

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

**NbN/NbCN KAPLANMIŞ ÇELİKLERİN YÜZEY
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tek. Öğrt. KADİR KOCAMAN

Enstitü Anabilim Dalı : METAL EĞİTİMİ

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Şaduman ŞEN

Haziran 2007

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**NbN/NbCN KAPLANMIŞ ÇELİKLERİN YÜZEY
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tek. Öğrt. KADİR KOCAMAN

Enstitü Anabilim Dalı : METAL EĞİTİMİ

Bu tez 21 / 06 /2007 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Şaduman ŞEN
Jüri Başkanı

Doç. Dr. Hüseyin ÜNAL
Üye

Doç. Dr. S. Can KURNAZ
Üye

TEŞEKKÜR

Öncelikle eğitim hayatım boyunca maddi manevi desteklerini esirgemeyen ve bu aşamaya gelmemde en büyük paya sahip olan sevgili annem, babam ve kardeşlerime teşekkür ederim.

Bu çalışmanın yürütülmesi ve sonuçlandırılmasında fikir ve tecrübeleriyle bana yardımcı olan, deneylerimde beni yönlendiren değerli hocalarım Doç. Dr. Şaduman ŞEN'e ve Doç. Dr. Uğur ŞEN'e ayrıca çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Özkan ÖZDEMİR ve Doç. Dr. Şenol YILMAZ hocama şükranlarımı sunar, teşekkürü bir borç bilirim.

Öğrencisi olduğum ve çalışmalarımı gerçekleştirdiğim Sakarya Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü'ne, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'ne ve kıymetli öğretim üyelerine, deneylerime yardımcı olan Araştırma görevlisi Ediz ERCENK'e ve ayrıca bana yardımcı dokunan herkese teşekkür ederim.

Haziran 2007

KADİR KOCAMAN

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ.....	xxiv
ÖZET.....	xxvi
SUMMARY	xxvii

BÖLÜM 1.

GİRİŞ	1
-------------	---

BÖLÜM 2.

ÇELİKLER HAKKINDA GENEL BİLGİ	5
2.1. Giriş	5
2.2. Çeliklerin Sınıflandırılması	6
2.2.1. Üretim yöntemlerine göre	6
2.2.2. Kullanım alanlarına göre çelikler.....	6
2.2.3. Alaşım durumlarına göre çelikler	7
2.2.4. Ana katkı maddesine göre çelikler.....	7
2.2.5. Mikro yapılarına göre çelikler.....	8
2.2.6. Kalite durumlarına göre çelikler	8
2.2.7. Fiziksel ve kimyasal özelliklerine göre çelikler.....	8
2.2.8. Sertleştirme ortamlarına göre çelikler.....	9

2.3. Sade Karbonlu Çelikler.....	9
2.3.1. Az karbonlu çelikler.....	9
2.3.2. Orta karbonlu çelikler	10
2.3.3. Yüksek karbonlu çelikler	11
2.4. Alaşımli Çelikler.....	11
2.4.1. Az alaşımli çelikler	12
2.4.2. Yüksek alaşımli çelikler.....	12
2.5. Yapı çelikleri	12
2.5.1. Normal yapı çelikleri	12
2.5.2. Islah çelikleri.....	12
2.5.3. Sementasyon çelikleri	13
2.6. Takım çelikleri.....	14
2.6.1. Soğuk iş takım çelikleri.....	15
2.6.2. Sıcak iş takım çelikleri.....	16
2.6.3. Yüksek hız takım çelikleri	17

BÖLÜM 3.

NİOBYUM (KOLOMBİYUM).....	18
3.1. Giriş	18
3.2. Niobiyumun Özellikleri	19
3.2.1. Fiziksel özellikleri.....	20
3.2.2. Kimyasal özellikler	21
3.2.3. Reaksiyonları	23
3.2.3.1. Hava ile reaksiyonu	23
3.2.3.2. Su ile reaksiyonu	23
3.2.3.3. Asit ile reaksiyonu.....	23
3.2.3.4. Baz ile reaksiyonu	23
3.3. Niobiyumun Kaynak Edilebilirliği	24
3.4. Dünyada Niobiyum Rezervleri	26
3.5. Üretim Yöntemi ve Teknolojisi	26

3.6. Üretim Yapan Ülkeler ve Firmalar	27
3.7. Tüketim ve Kullanım Alanları.....	28

BÖLÜM 4.

NİTRÜRLEME	30
4.1. Giriş	30
4.2. Çelik Seçimi.....	34
4.3. Nitrürleme Öncesi İşlemler.....	35
4.4. Nitrürleme Yönteminin Avantajları.....	36
4.5. Karbon sertleştirme ile nitrasyonun karşılaştırılması	37
4.6. Nitrürleme İşleminin Kullanım Alanları	38
4.7. Nitrürleme Yöntemleri.....	38
4.7.1. Gaz nitrürleme.....	38
4.7.1.1. Amonyak ile gaz nitrürleme	42
4.7.1.2. Amonyak, azot veya hidrojenle gaz nitrürleme	42
4.7.1.3. Amonyak veya hidrokarbonla gaz nitrürleme	42
4.7.2. Tuz banyosunda (sıvı) nitrürleme	43
4.7.2.1. Tuffride yöntemi	43
4.7.2.2. Sursulf yöntemi	44
4.7.2.3. Sulfinuz yöntemi	45
4.7.3. Toz İle Nitrürleme.....	45
4.7.4. Plazma İyon Nitrürleme	46

BÖLÜM 5.

TERMOREAKTİF DİFÜZYON (TRD) YÖNTEMİ	47
5.1. Giriş	47
5.2. Termo-Reaktif Difüzyon Yöntemi	47
5.3. Termokimyasal Kaplama Yöntemleri.....	50
5.4. TRD Yönteminin Üstünlükleri	51
5.5. TRD İşleminin Uygulama Alanları	52

BÖLÜM 6.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR	55
6.1. Giriş	55
6.2. Deneylerde Kullanılan Numuneler ve Kimyasal Analizleri	55
6.3. Deneylerde Kullanılan Numunelerin Hazırlanışı	57
6.4. Deneylerde Kullanılan Cihazlar ve Ekipmanlar	58
6.4.1. Nitrasyon ve Niobyumlama fırınları	58
6.4.2. Niobyumlama potasının hazırlanması.....	58
6.5. Nitrürleme İşlemi.....	59
6.6. TRD yöntemi ile Niobyumlama İşlemi	59
6.7. Metalografik İncelemeler.....	60
6.8. Faz Analizi.....	61
6.9. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Elementel Analiz İncelemesi.....	61
6.10. Sertlik Ölçümü.....	61
6.11. Aşınma Özellikleri.....	62

BÖLÜM 7.

SONUÇLAR VE İRDELEME.....	63
7.1. Giriş	63
7.2. Mikroyapı İncelemeleri	64
7.3. X-Işınları Difraksiyon Analizi.....	80
7.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Elementel Analiz (EDS) İncelenmeleri	87
7.5. Sertlik Ölçümleri	96
7.6. Aşınma Özellikleri.....	101

BÖLÜM 8.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER	151
9.1. Sonuçlar	151
9.2. Öneriler	152
KAYNAKLAR	154
ÖZGEÇMİŞ	157

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 ³ /m	:Aşınma Hızı
mm ³ /m	:Aşınma Hacmi
SEM-EDS	:Noktasal Analiz
Nb	:Niobyum

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Isıl ve kimyasal yüzey işlemlerinin sınıflandırılması	2
Şekil 1.2.	Yüzey sertleştirme için kullanılan değişik metotların sertlik derinliği ve sıcaklığa bağlı olarak kıyaslanması	3
Şekil 3.1.	Niobyum cevherinin görünüşü.....	19
Şekil 3.2.	Nb un genel özellikleri.....	20
Şekil 3.3.	Nb un indirgenme potansiyeli	22
Şekil 3.4.	Nb un süper iletkenlik intikali.....	24
Şekil 3.5.	Nb ve Sn nin süper iletkenlik halinde rezistivitenin gösterimi	24
Şekil 3.6.	Saf niobyumun sertliği üzerinde oksijen absorpsiyonunun etkisi	25
Şekil 3.7.	Saf Ferro-niobyumdan elde edilmiş levha	29
Şekil 4.1.	Fe-N ikili denge diyagramı	32
Şekil 4.2.	Kontrollü bir gaz nitrasyon fırınının şematik olarak gösterimi.....	41
Şekil 4.3.	Kontrollü bir gaz nitrasyon fırını	41
Şekil 6.1.	Deneylerde kullanılan numunenin boyutları (ölçü birimi: mm)	57
Şekil 6.2.	Gaz nitrasyon fırını.....	58
Şekil 6.3.	Niobyumlama fırını.....	58
Şekil 6.4.	TRD yönteminde kullanılan Niobyumlama potasının şematik görünüşü (ölçü birimi: mm)	59
Şekil 6.5.	Niobyumlama potasında malzeme ve banyo bileşenlerinin dizaynı.....	60
Şekil 6.6.	Aşınma deneyi cihazı.....	62
Şekil 7.1.	900°C sıcaklıkta (a) 1 saat ve (b) 2 saat süre ile niobyumlanan AISI 1010 çeliğinin mikroyapı görüntüleri	64
Şekil 7.2.	900°C sıcaklıkta (a) 3 saat ve (b) 4 saat süre ile niobyumlanan AISI 1010 çeliğinin mikroyapı görüntüleri	65

Şekil 7.3.	1000°C sıcaklıkta (a) 1 saat ve (b) 2 saat süre ile niobyumlanan AISI 1010 çeliğinin mikroyapı görüntüleri	65
Şekil 7.4.	1000°C sıcaklıkta (a) 3 saat ve (b) 4 saat süre ile niobyumlanan AISI 1010 çeliğinin mikroyapı görüntüleri	65
Şekil 7.5.	1100°C sıcaklıkta (a) 1 saat ve (b) 2 saat süre ile niobyumlanan AISI 1010 çeliğinin mikroyapı görüntüleri	66
Şekil 7.6.	1100°C sıcaklıkta (a) 3 saat ve (b) 4 saat süre ile niobyumlanan AISI 1010 çeliğinin mikroyapı görüntüleri	66
Şekil 7.7.	1000°C’de 2 saat süre ile niobyumlanmış AISI 1010 çeliğinin farklı büyütme ölçeklerinde SEM görüntüleri.....	66
Şekil 7.7.	Devam.....	67
Şekil 7.8.	900°C sıcaklıkta (a) 1 saat ve (b) 2 saat süre ile niobyumlanan AISI 4140 çeliğinin mikroyapı görüntüleri	67
Şekil 7.9.	900°C sıcaklıkta (a) 3 saat ve (b) 4 saat süre ile niobyumlanan AISI 4140 çeliğinin mikroyapı görüntüleri	67
Şekil 7.10.	1000°C sıcaklıkta (a) 1 saat ve (b) 2 saat süre ile niobyumlanan AISI 4140 çeliğinin mikroyapı görüntüleri	68
Şekil 7.11.	1000°C sıcaklıkta (a) 3 saat ve (b) 4 saat süre ile niobyumlanan AISI 4140 çeliğinin mikroyapı görüntüleri	68
Şekil 7.12.	1100°C sıcaklıkta (a) 1 saat ve (b) 2 saat süre ile niobyumlanan AISI 4140 çeliğinin mikroyapı görüntüleri	68
Şekil 7.13.	1100°C sıcaklıkta (a) 3 saat ve (b) 4 saat süre ile niobyumlanan AISI 4140 çeliğinin mikroyapı görüntüleri	69
Şekil 7.14.	1000°C’de 2 saat süre ile niobyumlanmış AISI 4140 çeliğinin farklı büyütme ölçeklerinde SEM görüntüleri.....	69
Şekil 7.15.	900°C sıcaklıkta (a) 1 saat ve (b) 2 saat süre ile niobyumlanan AISI D2 çeliğinin mikroyapı görüntüleri	70
Şekil 7.16.	900°C sıcaklıkta (a) 3 saat ve (b) 4 saat süre ile niobyumlanan AISI D2 çeliğinin mikroyapı görüntüleri	70
Şekil 7.17.	1000°C sıcaklıkta (a) 1 saat ve (b) 2 saat süre ile niobyumlanan AISI D2 çeliğinin mikroyapı görüntüleri	70

Şekil 7.18.	1000°C sıcaklıkta (a) 3 saat ve (b) 4 saat süre ile niobyumlanan AISI D2 çeliğinin mikroyapı görüntüleri	71
Şekil 7.19.	1100°C sıcaklıkta (a) 1 saat ve (b) 2 saat süre ile niobyumlanan AISI D2 çeliğinin mikroyapı görüntüleri	71
Şekil 7.20.	1100°C sıcaklıkta (a) 3 saat ve (b) 4 saat süre ile niobyumlanan AISI D2 çeliğinin mikroyapı görüntüleri	71
Şekil 7.21.	1000°C’de 2 saat süre ile niobyumlanmış AISI D2 çeliğinin farklı büyütmelemlerde SEM görüntüleri.....	72
Şekil 7.22.	900°C sıcaklıkta (a) 1 saat ve (b) 2 saat süre ile niobyumlanan AISI M2 çeliğinin mikroyapı görüntüleri.....	72
Şekil 7.23.	900°C sıcaklıkta (a) 3 saat ve (b) 4 saat süre ile niobyumlanan AISI M2 çeliğinin mikroyapı görüntüleri.....	73
Şekil 7.24.	1000°C sıcaklıkta (a) 1 saat ve (b) 2 saat süre ile niobyumlanan AISI M2 çeliğinin mikroyapı görüntüleri	73
Şekil 7.25.	1000°C sıcaklıkta (a) 3 saat ve (b) 4 saat süre ile niobyumlanan AISI M2 çeliğinin mikroyapı görüntüleri	73
Şekil 7.26.	1100°C sıcaklıkta (a) 1 saat ve (b) 2 saat süre ile niobyumlanan AISI M2 çeliğinin mikroyapı görüntüleri	74
Şekil 7.27.	1100°C sıcaklıkta (a) 3 saat ve (b) 4 saat süre ile niobyumlanan AISI M2 çeliğinin mikroyapı görüntüleri	74
Şekil 7.28.	1000°C’de 2 saat süre ile niobyumlanmış AISI M2 çeliğinin farklı büyütmelemlerde SEM görüntüleri.....	74
Şekil 7.28.	Devam	75
Şekil 7.29.	900°C 1000°C ve 1100 °C’ de kaplama işlemine tabi tutulmuş AISI 1010 çeliğinin kaplama zamanına bağlı olarak tabaka kalınlığı değişimi	76
Şekil 7.30.	900°C 1000°C ve 1100 °C’ de kaplama işlemine tabi tutulmuş AISI 4140 çeliğinin kaplama zamanına bağlı olarak tabaka kalınlığı değişimi	77
Şekil 7.31.	900°C 1000°C ve 1100 °C’ de kaplama işlemine tabi tutulmuş AISI D2 çeliğinin kaplama zamanına bağlı olarak tabaka kalınlığı değişimi	77
Şekil 7.32.	900°C 1000°C ve 1100 °C’ de kaplama işlemine tabi tutulmuş AISI M2 çeliğinin kaplama zamanına bağlı olarak tabaka kalınlığı değişimi	78

Şekil 7.33. Niobyumlama işlemine tabi tutulmuş AISI 1010 çeliğinin sıcaklığa ve kaplama zamanına bağlı olarak tabaka kalınlığı değişimi	78
Şekil 7.34. Niobyumlama işlemine tabi tutulmuş AISI 4140 çeliğinin sıcaklığa ve kaplama zamanına bağlı olarak tabaka kalınlığı değişimi	79
Şekil 7.35. Niobyumlama işlemine tabi tutulmuş AISI D2 çeliğinin sıcaklığa ve kaplama zamanına bağlı olarak tabaka kalınlığı değişimi	79
Şekil 7.36. Niobyumlama işlemine tabi tutulmuş AISI M2 çeliğinin sıcaklığa ve kaplama zamanına bağlı olarak tabaka kalınlığı değişimi	80
Şekil 7.37. 900°C sıcaklıkta 2 saat süre ile niobyumlanmış AISI 1010 çeliğinin x-ışını difraksiyon paterni	81
Şekil 7.38. 1000°C sıcaklıkta 2 saat süre ile niobyumlanmış AISI 1010 çeliğinin x-ışını difraksiyon paterni	81
Şekil 7.39. 1100°C sıcaklıkta 2 saat süre ile niobyumlanmış AISI 1010 çeliğinin x-ışını difraksiyon paterni	82
Şekil 7.40. 900°C sıcaklıkta 2 saat süre ile niobyumlanmış AISI 4140 çeliğinin x-ışını difraksiyon paterni	82
Şekil 7.41. 1000°C sıcaklıkta 2 saat süre ile niobyumlanmış AISI 4140 çeliğinin x-ışını difraksiyon paterni	83
Şekil 7.42. 1100°C sıcaklıkta 2 saat süre ile niobyumlanmış AISI 4140 çeliğinin x-ışını difraksiyon paterni	83
Şekil 7.43. 900°C sıcaklıkta 2 saat süre ile niobyumlanmış AISI D2 çeliğinin x-ışını difraksiyon paterni	84
Şekil 7.44. 1000°C sıcaklıkta 2 saat süre ile niobyumlanmış AISI D2 çeliğinin x-ışını difraksiyon paterni	84
Şekil 7.45. 1100°C sıcaklıkta 2 saat süre ile niobyumlanmış AISI D2 çeliğinin x-ışını difraksiyon paterni	85
Şekil 7.46. 900°C sıcaklıkta 2 saat süre ile niobyumlanmış AISI M2 çeliğinin x-ışını difraksiyon paterni	85
Şekil 7.47. 1000°C sıcaklıkta 2 saat süre ile niobyumlanmış AISI M2 çeliğinin x-ışını difraksiyon paterni	86

Şekil 7.48.	1100°C sıcaklıkta 2 saat süre ile niobyumlanmış AISI M2çeliğinin x-ışını difraksiyon paterni	86
Şekil 7.49.	1000°C’ de 2 saat süre ile niobyum nitrür kaplanan AISI 1010 çelik numunenin kaplama tabakasının (a) mikroyapı görüntüsü (b) elementel dağılım haritası (c) 1. (d) 2. (e) 3. (f) 4. noktaların EDS analizleri	88
Şekil 7.49.	Devam.....	89
Şekil 7.50.	1000°C’ de 2 saat süre ile niobyum nitrür kaplanan AISI 4140 çelik numunenin kaplama tabakasının (a) mikroyapı görüntüsü (b) elementel dağılım haritası (c) 1. (d) 2. (e) 3. (f) 4. noktaların EDS analizleri	90
Şekil 7.50.	Devam.....	91
Şekil 7.51.	1000°C’ de 2 saat süre ile niobyum nitrür kaplanan AISI D2 çelik numunenin kaplama tabakasının (a) mikroyapı görüntüsü (b) elementel dağılım haritası (c) 1. (d) 2. (e) 3. noktaların EDS analizleri	92
Şekil 7.51.	Devam	93
Şekil 7.52.	1000°C’ de 2 saat süre ile niobyum nitrür kaplanan AISI M2 çelik numunenin kaplama tabakasının (a) mikroyapı görüntüsü (b) elementel dağılım haritası (c) 1. (d) 2. (e) 3. noktaların EDS analizleri	94
Şekil 7.52.	Devam.....	95
Şekil 7.53.	900°C, 1000°C ve 1100 °C’ de niobyum nitrür kaplama işlemine tabi tutulmuş AISI 1010 çeliğinin kaplama zamanına bağlı olarak sertlik dağılımı	97
Şekil 7.54.	900°C, 1000°C ve 1100 °C’ de niobyum nitrür kaplama işlemine tabi tutulmuş AISI 4140 çeliğinin kaplama zamanına bağlı olarak sertlik dağılımı	98
Şekil 7.55.	900°C, 1000°C ve 1100 °C’ de niobyum nitrür kaplama işlemine tabi tutulmuş AISI D2 çeliğinin kaplama zamanına bağlı olarak sertlik dağılımı	98
Şekil 7.56.	900°C, 1000°C ve 1100 °C’ de niobyum nitrür kaplama işlemine tabi tutulmuş AISI M2 çeliğinin kaplama zamanına bağlı olarak sertlik dağılımı	99

Şekil 7.57. Niobyum nitür kaplama işlemine tabi tutulmuş AISI 1010 çeliğinde sıcaklık ve zamana bağlı olarak sertlik değişimi	99
Şekil 7.58. Niobyum nitür kaplama işlemine tabi tutulmuş AISI 4140 çeliğinde sıcaklık ve zamana bağlı olarak sertlik değişimi	100
Şekil 7.59. Niobyum nitür kaplama işlemine tabi tutulmuş AISI D2 çeliğinde sıcaklık ve zamana bağlı olarak sertlik değişimi	100
Şekil 7.60. Niobyum nitür kaplama işlemine tabi tutulmuş AISI M2 çeliğinde sıcaklık ve zamana bağlı olarak sertlik değişimi	101
Şekil 7.61. 1000°C’de 2 saat süre ile niobyum nitür kaplanmış AISI 1010 çeliğinin 0.1 m/s hız ve 5N yük altında Alümina bilyeye karşı yola bağlı olarak sürtünme katsayısındaki değişim	102
Şekil 7.62. 1000°C’de 2 saat süre ile niobyum nitür kaplanmış AISI 4140 çeliğinin 0.1 m/s hız ve 5N yük altında Alümina bilyeye karşı yola bağlı olarak sürtünme katsayısındaki değişim	103
Şekil 7.63. 1000°C’de 2 saat süre ile niobyum nitür kaplanmış AISI D2 çeliğinin 0.1 m/s hız ve 5N yük altında Alümina bilyeye karşı yola bağlı olarak sürtünme katsayısındaki değişim	103
Şekil 7.64. 1000°C’de 2 saat süre ile niobyum nitür kaplanmış AISI M2 çeliğinin 0.1 m/s hız ve 5N yük altında Alümina bilyeye karşı yola bağlı olarak sürtünme katsayısındaki değişim	104
Şekil 7.65. 1000°C’de 2 saat süre ile niobyum nitür kaplanmış AISI 1010 çeliğinin 0.1 m/s hız ve 5N yük altında AISI M50 çelik bilyeye karşı yola bağlı olarak sürtünme katsayısındaki değişim	104
Şekil 7.66. 1000°C’de 2 saat süre ile niobyum nitür kaplanmış AISI 4140 çeliğinin 0.1 m/s hız ve 5N yük altında AISI M50 çelik bilyeye karşı yola bağlı olarak sürtünme katsayısındaki değişim	105
Şekil 7.67. 1000°C’de 2 saat süre ile niobyum nitür kaplanmış AISI D2 çeliğinin 0.1 m/s hız ve 5N yük altında AISI M50 çelik bilyeye karşı yola bağlı olarak sürtünme katsayısındaki değişim	105

Şekil 7.68.	1000°C'de 2 saat süre ile niobyum nitrür kaplanmış AISI M2 çeliğinin 0.1 m/s hız ve 5N yük altında AISI M50 çelik bilyeye karşı yola bağlı olarak sürtünme katsayısındaki değişim	106
Şekil 7.69.	1000°C'de 2 saat süre ile niobyum nitrür kaplanmış çeliklerin 0.1 m/s hızda, 320m mesafede alümina bilyeye karşı oluşan sürtünme katsayısı değerleri	107
Şekil 7.70.	Kaplanmamış çeliklerin 0.1 m/s hızda, 320m mesafede alümina bilyeye karşı oluşan sürtünme katsayısı değerleri	108
Şekil 7.71.	1000°C'de 2 saat süre ile niobyum nitrür kaplanmış çeliklerin 0.1 m/s hızda, 320m mesafede AISI M50 çelik bilyeye karşı oluşan sürtünme katsayısı değerleri	108
Şekil 7.72.	Kaplanmamış çeliklerin 0.1 m/s hızda, 320m mesafede AISI M50 çelik bilyeye karşı oluşan sürtünme katsayısı değerleri	109
Şekil 7.73.	0,1 m/s hızda, 320 m mesafede Alümina bilye ile aşındırılan niobyum nitrür kaplamanın aşınma hızlarının uygulanan yüke bağlı olarak değişimi.....	110
Şekil 7.74.	0,1 m/s hızda, 320 m mesafede Alümina bilye ile aşındırılan kaplanmamış çeliklerde aşınma hızlarının uygulanan yüke bağlı olarak değişimi.....	111
Şekil 7.75.	0,1 m/s hızda, 320 m mesafede Alümina bilye ile aşındırılan niobyum nitrür kaplanmış çelikler ile kaplanmamış çeliklerin aşınma hızlarının uygulanan yüke bağlı olarak değişimleri	112
Şekil 7.76	0,1 m/s hızda, 320 m mesafede Niobyum nitrür kaplanmış çeliklere karşı aşınma deneyine tabi tutulan alümina bilyedeki aşınma hızının uygulanan yüke bağlı olarak değişimi	113
Şekil 7.77.	0,1 m/s hızda, 320 m mesafede Niobyum nitrür kaplanmış çeliklere karşı aşınma deneyine tabi tutulan AISI M50 çelik bilyedeki aşınma hızının uygulanan yüke bağlı olarak değişimi	114
Şekil 7.78.	0,1 m/s hızda, 320 m mesafede kaplanmamış çeliklere karşı aşınma deneyine tabi tutulan alümina bilyedeki aşınma hızının uygulanan yüke bağlı olarak değişimi.....	115

Şekil 7.79.	0,1 m/s hızda, 320 m mesafede kaplanmamış çeliklere karşı aşınma deneyine tabi tutulan AISI M50 çelik bilyedeki aşınma hızının uygulanan yüke bağlı olarak değişimi	116
Şekil 7.80.	1000°C'de 2 saat süre ile niobyum nitür kaplanmış AISI 1010 çeliğinin 5N yük altında, 0.1 m/s hızda ve 320 m mesafede Alümina bilyeye karşı aşındırılmasıyla oluşan izin (a)SEM mikroyapısı, (b) 1. (c) 2. (d) 3. (e) 4. noktaların EDS analizleri.....	118
Şekil 7.80.	Devam	119
Şekil 7.81.	1000°C'de 2 saat süre ile niobyum nitür kaplanmış AISI 4140 çeliğinin 5N yük altında, 0.1 m/s hızda ve 320 m mesafede Alümina bilyeye karşı aşındırılmasıyla oluşan izin (a)SEM mikroyapısı, (b) 1. (c) 2. (d) 3. noktaların EDS analizleri.....	120
Şekil 7.81.	Devam	121
Şekil 7.82.	1000°C'de 2 saat süre ile niobyum nitür kaplanmış AISI D2 çeliğinin 5N yük altında, 0.1 m/s hızda ve 320 m mesafede Alümina bilyeye karşı aşındırılmasıyla oluşan izin (a)SEM mikroyapısı, (b) 1. (c) 2. (d) 3. noktaların EDS analizleri.....	122
Şekil 7.82.	Devam	123
Şekil 7.83.	1000°C'de 2 saat süre ile niobyum nitür kaplanmış AISI M2 çeliğinin 5N yük altında, 0.1 m/s hızda ve 320 m mesafede Alümina bilyeye karşı aşındırılmasıyla oluşan izin (a)SEM mikroyapısı, (b) 1. (c) 2. (d) 3. (e) 4. noktaların EDS analizleri.....	124
Şekil 7.83.	Devam	125
Şekil 7.84.	1000°C'de 2 saat süre ile niobyum nitür kaplanmış AISI 1010 çeliğinin 5N yük altında, 0.1 m/s hızda ve 320 m mesafede AISI M50 çelik bilyeye karşı aşındırılmasıyla oluşan izin (a)SEM mikroyapısı, (b) 1. (c) 2. (d) 3. noktaların EDS analizleri	126
Şekil 7.84.	Devam	127
Şekil 7.85.	1000°C'de 2 saat süre ile niobyum nitür kaplanmış AISI 4140 çeliğinin 5N yük altında, 0.1 m/s hızda ve 320 m mesafede AISI M50 çelik	

	bilyeye karşı aşındırılmasıyla oluşan izin (a)SEM mikroyapısı, (b) 1. (c) 2. (d) 3. noktaların EDS analizleri	128
Şekil 7.85.	Devam	129
Şekil 7.86.	1000°C'de 2 saat süre ile niobyum nitrür kaplanmış AISI D2 çeliğinin 5N yük altında, 0.1 m/s hızda ve 320 m mesafede AISI M50 çelik bilyeye karşı aşındırılmasıyla oluşan izin (a)SEM mikroyapısı, (b) 1. (c) 2. (d) 3. noktaların EDS analizleri	130
Şekil 7.86.	Devam	131
Şekil 7.87.	1000°C'de 2 saat süre ile niobyum nitrür kaplanmış AISI M2 çeliğinin 5N yük altında, 0.1 m/s hızda ve 320 m mesafede AISI M50 çelik bilyeye karşı aşındırılmasıyla oluşan izin (a)SEM mikroyapısı, (b) 1. (c) 2. (d) 3. noktaların EDS analizleri	132
Şekil 7.87.	Devam	133
Şekil 7.88.	Niobyum nitrür kaplanmış AISI 1010 çeliğinin 320 metre mesafede 2,5N yük, 0,1m/s hızda alümina bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri.....	134
Şekil 7.89.	Niobyum nitrür kaplanmış AISI 1010 çeliğinin 320 metre mesafede 5N yük, 0,1m/s hızda alümina bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri.....	135
Şekil 7.90.	Niobyum nitrür kaplanmış AISI 1010 çeliğinin 320 metre mesafede 10N yük, 0,1m/s hızda alümina bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri.....	135
Şekil 7.91.	Niobyum nitrür kaplanmış AISI 4140 çeliğinin 320 metre mesafede 2,5N yük, 0,1m/s hızda alümina bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri.....	135
Şekil 7.92.	Niobyum nitrür kaplanmış AISI 4140 çeliğinin 320 metre mesafede 5N yük, 0,1m/s hızda alümina bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi	

	sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri.....	136
Şekil 7.93.	Niobyum nitrür kaplanmış AISI 4140 çeliğinin 320 metre mesafede 10N yük, 0,1m/s hızda alümina bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri.....	136
Şekil 7.94.	Niobyum nitrür kaplanmış AISI D2 çeliğinin 320 metre mesafede 2,5N yük, 0,1m/s hızda alümina bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri.....	136
Şekil 7.95.	Niobyum nitrür kaplanmış AISI D2 çeliğinin 320 metre mesafede 5N yük, 0,1m/s hızda alümina bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri.....	137
Şekil 7.96.	Niobyum nitrür kaplanmış AISI D2 çeliğinin 320 metre mesafede 10N yük, 0,1m/s hızda alümina bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri.....	137
Şekil 7.97.	Niobyum nitrür kaplanmış AISI M2 çeliğinin 320 metre mesafede 2,5N yük, 0,1m/s hızda alümina bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri.....	137
Şekil 7.98.	Niobyum nitrür kaplanmış AISI M2 çeliğinin 320 metre mesafede 5N yük, 0,1m/s hızda alümina bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri.....	138
Şekil 7.99.	Niobyum nitrür kaplanmış AISI M2 çeliğinin 320 metre mesafede 10N yük, 0,1m/s hızda alümina bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri.....	138

- Şekil 7.100. Kaplanmamış AISI 1010 çeliğinin 320 metre mesafede 2,5N yük, 0,1m/s hızda alümina bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri..... 138
- Şekil 7.101. Kaplanmamış AISI 1010 çeliğinin 320 metre mesafede 5N yük, 0,1m/s hızda alümina bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri. 139
- Şekil 7.102. Kaplanmamış AISI 1010 çeliğinin 320 metre mesafede 10N yük, 0,1m/s hızda alümina bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri. 139
- Şekil 7.103. Kaplanmamış AISI 4140 çeliğinin 320 metre mesafede 2,5N yük, 0,1m/s hızda alümina bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri..... 139
- Şekil 7.104. Kaplanmamış AISI 4140 çeliğinin 320 metre mesafede 5N yük, 0,1m/s hızda alümina bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri. 140
- Şekil 7.105. Kaplanmamış AISI 4140 çeliğinin 320 metre mesafede 10N yük, 0,1m/s hızda alümina bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri. 140
- Şekil 7.106. Kaplanmamış AISI D2 çeliğinin 320 metre mesafede 2,5N yük, 0,1m/s hızda alümina bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri. 140
- Şekil 7.107. Kaplanmamış AISI D2 çeliğinin 320 metre mesafede 5N yük, 0,1m/s hızda alümina bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri. 141
- Şekil 7.108. Kaplanmamış AISI D2 çeliğinin 320 metre mesafede 10N yük, 0,1m/s hızda alümina bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri. 141

- Şekil 7.109. Kaplanmamış AISI M2 çeliğinin 320 metre mesafede 2,5N yük, 0,1m/s hızda alümina bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri. 141
- Şekil 7.110. Kaplanmamış AISI M2 çeliğinin 320 metre mesafede 5N yük, 0,1m/s hızda alümina bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri. 142
- Şekil 7.111. Kaplanmamış AISI M2 çeliğinin 320 metre mesafede 10N yük, 0,1m/s hızda alümina bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri. 142
- Şekil 7.112. Niobiyum nitrür kaplanmış AISI 1010 çeliğinin 320 metre mesafede 2,5N yük, 0,1m/s hızda AISI M50 çelik bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri 142
- Şekil 7.113. Niobiyum nitrür kaplanmış AISI 1010 çeliğinin 320 metre mesafede 5N yük, 0,1m/s hızda AISI M50 çelik bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri 143
- Şekil 7.114. Niobiyum nitrür kaplanmış AISI 1010 çeliğinin 320 metre mesafede 10N yük, 0,1m/s hızda AISI M50 çelik bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri 143
- Şekil 7.115. Niobiyum nitrür kaplanmış AISI 4140 çeliğinin 320 metre mesafede 2,5N yük, 0,1m/s hızda AISI M50 çelik bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri 143
- Şekil 7.116. Niobiyum nitrür kaplanmış AISI 4140 çeliğinin 320 metre mesafede 5N yük, 0,1m/s hızda AISI M50 çelik bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri 144
- Şekil 7.117. Niobiyum nitrür kaplanmış AISI 4140 çeliğinin 320 metre mesafede 10N yük, 0,1m/s hızda AISI M50 çelik bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma

deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri	144
Şekil 7.118. Niobyum nitrür kaplanmış AISI D2 çeliğinin 320 metre mesafede 2,5N yük, 0,1m/s hızda AISI M50 çelik bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri	144
Şekil 7.119. Niobyum nitrür kaplanmış AISI D2 çeliğinin 320 metre mesafede 5N yük, 0,1m/s hızda AISI M50 çelik bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri	145
Şekil 7.120. Niobyum nitrür kaplanmış AISI D2 çeliğinin 320 metre mesafede 10N yük, 0,1m/s hızda AISI M50 çelik bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri	145
Şekil 7.121. Niobyum nitrür kaplanmış AISI M2 çeliğinin 320 metre mesafede 2,5N yük, 0,1m/s hızda AISI M50 çelik bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri	145
Şekil 7.122. Niobyum nitrür kaplanmış AISI M2 çeliğinin 320 metre mesafede 5N yük, 0,1m/s hızda AISI M50 çelik bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri	146
Şekil 7.123. Niobyum nitrür kaplanmış AISI M2 çeliğinin 320 metre mesafede 10N yük, 0,1m/s hızda AISI M50 çelik bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri	146
Şekil 7.124. Kaplanmamış AISI 1010 çeliğinin 320 metre mesafede 2,5N yük, 0,1m/s hızda AISI M50 çelik bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri	146

- Şekil 7.125. Kaplanmamış AISI 1010 çeliğinin 320 metre mesafede 5N yük, 0,1m/s hızda AISI M50 çelik bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri..... 147
- Şekil 7.126. Kaplanmamış AISI 1010 çeliğinin 320 metre mesafede 10N yük, 0,1m/s hızda AISI M50 çelik bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri..... 147
- Şekil 7.127. Kaplanmamış AISI 4140 çeliğinin 320 metre mesafede 2,5N yük, 0,1m/s hızda AISI M50 çelik bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri 147
- Şekil 7.128. Kaplanmamış AISI 4140 çeliğinin 320 metre mesafede 5N yük, 0,1m/s hızda AISI M50 çelik bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri..... 148
- Şekil 7.129. Kaplanmamış AISI 4140 çeliğinin 320 metre mesafede 10N yük, 0,1m/s hızda AISI M50 çelik bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri..... 148
- Şekil 7.130. Kaplanmamış AISI D2 çeliğinin 320 metre mesafede 2,5N yük, 0,1m/s hızda AISI M50 çelik bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri..... 148
- Şekil 7.131. Kaplanmamış AISI D2 çeliğinin 320 metre mesafede 5N yük, 0,1m/s hızda AISI M50 çelik bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri..... 149
- Şekil 7.132. Kaplanmamış AISI D2 çeliğinin 320 metre mesafede 10N yük, 0,1m/s hızda AISI M50 çelik bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi

sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri.....	149
Şekil 7.133. Kaplanmamış AISI M2 çeliğinin 320 metre mesafede 2,5N yük, 0,1m/s hızda AISI M50 çelik bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri.....	149
Şekil 7.134. Kaplanmamış AISI M2 çeliğinin 320 metre mesafede 5N yük, 0,1m/s hızda AISI M50 çelik bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri.....	150
Şekil 7.135. Kaplanmamış AISI M2 çeliğinin 320 metre mesafede 10N yük, 0,1m/s hızda AISI M50 çelik bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri.....	150

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 2.1.	Bazı sade karbonlu çeliklerinin mekanik özellikleri.....	9
Tablo 2.2.	Az karbonlu çeliklerin kimyasal bileşim değişimi	10
Tablo 2.3.	Orta karbonlu çeliklerin kimyasal değişimi	10
Tablo 2.4.	Yüksek karbonlu çeliklerin kimyasal bileşim değişimi	11
Tablo 3.1.	Niobyum elementinin fiziksel özellikleri	21
Tablo 3.2.	Niobyum elementinin kimyasal özellikleri.....	22
Tablo 3.3.	Nb elementinin iyonlaşma enerjileri.....	22
Tablo 3.4.	Nb elementinin izotopları	22
Tablo 3.5.	Nb un ve alaşımlarının değişen sıcaklıklarda mukavemetleri	25
Tablo 3.6.	Dünya niobyum rezervleri	26
Tablo 3.7.	Ferro-niobyum alaşımının özellikleri	27
Tablo 3.8.	Nniobyum üretiminin ülkelere göre dağılımı (ton metal).....	28
Tablo 4.1.	Nitrürleme işleminin uygulanabildiği bazı çelikler	34
Tablo 4.2.	Karbon sertleştirme ile nitrasyon işleminin karşılaştırılması	37
Tablo 5.1	TRD prosesine tabi tutulan takımların uygulamaları.....	53
Tablo 6.1.	D2 çeliğine ait ısıl ve mekanik özellikler	56
Tablo 6.2.	M2 çeliğine ait ısıl ve mekanik özellikler.....	56
Tablo 6.3.	Deneylerde kullanılan çeliklerin spektral analizleri	57
Tablo 7.1	Zaman ve sıcaklığa bağlı olarak AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çeliklerinin yüzeyinde oluşan niobyum esaslı tabakaların kalınlıkları	76

Tablo 7.2.	Niobyum nitrür kaplanan çeliklerde kaplama süresi ve sıcaklığına bağlı olarak elde edilen sertlik değerleri	97
Tablo 7.3.	1000°C’de 2 saat süre ile niobyum nitrür kaplanmış ve kaplama işlemi uygulanmamış çeliklerin 0.1 m/s hızda, 320m mesafede Alümina bilyeye karşı oluşan sürtünme katsayısı değerleri.....	106
Tablo 7.4.	1000°C’de 2 saat süre ile niobyum nitrür kaplanmış ve kaplama işlemi uygulanmamış çeliklerin 0.1 m/s hızda, 320m mesafede AISI M50 çelik bilyeye karşı oluşan sürtünme katsayısı değerleri.....	107
Tablo 7.5.	0,1 m/s hızda, 320 m mesafede Alümina bilye ile aşındırılan niobyum nitrür kaplamanın aşınma hızlarının uygulanan yüke bağlı olarak değişimi.....	110
Tablo 7.6.	0,1 m/s hızda, 320 m mesafede kaplanmamış çeliklerin Alümina bilye ile aşındırılmasıyla oluşan aşınma hızlarının uygulanan yüke bağlı olarak değişimi.....	111
Tablo 7.7.	1000°C’de 2 saat Niobyum nitrür kaplanmış çelik ile kaplanmamış çeliğin alümina bilye karşısındaki aşınma hızı % değişimi	112
Tablo 7.8.	0,1 m/s hızda, 320 m mesafede Niobyum nitrür kaplanmış çeliklere karşı aşındırılan Alümina bilyedeki aşınma hızlarının uygulanan yüke bağlı olarak değişimi.....	113
Tablo 7.9.	0,1 m/s hızda, 320 m mesafede Niobyum nitrür kaplanmış çeliklere karşı aşındırılan AISI M50 çelik bilyedeki aşınma hızlarının uygulanan yüke bağlı olarak değişimi.....	113
Tablo 7.10.	0,1 m/s hızda, 320 m mesafede kaplanmamış çeliklere karşı aşındırılan Alümina bilyedeki aşınma hızlarının uygulanan yüke bağlı olarak değişimi.....	114
Tablo 7.11.	0,1 m/s hızda, 320 m mesafede kaplanmamış çeliklere karşı aşındırılan AISI M50 çelik bilyedeki aşınma hızlarının uygulanan yüke bağlı olarak değişimi.....	115

ÖZET

Anahtar Kelimeler: Termo kimyasal kaplama, NbN, NbCN, aşınma, mekanik özellikler, yapısal özellikler

Bu çalışmada, AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çeliklerinin yüzeylerine Niobyum Nitrür kaplama işlemi uygulanmıştır. Çelikler; öncelikle niobyum nitrür kaplamalar için, gaz nitrasyonu işlemiyle azotça zengin yüzey tabakası oluşturma işlemine (530-570° C de 1 saat) tabi tutulmuştur. Bu işlemleri takiben, termo-reaktif difüzyon kaplama tekniği ile ferro-niobyum, amonyum klorür, alümina ve naftalinden oluşan bir katı ortamda, yüksek sıcaklıklarda (900-1100°C) niobyumlama işlemine tabi tutularak çelik malzemenin yüzeyinde NbN, ve NbCN esaslı kaplama tabakalarının oluşturulması esas alınmıştır. Niobyumlama 900°C, 1000°C ve 1100°C sıcaklıklarda 1, 2, 3 ve 4 saat sürelerde gerçekleştirilmiştir.

