiyle borun yapıya difüze olduğu ve yüzeyde Fe_2B tabakasının oluştuğu tespit edilmiştir.

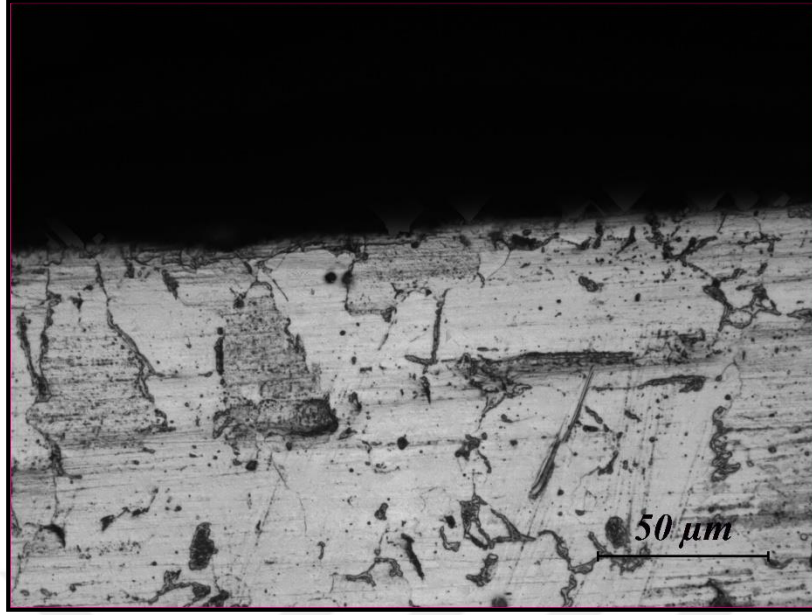
20 saat MA işlemi yapılarak, 650 °C ve 6 saat işlem şartları altında numune yüzeyinde borür tabakasının oluşturulduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 5.21. 20M65-6 kodlu numuneye ait XRD grafiği.

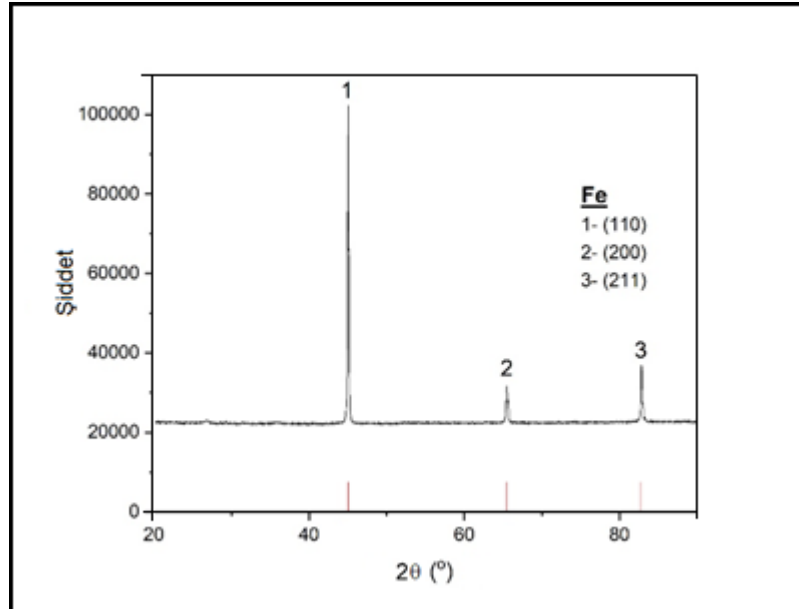
MA işlemi yapılmamış jel ile 650 °C ‘de 6 saat borlama neticesinde numune yüzeyinde borür tabakasının oluşmadığı fakat MA işlemi yapılmış jelle borlanan numunelerin yüzeyinde Fe₂B tabakasının oluştuğu XRD grafikleri, mikroyapı ve SEM görüntüleri ile tespit edilmiştir. MA işlemi yapılmış jel ile üretilen numunelerde adacıklar halinde Fe₂B borür tabakasının oluştuğu anlaşılmıştır. Aynı şartlar altında değişken olarak sadece MA işlemi yapılmış jel ile numune yüzeyinde ince de olsa Fe₂B tabakasının oluşması, MA işleminin difüzyona katkı sağladığının kanıtı olarak gösterilebilir.

MA işlemi yapılmamış jel kullanılarak, 650 °C ‘de 12 saat borlama ısıl işlemi yapılmış 0M65-12 kodlu numuneye ait mikroyapı Şekil 5.22. ‘de verilmiştir. Bu şartlar altında yüzeyde oluşması beklenen borür tabakasına mikroyapı görüntüsünde saptanamamıştır.



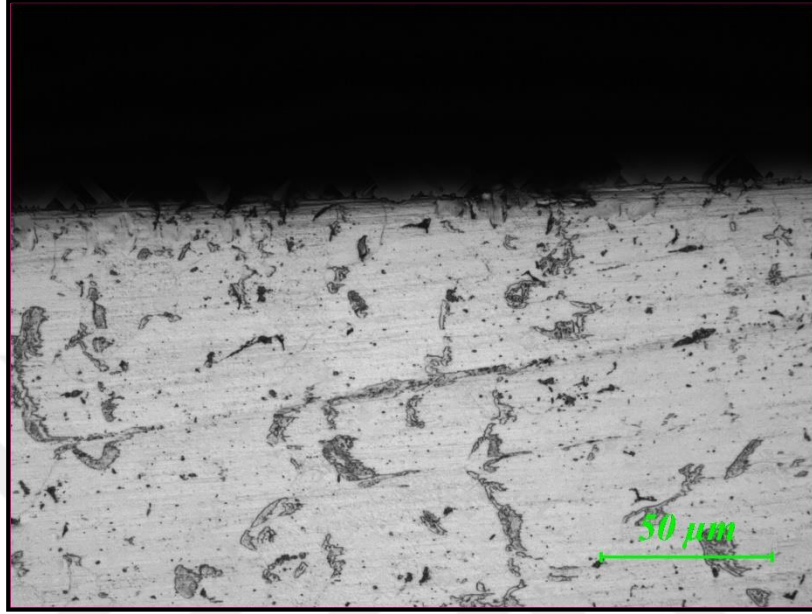
Şekil 5.22. 0M65-12 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (500x).

Şekil 5.23. 'de 0M65-12 kodlu numunenin XRD analiz sonucu verilmiştir. Grafikte Fe elementine ait pikler belirlenmiştir. Yapıda herhangi bir borür oluşumuna XRD analizi sonucunda da rastlanılamamıştır. MA işlemi yapılmadan, 650 °C ve 12 saat işlem şartları altında numune yüzeyinde borür tabakasının oluşturulmadığı sonucuna varılmıştır.



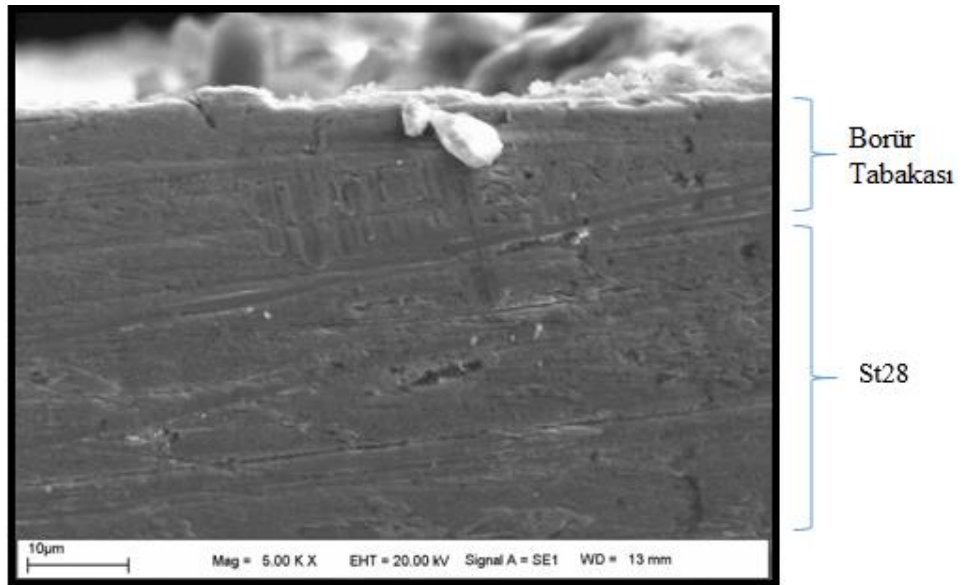
Şekil 5.23. 0M65-12 kodlu numuneye ait XRD grafiği.

10 saat MA işlemiyle elde edilen jel kullanılarak, 12 saat 650°C 'da borlama yapılmış 10M65-12 kodlu numuneye ait mikroyapı Şekil 5.24. 'de verilmiştir. Bu şartlar altında oluşması beklenen borür tabakasının birkaç adacık halinde olduğu şekilden anlaşılmaktadır.



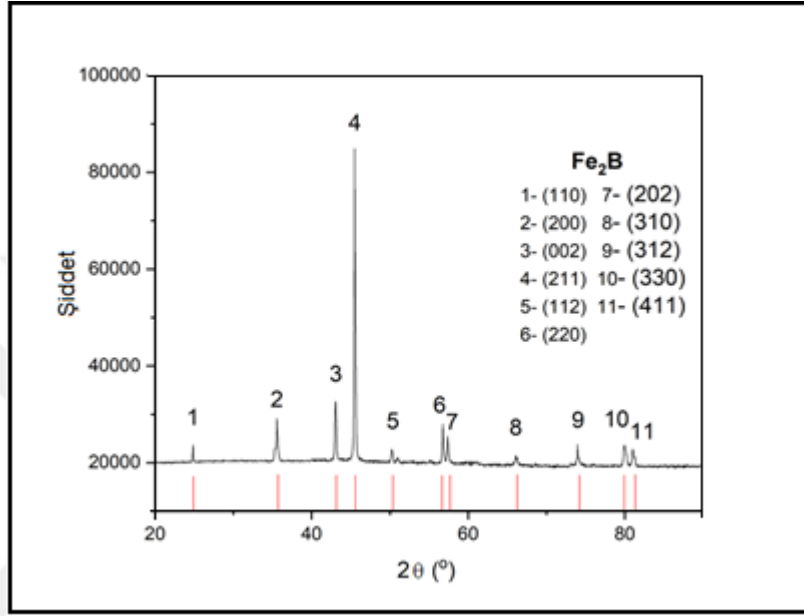
Şekil 5.24. 10M65-12 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (500x).

Şekil 5.25. 'de 10M65-12 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü verilmiştir. Numune yüzeyine ait mikroyapı görüntüsünden anlaşıldığı üzere kesitte olduğu gibi ince borür tabakası gözlenmiştir.



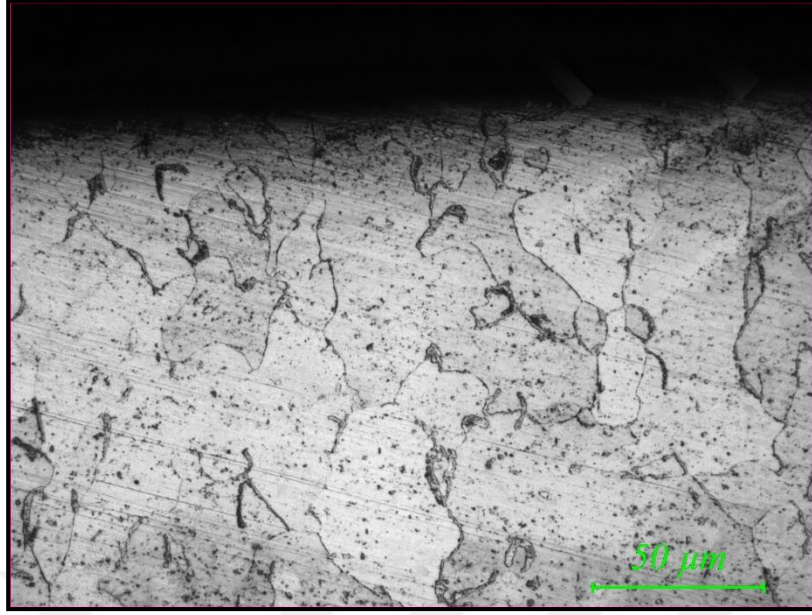
Şekil 5.25. 10M65-12 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.

Şekil 5.26. 'da 10M65-12 kodlu numunenin XRD analiz sonucu verilmiştir. Grafiğe bakıldığında numune üzerindeki piklerin sadece Fe_2B bileşiğine ait olduğu belirlenmiştir. XRD incelemesiyle borun yapıya difüze olduğu ve yüzeyde Fe_2B tabakasının oluştuğu tespit edilmiştir. 10 saat MA işlemi yapılarak, 650 °C ve 12 saat işlem şartları altında numune yüzeyinde borür tabakasının oluşturulduğu sonucuna varılmıştır.



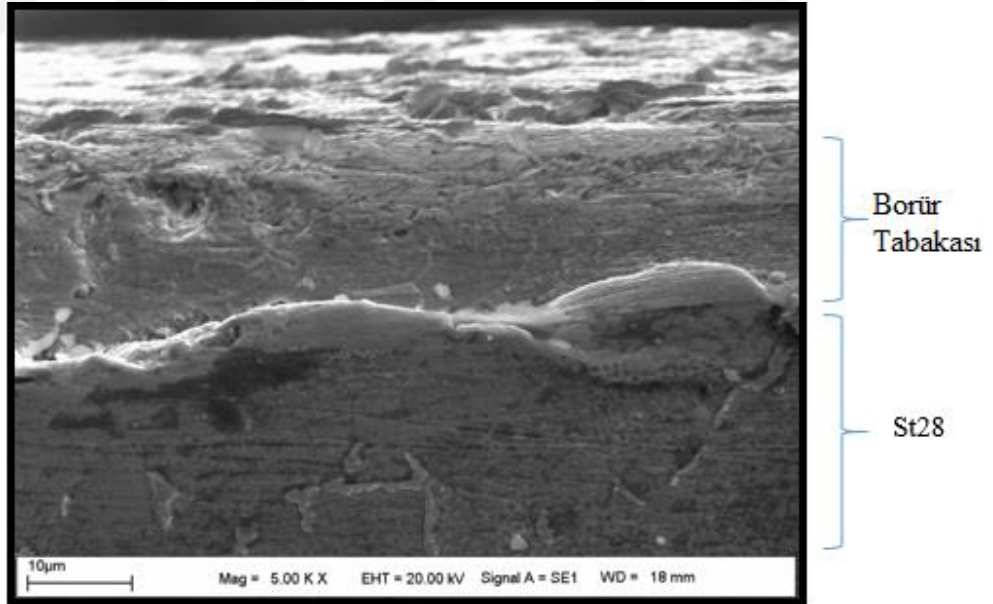
Şekil 5.26. 10M65-12 kodlu numuneye ait XRD grafiği.

20 saat MA işlemi sonucu elde edilen jel kullanılarak, 12 saat 650°C 'da borlama yapılmış 20M65-12 kodlu numuneye ait mikroyapı Şekil 5.27. 'de verilmiştir. Bu şartlar altında oluşması beklenen borür tabakasının çok ince bir tabaka halinde oluştuğu şekilden anlaşılmaktadır.



Şekil 5.27. 20M65-12 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (500x).

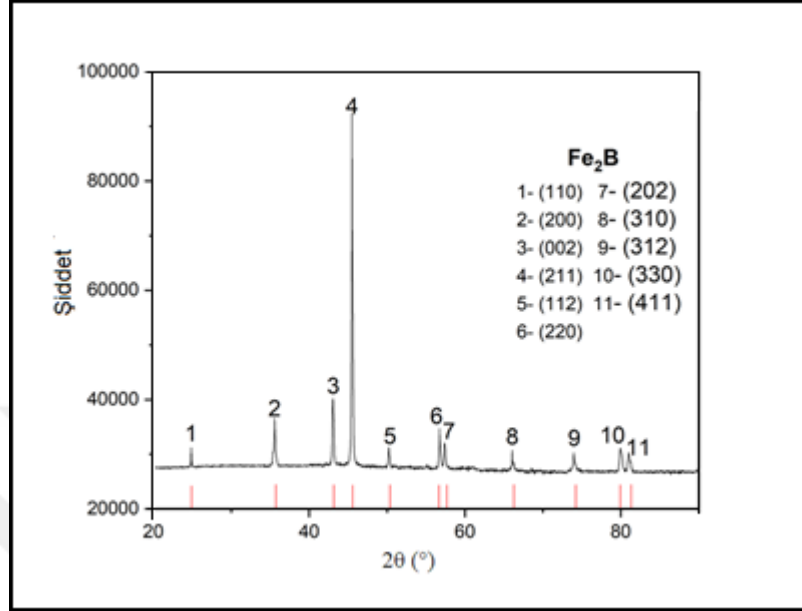
Şekil 5.28. 'de 20M65-12 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü verilmiştir. Bu görüntüden de anlaşılacağı gibi, borür tabakası numune yüzeyinde ince bir şekilde oluşmuştur.



Şekil 5.28. 20M65-12 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.

Şekil 5.29. 'da 20M65-12 kodlu numunenin XRD analiz sonucu verilmiştir. Grafiğe bakıldığında numune üzerindeki piklerin sadece Fe_2B bileşiğine ait olduğu saptanmıştır. XRD incelemesiyle borun yapıya difüze olduğu ve yüzeyde Fe_2B tabakasının oluştuğu tespit edilmiştir.

20 saat MA işlemi yapılarak, 650 °C ve 12 saat işlem şartları altında numune yüzeyinde borür tabakasının oluşturulduğu sonucuna varılmıştır.

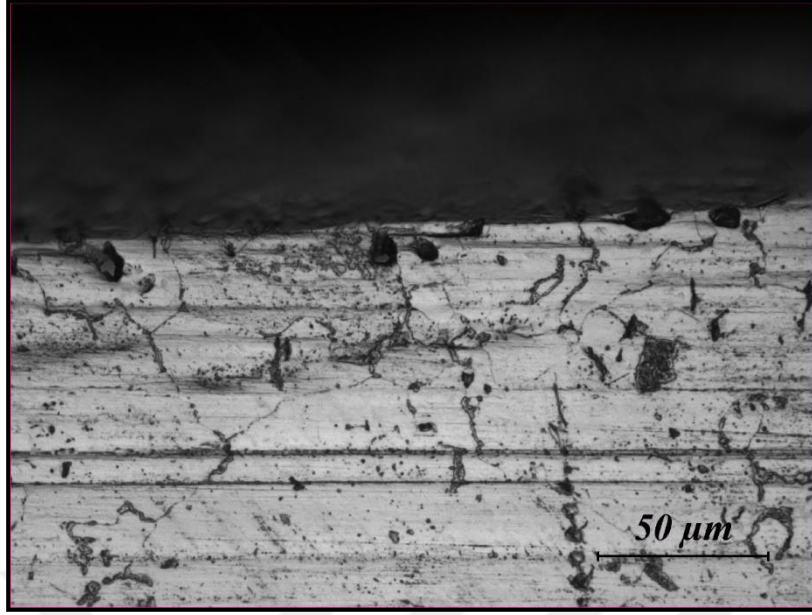


Şekil 5.29. 20M65-12 kodlu numuneye ait XRD grafiği.

20 saat MA işlemi yapılmış jelle 650 °C ‘de 6 saat borlama ısıtma işlemiyle üretilen numunelerin yüzeyinde Fe₂B tabakasının oluştuğu fakat MA işlemi yapılmamış jel ile 12 saatlik borlama işleminde bile numune yüzeyinde borür tabakasının oluşmadığı anlaşılmıştır. Bu durum XRD grafikleri, mikroyapı ve SEM görüntüleriyle desteklenmektedir. Borür tabakalarının oluşmaması gerekli süre ve sıcaklığın olmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. MA işlemi yapılmamış jel kullanılan numunelerde borür tabakası elde etmenin mümkün olmadığı sıcaklık ve sürelerde, MA ön işlemi yapılmış jelle borür tabakasının elde edilebilmesi MA işleminin difüzyona katkı sağladığının kanıtı olarak gösterilebilir. MA işlemi yapılmış jel ile borür tabakası oluşturmanın bu şartlarda mümkün olduğu ortaya konulmuşken, MA yapılmamış jelle 12 saat borlama yapıldığında bile borür tabakasının oluşmaması, bu deney şartlarının numune yüzeyinden bor difüzyonu için hala yetersiz olduğu anlamına gelmektedir.

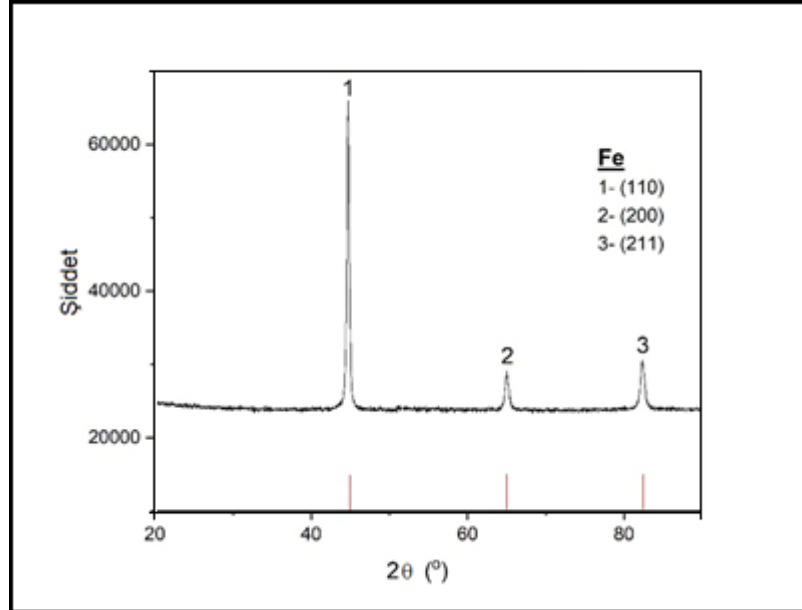
MA işlemi yapılmamış jel kullanılarak, 700 °C ‘de 3 saat borlama ısıtma işlemi yapılmış 0M70-3 kodlu numuneye ait mikroyapı Şekil 5.30. ‘da verilmiştir. Bu şartlar altında yüzeyde oluşması beklenen borür tabakasına rastlanılmadığı mikroyapı görüntüsünden teyit edilmiştir.

Mikroyapı görüntüsünün üst kısmında, siyah bölge içerisindeki bulanık kısım, parçanın yanal yüzeyinin flu bir görüntüsüdür. Yüzey üzerinde oluşmuş bir yapı değildir.



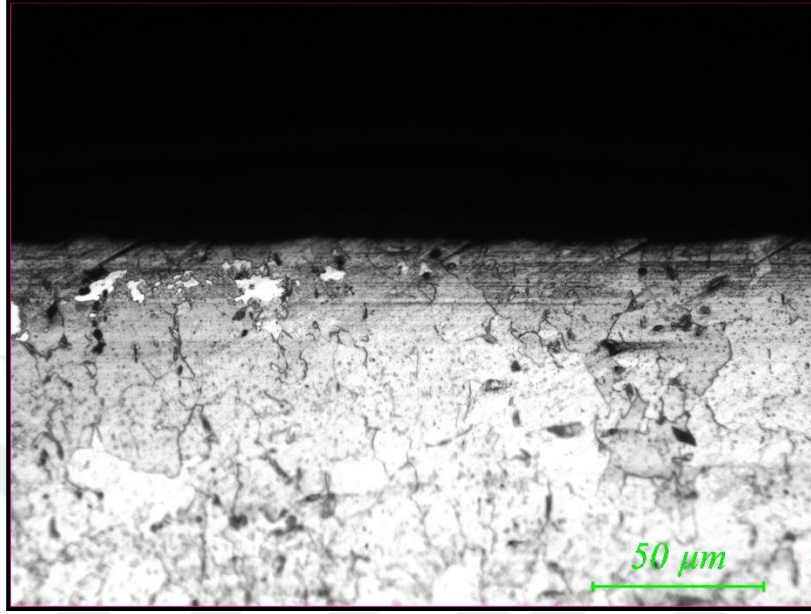
Şekil 5.30. 0M70-3 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (500x).

Şekil 5.31. 'de 0M70-3 kodlu numunenin XRD analiz sonucu verilmiştir. Grafikte Fe elementine ait pikler tespit edilmiştir. Yapıda herhangi bir borür oluşumuna XRD analizi sonucunda da rastlanılamamıştır. MA işlemi yapılmadan, 700 °C ve 3 saat borlama şartları altında numune yüzeyinde borür tabakasının oluşturulmadığı sonucuna varılmıştır.



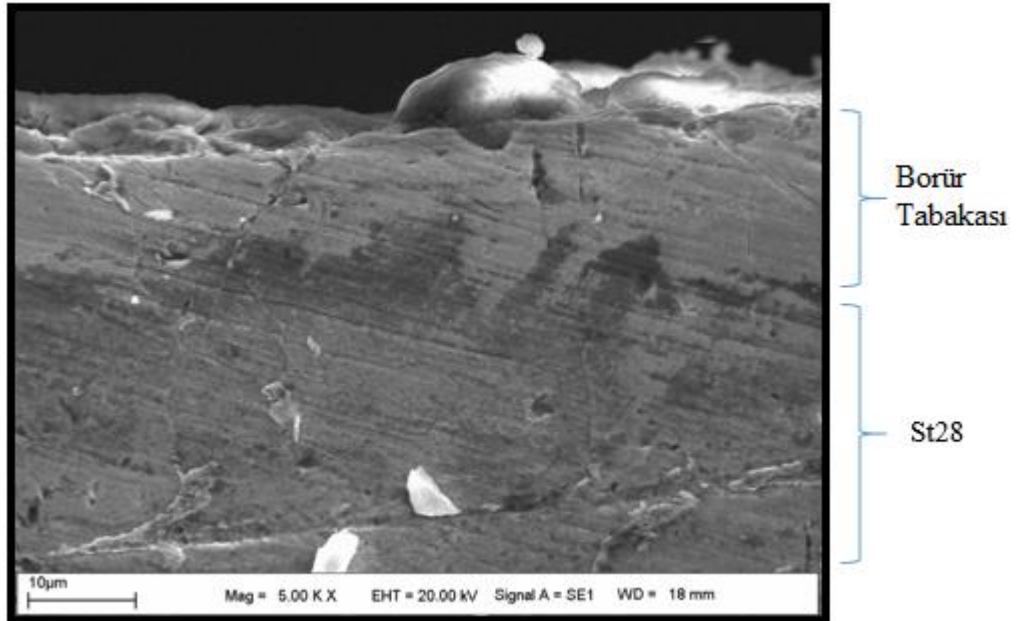
Şekil 5.31. 0M70-3 kodlu numuneye ait XRD grafiği.

10 saat MA işlemi sonucunda elde edilen jel kullanılarak, 3 saat 700°C 'da borlama yapılmış 10M70-3 kodlu numuneye ait mikroyapı Şekil 5.32. 'de verilmiştir. Bu şartlar altında yüzeyde oluşması beklenen borür yapılarının adacıklar halinde oluştuğu şekilde görülmektedir.



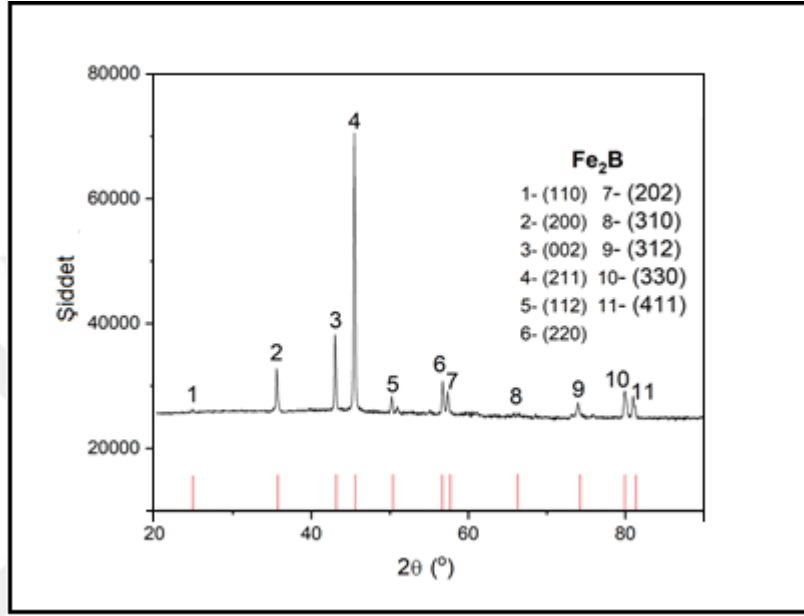
Şekil 5.32. 10M70-3 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (500x).

Şekil 5.33. 'de 10M70-3 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü verilmiştir. Numune yüzeyine ait mikroyapı görüntüsünde olduğu gibi ince borür tabakasına rastlanılmıştır.



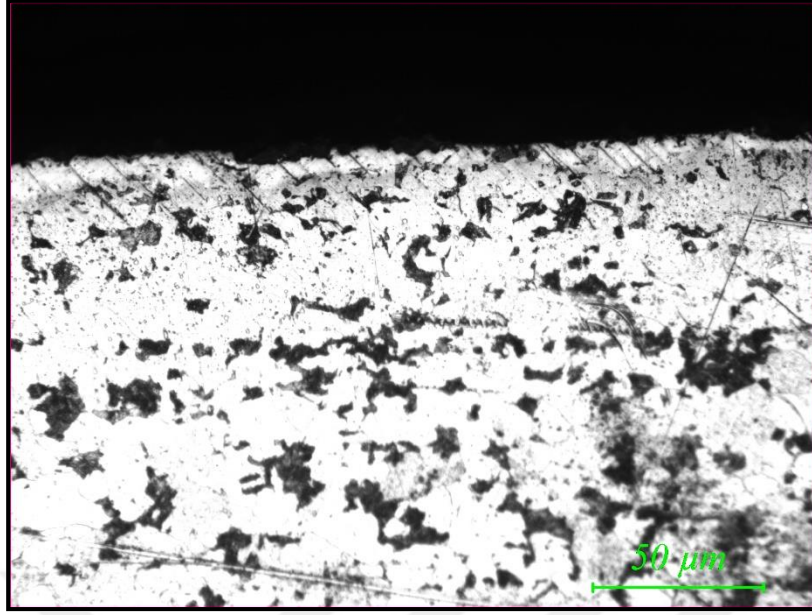
Şekil 5.33. 10M70-3 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.

Şekil 5.34. 'de 10M70-3 kodlu numunenin XRD analiz sonucu verilmiştir. Grafiğe bakıldığında numune üzerindeki piklerin sadece Fe_2B bileşiğine ait olduğu saptanmıştır. XRD incelemesiyle borun yapıya difüze olduğu ve yüzeyde Fe_2B tabakasının oluştuğu tespit edilmiştir. 10 saat MA işlemi yapılarak, 700 °C ve 3 saat işlem şartları altında numune yüzeyinde borür tabakasının oluşturulduğu sonucuna varılmıştır.



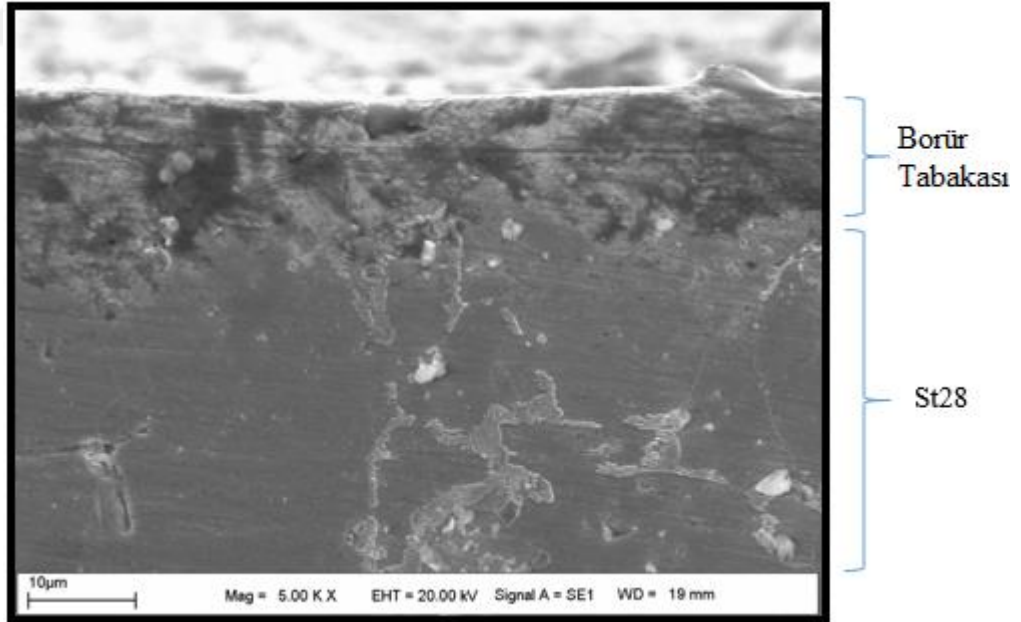
Şekil 5.34. 10M70-3 kodlu numuneye ait XRD grafiği.

20 saat MA işlemi sonucunda elde edilen jel kullanılarak, 3 saat 700°C 'da borlama yapılmış 20M70-3 kodlu numuneye ait mikroyapı Şekil 5.35. 'de verilmiştir. Bu şartlar altında yüzeyde oluşması beklenen borür yapılarının ince tabaka halinde oluştuğu anlaşılmaktadır.



Şekil 5.35. 20M70-3 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (500x).

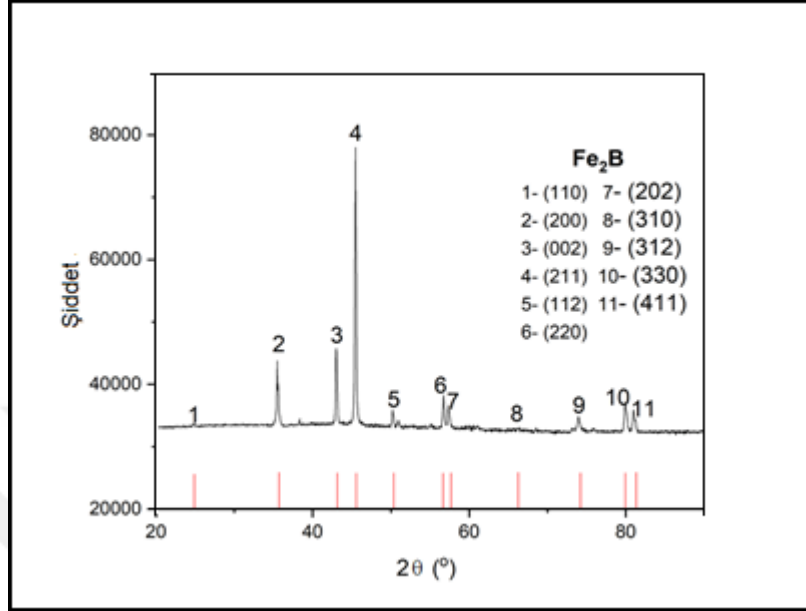
Şekil 5.36. 'da 20M70-3 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü verilmiştir. Numune yüzeyine ait mikroyapı görüntüsünde de olduğu gibi, borür tabakasına rastlanılmıştır.



Şekil 5.36. 20M70-3 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.

Şekil 5.37. 'de 20M70-3 kodlu numunenin XRD analiz sonucu verilmiştir. Grafiğe bakıldığında numune üzerindeki piklerin sadece Fe_2B bileşiğine ait olduğu saptanmıştır. XRD incelemesiyle borun yapıya difüze olduğu ve yüzeyde Fe_2B tabakasının oluştuğu tespit edilmiştir.

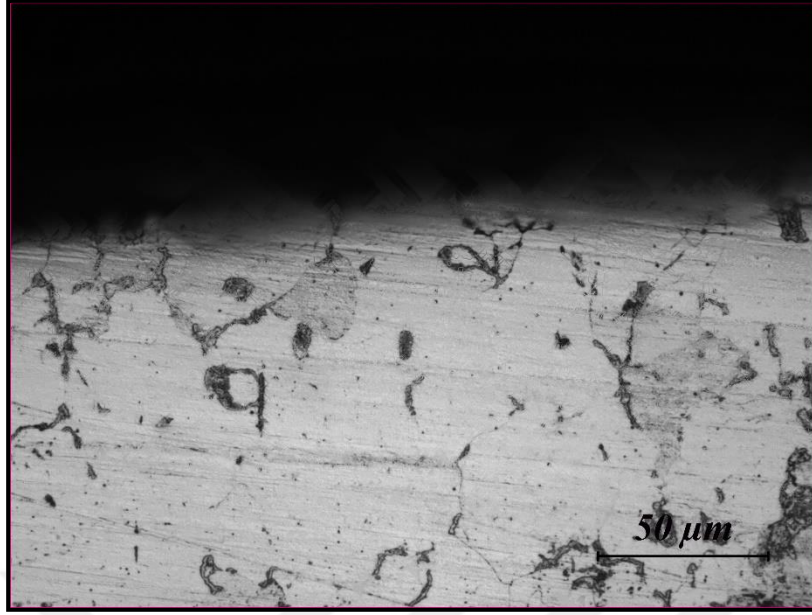
20 saat MA işlemi yapılarak, 700 °C ve 3 saat işlem şartları altında numune yüzeyinde borür tabakasının oluşturulduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 5.37. 20M70-3 kodlu numuneye ait XRD grafiği.

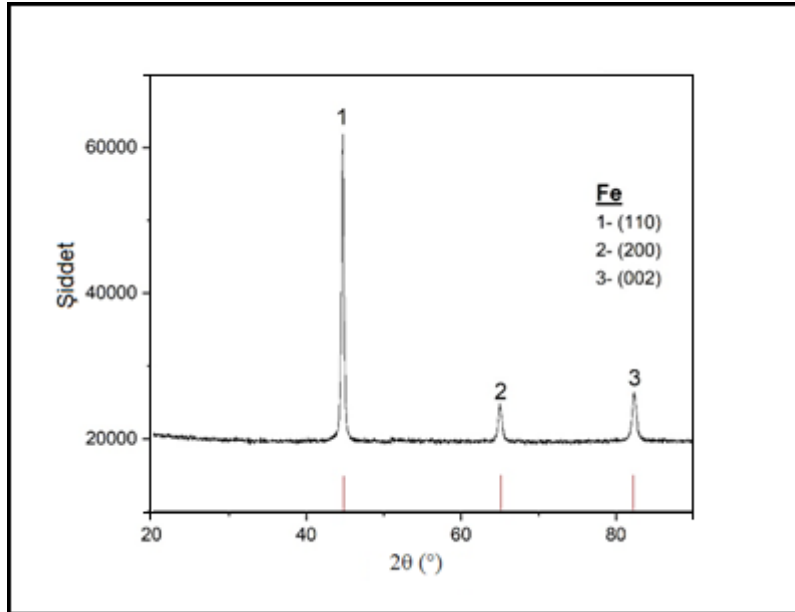
MA işlemi yapılmamış jel kullanılarak 700°C 'de 3 saat borlama yapılan numune yüzeyinde borür tabakası oluşmadığı XRD (Şekil 5.31.) grafiğinden anlaşılmaktadır. MA işlemi yapılmış jel kullanıldığında ise hem XRD (Şekil 5.34. ve 5.37.), hem mikroyapı (Şekil 5.32. ve 5.35.) hem de SEM (Şekil 5.33. ve 5.36.) görüntülerinde borür varlığı saptanmıştır. 700 °C borlama işlem sıcaklığı, 3 saat ısıtılma süresi şartlarında MA işlemi uygulanan jelle üretilen numunelerin yüzeylerinde 650 °C ve aynı şartlarda üretilenlere göre borür tabaka kalınlıklarının arttığı mikroyapı ve SEM görüntülerinden ölçülmüştür. MA işlemi yapılmamış jel kullanarak yapılan deneylerde, 650 °C 'den biraz yüksek bir sıcaklık olmasına rağmen 700°C 'da difüzyon için uygun bir sıcaklık olmadığı anlaşılmıştır.

MA işlemi yapılmamış jel kullanılarak, 700 °C 'de 6 saat borlama ısıtılma işlemi yapılmış 0M70-6 kodlu numuneye ait mikroyapı Şekil 5.38. 'de verilmiştir. Bu şartlar altında yüzeyde oluşması beklenen borür tabakasının oluşmadığı anlaşılmaktadır.



Şekil 5.38. 0M70-6 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (500x).

Şekil 5.39. 'da 0M70-6 kodlu numunenin XRD analiz sonucu verilmiştir. Grafikte Fe elementine ait pikler tespit edilmiştir. Yapıda herhangi bir borür oluşumuna XRD analizi sonucunda da rastlanılamamıştır. MA işlemi yapılmadan, 700 °C ve 6 saat işlem şartları altında numune yüzeyinde borür tabakasının oluşturulmadığı sonucuna varılmıştır.



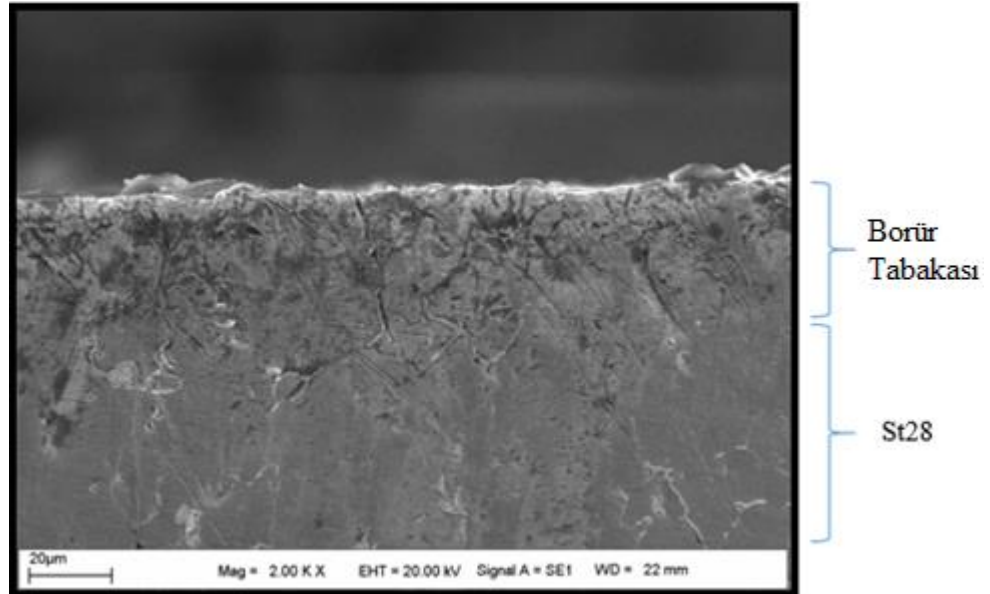
Şekil 5.39. 0M70-6 kodlu numuneye ait XRD grafiği.

10 saat MA işlemi sonucu elde edilen jel kullanılarak, 6 saat 700°C 'da borlama yapılmış 10M70-6 kodlu numuneye ait mikroyapı Şekil 5.40. 'da verilmiştir. Bu şartlar altında oluşması beklenen borür tabakasının ince bir tabaka halinde oluştuğu şekilde görülmektedir.



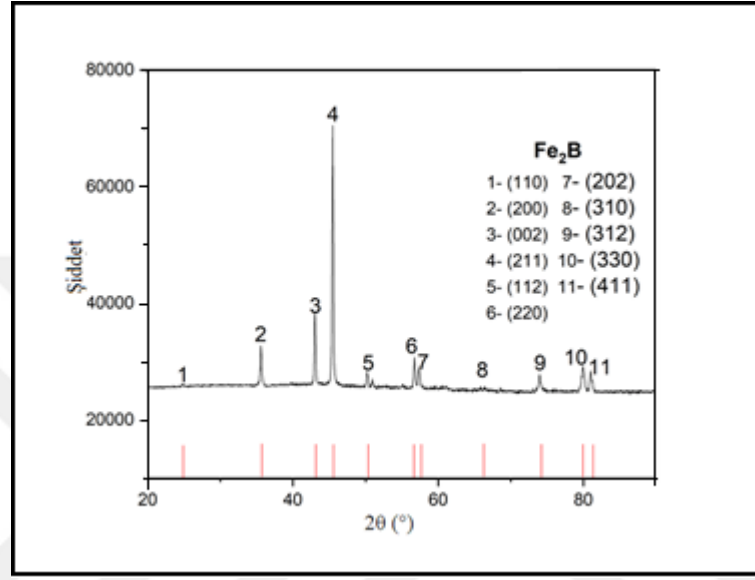
Şekil 5.40. 10M70-6 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (500x).

Şekil 5.41. 'de 10M70-6 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü verilmiştir. Numuneye ait mikroyapı görüntüsünde de olduğu gibi, yüzeyde borür tabakası oluştuğu teyit edilmiştir.



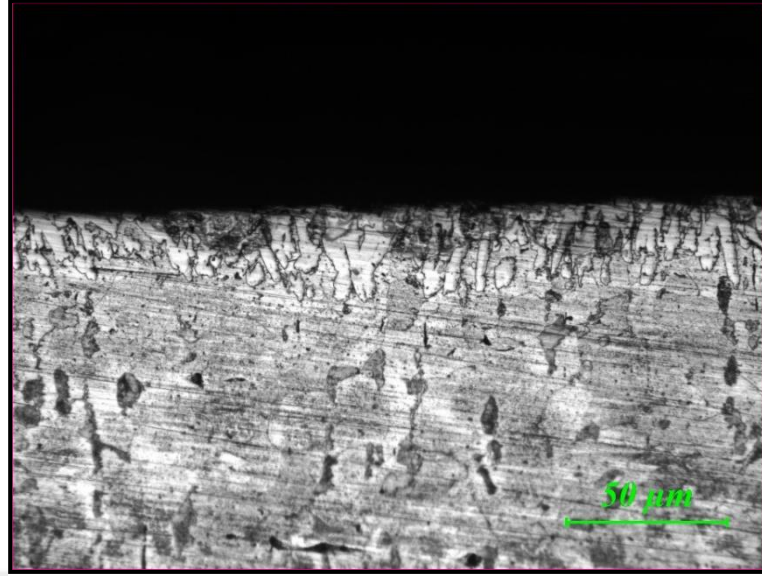
Şekil 5.41. 10M70-6 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.

Şekil 5.42. 'de 10M70-6 kodlu numunenin XRD analiz sonucu verilmiştir. Grafiğe bakıldığında numune üzerindeki piklerin sadece Fe_2B bileşiğine ait olduğu saptanmıştır. XRD incelemesiyle borun yapıya difüze olduğu ve yüzeyde Fe_2B tabakasının oluştuğu tespit edilmiştir. 10 saat MA işlemi yapılarak, 700 °C ve 6 saat işlem şartları altında numune yüzeyinde borür tabakasının oluşturulduğu sonucuna varılmıştır.



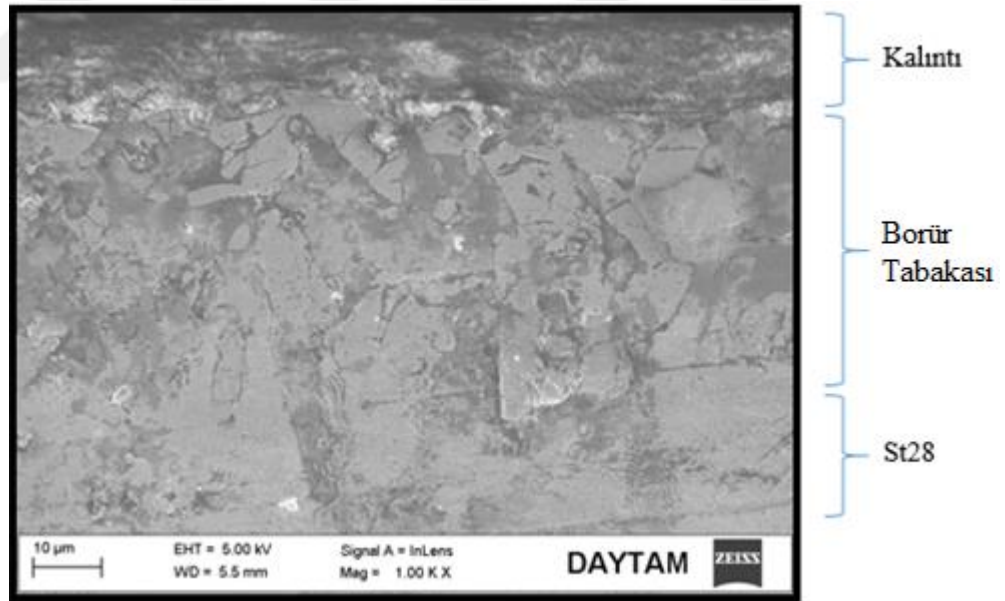
Şekil 5.42. 10M70-6 kodlu numuneye ait XRD grafiği.

20 saat MA işlemi sonucu elde edilen jel kullanılarak, 6 saat 700°C 'da borlama yapılmış 20M70-6 kodlu numuneye ait mikroyapı Şekil 5.43. 'de verilmiştir. Bu şartlar atında oluşması beklenen borür tabakasının karakteristik testere dişi şekilleri belirgin olarak görülmektedir.



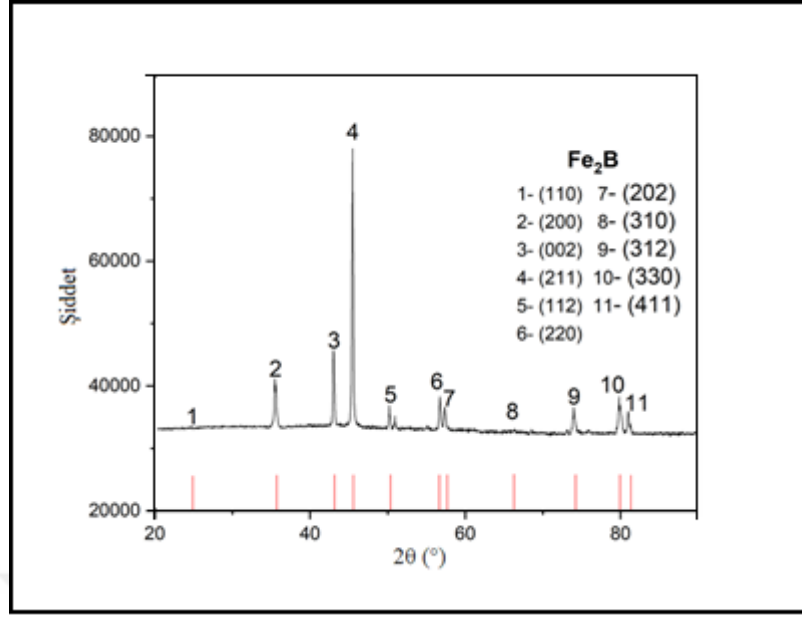
Şekil 5.43. 20M70-6 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (500x).

Şekil 5.44. 'de 20M70-6 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü verilmiştir. Numuneye ait mikroyapı görüntüsünde de olduğu gibi, yüzeyde borür tabakası oluşumu belirlenmiştir.



Şekil 5.44.20M70-6 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.

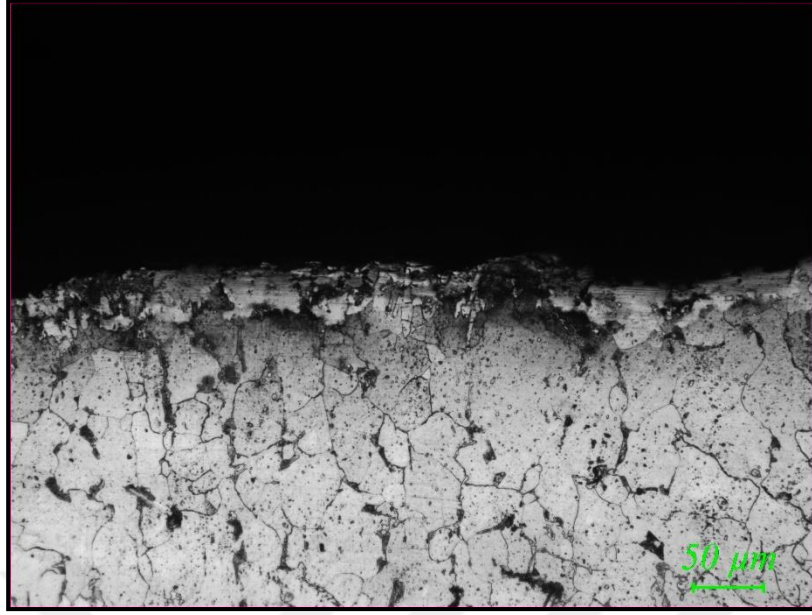
Şekil 5.45. 'de 20M70-6 kodlu numunenin XRD analiz sonucu verilmiştir. Grafiğe bakıldığında numune üzerindeki piklerin sadece Fe_2B bileşiğine ait olduğu saptanmıştır. XRD incelemesiyle borun yapıya difüze olduğu ve yüzeyde Fe_2B tabakasının oluştuğu tespit edilmiştir. 20 saat MA işlemi yapılarak, 700 °C ve 6 saat işlem şartları altında numune yüzeyinde borür tabakasının oluşturulduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 5.45. 20M70-6 kodlu numuneye ait XRD grafiği.

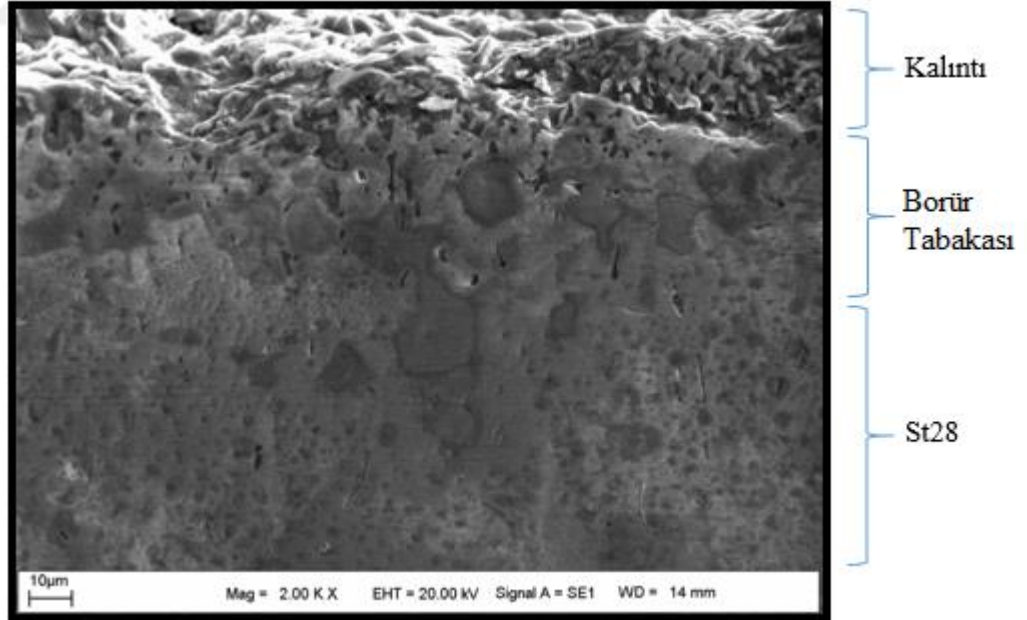
700 °C ‘de 6 saat borlama yapılan numuneler 650 °C ‘de borlama yapılan numunelerle benzer karakteristik göstermektedir. MA işlemi yapılmamış jelin kullanımı ile üretilen numunelerde borun alt malzemeye difüze olmadığı, difüzyon için gerekli ve yeterli şartların oluşmadığı görülmektedir. Buna rağmen MA işlemi yapılmış tozlarda bu durum tam tersinedir. MA işlemi neticesinde aynı sıcaklık ve sürede numunelerin yüzeyinde borür tabakaları hem XRD, hem mikroyapı hem de SEM görüntülerinde görülmektedir. MA işleminin, difüzyon mekanizmasını olumlu yönde etkilediği anlaşılmaktadır.

MA işlemi yapılmamış jel kullanılarak, 700 °C ‘de 12 saat borlama ısıtma işlemi yapılmış 0M70-12 kodlu numuneye ait mikroyapı Şekil 5.46. ‘da verilmiştir. MA işlemi yapılmamış jel kullanılarak borlama yapılan numunelerde yüzeyde ilk defa borür tabakası oluştuğu ancak bu tabakanın bir öncekiler gibi testere dişi morfolojisinde olmadığı görülmüştür. Bu durum, çekirdeklenme için gerekli koşulların mevcut fakat tabaka büyümesi için ise mevcut olmadığı düşünülmektedir.



Şekil 5.46. 0M70-12 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (200x).

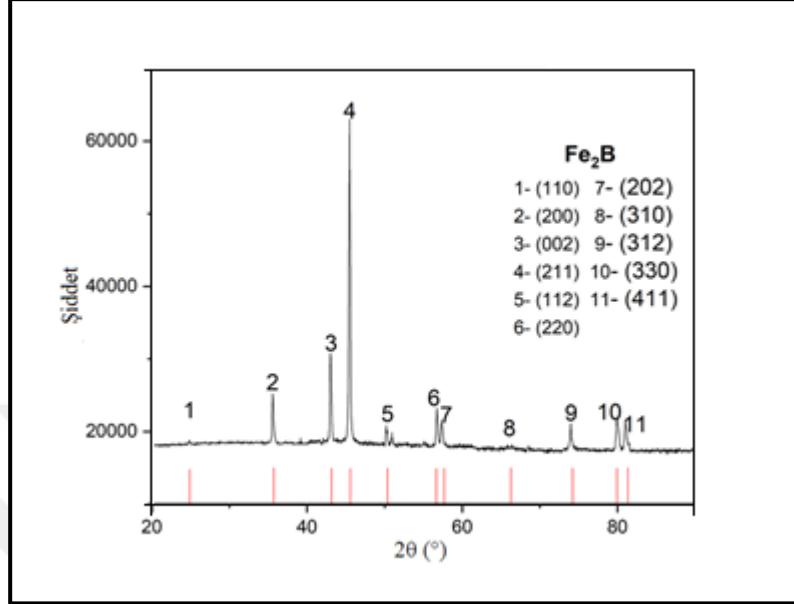
Şekil 5.47. 'de 0M70-12 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü verilmiştir. Numuneye ait mikroyapı görüntüsünde de olduğu gibi, yüzeyde borür tabakası gözlenmiştir.



Şekil 5.47. 0M70-12 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.

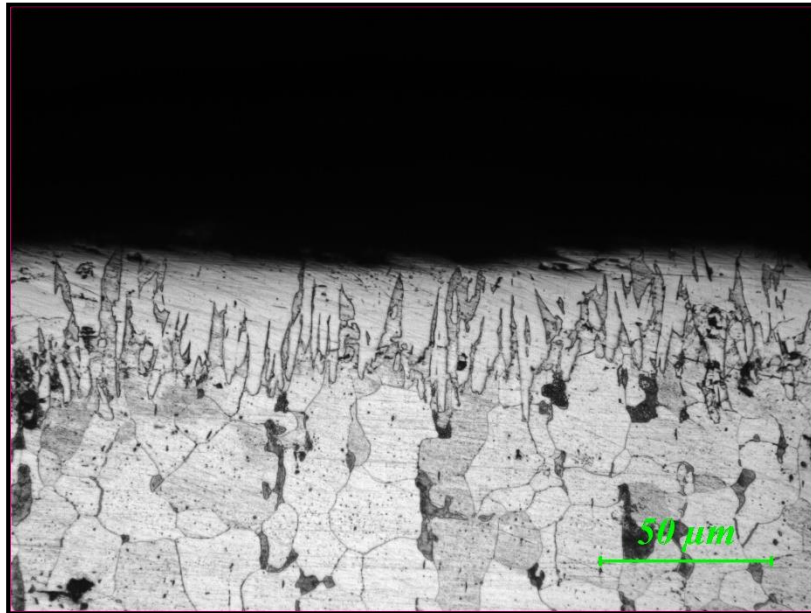
Şekil 5.48. 'de 0M70-12 kodlu numunenin XRD analiz sonucu verilmiştir. Grafiğe bakıldığında numune üzerindeki piklerin sadece Fe_2B bileşiğine ait olduğu saptanmıştır. XRD incelemesiyle borun yapıya difüze olduğu ve yüzeyde Fe_2B tabakasının oluştuğu tespit edilmiştir.

MA işlemi yapılmadan, 700 °C ve 12 saat işlem şartları altında numune yüzeyinde borür tabakasının oluşturulduğu sonucuna varılmıştır.



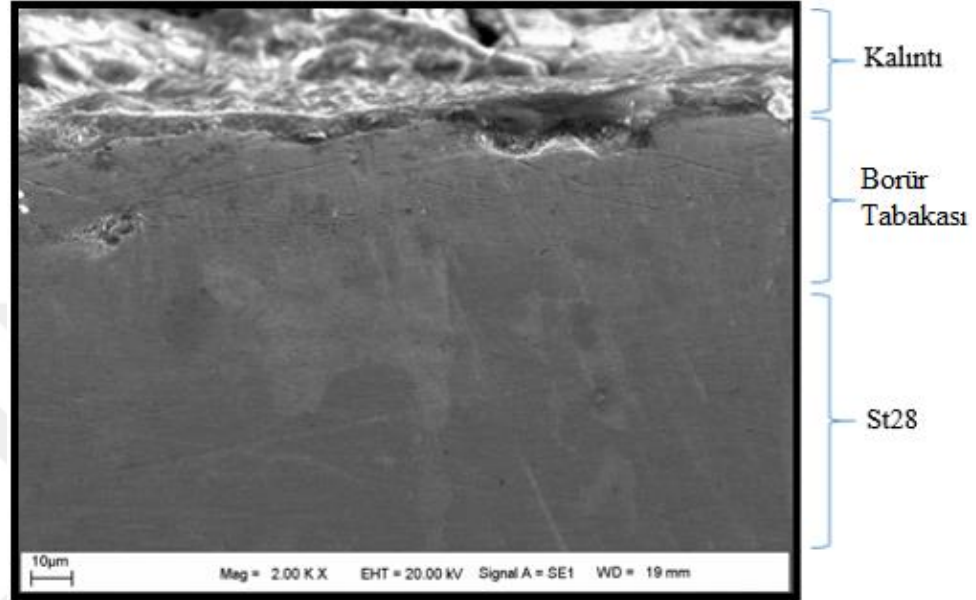
Şekil 5.48. 0M70-12 kodlu numuneye ait XRD grafiği.

