

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇELİKLERİN NİOBYUM BORÜR KAPLANMASI VE  
ÖZELLİKLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Tek. Öğr. S. Serdar PAZARLIOĞLU**

**Enstitü Anabilim Dalı : METAL EĞİTİMİ**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Uğur ŞEN**

**Temmuz 2006**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

## ÇELİKLERİN NİOBYUM BORÜR KAPLANMASI VE ÖZELLİKLERİ

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tek. Öğr. S. Serdar PAZARLIOĞLU

Enstitü Anabilim Dalı : METAL EĞİTİMİ

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Uğur ŞEN

Bu tez .. / .. /2006 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Uğur ŞEN  
Jüri Başkanı

Prof. Dr. Fehim FINDIK  
Üye

Prof. Dr. Cuma BİNDAL  
Üye

## TEŞEKKÜR

Bu çalıőmanın yűrűtűlmesi ve sonuçlandırılmasında fikir ve tecrűbeleri ile bana yardımcı olan, deneyler sırasında yapılması gerekenler hakkında beni yűnlendiren saygı deęer hocam Doç. Dr. Uęur ŐEN' e ve Yrd. Doç. Dr. Őaduman ŐEN' e sonsuz saygılarımı sunar, teőekkűr ederim.

Çalıőmalarım esnasında benden maddi ve manevi yardımlarını esirgemeyen ve sűrekli olarak bana destekçi olan sevgili annem ve babam Sevinç ve Salih PAZARLIOęLU' na, kardeőlerime ve bir de sűzlűm Duygu AYGŪN' e sonsuz teőekkűrlerimi sunarım.

Deneylerim sırasında gerek laboratuvar gerekse laboratuvar dıőında benden bilgi ve tecrűbelerini esirgemeyen sevgili Őzkan KON' a ve bir de Sakarya Őęrenci Yurdu Kredi ve Yurtlar Kurumu' nda bulunan tűm kardeőlerime sonsuz teőekkűrlerimi sunarım.

Temmuz 2006

S. Serdar PAZARLIOğLU

# İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
TABLolar LİSTESİ.....	xxix
SUMMARY.....	xxx
ÖZET.....	xxxı
BÖLÜM 1. GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2. ÇELİKLER HAKKINDA GENEL BİLGİ.....	6
2.1. Çeliklerin Karbon Oranına Göre Sınıflandırılması.....	7
2.1.1. Düşük karbonlu çelikler.....	8
2.1.1.1. Yumuşak çelikler.....	8
2.1.1.2. Çok yumuşak çelikler.....	8
2.1.2. Orta karbonlu çelikler.....	9
2.1.2.1. Genel dövme çelikleri.....	9
2.1.2.2. Mil çelikleri.....	9
2.1.2.3. Aşınmaya dayanıklı çelikler.....	10
2.1.3. Yüksek karbonlu çelikler.....	10
2.1.4. Sementasyon çelikleri.....	10
2.1.5. Islah çelikleri.....	12
2.1.6. Takım çelikleri.....	13
2.1.6.1. Soğuk iş takım çelikleri.....	13
2.1.6.1.1. Soğuk iş takım çeliklerinin kullanım yerleri.....	13

2.1.6.2. Sıcak iş takım çelikleri.....	14
2.1.6.2.1. Sıcak iş takım çeliklerinin kullanım yerleri.....	14
2.1.6.3. Yüksek hız takım çelikleri.....	15
2.1.6.3.1. Yüksek hız takım çeliklerinin kullanım yerleri.....	15
<b>BÖLÜM 3. BOR VE BORLAMA.....</b>	<b>16</b>
3.1. Bor.....	16
3.2. Borlama.....	22
3.2.1. Borlama yöntemleri.....	25
3.2.1.1. Katı (Kutu) borlama.....	25
3.2.1.2. Sıvı borlama.....	26
3.2.1.3. Gaz ortamında yapılan borlama.....	27
3.2.1.4. Plazma ortamında yapılan borlama.....	27
<b>BÖLÜM 4. NİOBYUM HAKKINDA GENEL BİLGİ.....</b>	<b>28</b>
4.1. Giriş.....	28
4.2. Niobiyum Borürler.....	30
<b>BÖLÜM 5. TERMOREAKTİF DİFÜZYON PROSESİ.....</b>	<b>32</b>
5.1. Giriş.....	32
5.2. Difüzyon.....	33
5.3. Termokimyasal İşlemler.....	34
5.4. Termoreaktif Difüzyon İşlemi.....	35
<b>BÖLÜM 6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....</b>	<b>38</b>
6.1. Giriş.....	38
6.2. Deneylerde Kullanılan Numuneler ve Kimyasal Analizleri.....	38
6.3. Deneylerde Kullanılan Numunelerin Hazırlanışı.....	39

6.4. Deneyleerde Kullanılan Numuneler.....	40
6.4.1. Borlama ve niobyumlama fırını.....	40
6.4.2. Borlama potasının hazırlanması.....	40
6.4.3. Niobyumlama potasının hazırlanması.....	41
6.5. Borlamada Kullanılan Tozların Hazırlanması.....	41
6.6. Borlama İşlemi.....	42
6.7. Niobyumlama İşlemi.....	42
6.8. Metalografik İnceleme.....	43
6.9. X-ışınları Difraksiyon Analizi.....	43
6.10. Taramalı Elektron Mikroskobu ve Elementel Analiz İncelemesi..	43
6.11. Sertlik Ölçümü.....	44
6.12. Aşınma Özellikleri.....	44
BÖLÜM 7. SONUÇLAR VE İRDELEME.....	45
7.1. Giriş.....	45
7.2. Metalografik İnceleme.....	45
7.3. X-ışınları Difraksiyon Analizi.....	57
7.4. Taramalı Elektron Mikroskobu ve Elementel Analiz İncelemesi...	62
7.5. Tabaka Kalınlığı.....	75
7.6. Sertlik Ölçümü.....	77
7.7. Aşınma Özellikleri.....	78
BÖLÜM 8.EKLER.....	120
SONUÇLAR.....	145
ÖNERİLER.....	146
KAYNAKLAR.....	147
ÖZGEÇMİŞ.....	150



## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

CVD	: Kimyasal Buhar Biriktirme
PVD	: Fiziksel Buhar Biriktirme
HV	: Sertlik
TRD	: Termoreaktif Difüzyon İşlemi
TD	: Termo Difüzyon
M	: Metal
r	: Yarıçap
D	: Difüzyon Katsayısı
T	: Sıcaklık
t	: Zaman
R	: Gaz Sabiti
XRD	: X-ışınları Difraksiyon Analizi
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
EDS	: Enerji Dağılımlı X-ışınları Spektroskopisi
AISI	: Amerikan Çelik Endüstrisi Normu
mm <sup>3</sup> /m	: Aşınma Hızı
mm/m	: Aşınma Hacmi
SEM-EDS	: Noktasal Analiz
Nb	: Niobyum



## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Yüzey mühendisliği bünyesinde yer alan yüzey işlemleri.....	3
Şekil 1.2.	Çeliklerin yüzey modifikasyonlarının sağlanmasında kullanılan değişik metodların sertlik derinliği ve sıcaklık açısından kıyaslanması.....	3
Şekil 4.1.	Niobyum ve borun faz diyagramı.....	30
Şekil 6.1.	Deneylerde kullanılan numunelerin görünümü (a) önden görünüşü (b) üstten görünüşü (c) profil görünüşü.....	40
Şekil 6.2.	Borlama potasının görünüşü.....	41
Şekil 6.3.	Niobyumlama potasının görünüşü.....	41
Şekil 7.1.	850°C sıcaklıkta (a) 2 saat ve (b) 4 saat süre ile niobyum borür kaplanmış olan AISI 1010 çeliğinin SEM mikroyapısı.	46
Şekil 7.2.	900°C sıcaklıkta (a) 2 saat ve (b) 4 saat süre ile niobyum borür kaplanmış olan AISI 1010 çeliğinin SEM mikroyapısı.	47
Şekil 7.3.	950°C sıcaklıkta (a) 2 saat ve (b) 4 saat süre ile niobyum borür kaplanmış olan AISI 1010 çeliğinin SEM mikroyapısı	48
Şekil 7.4.	850°C sıcaklıkta (a) 2 saat ve (b) 4 saat süre ile niobyum borür kaplanmış olan AISI 4140 çeliğinin SEM mikroyapısı.	49
Şekil 7.5.	900°C sıcaklıkta (a) 2 saat ve (b) 4 saat süre ile niobyum borür kaplanmış olan AISI 4140 çeliğinin SEM mikroyapısı.	50
Şekil 7.6.	950°C sıcaklıkta (a) 2 saat ve (b) 4 saat süre ile niobyum borür kaplanmış olan AISI 4140 çeliğinin SEM mikroyapısı.	51
Şekil 7.7.	850°C sıcaklıkta (a) 2 saat ve (b) 4 saat süre ile niobyum borür kaplanmış olan AISI D2 çeliğinin SEM mikroyapısı....	52
Şekil 7.8.	900°C sıcaklıkta (a) 2 saat ve (b) 4 saat süre ile niobyum borür kaplanmış olan AISI D2 çeliğinin SEM mikroyapısı....	53
Şekil 7.9.	950°C sıcaklıkta (a) 2 saat ve (b) 4 saat süre ile niobyum borür kaplanmış olan AISI D2 çeliğinin SEM mikroyapısı....	54

Şekil 7.10.	850°C sıcaklıkta (a) 2 saat ve (b) 4 saat süre ile niobyum borür kaplanmış olan AISI M2 çeliğinin SEM mikroyapısı...	55
Şekil 7.11.	900°C sıcaklıkta (a) 2 saat ve (b) 4 saat süre ile niobyum borür kaplanmış olan AISI M2 çeliğinin SEM mikroyapısı...	56
Şekil 7.12.	950°C sıcaklıkta (a) 2 saat ve (b) 4 saat süre ile niobyum borür kaplanmış olan AISI M2 çeliğinin SEM mikroyapısı...	57
Şekil. 7.13.	(a) 850°C, (b) 900°C ve (c) 950°C sıcaklıklarda 2 saat süre ile niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çeliğinin X- ışınları difraksiyon paterni.....	58
Şekil. 7.14.	(a) 850°C, (b) 900°C ve (c) 950°C sıcaklıklarda 2 saat süre ile niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çeliğinin X- ışınları difraksiyon paterni.....	59
Şekil 7.15.	(a) 850°C, (b) 900°C ve (c) 950°C sıcaklıklarda 2 saat süre ile niobyum borür kaplanmış AISI D2 çeliğinin X- ışınları difraksiyon paterni.....	60
Şekil 7.16.	(a) 850°C, (b) 900°C ve (c) 950°C sıcaklıklarda 2 saat süre ile niobyum borür kaplanmış AISI M2 çeliğinin X- ışınları difraksiyon paterni.....	61
Şekil 7.17.	850°C' de 4 saat süre ile niobyum borür kaplanan AISI 1010 çelik numunenin kaplama tabakasının (a) SEM mikroyapı görüntüsü (b) Kaplama tabakası boyunca elementlerin lineer analiz dağılımı (c) kaplama tabakasının EDS analizi (d) AISI 1010 çeliğinin EDS analizi.....	63
Şekil 7.18.	900°C' de 4 saat süre ile niobyum borür kaplanan AISI 1010 çelik numunenin kaplama tabakasının (a) SEM mikroyapı görüntüsü (b) Kaplama tabakası boyunca elementlerin lineer analiz dağılımı (c) kaplama tabakasının EDS analizi (d) AISI 1010 çeliğinin EDS analizi.....	64
Şekil 7.19.	950°C' de 4 saat süre ile niobyum borür kaplanan AISI 1010 çelik numunenin kaplama tabakasının (a) SEM mikroyapı görüntüsü (b) Kaplama tabakası boyunca elementlerin lineer analiz dağılımı (c) kaplama tabakasının EDS analizi (d) AISI 1010 çeliğinin EDS analizi.....	65

Şekil 7.20.	850°C' de 4 saat süre ile niobyum borür kaplanan AISI 4140 çelik numunenin kaplama tabakasının (a) SEM mikroyapı görüntüsü (b) Kaplama tabakası boyunca elementlerin lineer analiz dağılımı (c) kaplama tabakasının EDS analizi (d) AISI 4140 çeliğinin EDS analizi.....	66
Şekil 7.21.	900°C' de 4 saat süre ile niobyum borür kaplanan AISI 4140 çelik numunenin kaplama tabakasının (a) SEM mikroyapı görüntüsü (b) Kaplama tabakası boyunca elementlerin lineer analiz dağılımı (c) kaplama tabakasının EDS analizi (d) AISI 4140 çeliğinin EDS analizi.....	67
Şekil 7.22.	950°C' de 4 saat süre ile niobyum borür kaplanan AISI 4140 çelik numunenin kaplama tabakasının (a) SEM mikroyapı görüntüsü (b) Kaplama tabakası boyunca elementlerin lineer analiz dağılımı (c) kaplama tabakasının EDS analizi (d) AISI 4140 çeliğinin EDS analizi.....	68
Şekil 7.23.	850°C' de 4 saat süre ile niobyum borür kaplanan AISI D2 çelik numunenin kaplama tabakasının (a) SEM mikroyapı görüntüsü (b) Kaplama tabakası boyunca elementlerin lineer analiz dağılımı (c) kaplama tabakasının EDS analizi (d) AISI D2 çeliğinin EDS analizi.....	69
Şekil 7.24.	900°C' de 4 saat süre ile niobyum borür kaplanan AISI D2 çelik numunenin kaplama tabakasının (a) SEM mikroyapı görüntüsü (b) Kaplama tabakası boyunca elementlerin lineer analiz dağılımı (c) kaplama tabakasının EDS analizi (d) AISI D2 çeliğinin EDS analizi.....	70
Şekil 7.25.	950°C' de 4 saat süre ile niobyum borür kaplanan AISI D2 çelik numunenin kaplama tabakasının (a) SEM mikroyapı görüntüsü (b) Kaplama tabakası boyunca elementlerin lineer analiz dağılımı (c) kaplama tabakasının EDS analizi (d) AISI D2 çeliğinin EDS analizi.....	71
Şekil 7.26.	850°C' de 4 saat süre ile niobyum borür kaplanan AISI M2 çelik numunenin kaplama tabakasının (a) SEM mikroyapı görüntüsü (b) Kaplama tabakası boyunca elementlerin lineer	

	analiz dağılımı (c) kaplama tabakasının EDS analizi (d) AISI M2 çeliğinin EDS analizi.....	72
Şekil 7.27.	900°C' de 4 saat süre ile niobyum borür kaplanan AISI M2 çelik numunenin kaplama tabakasının (a) SEM mikroyapı görüntüsü (b) Kaplama tabakası boyunca elementlerin lineer analiz dağılımı (c) kaplama tabakasının EDS analizi (d) AISI M2 çeliğinin EDS analizi.....	73
Şekil 7.28.	950°C' de 4 saat süre ile niobyum borür kaplanan AISI M2 çelik numunenin kaplama tabakasının elementel analiz dağılımı. (a) SEM mikroyapı görüntüsü üzerinde lineer analiz alınan bölge (b) elementlerin lineer analiz dağılımı (c) kaplama tabakasının lineer analiz dağılımları (d) AISI M2 çeliğindeki noktasal analiz diyagramı.....	74
Şekil 7.29.	AISI 1010 çeliğinin kaplama zamanı ve süresine bağlı olarak niobyum borür kaplama tabakasının kalınlığındaki değişimi.	75
Şekil 7.30.	AISI 4140 çeliğinin kaplama zamanı ve süresine bağlı olarak niobyum borür kaplama tabakasının kalınlığındaki değişimi.	76
Şekil 7.31.	AISI D2 çeliğinin kaplama zamanı ve süresine bağlı olarak niobyum borür kaplama tabakasının kalınlığındaki değişimi.	77
Şekil 7.32.	AISI M2 çeliğinin kaplama zamanı ve süresine bağlı olarak niobyum borür kaplama tabakasının kalınlığındaki değişimi.	77
Şekil 7.33.	Niobyum borür kaplanmış çeliklerin yüzeyinde oluşan niobyum borür tabakasının ortalama sertlikleri.....	78
Şekil 7.34.	Niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çeliği ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 2N yük altında 0.3 m/s hızdaki sürtünme katsayısının yola bağlı olarak değişimi.....	78
Şekil 7.35.	Niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çeliği ile alümina bilye arasındaki 5N yük altında 0.3 m/s hızdaki sürtünme katsayısının yola bağlı olarak değişimi.....	79
Şekil 7.36.	Niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çeliği ile AISI 52100 çelik bilyesi arasındaki 1N yük altında 0.3 m/s hızdaki sürtünme katsayısının yola bağlı olarak değişimi.....	79
Şekil 7.37.	Niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çeliği ile alümina bilye	

	arasındaki 2N yük altında 0.1 m/s hızdaki sürtünme katsayısının yola bağlı olarak değişimi.....	80
Şekil 7.38.	Niobyum borür kaplanmış AISI D2 çeliği ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 1N yük altında 0.1 m/s hızdaki sürtünme katsayısının yola bağlı olarak değişimi.....	80
Şekil 7.39.	Niobyum borür kaplanmış AISI D2 çeliği ile alümina bilye arasındaki 5N yük altında 0.3 m/s hızdaki sürtünme katsayısının yola bağlı olarak değişimi.....	81
Şekil 7.40.	Niobyum borür kaplanmış AISI M2 çeliği ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 5N yük altında 0.3 m/s hızdaki sürtünme katsayısının yola bağlı olarak değişimi.....	81
Şekil 7.41.	Niobyum borür kaplanmış AISI M2 çeliği ile alümina bilye arasındaki 1N yük altında 0.3 m/s hızdaki sürtünme katsayısının yola bağlı olarak değişimi.....	82
Şekil 7.42.	Niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çelik numune ile alümina bilye arasındaki sürtünme katsayılarının uygulanan yüklere ve hızlara bağlı olarak değişimi.....	82
Şekil 7.43.	Niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çelik numune ile alümina bilye arasındaki sürtünme katsayılarının uygulanan yüklere ve hızlara bağlı olarak değişimi.....	83
Şekil 7.44.	Niobyum borür kaplanmış AISI D2 çelik numune ile alümina bilye arasındaki sürtünme katsayılarının uygulanan yüklere ve hızlara bağlı olarak değişimi.....	83
Şekil 7.45.	Niobyum borür kaplanmış AISI M2 çelik numune ile alümina bilye arasındaki sürtünme katsayılarının uygulanan yüklere ve hızlara bağlı olarak değişimi.....	84
Şekil 7.46.	Niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki sürtünme katsayılarının uygulanan yüklere ve hızlara bağlı olarak değişimi.....	84
Şekil 7.47.	Niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki sürtünme katsayılarının uygulanan yüklere ve hızlara bağlı olarak değişimi.....	85
Şekil 7.48.	Niobyum borür kaplanmış AISI D2 çelik numune ile AISI	

	52100 çelik bilye arasındaki sürtünme katsayılarının uygulanan yüklere ve hızlara bağlı olarak değişimi.....	85
Şekil 7.49.	Niobyum borür kaplanmış AISI M2 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki sürtünme katsayılarının uygulanan yüklere ve hızlara bağlı olarak değişimi.....	86
Şekil 7.50.	Alümina bilyeye karşı aşındırılan niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çeliğinin aşınma hızlarının uygulanan yük ve sürtünme hızına bağlı olarak değişimi.....	87
Şekil 7.51.	Alümina bilyeye karşı aşındırılan niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çeliğinin aşınma hızlarının uygulanan yük ve sürtünme hızına bağlı olarak değişimi.....	87
Şekil 7.52.	Alümina bilyeye karşı aşındırılan niobyum borür kaplanmış AISI D2 çeliğinin aşınma hızlarının uygulanan yük ve sürtünme hızına bağlı olarak değişimi.....	88
Şekil 7.53.	Alümina bilyeye karşı aşındırılan niobyum borür kaplanmış AISI M2 çeliğinin aşınma hızlarının uygulanan yük ve sürtünme hızına bağlı olarak değişimi.....	88
Şekil 7.54.	Niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çeliğine karşı aşınma deneyine tabi tutulan AISI 52100 çelik bilyedeki aşınma hızının uygulanan yük ve sürtünme hızına bağlı olarak değişimi.....	90
Şekil 7.55.	Niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çeliğine karşı aşınma deneyine tabi tutulan AISI 52100 çelik bilyedeki aşınma hızının uygulanan yük ve sürtünme hızına bağlı olarak değişimi.....	91
Şekil 7.56.	Niobyum borür kaplanmış AISI D2 çeliğine karşı aşınma deneyine tabi tutulan AISI 52100 çelik bilyedeki aşınma hızının uygulanan yük ve sürtünme hızına bağlı olarak değişimi.....	91
Şekil 7.57.	Niobyum borür kaplanmış AISI M2 çeliğine karşı aşınma deneyine tabi tutulan AISI 52100 çelik bilyedeki aşınma hızının uygulanan yük ve sürtünme hızına bağlı olarak değişimi.....	92

Şekil 7.58.	Niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çeliğine karşı aşınma deneyine tabi tutulan alümina bilyedeki aşınma hızının uygulanan yük ve sürtünme hızına bağlı olarak değişimi.....	92
Şekil 7.59.	Niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çeliğine karşı aşınma deneyine tabi tutulan alümina bilyedeki aşınma hızının uygulanan yük ve sürtünme hızına bağlı olarak değişimi.....	93
Şekil 7.60.	Niobyum borür kaplanmış AISI D2 çeliğine karşı aşınma deneyine tabi tutulan alümina bilyedeki aşınma hızının uygulanan yük ve sürtünme hızına bağlı olarak değişimi.....	93
Şekil 7.61.	Niobyum borür kaplanmış AISI M2 çeliğine karşı aşınma deneyine tabi tutulan alümina bilyedeki aşınma hızının uygulanan yük ve sürtünme hızına bağlı olarak değişimi.....	94
Şekil 7.62.	2N yük altında 0.1 m/s hızında 180 m mesafede, AISI 52100 çelik bilyeye karşı aşındırılan niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çeliğinde oluşan aşınma izinin (a) SEM mikroyapısı, (b) kaplama bölgesinden (c) çelik bilyenin sıvandığı bölgeden ve (d) sıvanmanın olmadığı aşınma bölgesinden alınan EDS analizlerini göstermektedir.....	95
Şekil 7.63.	2N yük altında 0.3 m/s hızında 180 m mesafede, AISI 52100 çelik bilyeye karşı aşındırılan niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çeliğinde oluşan aşınma izinin (a) SEM mikroyapısı, (b) çelik bilyenin sıvandığı bölgeden ve (c) sıvanmanın olmadığı aşınma bölgesinden alınan EDS analizlerini göstermektedir.....	96
Şekil 7.64.	2N yük altında 0.5 m/s hızında 180 m mesafede, AISI 52100 çelik bilyeye karşı aşındırılan niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çeliğinde oluşan aşınma izinin (a) SEM mikroyapısı, (b) çelik bilyenin sıvandığı bölgeden ve (c) sıvanmanın olmadığı aşınma bölgesinden alınan EDS analizlerini göstermektedir.....	97
Şekil 7.65.	2N yük altında 0.1 m/s hızında 180 m mesafede, AISI 52100 çelik bilyeye karşı aşındırılan niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çeliğinde oluşan aşınma izinin (a) SEM	

	mikroyapısı, (b) çelik bilyenin sıvandığı bölgeden ve (c) sıvanmanın olmadığı aşınma bölgesinden alınan EDS analizlerini göstermektedir.....	98
Şekil 7.66.	2N yük altında 0.3 m/s hızında 180 m mesafede, AISI 52100 çelik bilyeye karşı aşındırılan niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çeliğinde oluşan aşınma izinin (a) SEM mikroyapısı, (b) çelik bilyenin sıvandığı bölgeden ve (c) sıvanmanın olmadığı aşınma bölgesinden alınan EDS analizlerini göstermektedir.....	99
Şekil 7.67.	2N yük altında 0.3 m/s hızında 180 m mesafede, AISI 52100 çelik bilyeye karşı aşındırılan niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çeliğinde oluşan aşınma izinin (a) SEM mikroyapısı, (b) çelik bilyenin sıvandığı bölgeden ve (c) sıvanmanın olmadığı aşınma bölgesinden alınan EDS analizlerini göstermektedir.....	100
Şekil 7.68.	2N yük altında 0.1 m/s hızında 180 m mesafede, AISI 52100 çelik bilyeye karşı aşındırılan niobyum borür kaplanmış AISI D2 çeliğinde oluşan aşınma izinin (a) SEM mikroyapısı, (b) çelik bilyenin sıvandığı bölgeden ve (c) sıvanmanın olmadığı aşınma bölgesinden alınan EDS analizlerini göstermektedir.....	101
Şekil 7.69.	2N yük altında 0.3 m/s hızında 180 m mesafede, AISI 52100 çelik bilyeye karşı aşındırılan niobyum borür kaplanmış AISI D2 çeliğinde oluşan aşınma izinin (a) SEM mikroyapısı, (b) çelik bilyenin sıvandığı bölgeden ve (c) sıvanmanın olmadığı aşınma bölgesinden alınan EDS analizlerini göstermektedir.....	102
Şekil 7.70.	2N yük altında 0.5 m/s hızında 180 m mesafede, AISI 52100 çelik bilyeye karşı aşındırılan niobyum borür kaplanmış AISI D2 çeliğinde oluşan aşınma izinin (a) SEM mikroyapısı, (b) çelik bilyenin sıvandığı bölgeden ve (c) sıvanmanın olmadığı aşınma bölgesinden alınan EDS analizlerini göstermektedir.....	103



Şekil 7.71.	2N yük altında 0.1 m/s hızında 180 m mesafede, AISI 52100 çelik bilyeye karşı aşındırılan niobyum borür kaplanmış AISI M2 çeliğinde oluşan aşınma izinin (a) SEM mikroyapısı, (b) çelik bilyenin sıvandığı bölgeden ve (c) sıvanmanın olmadığı aşınma bölgesinden alınan EDS analizlerini göstermektedir.....	104
Şekil 7.72.	2N yük altında 0.3 m/s hızında 180 m mesafede, AISI 52100 çelik bilyeye karşı aşındırılan niobyum borür kaplanmış AISI M2 çeliğinde oluşan aşınma izinin (a) SEM mikroyapısı, (b) çelik bilyenin sıvandığı bölgeden ve (c) sıvanmanın olmadığı aşınma bölgesinden alınan EDS analizlerini göstermektedir.....	105
Şekil 7.73.	2N yük altında 0.5 m/s hızında 180 m mesafede, AISI 52100 çelik bilyeye karşı aşındırılan niobyum borür kaplanmış AISI M2 çeliğinde oluşan aşınma izinin (a) SEM mikroyapısı, (b) çelik bilyenin sıvandığı bölgeden ve (c) sıvanmanın olmadığı aşınma bölgesinden alınan EDS analizlerini göstermektedir.....	106
Şekil 7.74.	2N yük altında 0.1 m/s sürtünme hızında 180 metre mesafede, alümina bilyeye karşı aşındırılan niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çeliğinin yüzeyinde oluşan aşınma izinin (a) SEM mikroyapısı, (b) aşınma bölgesinden alınan EDS analizini göstermektedir.....	107
Şekil 7.75.	2N yük altında 0.3 m/s sürtünme hızında 180 metre mesafede, alümina bilyeye karşı aşındırılan niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çeliğinin yüzeyinde oluşan aşınma izinin (a) SEM mikroyapısı, (b) aşınma bölgesinden alınan EDS analizini göstermektedir.....	108
Şekil 7.76.	2N yük altında 0.5 m/s sürtünme hızında 180 metre mesafede, alümina bilyeye karşı aşındırılan niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çeliğinin yüzeyinde oluşan aşınma izinin (a) SEM mikroyapısı, (b) aşınma bölgesinden alınan	

	EDS analizini göstermektedir.....	109
Şekil 7.77.	2N yük altında 0.1 m/s sürtünme hızında 180 metre mesafede, alümina bilyeye karşı aşındırılan niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çeliğinin yüzeyinde oluşan aşınma izinin (a) SEM mikroyapısı, (b) aşınma bölgesinden alınan EDS analizini göstermektedir.....	110
Şekil 7.78.	2N yük altında 0.3 m/s sürtünme hızında 180 metre mesafede, alümina bilyeye karşı aşındırılan niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çeliğinin yüzeyinde oluşan aşınma izinin (a) SEM mikroyapısı, (b) aşınma bölgesinden alınan EDS analizini göstermektedir.....	111
Şekil 7.79.	2N yük altında 0.5 m/s sürtünme hızında 180 metre mesafede, alümina bilyeye karşı aşındırılan niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çeliğinin yüzeyinde oluşan aşınma izinin (a) SEM mikroyapısı, (b) aşınma bölgesinden alınan EDS analizini göstermektedir.....	112
Şekil 7.80.	2N yük altında 0.1 m/s sürtünme hızında 180 metre mesafede, alümina bilyeye karşı aşındırılan niobyum borür kaplanmış AISI D2 çeliğinin yüzeyinde oluşan aşınma izinin (a) SEM mikroyapısı, (b) aşınma bölgesinden alınan EDS analizini göstermektedir.....	113
Şekil 7.81.	2N yük altında 0.3 m/s sürtünme hızında 180 metre mesafede, alümina bilyeye karşı aşındırılan niobyum borür kaplanmış AISI D2 çeliğinin yüzeyinde oluşan aşınma izinin (a) SEM mikroyapısı, (b) aşınma bölgesinden alınan EDS analizini göstermektedir.....	114
Şekil 7.82.	2N yük altında 0.5 m/s sürtünme hızında 180 metre mesafede, alümina bilyeye karşı aşındırılan niobyum borür kaplanmış AISI D2 çeliğinin yüzeyinde oluşan aşınma izinin (a) SEM mikroyapısı, (b) aşınma bölgesinden alınan EDS analizini göstermektedir.....	115
Şekil 7.83.	2N yük altında 0.1 m/s sürtünme hızında 180 metre mesafede, alümina bilyeye karşı aşındırılan niobyum borür	

	kaplanmış AISI M2 çeliğinin yüzeyinde oluşan aşınma izinin (a) SEM mikroyapısı, (b) aşınma bölgesinden alınan EDS analizini göstermektedir.....	116
Şekil 7.84.	2N yük altında 0.3 m/s sürtünme hızında 180 metre mesafede, alümina bilyeye karşı aşındırılan niobyum borür kaplanmış AISI M2 çeliğinin yüzeyinde oluşan aşınma izinin (a) SEM mikroyapısı, (b) aşınma bölgesinden alınan EDS analizini göstermektedir.....	117
Şekil 7.85.	2N yük altında 0.5 m/s sürtünme hızında 180 metre mesafede, alümina bilyeye karşı aşındırılan niobyum borür kaplanmış AISI M2 çeliğinin yüzeyinde oluşan aşınma izinin (a) SEM mikroyapısı, (b) aşınma bölgesinden alınan EDS analizini göstermektedir.....	118
Şekil 8.1.	Niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 1N yük altında 0,1 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) AISI 52100 bilye(200X), (b) AISI 1010 çelik numune(200X), (c) AISI 1010 çelik numune(50X).....	121
Şekil 8.2.	Niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 1N yük altında 0,3 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) AISI 52100 bilye(200X), (b) AISI 1010 çelik numune(200X), (c) AISI 1010 çelik numune(50X).....	121
Şekil 8.3.	Niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 1N yük altında 0,5 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) AISI 52100 bilye(200X), (b) AISI 1010 çelik numune(200X), (c) AISI 1010 çelik numune(50X) .....	121
Şekil 8.4.	Niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 2N yük altında 0,1 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) AISI 52100 bilye(200X), (b) AISI 1010 çelik numune(200X), (c) AISI 1010 çelik numune(50X).....	122

- Şekil 8.5. Niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 2N yük altında 0,3 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) AISI 52100 bilye(200X), (b) AISI 1010 çelik numune(200X), (c) AISI 1010 çelik numune(50X) ..... 122
- Şekil 8.6. Niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 2N yük altında 0,5 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) AISI 52100 bilye(200X), (b) AISI 1010 çelik numune(200X), (c) AISI 1010 çelik numune(50X)..... 122
- Şekil 8.7. Niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 5N yük altında 0,1 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) AISI 52100 bilye(200X), (b) AISI 1010 çelik numune(200X), (c) AISI 1010 çelik numune(50X)..... 123
- Şekil 8.8. Niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 5N yük altında 0,3 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) AISI 52100 bilye(200X), (b) AISI 1010 çelik numune(200X), (c) AISI 1010 çelik numune(50X)..... 123
- Şekil 8.9. Niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 5N yük altında 0,5 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) AISI 52100 bilye(200X), (b) AISI 1010 çelik numune(200X), (c) AISI 1010 çelik numune(50X)..... 123
- Şekil 8.10. Niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 1 N altında 0.1 m/s hızda, 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) AISI 52100 çelik bilye(200X), (b) AISI 4140 çelik numune(200X), (c) AISI 4140 çelik numune (50X)..... 124
- Şekil 8.11. Niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 1 N altında 0.3 m/s hızda, 180

	mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan miroyapı görüntüleri (a) AISI 52100 çelik bilye(200X), (b) AISI 4140 çelik numune(200X), (c) AISI 4140 çelik numune (50X).....	124
Şekil 8.12.	Niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 1 N altında 0.5 m/s hızda, 180 mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan miroyapı görüntüleri (a) AISI 52100 çelik bilye(200X), (b) AISI 4140 çelik numune(200X), (c) AISI 4140 çelik numune (50X).....	124
Şekil 8.13.	Niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 2 N altında 0.1 m/s hızda, 180 mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan miroyapı görüntüleri (a) AISI 52100 çelik bilye(200X), (b) AISI 4140 çelik numune(200X), (c) AISI 4140 çelik numune (50X).....	125
Şekil 8.14.	Niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 2 N altında 0.3 m/s hızda, 180 mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan miroyapı görüntüleri (a) AISI 52100 çelik bilye(200X), (b) AISI 4140 çelik numune(200X), (c) AISI 4140 çelik numune (50X).....	125
Şekil 8.15.	Niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 2 N altında 0.5 m/s hızda, 180 mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan miroyapı görüntüleri (a) AISI 52100 çelik bilye(200X), (b) AISI 4140 çelik numune(200X), (c) AISI 4140 çelik numune (50X).....	125
Şekil 8.16.	Niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 5 N altında 0.1 m/s hızda, 180 mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan miroyapı görüntüleri (a) AISI 52100 çelik bilye(200X), (b) AISI 4140 çelik numune(200X), (c) AISI 4140 çelik numune (50X).....	126
Şekil 8.17.	Niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 5 N altında 0.3 m/s hızda, 180 mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan miroyapı görüntüleri (a) AISI 52100 çelik bilye(200X), (b) AISI 4140 çelik numune(200X), (c) AISI 4140 çelik numune (50X).....	126

- Şekil 8.18. Niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 5 N altında 0.5 m/s hızda, 180 mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan miroyapı görüntüleri (a) AISI 52100 çelik bilye(200X), (b) AISI 4140 çelik numune(200X), (c) AISI 4140 çelik numune (50X)..... 126
- Şekil 8.19. Niobyum borür kaplanmış AISI D2 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 1N yük altında 0,1 m/s hızda, 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikroyapı görüntüleri (a) AISI 52100 çelik bilye (200X), (b) AISI D2 çelik numune (200X), (c) AISI D2 çelik numune (50X)..... 127
- Şekil 8.20. Niobyum borür kaplanmış AISI D2 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 1N yük altında 0,3 m/s hızda, 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikroyapı görüntüleri (a) AISI 52100 çelik bilye (200X), (b) AISI D2 çelik numune (200X), (c) AISI D2 çelik numune (50X)..... 127
- Şekil 8.21. Niobyum borür kaplanmış AISI D2 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 1N yük altında 0,5 m/s hızda, 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikroyapı görüntüleri (a) AISI 52100 çelik bilye (200X), (b) AISI D2 çelik numune (200X), (c) AISI D2 çelik numune (50X)..... 127
- Şekil 8.22. Niobyum borür kaplanmış AISI D2 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 2N yük altında 0,1 m/s hızda, 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikroyapı görüntüleri (a) AISI 52100 çelik bilye (200X), (b) AISI D2 çelik numune (200X), (c) AISI D2 çelik numune (50X)..... 128
- Şekil 8.23. Niobyum borür kaplanmış AISI D2 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 2N yük altında 0,3 m/s hızda, 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikroyapı görüntüleri (a) AISI 52100 çelik bilye (200X), (b) AISI D2 çelik numune (200X), (c) AISI D2 çelik numune (50X)..... 128
- Şekil 8.24. Niobyum borür kaplanmış AISI D2 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 2N yük altında 0,5 m/s hızda,

	180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikroyapı görüntüleri (a) AISI 52100 çelik bilye (200X), (b) AISI D2 çelik numune (200X), (c) AISI D2 çelik numune (50X).....	128
Şekil 8.25.	Niobyum borür kaplanmış AISI D2 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 5N yük altında 0,1 m/s hızda, 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikroyapı görüntüleri (a) AISI 52100 çelik bilye (200X), (b) AISI D2 çelik numune (200X), (c) AISI D2 çelik numune (50X).....	129
Şekil 8.26.	Niobyum borür kaplanmış AISI D2 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 5N yük altında 0,3 m/s hızda, 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikroyapı görüntüleri (a) AISI 52100 çelik bilye (200X), (b) AISI D2 çelik numune (200X), (c) AISI D2 çelik numune (50X).....	129
Şekil 8.27.	Niobyum borür kaplanmış AISI D2 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 5N yük altında 0,5 m/s hızda, 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikroyapı görüntüleri (a) AISI 52100 çelik bilye (200X), (b) AISI D2 çelik numune (200X), (c) AISI D2 çelik numune (50X).....	129
Şekil 8.28.	Niobyum borür kaplanmış AISI M2 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 1N yük altında 0,1 m/s hızda, 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikroyapı görüntüleri (a) AISI 52100 çelik bilye (200X), (b) AISI M2 çelik numune (200X), (c) AISI M2 çelik numune (50X) .....	130
Şekil 8.29.	Niobyum borür kaplanmış AISI M2 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 1N yük altında 0,3 m/s hızda, 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikroyapı görüntüleri (a) AISI 52100 çelik bilye (200X), (b) AISI M2 çelik numune (200X), (c) AISI M2 çelik numune (50X).....	130
Şekil 8.30.	Niobyum borür kaplanmış AISI M2 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 1N yük altında 0,5 m/s hızda, 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikroyapı görüntüleri (a) AISI 52100 çelik bilye (200X), (b) AISI M2 çelik numune (200X), (c) AISI M2 çelik numune (50X).....	130

- Şekil 8.31. Niobyum borür kaplanmış AISI M2 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 2N yük altında 0,1 m/s hızda, 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikroyapı görüntüleri (a) AISI 52100 çelik bilye (200X), (b) AISI M2 çelik numune (200X), (c) AISI M2 çelik numune (50X)..... 131
- Şekil 8.32. Niobyum borür kaplanmış AISI M2 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 2N yük altında 0,3 m/s hızda, 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikroyapı görüntüleri (a) AISI 52100 çelik bilye (200X), (b) AISI M2 çelik numune (200X), (c) AISI M2 çelik numune (50X)..... 131
- Şekil 8.33. Niobyum borür kaplanmış AISI M2 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 2N yük altında 0,5 m/s hızda, 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikroyapı görüntüleri (a) AISI 52100 çelik bilye (200X), (b) AISI M2 çelik numune (200X), (c) AISI M2 çelik numune (50X)..... 131
- Şekil 8.34. Niobyum borür kaplanmış AISI M2 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 5N yük altında 0,1 m/s hızda, 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikroyapı görüntüleri (a) AISI 52100 çelik bilye (200X), (b) AISI M2 çelik numune (200X), (c) AISI M2 çelik numune (50X)..... 132
- Şekil 8.35. Niobyum borür kaplanmış AISI M2 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 5N yük altında 0,3 m/s hızda, 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikroyapı görüntüleri (a) AISI 52100 çelik bilye (200X), (b) AISI M2 çelik numune (200X), (c) AISI M2 çelik numune (50X)..... 132
- Şekil 8.36. Niobyum borür kaplanmış AISI M2 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 5N yük altında 0,5 m/s hızda, 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikroyapı görüntüleri (a) AISI 52100 çelik bilye (200X), (b) AISI M2 çelik numune (200X), (c) AISI M2 çelik numune (50X)..... 132
- Şekil 8.37. Niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 1N yük altında 0,1 m/s hızda ve



- 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye (200X), (b) AISI 1010 çelik numune(200X), (c) AISI 1010 çelik numune(50X)..... 133
- Şekil 8.38. Niobyum borür kaplanmış 1010 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 1N yük altında 0,3 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye(200X), (b) AISI 1010 çelik numune(200X), (c) AISI 1010 çelik numune(50X)..... 133
- Şekil 8.39. Niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 1N yük altında 0,5 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye (200X), (b) AISI 1010 çelik numune(200X), (c) AISI 1010 çelik numune(50X)..... 133
- Şekil 8.40. Niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 2N yük altında 0,1 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye (200X), (b) AISI 1010 çelik numune(200X), (c) AISI 1010 çelik numune(50X)..... 134
- Şekil 8.41. Niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 2N yük altında 0,3 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye (200X), (b) AISI 1010 çelik numune(200X), (c) AISI 1010 çelik numune(50X)..... 134
- Şekil 8.42. Niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 2N yük altında 0,5 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye (200X), (b) AISI 1010 çelik numune(200X), (c) AISI 1010 çelik numune(50X)..... 134
- Şekil 8.43. Niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 5N yük altında 0,1 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye (200X), (b) AISI 1010 çelik numune(200X), (c) AISI 1010 çelik numune(50X)..... 135

- Şekil 8.44. Niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 5N yük altında 0,3 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye (200X), (b) AISI 1010 çelik numune(200X), (c) AISI 1010 çelik numune(50X)..... 135
- Şekil 8.45. Niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 5N yük altında 0,5 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye (50X), (b) AISI 4140 çelik numune(50X), (c) AISI 4140 çelik numune(200X)..... 135
- Şekil 8.46. Niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 1N yük altında 0,1 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye (200X), (b) AISI 4140 çelik numune(200X), (c) AISI 4140 çelik numune(50X)..... 136
- Şekil 8.47. Niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 1N yük altında 0,3 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye (200X), (b) AISI 4140 çelik numune(200X), (c) AISI 4140 çelik numune(50X)..... 136
- Şekil 8.48. Niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 1N yük altında 0,5 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye (200X), (b) AISI 4140 çelik numune(200X), (c) AISI 4140 çelik numune(50X)..... 136
- Şekil 8.49. Niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 2N yük altında 0,1 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye (200X), (b) AISI 4140 çelik numune(200X), (c) AISI 4140 çelik numune(50X)..... 137
- Şekil 8.50. Niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 2N yük altında 0,3 m/s hızda ve

- 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye (200X), (b) AISI 4140 çelik numune(200X), (c) AISI 4140 çelik numune(50X)..... 137
- Şekil 8.51. Niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 2N yük altında 0,5 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye (200X), (b) AISI 4140 çelik numune(200X), (c) AISI 4140 çelik numune(50X)..... 137
- Şekil 8.52. Niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 5N yük altında 0,1 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye (200X), (b) AISI 4140 çelik numune(200X), (c) AISI 4140 çelik numune(50X)..... 138
- Şekil 8.53. Niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 5N yük altında 0,3 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye (200X), (b) AISI 4140 çelik numune(200X), (c) AISI 4140 çelik numune(50X)..... 138
- Şekil 8.54. Niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 5N yük altında 0,5 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye (200X), (b) AISI 4140 çelik numune(200X), (c) AISI 4140 çelik numune(50X)..... 138
- Şekil 8.55. Niobyum borür kaplanmış AISI D2 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 1N yük altında 0,1 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye (200X), (b) AISI D2 çelik numune(200X), (c) AISI D2 çelik numune(50X)..... 139
- Şekil 8.56. Niobyum borür kaplanmış AISI D2 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 1N yük altında 0,3 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye (200X), (b) AISI D2 çelik numune(200X), (c) AISI D2 çelik numune(50X)..... 139

Şekil 8.57.	Niobyum borür kaplanmış AISI D2 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 1N yük altında 0,5 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye (200X), (b) AISI D2 çelik numune(200X), (c) AISI D2 çelik numune(50X).....	139
Şekil 8.58.	Niobyum borür kaplanmış AISI D2 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 2N yük altında 0,1 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye (200X), (b) AISI D2 çelik numune(200X), (c) AISI D2 çelik numune(50X).....	140
Şekil 8.59.	Niobyum borür kaplanmış AISI D2 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 2N yük altında 0,3 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye (200X), (b) AISI D2 çelik numune(200X), (c) AISI D2 çelik numune(50X).....	140
Şekil 8.60.	Niobyum borür kaplanmış AISI D2 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 2N yük altında 0,5 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye (200X), (b) AISI D2 çelik numune(200X), (c) AISI D2 çelik numune(50X).....	140
Şekil 8.61.	Niobyum borür kaplanmış AISI D2 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 5N yük altında 0,1 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye (200X), (b) AISI D2 çelik numune(200X), (c) AISI D2 çelik numune(50X).....	141
Şekil 8.62.	Niobyum borür kaplanmış AISI D2 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 5N yük altında 0,3 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye (200X), (b) AISI D2 çelik numune(200X), (c) AISI D2 çelik numune(50X).....	141
Şekil 8.63.	Niobyum borür kaplanmış AISI D2 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 5N yük altında 0,5 m/s hızda ve	

	180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye (200X), (b) AISI D2 çelik numune(200X), (c) AISI D2 çelik numune(50X).....	141
Şekil 8.64.	Niobyum borür kaplanmış AISI M2 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 1N yük altında 0,1 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye (200X), (b) AISI M2 çelik numune(200X), (c) AISI M2çelik numune(50X).....	142
Şekil 8.65.	Niobyum borür kaplanmış AISI M2 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 1N yük altında 0,3 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye (200X), (b) AISI M2 çelik numune(200X), (c) AISI M2 çelik numune(50X).....	142
Şekil 8.66.	Niobyum borür kaplanmış AISI M2 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 1N yük altında 0,5 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye (200X), (b) AISI M2 çelik numune(200X), (c) AISI M2 çelik numune(50X).....	142
Şekil 8.67.	Niobyum borür kaplanmış AISI M2 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 2N yük altında 0,1 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye (200X), (b) AISI M2 çelik numune(200X), (c) AISI M2 çelik numune(50X).....	143
Şekil 8.68.	Niobyum borür kaplanmış AISI M2 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 2N yük altında 0,3 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye (200X), (b) AISI M2 çelik numune(200X), (c) AISI M2 çelik numune(50X).....	143
Şekil 8.69.	Niobyum borür kaplanmış AISI M2 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 2N yük altında 0,5 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye (200X), (b) AISI M2 çelik numune(200X), (c) AISI M2 çelik numune(50X).....	143

- Şekil 8.70. Niobyum borür kaplanmış AISI M2 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 5N yük altında 0,1 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye (200X), (b) AISI M2 çelik numune(200X), (c) AISI M2 çelik numune(50X)..... 144
- Şekil 8.71. Niobyum borür kaplanmış AISI M2 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 5N yük altında 0,3 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye (200X), (b) AISI M2 çelik numune(200X), (c) AISI M2 çelik numune(200X)..... 144
- Şekil 8.72. Niobyum borür kaplanmış AISI M2 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 5N yük altında 0,5 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye (200X), (b) AISI M2 çelik numune(200X), (c) AISI M2 çelik numune(50X)..... 144

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1.	Alaşımsız elikler içerisinde bulunan alaşım elementlerinin st sınırları.....	7
Tablo 2.2.	Az karbonlu çeliklerin kimyasal bileşim aralıkları.....	8
Tablo 2.3.	Orta karbonlu çeliklerin kimyasal bileşim aralıkları.....	9
Tablo 2.4.	Yüksek karbonlu çeliklerin kimyasal bileşim aralıkları.....	10
Tablo 3.1.	Bor rnlerinin kullanım alanları ve kullanım yerleri.....	19
Tablo 3.2.	Borlanmış eliklerin sertlik değerlerinin diğer işlemlerle ve serî malzemeler ile karşılaştırılması.....	24
Tablo 6.1.	Deneylerde kullanılan çeliklerin spektral analizleri.....	39
Tablo 7.1.	AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 eliklerinin yüzeyinde oluşan niobyum borür tabakalarının kalınlıkları.....	75
Tablo 7.2	Alümina bilye ile aşındırılan niobyum borür kaplamanın aşınma hızlarının uygulanan yük ve sürtünme hızlarına bağlı olarak değişimi.....	87
Tablo 7.3.	Niobyum borür kaplanmış çeliklere karşı aşındırılan AISI 52100 elik bilyedeki aşınma hızlarının uygulanan yük ve sürtünme hızına bağlı olarak değişimi.....	89
Tablo 7.4.	Niobyum borür kaplanmış çeliklere karşı aşındırılan alümina bilyedeki aşınma hızının uygulanan yk ve sürtünme hızına bağlı olarak değişimi.....	90

# THE PROPERTIES OF NIOBIUM BORIDE COATED STEELS

## SUMMARY

**Keywords:** Niobium boride, wear, thermo-rective deposition, boronizing, hardness, coating

In this study, boro-niobizing treatment was realized on the surfaces of the AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 and AISI M2 steels. In the boro-niobizing treatment, preboronizing was realized in a slurry salt bath consisting of borax, boric acid and ferro silicon. Then, boronized steels were niobized by thermo-reactive deposition technique in a pack consisting of ferro-niobium, ammonium chloride, alumina and naphthelene. Boronizing treatment was performed at 900°C for AISI 1010 and AISI 4140, at 1000°C for AISI D2 and AISI M2 steels for 2 h. Niobizing treatment was performed at 850°C, 900°C and 950°C for 1-4 h.

Morphological, mechanical and structural characterization and phase analysis of the coated samples were realized using optical microscopy, scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive X-ray spectroscopy (SEM-EDS), X-ray diffractometer. Wear tests were realized against alumina and AISI 52100 stell balls of the sliding speeds of 0.1 m/s, 0.3 m/s and 0.5 m/s and under the loads of 1N, 2N and 5N. Worn tracks and scans of disk and ball metarials were analyzed using optical microscopy and scannig electron microscopy (SEM).



## ÖZET

**Anahtar Kelimeler:** Niobyum borür, Aşınma, Termoreaktif difüzyon, Borlama, Sertlik, Kaplama

Bu çalışmada, AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çeliklerinin yüzeylerine niobyum borür kaplama uygulanmıştır. Niobyum borür kaplama işleminde, borlama işlemi boraks, borik asit ve ferro-silisyumdan oluşan sıvı borlama banyosunda gerçekleştirilmiştir. Borlanan çelikler termoreaktif difüzyon yöntemi kullanılarak ferro-niobyum, amonyum klorür, alümina ve naftalinden oluşan kutu potalarda niobyumlama işlemine tabi tutulmuşlardır. Borlama sıcaklıkları AISI 1010 ve AISI 4140 çelikleri için 900°C ve AISI D2, AISI M2 çelikleri için 1000°C, 2 saat süre olarak seçilmiştir. Niobyumlama 850°C, 900°C ve 950°C sıcaklıkta 1-4 saat sürelerde gerçekleştirilmiştir.

Kaplanan numunelerin morfolojik, mekanik ve yapısal karakterizasyonları ve faz analizleri optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu (SEM), SEM-EDS ve X- ışınları paternleri kullanılarak tespit edilmiştir. Aşınma testleri esnasında alumina ve AISI 52100 bilyeler kullanılmışlardır. Aşınma deneyleri 1N, 2N ve 5N yüklerde 180 metre mesafede 0.1 m/s, 0.3 m/s ve 0.5 m/s hızlarda gerçekleştirilmiştir. Diskler ve bilyelerde meydana gelen aşınma izleri optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmişlerdir.

## **BÖLÜM 1. GİRİŞ**

Çağımızda üstün teknolojiye ve bilime sahip olan ülkeler sanayide ve ekonomide üstünlük elde etmişlerdir. Hammadde rezervlerinin azalması ile birlikte, malzemelerden beklenen özelliklerde artmıştır. Malzemelerde kullanım esnasında etkileşim, daha çok yüzeylerinde oluşur. Bunun için yüzey sertleştirme yöntemlerine büyük önem verilmiştir. Yüzey işlemleri ile malzemenin sertliği, sünekliği ve yorulma gibi mekanik özellikleri geliştirilir. Ayrıca sürtünme ve aşınma gibi etkilere karşı dayanımı ile korozyon ve oksidasyon özellikleri de gelişir. Bu özellikler içinde önem bakımından birinci öncelik sürtünme ve aşınmaya verilmelidir[1].

Endüstriyel uygulamalarda kullanılan malzemelerin korozyon, sürtünme ve aşınma gibi tribolojik etkiler neticesinde azalan kullanım ömürlerinin artırılması yüzey bölgesinin iyileştirilmesi ile mümkündür. Aşınma ve korozyondan dolayı dünyada her yıl önemli kayıplar olmaktadır. Ülkelerin korozyon ve aşınmadan dolayı meydana gelen malzeme kayıpları, ülke gelirlerinin yaklaşık %3,5-5 arasına denk gelmektedir. Bu değer Türkiye’de 1995 yılında 4,5 milyon dolar olduğu tahmin edilmektedir[2].

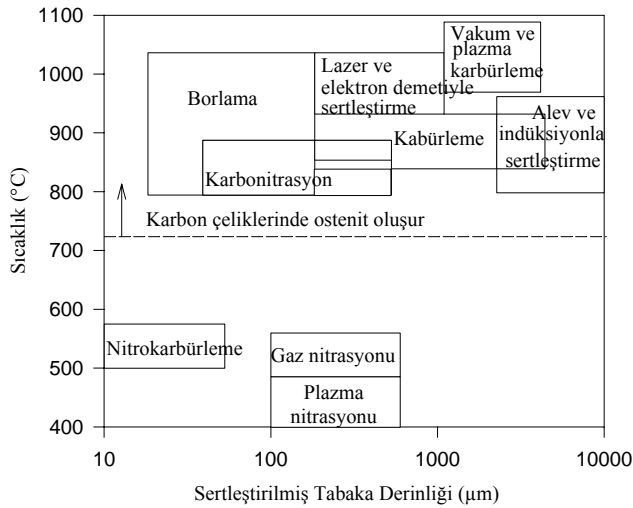
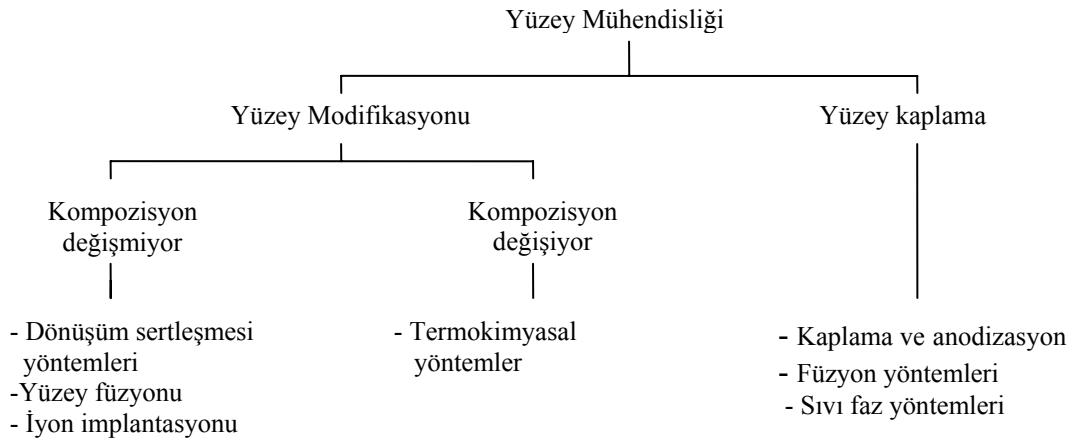
Ekonomik kaybın büyük bir kısmı, makine ve gereçlerin çevresel etkilere maruz kalan mekanik parçalarında oluşan korozyon ve aşınmadan dolayı ortaya çıkmaktadır. Özellikle sürtünerek çalışan makine elemanlarında, belirli bir süre sonra ortaya çıkan aşınma problemlerini azaltmak için, birçok yüzey iyileştirme teknikleri uygulanmaktadır. Bu yöntemlerden sementasyon, nitrasyon ve borlama ile çeşitli yüzey kaplama teknikleri yaygın bir şekilde kullanılmaktadır[3].

Yüzey mühendisliği ve yüzey işlem teknolojileri son yıllarda önem kazanmış ve endüstriyel alanlarda geniş uygulama alanı bulmuştur. Bir çok endüstriyel uygulamada servisteki bileşenlerin ömürleri yüzey özellikleri ile belirlenmektedir. Malzemelerin çevre ile etkileşimi doğrudan malzemenin yüzeyi ile gerçekleştiği için, malzemelerin yüzey özellikleri üzerine çalışmalar yoğunlaşmıştır. Bu çalışmaların başında, malzemelerin yüzeyinde oluşturulan kaplamalar gelmektedir. Günümüzde mekanik, optik, kimyasal, kuyumculuk ve diğer endüstrilerde kaplamalar, korozyona ve aşınmaya bağlı olarak geniş ölçüde kullanılmaktadır. Bu amaçla fiziksel buhar biriktirme (PVD), kimyasal buhar biriktirme (CVD), sprey ve difüzyon esaslı kaplama teknikleri, aşınma, korozyon ve oksidasyona karşı dirençli karbür, nitrür ve borür kaplamaların gerçekleştirilmesinde uygulanmaktadır.

Malzemeye uygulanan yüzey işlemleri altlık malzemenin özelliklerini;

- Kaplama (metal-alaşım-bileşik-seramik kaplama, organik kaplama, boya vs., inorganik kaplama, cam, beton, emaye gibi),
- Bir başka maddenin difüzyonu ve altlık malzeme ile bileşik oluşturulması yolu ile (borlama, nitrüleme, karbürleme ve karbonitrüleme gibi),
- Altlık malzemesinin kendinden kaynaklanan oksit tabakasını kalınlaştırmak (alüminyum ve titanyumun anodizasyonu gibi) ve başka maddelerle reaksiyona sokmak suretiyle (kromatlama ve fosfatlama gibi) değiştirmektedir[4].

Yüzey mühendisliği kapsamında incelenen yüzey işlemleri şematik olarak Şekil 1.1 'de ve çeliklerin yüzey modifikasyonu için kullanılan değişik metotların sertlik derinliği ve sıcaklığa bağlı olarak kıyaslanması Şekil 1.2. 'de verilmektedir. Belirtilen yöntemlerin birçoğu çeliklere uygulanırken, bir kısmı da seramik ve polimerik malzemelere uygulanmaktadır.



Şekil 1.2. Çeliklerin yüzey modifikasyonlarının sağlanmasında kullanılan değişik metodların sertlik derinliği ve sıcaklık açısından kıyaslanması [4]

Malzeme yüzeylerinde gerçekleşen bu kayıpları azaltmak için malzemelerin yüzey bölgesi özelliklerinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Yüzey kalitesinin geliştirilmesi için uygulanan yöntemlerden biri de borlamadır[5].

Borlama, bor elementinin yüksek sıcaklıkta temasta bulunduğu malzeme yüzeyine yayılarak malzeme yüzeyinin bor atomlarınca zenginleştirilmesini sağlayan termokimyasal bir yüzey sertleştirme işlemidir. Bu işlem fiziksel ve kimyasal özellikleri bakımından karbürleme ve nitrürleme gibi termokimyasal yüzey sertleştirme işlemleri ile benzerlik gösterir ve bütün ferro malzemeler, nikel alaşımları, titanyum alaşımları ve sinterlenmiş karbürlere başarıyla uygulanmaktadır[6]. Demir ve demir dışı birçok alaşım ile sinter karbür ve seramik malzemelere uygulanabilir. Borlanacak malzemeler, özelliklerine göre 700-1000 °C sıcaklık aralığında, yaklaşık 1-12 saat süre ile katı, macun (pasta), sıvı veya gaz fazındaki bor verici ortamlarda bekletmek suretiyle yapılan bir işlemdir. Bor kaynağının fiziksel durumu katı, sıvı veya gaz olabilir[2].

Nitrürasyon, karbürizasyon v.b. konvansiyonel yüzey sertleştirme işlemlerinde (600-1100) HV'lik bir yüzey sertliği elde edilirken, borla yüzey sertleştirmede (borlama) 1500-2000 HV'lik sertliğin yanında çok düşük sürtünme katsayıları elde edilmektedir. Borlama, yüksek sıcaklıkta çelik malzeme yüzeyinde bor difüzyonuyla Fe<sub>2</sub>B ve FeB gibi bileşiklerin elde edilmesidir. Endüstriyel uygulamalarda, hem daha az gevrek olması ve hem de borlama sonrası ısıl işlemlere izin vermesi bakımından Fe<sub>2</sub>B' den oluşan tek fazlı borür tabakaları tercih edilir[7].

Yapılan bu çalışmada farklı kimyasal özelliklere ve alaşım elementleri oranlarına sahip olan AISI 1010, AISI 4140, AISI M2 ve AISI D2 çelikleri kullanılmıştır. Bu çeliklerden AISI 1010 ve AISI 4140 çelikleri 900°C, AISI M2 ve AISI D2 çelikleri 1000°C sıcaklıklarda 2 saat süre ile ilk önce borlama işlemine tabi tutulmuştur. Borlama işlemi olarak sıvı borlama tercih edilmiştir. Borlama işlemleri tamamlanan numunelerin üzerlerindeki oksit tabakaları 1200 meshlik zımparayla temizlenmiş ve ardından termoreaktif difüzyon yöntemi (TRD) kullanılarak malzeme yüzeyleri 850°-900° ve 950°C sıcaklıklarda 1, 2, 3 ve 4 saatlik sürelerde ferroniobyum, alümina, amonyum klorür ve naftalin karışımından oluşan katı ortamda niobyum borür kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada; niobyum borür kaplanan numunelerin karakterizasyonları, taramalı elektron mikroskobu (SEM), optik mikroskop, X-ışınları analizleri ve ball-on disk aşınma cihazı kullanılarak aşınma özellikleri araştırılmıştır. Aşınma testleri esnasında AISI 52100 ve alümina bilyeler kullanılmışlardır. Aşınma deneyleri 1N, 2N ve 5N yüklerde 180 metre mesafede 0.1 m/s, 0.3 m/s ve 0.5 m/s hızlarda gerçekleştirilmiştir. Aşınma izleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve EDS analizi ile incelenmiştir.

## BÖLÜM 2. ÇELİKLER HAKKINDA GENEL BİLGİ

Çelik; bir demir (Fe)- karbon (C) alaşımıdır. Çeliğin içerisinde C'dan başka farklı oranlarda alaşım elementleri ve empürite elementleri de bulunmaktadır. Çeliğe farklı özellikler kazandıran içerdiği elementlerin kimyasal bileşimi ve çeliğin iç yapısıdır. Çeliğe değişik oranlarda alaşım elementleri katılabileceği gibi, çeşitli işlemler (ıslah, normalizasyon vs.) ile iç yapı da kontrol edilerek kullanım amacına göre değişik özelliklerde çelikler elde edilebilir. Çelikler genel olarak aşağıdaki şekilde sınıflandırılmaktadırlar:

- Karbon ve alaşımlı çelikler olarak bileşimlerine göre
- Üretim yöntemlerine göre
- Son üretim yöntemine göre
- Ürün şekline göre
- Kullanım yerleri, üretim programları ve deoksidasyon durumlarına göre

Çeliklerin temel özellikleri aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Çeliklerin büyük çoğunluğu ısıtılı işlemlere duyarlıdır. Kimyasal bileşimin yanı sıra uygulanan ısıtılı işlemler sonucunda istenen sertlik, mekanik ve fiziksel özellik, elektriksel özellik, korozyona ve yüksek sıcaklığa dayanıma tam olarak kavuşturulabilirler.
- Çelikler yapılarının gerektirdiği sıcaklıklara kadar çıkarıldıklarında şekillendirilebilme özelliği kazanabilmektedirler. (Haddeme, Presleme, Dövme v.b.)
- Talaş kaldırıcı tezgahlarda işlenerek, istenilen şekil ve yüzey düzgünlüğüne getirilebilmektedirler.
- Çeliklerin büyük bir bölümü çeşitli yöntemler ile metal ve kaplamaya, emaye yapılmaya, boyanmaya ve plastik maddeler ile kaplanmaya elverişlidirler[8].

Çelikler genel olarak alaşımlı ve alaşımsız çelikler olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadırlar. Alaşımsız çelikler; bileşimlerinde demir ve karbondan başka üst sınırları Tablo 2.1.' de verilen kimyasal elementler bulunabilen ve özel amaçlar dışında başka elementler içermeyen çeliklere denir[9].

Tablo 2.1. Alaşımsız çelikler içerisinde bulunan alaşım elementlerinin üst sınırları[10].

<b>Alaşım elementinin adı</b>	<b>Alaşım elementinin üst sınırı(%)</b>
Silisyum	0,5
Manganez	1.0
Alimünyum	0,1
Bakır	0,25
Fosfor	0,09
Kükürt	0.06

Karbon oranı %0,8' den az olanlara ötektoid altı çelikler, %0,8 olanlara ötektoid çelikleri, %0,8' den fazla olanlara ötektoid üstü çelikler denilmektedir. Alaşımlı çelikler de az alaşımlı ve çok alaşımlı çelikler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Alaşım elementlerinin toplamı %5' ten az olanlara az alaşımlı çelikler, %5' ten fazla olan çeliklere de yüksek alaşımlı çelikler denilmektedir.

Çelikler; genel yapı çelikleri, makine yapı çelikleri, sementasyon çelikleri, nitrürasyon çelikleri, otomat çelikleri, yüksek sıcaklığa dayanıklı çelikler, paslanmaz çelikler, rulman çelikleri ve takım çelikleri gibi pek çok sınıfa ayrılabilirler[10].

## **2.1. Çeliklerin Karbon Oranına Göre Sınıflandırılması**

Çelikler bazen içerdikleri karbon oranına göre düşük karbonlu çelikler, orta karbonlu çelikler ve yüksek karbonlu çelikler olmak üzere 3 kısma ayrılırlar.

### **2.1.1. Düşük karbonlu çelikler**

Bu çelikler %0,25 oranına kadar karbon içermektedirler ve yumuşak ve çok yumuşak çelikler olmak üzere ikiye ayrılmaktadırlar. Dünya çelik üretiminin en



büyük kısmını teşkil ederler. Yassı mamul ve inşaat sanayinde ve de konstrüksiyonda kullanılan çubuk, profil v.b. uygulamalarda kullanım alanı bulurlar. Teknolojide sementasyon ve nitrürasyona tabi tutularak, yüzeyi sert ve iç kısmı tok olan çeliklerde bu grupta yer almaktadırlar. Az karbonlu çeliklerin kimyasal olarak bileşim alanları Tablo 2.2.' de verilmektedir[9].

Tablo 2.2. Az karbonlu çeliklerin kimyasal bileşim aralıkları[10]

Element	% Ağırlıkça
C	0,00-0,20
Mn	0,30-0,60
Si	0,10-0,20
P	Max. 0,04
S	Max. 0,05

#### 2.1.1.1. Yumuşak çelikler

Karbon oranı olarak %0,15 ile %0,25 arasında karbon içeren çeliklere yumuşak çelikler denilmektedir. Çok yaygın olarak kullanılmakta olan alaşımsız çeliklerdir. Çok iyi kaynak edilebilme yeteneğine sahiptirler ancak su verme yöntemi ile iyi sertleştirilme özellikleri kötüdür[10].

#### 2.1.1.2. Çok yumuşak çelikler

Yapılarında %0,07 ile %0,15 arasında karbon bulunan çeliklere çok yumuşak çelikler denilmektedir. Bu çelikler soğuk şekillendirmeye elverişlidirler[10].

#### 2.1.2. Orta karbonlu çelikler

Bu çelikler %0,25 ile %0,55 arasında karbon içeren çeliklerdir. Isıl işleme çok uygun çeliklerdir. Yani, bu çeliklerin yapı ve özellikleri ısıl işlemler sayesinde çok kolay değiştirilebilmektedir. Bu bakımdan orta karbonlu çeliklerin kullanım sahaları özellik arz etmektedir. Bu çelikler karbon oranlarına göre genel dövme çelikleri, mil çelikleri ve aşınmaya dayanıklı çelikler olmak üzere 3 gruba

ayrılmaktadırlar. Özellikle makine üretim sanayinin tercih ettiği çeliklerdir. İşlenebilme kabiliyetleri ve şekil alabilme az karbonlu çeliklere oranla daha düşüktür. Orta karbonlu çeliklerin kimyasal bileşim aralıkları Tablo 2.3.' de verilmektedir[9].

Tablo 2.3. Orta karbonlu çeliklerin kimyasal bileşim aralıkları[9].

Element	% Ağırlıkça
C	0,20-0,50
Mn	0,60-0,90
Si	0,15-0,23
P	Max. 0,04
S	Max. 0,05

#### 2.1.2.1. Genel dövme çelikleri

%0,25 ile %0,35 arasında karbon içeren çeliklerdir[10].

#### 2.1.2.2. Mil çelikleri

%0,35 ile %0,45 oranları arasında karbon içeren çeliklerdir. Mil, tel ve dingil yapımında kullanılmaktadırlar[10].

#### 2.1.2.3. Aşınmaya dayanıklı çelikler

%0,45 ile %0,55 arasında karbon içeren çeliklerdir. Ray tekerleği, silindir ve pres kalıpların yapımında kullanılmaktadırlar[10].

#### 2.1.3. Yüksek karbonlu çelikler

%0,55 ile %0,90 arasında karbon içeren çeliklerdir. Yüksek mukavemet ve aşınma direnci gerektiren yerlerde kullanılmaktadırlar. Kullanım alanlarına örnek olarak pres kalıp blokları gösterilebilir. Normal halde yüksek mukavemetli ve sünekliği az olan çeliklerdir. Isıl işleme sertleşebilmeleri sayesinde çok yüksek

sertliklere ulaşılabilir. Bu bakımdan aşınmaya dayanıklı ve kesici özelliklerle özellik kazanırlar. İşlenme ve şekil alabilme kabiliyetleri düşüktür. Bununla beraber kaynak kabiliyetleri de düşüktür ve bundan dolayı özel tekniklerle kaynak edilebilirler. Yüksek karbonlu çeliklerin bileşim aralıkları Tablo 2.4.' de verilmektedir[9].

Tablo 2.4. Yüksek karbonlu çeliklerin kimyasal bileşim aralıkları[10].

Element	% Ağırlıkça
C	0,55-0,90
Mn	0,70-1,00
Si	0,15-0,30
P	Max. 0,04
S	Max. 0,05

#### 2.1.4. Sementasyon çelikleri

Sementasyon çelikleri, yüzeyde sert ve aşınmaya dayanıklı, çekirdekte ise daha yumuşak ve tok özelliklerin istendiği, değişken ve darbeli zorlamalara dayanıklı parçaların imalinde kullanılan düşük karbonlu, alaşımlı veya yüksek alaşımlı çeliklerdir.

Parçaya bu özelliklerin kazandırılması, çelik yüzeyine karbon emdirilmesi sayesinde gerçekleştirilmektedir. Sementasyon çelikleri; dişliler, miller, piston pimleri, zincir baklavaları, zincir dişlileri ve makaraları, diskler, klavuz yatakları, rulmanlı yataklar, merdaneler, bir kısım ölçü ve kontrol aletleri, orta zorlamalı ve zorlamalı parçalar, soğuk şişirilerek veya fişkırtılarak şekillendirilen parçalar, kesici takımlar gibi parçaların imalinde kullanılmaktadırlar. Sementasyon çeliklerin kullanımı, yüzeyde aynı sertlik değerini verecek, yüksek karbonlu çeliklerin kullanımına nazaran şu avantajları sağlamaktadır:

- Sementasyon işlemi, parça kısmen veya tamamen son şeklini aldıktan sonra uygulandığından dolayı parçanın işlenmesi oldukça kolaydır.
- Parçanın yüzeyinde sonradan işlenecek, sertleşmesi istenmeyen kısımlar var ise, bu bölgeler özel bir pasta veya elektrolitik kaplama yardımı ile kaplanarak

örtülmektedir. Sementasyon işlemi bu bölgelere tesir edemediğinden sonradan kolayca işlenebilme özelliğine sahiptirler.