Kaplanan numunelerin yapısal karakterizasyonları ve faz analizleri optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu (SEM), SEM-EDS ve X- ışınları paternleri kullanılarak tespit edilmiştir. Mekanik özellikleri belirlemek amacıyla sertlik ölçümleri ve aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Aşınma testleri esnasında alümina ve AISI M2 bilyeler kullanılmışlardır. Aşınma deneyleri 2,5N, 5N ve 10N yüklerde 320 metre mesafede 0.1 m/s, hızda gerçekleştirilmiştir. Böylece bir kaplama şartında malzemenin aşınma davranışı incelenmiştir. Ayrıca diskler ve bilyelerde meydana gelen aşınma izleri optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmişlerdir. Sertlik ölçümleri Vickers indentasyon tekniği ile 10g yük altında gerçekleştirilmiştir.

INVESTIGATION ON SURFACE PROPERTIES OF NbN/NbCN COATED STEELS

SUMMARY

Keywords: Thermo-chemically-coating, NbN, NbCN, Wear, Mechanical properties, Structural properties

In this study, nitro-niobizing treatment was realized on the surfaces of the AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 and AISI M2 steels. Steel samples are gas nitrided before the coating treatment for production of nitride base coatings (in the temperature of 530-570°C for an hour). After that, niobium is to diffused on the surface of pre-nitrided steel samples by thermo reactive diffusion method in the powder mixture consisting of ferro-niobium, ammonium chloride, naphthalene and alumina in the temperature of 900-1100°C for niobium nitride, and niobium carbo-nitride coatings. Niobium is to diffused at the temperature of 900°C, 1000°C and 1100°C for 1, 2, 3, 4 hours periods.

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 and microhardness measurements were realized for mechanical behaviours. Wear tests were realized against alumina and AISI M2 steel balls of the sliding speeds of 0.1 m/s and under the loads of 2.5N, 5N and 10N so, the wear behaviours of coatings for a coating parameter were investigated. Worn tracks and scans of disk and ball materials were analyzed using optical microscopy and scanning electron microscopy (SEM). Microhardness measurements were realized using Vickers indenter tester at 10g load.

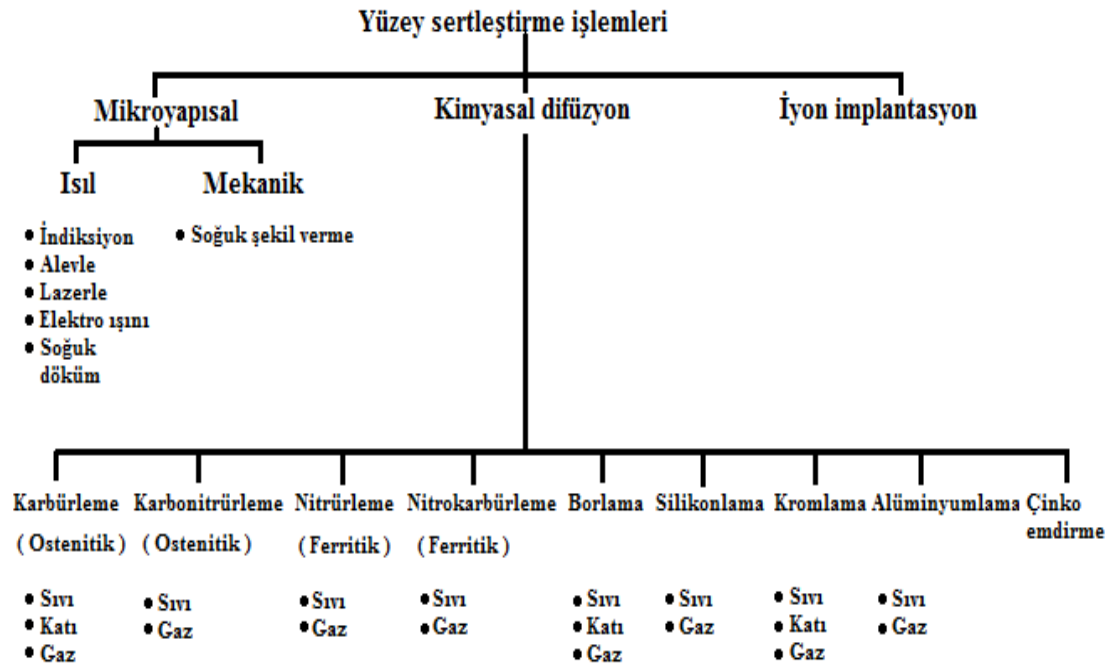
BÖLÜM 1. GİRİŞ

Gelişen teknolojiyle birlikte yüzey mühendisliği çok önemli bir yer tutmakta ve giderek bu önem daha da artmaktadır. Malzemelerin yüzey özellikleri değiştirilerek yeni özellikler kazandırılması, performanslarının artırılması çalışmaları her geçen gün yeni yöntemler ve tekniklerle birlikte gelişimini katlayarak artırmaktadır. Bu sebeple karbür, borür ve nitrür esaslı non-oksit seramik kaplamalar günümüzde tribolojik uygulamalarda gösterdikleri aşınma dirençlerinin yanında, korozyon ve oksidasyon dirençleri ve de spesifik ve son derece önemli olan süper iletken teknolojisi uygulamalarında önemli kaplama elemanları olarak karşımıza çıkmaktadır. Son yıllarda özellikle NbN, NbC ve NbCN kaplamalar uygulamada çok önemli yer tutmaktadır.

Kullanım amaçlarına bağlı olarak; yüzeyi sert ve aşınmaya dayanıklı, buna karşılık içyapılarının sünek olması arzu edilen çelik malzemelerde yüzey sertleştirme yöntemi uygulanır. Bunun için, malzeme yüzeyinde istenilen derinliğe kadar sertleşme sağlayan, sünek içyapıyı etkilemeyen değişik yüzey sertleştirme yöntemleri geliştirilmiştir. Yüzey sertleştirme yöntemleri incelendiğinde; sertleştirilen malzeme özellikleri, arzu edilen sertlik değeri ve derinliği, uygulanabilirlik, malzemenin kullanım şartları ve gelişen teknolojiye bağlı olarak çok değişik yüzey sertleştirme yöntemlerinin kullanıldığı görülmektedir. Örneğin; normal şartlarda yeterli düzeyde sertlik elde edilemeyen çeliklerin yüzeyine karbon verilerek sertleştirmenin yapıldığı sementasyon yöntemi, iyi sertleşme kabiliyeti olan çeliklerin arzu edilen sertleşme derinliğine kadar olan kısmının ostentleştirme sıcaklığına kadar ısıtılıp aniden soğutulduğu alevle ya da indüksiyonla yüzey sertleştirme, yüzeye sertlik artırıcı element atomlarının nüfuz ettirildiği nitrasyon yöntemi bunlardan bazılarıdır. Bunların dışında; yüzeyin sert bir malzeme ile kaplanması, yüzeye çelik püskürtülerek veya haddelenerek yüzey sertliğinin artırılması da uygulanan yöntemler arasındadır [1].

Yüzey sertliği, aşınma direnci ve yorulma dayanımını artırmak amacıyla kullanılan yüzey işlemleri, mikro yapısal, kimyasal difüzyon ve iyon implantasyon olmak üzere üç grupta incelenebilir. İlk iki işlem çoğunlukla demir esaslı malzemelere uygulanır. Birinci kategoride, malzeme yüzeyinin mikroyapısı değişirken, malzemenin iç kısımlarında herhangi bir değişim olmamaktadır. İkinci kategoride, hem yüzeyin mikroyapısı hem de kompozisyonu değişmektedir. Üçüncü grup, ana malzeme ile alaşım oluşturan iyonik parçaların implantasyonu ile malzemenin üst yüzeyini (0,1 mm üzerinde) değiştiren implantasyon işlemini içerir. Mikroyapısal işlemler, kimyasal yayılım işlemleri gibi ucuz ve özel malzeme gerektirmez. Fakat kimyasal difüzyon işlemi ile sertleştirme derinliği daha iyi kontrol edilerek yüksek sertlik ve malzemede daha az çarpılma elde edilir [2].

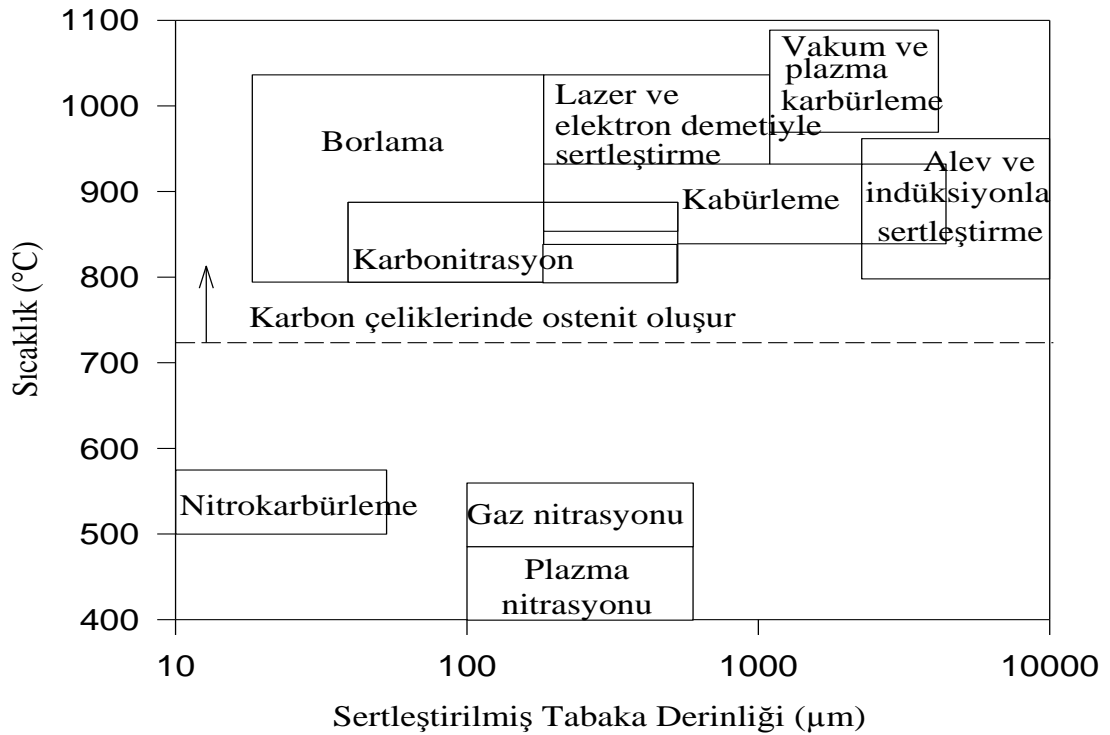
Şekil 1.1'de demir esaslı malzemelerin yüzey sertliğini artırmak için kullanılan yaygın yüzey işlemleri sınıflandırılmıştır [3].



Şekil 1.1. Isıl ve kimyasal yüzey işlemlerinin sınıflandırılması [3]

Yüzey mühendisliği ve yüzey işlem teknolojileri son yıllarda önem kazanmış ve endüstriyel alanlarda geniş uygulama alanı bulmuştur. Birçok endüstriyel uygulamada servisteki bileşenlerin ömürleri yüzey özellikleri ile belirlenmektedir. Bu amaçla fiziksel buhar biriktirme (PVD), kimyasal buhar biriktirme (CVD), sprey ve difüzyon esaslı kaplama teknikleri, aşınma, korozyon ve oksidasyona karşı dirençli karbür, nitür ve borür kaplamaların gerçekleştirilmesinde uygulanmaktadır[4].

Çeliklerin yüzey modifikasyonu için kullanılan değişik metotların sertlik derinliği ve sıcaklığa bağlı olarak kıyaslanması Şekil 1.2. 'de verilmektedir.



Şekil 1.2. Yüzey sertleştirme için kullanılan değişik metotların sertlik derinliği ve sıcaklığa bağlı olarak kıyaslanması [4]

Malzeme yüzeylerinde gerçekleşen kayıpları azaltmak, kullanım ömürlerini uzatmak için malzemelerin yüzey bölgesi özelliklerinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Yüzey kalitesinin geliştirilmesi için uygulanan yöntemlerden biri de nitrüleme yöntemidir.

Yapılan bu çalışmada farklı ve alaşım elementleri oranlarına sahip olan AISI 1010, AISI 4140, AISI M2 ve AISI D2 çelikleri kullanılmıştır. Kaplama işlemi gerçekleştirilirken bütün çelikler öncelikle 530–570°C arasındaki sıcaklıkta 1 saat süre ile gaz nitrasyon işlemine tabi tutulmuştur. Yüzeyi nitrülenmiş olan numuneler termoreaktif difüzyon yöntemi (TRD) kullanarak 900°-1000° ve 1100°C sıcaklıklarda 1, 2, 3 ve 4 saatlik sürelerle ferroniobyum, alümina, amonyum klorür ve naftalin karışımından oluşan katı ortamda niobyum nitrür kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada, niobyum nitrür kaplanan numunelerin karakterizasyonları, taramalı elektron mikroskobu (SEM), optik mikroskop, X-ışınları analizleri kullanılarak yapılmıştır ve ball-on disk aşınma cihazıyla aşınma özellikleri araştırılmıştır. Aşınma testleri esnasında AISI M2 ve alümina bilyeler kullanılmışlardır. Aşınma deneyleri 2,5N, 5N ve 10N yüklerde 320 metre mesafede 0.1 m/s, hızında gerçekleştirilmiştir. Yüzeyde oluşan aşınma izleri optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve EDS analizi ile incelenmiştir. Ayrıca kaplamaların mikro sertlik değerleri Vickers İndentasyon tekniği ile belirlenmiştir.

BÖLÜM 2. ÇELİKLER HAKKINDA GENEL BİLGİ

2.1. Giriş

Çelik malzemeler, demir cevheri, koklaşabilir kömürden üretilen kok ve cüruflaştırıcı gibi doğal hammaddelerden başlayarak yüksek fırın, (ham demir üretimi) Çelikhane-Siemens Martin, oksijen konverterleri gibi (ham çelik üretimi) haddehaneler (son çelik ürünlerin üretimi) gibi tesisleri içeren entegre üretim merkezlerinde veya çelik hurdasından başlayarak (hurda yerine sünger demirde kullanılabilerek) elektrik ark fırınlarını içeren yarı entegre tesislerde üretilen ve genelde içerisinde % 2'ye kadar karbon içeren Demir-Karbon alaşımlarıdır.

Çelikler kimyasal bileşimlerinin yanı sıra biçimlendirme yöntemleri (Haddeleme, dövme, derin çekme, ekstrüzyon, kaynakla birleştirme, döküm, talaş kaldırarak işleme vs.)yöntemlere göre oluşan mamuller (Külçe, blum kütük, çeşitli kesit ve boyutlarda çubuklar, profiller, teller, slab, levha sıcak haddelenmiş sac, soğuk haddelenmiş sac, kaplamalı sac, teneke, boru vs.) ve bu mamullere çeşitli ısı işlemlerinin uygulanması sonucu kazandıkları çok değişik yapılar, konstrüksiyon, makine yapımı, madeni eşya, ulaşım araçlar üretimi, madencilik ve kimya sektörlerin üretim, depolama, taşıma işlemleri ve bunlar yanında da pek çok çeşitli kullanım sahaları kazanırlar.

Gerek bileşim değişimi (Karbon ve diğer alaşım elementler ve empürite elementlerini mevcudiyeti ve miktarı) gerekse yarı veya ürün haline gelinceye kadar geçirdiği aşamalar çeliklerin kullanım yerlerini belirleyen temel özellikler olduğu için çeliklerin sınıflandırma ve standardizasyonu çok geniş bir biçimde ele alınıp incelenmesi gerekmektedir [5].

2.2. Çeliklerin Sınıflandırılması

Çeliklerin incelenmesini kolaylaştırmak ve daha yakından tanımak için bazı ortak özellikler göz önüne alınarak çeşitli sınıflandırmalar yapılmaktadır [6].

2.2.1. Üretim yöntemlerine göre

Çelik üretiminde kullanılan başlıca önemli yöntemlerle, bu yöntemler sonucunda üretilen çelikler:

- a) Bessemer ve Thomas çelikleri
- b) Simens – Martin çelikleri
- c) Elektrik ark ve elektrik endüksiyon çelikleri
- d) Pota çelikleri
- e) Oksijenli konverter çelikleri
- f) Vakum çelikleri

2.2.2. Kullanım alanlarına göre çelikler

Tüm metalurji sanayinde bugün için üretilen çelikler mutlaka belli bir amaçta kullanılmak için üretilmezler ancak yine de belli işlerde kullanılırlar. Burada yalnızca sayılmaya değer nitelikte kullanılmak olanlarından söz edilecektir [6].

- a) Yapı çelikleri
- b) Takım yapım işleri
- c) Soğuk ve sıcak işlerde: Soğuk iş
- d) Hızlı kesme işlerinde kullanılacak çelikler
- e) Yay yapımında kullanılacak çelikler
- f) Yüksek sıcaklıkların bulunduğu ortamlarda kullanılacak çelikler

g) Dış etkilere maruz yerlerde ve deniz ortamında kullanılacak çelikler

2.2.3. Alaşım durumlarına göre çelikler

Çeliklerde alaşımsız demek onun sadece demir elementinden ibaret olduğu anlamına gelmez. Tüm çeliklerde demirle birlikte karbon elementi bulunur. Bunun dışında bir element yapıya girecek olursa alaşımlı çeliklerden söz edilir [6].

Alaşım durumuna göre çelikler üç'e ayrılır

- a) Sade karbonlu çelikler
- b) Düşük ve orta alaşımlı çelikler
- c) Yüksek alaşımlı çelikler

2.2.4. Ana katkı maddesine göre çelikler

Burada çeliğe ana kütle içerisinde miktarı en çok element adını verir.

- a) Karbonlu çelikler
- b) Manganlı çelikler
- c) Kromlu çelikler
- d) Nikel çelikler
- e) Krom Nikel çelikler
- f) Volframlı çelikler
- g) Vanadyumlu çelikler

2.2.5. Mikro yapılarına göre çelikler

Burada ana kütleyi oluşturan yapı çeliğe adını vermektedir.

- a) Ferritik çelikler
- b) Ferritik ve Perlitik çelikler
- c) Perlittik çelikler
- d) Östenit çelikler
- e) Martenzitik çelikler
- f) Ledeburitik çelikler
- g) Beynitik çelikler

2.2.6. Kalite durumlarına göre çelikler

- a) Kütle çelikler
- b) Kalite çelikler
- c) Soy(asal) çelikler olmak üzere üç çeşittir [6]

2.2.7. Fiziksel ve kimyasal özelliklerine göre çelikler

- a) Isıya dayanıklı çelikler
- b) Manyetik çelikler
- c) Korozyona dayanıklı çelikler
- d) Paslanmaz çelikler

2.2.8. Sertleştirme ortamlarına göre çelikler

- a) Su çeliği
- b) Yağ çeliği
- c) Hava çeliği

Günümüzde çeliklerin sınıflandırılmasında genellikle izlenen yol genel bileşim esaslara göre olmakta standardizasyon özellikler ile kullanım yerlerine göre olmaktadır.

2.3. Sade Karbonlu Çelikler

Demirden başka ana alaşım elementi olarak sadece karbon içeren fakat (% 0,5 Si, % 0,8 Mn, % 0,1 Al, % 0,1 Ti, % 0,25 Cu) sınırları içerisinde alaşım elementlerin de bulundurabilen çeliklerdir (Tablo 2.1) [5].

Tablo 2.1. Bazı sade karbonlu çeliklerinin mekanik özellikleri

AISI numarası	Çekme Mukavemeti (MPa)	Akma Mukavemeti (MPa)	Süneklik (% Uzama)
1010	325	180	28
1020	380	205	25
1040	605-780	430-585	33-19
1095	760-1280	510-830	26-10

2.3.1. Az karbonlu çelikler

Bu gruba %0-0,20 arasında karbon ihtiva eden çelikler dahil edilebilirler. Mekanik özellikleri göz önünde bulundurularak “yumuşak çelikler” olarak da tanınırlar

(Tablo 2.2). Az karbonlu çelikler dünya çelik üretiminin en büyük miktarını kapsarlar. Az karbonlu çelikler ısıtılma işlemi ile yeterince sertleştirilemezler.

Tablo 2.2. Az karbonlu çeliklerin kimyasal bileşim değişimi

Element	% Kimyasal Bileşim
Karbon	0 – 0,20
Manganez	0,30 – 0,60
Silisyum	0,10 – 0,20
Fosfor	0,04 max
Kükürt	0,05 max

2.3.2. Orta karbonlu çelikler

Bu gruptaki çelikler % 0,20 – 0,50 arasında karbon ihtiva eden çeliklerdir (Tablo 2.3). Karbon miktarına bağlı olarak orta derecede mekanik özelliklere sahiptirler. Hareketli makine sanayinin en çok kullandığı sınıftır. Bu gruptaki çeliklerin en büyük özellikleri ısıtılma işlemi ile yeteri derecede sertleştirilmeleridir [5].

Tablo 2.3. Orta karbonlu çeliklerin kimyasal değişimi

Element	% Kimyasal Bileşim
Karbon	0,20 – 0,50
Manganez	0,60 – 0,90
Silisyum	0,15 – 0,30
Fosfor	0,40 max
Kükürt	0,05 max

Mil çelikleri: %0,35 ile %0,45 oranları arasında karbon içeren çeliklerdir. Mil, tel ve dingil yapımında kullanılmaktadırlar [3].

Genel dövme çelikleri: %0,25 ile %0,35 arasında karbon içeren çeliklerdir [7].

Aşınmaya dayanıklı çelikler: %0,45 ile %0,55 arasında karbon içeren çeliklerdir. Ray tekerleği, silindir ve pres kalıpların yapımında kullanılmaktadırlar [7].

2.3.3. Yüksek karbonlu çelikler

% 0,50'den daha fazla karbon ihtiva eden çeliklerdir (Tablo 2.4). Normal halde yüksek mukavemetli ve sünekliği az olan çeliklerdir. Isıl işlemlerle sertleştirilmeleri sayesinde fevkaledede yüksek sertlik kazanırlar. Bu bakımdan aşınmaya dayanıklı ve kesici özelliği kazanırlar [5].

Tablo 2.4. Yüksek karbonlu çeliklerin kimyasal bileşim değişimi

Element	% Kimyasal Bileşim
Karbon	0,50 den fazla
Manganez	0,70 – 1,00
Silisyum	0,15 – 0,30
Fosfor	0,04 max
Kükürt	0,05 max

Sade karbonlu çelikler (alaşımsız çelikler) çeliğin yapısında bulunan ana elementler dışında başka element içermeyen çelikler olup, yapı ve takım çelikleri olmak üzere 2 grupta incelenir [8].

2.4. Alaşımli Çelikler

İçerisinde karbonla beraber ve sade karbonlu çeliklerde belirli limitlere kadar olabilen alaşım elementlerinin bu sınırlar ötesinde ayrıca diğer alaşım elementlerini (Cr, Ni, W, Mo, v.b)de bulundurabilen çeliklere genelde alaşımli çelikler adı verilir[5]. Bu grupta yer alan çelikleri önce iki kategoriye ayırabiliriz.

2.4.1. Az alaşımlı elikler

Alaşım elementi ve elementlerinin toplamı % 5'den az olan çeliklerdir.

2.4.2. Yüksek alaşımlı elikler

Alaşım elementi veya elementlerinin toplamı % 5'den yüksek olan elikler.

2.5. Yapı elikleri

2.5.1. Normal yapı elikleri

(TS2162); Karbon oranı 0,1 ile 0,8 arasında değişen St (Stahl) harfleriyle gösterilen ve çekme dayanımı değeriyle ifade edilen çeliklerdir. rneğin= St 42 ($\sigma=42 \text{ Kg/m}^2$), St 30 [8].

2.5.2. Islah elikleri

Karbon oranı %0,2 ile %0,8 arasında değişen, kükürt ve fosfor oranı azaltılmış olan çeliklerdir. C30 (C-Karbonu, 30 Karbon oranını %0.30), C40, Ck45 [8].

Islah elikleri, 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. ıslah işlemi sonucunda elik parçaya yüksek tokluk özelliğinin kazandırılacağı önce bir sertleştirme ve arkasından menevişleme işlemlerinin bütünü olarak tarif edilmektedir. Islah elikleri, ıslah işlemi sonunda kazandıkları üstün mekanik özelliklerinden dolayı, çeşitli makine ve motor parçaları, dövme parçalar, çeşitli civata, 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 elik türüdür. Sertleştirme işlemi, öncelikle elik 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 A1 sıcaklığı altında belirli bir süre ısıtılması işlemidir. Bu işlem A1 sıcaklığına yani 7230C' 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 alaşımlı çelikler, menevişleme esnasında belli sıcaklık bölgelerinde kırılabilirlik 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 [7].

2.5.3. Sementasyon çelikleri

Karbon oranı %0,02 ile %0,25 arasında olan ve ısıtma işlemi ile sertleştirilebilmeleri için; katı sıvı ve gaz ortamda yüzeylerine karbon difüze edilen çeliklerdir (C10, C15, C40) [8].

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, kılavuz 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[7].

2.6. Takım çelikleri

Karbon oranı 0,8 ile 1,5 arasında değişen takım tezgâhlarında kesici uç olarak kullanılan çeliklerdir [8].

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.

2.6.1. Soğuk iş takım çelikleri

Genel olarak yüzey sıcaklığı 200°C' yi geçmeyen takımların imalinde kullanılmakta olan çeliklerdir. Talaşlı ve talaşsız imalatta kullanılmaktadırlar [7].

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 fişkırtma 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 fışkırtma 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[9].

2.6.2. Sıcak iş takım çelikleri

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

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
- Zımbalar 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) dâhilinde üretilmekte olan H11, H13, H10, H21, 12 gibi çelikler sıcak iş takım çelikleri grubuna dâhil olan çeliklerdir [7].

2.6.3. 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 alaşımli takım çelikleridir. İsimlerinden de anlaşıldığı gibi, bu çelikler ile diğer takım çeliklerine oranla daha yüksek hızlarda talaşlı imalat yapılmaktadır. 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 [7]. Matkap gibi metal kesme takımları, haddeleme bıçakları ve soğuk şekil verme takımlarından oluşur.

Bu sınıflandırma, takım çelikleri için en uygun sınıflandırma yöntemidir. Karbon miktarlarına (%0.2-2.3 arasındaki değerler) veya alaşım durumlarına göre (orta ve yüksek alaşımli 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. 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 fişkirtme takımlarında

BÖLÜM 3. NİOBYUM (KOLOMBİYUM)

3.1. Giriş

Özellikle A.B.D. 'de columbium (Cb simgeli) adıyla bilinen niobyuma bu nihaî adı 1949'da Uluslararası Kimya Birliği (International Union of Chemistry) vermiştir. Ad, Lydia mitolojisi kahramanlarından Tantalos'un kızı Niob'dan alınmadır. Gerçekten Nb, tantala benzeyen bir metalik element olup niobit (veya columbit ya da tantalit) cevherinden çıkartılır. Onu tantaldan ayırıp ilk kez niobyum diye adlandıran Alman kimyacı Heinrich Rose (1795–1864) olmuştur. Niobit cevherinden niobyum ile tantali ayırmak fevkalâde güç ve pahalıdır. Bu nedenle saf Nb geçmiş yıllarda ekonomik açıdan ilginç olan az kullanma yeri bulmuştur. Gaz massetme (absorbe etme) kabiliyeti sayesinde bu metal, vakum tüpleri imalinde kullanılır. En büyük işlevi, çelik ve sair metallerde alaşım elementi olmasıdır: bazı Al alaşımlarına tane inceltici olarak eklenir[10].

Niobyum, Amerika kıtasında Kolombiyum adıyla da bilinmektedir. Doğada, kimyasal özelliklerinden dolayı niobyum, tantalyum ile birlikte bulunur. Ekonomik önem taşıyan niobyum ve tantalyum mineralleri niyobit-tantalit grubu ile piroklormikrolit grubudur. Niyobit-tantalit grubunda demir, mangan ve niobyum ile tantalyum oksit izomorf halindedir. Grubun genel formülü [(Fe,Mn) (Nb, Ta₂O₆)] halindedir. Eğer mineralde Nb₂O₅ içeriği, Ta₂O₅ içeriğinden fazla ise bu mineral niyobit (kolumbit), tersi durumda ise tantalit diye adlandırılır. Aynı özellik, genel formülü [Ca₂ (Nb,Ta)₂O₆ (OH,F)] olan mikrolit-piroklar grubu için de geçerlidir. Eğer mineralde Ta₂O₅ içeriği fazla ise mikrolit, Nb₂O₅ içeriği fazla ise piroklar diye adlandırılır [11].

3.2. Niobyumun Özellikleri



Şekil 3.1. Niobyum cevherinin görünüşü

Niobyum sert ve cilalı bir metal olup, kırılğan ve dövülebilirdir. Rengi gri veya gümüşü beyazlıktadır. Kolayca erir ve kararmaz. Atom ağırlığı; 92,906, atom numarası 41'dir. On iki tane radyoaktif izotopu vardır. Radyoaktif olmayan niobyumun atom ağırlığı 93'tür. On iki izotopun atom ağırlıkları 89 ila 101 arasında değişmektedir. Yoğunluğu 8,4 g/cm³tür. Erime noktası 1950°C, kaynama noktası 2900° C' dir. Yüksek sıcaklıkta, oksijenle, karbonla, halojenlerle, azotla, kükürtle ve diğer ametallerle reaksiyon verir. Nitrik ve hidroflorik asit karışımında çözünür.

Tane inceltici etkiye sahip olan element, aynı zamanda, akma sınırını da yükseltir. Kuvvetli karbür yapıcı özelliği ile sertliği de artırır. Paslanmaz çeliklerde titanyumun yaptığı etkiye yapar ve titanyumla birlikte veya tek başına kullanılır [12].

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 birçok korozif 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 korozif ortamlarda

korozyona dayanım esnasında yüzeyinde pasif oksit filmi oluşturmaktadır. Niobyumun korozyona dayanım özellikleri tantala 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), H₂SO₄ (sülfirik asit) ve H₃PO₄ (fosforik asit) ortamlarına karşı dayanıklıdır.

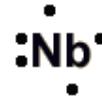
Atomik Yapı:

- **Atomik yarıçap:** 2.08Å
- **Atomik Hacim:** 10.87cm³/mol
- **Kovalent Yarıçap:** 1.34Å
- **Kesit Alanı:** 1.15barns ±0.05
- **Kristal yapısı:** Kübik Merkezli

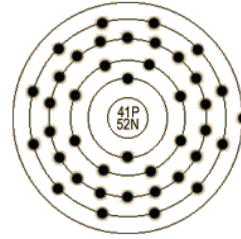


- **Elektron konfigürasyonu:**
1s² 2s² p⁶ 3s² p⁶ d¹⁰ 4s² p⁶ d⁴ 5s¹
Her Enerji Seviyesindeki Elektronlar: 2,8,18,12,1

Nokta Modeli:



Kabuk Modeli:



- **İyonik Yarıçap:** 0.69Å
- **Doldurulan Orbital:** 4d⁴
- **Elektron Sayıları:** 41
- **Nötron Sayıları :** 52
- **Proton Sayıları:** 41
- **Valans Elektronları:** 4d⁴ 5s

Şekil 3.2. Nb un genel özellikleri

3.2.1. Fiziksel özellikleri

Katıksız haldeyken yumuşak ve sünek bir metal olan niobyumun görünümü çeliğe benzer parlatıldığında da platini andırır. Yenime karşı çok dayanıklı olmakla birlikte 400° nin üstündeki sıcaklıklarda yükseltgenir. Demirle tümüyle karışabildiğinden kaynak ve ısıtma sırasında kararlı olmalarını sağlamak için bazı paslanmaz çeliklere Ferro niobyum

şeklinde katılır. Niobyum nikel esaslı yüksek sıcaklık alaşımlarının başlıca alaşımlama elementidir. Yüksek dayanımlı yapı çeliklerine de az miktarda katkı madde olarak eklenir. Niobyum eriyik haldeki alkali metal soğutucuların yenim etkisine karşı dayanıklılığı ve ısıl nötron tepkime kesitinin düşüklüğü bakımından uranyuma benzer. Bu özellikleri nedeniyle nükleer reaktör çekirdeklerinde kullanılır. Sıcak baskı kalıplarının yapımında kullanılan katılanmış karbürle niobyum katıldığında daha da sertleşir, darbelere ve ısınmaya karşı daha dayanıklı hale gelir. Niobyum elementinin fiziksel özellikleri Tablo 3.1 de verilmektedir [13].