10 saat MA işlemi sonucu elde edilen jel kullanılarak, 12 saat 700°C ‘da borlama yapılmış 10M70-12 kodlu numuneye ait mikroyapı Şekil 5.49. ‘da verilmiştir. Bu şartlar altında oluşması beklenen borür tabakasının karakteristik testere dişi morfolojisine sahip olduğu anlaşılmaktadır.



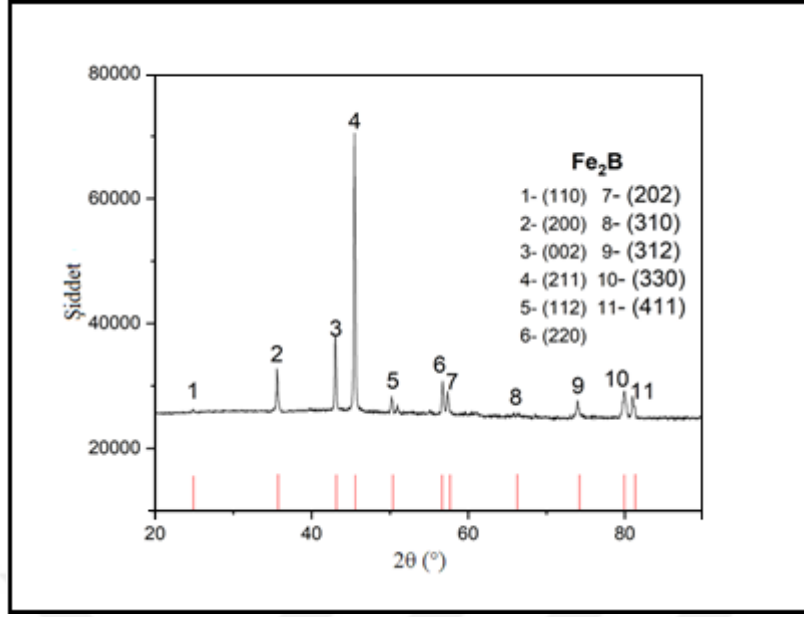
Şekil 5.49. 10M70-12 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (500x).

Şekil 5.50. ‘de 10M70-12 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü verilmiştir. Numuneye ait mikroyapı görüntüsünde de olduğu gibi, yüzeyde borür tabakası oluşumu belirlenmiştir. Mikroyapı resimlerinde olduğu gibi SEM görüntülerinde de testere dişli borürler ile alt malzeme St28 ‘in ferrit fazları çok benzer renk tonuna sahiptir.



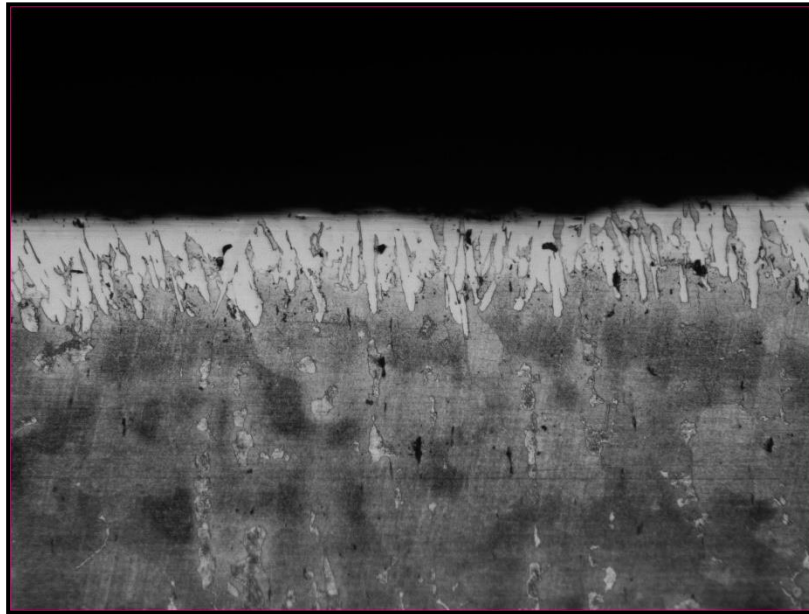
Şekil 5.50. 10M70-12 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.

Şekil 5.51. ‘de 10M70-12 kodlu numunenin XRD analiz sonucu verilmiştir. Grafiğe bakıldığında numune üzerindeki piklerin sadece Fe_2B bileşiğine ait olduğu saptanmıştır. XRD incelemesiyle borun yapıya difüze olduğu ve yüzeyde Fe_2B tabakasının oluştuğu tespit edilmiştir. 10 saat MA işlemi yapılarak, 700 °C ‘de 12 saat borlama şartları altında numune yüzeyinde borür tabakasının oluşturulduğu sonucuna varılmıştır.



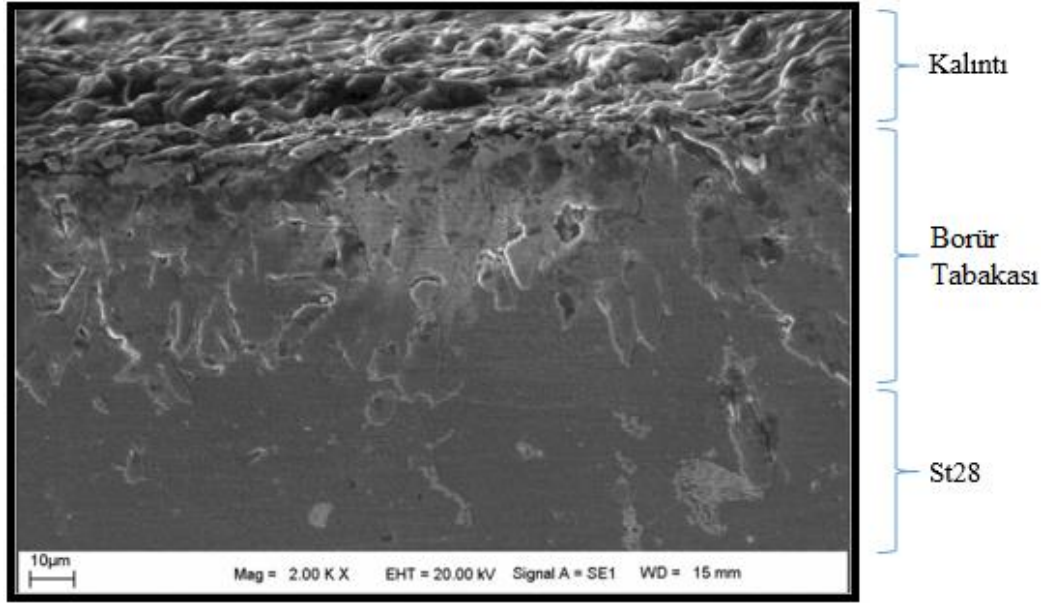
Şekil 5.51. 10M70-12 kodlu numuneye ait XRD grafiği.

20 saat MA işlemi sonucu elde edilen jel kullanılarak, 12 saat 700°C 'da borlama yapılmış 20M70-12 kodlu numuneye ait mikroyapı Şekil 5.52. 'de verilmiştir. Bu şartlar altında oluşması beklenen borür tabakasının karakteristik testere dişi şeklinde olduğu şekilde görülmektedir.



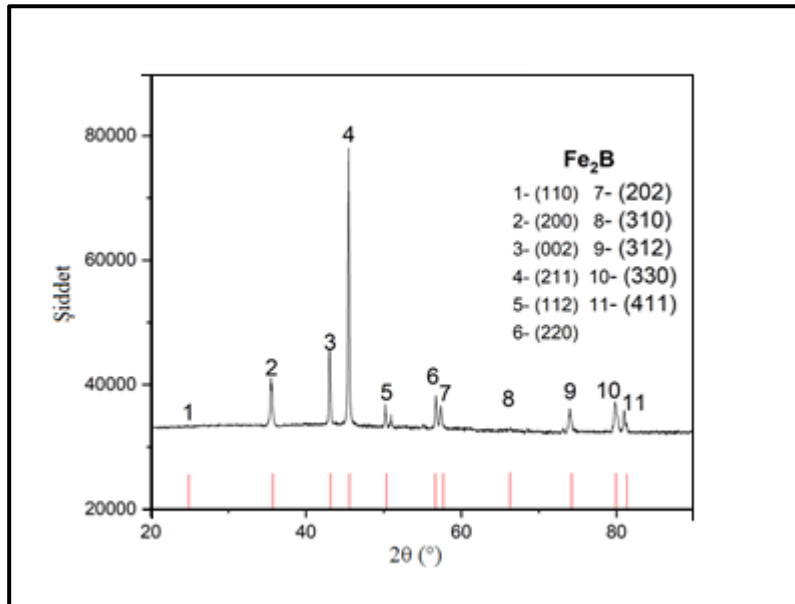
Şekil 5.52. 20M70-12 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (200x).

Şekil 5.53. 'de 20M70-12 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü verilmiştir. Numuneye ait mikroyapı görüntüsünde olduğu gibi, yüzeyde borür tabakasının varlığı resimden anlaşılmaktadır.



Şekil 5.53. 20M70-12 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.

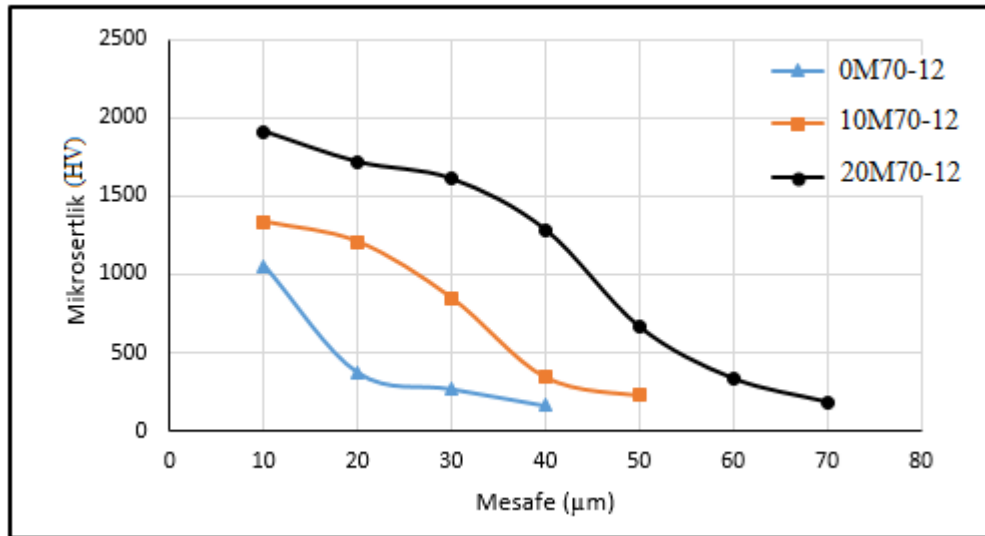
Şekil 5.54. 'de 20M70-12 kodlu numunenin XRD analiz sonucu verilmiştir. Grafiğe bakıldığında numune üzerindeki piklerin sadece Fe_2B bileşiğine ait olduğu saptanmıştır. XRD incelemesiyle borun yapıya difüze olduğu ve yüzeyde Fe_2B tabakasının oluştuğu tespit edilmiştir. 20 saat MA işlemi yapılarak, 700 °C 'de 12 saat borlama şartları altında numune yüzeyinde borür tabakasının oluşturulduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 5.54. 20M70-12 kodlu numuneye ait XRD grafiği.

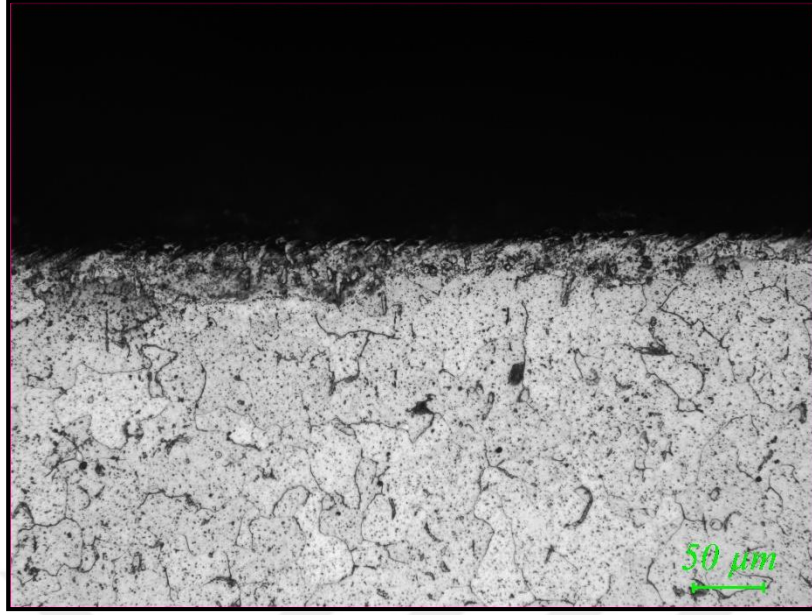
700 °C ‘de 12 saat borlanan numunelerle, aynı sıcaklıkta 6 saat borlanan numuneler arasında önemli bir fark bulunmaktadır. MA işlemi yapılmamış tozlarla üretilen numunelerde ilk borür tabakası 0M70-12 ‘de görülmüştür. MA işlemi yapılmadan elementel Bor ‘un alt malzemeye difüzyonu için asgari şartların 700 °C ve 12 saat olarak tespit edilmesi bu çalışmada MA işlemi yapılmadan borlama işleminin sağlanabildiği konusunda referans noktasını oluşturmuştur. Tablo 5.3. incelendiğinde 0M70-12 ile 20M70-6 ‘da benzer kalınlıkların elde edildiği görülmektedir. Bu sonuca göre; tozlara MA işleminin uygulanmasıyla borlama süresi azaltılabilir. Borür tabakasının testere dişi şeklinde morfolojiye sahip olması, tabaka yüzey alanının artması sebebiyle tabakanın ana matrise tutunmasının daha iyi olacağı anlamına gelmektedir. 0M70-12 ile 10M70-12 ve 20M70-12 aynı şartlarda sadece MA işlem süreleri farkıyla üretilmiş olmasına rağmen MA işlemi hem tabaka kalınlığını hem de yüzey alanını arttırmıştır.

Şekil 5.55. ‘de 0M70-12, 10M70-12 ve 20M70-12 kodlu numunelere ait yüzeyden matrise doğru ölçülmüş Mikrosertlik-Mesafe grafiği verilmiştir. Genel olarak, yüzeyden matrise doğru gidildikçe Mikrosertlik değerlerinde azalmalar meydana gelmiştir. MA işlemi ile malzeme yüzeyinde en yüksek Mikrosertlik değeri 20 saat MA işlemi yapılmış jelle borlanan numunede 1908,4 Vickers olarak elde edilmiştir.



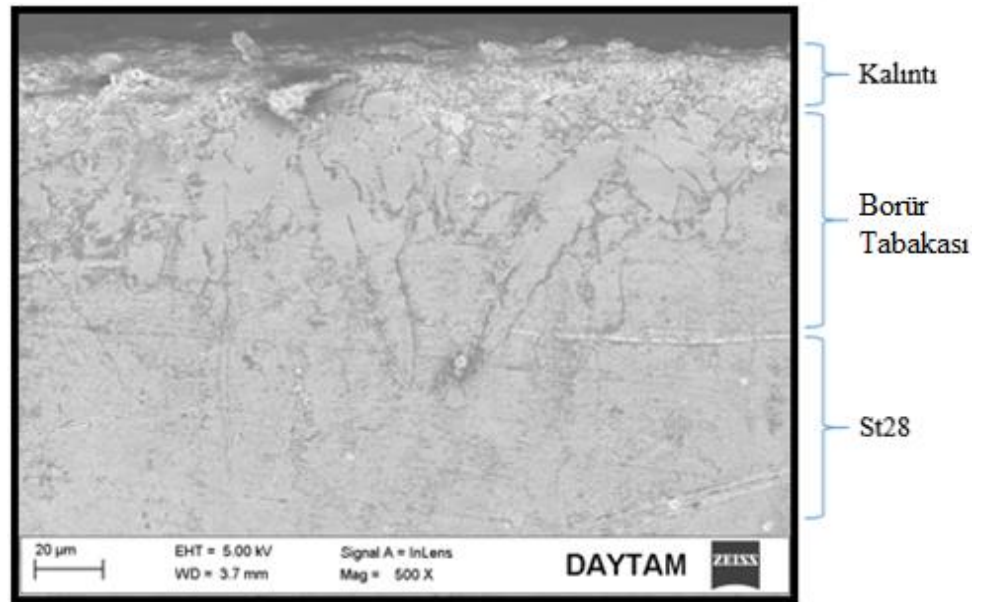
Şekil 5.55. 0M70-12, 10M70-12 ve 20M70-12 kodlu numunelere ait Mikrosertlik-Mesafe grafiği.

MA işlemi yapılmamış jel kullanılarak, 750 °C ‘de 3 saat borlama yapılmış 0M75-3 kodlu numuneye ait mikroyapı Şekil 5.56. ‘da verilmiştir. Bu şartlar altında oluşması beklenen borür tabakasının homojen olmayan kalınlık dağılımıyla oluştuğu şekilden anlaşılmaktadır.



Şekil 5.56. 0M75-3 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (200x).

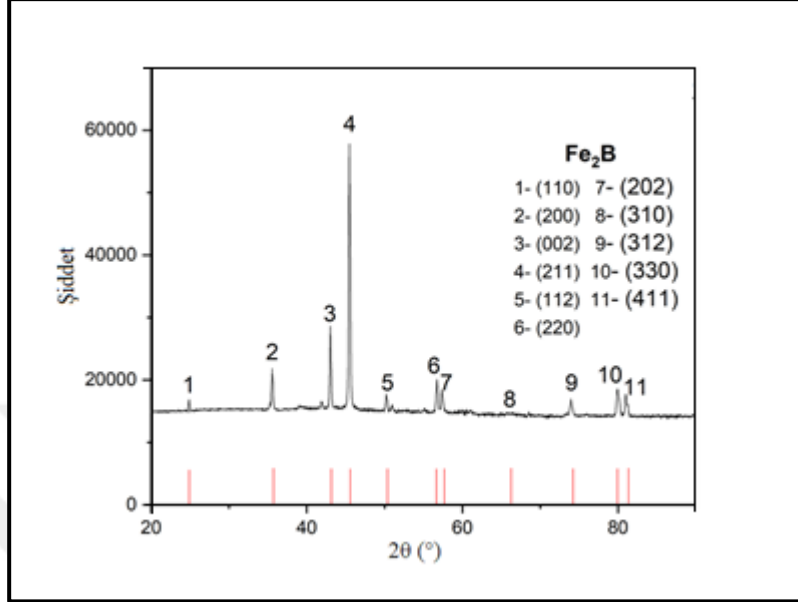
Şekil 5.57. 'de 0M75-3 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü verilmiştir. Numuneye ait mikroyapı görüntüsünde de olduğu gibi, yüzeyde testere dişi morfolojisindeki borür tabakasına rastlanılmıştır.



Şekil 5.57. 0M75-3 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.

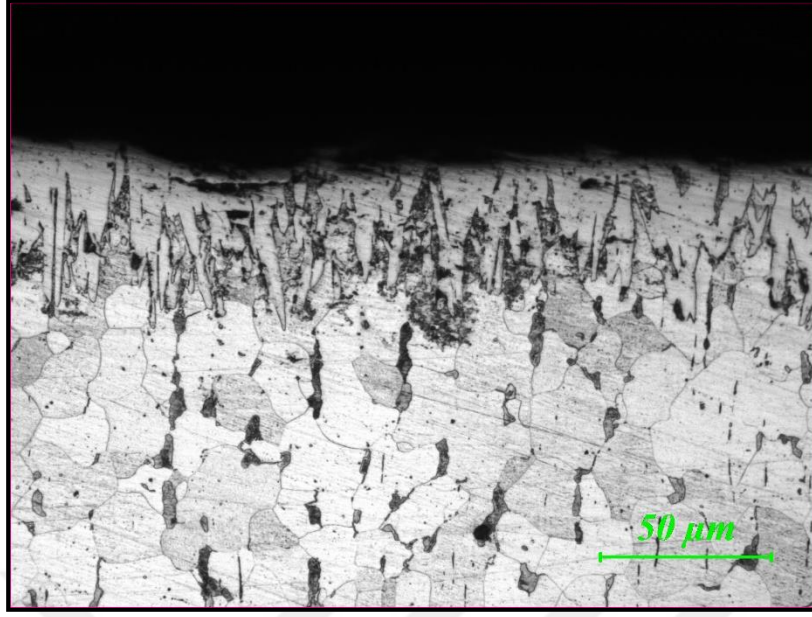
Şekil 5.58. 'de 0M75-3 kodlu numunenin XRD analiz sonucu verilmiştir. Grafiğe bakıldığında numune üzerindeki piklerin sadece Fe_2B bileşiğine ait olduğu saptanmıştır. XRD incelemesiyle borun yapıya difüze olduğu ve yüzeyde Fe_2B tabakasının oluştuğu tespit edilmiştir.

MA işlemi yapılmadan, 750 °C ‘de 3 saat işlem şartları altında numune yüzeyinde borür tabakasının oluşturulduğu sonucuna varılmıştır.



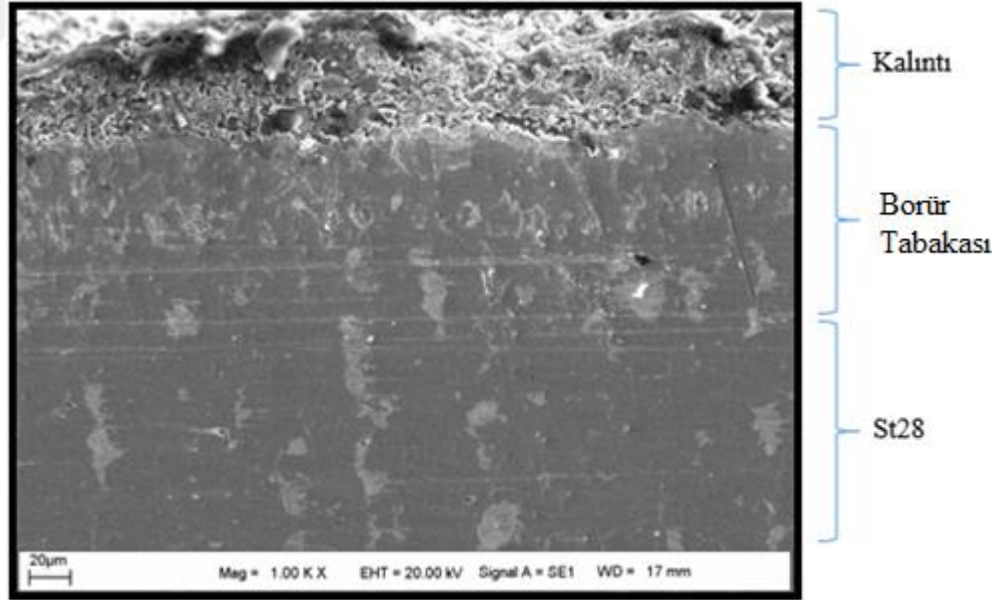
Şekil 5.58. 0M75-3 kodlu numuneye ait XRD grafiği.

10 saat MA işlemi sonucu elde edilen jel kullanılarak, 3 saat 750 °C ‘de borlama yapılmış 10M75-3 kodlu numuneye ait mikroyapı Şekil 5.59. ‘da verilmiştir. Bu şartlar altında oluşması beklenen borür tabakasının karakteristik testere dişi morfolojisinde olduğu belirgin bir şekilde görüntülenmiştir.



Şekil 5.59. 10M75-3 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (500x).

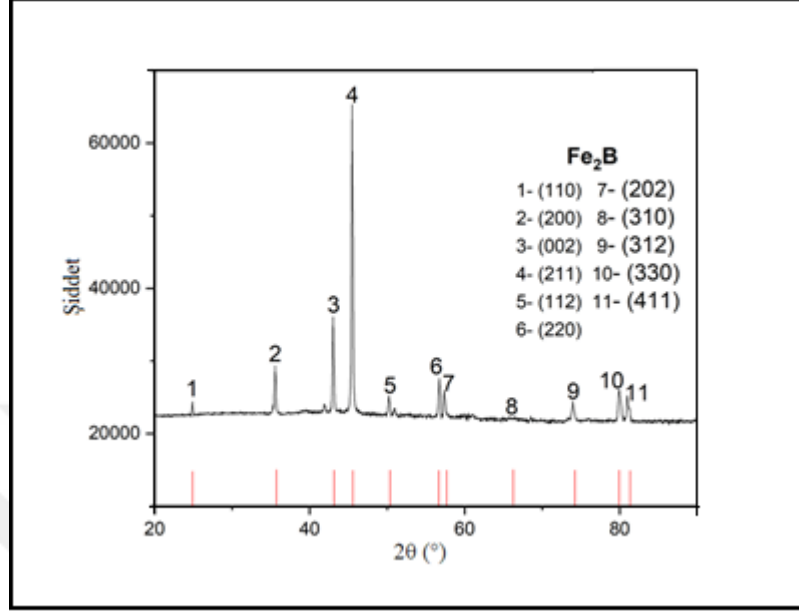
Şekil 5.60. 'da 10M75-3 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü verilmiştir. Numuneye ait mikroyapı görüntüsünde olduğu gibi, yüzeyde borür tabakası gözlenmiştir.



Şekil 5.60. 10M75-3 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.

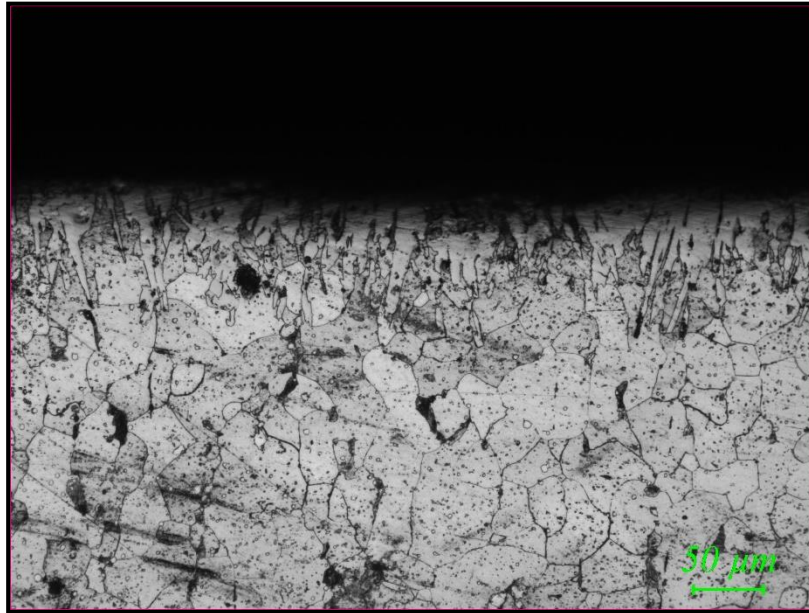
Şekil 5.61. 'de 10M75-3 kodlu numunenin XRD analiz sonucu verilmiştir. Grafiğe bakıldığında numune üzerindeki piklerin sadece Fe_2B bileşiğine ait olduğu saptanmıştır. XRD incelemesiyle borun yapıya difüze olduğu ve yüzeyde Fe_2B tabakasının oluştuğu tespit edilmiştir.

10 saat MA işlemi sonrası elde edilen tozlarla üretilen jel ile 750 °C ‘de 3 saat borlanmış numunede; borür tabakasının oluştuğu optik analizlerle tespit edilmiş ve bu sonuç XRD ile de teyit edilmiştir.



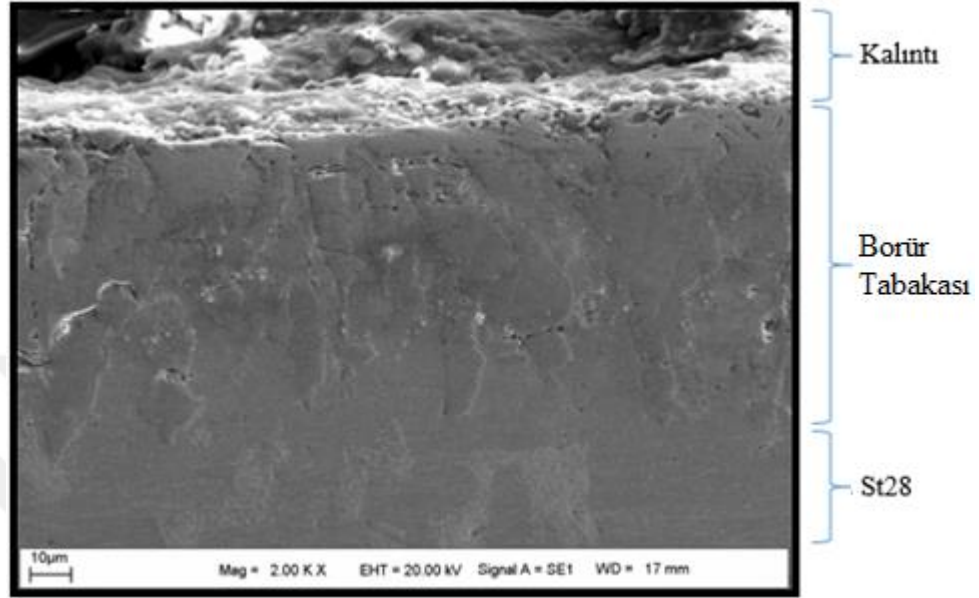
Şekil 5.61. 10M75-3 kodlu numuneye ait XRD grafiği.

20 saat MA işlemi sonucu elde edilen jel kullanılarak, 3 saat 750°C ‘da borlama yapılmış 20M75-3 kodlu numuneye ait mikroyapı Şekil 5.62. ‘de verilmiştir. Bu şartlar altında oluşması beklenen borür tabakasının karakteristik testere dişi morfolojisinde oluştuğu belirlenmiştir.



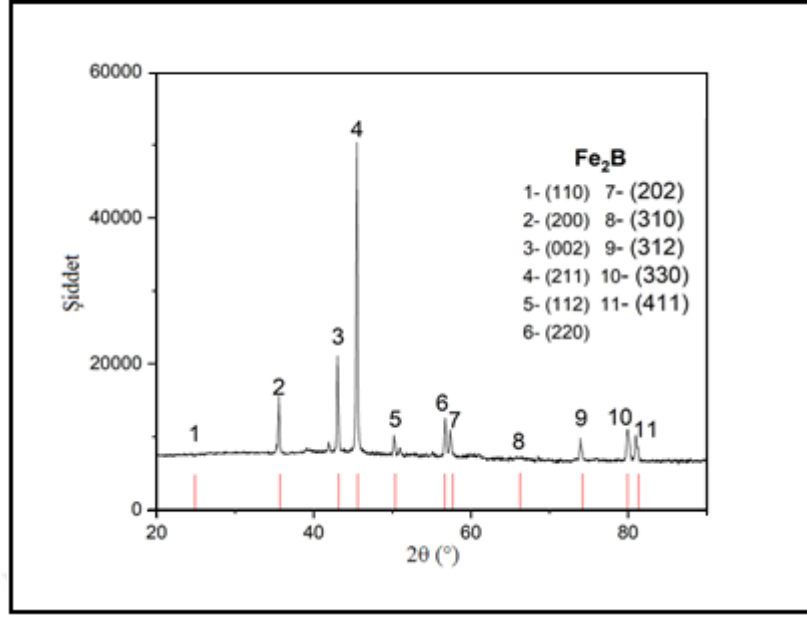
Şekil 5.62. 20M75-3 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (200x).

Şekil 5.63. 'de 20M75-3 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü verilmiştir. Numuneye ait mikroyapı görüntüsünde de olduğu gibi, yüzeyde borür tabakası testere dişi morfolojisinde oluştuğu teyit edilmiştir.



Şekil 5.63. 20M75-3 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.

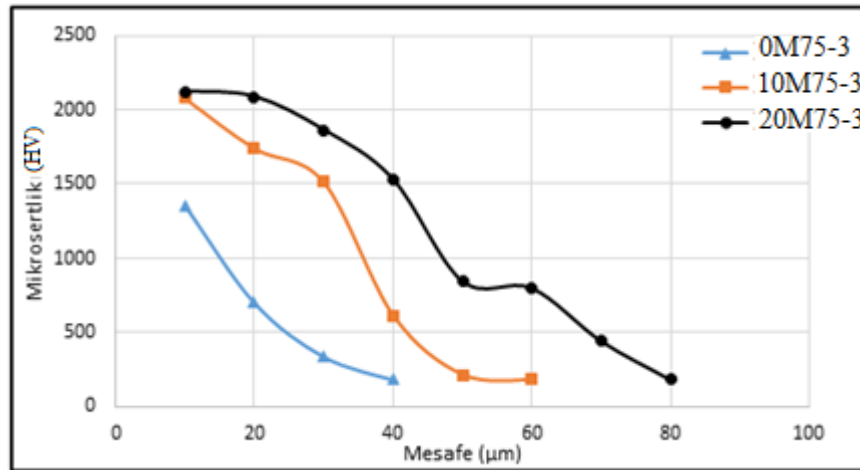
Şekil 5.64. 'de 20M75-3 kodlu numunenin XRD analiz sonucu verilmiştir. Grafiğe bakıldığında numune üzerindeki piklerin sadece Fe_2B bileşiğine ait olduğu saptanmıştır. XRD incelemesiyle borun yapıya difüze olduğu ve yüzeyde Fe_2B tabakasının oluştuğu tespit edilmiştir. 20 saat MA işlemi yapılarak, 750 °C 'de 3 saat işlem şartları altında numune yüzeyinde borür tabakasının oluşturulduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 5.64. 20M75-3 kodlu numuneye ait XRD grafiği.

750 °C ‘de yapılan ısıt işlemler neticesinde yüzeyde oluşan borür tabakası belirgin bir şekilde ortaya çıkmıştır. Borür yapıların, testere dişi morfolojisinde yüzeyden içeriye doğru büyüdükleri görülmektedir. Tabaka kalınlıkları, MA işlemi yapılmamış jel ile borlanan numunede en düşük, 20 saat MA işlemi yapılmış jelle borlanan numunede ise en yüksek değerdedir.

Şekil 5.65. ‘de 0M75-3, 10M75-3 ve 20M75-3 kodlu numunelere ait yüzeyden matrise doğru ölçülmüş Mikrosertlik-Mesafe grafiği verilmiştir. Genel olarak, yüzeyden matrise doğru gidildikçe Mikrosertlik değerlerinde azalmalar meydana gelmiştir. MA işlemi ile malzeme yüzeyinde en yüksek Mikrosertlik değeri 20 saat MA işlemi yapılmış numune yüzeyinde 2123 Vickers elde edilmiştir.



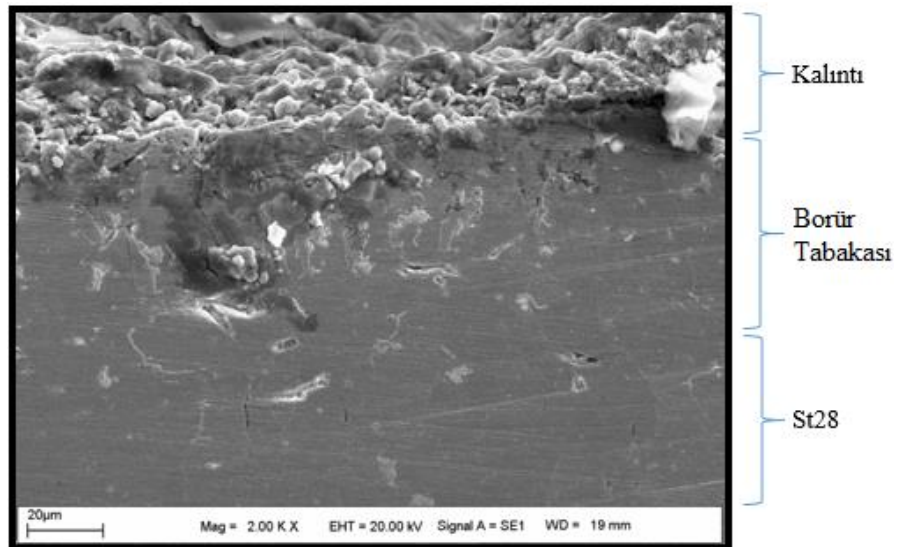
Şekil 5.65. 0M75-3, 10M75-3 ve 20M75-3 kodlu numunelere ait Mikrosertlik-Mesafe grafiği.

MA işlemi yapılmamış jel kullanılarak, 750 °C ‘de 6 saat borlama ısıt işlemi yapılmış 0M75-6 kodlu numuneye ait mikroyapı Şekil 5.66. ‘da verilmiştir. Bu şartlar altında oluşması beklenen borür tabakasının homojen olmayan (heterojen) kalınlıkta ve testere dişi morfolojisinde oluştuğu görülmektedir.



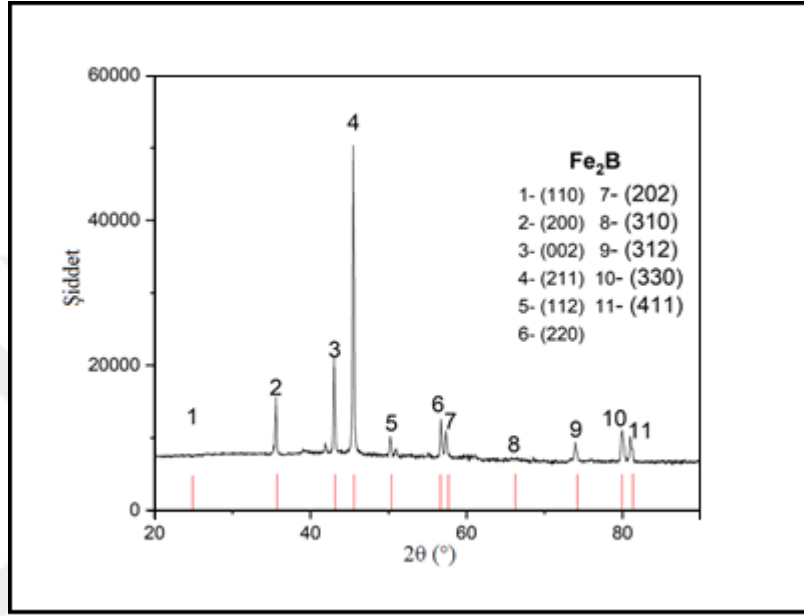
Şekil 5.66. 0M75-6 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (200x).

Şekil 5.67. ‘de 0M75-6 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü verilmiştir. Numuneye ait mikroyapı görüntüsünde olduğu gibi, yüzeyde borür tabakası gözlenmiştir.



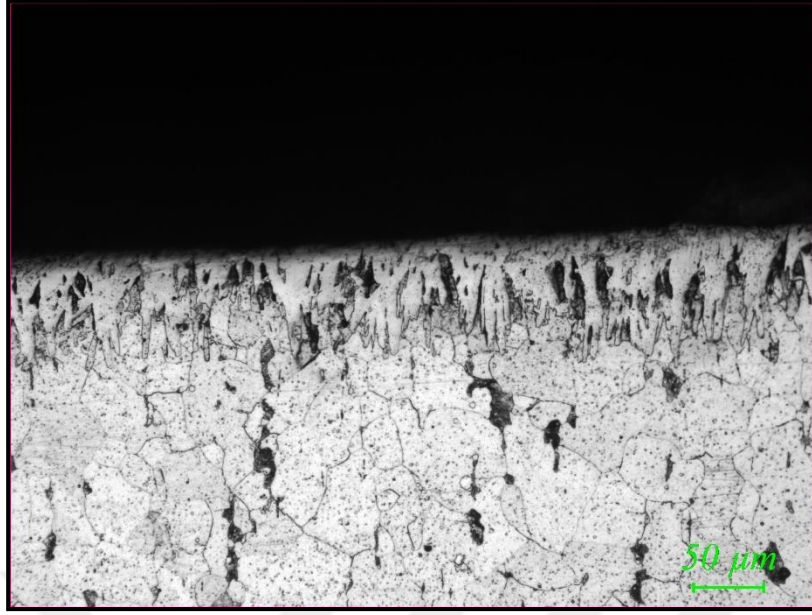
Şekil 5.67. 0M75-6 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.

Şekil 5.68. 'de 0M75-6 kodlu numunenin XRD analiz sonucu verilmiştir. Grafiğe bakıldığında numune üzerindeki piklerin sadece Fe_2B bileşiğine ait olduğu saptanmıştır. XRD incelemesiyle borun yapıya difüze olduğu ve yüzeyde Fe_2B tabakasının oluştuğu tespit edilmiştir. MA işlemi yapılmadan, 750 °C 'de 6 saat borlama şartları altında numune yüzeyinde borür tabakasının oluşturulduğu sonucuna varılmıştır.



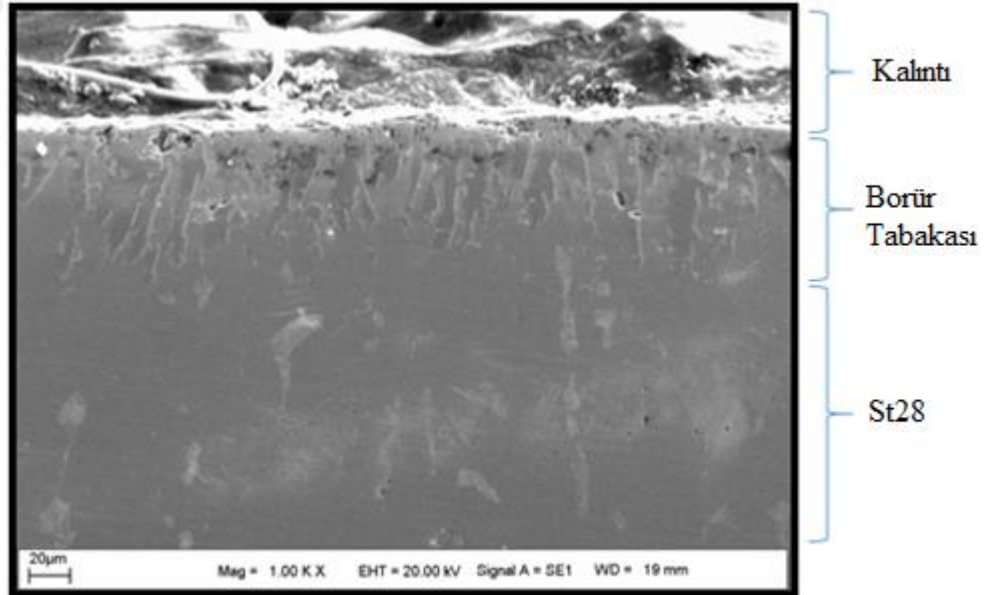
Şekil 5.68. 0M75-6 kodlu numuneye ait XRD grafiği.

10 saat MA işlemi sonucu elde edilen jel kullanılarak, 6 saat 750°C 'da borlama yapılmış 10M75-6 kodlu numuneye ait mikroyapı Şekil 5.69. 'da verilmiştir. Bu şartlar altında oluşması beklenen borür tabakasının karakteristik testere dişi şeklinde oluştuğu şekilde görüntülenmiştir.



Şekil 5.69. 10M75-6 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (200x).

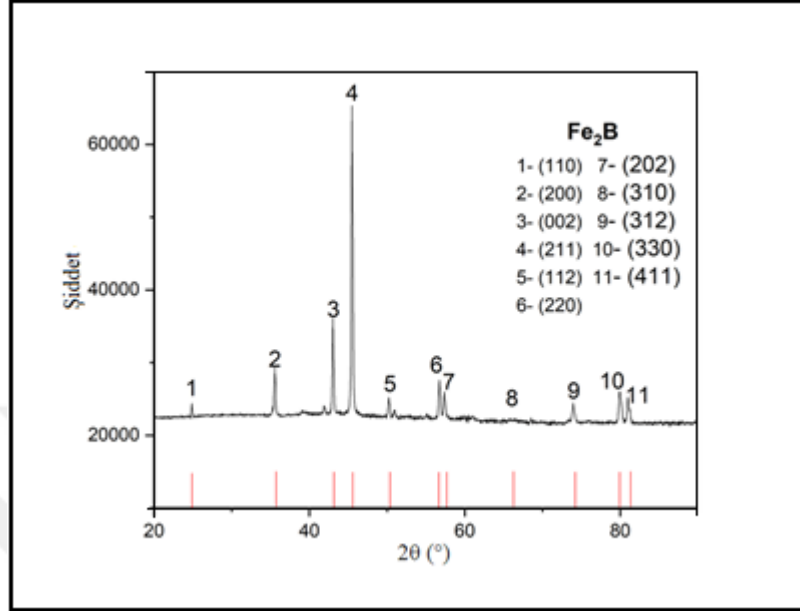
Şekil 5.70. 'de 10M75-6 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü verilmiştir. Numuneye ait mikroyapı görüntüsünde de olduğu gibi, yüzeyde oluşmuş borür tabakası teyit edilmiştir.



Şekil 5.70. 10M75-6 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.

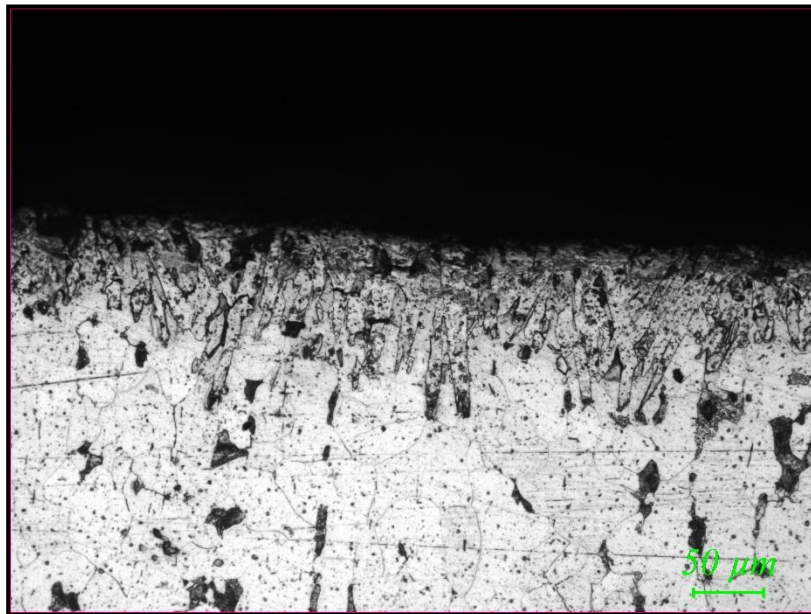
Şekil 5.71. 'de 10M75-6 kodlu numunenin XRD analiz sonucu verilmiştir. Grafiğe bakıldığında numune üzerindeki piklerin sadece Fe_2B bileşiğine ait olduğu saptanmıştır. XRD incelemesiyle borun yapıya difüze olduğu ve yüzeyde Fe_2B tabakasının oluştuğu tespit edilmiştir.

10 saat MA işlemi yapılarak, 750 °C ‘de 6 saat borlama şartları altında numune yüzeyinde borür tabakasının oluşturulduğu sonucuna varılmıştır.



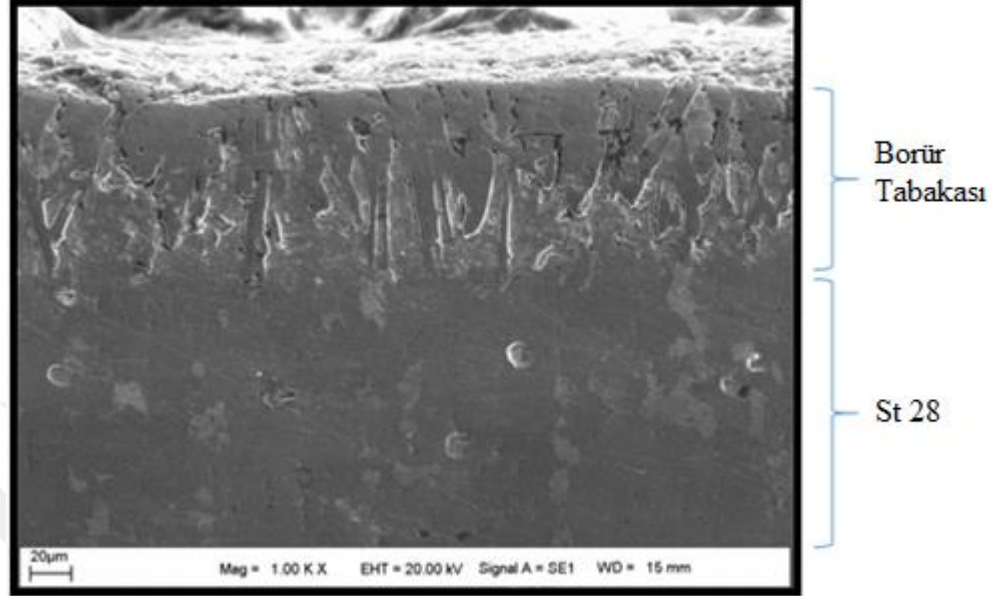
Şekil 5.71. 10M75-6 kodlu numuneye ait XRD grafiği.

20 saat MA işlemi sonucu elde edilen jel kullanılarak, 6 saat 750°C ‘da borlama yapılmış 20M75-6 kodlu numuneye ait mikroyapı Şekil 5.72. ‘de verilmiştir. Bu şartlar atında oluşması beklenen borür tabakasının karakteristik testere dişi morfolojisiyle oluştuğu anlaşılmaktadır.



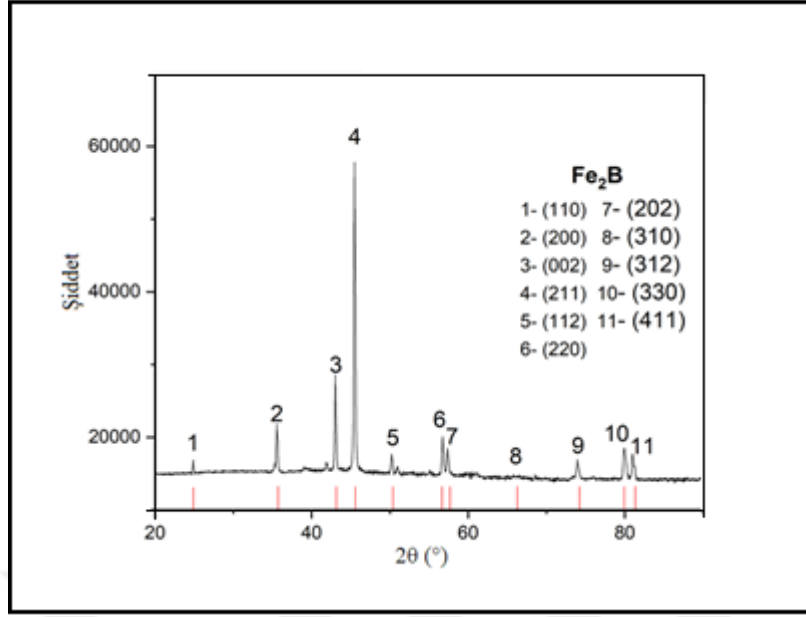
Şekil 5.72. 20M75-6 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (200x).

Şekil 5.73. 'de 20M75-6 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü verilmiştir. Numuneye ait mikroyapı görüntüsünde olduğu gibi, yüzeydeki borür tabakası belirlenmiştir.



Şekil 5.73. 20M75-6 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.

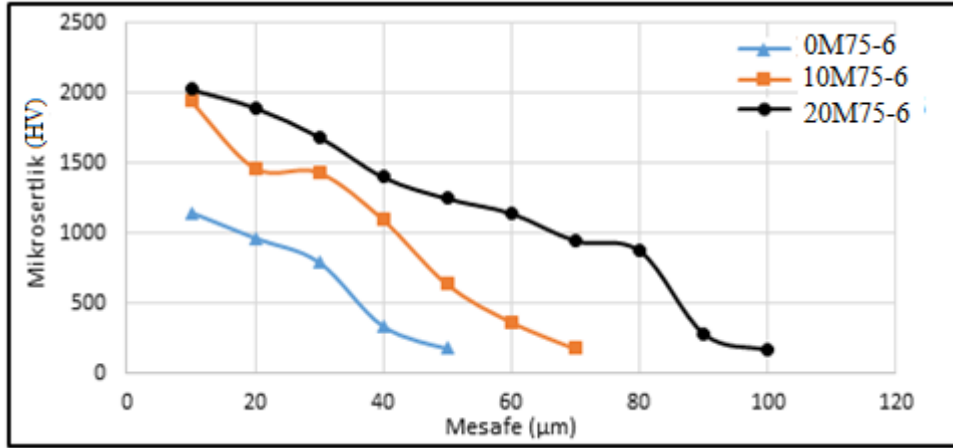
Şekil 5.74. 'de 20M75-6 kodlu numunenin XRD analiz sonucu verilmiştir. Grafiğe bakıldığında numune üzerindeki piklerin sadece Fe_2B bileşiğine ait olduğu saptanmıştır. XRD incelemesiyle borun yapıya difüze olduğu ve yüzeyde Fe_2B tabakasının oluştuğu tespit edilmiştir. 20 saat MA işlemi yapılarak, 750 °C 'de 6 saat borlama şartları altında numune yüzeyinde borür tabakası oluşturulduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 5.74. 20M75-6 kodlu numuneye ait XRD grafiği.

750°C 'da 6 saat borlanan bütün numunelerde beklenildiği gibi borür tabakaları oluşmaktadır. Tabaka kalınlıkları da yine beklenildiği gibi MA işlemi yapılmamış tozlarla borlanan numunede en düşük, 20 saat MA işlemi yapılmış jelle borlama yapılan numunede ise en yüksektir.

Şekil 5.75. 'de 0M75-6, 10M75-6 ve 20M75-6 kodlu numunelere ait yüzeyden matrise doğru ölçülmüş Mikrosertlik-Mesafe grafiği verilmiştir. Genel olarak, yüzeyden matrise doğru gidildikçe mikrosertlik değerlerinde azalmalar meydana gelmiştir. MA işlemi ile malzeme yüzeyinde en yüksek Mikrosertlik değeri 20 saat MA işlemi yapılmış numune yüzeyinde 2027,9 Vickers elde edilmiştir. 10 saat MA jeli ile borlanan numunenin en yüksek Mikrosertlik değerinin 20 saat MA jeli ile borlanan numunenin en yüksek Mikrosertlik değerine yakın değerde olduğu görülmektedir. Tabaka kalınlığının sertliği doğrudan etkilemediği, ancak sertliğin sabit aralıklarla ölçülmesinden dolayı ince tabakalı numunelerde izafi olarak daha hızlı düşeceği öngörülebilecek bir sonuç olarak söylenebilir ve bu durum ölçümlerle de gözlenmiştir.



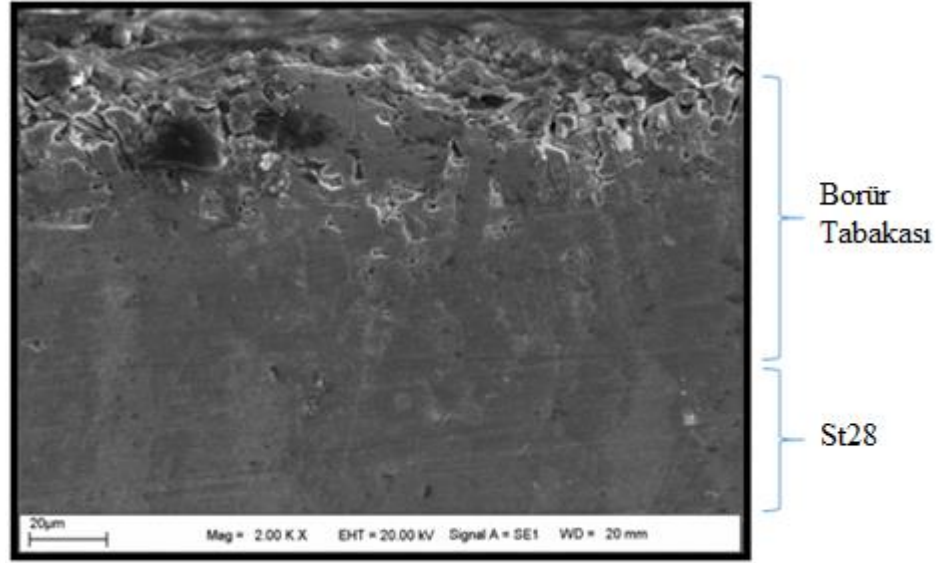
Şekil 5.75. 0M75-6, 10M75-6 ve 20M75-6 kodlu numunelere ait Mikrosertlik-Mesafe grafiği.

MA işlemi yapılmamış jel kullanılarak, 750 °C 'de 12 saat borlama ısıt işlemi yapılmış 0M75-12 kodlu numuneye ait mikroyapı Şekil 5.76. 'da verilmiştir. Bu şartlar altında oluşması beklenen borür tabakasının daha homojen bir kalınlıkta ve testere dişi morfolojisinde olduğu şekilden anlaşılmaktadır.



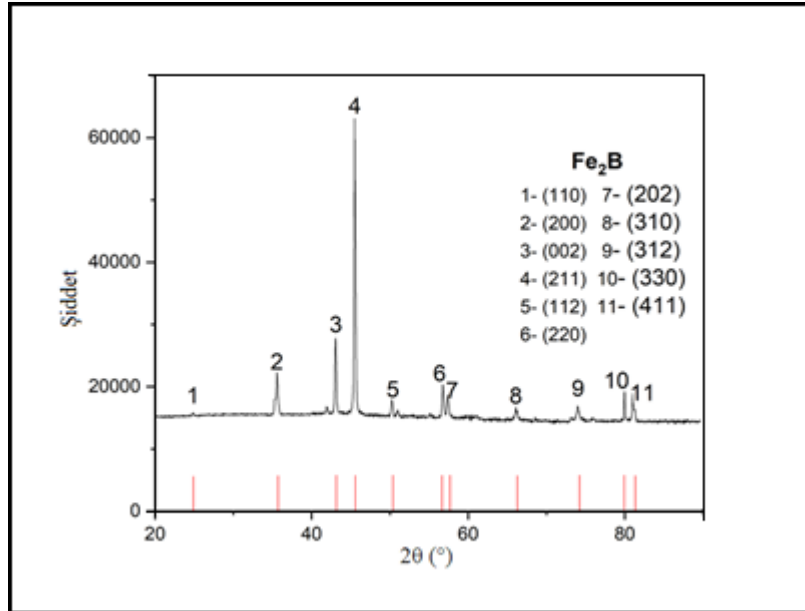
Şekil 5.76. 0M75-12 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (200x).

Şekil 5.77. 'de 0M75-12 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü verilmiştir. Numuneye ait mikroyapı görüntüsünde olduğu gibi, yüzeyde borür tabakası teyit edilmiştir.



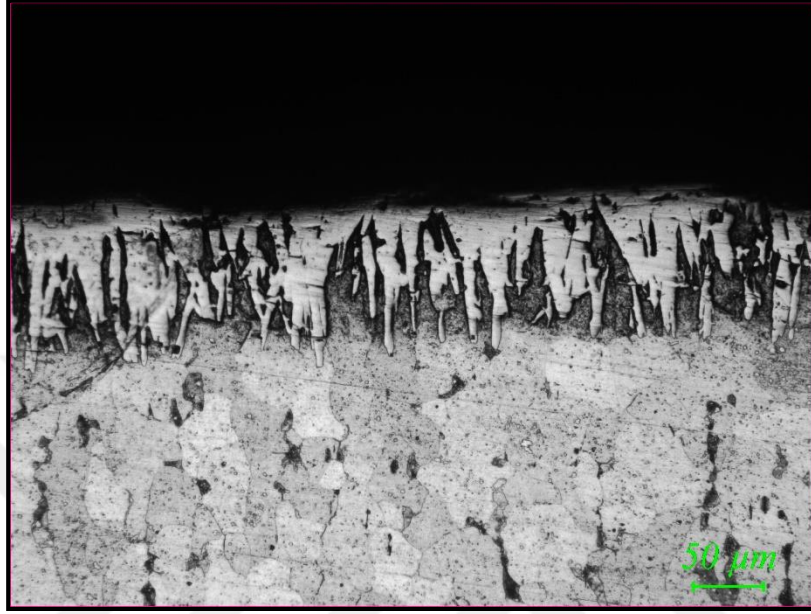
Şekil 5.77. 0M75-12 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.

Şekil 5.78. 'de 0M75-12 kodlu numunenin XRD analiz sonucu verilmiştir. Grafiğe bakıldığında numune üzerindeki piklerin sadece Fe_2B bileşiğine ait olduğu saptanmıştır. XRD incelemesiyle borun yapıya difüze olduğu ve yüzeyde Fe_2B tabakasının oluştuğu tespit edilmiştir. MA işlemi yapılmadan, 750 °C 'de 12 saat borlama şartları altında numune yüzeyinde borür tabakasının oluşturulduğu sonucuna varılmıştır.



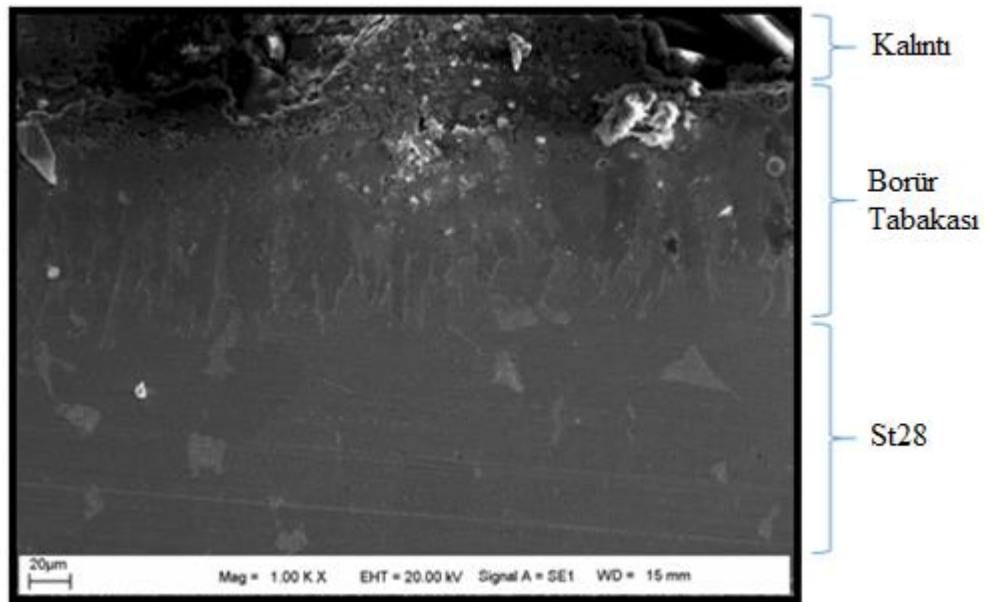
Şekil 5.78. 0M75-12 kodlu numuneye ait XRD grafiği.