-Sementasyon işlemi sonrasında, çekirdek bölgesi yumuşaklığını koruyacağından, sertleştirme sırasında ortaya çıkabilecek çarpılmalar oldukça azdır.

-Semente edilmiş çeliklerin iç kısımları kolayca işlenebilir.

-Sementasyon çelikleri, yüzeyde aynı sertliği verebilecek, çoğu zaman takım çeliği durumundaki yüksek karbonlu çeliklerden daha ucuzdur.

Sementasyon işlemi yüzey sertleştirme işlemlerinden birisi olup, en eski ve en uygun olarak kullanılmaktadır. Esas itibariyle, düşük karbonlu çelik parçasının yüzeyine, karbon emdirilmesi işlemidir. Bu konu ile ilgili ayrıntılı bilgiyi termokimyasal işlemler adlı bölümde bulabilirsiniz. Sementasyon çeliği olarak adlandırılmış olduğumuz bu çelik grubunun içerisinde AISI standartlarına uygun olarak üretimi yapılmakta olan AISI 1015, AISI 3115, AISI 3316, AISI 5015, AISI 5115, AISI 5120, AISI 8620 ve yapmış olduğumuz bu çalışmada niobyum borür kaplama işlemlerine tabi tutulan AISI 1010 çeliği bulunmaktadır[10].

### **2.1.5 Islah çelikleri**

Islah çelikleri, kimyasal bileşimleri özellikle karbon miktarı bakımından, sertleştirilmeye elverişli olan ve ıslah işlemi neticesinde belirli bir çekme dayanımı neticesinde yüksek tokluk özelliği gösteren, alaşımsız ve alaşımlı makine imalat çelikleridir.

Islah işlemi sonucunda çelik parçaya yüksek tokluk özelliğinin kazandırılacağı önce bir sertleştirme ve arkasından menevişleme işlemlerinin bütünü olarak tarif edilmektedir. Islah çelikleri, ıslah işlemi sonunda kazandıkları üstün mekanik özelliklerinden dolayı, çeşitli makine ve motor parçaları, dövme parçalar, çeşitli cıvata, somun ve sapmalar, krank milleri, akslar, kumanda ve tahrik parçaları, piston kolları, çeşitli miller, dişliler gibi parçaların imalinde olmak üzere geniş bir alanda kendilerine kullanım ortamları bulmuşlardır. Bu sebepten dolayı ıslah çelikleri, inşaat ve alaşımsız çeliklerden sonra en yüksek oranda üretilen ve kullanılan çelik türüdür. Sertleştirme işlemi, öncelikle çelik parçanın östenit faz

sıcaklığına kadar ısıtılması ve bu sıcaklıkta belirli bir süre tutularak, uygun bir ortamda hızla soğutulması işlemidir. Sertleştirme ortamı olarak %10' luk NaCl çözeltisi, su, tuz banyosu, yağ çözeltileri, yağ ve hava gibi çeşitli ortamlar kullanılmaktadır. Menevişleme işlemi, çelik parçanın  $A_1$  sıcaklığı altında belirli bir süre ısıtılması işlemidir. Bu işlem  $A_1$  sıcaklığına yani  $723^{\circ}\text{C}$ ' ye kadar yapılabildiğinden, çeliğin mekanik özellikleri ve mikroyapısında bazı özelliklerin değişebilme ihtimali vardır. Menevişleme sıcaklığı alanında, sıcaklık yükselirken genel olarak sertlikte azalma ve toklukta artma gözlenmektedir. Bazı alaşımli çelikler, menevişleme esnasında belli sıcaklık bölgelerinde kırılmalık özelliği göstermektedirler. Amerikan çelik standartları enstitüsüne (AISI) uygun olarak AISI 1022, AISI 1035, AISI 1045, AISI 1055, AISI 1060, AISI 1039, AISI 1330, AISI 5045, AISI 5132, AISI 5135, AISI 5140, AISI 4130, AISI 4135, AISI 4150, AISI 9840, AISI 4340, AISI 6150 ve bu çalışma esnasında niobyum borür tabakası ile kaplanmış olan AISI 4140 çelikleri üretilmektedirler[10].

### **2.1.6. Takım çelikleri**

Takım çelikleri, talaşlı veya talaşsız imalatta kullanılan, sıcak veya soğuk haldeki kesme, dövme ve sıkıştırma yöntemlerinden biri veya birkaçı ile biçimlendirilen yüksek niteliğe sahip çeliklerdir. Başlıca üç ana bölüme ayrılan takım çeliklerinin adları kullanım amaçlarını da belirlemektedir.

#### **2.1.6.1. Soğuk iş takım çelikleri**

Genel olarak yüzey sıcaklığı  $200^{\circ}\text{C}$ ' yi geçmeyen takımların imalinde kullanılmakta olan çeliklerdir. Talaşlı ve talaşsız imalatta kullanılmaktadırlar[10].

##### **2.1.6.1. 1. Soğuk iş takım çeliklerinin kullanım yerleri**

Soğuk iş takım çelikleri aşağıda belirtilen amaçlar için kullanılmaktadırlar:

- 1-) Kesme takımlarında
- Sütunlu veya kesme tezgahları
- Kazıma bıçakları

- Hassas delme takımları
- Kağıt ve plastik bıçakları
- Delme zımbaları
- 2-) Kesme takımları
  - Derin çekme takımları
  - Tel, çubuk ve boru çekme takımları
- 3-) Kabartma takımları
- 4-) Talaşlı imalat takımları
- 5-) Dişli takımları
  - Dişlilerin talaşsız imalatında kullanılan merdaneler ve çeneler
  - Dişlilerin talaşlı imalatında kullanılan matkap ve kesiciler
- 6-) Makine bıçakları
- 7-) Cıvata, perçin ve somunların soğuk iş akımları
- 8-) Soğuk fişkirtme pres iş takımları
- 9-) Sinter presleme takımları
- 10-) Tahta testereleri
- 11-) Basınçlı hava akımları
- 12-) Plastik işleme takımları
- 13-) Ölçü aletleri
- 14-) Germe kovanları
- 15-) El aletleri
- 16-) Şart malzemeleri

Soğuk iş takım çelikleri kesme, delme, zımbalama, biçme, baskı, presleme, soğuk ezme, soğuk fişkirtme ve soğuk biçimlendirme işlemlerinde kullanılmaktadırlar.

Amerikan çelik endüstrisi standartlarına uygun olarak üretilen soğuk iş takım çelikleri AISI W1, AISI L3, AISI D3, AISI 2, AISI A2, AISI D6, AISI D1, AISI S2, AISI S1, AISI L6, AISI W1 ve deneyler esnasında kullanılmış olan AISI D2 çeliğidir[11].

### 2.1.6.2. Sıcak iş takım çelikleri

Genel olarak yüzey sıcaklığı 200°C' yi geçen, 300°C-600°C arası sürekli ısıya tabi kalan takımlarda kullanılmaktadırlar.

#### 2.1.6.2.1. Sıcak iş takım çeliklerinin kullanım yerleri

1-) Pres döküm tezgahlarında

- Kalıp
- Metal kamaları ve presleme silindirleri
- Çıkartma parçaları, maçalar, iticiler v.b.

2-) Kalıp ve boru preslerinde

- İç ve ara kovanlarda
- Pres kalıplarında
- Zimbalar ve kafalarda
- Yardımcı takımlarda

3-) Profil pres takımlarında

- Hafif metal işlemek amacı ile
- Ağır metal işlemek amacı ile

4-) Dövme kalıplarında

- Kalıp gövdelerinde
- Kalıp yardımcı parçalarında

5-) Demir ve çelik alaşımlarının işlenmesinde

- Delici zımba ve kalıplarda

6-) Çelik çekme boru üretiminde

Sıcak iş takım çelikleri adlarından da anlaşılacağı gibi yüksek sıcaklıklara dayanım gösterirler ve şekillerini korurlar. Bunu sağlayan alaşım elementleri volfram, molibden ve vanadyumdur. Sıcak iş takım çelikleri bünyesinde bulunan nikel tokluğun yükselmesini sağlamaktadır. Bu çelikler ayrıca sıcak aşınma ve sıcaklık değişimlerine dayanım özelliğine sahip çeliklerdir. Amerikan çelik endüstrisi standartları (AISI) dahilinde üretilmekte olan H11, H13, H10, H21, H12 gibi çelikler sıcak iş takım çelikleri grubuna dahil olan çeliklerdir[10].

### **2.1.6.3. Yüksek hız takım çelikleri**

Yüksek hız çelikleri hava çelikleri olarak ta adlandırılan çeliklerdir. Belirli alaşımlandırma ve ısıl işlem ile yüksek sertlik, ısı ve aşınma direncine sahip yüksek alaşımlı takım çelikleridir. İsimlerinden de anlaşıldığı gibi, bu çelikler ile diğer takım çeliklerine oranla daha yüksek hızlarda talaşlı imalat yapılmaktadır. Yüksek zorlamalı talaş kaldırma ile yüksek kesme özelliğine sahiptirler. Yüksek hız takım çeliklerinin en önemli özellikleri yüksek sıcaklıklarda aşınmaya dayanım göstermeleridir. Malzemelerin yüksek hızda ilerlemeleri için kullanılmakta olan takım çelikleridir. Yüksek kesme hızlarına dayanıklıdır ve genel olarak talaşlı imalat yapılmakta olan yerlerde kullanılmaktadırlar[10].

Bu sınıflandırma, takım çelikleri için en uygun sınıflandırma yöntemidir. Karbon miktarlarına (%0.2-2.3 arasındaki değerler) veya alaşım durumlarına göre (orta ve yüksek alaşımlı takım çelikleri gibi alaşımsız takım çelikleri de mevcuttur) ayırım imkanı yoktur.

Takım çeliklerinin kısa sınıflandırılmasında görüldüğü gibi her çelik belirli bir amaca dönük olarak değişik özelliklere sahip olmalı yani belirli bir kullanım için belirli bir takım çeliği kullanılmalıdır.

#### **2.1.6.3.1. Yüksek hız takım çeliklerinin kullanım yerleri**

- 1-) Spiral, matkap ve diş açma takımlarında
- 2-) Frezelerde
- 3-) Raybalarda
- 4-) Torna takımları ve planyalarda
- 5-) Metal testerelede
- 6-) Soğuk fişkirtma takımlarında



Yüksek hız takım çelikleri talaşlı imalat alanında; delme, kesme, tornalama, frezeleme, zımbalama, talaşsız imalat alanında ise soğuk fişkırtma takımlarında uygulama alanı bulmaktadırlar[10].

## BÖLÜM 3. BOR VE BORLAMA

### 3.1. Bor

Kökeni Buraq/Baurach(Arapça) ve Burah(Farsça) kelimelerinden gelen ağırlıklı olarak metalimsi davranış gösteren Bor(B), ilk defa 1808 yılında Gay-Lussac ve Jacques Thenard ile Sir Humphry Davy tarafından bor oksit'in potasyum ile ısıtılmasıyla elde edilmiştir. Atom numarası 5, atom ağırlığı 10,81 gram, ergime noktası 2076-2300°C, buharlaşma sıcaklığı 3927°C, sertliği (mikrosertlik) 4900 HV, yoğunluğu 2,3 g/cm<sup>3</sup> (Amorf) ve 2,31 g/cm<sup>3</sup> (Tetragonal), 2.35 g/cm<sup>3</sup> β-rombohedral, 2,46 g/cm<sup>3</sup> α-rombohedral, 2,99 g/cm<sup>3</sup> (sıvı fazda), 2,13 g/cm<sup>3</sup> (katı fazda), elektron yapısı ise 1s<sup>2</sup>2s<sup>2</sup>2p<sup>1</sup> olup, periyodik sistemin üçüncü grubunun başında yer almaktadır[4].

Bor tabiatta serbest olarak bulunmaz. Yer kabuğunda toprak, kayalar ve suda yaygın olarak bulunan kristal ya da amorf yapıdaki bor miktarı ortalama 10 ppm mertebesindedir. Doğada, kütle numaraları 10 (%19,8) ve 11 (%80,2) olan iki kararlı izotopun karışımı şeklinde bulunmaktadır[11].

Bor içeren doğal minerallere genel olarak boratlar denilmekte ve boratlar insanoğlu tarafından binlerce yıldır kullanılmaktadır. Bor minerallerinden ticari değere sahip olanları; Tinkal, Kolemanit, Üleksit, Probertit, Borasit, Pandermit, Szaybelit, Hidroborasit ve Kernit'tir. Bor madenleri topraktan çıkarıldıktan sonra, yıkanıp ve kırılıp kullanıma hazır duruma gelebilmektedir[11].

Bor, yerkabuğunun bileşimine giren elementler arasında en az bulunanlardan biri olup; yerkabuğunda %0,001 oranında, deniz sularında ise 3-5 ppm düzeyinde bulunmaktadır. Bor elementinin yerkabuğundaki genel dağılımı çok az olmasına

karşın, belli bölgelerde bor konsantrasyonu çok yüksek bor yatakları da mevcuttur[11].

Yer bilimcilere göre borat yatakları, yer hareketlerinin sıkça görüldüğü, gezegenimizi kabuk gibi saran levhaların birbirleri ile sınır oluşturdukları levha sınırları boyunca yer alırlar ve günümüz tarihinden yaklaşık olarak 24 veya 25 milyon önce oluşmuşlardır.

Dünyanın en büyük borat yatakları, kimyasal çökeltme neticesinde gölsel ortamlarda meydana gelmişlerdir. Bunlar genellikle kil, kil taşı, volkanik kül, kireçtaşı ve benzeri gölsel tortul tabakaları ile ara katmanlı olarak meydana gelmişlerdir. Volkanik etkinliklerle eş zamanlı olarak meydana gelen sıcak su kaynakları ve hidrotermal çözeltiler, bor elementinin meydana gelmesini sağlayan en önemli ortamlardır. Borat yataklarının kimyasal çökeltme sonucu gölsel ortamlarda oluşabilmesi için, volkanik etkinliğin yanı sıra boratların birikim oluşturabilecekleri bir havzanın olması ayrıca bölgede kurak yada yarı kurak bir iklimin olması aranan bir diğer özellik olarak aranmaktadır. Boratların oluşumuna gölsel ortamların dışında, deniz ortamlarında oluşan tuz yatakları içerisinde de rastlanmaktadır. Ancak bu tür ortamlarda meydana gelen boratlar çoğunlukla ekonomik değere sahip değillerdir. Deniz ortamlarında oluşmuş ve ekonomik değere sahip olan borat yataklarına bugüne kadar sadece Doğu Avrupa' da rastlanmaktadır.

Bor mineralleri bundan başka, yer altında bulunan magmanın yeryüzüne doğru yükselirken kristalleşmesi sonucu da oluşmaktadır. Bu tür oluşum sırasında bor, kayacı meydana getiren minerallerin kristal yapısı içerisinde yer almaz aksine soğumakta olan magma kristalleşirken dışarıya salınan su ile birlikte, oluşmakta olan kayacı terk eder. Bor minerallerinin bir başka oluşum biçimi ise magmanın yer altından yükselirken sokulum yapması ve yüzeye yaklaşırken soğuması esnasında, çevrede bulunan farklı kayaçların yüksek ısı ve basınçtan etkilenmesi ve bu değişimle birlikte bor elementinin meydana gelmesi şeklinde kendisini göstermektedir. Bu tür meydana gelmiş olan bor madeni yatakları Rusya ve Çin' de bulunmaktadır.

Ülkemizde yer alan borat yatakları Batı Anadolu’ da Marmara Denizi’ nin güneyinde, doğu-batı yönünde yaklaşık olarak 300 km, kuzey-güney yönünde ise yaklaşık olarak 150 km’ lik bir alan içerisinde Balıkesir-Bigadiç, Bursa-Kestelek, Susurluk-Sultançayırı, Kütahya-Emet, ve Eskişehir-Kırka yörelerinde yer almaktadır[11].

Yeryüzünde bulunan bor ürünleri aşağıdaki şekilde sınıflandırılmaktadır[11].

- 1- Boraks Dekahidrat
- 2- Boraks Pentahidrat
- 3- Susuz Boraks
- 4- Borik Asit
- 5- Bor Oksit (Susuz Borik Asit)
- 6- Sodyum Perborat
- 7- Diğer Bor Bileşikleri
- 7- a- Boridler
- 7- b- Bor Karbür
- 7- c- Bor Nitrür
- 7- d- Bor Halojenürler

Aşağıdaki Tablo 3.1.’ de bor ürünlerinin kullanım alanları ve kullanım yerleri belirtilmektedir[12].

Tablo 3.1. Bor ürünlerinin kullanım alanları ve kullanım yerleri[12].

<b>KULLANIM ALANI</b>	<b>KULLANIM YERLERİ</b>
<b>Savunma Sanayi</b>	Zırh Plakalar, Seramik Plakalar, Ateşli Silah Namluları, Fişek v.b.
<b>Cam sanayi</b>	Borosilikat, Laboratuvar Camları, Uçak Camları, Borcam, Pyrex, İzole Cam Elyafı, Tekstil Cam Elyafı, Optik Lifler, Cam Seramikleri, Şişe, Diğer Düz Camlar, Otomotiv Camları v.b.
<b>Elektronik ve Bilgisayar Sanayi</b>	Mikrodalga Tüpleri, Sensörler, Süper İletkenler, Yarı İletkenler, Magnetler, Elektron emiterleri, Mikro Chipler, LCD Ekranlar, CD Sürücüler, Akım Levhaları, Bilgisayar Levhaları, Isıya ve Aşınmaya Dayanıklı Fiber Optik Kablolar, Vakum Tüpler, Dielektrik Malzemeler, Elektrik Kondansatörleri, Kapasitörler, Gecikmeli Sigortalar, Bataryalar, Piller, Lazer Printer Tonerleri v.b.

Tablo 3.1.' in devamı

<b>Enerji Sektörü</b>	Gaz Türbinleri, Yüksek Isı Transistörleri, Bor Hidrür Yakıtları, Isı Enerjisi Depolayıcılar, Piller, Hidrojen Depolayıcılar, Güneş Enerjisinin Depolanması, Güneş Pillerinde Koruruyucu, Hücre Yakıtları v.b.
<b>Görüş Sistemleri</b>	Kamera ve Mercek Camları, Fotoğraf Makinaları, Dürbünler, Banyo ve Film İmalatları
<b>İlaç Kozmetik Sanayi</b>	Dezenfekte Ediciler, Antiseptikler, Diş Macunları, Lens Solüsyonları, Kolonya, Parfüm, Şampuan v.b.
<b>İletişim Araçları</b>	Cep Telefonları, Modemler, Televizyonlar v.b
<b>İnşaat Sektöründe</b>	Çimentoya Mukavemet Artırıcı ve İzolasyon Amaçlı olarak
<b>Kağıt Sanayi</b>	Geri Kazanılan Kağıtların Mürekkeplerinden Arındırılması, Yüksek Kaliteli Kağıtların Parlaklaştırılması, Kağıt hamurunu beyazlatılması,
<b>Kimya Sanayi</b>	Bazı Kimyasalların İndirgenmesi, Elektrolitik İşlemler, Flotasyon İlaçları, Banyo Çözeltileri, Katalistler, Atık Temizleme Amaçlı olarak, Petrol Boyaları, Yanmayan ve Erimeyen Boyalar, Tekstil Boyaları, Yapıştırıcılar, Soğutucu Kimyasallar, Korozyon Önleyiciler, Mürekkep, Pasta ve Cilalar, Kibrit, Kireçlenme Önleyicileri, Dezenfektan kimyasallar, Kozmetikler, yumuşatıcılar, Sabun, Toz Deterjanlar, Toz Beyazlatıcılar, Ağartıcılar, Parlaticılar, Ahşap Emprenye çözeltileri, Mumyalama vb
<b>Koruyucu</b>	Ahşap Malzemeler ve Ağaçlarda Koruyucu olarak, Boya ve vernik Kurutucularında, Küf ve mantar önleyiciler, v.b.
<b>Makine Sanayi</b>	Manyetik Cihazlar, Zımpara ve Aşındırıcılar Kompozit Malzemeler, Titreşim Söndürücü Malzemeler, Sert Malzemeler, Motorlar, Katı yağlayıcılar, Yüksek sıcaklık sızdırmazlık Contaları, Yüksek Performanslı Motor Yağları, v.b.
<b>Metalurji</b>	Kaplama elemanları, Yüksek sıcaklık refrakterleri, Kaplama Sanayiinde Elektrolit Olarak, Paslanmaz ve Alaşımli Çelik, Sürtünmeye-Aşınmaya Karşı Dayanıklı Malzemeler, Kaynak Elektrotları, Metalurjik Flaks, Briket Malzemeleri, Lehimleme, Döküm Malzemelerinde Katkı Maddesi olarak, Kesiciler, Kompozit Malzemeler, Zımpara ve Aşındırıcılar v.b.
<b>Nükleer Sanayi</b>	Nükleer atık depolama (kolemanit cam bloklar), Reaktör Aksamları, Nötron Emiciler, Reaktör Kontrol Çubukları, Nükleer Kazalarda Güvenlik Amaçlı ve Nükleer Atık Depolayıcı olarak, Nükleer teknolojiye emniyet malzemeleri, v.b.

Tablo 3.1.' in devamı

<b>Otomobil Sanayi</b>	Titreşim söndürücü malzemeler, Hava yastığı şişirme mekanizmaları, Bor hidrür yakıtları (boranlar), Isı enerjisi depolayıcılar, Hidrojen depolayıcılar, Hava Yastıklarında, Hidroliklerde, Plastik Aksamda, Yağlarda ve Metal Aksamlarda, Isı ve Ses Yalıtımı Sağlamak Amacıyla, Antifrizler, v.b.
<b>Seramik Sanayi</b>	Emaye, Fayans, Porselen Boyaları, sırlar, v.b.
<b>Spor Malzemeleri</b>	Kayak Aksamları, Tenis Raketleri, Ok-yay, Balık Oltaları, Golf Sopaları, Darbe söndürücüler, vb.
<b>Tarım Sektörü</b>	Sentetik gübreler, Biyolojik Gelişim ve Kontrol Kimyasalları, Küf ve mantar önleyiciler, Böcek-Bitki Öldürücüler, Yabani Otlar, v.b.
<b>Tekstil Sektörü</b>	Isıya Dayanıklı Kumaşlar, Yanmayı Geciktirici ve Önleyici Selülozik Malzemeler, İzolasyon Malzemeleri, Tekstil Boyaları Deri Renklendiricileri, Dericilikte kireç çöktürücü, Suni İpek Parlatma Malzemeleri, v.b.
<b>Tıp</b>	Yapay organlar, Antibiyotikler(boromicyn), Osteopoz Tedavilerinde, Alerjik Hastalıklarda, Psikiyatride, Kemik Gelişiminde ve Artiritte, Menopoz Tedavisinde, BNTC Terapi Yöntemiyle Beyin Kanserlerinin Tedavisinde tümör öldürücüler, Manyetik Rezonans Görüntüleme Cihazlarında, v.b.
<b>Uzay ve Havacılık Sanayii</b>	Sürtünmeye-Aşınmaya ve Isıya Dayanıklı Malzemeler, Roket Yakıtı, Uydular, Uçaklar, Helikopterler, Zeplinler, Balonlar, Radar dalgası soğurucular, v.b.

### 3.2. Borlama

Yüzlerce farklı kullanım alanına sahip olan bor ve bor türevi ürünlerin endüstriyel anlamda yeni sayılabilecek uygulama alanlarından biri de çeliklerde bir tür yüzey sertleştirme yöntemi olarak kullanımlarıdır. Borlama adı verilen bu yöntem ilk kez 1895 yılında Moissan tarafından gerçekleştirilmiştir. Borlamanın kendisine endüstriyel kullanım alanları bulabilen bir yüzey sertleştirme işlemi olması ise, ancak 1970'li yıllarda olmuştur[4].

Borlama, ana malzeme ile sert borürleri oluşturmak için, bor atomlarının iş parçasının yüzeyine difüze olduğu bir termokimyasal yüzey sertleştirme prosesi olup genellikle 700-1000°C sıcaklık aralığında 1-10 saat sürelerde çeşitli borlama ortamlarında gerçekleştirilmektedir. Borlama ortamı katı, sıvı, gaz ve

plazma olup bor kaynağı ( $B_4C$ ,  $Na_2B_4O_7$ ,  $H_2B_6$ ), aktivatör ( $KBF_4$ ), dolgu malzemesi ve deoksidanlardan meydana gelmektedir. Burada aktivatörler tabakanın düzenli büyümesini sağlarken, dolgu ve deoksidan malzemeler işlem sıcaklığında oksijeni tutarak redükleyici bir ortam oluşturmakta ve ayrıca ortamdaki malzemelerin ana malzemeye yapışmasını önlemektedirler [13].

Yirminci yüzyılın başlarından itibaren çalışılmaya başlanan borlama ile çok sert, düşük sürtünme katsayısına sahip, yüksek sıcaklık mukavemeti fazla olan ve korozyon dirençli malzeme yüzeyleri elde edilmesi mümkün olmaktadır. Bu işlem fiziksel ve kimyasal özellikleri bakımından karbürleme ve nitrürleme gibi termokimyasal yüzey sertleştirme işlemleri ile benzerlik gösterir ve bütün ferro malzemeler, nikel alaşımları, titanyum alaşımları ve sinterlenmiş karbürlere başarıyla uygulanmaktadır[13].

Tane sınırları, dislokasyonlar, atom boşlukları gibi mikro hatalar ile yüzey pürüzlülükleri ve çizikler gibi yüzeyin daha reaktif olduğu yerler borür tabakası oluşumunun başlangıç noktalarıdır. Bu noktalarda  $Fe_2B$  çekirdekleri oluşur ve gelişir. Borlamanın birinci aşamasında borlayıcı ortam ve nesnenin yüzeyindeki reaksiyon partnerleri arasında reaksiyon oluşur. Taneler yüzeyde çekirdek oluşturmaktadır. Borlama süresi ile çekirdek oluşumu artar ve ince bir bor tabakası elde edilir. Bor,  $Fe_2B$  ve  $FeB$  yapısında çeliğin yüzeyine yayılır. Oluşan ilk borür çekirdeği numune içinde büyür. Bor atomları kafes yapının 001 doğrultusunda daha hızlı yayıldığı için  $FeB$  ve  $Fe_2B$  [001] boyunca yönelir. Bu yüzden borür taneleri [001] yönünde yüzeye dik daha hızlı büyür. Borür tanelerinin diğer yönlerde büyümesi daha yavaştır. Bu nedenle kolonsal yapı oluşur. Önce  $Fe_2B$  fazı oluşur, ortamda yeterince bor konsantrasyonu varsa  $FeB$  fazı da oluşur. İlk önce oluşan  $Fe_2B$  fazı uzun bir sürede büyümektedir. Borür tabakaları çeliğin yüzeyinden içeriye doğru  $FeB_x$ ,  $FeB$ ,  $Fe_2B$  yapısında oluşur. Borlamanın son aşamasında sadece  $FeB$  fazı oluşur[13].

Borlu tabaka veya tabakaların özelliklerini; malzeme bileşimi, borlama ortamındaki bor atomlarının kimyasal aktiviteleri, borlama işlem sıcaklığı ve süresi, ilave ısıl işlemler ve seçilen borlama yöntemi etkiler. İki fazlı demir

borürler, ortamda aşırı bor atomu varsa veya malzeme yüksek alaşımli bir malzeme ise meydana gelmektedir. Termal uzama katsayıları farklı olduğundan bu iki fazın aynı anda bulunması istenmez. Ana malzeme ile borür tabaka arayüzeyinde morfolojik incelemeler yapıldığıdaysa iki farklı tip yapı gözlenir. Birincisi, sade karbonlu ve az alaşımli çeliklerde görülen testere dişli tipindeki girintili – çıkıntılı arayüzey formu, ikincisi de yüksek karbonlu ve yüksek alaşımli çeliklerde gözlenen daha düz formdaki arayüzey tipidir. Testere dişli tip veya dişli tip yapı göreceli olarak daha düzgün olan arayüzeye göre mekanik özellikler açısından daha iyi sonuçlar sergiler. Bunun da nedeni, testere dişli şeklindeki sınır yapının borür tabakanın ana malzemeye çok daha iyi tutunmasını sağlamasıdır. Demir borür tabaka yapıları incelendiğinde, iki fazlı demir borür tabakalarına karşı tek Fe<sub>2</sub>B fazına sahip testere dişli görünümündeki tabakalar, endüstriyel uygulamalarda daha düşük kırılmalık gösterdiğinden tercih edilir[13].

Borlama işleminin en önemli avantajı; oluşan borür tabakasının çok yüksek sertlik (1450-5000Hv) ve ergime noktasına sahip olmasıdır. Borlanmış çelikler yüksek yüzey sertliği ve düşük sürtünme katsayılarından dolayı abrazif aşınmaya karşı çok iyi direnç gösterirler ve temel aşınma mekanizmalarının oluşumunu önlemede çok önemli fayda sağlarlar. Borlu tabakaların iyi aşınma özelliği göstermesi, yağlayıcı kullanımı da azaltır.

Borlama işlemi, demir esaslı malzemelerin oksitleyici olmayan seyreltik asitlere karşı korozyon direncini ve bu malzemelerinin erozyon dirençlerini arttırmaktadır. Bu özellikleri sebebiyle de endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır[13]. Tablo 3.2.' de Borlanmış çeliklerin sertlik değerlerinin diğer işlemlerle ve serî malzemeler ile karşılaştırılması gösterilmektedir.



Tablo 3.2. Borlanmış çeliklerin sertlik değerlerinin diğer işlemlerle ve serî malzemeler ile karşılaştırılması [14]

<b>Malzeme</b>	<b>Mikrosertlik (kg/mm veya Hv)</b>
Borlanmış yumuşak çelik	1600
Borlanmış AISIH13 kalıp çeliği	1800
Borlanmış AISIA2 çeliği	1900
Su verilmiş çelik	900
Su verilmiş ve temperlenmiş H13 çeliği	540-600
Su verilmiş ve temperlenmiş A2 çeliği	630-700
Yüksek hız çeliği BM 42	900-910
Nitrülenmiş çelik	650-1700
Sementasyonlu düşük alaşımlı çelik	650-950
Sert krom kaplama	1000-1200
Sementit karbürler, WC+Co	1160-1820
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + ZrO <sub>2</sub> seramikler	1483(30kg)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +TiC+ZrO <sub>2</sub> seramikler	1730(30kg)
Sialon seramikler	1768(30kg)
TiN	2000
TiC	3500
SiC	4000
B <sub>4</sub> C	5000
Elmas	10000

Borlama işleminin avantajlarının yanı sıra bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bunları şu şekilde sıralamak mümkündür:

1- Borlama işlemi esnek değildir. Gaz ortamında sementasyon ve plazma nitrürasyonu gibi diğer termokimyasal yüzey işlemlerine oranla işçilik ve işletim maliyeti daha yüksektir. Daha esnek olan gaz kartbürizasyonu ve plazma nitrürasyonu işlemleri kısa sürede ve daha kolay gerçekleşmesi nedeni ile borlamaya göre avantajlar sağlamaktadır.

2- Borlama işlemine tabi tutulan malzemelere de borlu tabaka kalınlığının %5-20'si oranında boyutsal artışlar görülmektedir. Bu kalınlık artışı borlanan malzemeye ve borlama şartlarına bağlı olarak değişmektedir. Çok hassas toleranslar altında çalışmak gerektiğinde kaplamanın işlenmesi elmas takımlarla sağlanmaktadır. Çünkü diğer geleneksel yöntemlerle işlenmesi sonucunda kırılmalar meydana gelmektedir buda kaplama kalitesinde bozulmalara ve çatlamalara neden olmaktadır. Genelde borlama işlemine tabi tutulmuş çelik parçaların döner temaslı yorulma özellikleri yüksek basınçlı yüzeylerde 2000 N, karbürizasyon ve nitrasyon yöntemleri ile kıyaslandığında çok zayıftır[13].

### **3.2.1. Borlama yöntemleri**

Borlama işlemi katı, sıvı, gaz ve plazma ortamlarında gerçekleştirilmekte ve bu ortamlarla birlikte anılmaktadır.

#### **3.2.1.1. Katı (Kutu) borlama**

Borlanan malzemeye ve elde edilmek istenen bor tabakası kalınlığına bağlı olarak genellikle 800 – 1050<sup>0</sup> C sıcaklık aralığında, bir saat ve daha uzun sürelerde işlem gerçekleştirilir. Toz bor verici karışımlar; bor verici bileşikler (Bor karbür, saf bor, vb.), alkali metaller, aktivatörler ve dolgu maddelerinin belirli oranlarda karıştırılması ile elde edilir. Buradaki karışım oranları ve tozların tanecik büyüklüğü işlem uygulanacak malzemeye göre değişmektedir. Borlama toz karışımları, işlem uygulanacak malzemenin şekline uygun imal edilmiş ısıl dirençli çelik kutularda, parçanın etrafını en az 1 cm kalınlıkta kaplayacak biçimde doldurulur. Kutunun üstü sızdırmaz bir kapakla kapatılıp işlem normal atmosferde yapılabilir; ya da işlem, kutunun veya fırının içinin koruyucu gaz atmosferiyle korunduğu ortamlarda yapılabilir. Borlanmış parçaların üzerindeki karışım kalıntıları tel fırça yardımıyla kolayca kaldırılabilir. Toz karışımlarla kısmi borlama da yapılabilir.

Bu yöntemin avantajları; işlem basitliği, oldukça düzgün yüzeylerin elde edilmesi, gerekli ekipmanların kolay bulunabilmesi ve ucuz olmaları, toz bileşimin kolayca değiştirilebilir olması ve işlem sonu parça yüzeyinin kolay temizlenebilmesidir.

Bu yöntemin yaygın olarak kullanılmasının nedeni avantajlarının diğer borlama yöntemlerinin avantajlarına göre daha çok olmasıdır. Dezavantajları ise işlem parametrelerinin kontrol yeteneğinin kötü olması, otomasyonun mümkün olmaması ve atık ürünlerinin çevreye zararlı olmasıdır. Katı ortamda toz bor verici karışımlardan başka pasta borlama bileşikleriyle de borlama yapılabilmektedir. Bu durumda cam suyu ve gliserin gibi maddeler bağlayıcı olarak kullanılır. Kısmi borlama uygulamalarına pasta borlayıcılar daha uygundur. İş parçasının borlanacak bölgelerine pasta bir veya daha çok kez sürülebilir. İşlem öncesi pasta sürülmüş kısmın tam olarak kurutulması gereklidir. Pasta borlamasında koruyucu gaz atmosferi olması zorunludur. İşlem sonunda kalıntılar kolaylıkla temizlenebilir[14].

### **3.2.1.2. Sıvı borlama**

Bor bileşikleri, aktivatör ve redükleyici maddelerden oluşan erimiş tuza, iş parçasının daldırılması yöntemidir. Daldırma süresi borlama süresidir. Borlama işlemi 900-1100°C sıcaklıkta ve 2-9 saat süre ile yapılır. Bu yöntemin dezavantajı sıcaklıktır. Sıcaklığın 850°C nin altına düşmesi durumunda erimiş boraksın akıcılığı azalacağından borlama işlemini gerçekleştirilmesi imkansız hale gelmektedir[13].

### **3.2.1.3. Gaz borlama**

Boron hidritlerin termal parçalanması sonucu elde edilen buharla yapılan borlama işlemidir. Bu işlemde sıcaklık yükseltilebilir ve daha homojen difüzyon tabakası elde edilebilir. İşlem özellikle karışık şekilli parçaların borlanması ve homojen tabaka elde edilmek istendiğinde tercih edilen bir yöntemdir. Ancak sıvı ortamda borlama işleminde mevcut olan zehirlilik, patlayıcı doğa ve çevresel kirlilik gibi dezavantajları kullanımını sınırlamaktadır[13].

#### 3.2.1.4. Plazma borlama

Demir esaslı ve demir dışı metalik malzemelere uygulanan, Ar, H<sub>2</sub> gazları ile birlikte bor kaynağı olarak BCl<sub>3</sub>, B<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, BF<sub>3</sub>, B(OCH<sub>3</sub>)<sub>3</sub> (trimetilborat) kullanarak, 800-1000<sup>0</sup>C sıcaklıkta, yaklaşık 10<sup>-2</sup> Pa gibi bir düşük bir basınçta oluşturulmuş plazma içerisinde yapılan borlamadır. Mikroyapı ve demirbor tabakalarının büyümesi işlem sıcaklığı, gaz karışım oranları, malzeme kompozisyonları, işlem basınç değişim oranları ve uygulanan akım yoğunluğuyla kontrol edilebilmektedir[13].

Borlanmış çelikler yüksek yüzey sertlikleri ve yüksek aşınma mukavemetleri ile karakterize edilirler. Borlama işleminde, borun yüzeye yayılması sonucu parçanın en üst yüzeyinde bileşik tabaka adı verilen borlu bölge, onun altında yayınma (difüzyon) bölgesi ve en iç kısımda ise çekirdek bölgesi yer alır. Yüzeyde borca zengin FeB en üstte oluşurken onun hemen altında daha homojen ve sünek olan Fe<sub>2</sub>B olmak üzere iki demirborür fazı oluşur. Termal uzama katsayıları farklı olan bu iki faz birlikte istenmezler. Paslanmaz çelik malzemeler üzerine yapılan borlamalarda, yüzey üzerinde nikelin düşük çözünürlüklü olduğu bor tabakası oluşur ve fazla nikel bor tabakasının altında nikelce zengin tabaka oluşturmak üzere yapıya difüze olur. Cr elementinin birazı bor tabakasında çözünürken geri kalanı nikelce zengin tabaka ve bor tabakaları arasında kromca zengin bir tabaka oluşturmak üzere içeri difüze olur. Borlanmış çelikler yüksek sertliklerinden dolayı abrasif aşınmaya karşı çok iyi direnç gösterirler. Bu nitrülendirilen ya da karbürleştirilen çeliklerle kıyaslandığında mükemmel derecede fazladır[13].

## BÖLÜM 4. NİOBYUM HAKKINDA GENEL BİLGİ

### 4.1. Giriş

Niobyum ve niobyum alaşımları başta roket ve jet motorları olmak üzere, nükleer reaktörler, sodyum buharı ile çalışan otoyol ışıklandırma sistemleri ve kimyasal proseslerin yapılmakta olduğu, çeşitli korozyona dayanım gerektiren yerlerde kullanılmaktadırlar. Niobyum bir çok özelliği açısından tantalla benzerlik göstermektedir ve bundan dolayı tantal ile kardeş metaller olarak gösterilmektedir. Buna karşılık olarak niobyum, tantalın sahip olduğu yoğunluk miktarının yarısı kadar yoğunluk değerine sahiptir. 300°C' nin üzerindeki sıcaklıklarda niobyum, başta hidrojen olmak üzere oksijen, nitrojen ve karbon gibi çeşitli elementlerle reaksiyona girmektedir. Bu reaksiyonlar sonucunda sert empüriteler meydana gelmektedir. Bunu engellemek amacı ile niobyum bir başka metal ile kaplanmalı veya vakum ya da inert bir ortamda muhafaza altına alınmalıdır. Niobyum bir çok koroziif ortama dayanıklıdır. Örneğin organik asitlere, sodyum ve lityum içermekte olan sıvı metal ortamlarına, ergimiş tuz banyolarına karşı dayanıklıdır.

Niobyumda tıpkı diğer reaktif metallerde olduğu gibi koroziif ortamlarda korozyona dayanım esnasında yüzeyinde pasif oksit filmi oluşturmaktadır. Niobyumun korozyona dayanım özellikleri tantalın kine benzer fakat yüksek konsantrasyona sahip asit mineralleri ihtiva eden etkili ortamlarda tantala oranla daha az dayanıma sahiptir.

100°C sıcaklığın altındaki bütün sıcaklık değerlerinde niobyum güçlü organik ve mineral asitlere, hidroflorik (HF) içeren tüm asit ortamlarına ayrıca HCl (hidroklorik asit), HI (hidroiyonik asit), HBr (hidrobromik asit), H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (sülfirik asit) ve H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> (fosforik asit) ortamlarına karşı dayanıklıdır. Oda sıcaklığında

örneğin; %95' lik konsantrasyona sahip olan  $H_2SO_4$  (sülfirik asit)' ya karşı dayanıklıdır.

Sulu alkalin çözeltileri ile çevrili ortamlarda 0.025 mm/yr' den daha az korozyon dayanımına sahiptir. Bununla beraber yükselen sıcaklık değerlerinde korozyon büyüme hızında aşırı bir değişim görülmemektedir. Niobyum tuzlu çözeltilere karşı mükemmel derecede korozyon dayanımına sahiptir.

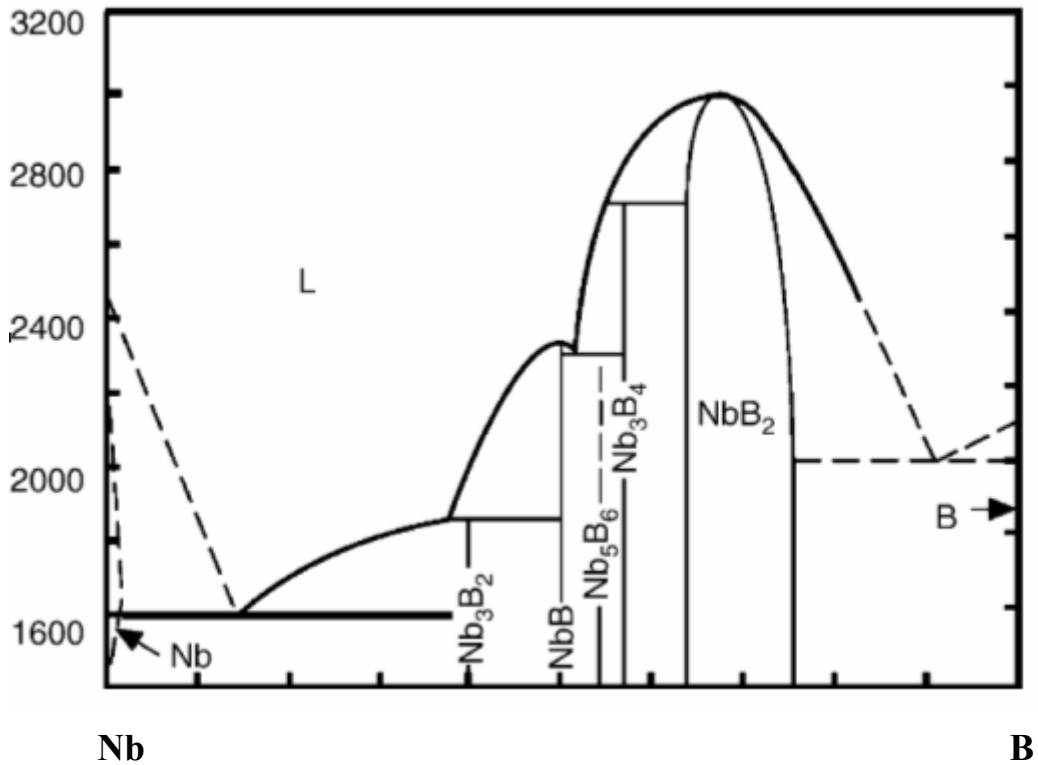
200°C' nin üzerindeki sıcaklıklarda kolayca korozyona uğrarlar. Fakat 500°C' nin üzerindeki sıcaklıklarda korozyona uğrama miktarında ani ve hızlı bir değişim meydana gelmemektedir. 980°C sıcaklıkta oksidasyon değişimi 430 mm/yr değerindedir.

Yüksek sıcaklıklara sahip olan sıvı metaller içerisinde iyi korozyon dayanımı özelliği göstermektedir. Örneğin Bi (bizmut)' ye 510°C' ye, Ga (galyum)' a 400°C' ye, Li (lityum)' ye 1000°C' ye sodyum, potasyum ve sodyum-potasyum alaşımlarına yine 1000°C' ye kadar dayanım göstermektedir. Bu özelliklerinden dolayı çok sağlam yapıları termal sistemlerde, hızlı üretim yapılan uzay araştırma reaktörlerinde ve fizyon reaktörlerinde kullanılmaktadırlar. Ayrıca yine yüksek sıcaklıklardaki sodyumun zorlama etkisine karşı dayanıklıdır.

Niobyum lokalize etkilere karşı yüksek oranlarda korozyon direncine sahiptir. Örneğin; aşınmaya, çentik korozyonuna ve stres korozyonuna karşı[15].

## 4.2. Niobyum Borürler

Niobyum borürler; yüksek ergime sıcaklıklarına, yüksek mukavemete, yüksek termal ve elektrik iletkenliğine sahip olduklarından dolayı, yüksek sıcaklıklardaki yapısal uygulamalara potansiyel bir aday olarak kabul edilirler. Niobyum ve borun faz diyagramı Şekil 5.1.' de gösterilmektedir ve bu diyagram bizlere aralarında 5 farklı bileşim oluşturan niobyum ve borun bileşim oranlarını göstermektedir. ( $Nb_3B_2$ ,  $NbB$ ,  $Nb_5B_6$ ,  $Nb_3B_4$  ve  $NbB_2$ ). Tüm bu stokiometrik bileşimler ile sabit yani değişmeyen bağlara sahip niobyum borür bileşikleri içerisinde  $NbB_2$  ayrı bir yere ve öneme sahiptir.  $1900^\circ C$  sıcaklığın üzerinde bulunan %' de bor bileşimi içerisinde, yaklaşık olarak  $NbB_2$  fazı %64- %72 arasında homojen olarak değişen bir dağılım sırasına sahiptir.



Şekil 4.1 Niobyum ve borun faz diyagramı

Çok yakın bir tarihte; 39 K sıcaklıkta  $MgB_2$ ' den süper iletkenlik özelliğinin keşfedilmesi ile değişik metal- $B_2$  (diborat) bileşikleri hakkında yeni uygulamaların yapılması gerekli hale gelmiştir. (M=Be, Al, Nb, Mo, Ta, Ti, Hf, V ve Cr). Bu diboratlar arasında, 8K sıcaklıkta farklı  $Nb_xB$ ' lerin kimyasal bileşimlerinin yanma sentezlemesi neticesinde süper iletken fazlar elde edilmiştir. İlerleyen zaman ve enerji birikimleri ile saf ve yüksek saflıkta üretilen yüksek sıcaklıklarda meydana gelen yanmalar neticesinde üretilen, çekici alternatif geleneksel metotlarla üretilen gelişmiş materyaller içeren borürler, karbürler, nitrürler, hidrürler, silikatlar, karbonitrürler ve intermetalik yapıya sahip malzemeler üretilmektedir[16].



## BÖLÜM 5. TERMO-REAKTİF DİFÜZYON YÖNTEMİ (TRD)

### 5.1. Giriş

Geleneksel yüzey sertleştirme metotlarına benzemeyen termo-reaktif difüzyon (TRD) işleminde karbon ve azot gibi elementlerin altlık malzemenin yüzeyini sertleştirmek amacıyla dışarıdan difüze edilmesiyle gerçekleştirilmektedir. TRD işleminde elde edilen kaplama tabaka kalınlıklarına CVD veya PVD teknikleri kullanılarak ulaşılabilmektedir. Kıyaslanacak olursa CVD kaplamaların kalınlıkları, TRD prosesinde elde edilen kaplamaların kalınlıklarına yakındır [1].

Malzemede hasar oluşturan sebeplere karşı alınan önlemlerin en başında ise seramik kaplamalar gelmektedir. Metalik malzemeler çeşitli prosesler ile özellikle karbür, nitrür ve borür gibi sert kaplama da denilen seramik kaplamalar yapılarak çok başarılı sonuçlar alınmaktadır. Ayrıca seramik kaplamalar, metalik malzemelerin korozyon dirençlerinin artırılması yanında yüksek sıcaklık uygulaması, enerji tasarrufu gibi amaçlarla da tatbik edilmektedir. Fakat bu proseslerin çoğunun uygulanabilirliği için yüksek teknolojiler, yani yüksek maliyetler gerekmektedir [17]. Takım çelikleri TRD prosesine tabi tutulmaları için minimum %0.3 C içermelidir. Bu değer, birçok soğuk ve sıcak iş takım çeliklerinde, yüksek hız takım çeliklerinde ve bazı martenzitik paslanmaz çeliklerde mevcuttur. Yüksek hız takım çeliklerinde tam altlık malzeme sertliğini elde etmek için TRD işlemi sonrasında tekrardan sertleştirme işlemine tabi tutmak gerekmektedir. Sementit karbürler genellikle talaş kaldırıcı altlık malzeme olarak kullanılırlar [18].

Alternatif gerilmeli uygulamalarda çeliklerin yorulma dirençleri ana metalde bulunan çekme kalıntı gerilmeleri sebebi ile oldukça sık bozulmaktadır. Kalıntı gerilmeler, ana metalde çatlakların oluşmasında çekirdek oluşturulur. Problem TRD prosesi ile

çözülebilir ve eğer gerek duyulursa çekme gerilmesini azaltmak için TRD işlemi sonrası su verilir [19].

## 5.2. Difüzyon

Malzeme içerisindeki atomların ve diğer sertleştirme elemanlarının sıcaklığa bağlı olarak hareket ettirilmesi ile yer değiştirilmesi difüzyon (yayınma) olarak adlandırılır. Difüzyon terimi özellikle katı malzeme içerisinde kütle taşınımını sağlayacak oranda gelişen atom hareketlerini tanımlar. Difüzyon yönteminde malzeme yüzeyinin iç yapısı, yüzeye nüfuz ettirilen yabancı atomlar ve ısı sayesinde gerçekleştirilir [20].

Metal malzemelerdeki difüzyon işlemi, homojen ve homojen olmayan malzemelerde farklılıklar gösterir. Bu sebeple homojen malzemelerde tamamıyla eşit dağılmış ve birbirinin aynı olan atomların yer değiştirmesi kendi kendine gerçekleşir ki, bu yer değiştirme işlemine kendi kendine difüzyon denir. Kendi kendine difüzyon genellikle kütle taşınması görülmez. Homojen olmayan malzemelerdeki difüzyon işlemi ise teknik açıdan farklılıklar gösterir. Homojen olmayan malzemelerdeki konsantrasyon farklılıkları, atomların belirli yönde hareket etmelerine neden olur. Bu tür difüzyon olayları ısı işlemlerin çoğunda büyük önem arz eder [21].

Birçok difüzyon işleminde olduğu gibi, kaplama tabaka kalınlığında (d) zaman ve sıcaklığın etkisi aşağıdaki eşitlikle elde edilmektedir.

$$d^2 / t = D = D_0 \exp(-Q/ RT) \quad (4.1)$$

d: kaplama kalınlığı (cm), t: zaman (sn), D: büyüme hızı sabiti (cm<sup>2</sup>/sn), D<sub>0</sub>: D'nin sabit terimi (cm<sup>2</sup>/sn), Q: aktivasyon enerjisi (kJ/mol), T: sıcaklık (°K) ve R: gaz sabitidir.

Difüzyon hızı, çeliğin bileşimine önemli ölçüde bağlıdır. Karbon muhtevası arttıkça difüzyon zorlanır ve yüzey tabakasında yeni bir karbon dağılımı elde edilir Bazı durumlarda, karbon atomları difüzyon tabakası dışında toplanırken (örneğin

alüminyumlama ve titanyumlama) diğer durumlarda ise ters olarak karbon atomları yüzeye doğru şiddetle difüze olurlar [22].

Difüzyonlu kaplamalar, ısı etkisi altında altlık ve kaplama malzemesi arasında kuvvetli alaşım oluşumu ile gerçekleşir. Kaplamanın özellikleri altlık kompozisyonuna bağlıdır. Difüzyonlu kaplamalarda karbon ve azot yüzeyin mekanik özelliklerini geliştiren klasik örneklerdendir. Altlığa kaplanacak metalin difüzyonu atomik seviyededir. Atomik ve moleküler bağlanma ile elde edilen toplam yapışma ve kristal distorsiyonu metalin yüzey sertliğini artırır [23].

### 5.3. Termo-Kimyasal İşlemler

Termokimyasal proste çalışma parçasının yüzey tabakası, bir kimyasal kompozisyon değişikliğine uğrar. Elektrolitik veya buhar çöktürme gibi proseslerin aksine, bu değişim difüzyon ile gerçekleştirilir, yani tabaka orjinal malzeme atomlarını ve ona difüze olan yabancı element atomlarını içerir. Bu tip yüzey tabakası ile matris arasında yapışma problemi gözlenmez [18].

Termokimyasal proses, geniş olarak bir difüzyon olayı olduğu için üretilen tabakanın kalınlığı işlem sıcaklığı ve süresine bağlıdır. Yabancı element, difüze edilebilir, formda olmalıdır; örneğin azot sadece atomik halde difüze edilebilir, fakat moleküler azot koruyucu bir gaz olarak hareket eder ve çelik yüzeyini değiştirmez. Yabancı elementlerin difüzyonu, katı (toz, granül, pasta), sıvı (ergimiş tuz banyosu) veya gaz fazından meydana gelebilir. Bunlara plazma hali ve akışkan yatak ilave edilebilir [24].

Termo-kimyasal işlem metotları, difüze olan elementin sağladığı aktif fazın fiziko-kimyasal karakteristiklerine göre katı fazdan, sıvı fazdan, gaz fazından ve buhar fazından doyurma şeklinde sınıflandırılmaktadır. Termokimyasal işlemler veya difüzyonlu kaplamalar çöktürülen elementin metal ve ametal oluşuna göre iki gruba ayrılır[25].

-Ametallerle doyurma işlemleri (karbürleme, nitrürleme ve nitrokarbürleme ve borlama)

-Metallerle doyurma işlemleri (alüminyumlama, kromlama, silisyumlama, vanadyumlama, berilyumlama).

#### **5.4. Termo Reaktif Difüzyon İşlemi**

Termo-reaktif difüzyon prosesi (TRD), karbür, nitrür ve karbonitrür gibi sert ve aşınma direnci yüksek olan tabakaların, çelik malzemelerin yüzeyinde oluşturulduğu bir metottur. TRD prosesinde çelik altlık malzemedeki karbon ve azot vanadyum, niyobyum, tantal, krom, molibden veya tungsten gibi karbür veya nitrür oluşturu elementlerle biriken bir tabaka oluşturmak için difüzyon olur. Difüze olan karbon ve azot biriken tabakada karbür ve nitrür oluşturu elementlerle altlık malzeme yüzeyinde metalurjik olarak bağlanmış olan karbür ve nitrür kaplamaları yoğun bir şekilde oluşturacak şekilde reaksiyona girer [1].

Yaygın olarak yüksek sıcaklık tuz banyosu veya kutu sementasyonu şeklinde olan TRD prosesi 850-1050°C sıcaklık aralığında ergimiş boraks banyosunda veya katı toz ortamında gerçekleştirilmektedir. Kaplama süresi elde edilecek kaplama kalınlığına bağlı olarak 5-15 µm tabaka kalınlığı için çoğu uygulamalarda 0.5-10 saat arasında değişmektedir. Bu süre ve sıcaklıklar üretilecek tabaka cinsi ve tabaka kalınlığına bağlı olarak değiştirilebilir. Kutu sementasyonunda numunenin soğuması genellikle kutu tozları içinde olmaktadır. Fırın dışında soğutma şeklinde yapılan çalışmalar da mevcuttur. Bu sıcaklık aralığı çoğu düşük alaşımlı ıslah çelikleri, sementasyon işlemine tabi tutulan çelikler ve çoğu takım çelikleri için uygundur ve parçalar TRD prosesi işlemine tabi tutulmadan önce distorsiyonu minimuma indirmek ve işlem süresini minimuma indirmek amacıyla bir ön ısıtma işlemine tabi tutulmaktadır[19].

Altlık malzeme, ortamda bulunan elemanlar ile yüksek sıcaklıkta temas ettiği zaman, karbür ve nitrür oluşturu elementler düşük serbest enerjileri sebebiyle yüzeyde karbür, nitrür ve karbonitrür şeklinde kaplama tabakalarını oluştururlar. Örneğin; difüze olan element, ara yer ya da yer alan tipinde karışım kristali oluşturarak demir

latisinde yer alabilir. Ayrıca demir ve yabancı element, latis yapısı demirinkinden tamamen farklı bir intermetalik bileşik oluşturabilir. Bu tabakanın altında, yabancı elementin bir katı çözelti olarak bulunduğu bir difüzyon tabakası oluşur. Burada metal veya metal olmayan kaplama malzemesi ile altlık malzemesi arasında kimyasal etkileşim söz konusudur [25].

TRD yönteminde altlık malzemenin içine gömüldüğü toz karışımları temel olarak üç bileşenden oluşmaktadır; kaplama element kaynağı (örneğin Fe-Cr, Fe V, Cr), karışım tozlarının birbirleriyle sinterleşmesini önlemek için inert bir dolgu maddesi ( $Al_2O_3$  veya  $SiO_2$ ) ve bir aktivatör madde (genellikle  $NH_4Cl$ ) [27]. TRD yöntemi gibi termokimyasal difüzyon yöntemleri difüzyon sıcaklığı ve süresi, verici malzemenin miktarı, aktivatör miktarı, altlık malzemenin yapısı (alaşım elementleri, karbon içeriği) gibi birçok değişkenden etkilenir.

TRD işleminde verici olarak genellikle bulunması kolay ve ucuz olan ferro alaşımlar kullanılmaktadır. Ferro alaşımların mümkün olan en yüksek tenöre sahip olanları seçilir. Ayrıca ferro alaşımlara nazaran daha pahalı fakat saflığı yüksek metal tozları ile çalışmak da mümkündür [26]. Karışım bileşenlerinin önemli bir elemanı da aktivatördür. Aktivatör, izotermal ısıtma sırasında ferro alaşım elementi ile reaksiyona girer ve uçucu metalik halojenürleri oluşturur. Bu şekilde aktif gaz ortamı sağlanmış olur. Aktivatör olarak muhtelif halojenür tuzları ( $NaF$ ,  $-Cl$ ,  $-Br$ ,  $-I$ ;  $MgF$ ,  $-Cl$ ,  $-Br$ ,  $-I$ ;  $NH_4F$ ,  $-Cl$ ,  $-Br$ ,  $-I$ ) kullanılır. aktivatör yaklaşık  $580^\circ C$ 'de ve işlem süresinin ilk 15 dakikasında parçalanmaktadır. Parçalanma sırasında meydana gelen gazlar bir tahliye borusuyla dışarı verilmektedir. Aktivatör seçiminde, kullanılan altlık malzemesinin cinsi ve aktif gaz ortamını oluşturacak ferro alaşım elementinin kısmi basıncı rol oynar [27]. İşleminde kullanılan altlığın karbon içeriğine bağlı olarak, düşük karbon miktarında metalik tabakalar (alüminyum, krom, titanyum, silisyum, yüksek karbon içeriğinde ise kullanılan ferro alaşımın cinsine bağlı olarak da seramik esaslı tabakalar (krom karbür, titanyum karbür, vanadyum karbür vb.) elde edilir.

TRD için en iyi uygulamalar yüksek aşınma ve kazıma problemlerine maruz kalan çoğu şekillendirme ve kesme takımları, kalıp bileşenleri olan malzemeler, yumuşak çelikler, yüksek hız takım çelikeri, kaplanmış çelikler, paslanmaz çelik, demir dışı metaller, şekillendirme kalıplarıdır [28].

Ekstrüzyon kalıpları ve soğuk dövme kalıpları gibi yüksek seviyelerde yüzey basınçlarının olduğu uygulamalarda karbür tabakaları sert altlık malzemelerle desteklenmektedir. Yüksek hız takım çelikleri öncelikle TRD ile sertleştirilmelidir. Bazı tozlaştırılmış kobalt içeren yüksek hız takım çelikleri maksimum TRD proses sıcaklıklarında 60-65Rc sertlik elde etmek amacıyla işleme tabi tutulabilmektedir.

Yüksek performanslı makinelerde kullanılan bileşenler, bisiklet, motosiklet ve arabalarda kullanılan zincirlerde, çok yüksek hızlarda kullanılan taşıyıcı ringlerde ve çok yüksek basınçlarda çalışan pompalarda TRD uygulamaları geniş ölçüde kullanılmaktadır. Aynı şekilde korozif sıvılarla çalışılan püskürtme nozüllerinde ve abrasif partikül taşıyan sıvı ortamlarda, cam kalıp makinelerinde bağlantı elemanları ve eksoz gazlarının oksidatif ve korozif şartlarındaki otomobil bileşenlerinde de uygulamalarını görmek mümkündür.

TRD işlemi, basit donanım, kolay yapılan bir işlem olması, düşük maliyet, girintili çıkıntılı bölgelerde homojen kaplama yapılabilmesi, malzemeye yapışan tuzun kolay temizlenmesi, koruyucu atmosfer gerektirmemesi, zehirli gaz olmaması, çevreye zarar vermemesi, yüzey işlemler ve boyutsal hassasiyetteki artıştan ötürü, ürün kalitesinin artması gibi üstünlüklerinden dolayı tercih edilebilecek bir kaplama yöntemidir[28].

## **BÖLÜM 6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR**

### **6.1. Giriş**

Bu çalışmanın amacı, öncelikle borlama işlemine tabi tutulan ve sonrasında termoreaktif difüzyon yöntemi ile niobyumlama işlemine tabi tutulan AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çeliklerinin yüzeylerinde oluşabilecek kaplama mikroyapılarını, kimyasal bileşimlerini, tabaka morfolojilerini ve mekanik özellikler üzerine etkilerini araştırmaktır. Bu amaçla 22 mm çapında temin edilen çelik çubuklar, 5 mm kalınlığında olacak şekilde kesilmiş ve kesilen numunelerin her iki tarafı da taşlama işlemine tabi tutulmuştur.

Bu çalışmada, termoreaktif difüzyon yöntemi ile, içerisinde farklı oranlarda alaşım elementleri bulunduran AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çeliklerinin yüzeylerine niobiyum borür kaplama işlemi uygulanmıştır. AISI 1010 ve AISI 4140 çeliklerine 900°C’ de, AISI D2 ve AISI M2 çeliklerine 1000°C’ de iki saat süre ile borlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Borlanan numunelerin yüzeyine 850°C, 900°C ve 950°C sıcaklıklarda 1, 2, 3 ve 4 saat sürelerde niobyumlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Niobiyum borür kaplanan numunelerin yüzeylerinde oluşan tabakaların özellikleri incelenmiştir.

### **6.2. Deneylede Kullanılan Numuneler ve Kimyasal Analizleri**

Deneysel çalışmalarda AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çelikleri kullanılmıştır. Bu çeliklerden ilki olan AISI 1010 çeliği düşük karbonlu çelik olup genellikle konstrüksiyon uygulamalarında kullanım alanı bulmasının yanında, endüstrinin diğer alanlarında da kendisine kullanım alanı bulmaktadır. AISI 4140 çeliği düşük alaşımlı orta karbonlu çeliklerden olup, makine sanayinde mukavemet gerektiren hareketli makine parçalarında, millerde, dişlilerde,

pimlerde, akslarda v.b. uygulamalarda kullanım alanına sahiptir. AISI D2 çeliğinin süneklik ve basınca karşı dayanımı yüksektir. Her türlü kesme ve bükme kalıplarında, vida-civata ovma tarakları, perçin ve civata başlarının şişirilme işlemlerinde v.b. yerlerde kullanılmaktadır. AISI M2 çeliği kesici takımlarda kullanılan en temel yüksek hız takım çeliğidir. Bütün kesici freze uçları, matkap, rayba, klavuz, paftalar ve talaşsız şekillendirme işlemlerinin uygulandığı yerlerde kullanım alanı bulmuştur. Deneylerde kullanılan çelik numunelerin spektral analizleri Thermo-Jarrel ASH-BAIRD Corp DV-6S 3063A marka spektral analiz cihazında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan çekliklerin spektral analizleri Tablo 6.1.' de verilmektedir.

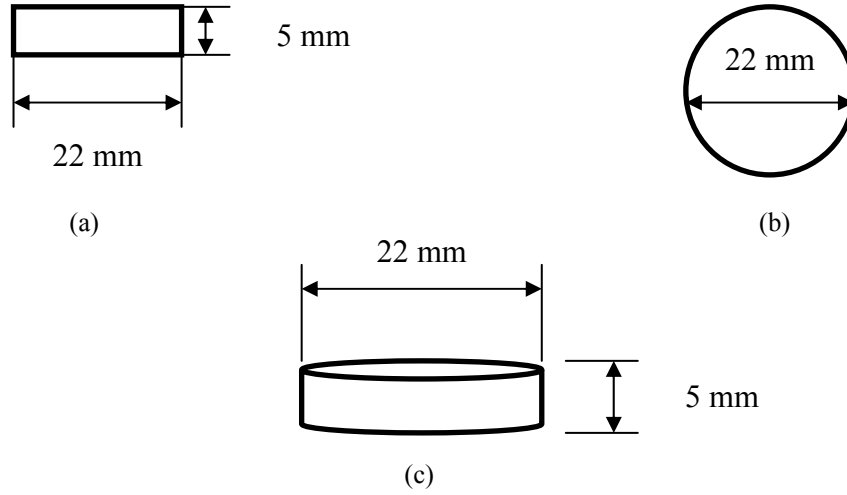
Tablo 6.1. Deneylerde kullanılan çeliklerin spektral analizleri

Çeliğin Cinsi	Kimyasal Bileşim (%Ağırlıkça)										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	W	V	Fe
AISI 1010	0,12	0,11	0,05	0,003	0,023	0,012	0,029	0,02	-	-	Kalan
AISI 4140	0,40	0,25	0,62	0,024	0,025	1,00	-	0,18	-	-	Kalan
AISI D2	1,33	0,34	0,28	0,02	0,01	6,38	0,26	0,77	-	1,0	Kalan
AISI M2	0,95	0,32	0,18	0,327	0,049	4,66	0,77	4,43	6,8	1,9	Kalan

### 6.3. Deneylerde kullanılan numunelerin hazırlanışı

Deneylerde kullanılan AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çelikleri 22 mm çapında yuvarlak kesitli olarak temin edilmiş olup, 5 mm kalınlığında parçalar halinde kestirilmiştir. Kaplama işlemine hazır hale gelmesi amacı ile metalografik numune hazırlama teknikleri ile 60-120-180-360-600-800-1200 mesh' lik zımparalarla zımparalama işlemine tabi tutulmuştur. Numunelerin şematik görüntüleri Şekil 6.1.' de verilmektedir.





Şekil 6.1. Deneylerde kullanılan numunelerin görünümü (a) önden görünüşü (b) üstten görünüşü , (c) profil görünüşü

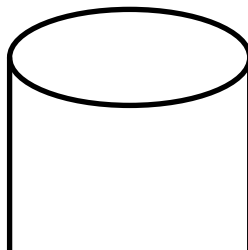
#### 6.4. Deneylerde Kullanılan Cihazlar

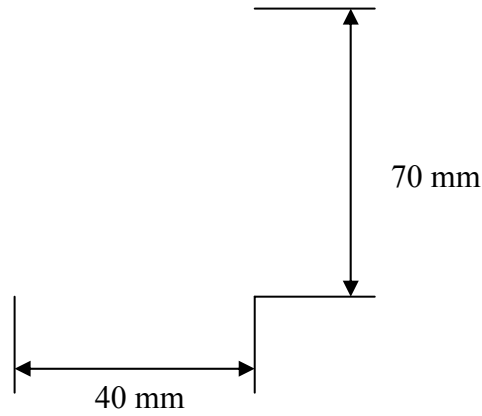
##### 6.4.1. Borlama ve niobyumlama fırını

Borlama ve niobyumlama işlemleri PROTHERM marka 1200°C sıcaklığa çıkabilen  $\pm 1^\circ\text{C}$  hassasiyette çalışan direnç fırınında gerçekleştirilmiştir.

##### 6.4.2. Borlama potasının hazırlanması

Borlama işleminde AISI 304 paslanmaz çelikten imal edilen 70 mm boyunda ve 40 mm eninde potalar kullanılmıştır. Şekil 6.2.' de borlama işleminin gerçekleştirilmesinde kullanılan borlama potasının görünüşü verilmektedir.

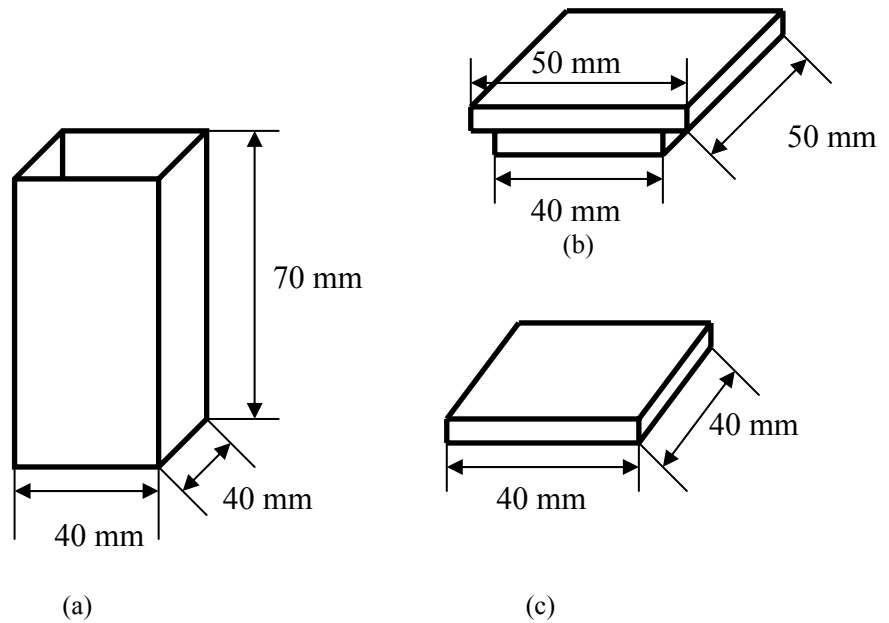




Şekil 6.2. Borlama potasının görünüşü

### 6.4.3. Niobyumlama potasının hazırlanması

Niobyumlama işleminde AISI 304 paslanmaz çelikten imal edilen 40x40x70 mm ebatlarında olan potalar kullanılmıştır. Şekil 6.3.' de niobyumlama işleminin gerçekleştirilmesinde kullanılan niobyumlama potasının görünüşü verilmiştir.



Şekil 6.3. (a) Niobyumlama potasının görünüşü (b) Dış kapak (c) İç kapak

### 6.5. Borlamada Kullanılan Tozların Hazırlanması

Borlama banyosunu hazırlamak için kullanılacak banyo bileşimlerinden boraks ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) ve borik asit ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) kalsinasyon işlemine tabi tutulmuşlardır. Kalsinasyon işlemi  $900^\circ\text{C}$  sıcaklıkta 30 dakika süre ile gerçekleştirilmiştir. Kalsinasyon işlemi sonrasında boraks, susuz boraks ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ) olarak ve borik asit,  $\text{B}_2\text{O}_3$  bileşimine sahip olacak şekilde üretilmişlerdir. Kalsinasyon işlemi tamamlandıktan sonra kalsine boraks ve borik asit havada soğutulmaya bırakılmışlardır. Soğuduktan sonra camsı görünüme sahip olan kalsine edilmiş boraks ve borik asitler değirmende öğütme işlemine tabi tutulmuş ve  $100 \mu\text{m}$  elek altı olacak şekilde öğütülmüşlerdir. Ayrıca, ferro-silisyum da öğütülerek,  $100 \mu\text{m}$  elek altı olacak şekilde elenmiştir.

### 6.6. Borlama İşlemi

Kalsine boraks, borik asit ve ferro-silisyum tozları %65 boraks, %20 ferro-silisyum ve %15 borik asit bileşiminde homojen karıştırılarak banyo bileşimi hazırlanmıştır. Etil alkol ve asetonla temizlenen AISI 1010 ve AISI 4140 çelikleri  $900^\circ\text{C}$ , AISI D2 ve AISI M2 çelikleri  $1000^\circ\text{C}$  sıcaklıklarda ikişer saat süre ile sıvı borlama işlemine tabi tutulmuşlardır. Her deney için yeni bir banyo hazırlanmıştır. Borlama işlemi tamamlandıktan sonra numuneler banyodan çıkarılmış ve havada soğutulmaya tabi tutulmuşlardır. Numuneler üzerinde bulunan banyo kalıntılarının büyük bir kısmı soğuma esnasında kendiliğinden çıkmış, kalanlar sıcak suda kaynatılarak ve numunelere zarar vermeden mekanik olarak temizlenmişlerdir.