Tablo 3.1. Niobyum elementinin fiziksel özellikleri

Yoğunluğu	8.570 g/mL
Erime noktası	2477°C (2750 K)
Kaynama noktası	4744°C (5017K)
Molar hacmi	10.83 ml/mol
Mineral Sertliği	6.0
Isı iletkenliği	0.537 W cm-1 K-1
Özgül ısı	0.265 J g-1 K-1
Buharlaştırma Entalpisi	690 kJ mol-1
Atomlaştırma Entalpisi	733 kJ mol-1

3.2.2. Kimyasal özellikler

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 [14].

Tablo 3.2. Niobyum elementinin kimyasal özellikleri

Elektronik konfigürasyonu	[Kr].4d4.5s1
Kabuk yapısı	2.8.18.12.1
Elektron ilgisi	86.1 kJmol ⁻¹
Elektronegatiflik	(Pauling birimine göre)
Atomik Yarıçapı	145 pm (198 pm hesaplama ile)

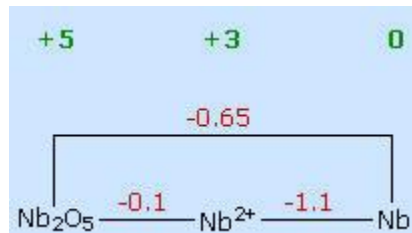
Tablo 3.3. Nb elementinin iyonlaşma enerjileri

I. İyonlaşma Enerjisi	652.1 kJ/mol
II. İyonlaşma Enerjisi	1380 kJ/mol
III. İyonlaşma Enerjisi	2416 kJ/mol
IV. İyonlaşma Enerjisi	3700 kJ/mol
V. İyonlaşma Enerjisi	4877 kJ/mol
VI. İyonlaşma Enerjisi	9847 kJ/mol
VII. İyonlaşma Enerjisi	12100 kJ/mol

Tablo 3.4. Nb elementinin izotopları

İzotop	Yarılanma süresi
⁸⁹ Nb	1.10 saat
⁹⁰ Nb	14.6 saat
⁹¹ Nb	700 yıl
⁹² Nb	3.7x10 ⁷ yıl
⁹³ Nb	Kararlı
⁹⁴ Nb	24000 yıl
⁹⁵ Nb	34.97 gün
⁹⁶ Nb	23.4 saat
⁹⁷ Nb	1.23 saat

Oksidasyon sayısı: 5, 3



Şekil 3.3. Nb un indirgenme potansiyeli

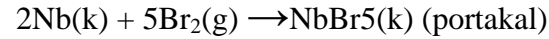
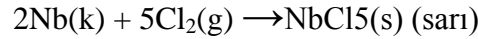
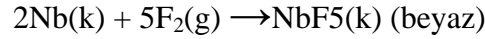
3.2.3. Reaksiyonları

3.2.3.1. Hava ile reaksiyonu

Niobyum metali normal koşullar altında havada kararlıdır. Niobyum metalinin yüzeyini kaplayan ince oksit tabakası hava ile etkileşmesini engeller.

3.2.3.2. Su ile reaksiyonu

Niobyum metali normal koşullar altında su ile reaksiyon vermez. Niobyum metali sıcaklığa bağlı olarak halojenlerle reaksiyona girerek niobyum halojenürleri oluşturur.



3.2.3.3. Asit ile reaksiyonu

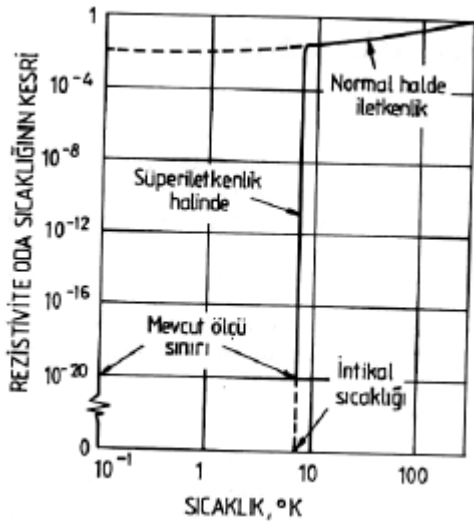
Niobyum oda sıcaklığında asitlerle reaksiyon vermez. Fakat hidroflorik asit (HF) veya HF ve nitrik asit (HNO₃) karışımında çözünür.

3.2.3.4. Baz ile reaksiyonu

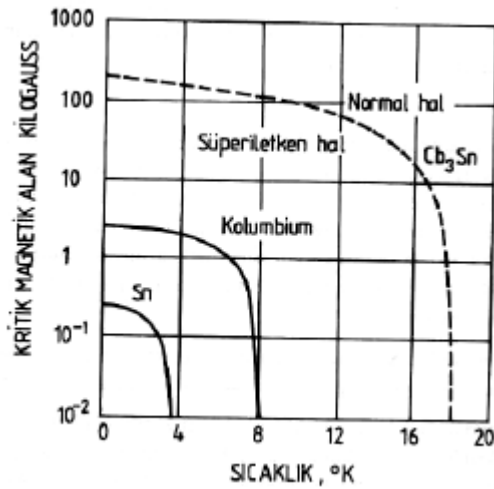
Niobyum metali erimiş alkalilere karşı reaktif değildir. Çok yavaş olarak çözünebilir [15].

3.3. Niobyumun Kaynak Edilebilirliği

Ostenitik paslanmaz çeliklerde duyarlı kılma (425 ile 870°C sıcaklık aralığında uzun süre ısıtılınca karbürlerin tane sınırlarına çökmesi olayı) ve bundan hasıl olan kaynağa yakın taneler arası korozyon, niobyum ilâvesiyle önlenir (karbür stabilizatörü rolü). Son zamanlarda niobyum süper iletkenlerde, kimyasal aparat imalinde ve küçük nötron absorpsiyon kesiti sayesinde reaktör endüstrisinde rol oynamaya başlamıştır. Şekil 3.3'de, Niobyumun süper iletkenlik haline intikalinin şematik gösterilisi vardır. Teorik işlemler, süper iletkenlik halinde rezistivitenin sıfır olduğunu gösteriyor. Şekil 3.4' de de Sn ve Nb süper iletken metallere kritik magnetik alanın sıcaklıklarla değişmesi görülür. Nb₃Sn metalar arası birleşim için de bir deneme eğrisi verilmiştir. Gerçekten bu Nb₃Sn birleşiminin süper iletkenliğin elektromagnetlere uygulanmasını sınırlayan ciddi engelleri aşacağı umulmaktadır. Öbür yandan % 5 V veya % 1 Zr ile Nb alaşımları, alkali metallerin korozif etkisine karşı kendilerini kanıtlamışlardır. ABD'de, 1200°C'a kadar yüksek sürünme mukavemetini haiz Nb alaşımları satışa arz edilmiş durumdadır. Ancak tane sınırı ayrılımları nedeniyle bunlar soğukta şekillendirilemezler.



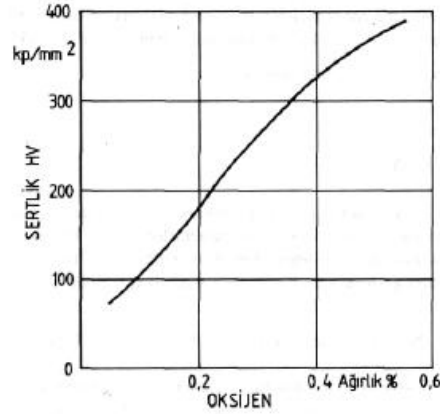
Şekil 3.4. Nb un süper iletkenlik intikali



Şekil 3.5. Nb ve Sn nin süper iletkenlik halinde rezistivitenin gösterimi

Her ne kadar gaza karşı duyarlılık yüksek ise de niobyumun, büyütülmüş gaz memesi, koruma gazı filtre tertibatı ve muhtemelen de ilâve kök korumasıyla otomatik olarak kaynak etme denemeleri, çok özenli argon idaresiyle memnunluk verici bir sonuçla gerçekleştiği görülmüştür.

Niobyum gerçekten, molibden veya tungstenden kolay kaynak edilir. TIG kaynağının sık kullanılmasına rağmen EB kaynağı daha iyi bir koruma, daha dar kaynaklar ve daha az ısı girdisi sağlar. Ön ısıtma gerekmez ama kaynak sonrası vakum gerilim giderme işlemi, özellikle niobyum alaşımlarında, süneklik ve sağlamlığı iade etmek için uygulanır [10]. Tablo 3.5.'de niobyum ve bazı alaşımlarının bileşim ve sıcakta mukavemetleri verilmiştir.



Şekil 3.6. Saf niobyumun sertliği üzerinde oksijen absorpsiyonunun etkisi [10]

Tablo 3.5. Nb un ve alaşımlarının değişen sıcaklıklarda mukavemetleri [10]

Grade	Bileşim %	Kopma muk. kg/mm ²		Akma sınırı $\sigma_{0.2}$, kg/mm ²	
		1100°C'ta	1200°C'ta	1100°C'ta	1200°C'ta
Nb	Ticari safiyette	6.5	—	3.0	—
NbMo-2A	4.1Mo-0.7Zr-0.08C	26	24	12	—
NbMo3	4.6Mo-1.4Zr-0.12C	45	25	16	—
NbMo4	9.5Mo-1.5Zr-0.3C-0.03Ce veya Ti	40	25	28	—

3.4. Dünyada Niobyum Rezervleri

Dünyada niobyum rezervlerinin büyük bir kısmını piroklar-mikrolit içeren maden yatakları oluşturur. Geri kalan bölüm ise pegmatit ve plaserde bulunmaktadır. Plaser tip yataklarda niobyum, niyobit (columbit) ve tantalit halinde bulunur. Zenginleştirilmesi kolay olduğu için plaser tip yataklardan niobyum konsantresi üretimi tercih edilmiştir. Dünyada belirlenen niobyum rezervlerinin ülkelere göre dağılımı Tablo 3.4. 'de verilmiştir.

Tablo 3.6. Dünya niobyum rezervleri

ÜLKELER	REZERV (ton)
Brezilya	3 310 000
Bağımsız Dev.Top.	680 000
Zaire	200 000
Kanada	140 000
Nijerya	64 000
Avustralya	5 000
Diğer Ülkeler	53 000
Toplam	4 452 000

3.5. Üretim Yöntemi ve Teknolojisi

Niobyum başlıca özel çeliklerin üretiminde ferro-niobyum (Tablo 3.7) halinde kullanılır. Niobyum mineralinden önce alkali çözelti ile sonra da hidroflorik asit yarımı ile ekstrakte edilir. Çözeltideki tantal sıvı-sıvı ekstraksiyonu yardımı ile ayrılır. Bu uygulamada tantal tuzu MIBK (metil isobütil ketone, 4-metil pentan-2-on)ile ekstrakte edilir. Niobyum çözeltide kalır. HF' li çözeltinin MIBK çözeltisi ile ekstraksiyonu ile organik çözelti niobyum içerir. Daha sonra bu çözeltide ki niobyum oksidine dönüştürülür. Karbon veya sodyum ile indirgenerek saf metalik niobyum elde edilir [16].

Zenginleştirme ile elde edilen konsantrelerden ferro-niobyum üretimi için alümino-termik reaksiyonlardan yararlanır. Elde edilen ferro-alaşım yaklaşık %40-60 Nb ve %20-25 Ta içerir. Niobyum, tantalın üretimi sırasında, potasyum fluotantalatın kristalleştirilmesinden geriye kalan çözülden de elde edilebilmektedir. Tantalı tamamen alınmış çözeltiyeye HCl ilavesiyle niobyumun pentoksit halinde çökmesi sağlanır. Niobyum metalinin üretilmesi için niobyum penta oksit, niobyum karbür ile karıştırılır ve çubuk halinde preslenir. Bu çubuklar, CO₂'in tamamı çıkıncaya kadar vakum altında ısıtılır ve gözenekli bir yapı kazanan niobyum metali toz haline gelinceye kadar öğütülür [17].

Tablo 3.7. Ferro-niobyum alaşımın özellikleri

Malzeme Tanımı	Metalik Niobyum ve Demir Alaşımı
Kullanım Alanı	Niobyum Alaşımlandırmada
Kimyasal Özellikleri	Nb %65,2,S % 0.056,Si %0.43,Al %1.59 P % 0.116
Yoğunluk	8,1 gr/cm ³
Ergime Sıcaklığı	1550 C Derece

3.6. Üretim Yapan Ülkeler ve Firmalar

Niobyum üretiminin büyük bir kısmı Brezilya ve Kanada'daki üç madenden yapılmaktadır. Bunlardan ikisi Brezilya'da, biri Kanada'da bulunmaktadır. Niobyum kaynağı olarak kolumbit'in kullanılışı gün geçtikçe azalmaktadır. Brezilya'daki Pitinga madeninden halen kolumbit üretimi yapılmaktadır. Bu yatak, Paranapanema firması tarafından niobyum, tantalium ve kalay üretimi için işletilmekte ve elde edilen konsantre San Paulo'daki izabe tesislerine nakledilmektedir. Niobyum üretimi için önce konsantreler üretilmekte, daha sonraki aşamada nihai ürünler üretilmektedir. Niobyum üretim miktarının ülkelere göre dağılımı Tablo 3.8 'de verilmiştir.

Tablo 3.8. Nniobyum üretiminin ülkelere göre dağılımı (ton metal)

Ülke	1995	1996
Kongo	1	--
Namibya	--	--
Nijerya	13	13
Rwanda	2	22
Zambia	--	--
Zimbabwe	--	--
Malezya	--	--
Tayland	--	--
Kanada	2 357	2 331
Bolivya	--	--
Brezilya	15 240	17 745
Avustralya	109	112
Toplam	17 721	20 223

3.7. Tüketim ve Kullanım Alanları

Niobyum (Nb);Güçlü paslanmaz çeliklerin yapımında ve bazı paslanmaz çelik türlerinin kaynak çubuklarında, ayrıca demir dışı alaşımlarda da kullanılır. Bu alaşımlar, güçlü olmalarının yanı sıra, diğer özellikleri nedeniyle de boru hatlarının yapımında kullanılırlar. Termal nötronlara karşı düşük yutma kesiti nedeniyle, nükleer teknolojide de kullanım alanı vardır. Gemini uzay programı ve benzeri ileri uçuş araçlarının yapı sistemlerinde büyük miktarlarda niobyum kullanılmıştır. Süper iletken özelliğe sahip olan ve güçlü manyetik alanlarda bile bu özelliğini yitirmeyen NbZr alaşımından yapılan teller, güçlü ve dayanıklı mıknatısların yapımında kullanılır. Kuyumculuk alanında da geniş kullanımı vardır. Nükleer reaktörlerde kullanılan paslanmaz çelik alaşımlarının, jet ve füzelerin, kesici aletlerin ve boru hatlarının yapımında da niobyumdan faydalanılır [18]. Çeşitli tür demir alaşımları üretimi için hemen hemen niobyumun % 90'ı çelik endüstrisi tarafından kullanılır. Ferro-niobyum başlıca dört tür çelik üretiminde kullanılır: **i)** HSLA çelikleri, **ii)** Paslanmaz çelik, **iii)** Düşük alaşımlı çelikler, **iv)** Süper alaşımlar. Bu çelik türleri arasında HSLA çelikleri, ferro-niobyumun en büyük tüketicisidir. Bu çeliklerde niobyum içeriği % 0,35-0,1 arasında değişir. Niobyum metali, niobyum esaslı

alaşımlar ve süper alaşımlar; korozyona dayanıklı, yüksek sıcaklıkta, yüksek dirence sahip makina ve teçhizatın yapımında kullanılır. Niobyum karbür en sert maddelerden biri olduğu için kesici alet ve teçhizatın yapımında kullanılır. Bu sektörlerin dışında uzay ve havacılık endüstrisi, nükleer, elektronik sektörleri, süper iletken, kalıcı magnet gibi ürünlerin yapımında niobyum metalinden ve niobyum esaslı alaşımlardan gittikçe artan oranda yararlanılmaktadır [11].



Şekil 3.7. Saf Ferro-niobyumdan elde edilmiş levha

- Güçlü paslanmaz çeliklerin yapımında,
- Süper iletken olan ve bu özelliğini manyetik alanlarda da kaybetmeyen NbZn alaşımı teller, güçlü mıknatısların yapımında,
- Kuyumculuk alanında,
- Nötronlara karşı düşük yakalama kesitine sahip olması nedeniyle nükleer endüstride,
- Boru hatları yapımında,
- Aşınmaya karşı dirençli olduğu için jet motorları yapımında kullanılmaktadır[15].

Niobyumun gaz emme (absorblama) kabiliyeti iyi olduğunda, vakum tüplerin imalatında kullanılır. Paslanmaz çelik hazırlanırken kullanılır. Çünkü niobyum yüksek sıcaklıkta korozyonu önler. Niobyumun ilavesiyle krom çeliği işlenebilir ve dayanıklı hal alır. Binlerce kilometre uzunluktaki gaz boruları niobyum ihtiva eden çelik borulardır. Niobyumun bileşikleri önemli değildir. Yalnız karbon bileşiği önemlidir. Niobyum-zirkonyum ve niobyum-kalay alaşımları süper iletken olduklarından elektronik sanayisinde kullanılır.

BÖLÜM 4. NİTRÜRLEME

4.1. Giriş

Bu işlem ilk olarak A.B.D’de Adolph Machlet tarafından 1908 yılında denenmiştir ve 1913 yılında da patenti onaylanmıştır. Aynı dönemlerde Avrupa’da da paralel çalışmalar yapılmaktaydı. Nitrasyon işleminin babası olarak bilinen Alman araştırmacı Adolph Fry, 1906 yılında Krupp Steel tarafından başlatılan programın yöneticisiydi. Patentini birinci dünya savaşı’nın ardından 1921 yılında denemiş 1924 yılında da onay alınmıştır [19].

Kabaca açıklayacak olursak nitrasyon; çelik yüzeyine azot emdirme işlemidir. Amacı da yüzeyde demir nitrürler oluşturup yüzey sertliğini ve aşınma direncini arttırmaktır. nitrasyon işlemi de kendi içerisinde azotun uygulanma şekline göre gaz nitrasyon, iyon/plazma nitrasyon, tuz banyosunda nitrasyon gibi farklı yöntemler barındırır[19].

Nitrasyon işleminin sonucunda malzeme yüzeyinden çekirdeğe doğru compound layer (beyaz tabaka), diffusion zone (difüzyon bölgesi) ve son olarak da transition zone (geçiş bölgesi) olarak isimlendirilen üç bölge oluşur, bu bölgelerin sertlikleri de yüzeyden çekirdeğe inildikçe düşer. Beyaz tabaka çift fazlı ve çok sert bir yapıdır, epsilon ve gama nitrürlerden oluşmuştur [19].

Daha kapsamlı olarak açıklamak gerekirse nitrürleme; çelik yüzeyinin ferritik durumda iken, A_1 sıcaklığının altındaki 500-700°C sıcaklıkları arasındaki bir sıcaklıkta, yüzeye azot emdirilerek yapılan bir yüzey sertleştirme işlemidir. Nitürleme diğer termokimyasal yüzey sertleştirme işlemlerinden farklı olarak, daha düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilir ki buda yöntemin en büyük avantajlarındanıdır. Bu sayede malzeme yüzeyinde yüksek sertlik değerlerine ulaşılırken, minimum

distorsiyon ve mükemmel boyutsal kararlılık sağlanmış olur. Yöntem sayesinde çelik yüzeyinde 1mm'ye kadar sert bir tabaka elde edilebilirken 1200 HV yüzey sertliğine de ulaşılabilir [20].

Nitrürleme işlemi, yüzey bileşiminin değiştirilmesi açısından sementasyon yöntemine benzese de, azotun ostenit yerine, ferritik fazda ilave edilmesinden dolayı farklılık gösterir. Bundan da anlaşılacağı gibi, nitrürleme de çeliğin ostenit alanında ısıtılması ve takriben martenzite dönüştürülmek için su verilip soğutulması işlemi yoktur.

İşlem vanadyum, tungsten, titanyum, molibden, krom ve alüminyum gibi nitrür oluşturuvcu çözeltiler elementleri içeren çeliklere uygulanabilir. İşlem esnasında yüzeyi sertleştirecek olan çelik katı halde bulunduğundan azotun çelik içerisine nüfuz edebilme imkânı sınırlıdır.

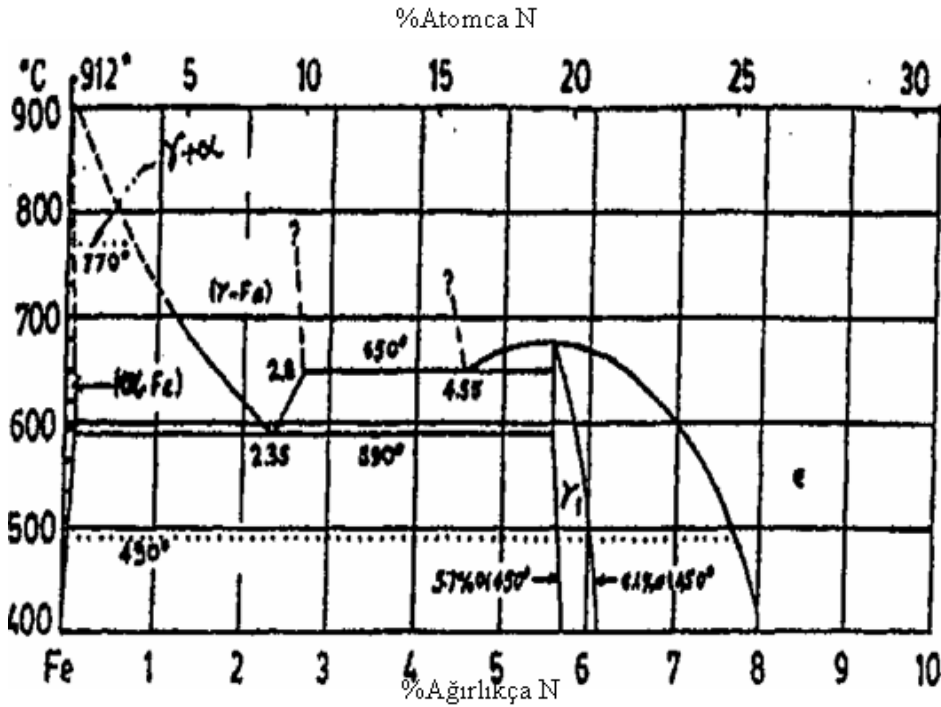
Nitrürleme işlemi, çok iyi sızdırmazlık özelliğine sahip ve hassas sıcaklık kontrolü yapılabilen fırınlarda uygulanır. Fırının atmosferi, sıcaklığı, nitrürleme süresi, çeliğin kimyasal bileşimi, nitrürleme öncesi yapılan ısıl işlemler ve çekirdek sertliği gibi etmenler sertleşme derinliğini etkileyen başlıca faktörlerdir [20].

Prensip olarak nitrürleme işlemi çeliğe aşağıdaki özellikleri kazandırır.

- Yüksek yüzey sertliği
- Yüksek sıcaklık sertliği
- Aşınma mukavemetinin artması
- Yüksek yorulma mukavemeti
- Korozyona karşı dayanıklılık
- Yüksek boyutsal kararlılık.

Nitrürleme işlemi sırasında yüzeyi sertleştirecek olan çelik katı halde bulunduğundan azotun çelik içerisine nüfuz edebilme imkânı sınırlıdır. Bu yöntem genellikle vanadyum, tungsten, titanyum, molibden, krom ve alüminyum gibi nitrür

oluşturucu çözeltili elementi içeren çeliklere uygulanır [21]. Nitritleme ile sıcaklığa bağlı olarak, Fe-N sisteminde aşağıdaki fazlar oluşabilir. Bu fazlar aşağıdaki şekilde yer alan Fe-N denge diyagramında görülmektedir.



Şekil 4.1. Fe-N ikili denge diyagramı

Diyagrama göre α -demirde azotun oluşturduğu katı çözeltili α -fazı olup ötektoid sıcaklıkta (591°C) %0,42 ve oda sıcaklığında ise yaklaşık %0,015 azot çözünürlüğüne sahiptir. δ -fazı, %5,5-5,95 N içeren YMK yapıya sahip demir-nitritür(Fe_4N) ve ϵ - fazı, %8-11,2 N içeren hegzagonal sıkı paket yapısına sahip $\text{Fe}_{2,3}\text{N}$ ara fazındadır.

Eğer nitritleme 591°C'deki ötektoid sıcaklıktan daha düşük bir sıcaklıkta gerçekleştirilirse, önce α çözeltisi oluşur, bunu δ -fazı takip eder ve en sonunda da ϵ -fazının oluşumu gerçekleşir. Yani yüzey azotça zenginleştikçe, göbekten yüzeye doğru faz oluşumu, $\alpha \rightarrow \delta \rightarrow \epsilon$ şeklinde olur. Sıcaklığın azalması ile α çözeltili bölgesi ve ϵ faz bölgesi denge diyagramında daha dar bir hal alır.

Nitrürlemede, azot konsantrasyonuna, alaşım elementlerine ve sıcaklığa bağlı olarak, yüzeyden iç bölgeye doğru farklı difüzyon bölgeleri ve farklı tabakalar (zon) oluşmaktadır.

Bileşik zon (beyaz tabaka): Nitelle dağlanmadığından beyaz tabaka olarak da adlandırılan bu tabaka, yüzeydeki azot konsantrasyonuna bağlı olarak δ -Fe₄N yada δ -Fe₄N+ ϵ nitrürlerden oluşur. Başlangıç olarak, yüzeyde oluşan, δ -Fe₄N α -ışınları ile açığa çıkarılırken artan N konsantrasyonlarında veya uzun süreli nitrürlemeler de, yüzeyde ϵ -nitrürlerin oluşmasından dolayı altta kaldığı için tespit edilememektedir. ϵ -nitrürleri; kimyasal çözündürme veya polisajla kaldırılarak nitrürlerini tespit etmek mümkündür. Ayrıca farklı dağlama reaktifleri uygulanarak ta bu tabakaları görmek mümkündür. Ticari amaçlı kaplamalarda 7-20 μ m kalınlıklı beyaz tabakaların elde edilmesi istenmektedir. Ayrıca bu tabaka yağlayıcı özelliğe sahip olduğundan malzemelerde sürtünme katsayısını da azaltır [20].

Difüzyon zonu: Bileşik zonun altında bulunan ve azot içeriğinden oluşan difüzyon tabakasıdır. Miktarı ancak işlem sıcaklığındaki çözünürlük ile belirlenebilir. Yapılan işlemde sonra sıcaklık hızla azaltılırsa azotça aşırı doymuş bir difüzyon bölgesi oluşur. Yavaş soğutma ile çelik içindeki alaşım elementlerinin oranına bağlı olarak sert nitrürler oluşur [22].

Özellikle Ti, Al, Cr, Mo ve W gibi nitrür yapıcı alaşım elementleri, değişik sıcaklık aralıklarında metal nitrürler halinde çökerek malzemenin tokluğunu artırmaktadır. Eğer çelik içerisinde bu gibi elementler yoksa Fe₂N, Fe₃N veya Fe₆N₁₂ gibi nitrürler çökelmektedir [20].

Karbonca zengin zon: Azotun, karbona göre metallerle bileşik yapma eğilimi daha fazla olmadığından dolayı, difüzyon zonu bitiminde azotun atomik olarak varlığı ile sementit veya diğer karbürler çözünerek oluşan reaksiyona göre metal nitrürler oluşmaktadır. Böylece serbest kalan atomları, kimyasal potansiyelleri daha düşük olan bölgelere yayınarak karbonca zengin zonlar oluştururlar [20].

4.2. Çelik Seçimi

Nitrürleme işlemi, ısıtma işlemi görmüş çeliklere, çok yüksek sertliklerde yüzey oluşturarak, aşınma, yorulma ve korozyona karşı direnç sağlamak amacıyla yapılır. Nitrürleme yapmak için seçilecek olan çelikler, karbürleme ve karbonitrürleme için seçilen çeliklerden farklı olarak, gerekli mukavemet düzeyine ulaşabilmek amacıyla daha yüksek karbon içerirler.

Yapılan nitrürleme işlemiyle gerekli sertliğe ulaşabilmek içinse V, Al, Cr, Mo gibi alaşım elementleri gereklidir. Sadece karbonlu çelikleri kullanmak nitrürleme için uygun değildir. Çünkü bu çeliklerin nitrür tabakları hem çok gevrek, hem de şişme eğilimi gösterirler. Aşağıdaki tabloda nitrürleme işleminin uygulandığı bazı çelikler ve ulaşılan en düşük sertlik değerleri verilmiştir [23].

Nitrürleme işleminin yapılacağı çeliklerden en iyi sonuçları, su verilip temperlenmiş çelikler verir. Nitrürleme için seçilecek olan çelik ise tam martenzitli bir yapı oluşturulabilmelidir. Temperleme ise yalnızca istenilen değerleri oluşturacak sıcaklık ve sürede yapılmalıdır. En çok kullanılan nitrürlenmiş çelikler, aşınmaya karşı dirençli olanlardır ve en çok kullanılan çelik serisi ile 4xxx serisini oluşturan çeliklerdir [20].

Tablo 4.1. Nitrürleme işleminin uygulanabildiği bazı çelikler

En Düşük Sertlik Değeri		
Nitrürleme işleminin uygulandığı çelikler	Knoop (kg/mm ²)	Rc
4130, 4140, 4150	450	45
4330, 4340, 8640	400	40
Nitralloy 135	1000	70+
H11 sıcak iş çeliği	1000	70+
430, 466 paslanmaz çelik	1200	-

Nitrürleme için yapılacak çelik seçiminde şu noktalara dikkat edilmelidir;

- Çeliğin içerdiği, alaşım elementleri ve kimyasal bileşimi,
- Yüksek bir temperleme sıcaklığına sahip olması,
- Çeliğin kullanım yeri ve ortam özelliklerine uygunluğu

Ayrıca nitrürleme için genelde, doğrudan su verilip sertleştirebilen çelikler seçilmelidir. Isıl işlem ise nitrürleme öncesi çeliğe uygulanarak, uygun yapının oluşması sağlanmalıdır.

Yapılan nitrürleme işleminin çelik yüzeyinde etkili olabilmesi için, çeliğin alaşım düzeyinin yüksek olması gerekir. Bu nedenle de kullanılan çeliklerin, genellikle derin sertleşen çelikler olması ve bileşimlerden ötürü gövde de çekme, kesme, eğme ve burulma yükleri altında çalışabilecek yüksek mukavemet düzeyine ulaşabilmeleri gerekmektedir.

4.3. Nitrürleme Öncesi İşlemler

Nitrürleme işleminin yapılacağı bir çeliğe, nitrürleme öncesi şu işlemler yapılmalıdır:

- Parça sıcak dövülmüş ya da tornada işlenerek hazırlanacaksa, yüzey düzgünlüğüne dikkat edilmelidir. Düzgün olmayan bir yüzey, nitrürleme işlemi sonrası bir takım sorunlara yol açabilir. Bu sorunlar, beyaz tabakaların pul pul dökülmesi, çatlaması gibi sonuçlar olabilir.
- Isıl işleme sertleştirme ve temperleme, istenilen mukavemet değerlerini sağlamalıdır. Isıl işlem sırasında tane boyutunun büyümemesine dikkat edilmelidir. Aksi takdirde yapılan nitrürleme işlemi sonrası çok pürüzlü, çatlamaya hazır bir yapı oluşabilir. Bunun içinde minimum sertleştirme sıcaklığı ve minimum zaman kullanılması önerilir.
- Yapılan ısıl işlem sonrası çeliğe istenilen şekil verilmeli ve yüzey pürüzlülüğü en aza indirilmelidir.
- Nitrürlenecek parçalar, nitrürleme öncesi çok iyi temizlenmeli ve parça yüzeyinde her hangi bir toz yada tufal olmamasına dikkat edilmelidir.

- Nitrürleme esnasında nitrürlenecek alanlar saf nişadır filmiyle korunmalıdır. Bu film tabakası uygulanan sıcaklıkla eriyerek, yüzey gerilimi nedeniyle yüzeyde kalır. Buda azotun çelik yüzeyine yayılmasına engel olur. Bu nedenle nişadıyla oluşturulan film tabakasının azotun yayılımını engellemesi için 0,01-0,015mm olması önerilir. Aksi takdirde eriyen nişadır, nitrürlenecek bölgelerde yayılabilir. Bu da nitrürleme işleminin oluşumunu engelleyebilir.

4.4. Nitrürleme Yönteminin Avantajları

Nitrürleme yönteminin avantajları aşağıda maddeler halinde verilmiştir;

- Nitrürleme ile malzeme yüzeyi doğrudan sertleştirildiği için, işlem sonrası malzemenin tekrar tavlama, menevileşme ve sertleştirme yapma ihtiyacı yoktur.
- Nitrürlenmiş parçaların içyapısı tok, yüzeyi ise oldukça sert ve aşınmaya karşı dayanıklıdır. Ayrıca kayma kabiliyetleri de yüksektir.
- Nitrürlenmiş parçaların korozyona karşı dirençleri yüksektir.
- Nitrürleme ile oluşan tabaka kalınlıkları 500°C'ye kadar ısıtılsalar da özelliğini kaybetmeden aynen kalırlar.
- Nitrürleme sertliği uygulanmış makine elemanlarında, yüksek sıcaklık değerleri tatbik edilmediği için çekme ve büzülme olayları görülmez.
- Nitrürleme işlemi ile sertleştirilen çeliklerde, diğer yöntemlere göre düşük sıcaklıklar uygulandığı için minimum düzeyde distorsyon ve mükemmel boyutsal kararlılık sağlanır [24].

Dezavantajı ise; yüksek yüzey zorlamaları (yüklemeleri) sert tabakanın pullanıp dökülmesine yol açar. Bunu önlemek içinde malzeme yüzeyine yüksek zorlamalar yapılmamalıdır.

4.5. Karbon sertleştirme ile nitrasyonun karşılaştırılması

Gaz nitrasyonunun, hem bugünün hem de geleceğin önemli yüzey sertleştirme işlemi olarak, karbon sertleştirmeye alternatif teşkil edecek şekilde önemi artmaktadır. Pek çok dişli, mil, flanş, pim ve diğer parçalara büyük oranlarda farklı yüzey derinliklerinde karbon potansiyel kontrolü ile sertleştirme işlemi yapılmaktadır. Ne var ki günümüzde karbon sertleştirme pek çok dezavantaja sahiptir. Aşağıdaki tablo, iki işlem arasındaki önemli farkları ortaya koymaktadır.

Tablo 4.2. Karbon sertleştirme ile nitrasyon işleminin karşılaştırılması [25]

KARŞILAŞTIRILAN ÖZELLİK	KARBON SERLEŞTİRME	NİTRASYON
Kullanılan Malzeme	Sınırlı çelik tipi	Geniş aralıklı çelik tipleri - paslanmaz, maryaşlanma, çökeltme sertleşmesi dahil olmak üzere
Isıl İşlem Sıcaklığı	850 – 950°C	460-600°C
Ek Isıl İşlem	Sertleştirme ve menevişleme gerekir	Ek bir işlem gerekmez
Son Düzeltme	Genelde pahalı taşlama işlemi gerektirir	Çoğu durumda taşlama gerektirmez
Çarpılma	Mümkündür	Düşük ısı işlem sıcaklığı ve kütle malzemesinde şekil değiştirme olmamasından ötürü sifira yakın minimum çarpılma
Yüzey Temizliği	Çoğu durumda soğutma yağını temizlemek için yıkama gerekir	Nitrasyon sonrası yüzey teslimata hazırdır
Yüzey Sertliği	60 – 65 HRC	Çelik derecesine bağlı olarak 70 HRC'ye kadar çıkabilir
Paslanma Dayanımı	Yüksek karbon konsantrasyonları paslanma gerilmesinden doğan çatlaklara maruz kalır	Bileşik katmanı paslanma dayanımını artırır

4.6. Nitrürleme İşleminin Kullanım Alanları

Makine parçalarından; her türlü tahrik dişlileri, krank milleri, biyel kolları eksantrik milleri, şanzuman ve vites dişlileri gibi hareketli ve güç iletiminin yapıldığı ortamlarda çalışan diğer parçaları ile plastik metal enjeksiyon kalıpları ile yapılan kalıplamalardan; sıvama baskı şekillendirme işlemlerinin yüzey sertleştirilmesinde nitrürleme yöntemi sıkça kullanılmakta ve her geçen gün kullanımı da yaygınlaşmaktadır. Ayrıca çalışan parçaların; döndürme, burkulma, sürtünme, kaynak vb. ortamlarda mukavemetli olarak çalışması istendiğinden dolayı, temas eden yüzeyleri ile sürtünmeli çalışan yüzeylerin aşınma ile karşı karşıya olması nedeniyle sert tabakalı yüzeyler ile kaplanmış olması istenir. Bu şekilde çalışan yüzey ve sürtünerek ısınan kısımların aşınmalarını engellemek için nitrürleme yapılmalıdır [20].

4.7. Nitrürleme Yöntemleri

Nitrürleme yöntemlerini genel olarak dört ana başlık altında toplamak mümkündür;

1. Fırında veya akışkan yatakta yapılan gaz nitrürleme,
2. Tuz banyosunda yapılan nitrürleme,
3. Toz nitrürleme,
4. Plazma ile yapılan iyon nitrürleme

4.7.1. Gaz nitrürleme

Bu işlem genellikle, sertleştirilip temperlenmiş, Al, Cr ve Mo içeren özel çeliklere uygulanır. Parçalar azot içeren bir ortamda tavlınır. İşlem sıcaklığı düşük olduğu için çarpılma istenmeyen hassas parçalar bu yöntemle sertleştirilir. Parçaya kazandırılacak olan sert tabaka kalınlığı ve sertlik değeri işlem süresi ve alaşım elementleriyle yakından ilişkilidir. Bu işlem özellikle aşınma direnci gerektiren parçalar için ideal bir ısı işlem şeklidir.