10 saat MA işlemi sonucu elde edilen jel kullanılarak, 12 saat 750°C 'da borlama yapılmış 10M75-12 kodlu numuneye ait mikroyapı Şekil 5.79. 'da verilmiştir. Bu şartlar altında borür tabakası karakteristik testere dişi morfolojisinde oluşmuştur.



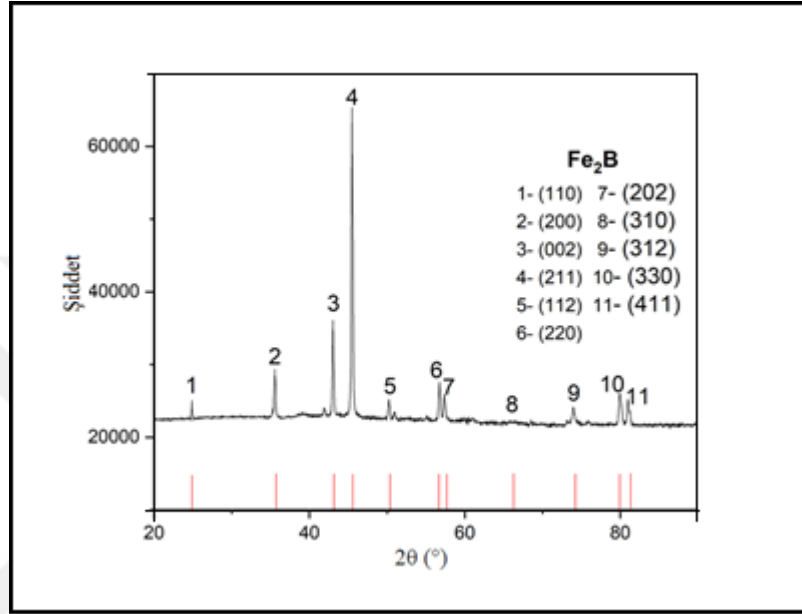
Şekil 5.79. 10M75-12 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (200x).

Şekil 5.80. 'de 10M75-12 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü verilmiştir. Numuneye ait mikroyapı görüntüsünde olduğu gibi, yüzeydeki borür tabakası kolaylıkla seçilebilmektedir.



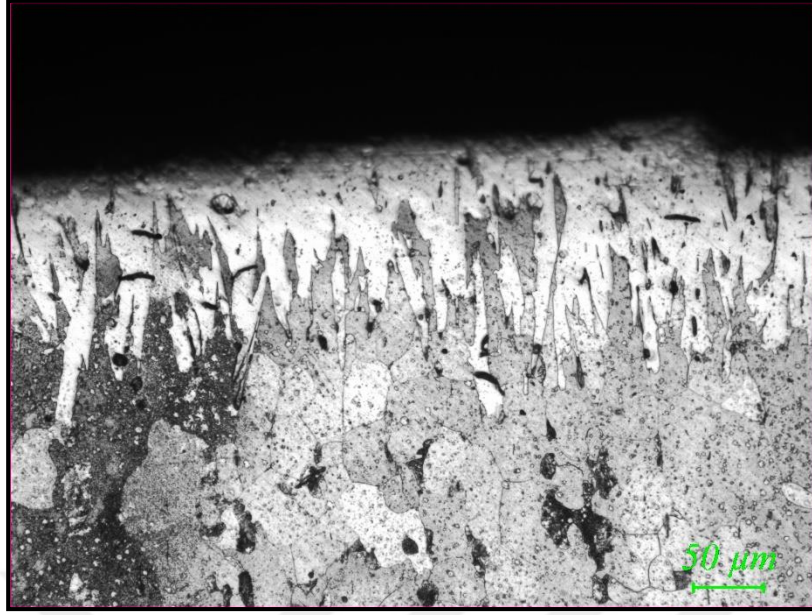
Şekil 5.80. 10M75-12 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.

Şekil 5.81. 'de 10M75-12 kodlu numunenin XRD analiz sonucu verilmiştir. Grafiğe bakıldığında numune üzerindeki piklerin sadece Fe_2B bileşiğine ait olduğu saptanmıştır. XRD incelemesiyle borun yapıya difüze olduğu ve yüzeyde Fe_2B tabakasının oluştuğu tespit edilmiştir. 10 saat MA işlemi yapılarak, 750 °C 'de 12 saat borlama şartları altında numune yüzeyinde borür tabakasının oluşturulduğu sonucuna varılmıştır.



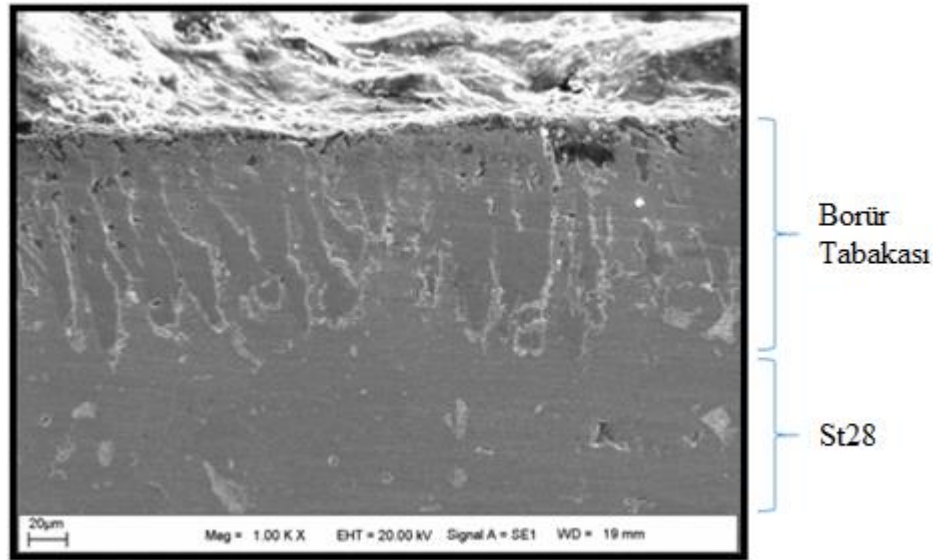
Şekil 5.81. 10M75-12 kodlu numuneye ait XRD grafiği.

20 saat MA işlemi sonucu elde edilen jel kullanılarak, 12 saat 750°C 'da borlama yapılmış 20M75-12 kodlu numuneye ait mikroyapı Şekil 5.82. 'de verilmiştir. Bu şartlar altında oluşması beklenen borür tabakasının karakteristik testere dişi morfolojisinde oluştuğu belirgin bir şekilde görülmektedir.



Şekil 5.82. 20M75-12 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (200x).

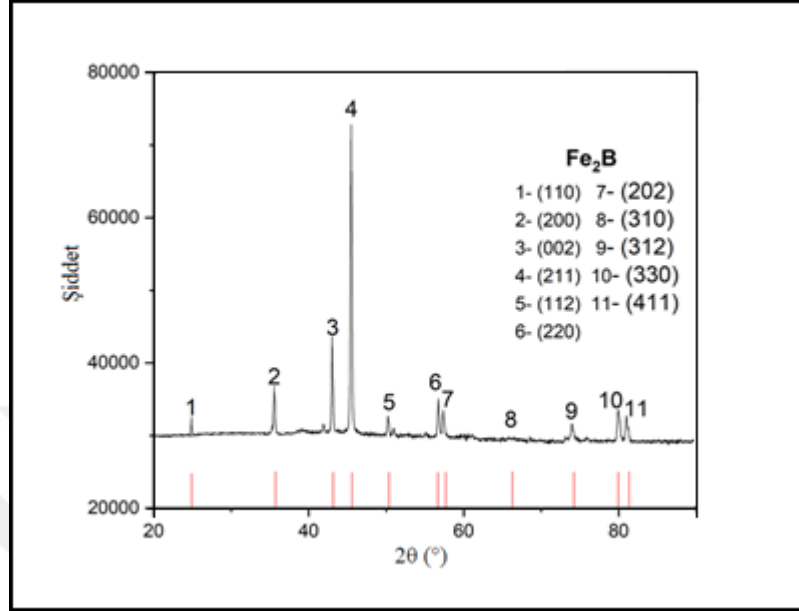
Şekil 5.83. 'de 20M75-12 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü verilmiştir. SEM görüntüsündeki borür tabakası, mikroyapı görüntüsünü teyit eder nitelikte, testere dişleri morfolojisindedir.



Şekil 5.83. 20M75-12 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.

Şekil 5.84. 'de 20M75-12 kodlu numunenin XRD analiz sonucu verilmiştir. Grafiğe bakıldığında numune üzerindeki piklerin sadece Fe_2B bileşiğine ait olduğu saptanmıştır. XRD incelemesiyle borun yapıya difüze olduğu ve yüzeyde Fe_2B tabakasının oluştuğu tespit edilmiştir.

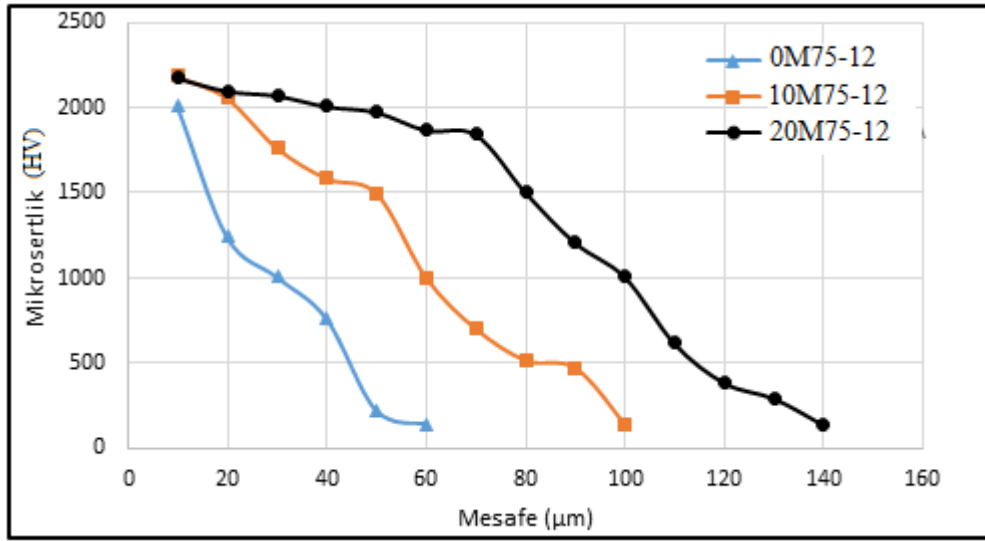
20 saat MA işlemi yapılarak, 750 °C ‘de 12 saat borlama şartları altında numune yüzeyinde borür tabakasının oluşturulduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 5.84. 20M75-12 kodlu numuneye ait XRD grafiği.

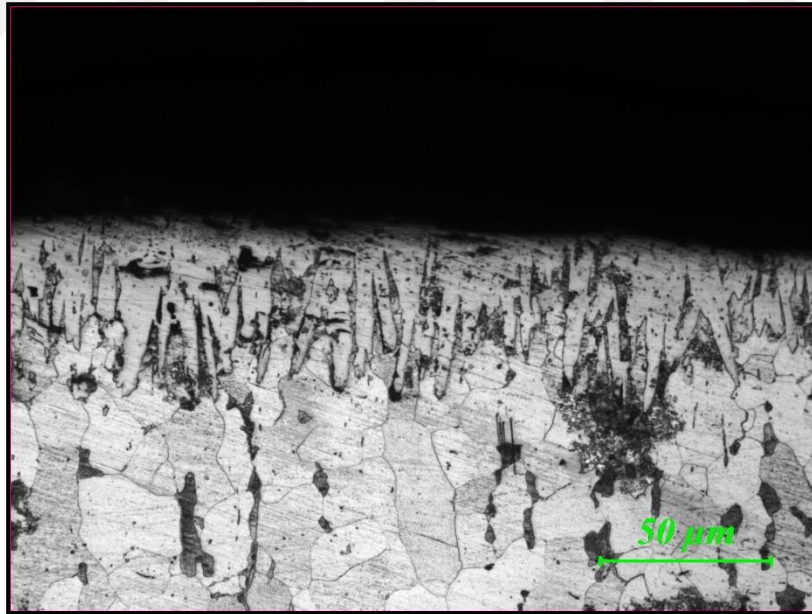
750°C ‘da 12 saat borlama yapılan numunelerde bor tabaka görüntüleri beklenildiği gibi testere dişi morfolojisinde, yüzeyden ana malzemeye doğru büyümektedir. MA süresindeki artışla birlikte tabaka kalınlıklarında artışın meydana geldiği görüntülerden de belirgin bir şekilde anlaşılmaktadır.

Şekil 5.85. ‘de 0M75-12, 10M75-12 ve 20M75-12 kodlu numunelere ait yüzeyden matrise doğru ölçülmüş Mikrosertlik-Mesafe grafiği verilmiştir. Genel olarak, yüzeyden matrise (ana malzemeye – St28 ‘e) doğru gidildikçe Mikrosertlik değerlerinde azalmalar meydana gelmektedir. 10 saat MA ile üretilen jelle borlanan numunenin en yüksek sertlik değerinin, 20 saat MA ile üretilen jelle borlanan numunenin en yüksek sertlik değerine yakın değerde olduğu görülmektedir. MA işlemi yapılmadan üretilen numunenin en yüksek Mikrosertlik değerinin bir önceki serilere göre daha da arttığı dikkat çekmektedir. 20 saat MA ile üretilen jelle borlanan numunenin Mikrosertlik dağılımında, numune yüzeyine yakın kesimlerde mikrosertlikteki azalışın daha az olduğu gözlenmiştir. Azalan MA süresiyle, benzer bölgelerden alınan ölçümlerdeki Mikrosertlik değerlerinin ise daha yüksek olduğu görülmektedir. MA işlemi yapılmamış numuneden alınan birinci ve ikinci ölçüm arasındaki ciddi farkın önceki numunelerde olduğu gibi devam ettiği görülmektedir. Tabaka kalınlıkları arasındaki farkların en yüksek sertlik değerine direkt olarak etki etmediği, kalın tabakalı numunelerdeki Mikrosertlik değerlerinin azalışı ince numunelere göre daha yavaş olduğu bu ölçümlerde de gözlemlenmiştir.



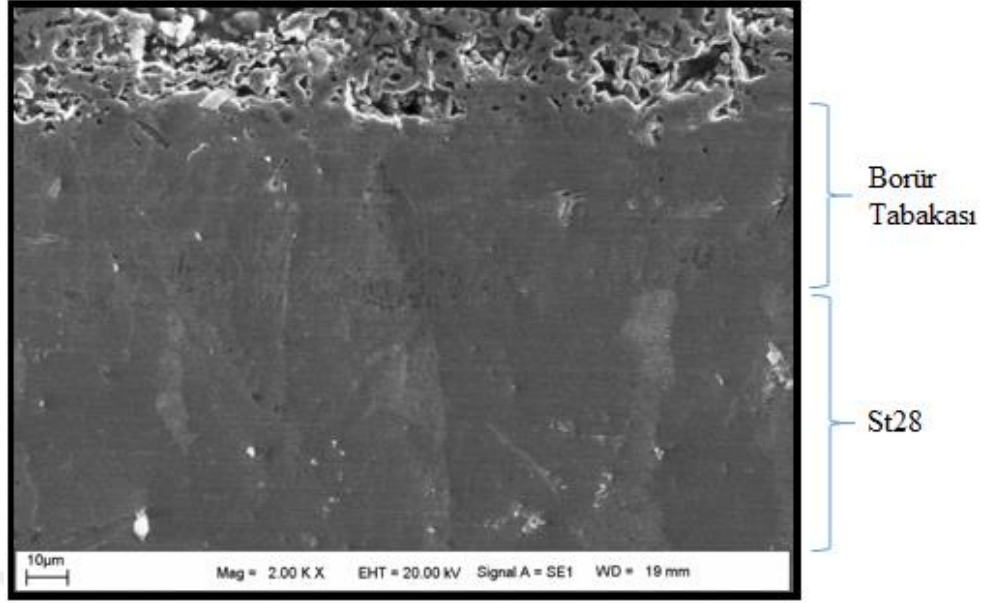
Şekil 5.85. 0M75-12, 10M75-12 ve 20M75-12 kodlu numunelere ait Mikrosertlik-Mesafe grafiği.

MA işlemi yapılmamış jel kullanılarak, 800 °C ‘de 3 saat borlama ısıtma işlemi yapılmış 0M80-3 kodlu numuneye ait mikroyapı Şekil 5.86. ‘da verilmiştir. Bu şartlar altında oluşması beklenen borür tabakasının testere dişi morfolojisiyle oluştuğu belirlenmiştir.



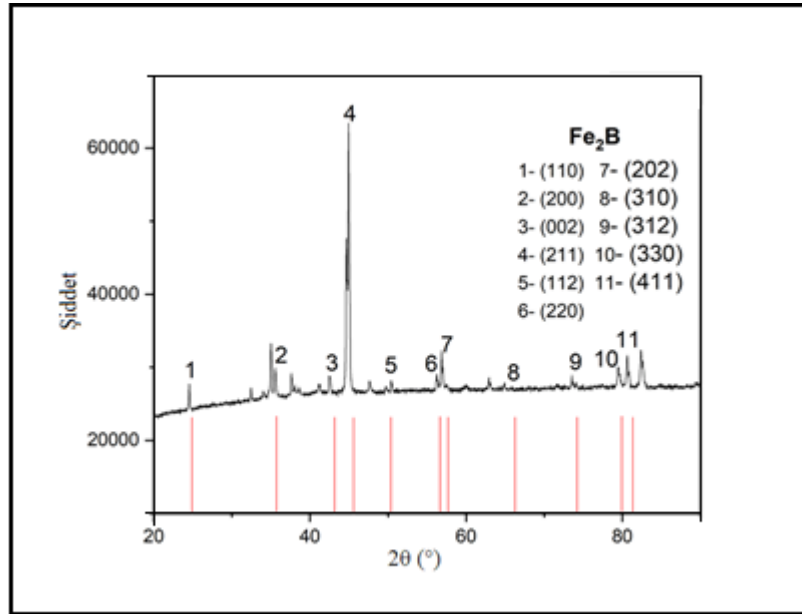
Şekil 5.86. 0M80-3 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (500x).

Şekil 5.87. ‘de 0M80-3 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü verilmiştir. Numuneye ait mikroyapı görüntüsünde de olduğu gibi, yüzeyde borür tabakasına rastlanılmıştır.



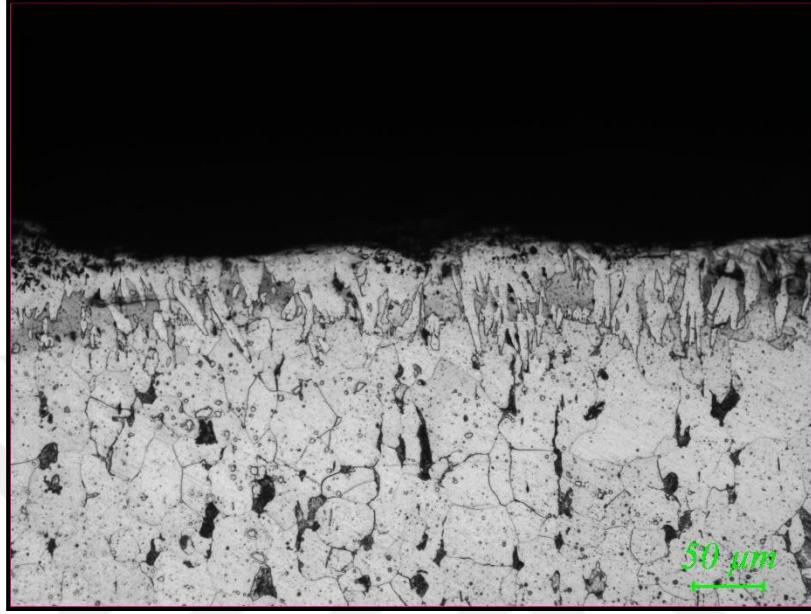
Şekil 5.87. 0M80-3 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.

Şekil 5.88. 'de 0M80-3 kodlu numunenin XRD analiz sonucu verilmiştir. Grafiğe bakıldığında numune üzerindeki piklerin sadece Fe_2B bileşiğine ait olduğu saptanmıştır. XRD incelemesiyle borun yapıya difüze olduğu ve yüzeyde Fe_2B tabakasının oluştuğu tespit edilmiştir. MA işlemi yapılmadan, 800 °C 'de 3 saat borlama şartları altında numune yüzeyinde borür tabakasının oluşturulduğu sonucuna varılmıştır.



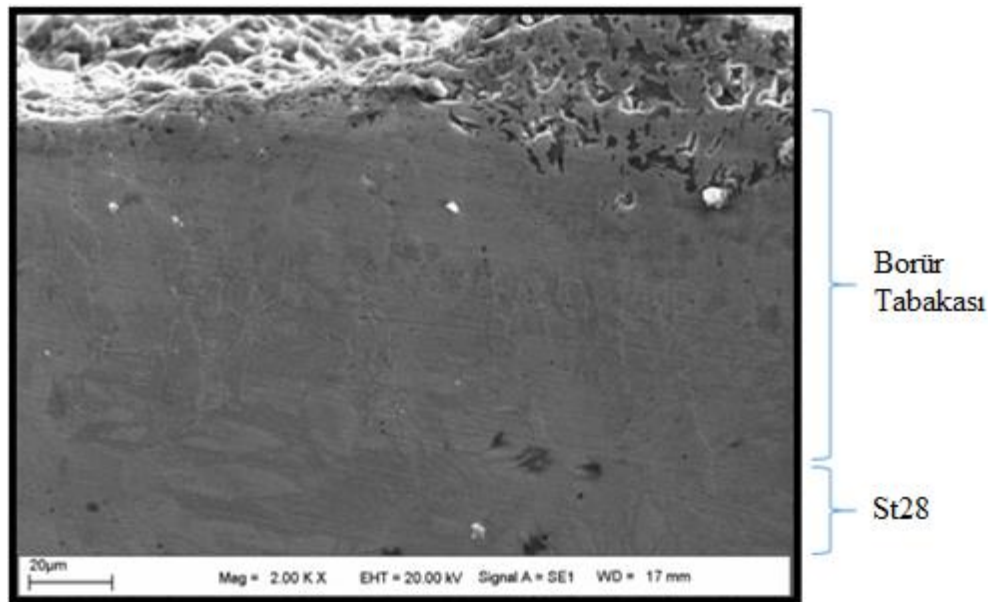
Şekil 5.88. 0M80-3 kodlu numuneye ait XRD grafiği.

10 saat MA işlemi sonucu elde edilen jel kullanılarak, 3 saat 800°C 'da borlama yapılmış 10M80-3 kodlu numuneye ait mikroyapı Şekil 5.89. 'da verilmiştir. Bu şartlar altında oluşması beklenen borür tabakasının karakteristik testere dişi morfolojisinde olduğu görülmektedir.



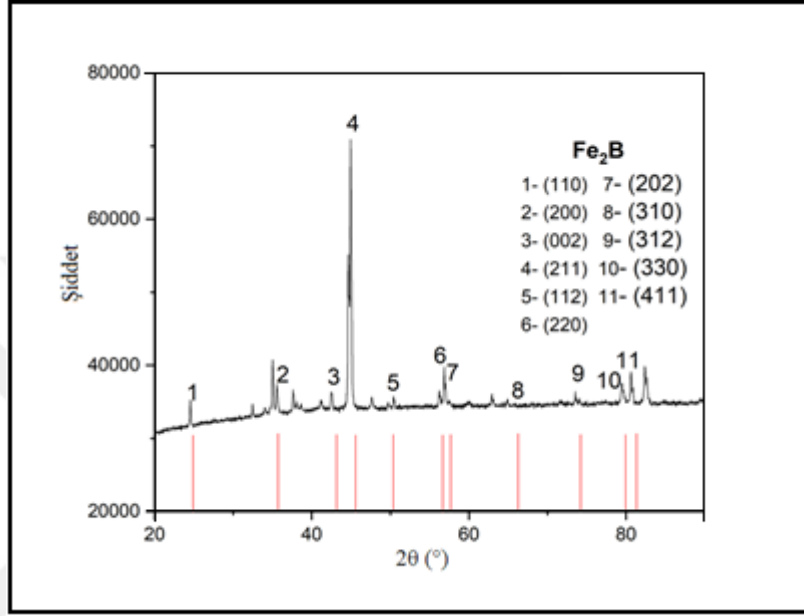
Şekil 5.89. 10M80-3 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (200x).

Şekil 5.90. 'da 10M80-3 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü verilmiştir. Numuneye ait mikroyapı görüntüsünde olduğu gibi, yüzeyde borür tabakasına rastlanılmıştır.



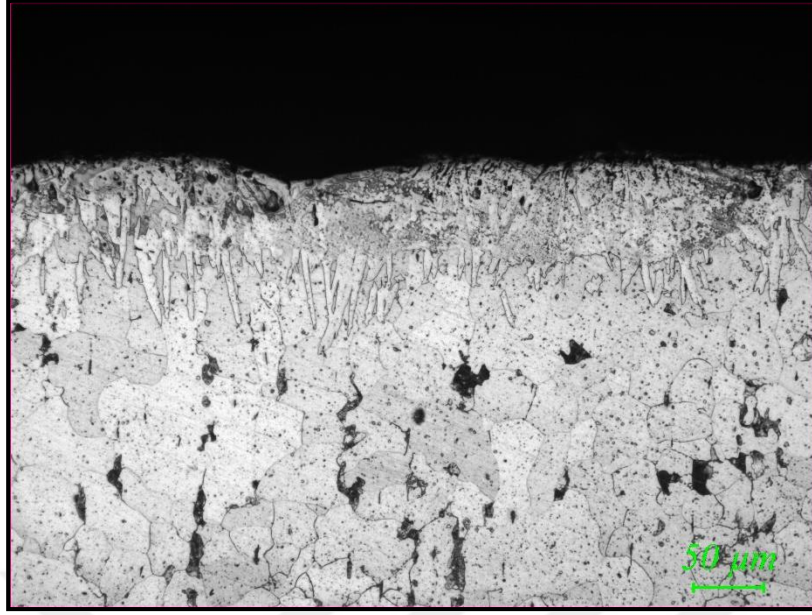
Şekil 5.90. 10M80-3 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.

Şekil 5.91. 'de 10M80-3 kodlu numunenin XRD analiz sonucu verilmiştir. Grafiğe bakıldığında numune üzerindeki piklerin sadece Fe_2B bileşiğine ait olduğu saptanmıştır. XRD incelemesiyle borun yapıya difüze olduğu ve yüzeyde Fe_2B tabakasının oluştuğu tespit edilmiştir. 10 saat MA işlemi yapılarak, 800 °C 'de 3 saat borlama şartları altında numune yüzeyinde borür tabakasının oluşturulduğu sonucuna varılmıştır.



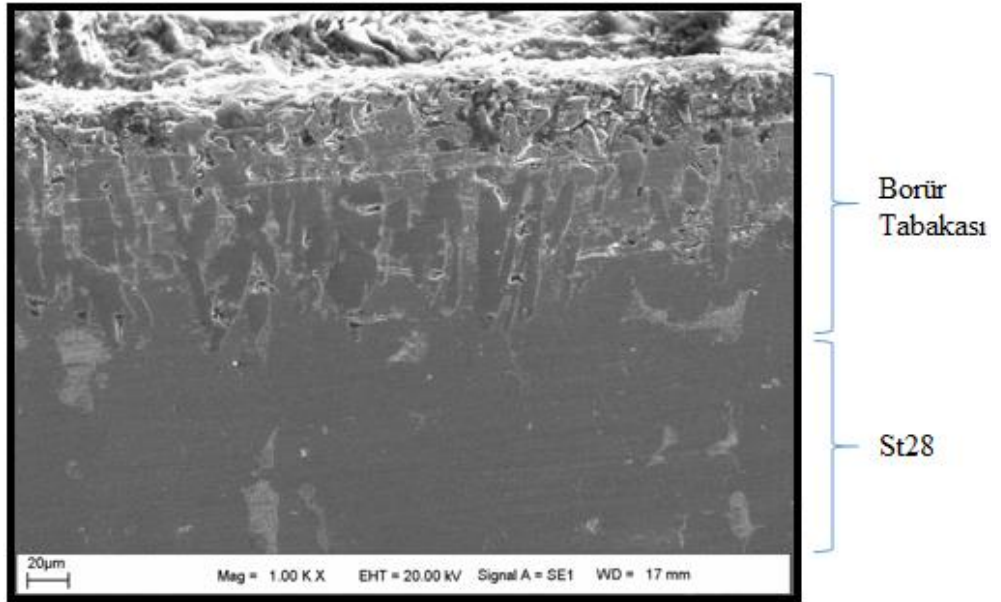
Şekil 5.91. 10M80-3 kodlu numuneye ait XRD grafiği.

20 saat MA işlemi sonucu elde edilen jel kullanılarak, 3 saat 800°C 'da borlama yapılmış 20M80-3 kodlu numuneye ait mikroyapı Şekil 5.92. 'de verilmiştir. Bu şartlar altında oluşması beklenen borür tabakasının karakteristik testere dişi şeklinde oluştuğu anlaşılmaktadır.



Şekil 5.92. 20M80-3 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (200x).

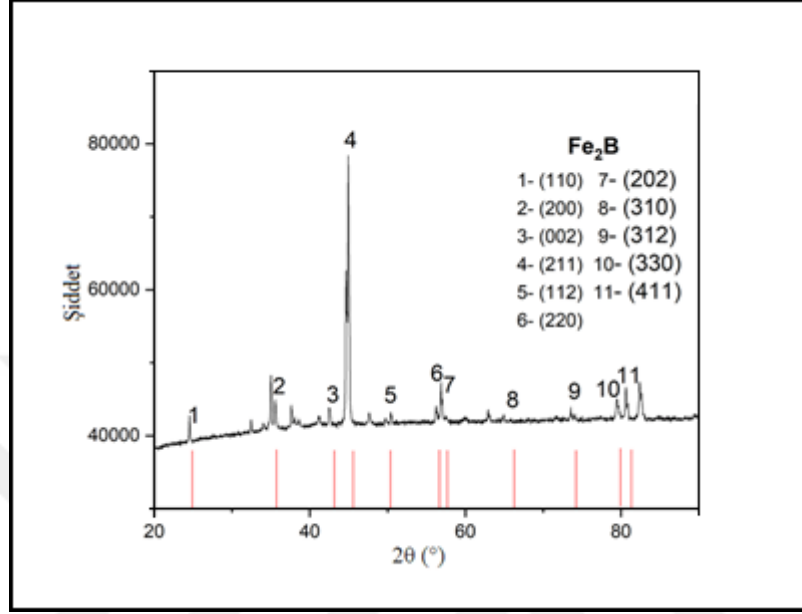
Şekil 5.93. 'de 20M80-3 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü verilmiştir. Numuneye ait mikroyapı görüntüsünde de olduğu gibi, yüzeyde oluşmuş borür tabakası belirgin bir şekilde görüntülenmiştir.



Şekil 5.93. 20M80-3 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.

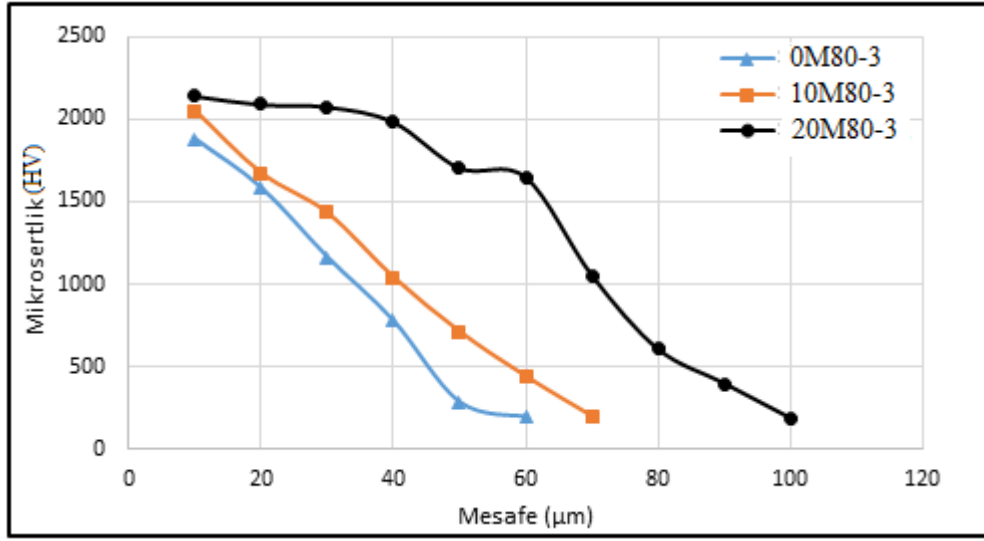
Şekil 5.94. 'de 20M80-3 kodlu numunenin XRD analiz sonucu verilmiştir. Grafiğe bakıldığında numune üzerindeki piklerin sadece Fe_2B bileşiğine ait olduğu saptanmıştır. XRD

incelemesiyle borun yapıya difüze olduğu ve yüzeyde Fe_2B tabakasının oluştuğu tespit edilmiştir. 20 saat MA işlemi yapılarak, 800 °C 'de 3 saat borlama şartları altında numune yüzeyinde borür tabakasının oluşturulduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 5.94. 20M80-3 kodlu numuneye ait XRD grafiği.

Şekil 5.95. 'de 0M80-3, 10M80-3 ve 20M80-3 kodlu numunelere ait yüzeyden matrise doğru ölçülmüş Mikrosertlik-Mesafe grafiği verilmiştir. Genel olarak, yüzeyden matrise doğru gidildikçe Mikrosertlik değerlerinde azalmalar meydana gelmiştir. 0M80-3 ve 10M80-3 kodlu numunelerin artan sertlik ölçüm sayılarıyla Mikrosertlik değerinde yaklaşık oransal düşüşler görülürken; 20 saat MA işlemi yapılmış jelle borlanan 20M80-3 kodlu numuneden alınan ilk dört ölçümde Mikrosertlik değerleri çok yakın çıkmıştır. Artan tabakalarla beraber sertlikteki düşüşün daha stabil olduğu görülmüştür.



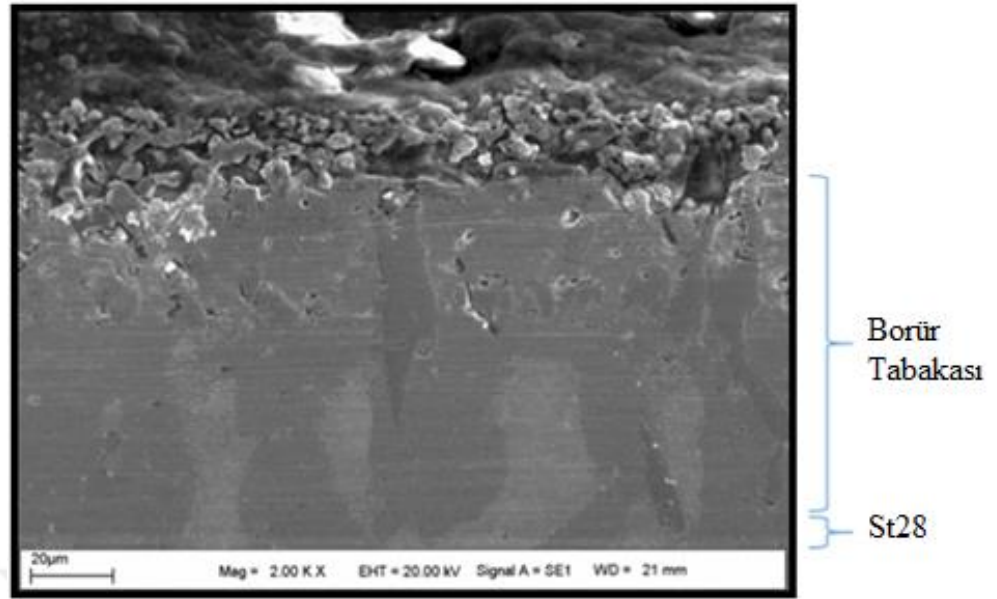
Şekil 5.95. 0M80-3, 10M80-3 ve 20M80-3 kodlu numunelere ait Mikrosertlik-Mesafe grafiği.

MA yapılmamış jel kullanılarak, 800 °C ‘de 6 saat borlama ısıt işlemleri yapılmış 0M80-6 kodlu numuneye ait mikroyapı Şekil 5.96. ‘da verilmiştir. Bu şartlar altında oluşması beklenen borür tabakasının heterojen bir dağılımla oluştuğu şekilden anlaşılmaktadır.



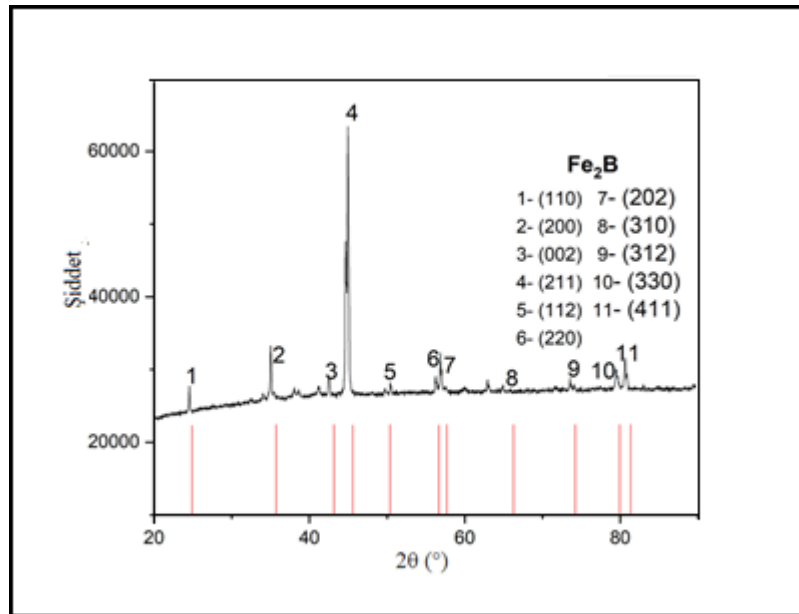
Şekil 5.96. 0M80-6 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (200x).

Şekil 5.97. ‘de 0M80-6 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü verilmiştir. Numuneye ait mikroyapı görüntüsünde olduğu gibi, yüzeydeki borür tabakası belirlenmiştir.



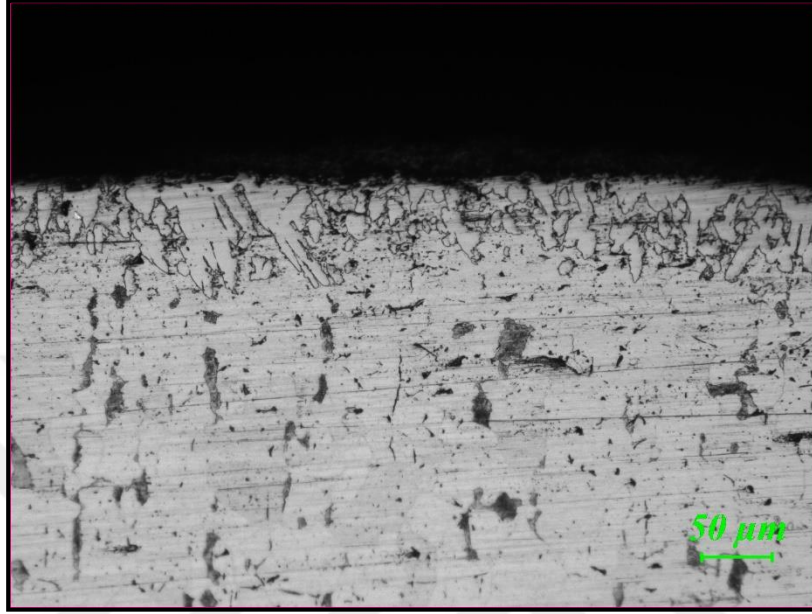
Şekil 5.97. 0M80-6 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.

Şekil 5.98. 'de 0M80-6 kodlu numunenin XRD analiz sonucu verilmiştir. Grafiğe bakıldığında numune üzerindeki piklerin sadece Fe_2B bileşiğine ait olduğu saptanmıştır. XRD incelemesiyle borun yapıya difüze olduğu ve yüzeyde Fe_2B tabakasının oluştuğu tespit edilmiştir. MA işlemi yapılmadan, 800 °C 'de 6 saat borlama şartları altında numune yüzeyinde borür tabakasının oluşturulduğu sonucuna varılmıştır.



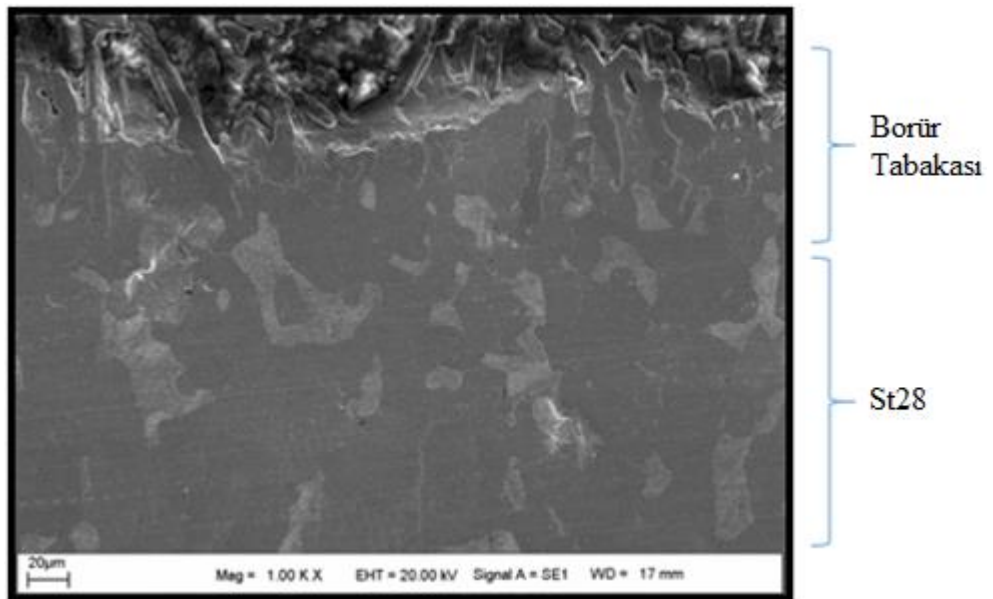
Şekil 5.98. 0M80-6 kodlu numuneye ait XRD grafiği.

10 saat MA işlemi sonucu elde edilen jel kullanılarak, 6 saat 800°C 'da borlama yapılmış 10M80-6 kodlu numuneye ait mikroyapı Şekil 5.99. 'da verilmiştir. Bu şartlar altında oluşması beklenen borür tabakasının karakteristik testere dişi şeklinde olduğu görülmektedir.



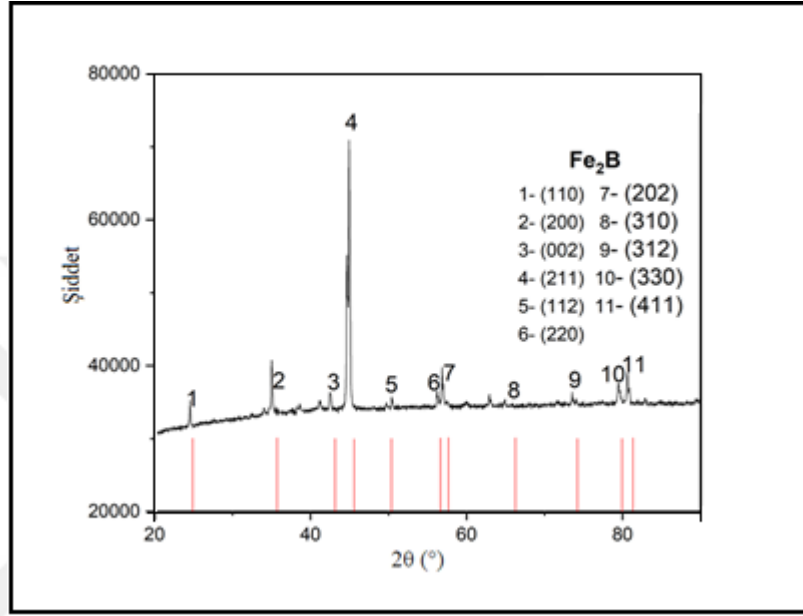
Şekil 5.99. 10M80-6 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (200x).

Şekil 5.100. 'de 10M80-6 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü verilmiştir. Numuneye ait mikroyapı görüntüsünde olduğu gibi, yüzeyde borür tabakasına rastlanılmıştır.



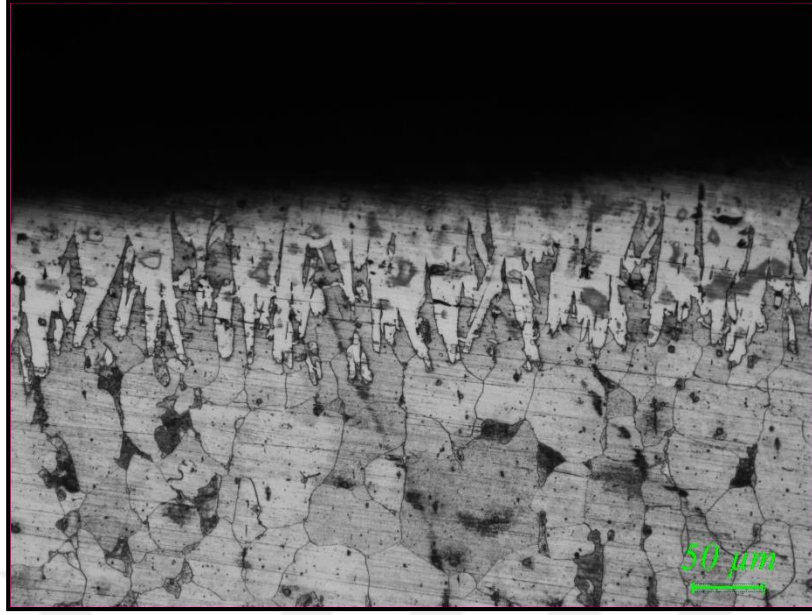
Şekil 5.100. 10M80-6 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.

Şekil 5.101. 'de 10M80-6 kodlu numunenin XRD analiz sonucu verilmiştir. Grafiğe bakıldığında numune üzerindeki piklerin sadece Fe_2B bileşiğine ait olduğu saptanmıştır. XRD incelemesiyle borun yapıya difüze olduğu ve yüzeyde Fe_2B tabakasının oluştuğu tespit edilmiştir. 10 saat MA işlemi yapılarak, 800 °C 'de 6 saat borlama şartları altında numune yüzeyinde borür tabakasının oluşturulduğu sonucuna varılmıştır.



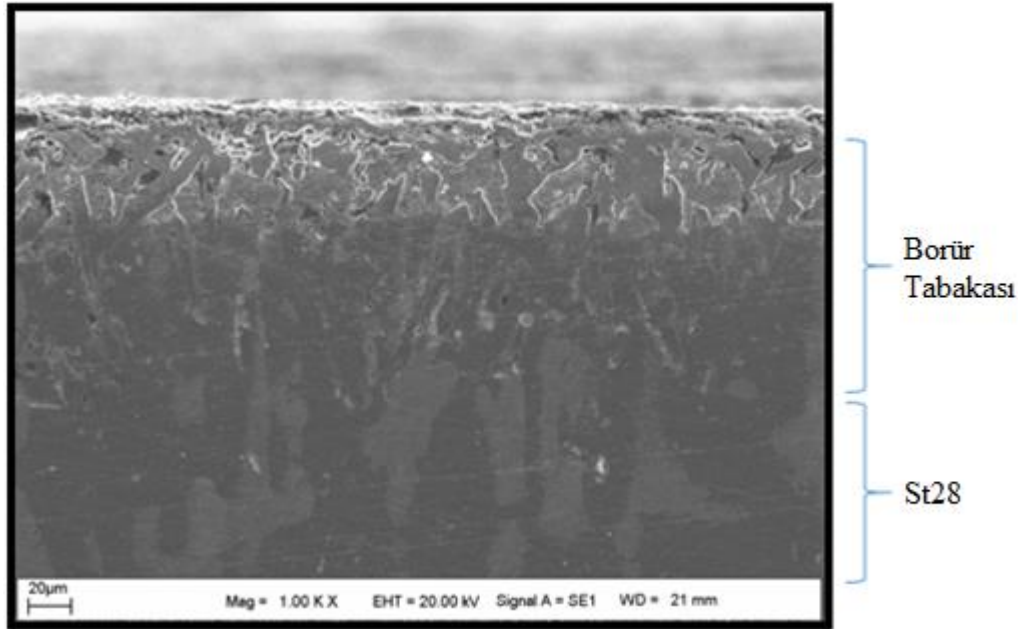
Şekil 5.101. 10M80-6 kodlu numuneye ait XRD grafiği.

20 saat MA sonucu elde edilen jel kullanılarak, 6 saat 800°C 'da borlama yapılmış 20M80-6 kodlu numuneye ait mikroyapı Şekil 5.102. 'de verilmiştir. Bu şartlar altında oluşması beklenen borür tabakasının karakteristik testere dişi morfolojisinde oluştuğu şekilde belirlenmiştir.



Şekil 5.102. 20M80-6 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (200x).

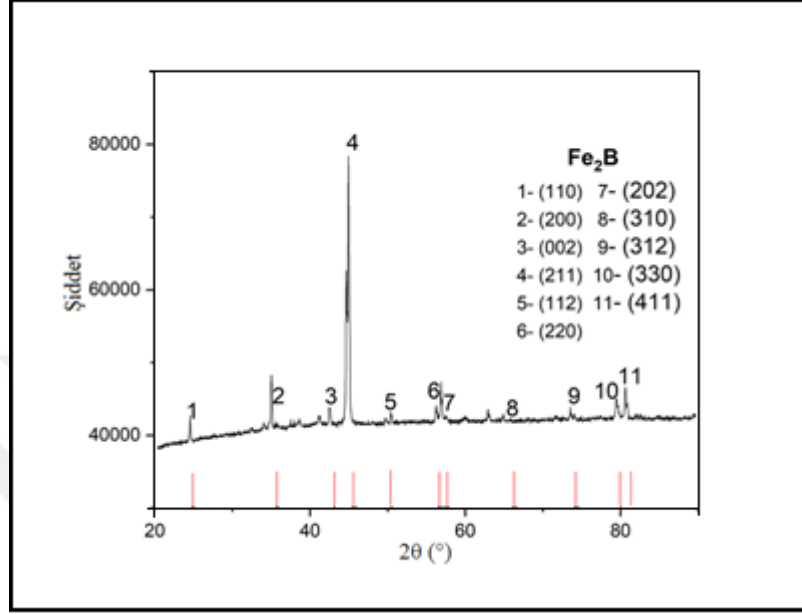
Şekil 5.103. 'de 20M80-6 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü verilmiştir. Numuneye ait mikroyapı görüntüsünde de olduğu gibi, yüzeyde oluşan testere dişi morfolojisindeki borür tabakası teyit edilmiştir.



Şekil 5.103. 20M80-6 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.

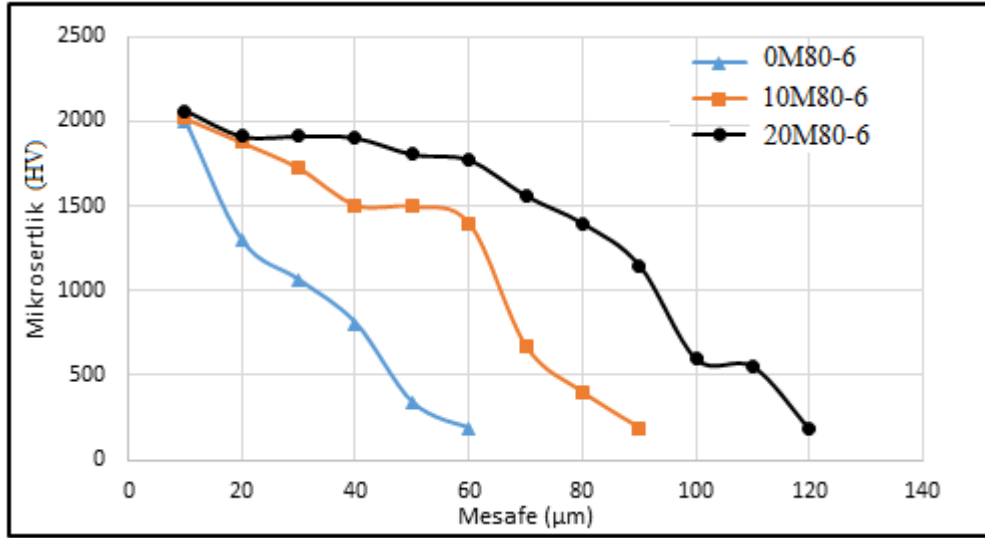
Şekil 5.104. 'de 20M80-6 kodlu numunenin XRD analiz sonucu verilmiştir. Grafiğe bakıldığında numune üzerindeki piklerin sadece Fe_2B bileşiğine ait olduğu saptanmıştır. XRD

incelemesiyle borun yapıya difüze olduğu ve yüzeyde Fe_2B tabakasının oluştuğu tespit edilmiştir. 20 saat MA ile üretilen jelle, 800 °C 'de 6 saat borlama şartları altında numune yüzeyinde borür tabakasının oluşturulduğu sonucuna varılmıştır.



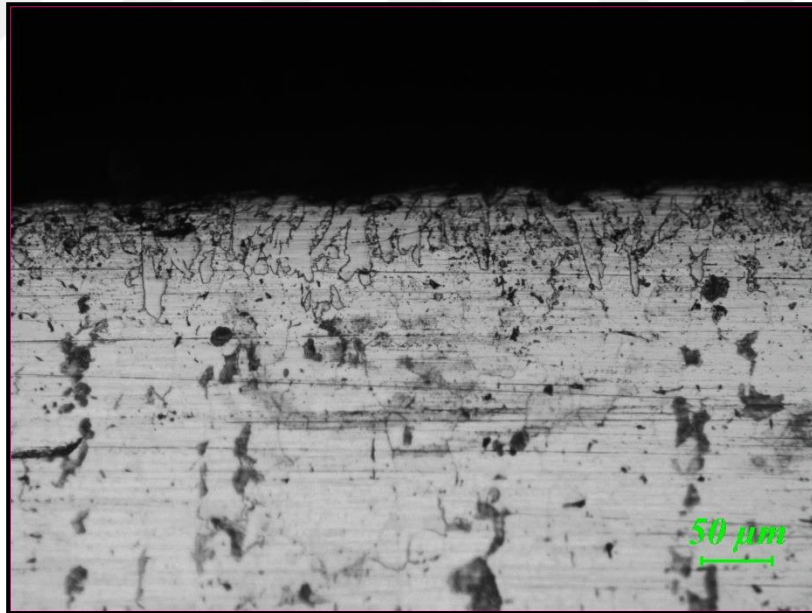
Şekil 5.104. 20M80-6 kodlu numuneye ait XRD grafiği.

Şekil 5.105. 'de 0M80-6, 10M80-6 ve 20M80-6 kodlu numunelere ait yüzeyden matrise doğru ölçülmüş Mikrosertlik-Mesafe grafiği verilmiştir. Genel olarak, yüzeyden matrise doğru gidildikçe Mikrosertlik değerlerinde azalmalar meydana gelmiştir. 10M80-6 ve 20M80-6 kodlu numunelerde benzer karakteristiklerde Mikrosertlik değerleri görülmüştür. Her ne kadar 0M80-6 kodlu numunede ilk ölçümde diğerler numunelerle yakın değerler elde edilmiş olsa bile genelde stabil düşüştü bir Mikrosertlik davranışı gözlenmemiştir. 60 µm derinliklerdeki Mikrosertlik ölçümleri kıyaslandığında, 0M80-6 numunesinin sertliği matris bölgesi sertliği seviyesindeyken diğer iki numunenin Mikrosertlik değerleri yüksek seviyede seyretmektedir.



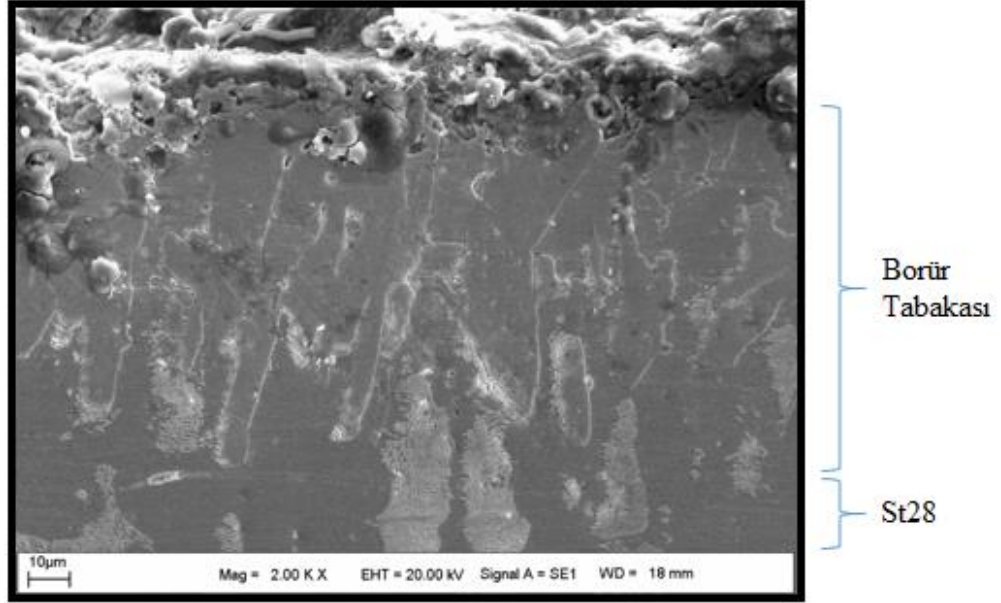
Şekil 5.105. 0M80-6, 10M80-6 ve 20M80-6 kodlu numunelere ait Mikrosertlik-Mesafe grafiği.

MA işlemi yapılmamış jel kullanılarak, 800 °C ‘de 12 saat borlama ısıt işlemi yapılmış 0M80-12 kodlu numuneye ait mikroyapı Şekil 5.106. ‘da verilmiştir. Bu şartlar altında oluşması beklenen borür tabakası karakteristik testere dişi morfolojisindedir.



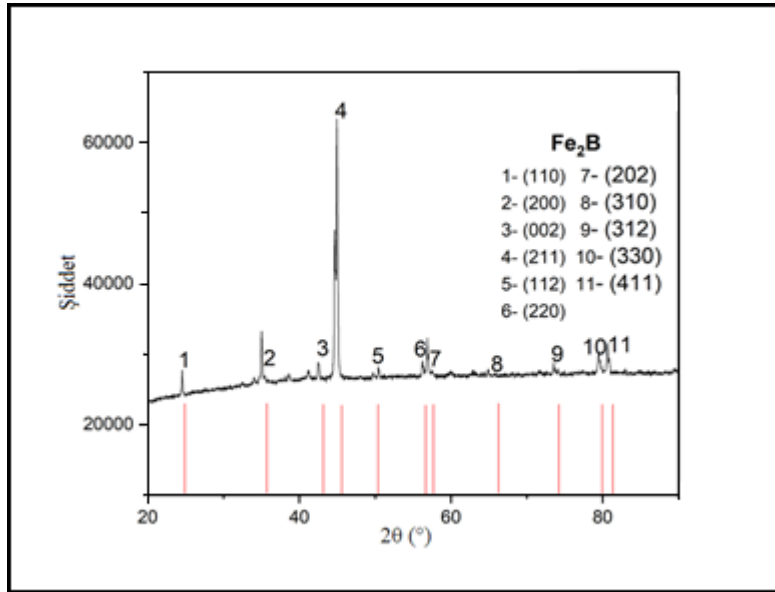
Şekil 5.106. 0M80-12 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (200x).

Şekil 5.107. ‘de 0M80-12 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü verilmiştir. Numuneye ait mikroyapı görüntüsünde olduğu gibi, testere dişi morfolojisi açıkça görülmektedir.



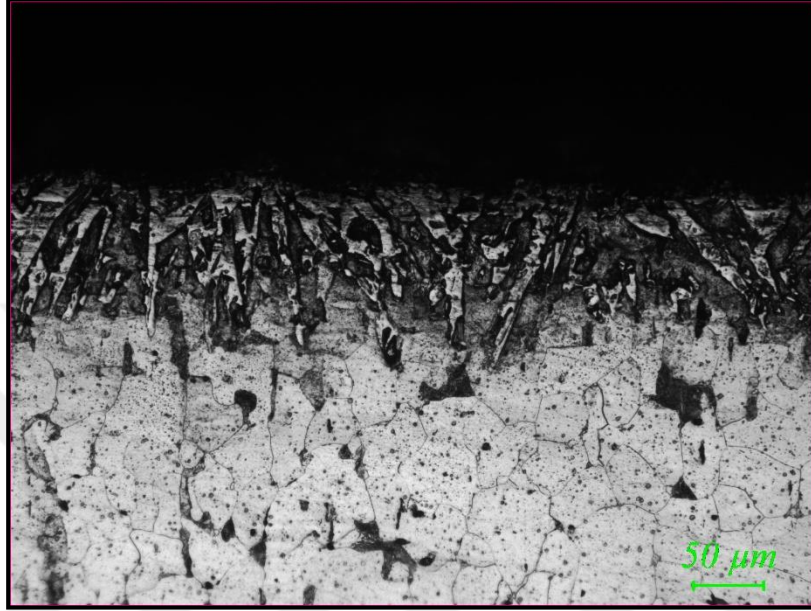
Şekil 5.107. 0M80-12 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.

Şekil 5.108. 'de 0M80-12 kodlu numunenin XRD analiz sonucu verilmiştir. Grafiğe bakıldığında numune üzerindeki piklerin sadece Fe_2B bileşiğine ait olduğu saptanmıştır. XRD incelemesiyle borun yapıya difüze olduğu ve yüzeyde Fe_2B tabakasının oluştuğu tespit edilmiştir. MA işlemi yapılmadan hazırlanan jelle, 800 °C 'de 12 saat borlanan numune yüzeyinde borür tabakasının oluşturulduğu sonucuna varılmıştır.