### 6.7. Niobyumlama İşlemi

Borlama işlemine tabi tutulan ve yüzeyleri tamamen temizlenen AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çelikleri termoreaktif difüzyon yöntemi (TRD) ile  $850\text{-}900\text{-}950^\circ\text{C}$  sıcaklıklarda 1, 2, 3 ve 4 saat sürelerde niobyumlama işlemine tabi tutulmuşlardır. Niobyumlama işlemini gerçekleştirme de kullanılan niobyumlama banyosunda ferro-niobyum tozu ( $100 \mu\text{m}$  elek altı), amonyum klorür ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ), alümina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $100 \mu\text{m}$  elek altı) ve naftalin kullanılmıştır. Banyo bileşimi ağırlıkça %50 ferro-niobyum + %25 alümina + %12,5 amonyum

klorür + %12,5 naftalin içermektedir. Niobyumlama işleminde kullanılan banyo elemanlarından ferro-niobyum banyo içerisinde bulunan numunelere niobyum kaynağı olmuştur. Alümina ( $Al_2O_3$ ); inert dolgu malzemesi ve ferro-niobyum tozlarının sinterlenmesini engellemek, amonyum klorür ( $NH_4Cl$ ) aktivatör olarak, naftalin ise ortamdaki kalıntı oksijeni düşük sıcaklıklarda ortamdan süpürmek, uzaklaştırmak için kullanılmışlardır.

### **6.8. Metalografik İnceleme**

Niobyum borür kaplanan numuneler, metalografik inceleme için orta kısımlarından kesilerek, kesilen yüzeyleri görülecek şekilde kalıba alınmıştır. Kalıplanan numuneler 100, 220, 400, 800 ve 1200 grid' lik zımparalama işlemlerine tabi tutulduktan sonra  $1\ \mu m$ ' luk alümina pasta kullanılarak parlatma işlemine tabi tutulmuşlardır. Metalografik olarak parlatılmış olan yüzeyler %2' lik nitalle dağlanarak mikroyapılar ortaya çıkarılmıştır.

### **6.9. X-Işınları Difraksiyon Analizi**

Kaplama tabaksında mevcut fazların tespit edilmesinde ve özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan yöntemlerden biri X-ışınları difraksiyon analizidir. X-ışınları difraksiyon analiz yönteminde, genellikle Cu veya Co gibi elementlerden elde edilen  $K\alpha$  karakteristik ışın demeti, analiz edilecek numune üzerine gönderilmektedir. Işın demeti analizleri gerçekleştirilen numunelerin üç boyutlu kristal yapılarında difraksiyona uğrayarak analize tabi tutulan numuneye has difraksiyon paterni elde edilmektedir. Bu paternlerin incelenmesi standart paternler ile karşılaştırılarak yapılmaktadır. Karşılaştırma sırasında standart ASTM kartlarından yararlanılmıştır.

### **6.10. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Elementel Analiz İncelemesi**

850°C, 900°C ve 950°C sıcaklıklarda 4 saat süre ile niobyum borür kaplanmış AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çeliklerinin metalografik olarak

incelenen yüzeylerinin mikroyapı görüntüleri ve elementel analiz dağılımları taramalı elektron mikroskobunda (SEM) gerçekleştirilmiştir.

### **6.11. Sertlik Ölçümü**

Niobyum borür kaplamaların gerçekleştirildiği AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çeliklerinin kaplama yüzeylerinden Future Tech FM 700 marka mikro sertlik cihazında Vickers sertlik ucu kullanılarak yük altında sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

### **6.12. Aşınma Özellikleri**

Aşınma deneyleri ASTM G-99 standardına uygun olan tribometre cihazında gerçekleştirilmiştir. Deneyler Ball-On Disk metoduyla, 9.5 mm çapında alümina ve AISI 52100 çelik bilyeler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneyleri 1N, 2N ve 5N yükler altında 180 m mesafede, 0.1 m/s, 0.3 m/s ve 0.5 m/s hızlarda gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneyleri sonrasında oluşan aşınma izleri optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve EDS analizleri ile incelenmişlerdir.

## **BÖLÜM 7. SONUÇLAR VE İRDELEME**

### **7.1. Giriş**

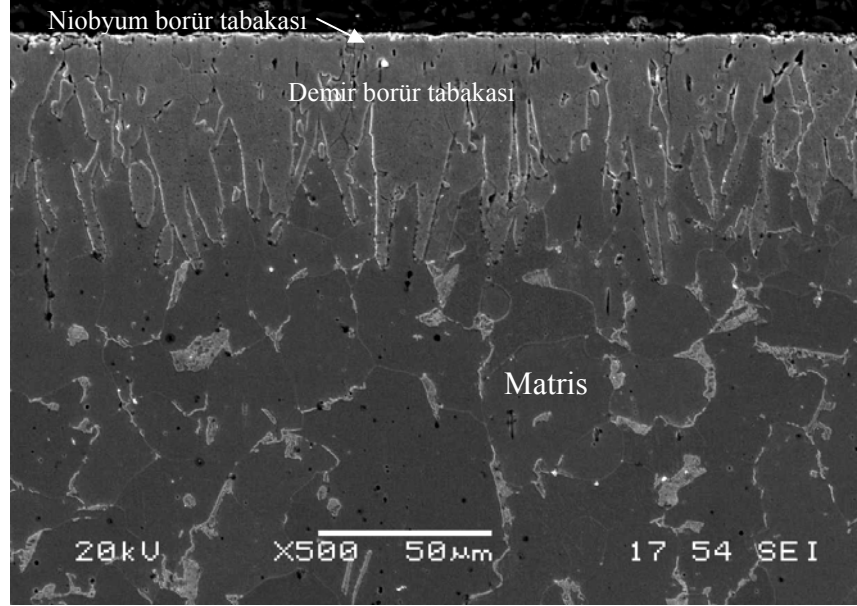
Bu çalışmada, Tablo 6.1.' de kimyasal bileşimleri verilen AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çelikleri, içerisinde %65 Boraks, %20 ferro-silisyum ve %15 borik asit olan sıvı boraks banyosunda borlama işlemine tabi tutulmuşlardır. AISI 1010 ve AISI 4140 çelikleri için 900°C' de, AISI M2 ve AISI D2 çelikleri için 1000°C' de 2 saat süre ile borlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Borlanan çelikler 850°C, 900°C ve 950°C sıcaklıklarda 1, 2, 3 ve 4 saat sürelerde ferro-niobyum, amonyum klorür (NH<sub>4</sub>Cl), alümina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), ve naftalinden oluşan bir banyoda termoreaktif difüzyon yöntemi kullanılarak niobyumlama işlemine tabi tutulmuşlardır.

Niobyum borür kaplanan malzemelerin mikroyapıları, yüzeyleri, kaplama tabakaları, kaplama matris ara yüzeyleri; klasik metalografi teknikleri, X-ışınları difraksiyon analizi, taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemesi ve SEM-EDS analizleri ile incelenmiştir. Ayrıca, 950°C' de 4 saat süre ile niobyum borür kaplanan AISI 1010, AISI 4140, AISI M2 ve AISI D2 çeliklerinden numuneler alınarak, 1N, 2N ve 5N yükler altında 0.1, 0.3 ve 0.5 m/s hızlarda 180 metre mesafede aşınma deneyi gerçekleştirilmiştir. Aşınma işleminin ardından numunelerin aşınma bölgelerinden SEM ve EDS analizleri gerçekleştirilmiştir.

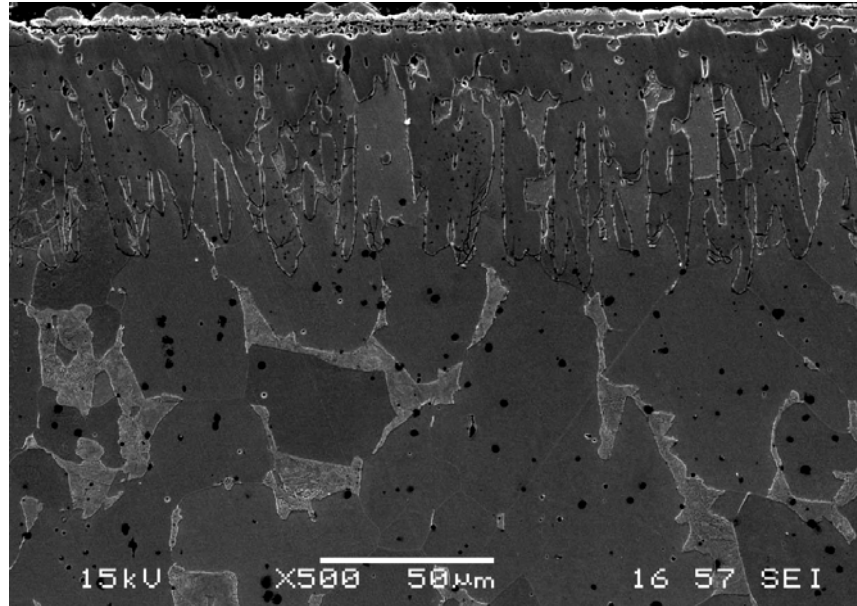
### **7.2. Metalografik İnceleme**

Klasik metalografi tekniklerinden faydalanılarak hazırlanan numuneler üzerinde taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri neticesinde, kaplama işlemine tabi tutulan bütün numunelerde kaplama matris tabakası, kaplama matris ara yüzeyi ve matris açık bir şekilde ortaya çıkmıştır. Şekil 7.1-7.12 de sırasıyla AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çeliklerinin 850°C, 900°C ve 950°C

sıcaklıklarda 2 ve 4 saat sürelerde niobyum borür kaplamalarının SEM mikrografları verilmektedir.

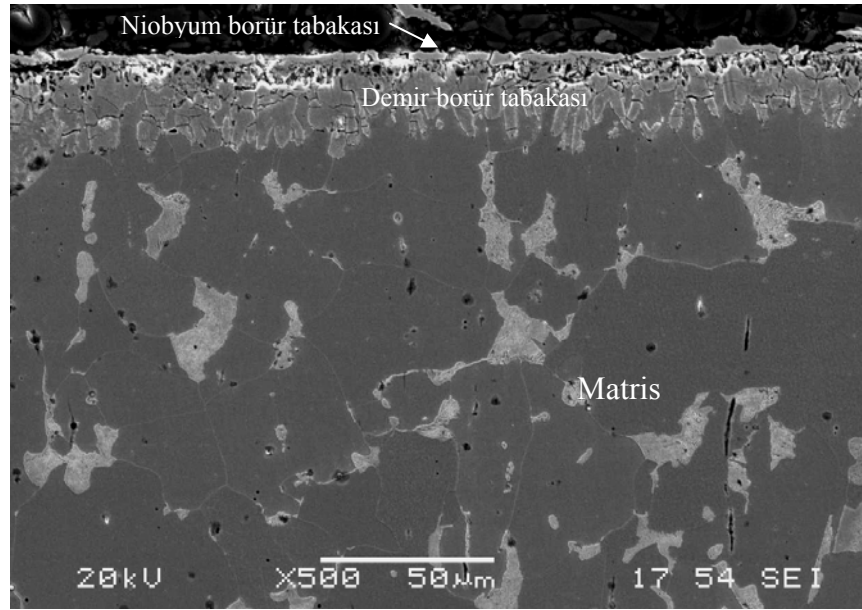


(a)

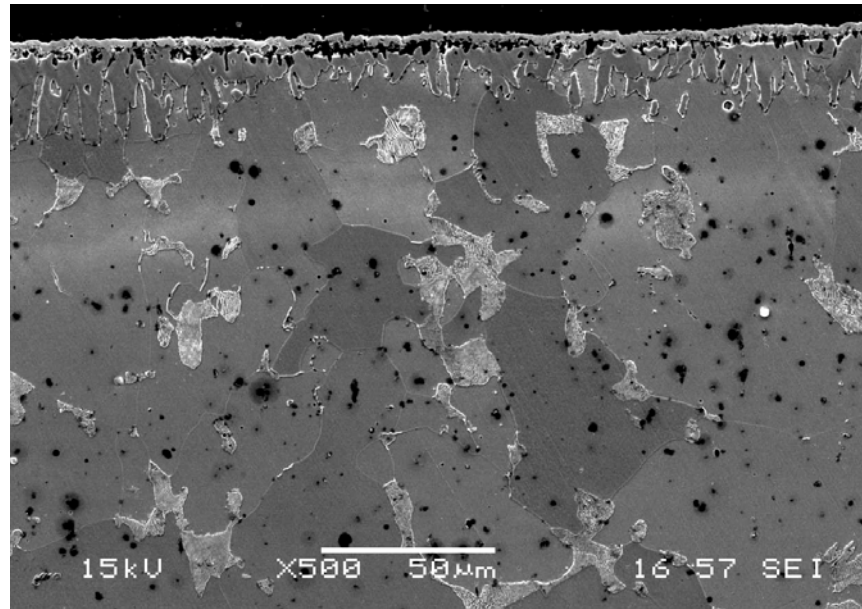


(b)

Şekil 7.1. 850°C sıcaklıkta (a) 2 saat ve (b) 4 saat süre ile niobyum borür kaplanmış olan AISI 1010 çeliğinin SEM mikroyapısı



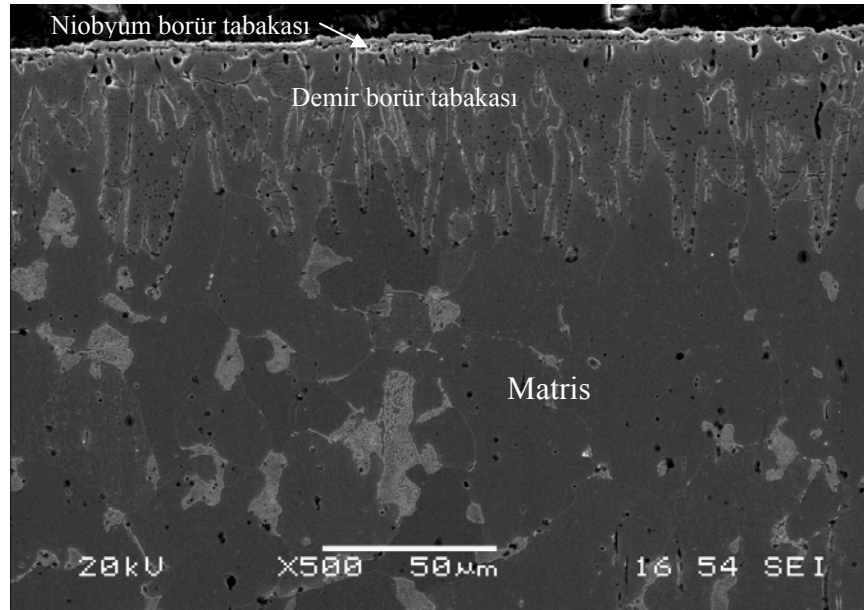
(a)



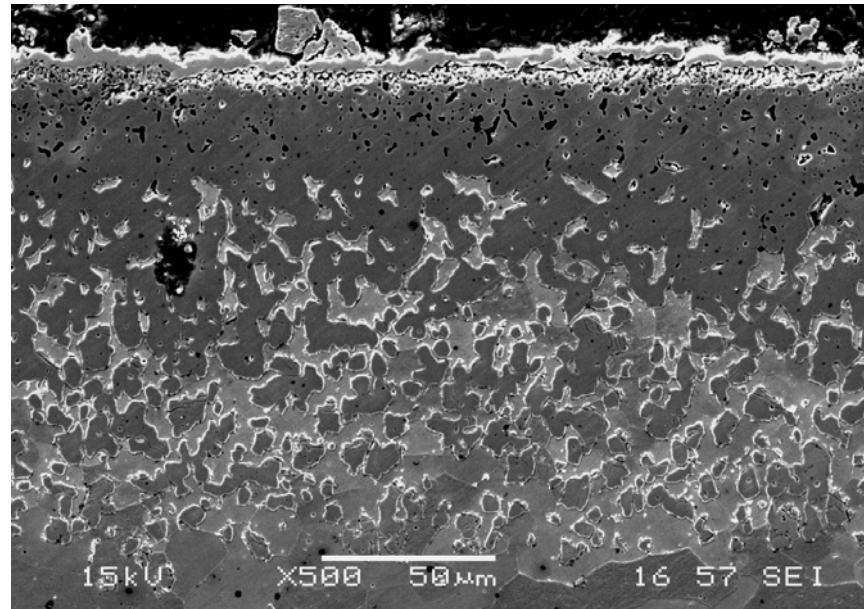
(b)

Şekil 7.2. 900°C sıcaklıkta (a) 2 saat ve (b) 4 saat süre ile niobyum borür kaplanmış olan AISI 1010 çeliğinin SEM mikroyapısı



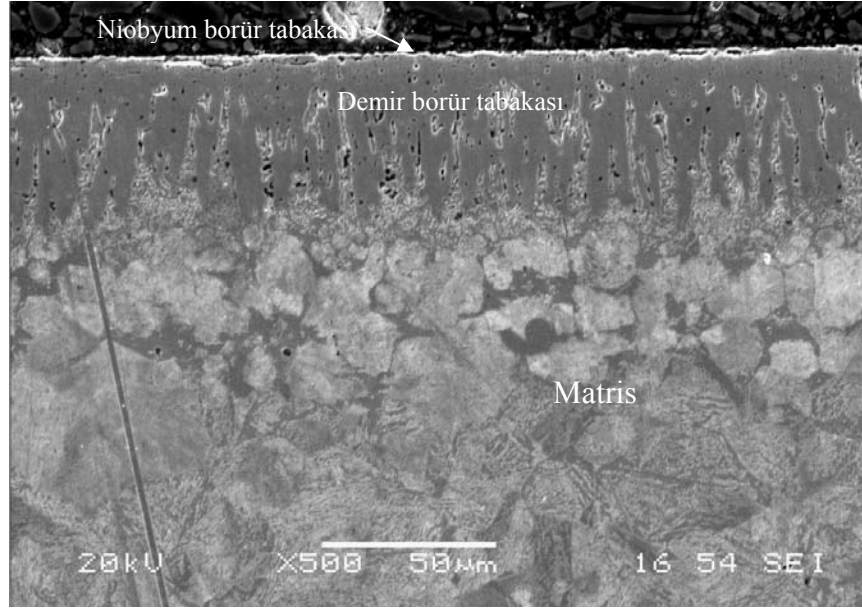


(a)

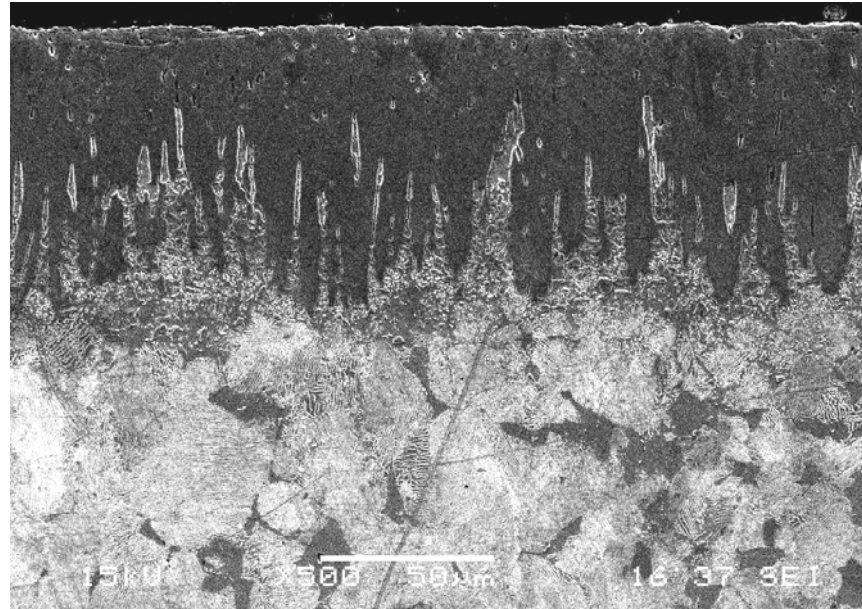


(b)

Şekil 7.3. 950°C sıcaklıkta (a) 2 saat ve (b) 4 saat süre ile niobyum borür kaplanmış olan AISI 1010 çeliğinin SEM mikroyapısı

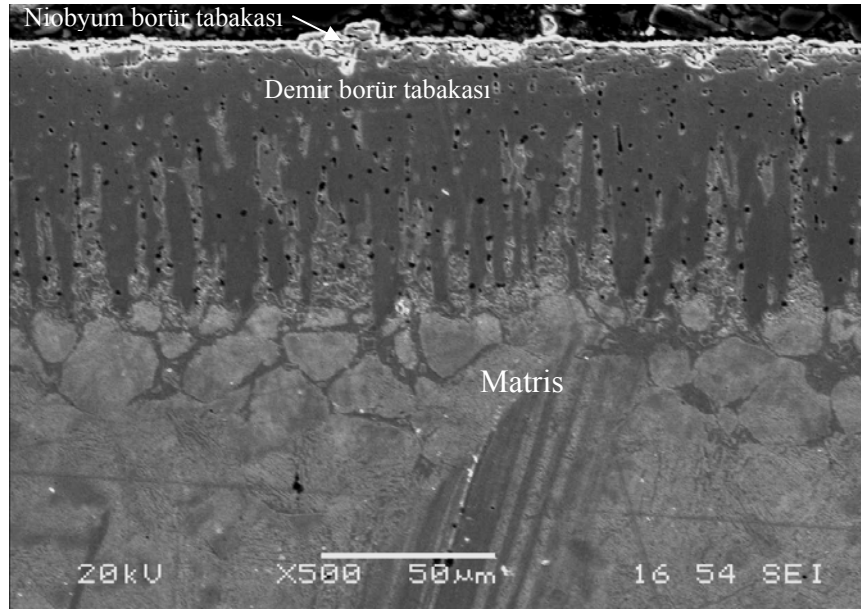


(a)

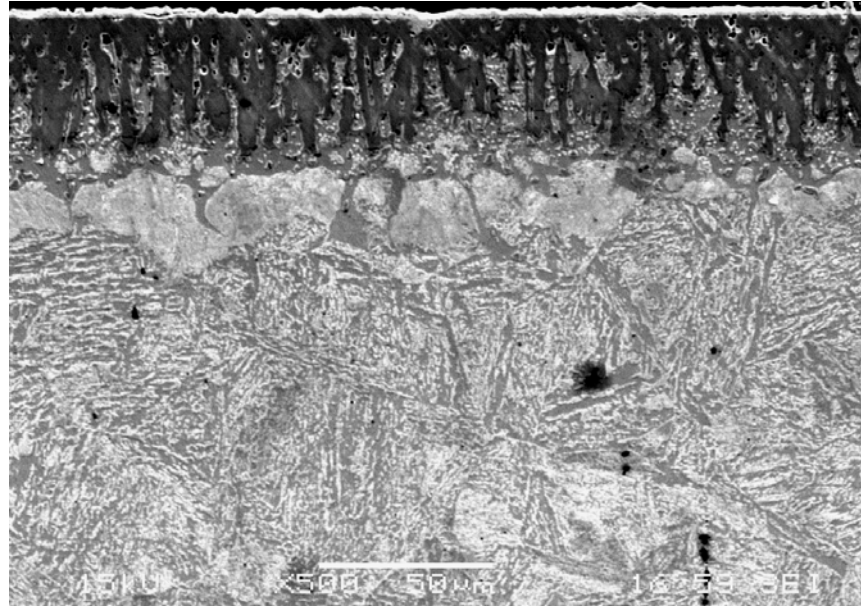


(b)

Şekil 7.4. 850°C sıcaklıkta (a) 2 saat ve (b) 4 saat süre ile niobyum borür kaplanmış olan AISI 4140 çeliğinin SEM mikroyapısı

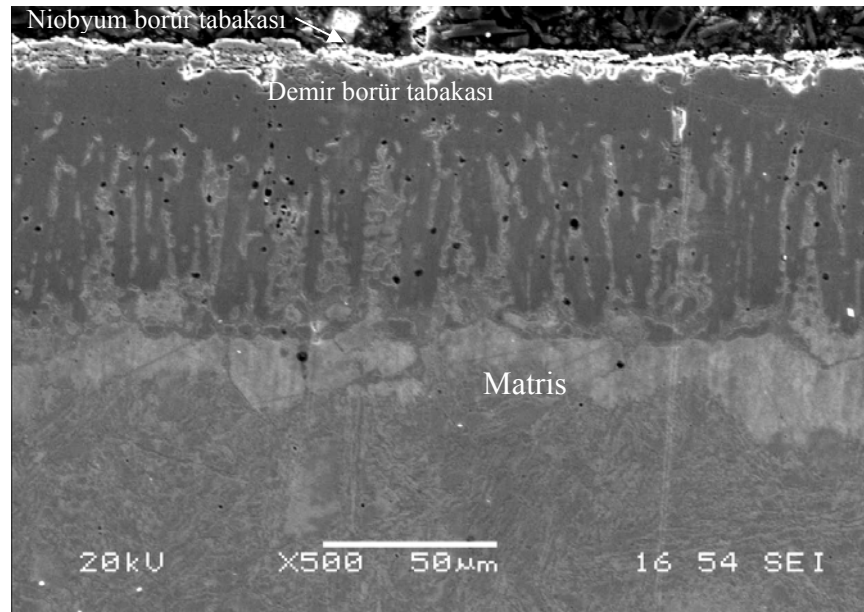


(a)

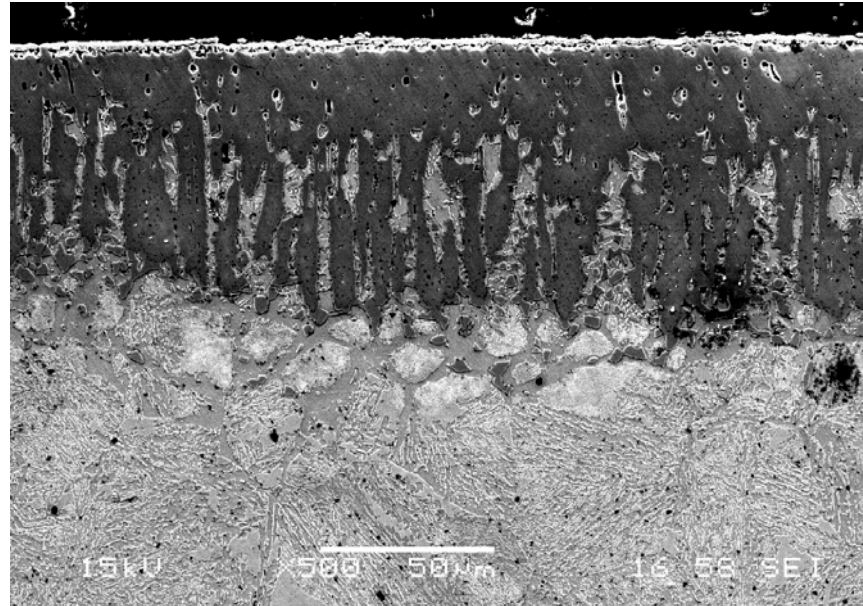


(b)

Şekil 7.5. 900°C sıcaklıkta (a) 2 saat ve (b) 4 saat süre ile niobyum borür kaplanmış olan AISI 4140 çeliğinin SEM mikroyapısı

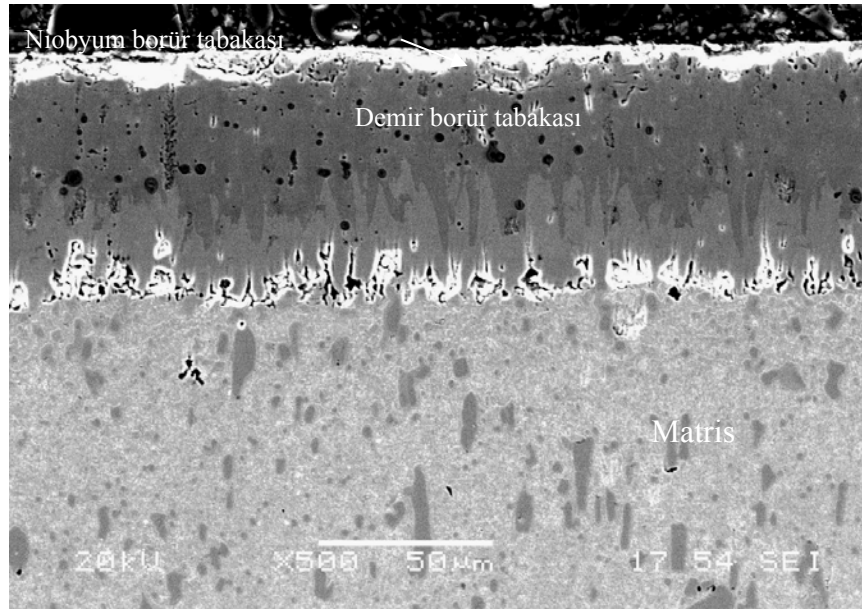


(a)

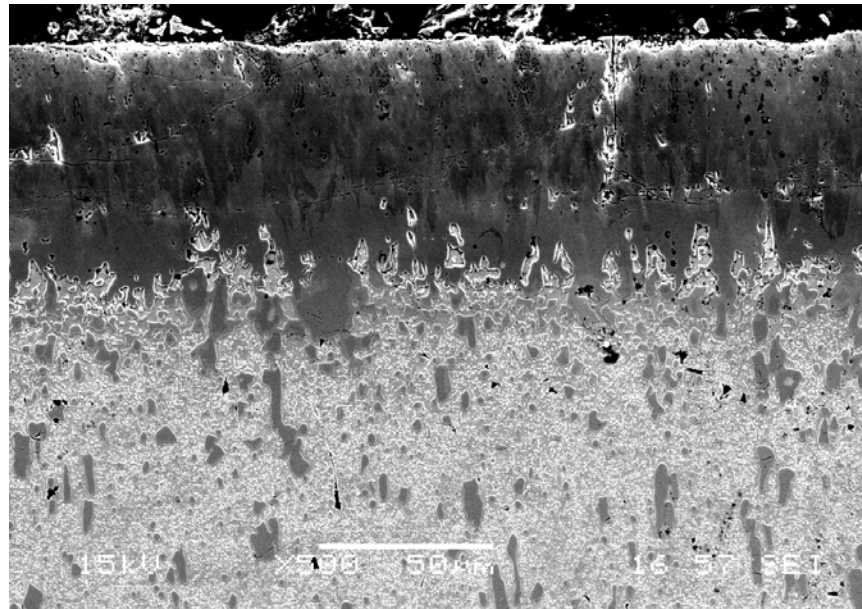


(b)

Şekil 7.6. 950°C sıcaklıkta (a) 2 saat ve (b) 4 saat süre ile niobyum borür kaplanmış olan AISI 4140 çeliğinin SEM mikroyapısı

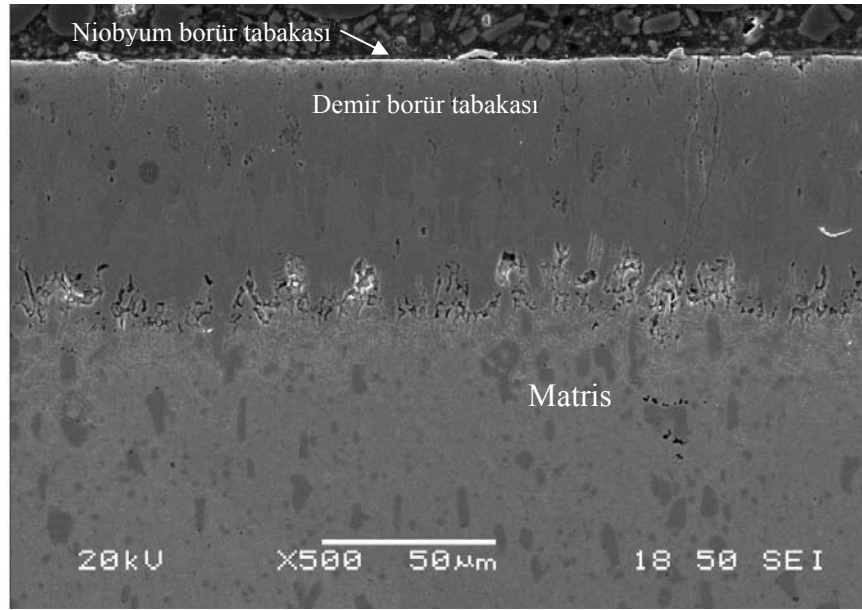


(a)

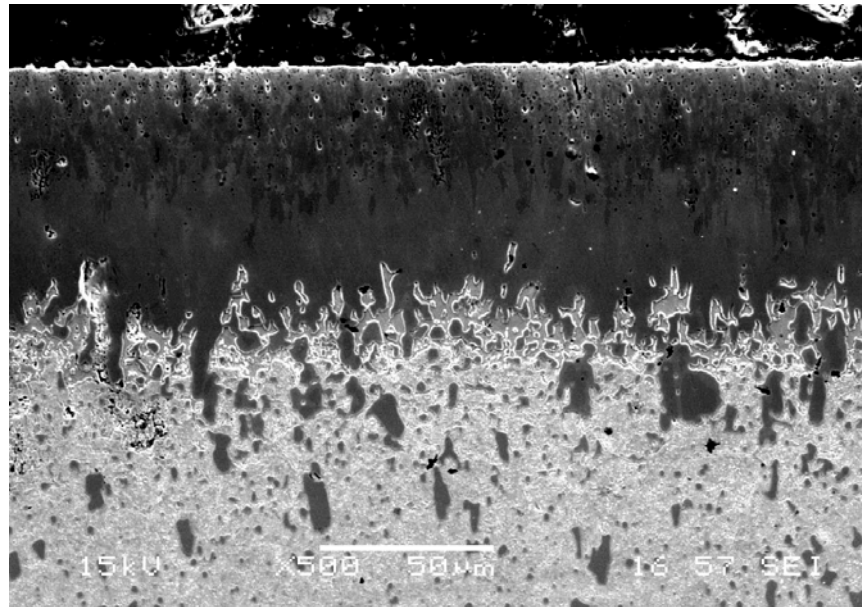


(b)

Şekil 7.7. 850°C sıcaklıkta (a) 2 saat ve (b) 4 saat süre ile niobyum borür kaplanmış olan AISI D2 çeliğinin SEM mikroyapısı

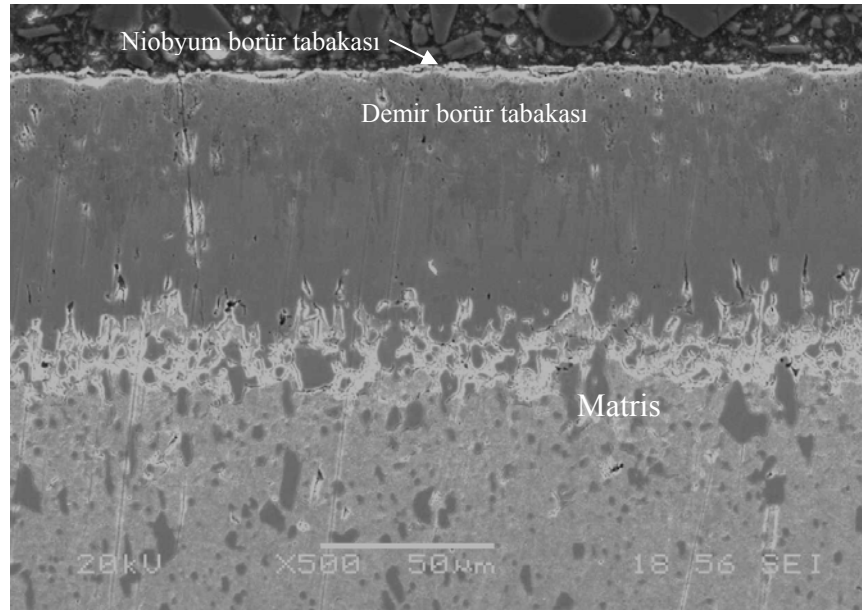


(a)

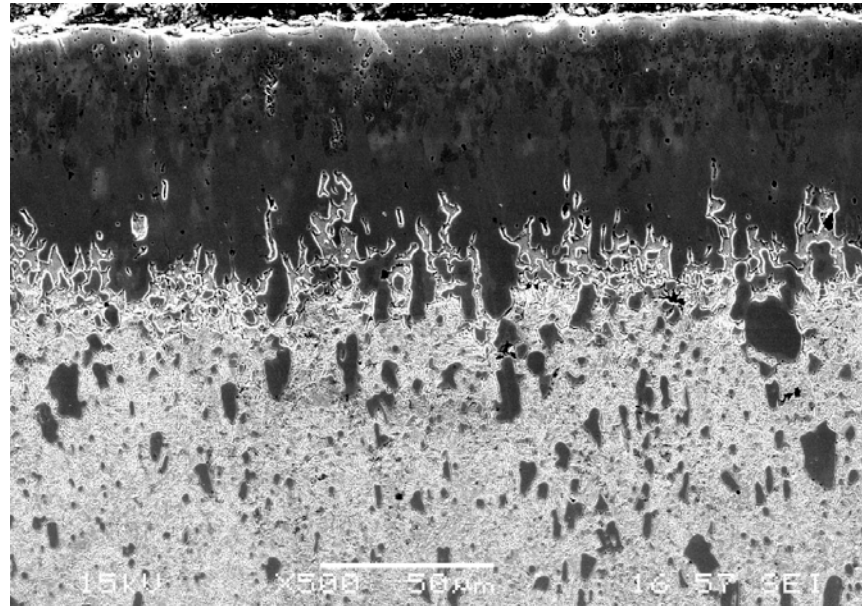


(b)

Şekil 7.8. 900°C sıcaklıkta (a) 2 saat ve (b) 4 saat süre ile niobyum borür kaplanmış olan AISI D2 çeliğinin SEM mikroyapısı

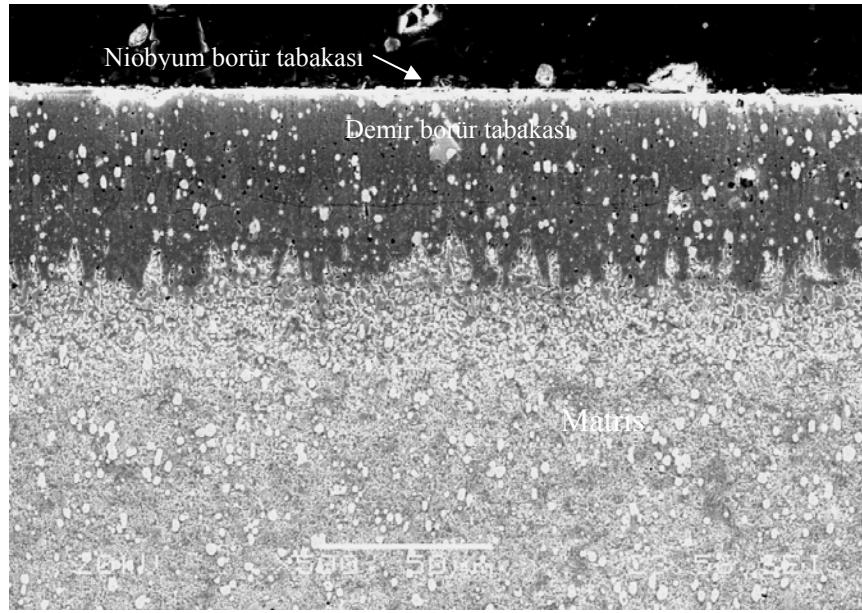


(a)

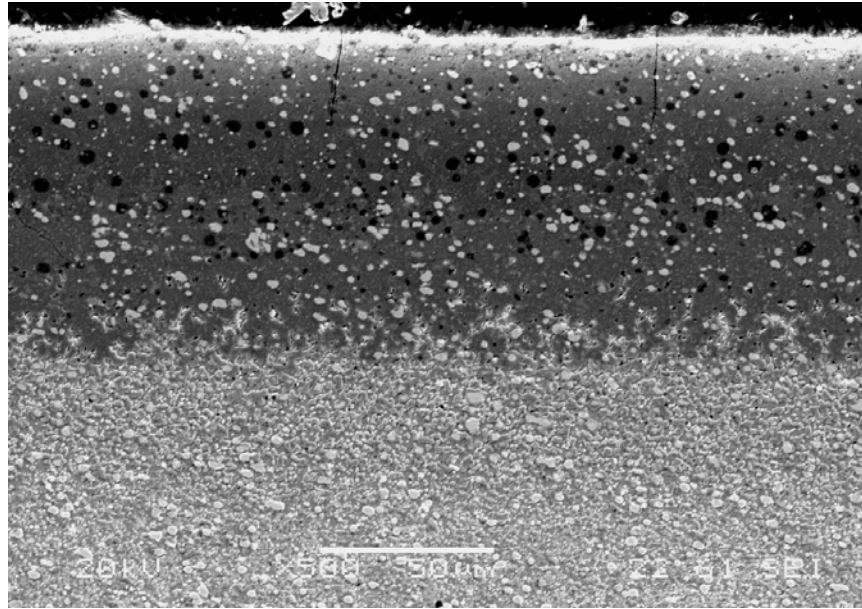


(b)

Şekil 7.9. 950°C sıcaklıkta (a) 2 saat ve (b) 4 saat süre ile niobyum borür kaplanmış olan AISI D2 çeliğinin SEM mikroyapısı



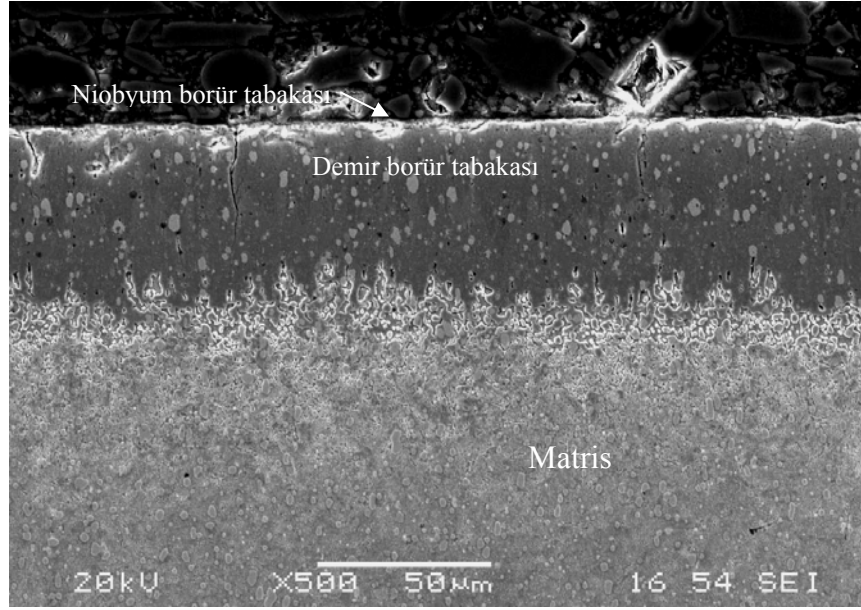
(a)



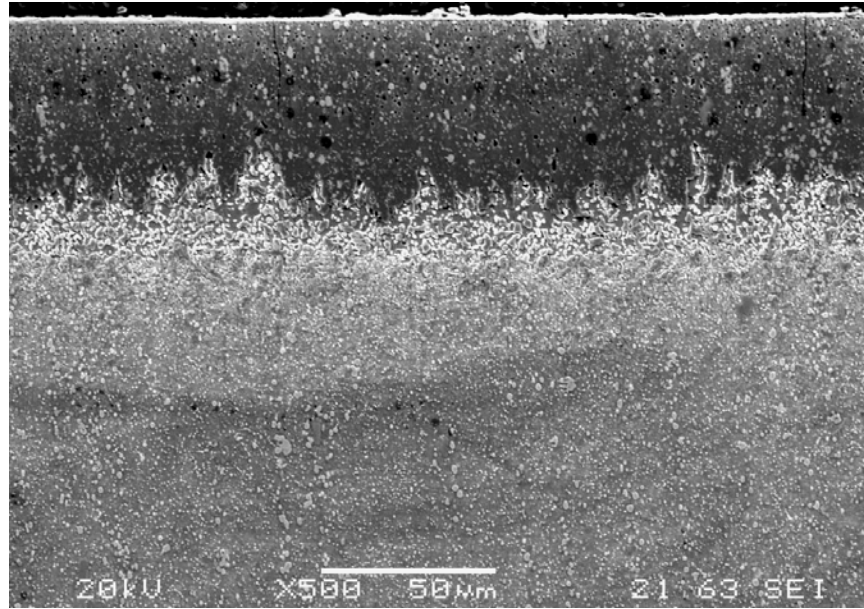
(b)

Şekil 7.10. 850°C sıcaklıkta (a) 2 saat ve (b) 4 saat süre ile niobyum borür kaplanmış olan AISI M2 çeliğinin SEM mikroyapısı



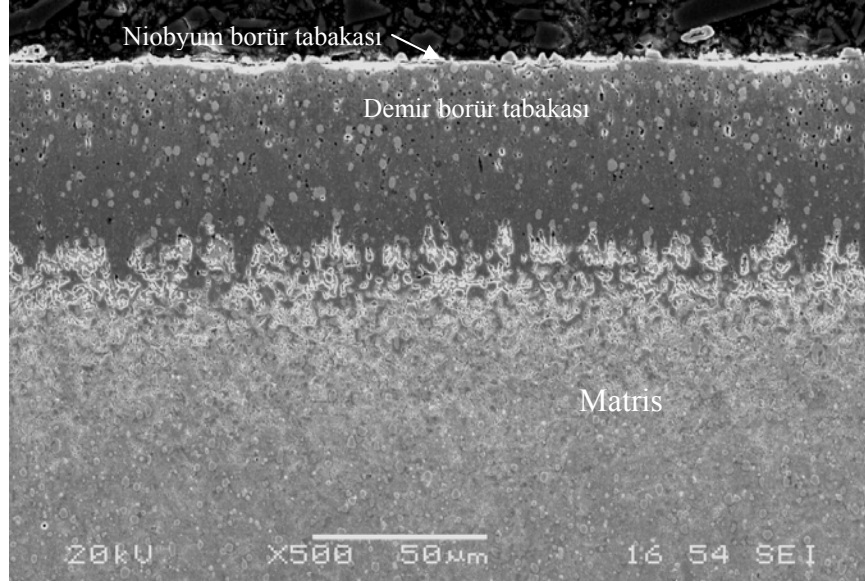


(a)

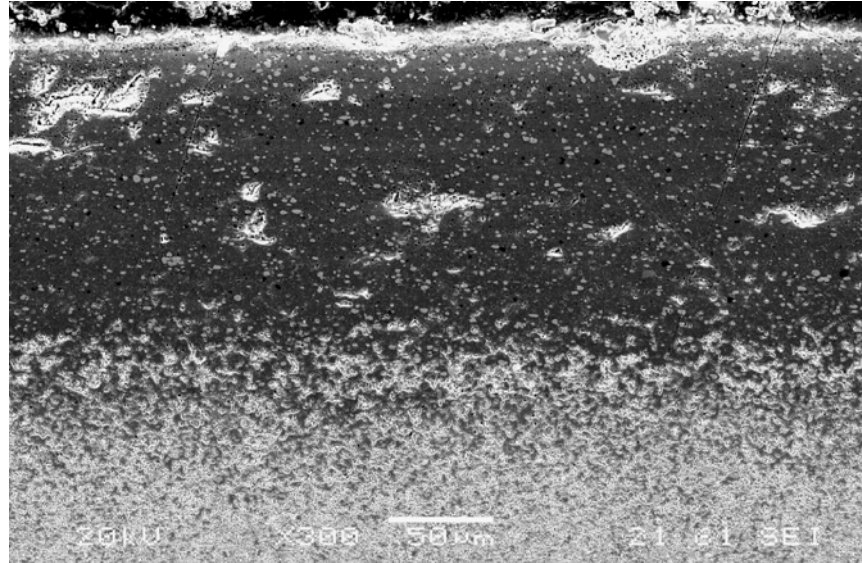


(b)

Şekil 7.11. 900°C sıcaklıkta (a) 2 saat ve (b) 4 saat süre ile niobyum borür kaplanmış olan AISI M2 çeliğinin SEM mikroyapısı



(a)



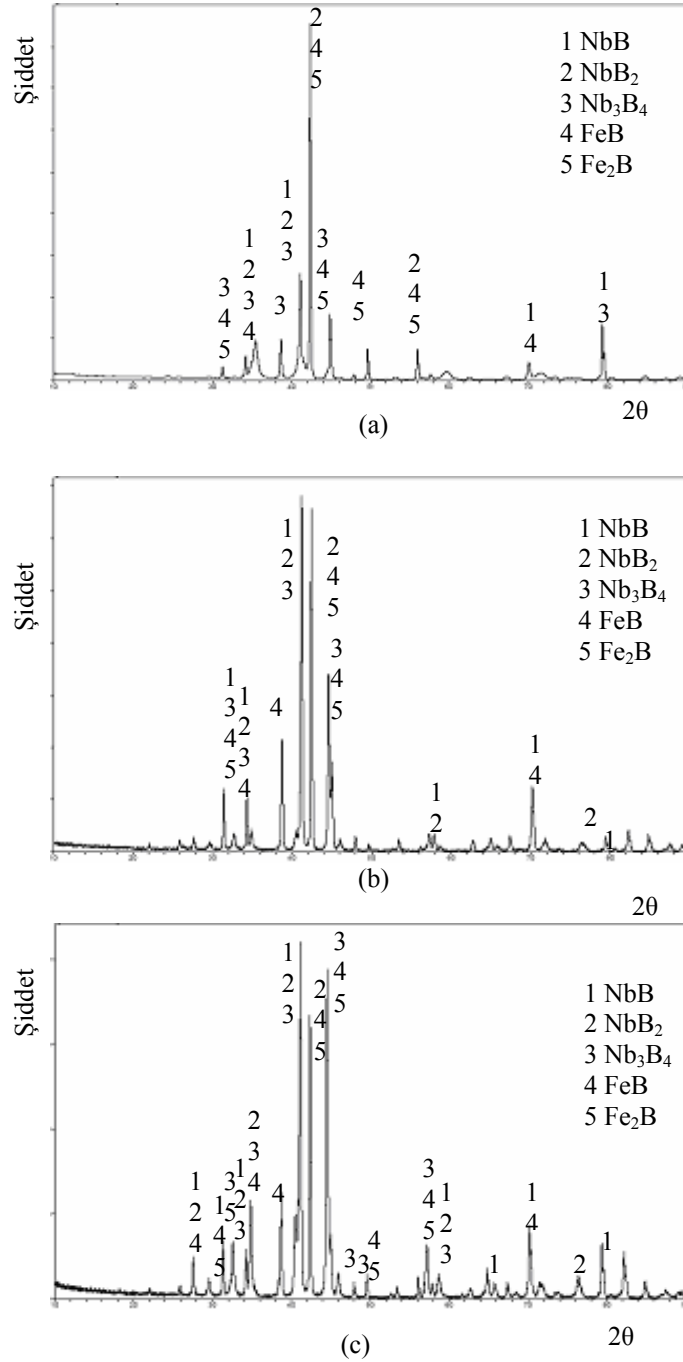
(b)

Şekil 7.12. 950°C sıcaklıkta (a) 2 saat ve (b) 4 süre ile niobyum borür kaplanmış olan AISI M2 çeliğinin SEM mikroyapısı

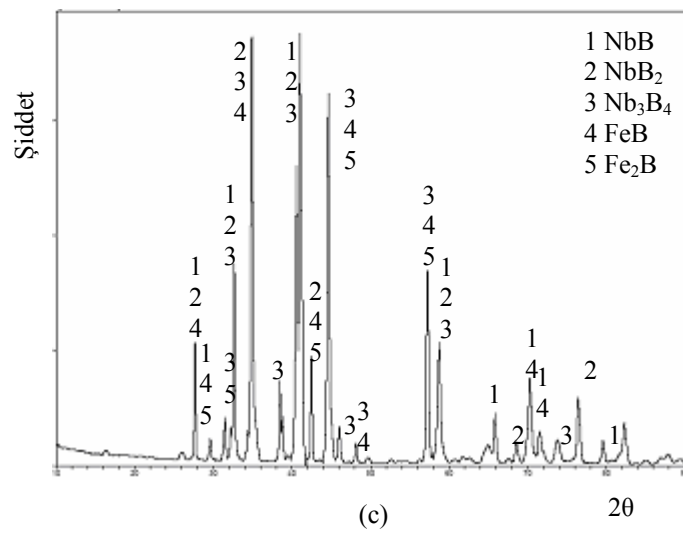
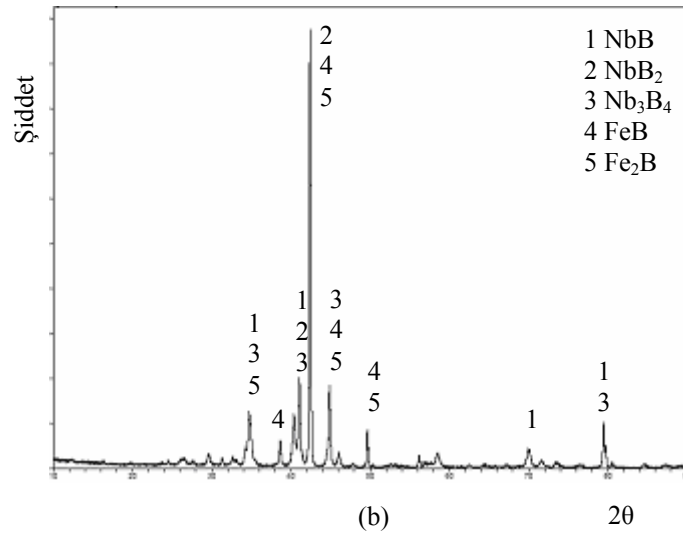
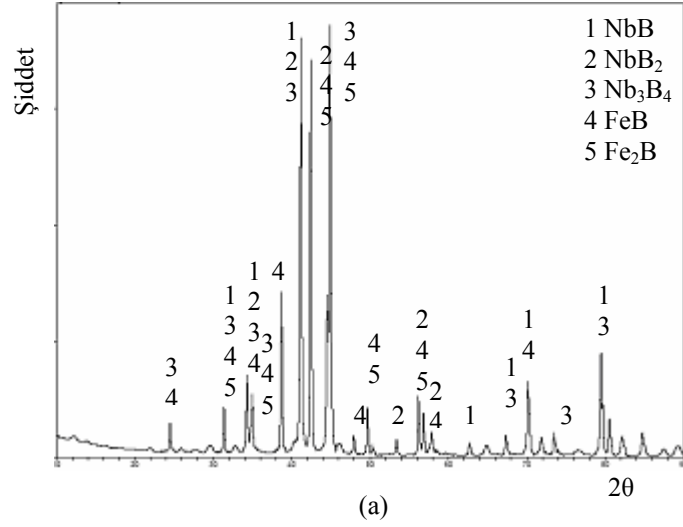
### 7.3. X-Işınları Difraksiyon Analizi

Niobyum borür kaplanan çeliklerin yüzeyinde meydana gelen kaplama tabakasını meydana getiren fazları tespit edebilmek amacı ile, X-ışınları difraksiyon analiz yöntemi kullanılmıştır. 850°C, 900°C ve 950°C sıcaklıklarda 2 saat süreyle

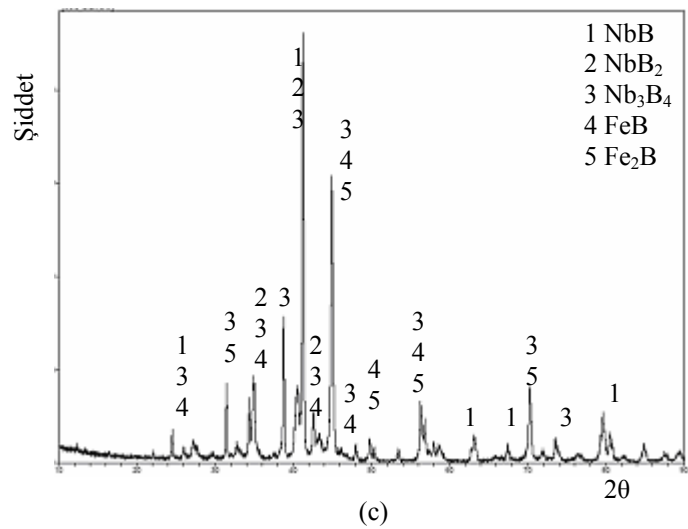
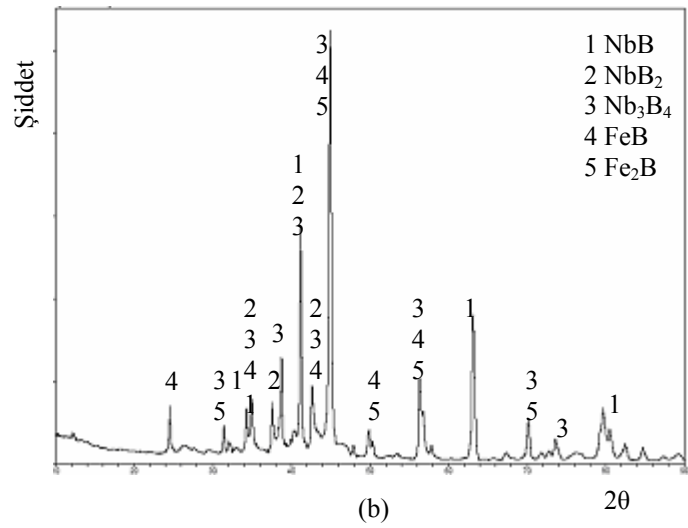
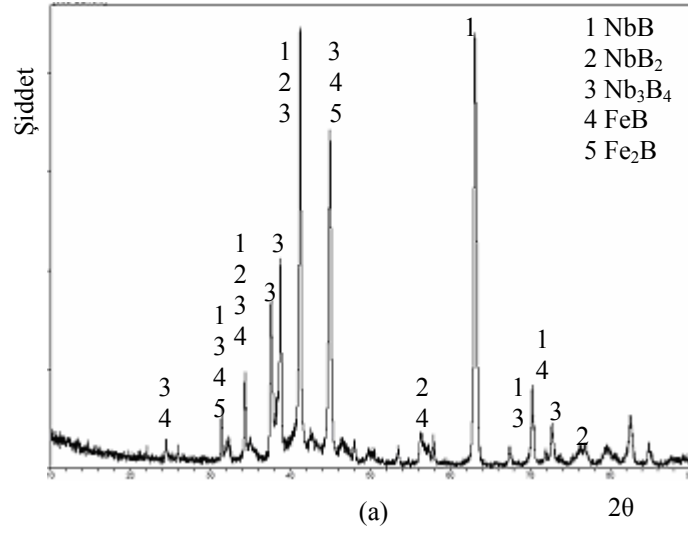
niobyum borür kaplanmış AISI 1010, AISI 4140, AISI M2 ve AISI D2 çeliklerinin X-ışınları difraksiyon analizi gerçekleştirilmiştir. X-ışınları difraksiyon analizleri neticesinde elde edilen diyagramlar Şekil 7.13-7.16 da sırasıyla görülmektedir. Yapılan analizler neticesinde tüm çelik numunelerin yüzeylerinde NbB, NbB<sub>2</sub>, Nb<sub>3</sub>B<sub>4</sub>, FeB ve Fe<sub>2</sub>B fazları tespit edilmiştir.



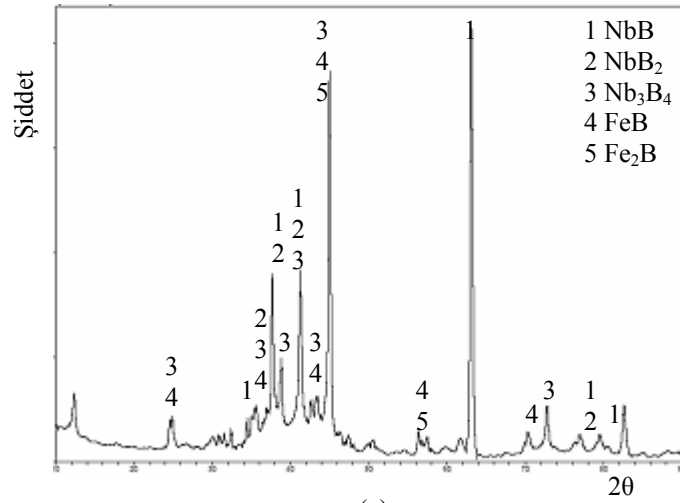
Şekil. 7.13. (a) 850°C, (b) 900°C ve (c) 950°C sıcaklıklarda 2 saat süre ile niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çeliğinin X-ışınları difraksiyon paterni



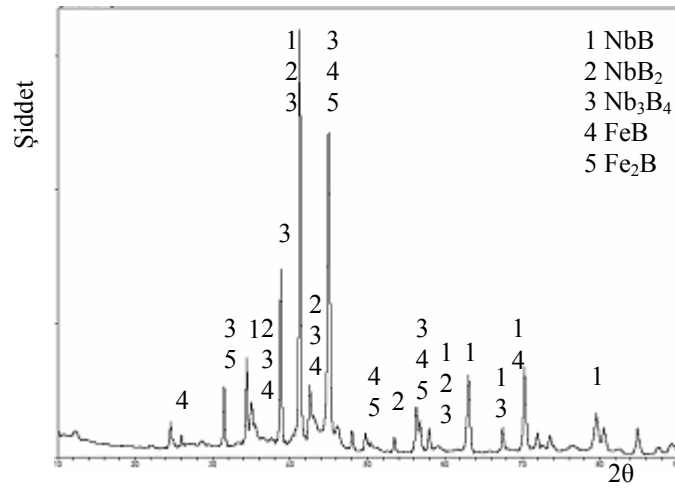
Şekil. 7.14. (a) 850°C, (b) 900°C ve (c) 950°C sıcaklıklarda 2 saat süre ile niyobum borür kaplanmış AISI 4140 çeliğinin X- ışınları difraksiyon paterni



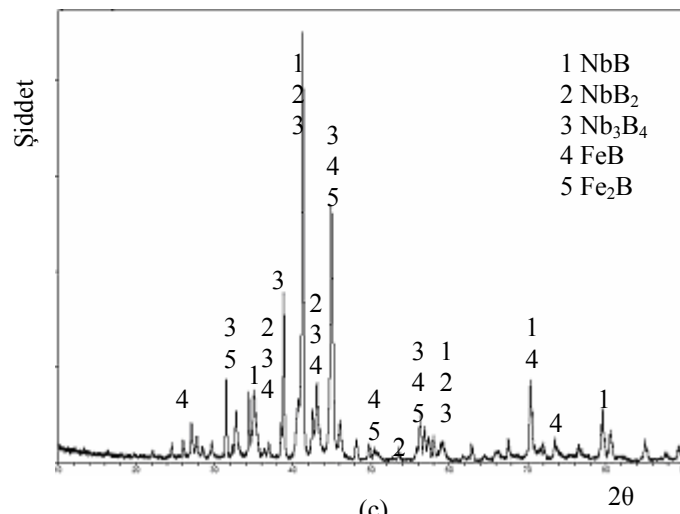
Şekil. 7.15. (a) 850°C, (b) 900°C ve (c) 950°C sıcaklıklarda 2 saat süre ile niobyum borür kaplanmış AISI D2 çeliğinin X-ışınları difraksiyon paterni



(a)



(b)



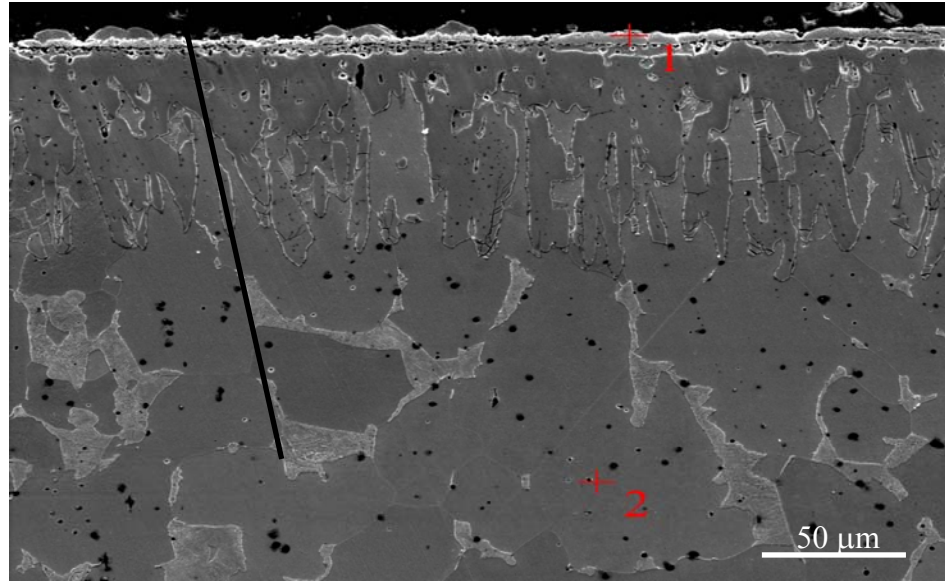
(c)

Şekil. 7.16. (a) 850°C, (b) 900°C ve (c) 950°C sıcaklıklarda 2 saat süre ile niobyum borür kaplanmış AISI M2 çeliğinin X- ışınları difraksiyon paterni

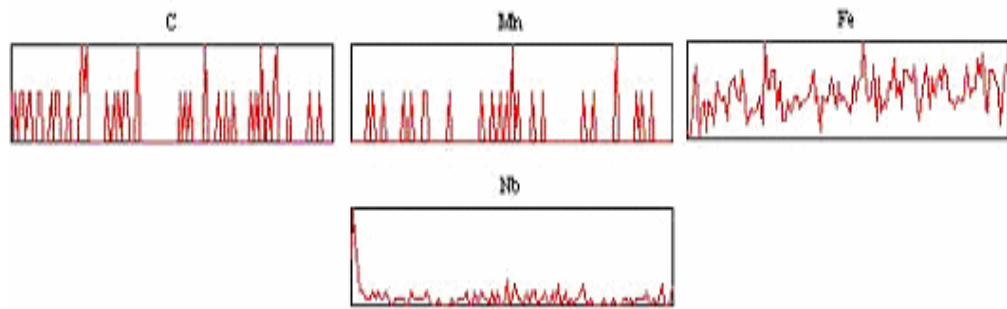
#### **7.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Elementel Analiz (EDS) İncelenmeleri**

850°C, 900°C ve 950°C sıcaklıkta 4 saat süre ile niobyum borür kaplanmış AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çelik yüzeylerinin metalografik olarak incelenen yüzeylerinin mikroyapı görüntüleri ve elementel analiz dağılımları taramalı elektron mikroskobunda gerçekleştirilmiştir. Şekil 7.17-7.28' de sırasıyla 850°C, 900°C ve 950°C sıcaklıklarda 4 saat süreyle niobyum borür kaplanmış çeliklerin SEM mikroyapı görüntüleri ile elementel analizleri, çizgisel ve noktasal olarak gösterilmektedir.

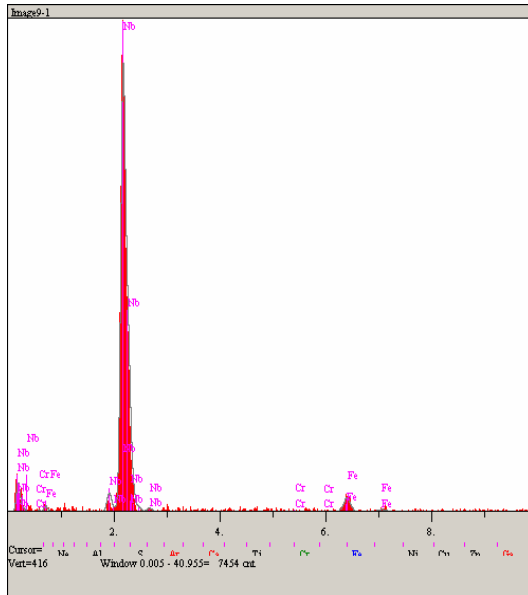
Yapılan analizler neticesinde numunelerin yüzeylerinde niobyum oranlarının yüksek olduğu görülmektedir. Yüzeyden matrise doğru inildikçe niobyum oranında azalma, diğer elementlerin (Fe, Mo, Mn v.b.) oranlarında artış görülmüştür.