Gaz nitrürleme, genellikle amonyak gazı ihtiva eden bir ortamda, nitrürleme için uygun bir sıcaklık değeri elde edilerek (500-550°C), bu sıcaklıkta malzeme yüzeyine azotun difüze edilmesiyle yapılan bir yüzey sertleştirme yöntemidir [21].

Bu yöntemde amonyak yaklaşık 510°C'de $2\text{NH}_3 \rightarrow 2\text{N} + 3\text{H}_2$ reaksiyonuna göre ayrışır ve reaksiyon sonunda oluşan atomik azot da çeliğin bünyesine girerek nitrürleme işlemi yapılmış olur.

Gaz ile nitrürleme işlemi; 0,2-0,7 mm arasında etkin sertleştirme derinliği istenen çeliklere uygulanır. Yöntemin uygulanması ise hassas sıcaklık kontrolü yapılabilen bir elektrikli fırında (Şekil 4.2. ve 4.3) yapılır. Ancak büyük çaptaki malzemelerin nitrürlenmesi ise çok iyi sızdırmazlık özelliğine sahip kapaklı yer ocakları kullanılarak yapılır. Ayrıca küçük çaptaki nitrürleme işlemleri içinde ayrı bir nitrürleme kutusu olan Mufl fırınlar kullanılabilir [26].

Nitrürleme için kullanılan kutular gaz ile reaksiyona girmeyecek malzemelerden yapılmalıdır. Bu amaçla da özellikle nikel, inconel gibi alaşımların kullanılması idealdir. Ancak %25 Cr %20 Ni içeren alaşımlarda, ısıya karşı dirençli olmalarından dolayı kullanımlarının uygun olduğu kanıtlanmıştır. Fakat az sayıda(bir kaç adet) parçanın nitrürlenmesi için kullanılacak olan nitrasyon kutularının, çelik saçtan yapılması da uygun olur [20].

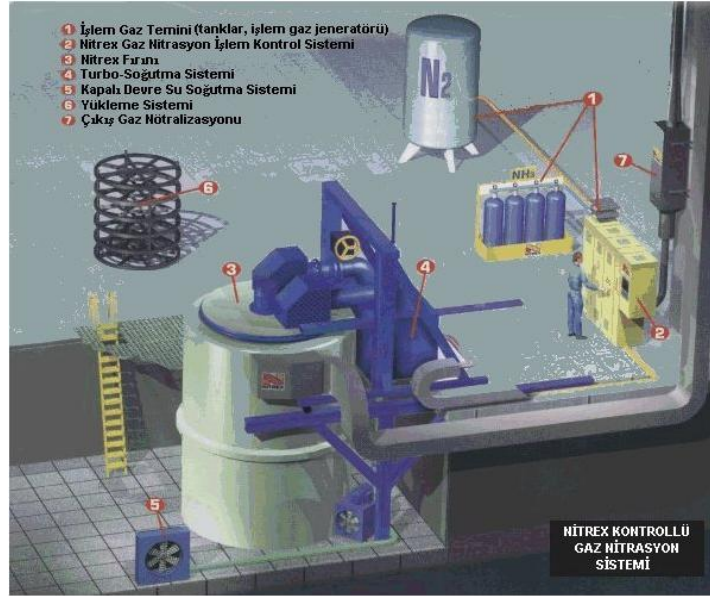
Gaz nitrürleme yönteminde kullanılan mevcut gazlar daima çok az miktarda da olsa nem içerirler. Nem nitrürleme işlemini olumsuz yönde etkilediği içinde, bu gazlardaki nemin, nitrasyon kutusuna girmeden önce alınması gerekir. Aksi halde oluşan su buharı nitrürlenmiş parçaların oksidasyonuna neden olur. Bu amaçla kullanılan en iyi nem alma yöntemi ise; gazı sönmemiş kireç filtresinden geçirilmeden önce 1100°C' ye kadar ısıtılarak kullanır getirilmesi yöntemidir.

Nitrürleme öncesi, nitrürlenecek parçalar çok iyi temizlenmeli ve parça yağ, su damlacığı gibi nem içeren etkenlerden arındırılmalıdır. Parça üzerinde kesinlikle pas toz ve tufal belirtisi olmamalıdır. Nitrürleme işlemi sonrasında eğer parçanın bazı kısımlarının yumuşak kalması istenirse, bu kısımlar nitrürleme işlemi öncesi elektrolitik kaplama yapılarak, kaplama tabakasının azotun çeliğe girmesi önlenmelidir.

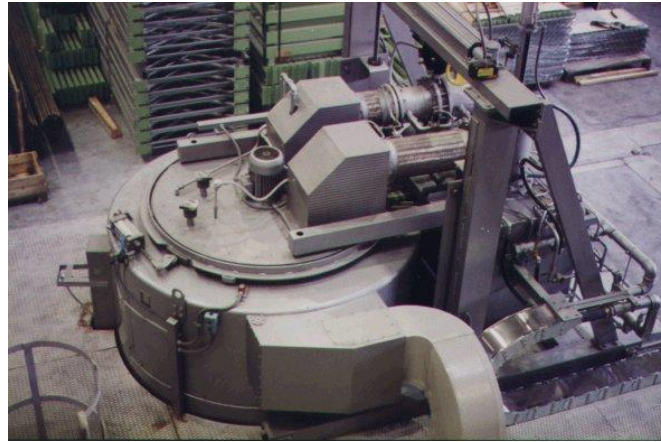
Nitrürleme işlemi için, nitrürlenecek parçaların tüm yüzeyleri gaz ile temas edecek şekilde nitrasyon kutusuna yerleştirilir. Kutu kapatılarak içerideki hava tamamen dışarıya atılıncaya kadar kutunun içerisi amonyakla yıkanır ve daha sonra amonyak kutu içerisinde bırakılır. Çıkış gazının kimyasal bileşimi ise düzenli bir şekilde ayrışma pipetleri yardımıyla tespit edilir ve ilk 5-10 saat için %15-20 artı gazda tutulur. Ancak tespit bu değerden daha düşük bir değer oluşursa, gaz hızı çok fazla demektir ve gaz hızının düşürülmesi gerekir. Eğer bunun aksi bir durum olursa da gazın hızı artırılmalıdır. Ayrılma sonrası artık sistem kararlı hale geçmiştir ve bu durumda %50 artı gaz miktarı uygun kabul edilerek gazın bileşimi günde 2 veya 3 defa kontrol etmek yeterlidir [20].

Nitrürleme işlemi tamamlandığında kutu, gazın akışı durdurmaksızın, fırından çıkarılır. Şarj 200°C' de soğutulduktan sonra gaz verisi kesilmeli ve kutu içinde kalan gaz, kutu açılmadan önce kompresörle uygun bir şekilde dışarı atılmalıdır. Nitrürlenmiş parçalar bu sırada normal olarak, mat gri bir renkte görünür. Bazen mevcut olan sarı, mavi ve pembe gölgeler parçanın nitrülenmesinde bir hata olduğu anlamına gelir. Sistemdeki oksijen mevcudiyetinden ileri gelen çeşitli gölgeler ise gazın tam olarak kurutulmamış olmasından veya kutudaki ya da gaz besleyici tüpteki bir miktar sızıntıdan olmuş olabilir.

Ticari çelikler genel olarak kullanılan alaşım elementlerinden Al, Cr, V ve Mo nitritleri, nitrürleme sıcaklığından sabit oldukları için nitrürleme işlemine yararlıdırlar. Bir nitrit yapıcı olarak katsayısına ilaveten, Mo ayrıca nitrürleme sıcaklığında kırılma riskini azaltır. Diğer alaşım elementlerinden Ni, Cu, Si, ve Mg gibi elementler ise nitrürleme de çok az etkili olurlar.



Şekil 4.2. Kontrollü bir gaz nitrasyon fırının şematik olarak gösterimi [25]



Şekil 4.3. Kontrollü bir gaz nitrasyon fırını

Aşağıda verilen bazı çelikler belirli uygulamalarda gaz nitürleme işlemine tabi tutulurlar. Bunlar;

- Alüminyum içeren düşük amaçlı çelikler,
- 4100, 4300, 5100, 6100, 8600, 8700, 9300 ve 9700 serilerinin orta karbonlu, krom içeren, düşük alaşımlı çelikleri,

- H11, H12, H13 gibi %5 krom içeren ısıtım işlem çelikleri,
- 300 serisinin ostenitik paslanmaz çelikleri,
- 400 serisinin ferritik ve martenzitik paslanmaz çelikleri,
- Çökme sertleşmeli paslanmaz çelikler.

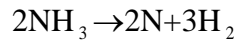
Gaz nitrüleme, kullanılan gaz ve gaz karışımlarına göre üç gruba ayrılırlar.

Bunlar;

- Amonyak ile gaz nitrüleme,
- Amonyak, azot veya hidrojenle gaz nitrüleme,
- Amonyak veya hidrokarbonla gaz nitrüleme.

4.7.1.1. Amonyak ile gaz nitrüleme

Temel gaz nitrasyon yönteminde, sertleştirilecek parçanın üzerinde amonyağın yaklaşık 510°C sıcaklıkta akmasına izin verilir. Yönteme göre amonyak,



reaksiyonuyla ayrışır. Reaksiyon sonucu atomik olarak ayrışan azot çelik tarafından absorbe edilir.

4.7.1.2. Amonyak, azot veya hidrojenle gaz nitrüleme

Bu yöntem çok nadir kullanılan bir yöntemdir. Minkevic ve Sorokin %20 Amonyak ve %80 Azot içeren bir gaz karışımı önermiştir. Minkevic ve Sorokin'in yapmış oldukları çalışmalar göre; düşük amonyak miktarı, düşük bir azot aktivitesi verir ve bu da daha tok özellikte bir tabaka sağlar. Bununla beraber sadece amonyakla veya hidrojen ilave edilerek nitrüleme yapıldığında, amonyağın ayrışma miktarını artırarak benzer sonuçlar elde edilebilir [20].

4.7.1.3. Amonyak veya hidrokarbonla gaz nitrüleme

Bu yöntemde amonyakla gaz nitrüleme yönteminde olduğu gibi yapılır. Ancak propan veya havada oluşturulan, saf propan yada endo gaz şeklinde hidro karbonlar

da gaz içerisine genellikle ilave edilirler. Bu yöntemde nitrüleme normal nitrülemekten bir miktar yüksek sıcaklıkta uygulanır. İşlem esnasında karbonik ile azot aynı anda çelik içerisine yayınırlar. Böylece C ile N birlikte karbonitrür oluştururlar. Aynı şekilde yüzeydeki yüksek karbon miktarı aşınmaya karşı direnci artırır. Böylece de yüzey tabakasının parçalanıp dökülme tehlikesi azalır [20].

4.7.2. Tuz banyosunda (sıvı) nitrüleme

Tuz banyosunda nitrüleme, NaCN ve KCN gibi karbon ve azot iyonları içeren sıvı tuz banyolarında, 510-590°C sıcaklık aralıklarında uygulanmaktadır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan yöntemler; Tuffride, Sursulf ve Sulfinuz yöntemleridir ve bu yöntemlerle sıvı nitrüleme yapılmaktadır.

20 yy'ın ortalarına kadar tuz banyolarında nitrüleme sınırlı bir ölçüde kullanılmıştır. Ancak daha sonra esas olarak 10-30 dakika gibi kısa sürelerle burju matkaplarının nitrülenmesinde kullanılmıştır. Eğer bu süre daha uzun tutulsaydı çelik yüzeyinde oyuklar oluşurdu. Böylece de düzensiz bir yüzey oluşurdu. Bunun sebebi de siyanat miktarının farklılık göstermesiydi. Son yıllarda ise tuz banyosunda nitrasyon yöntemi, banyo içerisine hava enjeksiyon edilerek yapılmaktadır. Bu sayede siyanat miktarı kontrolü daha iyi yapılabilmektedir. Ancak yöntemin daha da gelişmesiyle titanyum potalar kullanılmaya başlanmış ve bu ana kadar kullanılan demir potalarla, karışımın teması sonucunda oluşan tuz ayrışması önlenmiştir [20].

4.7.2.1. Tuffride yöntemi

Alman "Degussa" firmasının geliştirmiş olduğu ve Ti alaşımlı potalar kullanılarak yapılan nitrüleme yöntemidir. Bu yönteme göre; Ti alaşımlı pota içerisindeki tuz karışımına hava enjekte edilerek banyo homojenitesi sağlanmış olur ve aktivitenin artırılmasıyla da nitrüleme yapılmış olur. Bu yöntem krank milleri, pompalar ve dişlilerin yorulma dayanımını artıran ve aşınma direncinde gelişim sağlayan ticari bir nitrokarbürleme prosesidir [20].

Bu yöntem alkali metal siyanürler veya siyanatlar içeren tuz banyosunda bileşenlerin yaklaşık 570°C' de ısıtılmasından ibarettir. Yöntemin önemli özelliklerinden birisi beyaz tabaka ya da bileşik tabaka kalınlığının diğer tuz banyosunda nitrürleme yöntemlerine göre daha hızlı olmasıdır [20]. Tuffride tuz banyosunda yapılan nitrürleme sonrasında malzemenin sertliği, aşınma mukavemeti, korozyon direnci yanında çekme mukavemeti de artmaktadır.

4.7.2.2. Sursulf yöntemi

Sursulf yöntemi, aşınma ve sarma problemlerini önlemek için tuz banyosunda yapılan nitrürleme işlemidir. Yöntemin özelliği, banyonun aktif kükürt içermesi nedeniyle nitrürleme zamanının kısaltılması ve nitrür tabakasına prozite kontrolü getirmesidir. Ayrıca bu banyonun çevre kirletici özelliği de yoktur. Tüm tuz banyosunda ki nitrürleme işlemleri ile bazı nitrokarbürleme ve sementasyon işlemleri yerine de kullanılabilir. Alaşımli ve alaşımsız çelikler, bazıları hariç paslanmaz çelikler, dökme demirler gibi 570°C' de ısıtılmaları ile mekanik özelliklerinde bozulma olmayan çelik ve dökme demirlere uygulanabilmektedir.

Sursulf yönteminin özelliği, siyanat ve karbonatlara ilave olarak banyonun lityum tuzları ve kükürt bileşikleri ihtiva etmesidir. Bu nedenle banyoyu oluşturmak için üç ayrı özellikte tuz gerekmektedir. Bu tuzlar,

- Alkali siyanatlar ve karbonatlardan oluşan CR4 denilen temel tuz
- Banyoda sabit bir nitrürleme potansiyeli sağlayan ne organiklerden oluşan CR2 denilen rejenere edici tuz
- Banyonun kimyasal özelliklerini ve parçanın metalürjik özelliklerini koruyan potasyum sülfid(Ticari K_2S) [2]

Sursulf yöntemi ile nitrürlenmiş parçaların aşınma, yorulma, tutma(sürtme) ve kaviteasyon dirençleri artırılır. Ayrıca banyodaki kükürt oranına bağlı olarak düşük kükürtlü sursulf banyosunda nitrürlenmiş parçaların korozyon dirençleri yüksek olur. Çünkü banyodaki aktif kükürt miktarı parçanın korozyon direnci ile ters ilişkilidir.

4.7.2.3. Sulfinuz yöntemi

Bu yöntemde banyodaki NaCN ve NaCNO'dan başka aktif olarak Na₂S'de (sodyum sülfür) bulunur. Klasik olarak yapılan tuz banyosundaki nitrasyon işleminde, Azot ve Karbon çelik yüzeyi tarafından absorblanır. Sulfinuz işleminde ise kükürdün mevcudiyeti, nitrülenmiş tabakanın sürtünmeye karşı direncini daha da artırır. Böylece sürtünmeye karşı mükemmel direnç elde edilmiş olur. Bazı hallerde de, Sulfinuz işlemiyle çelik yüzeyinde 0,005 mm'lik bir kayba neden olabilir. Ayrıca çelik parçalarının dış yüzeylerinde de çok ince, yüksek kükürlü bir tabaka da oluşabilir. Boyutsal kararlılık için eğer bu tabaka giderilmek istenirse bu işlem en iyi çelik yönü ile yapılabilir. Tuz banyosunda yapılan nitrüleme işlemi sonrası normal olarak taşlama işlemi yapılmamalıdır [20].

Tuffride veya sulfinuz işlemi sonrası en iyi yüzey, çelik parçaların ılık su ile soğutulması halinde elde edilir. Bu şekilde hızlı bir soğutma ile α -demirini azotça aşırı doymuş bir katı eriyik haline getirir. Bu katı eriyik de nitrülemenin bir karakteristiği olan yorulma mukavemetine bir artış sağlar. Bununla beraber aşırı doymuş α -katı eriyiğinin oluşması esnasında meydana gelen iç gerilmelerde tokluğu azalır.

4.7.3. Toz İle nitrüleme

Toz ile nitrülemde ise; parçalar kutu karbürizasyon yönteminde olduğu gibi kutu içerisine yerleştirilerek nitrüleme işlemi yapılır. Burada yaklaşık olarak, ağırlıkça %15 oranında nitrasyon hızlandırıcı malzeme öncelikle kutu dibine konulur. Daha sonra nitrülenecek parçalar yerleştirilir ve nitrasyon tozları da bir tabaka halinde bu parçaların üzerine yerleştirilir.

Bu işlem esnasında, parçanın nitrasyonu hızlandırıcı malzemelerle temas etmemesi gerekir. Eğer daha fazla parçaya nitrüleme işlemi yapılacaksa tekrar bir sıra toz tabakası ve üzerine de bir sıra parçalar olacak şekilde yerleştirilir. Yeterli miktarda toz tabakası ve parça yerleştirildikten sonra kutular sıkıca kapatılarak sıcaklığı 520-

570°C olan mufl fırın içerisine yerleştirilir. Böylece nitrüleme işlemi, gerekli parçaları fırında bekleterek yapılmış olur. Ancak nitrüleme işlemi için fırın içerisinde ki bekletme süresinin 12 saati geçmemesi tavsiye edilir. Yapılan bu işlemler sonrasında, parça nitrüledikten sonra çelik yüzeylerinde oyuklaşma ve kabartılar olup, bu kabartıların pul pul dökülmesi söz konusu olabilir [20].

4.7.4. Plazma iyon nitrüleme

İyon (plazma) nitrüleme, düşük basınçlı gaz içeren ve iki elektrot daldırılmış, havası boşaltılmış kaplar içerisinde yapılan bir nitrüleme yöntemidir. Bu yöntemin patenti 1930'lu yıllarda alınmış olmasına rağmen, pahalı yatırımlar gerektirmesi ve işlemin doğru olarak uygulanması için değişik teknolojik gereksinimler nedeniyle yıllarca büyük çapta endüstriyel uygulamalar için tercih edilmemiştir. Son yıllarda ise özellikle çeliklerin yüzey sertleştirilmesi için iyon nitrüleme (Glow Discharge) yöntemi yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır [20].

İyon nitrüleme düşük basınçlı kaplar içerisinde gerçekleştirilen bir yöntemdir. Nitrüleme işlemi seyreltik amonyak gazı veya hidrojen ile azot gazlarının karışımının bulunduğu kaplarda uygulanır. Burada hidrojen ve azot gazlarının karışımı kapta iyonlaşmaya başlar. İşlenecek parçalar bu iyonlaşan akımla işlem görürse, oluşan azot iyonları (NT) söz konusu parçaların yüzeylerine bombardıman ederler. Böylece parça yüzeyi ısınmaya başlar ve iyonlanmış azotlar parça içlerine doğru girerek nitrüleme işlemi yapılır [20].

İyon nitrüleme prosesinde düşük basınçlı gaz içeren ve içerisine iki elektrot daldırılmış kaptaki bu elektrotlar arasına yüksek voltajlı doğru akım (DC) uygulanırsa, akım geçmeye başlar. Geçen bu akımla oluşan iyonlarda pozitif elektroda (anot) doğru hareket eden eksi yüklü iyonlar ile negatif elektroda (katot) doğru hareket eden doğru yükler iyonlardır. Bu atomlardan bir veya birden fazla elektron ayrılacak katodu belli bir enerjiyle bombardıman ederler. Bu enerjinin de bir kısmı ısıya çevrilir. Böylece katodun sıcaklığı yükselir. Kalan kısmı ise katot yüzeyinden gelen ikincil elektrotların yer değişimi için kullanılır [20].

BÖLÜM 5. TERMOREAKTİF DİFÜZYON (TRD) YÖNTEMİ

5.1. Giriş

Kaplama proseslerinde temel iki amaç vardır. Bunlar malzemenin yüzeyinin aşınma direncini arttırmak ve sürtünme davranışını azaltmaktır. Kaplama proseslerinden PVD, PAPVD (Plazma destekli fiziksel buhar çöktürme) ve CVD'yi kapsayan buhar proseslerinde, buharın kinetik enerjisinden faydalanılarak kaplama işlemi gerçekleştirilir. PVD kaplamalar, daha düşük sıcaklıklarda (50–500 °C) yapıldığı için altta bulunan malzemenin mekanik özellikleri ve mikro yapısı etkilenmez. Plazma ile nitrüleme işlemi de PVD kaplama işlemi gibi 400–600 °C sıcaklıklarda gerçekleştirildiği için malzemenin yüzeyi bir ön işlem gibi sertleştirildikten sonra yüzeye aşınma dirençli kaplamalar uygulanabilir.

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 yapılaşma ve kristal distorsiyonu metalin yüzey sertliğini artırır [27,28].

5.2. Termo-Reaktif Difüzyon Yöntemi

TRD (Thermo Reactive Diffusion) veya TD (Toyota Diffusion Process) diye adlandırılan bu yöntem çeliklere sert karbür, nitrür ve karbo-nitrür kaplamalar, tuz banyosunda veya akışkan yataklı fırınlarda uygulanabilmektedir. Tuz banyosuna daldırma tekniği ile karbür kaplamalar öncelikle Japonya'da gerçekleştirilmiştir ve Toyota difüzyon (TD) kaplama ismi altında hemen hemen 20 yıl önce endüstriyel olarak kullanılmıştır. TD yönteminde vanadyum, niobyum, titanyum veya krom gibi karbür

oluşturucu elementlerinin ilavesiyle ergimiş boraks kullanılır. Diğer bir deyişle bu sisteme göre boraks tuz banyosu içine ilave edilen V, Nb, Ti, Ta ve Cr gibi güçlü karbür yapıcı elementler, çelik yüzeyindeki karbon ile birleşerek yüzeylerde Cr_2C_3 , $Cr_{23}C_6$, NbC, TiC, TaC ve VC türü metalik karbür tabakalar oluşturmaktadır. Proses bilimsel çevrelerde TRD, endüstride ise TD yöntemi olarak bilinmektedir [27,28].

Termo-reaktif difüzyon yöntemi, karbür, nitrür ve karbo-nitrür gibi sert ve aşınma direnci yüksek olan tabakaların çelik malzemelerin yüzeyinde oluşturulduğu bir metottur. TRD yönteminde çelik altlık malzemedede karbon, azot, vanadyum, niyobyum, tantalyum, krom, molibden veya tungsten gibi karbür veya nitrür oluşturucu elementlerle biriken bir tabaka oluşturmak için difüze olur. Difüze olan karbon ve azot biriken tabakada karbür ve nitrür oluşturucu elementlerle altlık malzeme yüzeyinde metalürjik olarak bağlanmış olan karbür ve nitrür kaplamaları oluşturacak şekilde reaksiyona girer.

Tabakanın büyümesinin karbon difüzyonuna bağlı olması sebebiyle, ihtiyaç duyulan kaplama hızını sağlamak için yöntem $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'den $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar yüksek sıcaklığı gerektirir 4 ile 7 μm karbür kaplama kalınlığını üretmek için banyo sıcaklığı ve çeliğin cinsine bağlı olarak 10 dakika ile 8 saat arasında işlem süresine ihtiyaç duyulabilmektedir. Kaplanmış çelikler soğutulduktan sonra, sertleştirme amacıyla tekrar ısıtılabilir veya banyo sıcaklığı ostenitleme sıcaklığı seçilebilir ve kaplama işlemi sonrasında doğrudan su verme işlemi gerçekleştirilebilir.

TRD yöntemi geleneksel yüzey sertleştirme metotlarına benzemez. Çünkü geleneksel yüzey sertleştirme metotlarında karbon ve azot, altlık malzemenin yüzeyini sertleştirmek amacıyla dışarıdan difüze edilmektedir. TRD yöntemi konvansiyonel difüzyon metoduna benzememesine rağmen, TRD yönteminde de altlık malzemenin yüzeyinde kaplama tabakasının oluşumu gerçekleşmektedir. TRD yönteminde elde edilen kaplama tabaka kalınlıklarına CVD veya PVD teknikleri kullanılarak ulaşılabilir. Kıyaslanacak olursa, CVD kaplamaların kalınlıktan (2–5 μm), TRD yönteminde elde edilen kaplamaların kalınlıklarına yakındır. Tabakaların kalınlığı, altlığın bileşimine özellikle karbon içeriğine, işlem sıcaklığına ve süresine bağlıdır (5–15 μm) [27].

TRD yönteminde iş parçasının içine gömüldüğü toz karışımları ana olarak üç bileşenden oluşmaktadır: Kaplama element kaynağı (verici malzeme, örneğin, Fe-V, Fe-Ti ve Fe-Cr), karışım tozlarının birbirleriyle sinterleşmesini önlemek için inert bir dolgu maddesi (Al_2O_3 veya SiO_2) ve bir aktivatör (genellikle NH_4Cl) [28].

TRD yöntemi gibi termokimyasal difüzyon yöntemleri birçok değişkenden etkilenir. Her defasında problemlerin en uygun çözümleri, parametrelerin birbirine göre ayarlanması deneysel çalışmalar sonucu olmaktadır [22]. Bu parametreler aşağıda sıralanmışlardır:

- Difüzyon sıcaklığı
- Difüzyon süresi
- Verici malzemenin miktarı
- Aktivatör miktarı
- Numune malzemesinin yapısı (alaşım elementleri, karbon içeriği)
- Son işlemler (ısıtma işlemi)

Difüzyonel kaplama işlemleri bir kutu içerisinde 900–1150 °C'deki bir fırında genellikle 2 ila 5 saat süre ile uygulanır. Bu süre ve sıcaklıklar üretilecek tabaka cinsi ve tabaka kalınlığına bağlı olarak değiştirilebilir. Numunenin soğuması genellikle kutu tozları içinde olmaktadır. Ayrıca fırın dışında soğutma şeklinde yapılan çalışmalar da mevcuttur.

TRD prosesinde 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.

Karışım bileşenlerinin önemli bir elemanı da aktivatördür. Aktivatör, izotermal ısıtma esnasında 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 seçiminde, kullanılan altlık malzemesinin cinsi ve aktif gaz ortamını oluşturacak ferro alaşım elementinin kısmi basıncı rol oynar [29].

Buna göre aktivatör yaklaşık 580°C’de ve işlem süresinin ilk 15 dakikasında parçalanmaktadır. Parçalanma sırasında meydana gelen gazlar bir tahliye borusuyla dışarı verilmektedir [29].

5.3. Termokimyasal Kaplama Yöntemleri

Termokimyasal işlem metotları, difüze olan elementin sağladığı aktif fazın fiziko-kimyasal karakteristiklerine göre şu şekilde sınıflandırılmaktadır:

- Katı fazdan doyurma,
- Sıvı fazdan doyurma,
- Gaz fazından doyurma,
- Buhar fazından doyurma.

Termokimyasal işlemler veya difüzyonlu kaplamalar çöktürülen elementin metal ve ametal oluşuna göre iki gruba ayrılır:

I. Ametallerle doyurma işlemleri:

- Karbürleme,
- Nitrürleme ve Nitrokarbürleme,
- Borlama.

II. Metallerle doyurma işlemleri:

- Alüminyumlama,
- Kromlama,
- Silisyumlama,
- Vanadyumlama,
- Berilyumlama,

işlemlerini kapsar.

Yüksek sıcaklıkta, etrafını kuşatan ortamdan belirli bir veya birkaç elementin difüzyonu ile malzemenin yüzeyinin doyurulması termokimyasal işlem olarak adlandırılmaktadır.

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.

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[31].

5.4. TRD Yönteminin Üstünlükleri

TRD yönteminin üstünlükleri şöyle sıralanabilir

- Basit donanım
- Kolay operasyon
- Seçici karbür kaplama
- Düşük maliyet
- Girintili çıkıntılı bölgelerde üniform kaplama
- Uzun banyo ömrü
- Malzemeye yapışan tozun kolay temizlenmesi
- Koruyucu atmosfer gerektirmemesi
- Kolay su verebilme (göbek sertliği)
- Atık ve zehirli gaz olmaması, çevreye zarar vermemesi
- Kalıp ömrünün artması

- Kalıp parlatılmasında kullanılan işçilikten tasarruf
- Yağlayıcıdan tasarruf (veya hiç yağlayıcı kullanılmadan)
- Yüzey işlemlerindeki ve boyutsal hassasiyetteki artıştan ötürü, ürün kalitesinin artması
- Daha az kalıp malzemesi kullanılarak, kalıp malzemesi ve üretim maliyetlerinde azalma [30,31].

5.5. TRD İşleminin Uygulama Alanları

TRD için en iyi uygulamalar yüksek aşınma ve kazıma problemlerine sahip takımlardır. Bu durumda olan takımlara örnekler Tablo 3.2.'de görüldüğü gibi çoğu şekillendirme ve kesme takımları, kalıp bileşenleridir. Yumuşak çelik, HSS, kaplanmış çelikler, paslanmaz çelik, demir dışı metaller, şekillendirme kalıplarında kullanılabilir.

Altlık malzemenin sertliği bazı uygulamalar için normal değerlere yakın veya daha düşük olabilmektedir. Takımların öğünmesi veya kırılma problemlerinin olması durumunda düşük altlık malzeme sertliği, tokluğu arttırıcı etkisi sebebi ile kullanılmaktadır. Sert karbür kaplamalar, yüzeysel aşınma direnci sağlamaktadır. Sertleştirme işlemine uğratılmadan, yüksek hız takım çelikleri altlık malzeme tokluğuna ihtiyaç duyulması durumunda kullanılabilir.

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 (1050°C) 60–65 HRC sertliği elde etmek amacıyla işleme tabi tutulabilmektedir.

Bir uç çok keskin olursa veya pürüzlü yüzey içerirse kırılacaktır. Kesici uçlar 0.05'den 0.25 mm'ye kadar taş veya zımpara ile radius verilerek yuvarlatılmaktadır.

Aşınan en sert atlık malzemenin elde edilebilmesi TRD işleminin çok dikkatli bir şekilde yapılmasıyla sementit karbürlerle başarıyla sağlanmaktadır. Kesici ve delici takımların uç hazırlaması takımlar için son derece önemlidir. Kesici uçlar tekrar keskin hale getirilmelidir. Bu mümkün değildir, çünkü kesici takımın yüzey kısmında oluşturulan karbür kaplama sayesinde performans elde edilebilmiştir.

Tablo 5. 1 TRD prosesine tabi tutulan takımların uygulamaları

Uygulama	Takım
Sac metal şekillendirme	Derin çekme kalıpları, bükme kalıpları, sürücüler, iticiler, şekillendirme merdaneleri, iz çekiçleri, düzeltme çekiçleri, folyo merdaneleri, kesme bıçakları, sıyrıcı yardımcı pimler ve buşingleri, pilot pimler ve diğerleri.
Boru ve tüp ürünleri	Çekme kalıpları, sıkıştırma haddeleri, frenleyici merdaneler, boş merdaneler ve yardımcı merdaneler vs.
Boru ve tüp işleri	Bükme kalıpları, basma kalıpları, mandal genişletme çekiçleri, sıvama ve yayma kalıpları vs.
Tel üretim	Çekme kalıpları, doğrultma merdanesi, oksit kaldıracı, merdane, besleme merdaneleri, yardımcı merdaneler ve kesme takımları.
Tel çekme işleri	Bükme kalıbı, yardımcı plaka, yardımcı merdane, besleme merdanesi, sıyırma bıçağı.
Soğuk ve ılık dövme	Ekstrüzyon koçları ve kalıpları, derin çekme kalıpları, yığma çekiçleri ve kalıpları, markalama çekiç ve kalıpları, hadde kalıpları, merdane kesiciler vs.
Sıcak dövme	Prete dövme kalıpları, hadde kalıpları, yığma kalıpları, döner sıvama kalıpları, kapalı dövme kalıbı vs.
Döküm (Alüminyum, çinko)	Gravite döküm maça pimi, basınçlı döküm maça pimi, maça besleyiciler vs.
Kauçuk şekillendirme	Şekillendirme kalıbı, ekstrüzyon kalıbı, ekstrüzyon itici sonsuz vidası, torpido, silindir kolları, nozullar, giriş vs.
Plastik şekillendirme	Şekillendirme kalıpları, enjeksiyon vidası, kollar, silindirler, sevk ediciler, nozullar, giriş vs.
Cam şekillendirme	Şekillendirme kalıbı, pompalar, yanma nozulları, makine parçaları vs.
Toz kompaktlama	Şekillendirme kalıpları, maça çubukları, ekstrüzyon kalıpları, vida vs.
Kesme ve işleme	Kesme takımları, kesme bıçakları, matkap, tapa, germe pimi, takım tutucular, yardımcı plakalar vs.

TRD prosesi öncesinde öncelikle üretilen kalıbın yüzey bitirme işlemi ve parlatma yönü çok önemlidir. Karbür tabakasının çok sert olması sebebiyle TRD işlemine tabi tutulan takımlar kaba bitirme yüzeylerine sahip olurlarsa kaplanmamış, sıradan kalıplardan daha kötü bir performans sergilerler [31,32].

BÖLÜM 6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1. Giriş

Bu çalışmada, termo-reaktif difüzyon yöntemi ile içerisinde farklı oranlarda alaşım elementleri bulunan AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çeliklerinin yüzeylerine niobyum nitrür kaplama işlemi uygulanmıştır. Bütün çeliklere 500°C-530°C' de bir saat nitrasyon işlemi uygulanmış, nitrürlenmiş numunelerin yüzeyine 900°C, 1000°C ve 1100°C sıcaklıklarda 1, 2, 3 ve 4 saat sürelerde niobyumlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Niobyum nitrür kaplanan numunelerin yüzeylerinde oluşan tabakaların özellikleri, yapısal, faz analizi ve mekanik özellikler açısından 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 taracları, perçin ve civata başlarının şişirilme işlemlerinde v.b. yerlerde kullanılmaktadır. D2 çeliğine ait ısıl ve mekanik özellikler Tablo 6.1'de verilmiştir. 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. M2 çeliğine ait ısı ve mekanik özellikler Tablo 6.2’de verilmiştir.

Tablo 6.1. D2 çeliğine ait ısı ve mekanik özellikler

ADI	D2 ÇELİĞİ
TÜRÜ	Soğuk hız Çeliği
Yumuşatma tavi (°C)	800 – 850
Yumuşatma tavidan sonraki sertlik (HB)	Maksimum 250
Gerilim alma (°C)	650 – 700
Sertleştirme (°C)	1020 – 1040
Sertleştirmeden sonraki sertlik (HRC)	63 – 65
Menevişlemeden sonra elde edilen yaklaşık sertlik (HRC)	58 – 64
Oda sıcaklığındaki yaklaşık yoğunluk	7.70 g/cm ³

Tablo 6.2. M2 çeliğine ait ısı ve mekanik özellikler

ADI	M2 ÇELİĞİ
TÜRÜ	Yüksek Hız Çeliği
Yumuşatma tavi (°C)	770 – 840
Yumuşatma tavidan sonraki sertlik (HB)	Maksimum 280
Gerilim alma (°C)	600 – 650
Sertleştirme (°C)	1190 – 1230
Menevişleme (°C)	540 – 570
Menevişlemeden sonra elde edilen yaklaşık sertlik (HRC)	64 – 66
Oda sıcaklığındaki takribi yoğunluk	8.1 g/cm ³

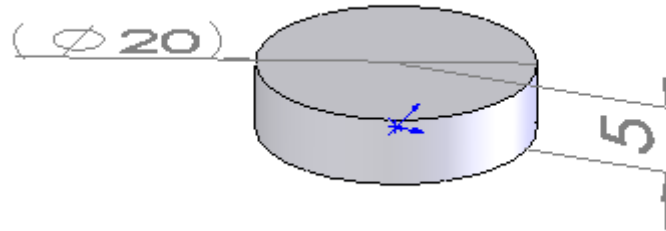
Deneilerde kullanılan çelik numunelerin spektral analizleri Thermo-Jarrel ASH-BAIRD Corp DV-6S 3063A marka spektral analiz cihazında gerçekleştirilmiştir. Kullanılan çeliklerin spektral analizleri Tablo 6.3’ de verilmektedir.

Tablo 6.3. Deneylerde kullanılan çeliklerin spektral analizleri

Çeliğin Cinsi	Kimyasal Bileşim (% Ağırlıkça)									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	W	V
AISI 1010	0,12	0,11	0,05	0,003	0,023	0,012	0,029	0,02	-	-
AISI 4140	0,40	0,19	0,79	0,009	0,013	0,89	0,80	0,16	0,02	0,01
AISI D2	1,43	0,29	0,20	0,005	0,005	11,38	0,68	0,60	0,01	-
AISI M2	0,71	0,47	0,27	0,038	0,025	3,45	0,12	3,45	14,77	1,55

6.3. Deneylerde Kullanılan Numunelerin Hazırlanışı

Deneylerde kullanılan AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çelikler 20 mm çapında yuvarlak kesitli olarak temin edilmiş olup, 5 mm kalınlığında parçalar halinde kesilmiştir. 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. Metalografik olarak hazırlanan numunelerin şematik görüntüleri Şekil 6.1.' de verilmektedir.