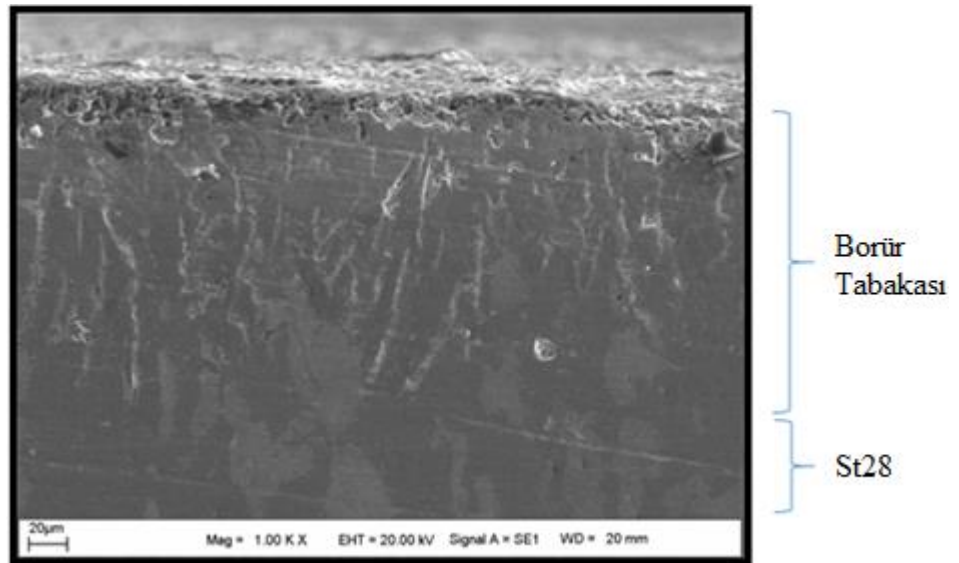
Şekil 5.108. 0M80-12 kodlu numuneye ait XRD grafiği.

10 saat MA işlemi sonucu elde edilen jel kullanılarak, 12 saat 800°C 'da borlama yapılmış 10M80-12 kodlu numuneye ait mikroyapı Şekil 5.109. 'da verilmiştir. Bu şartlar altında oluşması beklenen borür tabakasının karakteristik testere dişi morfolojisinde olduğu şekille görüntülenmiştir.



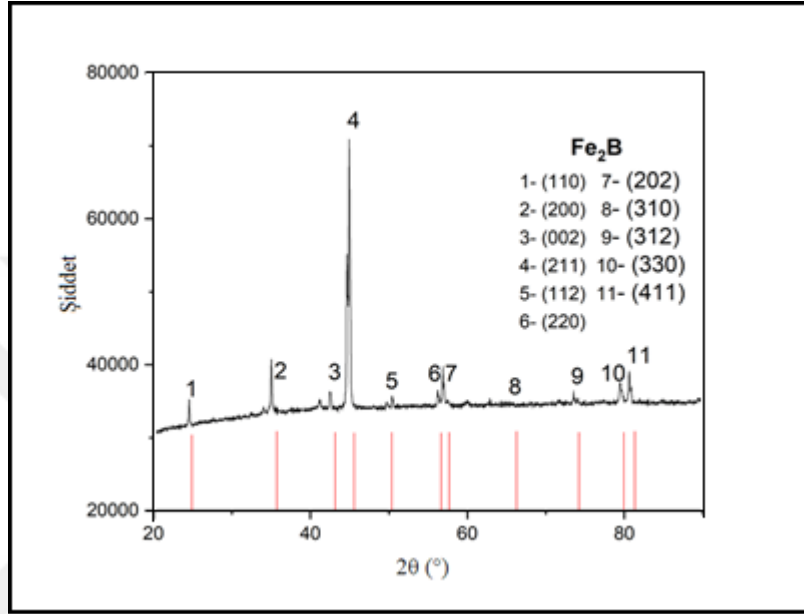
Şekil 5.109. 10M80-12 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (200x).

Şekil 5.110. 'da 10M80-12 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü verilmiştir. Numuneye ait mikroyapı görüntüsünde de olduğu gibi, yüzeyde borür tabakasına rastlanılmıştır.



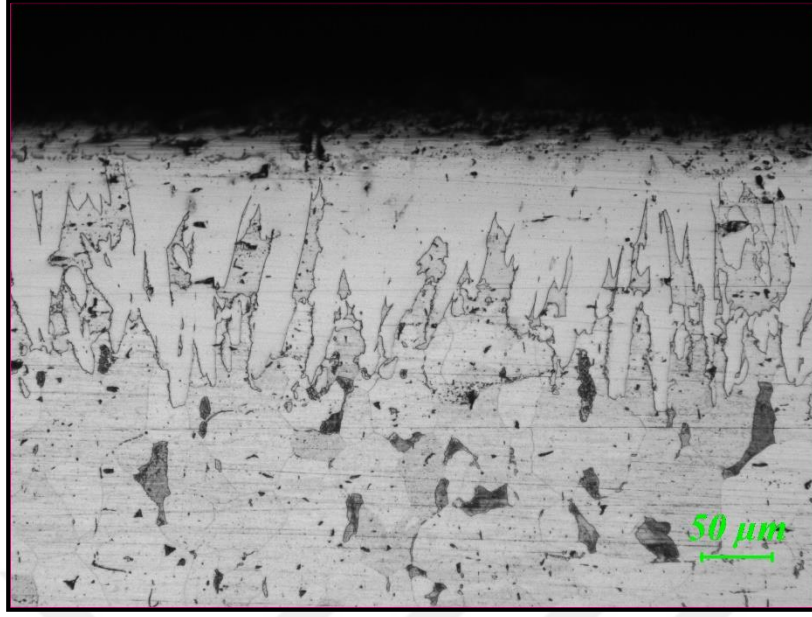
Şekil 5.110. 10M80-12 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.

Şekil 5.111. 'de 10M80-12 kodlu numunenin XRD analiz sonucu verilmiştir. Grafiğe bakıldığında numune üzerindeki piklerin sadece Fe_2B bileşiğine ait olduğu saptanmıştır. XRD incelemesiyle borun yapıya difüze olduğu ve yüzeyde Fe_2B tabakasının oluştuğu tespit edilmiştir. 10 saat MA işlemi sonucu elde edilen jel kullanılarak, 800 °C 'de 12 saat borlanan numune yüzeyinde borür tabakasının oluşturulduğu sonucuna varılmıştır.



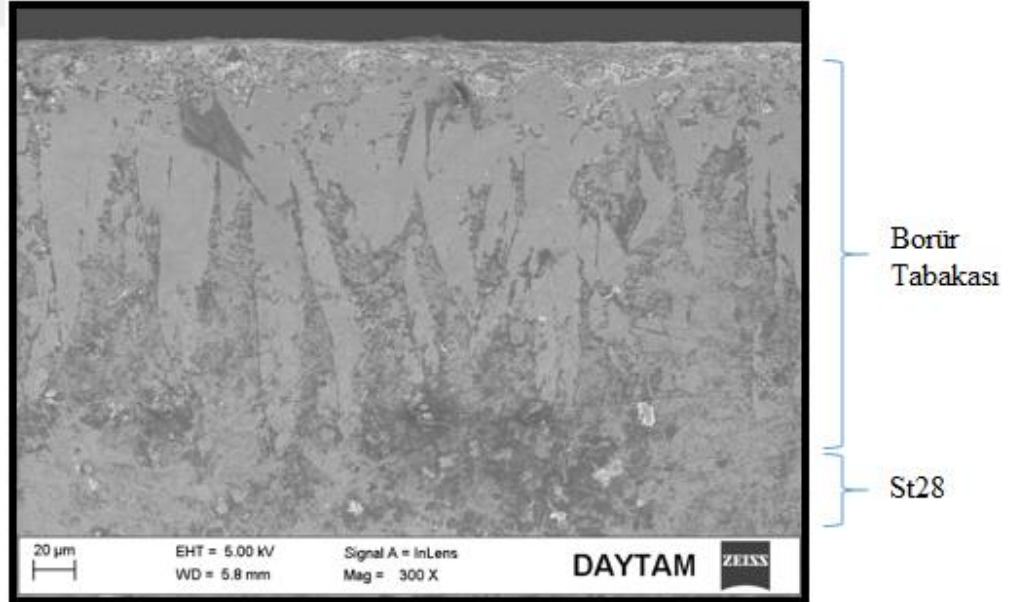
Şekil 5.111. 10M80-12 kodlu numuneye ait XRD grafiği.

20 saat MA işlemi sonucu elde edilen jel kullanılarak, 12 saat 800°C 'da borlama yapılmış 20M80-12 kodlu numuneye ait mikroyapı Şekil 5.112. 'de verilmiştir. Bu şartlar altında oluşması beklenen borür tabakasının karakteristik testere dişi morfolojisi halinde oluştuğu belirlenmiştir.



Şekil 5.112. 20M80-12 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (200x).

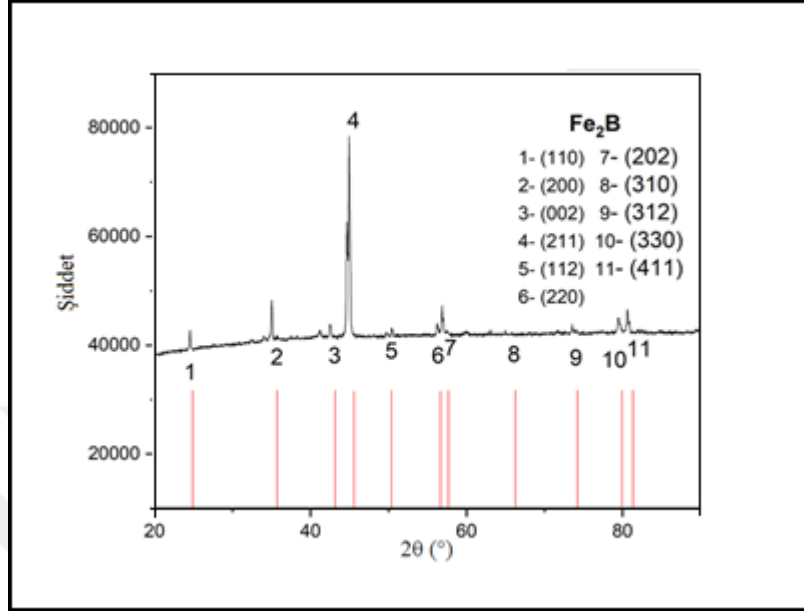
Şekil 5.113. 'de 20M80-12 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü verilmiştir. Numuneye ait mikroyapı görüntüsünde olduğu gibi, yüzeydeki karakteristik borür tabakası teyit edilmiştir.



Şekil 5.113. 20M80-12 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.

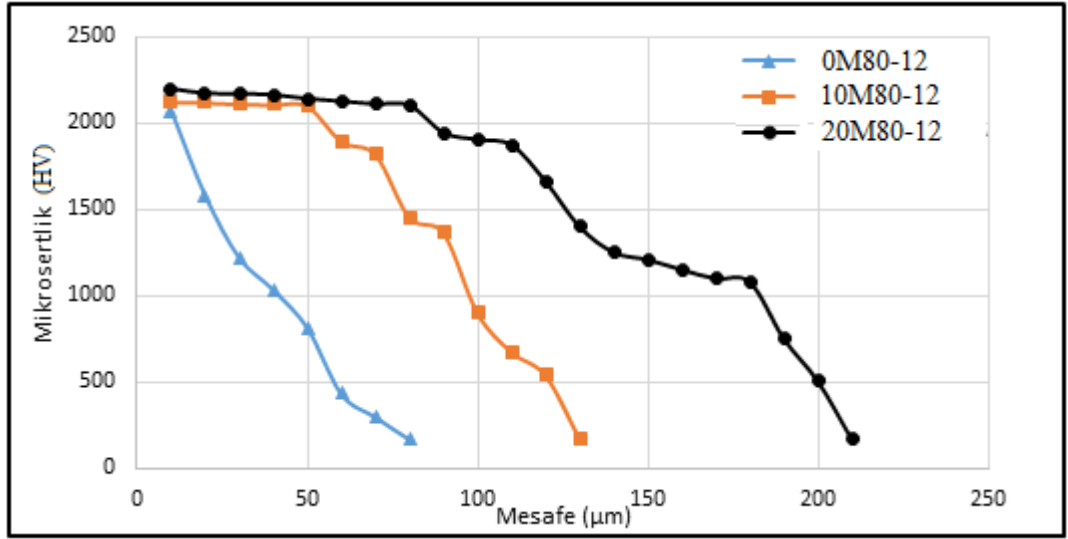
Şekil 5.114. 'de 20M80-12 kodlu numunenin XRD analiz sonucu verilmiştir. Grafiğe bakıldığında numune üzerindeki piklerin sadece Fe_2B bileşiğine ait olduğu saptanmıştır. XRD incelemesiyle borun yapıya difüze olduğu ve yüzeyde Fe_2B tabakasının oluştuğu tespit edilmiştir.

20 saat MA işlemi ile elde edilen jel kullanılarak, 800 °C ‘de 12 saat borlanan numune yüzeyinde borür tabakasının oluşturulduğu sonucuna varılmıştır.



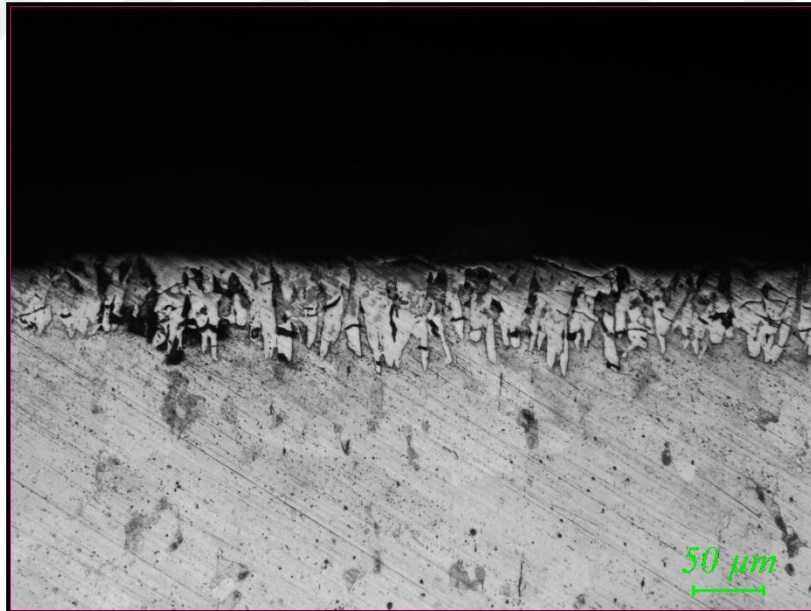
Şekil 5.114. 20M80-12 kodlu numuneye ait XRD grafiği.

Şekil 5.115. ‘de 0M80-12, 10M80-12 ve 20M80-12 kodlu numunelere ait yüzeyden matrise doğru ölçülmüş Mikrosertlik-Mesafe grafiği verilmiştir. Genel olarak, yüzeyden matrise doğru gidildikçe Mikrosertlik değerlerinde azalmalar meydana gelmiştir. 0M80-12 ile 20M80-12 kodlu numuneler kıyaslandığında, 0M80-12 ‘nin borür tabakasının bittiği mesafelerde 20M80-12 kodlu numunenin Mikrosertlik değerlerinin 2000 HV ‘nin üzerinde olduğu görülmektedir. Bu doğrultuda, MA ile üretilen jelle borlama neticesinde oluşan Fe₂B borür tabakalarının MA işlemi yapılmadan hazırlanan jelle borlanan numunelere göre sertlik açısından daha istikrarlı olduğu sonucuna varılabilir. Tabaka kalınlıklarındaki artış ile sertlikteki stabil davranışın daha da derin mesafelere kadar devam ettiği tespit edilmiştir.



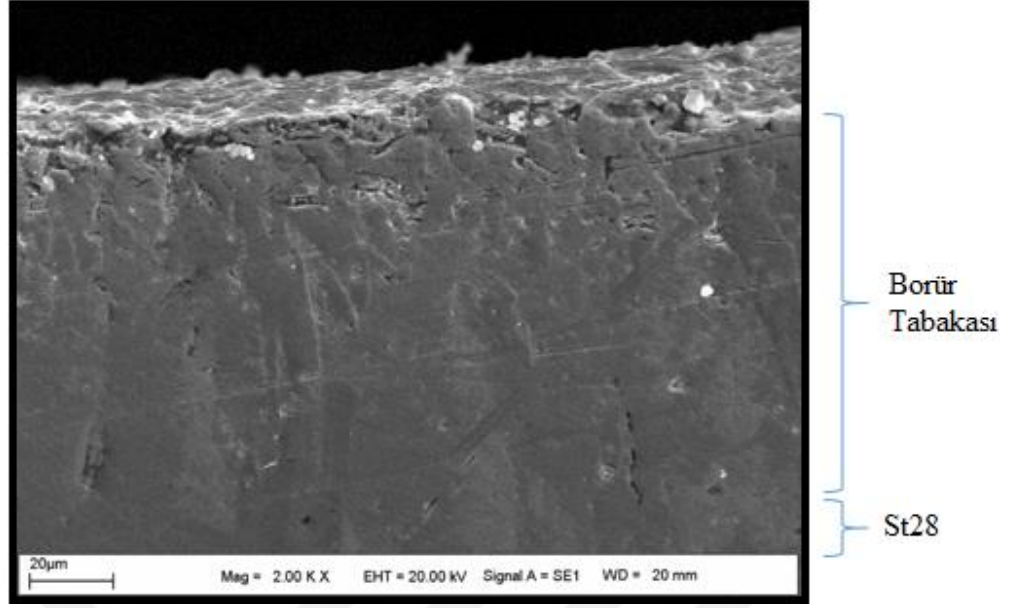
Şekil 5.115. 0M80-12, 10M80-12 ve 20M80-12 kodlu numunelere ait Mikrosertlik-Mesafe grafiği.

MA işlemi yapılmamış jel kullanılarak, 850 °C ‘de 3 saat borlama ısıt işlemi yapılmış 0M85-3 kodlu numuneye ait mikroyapı Şekil 5.116. ‘da verilmiştir. Bu şartlar altında oluşması beklenen borür tabakasının testere dişi halinde oluştuğu anlaşılmaktadır.



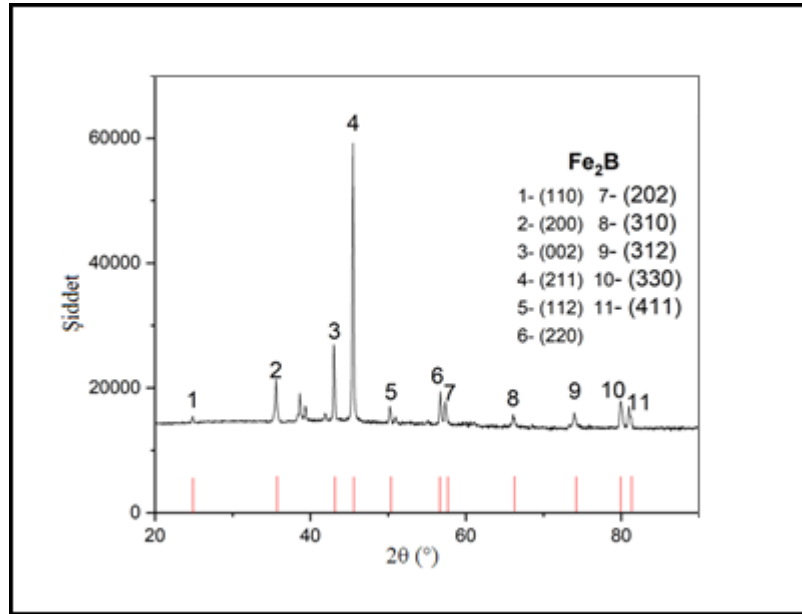
Şekil 5.116. 0M85-3 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (200x).

Şekil 5.117. ‘de 0M85-3 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü verilmiştir. Numuneye ait mikroyapı görüntüsünde olduğu gibi, yüzeydeki borür tabakası belirlenmiştir.



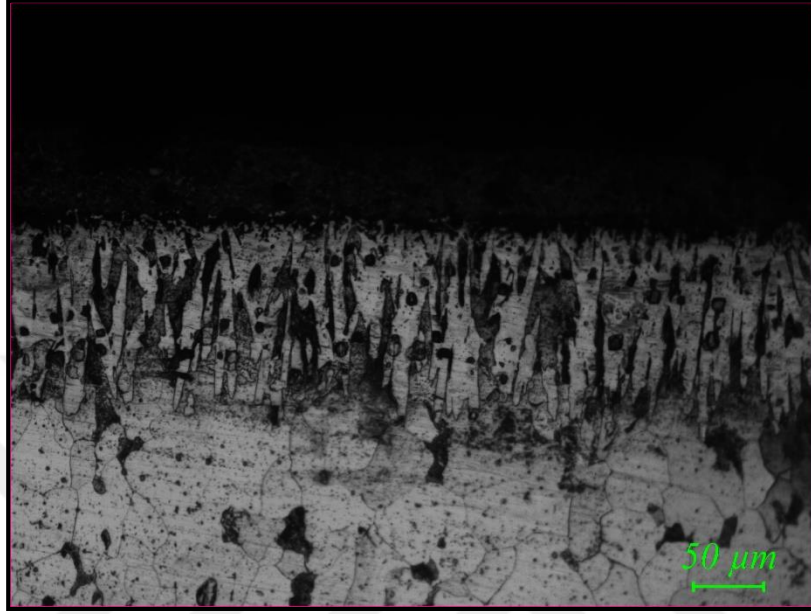
Şekil 5.117. 0M85-3 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.

Şekil 5.118. 'de 0M85-3 kodlu numunenin XRD analiz sonucu verilmiştir. Grafiğe bakıldığında numune üzerindeki piklerin sadece Fe_2B bileşiğine ait olduğu saptanmıştır. XRD incelemesiyle borun yapıya difüze olduğu ve yüzeyde Fe_2B tabakasının oluştuğu tespit edilmiştir. MA işlemi ile elde edilen jelle, 850 °C 'de 3 saat borlanan numune yüzeyinde borür tabakasının oluşturulduğu sonucuna varılmıştır.



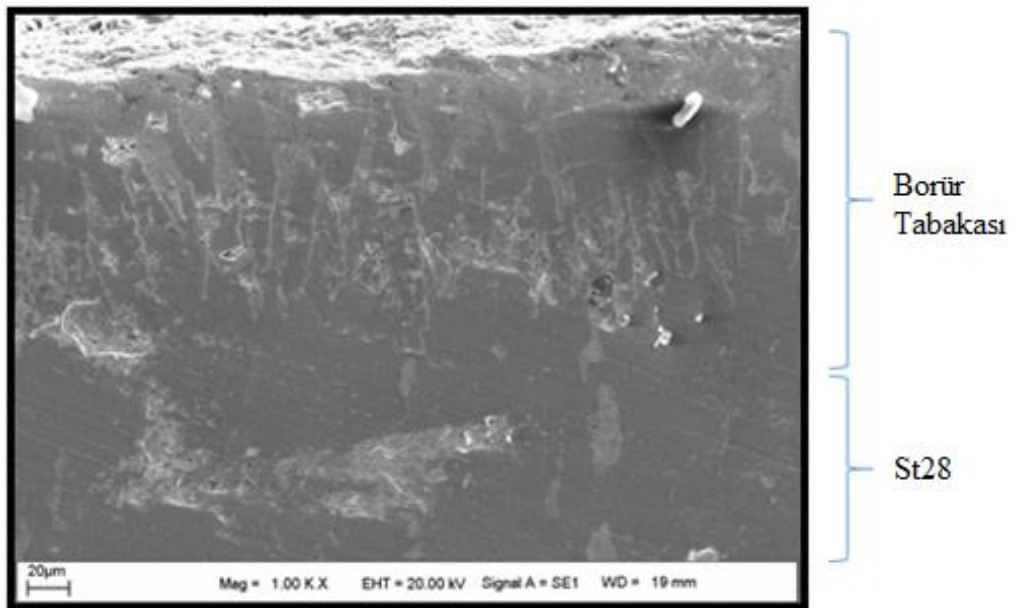
Şekil 5.118. 0M85-3 kodlu numuneye ait XRD grafiği.

10 saat MA işlemi sonucu elde edilen jel kullanılarak, 3 saat 850°C 'da borlama yapılmış 10M85-3 kodlu numuneye ait mikroyapı Şekil 5.119. 'da verilmiştir. Oluşması beklenen borür tabakasının karakteristik testere dişi yapısı şekilde belirgin olarak görülmektedir.



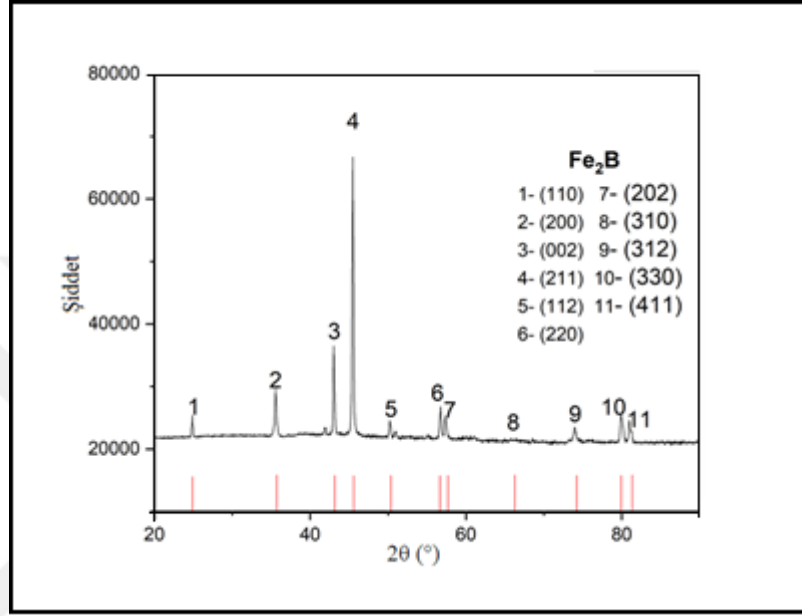
Şekil 5.119. 10M85-3 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (200x).

Şekil 5.120. 'de 10M85-3 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü verilmiştir. Numuneye ait mikroyapı görüntüsünde olduğu gibi, yüzeydeki karakteristik borür tabakası teyit edilmiştir.



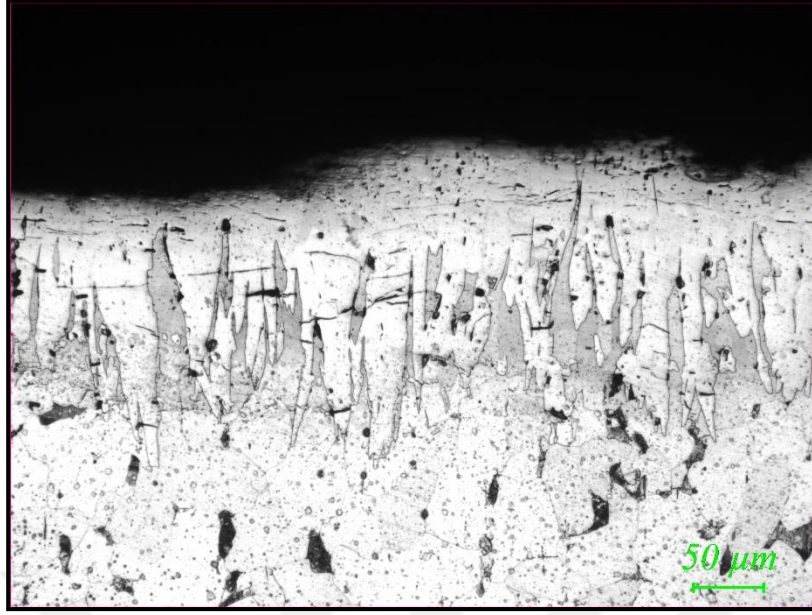
Şekil 5.120. 10M85-3 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.

Şekil 5.121. 'de 10M85-3 kodlu numunenin XRD analiz sonucu verilmiştir. Grafiğe bakıldığında numune üzerindeki piklerin sadece Fe_2B bileşiğine ait olduğu saptanmıştır. XRD incelemesiyle borun yapıya difüze olduğu ve yüzeyde Fe_2B tabakasının oluştuğu tespit edilmiştir. 10 saat MA işlemi ile elde edilen jel kullanılarak, 850 °C 'de 3 saat borlanan numune yüzeyinde borür tabakasının oluşturulduğu sonucuna varılmıştır.



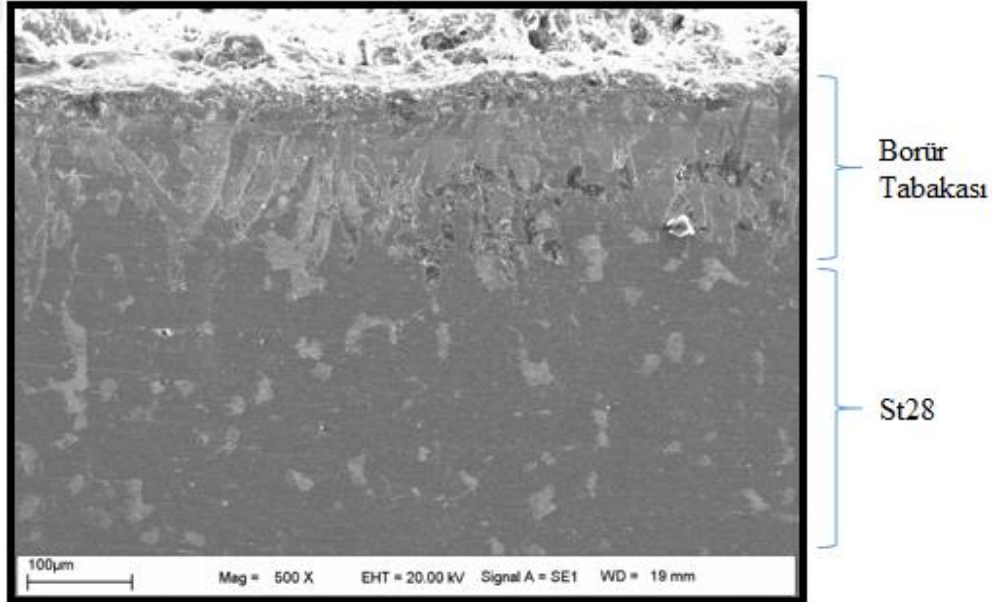
Şekil 5.121. 10M85-3 kodlu numuneye ait XRD grafiği.

20 saat MA işlemi sonucu elde edilen jel kullanılarak, 3 saat 850°C 'da borlama yapılmış 20M85-3 kodlu numuneye ait mikroyapı Şekil 5.122. 'de verilmiştir. Bu şartlar altında oluşması beklenen borür tabakasının karakteristik testere dişi morfolojisinde oluştuğu görülmektedir.



Şekil 5.122. 20M85-3 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (200x).

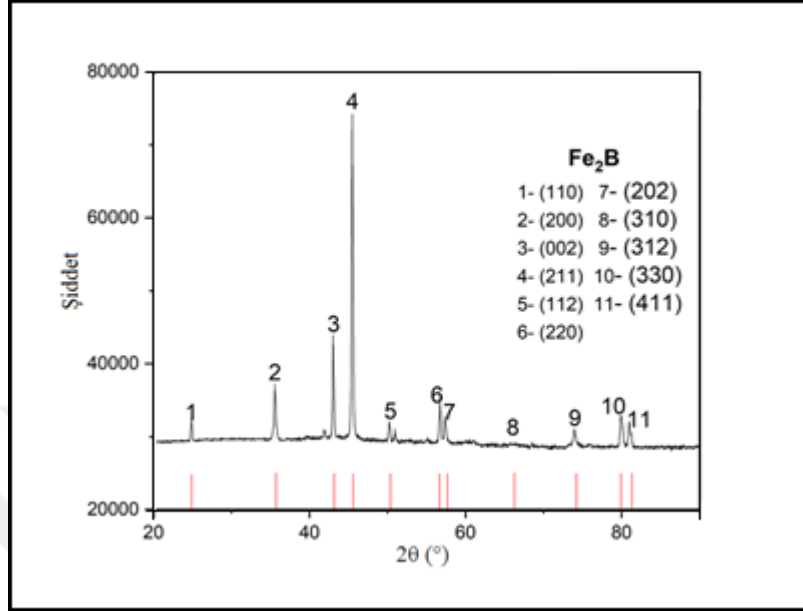
Şekil 5.123. 'de 20M85-3 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü verilmiştir. Numuneye ait mikroyapı görüntüsünde olduğu gibi, yüzeyde ki borür tabakası belirlenmiştir.



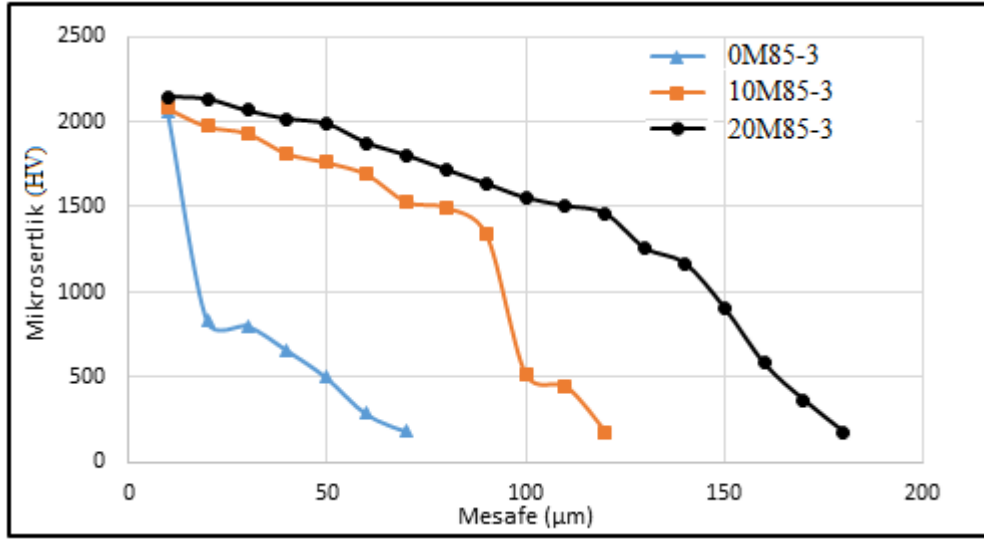
Şekil 5.123. 20M85-3 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.

Şekil 5.124. 'de 20M85-3 kodlu numunenin XRD analiz sonucu verilmiştir. Grafiğe bakıldığında numune üzerindeki piklerin sadece Fe_2B bileşiğine ait olduğu saptanmıştır. XRD incelemesiyle borun yapıya difüze olduğu ve yüzeyde Fe_2B tabakasının oluştuğu tespit edilmiştir.

20 saat MA işlemi yapılarak, 850 °C ‘de 3 saat borlama şartları altında numune yüzeyinde borür tabakasının oluşturulduğu sonucuna varılmıştır.

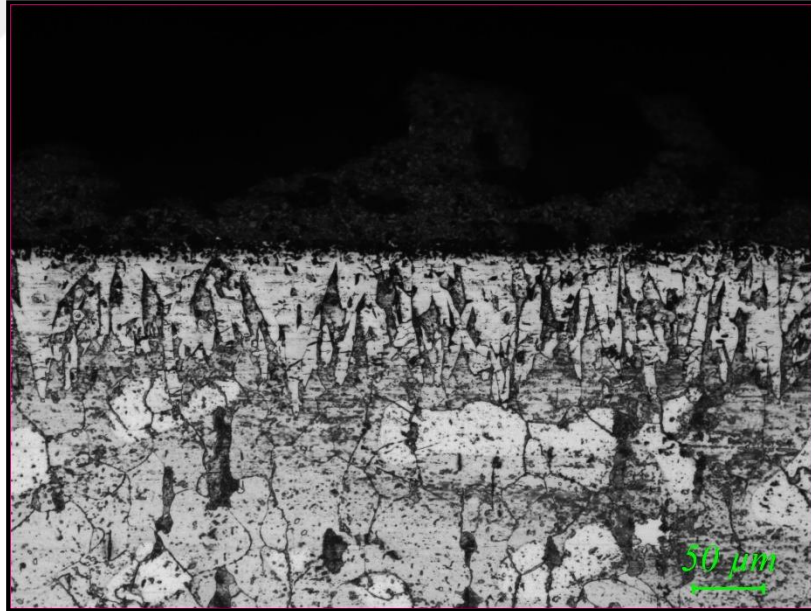


Şekil 5.125. ‘de 0M85-3, 10M85-3 ve 20M85-3 kodlu numunelere ait yüzeyden matrise doğru ölçülmüş Mikrosertlik-Mesafe grafiği verilmiştir. Genel olarak, yüzeyden matrise doğru gidildikçe Mikrosertlik değerlerinde azalmalar meydana gelmiştir. Isıl işlem sıcaklığının 850 °C ‘ye yükseltilmesiyle birlikte MA yapılmış ve yapılmamış jelle borlanan numunelerin yüzeye yakın bölgelerinden alınan ölçümler arasında ciddi farklar ortaya çıkmaya başlamıştır. Difüzyon için 3 saat gibi kısa bir süreye rağmen MA işlemi ile birlikte ikinci ölçümlerden sonra meydana gelen Mikrosertlik değerleri düşüşlerinin önüne geçilmiştir. Artan tabaka kalınlıkları ile birlikte mikrosertlik değerlerindeki sert düşüşlerin yaşandığı bölgenin derinliği MA işlem süresindeki artışla artmıştır.



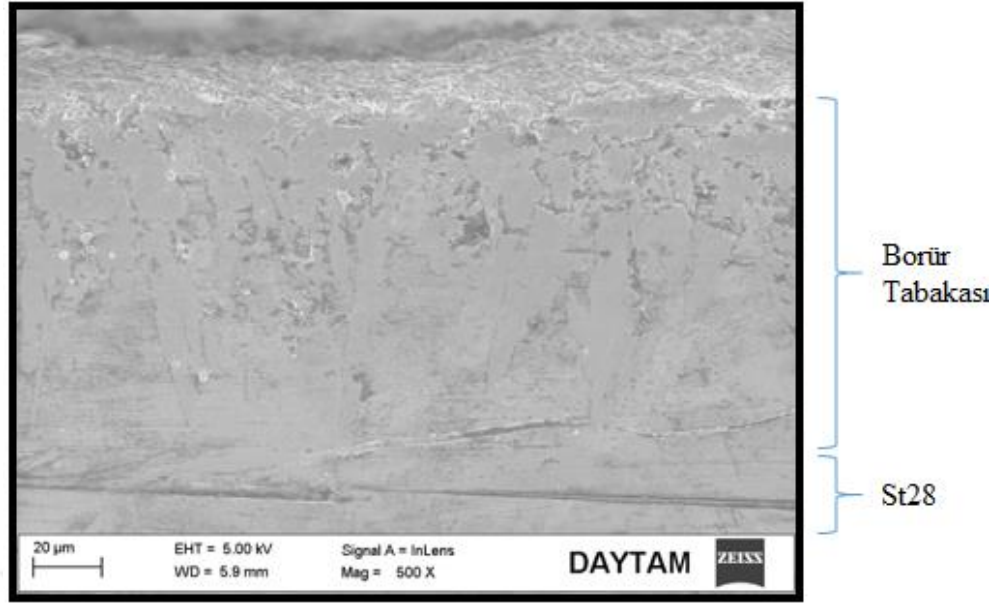
Şekil 5.125. 0M85-3, 10M85-3 ve 20M85-3 kodlu numunelere ait Mikrosertlik-Mesafe grafiği.

MA işlemi yapılmamış jel kullanılarak, 850 °C ‘de 6 saat borlama ısıt işlemi yapılmış 0M85-6 kodlu numuneye ait mikroyapı Şekil 5.126. ‘da verilmiştir. Bu şartlar altında oluşması beklenen borür tabakasının testere dişi halinde oluştuğu görüntülenmiştir.



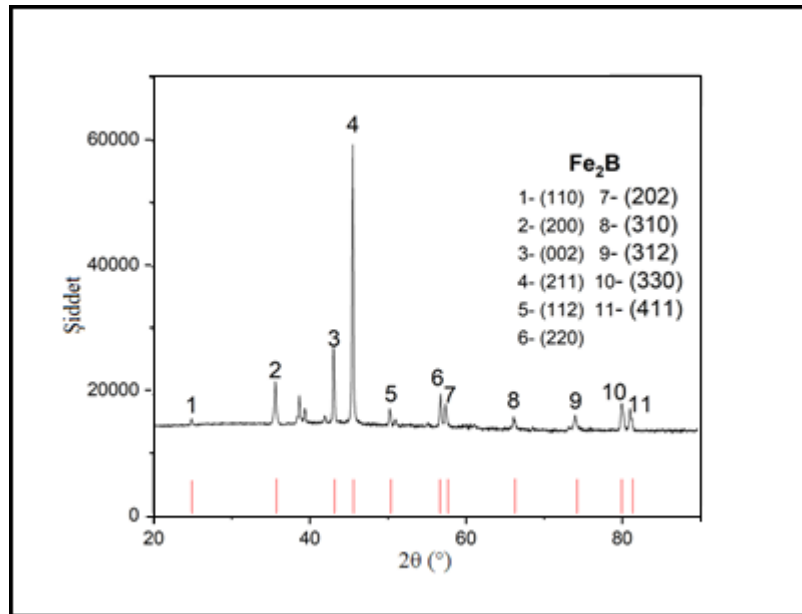
Şekil 5.126. 0M85-6 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (200x).

Şekil 5.127. ‘de 0M85-6 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü verilmiştir. Numuneye ait mikroyapı görüntüsünde olduğu gibi, yüzeyde borür tabakasının olduğu anlaşılmaktadır.



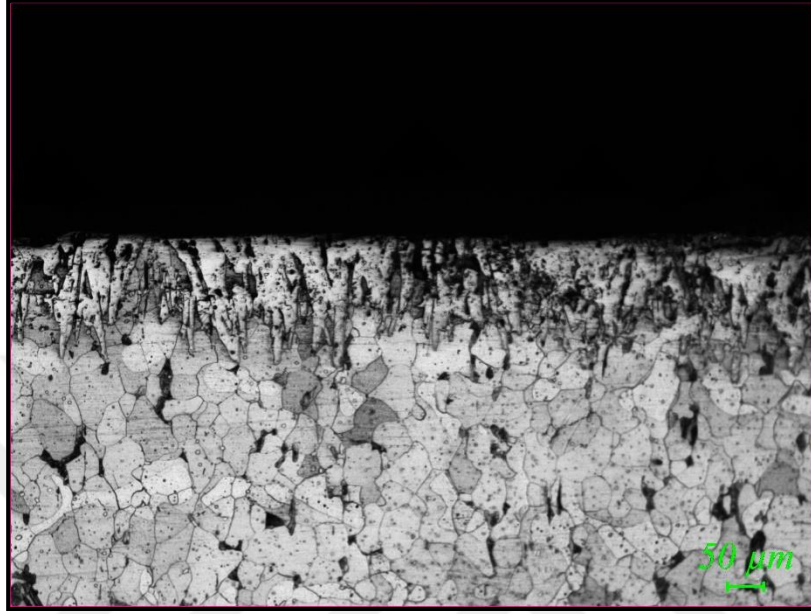
Şekil 5.127. 0M85-6 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.

Şekil 5.128. 'de 0M85-6 kodlu numunenin XRD analiz sonucu verilmiştir. Grafiğe bakıldığında numune üzerindeki piklerin sadece Fe_2B bileşiğine ait olduğu saptanmıştır. XRD incelemesiyle borun yapıya difüze olduğu ve yüzeyde Fe_2B tabakasının oluştuğu tespit edilmiştir. MA işlemi yapılmadan, 850 °C ve 6 saat borlama şartları altında numune yüzeyinde borür tabakasının oluşturulduğu sonucuna varılmıştır.



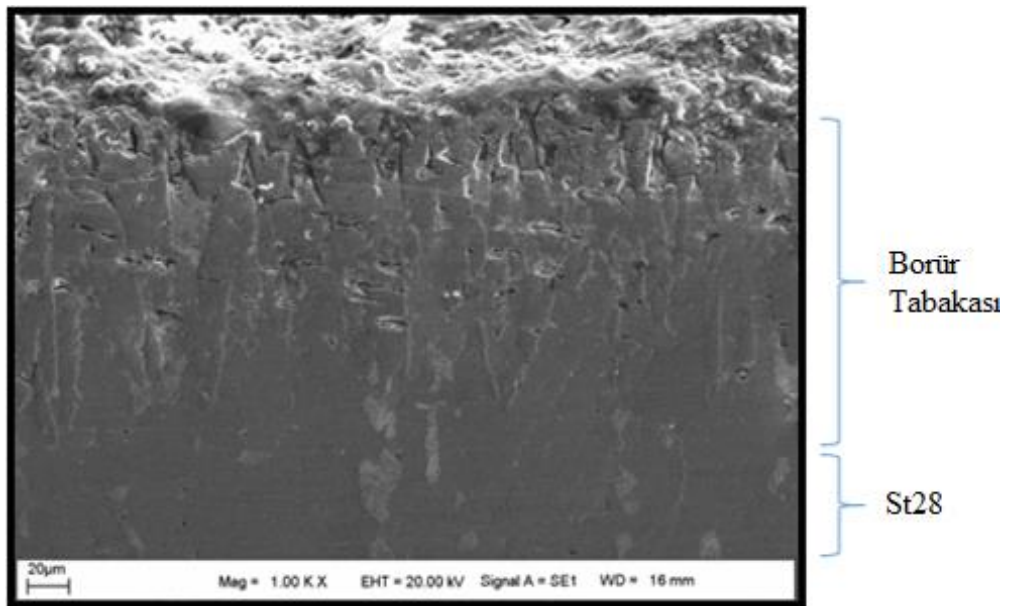
Şekil 5.128. 0M85-6 kodlu numuneye ait XRD grafiği.

10 saat MA işlemi sonucu elde edilen jel kullanılarak, 6 saat 850°C 'da borlama yapılmış 10M85-6 kodlu numuneye ait mikroyapı Şekil 5.129. 'de verilmiştir. Bu şartlar altında oluşması beklenen borür tabakasının karakteristik testere dişi morfolojisindedir.



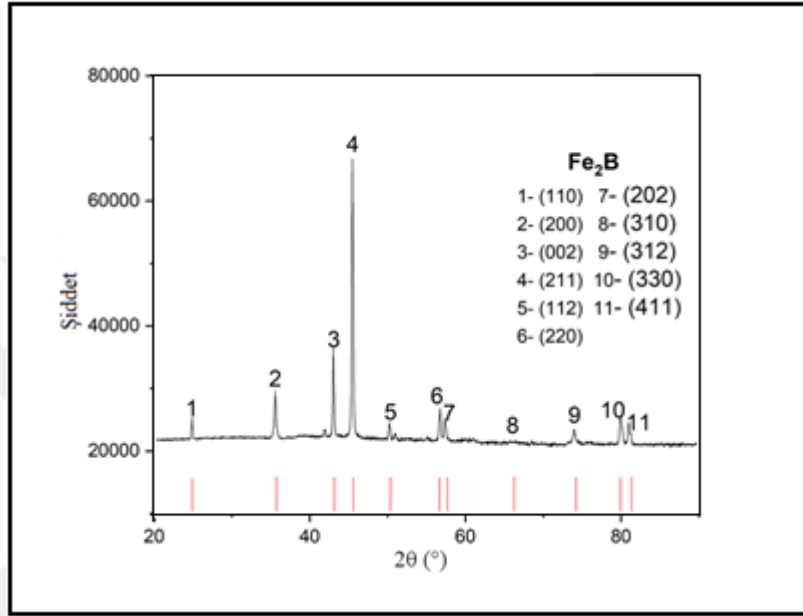
Şekil 5.129. 10M85-6 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (100x).

Şekil 5.130. 'da 10M85-6 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü verilmiştir. Numuneye ait mikroyapı görüntüsünde olduğu gibi, yüzeyde borür tabakasına rastlanılmıştır.



Şekil 5.130. 10M85-6 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.

Şekil 5.131. 'de 10M85-6 kodlu numunenin XRD analiz sonucu verilmiştir. Grafiğe bakıldığında numune üzerindeki piklerin sadece Fe_2B bileşiğine ait olduğu saptanmıştır. XRD incelemesiyle borun yapıya difüze olduğu ve yüzeyde Fe_2B tabakasının oluştuğu tespit edilmiştir. 10 saat MA işlemi yapılarak, 850 °C ve 6 saat borlama şartları altında numune yüzeyinde borür tabakasının oluşturulduğu sonucuna varılmıştır.



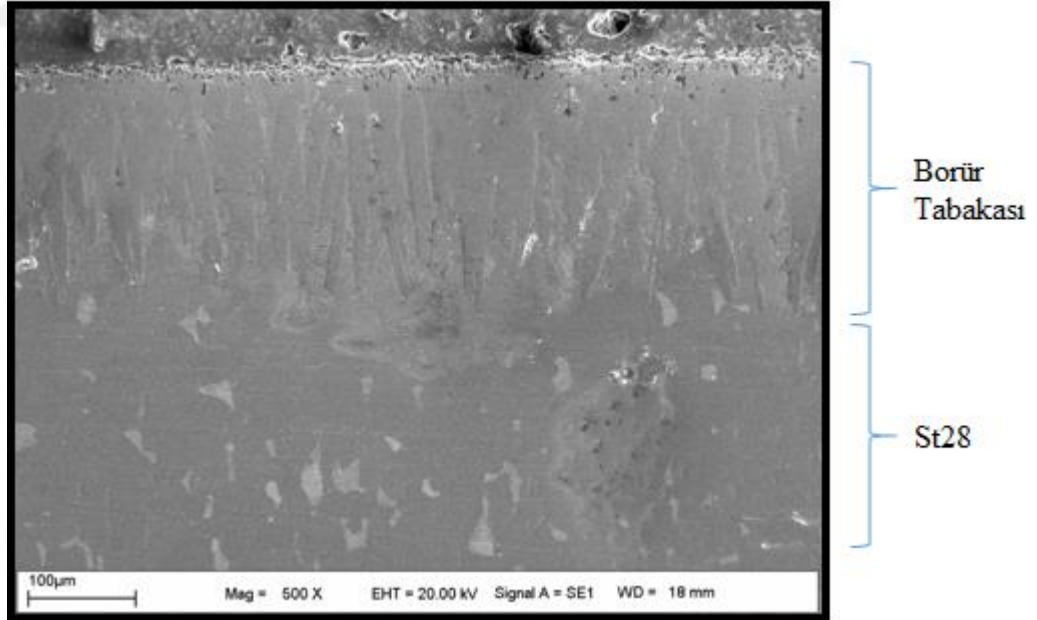
Şekil 5.131. 10M85-6 kodlu numuneye ait XRD grafiği.

20 saat MA işlemi sonucu elde edilen jel kullanılarak, 6 saat 850°C 'da borlama yapılmış 20M85-6 kodlu numuneye ait mikroyapı Şekil 5.132. 'de verilmiştir. Bu şartlar altında oluşması beklenen borür tabakasının karakteristik testere dişi morfolojisi belirgin bir şekilde görülmektedir.



Şekil 5.132. 20M85-6 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (100x).

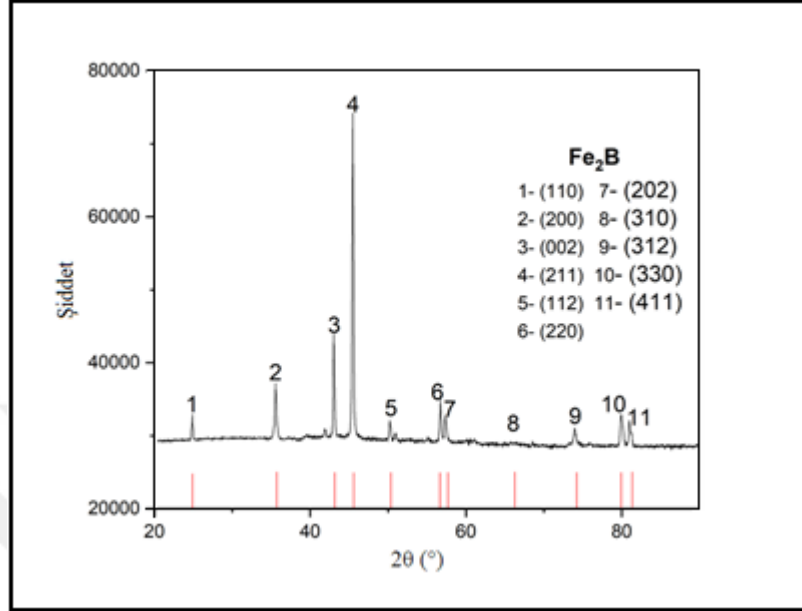
Şekil 5.133. 'de 20M85-6 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü verilmiştir. Numuneye ait mikroyapı görüntüsünde olduğu gibi, yüzeyde ki borür tabakası teyit edilmiştir.



Şekil 5.133. 20M85-6 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.

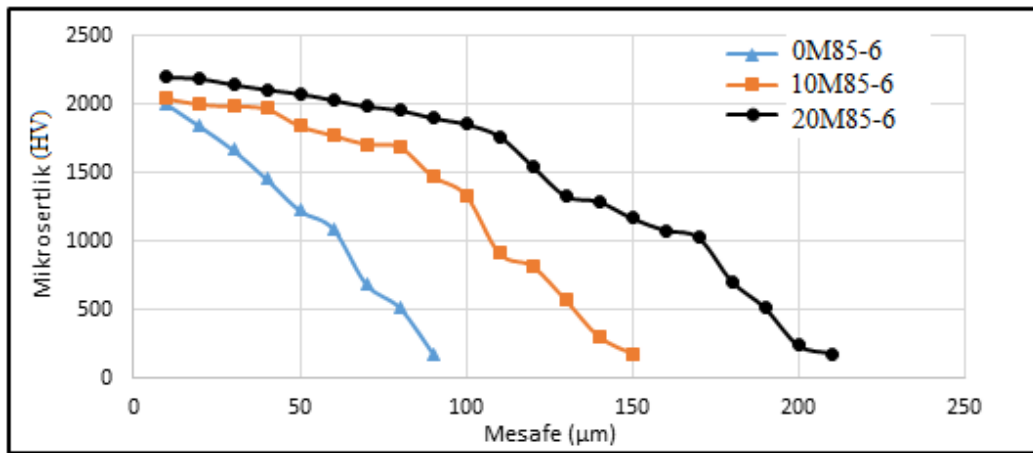
Şekil 5.134. 'de 20M85-6 kodlu numunenin XRD analiz sonucu verilmiştir. Grafiğe bakıldığında numune üzerindeki piklerin sadece Fe_2B bileşiğine ait olduğu saptanmıştır. XRD incelemesiyle borun yapıya difüze olduğu ve yüzeyde Fe_2B tabakasının oluştuğu tespit edilmiştir.

20 saat MA işlemi yapılarak, 850 °C ve 6 saat borlama şartları altında numune yüzeyinde borür tabakasının oluşturulduğu sonucuna varılmıştır.



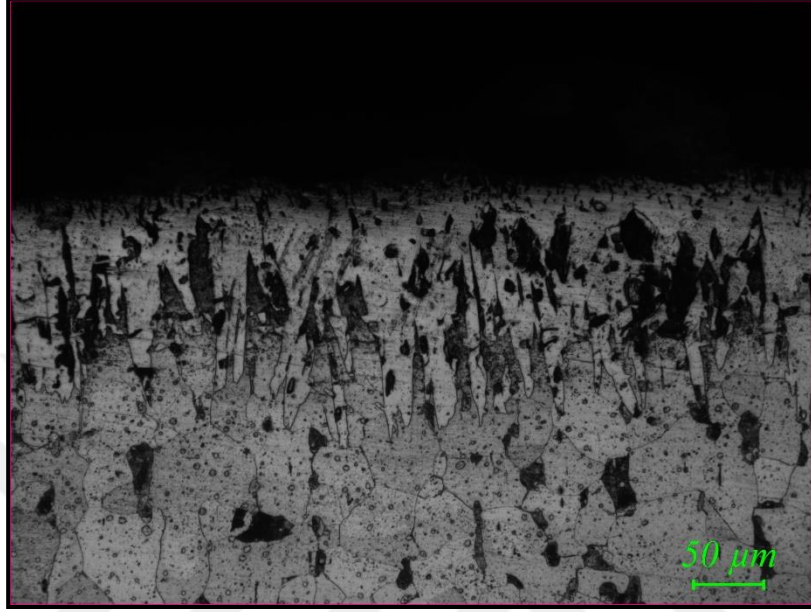
Şekil 5.134. M2020M85-6 kodlu numuneye ait XRD grafiği.

Şekil 5.135. ‘de 0M85-6, 10M85-6 ve 20M85-6 kodlu numunelere ait yüzeyden matrise doğru ölçülmüş Mikrosertlik-Mesafe grafiği verilmiştir. Genel olarak, yüzeyden matrise doğru gidildikçe Mikrosertlik değerlerinde azalmalar meydana gelmiştir. 10 ve 20 saat MA yapılmış tozlardan üretilen jelle borlama işlemi yapılmış numunelerden alınan ilk ölçümlerde sertlikte istikrarlı bir düşüş gözlenmesine rağmen MA işlemi yapılmamış numunenin Mikrosertlik değerlerinde hızlı düşüşler gözlenmiştir.



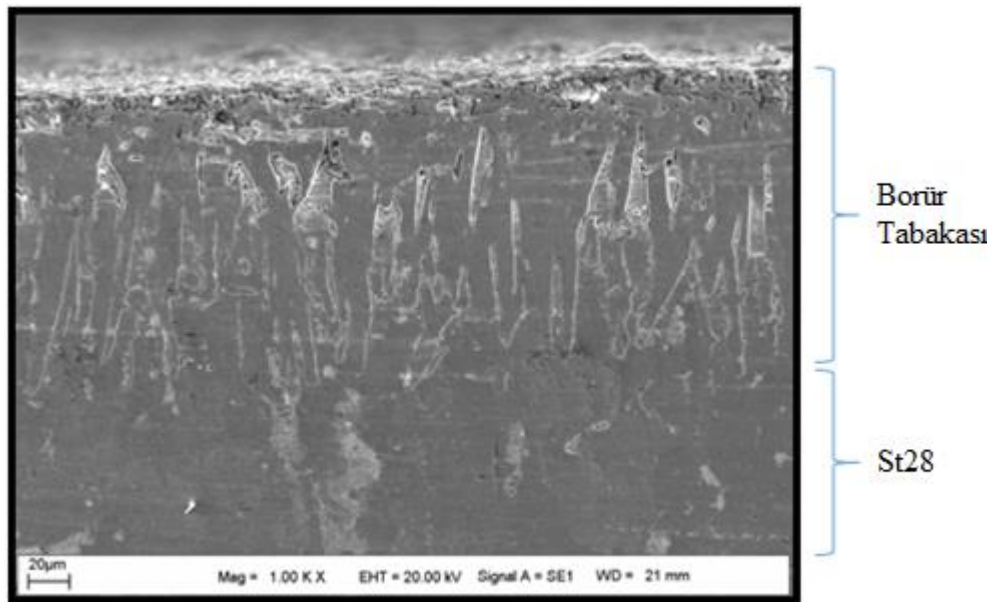
Şekil 5.135. 0M85-6, 10M85-6 ve 20M85-6 kodlu numunelere ait Mikrosertlik-Mesafe grafiği.

MA işlemi yapılmamış jel kullanılarak, 850 °C ‘de 12 saat borlama işlemi yapılmış 0M85-12 kodlu numuneye ait mikroyapı Şekil 5.136. ‘da verilmiştir. Bu şartlar altında oluşması beklenen borür tabakasının testere dişi morfolojisinde olduğu anlaşılmaktadır.



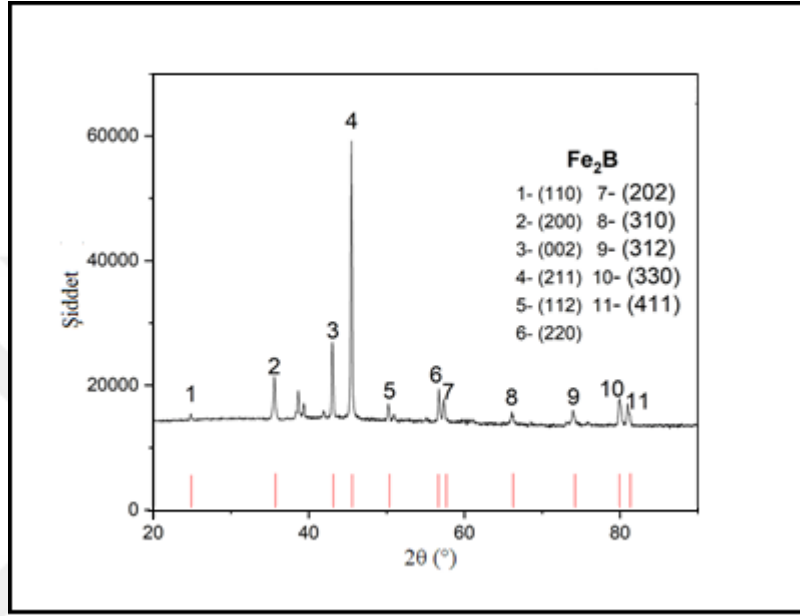
Şekil 5.136. 0M85-12 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (200x).

Şekil 5.137. ‘de 0M85-12 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü verilmiştir. Numuneye ait mikroyapı görüntüsünde olduğu gibi, yüzeyde borür tabakası belirlenmiştir.



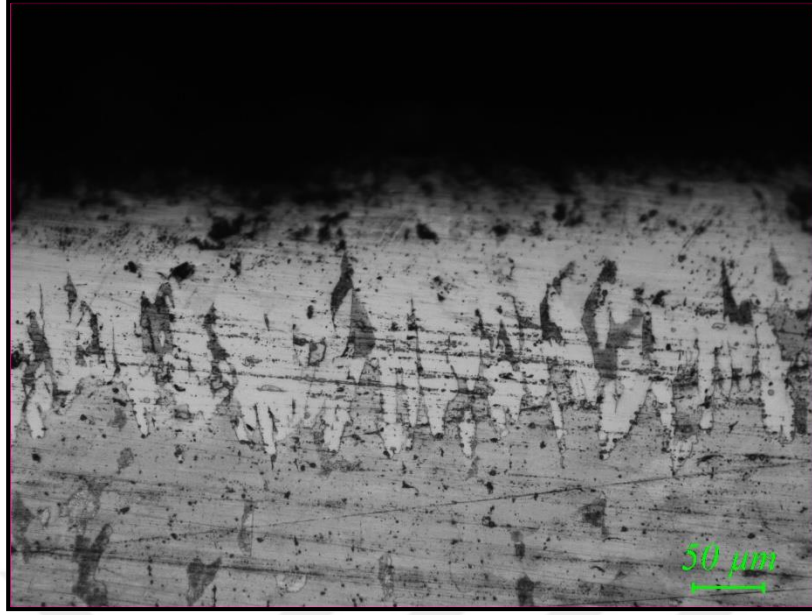
Şekil 5.137. 0M85-12 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.