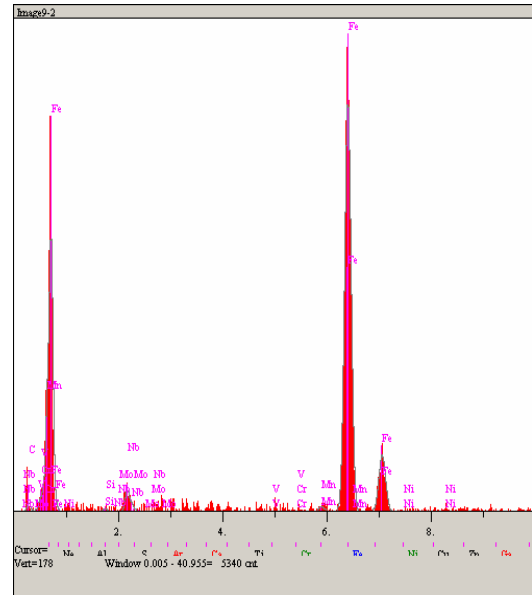
(a)



(b)



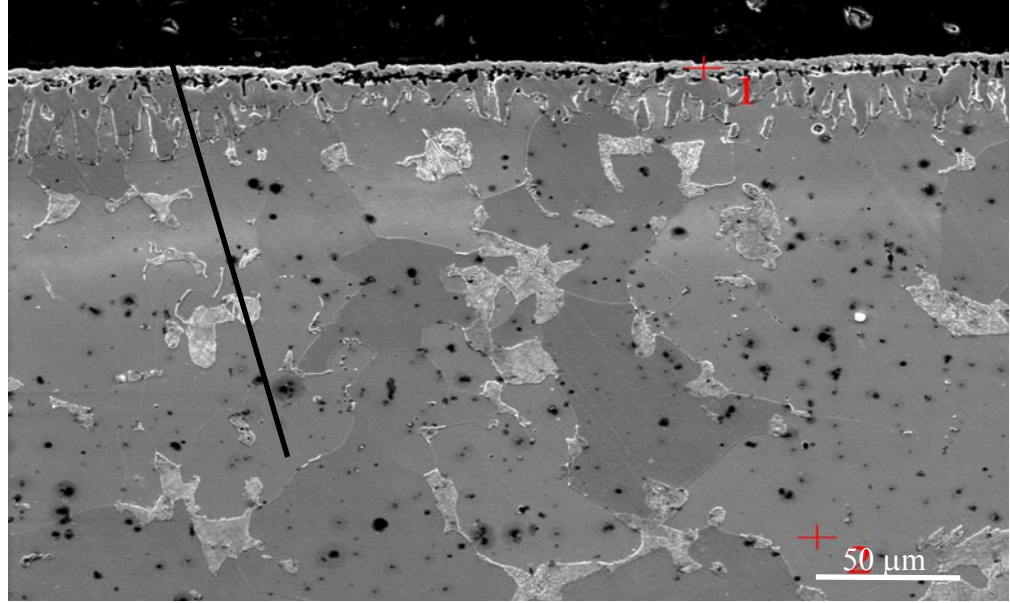
(c)



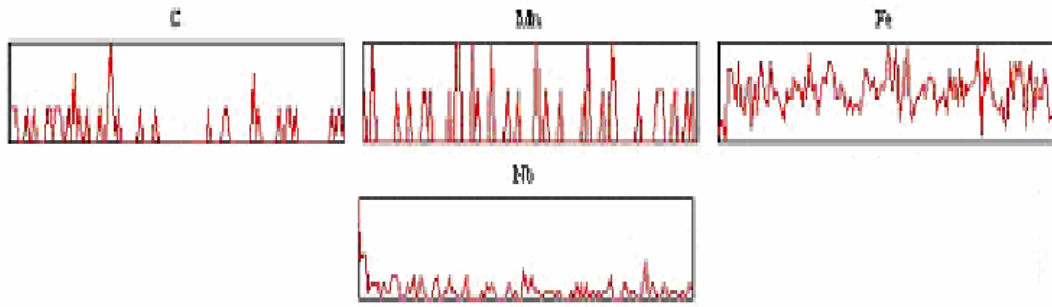
(d)

Şekil 7.17. 850°C' de 4 saat süre ile niyumborür kaplanan AISI 1010 çelik numunenin kaplama tabakasının (a) SEM mikroyapı görüntüsü (b) Kaplama tabakası boyunca elementlerin lineer analiz dağılımı (c) Kaplama tabakasının EDS analizi (d) AISI 1010 çeliğinin EDS analizi

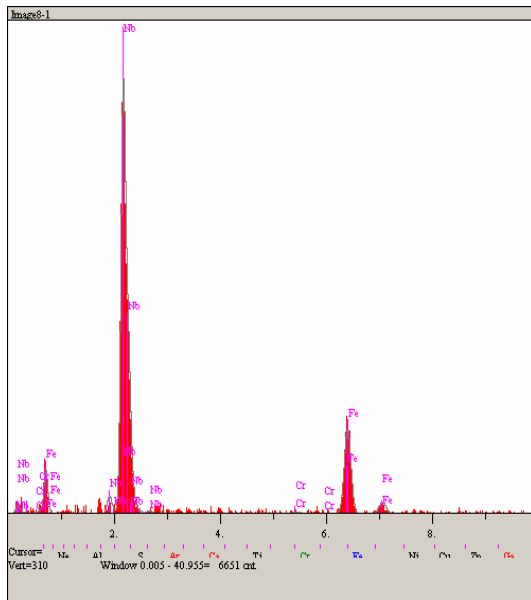




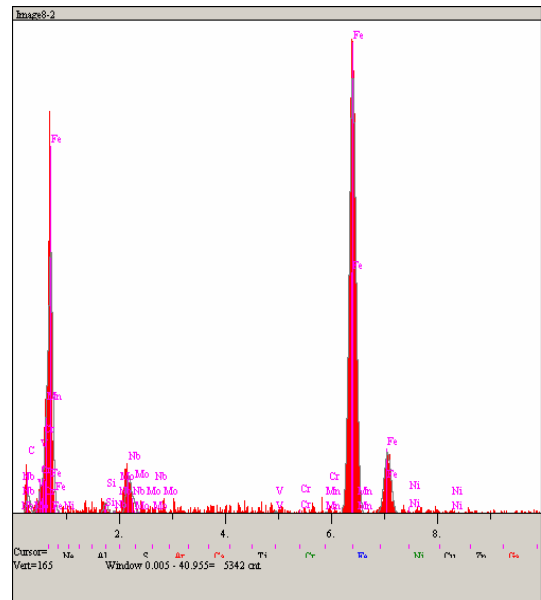
(a)



(b)

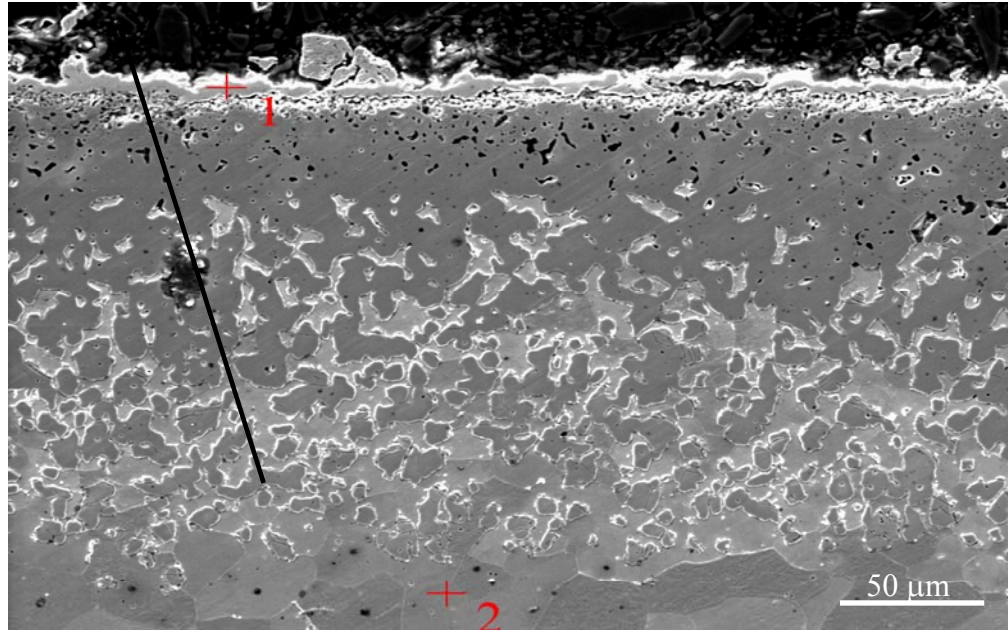


(c)

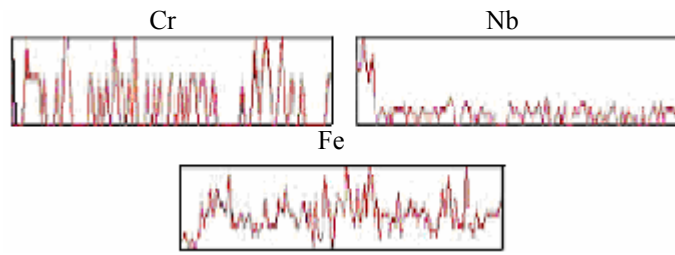


(d)

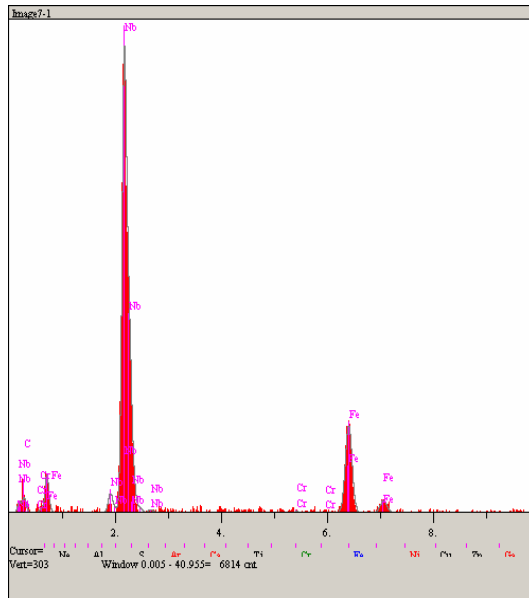
Şekil 7.18. 900°C’ de 4 saat süre ile niyobum borür kaplanan AISI 1010 çelik numunenin kaplama tabakasının (a) SEM mikroyapı görüntüsü (b) Kaplama tabakası boyunca elementlerin lineer analiz dağılımı (c) Kaplama tabakasının EDS analizi (d) AISI 1010 çeliğinin EDS analizi



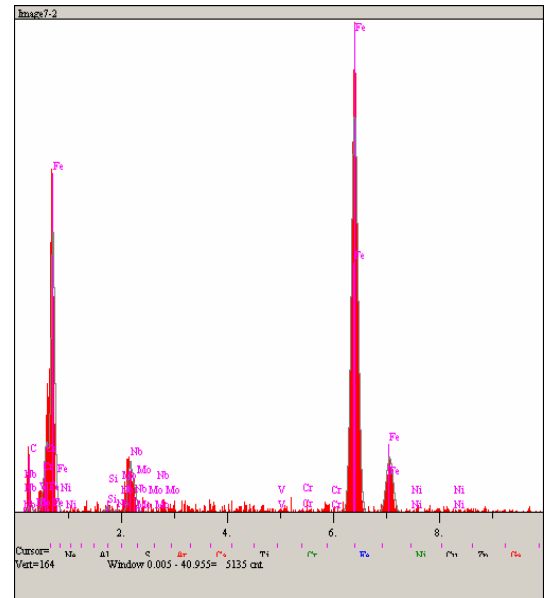
(a)



(b)

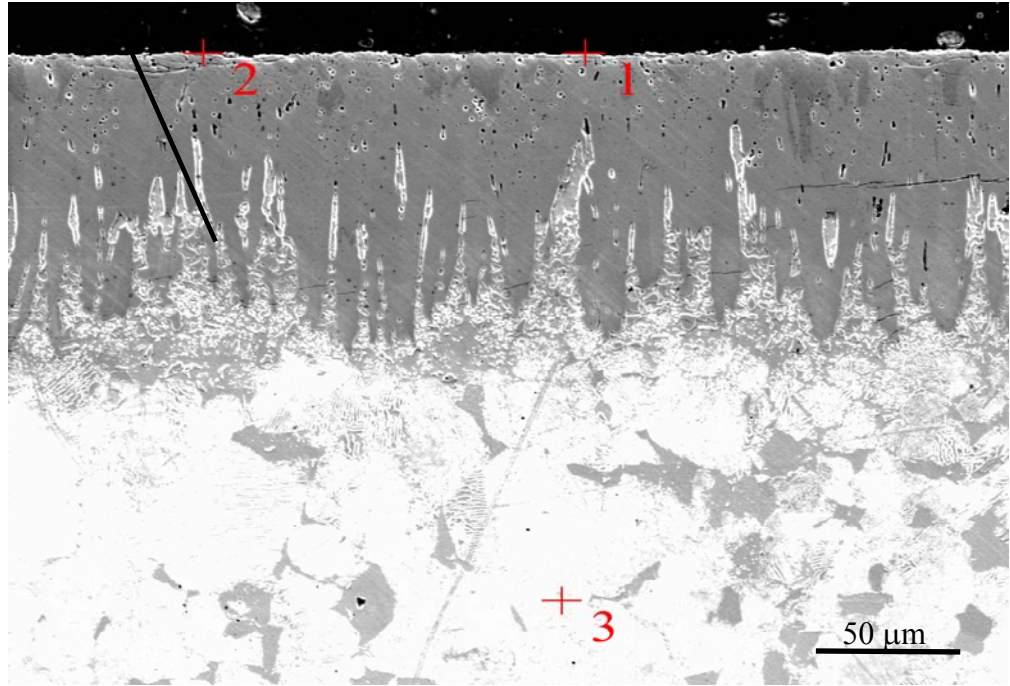


(c)

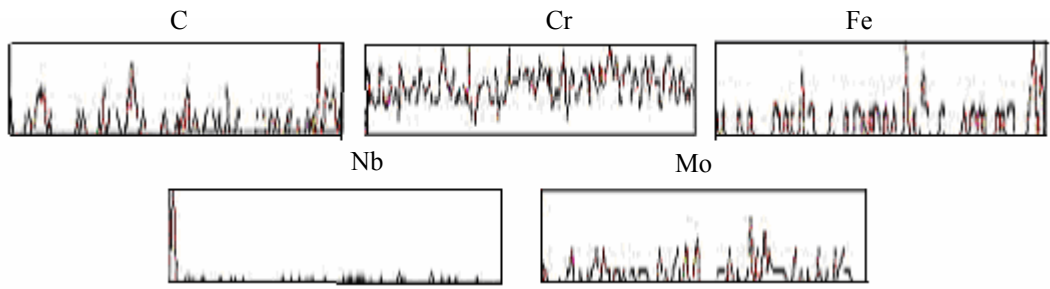


(d)

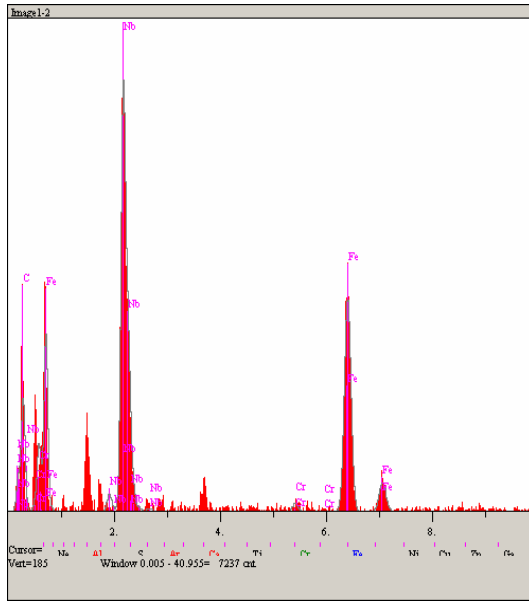
Şekil 7.19. 950°C' de 4 saat süre ile niyobum borür kaplanan AISI 1010 çelik numunenin kaplama tabakasının (a) SEM mikroyapı görüntüsü (b) Kaplama tabakası boyunca elementlerin lineer analiz dağılımı (c) Kaplama tabakasının EDS analizi (d) AISI 1010 çeliğinin EDS analizi



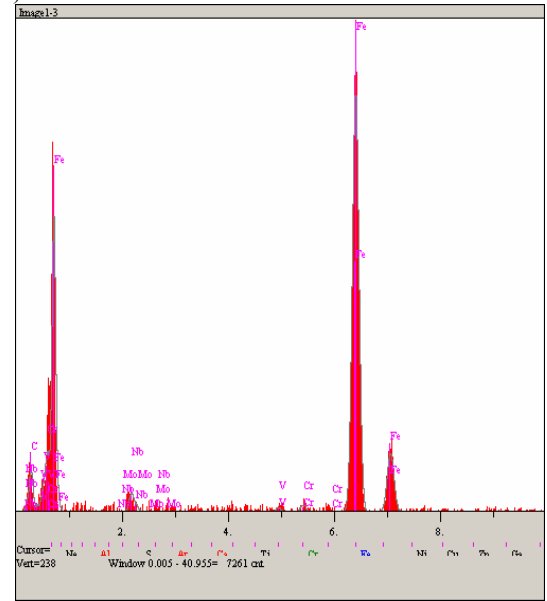
(a)



(b)

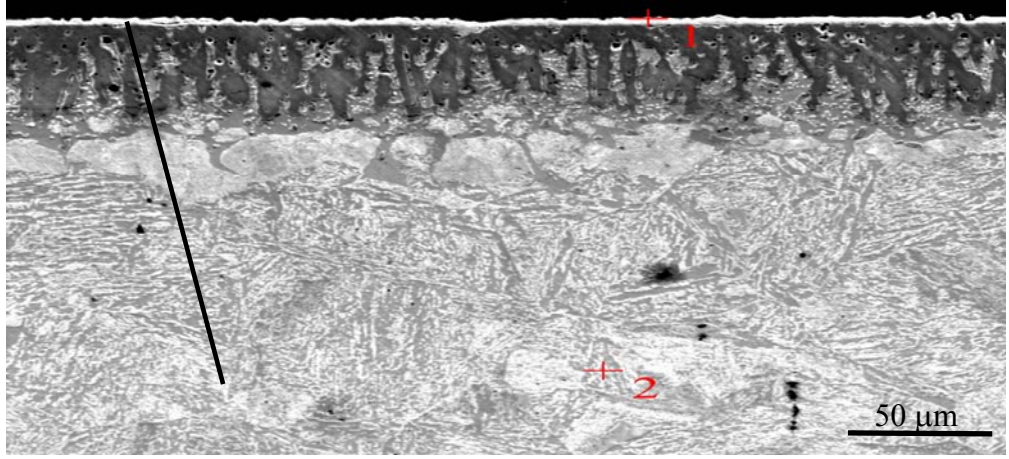


(c)

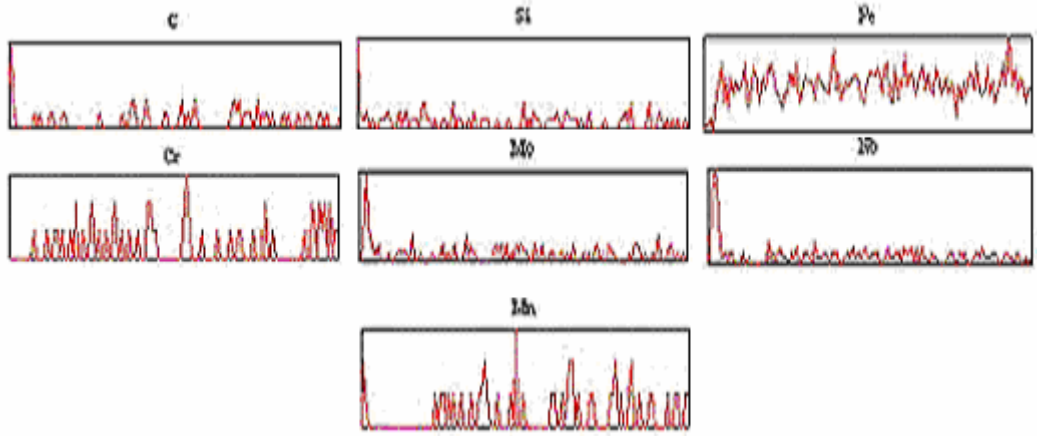


(d)

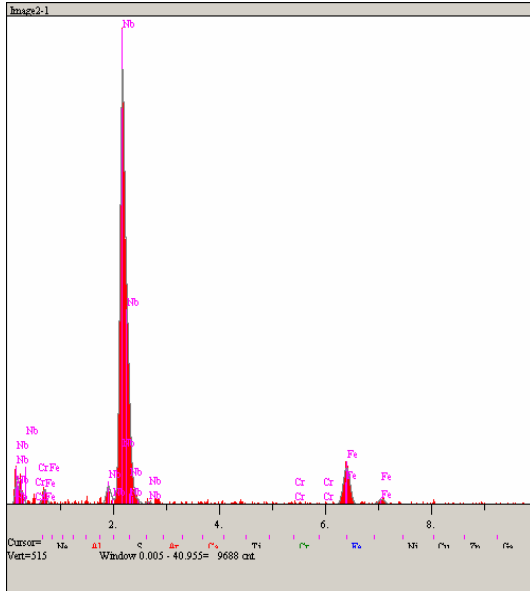
Şekil 7.20. 850°C' de 4 saat süre ile niobyum borür kaplanan AISI 4140 çelik numunenin kaplama tabakasının (a) SEM mikroyapı görüntüsü (b) Kaplama tabakası boyunca elementlerin lineer analiz dağılımı (c) Kaplama tabakasının EDS analizi (d) AISI 4140 çeliğinin EDS analizi



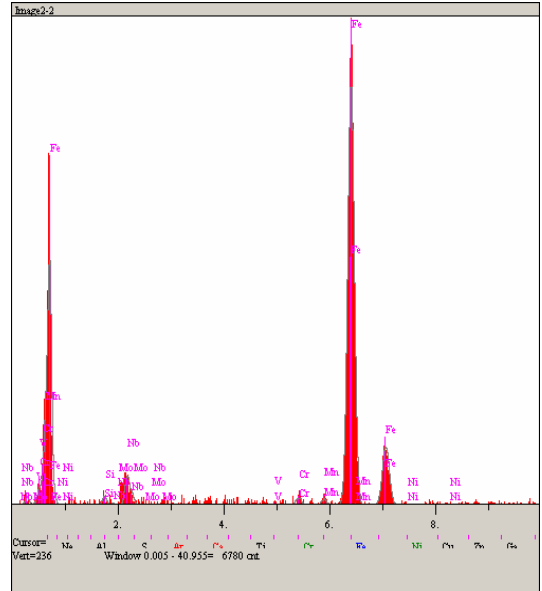
(a)



(b)

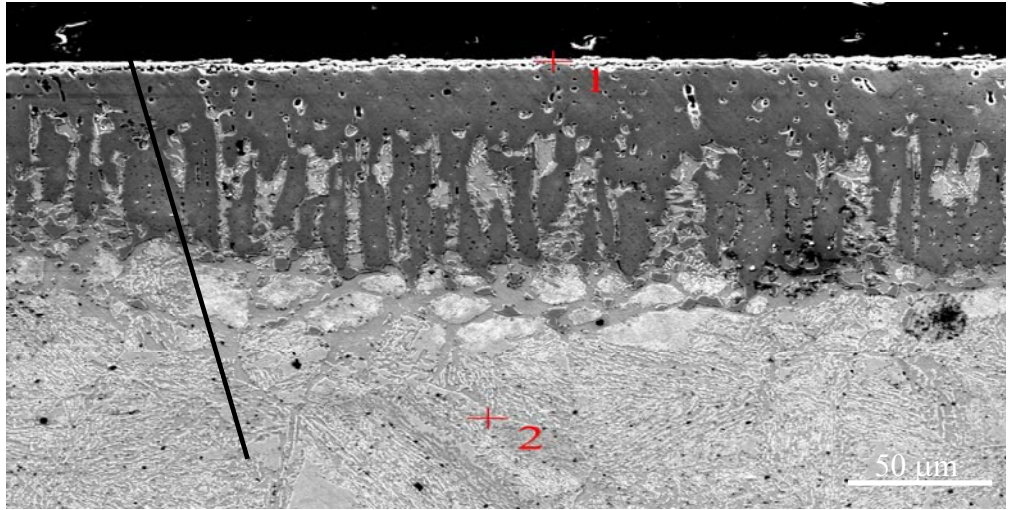


(c)

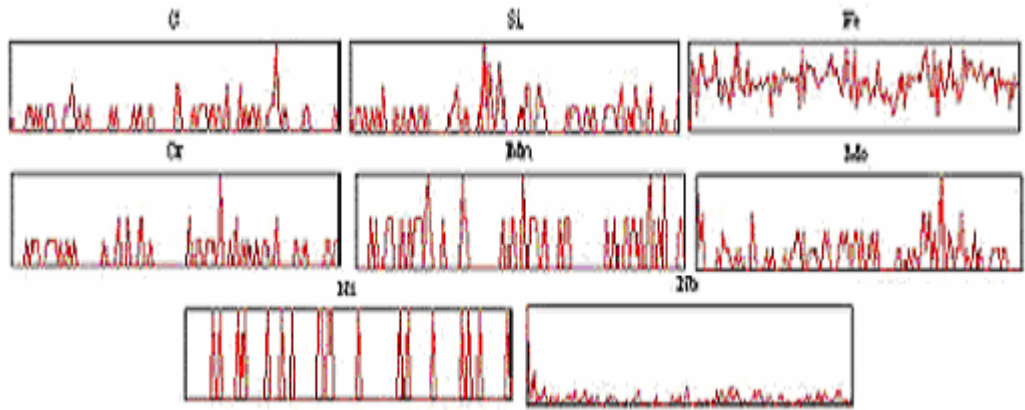


(d)

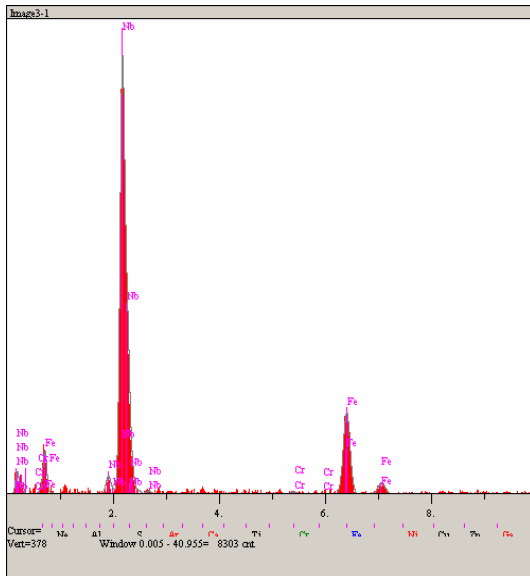
Şekil 7.21. 900°C’ de 4 saat süre ile niobyum borür kaplanan AISI 4140 çelik numunenin kaplama tabakasının (a) SEM mikroyapı görüntüsü (b) Kaplama tabakası boyunca elementlerin lineer analiz dağılımı (c) Kaplama tabakasının EDS analizi (d) AISI 4140 çeliğinin EDS analizi



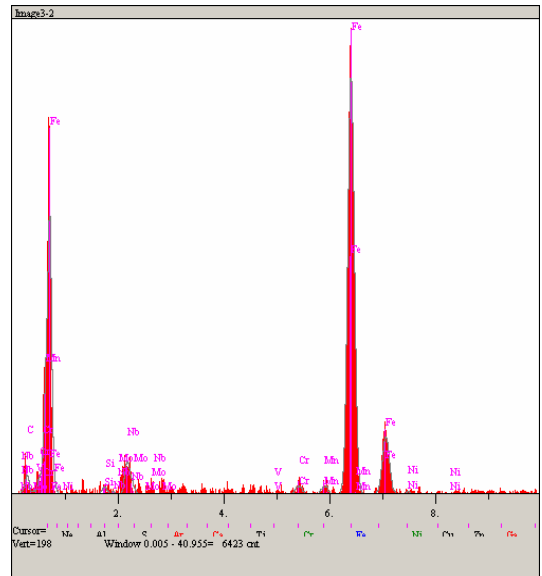
(a)



(b)

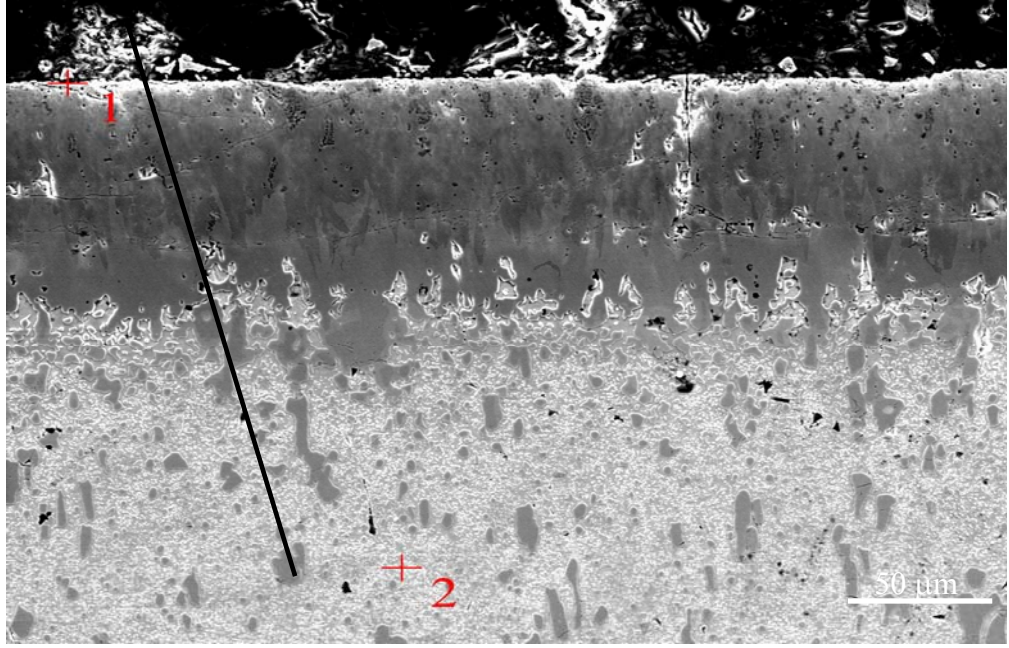


(c)

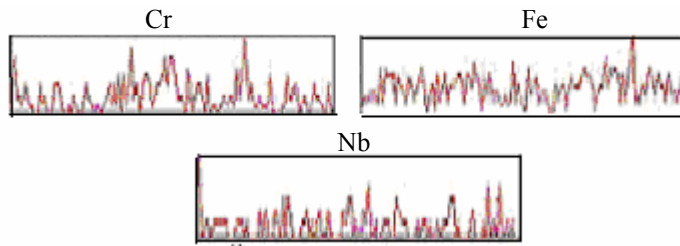


(d)

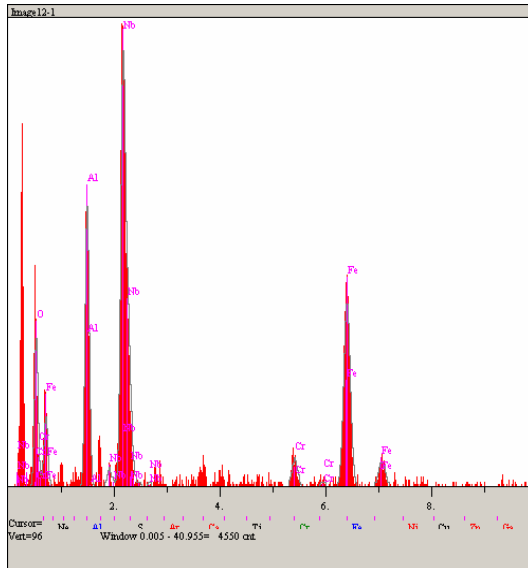
Şekil 7.22. 950°C' de 4 saat süre ile niobyum borür kaplanan AISI 4140 çelik numunenin kaplama tabakasının (a) SEM mikroyapı görüntüsü (b) Kaplama tabakası boyunca elementlerin lineer analiz dağılımı (c) Kaplama tabakasının EDS analizi (d) AISI 4140 çeliğinin EDS analizi



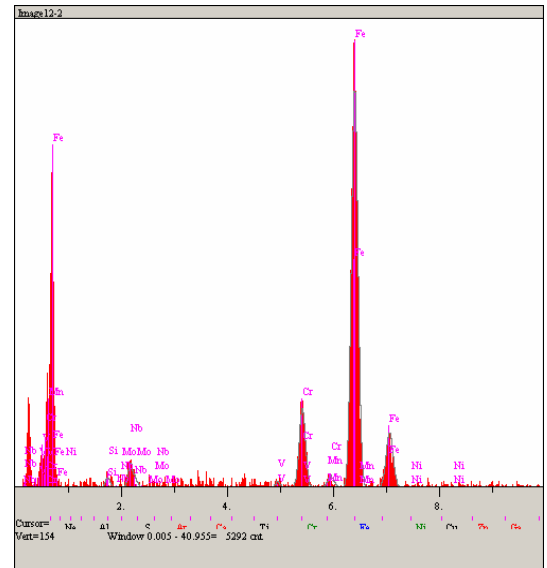
(a)



(b)

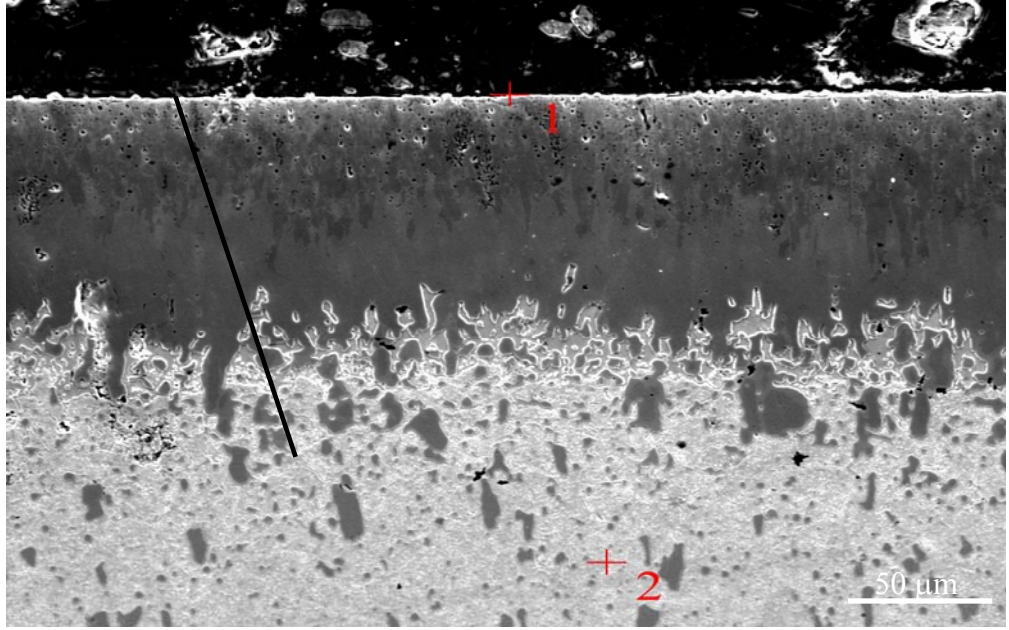


(c)

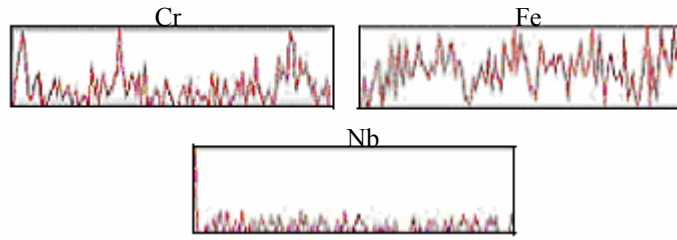


(d)

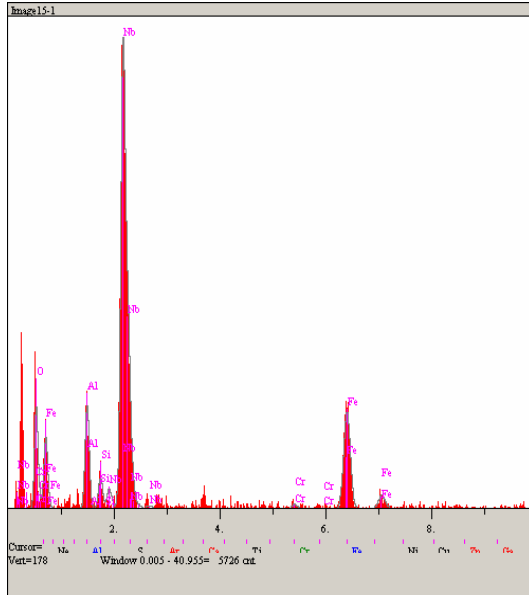
Şekil 7.23. 850°C’ de 4 saat süre ile niyobum borür kaplanan AISI D2 çelik numunenin kaplama tabakasının (a) SEM mikroyapı görüntüsü (b) Kaplama tabakası boyunca elementlerin lineer analiz dağılımı (c) Kaplama tabakasının EDS analizi (d) AISI D2 çeliğinin EDS analizi



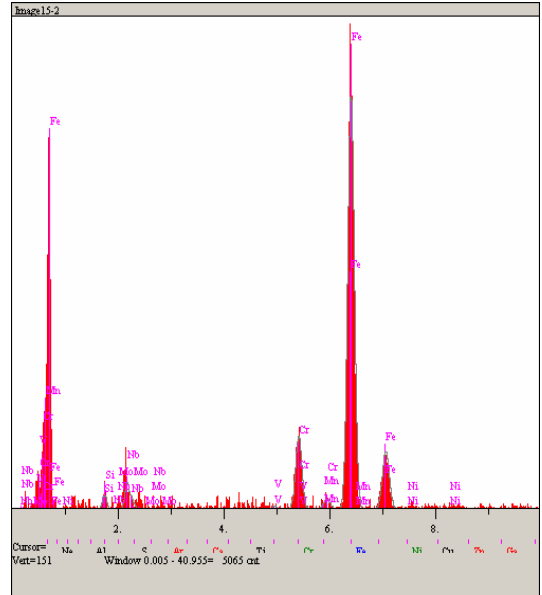
(a)



(b)

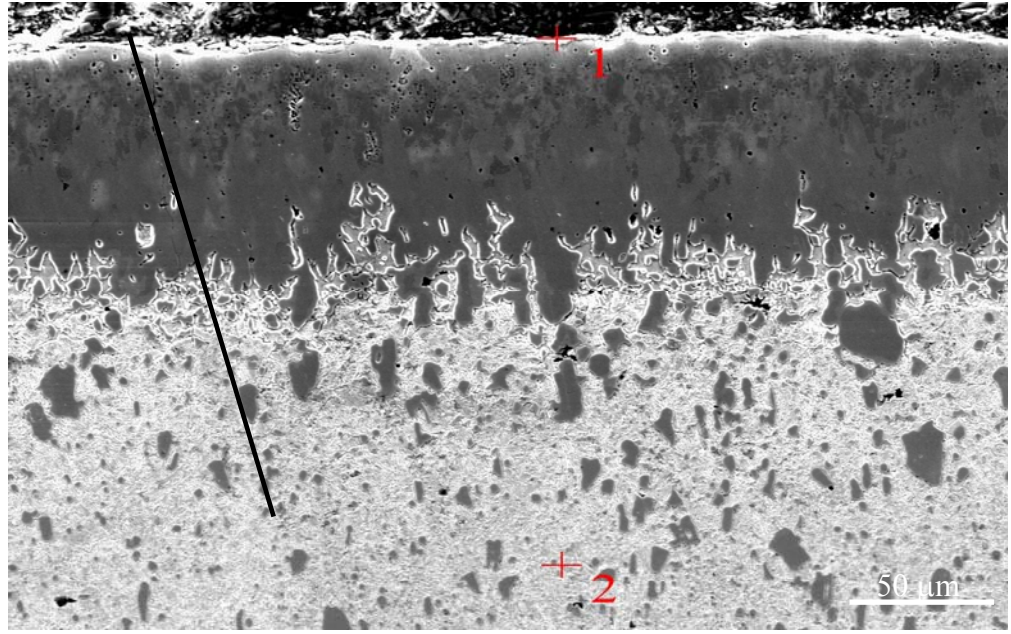


(c)

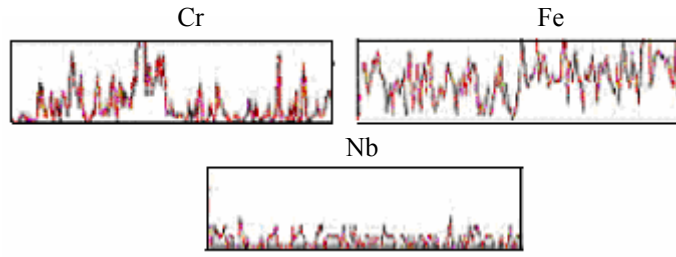


(d)

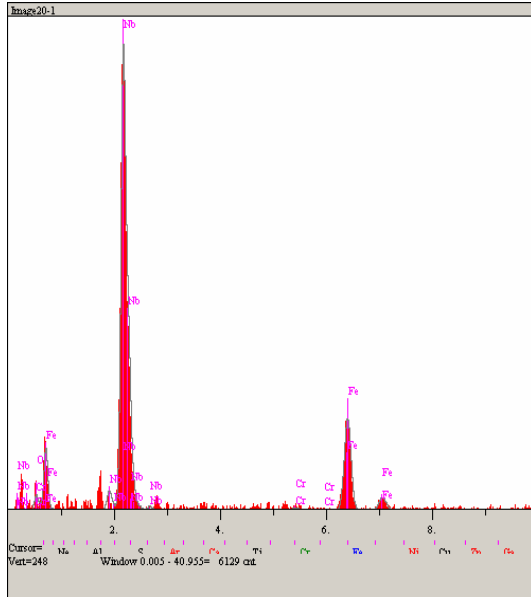
Şekil 7.24. 900°C' de 4 saat süre ile niyobum borür kaplanan AISI D2 çelik numunenin kaplama tabakasının (a) SEM mikroyapı görüntüsü (b) Kaplama tabakası boyunca elementlerin lineer analiz dağılımı (c) Kaplama tabakasının EDS analizi (d) AISI D2 çeliğinin EDS analizi



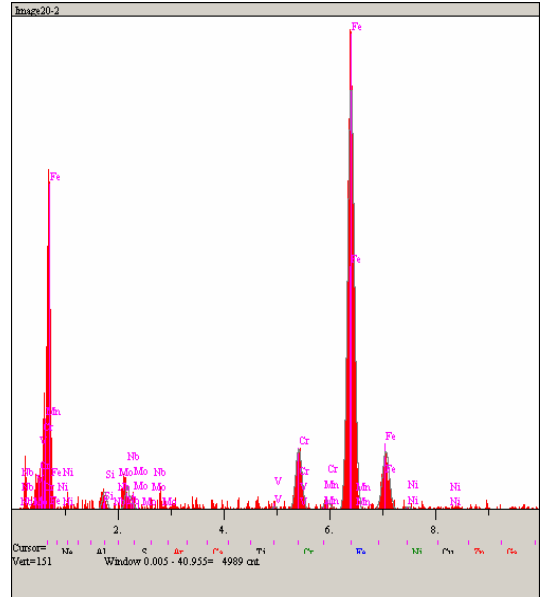
(a)



(b)



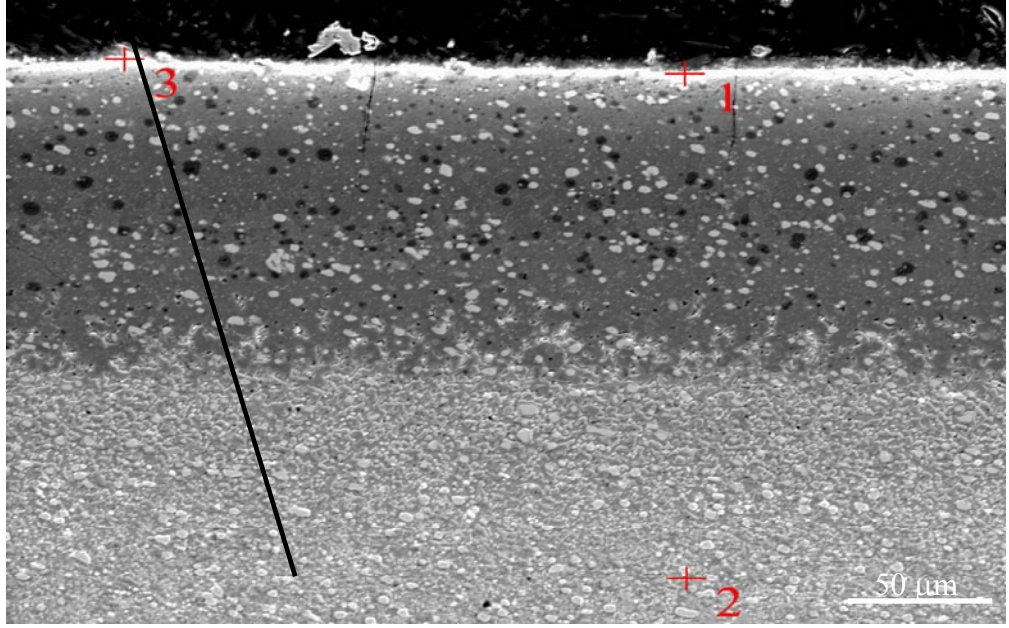
(c)



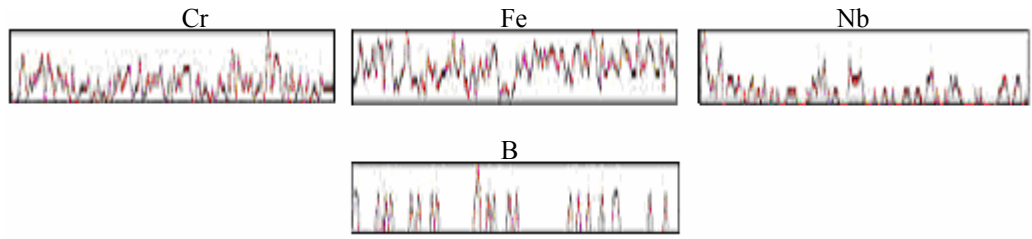
(d)

Şekil 7.25. 950°C' de 4 saat süre ile niobyum borür kaplanan AISI D2 çelik numunenin kaplama tabakasının (a) SEM mikroyapı görüntüsü (b) Kaplama tabakası boyunca elementlerin lineer analiz dağılımı (c) Kaplama tabakasının EDS analizi (d) AISI D2 çeliğinin EDS analizi

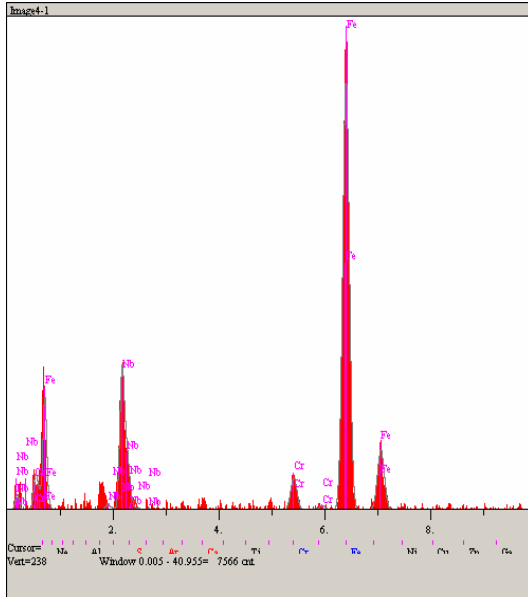




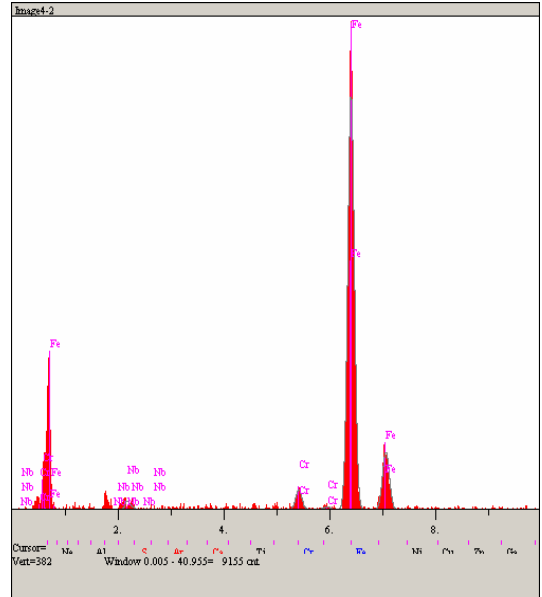
(a)



(b)

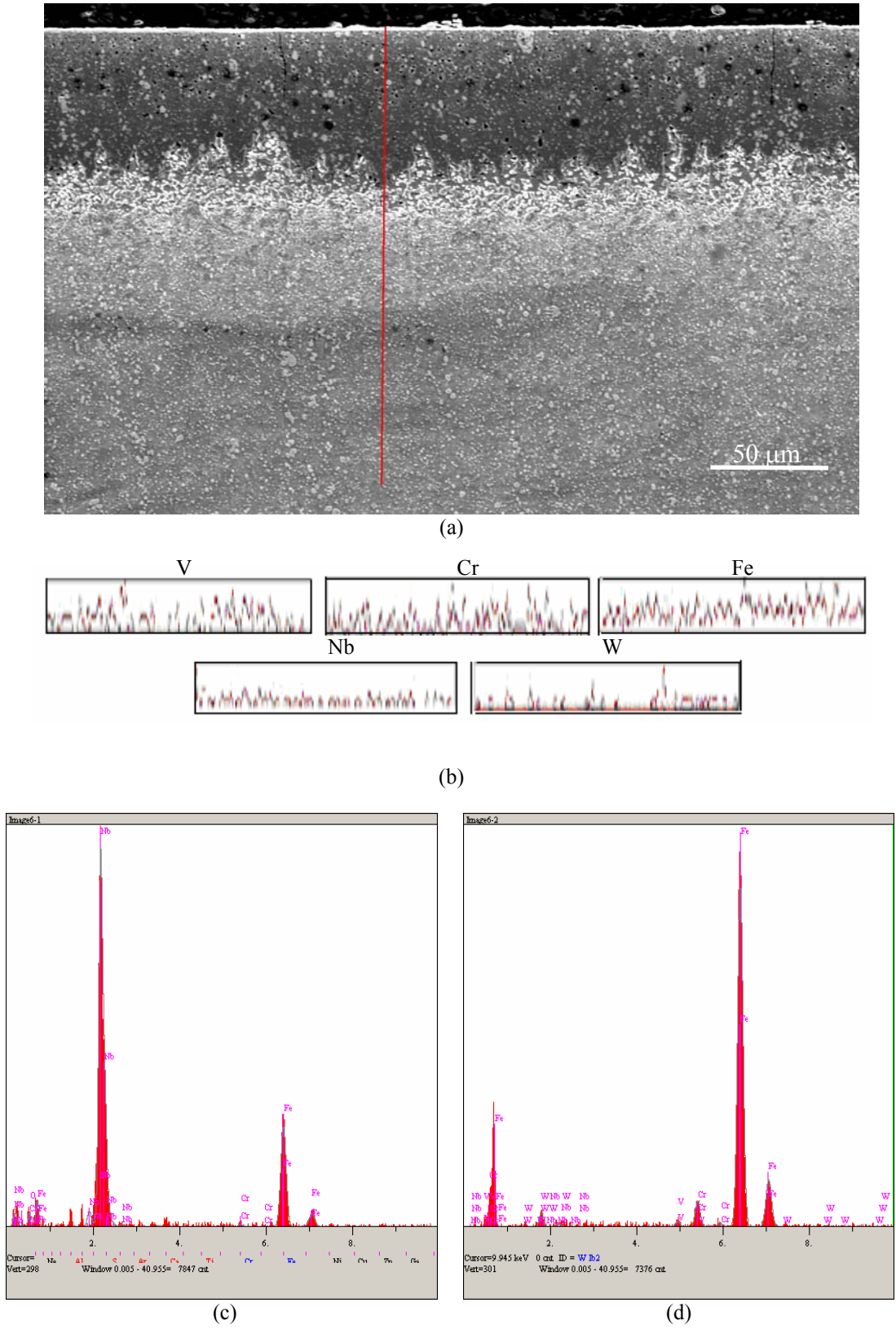


(c)

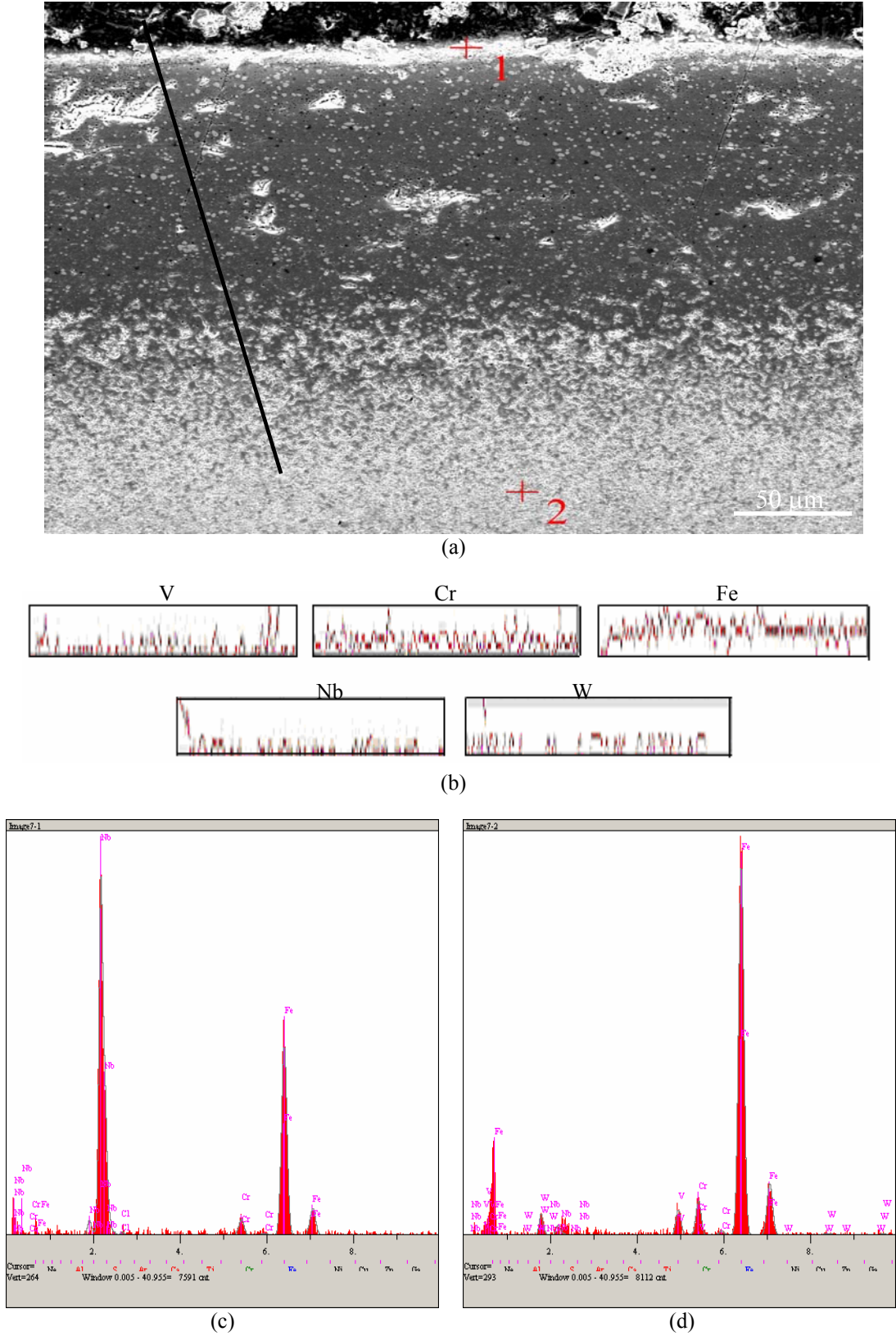


(d)

Şekil 7.26. 850°C' de 4 saat süre ile niobyum borür kaplanan AISI M2 çelik numunenin kaplama tabakasının (a) SEM mikroyapı görüntüsü (b) Kaplama tabakası boyunca elementlerin lineer analiz dağılımı (c) Kaplama tabakasının EDS analizi (d) AISI M2 çeliğinin EDS analizi



Şekil 7.27. 900°C' de 4 saat süre ile niobyum borür kaplanan AISI M2 çelik numunenin kaplama tabakasının (a) SEM mikroyapı görüntüsü (b) Kaplama tabakası boyunca elementlerin lineer analiz dağılımı (c) Kaplama tabakasının EDS analizi (d) AISI M2 çeliğinin EDS analizi



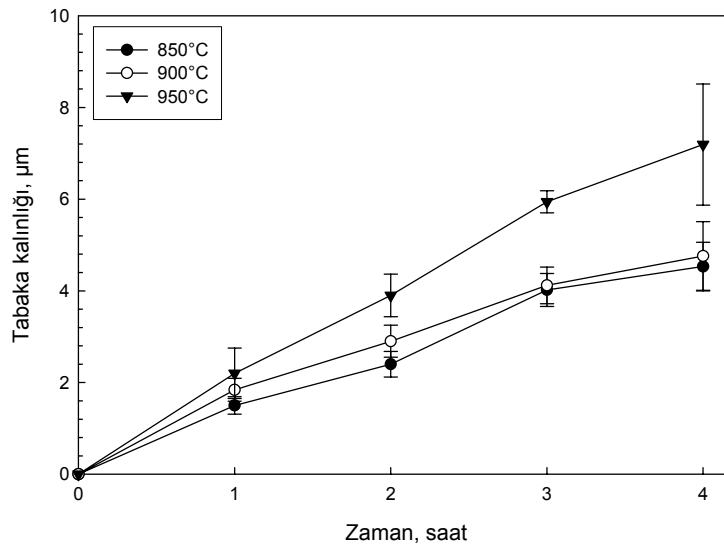
Şekil 7.28. 950°C' de 4 saat süre ile niobiyum borür kaplanan AISI M2 çelik numunenin kaplama tabakasının (a) SEM mikroyapı görüntüsü (b) Kaplama tabakası boyunca elementlerin lineer analiz dağılımı (c) Kaplama tabakasının EDS analizi (d) AISI M2 çeliğinin EDS analizi

## 7.5. Tabaka kalınlığı

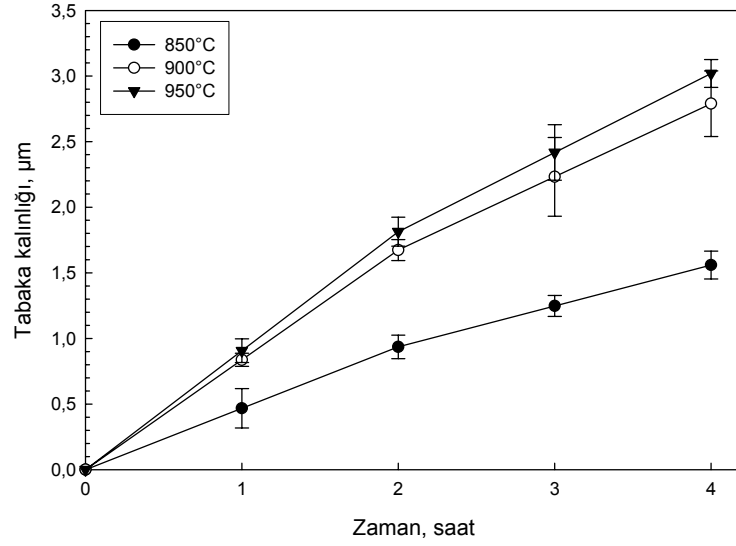
850°C, 900°C ve 950°C sıcaklıklarda 1-4 saat süre ile niobyum borür kaplanmış AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çeliklerinin yüzeyinde oluşan niobyum borür tabakalarının kalınlıklarının değişimi Tablo 7.1 ve Şekil 7.29-7.32 de verilmektedir. Zaman ve sıcaklığa bağlı olarak AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çeliklerinin yüzeyinde oluşan niobyum borür tabakalarının kalınlıkları sırasıyla 1.50 µm -7.19 µm, 0.468 µm-3.02 µm, 0.42 µm-2.43 µm ve 0.33 µm-3.215 µm değerleri arasında değişmektedir.

Tablo 7.1. AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çeliklerinin yüzeyinde oluşan niobyum borür tabakalarının kalınlıkları

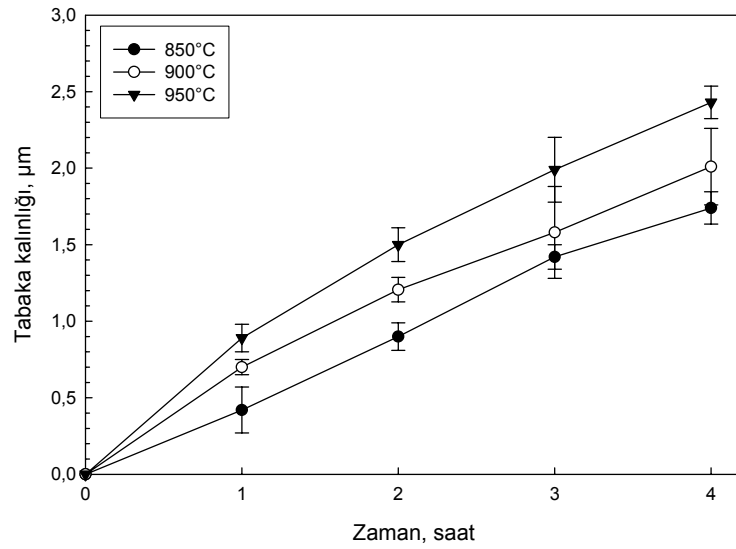
Zaman, saat	Tabaka kalınlığı, µm											
	AISI 1010			AISI 4140			AISI D2			AISI M2		
	850°C	900°C	950°C	850°C	900°C	950°C	850°C	900°C	950°C	850°C	900°C	950°C
1	1,5	1,84	2,2	0,47	0,83	0,91	0,42	0,7	0,89	0,33	0,58	0,97
2	2,4	2,9	3,9	0,94	1,67	1,82	0,9	1,21	1,5	0,74	1,3	2
3	4,02	4,12	5,94	1,25	2,32	2,42	1,42	1,58	1,99	0,91	1,55	2,7
4	4,53	4,76	7,19	1,56	2,79	3,02	1,74	2,01	2,43	1,19	1,88	3,25



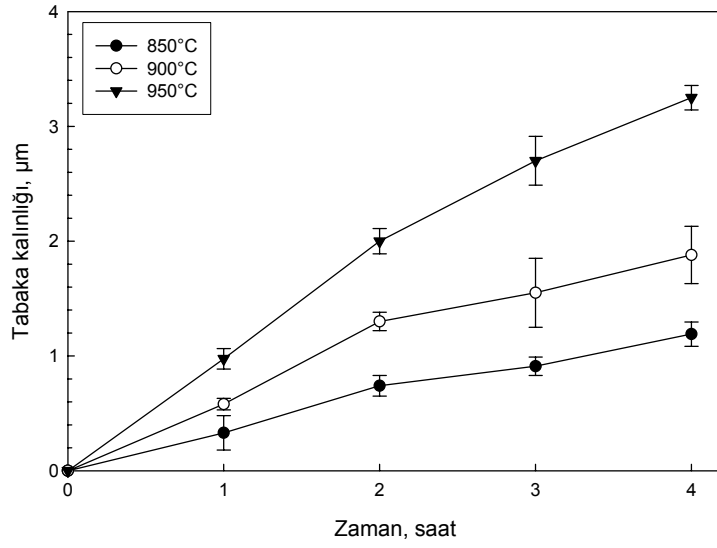
Şekil 7.29. AISI 1010 çeliğinin kaplama zamanı ve süresine bağlı olarak niobyum borür kaplama tabakasının kalınlığındaki değişimi



Şekil 7.29. AISI 4140 çeliğinin kaplama zamanı ve süresine bağlı olarak niobyum borür kaplama tabakasının kalınlığındaki değişimi



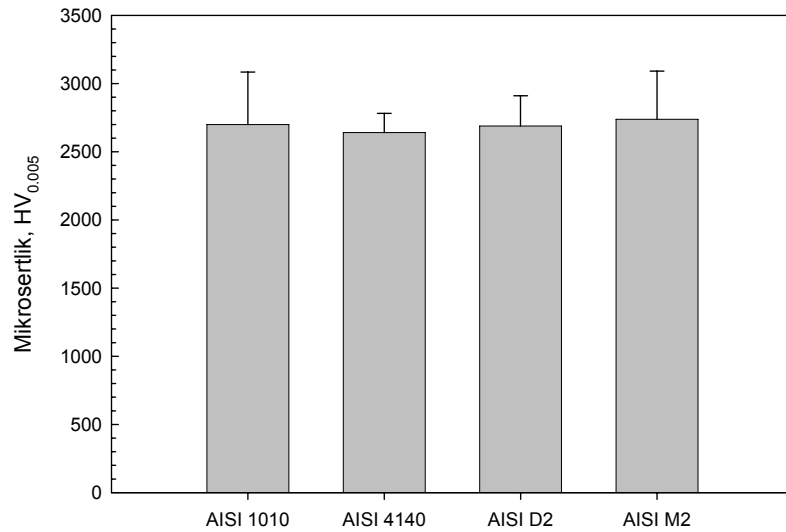
Şekil 7.29. AISI D2 çeliğinin kaplama zamanı ve süresine bağlı olarak niobyum borür kaplama tabakasının kalınlığındaki değişimi



Şekil 7.29. AISI M2 çeliğinin kaplama zamanı ve süresine bağlı olarak niobyum borür kaplama tabakasının kalınlığındaki değişimi

## 7.6. Sertlik Ölçümleri

Niobyum borür kaplamaların gerçekleştirildiği AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çeliklerinin kaplama yüzeylerinden Future Tech FM 700 marka mikrosertlik cihazında Vickers sertlik ucu kullanılarak yapılan mikrosertlik ölçümleri sonucunda elde edilen ortalama sertlik değerleri alınmış ve Şekil 7.33 de gösterilmiştir.

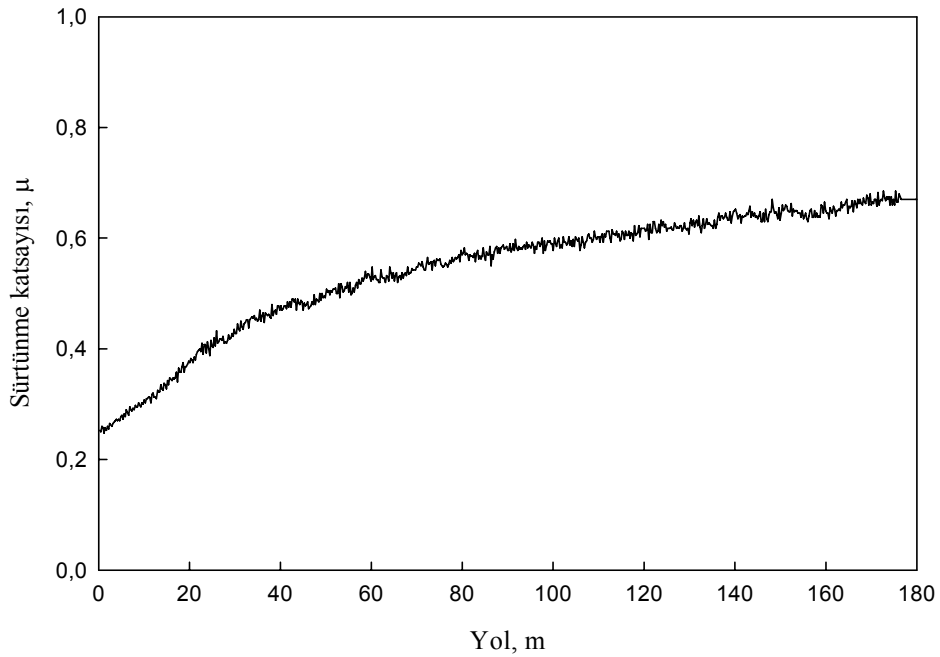


Şekil 7.33. Niobyum borür kaplanmış çeliklerin yüzeyinde oluşan niobyum borür tabakasının ortalama sertlikleri

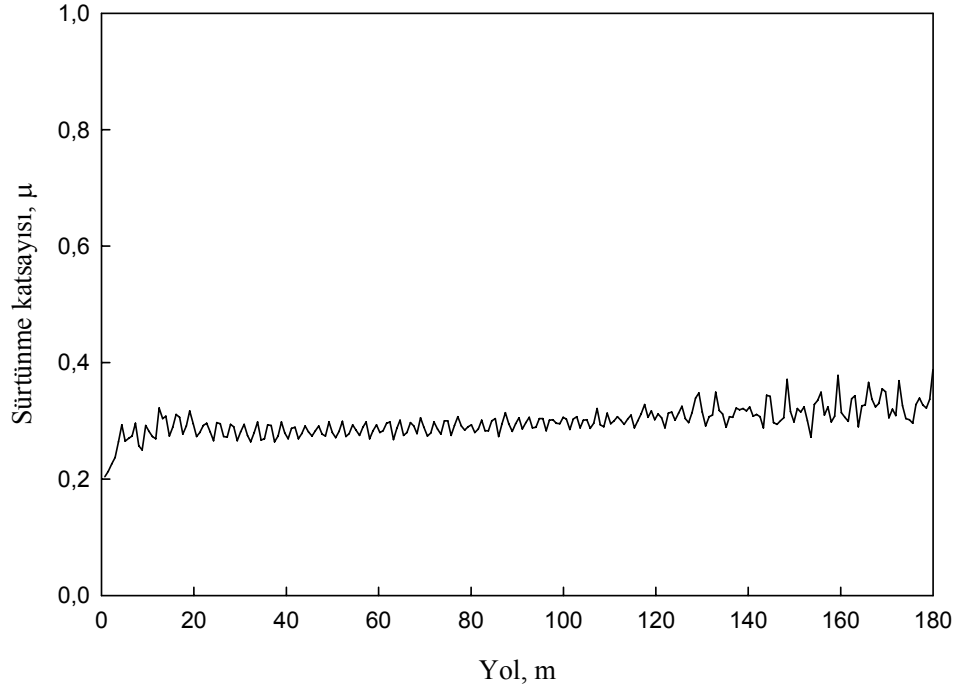
### 7.7. Aşınma Özellikleri

Aşınma deneyleri ASTM G-99 standartına uygun olan tribometre cihazında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde Ball-On Disk metodundan faydalanılarak, 9,5 mm çapında alümina ve AISI 52100 çelik bilyeler kullanılmıştır. Aşınma deneyleri 1N, 2N ve 5N yük altında, 180 metre mesafede 0.1m/s, 0.3m/s, 0.5 m/s hızlarda gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneyleri sonrasında oluşan aşınma izlerinin mikroyapıları, NIKON EPIPHOT 200 marka optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri ile gerçekleştirilmiştir.

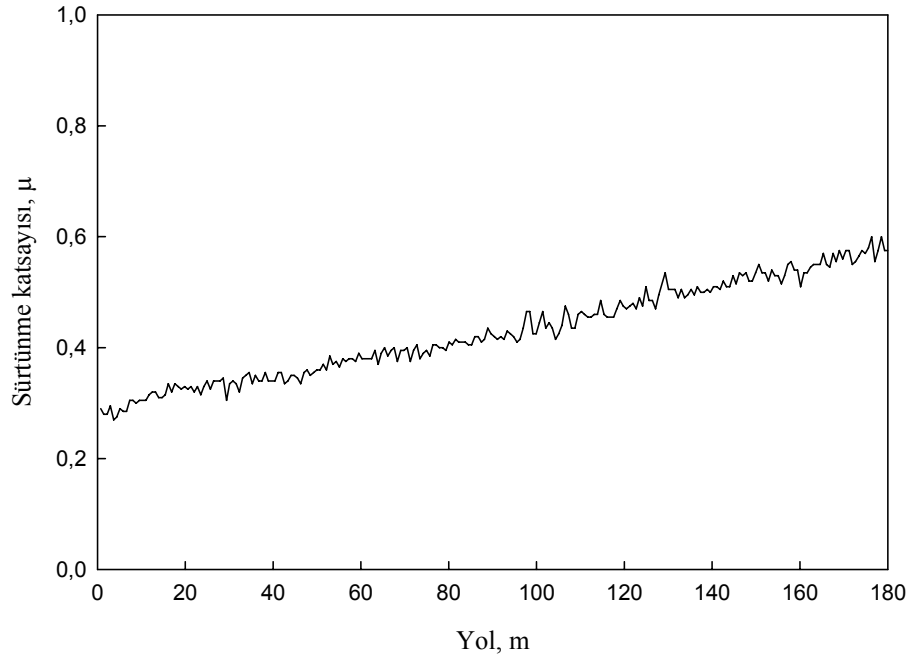
Niobyum borür kaplanmış AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 numuneler ile alümina ve AISI 52100 çelik aşındırıcı bilyeler arasındaki aşınma deneyleri gerçekleştirildikten sonra, ölçülen yanal kuvvetlerden faydalanılarak, uygulanan yüklere göre sürtünme katsayılarındaki değişim Şekil 7.34- 7.41' de verilmiştir. Niobyum borür kaplanmış AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 numuneler ile alümina ve AISI 52100 çelik aşındırıcı bilyeler arasındaki sürtünme katsayılarının uygulanan yüklere ve hızlara bağlı olarak değişimi Şekil 7.42- 7.49' da belirtilmiştir.