Şekil 6.1. Deneylerde kullanılan numunenin boyutları (ölçü birimi: mm)

6.4. Deneyleerde Kullanılan Cihazlar ve Ekipmanlar

6.4.1. Nitrasyon ve Niobyumlama fırınları

Numunelerin nitrürlenmesi için atmosfer kontrollü gaz nitrasyon fırını (Şekil 6.2) kullanılarak 500°C-530°C' de bir saat süreyle nitrasyon işlemi uygulanmıştır. Niobyumlama işlemleri PROTHERM marka (Şekil 6.3) 1200°C sıcaklığa çıkabilen $\pm 1^\circ\text{C}$ hassasiyette çalışan direnç fırınında gerçekleştirilmiştir.



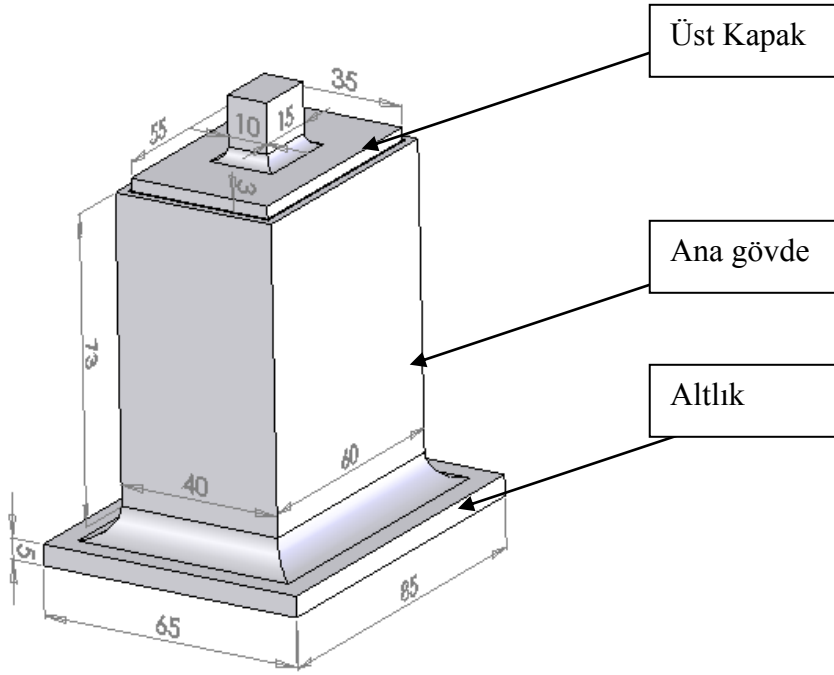
Şekil 6.2. Gaz nitrasyon fırını



Şekil 6.3. Niobyumlama fırını

6.4.2. Niobyumlama potasının hazırlanması

Niobyumlama işleminde piyasada rahatlıkla bulunan 40×60 mm profillerden üretilmiŐ potalar kullanılmıştır. Potaları isteğe bağlı olarak 40x60x75 mm ebatlarında paslanmaz çelikten kullanmak mümkündür. Şekil 6.4' de niobyumlama işleminin gerçekleştirilmesinde kullanılan niobyumlama potası ve boyutları görülmektedir.



Şekil 6.4. TRD yönteminde kullanılan Niobyumlama potasının şematik görünüşü (ölçü birimi: mm)

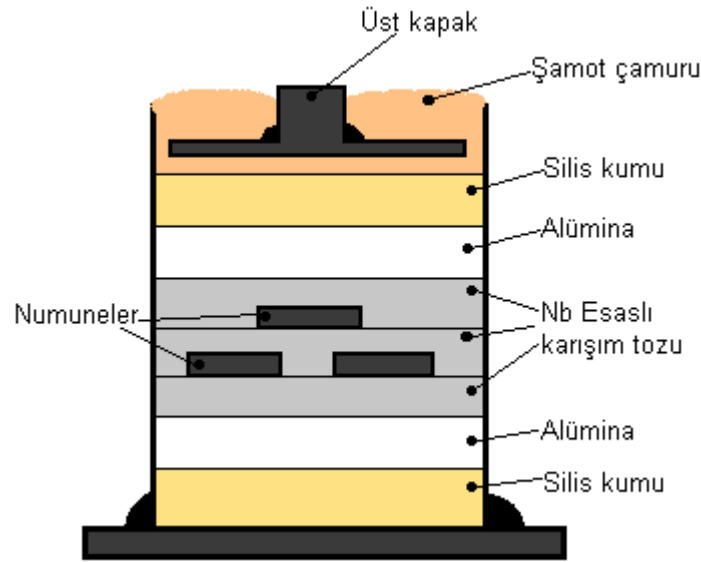
6.5. Nitrürleme İşlemi

Numunelerin yüzeyleri 1200 mesh lik zımparaya kadar zımparalandıktan ve üzerinde kirlilik kalmadığından emin olduktan sonra atmosfer kontrollü gaz nitrasyon fırınlarında (500°-530°C) bir saat süre ile numune yüzeylerine azot emdirilmek suretiyle nitrürleme işlemleri gerçekleştirilmiştir.

6.6. TRD yöntemi ile Niobyumlama İşlemi

Nitrürleme işlemine tabi tutulan ve yüzeyleri tamamen temizlenen AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çelikleri termo-reaktif difüzyon yöntemi (TRD) ile 900-1000-1100°C sıcaklıklarda 1, 2, 3 ve 4 saat sürelerde niobyumlama işlemine tabi tutulmuşlardır. Niobyumlama işlemini gerçekleştirme de kullanılan niobyumlama banyosunda ferro-niobiyum tozu (100 µm elek altı), amonyum klorür (NH₄Cl), alümina

(Al_2O_3 , 100 μm elek altı) ve naftalin kullanılmıştır. 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 uzaklaştırmak için kullanılmışlardır. Niobyumlama işleminde çeliklerin ve banyo bileşenlerinin kutu içerisinde dizaynı Şekil 6.5’de görülmektedir.



Şekil 6.5. Niobyumlama potasında malzeme ve banyo bileşenlerinin dizaynı

6.7. Metalografik İncelemeler

Niobyum nitrür kaplanan numuneler, tabakaların açığa çıkarılması bakımından kesitinden incelemeler yapmak amacıyla bakalite alınmıştır. Bakalite alınan numuneler 100, 220, 400, 800 ve 1200 grid’ lik zımparalama işlemlerine tabi tutulduktan sonra 1 μm ’ lik alümina pasta kullanılarak parlatma işlemine tabi tutulmuşlardır. Metalografik olarak parlatılmış olan yüzeyler %2’lik nitelle dağlanarak mikro yapılar ortaya

çıkarılmıştır. Mikroyapı incelemeleri NIKON EPIPHOT 200 marka optik mikroskopta gerçekleştirilmiştir.

Farklı sıcaklık ve sürelerde niobyumlanan çeliklerin yüzeyinde oluşan tabakaların kalınlık ölçümleri optik mikroskop bünyesinde yer alan dijital mikrometre yardımıyla ölçülmüştür.

6.8. Faz Analizi

Kaplama tabakasında yer alan fazların tespiti için RIGAKU D/Max72200/PC marka x-ışınları difraksiyon analiz cihazı kullanılmıştır. Analiz sırasında Cu K α ($\lambda = 1.5408 \text{ \AA}$) karakteristik ışın demeti kullanılmış ve elde edilen difraksiyon paternlerinin çözümünde ASTM kartlarından yararlanılmıştır.

6.9. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Elementel Analiz İncelemesi

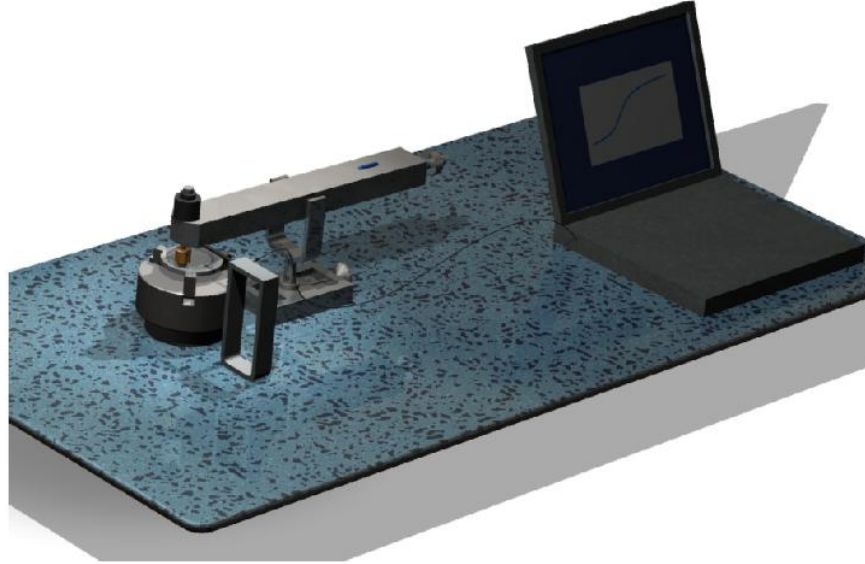
570°C'de 1 saat nitrülenmiş ve takiben 1000°C'de 2 saat süre ile niobyumlanmış AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çeliklerinin metalografik olarak hazırlanan yüzeylerinin mikroyapı incelemeleri elementel analiz dağılımları taramalı elektron mikroskobunda (SEM) gerçekleştirilmiştir. İncelemeler JEOL JSM-6060 LU marka taramalı elektron mikroskobunda gerçekleştirilmiştir.

6.10. Sertlik Ölçümü

570°C'de 1 saat nitrülenmiş ve ardından 900, 1000 ve 1100°C'de 1, 2, 3 ve 4 saat sürelerle niobyumlanmış AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çeliklerinin yüzeyinde oluşan tabakaların sertlikleri FUTURE TECH FM 700 marka mikro sertlik cihazında Vickers sertlik ucu kullanılarak 10gr yük altında gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümleri kaplama işlemi uygulanmamış çeliklerde de gerçekleştirilmek suretiyle sertlik değişimleri belirlenmiştir.

6.11. 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 M50 çelik bilyeler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneyleri 2,5N, 5N ve 10N yükler altında 320 m mesafede, 0.1 m/s hızda gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneyleri sonrasında oluşan aşınma izleri optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve EDS analizleri ile incelenmişlerdir. Aşınma deneylerinin gerçekleştirildiği Ball-On Disk cihazının şematik gösterimi Şekil 6.6'da görülmektedir.



Şekil 6.6. Aşınma deneyi cihazı

BÖLÜM 7. SONUÇLAR VE İRDELEME

7.1. Giriş

Bu çalışmada, Tablo 6.3' de kimyasal bileşimleri verilen AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çelikleri, yüzeylerine, atmosfer kontrollü gaz nitrasyon fırınlarında (500°-530°C) bir saat süre ile azot emdirerek nitrüleme işlemine tabi tutulmuştur. Yüzeyinin tamamı nitrülenmiş olan numuneler yüzeylerinde oluşabilecek kalıntılar gidermek için kullanılmış 1200 mesh'lik zımpara ile temizlenmiştir. Daha sonra ferro-niobyum, amonyum klorür (NH₄Cl), alümina (Al₂O₃), ve naftalinden oluşan bir banyoda termo-reaktif difüzyon yöntemi kullanılarak 900°C, 1000°C ve 1100°C sıcaklıklarda 1, 2, 3 ve 4 saat sürelerde niobyumlama işlemine tabi tutulmuşlardır.

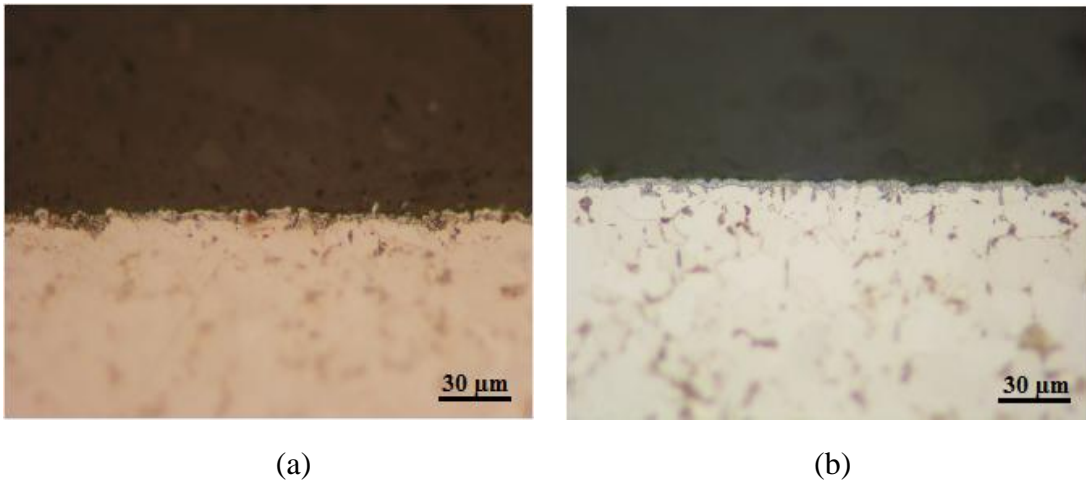
Niobyumlanan malzemelerin mikroyapıları, klasik metalografi teknikleri ile hazırlanarak, optik mikroskobu, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve SEM-EDS analizleri ile incelenmiştir. Nb esaslı tabakaların faz analizleri X-ışınları difraksiyon analizi ile yapılmıştır. Çeliklerin yüzeylerinde oluşan kaplama tabakalarının sertlikleri, Vickers indentasyon tekniği ile 10gr yük altında gerçekleştirilmiş ve sertlik değişimleri belirlenmiştir.

Ayrıca, 1000°C' de 2 saat süre ile niobyumlanan AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çeliklerinin aşınma davranışları 2,5N, 5N ve 10N yükler altında 0.1 m/s hızında 320 metre mesafede aşınma deneyi gerçekleştirilmek suretiyle belirlenmiştir. Aşınma yüzeylerin incelemeleri SEM ve EDS analizleri ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan incelemeler, analizler ve deneyler sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

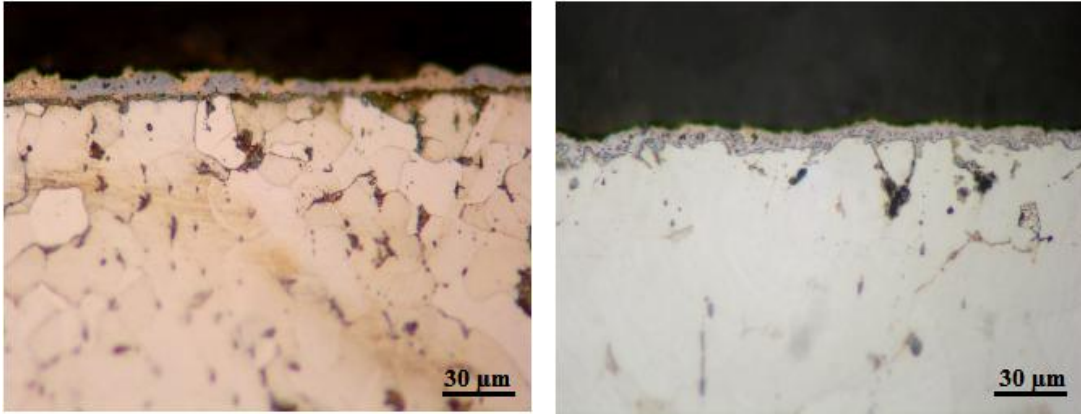
7.2. Mikroyapı İncelemeleri

Metalografi teknikleri ile hazırlanan çeliklerin optik mikroskop incelemeleri neticesinde, yüzeyde bir tabaka halinde kaplamanın gerçekleştiği kaplamanın matrisden farklı bir renk arz etmesi nedeniyle ayırt edilmiştir. İncelemelerde farklı şartlarda kaplama işlemine tabi tutulmuş çeliklerin yüzeylerinde düz ve homojen ve süreklilik arz eden bir tabakanın oluştuğu görülmektedir. Niobyumlanan çeliklerde kaplama tabakası, kaplama-matris ara yüzeyi ve matris açık bir şekilde ayırt edilmektedir. Şekil 7.1–7.28.’ de 900 °C – 1000 °C ve 1100 °C sıcaklıklarda 1, 2, 3 ve 4 saat sürelerde niobyumlama işlemine tabi tutulmuş olan AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çeliklerinin mikroyapıları görülmektedir. Ayrıca 1000°C’de 2 saat süreyle kaplanmış AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çeliklerinin SEM mikroyapı görüntüleri sırasıyla Şekil 7.7. -Şekil 7.14. -Şekil 7.21. ve Şekil 7.28.’de görülmektedir.

Gerçekleştirilen niobyumlama işlemi sonrasında, kaplama sıcaklığı ve süresine bağlı olarak bir kaplama tabakası ve matris fazından oluşan iki farklı bölge ortaya çıkmıştır. Ayrıca, kaplama zamanı ve sıcaklığına bağlı olarak tüm çeliklerin yüzeyinde oluşan kaplama tabakası kalınlığının arttığı mikroyapılardan açıkça görülmektedir.



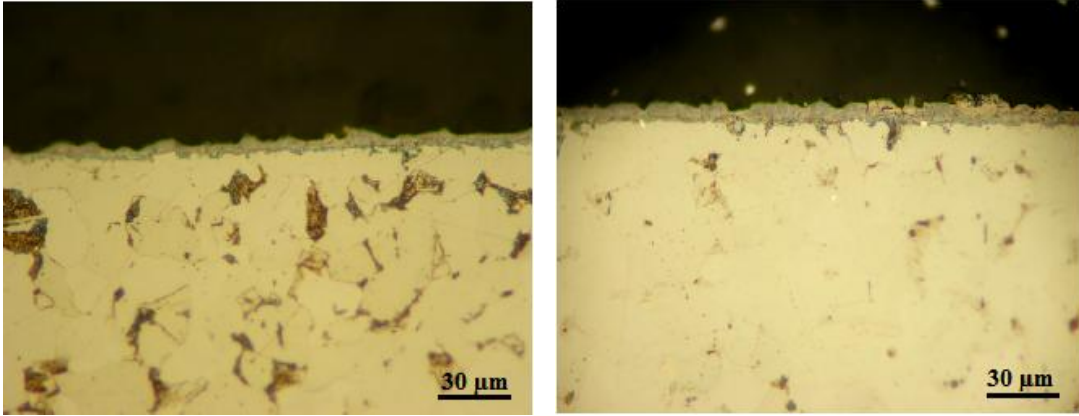
Şekil 7.1. 900°C sıcaklıkta (a) 1 saat ve (b) 2 saat süre ile niobyumlanan AISI 1010 çeliğinin mikroyapı görüntüleri



(a)

(b)

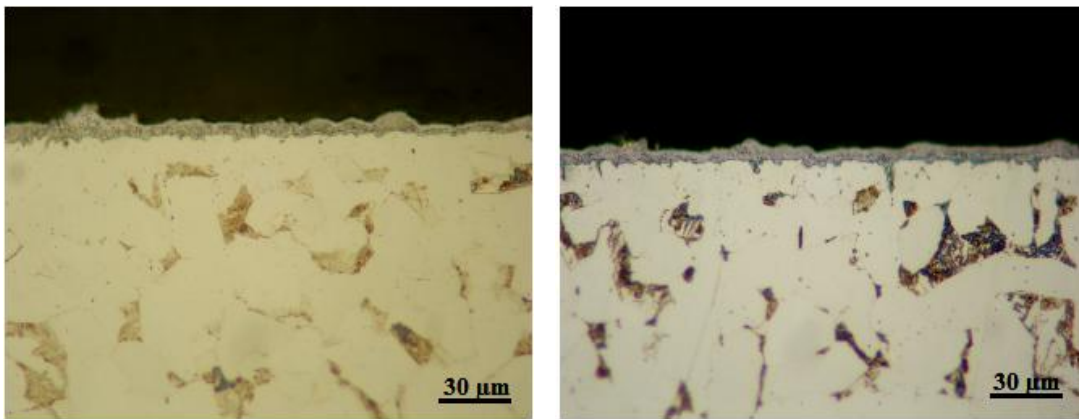
Şekil 7.2. 900°C sıcaklıkta (a) 3 saat ve (b) 4 saat süre ile niobyumlanan AISI 1010 çeliğinin mikroyapı görüntüleri



(a)

(b)

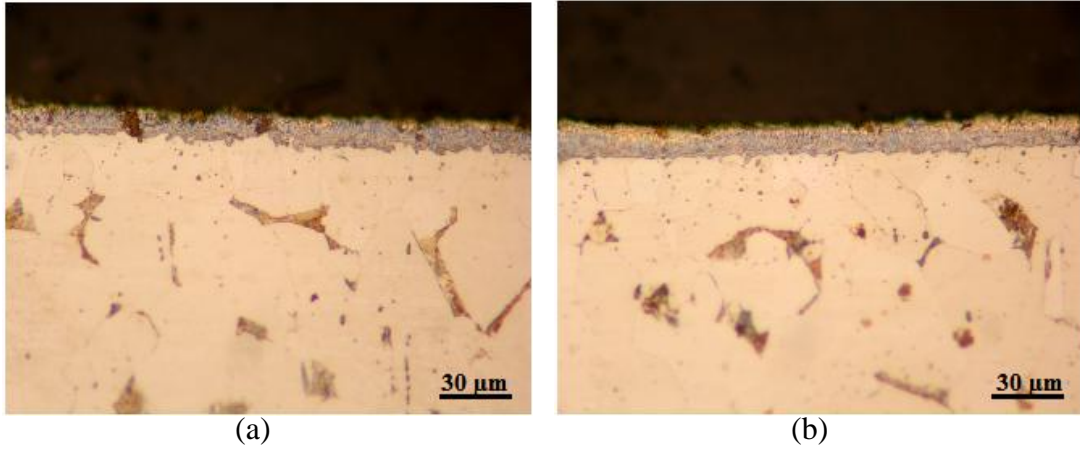
Şekil 7.3. 1000°C sıcaklıkta (a) 1 saat ve (b) 2 saat süre ile niobyumlanan AISI 1010 çeliğinin mikroyapı görüntüleri



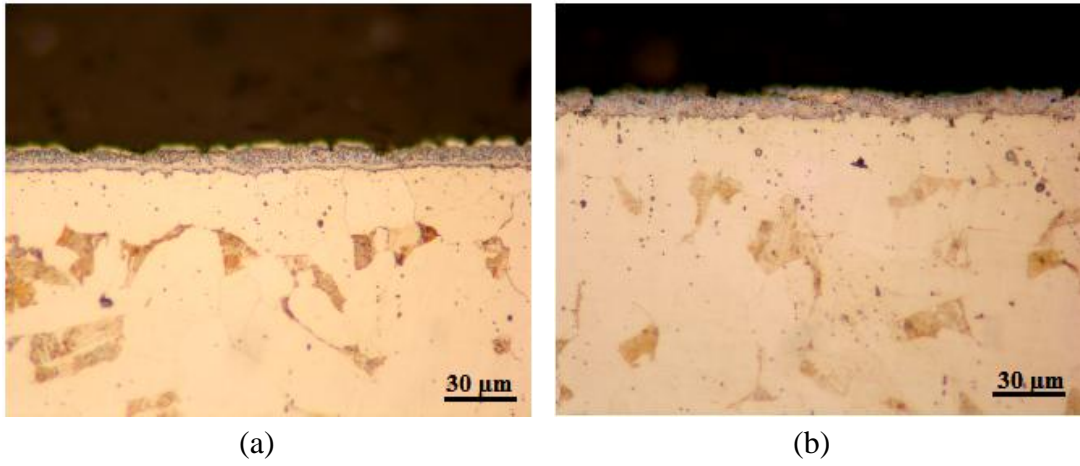
(a)

(b)

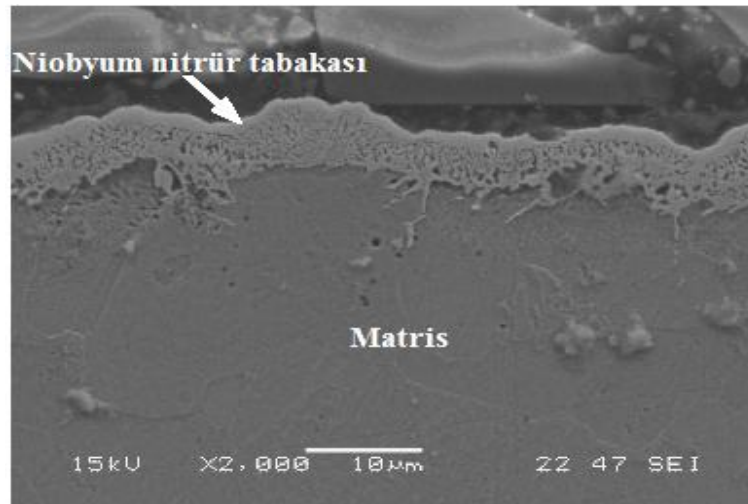
Şekil 7.4. 1000°C sıcaklıkta (a) 3 saat ve (b) 4 saat süre ile niobyumlanan AISI 1010 çeliğinin mikroyapı görüntüleri



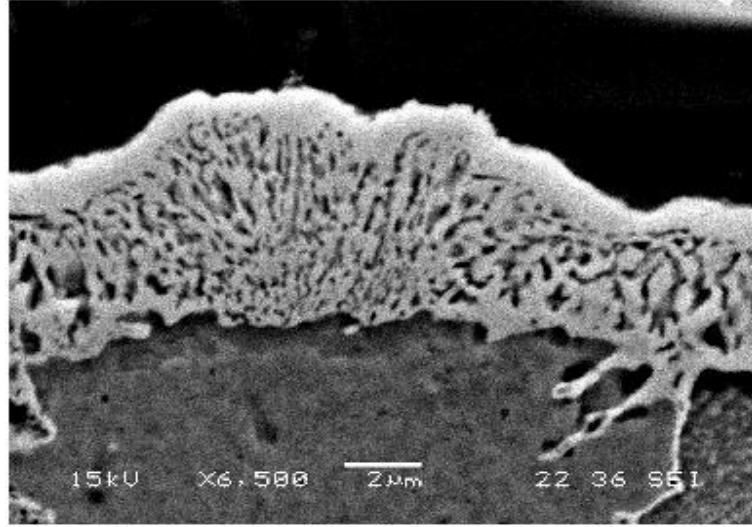
Şekil 7.5. 1100°C sıcaklıkta (a) 1 saat ve (b) 2 saat süre ile niobyumlanan AISI 1010 çeliğinin mikroyapı görüntüleri



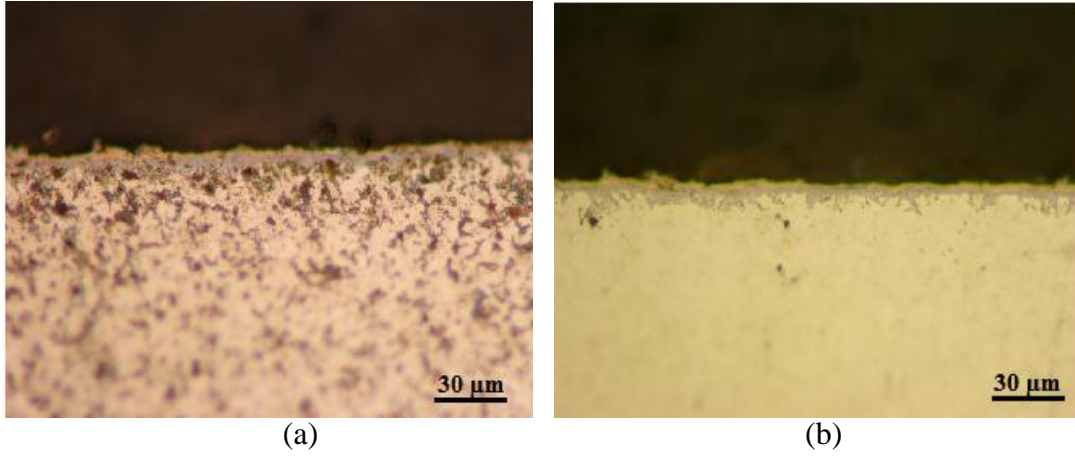
Şekil 7.6. 1100°C sıcaklıkta (a) 3 saat ve (b) 4 saat süre ile niobyumlanan AISI 1010 çeliğinin mikroyapı görüntüleri



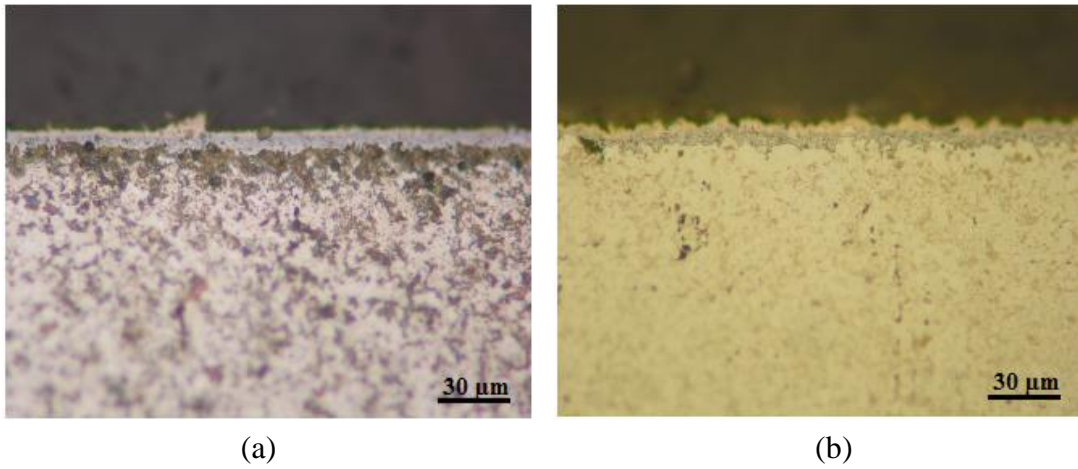
Şekil 7.7. 1000°C'de 2 saat süre ile niobyumlanmış AISI 1010 çeliğin farklı büyütmelerde SEM görüntüleri



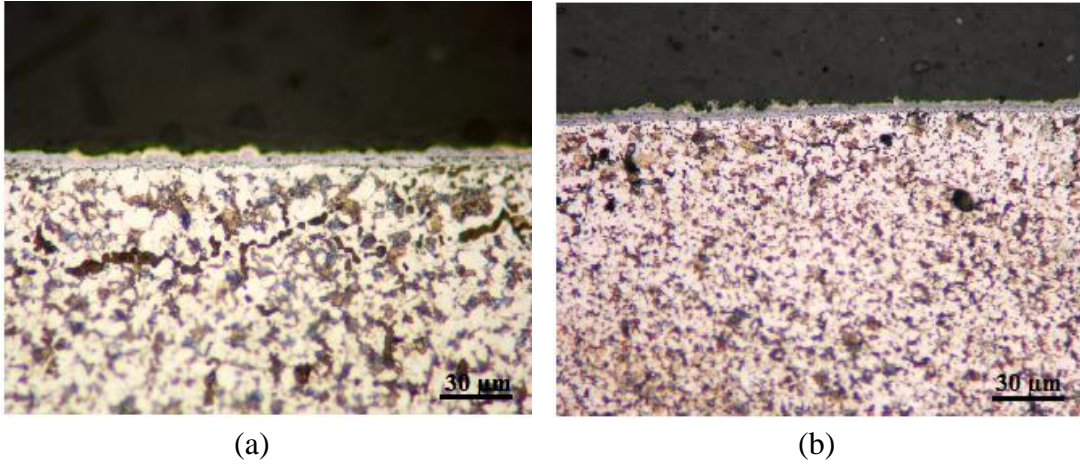
Şekil 7.7. Devam



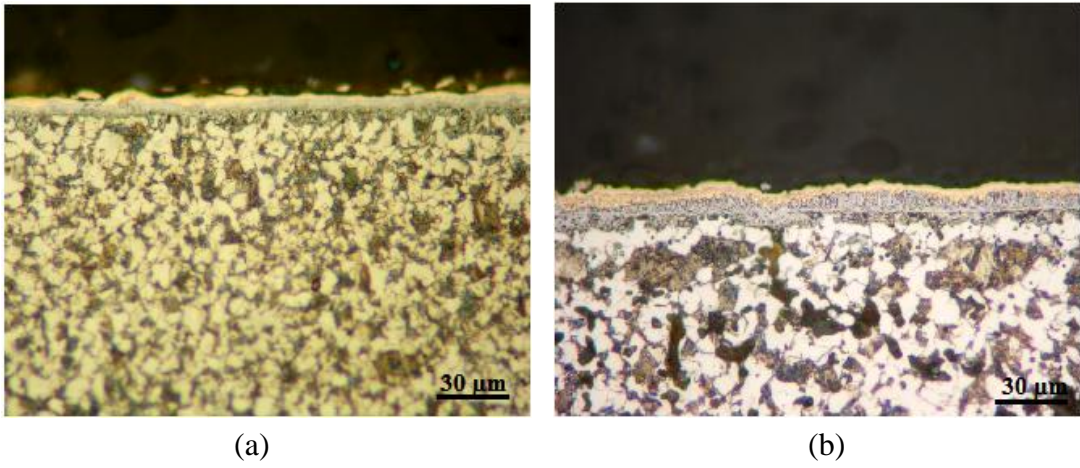
Şekil 7.8. 900°C sıcaklıkta (a) 1 saat ve (b) 2 saat süre ile niobyumlanan AISI 4140 çeliğinin mikroyapı görüntüleri



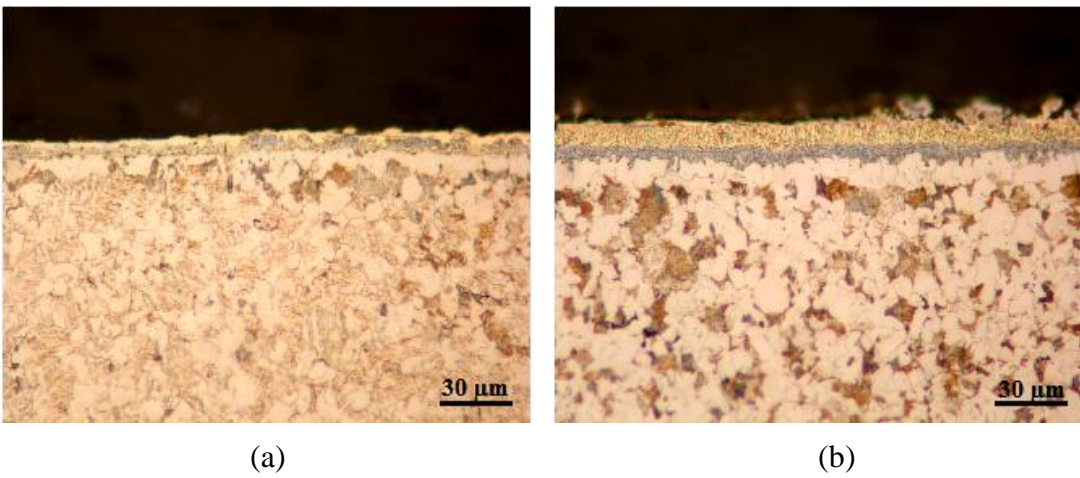
Şekil 7.9. 900°C sıcaklıkta (a) 3 saat ve (b) 4 saat süre ile niobyumlanan AISI 4140 çeliğinin mikroyapı görüntüleri



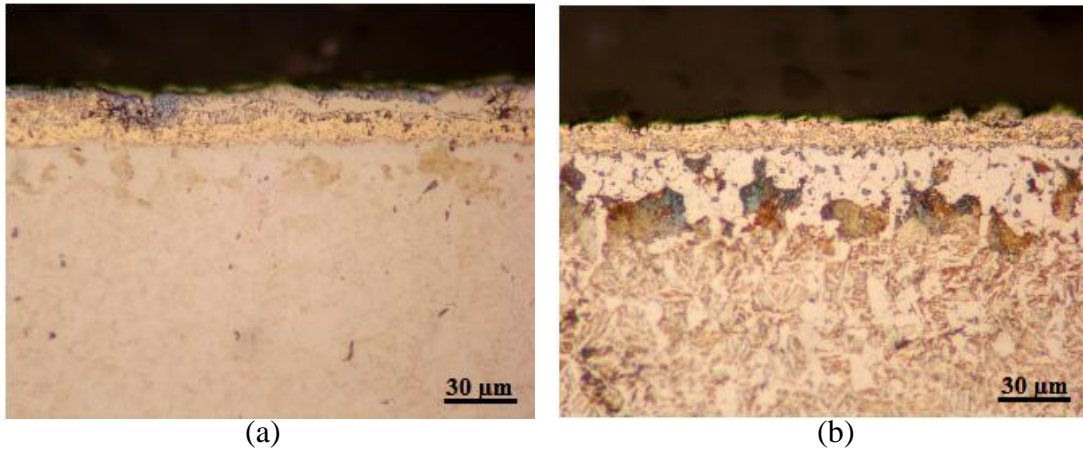
Şekil 7.10. 1000°C sıcaklıkta (a) 1 saat ve (b) 2 saat süre ile niobyumlanan AISI 4140 çeliğinin mikroyapı görüntüleri