Şekil 5.138. 'da 0M85-12 kodlu numunenin XRD analiz sonucu verilmiştir. Grafiğe bakıldığında numune üzerindeki piklerin sadece Fe_2B bileşiğine ait olduğu saptanmıştır. XRD incelemesiyle borun yapıya difüze olduğu ve yüzeyde Fe_2B tabakasının oluştuğu tespit edilmiştir. MA işlemi yapılmadan, 850 °C ve 12 saat borlama şartları altında numune yüzeyinde borür tabakasının oluşturulduğu sonucuna varılmıştır.



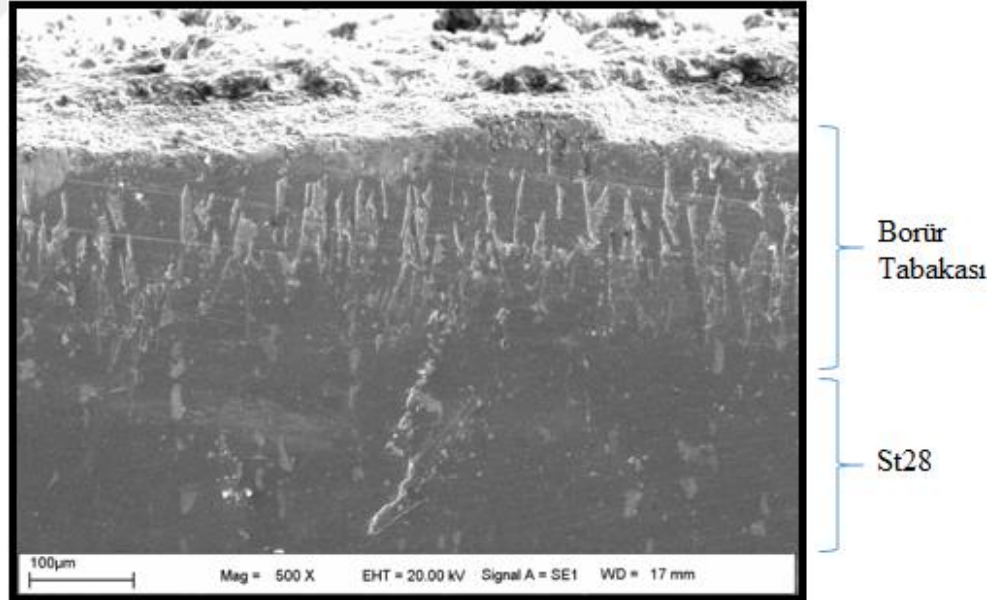
Şekil 5.138. 0M85-12 kodlu numuneye ait XRD grafiği.

10 saat MA işlemi sonucu elde edilen jel kullanılarak, 12 saat 850°C 'da borlama yapılmış 10M85-12 kodlu numuneye ait mikroyapı Şekil 5.139. 'da verilmiştir. Bu şartlar altında oluşması beklenen borür tabakasının karakteristik testere dişi şeklinde oluştuğu görülmektedir.



Şekil 5.139. 10M85-12 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (200x).

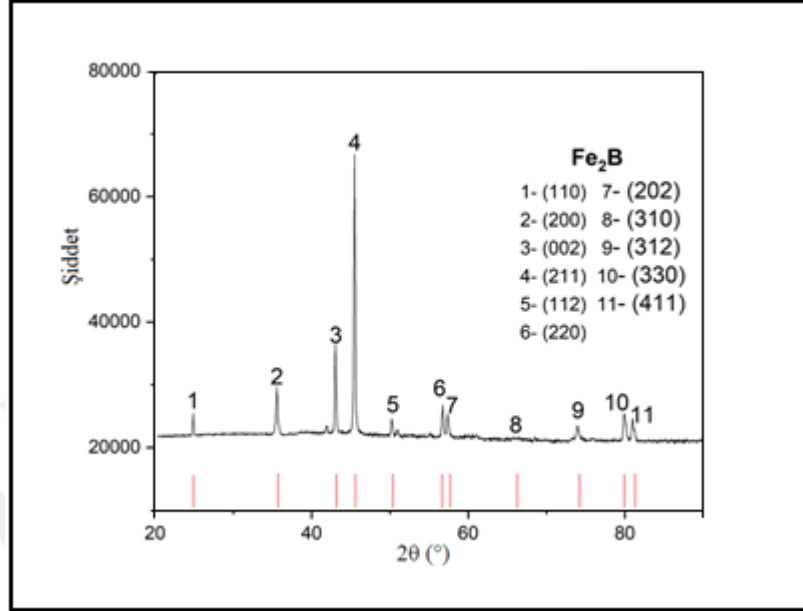
Şekil 5.140. 'da 10M85-12 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü verilmiştir. Numuneye ait mikroyapı görüntüsünde olduğu gibi, yüzeyde borür tabakasına rastlanılmıştır.



Şekil 5.140. 10M85-12 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.

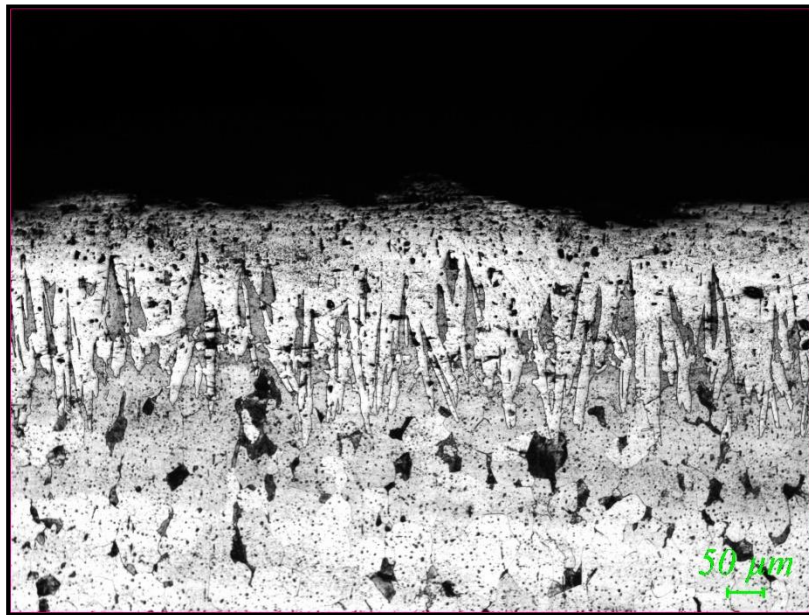
Şekil 5.141. 'de 10M85-12 kodlu numunenin XRD analiz sonucu verilmiştir. Grafiğe bakıldığında numune üzerindeki piklerin sadece Fe_2B bileşiğine ait olduğu saptanmıştır. XRD incelemesiyle borun yapıya difüze olduğu ve yüzeyde Fe_2B tabakasının oluştuğu tespit edilmiştir.

10 saat MA işlemi yapılarak, 850 °C ve 12 saat borlama şartları altında numune yüzeyinde borür tabakasının oluşturulduğu sonucuna varılmıştır.



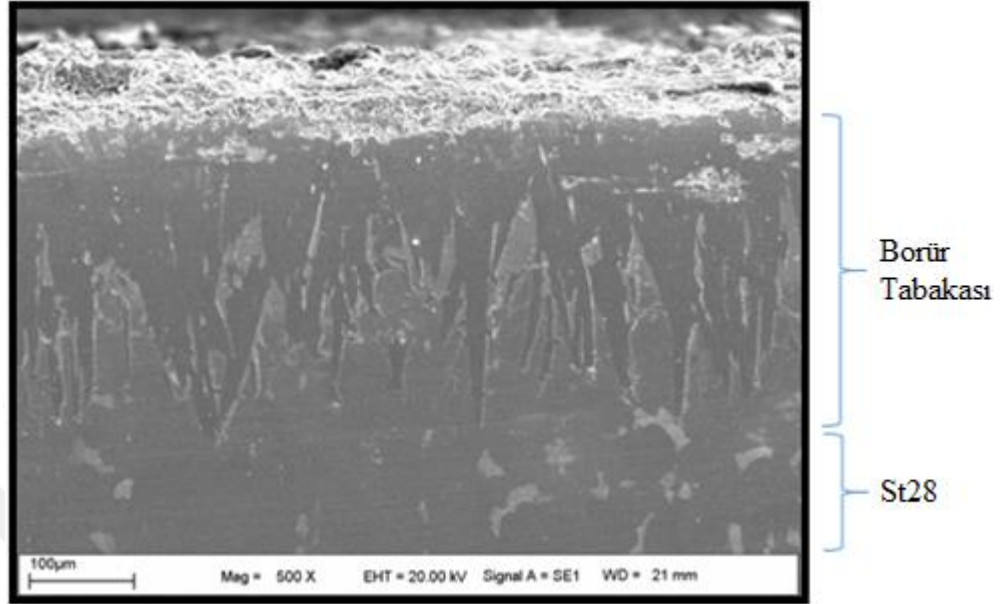
Şekil 5.141. 10M85-12 kodlu numuneye ait XRD grafiği.

20 saat MA işlemi sonucu elde edilen jel kullanılarak, 12 saat 850°C ‘da borlama yapılmış 20M85-12 kodlu numuneye ait mikroyapı Şekil 5.142. ‘de verilmiştir. Bu şartlar altında oluşması beklenen borür tabakasının karakteristik testere dişi morfolojisi şekilden anlaşılmaktadır.



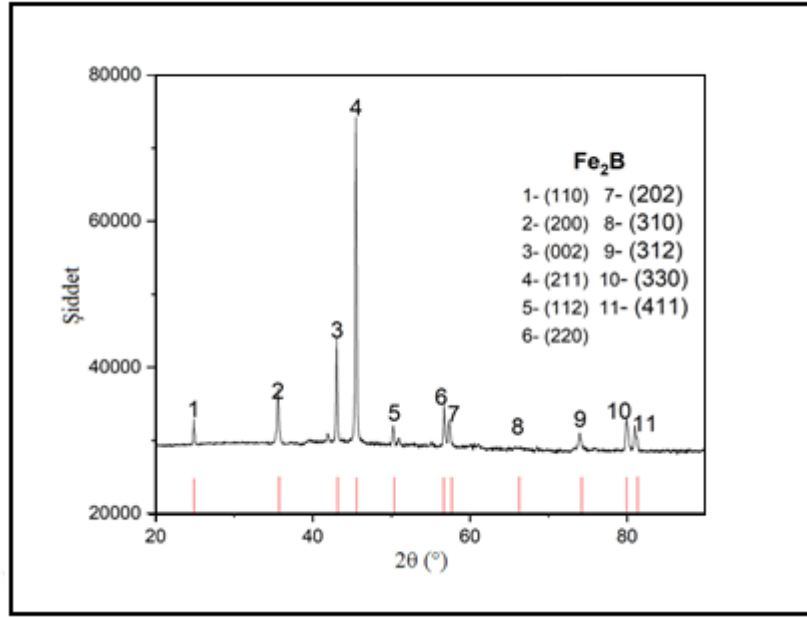
Şekil 5.142. 20M85-12 kodlu numuneye ait mikroyapı görüntüsü (100x).

Şekil 5.143. 'de 20M85-12 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü verilmiştir. Numuneye ait mikroyapı görüntüsünde olduğu gibi, yüzeyde ki karakteristik testere morfolojisi teyit edilmiştir.



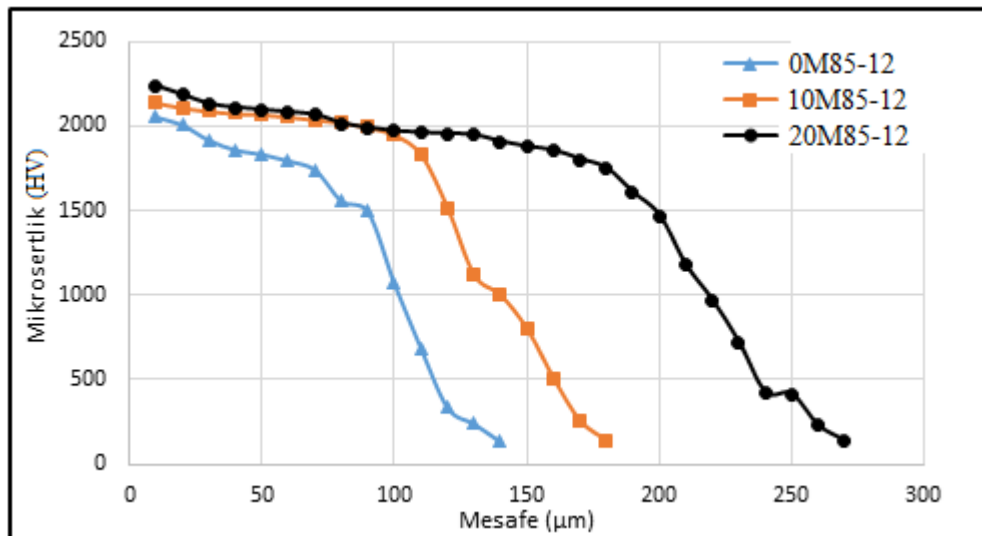
Şekil 5.143. 20M85-12 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.

Şekil 5.144. 'de 20M85-12 kodlu numunenin XRD analiz sonucu verilmiştir. Grafiğe bakıldığında numune üzerindeki piklerin sadece Fe_2B bileşiğine ait olduğu saptanmıştır. XRD incelemesiyle borun yapıya difüze olduğu ve yüzeyde Fe_2B tabakasının oluştuğu tespit edilmiştir. 20 saat MA işlemi yapılarak, 850 °C ve 12 saat borlama şartları altında numune yüzeyinde borür tabakasının oluşturulduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 5.144. 20M85-12 kodlu numuneye ait XRD grafiği.

Şekil 5.145. 'de 0M85-12, 10M85-12 ve 20M85-12 kodlu numunelere ait yüzeyden matrise doğru ölçülmüş Mikrosertlik-Mesafe grafiği verilmiştir. Genel olarak, yüzeyden matrise doğru gidildikçe Mikrosertlik değerlerinde azalmalar meydana gelmiştir. Mikrosertlik ölçümlerine bakıldığında, ilk defa bir serinin bütün numunelerinden alınan ilk ölçümlerde kararlı azalışlar görülmüştür. MA işlemi sonucu elde edilen jel kullanılarak borlanan numunelerde bu durum önceden de görülmesine rağmen MA işlemi yapılmamış jelle borlanan numunede bu durum ilk defa tespit edilmiştir.



Şekil 5.145. 0M85-12, 10M85-12 ve 20M85-12 kodlu numunelere ait Mikrosertlik-Mesafe grafiği.

5.3. Borür Tabakalarının Kinetik Analizleri

Yüzey sertleştirme işlemlerinden biri olan borlama, yüksek sıcaklık ve sürelerde yapılması gerektiğinden dolayı uygulanışı zor, uygulama alanı ise sınırlıdır. Uzun sürelerde yapılan araştırmalar neticesinde kutu borlama gibi klasik metotların yanına iyon implantasyonu[177], plazma borlama[14] ve elektrokimyasal borlama[178] gibi yeni yöntemler de eklenmiştir. Yeni tekniklerle uygulama alanı genişlese de imkân ve maliyet açısından bu yeni teknikler de sınırlı kalmaktadır. Literatür araştırmasında borlama için gerekli sıcaklık ve süre ile ilgilenildiği, borlanan malzemelerin mekanik özelliklerinin incelendiği görülmüştür[179]–[188].

Borlama işlemi sırasında ilk olarak numunenin yüzeyinde bor intermetalliği çekirdekleri oluşur ve bunlar daha sonra borlanacak malzemeye doğru büyür. Borun atom yoğunluğu, Fe_2B 'nin hacim merkezli tetragonal örgüsünde [001] kristalografik yön boyunca maksimumdur. Bu yön, borun kafes difüzyonu için en kolay yoldur ve bu nedenle Fe_2B 'deki tercihli büyüme yönü bu yöndedir[3]. Numune yüzeyine dik yöndeki bor intermetalik tanelerinin daha hızlı büyümelerinin sebebi budur.

Literatür araştırmalarında yapılmış çalışmalarda FeB ve Fe_2B olmak üzere 2 farklı bor tabakasından bahsedilmektedir. Optik görüntülere göre, numune yüzeylerinde tek fazlı Fe_2B tabakası olduğu ve tabaka ile çelik matris arasında büyük taneciklere sahip bir geçiş bölgesi görülmektedir. Demir borürlerin büyümesi, yüksek düzeyde anizotropik yapıya sahip difüzyon kontrollü bir süreç olarak tanımlandığından, daha yüksek sıcaklıklar ve / veya daha uzun işlem süreleri, Fe_2B kristallerinin bitişik kristallerle temas etmesini ve onları testere dişi morfolojisini korumaya zorlamasını sağlar [189]–[191]. FeB ve Fe_2B bor intermetalikleri içerisinde de sahip olduğu mekanik özelliklerinden dolayı FeB 'nin olmaması veya mümkün olduğunca düşük kalınlıklarda olması istenilmektedir. Borlama esnasında yapı içerisinde oluşacak Fe_2B 'yi olduğunca hâkim kılmak için uygulanması gereken en basit metot Fe-B denge diyagramında FeB (%16,2) intermetalliğini oluşturmayacak Fe_2B (%8,83) kimyasal kompozisyonunu kullanmak olduğu görülmektedir. Yapılan bu çalışmada bor tabakasının tek fazlı olmasının sebebi olarak başlangıçta tercih edilen bu kompozisyon gösterilebilir.

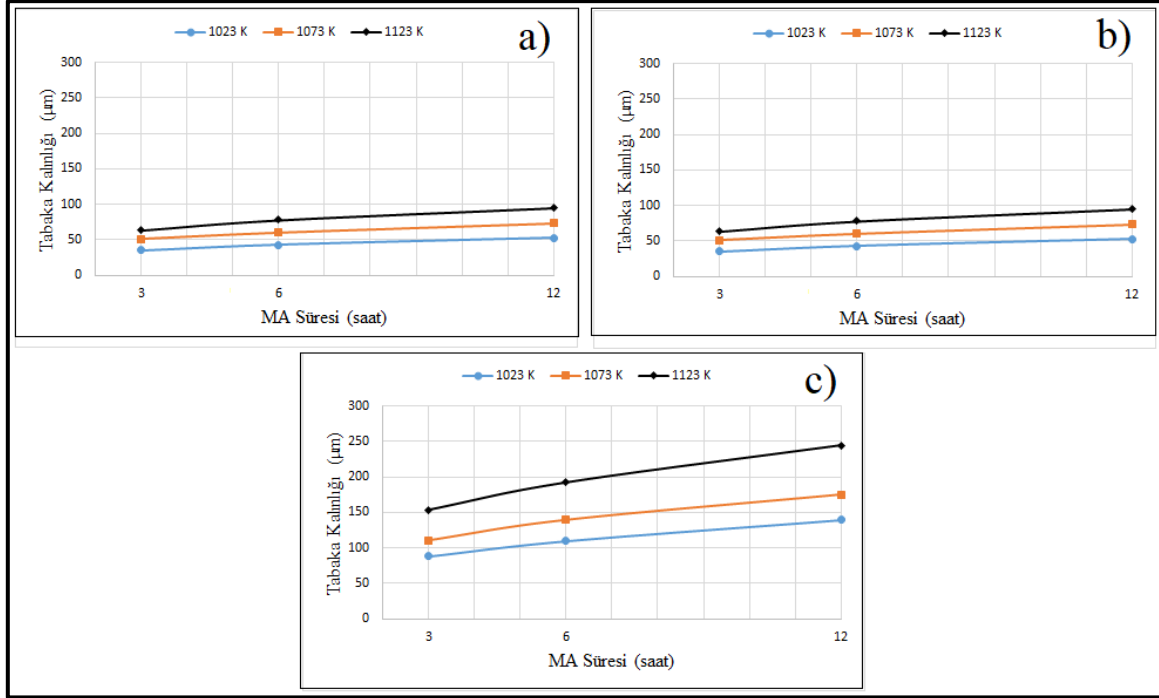
Borlama işlemi sıcaklık ve süre ile doğrudan ilişkili olmasının yanında borlanacak malzeme ile de dolaylı olarak ilişkilidir. Kullanılacak çeliğin içeriğindeki karbon, nikel, krom, mangan gibi elementler bor tabaka kalınlığını etkilemektedir. DIN St28 çeliğinde bor tabakasını baskılayabilecek herhangi bir element bulunmadığından (Tablo 4.1.) başka elementlerin etkisi yok denilebilecek kadar azdır.

Numunelerin farklı MA süreleri ve borlama ısı işlem sıcaklıklarına göre bor tabaka kalınlıkları Tablo 5.3. 'de verilmiştir.

Tablo 5.3. Numunelerin Borür Tabakası Ortalama Kalınlıkları.

Numune Adı	Tabaka Kalınlığı (µm)
0M65-3	-
10M65-3	-
20M65-3	-
0M65-6	-
10M65-6	4,91
20M65-6	10,15
0M65-12	-
10M65-12	6,69
20M65-12	10,58
0M70-3	-
10M70-3	12,72
20M70-3	16,72
0M70-6	-
10M70-6	25,61
20M70-6	32,91
0M70-12	36,67
10M70-12	46,52
20M70-12	59,39
0M75-3	35,30
10M75-3	50,93
20M75-3	88,07
0M75-6	43,10
10M75-6	62,76
20M75-6	109,59
0M75-12	52,46
10M75-12	98,05
20M75-12	139,24
0M80-3	51,32
10M80-3	66,40
20M80-3	110,88
0M80-6	60,08
10M80-6	92,56
20M80-6	139,72
0M80-12	73,20
10M80-12	121,14
20M80-12	175,40
0M85-3	63,86
10M85-3	90,05
20M85-3	153,69
0M85-6	77,97
10M85-6	110,70
20M85-6	192,27
0M85-12	95,01
10M85-12	173,80
20M85-12	244,50

Şekil 5.146. ‘da borür tabaka kalınlıklarının MA işlem süresi ve borlama parametreleri ile olan ilişkisi grafik halinde verilmiştir.



Şekil 5.146. Borür tabaka kalınlığının borlama süresi ve sıcaklığa göre değişimi; a) MA Yapılmamış, b) 10 saat MA, c) 20 saat MA yapılmış.

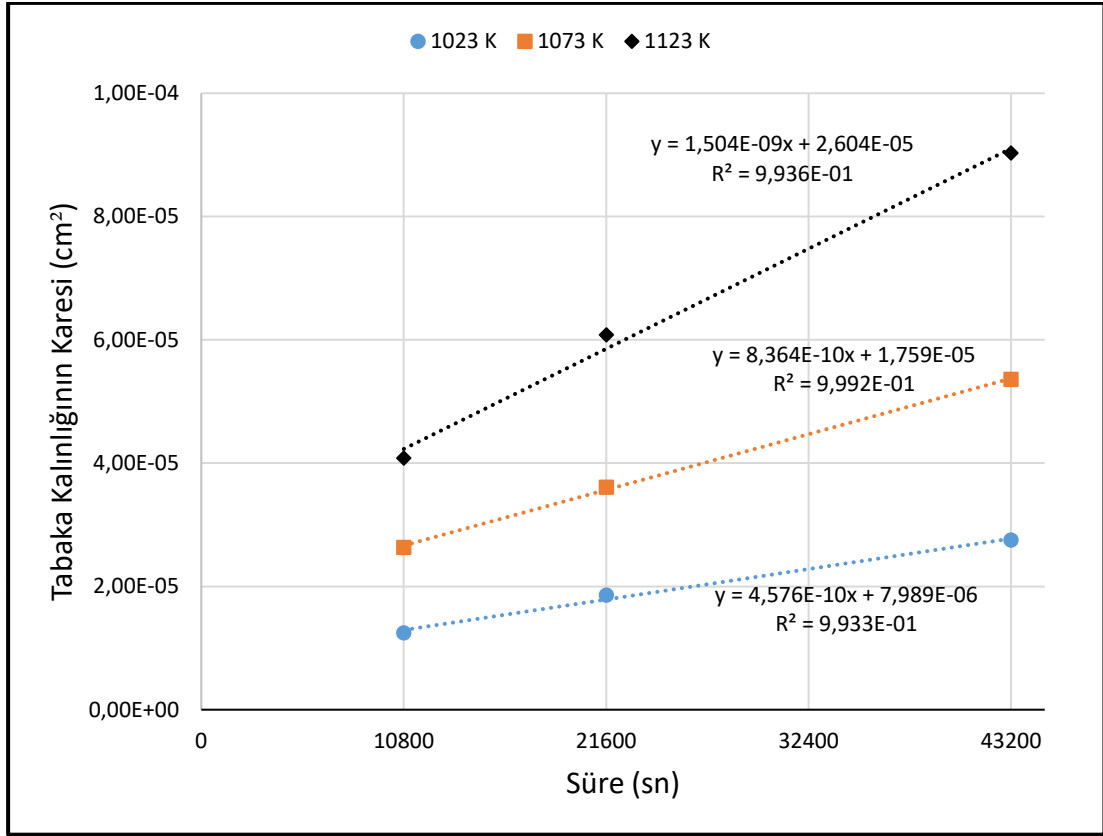
Borür tabaka kalınlıklarından faydalanarak bu tabakaların kinetik açıdan incelenmesi mümkündür. İlk olarak borun difüzyon katsayısının tespitini yapabilmek için denklem 2.9 kullanılabilir.

$$d^2 = D \cdot t \quad (2.9) [192]$$

d: Borür tabaka kalınlığının karesi (cm^2), D: Difüzyon Katsayısı ($\text{cm}^2 \text{sn}^{-1}$), t: İşlem süresi (sn).

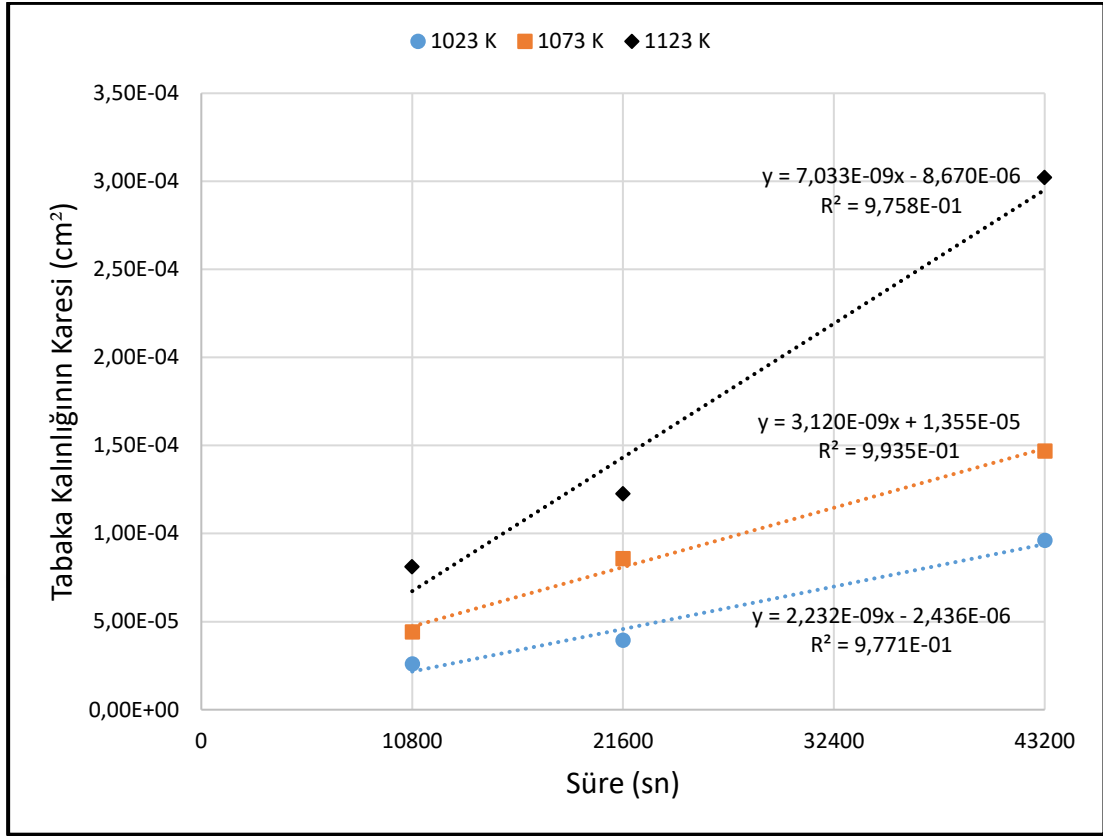
d^2 ile t arasındaki ilişkiyi gösteren grafiğin eğimi D ‘yi vermektedir. Aynı zamanda yayınma hızını belirleyen Difüzyon Katsayısı, malzemeye göre değişmektedir.

Şekil 5.147. ‘de MA işlemi yapılmamış jel kullanılarak borlama yapılmış numunelere ait d^2 -t grafiği verilmiştir. Her bir eğrinin eğimiyle, Bor atomunun o şartlarda borlanan malzeme içerisindeki difüzyon katsayısı hesaplanabilir [18]. Bu bağlamda MA işlemi yapılmamış jel kullanılarak borlanan numunelerin difüzyon katsayısı 1023 K (750 °C) için $4,576 \times 10^{-10}$, 1073 K (800 °C) için $8,364 \times 10^{-10}$ ve 1123 K (850 °C) için ise $15,042 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s}$ olarak hesaplanmıştır. Artan ısı işlem sıcaklıklarıyla birlikte difüzyon katsayısında artış gözlemlenmektedir.



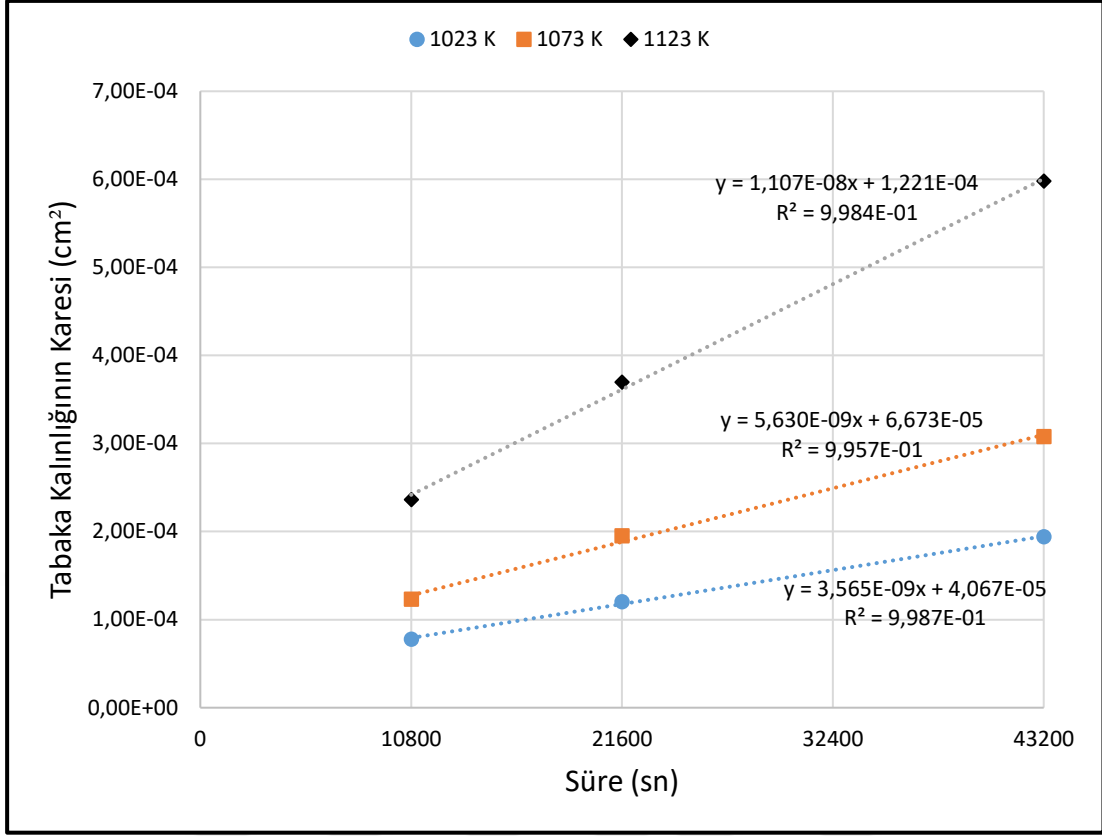
Şekil 5.147. MA işlemi yapılmamış jel kullanılarak borlama yapılmış numunelere ait d^2-t grafiği.

Şekil 5.148. 'de 10 saat MA işlemi yapılmış jel kullanılarak borlama yapılmış numunelere ait d^2-t grafiği verilmiştir. Her bir eğrinin eğimiyle, Bor atomunun o şartlarda borlanan malzeme içerisindeki difüzyon katsayısı gösterilmiştir. Bu bağlamda 10 saat MA işlemi yapılmış jel kullanılarak borlanan numunelerin difüzyon katsayısı 1023 K (750 °C) için $2,232 \times 10^{-9}$, 1073 K (800 °C) için $3,120 \times 10^{-9}$ ve 1123 K (850 °C) için ise $7,033 \times 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$ olarak hesaplanmıştır. Artan MA işlem süresiyle birlikte difüzyon katsayısında artış gözlemlenmektedir.



Şekil 5.148. 10 saat MA işlemi yapılmış jel kullanılarak borlama yapılmış numunelere ait d^2-t grafiği.

Şekil 5.149. 'da 20 saat MA işlemi yapılmış jel kullanılarak borlama yapılmış numunelere ait d^2-t grafiği verilmiştir. Her bir eğrinin eğimiyle, Bor atomunun o şartlarda borlanan malzeme içerisindeki difüzyon katsayısı gösterilmiştir. Bu bağlamda 20 saat MA işlemi yapılmış jel kullanılarak borlanan numunelerin difüzyon katsayısı 1023 K (750 °C) için $3,565 \times 10^{-9}$, 1073 K (800 °C) için $5,630 \times 10^{-9}$ ve 1123 K (850 °C) için ise $11,07 \times 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$ olarak hesaplanmıştır. Artan MA işlem süresiyle birlikte difüzyon katsayısında artış gözlemlenmektedir.



Şekil 5.149. 20 saat MA işlemi yapılmış jel kullanılarak borlama yapılmış numunelere ait d^2-t grafiği.

Artan ısı işlem sıcaklığı ile birlikte hem MA yapılmamış hem de farklı sürelerde MA yapılmış jelin kullanımı ile üretilen numunelerde difüzyon katsayısının arttığı Şekil 5.146. – 5.148. ‘de gösterilmiştir.

Difüzyon katsayısı (D), aktivasyon enerjisi (Q) ve süreç sıcaklığı (T) arasındaki ilişki Arrhenius eşitliği ile belirlenebilir [6, 8, 14, 18].

$$D = D_0 \exp^{-Q/RT} \text{ (Arrhenius Eşitliği)} \quad (2.8)$$

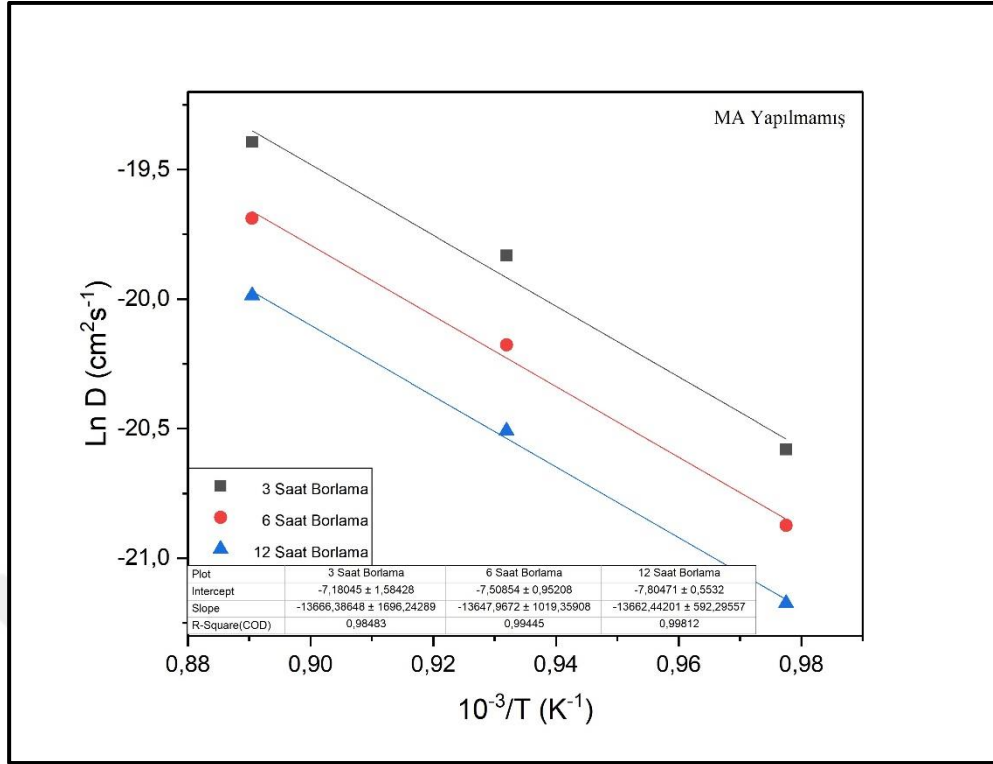
$$\ln D = \ln D_0 + \frac{-Q}{RT} \quad (5.3)$$

şeklinde yazılır.

D_0 ; tabaka büyüme hızını, R; gaz sabitini, T; işlem sıcaklığını ifade etmektedir.

$\ln D - 1/T$ grafiğinin eğimi ile aktivasyon enerjisi (Q) hesaplanmıştır.

Şekil 5.150. ‘de MA işlemi yapılmamış jel kullanılarak borlama yapılan numunelere ait $\ln D - 1/T$ grafiği verilmiştir. MA işlemi yapılmamış jel kullanılarak borlama yapılan numunede aktivasyon enerjisi 113,555 kJ/mol olarak hesaplanmıştır. MA işlemi yapılmadan 700 °C ‘de 12 saat borlama şartlarında borür tabakası elde edilmiş fakat 3 ve 6 saat borlama şartlarında borür tabakası elde edilememiştir. Bu sebeple aktivasyon enerjisi hesaplanırken 700 °C sıcaklık verisi Şekil 5.150. – 5.152. ‘de gösterilmemiştir.



Şekil 5.150. MA işlemi yapılmamış jel kullanılarak borlama yapılan numunelere ait $\ln D-1/T$ grafiği.

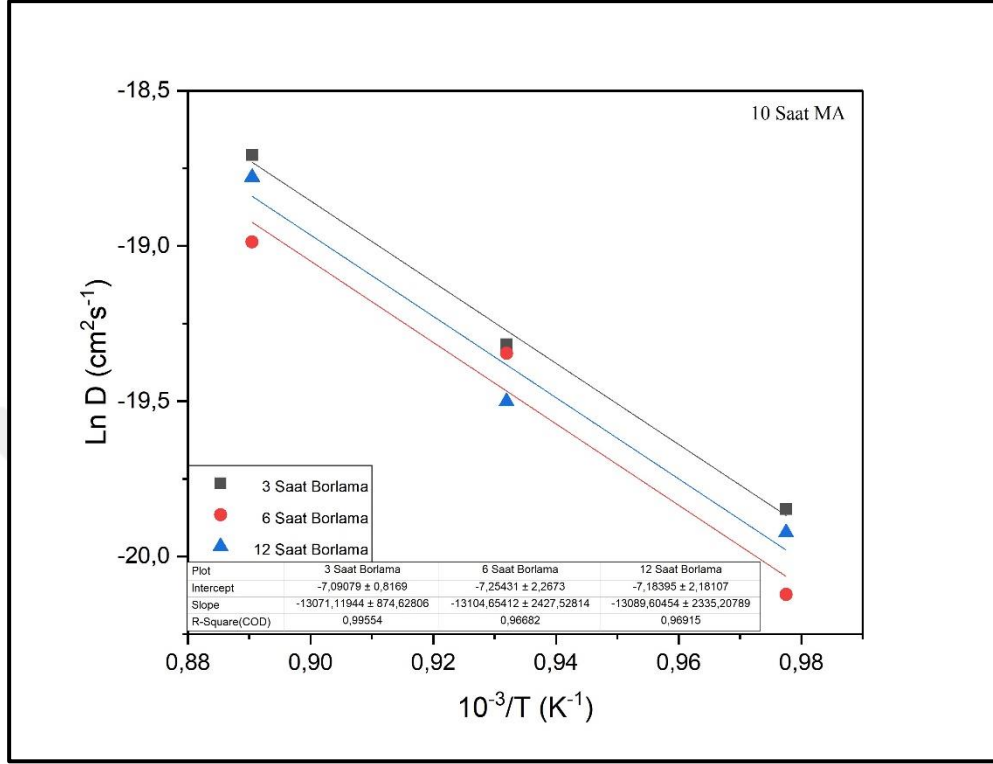
MA işleminin ve süresinin sıcaklıktan bağımsız olarak borlama üzerindeki etkisini tespit etmek amacıyla numuneler kendi içerisinde borlama süresi sabit tutularak, üçerli guruplar halinde değerlendirilmiş ve her bir zaman gurubu (3, 6 ve 12 saat) için artan sıcaklıkla (750,800 ve 850 °C) borür tabaklarının ortalama kalınlıkları aritmetik ortalamaları alınarak hesaplanmıştır. Örneğin 3 saat borlama süresi için 750,800 ve 850 °C sıcaklıklarda elde edilen borür tabaka kalınlıklarının aritmetik ortalaması alınmıştır ve bu işlem 6 ve 12saat için de ayrı ayrı tekrarlanmıştır.

Aynı borlama süresi – farklı sıcaklık (750,800 ve 850 °C) verileri kullanılarak ortalama tabaka kalınlıklarının tespiti amacıyla yapılan hesaplama sonucu, kalınlıklar 3 saat borlama süresi için 50,16 µm, 6 saat için 60,38 µm ve 12 saat için ise 73,56 µm olarak bulunmuştur. (Tablo 5.3'den).

Yapılan çalışmada borlama zaman ve sıcaklığına bağlı olarak tekil numune irdelemeleri yapıldığında MA işlemi yapılmamış tozlarla elde edilen en yüksek tabaka kalınlığı 850 °C 'de 12 saat borlamada 95,01 µm ve en düşük tabaka kalınlığı ise 750 °C 'de 3 saat borlamada 35,30 µm olarak ölçülmüştür.

Şekil 5.151. 'de 10 saat MA işlemi yapılmış jel kullanılarak borlama yapılan numunelere ait $\ln D-1/T$ grafiği verilmiştir. 10 saat MA işlemi yapılmış jel kullanılarak borlanan numunede aktivasyon enerjisi 108,814 kJ/mol olarak hesaplanmıştır. MA yapılmamış deneylerle

karşılaştırıldığında 10 saat MA işlemi yapılarak aktivasyon enerjisinde beklenildiği gibi 4,74 kJ/mol veya %4,33 kadar bir düşüş meydana gelmiştir.

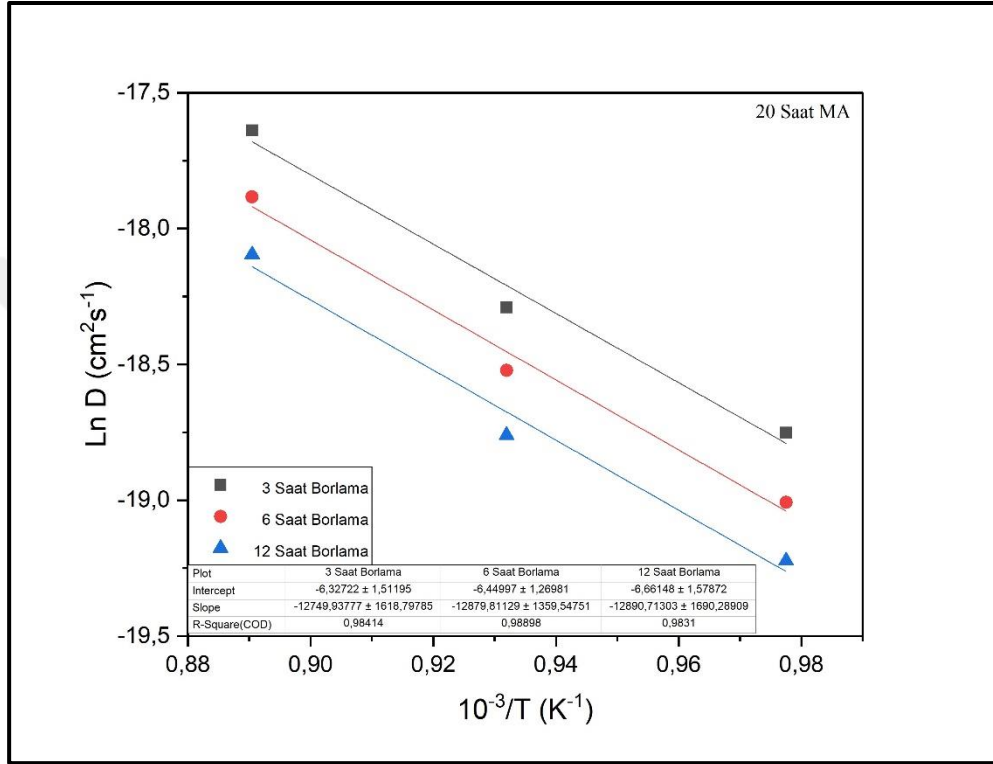


Şekil 5.151. 10 saat MA işlemi yapılan numunelere ait $\ln D-1/T$ grafiği.

Tablo 5.3. ‘deki aynı borlama süresi – farklı sıcaklık verileri kullanılarak hesaplanan ortalama tabaka kalınlıkları; 3 saat borlamada 69,13 μm , 6 saat borlamada 88,67 μm ve 12 saat borlamada ise 131,00 μm ‘dir. MA yapılmamış tozlarla gerçekleştirilen borlama ile karşılaştırıldığında 10 saat MA işlemi ile borlama sıcaklığından bağımsız ve sadece borlama süresine bağlı olarak ortalama tabaka kalınlıklarında %38 ile %78 arasında değişen artışlar oluşmuştur. Aynı borlama süresinde (en düşük borlama süresi olan 3 saat için) borlama jelinin 10 saat MA yapılmış tozlardan üretilmesi sayesinde borür tabaka kalınlıklarında, MA yapılmamış tozlarla hazırlanmış jelle yapılan borlamaya nazaran minimum %38 artış meydana gelmiştir.

Yapılan çalışmada borlama zaman ve sıcaklığına bağlı olarak tekil numune irdelemeleri yapıldığında 10 saat MA yapılmış tozlar kullanılarak yapılan deneylerde elde edilen en yüksek tabaka kalınlığı 850 °C ‘de 12 saat borlamada 173,80 μm ve en düşük tabaka kalınlığı ise 750 °C ‘de 3 saat borlamada 50,93 μm olarak ölçülmüştür. 10 saat MA işlemi ile elde edilen en yüksek tabaka kalınlığında MA yapılmamış deneylerle karşılaştırıldığında %80, en düşük tabaka kalınlığında ise %45 gibi önemli artışlar ortaya çıkmıştır.

Şekil 5.152. 'de 20 saat MA işlemi yapılan jel kullanılarak borlanan numunelere ait $\ln D-1/T$ grafiği verilmiştir. 20 saat MA işlemi yapılan jel kullanılarak borlanan numunelerde aktivasyon enerjisi 106,746 kJ/mol olarak hesaplanmıştır. MA yapılmamış tozlarla gerçekleştirilen deneyler kıyaslandığında, 20 saat MA işleminin aktivasyon enerjisini yaklaşık 8 kJ/mol veya %6 düşürdüğü tespit edilmiştir.



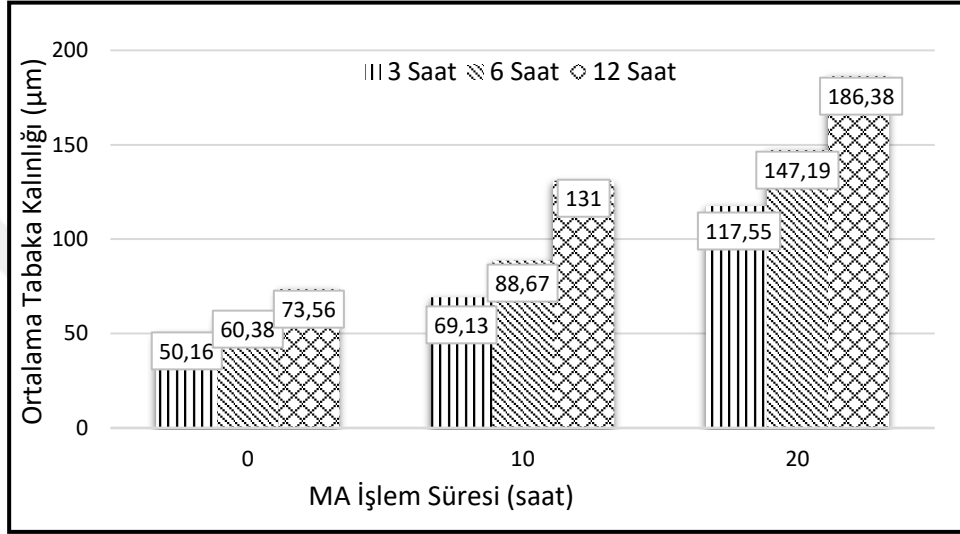
Şekil 5.152. 20 saat MA işlemi yapılan numunelere ait $\ln D-1/T$ grafiği.

Aynı borlama süresi – farklı sıcaklık verileri kullanılarak ortalama tabaka kalınlıkları; 3 saat borlamada 117,547 μm , 6 saat borlamada 147,19 μm ve 12 saat borlamada ise 186,38 μm olarak Tablo 5.3. 'den hesaplanmıştır.

Yapılan çalışmada borlama zaman ve sıcaklığına bağlı olarak tekli numune irdellemeleri yapıldığında 20 saat MA yapılmış jel kullanılarak yapılan deneylerde elde edilen en yüksek tabaka kalınlığı 850 °C 'de 12 saat borlamada 244,50 μm ve en düşük tabaka kalınlığı ise 750 °C 'de 3 saat borlamada 88,07 μm olarak ölçülmüştür.

10 saat MA işlemi yapılmış jelle üretilen numunelerde elde edilen en yüksek ve en düşük tabaka kalınlıkları kıyaslandığı zaman yaklaşık %150, MA işlemi yapılmamış jelle elde edilen en yüksek ve en düşük tabaka kalınlıkları kıyaslandığında ise yaklaşık %250 'den fazla kalın borür tabakalarının elde edilebildiği hesaplanmıştır.

Şekil 5.153’de sıcaklıktan bağımsız olarak sadece borlama süresine bağlı olarak MA işleminin oluşan tabaka kalınlığı üzerindeki etkisini gösteren grafik verilmiştir. Grafik incelendiğinde MA yapılmadan hazırlanan jelle yapılan borlama referans alındığında, 20 saat MA yapılmış tozlarla hazırlanan jel kullanılarak gerçekleştirilen borlama işleminde tabaka kalınlığının 3 saat gurubunda 117,55 μm , 6 saat gurubunda 147,19 μm ve 12 saat gurubunda ise 186,38 μm ’a kadar çıktığı tespit edilmiştir.



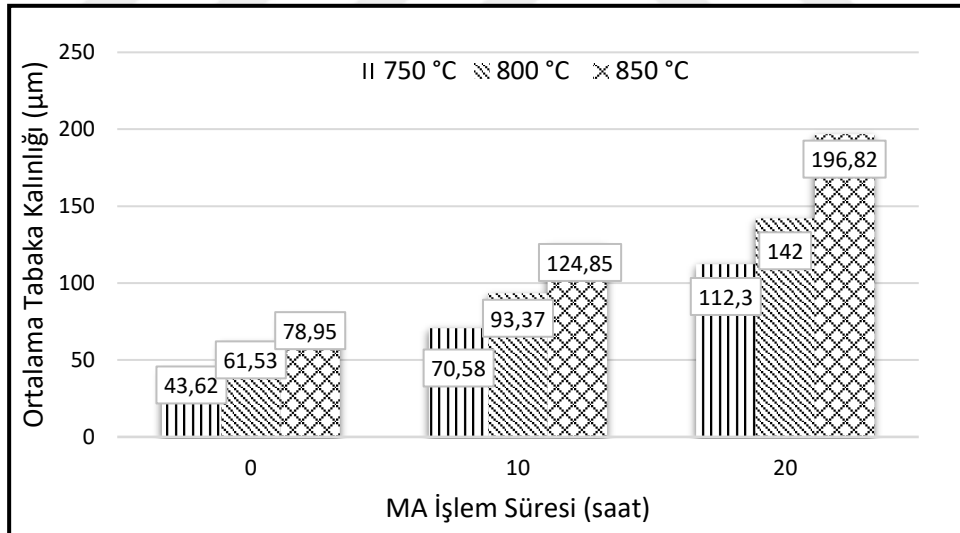
Şekil 5.153. Farklı sıcaklıklarda borlama yapılmış numunelere ait Ortalama Tabaka Kalınlığı – MA İşlem Süresi grafiği.

Tablo 5.4. ‘de sıcaklıktan bağımsız olarak sadece borlama süresine bağlı olarak MA işleminin oluşan tabaka kalınlığı üzerindeki etkisini % olarak gösteren tablo verilmiştir. Tablo incelendiğinde MA yapılmadan hazırlanan jelle yapılan borlama referans alındığında, 20 saat MA yapılmış tozlarla hazırlanan jel kullanılarak gerçekleştirilen borlama işleminde tabaka kalınlığının 3 saat gurubunda %134,35 kadar, 6 saat gurubunda %143,77 ve 12 saat gurubunda ise %153,37 kadar artış gösterdiği tespit edilmiştir. Genelleme yapıldığında MA işlemiyle tabaka kalınlıklarında izafi olarak yaklaşık %38 den %153,40’ a kadar artışlar elde edilebilmiştir.

Tablo 5.4. Numunelere ait ortalama tabaka kalınlıkları ve bu kalınlıkların MA İşlemi Yapılmamış numunelerin ortalama tabaka kalınlıklarına göre % artış miktarları (Borlama süresine göre).

	<u>MA İşlemi Yapılmamış</u>	<u>10 Saat MA İşlemi İle</u>	<u>20 Saat MA İşlemi İle</u>
<u>3 Saat Borlama</u>	50,16 μm	69,13 μm (% 37,82 artış)	117,55 μm (% 134,35 artış)
<u>6 Saat Borlama</u>	60,38 μm	88,67 μm (% 46,85 artış)	147,19 μm (% 143,77 artış)
<u>12 Saat Borlama</u>	73,56 μm	131,00 μm (% 78,09 artış)	186,38 μm (% 153,37 artış)

Şekil 5.154 'de borlama zamanından bağımsız olarak sadece borlama sıcaklığına bağlı olarak MA işleminin oluşan tabaka kalınlığı üzerindeki etkisini gösteren grafik verilmiştir. Grafik incelendiğinde MA yapılmadan hazırlanan jelle yapılan borlama referans alındığında, 20 saat MA yapılmış tozlarla hazırlanan jel kullanılarak gerçekleştirilen borlama işleminde tabaka kalınlığının 750 °C gurubunda 112,30 μm , 800 °C gurubunda 142,00 μm ve 850 °C gurubunda ise 196,82 μm e kadar çıktığı tespit edilmiştir.



Şekil 5.154. Farklı sıcaklıklarda borlama yapılmış numunelere ait Ortalama Tabaka Kalınlığı – MA İşlem Süresi grafiği.

Tablo 5.5. 'de zamandan bağımsız olarak sadece borlama sıcaklığına bağlı olarak MA işleminin oluşan tabaka kalınlığı üzerindeki etkisini % olarak gösteren tablo verilmiştir. Tablo incelendiğinde MA yapılmadan hazırlanan jelle yapılan borlama referans alındığında, 20 saat MA yapılmış tozlarla hazırlanan jel kullanılarak gerçekleştirilen borlama işleminde tabaka kalınlığının 750 °C gurubunda %157,45 kadar, 800 °C gurubunda %130,77 ve 850 °C gurubunda ise %149,31

kadar artış gösterdiği tespit edilmiştir. Genelleme yapıldığında MA işlemiyle tabaka kalınlıklarında izafi olarak yaklaşık %61,81 den %149,31' e kadar artışlar elde edilebilmiştir.

Tablo 5.5. Numunelere ait ortalama tabaka kalınlıkları ve bu kalınlıkların MA İşlemi Yapılmamış numunelerin ortalama tabaka kalınlıklarına göre % artış miktarları (Borlama sıcaklığına göre).

	<u>MA İşlemi Yapılmamış</u>	<u>10 Saat MA İşlemi İle</u>	<u>20 Saat MA İşlemi İle</u>
<u>750 °C</u>	43,62 μm	70,58 μm (% 61,81 artış)	112,30 μm (% 157,45 artış)
<u>800 °C</u>	61,53 μm	93,37 μm (% 51,73 artış)	142,00 μm (% 130,77 artış)
<u>850 °C</u>	78,95 μm	124,85 μm (% 58,14 artış)	196,82 μm (% 149,31 artış)

Artan borlama işlem süresinde tabaka kalınlıklarının artması difüzyon açısından bakıldığında beklenen bir durumdur. MA işlem süresinin artmasıyla birlikte borür tabakalarının kalınlığındaki artış birbirine paralel olarak ilerlemektedir. Bu durum borlama deneylerindeki tüm sıcaklık ve sürelerde de gözlenmiştir. MA işlemi yapılmasıyla birlikte tozların aktivasyon enerjisinde düşüş meydana gelmektedir. MA süresinin artmasıyla aktivasyon enerjisindeki azalma devam etse de, MA süresindeki artış oranı ile aktivasyon enerjisindeki düşüş paralellik göstermemektedir. Aktivasyon enerjisi açısından bakıldığında optimum şartlar 20 saat MA işlemi yapılmış jelle borlanan numunelerde gözlenmiştir. Ancak 20 saat MA işlemi ile jeli oluşturan tozların aktivasyon enerjisindeki azalmanın (%1,67) 10 saat ile kıyaslandığında (%4,33) daha az olduğu hesaplanmıştır. MA süresinin 2 katına çıkmasıyla aktivasyon enerjisinin iki kat azalmamasına karşın borür tabaka kalınlığının %153,37 kadar artmasının sebebi SEM görüntülerindeki küçülen toz boyutu ve buna bağlı olarak artan topaklanma ile izah edilebilir. Artan MA süresiyle borlama tozundaki amorfleşme miktarının, dislokasyon yoğunluğunun ve topaklaşmanın artması difüzyonu daha kolay hale getirmiştir[19].

Tablo 5.6. 'da borlama ve MA işlem süresinin fonksiyonu olarak büyüme hızı ve borür tabaka kalınlığının değişimi verilmiştir. Elde edilen ampirik bulgular çalışma sıcaklığı için olmak kaydıyla Arrhenius Denklemi kullanılarak tahmini bir tabaka kalınlığı değerini elde etmek için kullanılabilir.

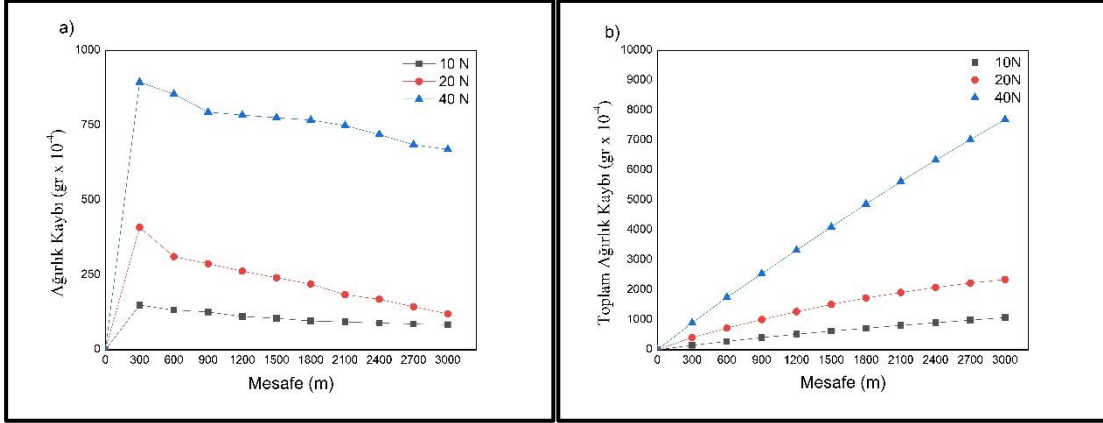
Tablo 5.6. Borlama ve mekanik alaşımlama süresinin fonksiyonu olarak tabaka büyüme hızı ve borür tabaka kalınlığının değişimi için ampirik yaklaşımlar.

MA Süresi (Saat)	Borlama Süresi (s)	Aktivasyon Enerjisi (Q) (kJ/mol)	Tabaka Büyüme Hızı (D_0) ($\text{cm}^2/\text{s} \times 10^{-4}$)	Ampirik Formül $d_{cm} = \sqrt{t \cdot D_0 \cdot e^{(-Q/RT)}}$
0	10800	113,555	7,613	$d = \sqrt{t \cdot 7,613 \cdot 10^{-4} \cdot e^{-13658/T}}$
	21600		5,484	$d = \sqrt{t \cdot 5,484 \cdot 10^{-4} \cdot e^{-13658/T}}$
	43200		4,078	$d = \sqrt{t \cdot 4,078 \cdot 10^{-4} \cdot e^{-13658/T}}$
10	10800	108,814	8,327	$d = \sqrt{t \cdot 8,327 \cdot 10^{-4} \cdot e^{-13088/T}}$
	21600		7,071	$d = \sqrt{t \cdot 7,071 \cdot 10^{-4} \cdot e^{-13088/T}}$
	43200		7,587	$d = \sqrt{t \cdot 7,587 \cdot 10^{-4} \cdot e^{-13088/T}}$
20	10800	106,746	17,869	$d = \sqrt{t \cdot 17,869 \cdot 10^{-4} \cdot e^{-12839/T}}$
	21600		15,806	$d = \sqrt{t \cdot 15,806 \cdot 10^{-4} \cdot e^{-12839/T}}$
	43200		12,792	$d = \sqrt{t \cdot 12,792 \cdot 10^{-4} \cdot e^{-12839/T}}$

5.4. Aşınma Verilerinin İncelenmesi

MA desteği olmadan veya MA desteği ile borlanan numunelerdeki aşınma davranışının tespit edilmesi amacıyla; referans numune olarak kullanılmak üzere hiçbir işleme tabi tutulmayan DIN St28 malzemesi diğer borlanmış numunelerle aynı şartlarda aşınma deneylerine tabi tutulmuş ve bu numuneye bağlı olarak aşınma verilerindeki iyileşmeler borlama deney parametrelerine bağlı olarak her grup numune için ayrı ayrı daha sonra ise gruplar arasında mukayeseli olmak üzere irdelenmiştir.