Şekil 7.34. Niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çeliği ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 2N yük altında 0.3 m/s hızdaki sürtünme katsayısının yola bağlı olarak değişimi

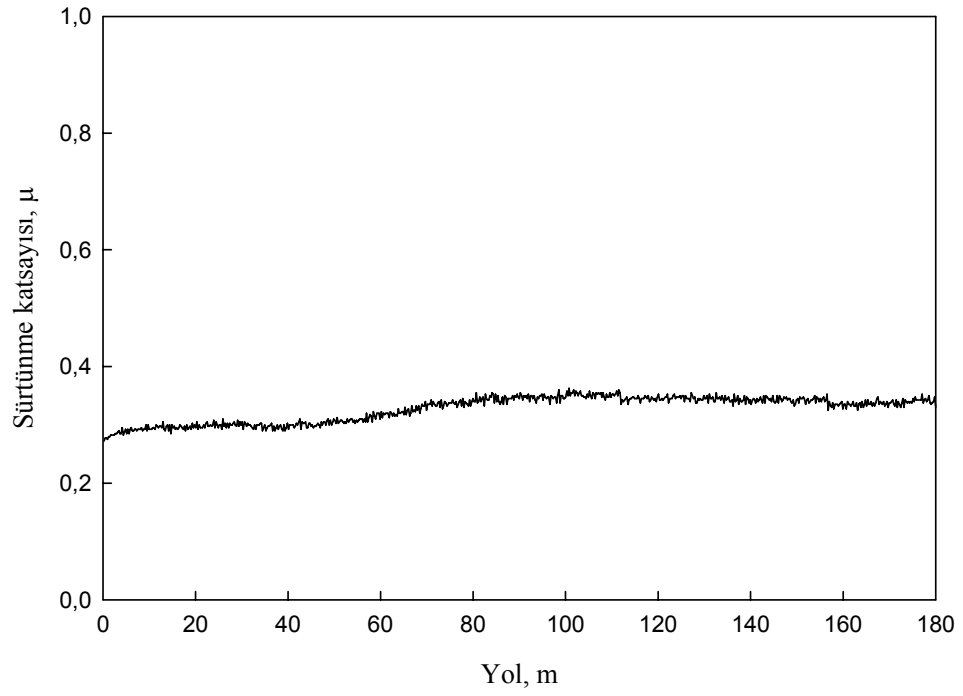


Şekil 7.35. Niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çeliği ile alümina bilye arasındaki 5N yük altında 0.3 m/s hızdaki sürtünme katsayısının yola bağlı olarak değişimi

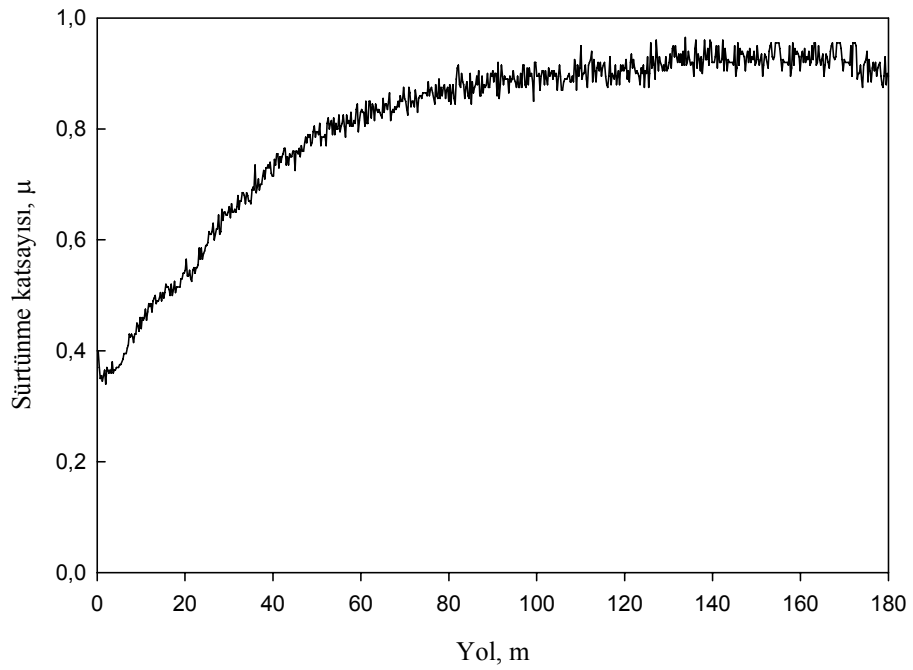


Şekil 7.36. Niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çeliği ile AISI 52100 çelik bilyesi arasındaki 1N yük altında 0.3 m/s hızdaki sürtünme katsayısının yola bağlı olarak değişimi

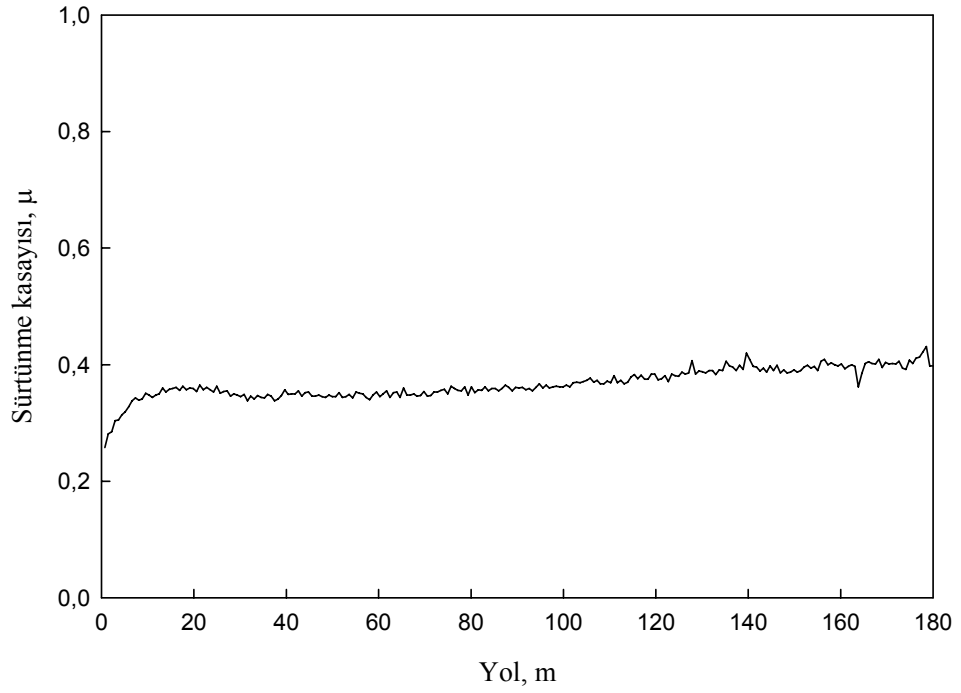




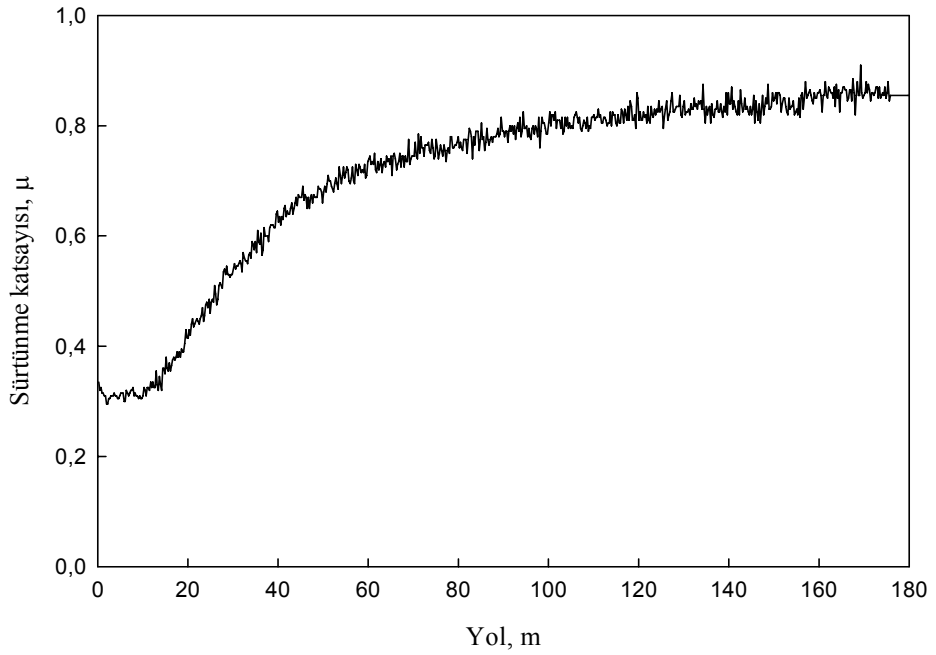
Şekil 7.37. Niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çeliği ile alümina bilye arasındaki 2N yük altında 0.1 m/s hızdaki sürtünme katsayısının yola bağlı olarak değişimi



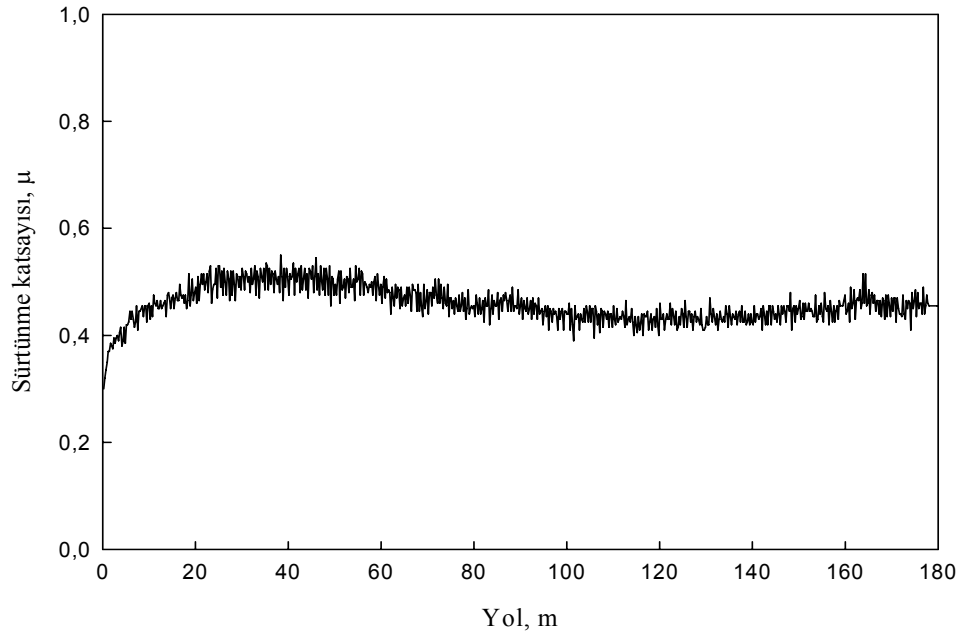
Şekil 7.38. Niobyum borür kaplanmış AISI D2 çeliği ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 1N yük altında 0.1 m/s hızdaki sürtünme katsayısının yola bağlı olarak değişimi



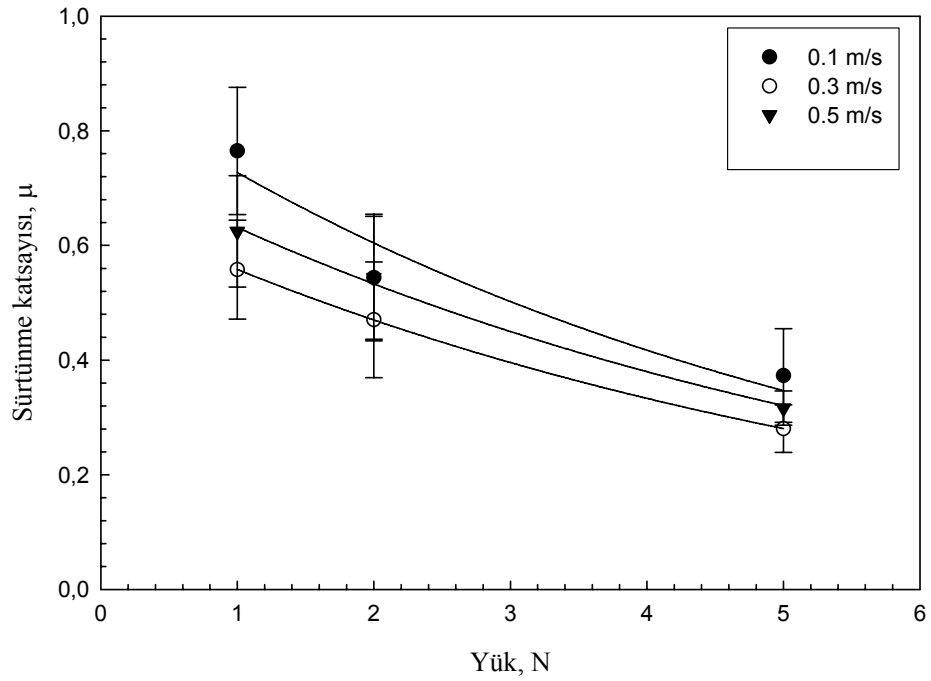
Şekil 7.39. Niobyum borür kaplanmış AISI D2 çeliği ile alümina bilye arasındaki 5N yük altında 0.3 m/s hızdaki sürtünme katsayısının yola bağlı olarak değişimi



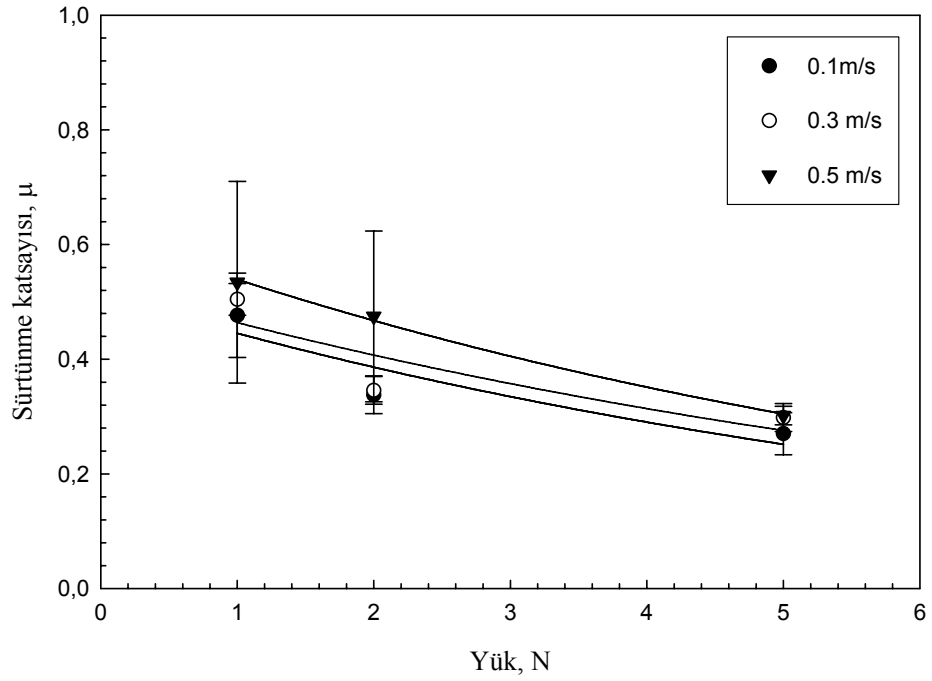
Şekil 7.40. Niobyum borür kaplanmış AISI M2 çeliği ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 5N yük altında 0.3 m/s hızdaki sürtünme katsayısının yola bağlı olarak değişimi



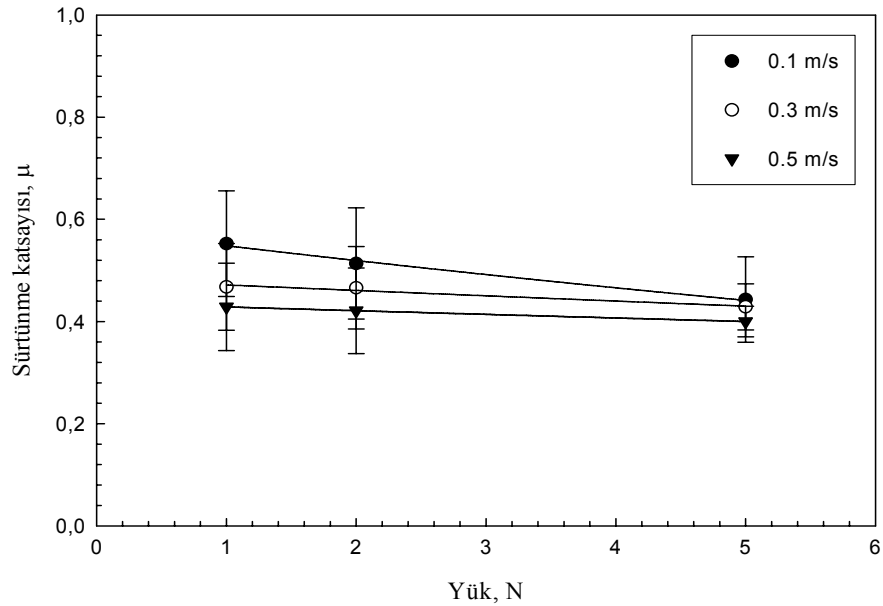
Şekil 7.41. Niobyum borür kaplanmış AISI M2 çeliği ile alümina bilye arasındaki 1N yük altında 0.3 m/s hızdaki sürtünme katsayısının yola bağlı olarak değişimi



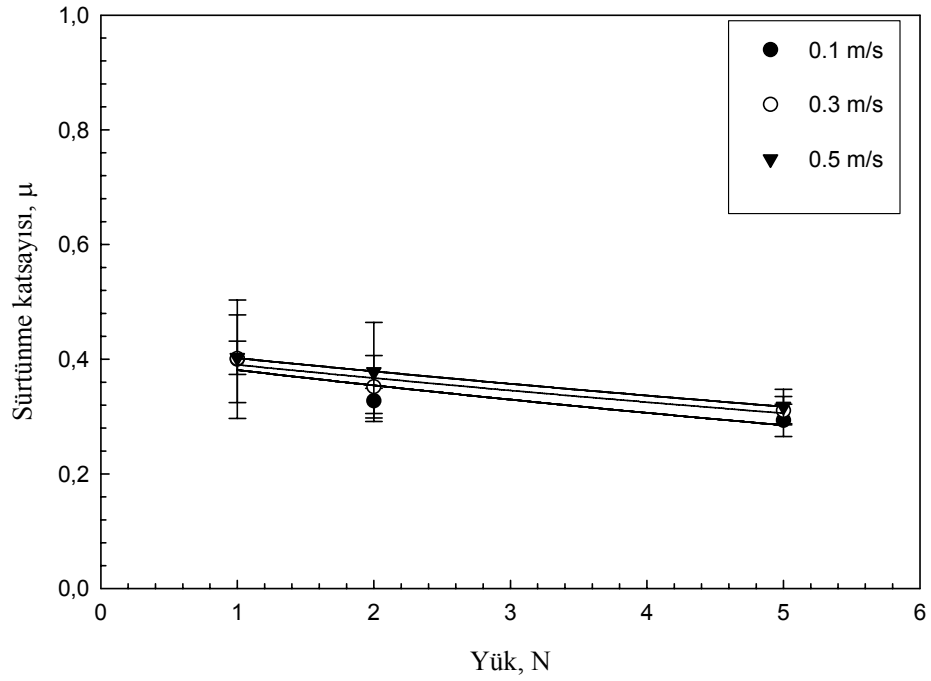
Şekil 7.42. Niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çelik numune ile alümina çelik bilye arasındaki sürtünme katsayılarının uygulanan yüklere ve hızlara bağlı olarak değişimi



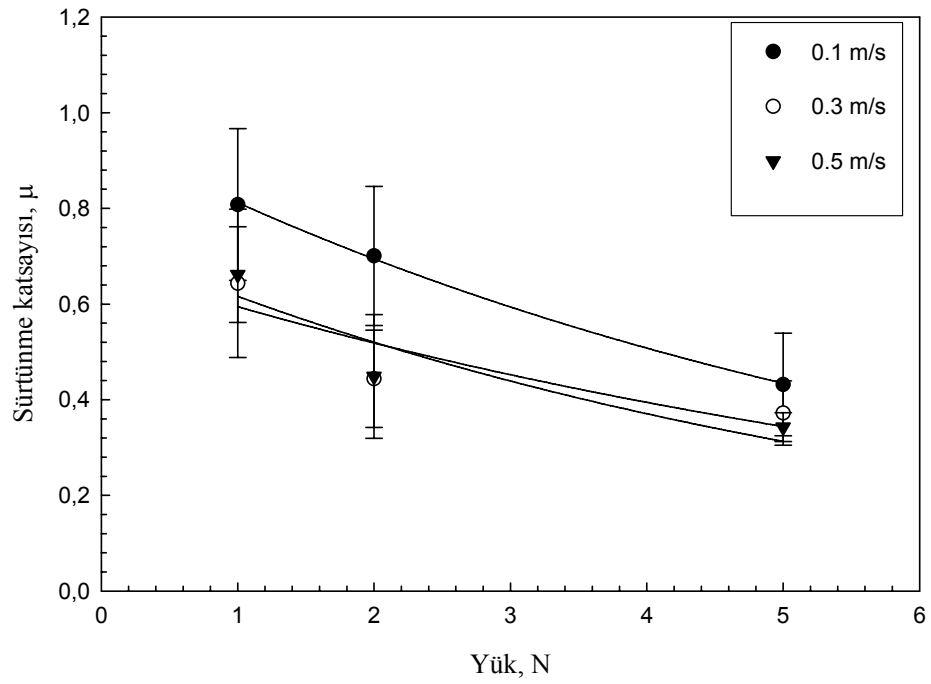
Şekil 7.43. Niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çelik numune ile alümina bilye arasındaki sürtünme katsayılarının uygulanan yüklere ve hızlara bağlı olarak değişimi



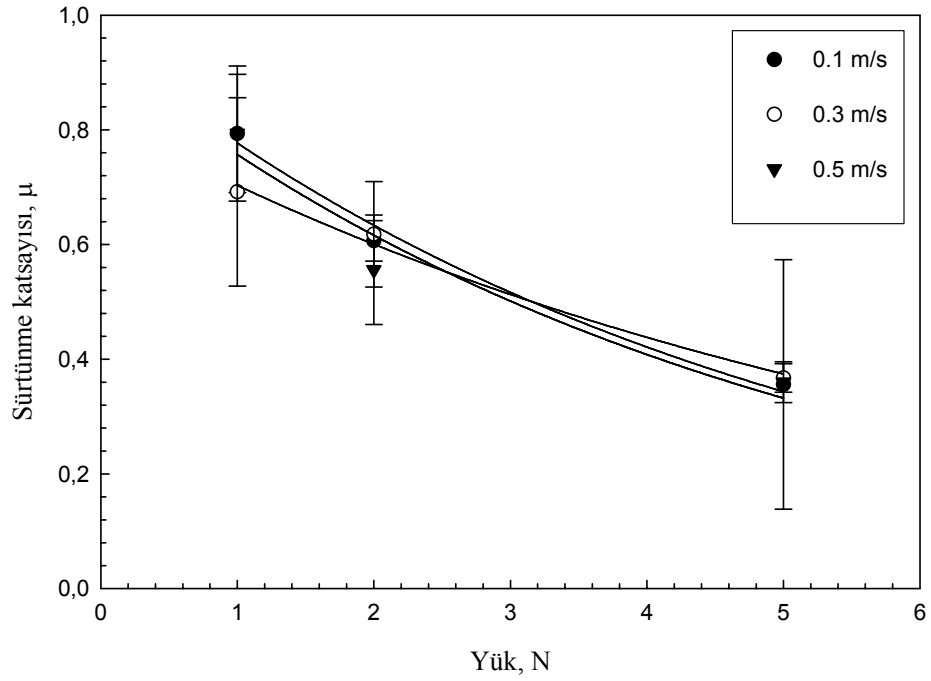
Şekil 7.44. Niobyum borür kaplanmış AISI D2 çelik numune ile alümina bilye arasındaki sürtünme katsayılarının uygulanan yüklere ve hızlara bağlı olarak değişimi



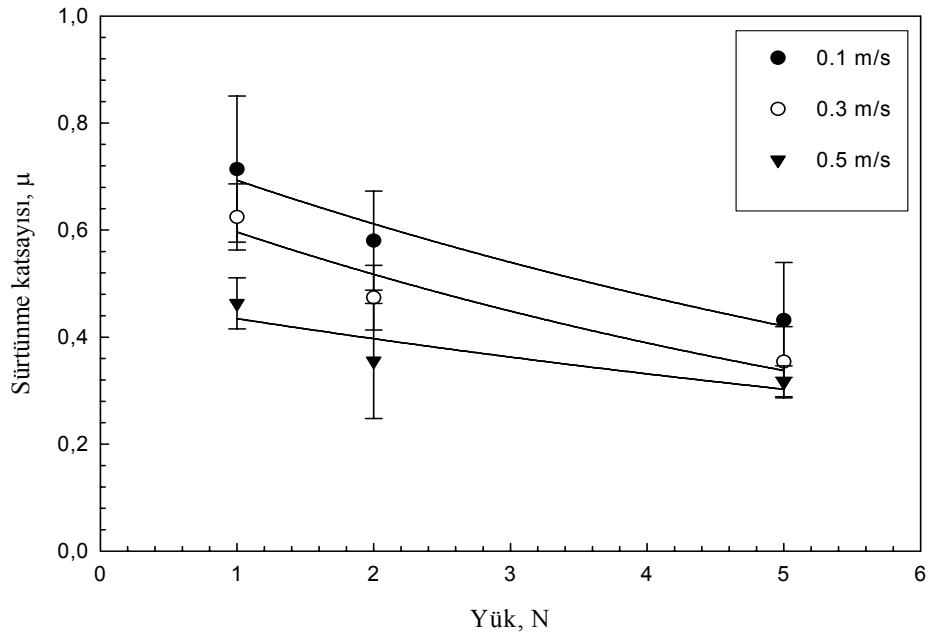
Şekil 7.45. Niobyum borür kaplanmış AISI M2 çelik numune ile alümina bilye arasındaki sürtünme katsayılarının uygulanan yüklere ve hızlara bağlı olarak değişimi



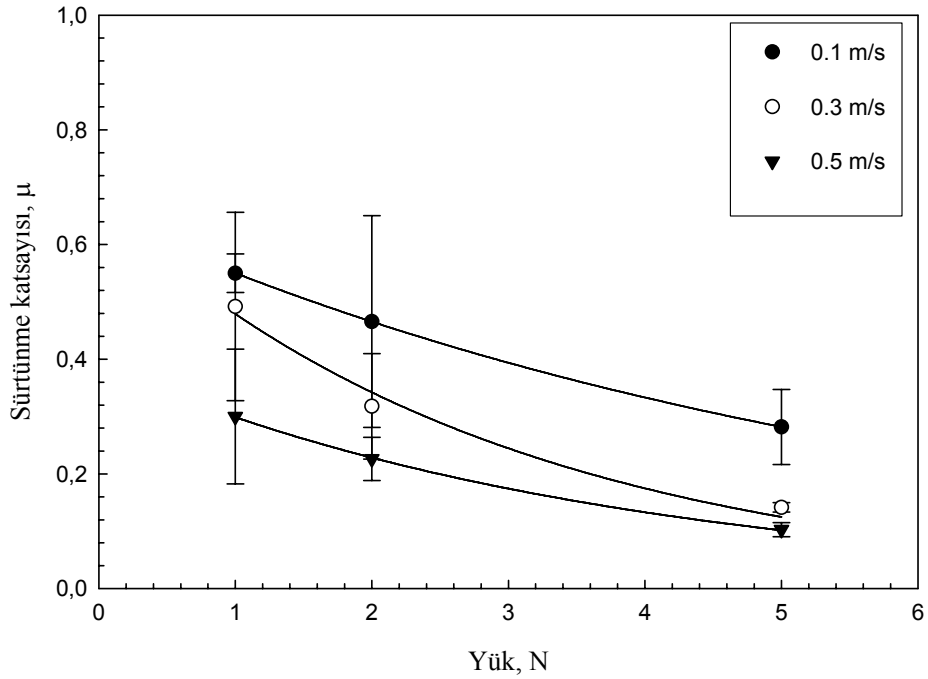
Şekil 7.46. Niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki sürtünme katsayılarının uygulanan yüklere ve hızlara bağlı olarak değişimi



Şekil 7.47. Niobiyum borür kaplanmış AISI 4140 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki sürtünme katsayılarının uygulanan yüklerle ve hızlara bağlı olarak değişimi



Şekil 7.48. Niobiyum borür kaplanmış AISI D2 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki sürtünme katsayılarının uygulanan yüklerle ve hızlara bağlı olarak değişimi



Şekil 7.49. Niobyum borür kaplanmış AISI M2 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki sürtünme katsayılarının uygulanan yüklere ve hızlara bağlı olarak değişimi

Yapılan aşınma deneyleri neticesinde, niobyum borür kaplanmış AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çelikleri için alümina bilye ve AISI 52100 çelik bilye sürtünme katsayıları genel olarak yükün artışı ve hızın artışıyla azalmaktadır. Alümina bilye ile yapılan aşınma deneyleri neticesinde elde edilen sürtünme katsayısı değerleri daha dar bir aralıkta seyrederken, AISI 52100 çelik bilye ile yapılan aşınma deneyleri neticesinde elde edilen sürtünme katsayısı değerleri daha geniş bir aralıkta seyretmektedir.

Niobyum borür kaplanmış AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çeliklerinin alümina bilyeye karşı oluşan aşınma hızlarının uygulanan yük ve sürtünme hızlarına bağlı olarak değişimi Tablo 7.2' de ve Şekil 7.50-7.53' de verilmektedir.

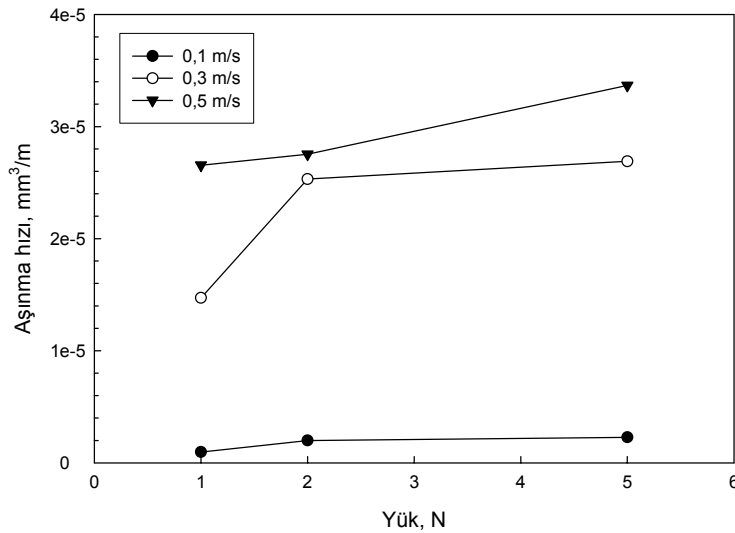
Yapılan aşınma deneyleri neticesinde aşınma hızlarındaki değişimler incelendiğinde, niobyum borür kaplanmış AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çeliklerinin alümina bilye ile aşındırılması sonunda oluşan aşınma

hızları uygulanan yük ve sürtünme hızının artışıyla artış göstermektedir. Niobyum borür kaplanmış AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çeliklerinin alümina bilye karşısında gösterdiği aşınma hızı değerleri sırasıyla  $9,7 \times 10^{-7}$  mm<sup>3</sup>/m ile  $3,37 \times 10^{-5}$  mm<sup>3</sup>/m,  $3,5 \times 10^{-7}$  mm<sup>3</sup>/m ile  $3,74 \times 10^{-5}$ ,  $1,52 \times 10^{-6}$  mm<sup>3</sup>/m ile  $5,38 \times 10^{-5}$  mm<sup>3</sup>/m ve  $8,87 \times 10^{-7}$  ile  $4,29 \times 10^{-5}$  mm<sup>3</sup>/m arasında değişim göstermektedir.

Tablo 7.2. Alümina bilye ile aşındırılan niobyum borür kaplamanın aşınma hızlarının uygulanan yük ve sürtünme hızlarına bağlı olarak değişimi

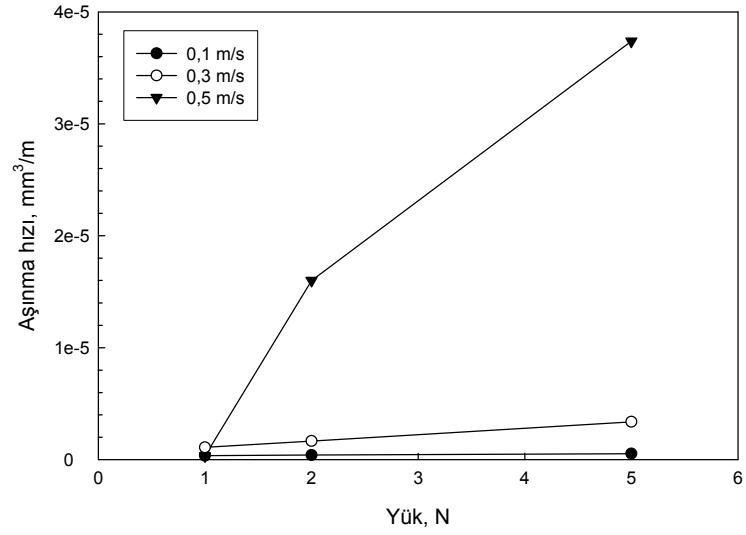
Hız (m/s)	Aşınma hızı (mm <sup>3</sup> /m)x10 <sup>-5</sup>								
	0,1			0,3			0,5		
Yük (N)	1N	2N	5N	1N	2N	5N	1N	2N	5N
<b>AISI 1010</b>	0,097	1,470	2,660	0,201	2,530	2,750	0,228	2,690	3,370
<b>AISI 4140</b>	0,035	0,110	0,033	0,040	0,167	1,600	0,053	0,338	3,740
<b>AISI D2</b>	0,152	0,212	0,232	0,253	0,323	0,360	0,413	0,529	5,380
<b>AISI M2</b>	0,088	0,193	0,091	0,035	0,454	1,600	0,538	1,130	4,290

Niobyum borür kaplanmış 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çeliklerine karşı aşındırılan AISI 52100 çelik ve alümina bilyelerin sürtünme hızları ve aşınma yüklerine bağlı olarak aşınma hızlarının uygulan yük ve sürtünme hızına bağlı olarak değişimi sırası ile Tablo 7.3. ve Şekil 7.54- Şekil 7.57 ile Tablo 7.4. ve Şekil 7.58- Şekil 7.61' de verilmektedir.

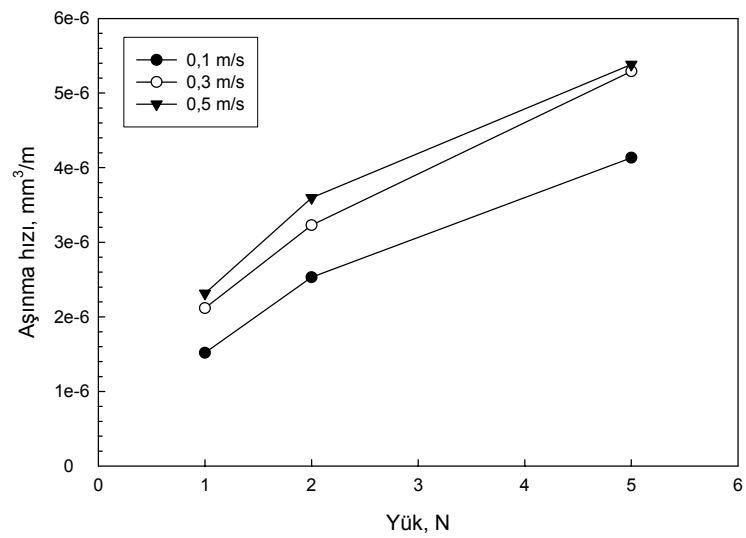


Şekil 7.50. Alümina bilyeye karşı aşındırılan niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çeliğinin aşınma hızlarının uygulanan yük ve sürtünme hızına bağlı olarak değişimi

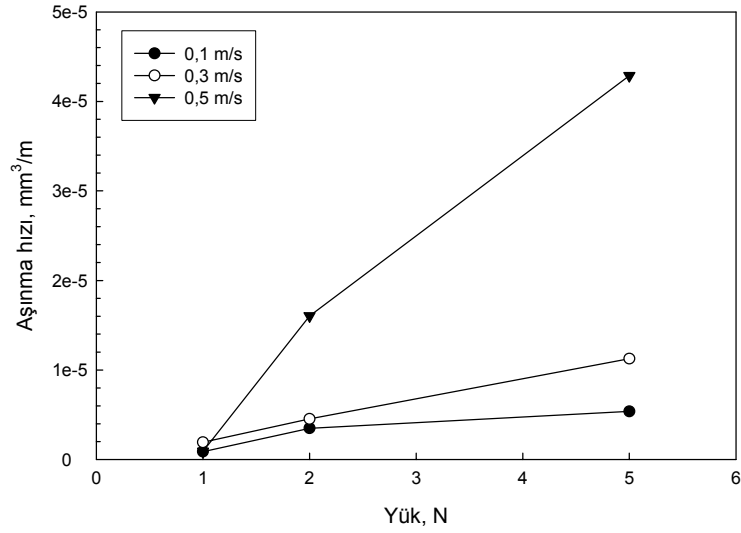




Şekil 7.51. Alümina bilyeye karşı aşındırılan niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çeliğinin aşınma hızlarının uygulanan yük ve sürtünme hızına bağlı olarak değişimi



Şekil 7.52. Alümina bilyeye karşı aşındırılan niobyum borür kaplanmış AISI D2 çeliğinin aşınma hızlarının uygulanan yük ve sürtünme hızına bağlı olarak değişimi



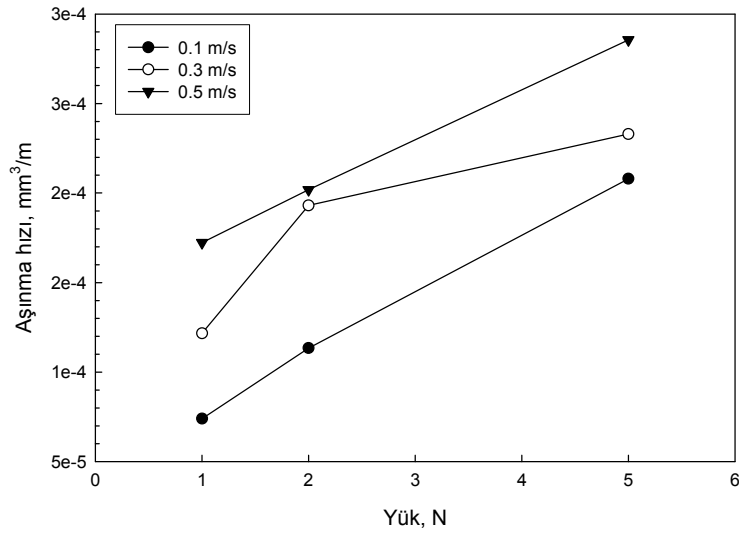
Şekil 7.53. Alümina bilyeye karşı aşındırılan niobyum borür kaplanmış AISI M2 çeliğinin aşınma hızlarının uygulanan yük ve sürtünme hızına bağlı olarak değişimi

Tablo 7.3. Niobyum borür kaplanmış çeliklere karşı aşındırılan AISI 52100 çelik bilyedeki aşınma hızlarının uygulanan yük ve sürtünme hızına bağlı olarak değişimi

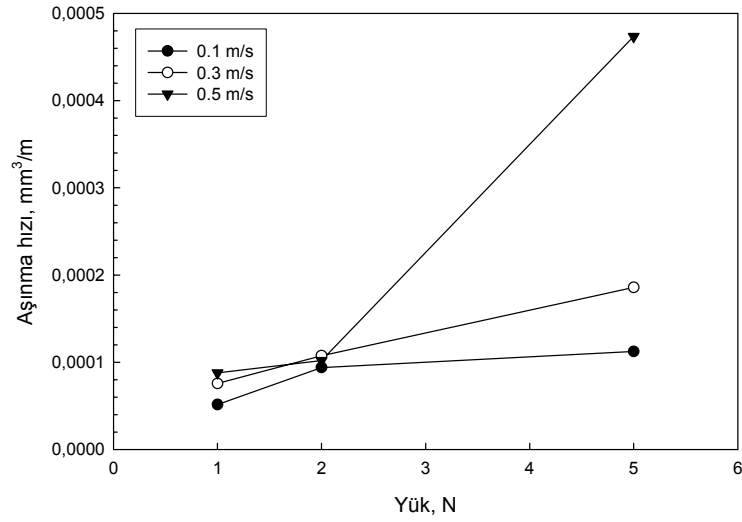
Malzeme	Yük, N	Aşınma hızı, mm <sup>3</sup> /mx10 <sup>-5</sup>		
		0.1 m/s	0.3 m/s	0.5 m/s
AISI 1010	1	7,400	12,168	17,228
	2	11,338	19,310	20,184
	5	20,794	23,299	28,551
AISI 4140	1	5,513	7,562	8,772
	2	9,400	10,757	10,197
	5	11,239	18,581	47,330
AISI D2	1	9,617	9,132	13,341
	2	13,222	14,881	20,713
	5	17,944	25,848	27,896
AISI M2	1	0,281	0,358	1,811
	2	3,537	15,208	18,108
	5	26,032	27,977	43,773

Tablo 7.4. Niobyum borür kaplanmış çeliklere karşı aşındırılan alümina bilyedeki aşınma hızının uygulanan yük ve sürtünme hızına bağlı olarak değişimi

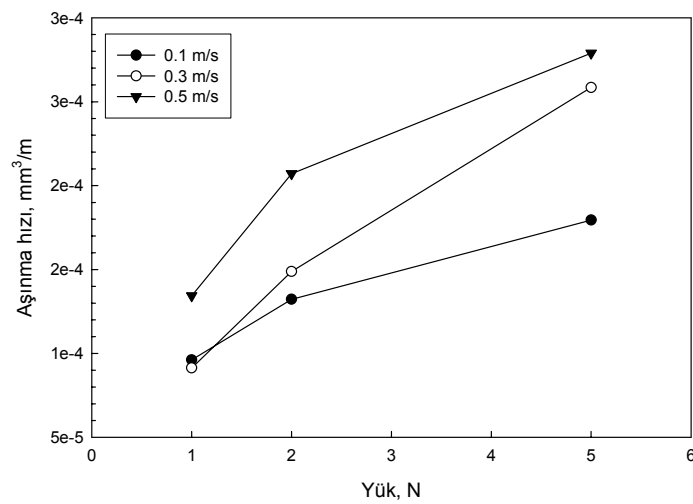
Malzeme	Yük, N	Aşınma hızı, $\text{mm}^3/\text{m} \times 10^{-5}$		
		0.1 m/s	0.3 m/s	0.5 m/s
AISI 1010	1	0,094	1,053	2,192
	2	0,181	2,197	2,569
	5	0,218	2,522	3,310
AISI 4140	1	0,034	0,096	0,031
	2	0,039	0,166	1,431
	5	0,053	0,324	3,629
AISI D2	1	0,101	0,224	0,181
	2	0,238	0,330	0,424
	5	0,403	0,501	0,532
AISI M2	1	0,087	0,088	0,183
	2	0,349	0,424	0,459
	5	1,104	1,131	1,867



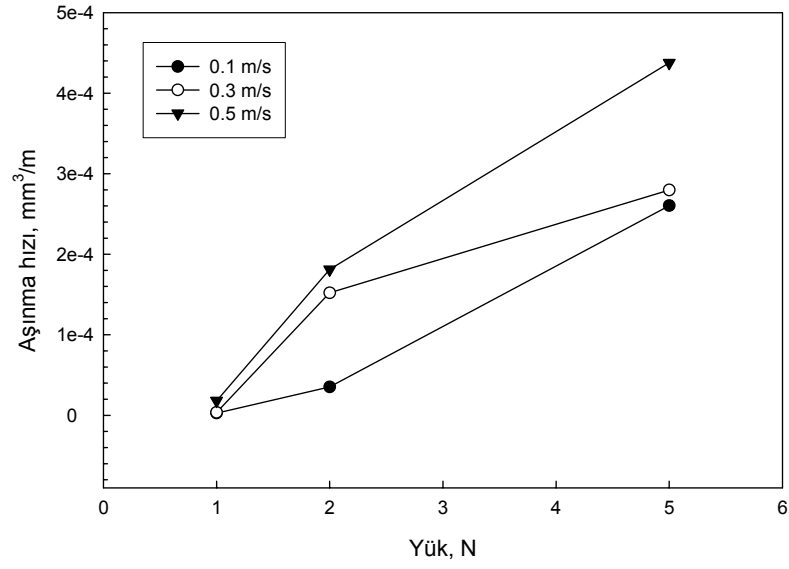
Şekil 7.54. Niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çeliğine karşı aşınma deneyine tabi tutulan AISI 52100 çelik bilyedeki aşınma hızının uygulanan yük ve sürtünme hızına bağlı olarak değişimi



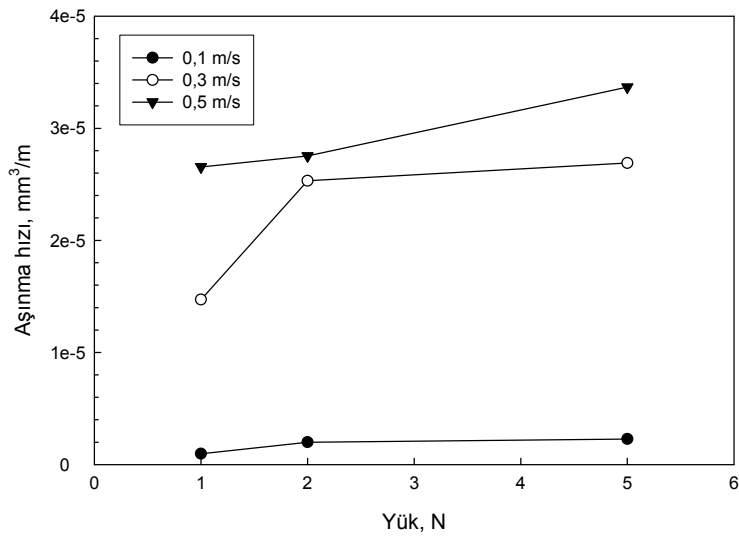
Şekil 7.55. Niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çeliğine karşı aşınma deneyine tabi tutulan AISI 52100 çelik bilyedeki aşınma hızının uygulanan yük ve sürtünme hızına bağlı olarak değişimi



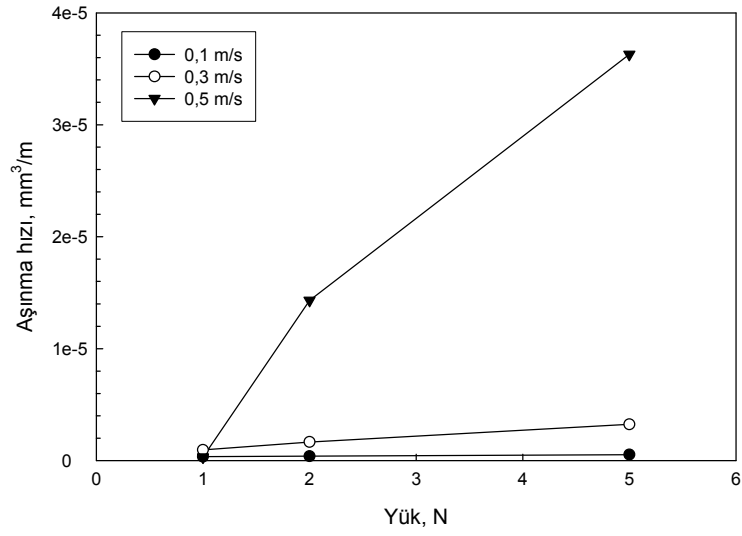
Şekil 7.56. Niobyum borür kaplanmış AISI D2 çeliğine karşı aşınma deneyine tabi tutulan AISI 52100 çelik bilyedeki aşınma hızının uygulanan yük ve sürtünme hızına bağlı olarak değişimi



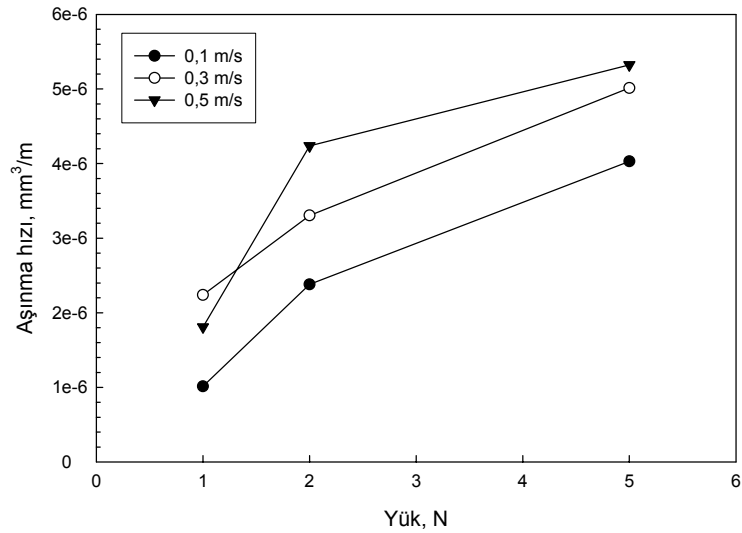
Şekil 7.57. Niobyum borür kaplanmış AISI M2 çeliğine karşı aşınma deneyine tabi tutulan AISI 52100 çelik bilyedeki aşınma hızının uygulanan yük ve sürtünme hızına bağlı olarak değişimi



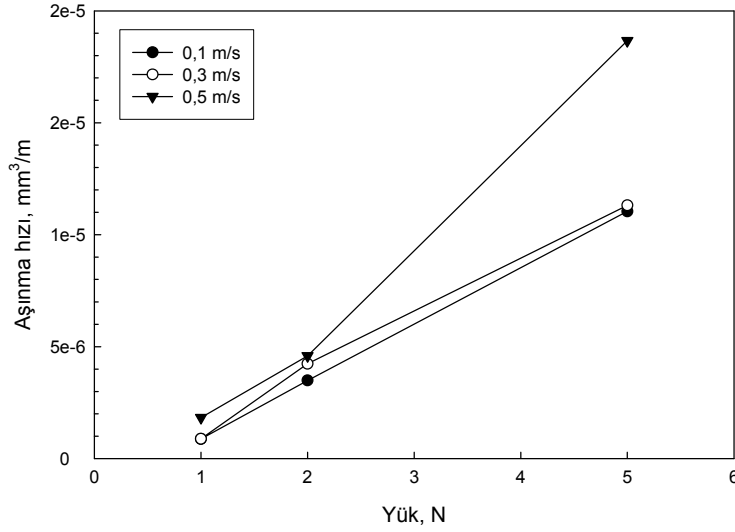
Şekil 7.58. Niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çeliğine karşı aşınma deneyine tabi tutulan alümina bilyedeki aşınma hızının uygulanan yük ve sürtünme hızına bağlı olarak değişimi



Şekil 7.59. Niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çeliğine karşı aşınma deneyine tabi tutulan alümina bilyedeki aşınma hızının uygulanan yük ve sürtünme hızına bağlı olarak değişimi



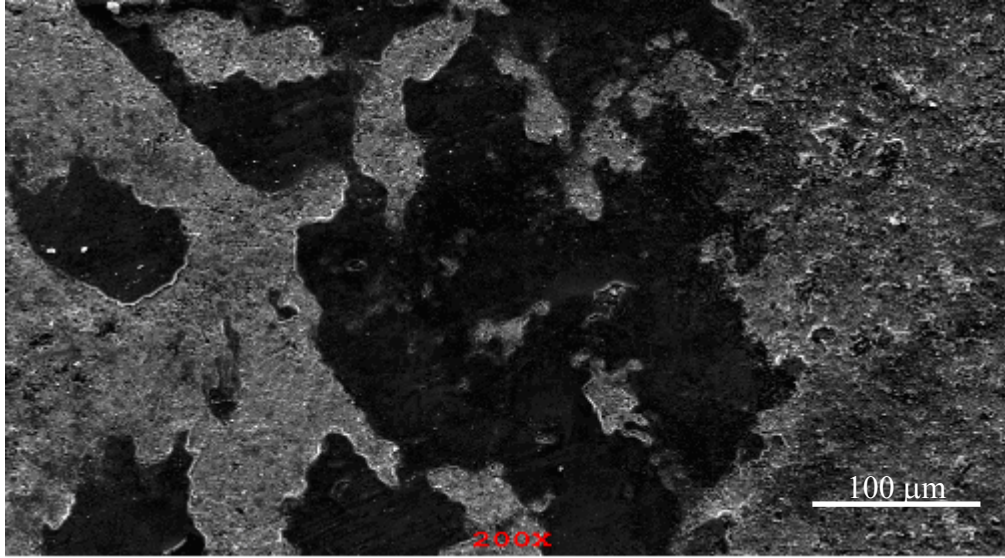
Şekil 7.60. Niobyum borür kaplanmış AISI D2 çeliğine karşı aşınma deneyine tabi tutulan alümina bilyedeki aşınma hızının uygulanan yük ve sürtünme hızına bağlı olarak değişimi



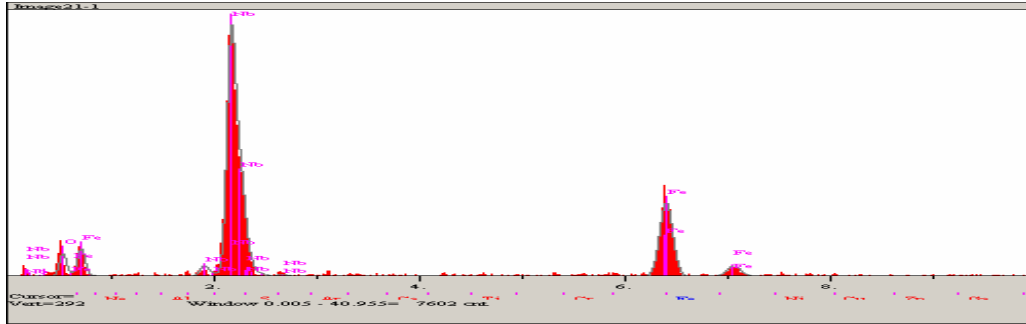
Şekil 7.61. Niobyum borür kaplanmış AISI M2 çeliğine karşı aşınma deneyine tabi tutulan alümina bilyedeki aşınma hızının uygulanan yük ve sürtünme hızına bağlı olarak değişimi

Şekil 7.53 ile Şekil 7.61 arasındaki grafikler incelendiğinde sürtünme hızının artmasına ve aşınma yükünün artmasına bağlı olarak bilyelerdeki aşınma hızları artış göstermektedir. AISI 52100 çelik bilye ile yapılan aşınma deneylerinde, AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çeliklerine karşı aşındırılan AISI 52100 çelik bilyedeki aşınma hızlarının sırası ile  $7,40 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$  ile  $2,855 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{m}$ ,  $5,15 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$  ile  $4,733 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{m}$ ,  $9,62 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$  ile  $2,790 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{m}$  ve  $2,81 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{m}$  ile  $4,377 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{m}$  arasında değiştiği görülmektedir. Alümina bilye ile yapılan aşınma deneylerinde, AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çeliklerine karşı aşındırılan alümina bilyedeki aşınma hızlarının sırası ile  $9,40 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{m}$  ile  $3,31 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$ ,  $3,40 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{m}$  ile  $3,63 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$ ,  $1,01 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{m}$  ile  $5,32 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{m}$  ve  $8,7 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{m}$  ile  $1,87 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$  arasında değişmektedir.

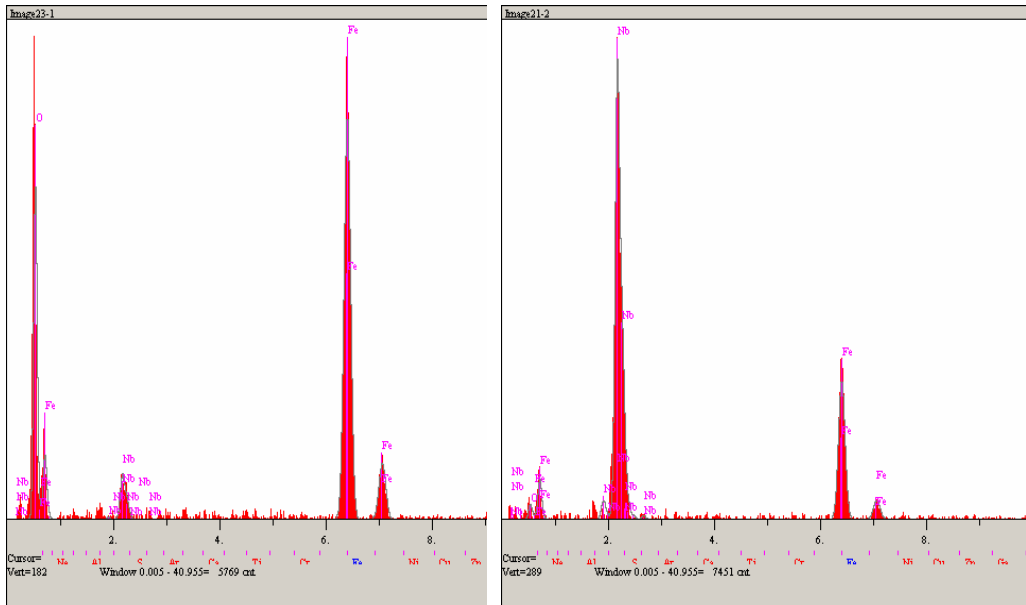
Aşınma deneyleri sonucunda elde edilen aşınma izleri ve aşınma üzerinden alınan EDS analizleri Şekil 7.62 ile Şekil 7.85' de verilmektedir.



(a)



(b)

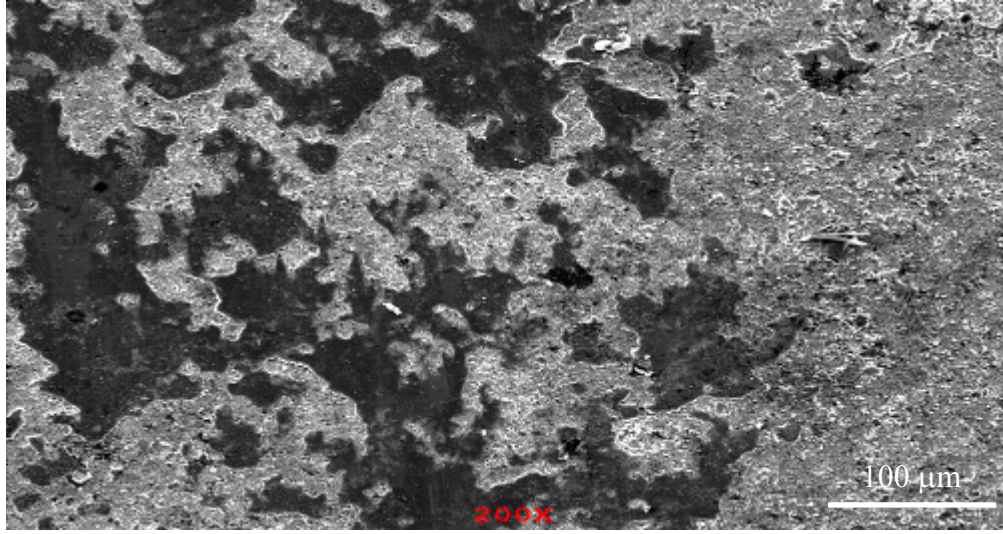


(c)

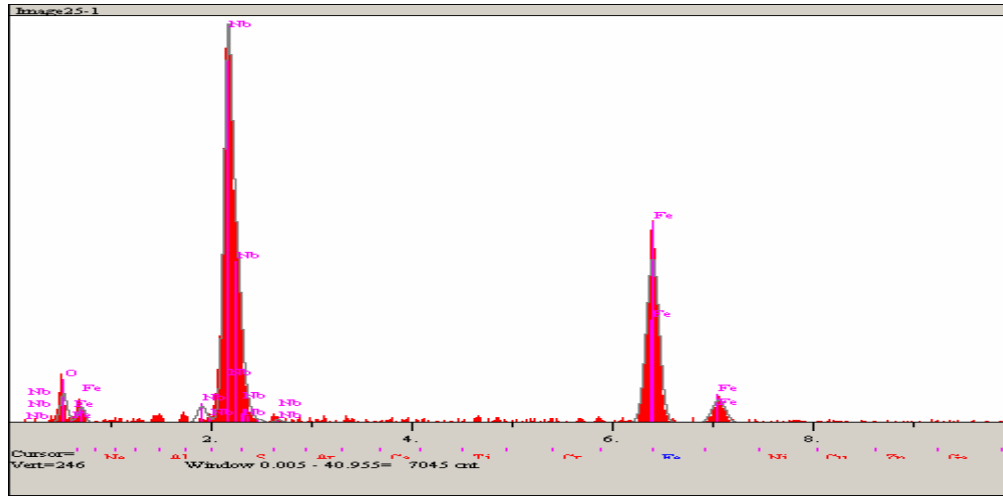
(d)

Şekil 7.62. 2N yük altında 0.1 m/s hızında 180 m mesafede, AISI 52100 çelik bilyeye karşı aşındırılan niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çeliğinde oluşan aşınma izinin (a) SEM mikroyapısı, (b) kaplama bölgesinden (c) çelik bilyenin sıvandığı bölgeden ve (d) sıvanmanın olmadığı aşınma bölgesinden alınan EDS analizlerini göstermektedir.

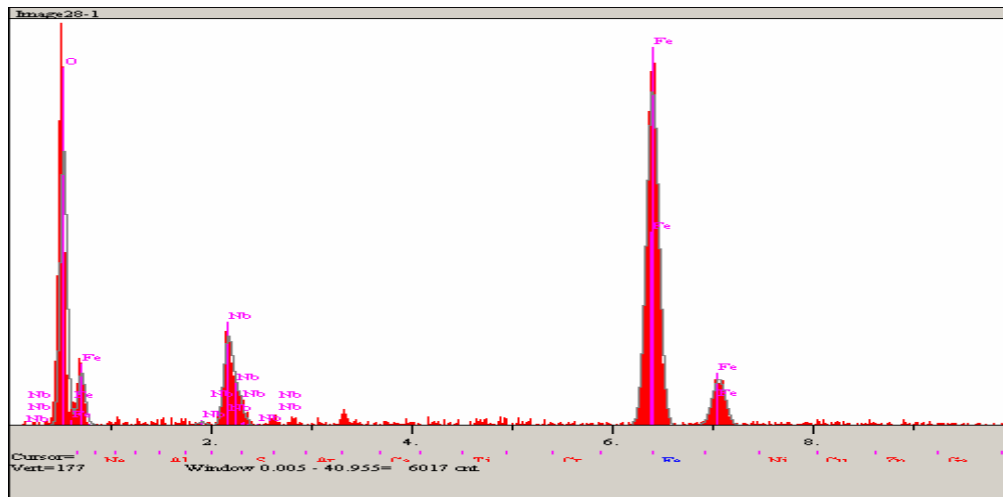




(a)

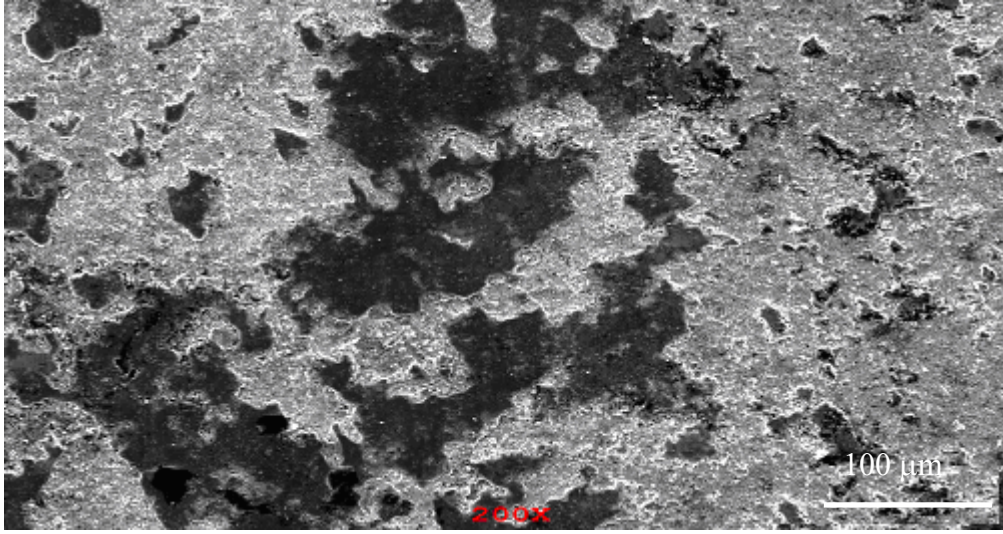


(b)

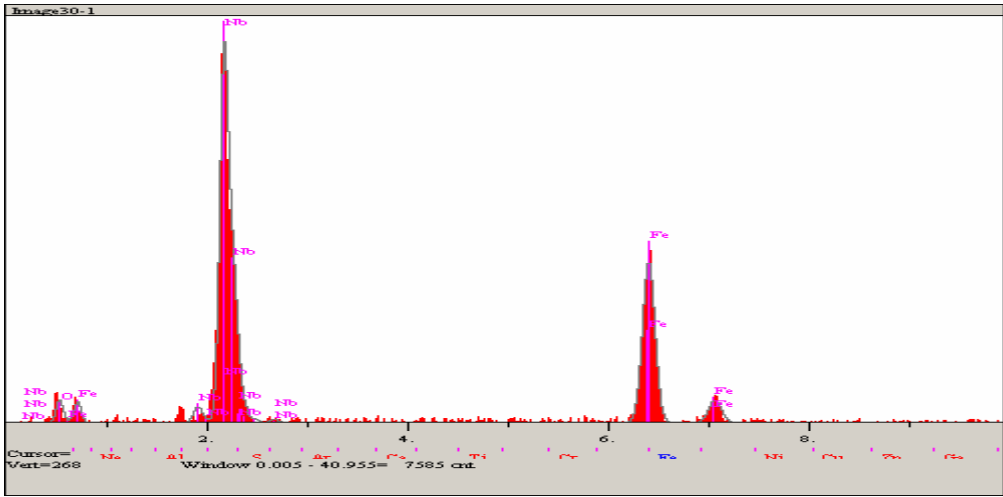


(c)

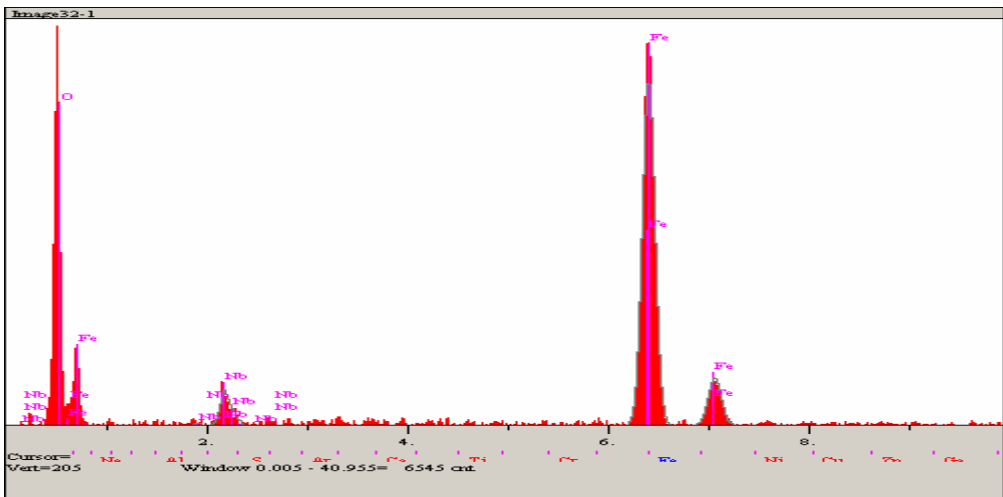
Şekil 7.63. 2N yük altında 0.3 m/s hızında 180 m mesafede, AISI 52100 çelik bilyeye karşı aşındırılan niyobum borür kaplanmış AISI 1010 çeliğinde oluşan aşınma izinin (a) SEM mikroyapısı, (b) çelik bilyenin sıvandığı bölgeden ve (c) sıvanmanın olmadığı aşınma bölgesinden alınan EDS analizlerini göstermektedir.



(a)

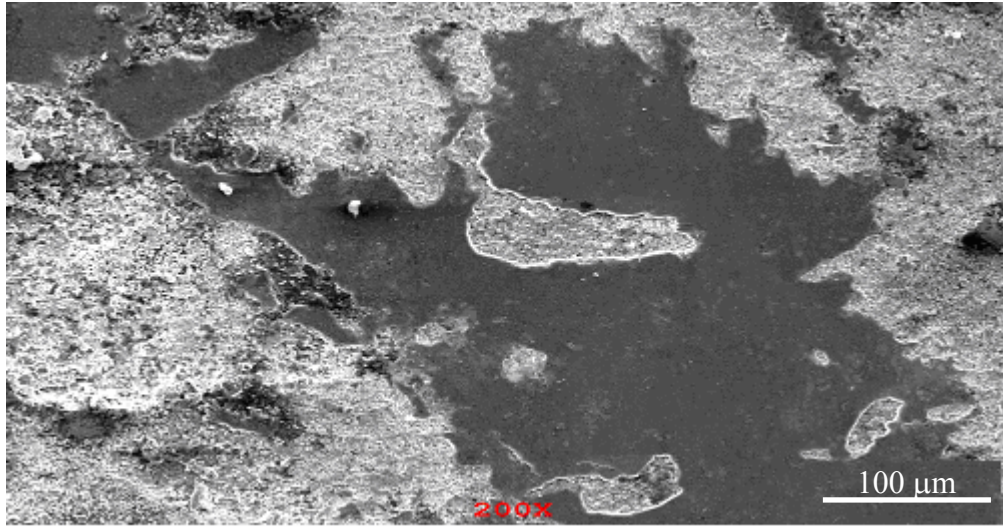


(b)

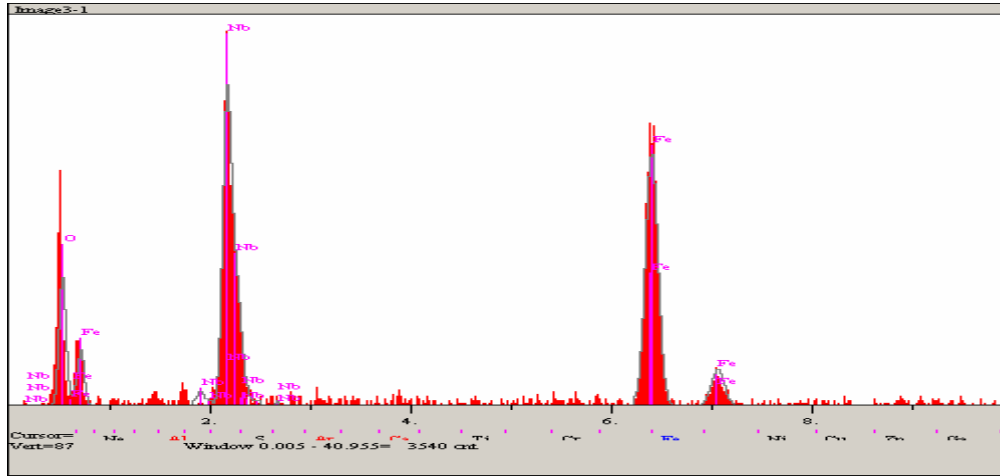


(c)

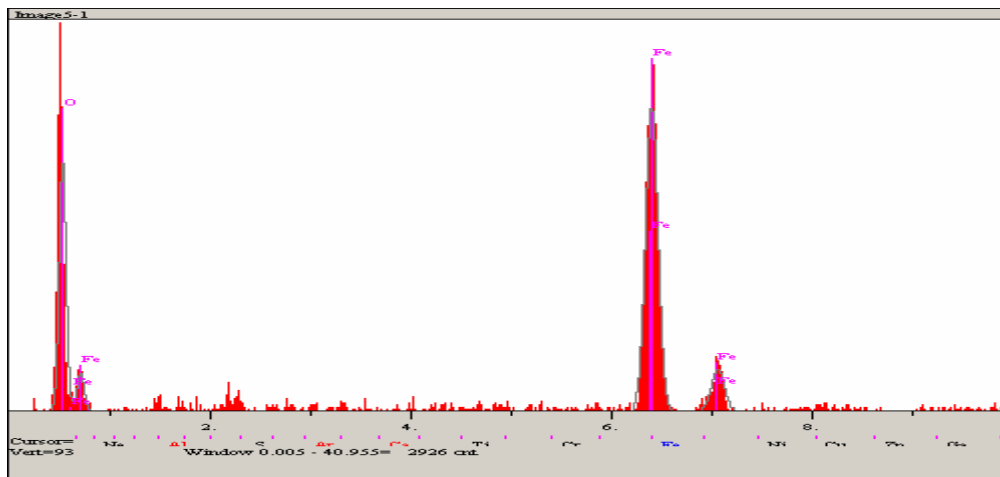
Şekil 7.64. 2N yük altında 0.5 m/s hızında 180 m mesafede, AISI 52100 çelik bilyeye karşı aşındırılan niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çeliğinde oluşan aşınma izinin (a) SEM mikroyapısı, (b) çelik bilyenin sıvandığı bölgeden ve (c) sıvanmanın olmadığı aşınma bölgesinden alınan EDS analizlerini göstermektedir.