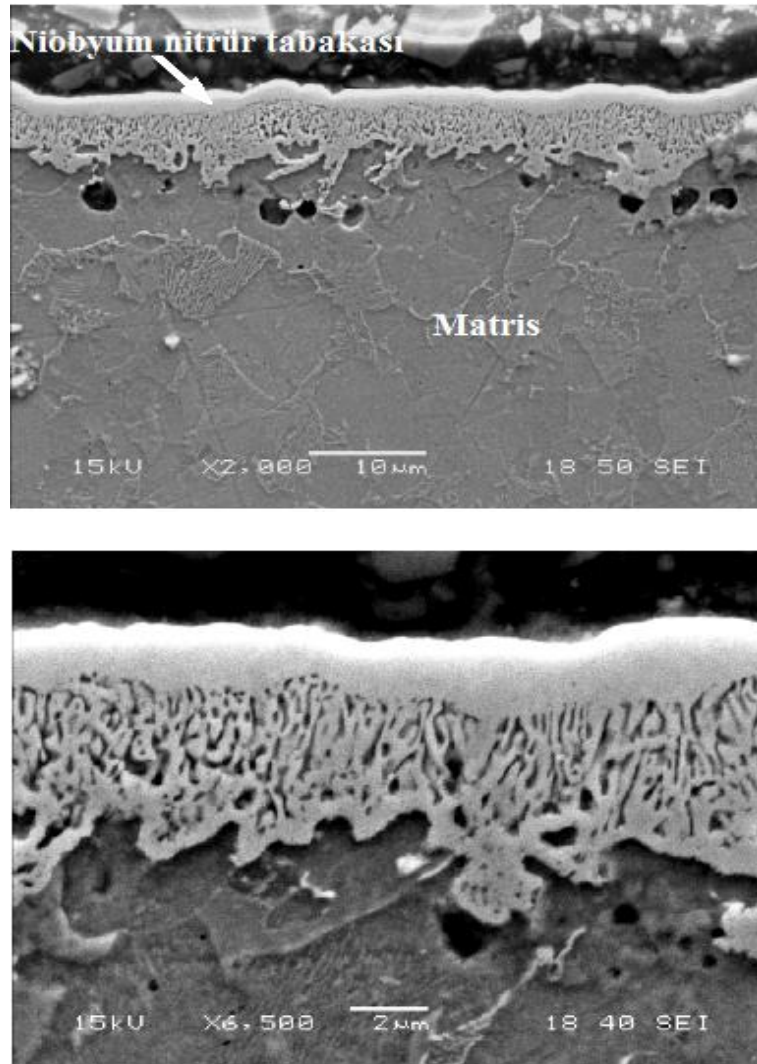
Şekil 7.11. 1000°C sıcaklıkta (a) 3 saat ve (b) 4 saat süre ile niobyumlanan AISI 4140 çeliğinin mikroyapı görüntüleri



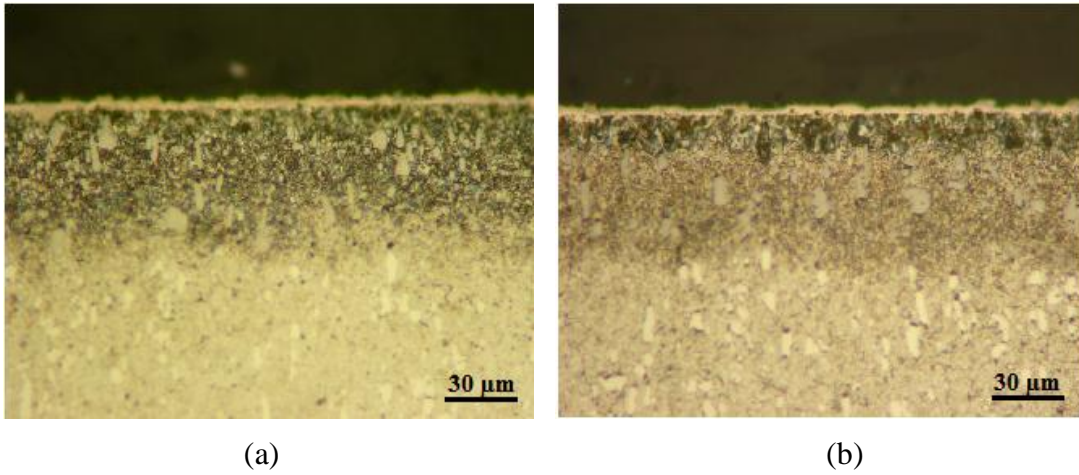
Şekil 7.12. 1100°C sıcaklıkta (a) 1 saat ve (b) 2 saat süre ile niobyumlanan AISI 4140 çeliğinin mikroyapı görüntüleri



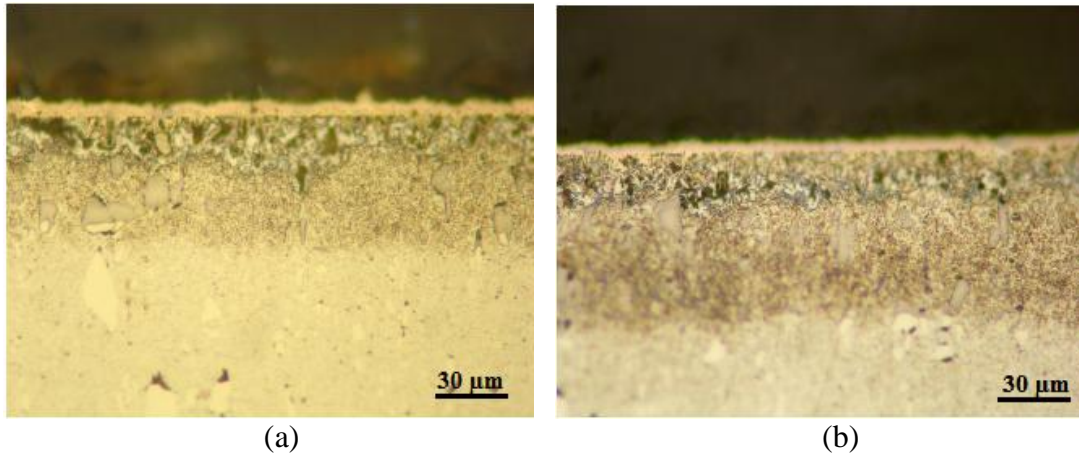
Şekil 7.13. 1100°C sıcaklıkta (a) 3 saat ve (b) 4 saat süre ile niobyumlanan AISI 4140 çeliğinin mikroyapı görüntüleri



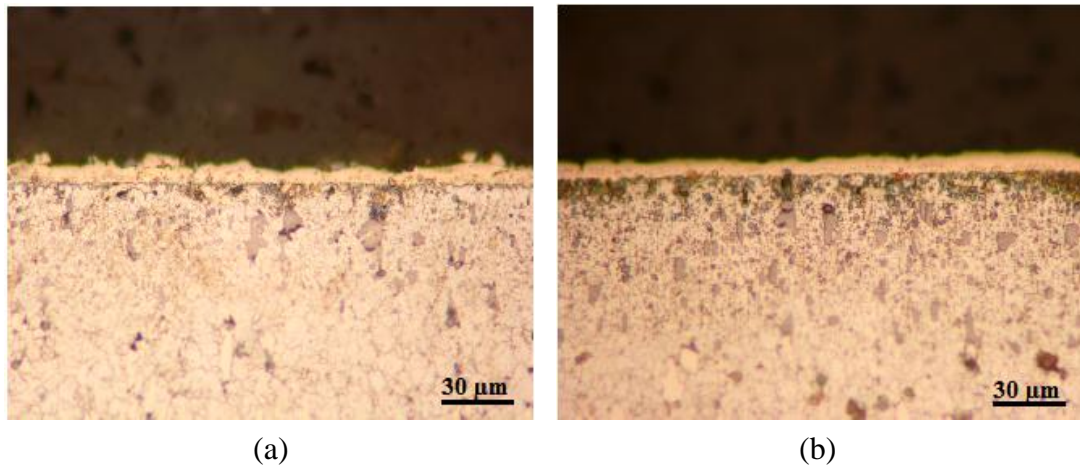
Şekil 7.14. 1000°C'de 2 saat süre ile niobyumlanmış AISI 4140 çeliğın farklı büyütmelerde SEM görüntüleri



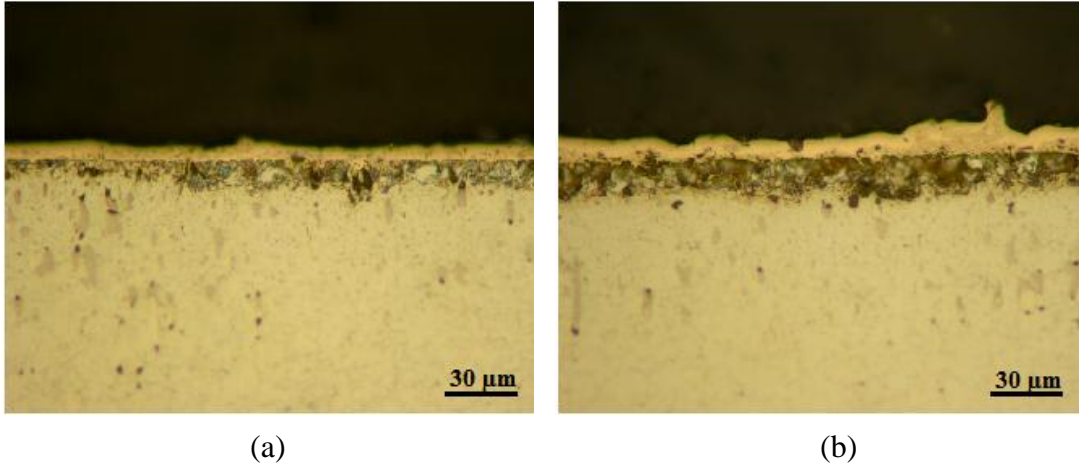
Şekil 7.15. 900°C sıcaklıkta (a) 1 saat ve (b) 2 saat süre ile niobyumlanan AISI D2 çeliğinin mikroyapı görüntüleri



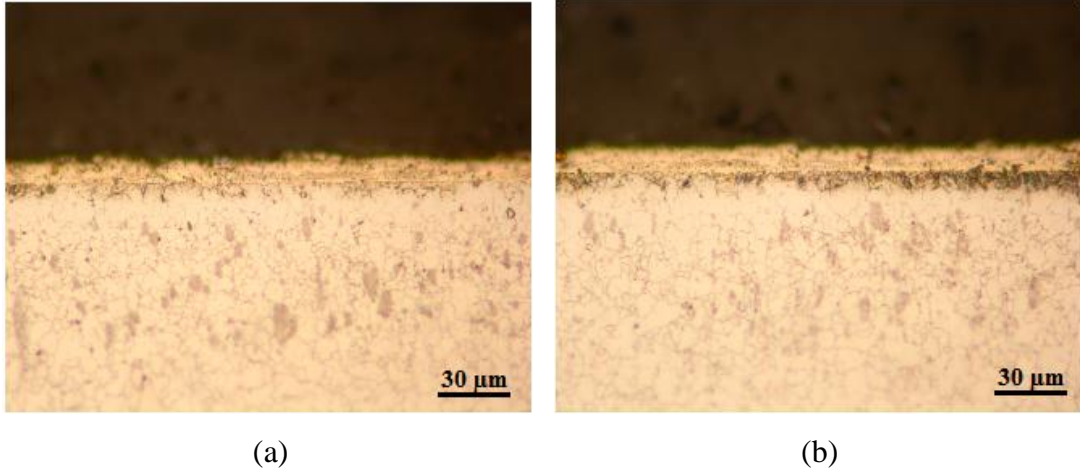
Şekil 7.16. 900°C sıcaklıkta (a) 3 saat ve (b) 4 saat süre ile niobyumlanan AISI D2 çeliğinin mikroyapı görüntüleri



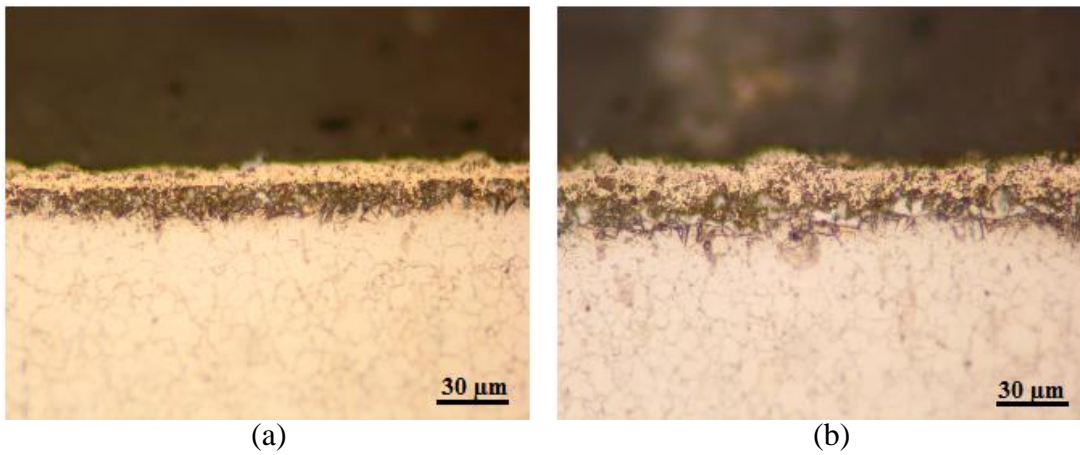
Şekil 7.17. 1000°C sıcaklıkta (a) 1 saat ve (b) 2 saat süre ile niobyumlanan AISI D2 çeliğinin mikroyapı görüntüleri



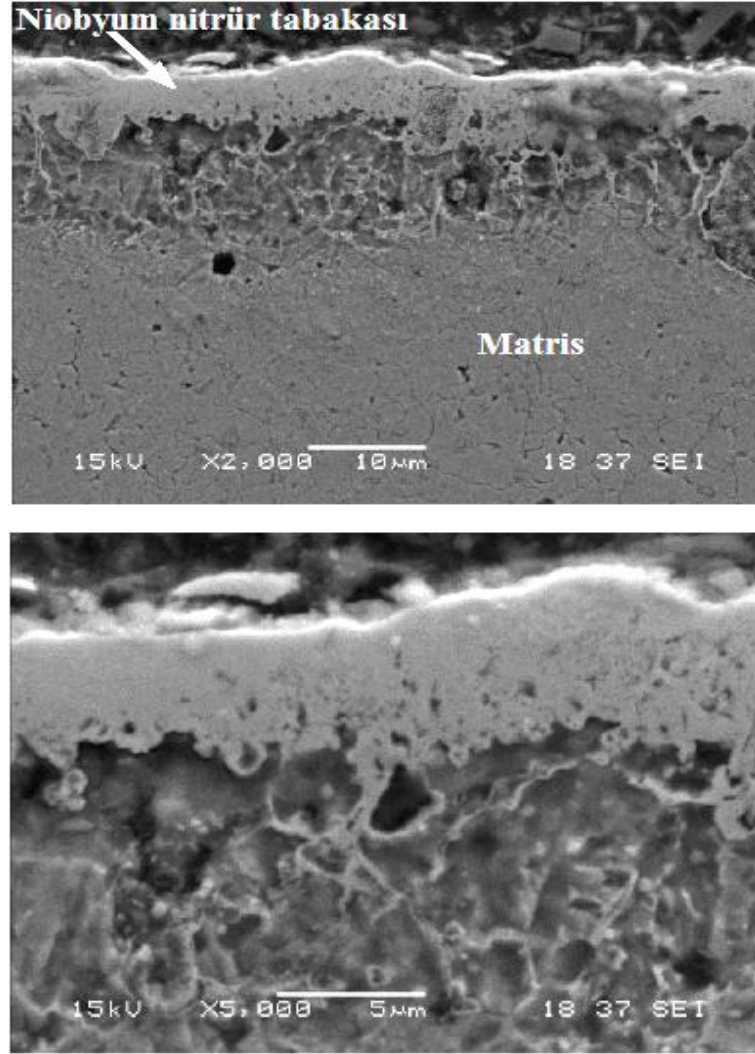
Şekil 7.18. 1000°C sıcaklıkta (a) 3 saat ve (b) 4 saat süre ile niobyumlanan AISI D2 çeliğinin mikroyapı görüntüleri



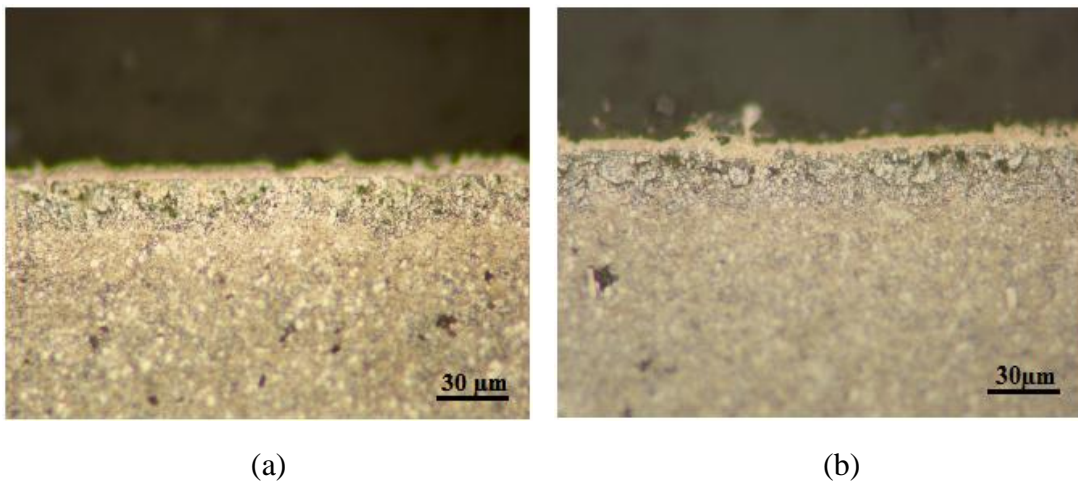
Şekil 7.19. 1100°C sıcaklıkta (a) 1 saat ve (b) 2 saat süre ile niobyumlanan AISI D2 çeliğinin mikroyapı görüntüleri



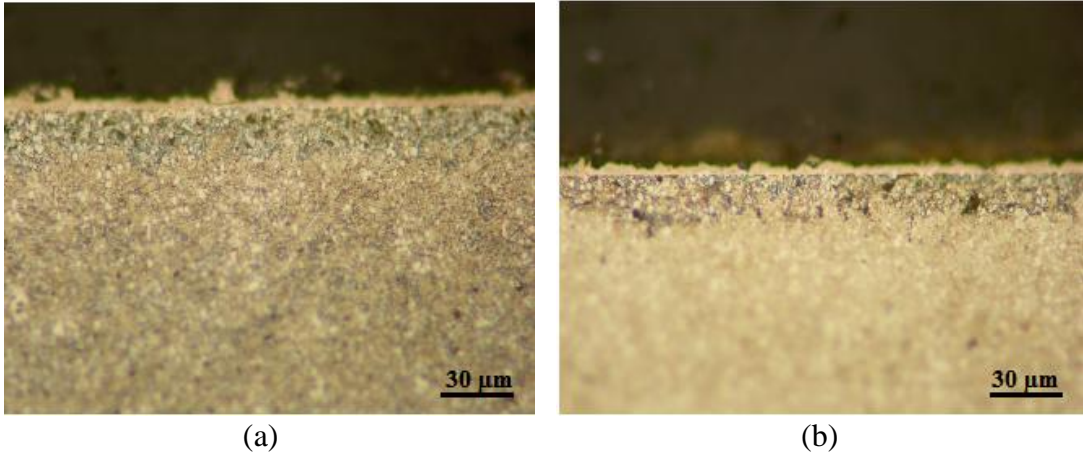
Şekil 7.20. 1100°C sıcaklıkta (a) 3 saat ve (b) 4 saat süre ile niobyumlanan AISI D2 çeliğinin mikroyapı görüntüleri



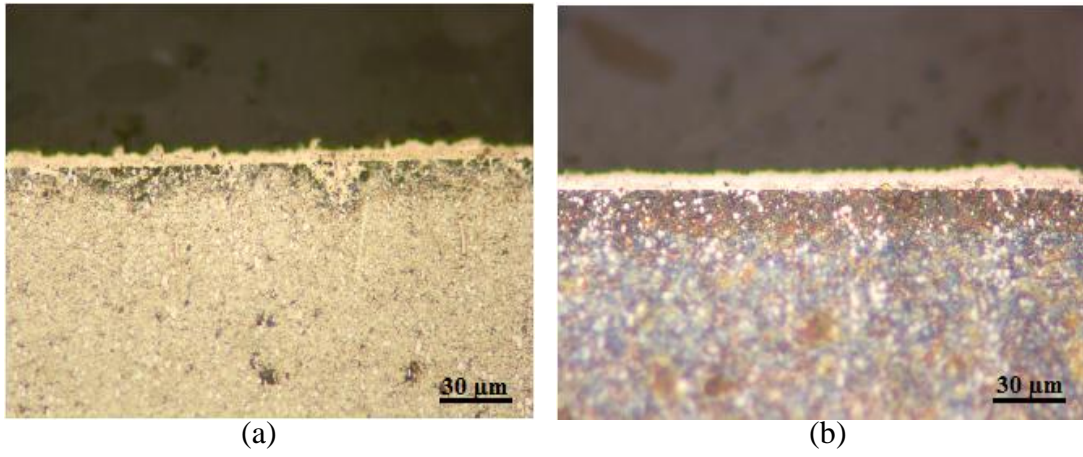
Şekil 7.21. 1000°C'de 2 saat süre ile niobyumlanmış AISI D2 çeliğin farklı büyütmelerde SEM görüntüleri



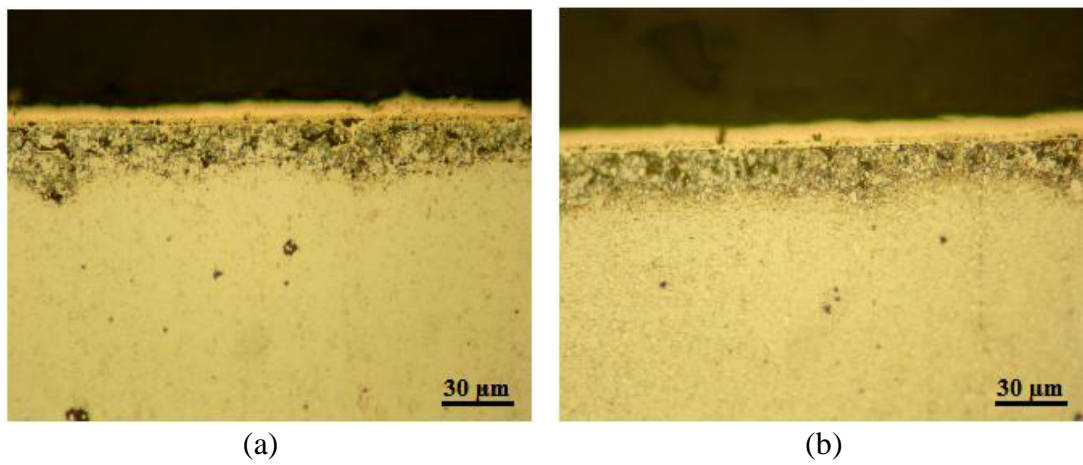
Şekil 7.22. 900°C sıcaklıkta (a) 1 saat ve (b) 2 saat süre ile niobyumlanan AISI M2 çeliğinin mikroyapı görüntüleri



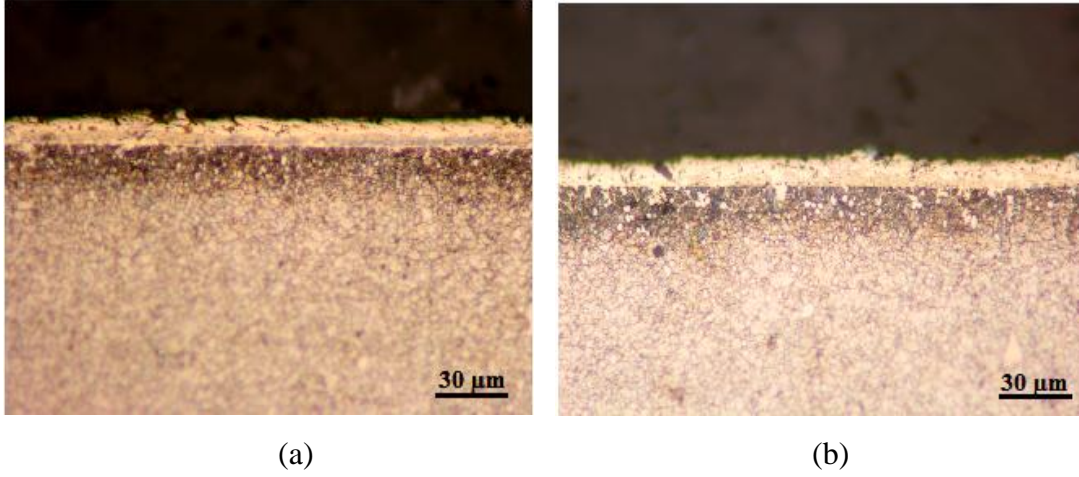
Şekil 7.23. 900°C sıcaklıkta (a) 3 saat ve (b) 4 saat süre ile niobyumlanan AISI M2 çeliğinin mikroyapı görüntüleri



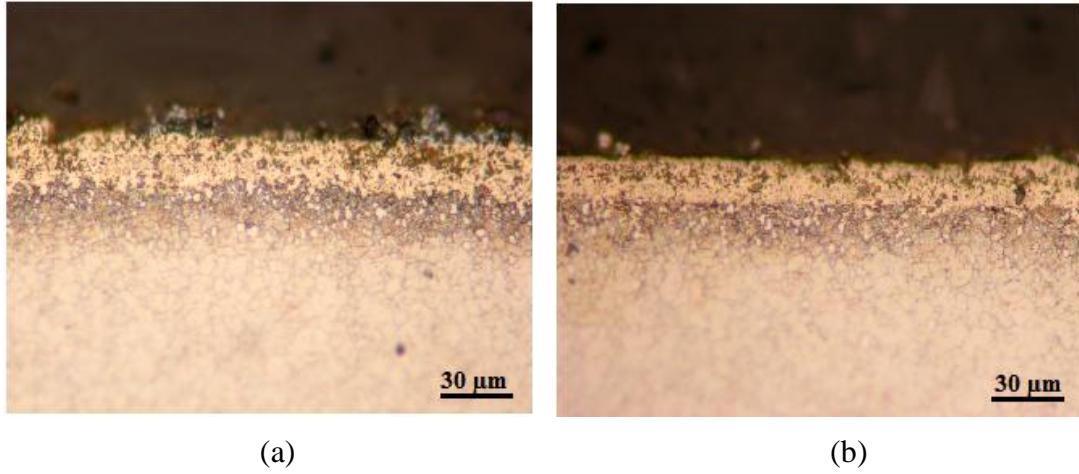
Şekil 7.24. 1000°C sıcaklıkta (a) 1 saat ve (b) 2 saat süre ile niobyumlanan AISI M2 çeliğinin mikroyapı görüntüleri



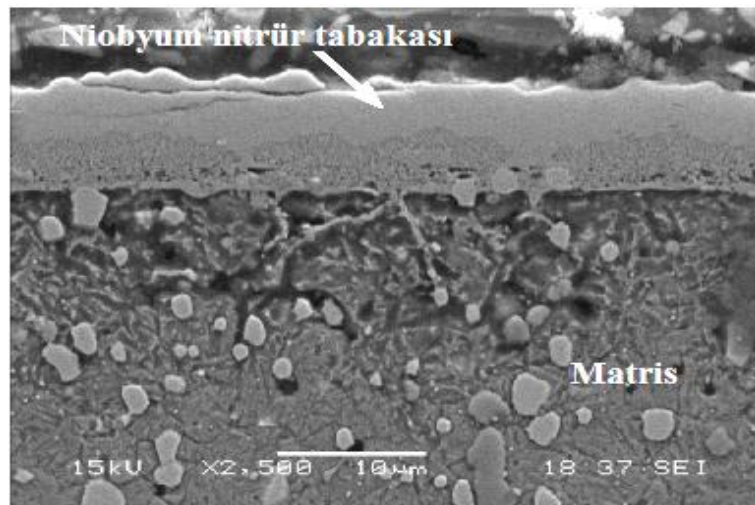
Şekil 7.25. 1000°C sıcaklıkta (a) 3 saat ve (b) 4 saat süre ile niobyumlanan AISI M2 çeliğinin mikroyapı görüntüleri



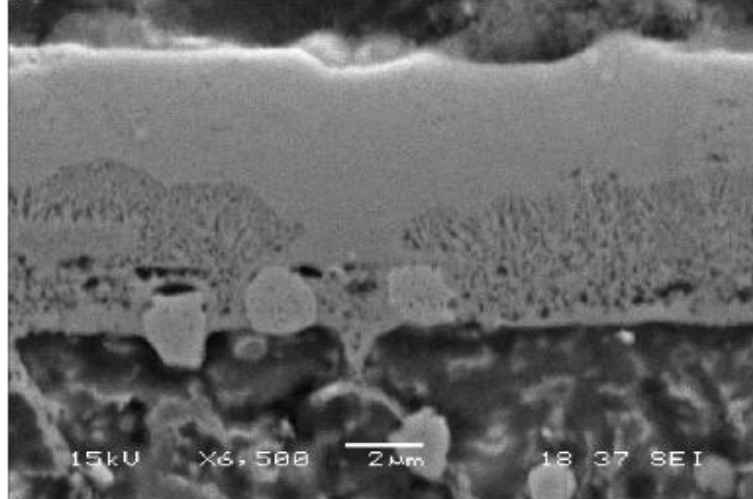
Şekil 7.26. 1100°C sıcaklıkta (a) 1 saat ve (b) 2 saat süre ile niobyumlanan AISI M2 çeliğinin mikroyapı görüntüleri



Şekil 7.27. 1100°C sıcaklıkta (a) 3 saat ve (b) 4 saat süre ile niobyumlanan AISI M2 çeliğinin mikroyapı görüntüleri



Şekil 7.28. 1000°C'de 2 saat süre ile niobyumlanmış AISI M2 çeliğinin farklı büyütme SEM görüntüleri



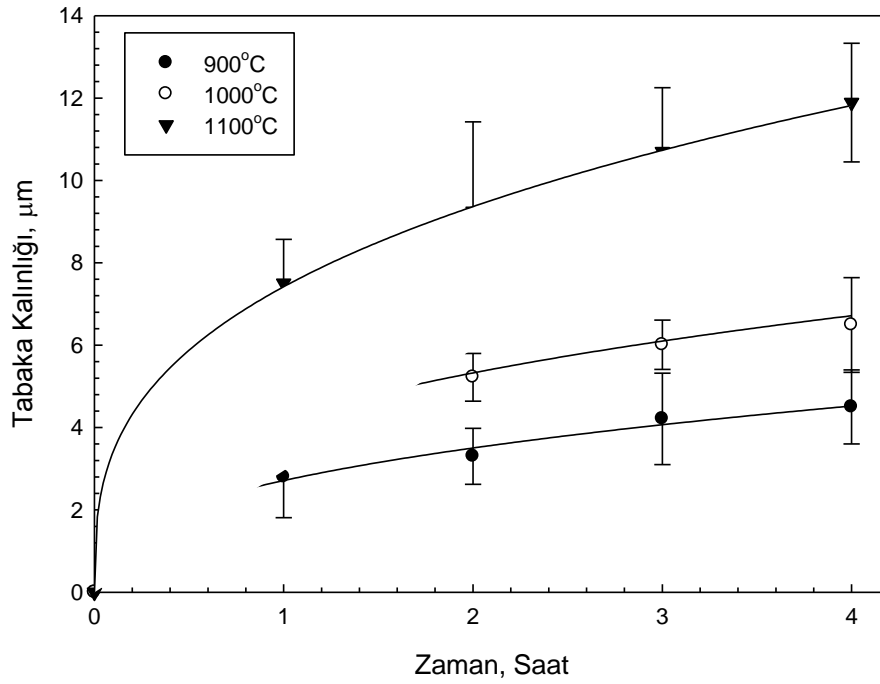
Şekil 7.28. Devam

900°C, 1000°C ve 1100°C sıcaklıklarda 1-4 saat süre ile niobyumlanmış AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çeliklerinin yüzeyinde oluşan niobyum esaslı tabakanın kalınlıklarının değişimi Tablo 7.1 ve Şekil 7.29-7.32 de verilmektedir. Kaplama zamanı ve sıcaklığına bağlı olarak tüm çelikler için tabaka kalınlıklarında artış meydana geldiği görülmüştür. En yüksek tabaka kalınlığı değerleri AISI M2 çeliğinde elde edilmiştir. Zaman ve sıcaklığa bağlı olarak AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çeliklerinin yüzeyinde oluşan niobyum nitrür tabakalarının kalınlıkları sırasıyla 2.80 µm - 11.89 µm, 3.61 µm - 13.71 µm, 3.16 µm - 13.16 µm ve 3.85 µm -16.77 µm değerleri arasında değişmektedir.

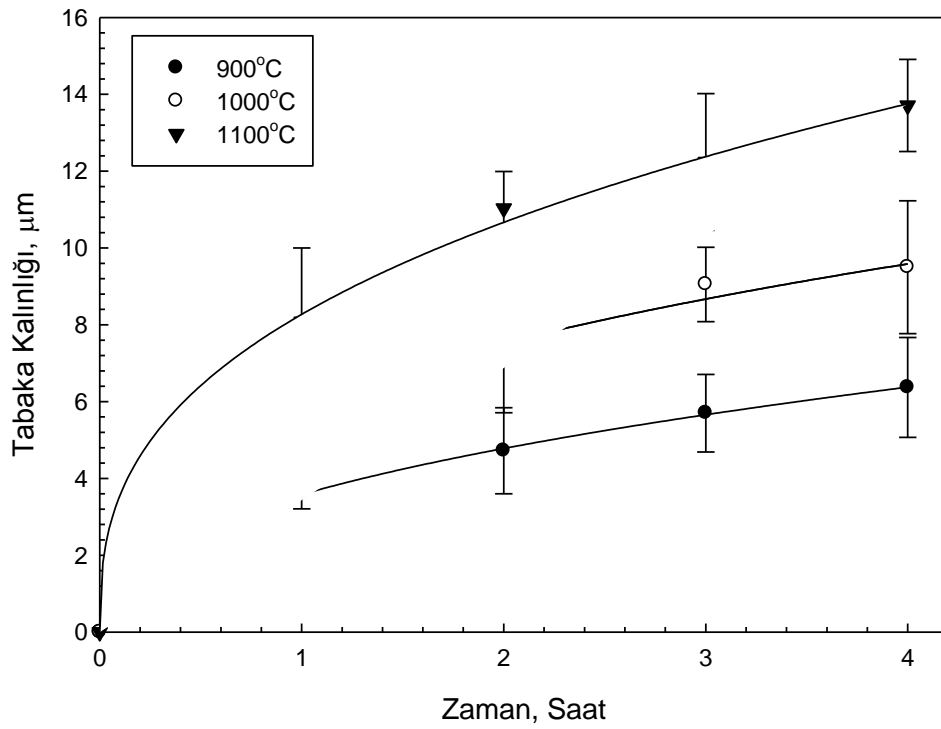
Ayrıca, yapılan deney şartları dışında çalışılması muhtemel kaplama zamanları ve sıcaklıkları için elde edilecek tabaka kalınlıklarını önceden belirlemek amacıyla tüm çelikler için kaplama zamanı ve sıcaklığına bağlı olarak tabaka kalınlığının değişimi gösteren bir kontur diyagramlar çıkarılmıştır. Bu amaçla Sigma Plot 10.0 paket programı kullanılmıştır. Şekil 7.33-7.36' de sırasıyla AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çeliklerinin yüzeyinde oluşan tabaka kalınlıklarının kontur diyagramları görülmektedir.