Şekil 5.155. ‘de borlanmamış referans St28 malzemesinin farklı yükler altındaki a) Her 300m ‘de meydana gelen Ağırlık Kaybı-Mesafe, b) Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği verilmiştir. Yapılan her 300m ‘de bir tartım neticesinde malzemede meydana gelen ağırlık kayıplarını ayrı ayrı gösteren Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği ve her bir tartımda meydana gelen ağırlık kaybının üzerine eklenerek çizilen Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği verilmiştir.

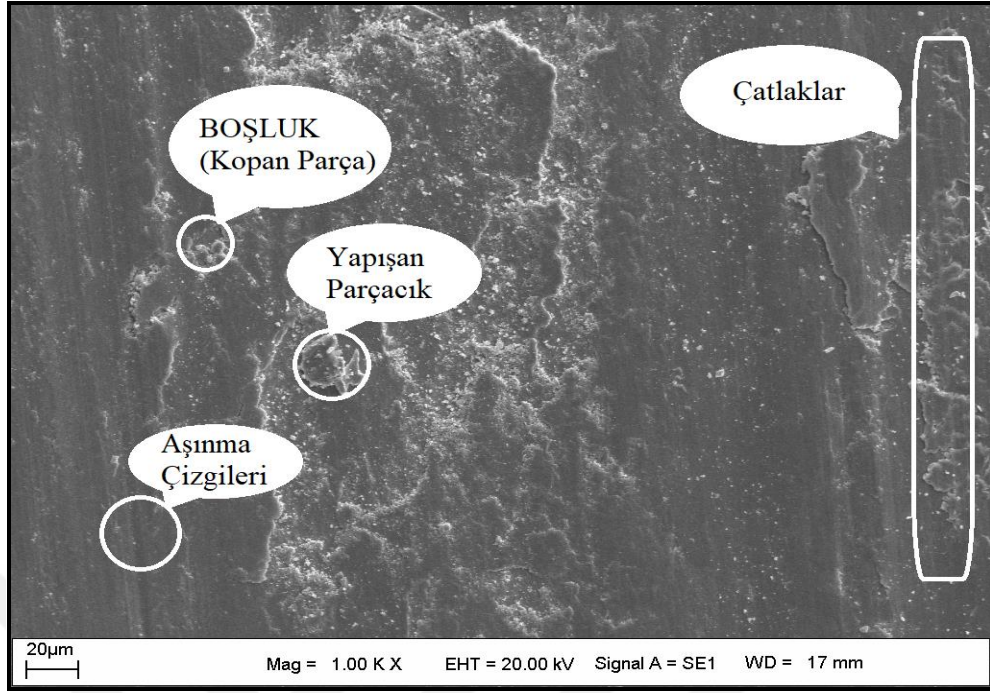


Şekil 5.155. Borlanmamış referans St28 malzemesinin aşınma deneyleri **a)** Her 300m ‘de meydana gelen Ağırlık Kaybı-Mesafe, **b)** Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği.

İlk tartımın yapıldığı 300m mesafede, ağırlık kayıplarının büyük miktarda olduğu yapılan bütün testlerde gözlenmiştir. Silindirik aşındırıcı ve parça yüzeyi arasındaki temasın minimum olması bu fazla miktardaki kaybın başlıca sebebidir. Numune her ne kadar aşınma öncesinde zımparalanıp temizlense de mikron seviyesinde pürüzlülüğe sahiptirler. Aşındırıcının temas ettiği yüzeyde basınç en yüksek değere ulaşmaktadır. Artan aşınma ile birlikte temas yüzeyi de artmakta ve basınç miktarı artan yüzey alanıyla doğru orantılı olarak azalmaktadır. Bu durum bir diğer sebep olarak düşünülmektedir. Her numune için bu durumlar benzer şekilde gözlenmiştir.

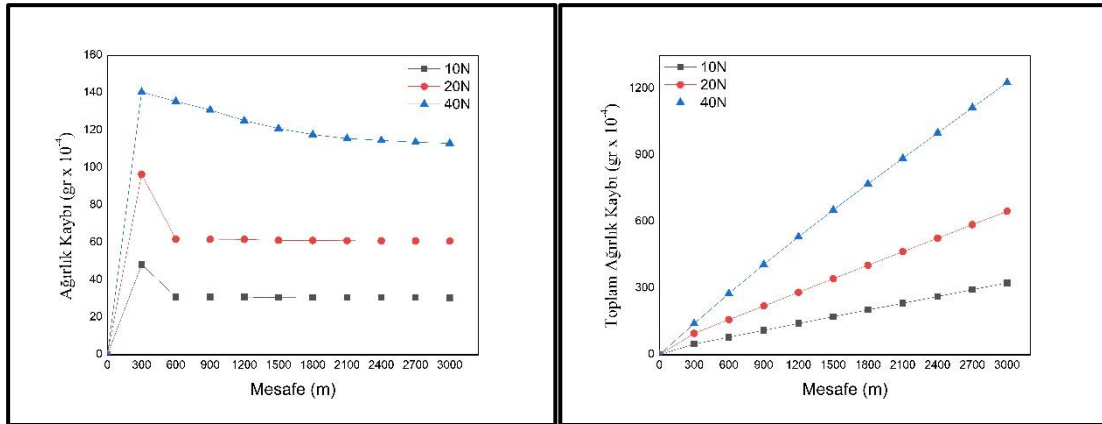
Aşındırıcı, numune yüzeyinde hareket ederek ağırlık kayıpları meydana getirmektedir. Tartımlar sonucunda toplam ağırlık kayıpları; 40 N yük altında 0,769 gr, 20 N yük altında 0,235 gr ve 10 N yük altında 0,107 gr olarak bulunmuştur. Her 3 yükte de kararlı aşınma davranışı yani bir sonraki tartımda ağırlık kaybının miktarı ön görülememektedir.

Şekil 5.156. ‘da borlanmamış DIN St28 matris malzemesinin 40N yük ve 3000m sonundaki aşınma SEM görüntüsü verilmiştir. Numune yüzeyinde adhesiv aşınma sonucunda oluşan çizgiler belirgin bir şekilde ortaya çıkmış ve bu çizgiler resimde daire içine alınarak gösterilmiştir. Aşınma çizgilerinin kalın, düzenli ve belirgin olması malzemenin aşındırıcıya oranla çok daha düşük sertlikte olmasından kaynaklanmaktadır. Aşındırıcının yüzeyinden numune yüzeyine herhangi bir parçacık transferinin (aşındırıcıdan kopma sonucu) olmadığından, derin aşınma çizgilerinin varlığına numunenin yüzeyinden plastik deformasyona uğrayarak kopan sertleşmiş parçacıkların sebep olduğu düşünülmektedir. Aşınma yüzeylerinde, kopmuş ama ortamdan uzaklaşmamış parçacıkların tekrar sıvanmasıyla oluşan tepe noktaları -krater- ve mikro çatlaklar ve/veya kopan parçacıkların dip noktaları -oluk- ile aşınma esnasında numune üzerine uygulanan yükün sebep olduğu çatlaklar neticesinde pullanmış bölgeler görülmektedir.



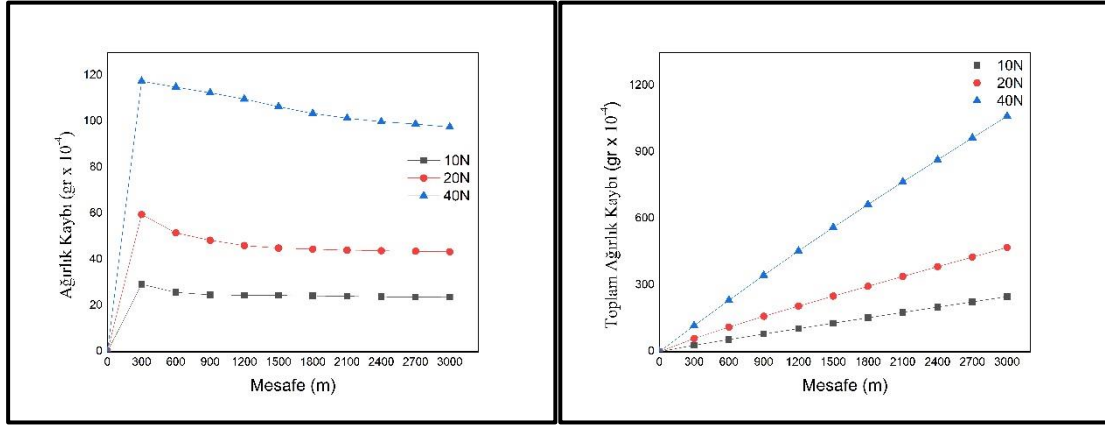
Şekil 5.156. Borlanmamış DIN St28 malzemesinin 40N yük ve 3000m sonundaki aşınma SEM görüntüsü.

Şekil 5.157. 'de 10 saat MA yapılarak, 650 °C'de 6 saat borlanan 10M65-6 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği verilmiştir. Artan yüklerle birlikte numunedeki ağırlık kaybı miktarları da artmıştır. İlk 300m mesafeden sonra meydana gelen ağırlık kaybı miktarlarına göre 10 ve 20 N yük altında numune, nispeten istikrarlı bir ağırlık kaybı davranış sergilemektedir. 40 N yükte ise 2100m sonunda ağırlık kaybının sabit hale geldiği söylenebilir. Toplam ağırlık kayıpları; 40 N yük altında 0,123 gr, 20 N yük altında 0,065 gr ve 10 N yük altında 0,032 gr olarak tespit edilmiştir.



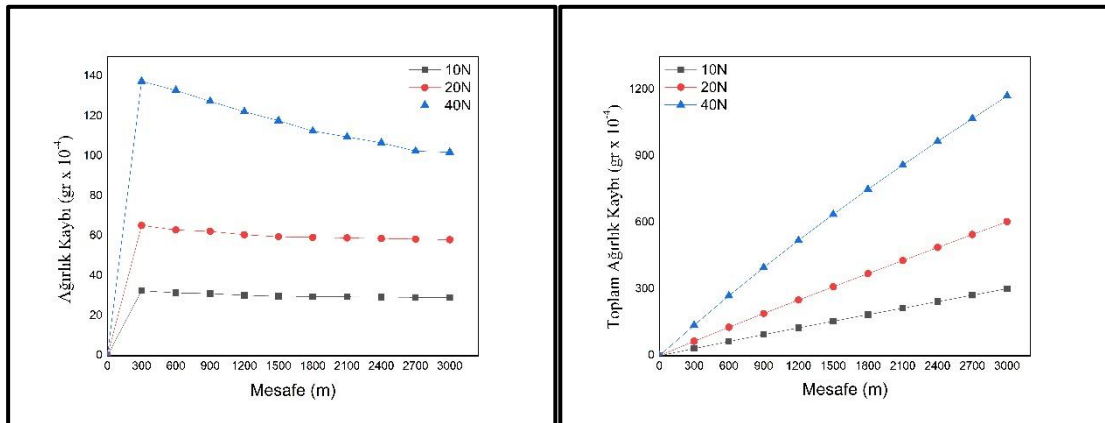
Şekil 5.157. 10M65-6 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.

Şekil 5.158. 'de 20 saat MA yapılarak, 650 °C'de 6 saat borlanan 20M65-6 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği verilmiştir. Artan yüklerle birlikte numunedeki ağırlık kaybı miktarları da artmıştır. 10 ve 20 N 'luk yük altında numunede kararlı bir aşınma davranışı 1200m 'den sonra görülürken 40 N yük altında 2100m 'den sonra görülmektedir. Toplam ağırlık kayıpları; 40 N yük altında 0,106 gr, 20 N yük altında 0,047 gr ve 10 N yük altında 0,025 gr olarak tespit edilmiştir.



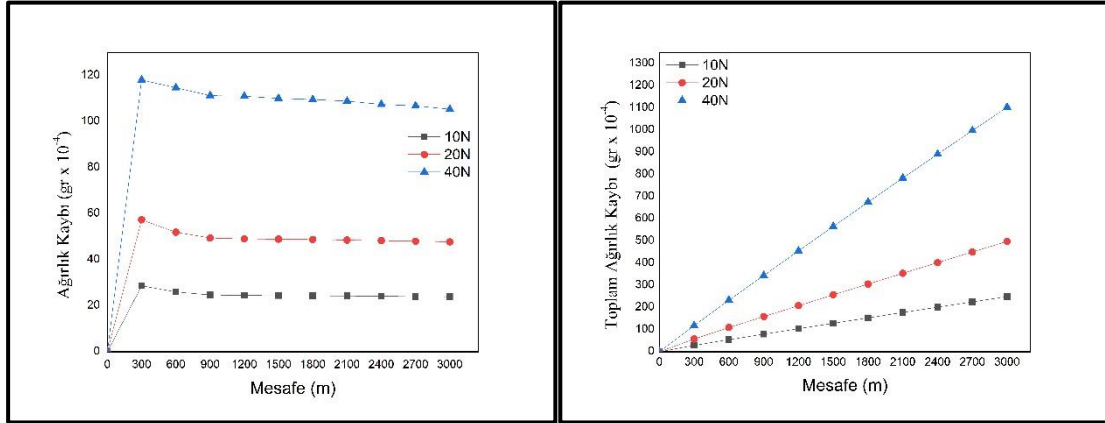
Şekil 5.158. 20M65-6 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.

Şekil 5.159. 'da 10 saat MA yapılarak, 650 °C'de 12 saat borlanan 10M65-12 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği verilmiştir. 10 ve 20 N 'luk yük altında numunede kararlı ağırlık kaybı davranışı neredeyse ikinci ölçümle başlarken 40 N yük altında 2700 m 'den sonra görülmektedir. Toplam ağırlık kayıpları; 40 N yük altında 0,117 gr, 20 N yük altında 0,061 gr ve 10 N yük altında 0,031 gr olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.159. 10M65-12 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.

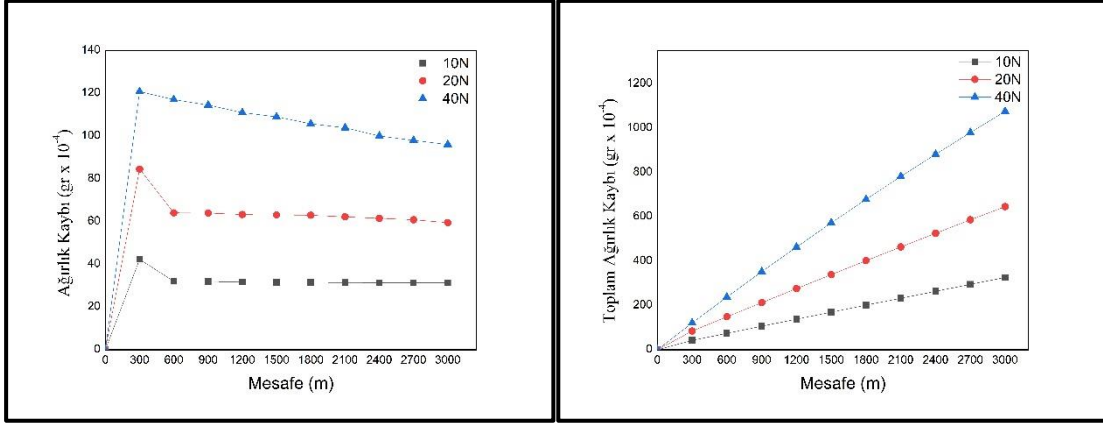
Şekil 5.160. ‘da 20 saat MA yapılarak, 650 °C’de 12 saat borlanan 20M65-12 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği verilmiştir. Artan yüklerle birlikte numunedeki ağırlık kaybı miktarları da artmıştır. Genel anlamda bütün yüklerde 900 m den sonra numunelerin ağırlık kayıplarının belirli bir seviyede kaldığı yani kararlı hale geldiği görülmektedir. Toplam ağırlık kayıpları; 40 N yük altında 0,110 gr, 20 N yük altında 0,050 gr ve 10 N yük altında 0,025 gr olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.160. 20M65-12 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.

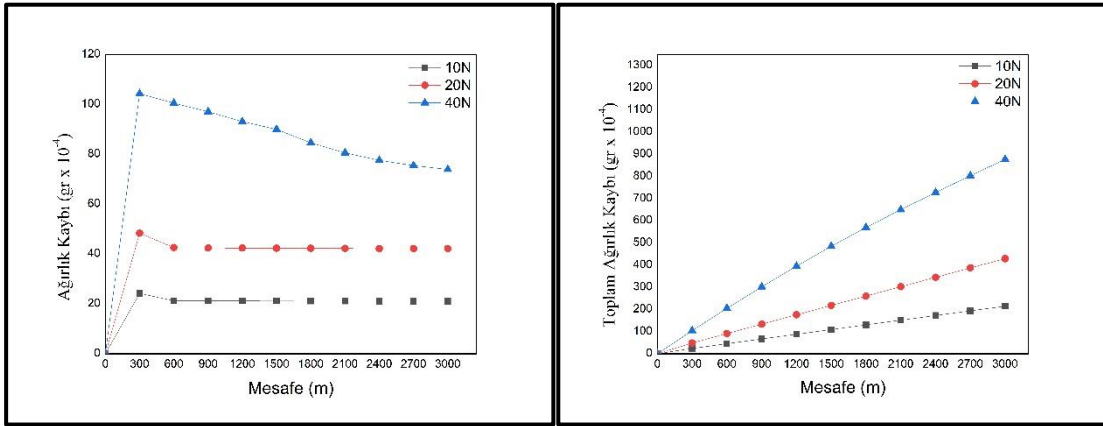
650 °C sıcaklıkta borlanan numunelerle yapılan aşınma testi verilerine göre, aynı MA işlem sürelerinde, ağırlık kayıplarında benzerlik tespit edilmiştir. 10 ve 20 N gibi nispeten düşük yükler altında kararlı ağırlık kayıpları ilk tartımdan itibaren gözlemlenirken, 40 N yük altında kararlı durum son tartımlarda gözlemlenmiştir. Borlanan numunelerin ağırlık kayıplarının ön görülebilir değerlerde yani kararlı olması, malzemenin benzer test şartları altında kullanılmasıyla ne zaman hasara uğrayacağı konusunda fikir verebilir.

Şekil 5.161. ‘de 10 saat MA yapılarak, 700 °C’de 3 saat borlanan 10M70-3 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği verilmiştir. Artan yüklerle birlikte numunedeki ağırlık kaybı miktarları da artmıştır. 10 ve 20 N yük altında numune ikinci ölçümden sonra nispeten daha kararlı duruma geçerken 40 N altında kararlı durum görülmemektedir. Toplam ağırlık kayıpları; 40 N yük altında 0,108 gr, 20 N yük altında 0,065 gr ve 10 N yük altında 0,033 gr olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.161. 10M70-3 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.

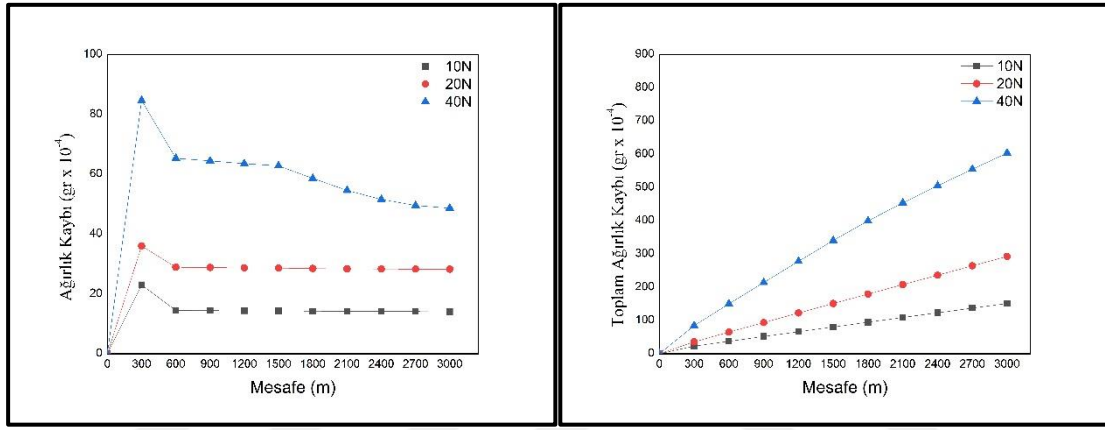
Şekil 5.162. 'de 20 saat MA yapılarak, 700 °C'de 3 saat borlanan 20M70-3 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği verilmiştir. Artan yüklerle birlikte numunedeki ağırlık kaybı miktarları da artmıştır. 10 ve 20 N yük altında numune ikinci ölçümden sonra nispeten daha kararlı duruma geçerken 40 N altında bu durum görülmemektedir. Toplam ağırlık kayıpları; 40 N yük altında 0,088 gr, 20 N yük altında 0,043 gr ve 10 N yük altında 0,022 gr olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.162. 20M70-3 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.

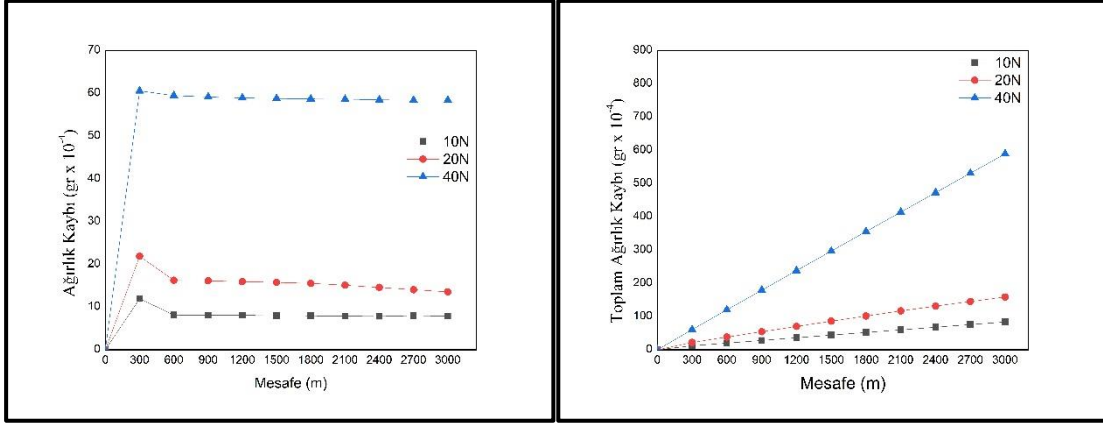
20M70-3 kodlu numune dâhil, şu ana kadar aşınma testi yapılan numunelerde 40 N yük altında sahip olunan bor tabakalarının aşındığı düşünülmekte ve kararlı aşınma bölgesi tespitinin zorlaştığı görülmektedir. Daha düşük yüklerde bor tabakasının aşınma testi boyunca numune yüzeyindeki varlığını koruduğu düşünülmektedir.

Şekil 5.163. ‘de 10 saat MA yapılarak, 700 °C’de 6 saat borlanan 10M70-6 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği verilmiştir. Artan yüklerle birlikte numunedeki ağırlık kaybı miktarları da artmıştır. 10 ve 20 N yük altında numune ikinci ölçümden sonra nispeten daha kararlı duruma geçerken 40 N altında numune farklı bir durum görülmektedir. 600-1500 m arasında kararlı aşınma gözlemlenirken, 1500 m ‘den sonra ağırlık kayıpları ön görülemez hale gelmiştir. Bu durum hakkında, borür tabakasının 1500 m ‘den sonra aşındığı düşünülmektedir. Toplam ağırlık kayıpları; 40 N yük altında 0,060 gr, 20 N yük altında 0,029 gr ve 10 N yük altında 0,015 gr olarak tespit edilmiştir.



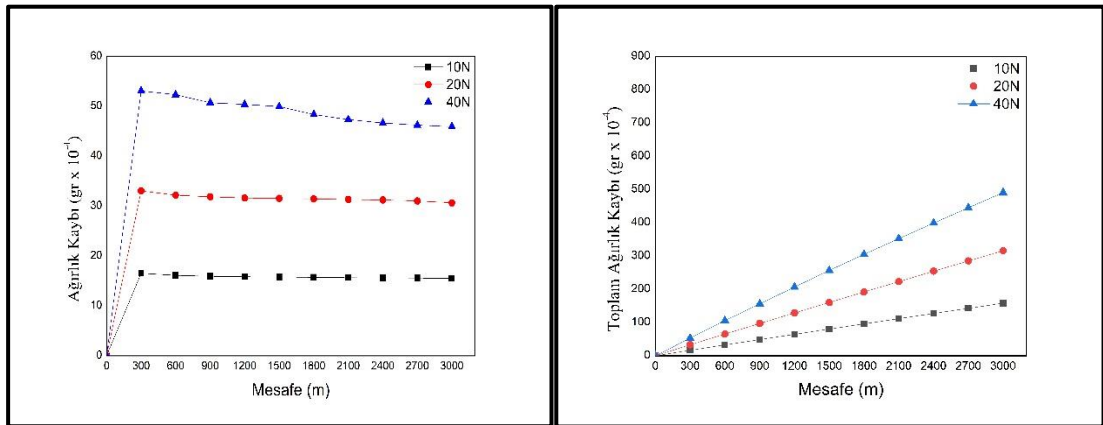
Şekil 5.163. 10M70-6 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.

Şekil 5.164. ‘de 20 saat MA yapılarak, 700 °C’de 6 saat borlanan 20M70-6 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği verilmiştir. Artan yüklerle birlikte numunedeki ağırlık kaybı miktarları da artmıştır. 10 ve 20 N yük altında ikinci ölçümden sonra numune nispeten kararlı bir ağırlık kaybı davranışı sergilemesine rağmen 40 N yük altında ilk ölçümden itibaren bu davranışı sergilediği görülmektedir. Toplam ağırlık kayıpları; 40 N yük altında 0,0589 gr, 20 N yük altında 0,0158 gr ve 10 N yük altında 0,0084 gr olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.164. 20M70-6 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.

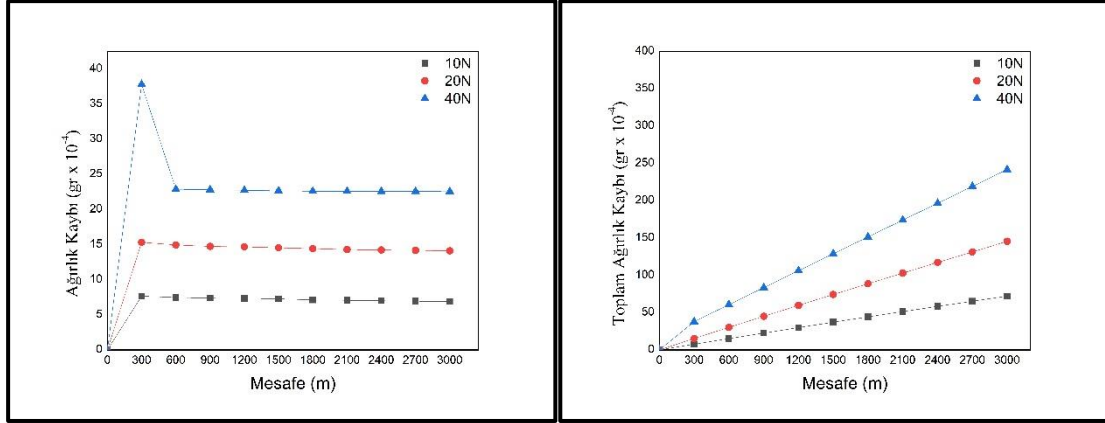
Şekil 5.165. 'de MA işlemi yapılmadan, 700 °C'de 12 saat borlanan 0M70-12 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği verilmiştir. Artan yüklerle birlikte numunedeki ağırlık kaybı miktarları da artmıştır. 10 ve 20 N yük altında ikinci ölçümden sonra numune nispeten kararlı bir ağırlık kaybı davranışı sergilemesine rağmen 40 N yük altında ilk ölçümden itibaren bu davranışı sergilediği görülmektedir. Toplam ağırlık kayıpları; 40 N yük altında 0,0491 gr, 20 N yük altında 0,0316 gr ve 10 N yük altında 0,0158 gr olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.165. 0M70-12 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.

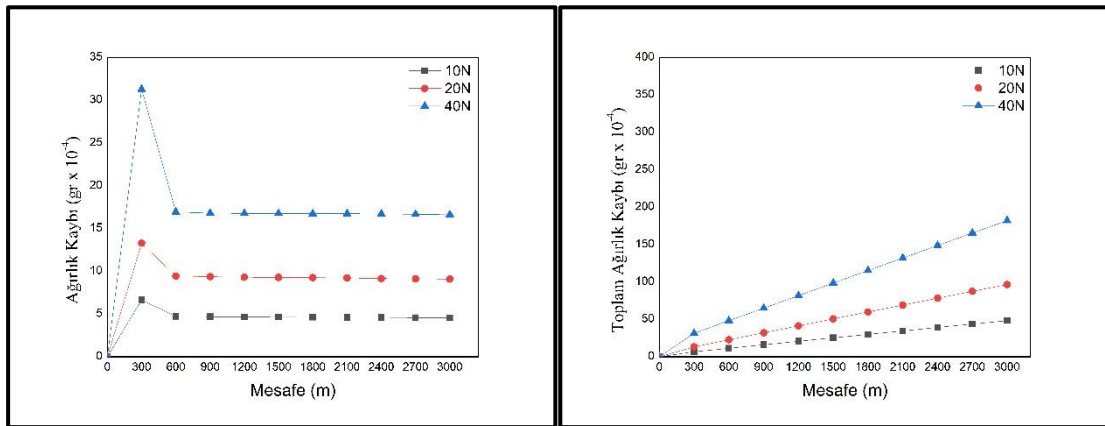
Şekil 5.166. 'da 10 saat MA yapılarak, 700 °C'de 12 saat borlanan 10M70-12 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği verilmiştir. Artan yüklerle birlikte numunedeki ağırlık kaybı miktarları da artmıştır. 10 ve 20 N yük altında ilk ölçümden sonra numune nispeten kararlı bir ağırlık kaybı davranışı sergilemesine rağmen 40 N yük altında bu

davranışı ikinci ölçümden itibaren sergilediği görülmektedir. Toplam ağırlık kayıpları; 40 N yük altında 0,0242 gr, 20 N yük altında 0,0145 gr ve 10 N yük altında 0,0072 gr olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.166. 10M70-12 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.

Şekil 5.167. 'de 20 saat MA yapılarak, 700 °C'de 12 saat borlanan 20M70-12 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği verilmiştir. Artan yüklerle birlikte numunedeki ağırlık kaybı miktarları da artmıştır. Üç yük altında da ilk ölçümden sonra numune nispeten kararlı bir ağırlık kaybı davranışı sergilemiştir. Toplam ağırlık kayıpları; 40 N yük altında 0,0182 gr, 20 N yük altında 0,0096 gr ve 10 N yük altında 0,0048 gr olarak tespit edilmiştir.

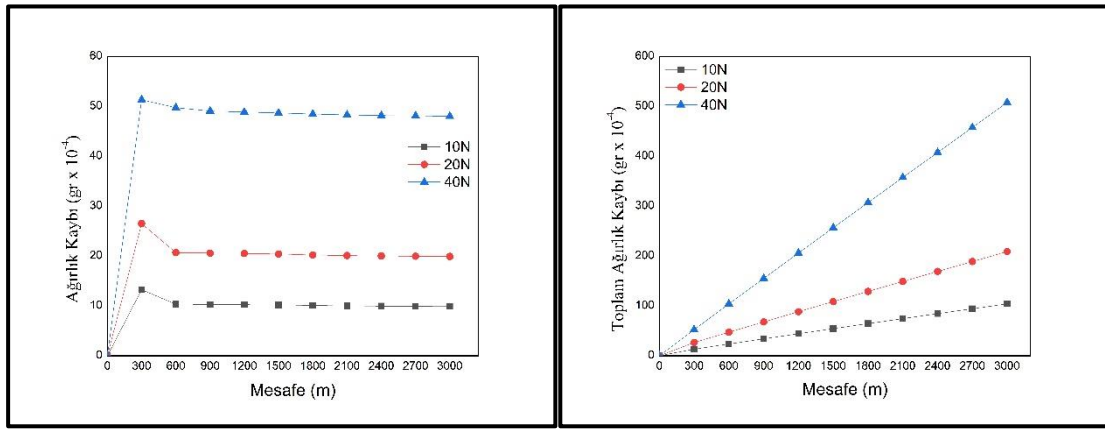


Şekil 5.167. 20M70-12 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.

Tabaka kalınlıklarının artması ile (Tablo 5.3.) bu davranış doğrudan ilişkili olduğu düşünülmektedir. 0M70-12, 10M70-12 ve 20M70-12 kodlu numuneler kıyaslandığında, MA işleminin ağırlık kaybı üzerindeki olumlu yönlü etkisi olduğu açıkça görülmektedir. 40 N yük

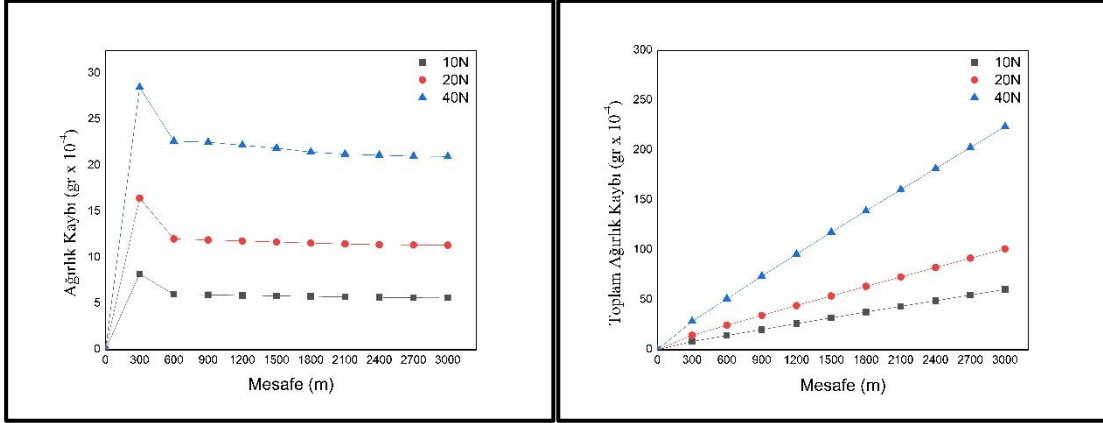
altında 0M70-12 kodlu numunenin kararlı aşınma göstermemekte, 20M70-12 kodlu numunesinin ise çok belirgin bir davranış göstermektedir. Toplam kütle kaybı miktarlarına bakıldığında, 3 katı oranında bir iyileşme görülmüştür.

Şekil 5.168. 'de MA yapılmadan, 750 °C'de 3 saat borlanan 0M75-3 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği verilmiştir. Artan yüklerle birlikte numunedeki ağırlık kaybı miktarları da artmıştır. 10 ve 20 N yük altında da ikinci ölçümden sonra numune nispeten kararlı bir ağırlık kaybı davranışı sergilemekteyken 40 N yük altında ilk ölçümden sonra nispeten kararlı bir ağırlık kaybı davranışı sergilemektedir. Toplam ağırlık kayıpları; 40 N yük altında 0,0507 gr, 20 N yük altında 0,0209 gr ve 10 N yük altında 0,0104 gr olarak tespit edilmiştir.



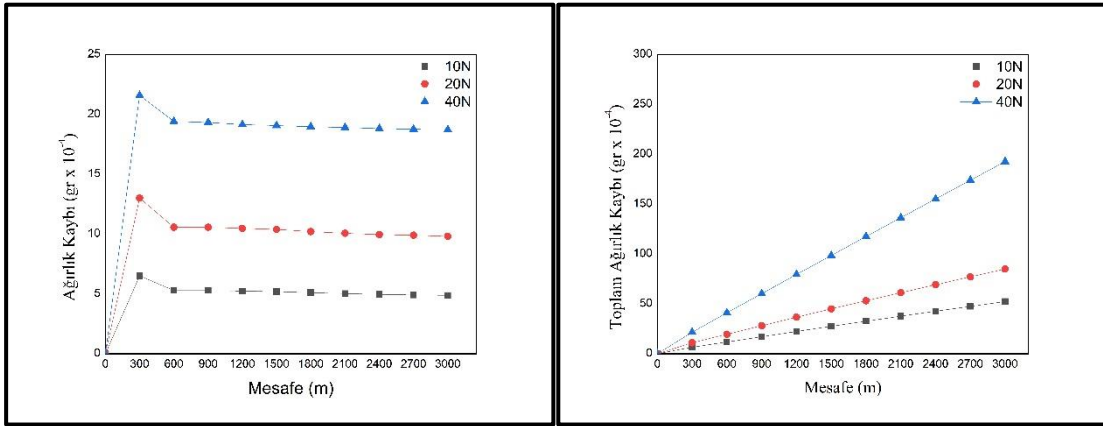
Şekil 5.168. 0M75-3 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.

Şekil 5.169. 'da 10 saat MA yapılarak, 750 °C'de 3 saat borlanan 10M75-3 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği verilmiştir. Artan yüklerle birlikte numunedeki ağırlık kaybı miktarları da artmıştır. 10, 20 ve 40 N yük altında ikinci ölçümden sonra numune nispeten kararlı bir ağırlık kaybı davranışı sergilemektedir. Toplam ağırlık kayıpları; 40 N yük altında 0,0223 gr, 20 N yük altında 0,0101 gr ve 10 N yük altında 0,0060 gr olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.169. 10M75-3 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.

Şekil 5.170. 'de 20 saat MA yapılarak, 750 °C'de 3 saat borlanan 20M75-3 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği verilmiştir. Artan yüklerle birlikte numunedeki ağırlık kaybı miktarları da artmıştır. 10, 20 ve 40 N yük altında ikinci ölçümden sonra numune nispeten kararlı bir ağırlık kaybı davranışı sergilemektedir. Toplam ağırlık kayıpları; 40 N yük altında 0,0193 gr, 20 N yük altında 0,0085 gr ve 10 N yük altında 0,0052 gr olarak tespit edilmiştir.

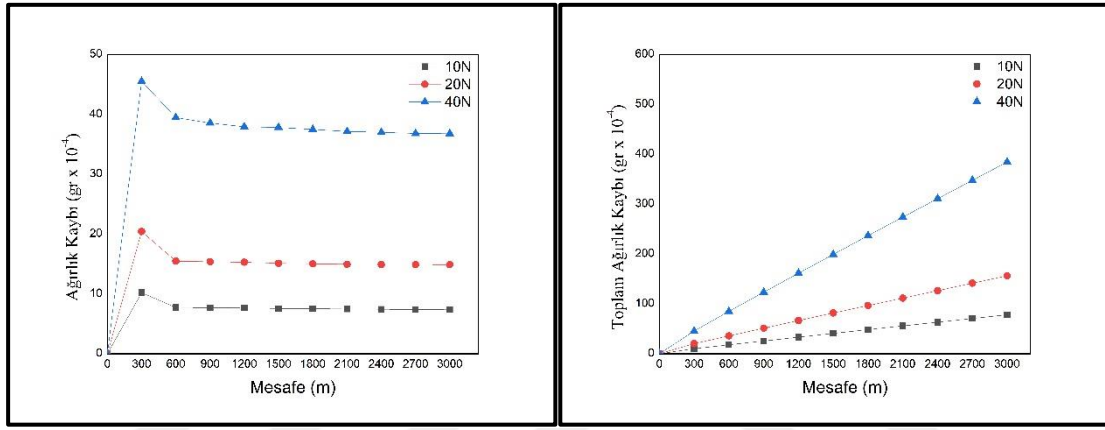


Şekil 5.170. 20M75-3 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.

750 °C, farklı MA işlem süreleri ve 3 saat borlama ısıtma işlemi yapılmış numunelere bakıldığında MA işleminin aşınma davranışının olumlu yönde etkilediği açıkça görülmektedir. 40N yük altında yapılan aşınma testlerinde, MA işlemi yapılmamış 0M75-3 kodlu numunenin MA işlemi yapılmış numunelere göre kararlı davranış sergilemediği görülmektedir. Benzer durum Y

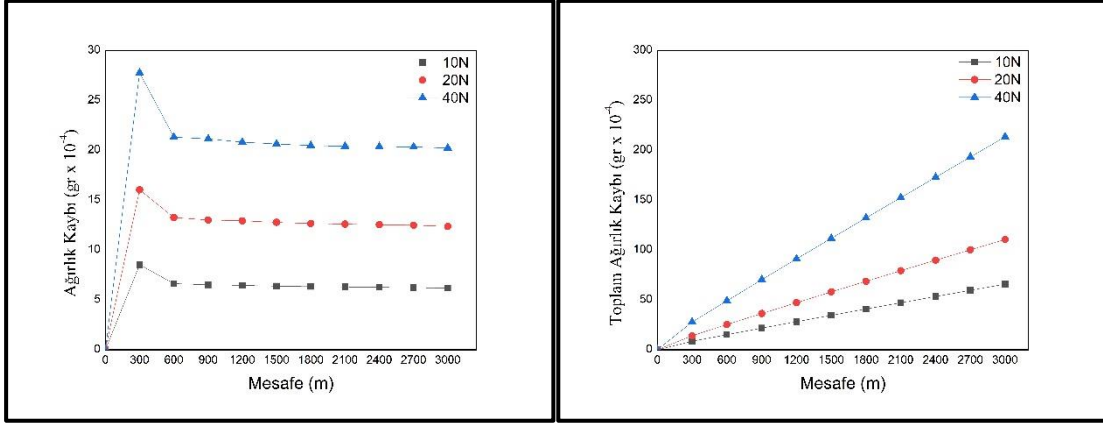
kodlu numunelerde de görülmüştür. Artan tabaka kalınlıkları ve MA işleminin aşınma üzerindeki etkisi doğru orantılı olduğu düşünülebilir.

Şekil 5.171. 'de MA yapılmadan, 750 °C'de 6 saat borlanan 0M75-6 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği verilmiştir. Artan yüklerle birlikte numunedeki ağırlık kaybı miktarları da artmıştır. 10 ve 20 N yük altında ikinci ölçümden sonra numune nispeten kararlı bir ağırlık kaybı davranışı sergilemesine rağmen 40 N yük altında bu durum 1800 m 'den sonra görülmektedir. Toplam ağırlık kayıpları; 40 N yük altında 0,0384 gr, 20 N yük altında 0,0156 gr ve 10 N yük altında 0,0078 gr olarak tespit edilmiştir.



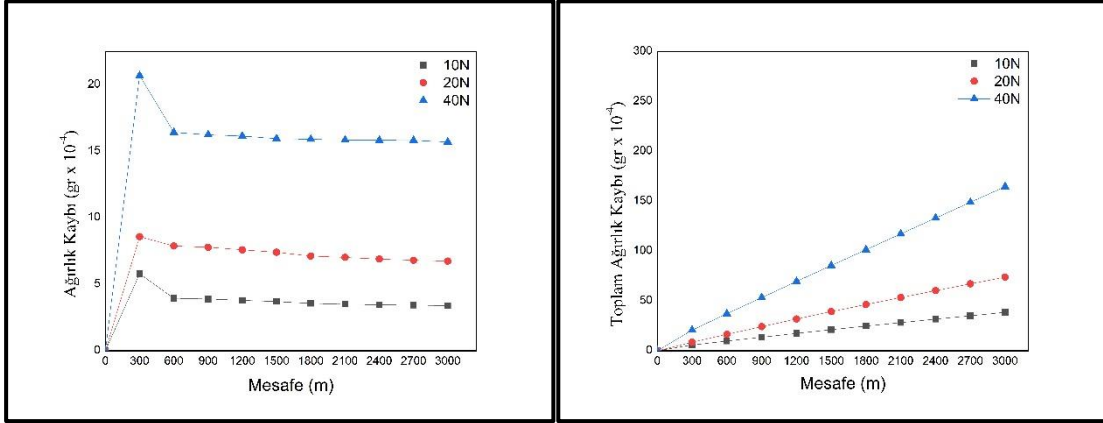
Şekil 5.171. 0M75-6 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.

Şekil 5.172. 'de 10 saat MA yapılarak, 750 °C'de 6 saat borlanan 10M75-6 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği verilmiştir. Artan yüklerle birlikte numunedeki ağırlık kaybı miktarları da artmıştır. 10, 20 ve 40 N yük altında ikinci ölçümden sonra numune nispeten kararlı bir ağırlık kaybı davranışı sergilemektedir. Toplam ağırlık kayıpları; 40 N yük altında 0,0213 gr, 20 N yük altında 0,0111 gr ve 10 N yük altında 0,0066 gr olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.172. 10M75-6 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.

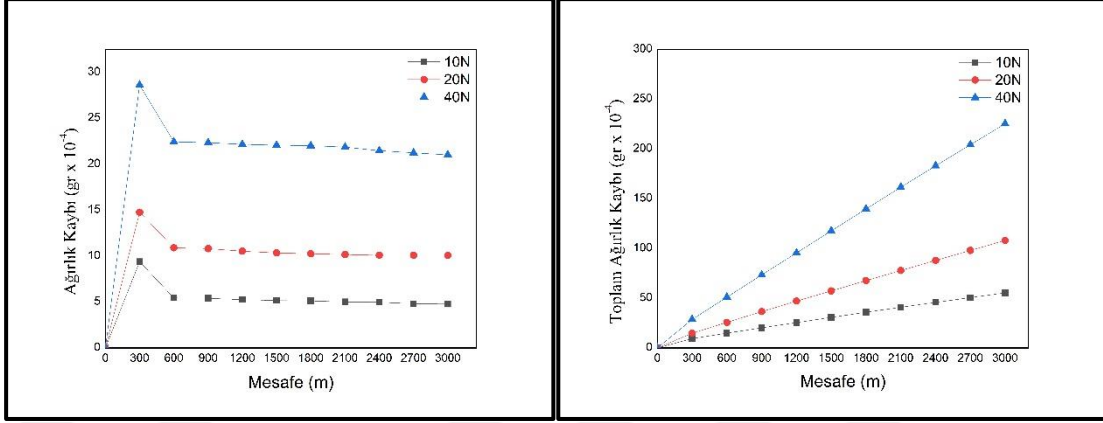
Şekil 5.173. 'de 20 saat MA yapılarak, 750 °C'de 6 saat borlanan 20M75-6 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği verilmiştir. Artan yüklerle birlikte numunedeki ağırlık kaybı miktarları da artmıştır. 10 ve 40 N yük altında ikinci ölçümden sonra numune nispeten kararlı bir ağırlık kaybı davranışı sergilemekteyken 20 N yük altında 1800 m den sonra nispeten kararlı bir ağırlık kaybı davranışı sergilemektedir. Toplam ağırlık kayıpları; 40 N yük altında 0,0164 gr, 20 N yük altında 0,0074 gr ve 10 N yük altında 0,0038 gr olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.173. 20M75-6 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.

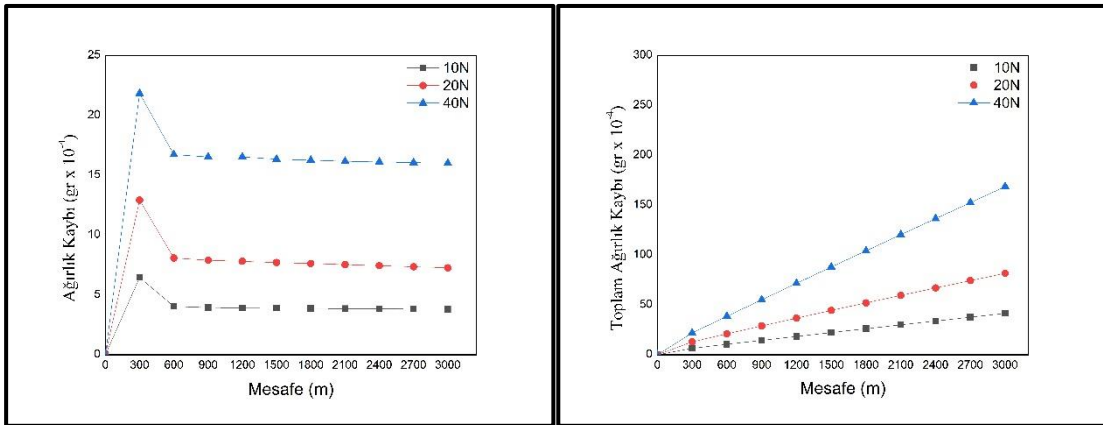
Şekil 5.174. 'de MA yapılmadan, 750 °C'de 12 saat borlanan 0M75-12 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği verilmiştir. Artan yüklerle birlikte numunedeki ağırlık kaybı miktarları da artmıştır. 10, 20 ve 40 N yük altında ikinci ölçümden sonra numune

nispeten kararlı bir ağırlık kaybı davranışı sergilemektedir. Toplam ağırlık kayıpları; 40 N yük altında 0,0225 gr, 20 N yük altında 0,0108 gr ve 10 N yük altında 0,0055 gr olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.174. 0M75-12 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.

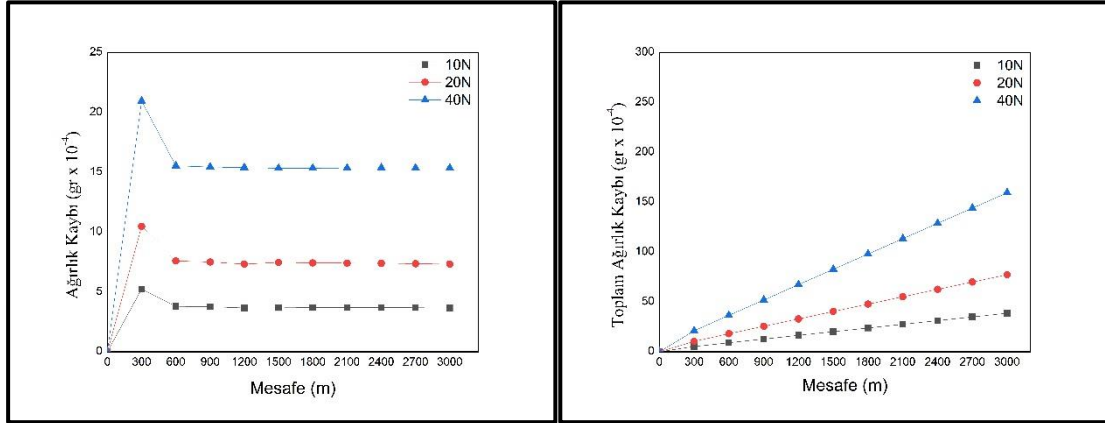
Şekil 5.175. 'de 10 saat MA yapılarak, 750 °C'de 12 saat borlanan 10M75-12 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği verilmiştir. Artan yüklerle birlikte numunedeki ağırlık kaybı miktarları da artmıştır. 10, 20 ve 40 N yük altında ikinci ölçümden sonra numune nispeten kararlı bir ağırlık kaybı davranışı sergilemektedir. Toplam ağırlık kayıpları; 40 N yük altında 0,0168 gr, 20 N yük altında 0,0081 gr ve 10 N yük altında 0,0041 gr olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.175. 10M75-12 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.

Şekil 5.176. 'da 20 saat MA yapılarak, 750 °C'de 12 saat borlanan 20M75-12 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği verilmiştir. Artan yüklerle birlikte

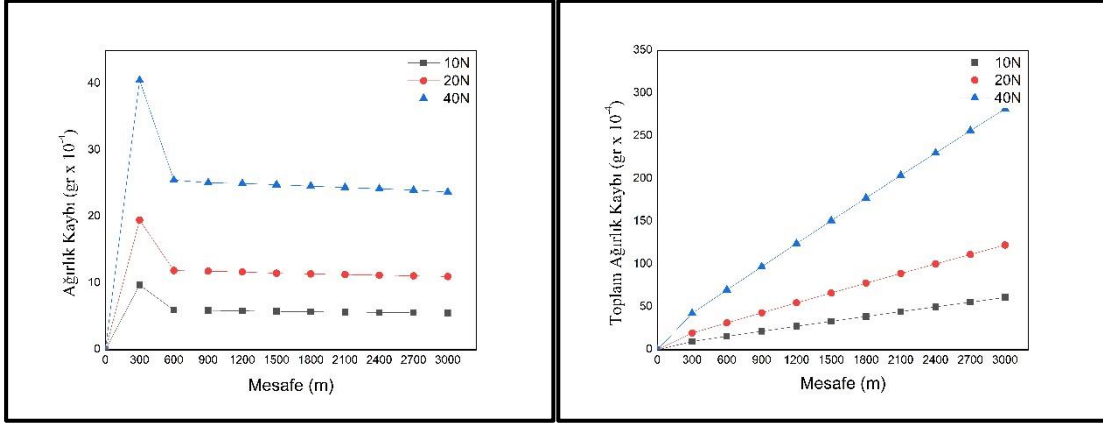
numunedeki ağırlık kaybı miktarları da artmıştır. 10, 20 ve 40 N yük altında ikinci ölçümden sonra numune nispeten kararlı bir ağırlık kaybı davranışı sergilemektedir. Toplam ağırlık kayıpları; 40 N yük altında 0,0159 gr, 20 N yük altında 0,0077 gr ve 10 N yük altında 0,0039 gr olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.176. 20M75-12 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.

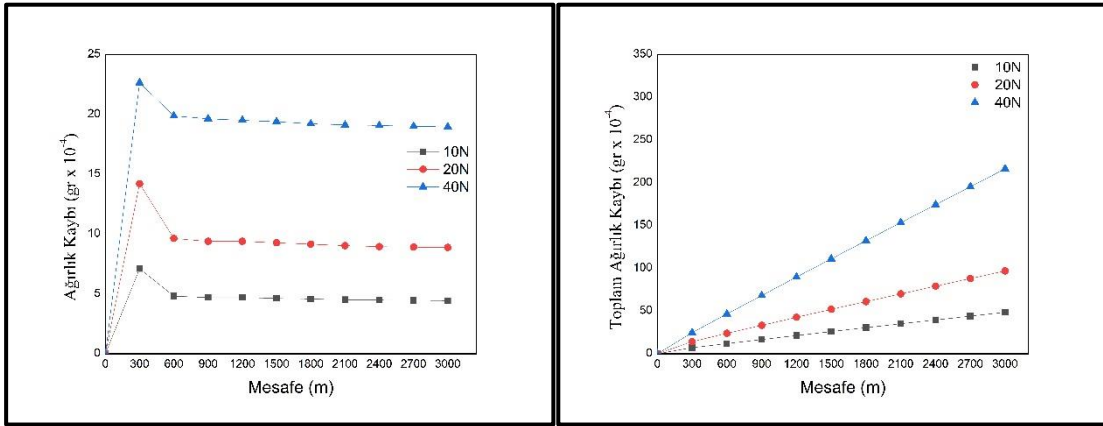
Aşınma testi verilerine göre, 750 °C sıcaklığında borlanan numunelerde 6 saat borlama işlemi sonrasında, aşınma davranışları kararlı yani ağırlık kayıpları açısından öngörülebilir halde devam ettiği görülmüştür. Aşınma ortamlarında çalışan malzemelerde bu durum çok önemlidir. MA işlemi ile birlikte ağırlık kayıplarında yani aşınma miktarlarında ciddi farklar olduğu gözlenmiştir.

Şekil 5.177. 'da MA yapılmadan, 800 °C'de 3 saat borlanan 0M80-3 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği verilmiştir. Artan yüklerle birlikte numunedeki ağırlık kaybı miktarları da artmıştır. 10, 20 ve 40 N yük altında ikinci ölçümden sonra numune nispeten kararlı bir ağırlık kaybı davranışı sergilemektedir. Toplam ağırlık kayıpları; 40 N yük altında 0,0282 gr, 20 N yük altında 0,0122 gr ve 10 N yük altında 0,0062 gr olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.177. 0M80-3 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.

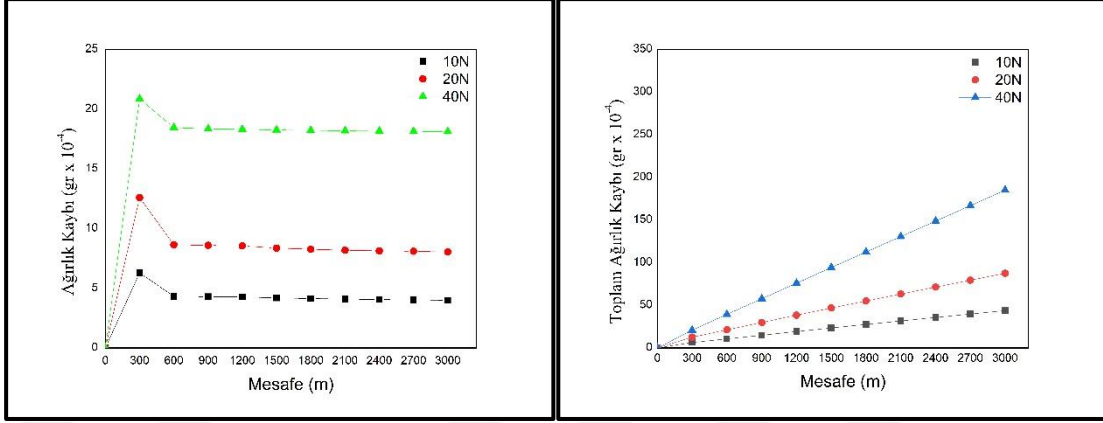
Şekil 5.178. 'de 10 saat MA yapılarak, 800 °C'de 3 saat borlanan 10M80-3 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği verilmiştir. Artan yüklerle birlikte numunedeki ağırlık kaybı miktarları da artmıştır. 10, 20 ve 40 N yük altında ikinci ölçümden sonra numune nispeten kararlı bir ağırlık kaybı davranışı sergilemektedir. Toplam ağırlık kayıpları; 40 N yük altında 0,0216 gr, 20 N yük altında 0,0097 gr ve 10 N yük altında 0,0048 gr olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.178. 10M80-3 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.

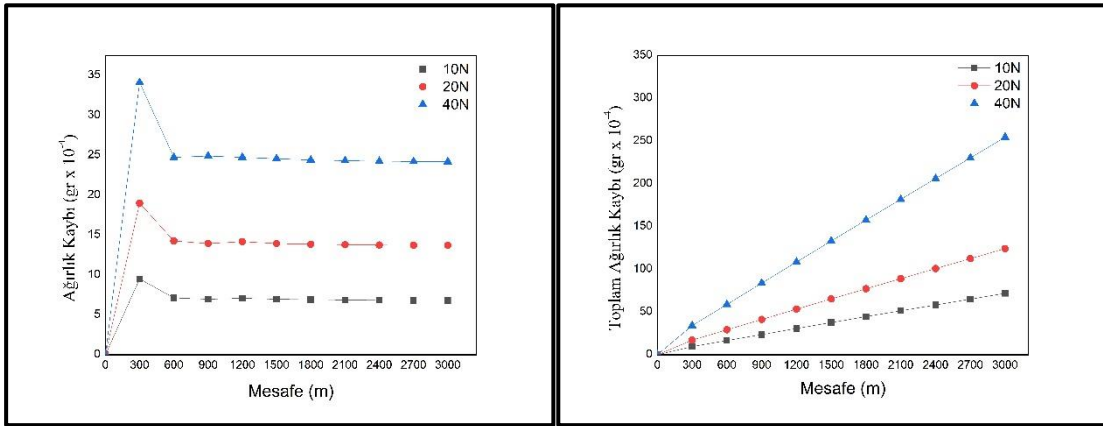
Şekil 5.179. 'da 20 saat MA yapılarak, 800 °C'de 3 saat borlanan 20M80-3 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği verilmiştir. Artan yüklerle birlikte numunedeki ağırlık kaybı miktarları da artmıştır. 10, 20 ve 40 N yük altında ikinci ölçümden sonra numune nispeten kararlı bir ağırlık kaybı davranışı sergilemektedir. Toplam ağırlık kayıpları; 40 N

yük altında 0,0184 gr, 20 N yük altında 0,0087 gr ve 10 N yük altında 0,0043 gr olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.179. 20M80-3 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.

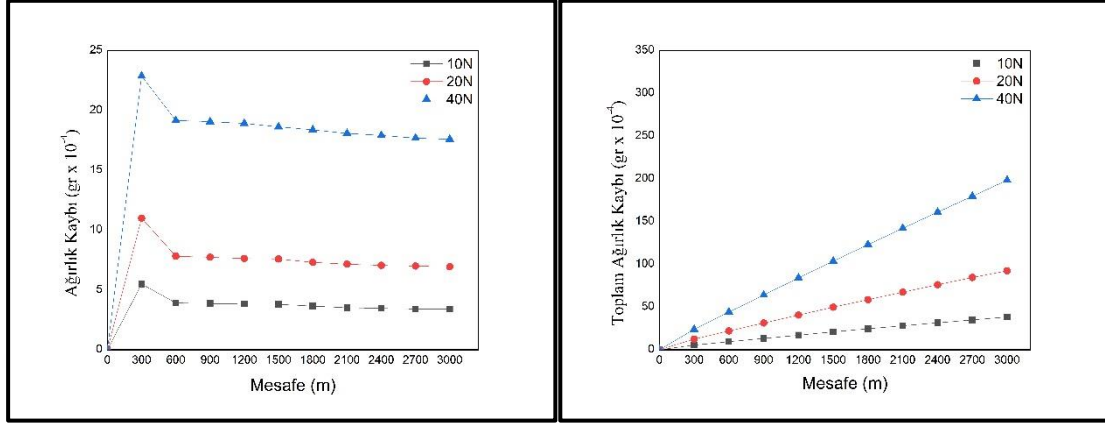
Şekil 5.180. 'de MA yapılmadan, 800 °C'de 6 saat borlanan 0M80-6 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği verilmiştir. Artan yüklerle birlikte numunedeki ağırlık kaybı miktarları da artmıştır. 10, 20 ve 40 N yük altında ikinci ölçümden sonra numune nispeten kararlı bir ağırlık kaybı davranışı sergilemektedir. Toplam ağırlık kayıpları; 40 N yük altında 0,0254 gr, 20 N yük altında 0,0124 gr ve 10 N yük altında 0,0071 gr olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.180. 0M80-6 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.