(a)

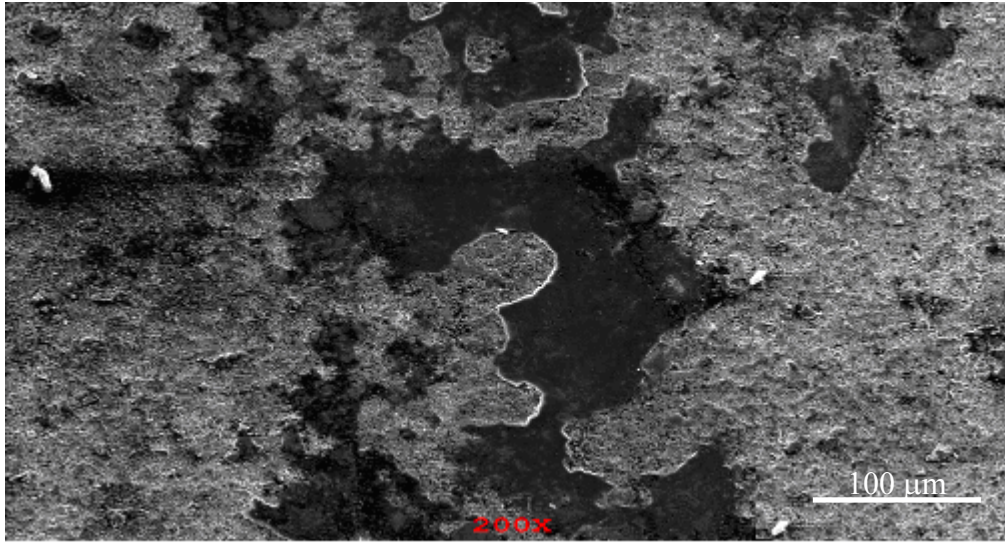


(b)

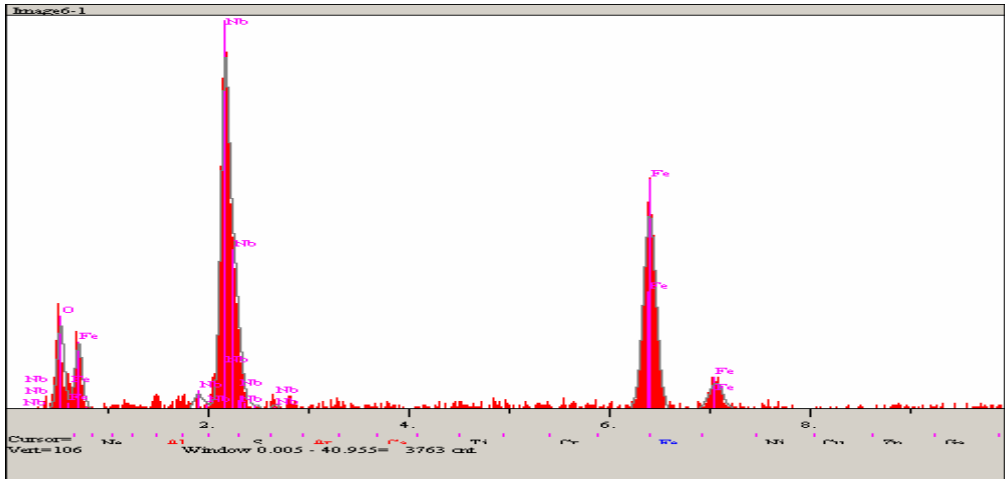


(c)

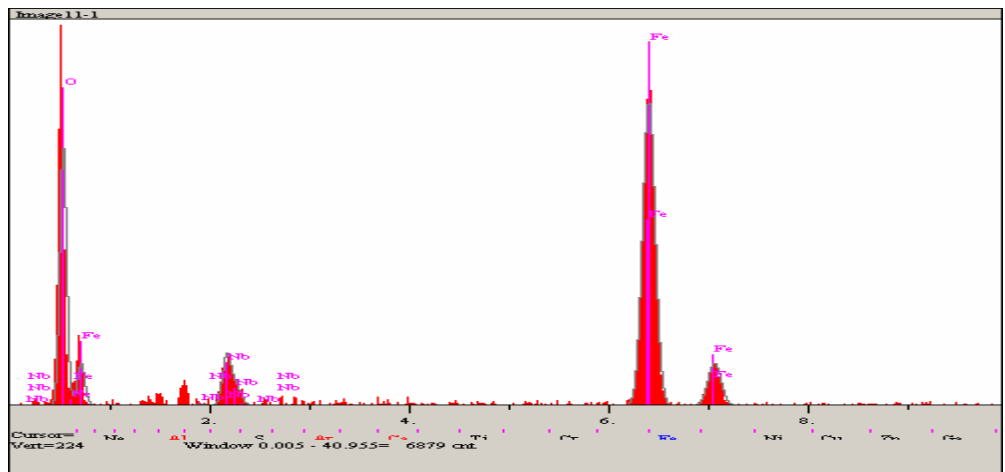
Şekil 7.65. 2N yük altında 0.1 m/s hızında 180 m mesafede, AISI 52100 çelik bilyeye karşı aşındırılan niyobum borür kaplanmış AISI 4140 çeliğinde oluşan aşınma izinin (a) SEM mikroyapısı, (b) çelik bilyenin sıvandığı bölgeden ve (c) sıvanmanın olmadığı aşınma bölgesinden alınan EDS analizlerini göstermektedir.



(a)

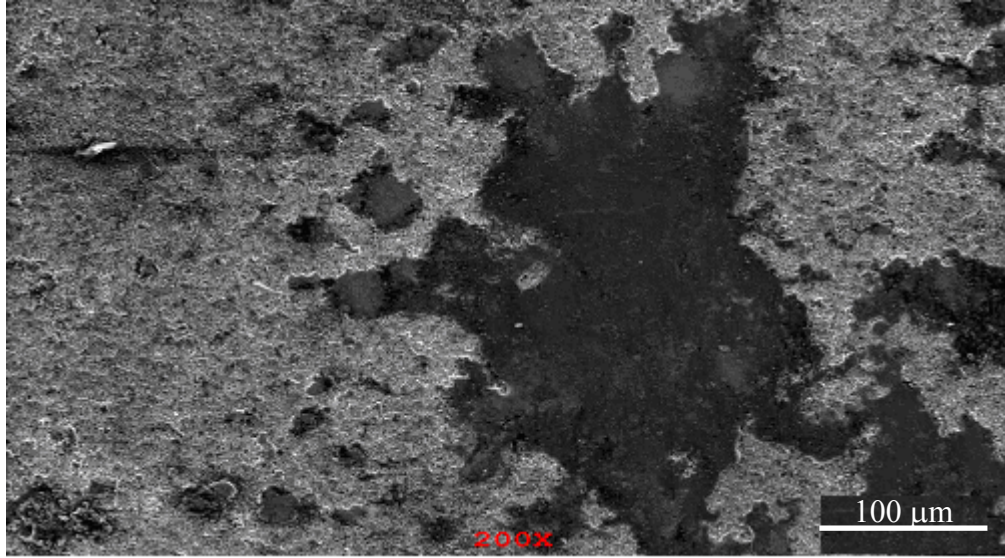


(b)

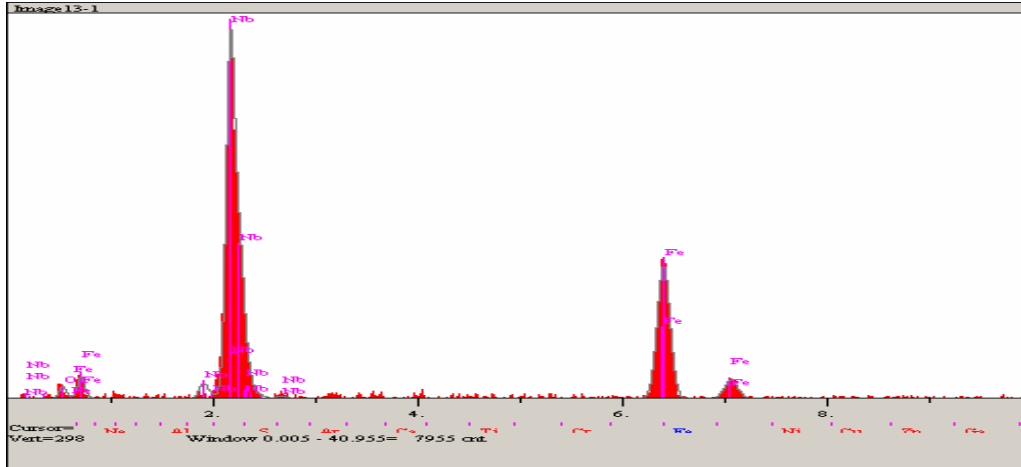


(c)

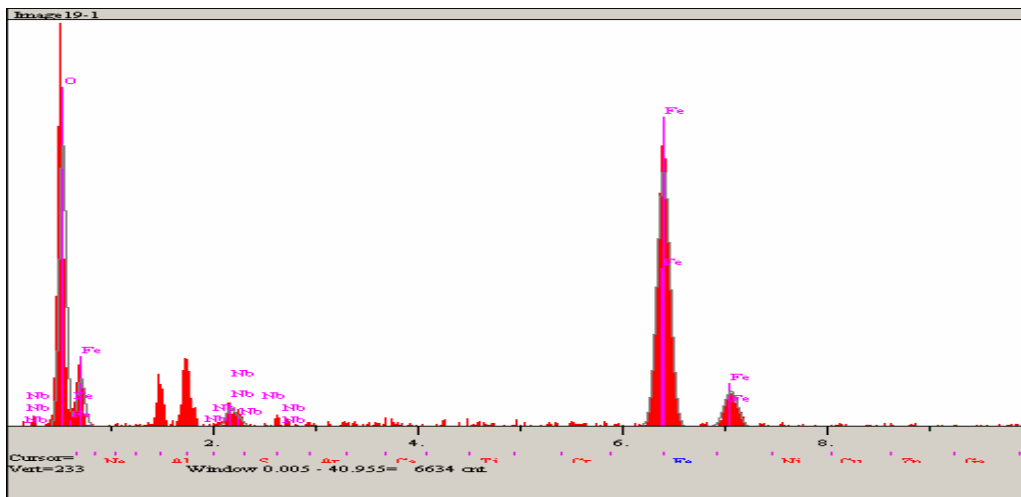
Şekil 7.66. 2N yük altında 0.3 m/s hızında 180 m mesafede, AISI 52100 çelik bilyeye karşı aşındırılan niobyum borür kaplanmış AISI 4140 yapısı, (b) çelik bilyenin sıvandığı bölgeden ve (c) sıvanmanın olmadığı aşınma bölgesinden alınan EDS analizlerini göstermektedir.



(a)

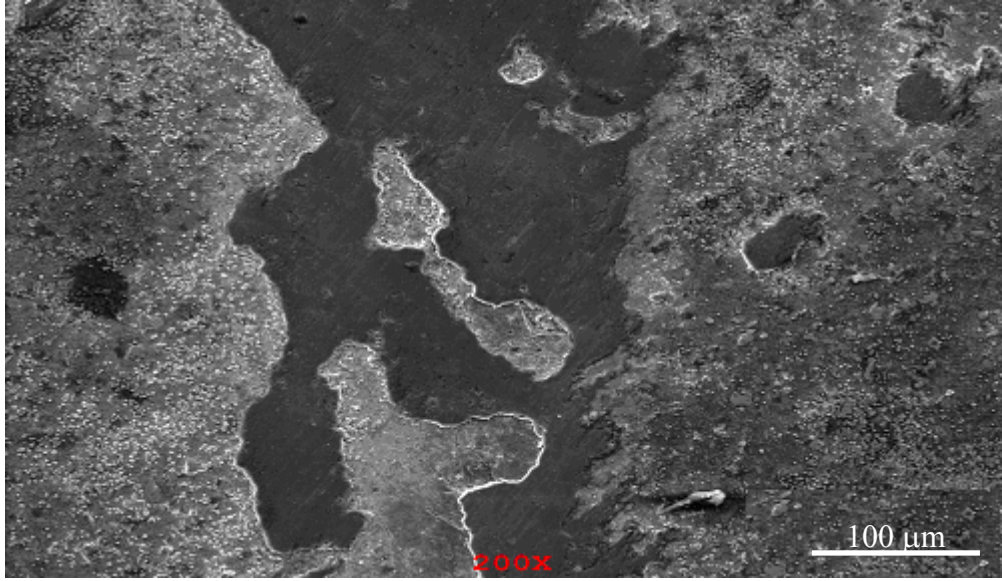


(b)

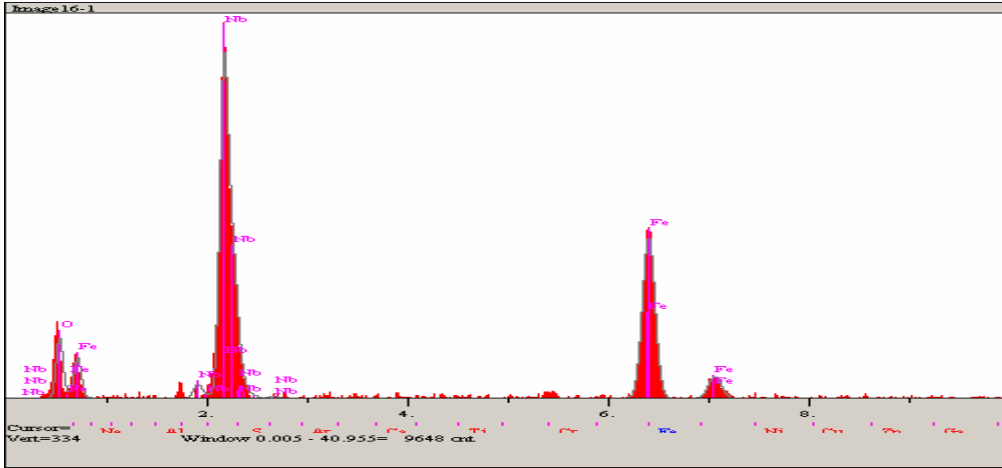


(c)

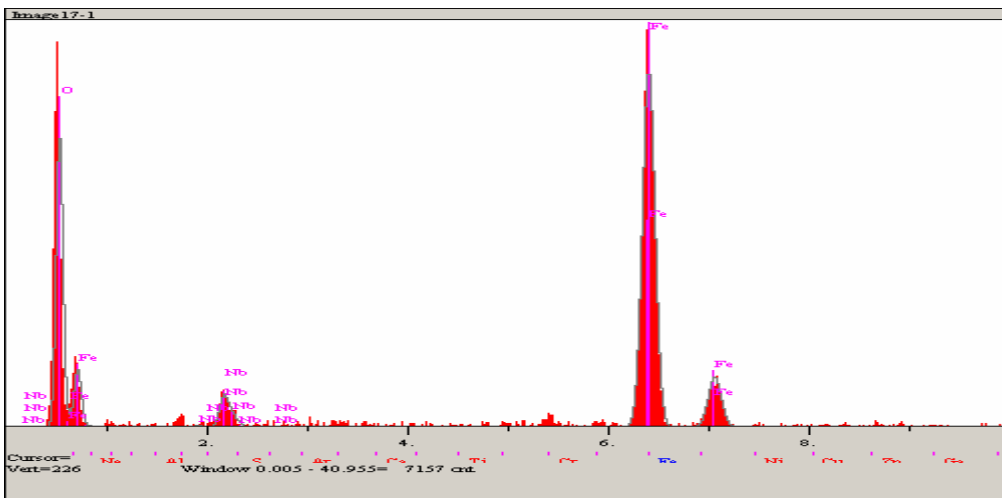
Şekil 7.67. 2N yük altında 0.3 m/s hızında 180 m mesafede, AISI 52100 çelik bilyeye karşı aşındırılan niyobum borür kaplanmış AISI 4140 çeliğinde oluşan aşınma izinin (a) SEM mikroyapısı, (b) çelik bilyenin sıvandığı bölgeden ve (c) sıvanmanın olmadığı aşınma bölgesinden alınan EDS analizlerini göstermektedir.



(a)

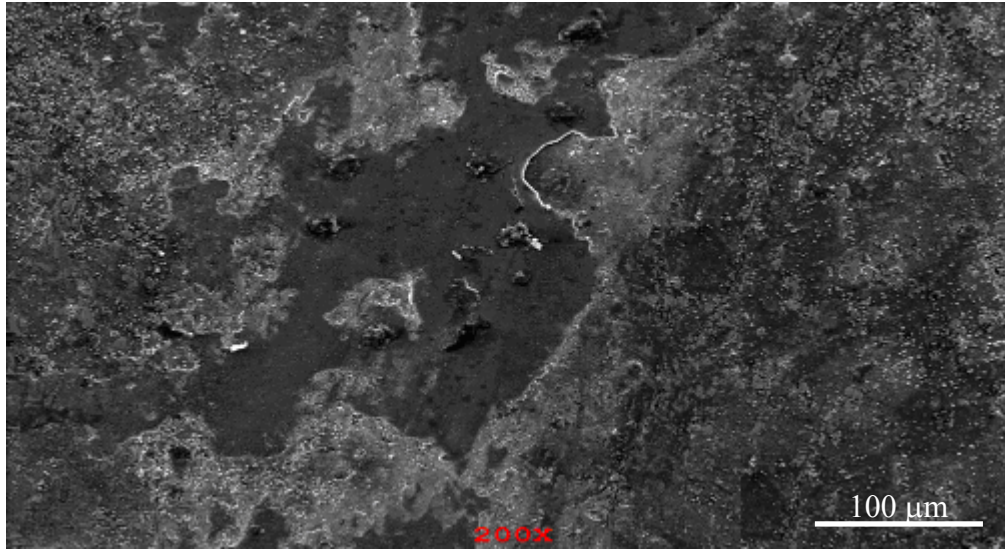


(b)

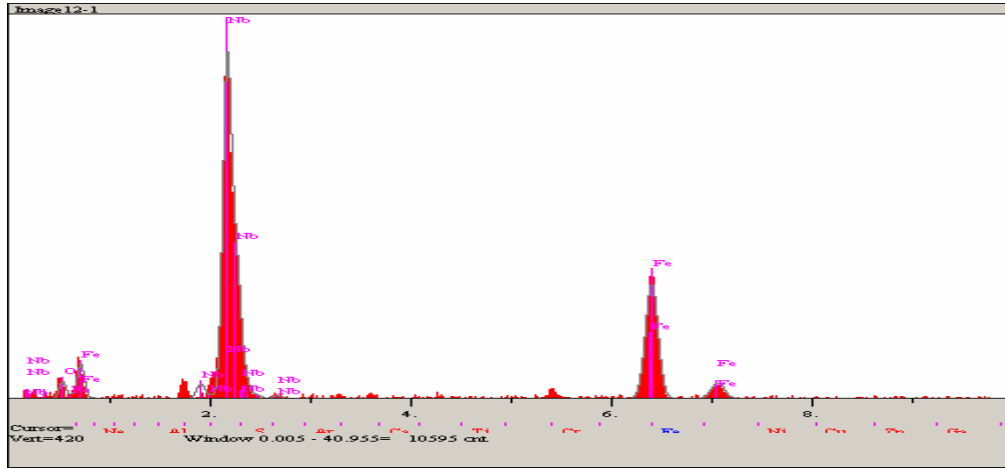


(c)

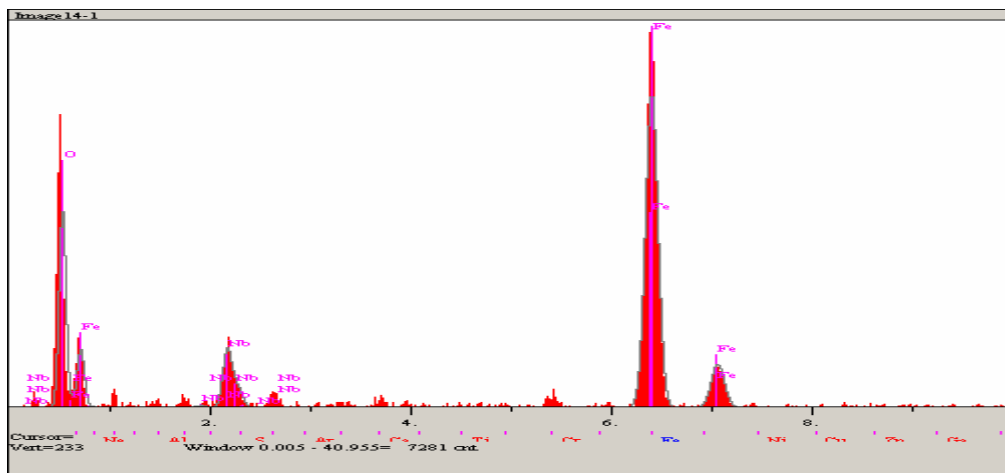
Şekil 7.68. 2N yük altında 0.1 m/s hızında 180 m mesafede, AISI 52100 çelik bilyeye karşı aşındırılan niobyum borür kaplanmış AISI D2 çeliğinde oluşan aşınma izinin (a) SEM mikroyapısı, (b) çelik bilyenin sıvandığı bölgeden ve (c) sıvanmanın olmadığı aşınma bölgesinden alınan EDS analizlerini göstermektedir.



(a)

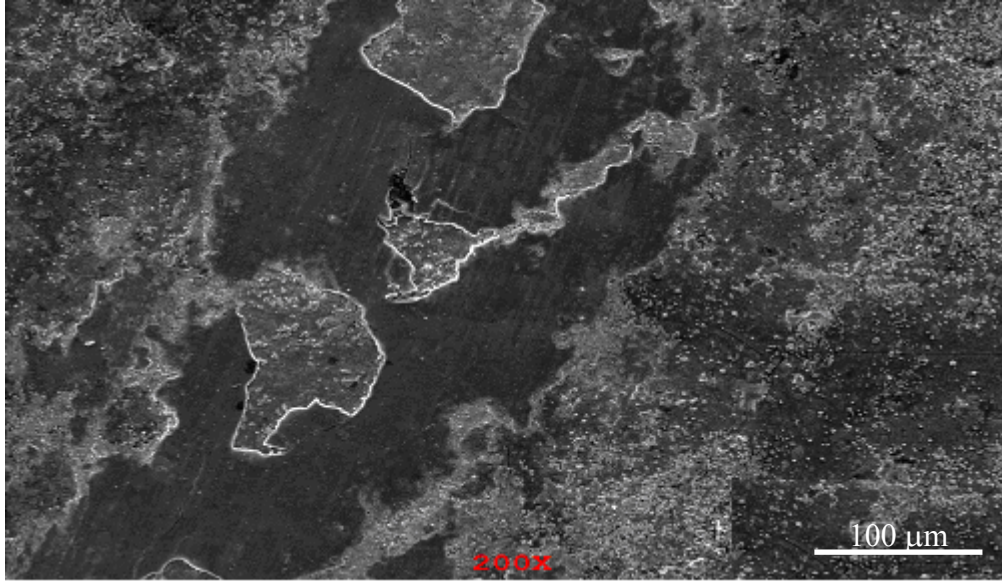


(b)

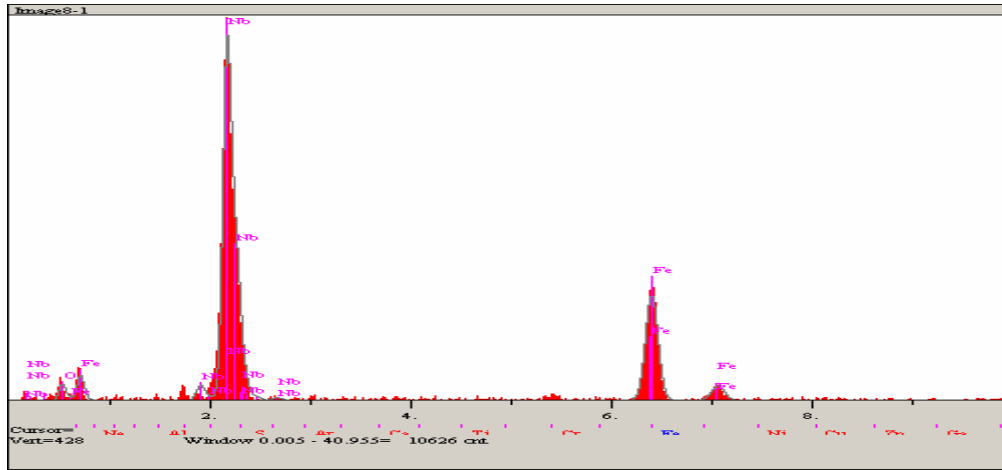


(c)

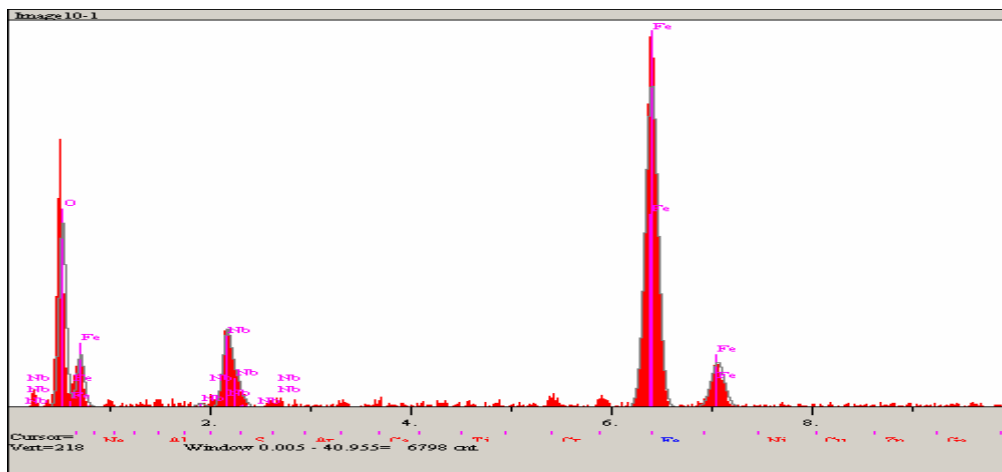
Şekil 7.69. 2N yük altında 0.3 m/s hızında 180 m mesafede, AISI 52100 çelik bilyeye karşı aşındırılan niobyum borür kaplanmış AISI D2 çeliğinde oluşan aşınma izinin (a) SEM mikroyapısı, (b) çelik bilyenin sıvandığı bölgeden ve (c) sıvanmanın olmadığı aşınma bölgesinden alınan EDS analizlerini göstermektedir.



(a)



(b)



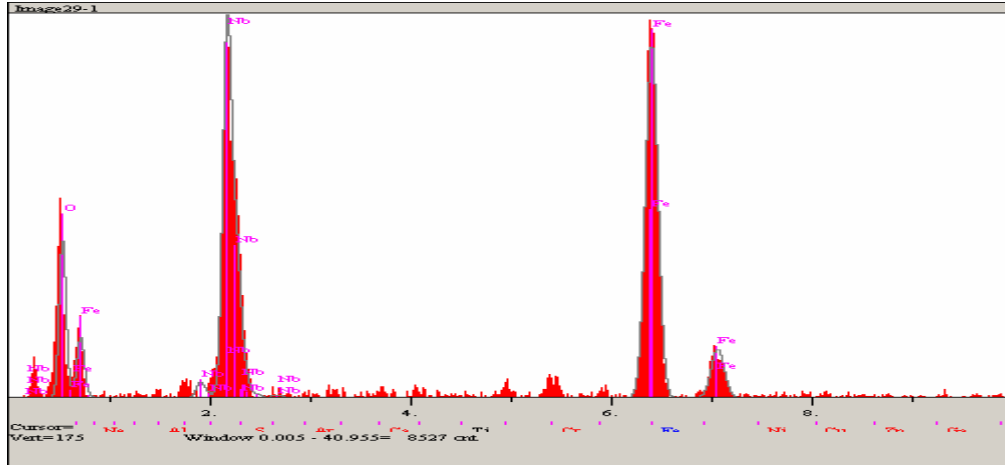
(c)

Şekil 7.70. 2N yük altında 0.5 m/s hızında 180 m mesafede, AISI 52100 çelik bilyeye karşı aşındırılan niobyum borür kaplanmış AISI D2 çeliğinde oluşan aşınma izinin (a) SEM mikroyapısı, (b) çelik bilyenin sıvandığı bölgeden ve (c) sıvanmanın olmadığı aşınma bölgesinden alınan EDS analizlerini göstermektedir.

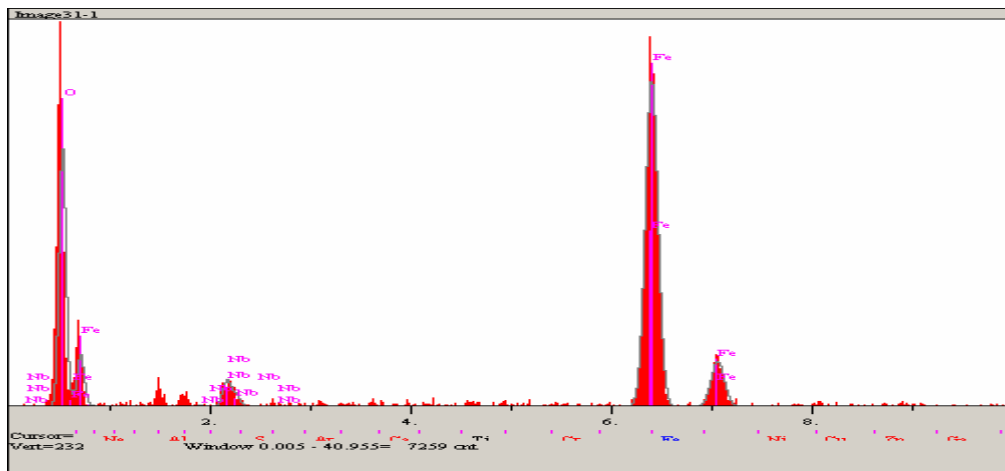




(a)

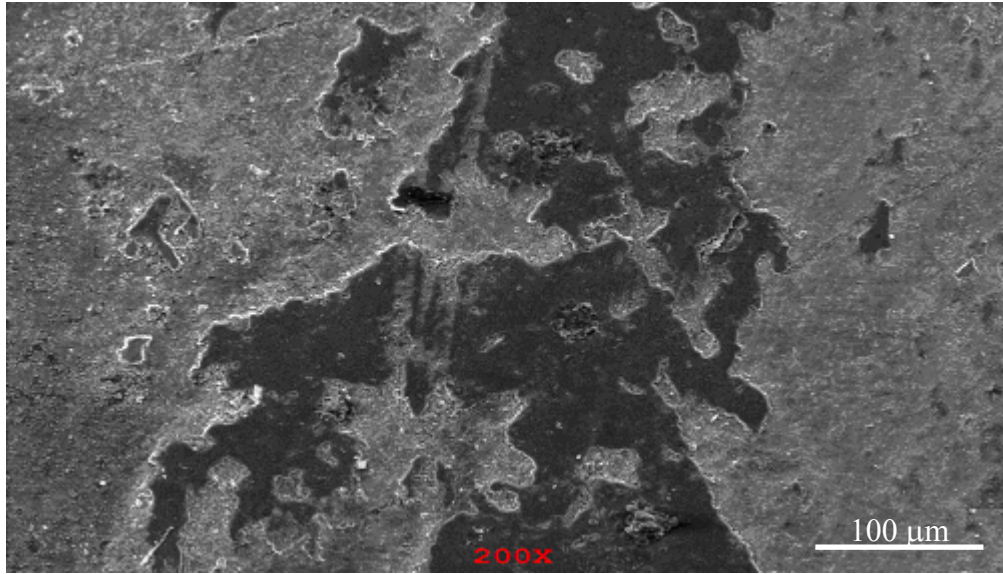


(b)

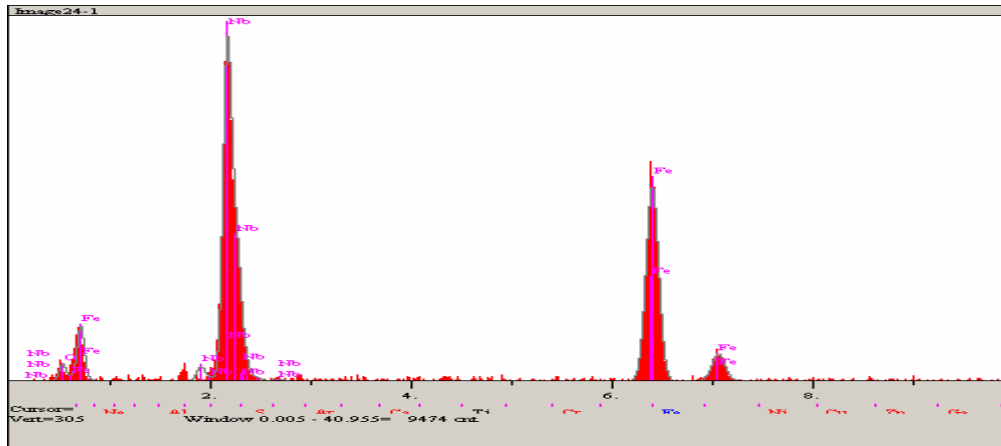


(c)

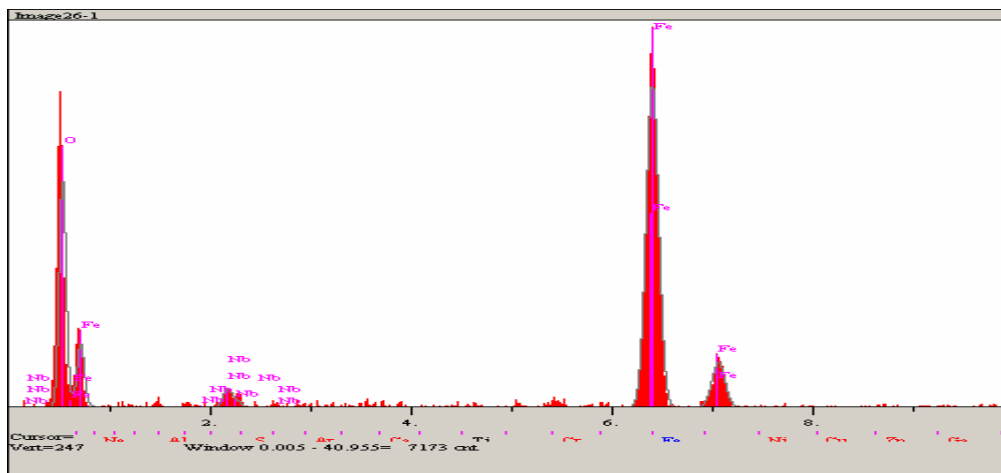
Şekil 7.71. 2N yük altında 0.1 m/s hızında 180 m mesafede, AISI 52100 çelik bilyeye karşı aşındırılan niobyum borür kaplanmış AISI M2 çeliğinde oluşan aşınma izinin (a) SEM mikroyapısı, (b) çelik bilyenin sıvandığı bölgeden ve (c) sıvanmanın olmadığı aşınma bölgesinden alınan EDS analizlerini göstermektedir.



(a)

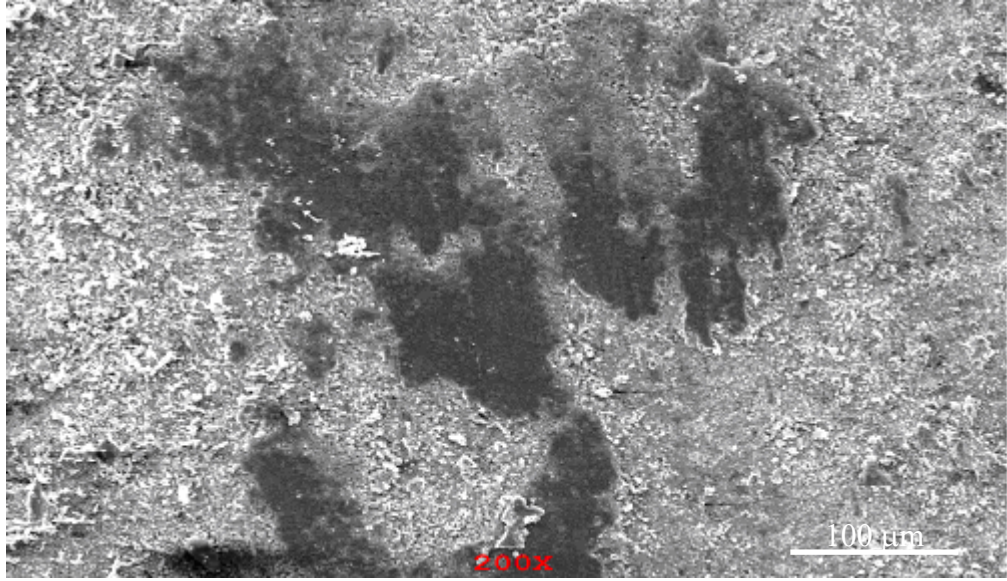


(b)

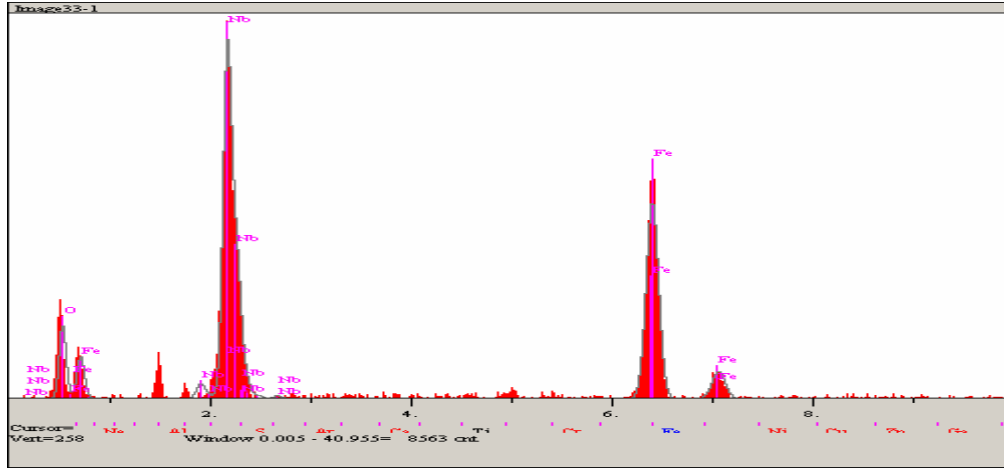


(c)

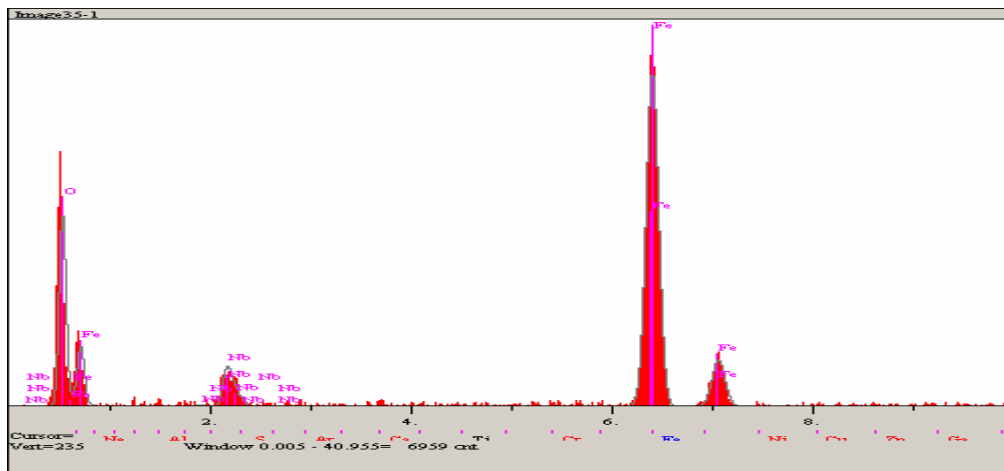
Şekil 7.72. 2N yük altında 0.3 m/s hızında 180 m mesafede, AISI 52100 çelik bilyeye karşı aşındırılan niyobum borür kaplanmış AISI M2 çeliğinde oluşan aşınma izinin (a) SEM mikro yapısı, (b) çelik bilyenin sıvandığı bölgeden ve (c) sıvanmanın olmadığı aşınma bölgesinden alınan EDS analizlerini göstermektedir.



(a)

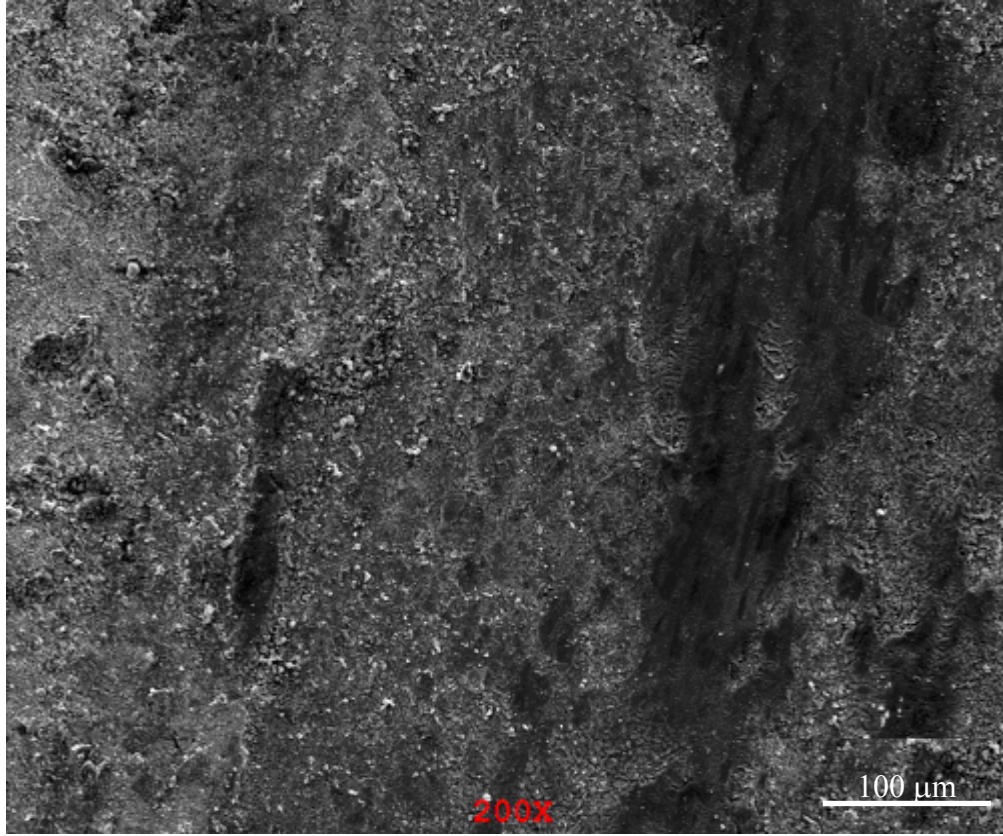


(b)

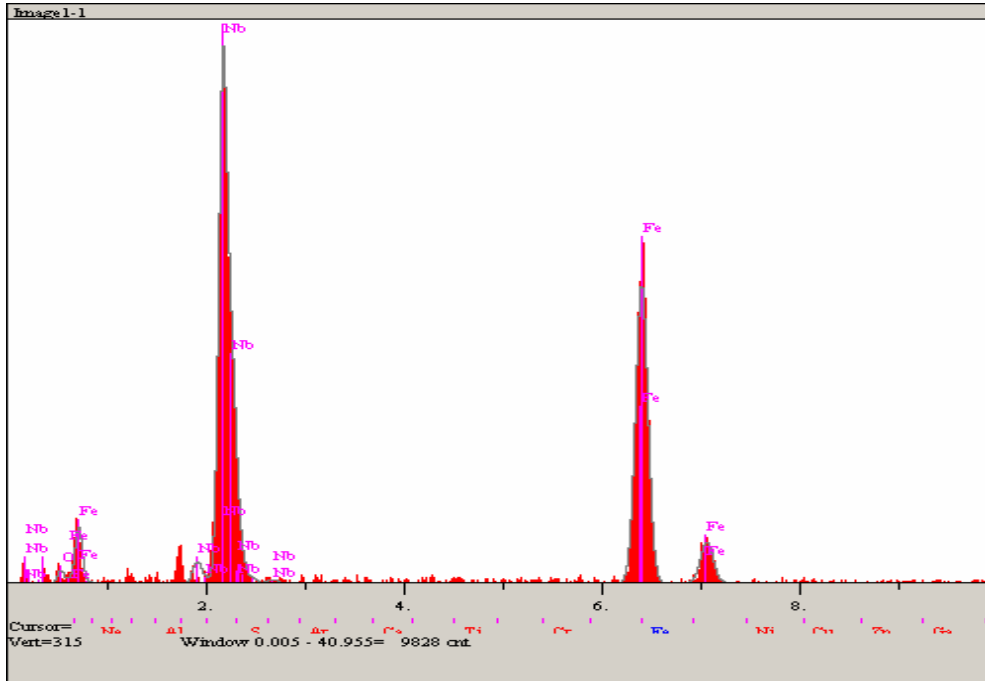


(c)

Şekil 7.73. 2N yük altında 0.5 m/s hızında 180 m mesafede, AISI 52100 çelik bilyeye karşı aşındırılan niyobum borür kaplanmış AISI M2 çeliğinde oluşan aşınma izinin (a) SEM mikroyapısı, (b) çelik bilyenin sıvandığı bölgeden ve (c) sıvanmanın olmadığı aşınma bölgesinden alınan EDS analizlerini göstermektedir.

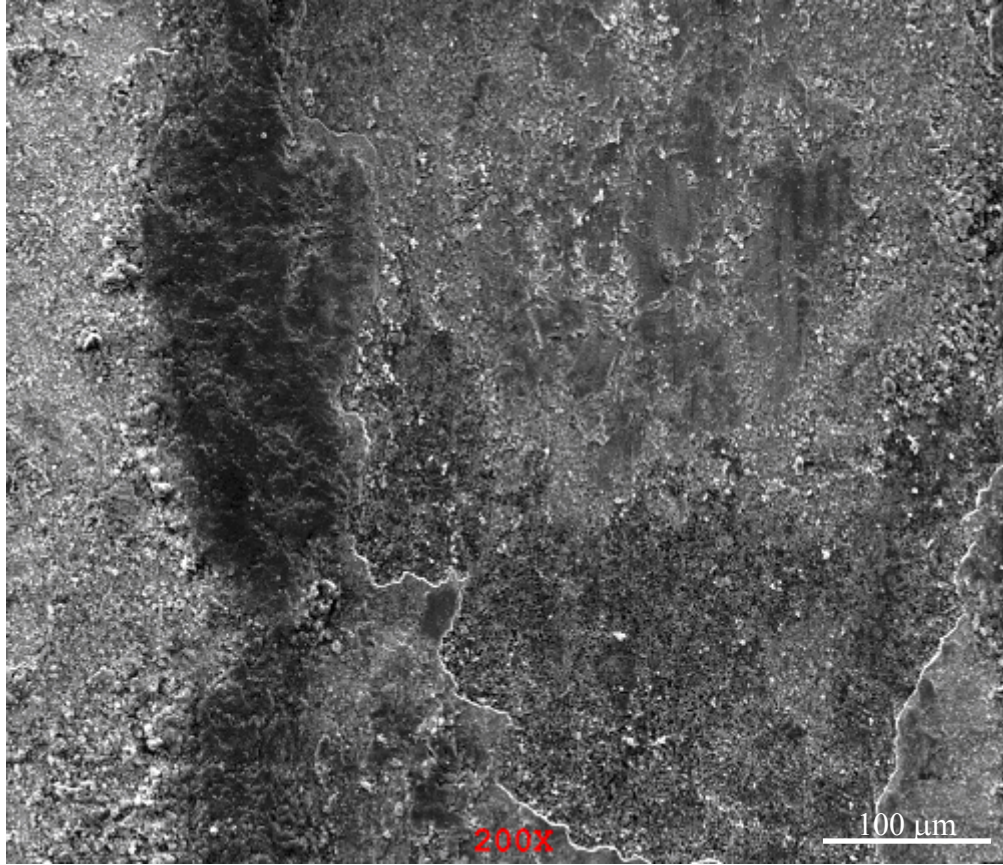


(a)

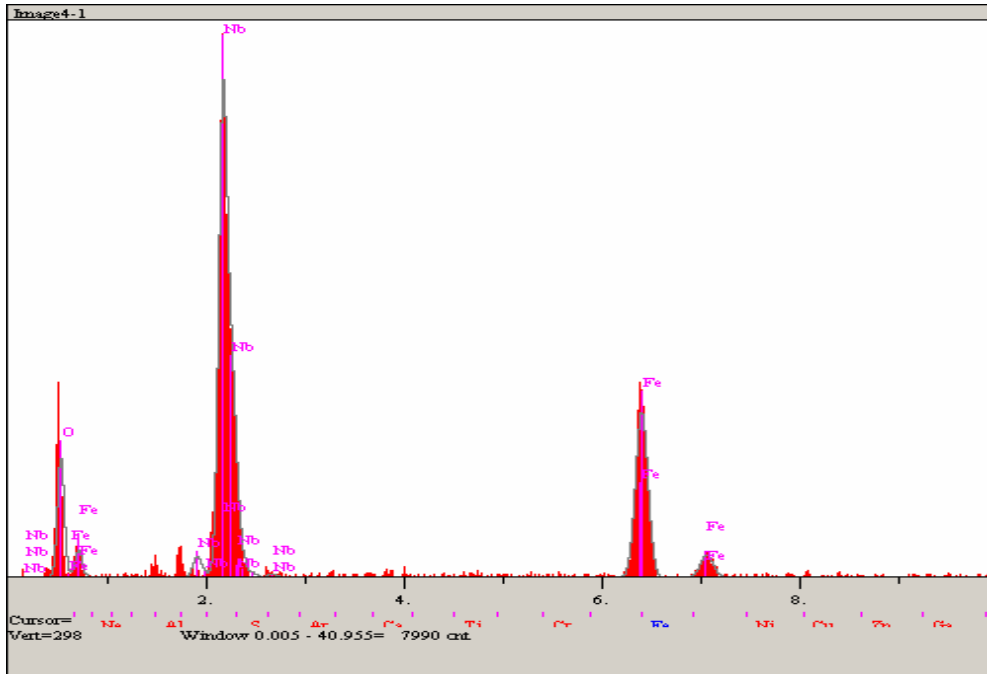


(b)

Şekil 7.74. 2N yük altında 0.1 m/s sürtünme hızında 180 metre mesafede, alümina bilyeye karşı aşındırılan niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çeliğinin yüzeyinde oluşan aşınma izinin (a) SEM mikroyapısı, (b) aşınma bölgesinden alınan EDS analizini göstermektedir.

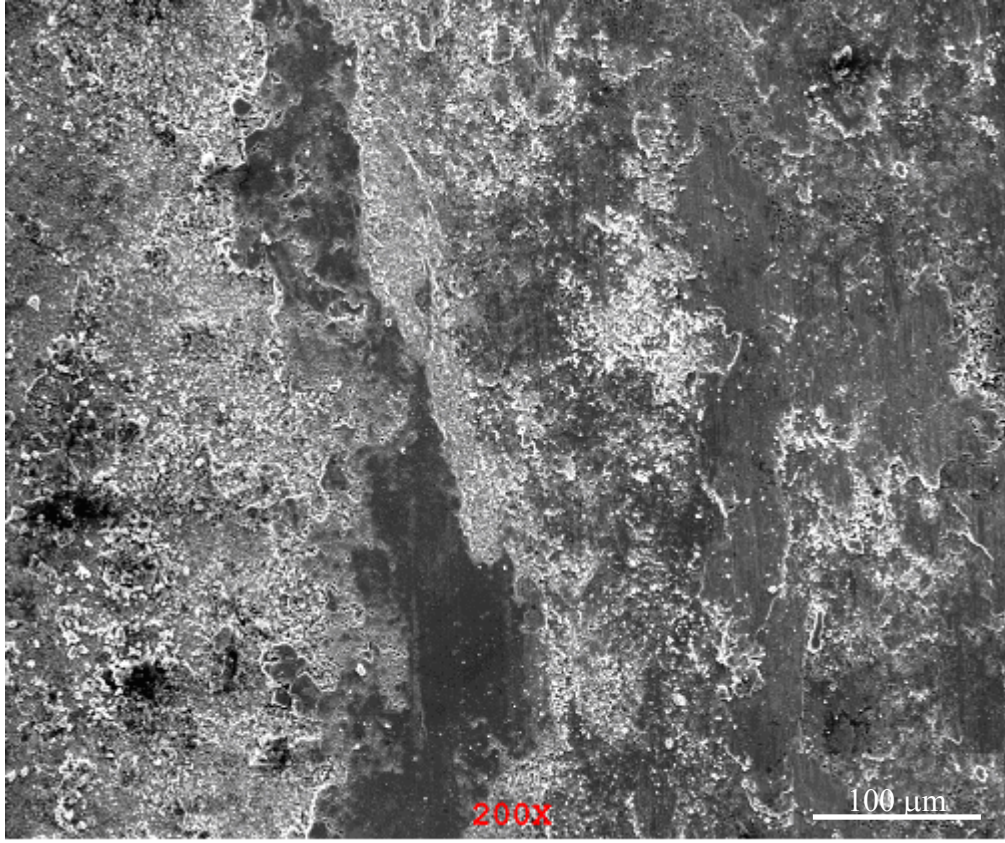


(a)

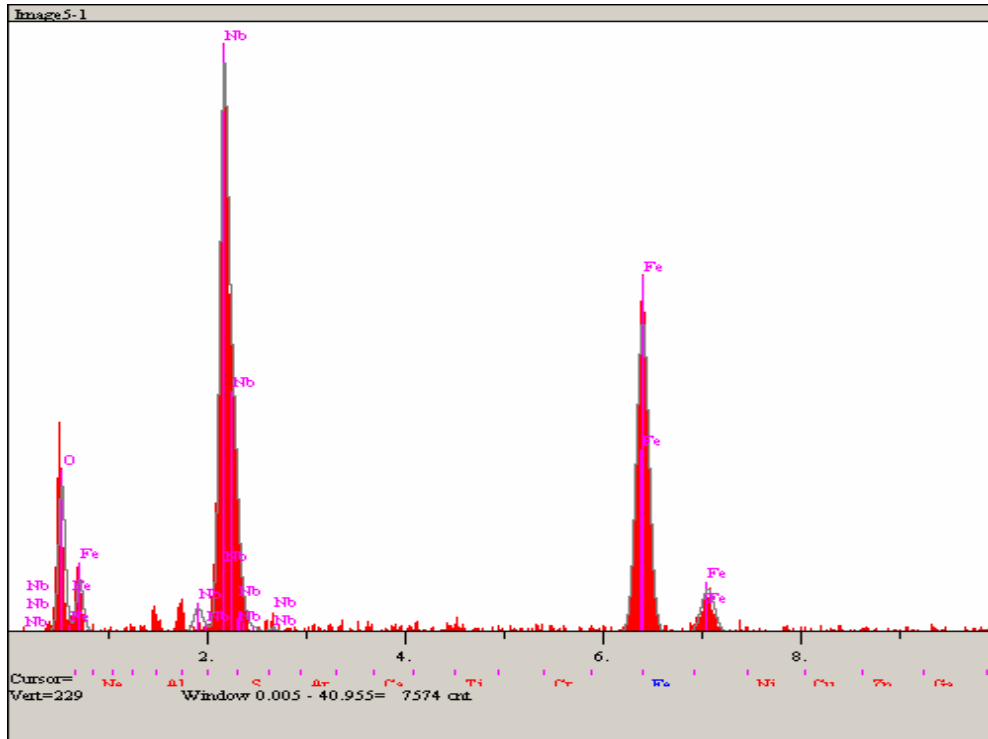


(b)

Şekil 7.75. 2N yük altında 0.3 m/s sürtünme hızında 180 metre mesafede, alümina bilyeye karşı aşındırılan niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çeliğinin yüzeyinde oluşan aşınma izinin (a) SEM mikroyapısı, (b) aşınma bölgesinden alınan EDS analizini göstermektedir.

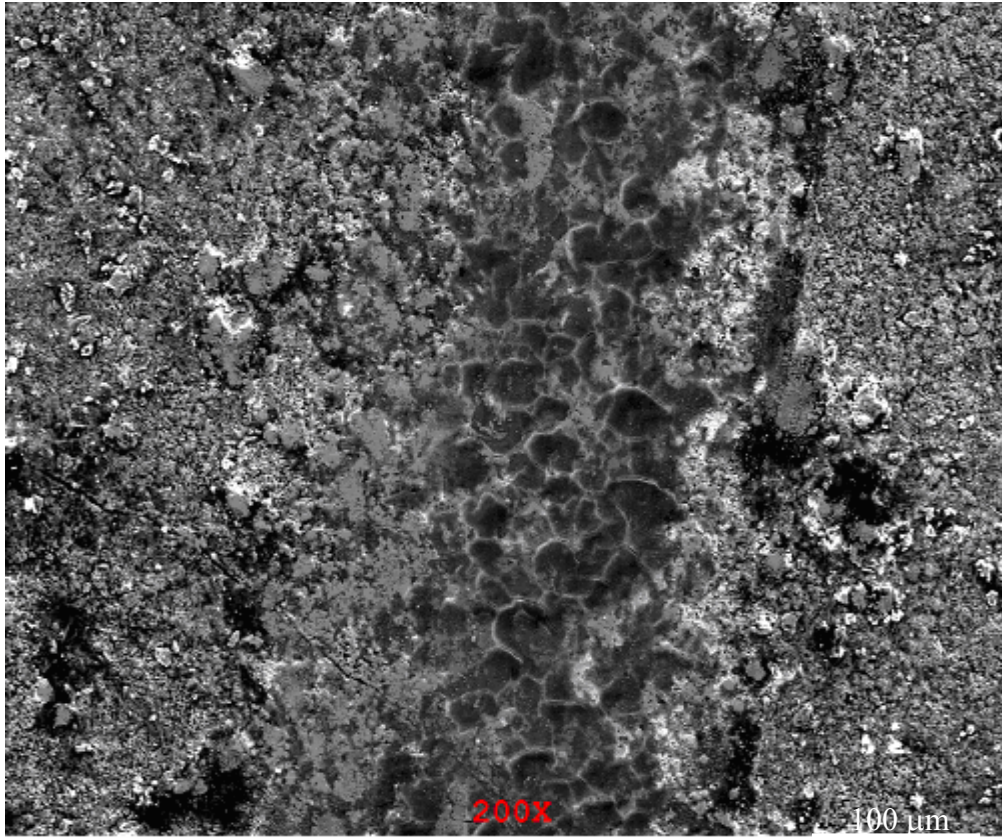


(a)

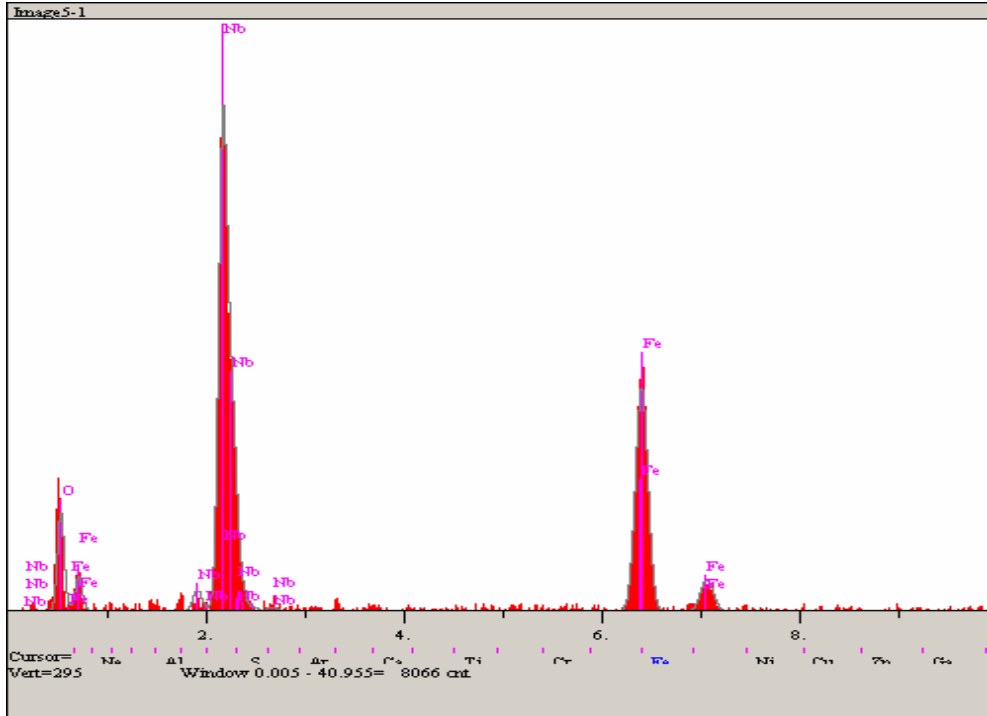


(b)

Şekil 7.76. 2N yük altında 0.5 m/s sürtünme hızında 180 metre mesafede, alümina bilyeye karşı aşındırılan niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çeliğinin yüzeyinde oluşan aşınma izinin (a) SEM mikroyapısı, (b) aşınma bölgesinden alınan EDS analizini göstermektedir.

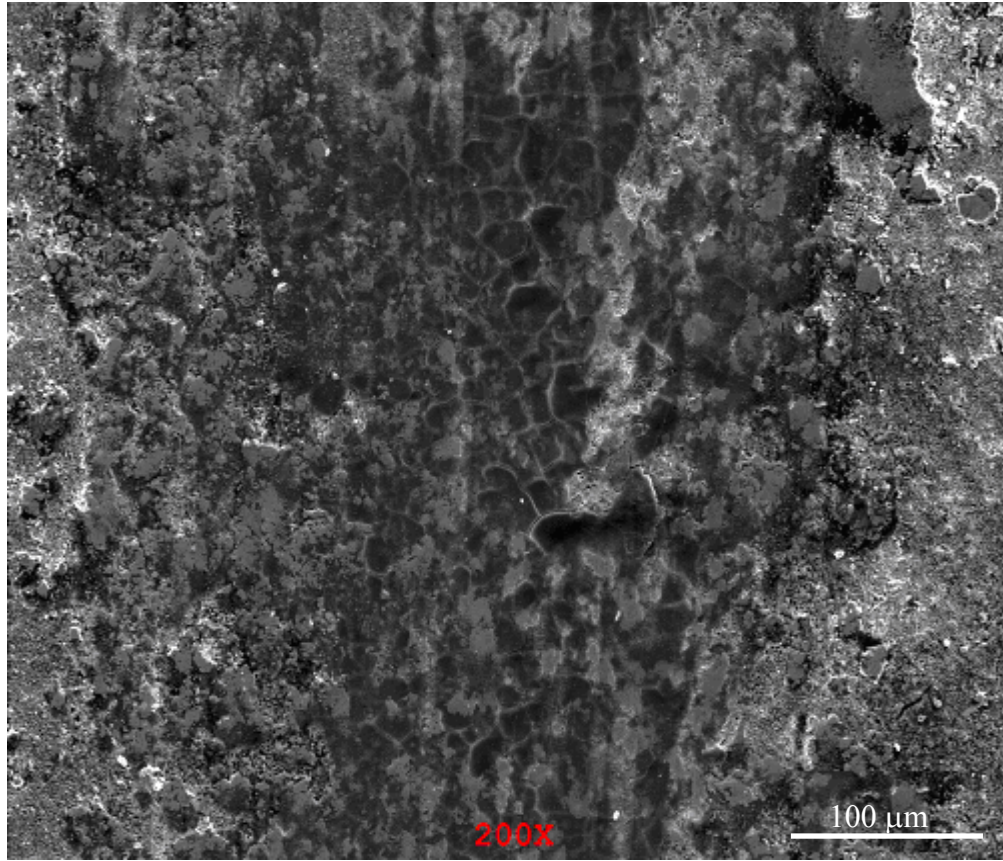


(a)

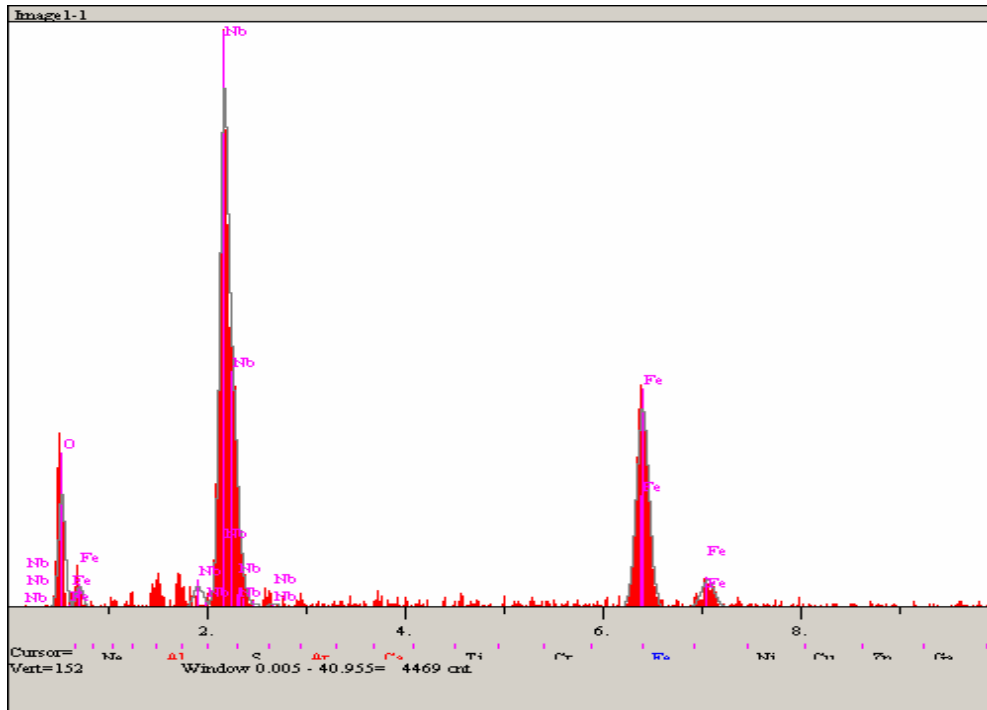


(b)

Şekil 7.77. 2N yük altında 0.1 m/s sürtünme hızında 180 metre mesafede, alümina bilyeye karşı aşındırılan niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çeliğinin yüzeyinde oluşan aşınma izinin (a) SEM mikroyapısı, (b) aşınma bölgesinden alınan EDS analizini göstermektedir.



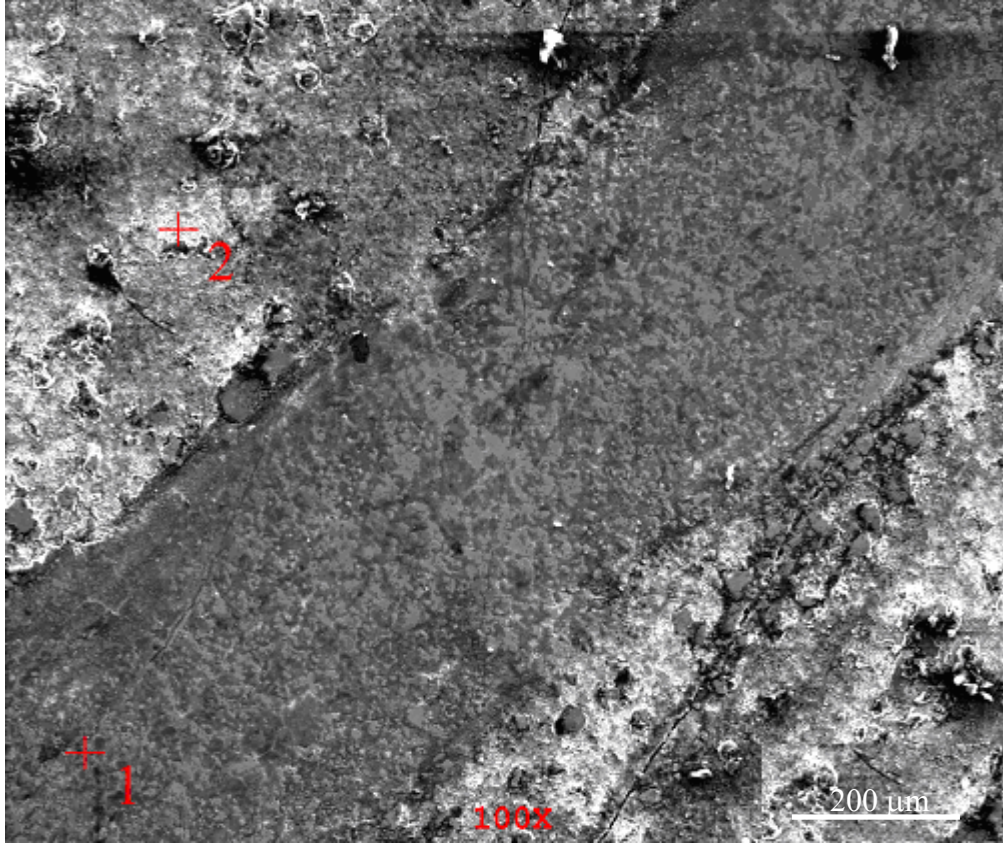
(a)



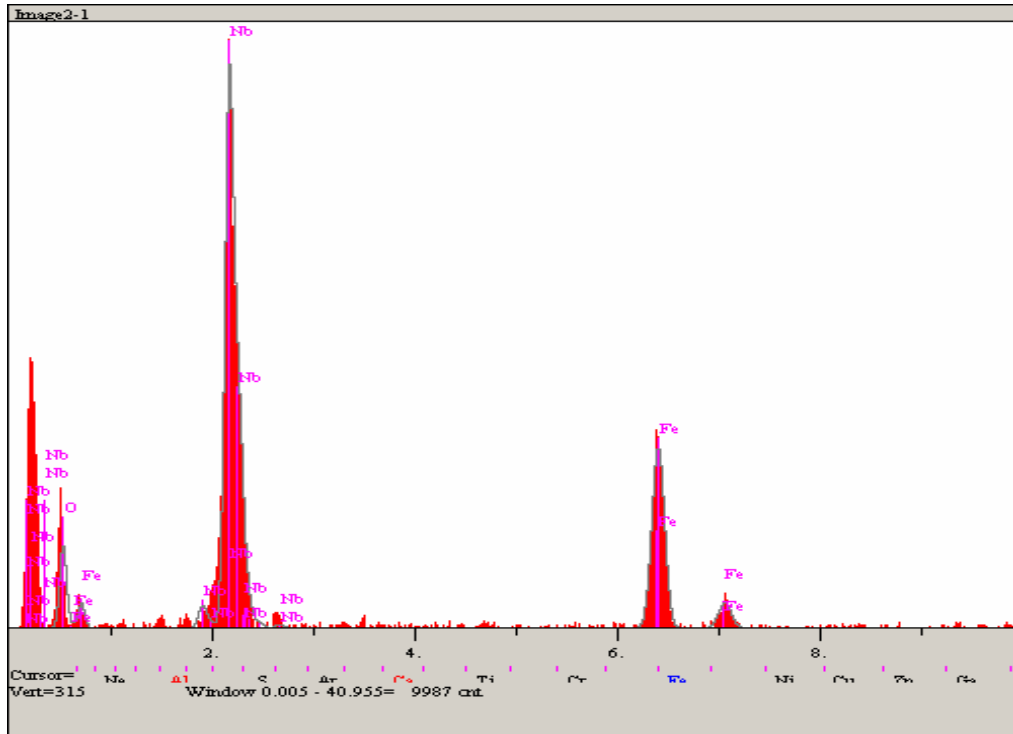
(b)

Şekil 7.78. 2N yük altında 0.3 m/s sürtünme hızında 180 metre mesafede, alümina bilyeye karşı aşındırılan niyobum borür kaplanmış AISI 4140 çeliğinin yüzeyinde oluşan aşınma izinin (a) SEM mikroyapısı, (b) aşınma bölgesinden alınan EDS analizini göstermektedir.



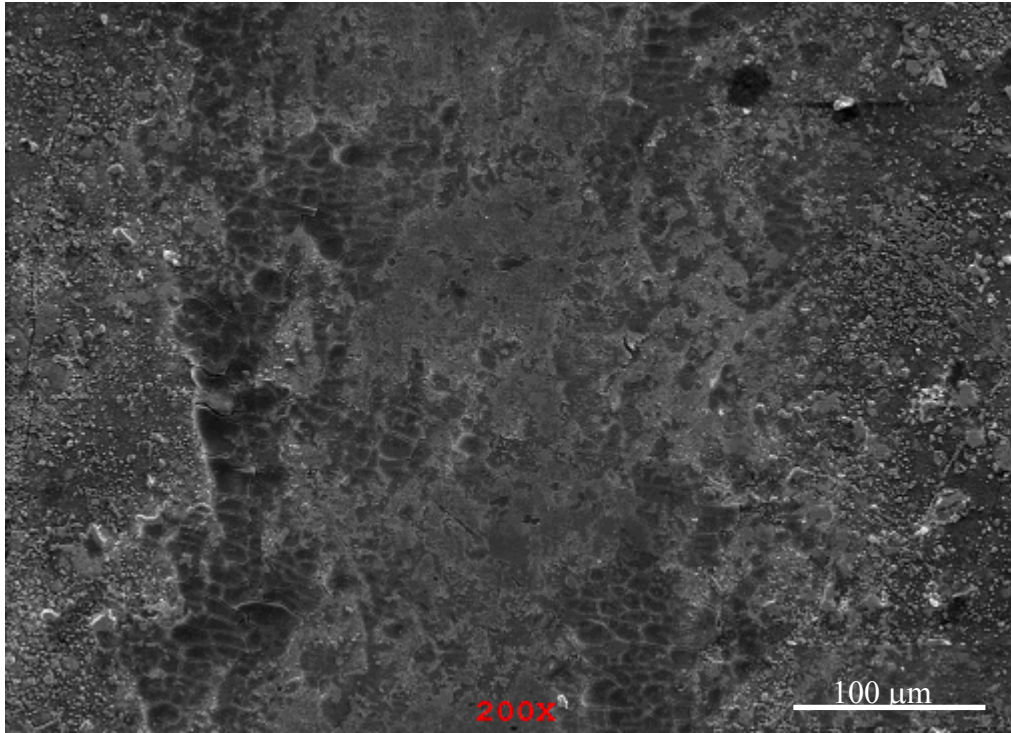


(a)

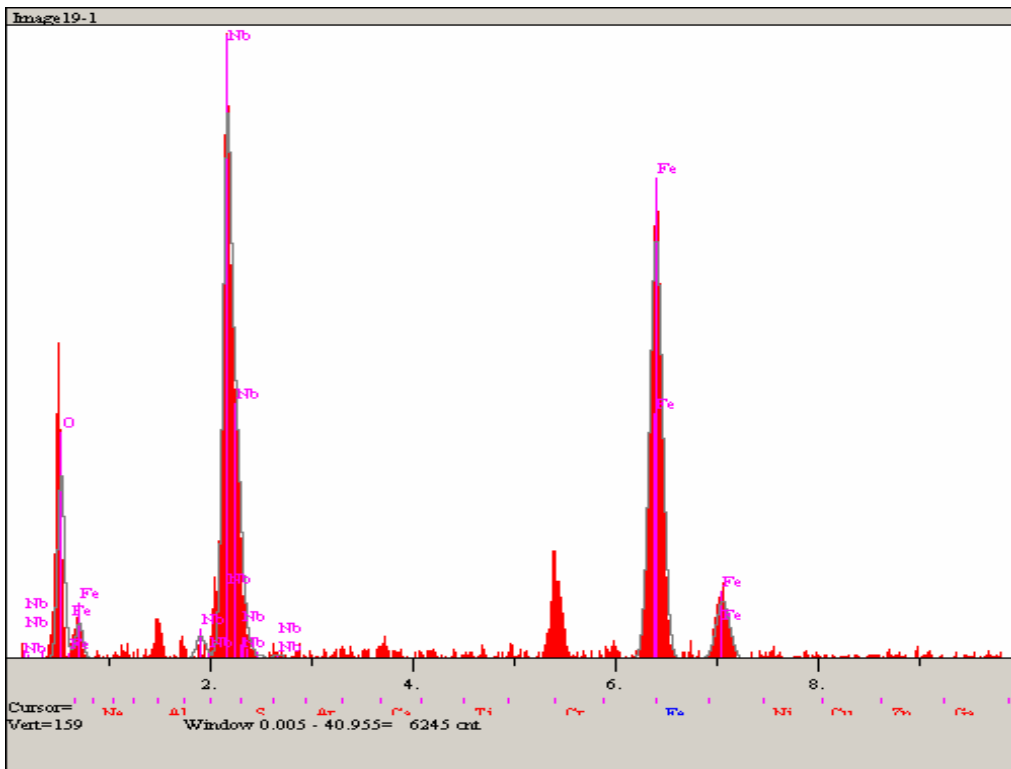


(b)

Şekil 7.79. 2N yük altında 0.5 m/s sürtünme hızında 180 metre mesafede, alümina bilyeye karşı aşındırılan niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çeliğinin yüzeyinde oluşan aşınma izinin (a) SEM mikroyapısı, (b) aşınma bölgesinden alınan EDS analizini göstermektedir.