Tablo 7.1 Zaman ve sıcaklığa bağlı olarak AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çeliklerinin yüzeyinde oluşan niobyum esaslı tabakaların kalınlıkları

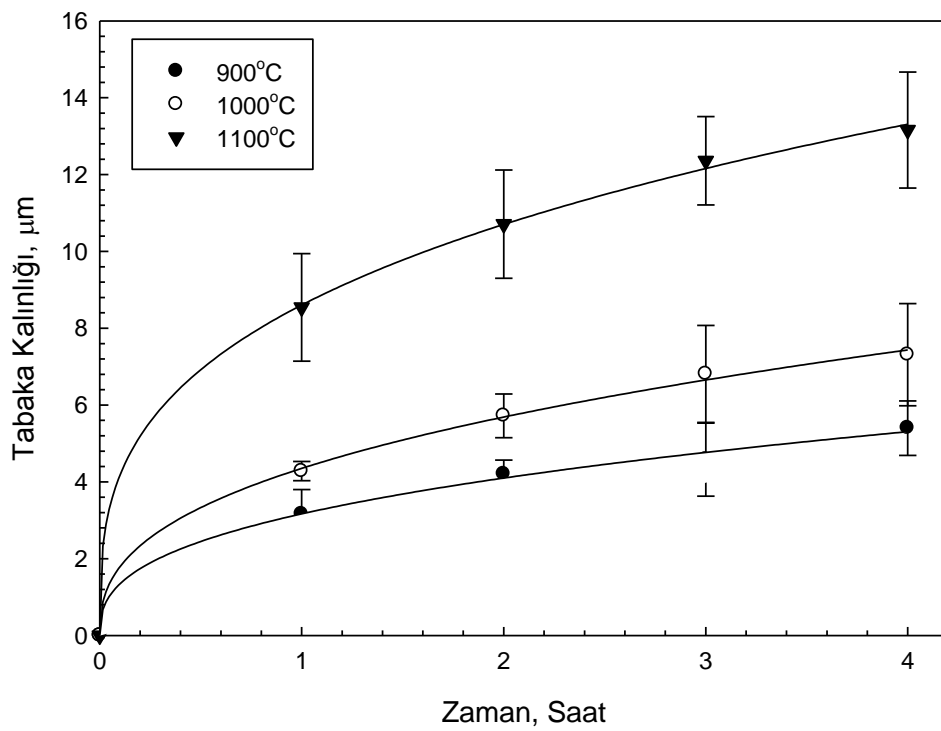
Tabaka Kalınlığı, μm				
Numune	Zaman, saat	900°C	1000°C	1100°C
AISI 1010	1	2,8±0,9	3,9±0,6	7,5±1
	2	3,3±0,6	5,22±0,5	9,25±2,1
	3	4,21±1,1	6,01±0,6	10,7±1,5
	4	4,5±0,9	6,49±1,1	11,89±1,4
AISI 4140	1	3,61±0,4	6,1±1,7	8,08±1,9
	2	4,72±1,1	7,05±1,3	11,03±0,9
	3	5,7±1	9,05±0,9	12,24±1,7
	4	6,37±1,3	9,5±1,7	13,71±1,2
AISI D2	1	3,16±0,6	4,28±0,2	8,54±1,4
	2	4,2±0,3	5,72±0,5	10,71±1,4
	3	4,58±0,9	6,81±1,2	12,36±1,1
	4	5,4±0,7	7,31±1,3	13,16±1,5
AISI M2	1	3,85±0,9	6,46±1,7	9,9±1,4
	2	4,51±0,7	7,63±0,5	12,18±2,3
	3	5,9±0,6	8,3±0,8	15,13±1,6
	4	5,96±0,9	9,52±1	16,77±2,1



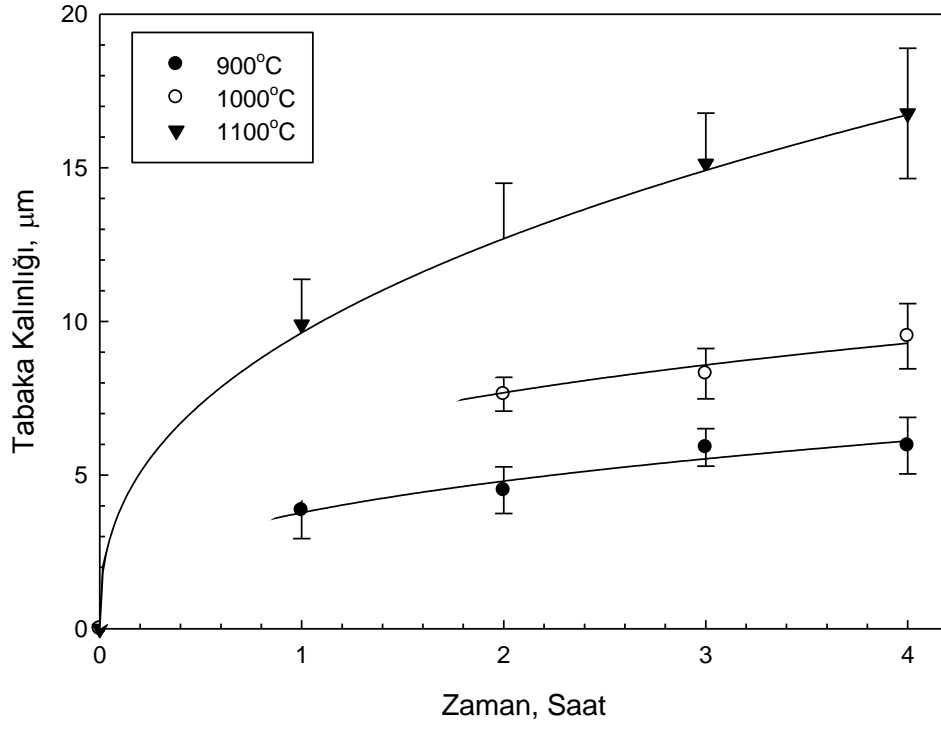
Şekil 7.29. 900°C 1000°C ve 1100 °C’ de kaplama işlemine tabi tutulmuş AISI 1010 çeliğinin kaplama zamanına bağlı olarak tabaka kalınlığı değişimi



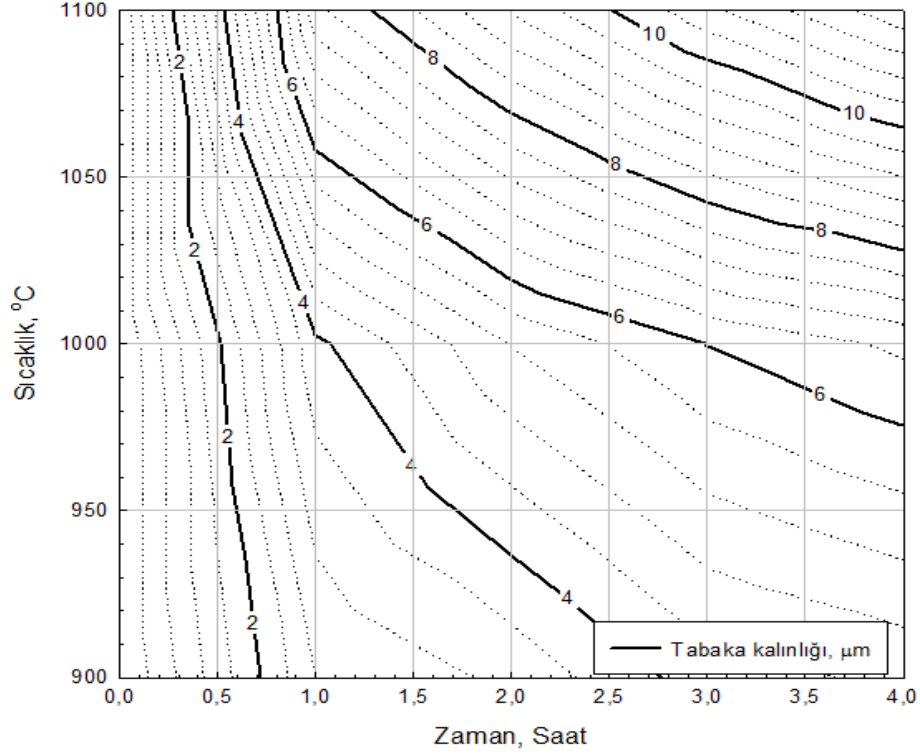
Şekil 7.30. 900°C 1000°C ve 1100 °C' de kaplama işlemine tabi tutulmuş AISI 4140 çeliğinin kaplama zamanına bağlı olarak tabaka kalınlığı değişimi



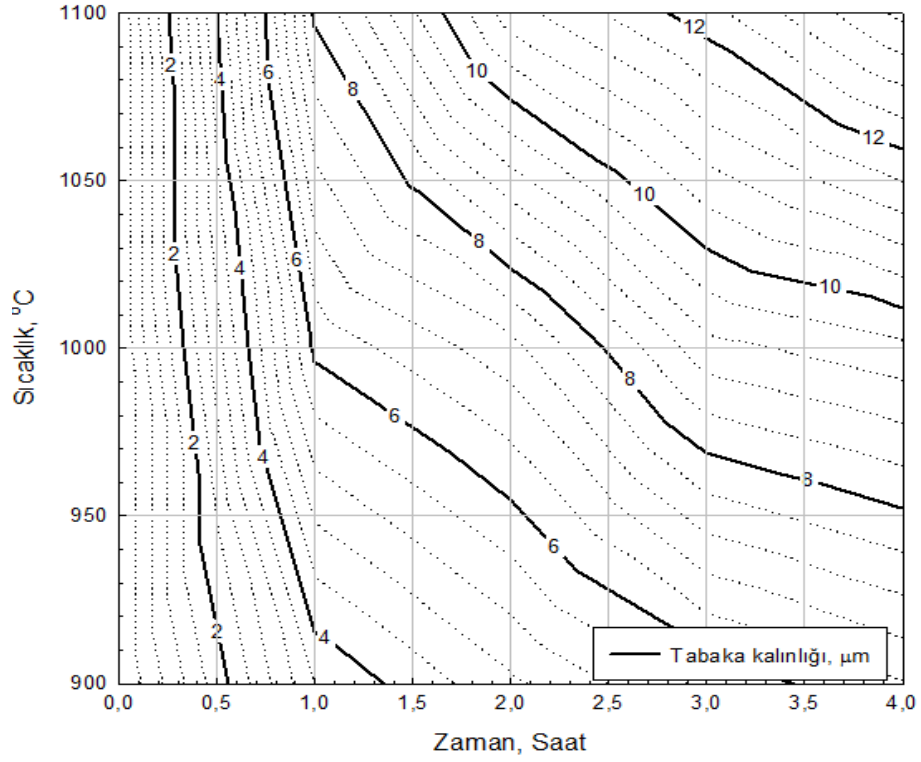
Şekil 7.31. 900°C 1000°C ve 1100 °C' de kaplama işlemine tabi tutulmuş AISI D2 çeliğinin kaplama zamanına bağlı olarak tabaka kalınlığı değişimi



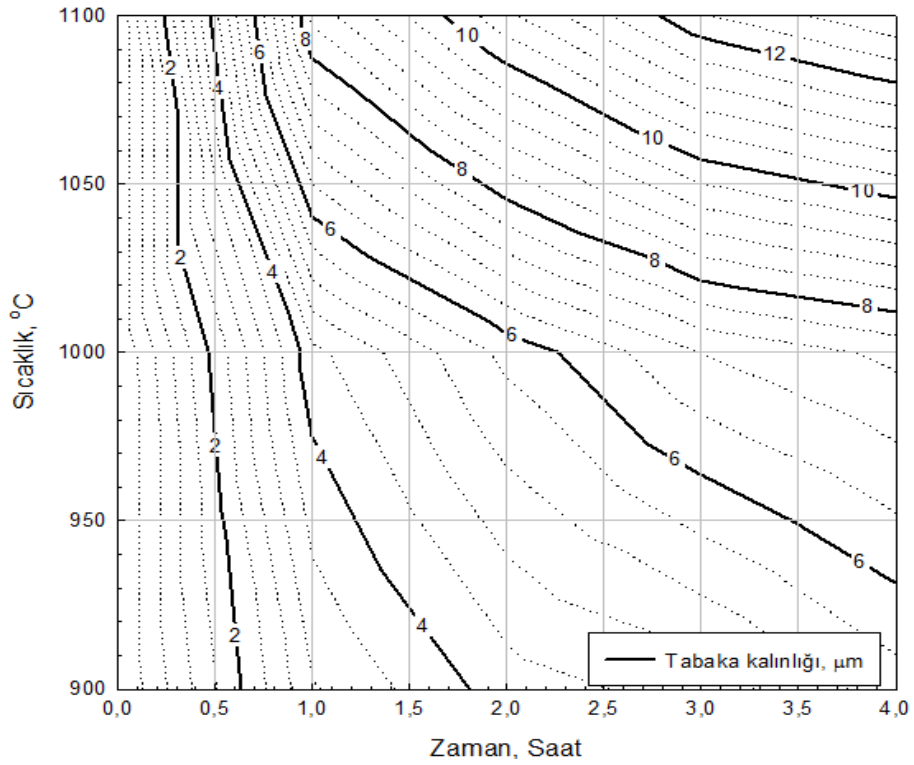
Şekil 7.32. 900°C 1000°C ve 1100 °C' de kaplama işlemine tabi tutulmuş AISI M2 çeliğinin kaplama zamanına bağlı olarak tabaka kalınlığı değişimi



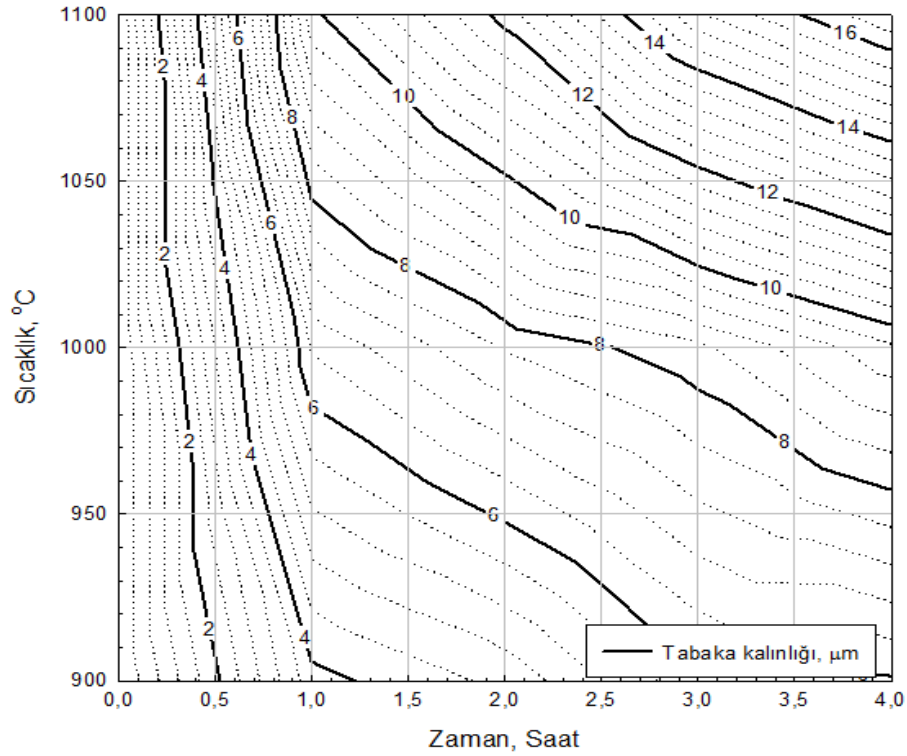
Şekil 7.33. Niobyumlama işlemine tabi tutulmuş AISI 1010 çeliğinin sıcaklığa ve kaplama zamanına bağlı olarak tabaka kalınlığı değişimi



Şekil 7.34. Niobiumlama işlemine tabi tutulmuş AISI 4140 çeliğinin sıcaklığa ve kaplama zamanına bağlı olarak tabaka kalınlığı değişimi



Şekil 7.35. Niobiumlama işlemine tabi tutulmuş AISI D2 çeliğinin sıcaklığa ve kaplama zamanına bağlı olarak tabaka kalınlığı değişimi



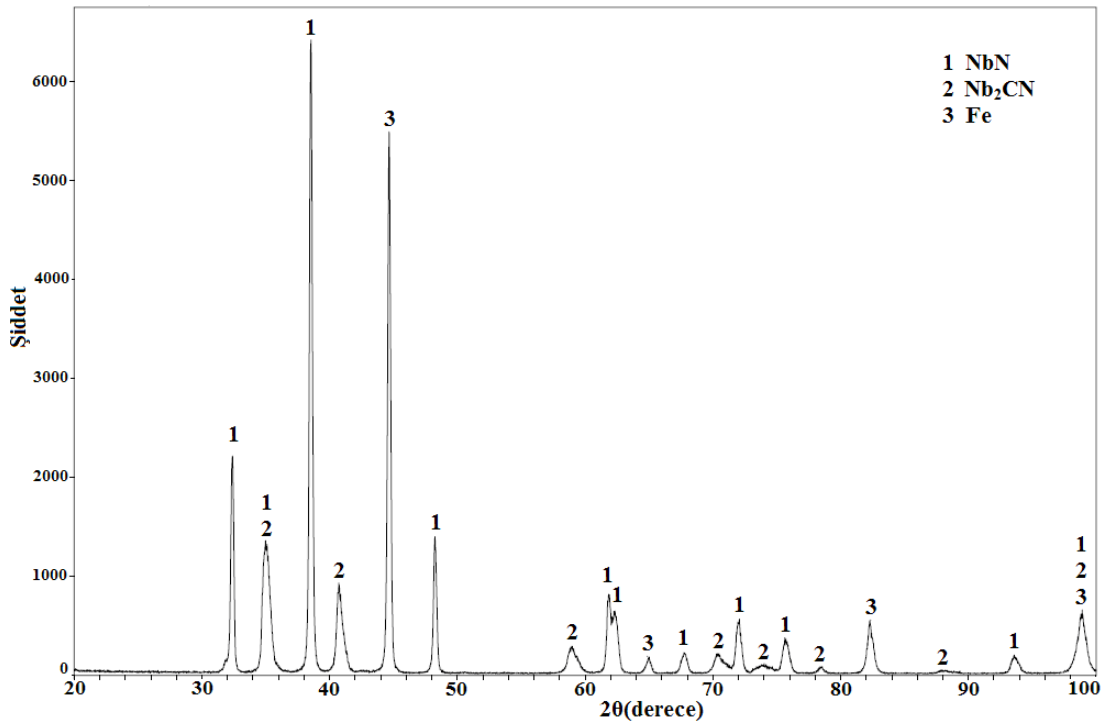
Şekil 7.36. Niobiyumlama işlemine tabi tutulmuş AISI M2 çeliğinin sıcaklığa ve kaplama zamanına bağlı olarak tabaka kalınlığı değişimi

7.3. X-Işınları Difraksiyon Analizi

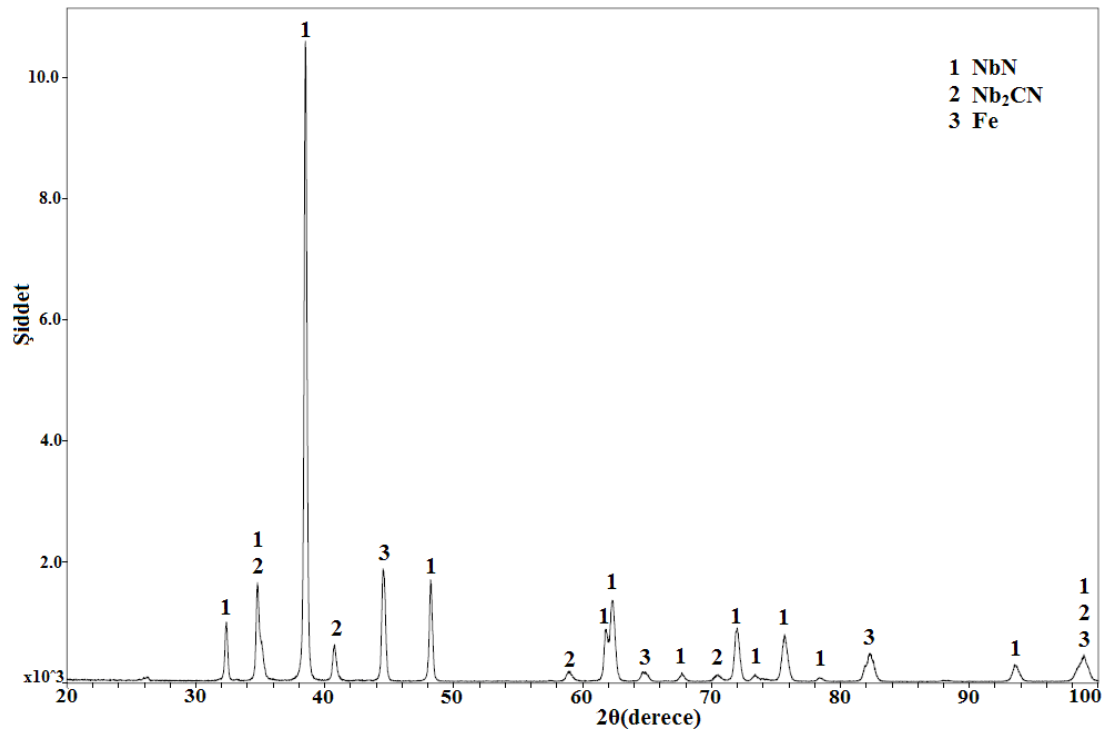
Niobiyum nitrür kaplanan çeliklerin yüzeyinde meydana gelen kaplama tabakasını meydana getiren fazları tespit edebilmek amacı ile X-ışınları difraksiyon analiz yöntemi kullanılmıştır. Bu amaçla RIGAKU D/MAX/2200 PC marka x-ışınları difraktometresi kullanılmıştır. Analizlerde Cu K α ($\lambda = 1.5408 \text{ \AA}$) ışını kullanılarak oluşan fazların tespitinde ASTM kartlarından faydalanılmıştır.

900°C, 1000°C ve 1100°C sıcaklıklarda 2 saat süreyle niobiyumlanmış AISI 1010, AISI 4140, AISI M2 ve AISI D2 çeliklerinin x-ışınları difraksiyon analizleri gerçekleştirilmiş ve yüzeyde oluşan tabakaların NbN, Nb₂CN, Fe₃Nb₃C ve çeliğe göre değişen çeşitli karbürlerden oluştuğu belirlenmiştir. Şekil 7.37-7.48'de 900°C,

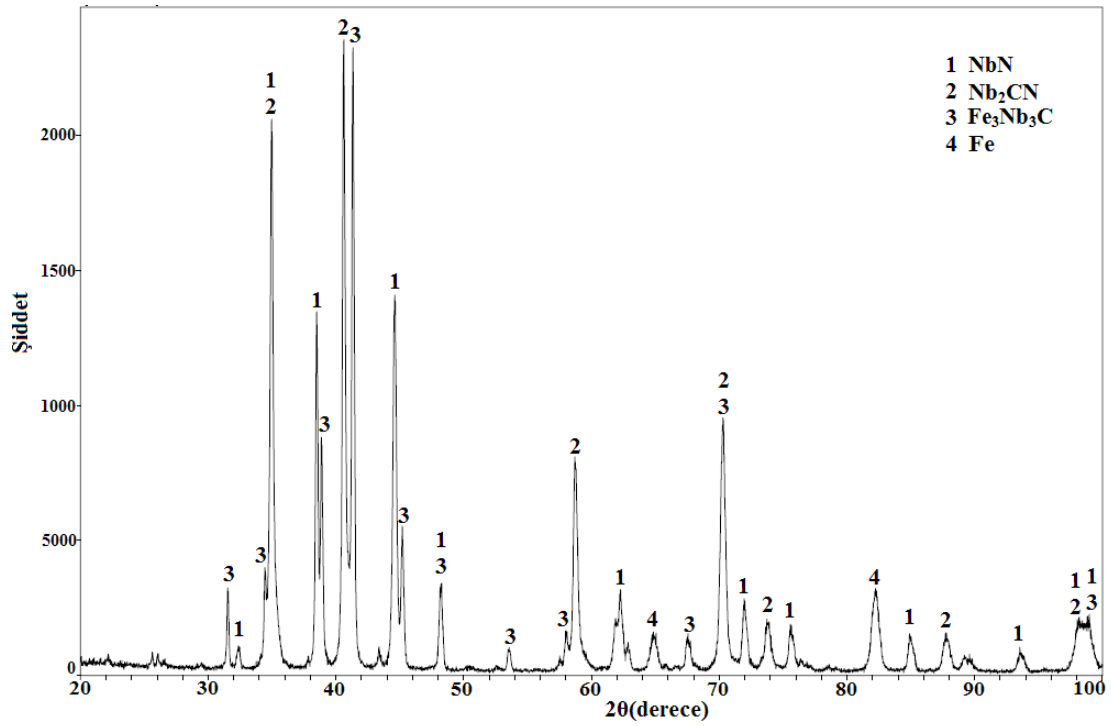
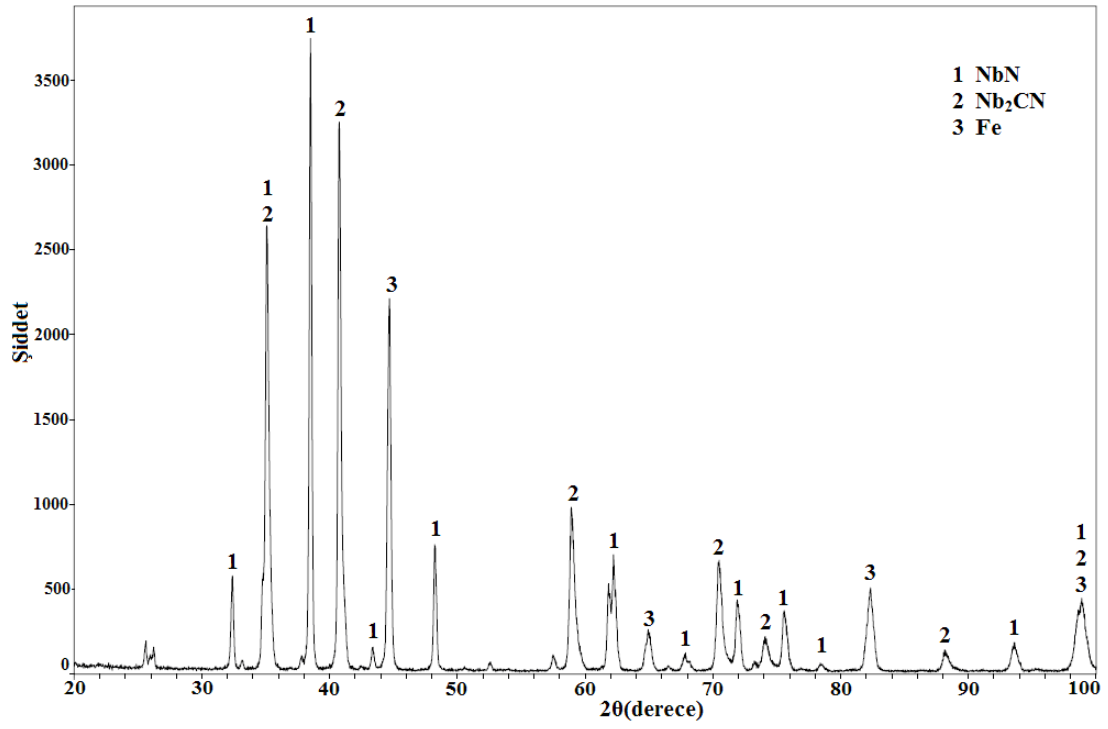
1000°C ve 1100°C sıcaklıklarda 2 saat süreyle niobyumlanmış çeliklerin yüzeyinde oluşan tabakaların x-ışınları difraksiyon paternleri görülmektedir.

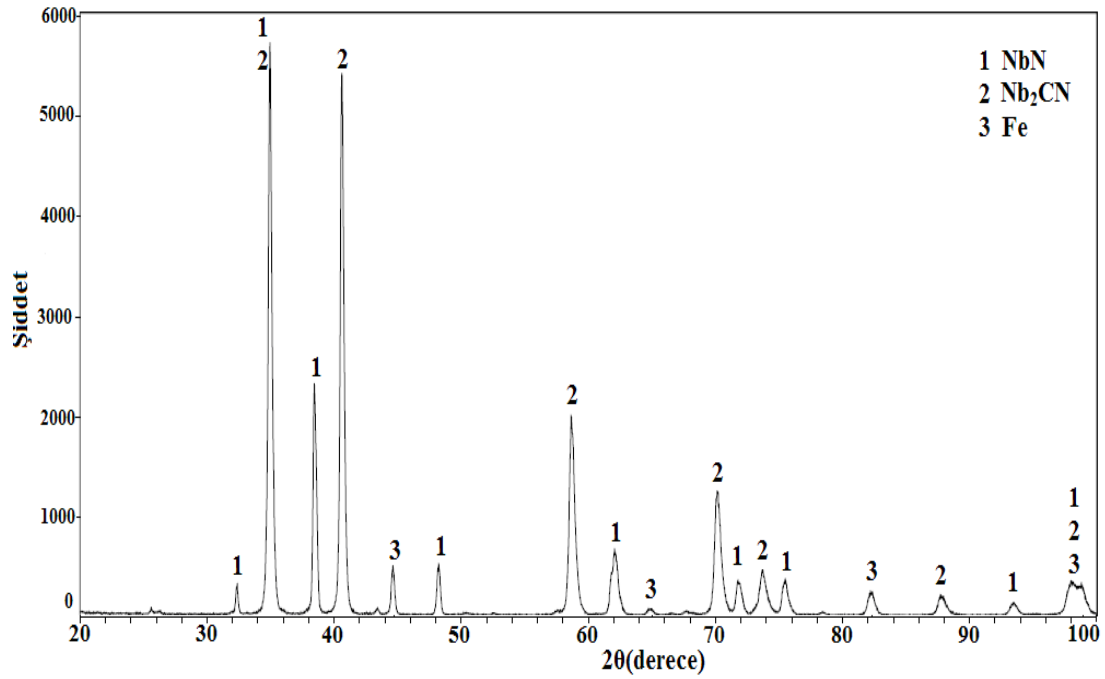


Şekil 7.37. 900°C sıcaklıkta 2 saat süre ile niobyumlanmış AISI 1010 çeliğinin x- ışını difraksiyon paterni

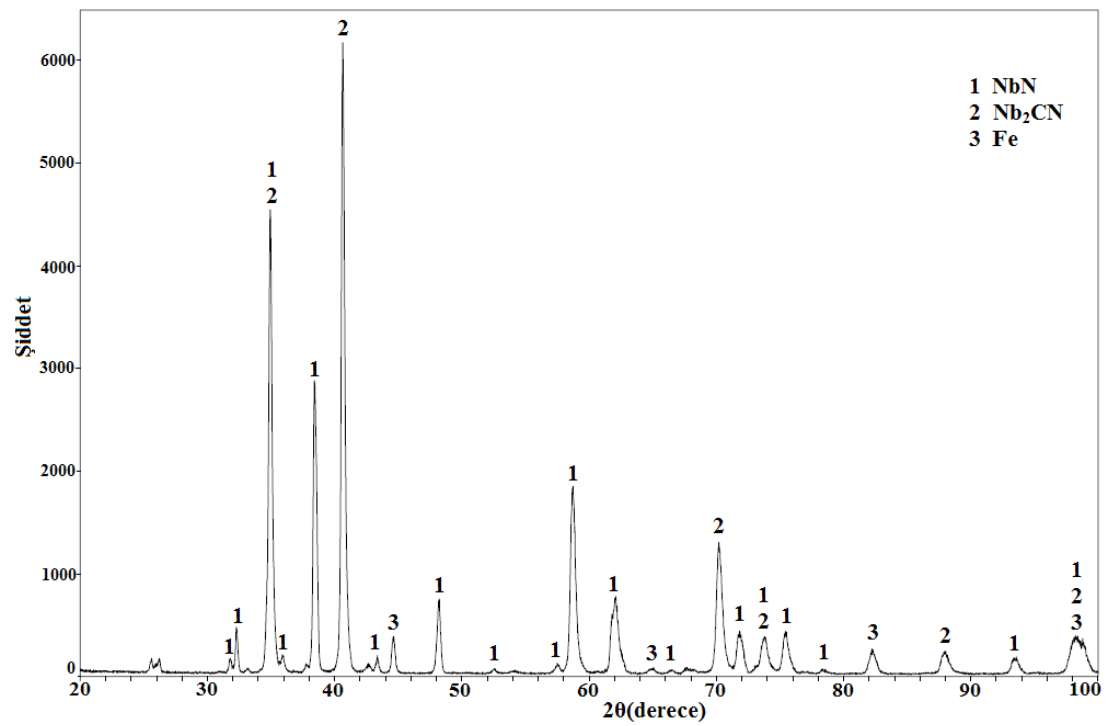


Şekil 7.38. 1000°C sıcaklıkta 2 saat süre ile niobyumlanmış AISI 1010 çeliğinin x- ışını difraksiyon paterni

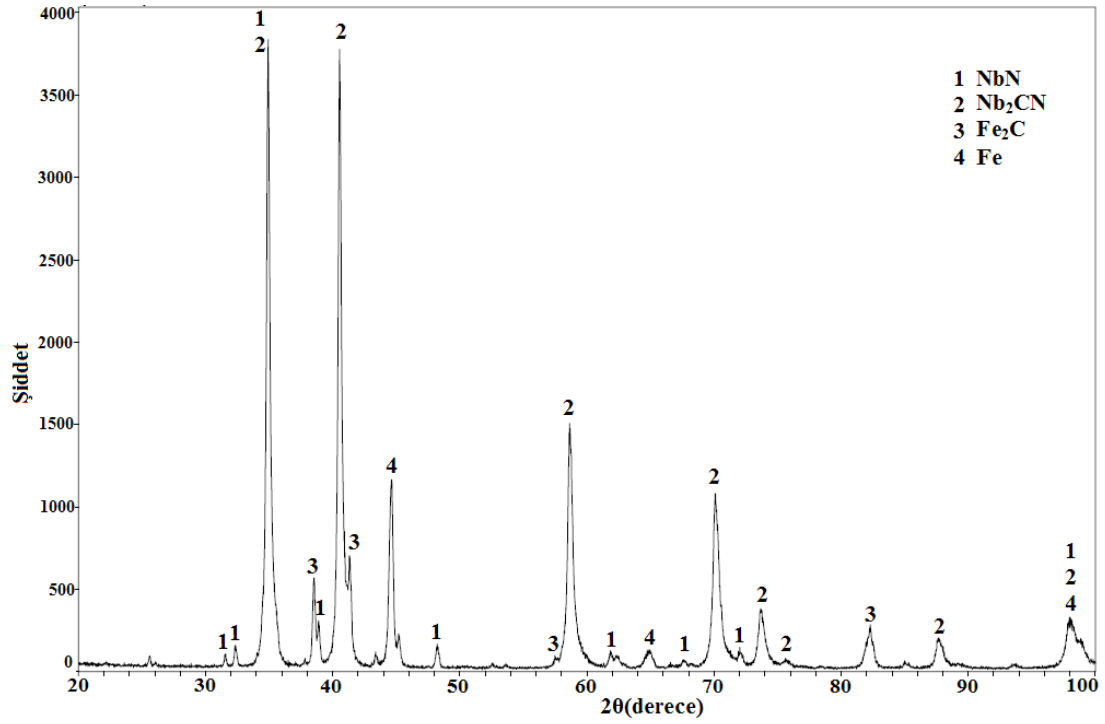




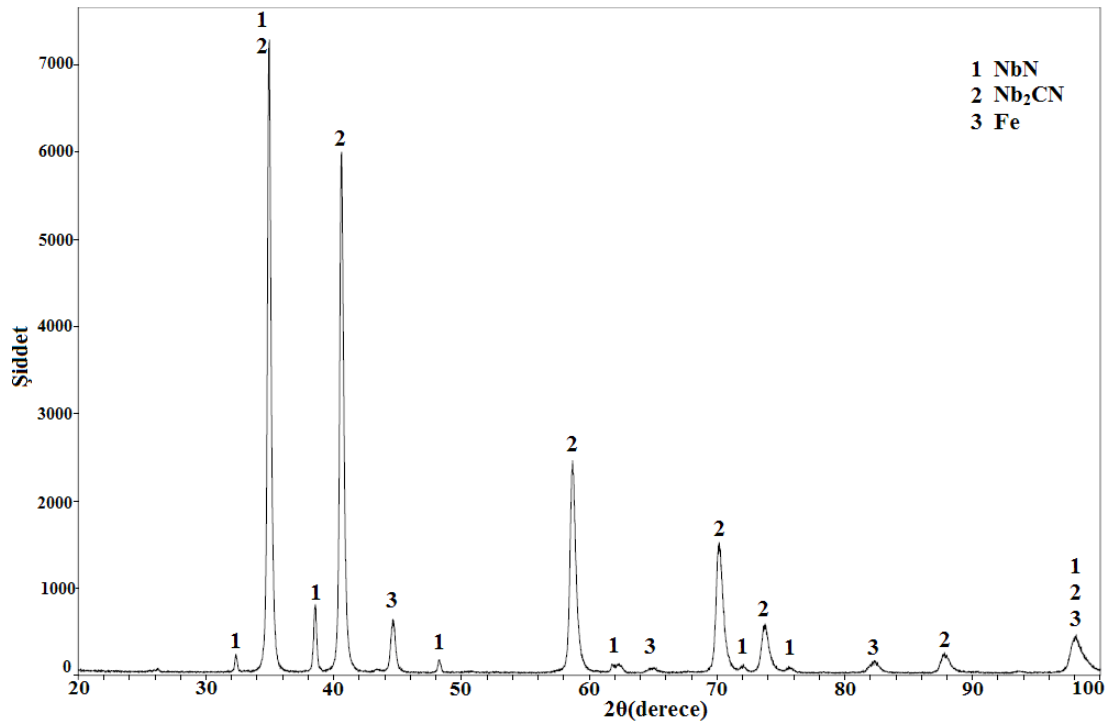
Şekil 7.41. 1000°C sıcaklıkta 2 saat süre ile niobyumlanmış AISI 4140 çeliğinin x- ışını difraksiyon paterni



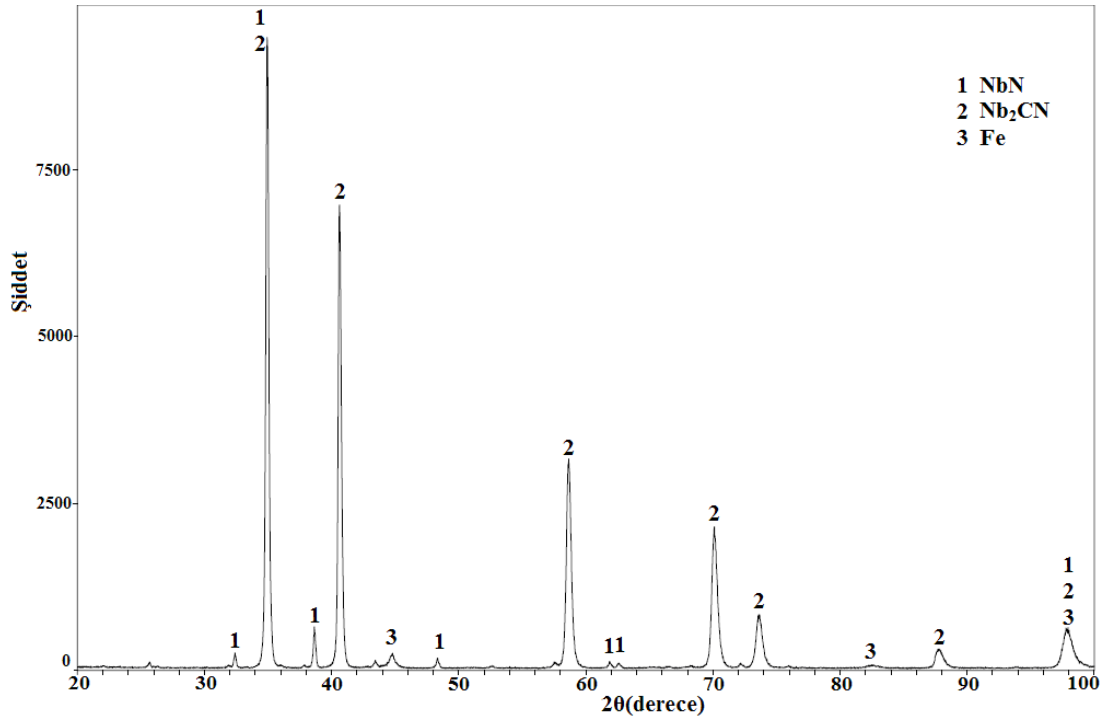
Şekil 7.42. 1100°C sıcaklıkta 2 saat süre ile niobyumlanmış AISI 4140 çeliğinin x- ışını difraksiyon paterni