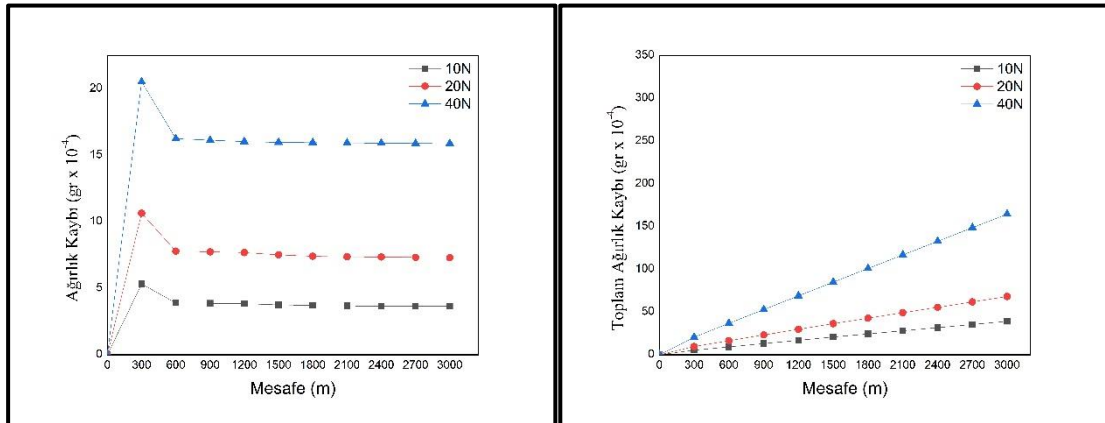
Şekil 5.181. 'de 10 saat MA yapılarak, 800 °C'de 6 saat borlanan 10M80-6 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği verilmiştir. Artan yüklerle birlikte numunedeki ağırlık kaybı miktarları da artmıştır. 10, 20 ve 40 N yük altında ikinci ölçümden sonra

numune nispeten kararlı bir ağırlık kaybı davranışı sergilemektedir. Toplam ağırlık kayıpları; 40 N yük altında 0,0198 gr, 20 N yük altında 0,0092 gr ve 10 N yük altında 0,0038 gr olarak tespit edilmiştir.



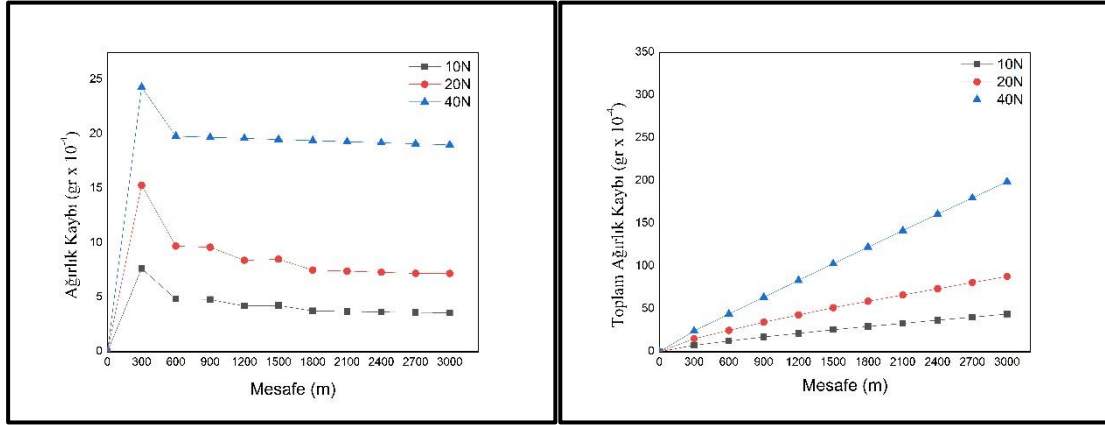
Şekil 5.181. 10M80-6 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.

Şekil 5.182. 'de 20 saat MA yapılarak, 800 °C'de 6 saat borlanan 20M80-6 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği verilmiştir. Artan yüklerle birlikte numunedeki ağırlık kaybı miktarları da artmıştır. 10, 20 ve 40 N yük altında ikinci ölçümden sonra numune nispeten kararlı bir ağırlık kaybı davranışı sergilemektedir. Toplam ağırlık kayıpları; 40 N yük altında 0,0164 gr, 20 N yük altında 0,0068 gr ve 10 N yük altında 0,0037 gr olarak tespit edilmiştir.



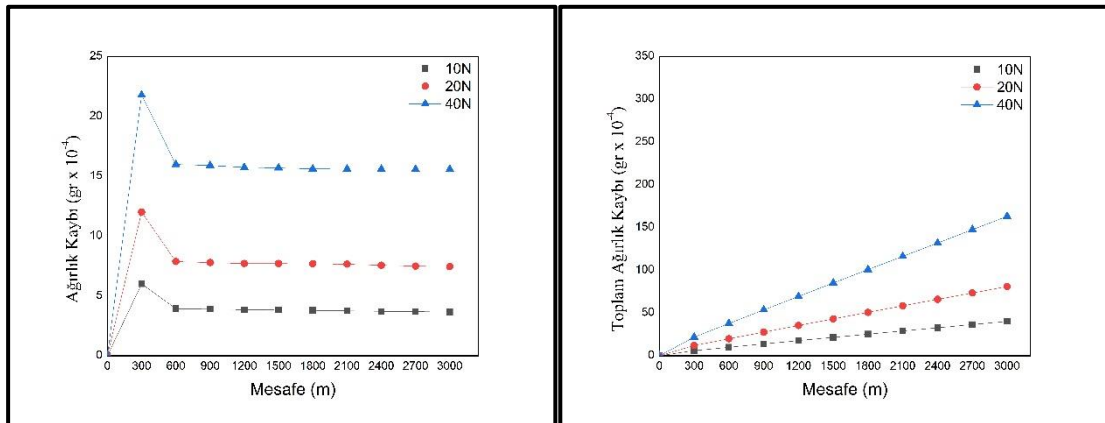
Şekil 5.182. 20M80-6 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.

Şekil 5.183. ‘de MA yapılmadan, 800 °C’de 12 saat borlanan 0M80-12 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği verilmiştir. Artan yüklerle birlikte numunedeki ağırlık kaybı miktarları da artmıştır. 10 ve 20 N yük altında 1800 m ‘den sonra nispeten kararlı bir ağırlık kaybı davranışı sergilemekteyken 40 N yük altında ikinci ölçümden sonra numune nispeten kararlı bir ağırlık kaybı davranışı sergilemektedir. Toplam ağırlık kayıpları; 40 N yük altında 0,0189 gr, 20 N yük altında 0,0088 gr ve 10 N yük altında 0,0045 gr olarak tespit edilmiştir.



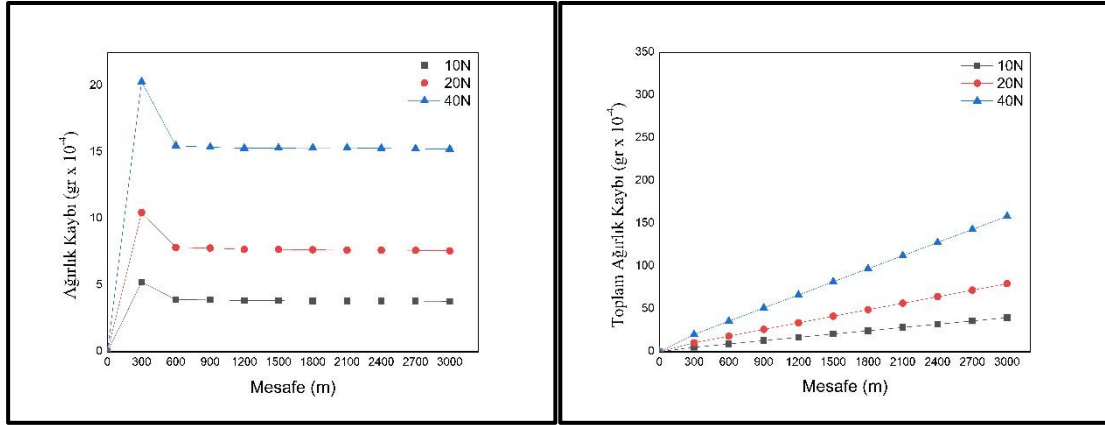
Şekil 5.183. 0M80-12 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.

Şekil 5.184. ‘de 10 saat MA yapılarak, 800 °C’de 12 saat borlanan 10M80-12 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği verilmiştir. 10, 20 ve 40 N yük altında ikinci ölçümden sonra numune nispeten kararlı bir ağırlık kaybı davranışı sergilemektedir. Toplam ağırlık kayıpları; 40 N yük altında 0,0163 gr, 20 N yük altında 0,0081 gr ve 10 N yük altında 0,0040 gr olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.184. 10M80-12 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.

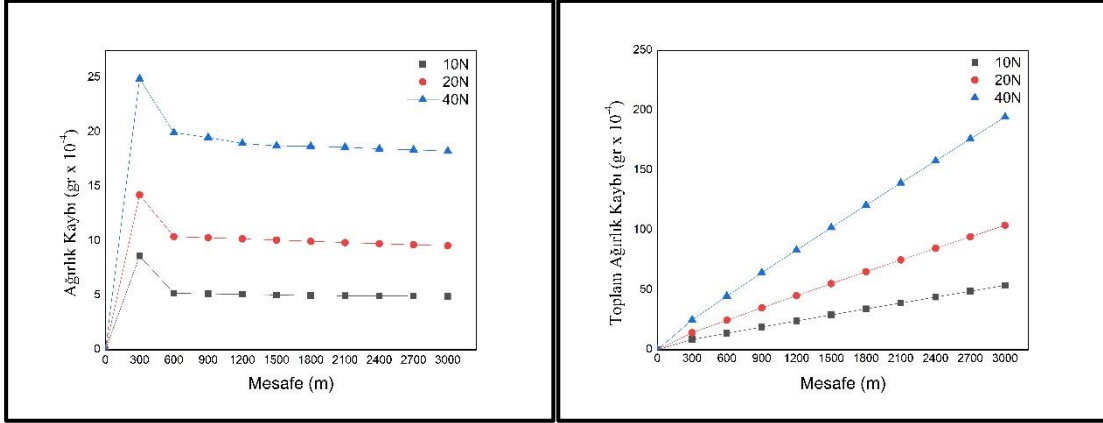
Şekil 5.185. ‘de 20 saat MA yapılarak, 800 °C’de 12 saat borlanan 20M80-12 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği verilmiştir. Artan yük miktarına göre numunedeki ağırlık kaybı miktarları da artmıştır. 10, 20 ve 40 N yük altında ikinci ölçümden sonra numune nispeten kararlı bir ağırlık kaybı davranışı sergilemektedir. Toplam ağırlık kayıpları; 40 N yük altında 0,0158 gr, 20 N yük altında 0,0080 gr ve 10 N yük altında 0,0039 gr olarak tartılmıştır.



Şekil 5.185. 20M80-12 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.

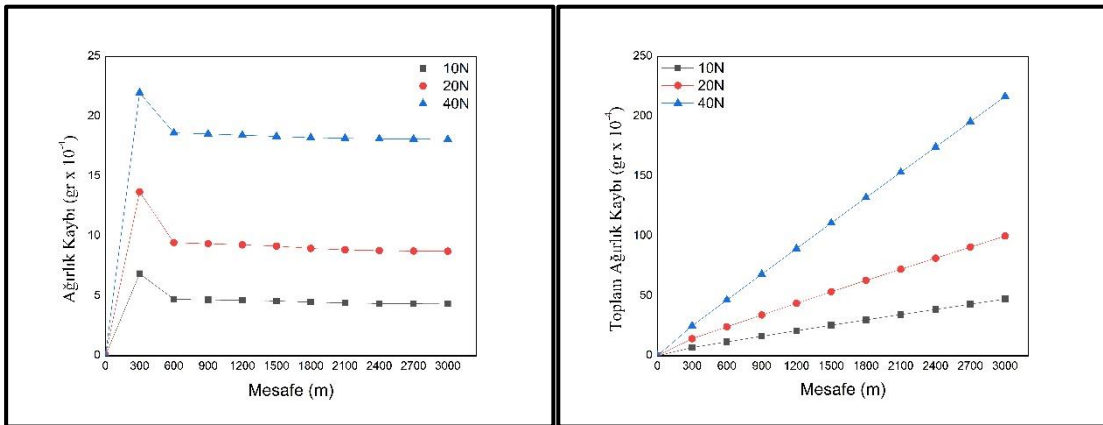
Aşınma testi verilerine göre, 800 °C sıcaklığında borlanan numunelerde artan MA işlem süresi ve paralelinde artan tabaka kalınlıkları sebebiyle, toplam ağırlık kayıplarının sabit kaldığı anlaşılmıştır. Bu durum, borür tabakalarının aşınma üzerinde tamamen baskın bir davranış sergilediği, yüzeyi kaplanan St28 ‘in aşınma üzerinde herhangi bir etkisi kalmamasıyla açıklanmaktadır. Numunenin aşınma yüzeylerinde yağlayıcı etkisi ile bilinen boroksit oluştuğu ağırlık kayıplarının benzer seviyelerde kalmasında bu durumun etkili olduğu düşünülmektedir [17].

Şekil 5.186. ‘da MA yapılmadan, 850 °C’de 3 saat borlanan 0M85-3 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği verilmiştir. Artan yüklerle birlikte numunedeki ağırlık kaybı miktarları da artmıştır. 10 ve 20 N yük altında numune ikinci ölçümden sonra nispeten kararlı bir ağırlık kaybı davranışı sergilemekteyken 40 N yük altında bu durum 1800 m ‘den sonra görülmektedir. Toplam ağırlık kayıpları; 40 N yük altında 0,0194 gr, 20 N yük altında 0,0103 gr ve 10 N yük altında 0,0053 gr olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.186. 0M85-3 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.

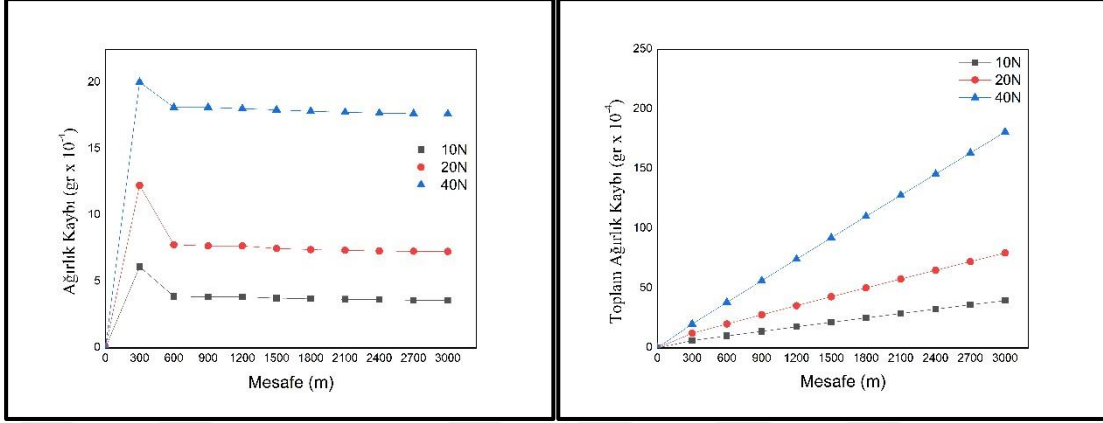
Şekil 5.187. 'de 10 saat MA yapılarak, 850 °C'de 3 saat borlanan 10M85-3 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği verilmiştir. Artan yüklerle birlikte numunedeki ağırlık kaybı miktarları da artmıştır. 10, 20 ve 40 N yük altında ikinci ölçümden sonra numune nispeten kararlı bir ağırlık kaybı davranışı sergilemektedir. Toplam ağırlık kayıpları; 40 N yük altında 0,0216 gr, 20 N yük altında 0,0099 gr ve 10 N yük altında 0,0047 gr olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.187. 10M85-3 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.

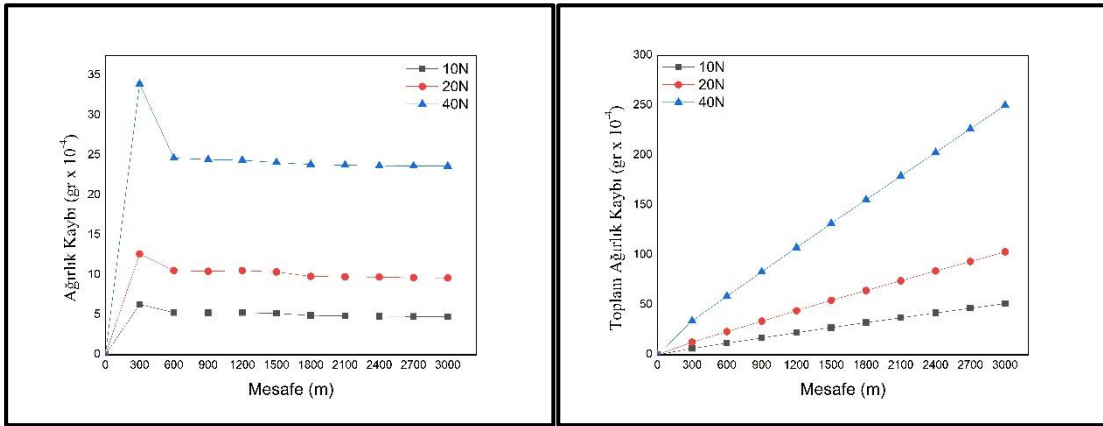
Şekil 5.188. 'de 20 saat MA yapılarak, 850 °C'de 3 saat borlanan 20M85-3 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği verilmiştir. Artan yüklerle birlikte numunedeki ağırlık kaybı miktarları da artmıştır. 10, 20 ve 40 N yük altında ikinci ölçümden sonra numune nispeten kararlı bir ağırlık kaybı davranışı sergilemektedir. Toplam ağırlık kayıpları; 40 N

yük altında 0,0180 gr, 20 N yük altında 0,0079 gr ve 10 N yük altında 0,0040 gr olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.188. 20M85-3 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.

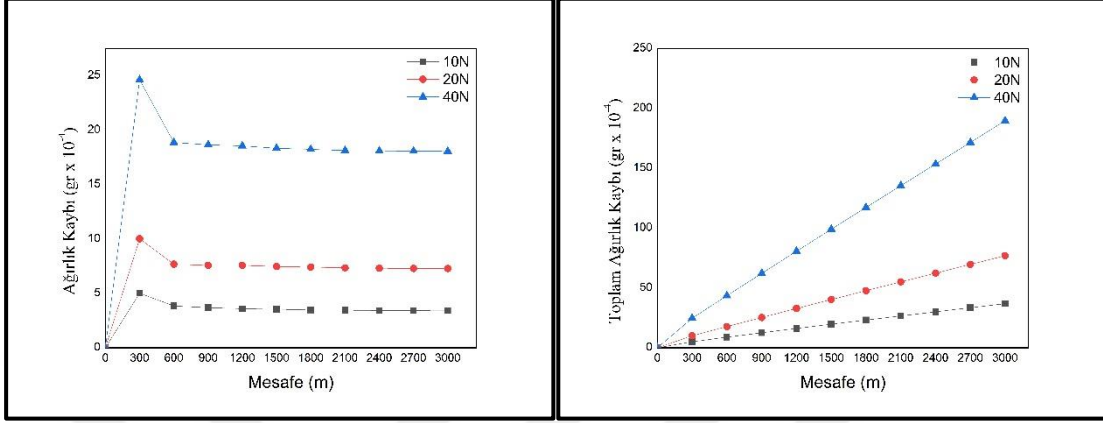
Şekil 5.189. 'da MA yapılmadan, 850 °C'de 6 saat borlanan 0M85-6 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği verilmiştir. Artan yüklerle birlikte numunedeki ağırlık kaybı miktarları da artmıştır. 10, 20 ve 40 N yük altında ikinci ölçümden sonra numune nispeten kararlı bir ağırlık kaybı davranışı sergilemektedir. Toplam ağırlık kayıpları; 40 N yük altında 0,0250 gr, 20 N yük altında 0,0103 gr ve 10 N yük altında 0,0051 gr olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.189. 0M85-6 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.

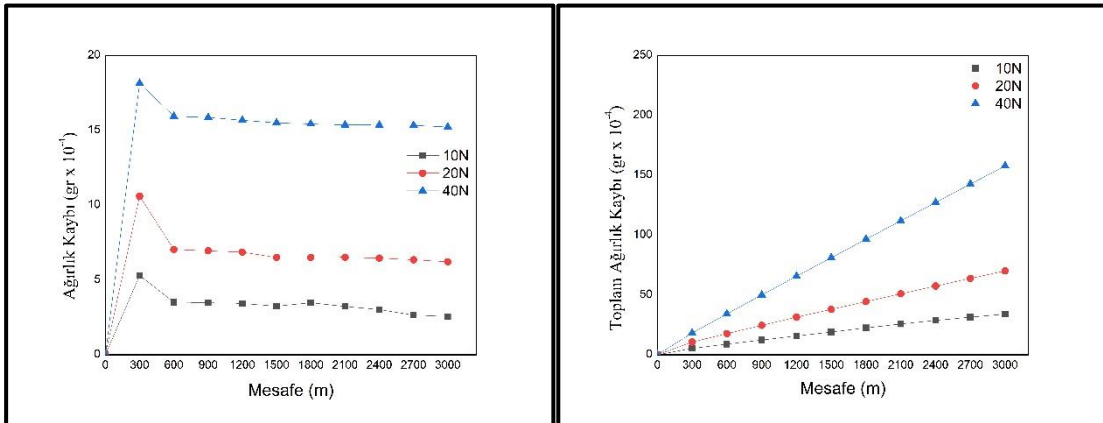
Şekil 5.190. 'da 10 saat MA yapılarak, 850 °C'de 6 saat borlanan 10M85-6 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği verilmiştir. Artan yüklerle birlikte numunedeki ağırlık kaybı miktarları da artmıştır. 10, 20 ve 40 N yük altında ikinci ölçümden sonra

numune nispeten kararlı bir ağırlık kaybı davranışı sergilemektedir. Toplam ağırlık kayıpları; 40 N yük altında 0,0189 gr, 20 N yük altında 0,0077 gr ve 10 N yük altında 0,0037 gr olarak tespit edilmiştir.



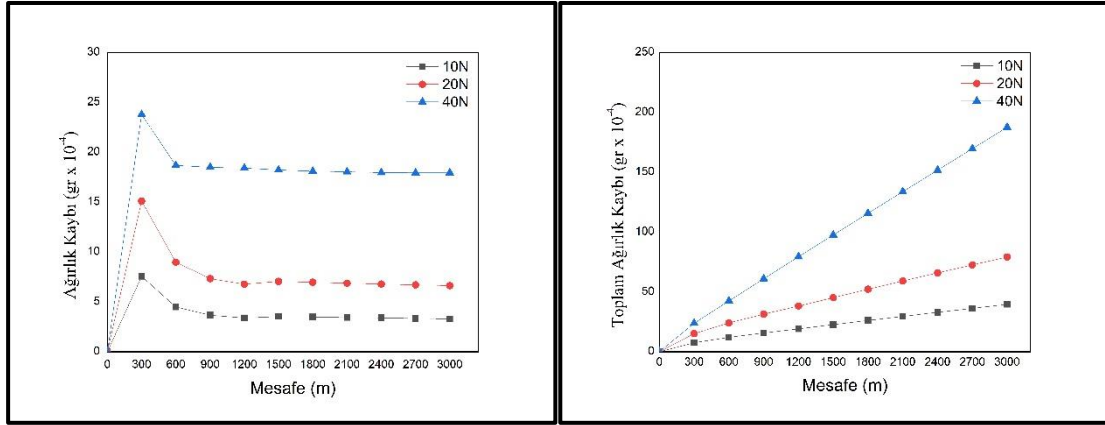
Şekil 5.190. 10M85-6 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.

Şekil 5.191. 'de 20 saat MA yapılarak, 850 °C'de 6 saat borlanan 20M85-6 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği verilmiştir. Artan yüklerle birlikte numunedeki ağırlık kaybı miktarları da artmıştır. 10, 20 ve 40 N yük altında ikinci ölçümden sonra numune nispeten kararlı bir ağırlık kaybı davranışı sergilemektedir. Toplam ağırlık kayıpları; 40 N yük altında 0,0157 gr, 20 N yük altında 0,0070 gr ve 10 N yük altında 0,0034 gr olarak tespit edilmiştir.



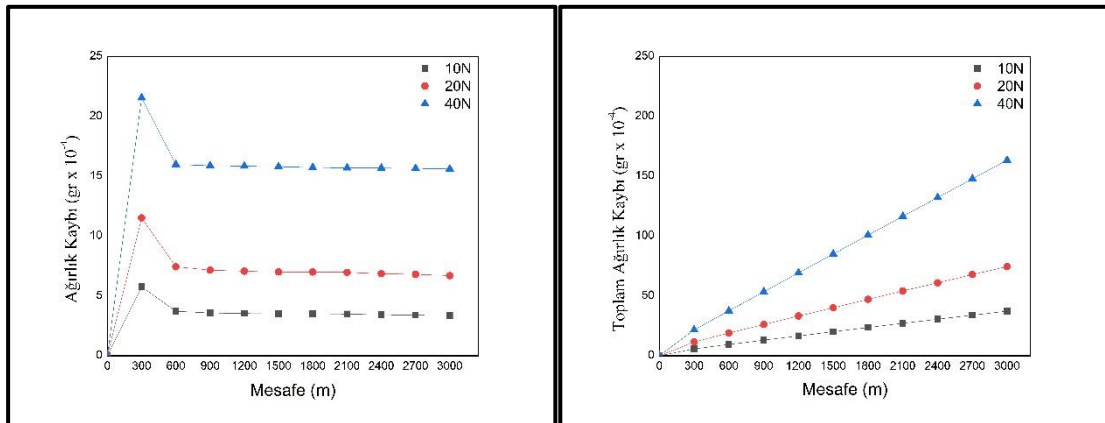
Şekil 5.191. 20M85-6 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.

Şekil 5.192. ‘de MA yapılmadan, 850 °C’de 12 saat borlanan 0M85-12 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği verilmiştir. Artan yüklerle birlikte numunedeki ağırlık kaybı miktarları da artmıştır. 10, 20 ve 40 N yük altında ikinci ölçümden sonra numune nispeten kararlı bir ağırlık kaybı davranışı sergilemektedir. Toplam ağırlık kayıpları; 40 N yük altında 0,0188 gr, 20 N yük altında 0,0079 gr ve 10 N yük altında 0,0039 gr olarak tespit edilmiştir.



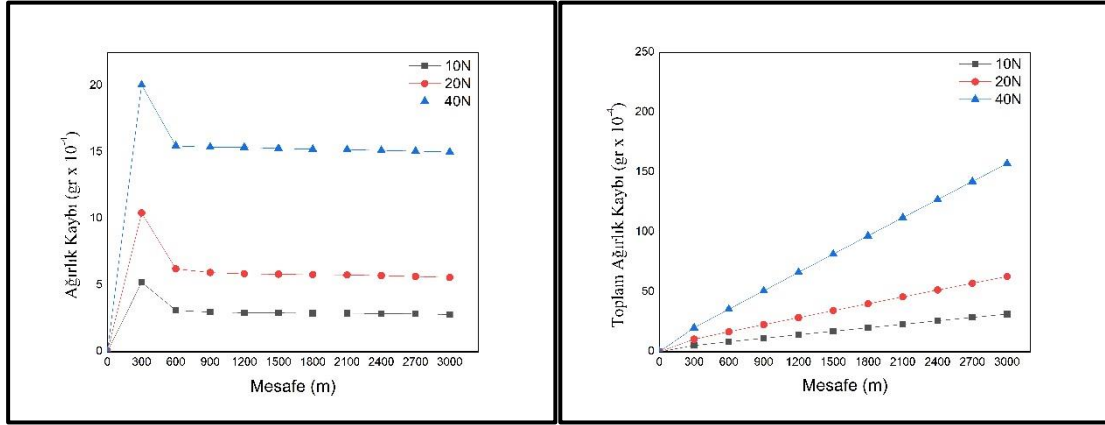
Şekil 5.192. 0M85-12 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.

Şekil 5.193. ‘de 10 saat MA yapılarak, 850 °C’de 12 saat borlanan 10M85-12 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği verilmiştir. Artan yüklerle birlikte numunedeki ağırlık kaybı miktarları da artmıştır. 10, 20 ve 40 N yük altında ikinci ölçümden sonra numune nispeten kararlı bir ağırlık kaybı davranışı sergilemektedir. Toplam ağırlık kayıpları; 40 N yük altında 0,0163 gr, 20 N yük altında 0,0074 gr ve 10 N yük altında 0,0037 gr olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.193. 10M85-12 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.

Şekil 5.194. 'de 20 saat MA yapılarak, 850 °C'de 12 saat borlanan 20M85-12 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği verilmiştir. Artan yüklerle birlikte numunedeki ağırlık kaybı miktarları da artmıştır. 10, 20 ve 40 N yük altında ikinci ölçümden sonra numune nispeten kararlı bir ağırlık kaybı davranışı sergilemektedir. Toplam ağırlık kayıpları; 40 N yük altında 0,0157 gr, 20 N yük altında 0,0063 gr ve 10 N yük altında 0,0031 gr olarak tespit edilmiştir.



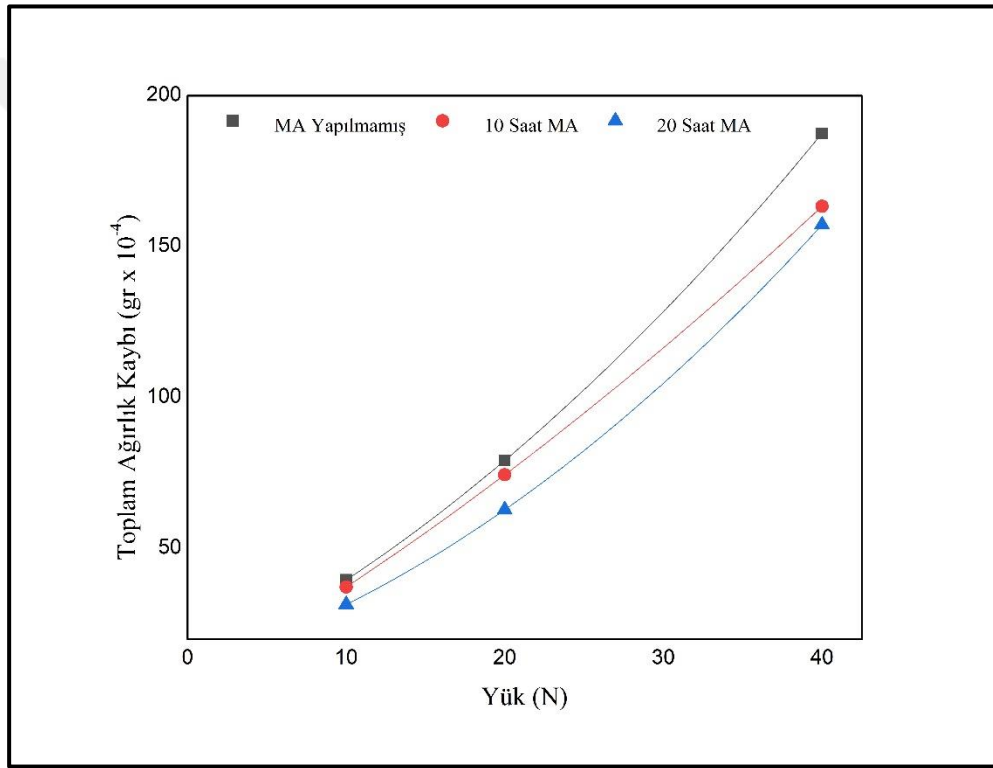
Şekil 5.194. 20M85-12 kodlu numuneye ait farklı yüklerdeki Ağırlık Kaybı-Mesafe ve Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri.

Yapılan çalışmada borlama ısı işlem sıcaklığı açısından en yüksek sıcaklığa sahip olan seride en yüksek borür tabaka kalınlıkları ölçülmüştür. Aşınma testi verilerine göre de, MA işlemi ile birlikte aşınma karakteristiği farklılık göstermemesine rağmen 850 °C sıcaklıkta yapılan numunelerde en düşük ağırlık kayıpları söz konusu olmuştur. 40 N yük altında, borlanmamış referans St28 numunesinin toplam ağırlık kaybı 0,769 gr iken en kalın borür tabakasına sahip 20M85-12 kodlu numunede bu değer 0,0157 gr olarak ölçülmüştür. Aynı aşınma şartları altında, MA ön işlemi olmadan, 10 saat MA işlemi ve 20 saat MA işlemi ile elde edilen jellerle yapılan borlamalar neticesinde toplam ağırlık kaybındaki iyileşmeler sırasıyla yaklaşık 42, 47 ve 49 kat olarak hesaplanmıştır.

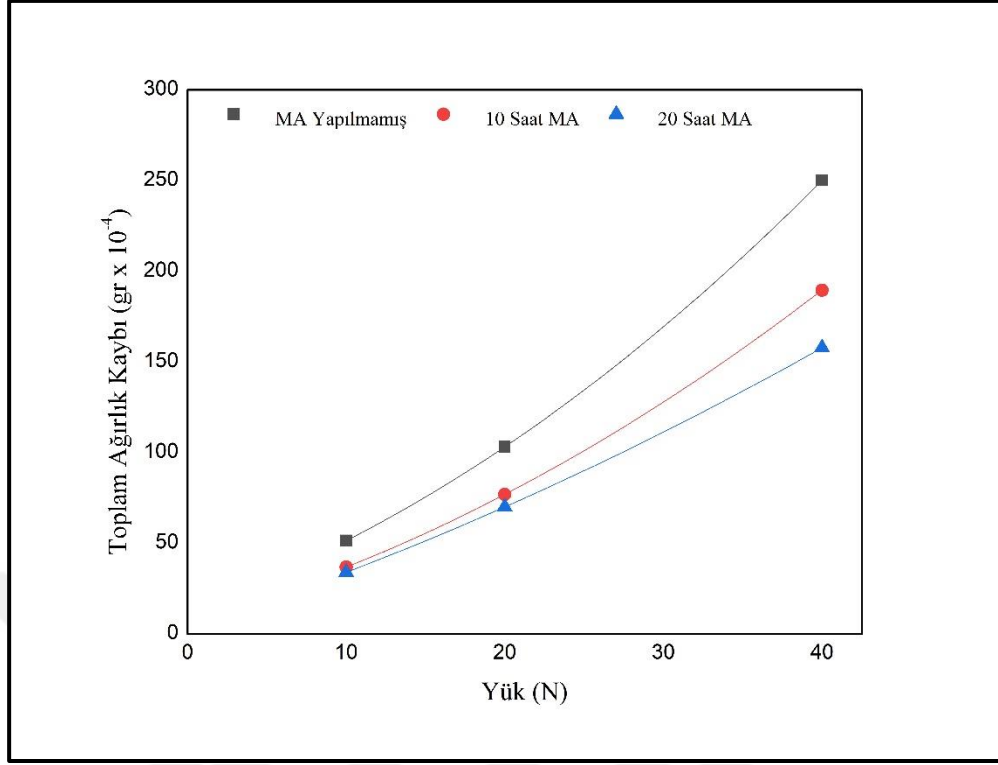
Genel olarak borlanmamış referans St28 numunesinde olduğu gibi, borür tabakasının aşındığı numunelerde de kararlı aşınma davranışının görülmediği ortaya konulmuştur. Hem MA ön işlemi ile hem de MA ön işlemi olmadan borlama yapılan numunelerde toplam kütle kayıpları beklenildiği gibi azalmıştır. Düşük sıcaklıklarda borlama yapılan numunelerde izafi olarak çok daha düşük ağırlık kayıplarının tespit edilmiş olması, MA ön işlemini öne çıkaran hususlardan biridir. MA sayesinde borlama işleminin yüksek sıcaklıklara çıkmadan nispeten düşük sıcaklıklarda yapılabilir olması, borlama yapılacak ana matris malzemesinin iç yapısının daha az ısıya maruz kalması ve iç yapıda daha az faz değişiminin oluşması anlamına gelmektedir. MA ön işlemini,

aşınma verilerinde öne çıkaran bir diğer husus da daha düşük borlama işlem sürelerinde daha düşük ağırlık kayıplarının ölçülmüş olmasıdır. Borlama işlem süresindeki azalma, matris malzemesinde meydana gelmesi muhtemel istenmeyen faz değişimleri için gerekli sürenin de azaltılması anlamını taşımaktadır.

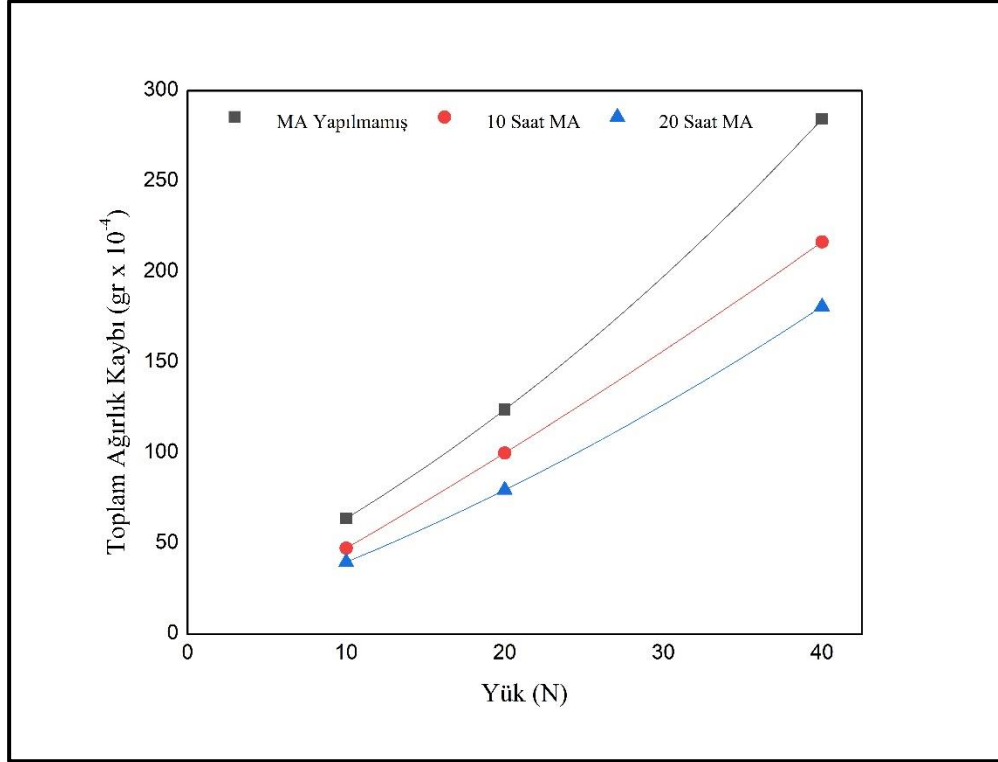
Şekil 5.195 – 5.197. ‘de 850 °C ‘de farklı sürelerde borlama yapılmış MA işlem sürelerine göre 0, 10 ve 20 saat işlem görmüş numunelerin farklı yüklerdeki toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri verilmiştir Artan yüke rağmen MA işlem sürelerindeki artışın toplam kütle kaybını azalttığı grafiklerden anlaşılmaktadır. Şekil 5.195.-5.197. ‘ye bakıldığında toplam ağırlık kayıpları artan borlama süresiyle çok az da olsa düşmektedir.



Şekil 5.195. 850 °C 12 saat süreyle borlama yapılmış numunelerin farklı yüklerdeki Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği.

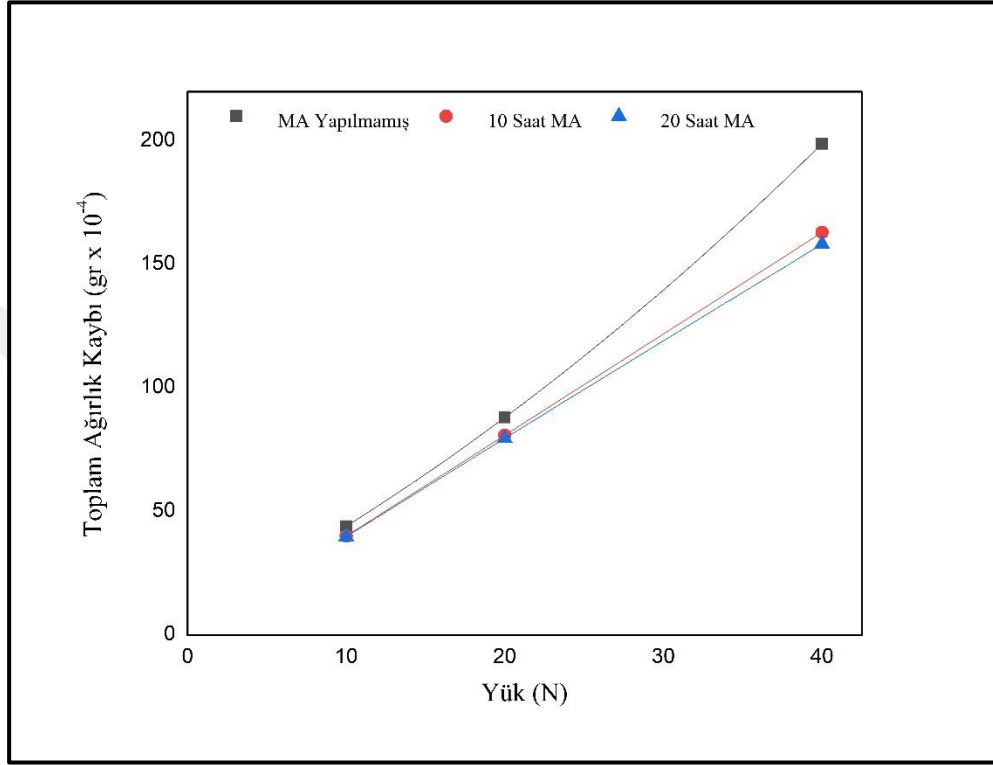


Şekil 5.196. 850 °C 6 saat süreyle borlama yapılmış numunelerin farklı yüklerdeki Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği.

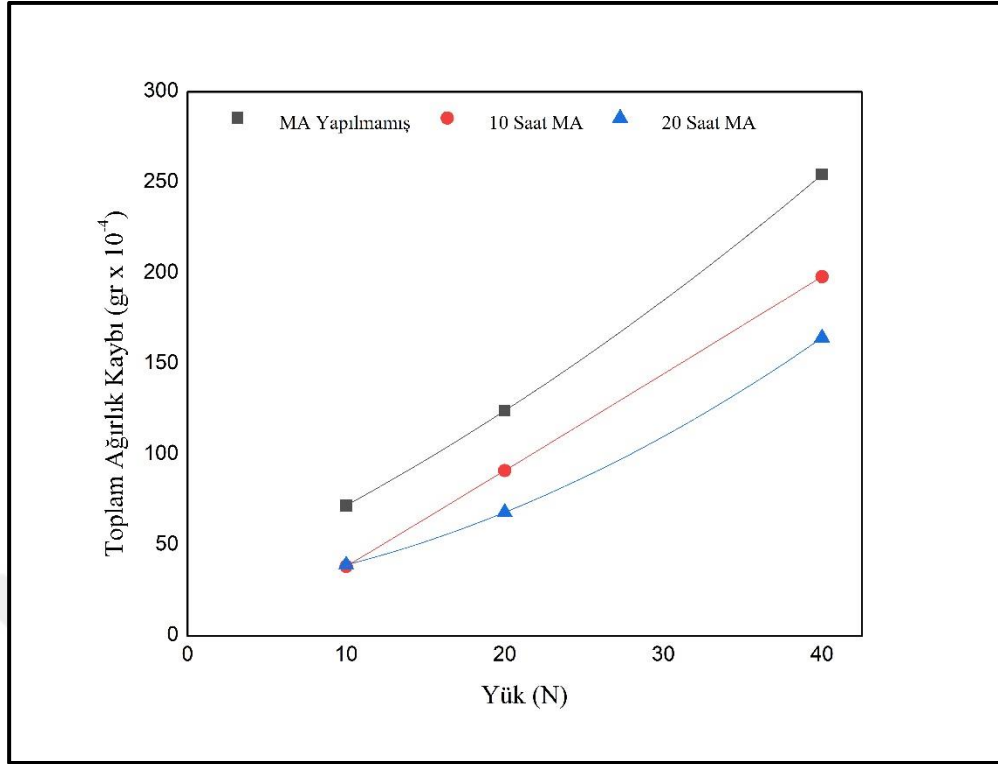


Şekil 5.197. 850 °C 3 saat süreyle borlama yapılmış numunelerin farklı yüklerdeki Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği.

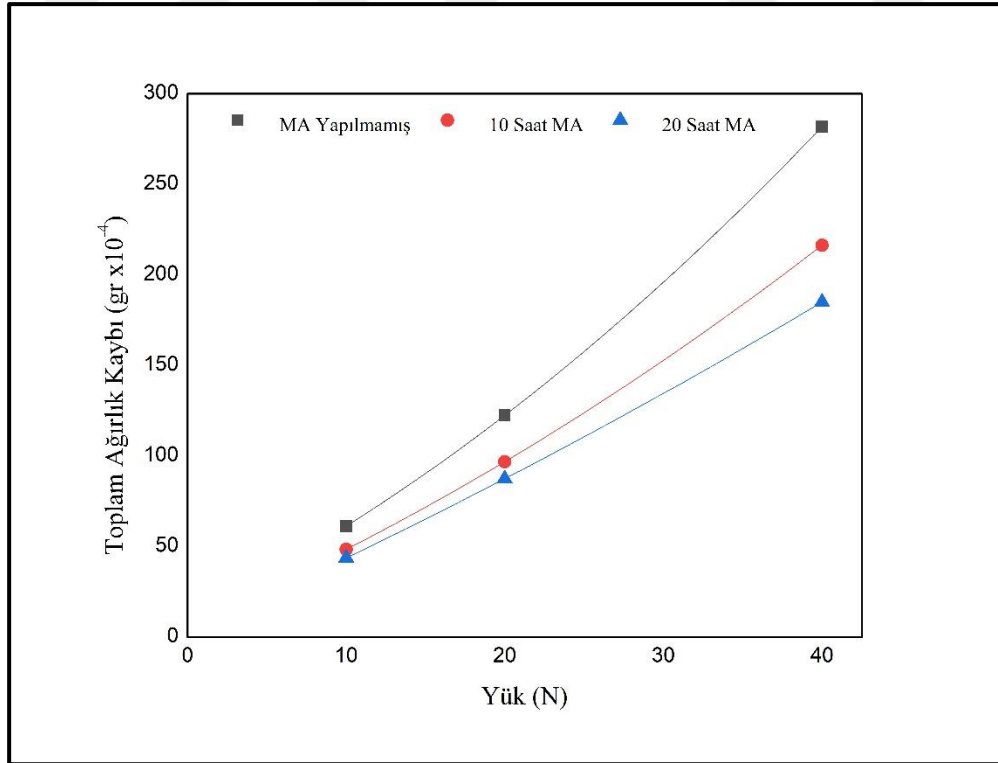
Şekil 5.198 – 5.200. ‘de 800 °C ‘de farklı sürelerde borlama yapılmış MA işlem sürelerine göre 0, 10 ve 20 saat işlem görmüş numunelerin farklı yüklerdeki toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri verilmiştir. 850 °C ‘de üretilmiş numunelerin aşınma grafiklerinde benzer durumun 800 °C ‘de üretilmiş numuneler için de geçerli olduğu söylenebilir.



Şekil 5.198. 800 °C 12 saat süreyle borlama yapılmış numunelerin farklı yüklerdeki Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği.

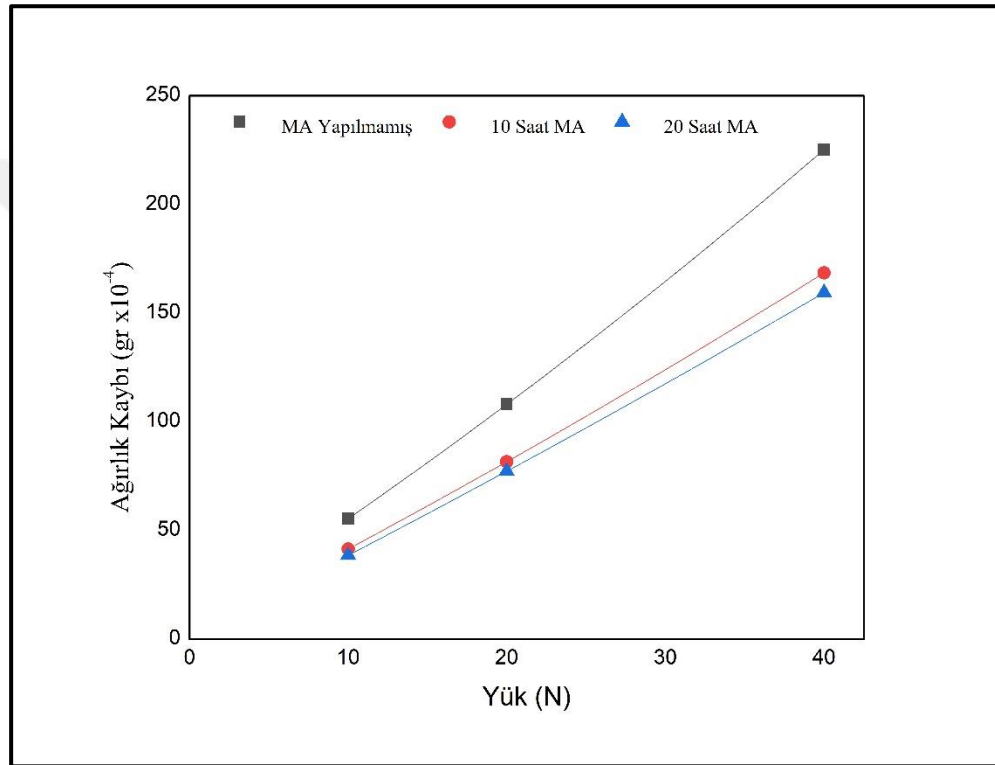


Şekil 5.199. 800 °C 6 saat süreyle borlama yapılmış numunelerin farklı yüklerdeki Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği.

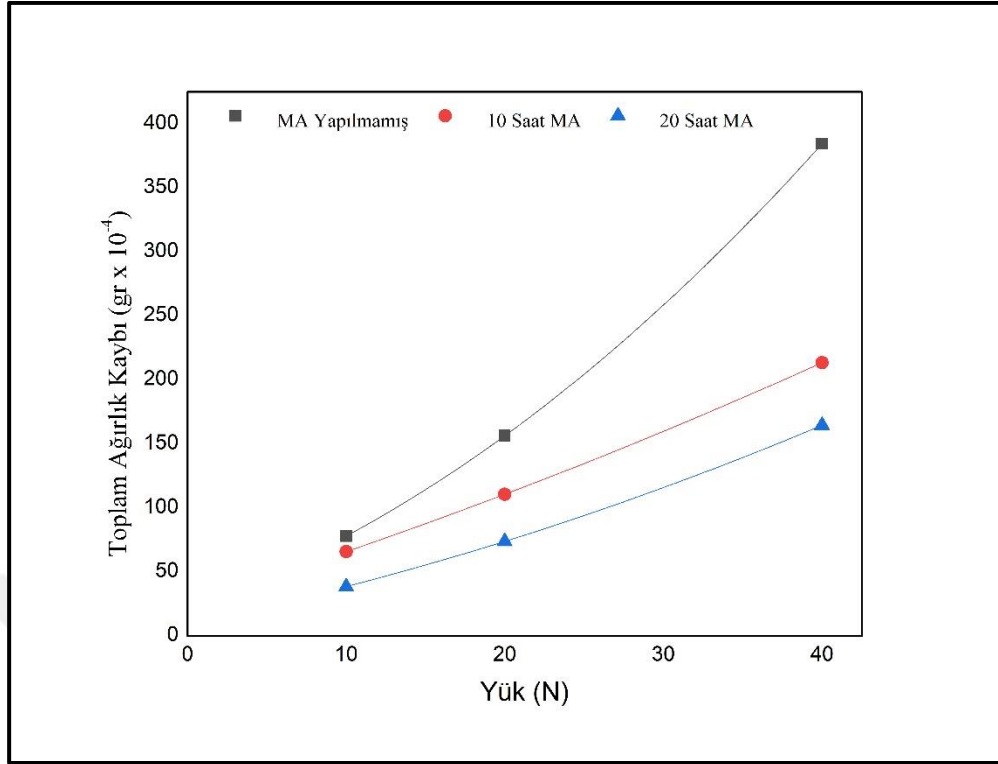


Şekil 5.200. 800 °C 3 saat süreyle borlama yapılmış numunelerin farklı yüklerdeki Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği.

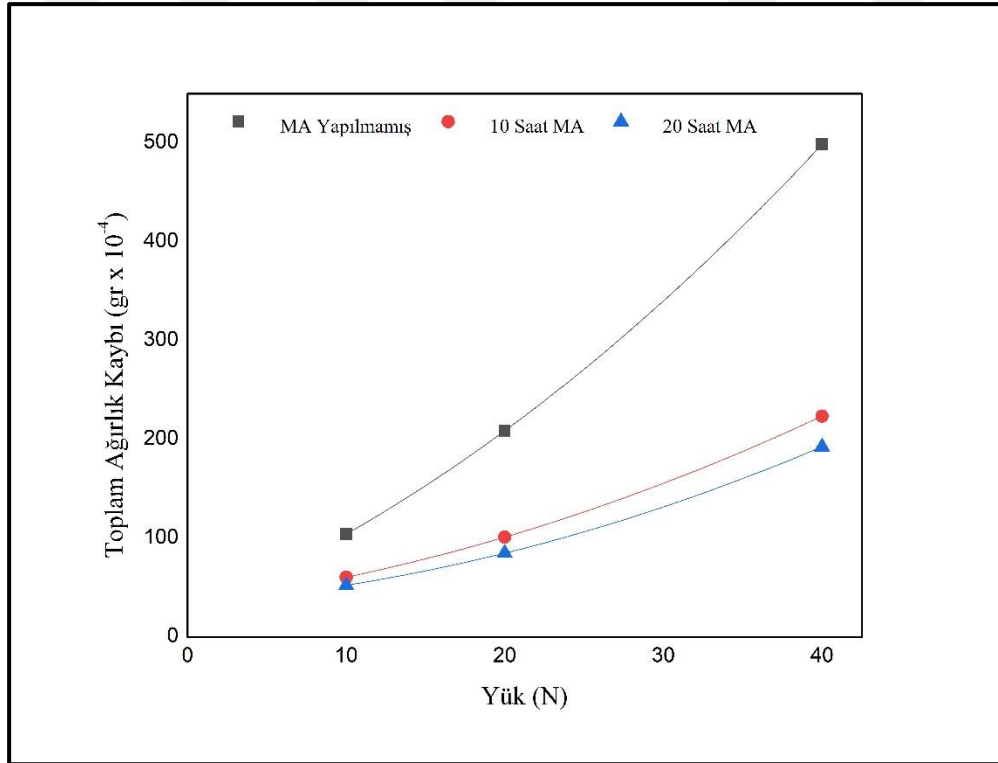
Şekil 5.201 – 5.203. ‘de 750 °C ‘de farklı sürelerde borlama yapılmış MA işlem sürelerine göre 0, 10 ve 20 saat işlem görmüş numunelerin farklı yüklerdeki toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafikleri verilmiştir. Hem 850 °C hem de 800 °C ‘de üretilmiş numunelerin aşınma grafiklerine bakıldığında aşınma karakteristiği olarak birbirleri ile benzer olduğu görülmektedir. En az kütle kaybı 750 °C – 12 saat borlama – 20 saat MA işlem koşullarıyla üretilmiş numunede olduğu görülmektedir. En fazla kütle kaybının ise MA işlemi yapılmamış jel ile 750 °C ‘de 3 saat borlanan numunede olduğu görülmektedir.



Şekil 5.201. 750 °C 12 saat süreyle borlama yapılmış numunelerin farklı yüklerdeki Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği.

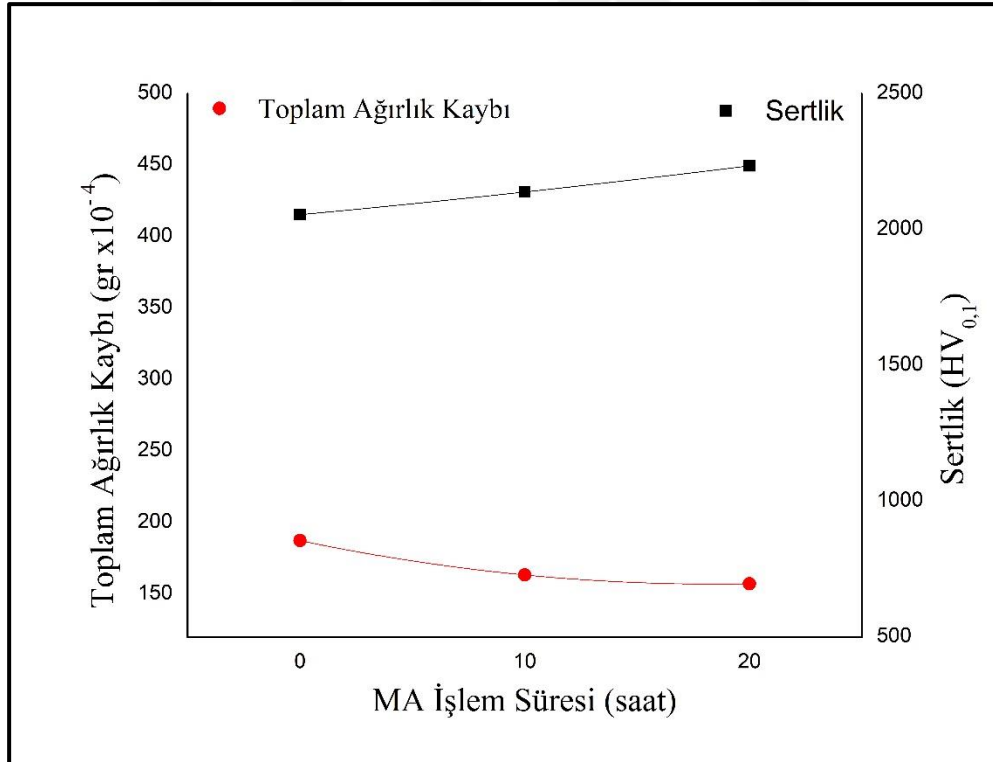


Şekil 5.202. 750 °C 6 saat süreyle borlama yapılmış numunelerin farklı yüklerdeki Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği.

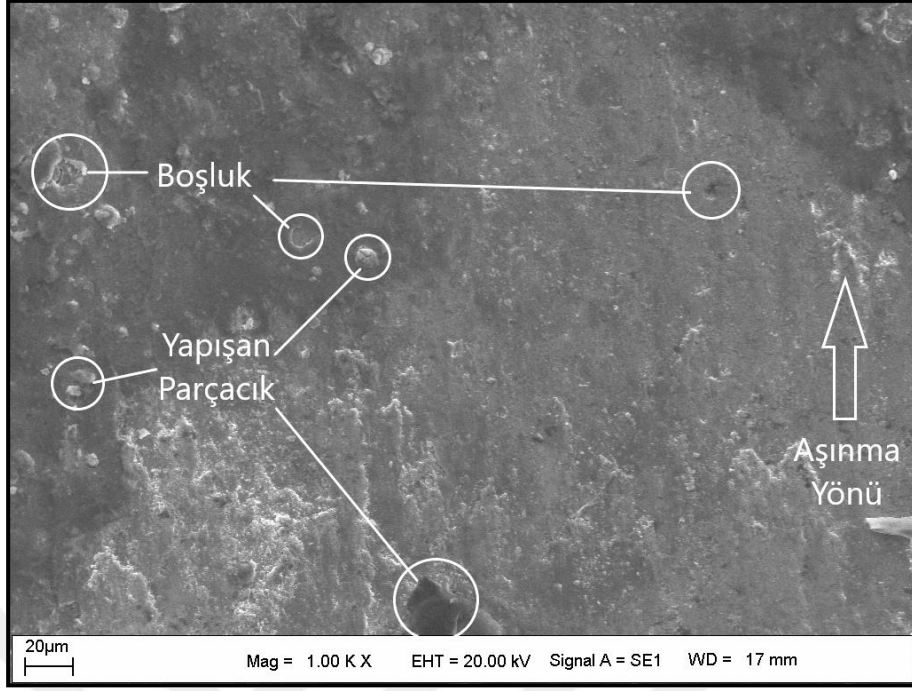


Şekil 5.203. 750 °C 3 saat süreyle borlama yapılmış numunelerin farklı yüklerdeki Toplam Ağırlık Kaybı-Mesafe grafiği.

Şekil 5.204. 850 °C 'de 12 saat borlamayla üretilmiş numunelere ait 40 N yükte Toplam Ağırlık Kaybı – MA İşlem Süresi – Sertlik grafiği verilmiştir. En yüksek sıcaklık parametresine sahip bu numunelerin yüzeyinde oluşan kalın borür tabakaları sebebiyle sertlik değerleri en yüksek seviyelerde, ağırlık kayıpları ise en düşük mertebededir. Şekil 5.205. 'de 20 saat MA işlemi, 850 °C 'de 12 saat borlamayla üretilmiş numuneye (20M85-12) ait 40 N yük altında 3000 m aşınma sonucundaki aşınma yüzeyi SEM görüntüsü verilmiştir. Görüntüye bakıldığında parça yüzeyinde borlanmamış numuneye göre aşınma çizgisi, parça kopması veya parça sıvanması belirgin olarak görülmemektedir. Bu durum Şekil 5.204. ile açıklanabilir; numunenin sahip olduğu yüksek sertlik ve aşınma testi boyunca gerçekleştirdiği düşük ağırlık kaybı, numune yüzeyinde herhangi bir belirgin aşınma çizgisi oluşmaması için yeterli koşullardır. Şekil 5.156. 'da borlama yapılmamış referans St28 numunesinin aşınma görüntüsüyle kıyaslandığında en yüksek borür tabaka kalınlığına sahip numune yüzeyinde aşınma hasarı izlerinin neredeyse oluşmadığı söylenebilir. Borür tabakasının yüksek sertliği sebebiyle daha az aşınmanın meydana gelmiş olması aynı zamanda aşınma yüzeyinde aşınma çizgilerinin daha az oluştuğuna, aşınma yüzeyinin tribolojik manada daha az hasara uğradığına işaret eder.