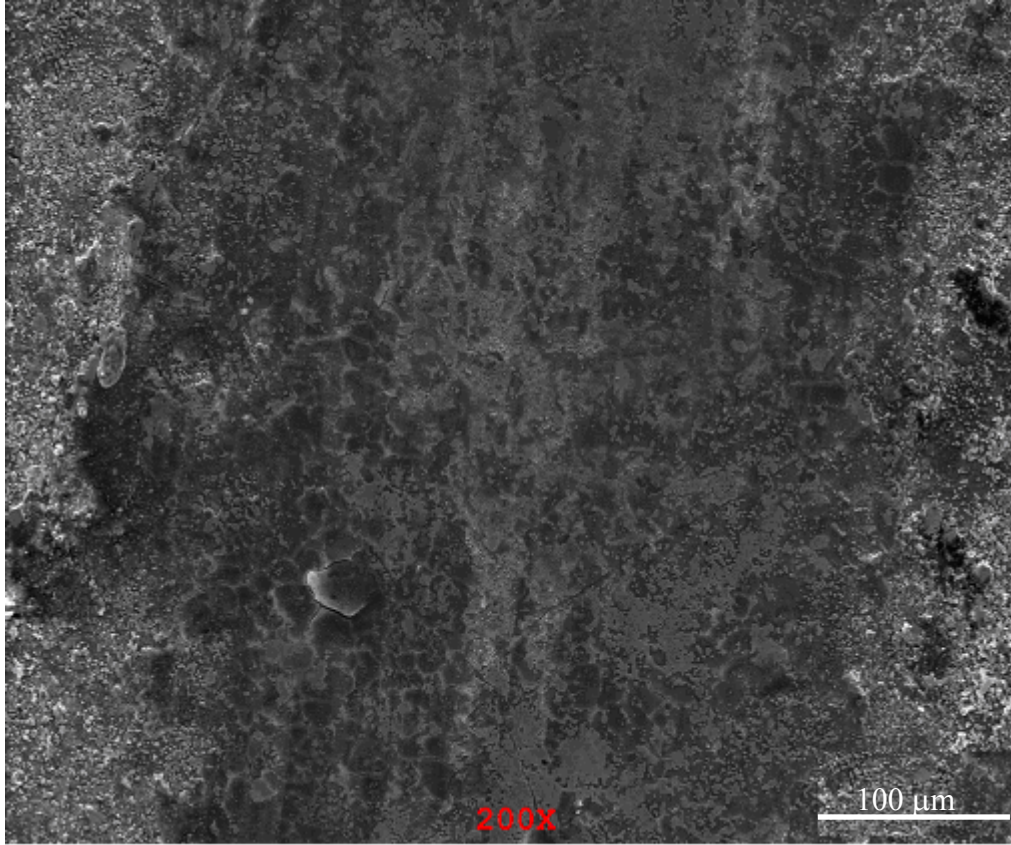


(a)

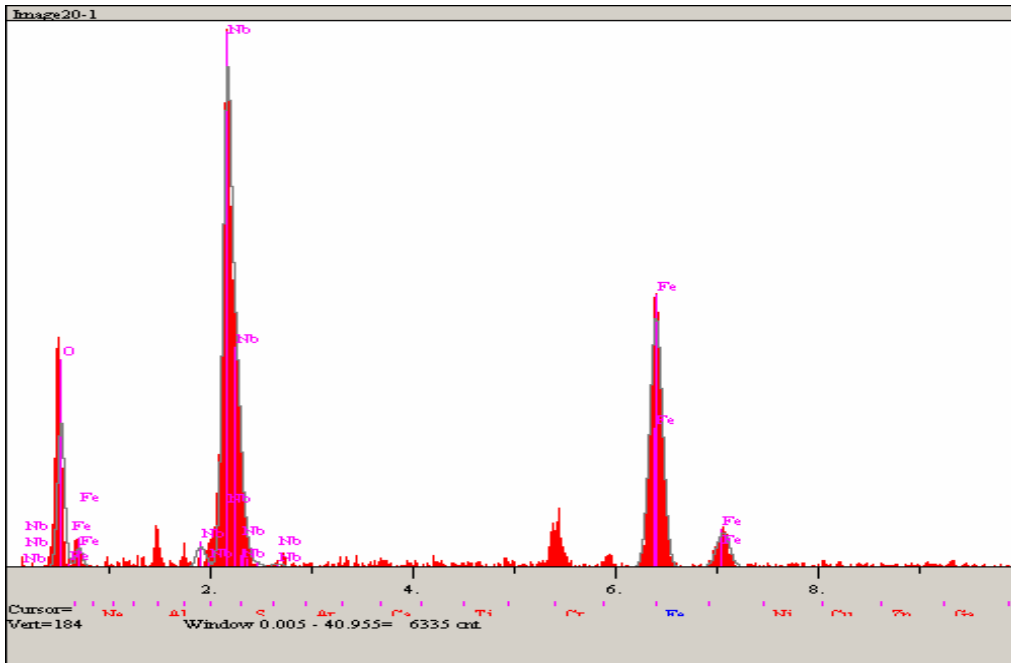


(b)

Şekil 7.80. 2N yük altında 0.1 m/s sürtünme hızında 180 metre mesafede, alümina bilyeye karşı aşındırılan niobyum borür kaplanmış AISI D2 çeliğinin yüzeyinde oluşan aşınma izinin (a) SEM mikroyapısı, (b) aşınma bölgesinden alınan EDS analizini göstermektedir.

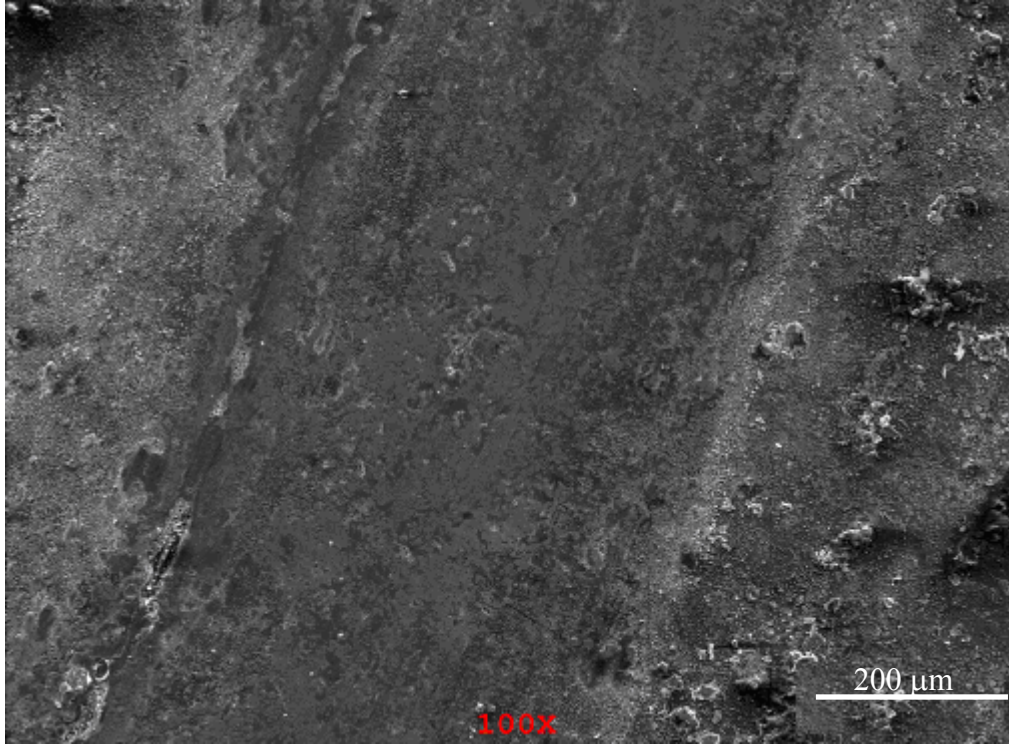


(a)

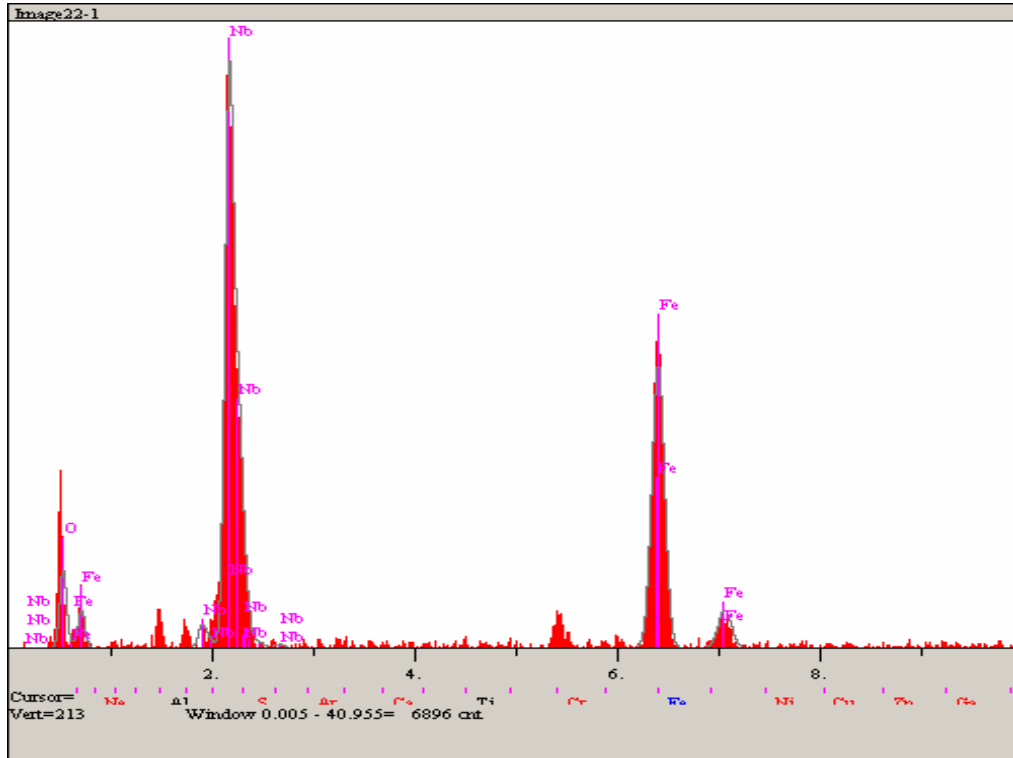


(b)

Şekil 7.81. 2N yük altında 0.3 m/s sürtünme hızında 180 metre mesafede, alümina bilyeye karşı aşındırılan niobyum borür kaplanmış AISI D2 çeliğinin yüzeyinde oluşan aşınma izinin (a) SEM mikroyapısı, (b) aşınma bölgesinden alınan EDS analizini göstermektedir.

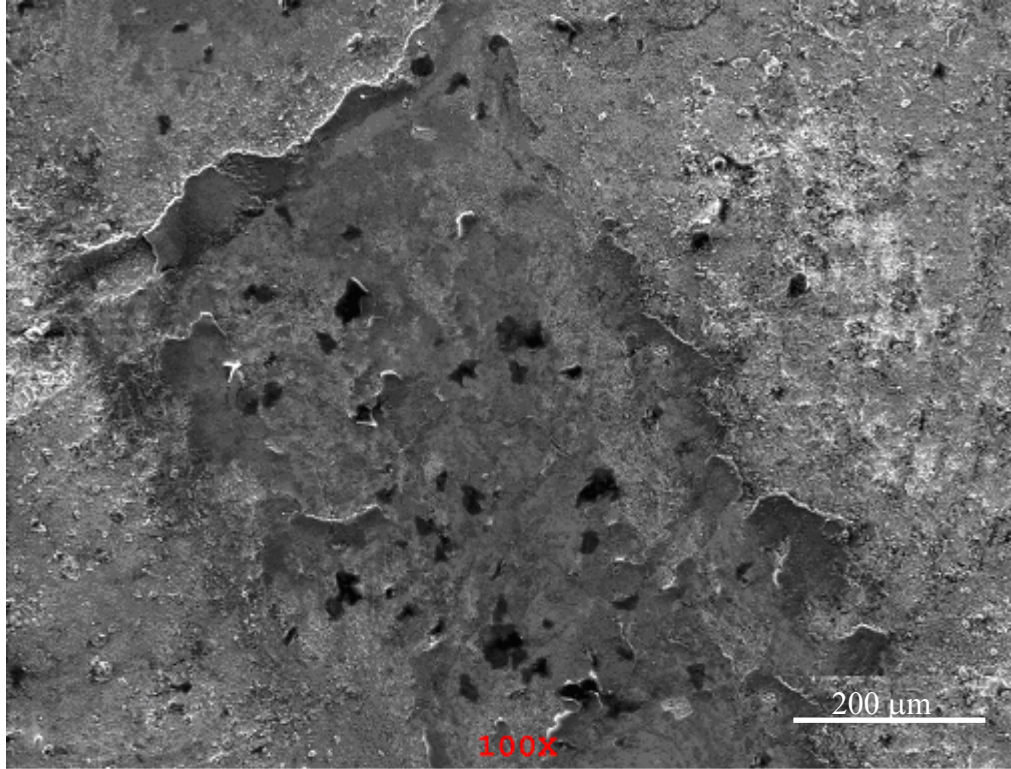


(a)

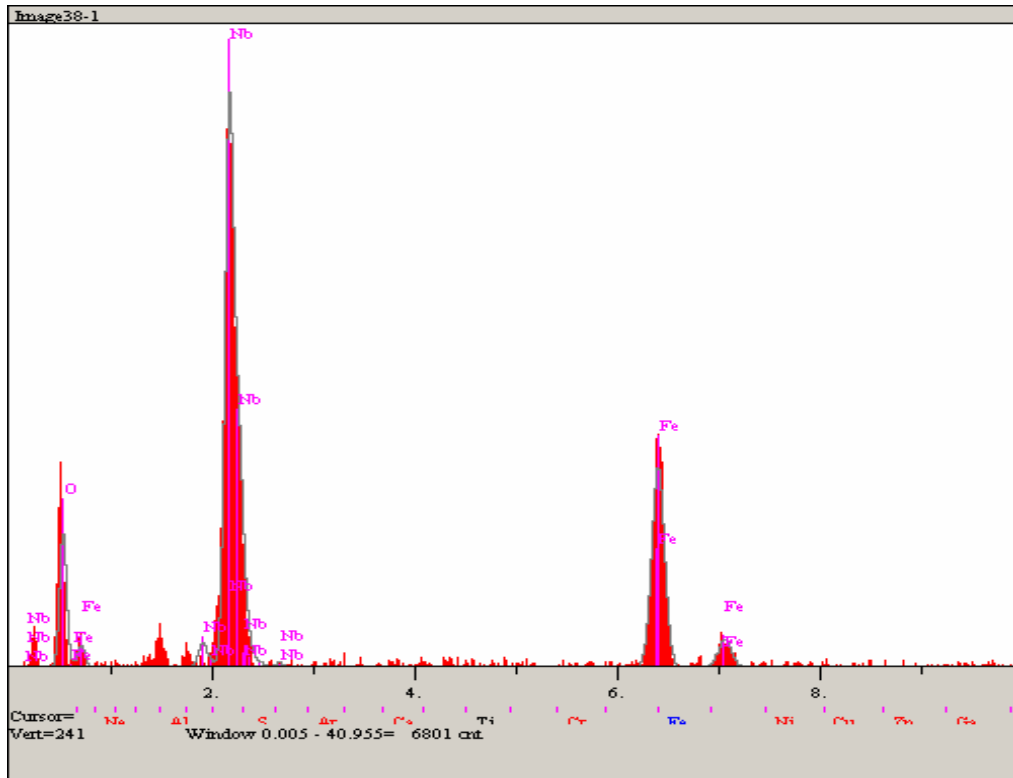


(b)

Şekil 7.82. 2N yük altında 0.5 m/s sürtünme hızında 180 metre mesafede, alümina bilyeye karşı aşındırılan niobyum borür kaplanmış AISI D2 çeliğinin yüzeyinde oluşan aşınma izinin (a) SEM mikroyapısı, (b) aşınma bölgesinden alınan EDS analizini göstermektedir.

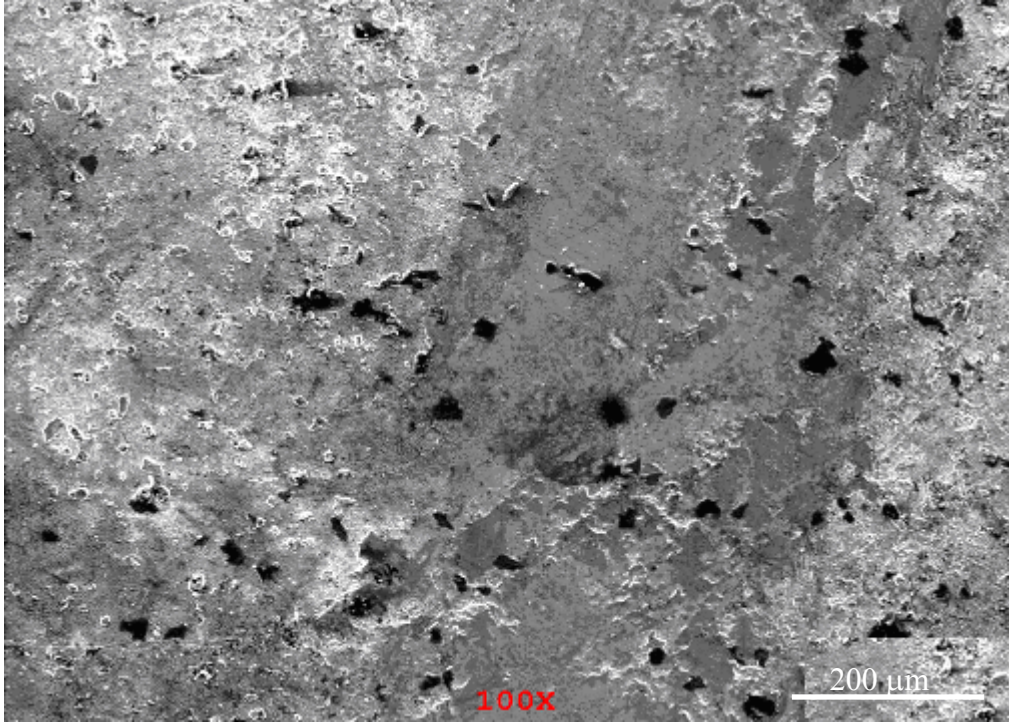


(a)

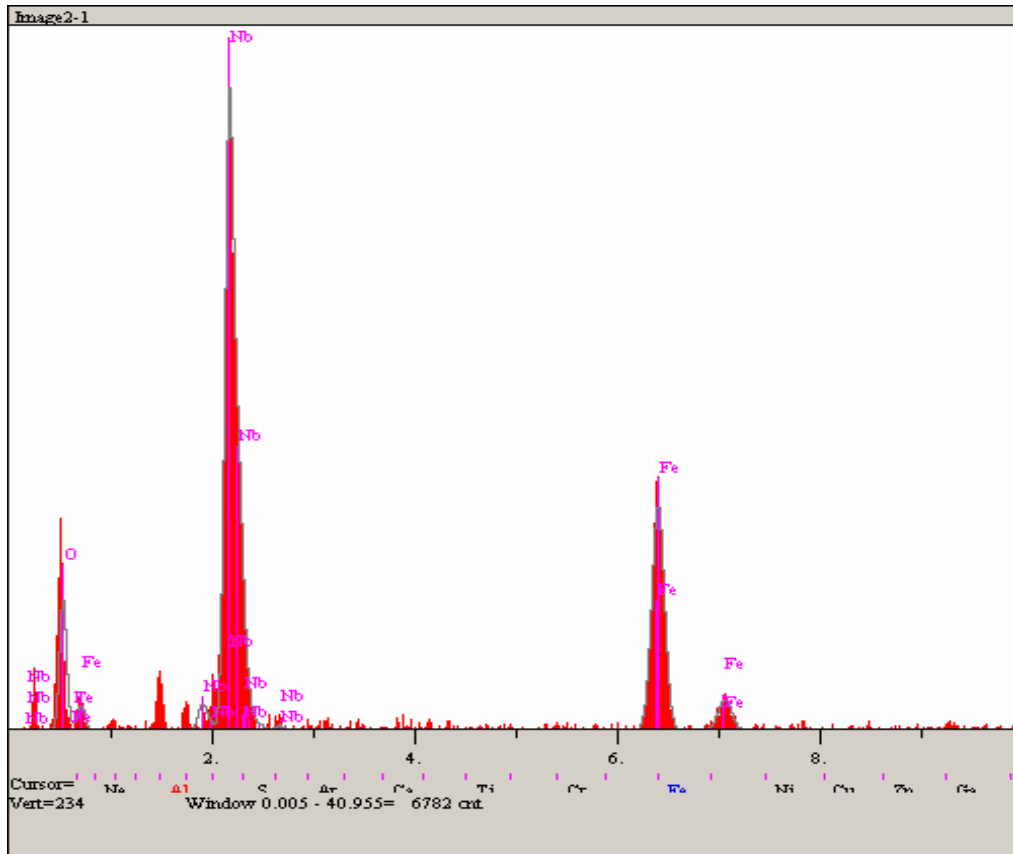


(b)

Şekil 7.83. 2N yük altında 0.1 m/s sürtünme hızında 180 metre mesafede, alümina bilyeye karşı aşındırılan niobyum borür kaplanmış AISI M2 çeliğinin yüzeyinde oluşan aşınma izinin (a) SEM mikroyapısı, (b) aşınma bölgesinden alınan EDS analizini göstermektedir.

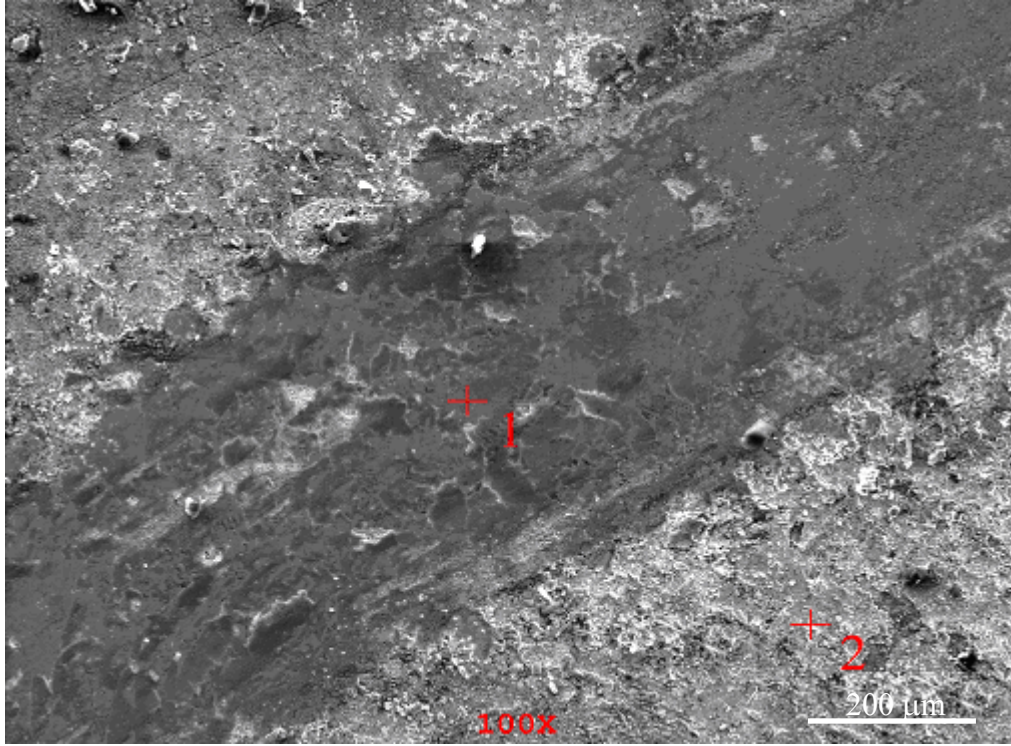


(a)

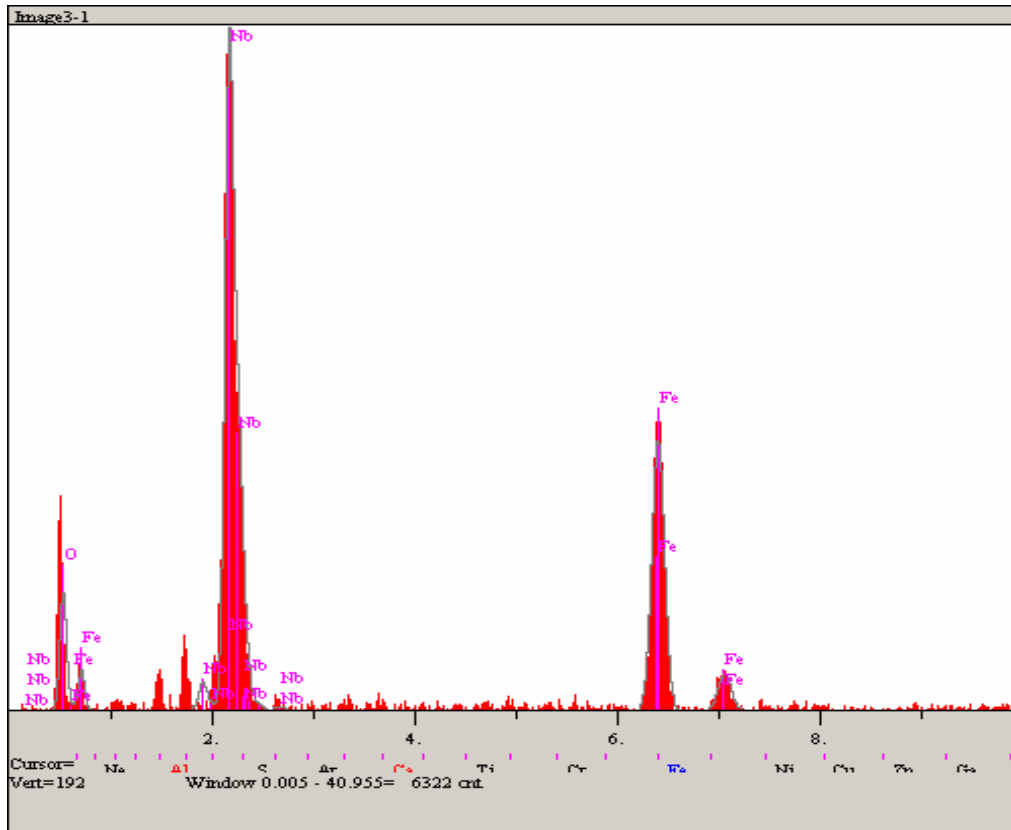


(b)

Şekil 7.84. 2N yük altında 0.3 m/s sürtünme hızında 180 metre mesafede, alümina bilyeye karşı aşındırılan niobyum borür kaplanmış AISI M2 çeliğinin yüzeyinde oluşan aşınma izinin (a) SEM mikroyapısı, (b) aşınma bölgesinden alınan EDS analizini göstermektedir.



(a)



(b)

Şekil 7.85. 2N yük altında 0.5 m/s sürtünme hızında 180 metre mesafede, alümina bilyeye karşı aşındırılan niobyum borür kaplanmış AISI M2 çeliğinin yüzeyinde oluşan aşınma izinin (a) SEM mikroyapısı, (b) aşınma bölgesinden alınan EDS analizini göstermektedir.

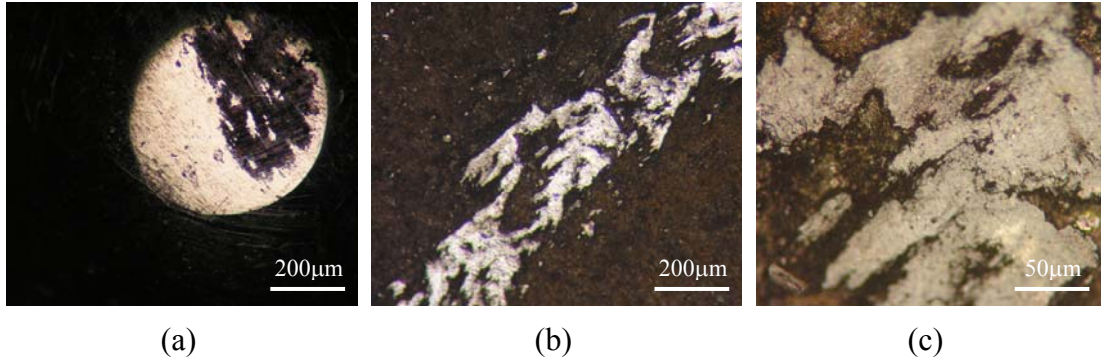
Çelik bilye ile yapılan aşınma testlerinde oluşan aşınma izleri incelendiğinde, aşınma bölgesinde çelik bilyelerin sıvandığı ve gri renkte adacıkların oluşmasına sebep olduğu görülmektedir. Aşınma izlerinden alınan EDS analizleri bu adacıkların demir ve oksijen içeriğini ve bu bölgelerin dışında kalan aşınma izlerinde niobyumun bulunduğu görülmektedir. Bu da aşınmanın adhesive ve oksidatif olduğunu göstermektedir.

Alümina bilye ile yapılan aşınma deneylerinde, aşınma bölgelerinde ince abrasiv çiziklerin olduğunu ve aşınma bölgesinden alınan EDS analizlerin niobyum ve oksijen içermeleri bu bölgelerde oksidatif abrasive aşınmanın olduğunu göstermektedir.

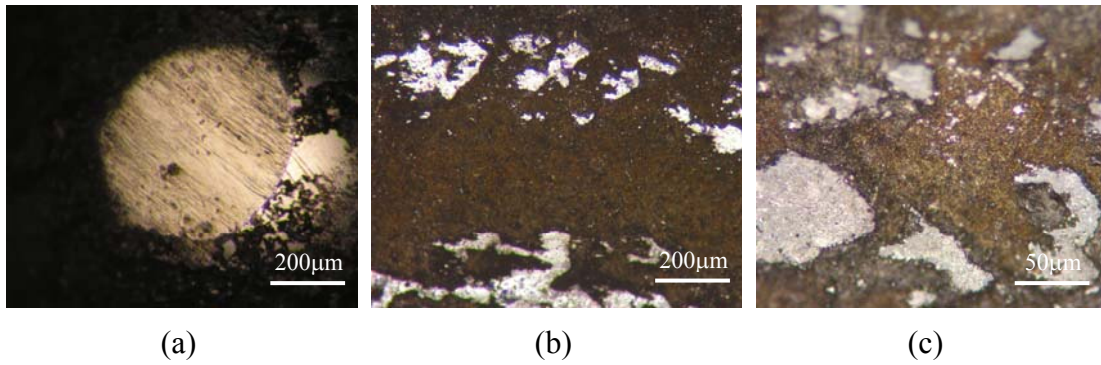


## **BÖLÜM 8. EKLER**

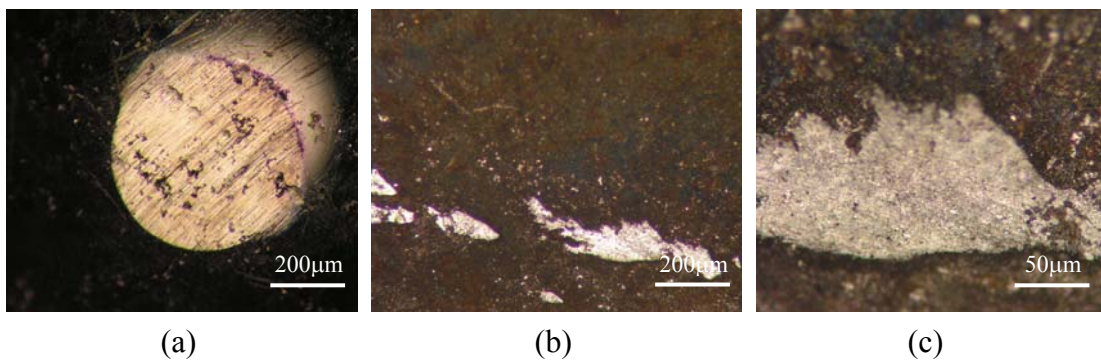
Niobyum borür kaplanmış AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çelikleri ile alümina ve AISI 52100 çelik bilyeleri arasında gerçekleştirilen 1N, 2N ve 5N yükler altında, 0.1 m/s, 0.3 m/s ve 0.5 m/s hızlarda 180 m mesafede gerçekleştirilen aşınma deneyleri neticesinde meydana gelen numunelerdeki ve bilyelerdeki aşınma izleri Şekil 8.1.-Şekil 8.72. arasında gösterilmektedir.



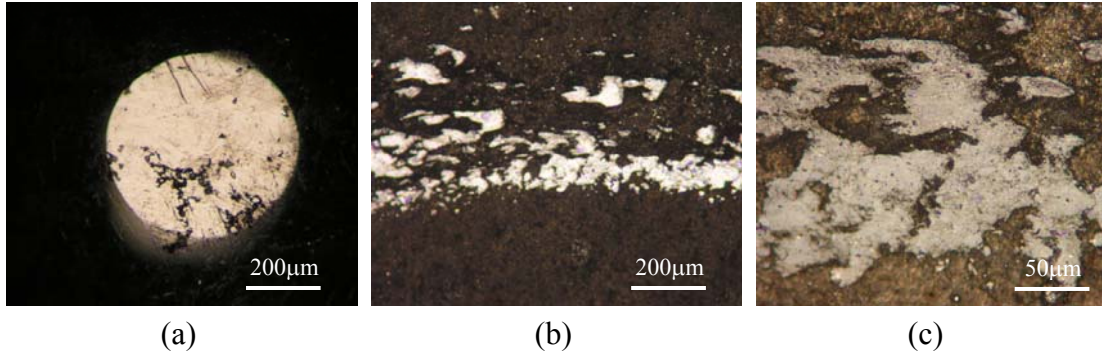
Şekil 8.1. Niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 1N yük altında 0,1 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) AISI 52100 bilye(200X), (b) AISI 1010 çelik numune(200X), (c) AISI 1010 çelik numune(50X)



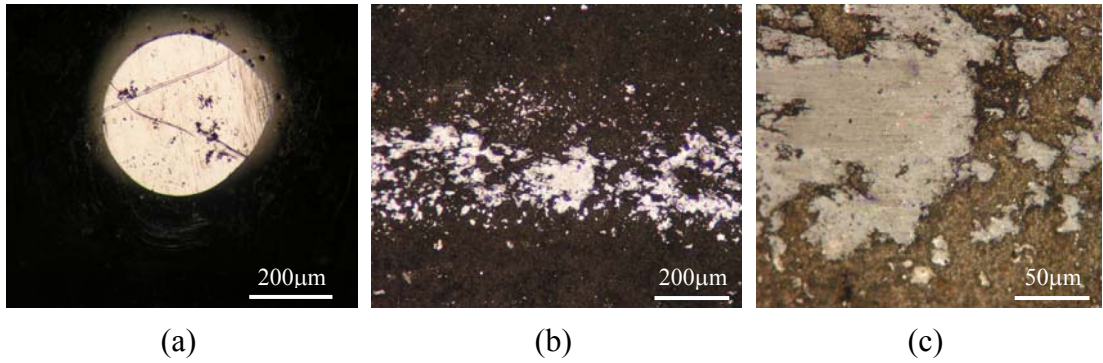
Şekil 8.2. Niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 1N yük altında 0,3 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) AISI 52100 bilye(200X), (b) AISI 1010 çelik numune(200X), (c) AISI 1010 çelik numune(50X)



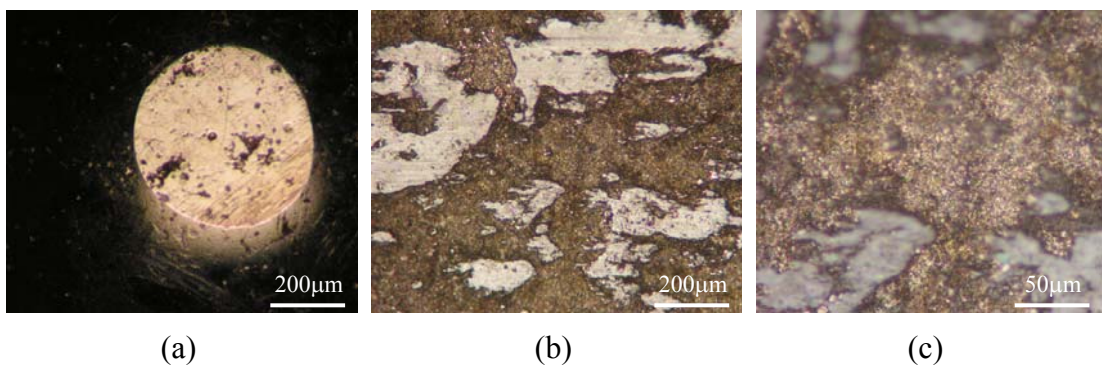
Şekil 8.3. Niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 1N yük altında 0,5 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) AISI 52100 bilye(200X), (b) AISI 1010 çelik numune(200X), (c) AISI 1010 çelik numune(200X)



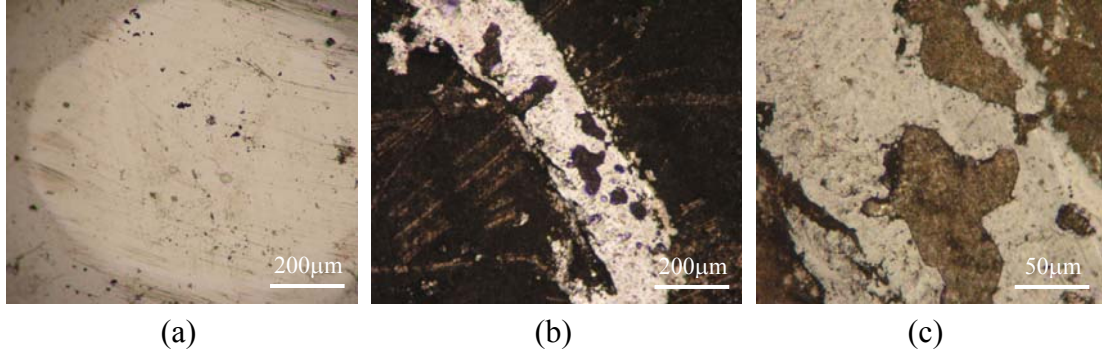
Şekil 8.4. Niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 2N yük altında 0,1 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) AISI 52100 bilye(200X), (b) AISI 1010 çelik numune(200X), (c) AISI 1010 çelik numune(50X)



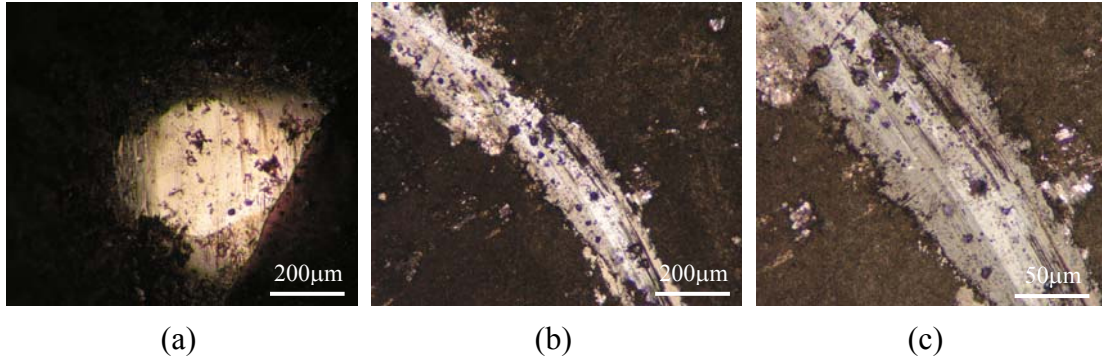
Şekil 8.5. Niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 2N yük altında 0,3 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) AISI 52100 bilye(200X), (b) AISI 1010 çelik numune(200X), (c) AISI 1010 çelik numune(50X)



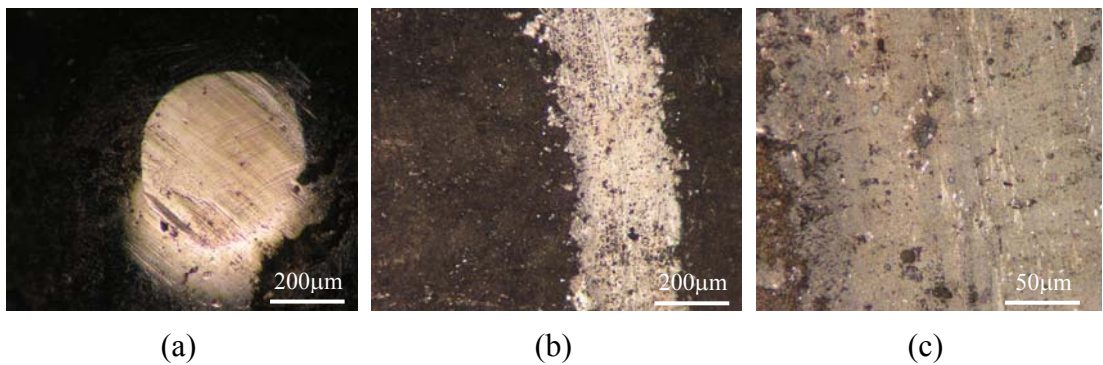
Şekil 8.6. Niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 2N yük altında 0,5 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) AISI 52100 bilye(200X), (b) AISI 1010 çelik numune(200X), (c) AISI 1010 çelik numune(50X)



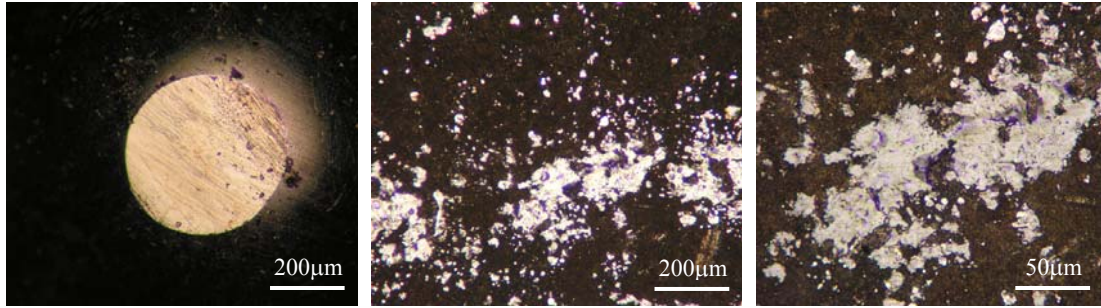
Şekil 8.7. Niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 5N yük altında 0,1 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) AISI 52100 bilye(200X), (b) AISI 1010 çelik numune(200X), (c) AISI 1010 çelik numune(50X)



Şekil 8.8. Niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 5N yük altında 0,3 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) AISI 52100 bilye(200X), (b) AISI 1010 çelik numune(200X), (c) AISI 1010 çelik numune(50X)

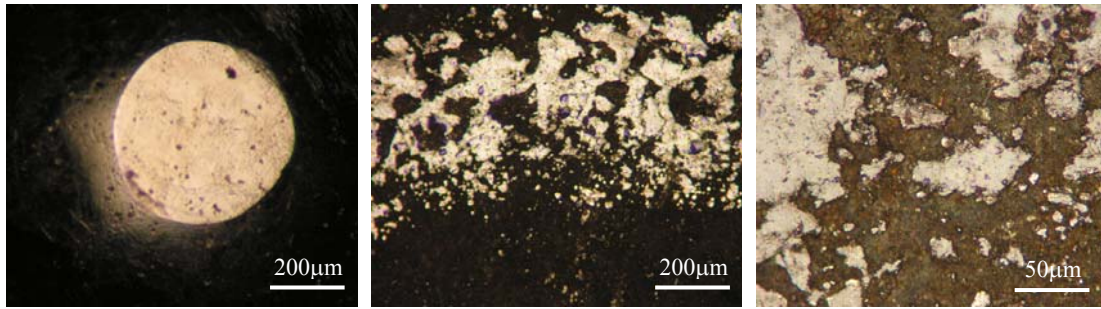


Şekil 8.9. Niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 5N yük altında 0,5 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) AISI 52100 bilye(200X), (b) AISI 1010 çelik numune(200X), (c) AISI 1010 çelik numune(50X)



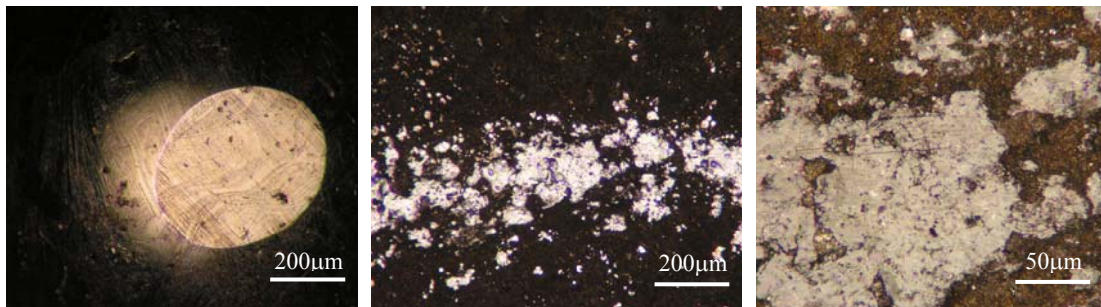
(a) (b) (c)

Şekil 8.10. Niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 1N yük altında 0,1 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) AISI 52100 bilye(200X), (b) AISI 4140 çelik numune(200X), (c) AISI 4140 çelik numune(50X)



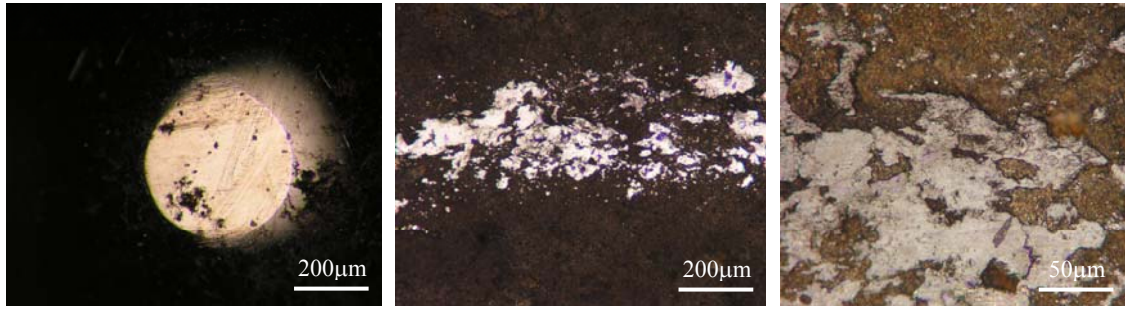
(a) (b) (c)

Şekil 8.11. Niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 1N yük altında 0,3 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) AISI 52100 bilye(200X), (b) AISI 4140 çelik numune(200X), (c) AISI 4140 çelik numune(50X)



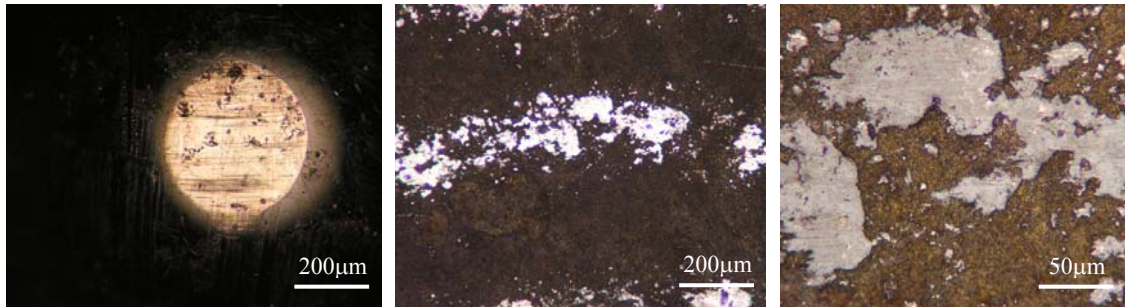
(a) (b) (c)

Şekil 8.12. Niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 1N yük altında 0,5 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) AISI 52100 bilye(200X), (b) AISI 4140 çelik numune(200X), (c) AISI 4140 çelik numune(50X)



(a) (b) (c)

Şekil 8.13. Niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 2N yük altında 0,1 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) AISI 52100 bilye(200X), (b) AISI 4140 çelik numune(200X), (c) AISI 4140 çelik numune(50X)



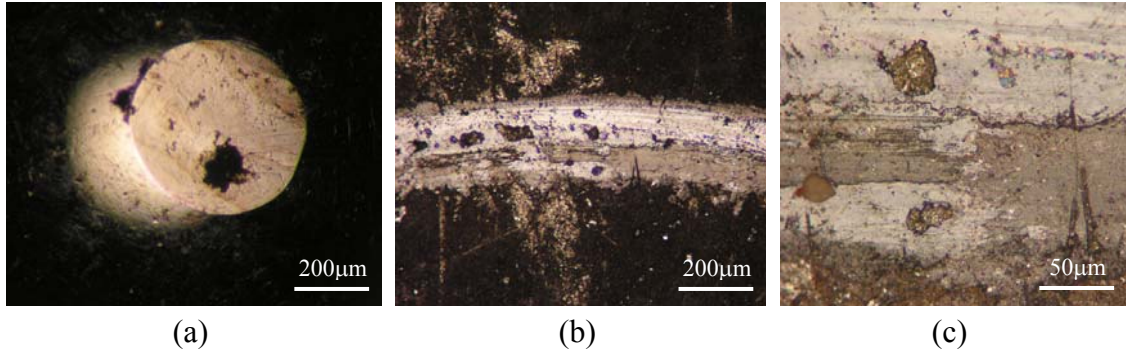
(a) (b) (c)

Şekil 8.14. Niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 2N yük altında 0,3 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) AISI 52100 bilye(200X), (b) AISI 4140 çelik numune(200X), (c) AISI 4140 çelik numune(50X)

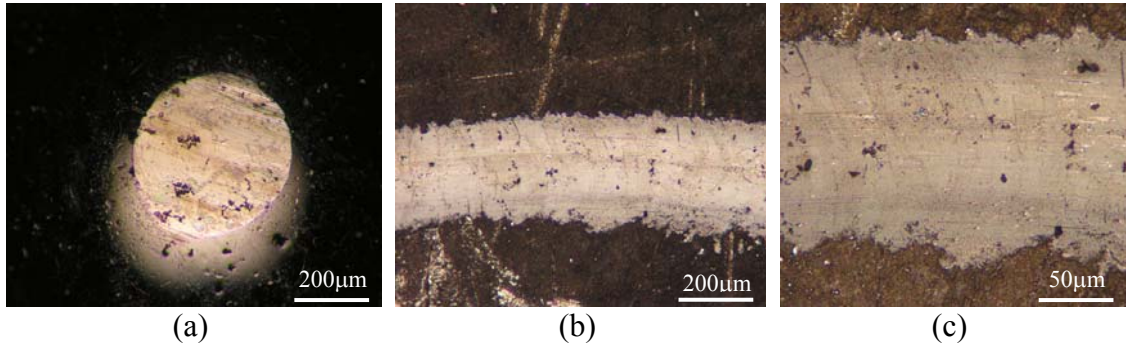


(a) (b) (c)

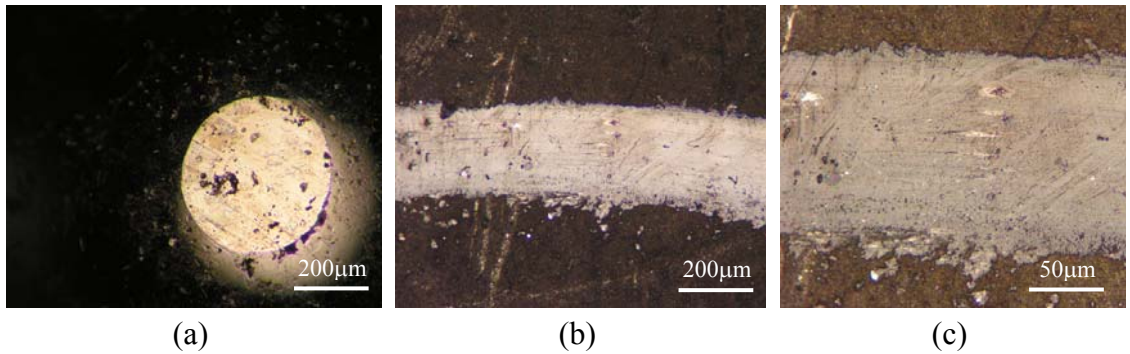
Şekil 8.15. Niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 2N yük altında 0,5 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) AISI 52100 bilye(200X), (b) AISI 4140 çelik numune(200X), (c) AISI 4140 çelik numune(50X)



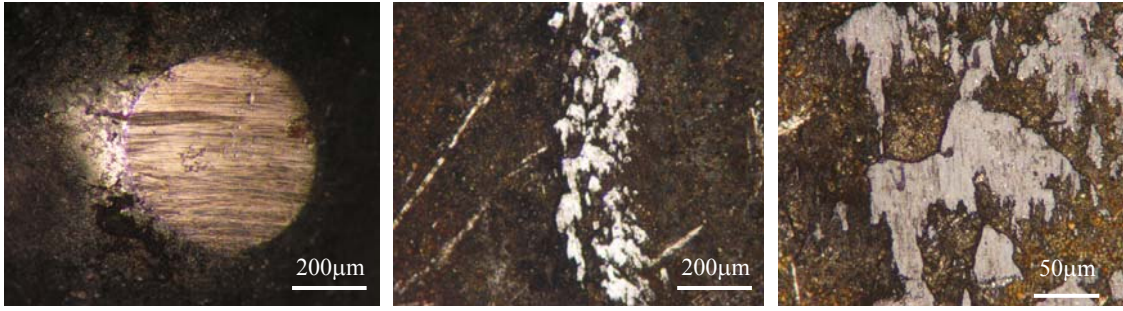
Şekil 8.16. Niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 5N yük altında 0,1 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) AISI 52100 bilye(200X), (b) AISI 4140 çelik numune(200X), (c) AISI 4140 çelik numune(50X)



Şekil 8.17. Niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 5N yük altında 0,3 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) AISI 52100 bilye(200X), (b) AISI 4140 çelik numune(200X), (c) AISI 4140 çelik numune(50X)

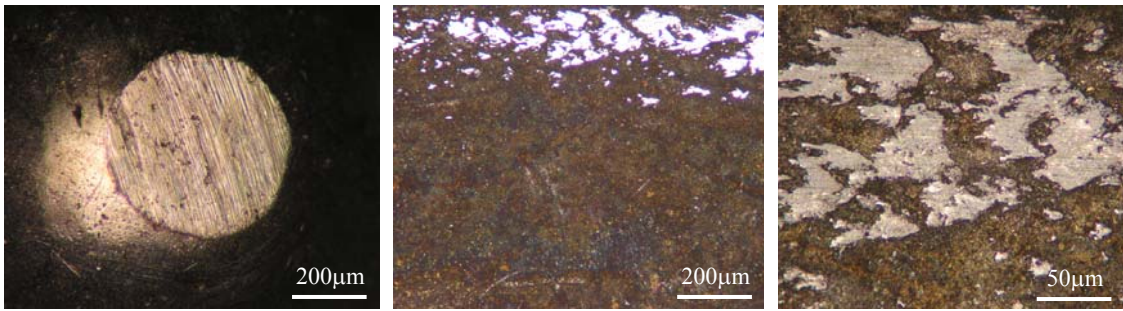


Şekil 8.18. Niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 5N yük altında 0,5 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) AISI 52100 bilye(200X), (b) AISI 4140 çelik numune(200X), (c) AISI 4140 çelik numune(50X)



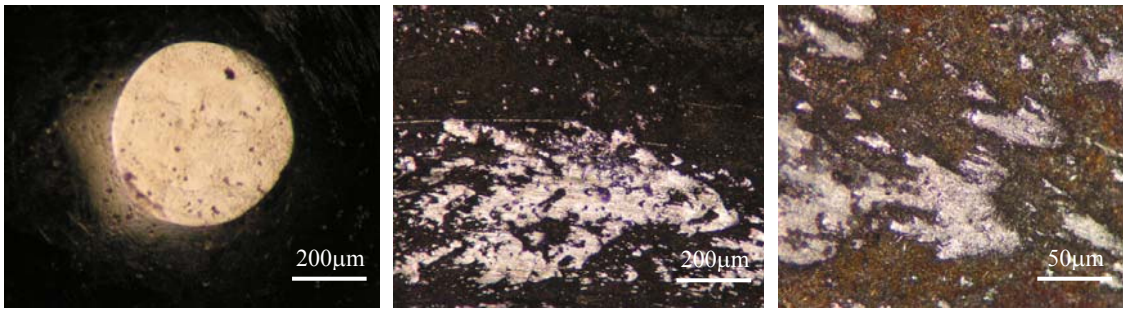
(a) (b) (c)

Şekil 8.19. Niobyum borür kaplanmış AISI D2 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 1N yük altında 0,1 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) AISI 52100 bilye(200X), (b) AISI D2 çelik numune(200X), (c) AISI D2 çelik numune(50X)



(a) (b) (c)

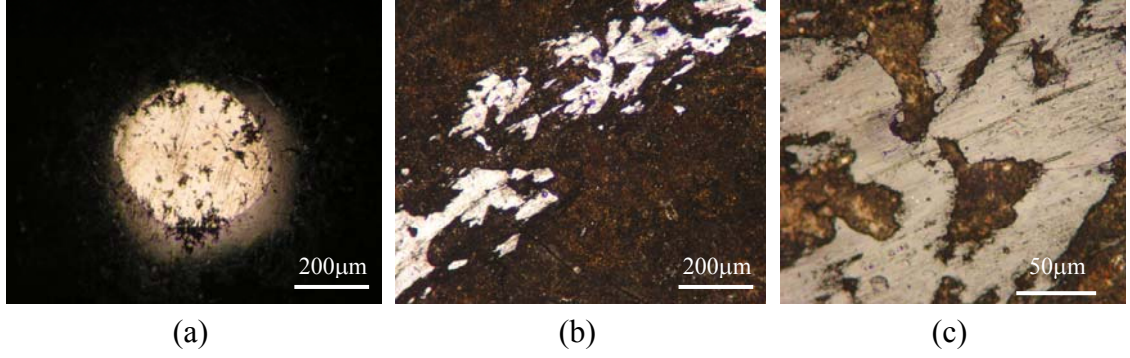
Şekil 8.20. Niobyum borür kaplanmış AISI D2 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 1N yük altında 0,3 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) AISI 52100 bilye(200X), (b) AISI D2 çelik numune(200X), (c) AISI D2 çelik numune(50X)



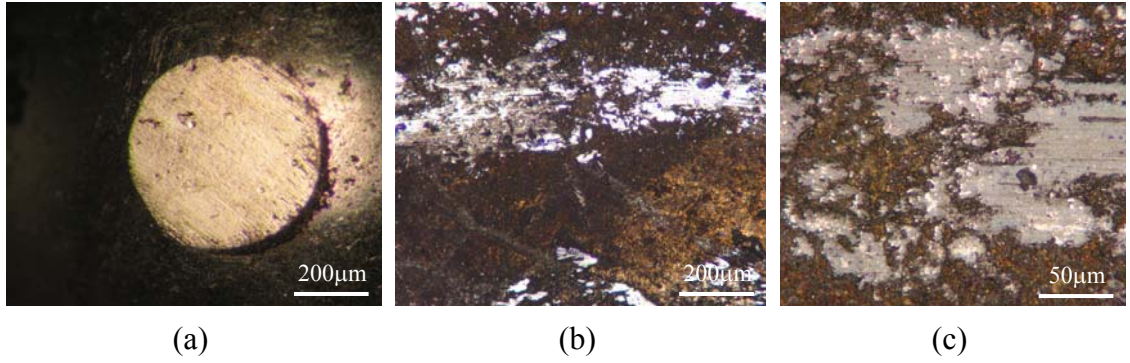
(a) (b) (c)

Şekil 8.21. Niobyum borür kaplanmış AISI D2 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 1N yük altında 0,5 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) AISI 52100 bilye(200X), (b) AISI D2 çelik numune(200X), (c) AISI D2 çelik numune(50X)

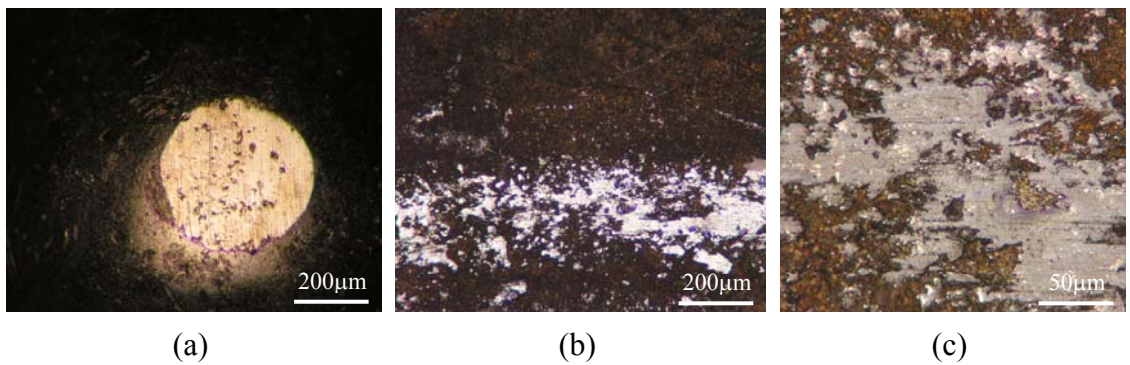




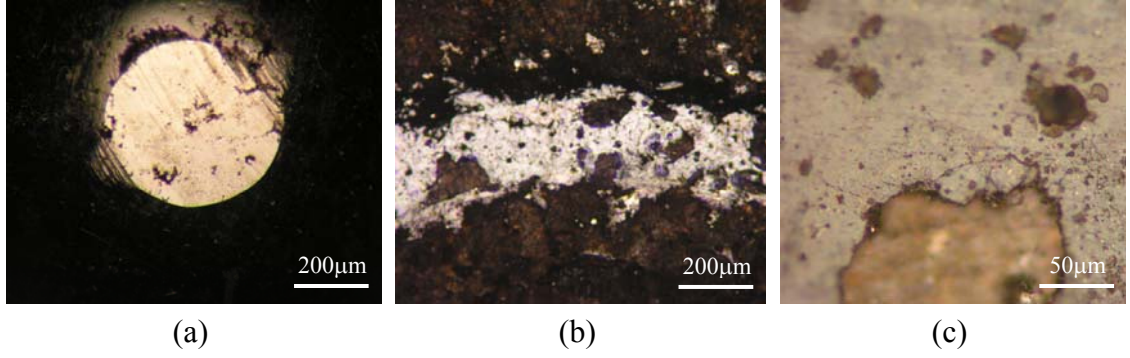
Şekil 8.22. Niobyum borür kaplanmış AISI D2 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 2N yük altında 0,1 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) AISI 52100 bilye(200X), (b) AISI D2 çelik numune(200X), (c) AISI D2 çelik numune(50X)



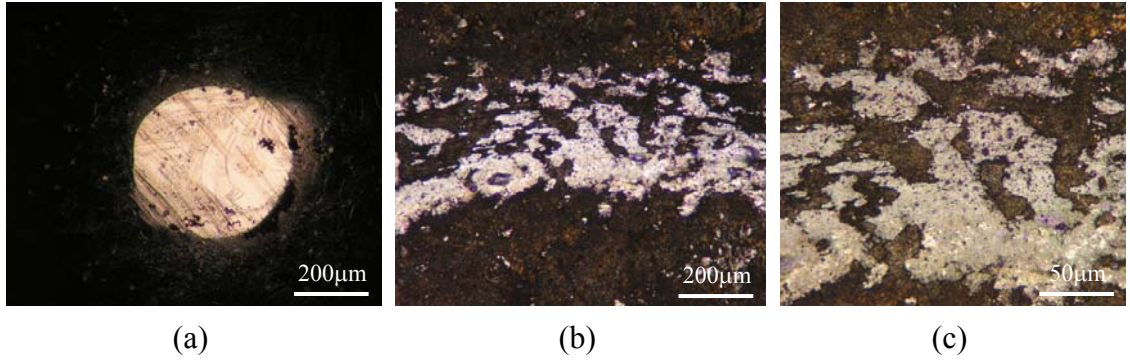
Şekil 8.23. Niobyum borür kaplanmış AISI D2 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 2N yük altında 0,3 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) AISI 52100 bilye(200X), (b) AISI D2 çelik numune(200X), (c) AISI D2 çelik numune(50X)



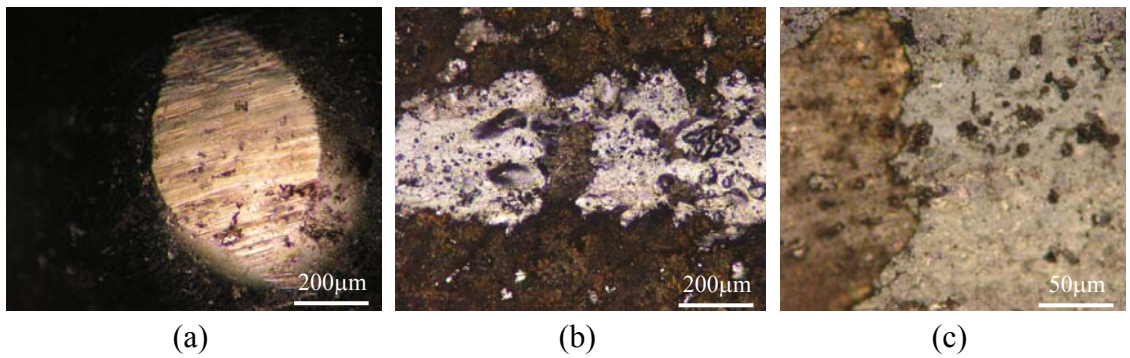
Şekil 8.24. Niobyum borür kaplanmış AISI D2 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 2N yük altında 0,5 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) AISI 52100 bilye(200X), (b) AISI D2 çelik numune(200X), (c) AISI D2 çelik numune(50X)



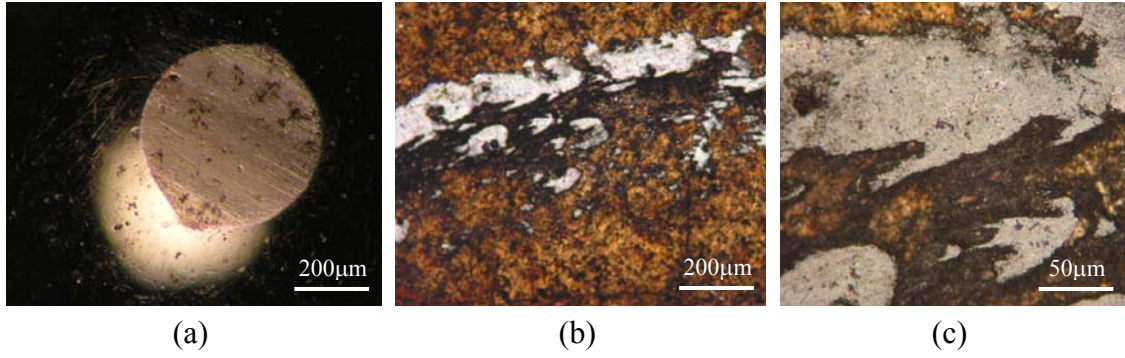
Şekil 8.25. Niobyum borür kaplanmış AISI D2 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 5N yük altında 0,1 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) AISI 52100 bilye(200X), (b) AISI D2 çelik numune(200X), (c) AISI D2 çelik numune(50X)



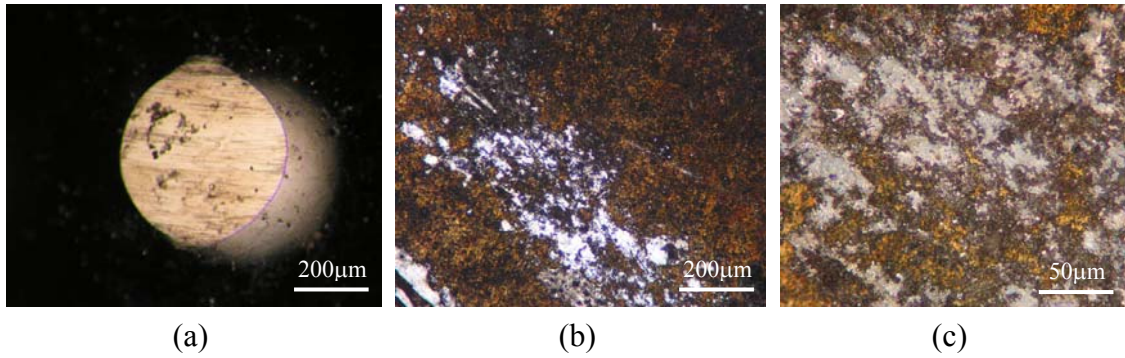
Şekil 8.26. Niobyum borür kaplanmış AISI D2 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 5N yük altında 0,3 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) AISI 52100 bilye(200X), (b) AISI D2 çelik numune(200X), (c) AISI D2 çelik numune(50X)



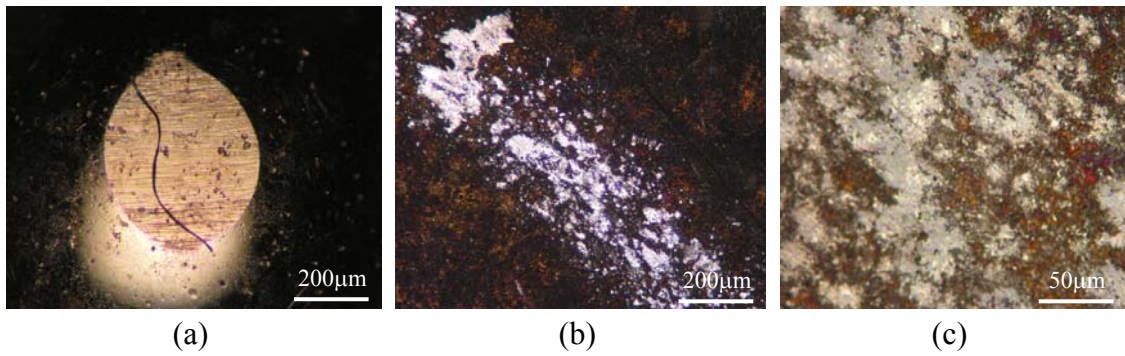
Şekil 8.27. Niobyum borür kaplanmış AISI D2 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 5N yük altında 0,5 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) AISI 52100 bilye(200X), (b) AISI D2 çelik numune(200X), (c) AISI D2 çelik numune(50X)



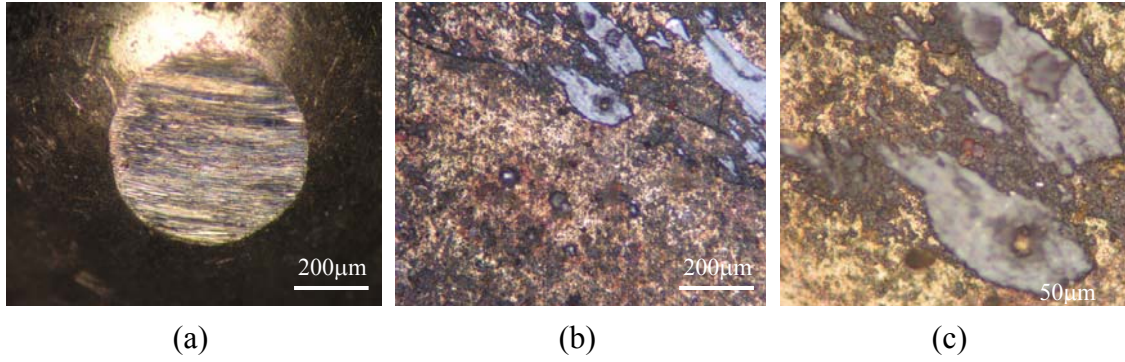
Şekil 8.28. Niobyum borür kaplanmış AISI M2 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 1N yük altında 0,1 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) AISI 52100 bilye(200X), (b) AISI M2 çelik numune(200X), (c) AISI M2 çelik numune(50X)



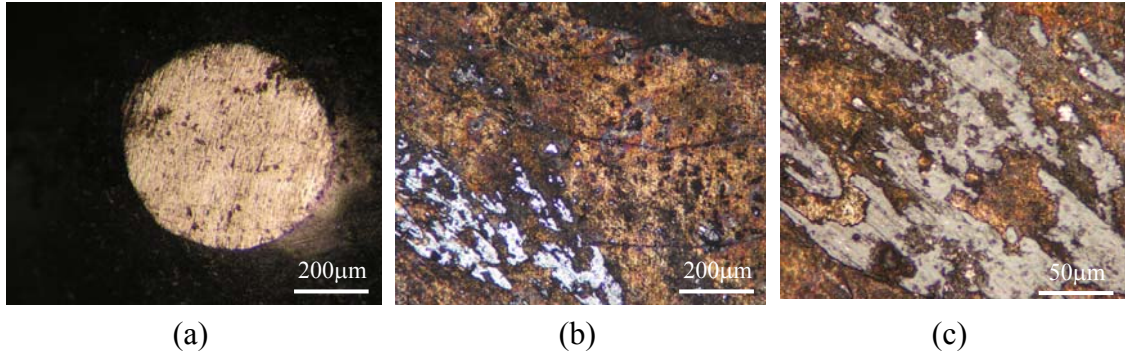
Şekil 8.29. Niobyum borür kaplanmış AISI M2 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 1N yük altında 0,3 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) AISI 52100 bilye(200X), (b) AISI M2 çelik numune(200X), (c) AISI M2 çelik numune(50X)



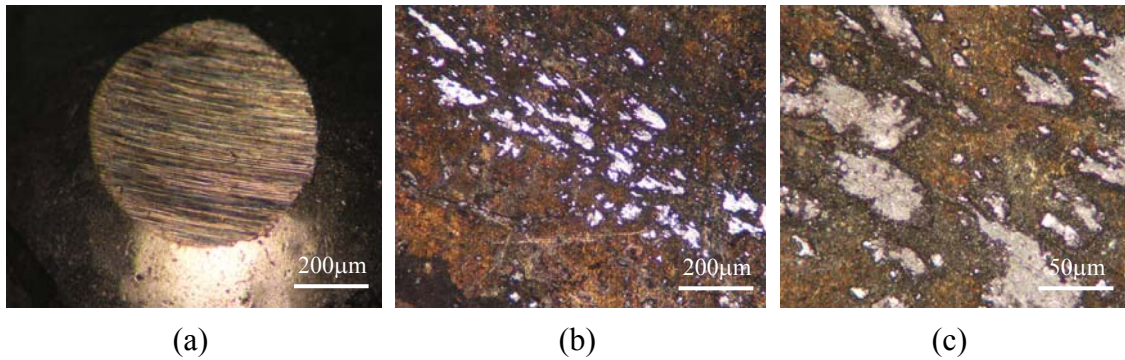
Şekil 8.30. Niobyum borür kaplanmış AISI M2 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 1N yük altında 0,5 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) AISI 52100 bilye(200X), (b) AISI M2 çelik numune(200X), (c) AISI M2 çelik numune(50X)



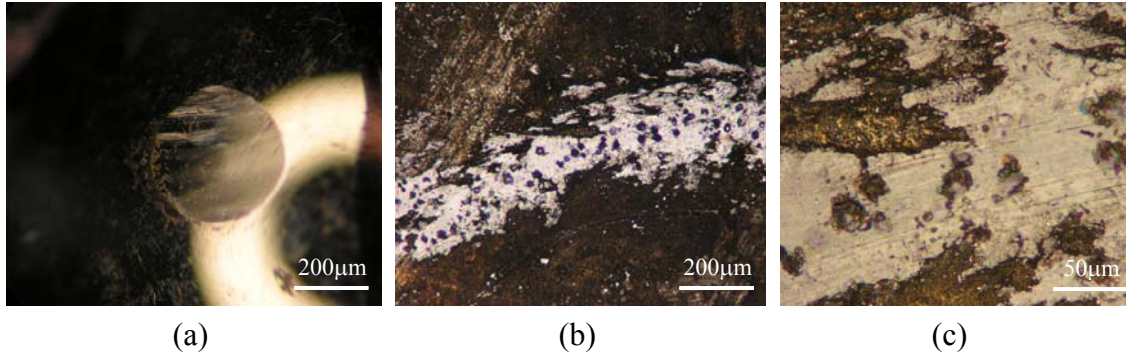
Şekil 8.31. Niobyum borür kaplanmış AISI M2 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 2N yük altında 0,1 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) AISI 52100 bilye(200X), (b) AISI M2 çelik numune(200X), (c) AISI M2 çelik numune(50X)



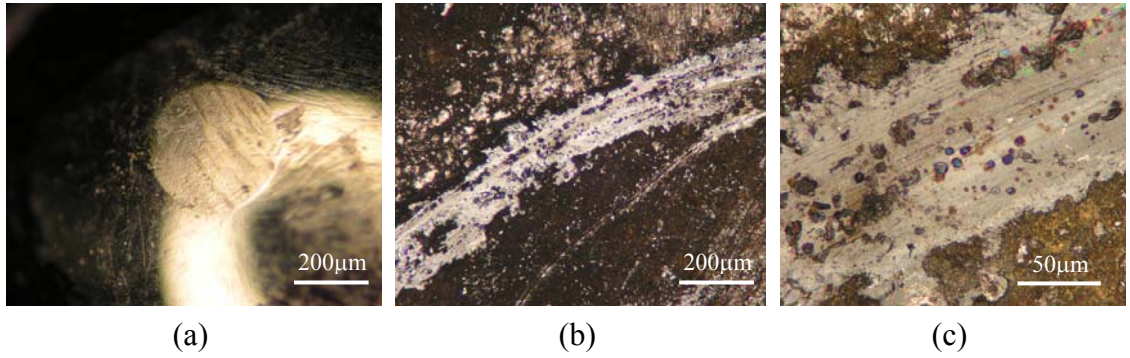
Şekil 8.32. Niobyum borür kaplanmış AISI M2 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 2N yük altında 0,3 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) AISI 52100 bilye(200X), (b) AISI M2 çelik numune(200X), (c) AISI M2 çelik numune(50X)



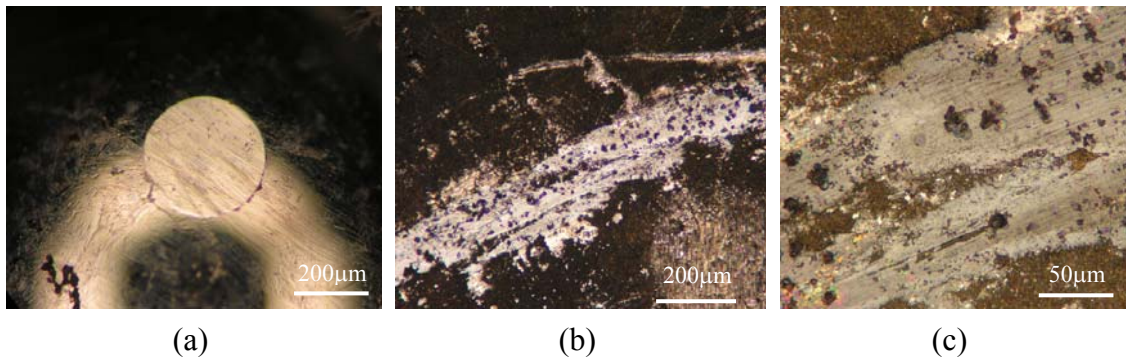
Şekil 8.33. Niobyum borür kaplanmış AISI M2 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 2N yük altında 0,5 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) AISI 52100 bilye(200X), (b) AISI M2 çelik numune(200X), (c) AISI M2 çelik numune(50X)



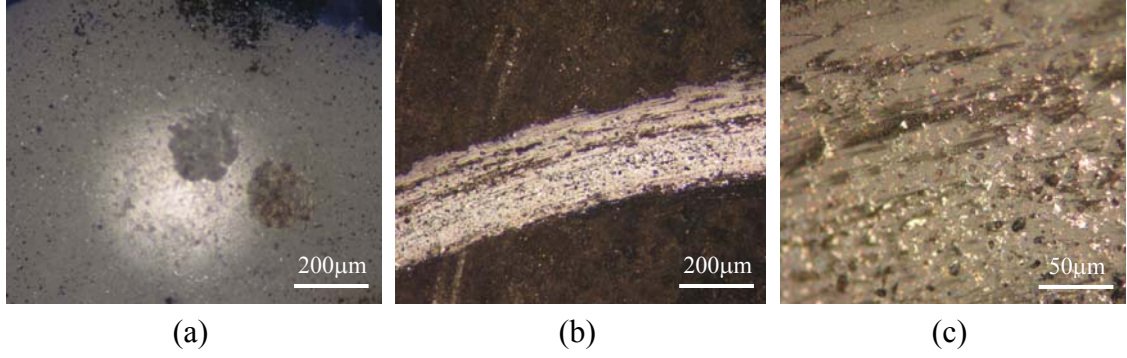
Şekil 8.34. Niobyum borür kaplanmış AISI M2 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 5N yük altında 0,1 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) AISI 52100 bilye(200X), (b) AISI M2 çelik numune(200X), (c) AISI M2 çelik numune(50X)



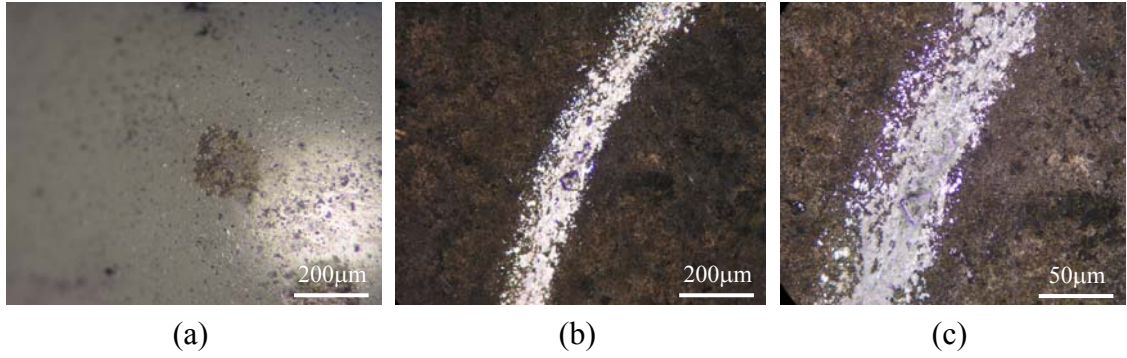
Şekil 8.35. Niobyum borür kaplanmış AISI M2 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 5N yük altında 0,3 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) AISI 52100 bilye(200X), (b) AISI M2 çelik numune(200X), (c) AISI M2 çelik numune(50X)



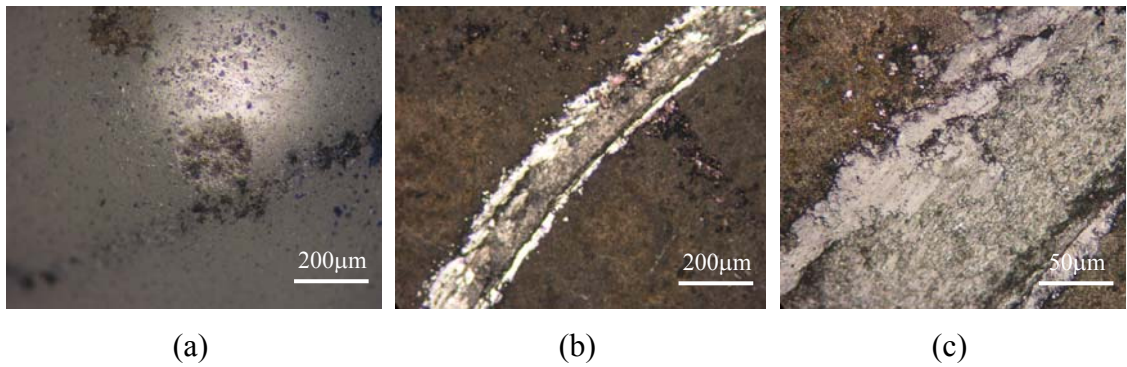
Şekil 8.36. Niobyum borür kaplanmış AISI M2 çelik numune ile AISI 52100 çelik bilye arasındaki 5N yük altında 0,5 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) AISI 52100 bilye(200X), (b) AISI M2 çelik numune(200X), (c) AISI M2 çelik numune(50X)



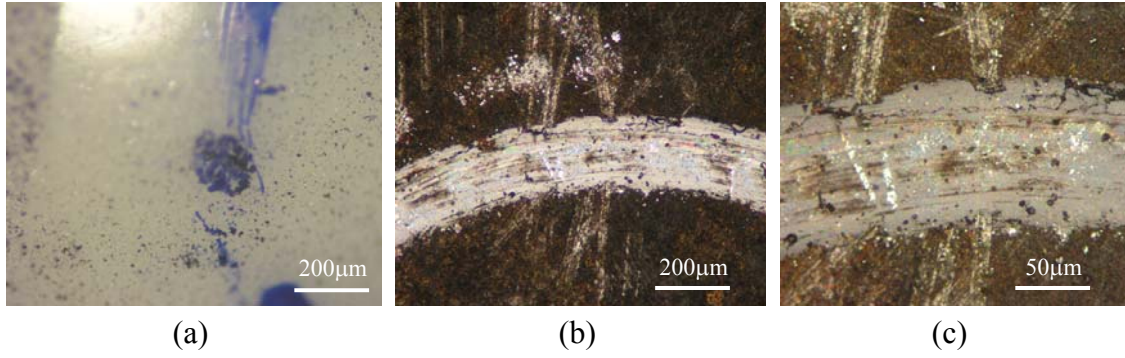
Şekil 8.37. Niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 1N yük altında 0,1 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye(200X), (b) AISI 1010 çelik numune(200X), (c) AISI 1010 çelik numune(50X)



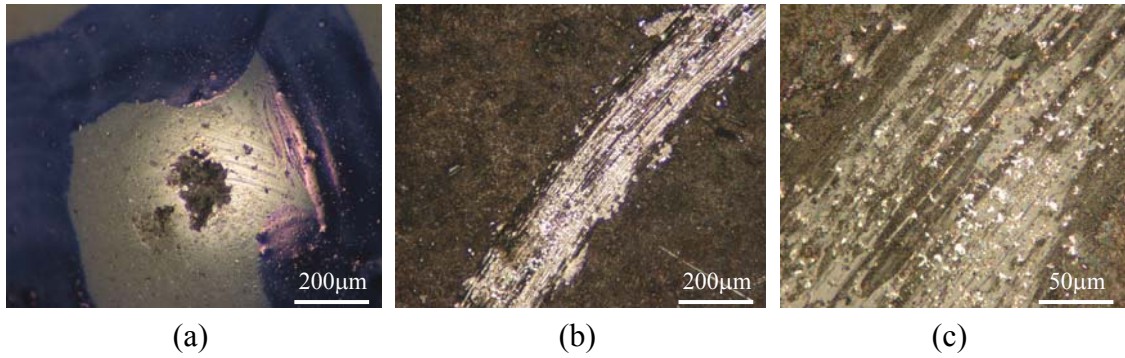
Şekil 8.38. Niobyum borür kaplanmış 1010 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 1N yük altında 0,3 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye(200X), (b) AISI 1010 çelik numune(200X), (c) AISI 1010 çelik numune(50X)



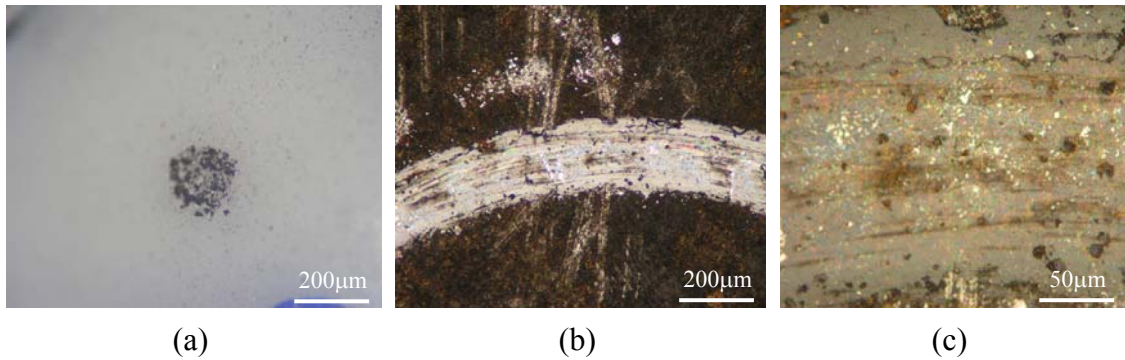
Şekil 8.39. Niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 1N yük altında 0,5 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye(200X), (b) AISI 1010 çelik numune(200X), (c) AISI 1010 çelik numune(50X)



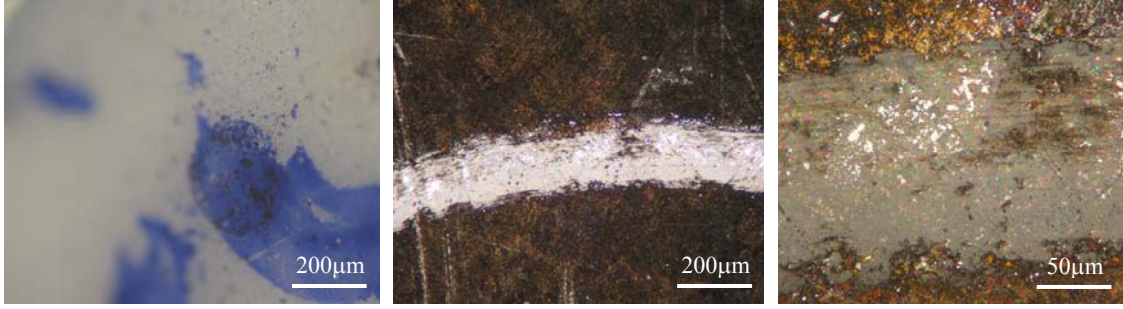
Şekil 8.40. Niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 2N yük altında 0,1 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye(200X), (b) AISI 1010 çelik numune(200X), (c) AISI 1010 çelik numune(50X)



Şekil 8.41. Niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 2N yük altında 0,3 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye(200X), (b) AISI 1010 çelik numune(200X), (c) AISI 1010 çelik numune(50X)

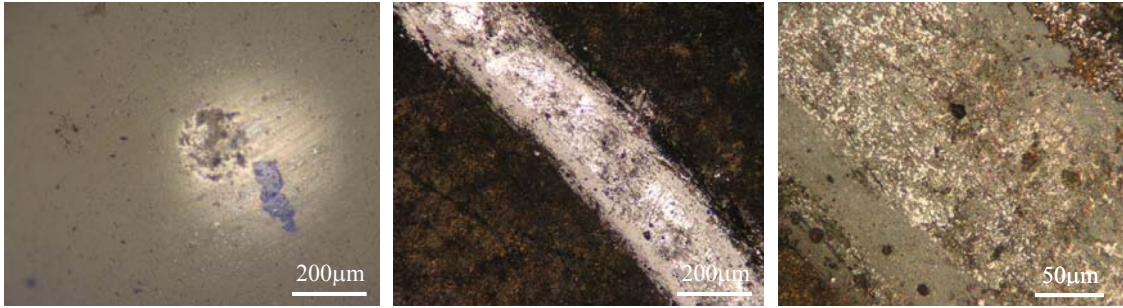


Şekil 8.42. Niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 2N yük altında 0,5 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye(200X), (b) AISI 1010 çelik numune(200X), (c) AISI 1010 çelik numune(50X)



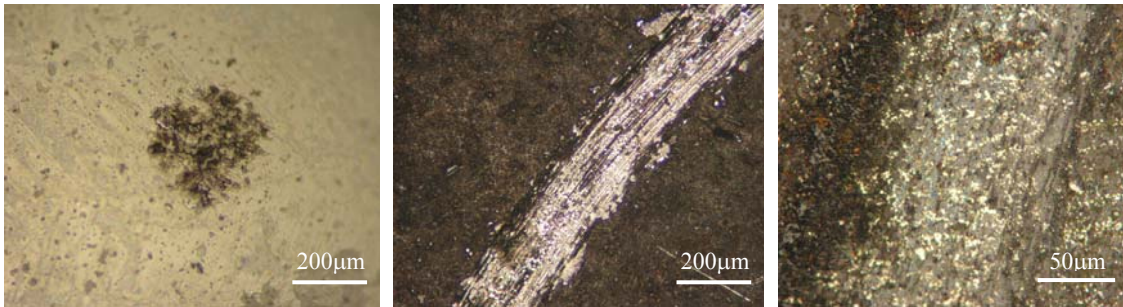
(a) (b) (c)

Şekil 8.43. Niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 5N yük altında 0,1 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye(200X), (b) AISI 1010 çelik numune(200X), (c) AISI 1010 çelik numune(50X)



(a) (b) (c)

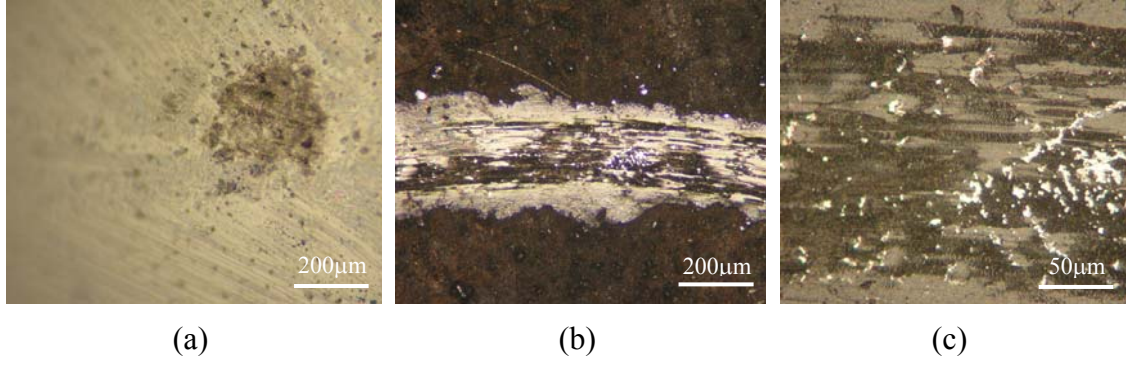
Şekil 8.44. Niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 5N yük altında 0,3 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye(200X), (b) AISI 1010 çelik numune(200X), (c) AISI 1010 çelik numune(50X)



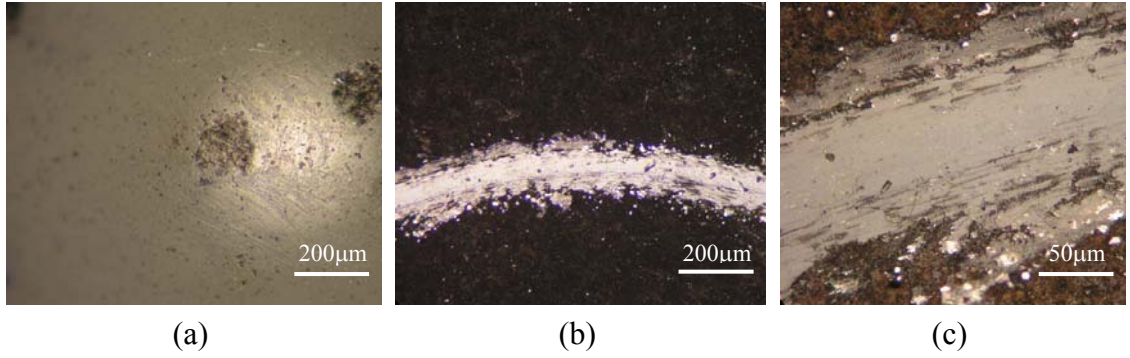
(a) (b) (c)

Şekil 8.45. Niobyum borür kaplanmış AISI 1010 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 5N yük altında 0,5 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye(200X), (b) AISI 1010 çelik numune(200X), (c) AISI 1010 çelik numune(50X)

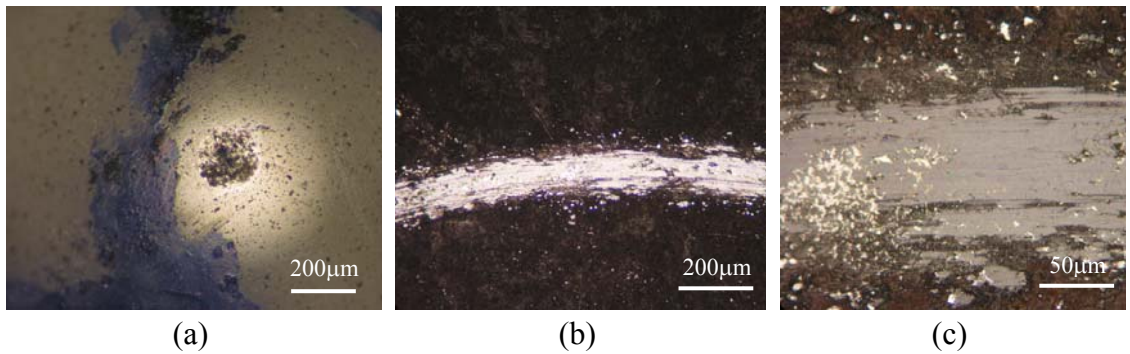




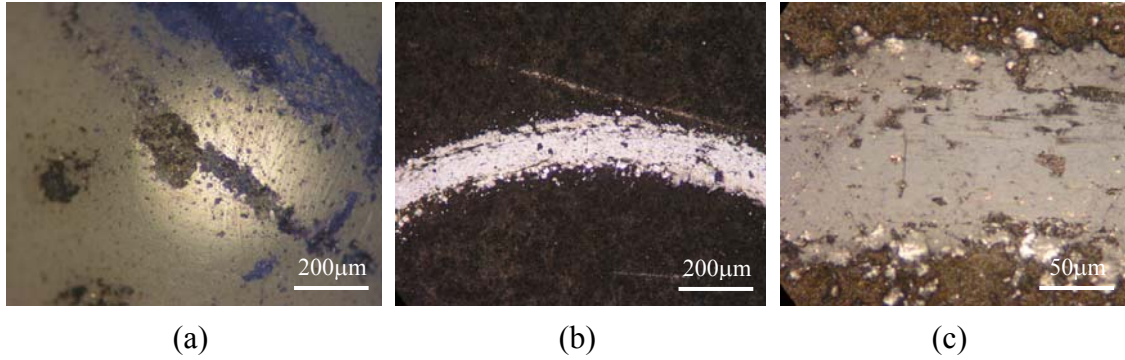
Şekil 8.46. Niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 1N yük altında 0,1 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye(200X), (b) AISI 4140 çelik numune(200X), (c) AISI 4140 çelik numune(50X)



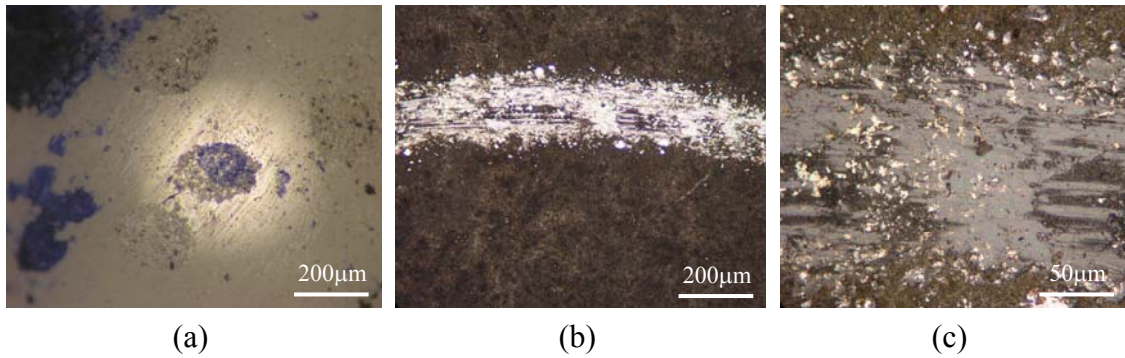
Şekil 8.47. Niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 1N yük altında 0,3 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye(200X), (b) AISI 4140 çelik numune(200X), (c) AISI 4140 çelik numune(50X)



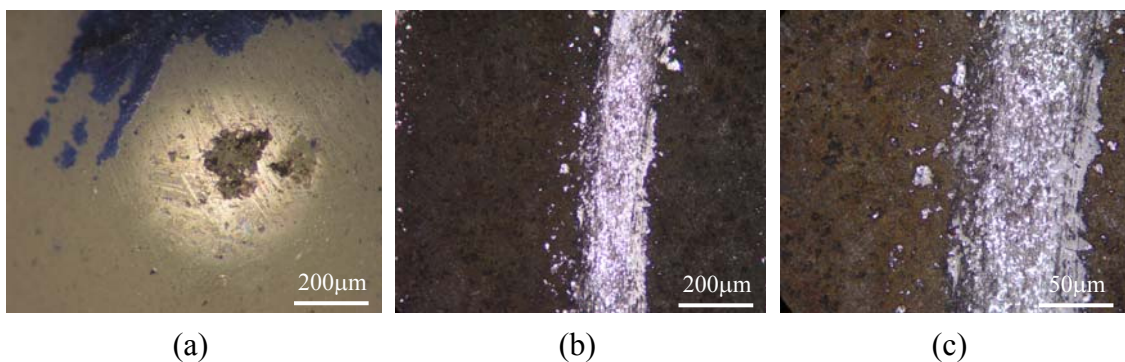
Şekil 8.48. Niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 1N yük altında 0,5 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye(200X), (b) AISI 4140 çelik numune(200X), (c) AISI 4140 çelik numune(200X)



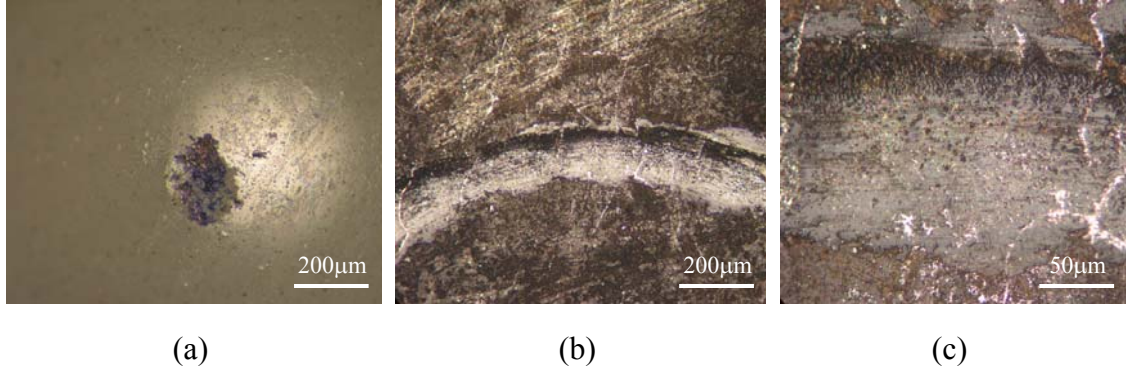
Şekil 8.49. Niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 2N yük altında 0,1 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye(200X), (b) AISI 4140 çelik numune(200X), (c) AISI 4140 çelik numune(50X)



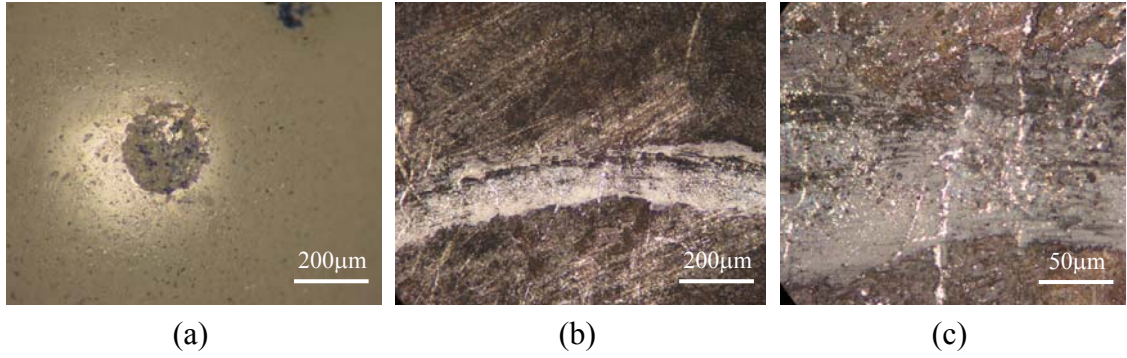
Şekil 8.50. Niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 2N yük altında 0,3 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye(200X), (b) AISI 4140 çelik numune(200X), (c) AISI 4140 çelik numune(50X)



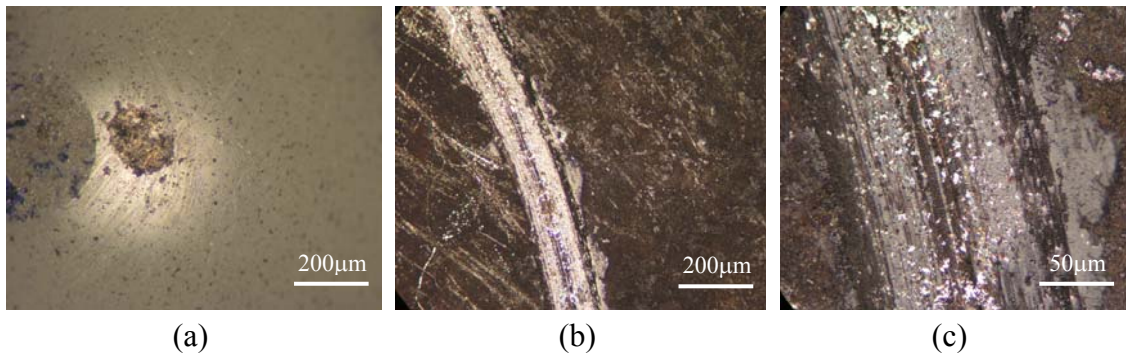
Şekil 8.51. Niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 2N yük altında 0,5 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye(200X), (b) AISI 4140 çelik numune(200X), (c) AISI 4140 çelik numune(50X)



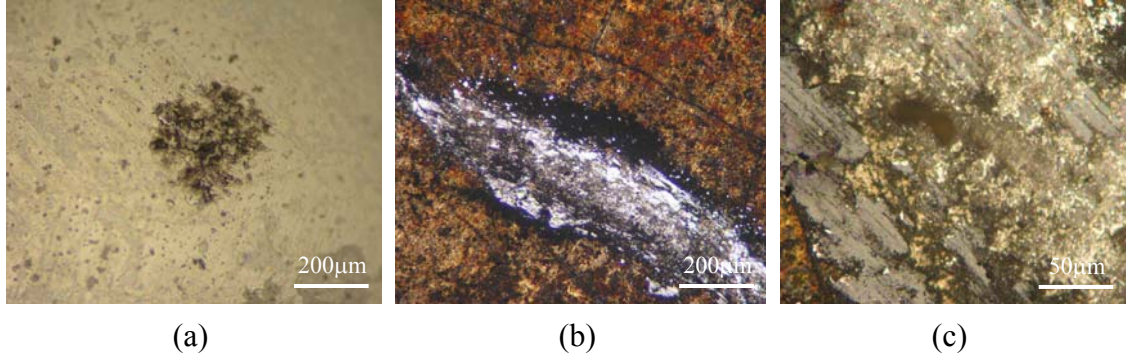
Şekil 8.52. Niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 5N yük altında 0,1 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye(200X), (b) AISI 4140 çelik numune(200X), (c) AISI 4140 çelik numune(50X)



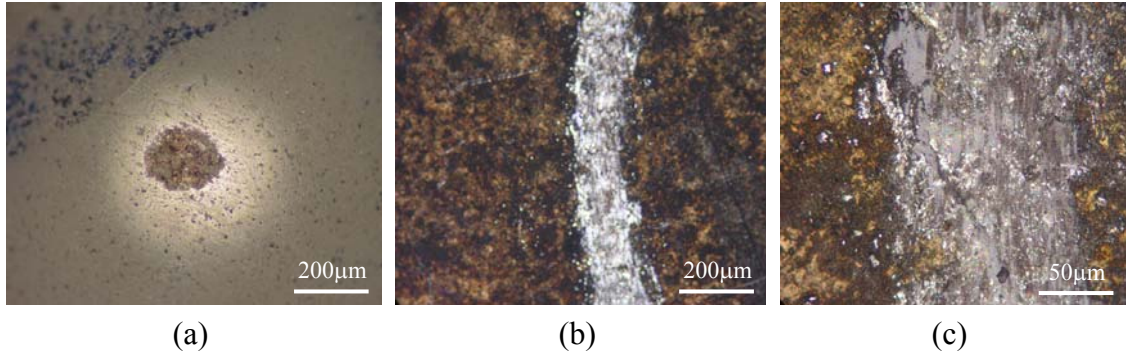
Şekil 8.53. Niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 5N yük altında 0,3 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye(200X), (b) AISI 4140 çelik numune(200X), (c) AISI 4140 çelik numune(50X)



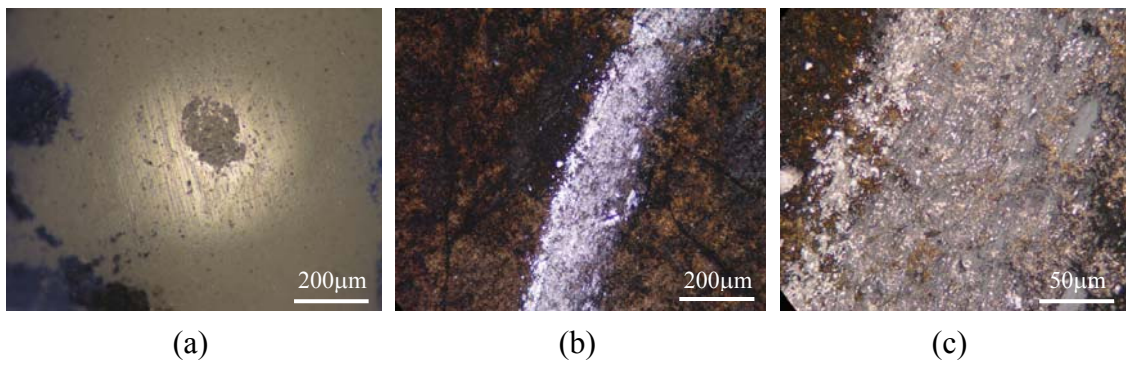
Şekil 8.54. Niobyum borür kaplanmış AISI 4140 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 5N yük altında 0,5 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye(200X), (b) AISI 4140 çelik numune(200X), (c) AISI 4140 çelik numune(50X)



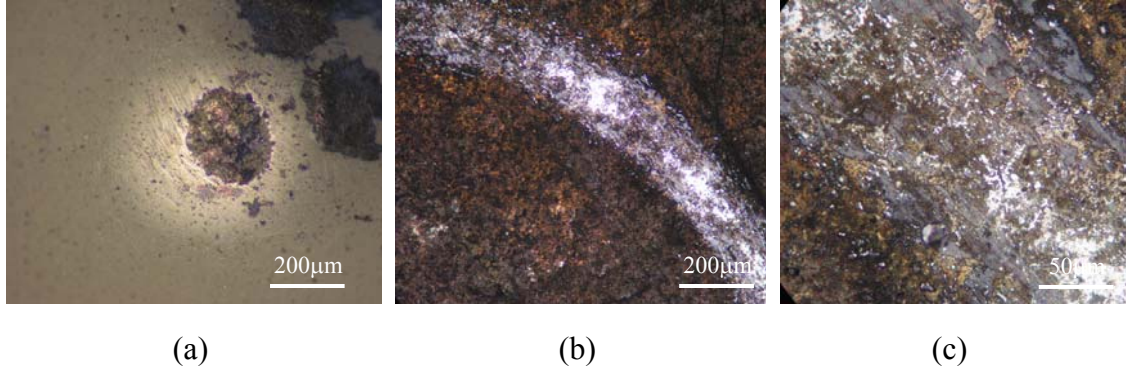
Şekil 8.55. Niobyum borür kaplanmış AISI D2 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 1N yük altında 0,1 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye(200X), (b) AISI D2 çelik numune(200X), (c) AISI D2 çelik numune(50X)



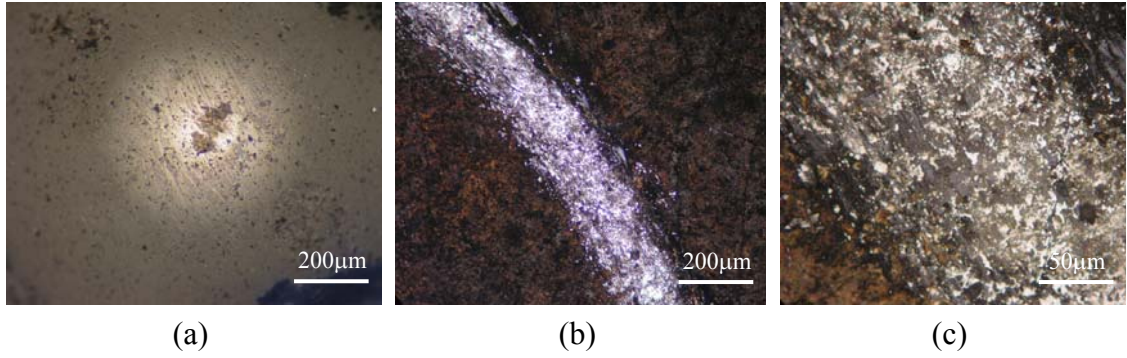
Şekil 8.56. Niobyum borür kaplanmış AISI D2 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 1N yük altında 0,3 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye(200X), (b) AISI D2 çelik numune(200X), (c) AISI D2 çelik numune(50X)



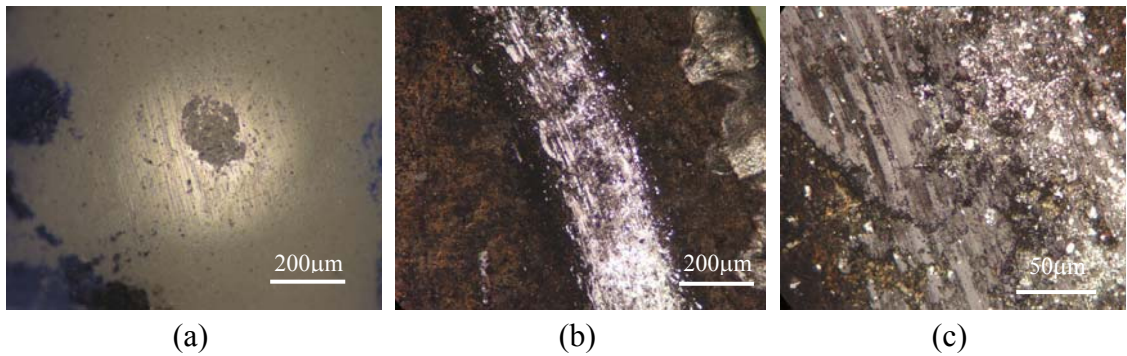
Şekil 8.57. Niobyum borür kaplanmış AISI D2 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 1N yük altında 0,5 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye(200X), (b) AISI D2 çelik numune(200X), (c) AISI D2 çelik numune(50X)



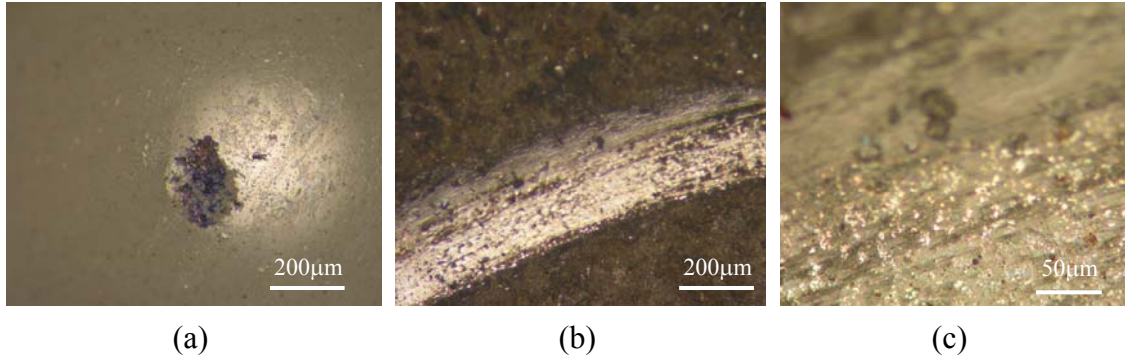
Şekil 8.58. Niobyum borür kaplanmış AISI D2 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 2N yük altında 0,1 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye(200X), (b) AISI D2 çelik numune(200X), (c) AISI D2 çelik numune(50X)



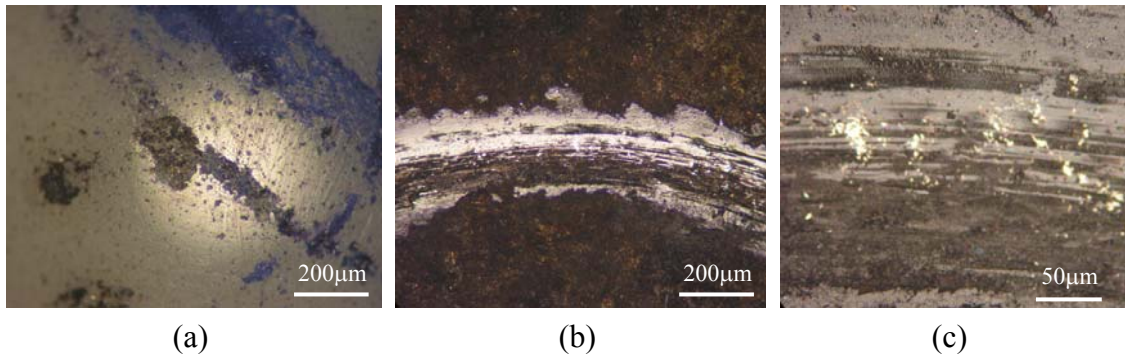
Şekil 8.59. Niobyum borür kaplanmış AISI D2 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 2N yük altında 0,3 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye(200X), (b) AISI D2 çelik numune(200X), (c) AISI D2 çelik numune(50X)



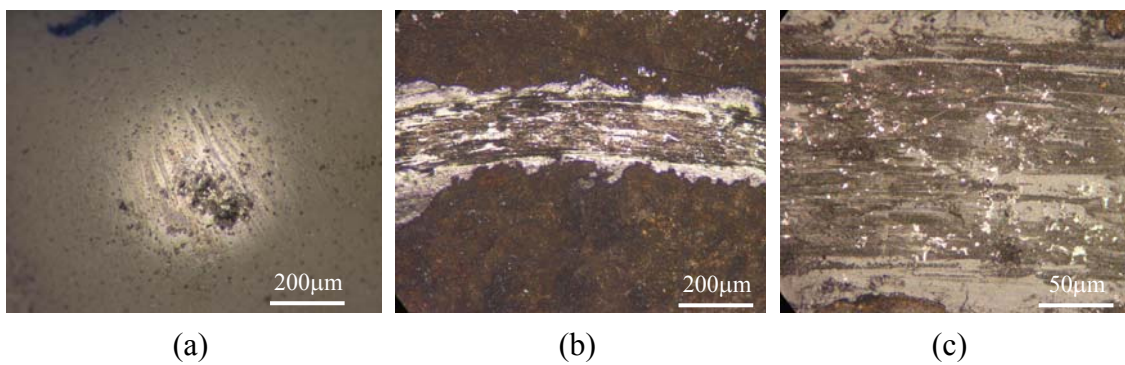
Şekil 8.60. Niobyum borür kaplanmış AISI D2 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 2N yük altında 0,5 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye(200X), (b) AISI D2 çelik numune(200X), (c) AISI D2 çelik numune(50X)



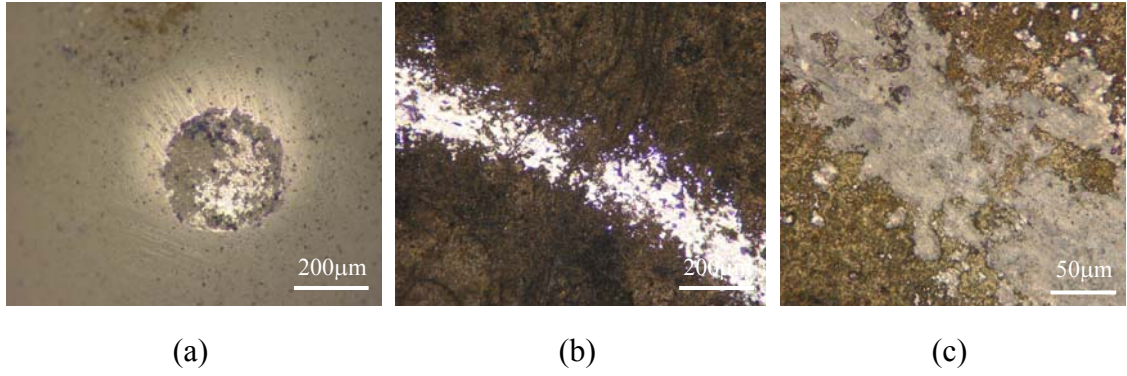
Şekil 8.61. Niobyum borür kaplanmış AISI D2 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 5N yük altında 0,1 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye(200X), (b) AISI D2 çelik numune(200X), (c) AISI D2 çelik numune(50X)



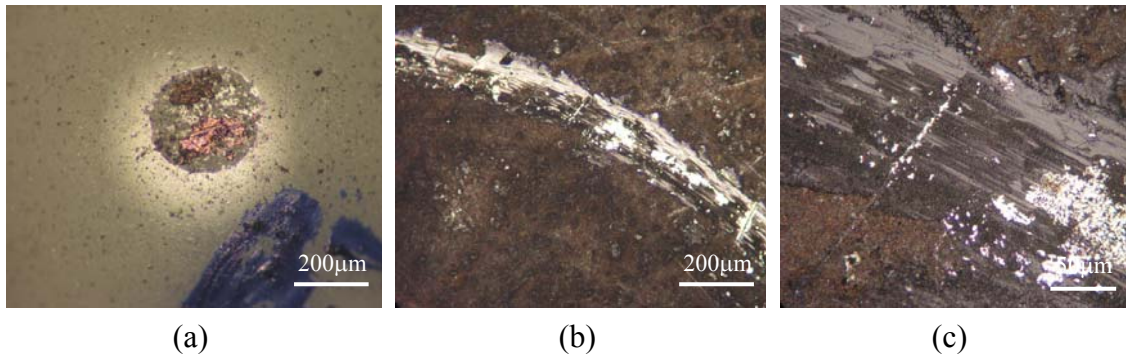
Şekil 8.62. Niobyum borür kaplanmış AISI D2 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 5N yük altında 0,3 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye(200X), (b) AISI D2 çelik numune(200X), (c) AISI D2 çelik numune(50X)



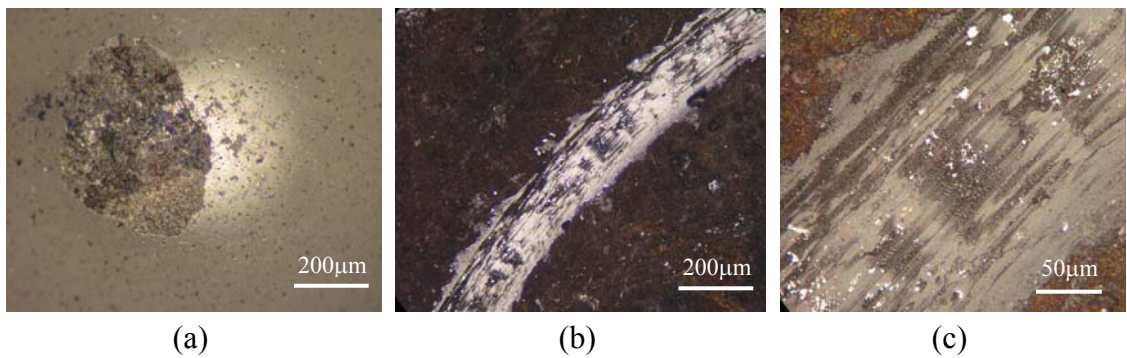
Şekil 8.63. Niobyum borür kaplanmış AISI D2 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 5N yük altında 0,5 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye(200X), (b) AISI D2 çelik numune(200X), (c) AISI D2 çelik numune(50X)



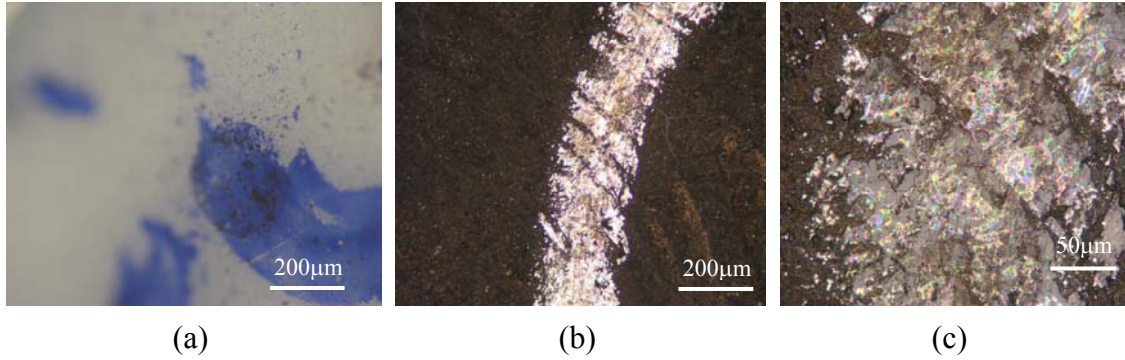
Şekil 8.64. Niobyum borür kaplanmış AISI M2 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 1N yük altında 0,1 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye(200X), (b) AISI M2 çelik numune(200X), (c) AISI 1010 çelik numune(50X)



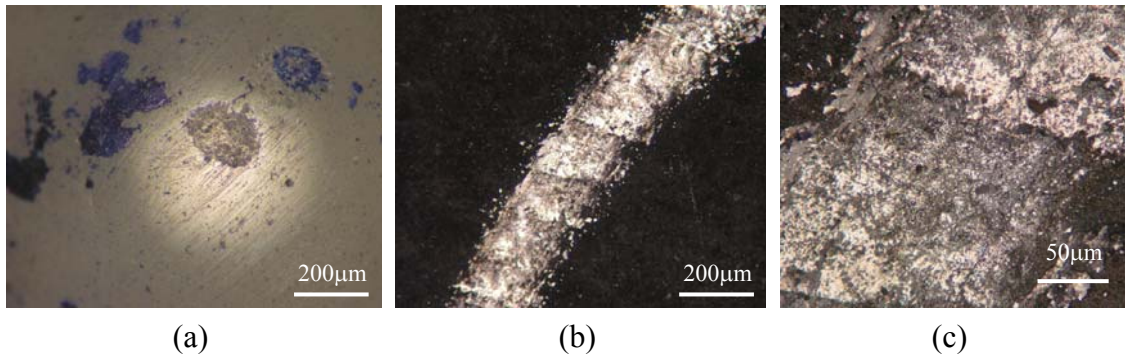
Şekil 8.65. Niobyum borür kaplanmış AISI M2 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 1N yük altında 0,3 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye(200X), (b) AISI M2 çelik numune(200X), (c) AISI M2 çelik numune(50X)



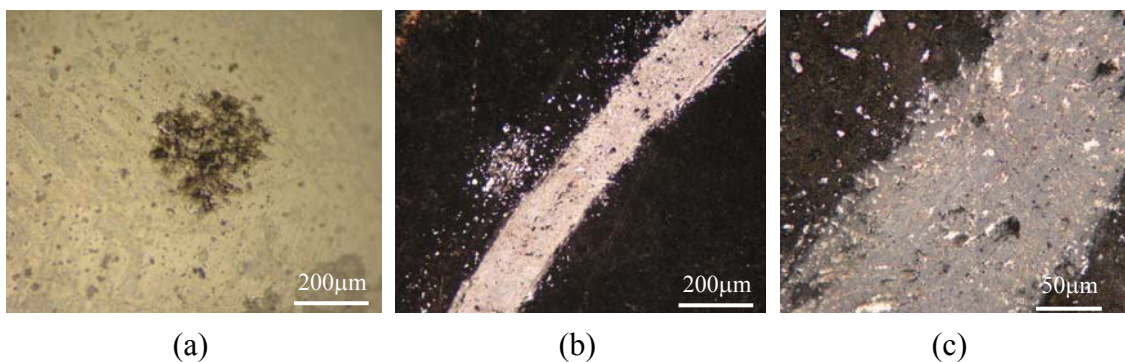
Şekil 8.66. Niobyum borür kaplanmış AISI M2 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 1N yük altında 0,5 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye(200X), (b) AISI M2 çelik numune(200X), (c) AISI M2 çelik numune(50X)



Şekil 8.67. Niobyum borür kaplanmış AISI M2 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 2N yük altında 0,1 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye(200X), (b) AISI M2 çelik numune(200X), (c) AISI M2 çelik numune(50X)

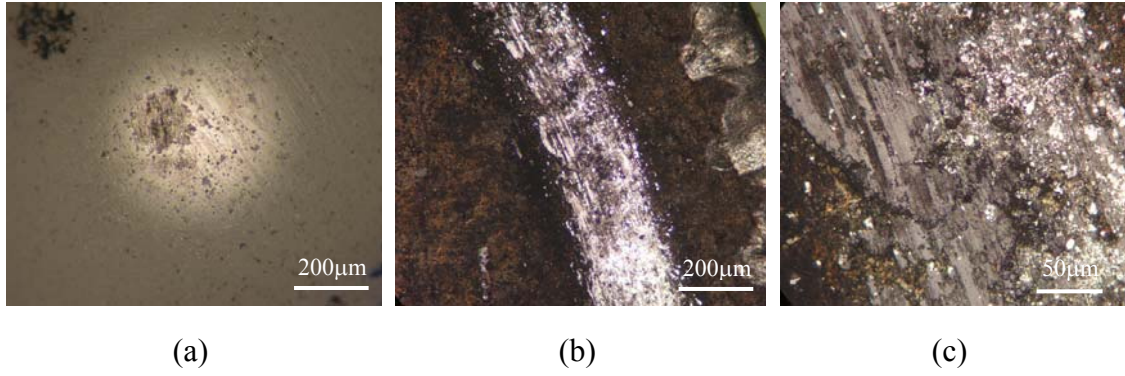


Şekil 8.68. Niobyum borür kaplanmış AISI M2 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 2N yük altında 0,3 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye(200X), (b) AISI M2 çelik numune(200X), (c) AISI M2 çelik numune(50X)

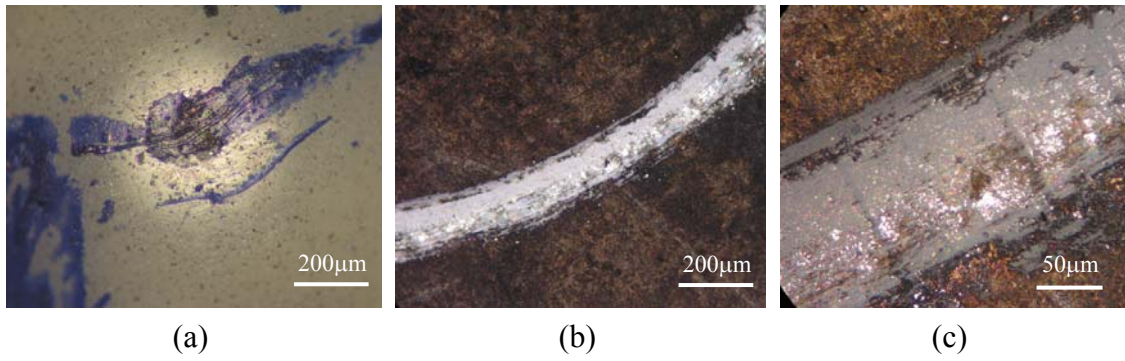


Şekil 8.69. Niobyum borür kaplanmış AISI M2 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 2N yük altında 0,5 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye(200X), (b) AISI M2 çelik numune(200X), (c) AISI M2 çelik numune(50X)

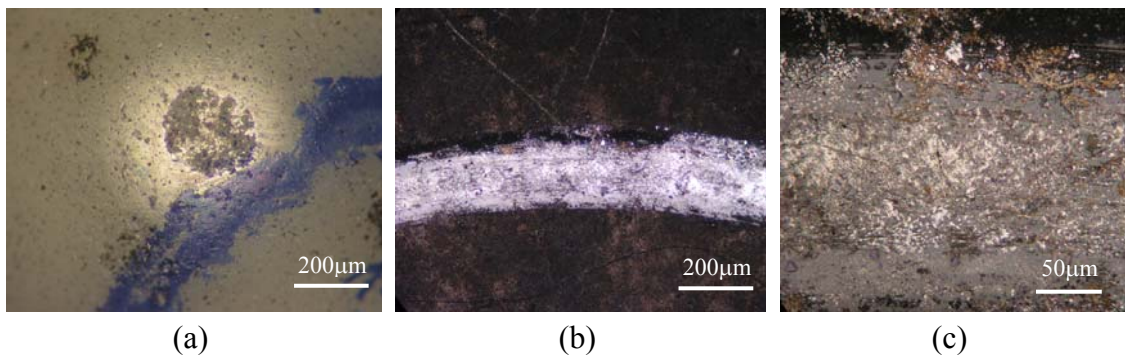




Şekil 8.70. Niobyum borür kaplanmış AISI M2 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 5N yük altında 0,1 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye(200X), (b) AISI M2 çelik numune(200X), (c) AISI M2 çelik numune(50X)



Şekil 8.71. Niobyum borür kaplanmış AISI M2 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 5N yük altında 0,3 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye(200X), (b) AISI M2 çelik numune(200X), (c) AISI M2 çelik numune(50X)



Şekil 8.72. Niobyum borür kaplanmış AISI M2 çelik numune ile alümina bilye arasındaki 5N yük altında 0,5 m/s hızda ve 180 metre mesafede aşınma deneyi sonucu oluşan mikro yapı görüntüleri (a) Alümina bilye(200X), (b) AISI M2 çelik numune(200X), (c) AISI M2 çelik numune(50X)



## BÖLÜM 9. TARIŞMA VE ÖNERİLER

- AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çeliklerinin tamamında 850°C, 900°C ve 950°C sıcaklıklarda, 1-4 saat sürelerde niobyum borür kaplamalar başarı ile gerçekleştirilmiştir.

- Niobyum borür kaplamalar yoğun ve kompakt olarak çeliklerin yüzeylerinde elde edilmiştir. TRD yöntemiyle elde edilen niobyum borür tabakaları sırasıyla NbB, NbB<sub>2</sub> ve Nb<sub>3</sub>B<sub>4</sub> fazlarını içermektedir.

- Elde edilen niobyum borür kaplamaların kalınlıkları işlem sıcaklığı ve süresine bağlı olarak artış göstermektedir. Zaman ve sıcaklığa bağlı olarak AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çeliklerinin yüzeylerinde oluşan niobyum borür tabakalarının kalınlıkları sırası ile 1.50 µm-7.19 µm, 0.468 µm-3.02 µm, 0.42 µm-2.43 µm ve 0.33 µm-3.215 µm değerleri arasında değişmektedir.

- Niobyum borür tabakalarının son derece sert kaplamalar olduğu tespit edilmiştir. Kaplama tabakalarının sertliği 2641 HV<sub>0.005</sub> ile 2738 HV<sub>0.005</sub> arasında değişmektedir.

- Aşınma deneylerinde AISI 52100 çelik bilye ve alümina bilyeye karşı aşındırılan niobyum borür kaplanmış çeliklerde sürtünme katsayıları genel olarak artan yük ve artan sürtünme hızları ile azalmaktadır.

- Yapılan aşınma deneylerinde alümina ve AISI 52100 çelik bilyelerin aşınma hızlarının, aşınma yükü ve sürtünme hızlarının artışına bağlı olarak arttığı görülmektedir. Benzer şekilde alümina bilyeye karşı aşındırılan niobyum borür kaplanmış çeliklerin aşınma hızlarında aşınma yükü ve sürtünme hızlarının artışına bağlı olarak artış göstermiştir.

- Niobyum borür kaplamaların korozyon ve oksidasyon çalışmalarını yapmak faydalı olacaktır.
- Niobyum borür kaplamaların pratik olarak gerçek uygulamalar da test edilmesi önemli sonuçlar verebilir.
- Demir dışı metallere benzer yöntemle niobyum borür kaplayarak özelliklerinin incelenmesi gerçekleştirilebilir.
- Banyo bileşimleri ile oynanarak kaplama tabakalarının kalınlıkları artırılmaya çalışılabilir.
- Niobyumla beraber ferro- alaşımlardan örneğin ferro-titanyum, ferro-vanadyum gibi, bileşimler ilave edilerek oluşacak değişimler incelenebilir.

## KAYNAKLAR

- [1] TOZAN, H., "TRD ile Çeşitli Çeliklerin Bor Titanyumlanması ve Özelliklerinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, Mayıs 2004
- [2] DELİKANLI, K., ULUSOY N., UZUN, H. A., "Yüzeyleri Borlama ile Sertleştirilen Ç1040 Çeliğinin Abrasiv Aşınma ve Korozyona Karşı Dayanımı", Mühendis ve Makine Dergisi, volume: 336, Ekim 2003, s:61-66
- [3] DENİZ, G., "TRD ile AISI 1010 ve AISI M2 çeliklerinin Titanyum Nitrür Kaplanması ve Özellikleri", Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2002
- [4] ŞEN, Ş., "Termokimyasal Borlama İşlemi ile AISI 4140 ve AISI 4340 Çeliklerinin Yüzey Performanslarının Geliştirilmesi", Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, Haziran 1998
- [5] ÖZBEK, İ., "Borlama Yöntemi ile (AISI M50, AISI M2) Yüksek Hız Takım Çeliklerinin ve AISI W1 Çeliğinin Yüzey Performanslarının Geliştirilmesi", Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, Mart 2004
- [6] MERİÇ, C., ŞAHİN, S., YILMAZ, S. S., "Katı Borlamada Kullanılan Tozların Tane Boyutunun Borür Tabakasına Etkisinin İncelenmesi", TMMOB Yayınları, Yayın No: 228, s: 82, 1999
- [7] ÇELEBİ G. F., "31CrMoV9 ve 34 CrA3N7 Çeliklerinin Borlama Kinetiklerinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, Haziran 2006
- [8] [www.osmanlicelik.com](http://www.osmanlicelik.com)
- [9] DALDAL, S., "Niobiyum Karbür Kaplamaların Özellikleri", Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, Temmuz 2002
- [10] "Asil Çelik Teknik Yayınlar Serisi", Bölüm 5, s: 4-28 Bölüm 6, s: 4-48, Bölüm 7, s: 1-62, 1982
- [11] YILMAZ, A., "Her Derde Deva Hazinemiz Bor", Bilim ve Teknik Dergisi, TÜBİTAK, Mayıs 2002, s: 414, s:38-48
- [12] [www.metalurjimuhendisleri.com](http://www.metalurjimuhendisleri.com)

- [13] ÖZBEK, İ., "Borlama", Çelik Yüzeylerin Kaplanması, Erdemir Bilim ve Teknoloji Serisi, Bölüm 6, s:118-162, ERDEMİR 2006
- [14] AYDEMİR, T., "Soğuk İş Takım Çeliklerinin Borlanması", Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, Haziran 1998
- [15] AKSELAND, D.R., "Refractory Metariats", ASTM Handbook, Volume 9 pp: 324-328, 1994
- [16] YEH C.L., "Preparation of niobium borides NbB and NbB<sub>2</sub> by self-propagating combustion synthesis ", Journal of Alloys and Compounds, Volume 420, Issues 1-2, 31 August 2006, pp: 111-116
- [17] BOZKURT N., "Bor Yayınımı ile Çeliklerde Yüzey Sertleştirme", Doktora Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1984
- [18] <http://www.teknoplazma.com.tr/tr>
- [19] ÜSTEL, F., "Kutu Sementasyon Tekniği ile Yüksek F-Tız Çeliği Yüzeyinde TiCxNL-x Türü Yüksek Sert Tabakalarının Üretilebilirliğinin Araştırılması", Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 1998
- [20] <http://www.mmo.org.tr/muhendismakina/arsiv/2004/makale>
- [21] ÖZSOY, A., "Çeliğin Borlanmasında Borür Tabakası, Geçiş Zonu ve Ana Matriksin Özelliklerinin İyileştirilmesi", Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 1991
- [22] ŞEN, U., "Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Borlanması ve Özellikleri", Doktora Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Aralık 1997
- [23] EKREN, H., EROĞLU, Ş., "Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemi ile Atmosfer ile Basınç Altında Piroolitik Karbon Bağlama", TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası, s:113, Nisan 1998
- [24] USLU, İ., "AISI 1040 ve P20 Kalıp Çeliklerinin Borlama Kinetiği", Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, Şubat 2004
- [25] ALSARAN, A., ÇELİK, A., KARAKAN, A., YETİM, F., "Yüzey Mühendisliğinde Yeni Bir Yaklaşım, Dupleks Yüzey Yaklaşımı", Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, s:1-3, 2003
- [26] ÇEĞİL, Ö., "AISI 8620 Çeliğinin Bor Vanadyumlanması ve Yüzey Özelliklerinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, Haziran 2002

- [27] <http://www.tinkap.com/kaplamalar.html>
- [28] ÇELİK, A., ALSARAN, A., KARAKAN, M, "Plazma ile Termokimyasal Yüzey İşlemleri", Mühendis ve Makine Dergisi, s: 510, Temmuz, 2002

## **ÖZGEÇMİŞ**

04/08/1980 tarihinde Tokat' ta doğmuştur. İlkokul eğitimini Alparslan İlkokulu' nda, orta okul eğitimini Atatürk Ortaokulu' nda ve lise eğitimini Tokat Endüstri Meslek, Teknik ve Anadolu Teknik Lisesi' nin Anadolu Teknik Lisesi Elektrik eğitimi bölümünde bitirmiştir. 2000 eğitim öğretim yılında Sakarya Üniversitesi Metal Eğitimi Bölümünü kazanmış ve 2004 eğitim öğretim yılında mezun olduktan sonra Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Anabilim dalında yüksek lisans eğitimine hak kazanmıştır. Halen bu üniversitede yüksek lisans eğitimine devam etmektedir.

Yük. Met. Öğr. S. Serdar PAZARLIOĞLU