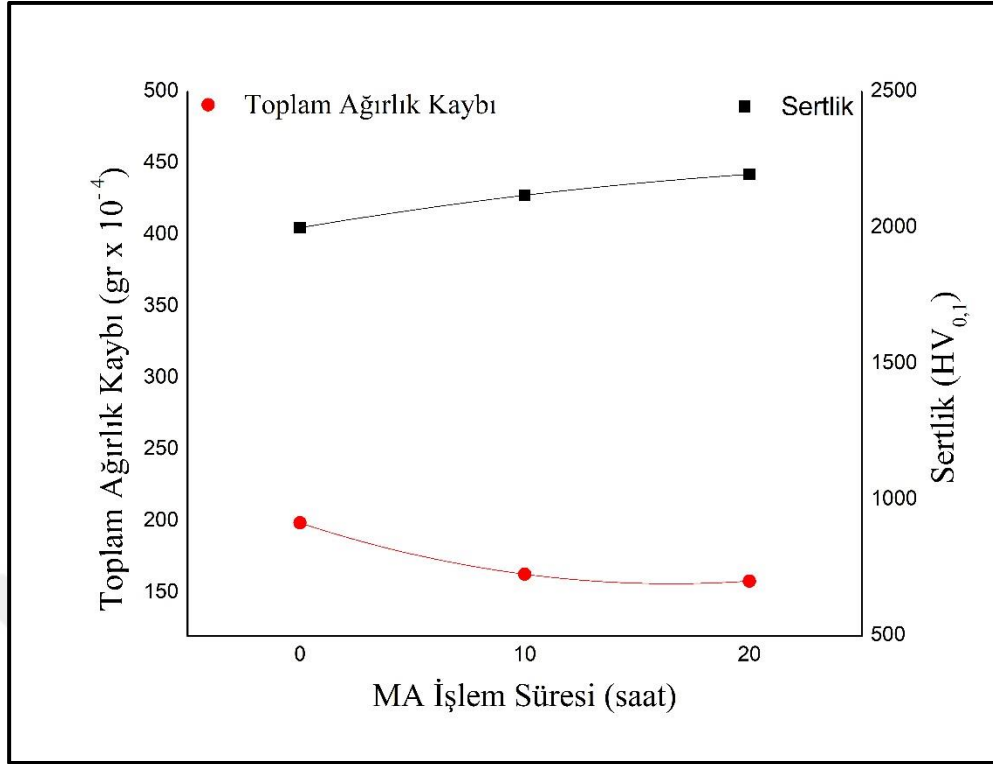


Şekil 5.204. 850 °C 'de 12 saat borlamayla üretilmiş numunelere ait 40 N yükte Toplam Ağırlık Kaybı – MA İşlem Süresi – Sertlik grafiği.



Şekil 5.205. 20 saat MA işlemi, 850 °C 'de 12 saat borlamayla üretilmiş numuneye (20M85-12) ait 40 N yük altındaki aşınma yüzeyi SEM görüntüsü.

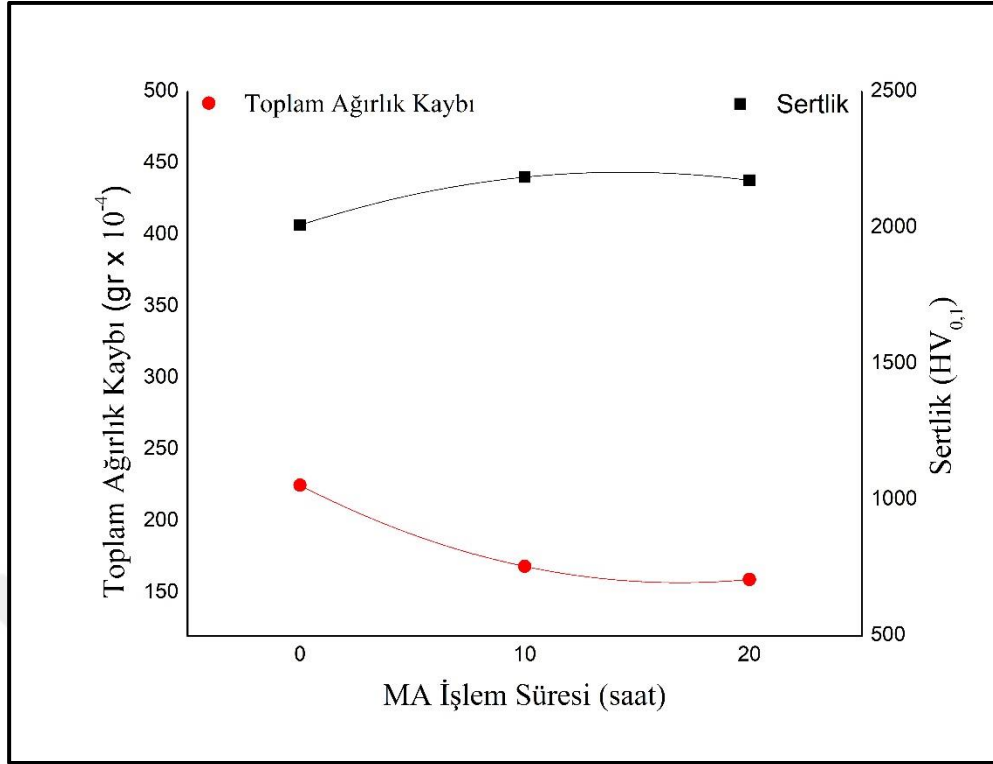
Şekil 5.206. 'da 800 °C 'de 12 saat borlamayla üretilmiş numunelere ait 40 N yükte Toplam Ağırlık Kaybı – MA İşlem Süresi – Sertlik grafiği verilmiştir. Şekil 5.204. ile kıyaslandığında borlama sıcaklığının düşmesiyle birlikte hem ağırlık kayıplarında hem de mikrosertlik değerlerinde ciddi azalışlar gözlemlenmemiştir. Bu durum borür tabaka kalınlıkları ile ilişkilendirilmektedir.



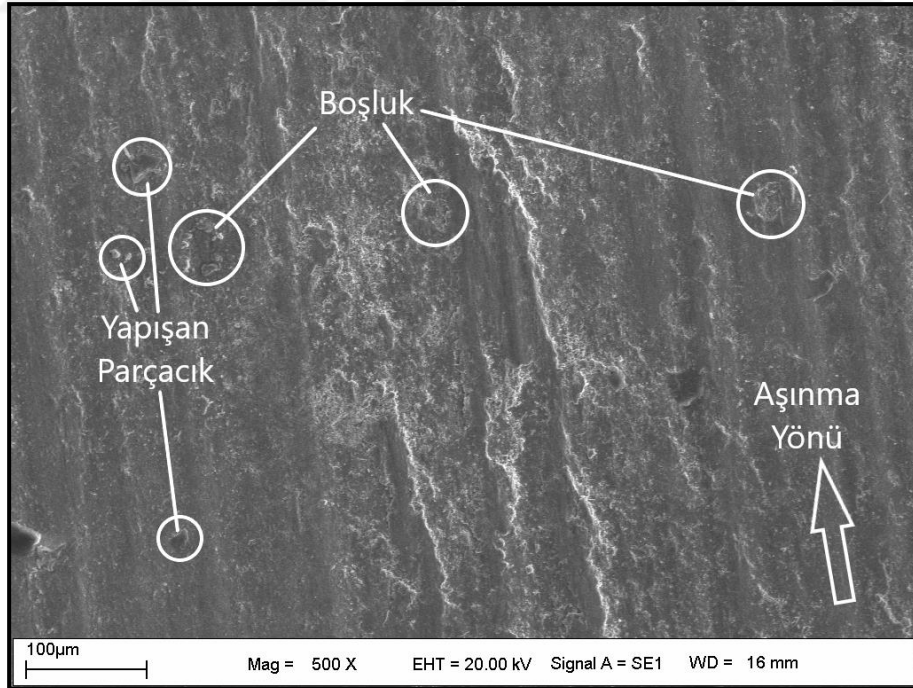
Şekil 5.206. 800 °C 'de 12 saat borlamayla üretilmiş numunelere ait 40 N yükte Toplam Ağırlık Kaybı – MA İşlem Süresi – Sertlik grafiği.

Şekil 5.207. ve 5.209. 'da numunelerin 40 N yük 12 saat borlama koşullarında değişen sıcaklıkla (700 ve 750 °C) aşınma davranışları grafiklerle gösterilmiştir. Artan borlama sıcaklığı ile numunelerin sertliği artmaktadır. Buna paralel olarak ağırlık kaybının da azaldığı tespit edilmiştir.

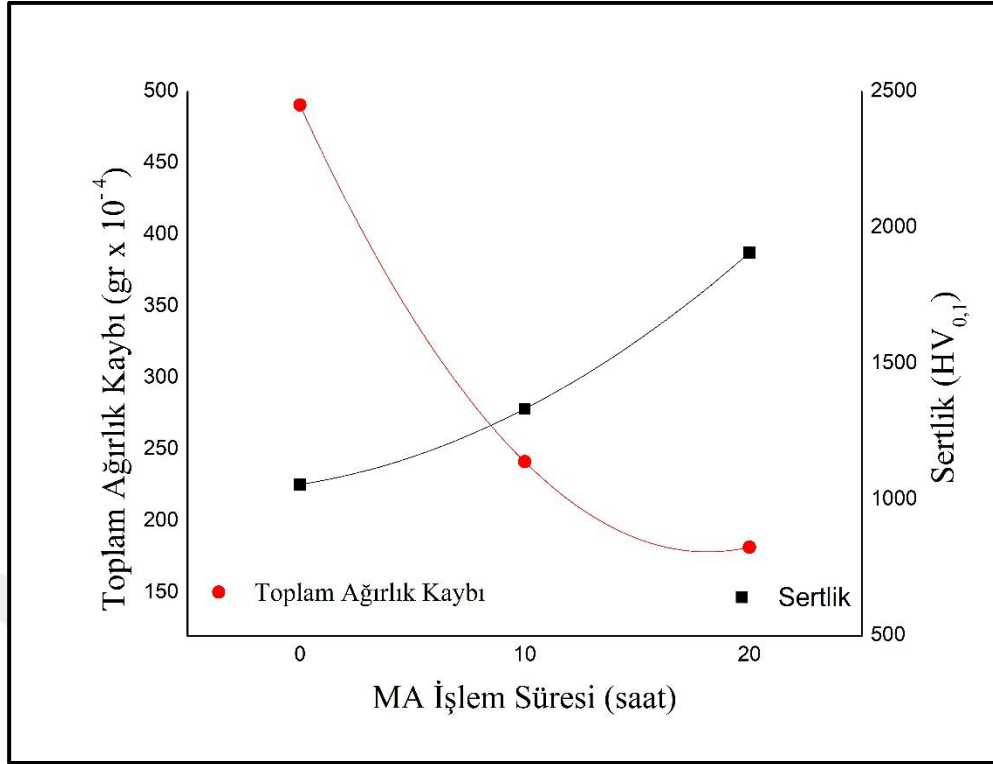
Şekil 5.208. 'de 20 saat MA işlemi, 750 °C 'de 12 saat borlamayla üretilmiş numuneye (20M75-12) ait 40 N yük altında 3000 m aşınma sonucundaki aşınma yüzeyi SEM görüntüsü verilmiştir. Görüntüye bakıldığında borlanmamış referans numuneye kıyasla parça yüzeyinde belirgin aşınma çizgisi görülmemekte ancak kopan ve yapışan parçacıklar görülmektedir. Borlama sıcaklığındaki azalma ile yüzeyde oluşan borür tabaka kalınlığı ve sertliğindeki düşüş yüzünden numunede meydana gelen aşınma hasarı artmaktadır. Bu durum Şekil 5.206. 'da verilen ağırlık kaybı miktarındaki artışla desteklenmektedir. Aşınma çizgilerinin ise 20M85-12 kodlu numune yüzeyinde oluşana göre daha kalın ve borlanmamış numune yüzeyinde oluşana göre ise daha ince olduğu söylenebilir.



Şekil 5.207. 750 °C 'de 12 saat borlamayla üretilmiş numunelere ait 40 N yükte Toplam Ağırlık Kaybı – MA İşlemi Süresi – Sertlik grafiği.



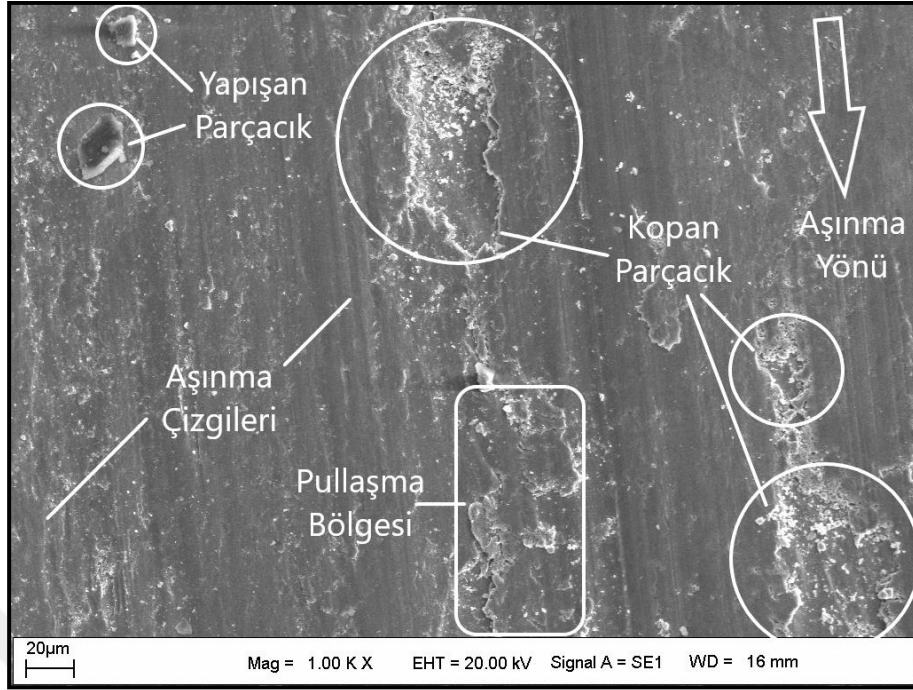
Şekil 5.208. 20 saat MA işlemi, 750 °C 'de 12 saat borlamayla üretilmiş numuneye (20M75-12) ait 40 N yük altındaki aşınma SEM görüntüsü.



Şekil 5.209. 700 °C 'de 12 saat borlamayla üretilmiş numunelere ait 40 N yükte Toplam Ağırlık Kaybı – MA İşlem Süresi – Sertlik grafiği.

Borlama işlemi sayesinde yüksek sertliğe sahip ve sürtünme katsayısı düşük yüzeyler elde edilir. Bu durum iyi bir aşınma direnci sağlamaktadır[3], [193]. Borlanmış çeliklerden imal edilen makine elemanlarının bakım ve kullanım ömrünün borlanmamışlara nazaran daha uzun olması beklenir.

Şekil 5.210. 'da 20 saat MA işlemi, 700 °C 'de 12 saat borlamayla üretilmiş numuneye (20M70-12) ait 40 N yük altında 3000 m aşınma sonucundaki aşınma yüzeyi SEM görüntüsü verilmiştir. Görüntüye bakıldığında aşınma çizgilerinin kalınlaştığı, kopan ve yapışan parçacıkların, boşlukların ve pullanma olan bölgelerin çok daha belirginleştiği görülmektedir. Borlanmamış referans numunenin SEM görüntüsü Şekil 5.156. ile kıyaslandığında ise o yüzeydeki kadar belirgin olmadığı söylenebilir. Borlama sıcaklığındaki azalma ile yüzeyde oluşan borür tabaka kalınlığı ve sertliğindeki düşüş yüzünden, numunede meydana gelen aşınma hasarı artmaktadır. Bu durum Şekil 5.209. 'deki ağırlık kaybı miktarındaki artışla desteklenmektedir.



Şekil 5.210. 20 saat MA işlemi, 700 °C 'de 12 saat borlamayla üretilmiş numuneye (20M70-12) ait 40 N yük altındaki aşınma SEM görüntüsü.

Artan yük ile aşınma miktarının artacağı literatürde belirtilmiştir[1]. Artan yük ile birlikte ağırlık kaybı miktarı aşınma testi yapılan bütün numunelerde gözlemlenmiştir. Ağırlık kaybındaki artış aynı zamanda numune yüzeyindeki sertlikle ilişkili olup, sertliğin artmasıyla ağırlık kaybında ciddi azalmaların olduğu tespit edilmiştir. MA işlemi ile birlikte borür tabaka kalınlıklarında ciddi artışlar meydana gelmiş ve yüzeyin aşınma miktarının azalmasıyla birlikte aşınma ile oluşan plastik deformasyon izlerinin de azaldığı söylenebilir.

6. SONUÇLAR

Yapılan çalışmada kullanılacak tozlar temin edildikten sonra belirli ağırlık oranlarında toz karışımları hazırlanmış ve literatür bilgileri ışığında belirlenen parametrelerle toz karışımları mekanik alaşımlama işlemine tabi tutulmuştur daha sonra ise MA yapılan bu tozlardan hazırlanan jellerle DIN St28 üzerinde borlama ısıl işlemleri yapılmıştır. Hazırlanan jel için MA süreleri 10 ve 20 saat olarak belirlenmiştir. Ayrıca mukayese yapılabilmesi amacıyla aynı kompozisyona sahip MA yapılmamış tozlarla da aynı ısıl işlem parametreleriyle borlama deneyleri yapılmıştır.

Mekanik alaşımlama işlemlerinde bilye/toz ağırlık oranı, çalışma devri, bilye çapı ve ortam atmosferi gibi parametreler sabit tutulmuştur. Mekanik alaşımlama işleminden sonra her bir mekanik alaşımlama süresi için borlama sıcaklıkları ve süreleri sırasıyla 650, 700, 750, 800 ve 850 °C ve 3, 6 ve 12 saat olarak uygulanmıştır. Planeter tip öğütme cihazı kullanılarak üretilen tozlardan hazırlanan jellerle gerçekleştirilen borlama deneyleri sonucunda mekanik alaşımlama işleminin borlama sıcaklığı, süresi ve tabaka kalınlığı üzerine olan etkisi incelenmiştir. Numuneler optik, taramalı elektron mikroskobu (SEM), x-ışınları difraksiyonu (XRD) ve mikrosertlik ölçüm yöntemleri kullanılarak karakterize edilmiştir.

Üretilen numunelerin karakterizasyonuna x-ışınları difraksiyonu ile başlanılmış olup yüzeyde oluşması muhtemel Fe-B yapılar taranmıştır. Mekanik alaşımlama yapılan tozlar kullanılarak hazırlanan jelle borlanan numunelerde düşük sıcaklıktan yüksek sıcaklığa doğru bakıldığında ilk Fe-B yapısına 10 saat MA yapılmış tozlarla hazırlanan jel ile 650 °C 'de 6 saat borlanan (10M65-6 kodlu) numunede rastlanılmıştır. Mekanik alaşımlama uygulanmadan hazırlanan jelle yapılan borlamada ise 700°C 'de 12 saat borlama ile (0M70-12 kodlu) ilk Fe-B piklerine rastlanılmıştır. X-ışınları analizinde yüzeyde Fe₂B harici başka bir Fe-B bileşiğine rastlanılmamıştır. Borür tabakasının oluşmadığı numunelerden elde edilen x-ışınları verilerine bakıldığında numune yüzeylerinde sadece Fe pikleri görülmüştür. Gerek mekanik alaşımlama ve gerekse borlama süre ve sıcaklıklarının artmasıyla piklerin karakteristiğinde bir değişime rastlanılmamıştır. Tatbik edilen MA ön işlemin neticesinde üretilen jelin kullanımı ile borlama işleminin daha düşük sıcaklık ve sürelerde yapılabileceği açıkça ortaya konulmuştur.

Optik ve taramalı elektron mikroskobu ile elde edilen neticeler ışığında borür tabakalarının saptandığı numunelerde birbirinden farklı 2 temel bölge olduğu görülmüştür. Numune yüzeyinde içeriye doğru kolonsal ve dış kökü benzeri borür yapıların varlığı tespit edilmiş, değişen işlem süresi ve sıcaklığıyla birlikte bu kolonsal yapılarda farklılıklar gözlemlenmiştir. Parametrelerin artırılması ile borür yapıların adacıklardan dönüşmesi, kolon şeklinde ana yapıya doğru ilerlemesi ve daha sonra kalınlaşması söz konusu olmuştur. Borür tabakalarının bir blok halinde büyümesinden kolonsal büyümesinin faz yüzey alanını arttırdığı ve dolayısıyla tutunma yüzeyini de arttırdığı bir gerçektir. Kolonların matris ve borür tabakaları arasında yapışmayı arttıran bir

başka sahte yüzey gibi davrandığı literatürde ifade edilmektedir. Numunelerde bu gerçeği destekler biçimde kolonsal büyümeler tespit edilmiş ve deneylerle aşınma davranışları incelenmiştir. Artan parametrelerle numune yüzeyindeki borür tabakasının oluşumuna ve büyümesine mekanik alaşımlama işleminin etkisi açısından bakıldığında MA yapılmış ve yapılmamış tozlar ile borlamada ciddi farklar görülmüştür. 10 ve 20 saat MA yapılmış tozlar kullanılarak üretilen numuneler karşılaştırıldığında 20 saat MA işlemi neticesinde tabaka kalınlıklarının 10 saate nazaran arttığı ancak MA yapılmamış numunelerle 10 saat MA yapılmışlar kıyaslandığında ise elde edilen fark kadar büyük farklar gözlemlenmemiştir. Optik görüntülerde bazı numunelerde poroz yapılar göze çarpmaktadır. Porozite oluşumu “Kirkendall Etkisi” ile açıklanmaktadır. B ‘nin Fe_2B ‘den çok daha hızlı difüze olmasından dolayı bu etkinin olabileceği literatürde ifade edilmiştir.

Numunelerin borür tabakası boyunca sertlik ölçümleri alınarak grafik haline getirilmiş, borür tabakaları ile matris arasındaki geçişte sertlikteki farklılıklar tespit edilmiştir. Yüzeyden matrise doğru inildikçe sertlik değerleri düşerken matrise yaklaşıldığında ise ani düşmeler görülmüştür. Borür tabakası nispeten olan numunelerle kalın olan numuneler kıyaslandığında, ince tabakalı numunelerin sertliğinin kalın tabakalı numunelerden daha düşük olduğu gözlenmiş olup, bu durumun kolonsal büyüme ve poroz oluşum yoğunluğu farklılıklarından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Yapılan çalışmada aynı toz kompozisyonu ile farklı sürelerde MA işlemi yapılarak elde edilen tozlarla hazırlanan jelle borlanmış numuneler üzerinde kinetik hesaplamalar yapılmıştır. Numunelerin farklı borlama sürelerinde tabaka kalınlıkları tespit edilmiş ve bu değerlerle sıcaklık arasındaki ilişki kullanılarak her bir MA işlemi için aktivasyon enerjisi hesaplanmıştır. MA yapılmamış toz karışımından hazırlanan jelle gerçekleştirilen borlama neticesinde aktivasyon enerjilerinin 113,555 kJ/mol, 10 saat MA yapılmış jel ile 108,814 kJ/mol ve 20 saat MA yapılmış jel ile de 106,746 kJ/mol olduğu anlaşılmıştır. Bu bilgiler çerçevesinde ihtiyaç duyulması muhtemel deneysel eşitlikler türetilmiştir. MA işlemi ile aktivasyon enerjilerinde düşüş meydana geldiği açıkça görülmüştür. Borlama tozuna 20 saat MA neticesinde bulunan aktivasyon enerjisinde 10 saat MA ‘ya nazaran daha küçük bir azalma meydana gelse de numunelerin frekans faktörleri yani bor atomlarının tabaka içindeki ilerleme hızında ciddi artışlar görülmüştür. Bu husus tozların toz tane boyutundaki düşüş ve mikro gerilmelerdeki yani plastik deformasyonlarındaki artış ile açıklanabilir.

Elde edilen numuneler üzerinde adhesiv aşınma deneyleri gerçekleştirilmiş olup ağırlık kaybı verileri grafikler halinde gösterilmiştir. Borür tabaka kalınlıklarındaki artışla birlikte aşınma deneylerinde ağırlık kayıpları azalmıştır ve bu durum literatürde de benzer çalışmalarda ifade edilmektedir. Aşınma yüzeylerinden alınan SEM görüntülerinde artan tabaka kalınlıklarıyla aşınma çizgilerinin derinliklerinde, sıklıklarında ve yüzeyden kopan parça miktarlarında azalmalar görülmüştür. Borür tabakalarının sertliğinin bu duruma sebep olduğu düşünülmektedir. Aşınmada

artan yük miktarıyla ağırlık kayıplarında artış gözlense de borür tabakasının kalınlaşmasıyla ağırlık kayıpları azalmaktadır. Metal-metal kuru aşınmasında aşındırma ortamında soğutucu-yaglayıcı gibi unsurlar olmadığı düşünöldüğünde numune yüzeyinde oksidasyon aşınmasının olması doğal bir sonuçtur. Aşınma mesafesi arttıkça numunelerin ağırlık kayıplarının her bir tartımda sabitleştiğı görölmüş ve bu sabitleşmenin nedeni yüzeyde bor-oksit bileşiklerinin oluşması olarak düşünölmektedir. Borun oksit bileşiklerinin yağlayıcı özellikte davranış gösterdiği literatür çalışmalarında not edilmiştir. Ağırlık kayıplarının sabit bir oranda gerçekleşmesi kullanılan malzemenin kullanım ömrünün öngörölebilmesi açısından önem arz etmektedir.



7. KAYNAKLAR

- [1] M. Izciler and M. Tabur, "Abrasive wear behavior of different case depth gas carburized AISI 8620 gear steel," *Wear*, vol. 260, no. 1–2, pp. 90–98, Jan. 2006, doi: 10.1016/j.wear.2004.12.034.
- [2] R. M. Andrijana Milinović, Dragomir Krumes, "An Investigation of Boride Layers Growth Kinetics on Carbon Steels," *Teh. Vjesn.*, vol. 19, no. 1, pp. 27–31, 2012.
- [3] İ. Türkmen and E. Yalamaç, "Growth of the Fe₂B layer on SAE 1020 steel employed a boron source of H₃BO₃ during the powder-pack boriding method," *J. Alloys Compd.*, vol. 744, pp. 658–666, 2018, doi: 10.1016/j.jallcom.2018.02.118.
- [4] I. Gunes and I. Yildiz, "Rate of growth of boride layers on stainless steels," *Oxid. Commun.*, vol. 38, no. 4A, pp. 2189–2198, 2015.
- [5] B. Selçuk, "Borlanmış AISI 1020 ve 5115 Çeliklerinin Sürtünme ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi," Erciyes Üniversitesi, 1994.
- [6] F. Y. U. Sen, S. Sen, S. Koksall, "Fracture toughness of borides formed on boronized ductile iron," *Mater. Des.*, vol. 26, no. 2, pp. 175–179.
- [7] M. Tabur, "Bor Karbür Kaplanmış AISI 8620 Ve Hardox 400 Çeliklerinin Abrasiv Aşınma Davranışlarının İncelenmesi," Gazi Üniversitesi, 2008.
- [8] H. A. Uzun, "Borlama İle Yüzeyleri Sertleştirilen Çeliklerin Aşınma Ve Korozyona Karşı Dayanımları," Süleyman Demirel Üniversitesi, 2002.
- [9] U. Yapar, "Düşük Ve Orta Karbonlu Çeliklerin Termokimyasal Borlama İle Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesi," İstanbul Teknik Üniversitesi, 2003.
- [10] D. Mu and B. L. Shen, "Mechanical and dry-sliding wear properties of boronized pure cobalt using boronizing powders with SiC as diluent," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 236, pp. 102–106, 2013, doi: 10.1016/j.surfcoat.2013.09.034.
- [11] N. Ucar, M. Yigit, and A. Calik, "Metallurgical Characterization and Kinetics of Borided 34CrNiMo6 Steel," *Adv. Mater. Sci.*, vol. 20, no. 4, pp. 38–48, 2021, doi: 10.2478/adms-2020-0021.
- [12] A. P. Krelling, C. E. da Costa, J. C. G. Milan, and E. A. S. Almeida, "Micro-abrasive wear mechanisms of borided AISI 1020 steel," *Tribol. Int.*, vol. 111, no. March, pp. 234–242, 2017, doi: 10.1016/j.triboint.2017.03.017.
- [13] M. Ortiz-Domínguez *et al.*, "Modeling of the Growth Kinetics of Boride Layers in Powder-Pack Borided ASTM A36 Steel Based on Two Different Approaches," *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2019, 2019, doi: 10.1155/2019/5985617.
- [14] Y. Kayalı, "Plazma Pasta Borlama Yöntemiyle Borlanmış AISI D2 Çeliğinin Aşınma ve Elektrokimyasal Korozyon Davranışlarının İncelenmesi," *Afyon Kocatepe Univ. J. Sci. Eng.*, vol. 19, no. 1, pp. 177–185, 2019, doi: 10.35414/akufemubid.466932.
- [15] A. Milinović, V. Marušić, and I. Samardžić, "Research into boride layers growth kinetics on C45 carbon steel," *Metallurgija*, vol. 55, no. 4, pp. 671–674, 2016.
- [16] S. Taktak, "Some mechanical properties of borided AISI H13 and 304 steels," *Mater. Des.*, vol. 28, no. 6, pp. 1836–1843, 2007, doi: 10.1016/j.matdes.2006.04.017.
- [17] Y. H. Wu *et al.*, "Tribological behavior of boronized Al_{0.1}CoCrFeNi high-entropy alloys under dry and lubricated conditions," *Wear*, vol. 460–461, no. June, 2020, doi: 10.1016/j.wear.2020.203452.
- [18] S. O. Yilmaz, T. Teker, and S. Karataş, "Wear behavior of iron boride coating on AISI 4140," *Prot. Met. Phys. Chem. Surfaces*, vol. 52, no. 1, pp. 119–127, 2016, doi: 10.1134/S2070205116010299.
- [19] S. O. Yilmaz and S. Karataş, "Effect of mechanical activation on jell boronizing treatment of the AISI 4140," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 275, pp. 148–155, 2013, doi: 10.1016/j.apsusc.2013.01.059.

- [20] J. L. Margrave, "The Isotope Abundance Ratio And Chemical Atomic Weight Of Boron," *Wisconsin Acad. Sci. Arts Lett.*, vol. 47, 1958.
- [21] M. Ipekoglu, Ü., Polat, "A General View to Boron Industry," *Madencilik*, vol. 26, no. 1, 1987.
- [22] L. K. Sharp, "Inorganic Chemistry," *Bailliere TindallCox Ltd*, 1962.
- [23] P. L. Heslop., R.B., Robinson, *Inorganic Chemistry*. New York, 1962.
- [24] A. Taneri, "Organik ve anorganik bor bileşikleri," *Etibank Bülteni*, vol. 74, pp. 20–28, 1985.
- [25] C. E. Travis NJ, *The Tincal Trail: A History of Borax*. London: London:Harraps Ltd, 1984.
- [26] G. W. William, "An Introduction to Boron: History, Sources, Uses, and Chemistry," *Env. Heal. Perspect.*, pp. 5–11, 1994.
- [27] M. D. Ş. G. Özkan, H. Çebî, S. Delice, "Bor Minerallerinin Özellikleri ve Madenciliği," *2 Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, pp. 224–228, 1997.
- [28] Eti Maden, "Bor Rezerv." <https://www.boren.gov.tr/Sayfa/rezervler/26> (accessed Mar. 26, 2019).
- [29] B. M. Buluttekın, "Bor Madeni Ekonomisi: Türkiye'nin Dünya Bor Piyasasındaki Yeri," *2.Ulusal İktisat Kongresi*, pp. 1–36, 2008.
- [30] F. S. Korutürk, "T.C. Resmî Gazete," 1978.
- [31] C. C. Spence, *British Investments and the American Mining Frontier, 1860-1901*. New York, 2000.
- [32] D. Garrett, "Borates:Handbook of deposits, processing, properties and use," *San Diego Acad. Press*, 1998.
- [33] Eti maden, "Finansal Veriler," 2020. <http://www.etimaden.gov.tr/finansal-veriler> (accessed Jun. 19, 2019).
- [34] C. Helvacı, "Borates," *Encycl. Geol.*, vol. 3, pp. 510–522, 2004.
- [35] E. . Kroll, W.J., Nies, N.P., Fajans, "Production of Elemental Boron," 2893842, 1959.
- [36] R. . Schumacher, J.C., Baier, "Production of High Quality Boron," 3001855, 1961.
- [37] Haag H., "Improvements In or Relating to The Production of Boron," 747287, 1956.
- [38] S. J. C. Cooper H.S., Heights S., "Production of boron by fused salt bath electrolysis," 2918417, 1959.
- [39] H. S. Cooper H.S., "Electrolytic method of making boron," 2572248, 1951.
- [40] M. Q. H. Stern D.R., "Production of elemental boron electrolytically," 2892762, 1959.
- [41] Jain A., Anthonysamy S., Ananthasivan K., Ranganathan R., Mittal V., Narasimhan S.V., Vasudeva Rao P.R., "Characterization of electrodeposited elemental boron," *Mater. Charact.*, vol. 59, pp. 890–900, 2008.
- [42] G. S. . Yıldırım, H., "The production of elemental boron (amorphous and crystalline) in a simple and economical method," 135350, 2006.
- [43] B. R. . Mazza H., Sawyer D.L., "Process for producing amorphous boron of high purity," 2866688, 1955.
- [44] M. P. Ricceri R., "Mechanochemical Synthesis of Elemental Boron," *Int. J. Powder Metall.*, vol. 39, no. 3, pp. 48–52, 2003.
- [45] Weintraub E., "Metalloidal Material," 1074672, 1913.
- [46] G. H. Fetterley, "Apparatus for the production of boron," 2542916, 1951.
- [47] C. P. Talley, "Method of producing refractory monocrystalline boron structures," 3226248, 1965.

- [48] W. L. Robb, "Process for boron production," 3115393, 1963.
- [49] I. J. Allen R.H., "Preparation of high purity boron," 5013604, 1991.
- [50] D. I. Agaogullari D., Balci, O., "Mechanisms and Effects of Various Reducing Agents on the Fabrication of Elemental Boron," in *METAL 2010 19th International Conference on Metallurgy and Materials, Symposium E: Non-Ferrous Metals and Alloys*, 2010, pp. 109–110.
- [51] H. Yiğitbaşıoğlu, "Türkiye İçin Önemli Bir Maden: Bor," *Ankara Üniversitesi Coğrafi Bilim. Dergisi*, vol. 2, no. 2, 2004.
- [52] A. Yılmaz, "Her Derde Deva Hazinemiz Bor," *TUBİTAK-Bilim ve Tek. Derg.*, pp. 38–41, 2002.
- [53] "Maden," 2019.
http://www.maden.org.tr/resimler/ekler/6358599b7afb250_ek.pdf?tipi=5&turu=R&sube=0
(accessed Jul. 01, 2019).
- [54] DPT, "Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu," Ankara, 2012.
- [55] Ş. Turku, N., Doğan, N. Uçar, and A. Çalık, "Borlama Süresinin Düşük Karbonlu Mikro Alaşımlı Çeliklerin Sertlik Değerleri Üzerine Etkisi," *SDU J. Sci.*, vol. 9, no. 2, pp. 147–151, 2014.
- [56] N. S. Meriç, C., Şahin, S., Backır, B., Köksal, "Investigation Of The Boronizing Effect On The Abrasive Wear Behaviour In Cast Irons," *Mater. Des.*, vol. 27, pp. 751–757, 2006.
- [57] A. H. Çelebi, G., İpek M., Bındal, C., Ücısık, "Some Mechanical Properties Of Borides Formed On AISI 8620 Steel," *Mater. Forum*, vol. 29, pp. 456–460, 2005.
- [58] G. Jam, V., Sundararajan, "Influence Of The Pack Thickness Of The Boronizing Mixture On The Boriding Of Steel," *Surf. Coat. Technol.*, vol. 149, pp. 21–26, 2002.
- [59] A. H. Özbek, İ., Şen, S., İpek, M., Bındal, C., Zeytin, S., Ücısık, "A Mechanical Aspect Of Borides Formed On The AISI 440C Stainless-Steel," *Vacuum*, vol. 73, pp. 641–648, 2004.
- [60] B.-S. Lee, S. Y., Kim, G. S., Kim, "Mechanical Properties Of Duplex Layer Formed On AISI 403 Stainless Steel By Chromizing And Boronizing Treatment," *Surf. Coat. Technol.*, vol. 2, pp. 177–184, 2004.
- [61] R. Çelikyürek, İ., Baksan, B., Torun, O., Gürler, "Boronizing Of Iron Aluminide Fe72Al28," *Intermetallics*, vol. 14, pp. 136–141, 2006.
- [62] I. Özbek, "Borlama Yöntemiyle (AISI M50, AISI M2) Yüksek Hız Çeliklerinin Ve W1 Çeliğinin Yüzey Performanslarının Geliştirilmesi," Sakarya Üniversitesi, 2000.
- [63] D. Martini, C., Palombarini, G., Poli G., Prandstraller, "Sliding And Abrasive Wear Behaviour Of Boride Coatings," *Wear*, vol. 256, pp. 608–613, 2004.
- [64] C. Özbek, İ., Bındal, "Mechanical Properties Of Boronized AISI W4 Steel," *Surf. Coat. Technol.*, vol. 154, pp. 14–20, 2002.
- [65] E. Bejar, M. A., Moreno, "Abrasive Wear Resistance Of Boronized Carbon And Low-Alloy Steels," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 173, pp. 352–358, 2006.
- [66] J. Subrahmanyam, "Wear Studies On Boronized Mild Steel," *Wear*, vol. 95, pp. 287–292, 1984.
- [67] S. C. Singhal, "A Hard Diffusion Boride Coating For Ferrous Materials," *Thin Solid Films*, vol. 45, pp. 321–329, 1977.
- [68] J. Yan, P. X., Wei, Z. Q., Wen, X. L., Wu, Z. G., Xu, J. W., Liu, W. M., Tian, "Post Boronizing İon İmplantation Of C45 Steel," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 195, no. 1–4, pp. 74–79, 2002.
- [69] A. Ersöz, "Elektrokimyasal Borlama İle Çeliklerin Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesi," İstanbul Teknik Üniversitesi, 2008.
- [70] W. Graf, A., Matushcka, "Borieren," *Carl Hanser Verlag, München*, pp. 1–87, 1997.

- [71] P. S. Hocking, M.G., Vasantasree, V., Sidky, "Metalic and Ceramic Coatings," New York, 1989.
- [72] A. Koçaslan, "16MnCr5 Çeliğinin Borlama ve Termal Çevrimli Borlama Özelliklerinin Araştırılması," Süleyman Demirel Üniversitesi, 2016.
- [73] A. G. V. Matuschka, "Boronizing," *München, Wien*, p. 100, 1980.
- [74] N. Bozkurt, "Bor Yayınımla Çeliklerde Yüzey Sertleştirme," İstanbul Teknik Üniversitesi, 1984.
- [75] M. Khoe, "Ergimiş Boraks Banyosunda Çeliklere Vanadyum Karbür Kaplama," İstanbul Teknik Üniversitesi, 1992.
- [76] S. C. Seong, H.H., John, "A Study On Electroboronizing Of Steel By Superimposed Cyclic Current," *J. Mater. Sci. Lett.*, vol. 15, pp. 1379–1386, 1980.
- [77] A. P. Samsanov, G. V., Epik, "Coatings Of High Temperature Materials," 1966.
- [78] S. C. Nam, K. S., Lee, S. R., Lee, K. H., Kwon, "A Study On Plasma-Assisted Boriding Of Steels," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 98, no. 1–3, pp. 886–890, 1998.
- [79] G. Hunger, H. J., Löb, "Generation Of Boride Layers On Steel And Nickel Alloys By Plasma Activation Of Boron Trifluoride," *Thin Solid Films*, vol. 310, pp. 244–250, 1997.
- [80] A. Karakan, M., Akgün, A., Çelik, "Plazma Borlama," *Mühendis ve Makine Derg.*, vol. 512, pp. 51–54, 2002.
- [81] Ş. Şen, "Termokimyasal Borlama İşlemiyle AISI 5140, AISI 4140, Ve AISI 4340 Çeliklerinin Yüzey Performanslarının Geliştirilmesi," Sakarya Üniversitesi, 1998.
- [82] B. Galibois, A., Boutenko, O., Voyzelle, "Mecanisme De Formation Des Couches Borurees Sur Les Aciers A Haut Carbone Technique Des Pates," *Acta Met.*, vol. 28, p. 1753, 1980.
- [83] A. H. Özdemir, O., Usta, M., Bindal, C., Uçışık, "Hard Iron Boride (Fe₂B) On 99.97 Wt % Pure Iron," *Vacuum*, vol. 80, pp. 1391–1395, 2006.
- [84] C. Şen S., Özbek, I., Şen, U., Bindal, "Mechanical Behavior Of Borides Formed On Borided Cold Work Tool Steel," *Surf. Coat. Technol.*, vol. 135, pp. 173–177, 2001.
- [85] D. N. Rus, J., Luis C., Tsipias, "Boronising Of 304 Steel," *J. Mater. Sci. Lett.*, vol. 4, pp. 558–560, 1985.
- [86] G. Carbucicchio, M., Badini, C., Samboga, "On The Early Stages Of High Purity Iron Boriding With Crystalline Boron Powder," *J. Mater. Sci. Lett. Materials Sci.*, vol. 15, pp. 1483–1490, 1980.
- [87] G. Carbucicchio, M., Badini, C., Palombarini, "Mössbauer And Metallographic Analysis Of Borided Surface Layers On Armco Iron," *J. Mater. Sci. Lett.*, vol. 15, pp. 711–719, 1980.
- [88] E. J. Brakman, C.M., Gommers, A.W. J., Mittemeijer, "Boriding Of Iron And Fe-C, Fe-Cr, Fe-Ni Alloys: Boride Layer Kinetics," *J. Mater. Sci. Lett.*, vol. 23, pp. 3061–3066, 1989.
- [89] Y. Soydan, "Katı Ortamda Bor Yayınımlı İle Sertleştirilen Çelik Yüzeylerinin Kuru Kayma Halinde Sürtünme Ve Aşınma Davranışları," İstanbul Teknik Üniversitesi, 1996.
- [90] M. Palombarini, G., Carbucicchio, "On The Morphology Of Thermochemically Produced Fe₂B/Fe Interface," *J. Mater. Sci. Lett.*, vol. 3, pp. 791–794, 1984.
- [91] V. M. Berzina, I.G., Gusev, E.B., Fedina, G.N., Fedin, "Investigation Of Boron Diffusion During Boronizing Of Engineering Steel 45," *Phys. Met. Met.*, vol. 57, no. 81–84, 1984.
- [92] A. Özsoy, "Çeliğin Borür Tabakası, Geçiş Zonu Ve Ana Matrisin Özelliklerinin İyileştirilmesi," Anadolu Üniversitesi, 1991.
- [93] G. Carbucicchio, M., Palombarini, "Effects Of Alloying Elements On The Growth Of Iron Boride Coatings," *J. Mater. Sci. Lett.*, vol. 6, pp. 1145–1149, 1987.
- [94] C. Üçışık, A.H., Bindal, "Fracture Toughness Of Boride Formes On Low Alloy Steels," *Surf. Coatings*

- Technol.*, no. 94–95, pp. 561–565, 1997.
- [95] S. C., “Mechanical alloying and milling,” *Prog. Mater. Sci.*, vol. 46, pp. 1–184, 2001.
 - [96] J. S. Benjamin, “Dispersion strengthened superalloys by mechanical alloying,” *Metall. Trans.*, vol. 1, no. 10, pp. 2943–2951, 1970, doi: 10.1007/BF03037835.
 - [97] L. Bid Service, “Spex Sample Prep 8000 Series,” *Youtube*. https://www.youtube.com/watch?v=4JEoxFr2i1M&ab_channel=BidServicellc (accessed Feb. 21, 2021).
 - [98] Retsch, “PM 100,” *Schuang.Uakron*, 2016. <https://schuang.uakron.edu/facilities/retsch-ball-mill-pm-100/>.
 - [99] Restch, “PM 100 Animation,” *Restch Milling*, 2017. https://www.youtube.com/watch?time_continue=25&v=fUukERf8Kko&feature=emb_logo&ab_channel=Retsch-Milling%26Sieving.
 - [100] K. I., “No Title,” *Met. Powder Rep.*, vol. 48, pp. 36–38, 1993.
 - [101] B. H. Di LM, “No Title,” *Phys C Condens Matter*, vol. 3, pp. 3427–3432, 1991.
 - [102] P. T.-P. Chu B-L, Chen C-C, “No Title,” *Met. Trans*, vol. A23, pp. 2105–2110, 1992.
 - [103] T. K., “No Title,” *Mater Sci Forum*, vol. 235, no. 238, pp. 127–132, 1997.
 - [104] K. J. Yen BK, Aizawa T, “No Title,” *Mater. Sci. Eng.*, vol. A220, pp. 8–14, 1996.
 - [105] K. J. Yen BK, Aizawa T, “No Title,” *Mater. Sci. Forum*, vol. 235, no. 238, pp. 157–162, 1992.
 - [106] E.-E. M. J., “No Title,” *Alloy. Compd.*, vol. 203, pp. 117–126, 1994.
 - [107] S. K. El-Eskandarany MS, Sumiyama K, Aoki K, Masumoto T, “No Title,” *J Mater Res*, vol. 9, pp. 2891–2898, 1994.
 - [108] T. A. Tonejc A, Duzievicâ D, “No Title,” *Mater Sci. Eng.*, vol. A134, pp. 1372–1375, 1991.
 - [109] O. K. Ohtani T, Maruyama K, “No Title,” *Mater. Res. Bull.*, vol. 32, pp. 343–350, 1997.
 - [110] E.-E. MS., “No Title,” *Met. Mater Trans*, vol. A27, pp. 2374–2382, 1996.
 - [111] Y. Abe, O., Suzuki, “No Title,” *Mater Sci Forum*, vol. 225, no. 227, pp. 563–568, 1996.
 - [112] M. U. Fukunaga T, Nakamura K, Suzuki K, “No Title,” *J. Non-Cryst Solids*, vol. 117, no. 118, pp. 700–703, 1990.
 - [113] M. U. Fukunaga T, Mori M, Inou K, “No Title,” *Mater. Sci. Eng.*, vol. A134, pp. 863–866, 1991.
 - [114] M. U. Lee CH, Fukunaga T, “No Title,” *Mater Sci Engng*, vol. A134, no. 90, pp. 1334–1337, 1991.
 - [115] M. U. Lee CH, Mori M, Fukunaga T, Sakurai K, “No Title,” *Mater Sci Forum*, vol. 88, no. 90, pp. 399–406, 1992.
 - [116] M. U. Sakurai K, Lee CH, Kuroda N, Fukunaga T, “No Title,” *J. Appl. Phys.*, vol. 75, pp. 7752–7755, 1994.
 - [117] B. B. Harringa JL, Cook BA, “No Title,” *J. Mater. Sci.*, vol. 27, pp. 801–804, 1992.
 - [118] E. V. . Kaloshkin, S.D., Tomlin, I.A., Andrianov, G.A., Baldokhin, U.V., Shelekhov, “No Title,” *Mater Sci Forum*, vol. 235, no. 238, pp. 565–570, 1997.
 - [119] E. Kuhrt C, Schropf H, Schultz L, Arzt E. In: Debarbadillo JJ, et al., “Mechanical alloying for structural applications,” *Mater. Park. OH ASM Int.*, pp. 269–273, 1993.
 - [120] C. Suryanarayana, “No Title,” *Intermetallics*, vol. 3, pp. 153–160, 1995.
 - [121] M. J. Suryanarayana C, Ivanov E, Noufi R, Contreras MA, “Thin Solid Films,” *J Mater Res*, vol. 14,

p. 377, 1999.

- [122] E. Larson, J.M., Luhman, T.S., Merrick, H.F. In: Meyerhoff, R.W., "Manufacture of superconducting materials," *Mater. Park. OH ASM Int.*, pp. 155–63, 1977.
- [123] S. Biswas, A., Dey, G.K., Haq, A.J., Bose, D.K., Banerjee, "No Title," *J Mater Res*, vol. 11, pp. 599–607, 1996.
- [124] T. Katamura, J., Yamamoto, T., Qi, X., Sakuma, "No Title," *J. Mater. Sci. Lett.*, vol. 15, pp. 36–37, 1996.
- [125] L. Lai, M.O., Lu, *Mechanical alloying*. Boston MA: Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [126] Y.-H. Watanabe, R., Hashimoto, H., Park, "Advances in powder metallurgy," in *Advances in powder metallurgy*, R. J. Sansoucy, Ed. Princeton, NJ: Metal Powder Industries Federation, 1991, pp. 119–130.
- [127] R. Park, Y-H., Hashimoto, H., Watanabe, "No Title," *Mater Sci Forum*, vol. 88, no. 90, pp. 59–66, 1992.
- [128] F. Guo, W., Iasonna, A., Magini, M., Martelli, S., Padella, "No Title," *J. Mater. Sci.*, vol. 29, pp. 2436–2444, 1994.
- [129] A. J. Padella, F., Paradiso, E., Burgio, N., Magini, M., Martelli, S., Guo, W., Iasonna, "No Title," *Less-Common Met.*, vol. 175, pp. 79–90, 1991.
- [130] V. V. Gerasimov, K.B., Gusev, A.A., Ivanov, E.Y., Boldyrev, "No Title," *J. Mater Sci*, vol. 26, pp. 2495–2500, 1995.
- [131] K. Liu, L., Casadio, S., Magini, M., Nannetti, C.A., Qin, Y., Zheng, "No Title," *Mater Sci Forum*, vol. 235, no. 238, pp. 163–168, 1997.
- [132] M. Atzmon, "No Title," *Phys Rev Lett*, vol. 64, pp. 487–490, 1990.
- [133] W. Gavrilov, D., Vinogradov, O., Shaw, "Proc. Inter. Conf. on Composite Materials," in *ICCM-10 vol:III*, 1995, p. 11.
- [134] J. S. Gilman, P.S., Benjamin, "No Title," *Mater Sci*, vol. 13, pp. 279–300, 1983.
- [135] M. Takacs, L., Pardavi-Horvath, "No Title," *J. Appl Phys*, vol. 75, pp. 5864–5866, 1994.
- [136] C. Takacs, L., In: Suryanarayana, "Processing and properties of nanocrystalline materials," Warrendale: PA: TMS, 1996, pp. 453–464.
- [137] R. Ogino, Y., Yamasaki, T., Maruyama, S., Sakai, "No Title," *J. Non-Cryst Solids*, vol. 117, no. 118, pp. 737–740, 1990.
- [138] C. C. Lee, P.Y., Koch, "No Title," *J. Non-Cryst Solids*, vol. 94, pp. 88–100, 1987.
- [139] M. J. Frazier, W.E., Koczak, "No Title," *Scr. Met.*, vol. 21, pp. 129–134, 1987.
- [140] M. Chen, G., Wang, K., Wang, J., Jiang, H., Quan, "Mechanical alloying for structural applications," in *ASM International*, et al. Debarbadillo, J.J., Ed. Materials Park, 1993, pp. 183–187.
- [141] L. Ivison, P.K., Cowlam, N., Soletta, I., Cocco, G., Enzo, S., Battezzati, "No Title," *Mater Sci Engng*, vol. A134, pp. 859–862, 1991.
- [142] L. Ivison, P.K., Soletta, I., Cowlam, N., Cocco, G., Enzo, S., Battezzati, "No Title," *J. Phys C Condens Matter*, vol. 4, pp. 1635–1645, 1992.
- [143] F. Gaffet, E., Harmelin, M., Faudot, "No Title," *J. Alloy. Compd.*, vol. 194, pp. 23–30, 1993.
- [144] B. Enayati, M.H., Chang, Ith., Schumacher, P., Cantor, "No Title," *Mater Sci Forum*, vol. 235–238, pp. 85–90, 1997.
- [145] L. Ivison, P.K., Soletta, I., Cowlam, N., Cocco, G., Enzo, S., Battezzati, "No Title," *Phys C Condens*

Matter, vol. 4, pp. 5239–5248, 1992.

- [146] S. Hwang, S.J., Nash, P., Dollar, M., Dymek, “No Title,” *Mater Sci Forum*, vol. 88, no. 90, pp. 611–618, 1992.
- [147] E. J. Huang, B-L., Perez, R.J., Crawford, P.J., Nutt, Sr, Lavernia, “No Title,” *Nanostructured Mater*, vol. 7, pp. 57–65, 1996.
- [148] W. L. Eckert, J., Holzer, J.C., Krill, III, C.E., Johnson, “No Title,” *Mater Sci Forum*, vol. 88, no. 90, pp. 505–512, 1992.
- [149] J. Lebrun, P., Froyen, L., Munar, B., Delaey, L.. Scand, “No Title,” *Metall.*, vol. 19, pp. 19–22, 1990.
- [150] B. Hong, L.B., Bansal, C., Fultz, “No Title,” *Nanostructured Mater*, vol. 4, pp. 949–956, 1994.
- [151] H. Qin, Y., Chen, L., Shen, “No Title,” *J. Alloy. Compd.*, vol. 256, pp. 230–233, 1997.
- [152] R. S. Klassen, T., Herr, U., Averbach, “No Title,” *Acta Mater.*, vol. 45, pp. 2921–2930, 1997.
- [153] W. L. Fu, Z., Johnson, “No Title,” *Nanostructured Mater*, vol. 3, pp. 175–180, 1993.
- [154] J. C. Mishurda, “No Title,” University of Idaho, Moscow, 1993.
- [155] M. Kimura, H., Kimura, “Solid state powder processing,” D. J. J. Clauer A.H., Ed. Warrendale: PA: TMS, 1990, pp. 365–377.
- [156] U. Lee, C.H., Mori, M., Fukunaga, T., Mizutani, “No Title,” *J. Appl Phys*, vol. 29, pp. 540–544, 1990.
- [157] O. Baylan, “Fe-C Phase Diagram.” <https://www.metaluzmani.com/demir-karbon-denge-diyagrami/>.
- [158] B. E. Grange, R.A., Pavlov Y.A., Levin, “Ferroalaşımların İstihsalı,” *Tulgar H. E.*, pp. 1–76, 1968.
- [159] A. Çalık, “Makine ve Metalürji Sanayinde Bor Kullanımı.”
- [160] S. E. Mal, K.K., Tarkan, “Diffused Boron Ups Hardness Wear Resistance Of Metals,” *Mater. Eng.*, vol. 77, pp. 70–71, 1973.
- [161] R. Chattopadhyay, “Surface Wear - Analysis, Treatment, and Prevention,” in *ASM International*, OH, USA: ASM-International.
- [162] J. R. Davis, “Surface engineering for corrosion and wear resistance,” in *ASM International*, OH, USA: Materials Park, 2010.
- [163] A. Akchurin, R. Bosman, P. M. Lugt, and M. van Drogen, “Analysis of Wear Particles Formed in Boundary-Lubricated Sliding Contacts,” *Tribol. Lett.*, vol. 63, no. 2, pp. 1–14, 2016, doi: 10.1007/s11249-016-0701-z.
- [164] V. L. Popov, “Is Tribology Approaching Its Golden Age? Grand Challenges in Engineering Education and Tribological Research,” *Front. Mech. Eng.*, vol. 4, no. November, pp. 1–6, 2018, doi: 10.3389/fmech.2018.00016.
- [165] P. Essayan, “Wear and Mechanical Behaviors of Nickel Aaluminide - Carbon Nanotube Composites,” San Diego State University, 2019.
- [166] A. K., Koji, K., “Wear Mechanisms,” in *In Modern Tribology Handbook Volume Two: Material Coatings, and Industrial Applications*, B. Bhushan, Ed. Boca Raton, FL.: CRC Press, 2001, pp. 273–300.
- [167] K. K., Hokkirigawa, K., “An Experimental and Theoretical Investigation of Ploughing, Cutting and Wedge Formation During Abrasive Wear,” *Tribol. Int.*, vol. 21, no. 1, pp. 51–57, 1988.
- [168] I. ASTM, “ASTM Standard G40-17: Standard Terminology Relating to Wear and Erosion,” in *ASTM Handbook*, West Conshohocken, 2017, p. ASTM International.
- [169] N. Selçuk, “Toprak İşleme Tarım Makinelerinde Kullanılan 5630 Kalite Çeliğinin Aşınma

Direncinin Değişik Yüzey Prosesleri İle İyileştirilmesi,” Afyon Kocatepe Üniversitesi, 2014.

- [170] Factory, “Corrosive Wear,” *Factory LTD.*, 2019. <https://fractory.com/mechanical-corrosive-adhesive-material-wear/>.
- [171] E. Axdahl, “Cavitation Damage,” *Wikipedia*, 2006. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cavitation_Propeller_Damage.JPG.
- [172] A. Ayday., “Elektrolitik Plazma Teknolojisi İle Küresel Grafitli Dökme Demir Malzemesinin Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesi,” Sakarya Üniversitesi, 2013.
- [173] Mehmet Bağcı, “Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Erozyon Aşınma Davranışının İncelenmesi,” Selçuk Üniversitesi, 2010.
- [174] T. Gürgeç, “AISI 1020 Çeliğinin Plazma Transfer Ark Yöntemi İle Alaşımlandırılmasında Bor Katkısının Yüzey Özellikleri Üzerine Etkisi,” Fırat Üniversitesi, 2017.
- [175] B. Avar, “Structural, thermal and magnetic characterization of nanocrystalline Co₆₅Ti₂₅W₅B₅ powders prepared by mechanical alloying,” *J. Non. Cryst. Solids*, vol. 432, pp. 246–253, 2016, doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2015.10.016.
- [176] H. Raanaei, S. Abbasi, and S. Behaein, “Structural and magnetic evolution of nanostructured Co₄₀Fe₁₀Zr₁₀B₄₀ prepared by mechanical alloying,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 384, pp. 175–180, Jun. 2015, doi: 10.1016/j.jmmm.2015.02.044.
- [177] D. Eyl and M. Gen, “Plazma Daldırma İyon İmplantasyonu (PIII) Yöntemi İle Demir Dışı Metallerin (PIII) Yöntemi İle Demir Dışı Metallerin,” 2010.
- [178] A. Ersöz, “ELEKTROKİMYASAL Borlamalı Çeliklerin Yüz Özelliklerinin Geliştirilmesi,” p. 91, 2008.
- [179] I. Campos, M. Islas, G. Ramírez, C. Villa Velázquez, and C. Mota, “Growth kinetics of borided layers: Artificial neural network and least square approaches,” *Appl. Surf. Sci.*, vol. 253, no. 14, pp. 6226–6231, May 2007, doi: 10.1016/j.apsusc.2007.01.070.
- [180] O. Allaoui, N. Bouaouadja, and G. Sainderran, “Characterization of boronized layers on a XC38 steel,” *Surf. Coatings Technol.*, vol. 201, no. 6, pp. 3475–3482, Dec. 2006, doi: 10.1016/j.surfcoat.2006.07.238.
- [181] M. Kulka, N. Makuch, and M. Popławski, “Two-stage gas boriding of Nisil in N₂-H₂-BCl₃ atmosphere,” *Surf. Coatings Technol.*, vol. 244, pp. 78–86, Apr. 2014, doi: 10.1016/j.surfcoat.2014.01.057.
- [182] H. Cimenoglu, E. Atar, and A. Motallebzadeh, “High temperature tribological behaviour of borided surfaces based on the phase structure of the boride layer,” *Wear*, vol. 309, no. 1–2, pp. 152–158, Jan. 2014, doi: 10.1016/j.wear.2013.10.012.
- [183] Y. Kayali, “Investigation of diffusion kinetics of borided AISI P20 steel in micro-wave furnace,” *Vacuum*, vol. 121, pp. 129–134, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.vacuum.2015.08.006.
- [184] H. Yang, X. Wu, Z. Yang, S. Pu, and H. Wang, “Enhanced boronizing kinetics of alloy steel assisted by surface mechanical attrition treatment,” *J. Alloys Compd.*, vol. 590, pp. 388–395, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.jallcom.2013.12.151.
- [185] D. Liu, Y. Duan, W. Bao, and M. Peng, “Characterization and growth kinetics of boride layers on Ti-5Mo-5V-8Cr-3Al alloy by pack boriding with CeO₂,” *Mater. Charact.*, vol. 164, p. 110362, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.matchar.2020.110362.
- [186] J. Li, S. Jeffs, M. Whittaker, and N. Martin, “Boride formation behaviour and their effect on tensile ductility in cast TiAl-based alloys,” *Mater. Des.*, vol. 195, p. 109064, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.matdes.2020.109064.
- [187] M. Kul, I. Danacı, Gezer, and B. Karaca, “Effect of boronizing composition on hardness of boronized AISI 1045 steel,” *Mater. Lett.*, vol. 279, p. 128510, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.matlet.2020.128510.
- [188] M. Kul, K. O. Oskay, A. Temizkan, B. Karaca, L. C. Kumruoğlu, and B. Topçu, “Effect of boronizing

- composition on boride layer of boronized GGG-60 ductile cast iron,” *Vacuum*, vol. 126, pp. 80–83, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.vacuum.2016.01.021.
- [189] M. C. G. Palombarini, “Growth of boride coatings on iron,” *J. Mater. Sci. Lett.*, vol. 6, pp. 415–416, 1987.
- [190] E. Medvedovski, “Formation of Corrosion-Resistant Thermal Diffusion Boride Coatings,” *Adv. Eng. Mater.*, vol. 18, no. 1, pp. 11–33, 2016, doi: 10.1002/adem.201500102.
- [191] O. A. Gómez-Vargas and M. O.-D. M. Keddad, “Kinetics and Tribological Characterization of Pack-Borided AISI 1025 Steel,” *High Temp. Mater. Process.*, vol. 36, no. 3, pp. 197–208, 2016.
- [192] C. M. Brakman, “Boriding of Fe and Fe–C, Fe–Cr, and Fe–Ni alloys; Boride-layer growth kinetics,” *J. Mater. Res.*, vol. 4, no. 6, pp. 1354–1370, 1989.
- [193] A. Calik, A. Duzgun, A. E. Ekinci, S. Karakas, and N. Ucar, “Comparison of hardness and wear behaviour of boronized and carburized AISI 8620 steels,” *Acta Phys. Pol. A*, vol. 116, no. 6, pp. 1029–1032, 2009, doi: 10.12693/APhysPolA.116.1029.



ÖZGEÇMİŞ

Muhammet Gökhan ALBAYRAK

ARAŞTIRMA DENEYİMİ

- ✓ Sertlik Ölçüm Cihazları, Planeter Tip Öğütme Cihazları, Optik Görüntüleme Mikroskopları.
- ✓ C++.
- ✓ Autocad, SolidWorks, MS Office, Origin Pro.

AKADEMİK FAALİYETLER

Bildiriler:

1. Albayrak, M., G., Evin, E., 2020, Effect Of Mechanical Activation On Boronizing Process, "1. International Baku Scientific Researches Conference", Azerbaijan, 213-217.