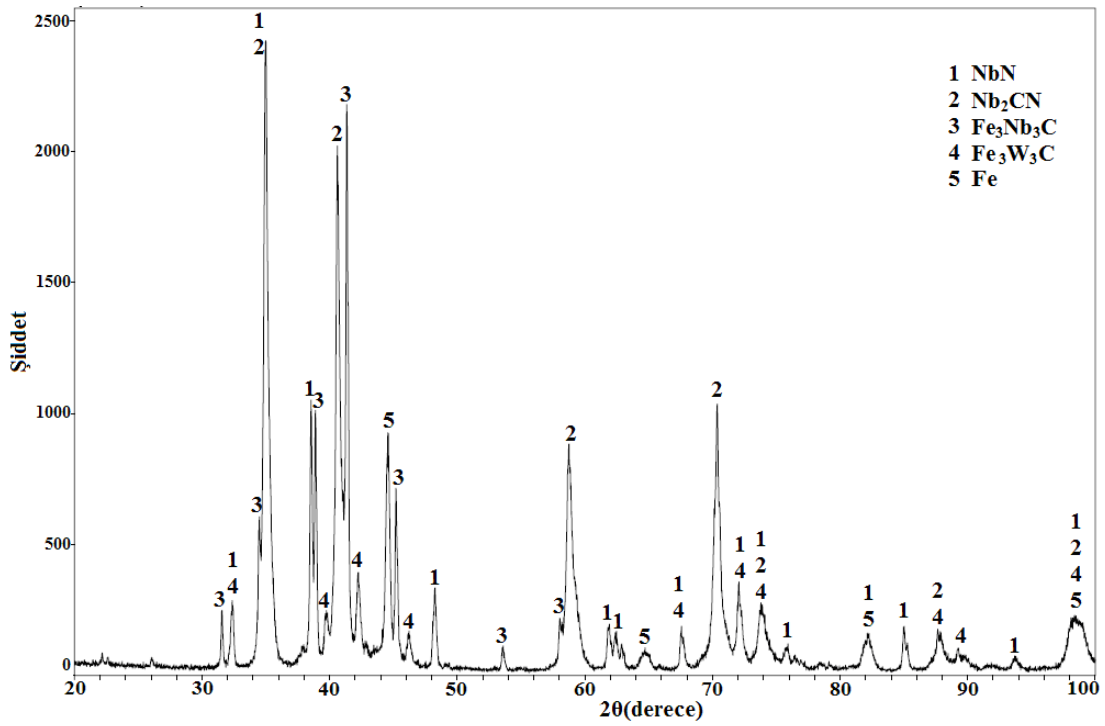
Şekil 7.43. 900°C sıcaklıkta 2 saat süre ile niobyumlanmış AISI D2 çeliğinin x- ışını difraksiyon paterni



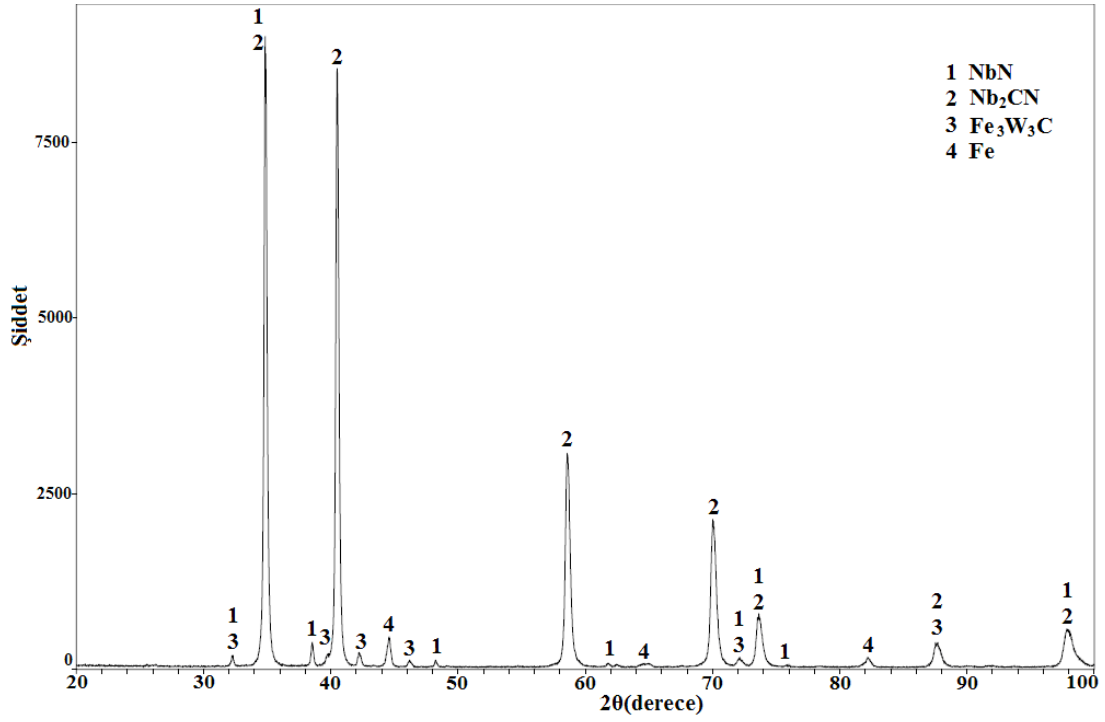
Şekil 7.44. 1000°C sıcaklıkta 2 saat süre ile niobyumlanmış AISI D2 çeliğinin x- ışını difraksiyon paterni



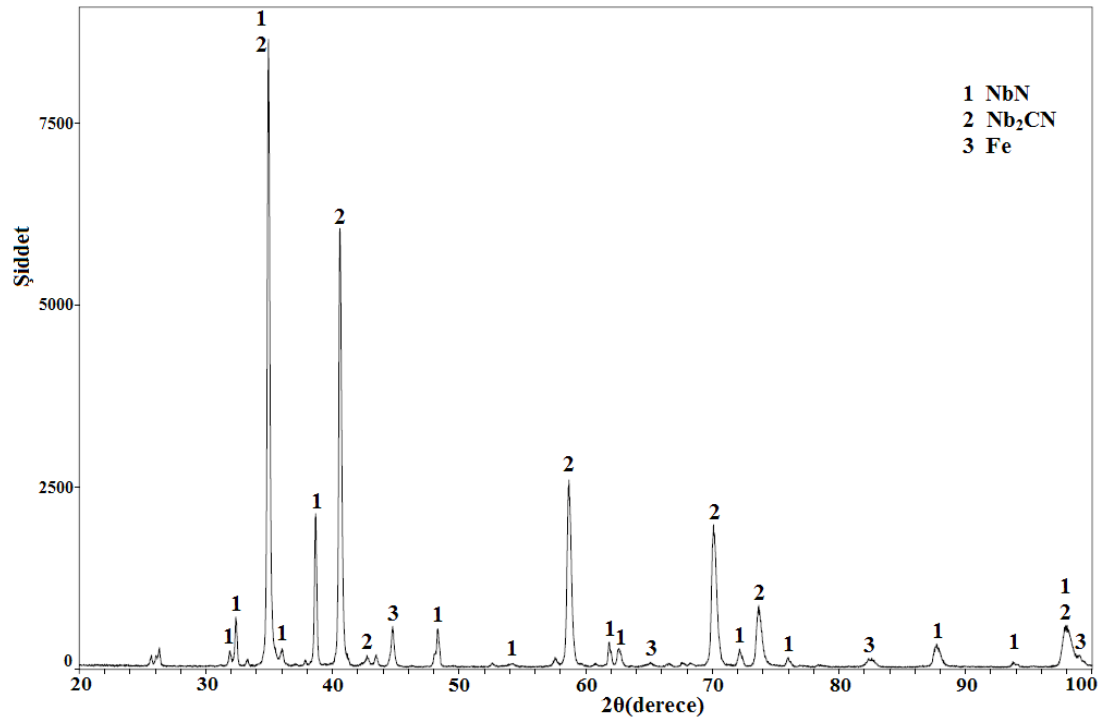
Şekil 7.45. 1100°C sıcaklıkta 2 saat süre ile niobyumlanmış AISI D2 çeliğinin x- ışını difraksiyon paterni



Şekil 7.46. 900°C sıcaklıkta 2 saat süre ile niobyumlanmış AISI M2 çeliğinin x- ışını difraksiyon paterni



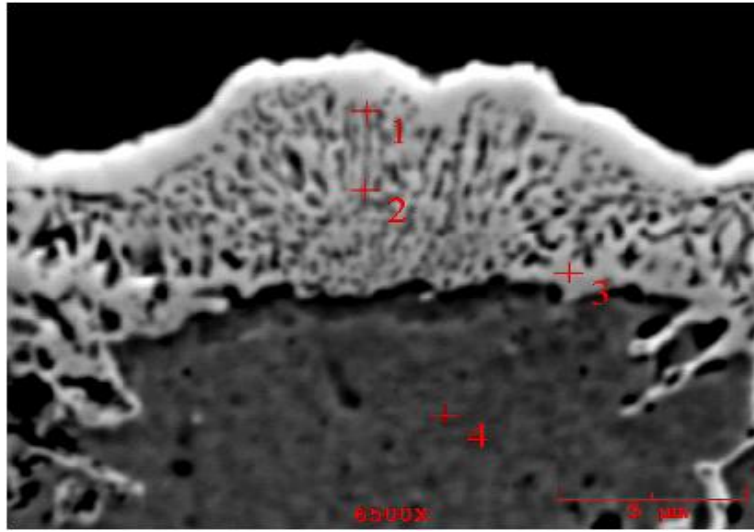
Şekil 7.47. 1000°C sıcaklıkta 2 saat süre ile niobyumlanmış AISI M2çeliğinin x- ışını difraksiyon paterni



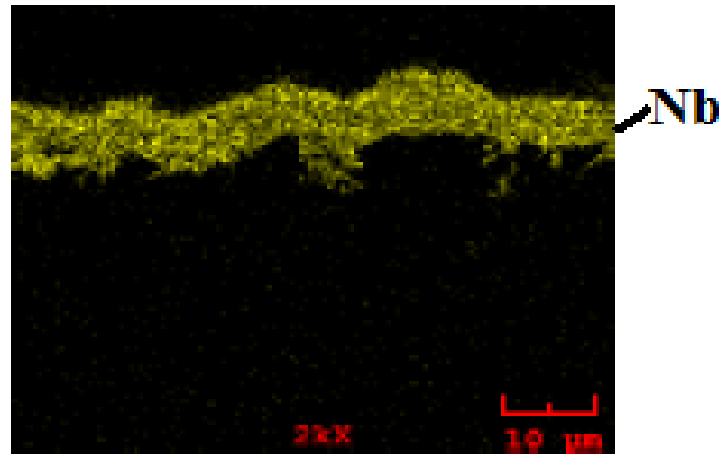
Şekil 7.48. 1100°C sıcaklıkta 2 saat süre ile niobyumlanmış AISI M2çeliğinin x- ışını difraksiyon paterni

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

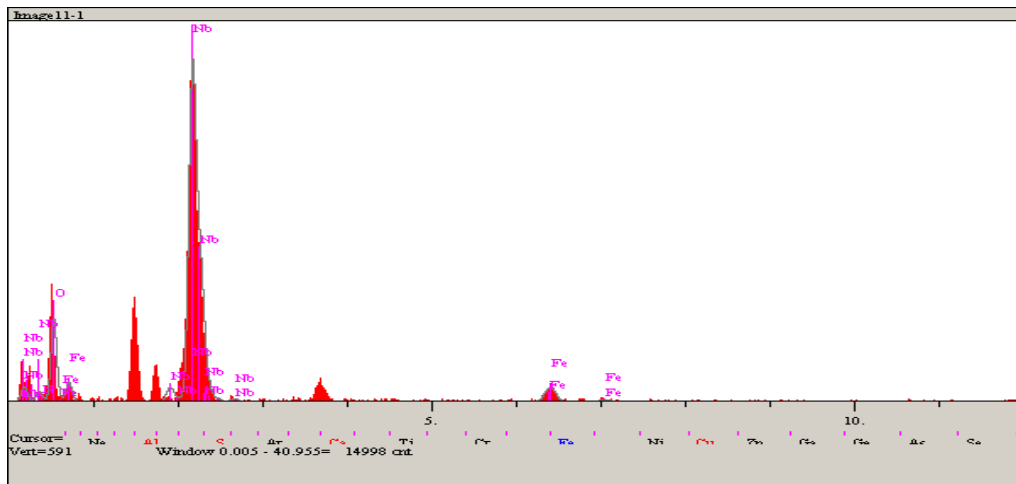
1000°C sıcaklıkta 2 saat süre ile niobyum nitrür kaplanmış AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çelik yüzeylerinin metalografik olarak incelenen yüzeylerinin mikroyapı görüntüleri ve elementel analiz dağılımları taramalı elektron mikroskobunda gerçekleştirilmiştir. Şekil 7.49-7.52.' de sırasıyla 1000°C sıcaklıklarda 2 saat süreyle niobyum nitrür kaplanmış çeliklerin SEM mikroyapı görüntüleri ile elementel analizleri 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)

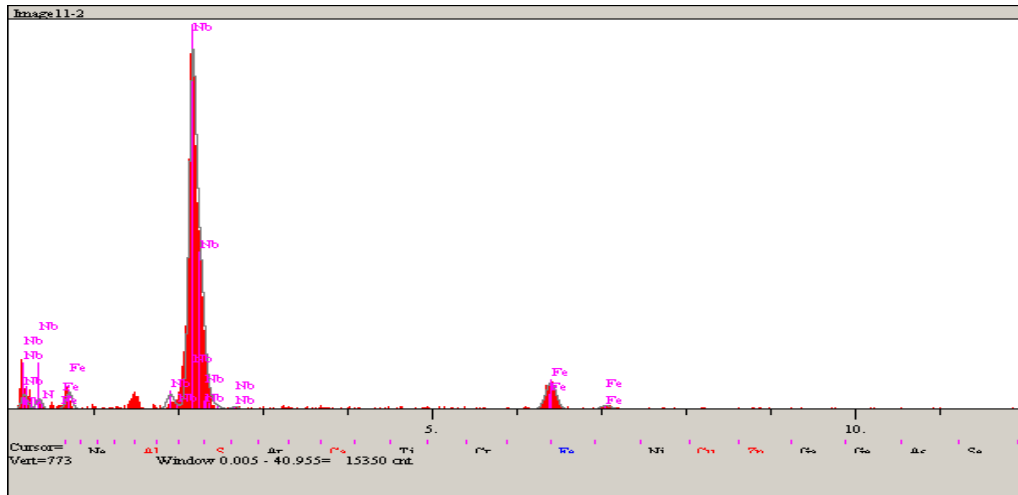


(b)

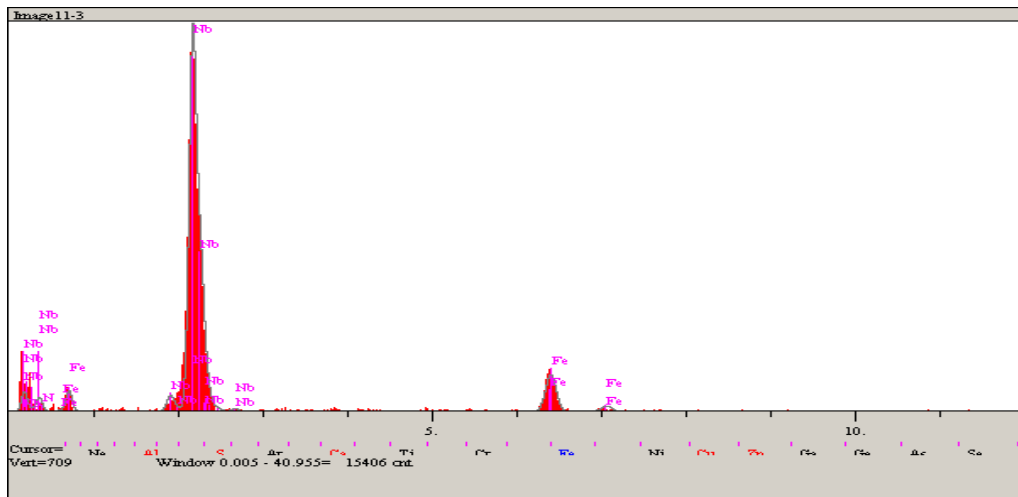


(c)

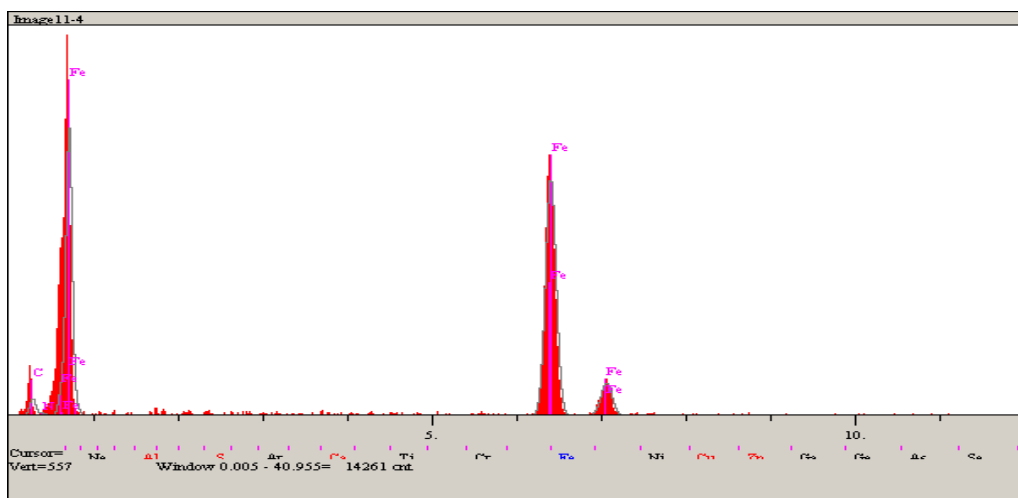
Şekil 7.49. 1000°C’ de 2 saat süre ile niobyum nitrür kaplanan AISI 1010 çelik numunenin kaplama tabakasının (a) mikroyapı görüntüsü (b) elemental dağılım haritası (c) 1. (d) 2. (e) 3. (f) 4. noktaların EDS analizleri



(d)

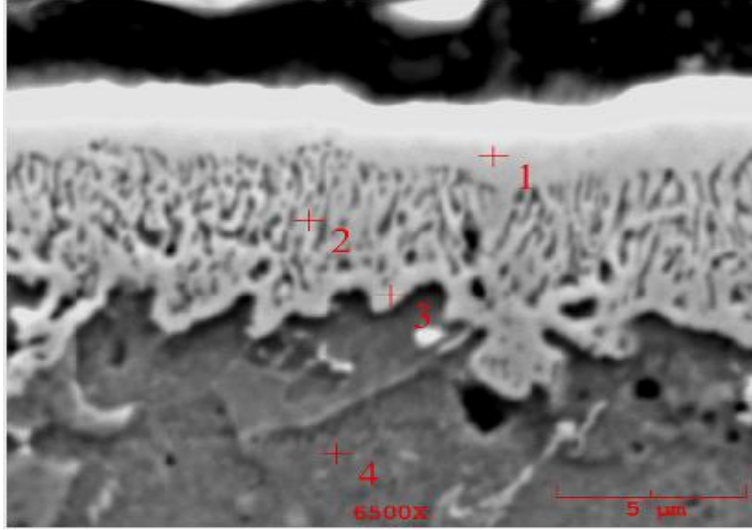


(e)

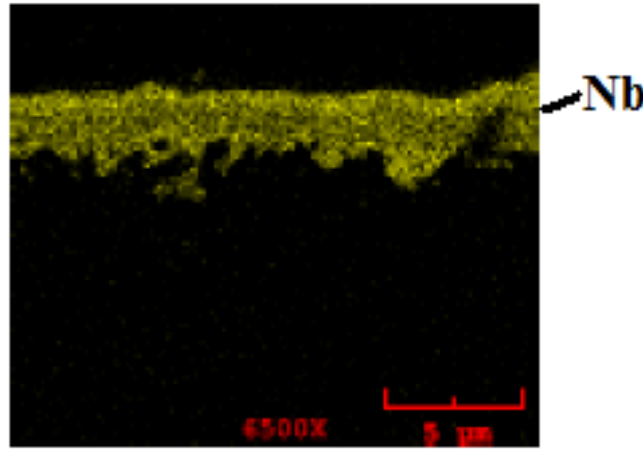


(f)

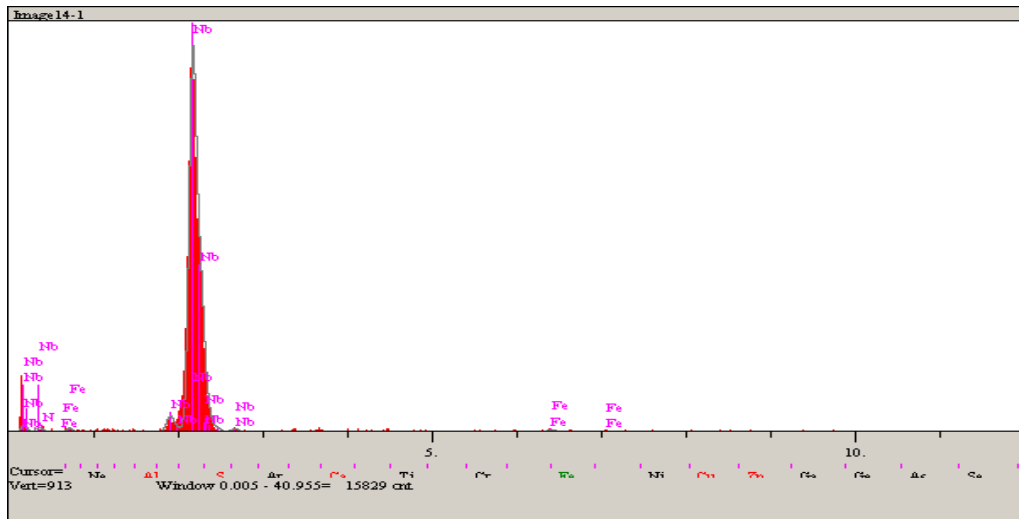
Şekil 7.49. Devam



(a)

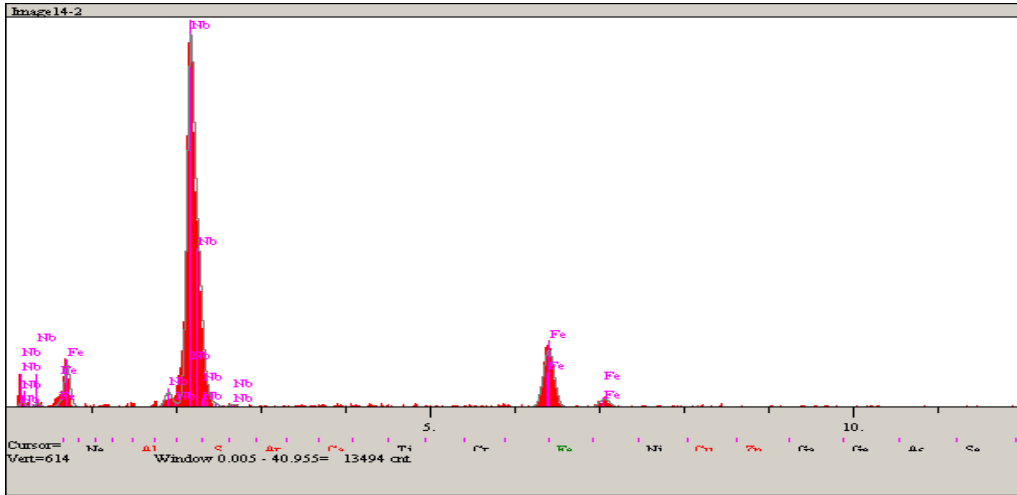


(b)

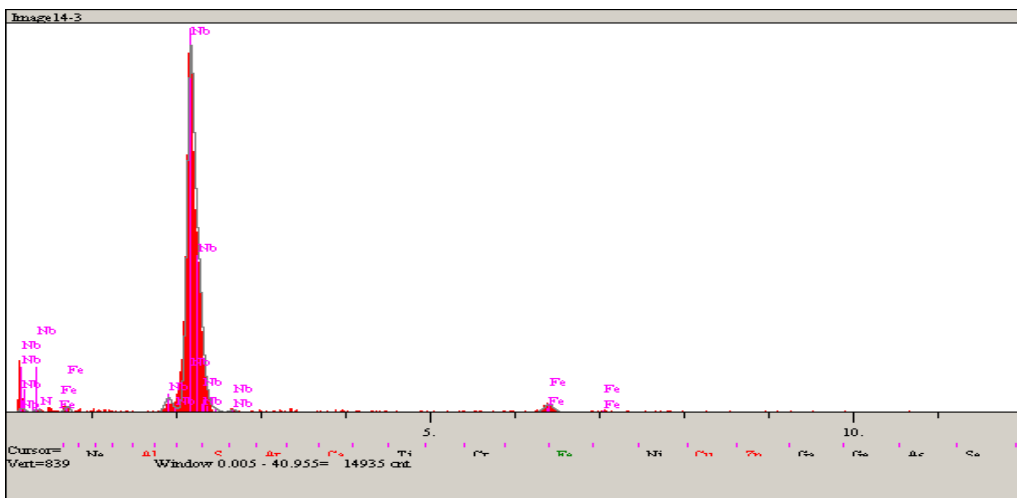


(c)

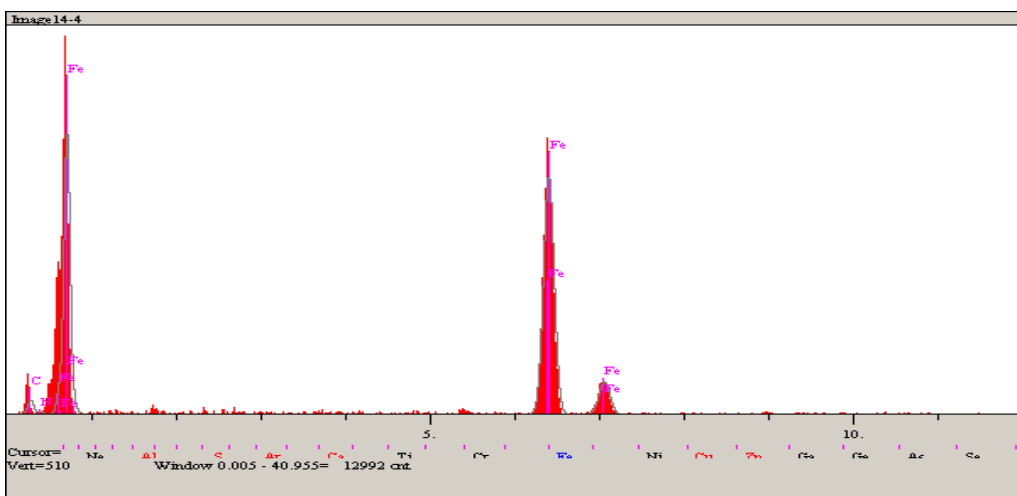
Şekil 7.50. 1000°C’ de 2 saat süre ile niobyum nitrür kaplanan AISI 4140 çelik numunenin kaplama tabakasının (a) mikroyapı görüntüsü (b) elemental dağılım haritası (c) 1. (d) 2. (e) 3. (f) 4. noktaların EDS analizleri



(d)

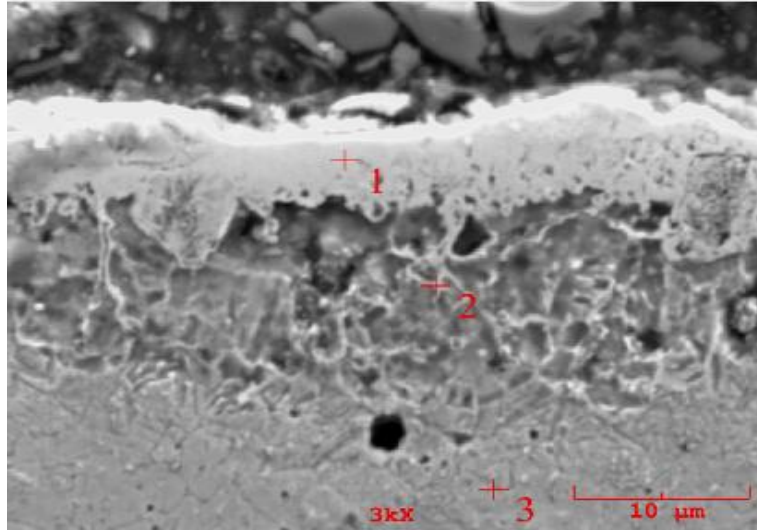


(e)

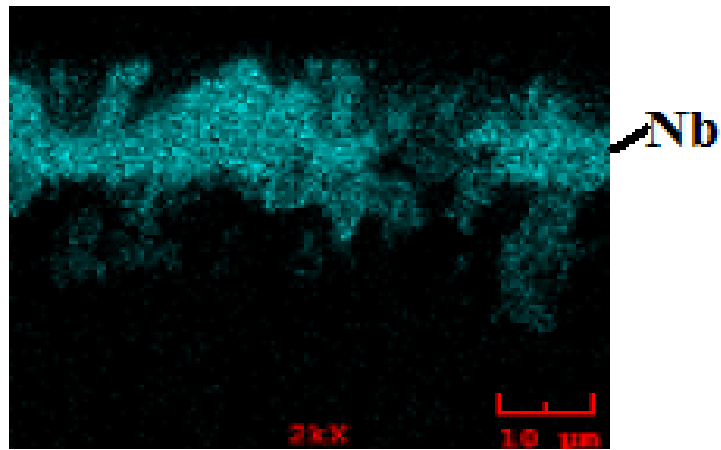


(f)

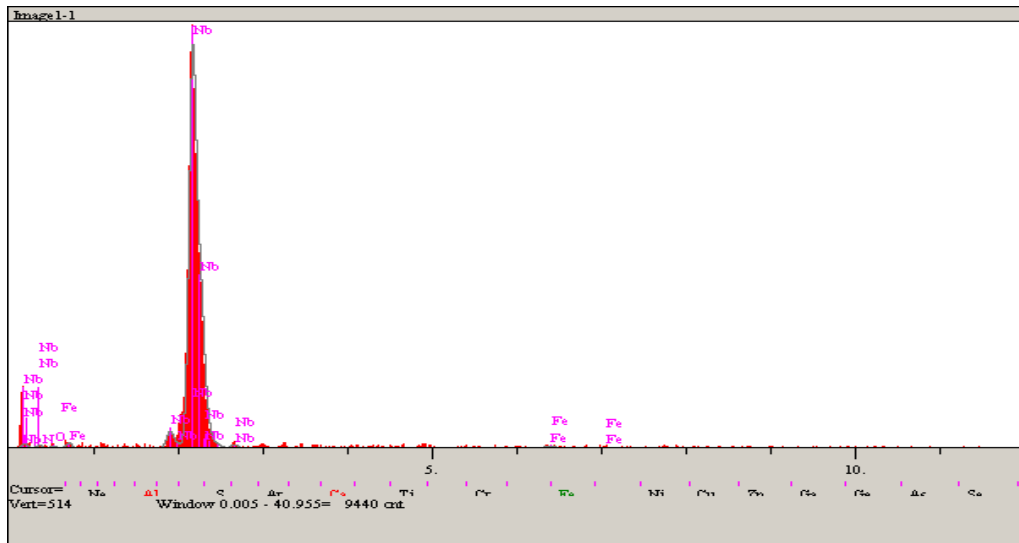
Şekil 7.50. Devam



(a)

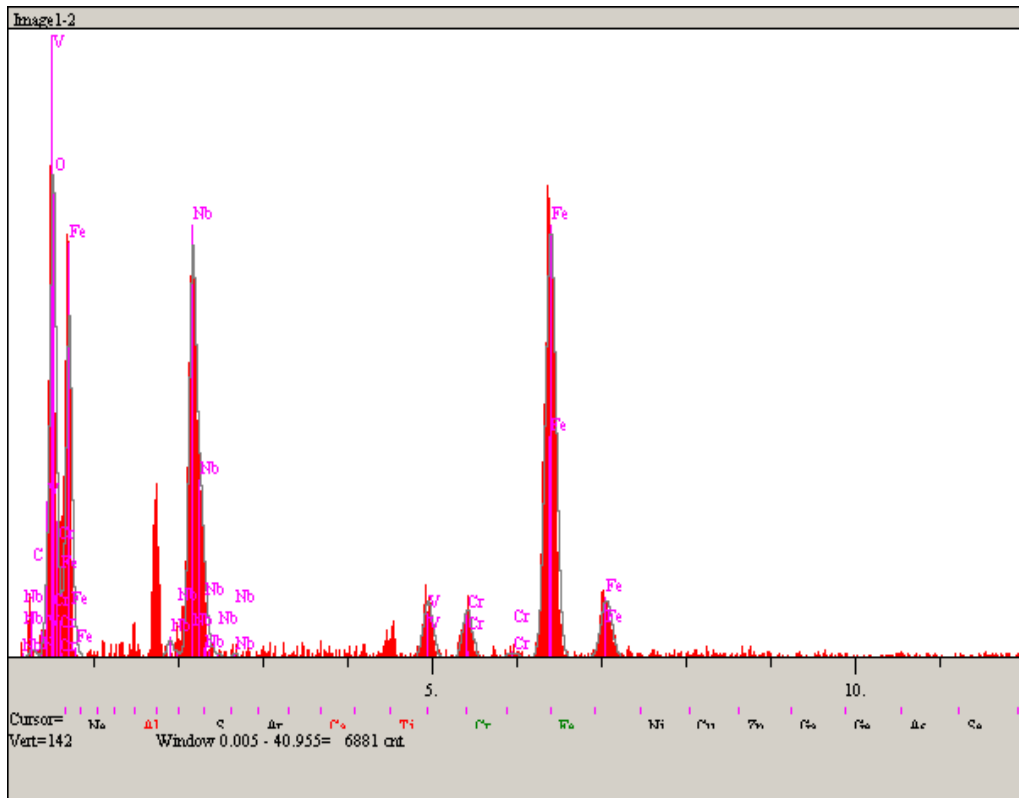


(b)

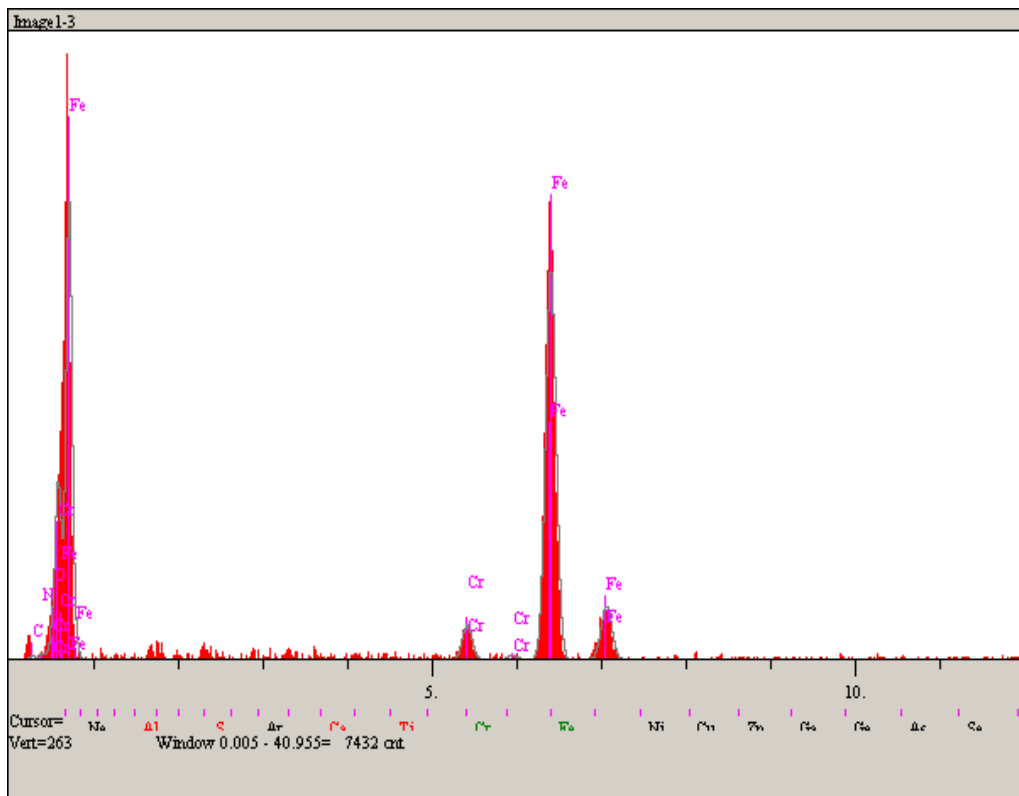


(c)

Şekil 7.51. 1000°C’ de 2 saat süre ile niobyum nitrür kaplanan AISI D2 çelik numunenin kaplama tabakasının (a) mikroyapı görüntüsü (b) elemental dağılım haritası (c) 1. (d) 2. (e) 3. noktaların EDS analizleri

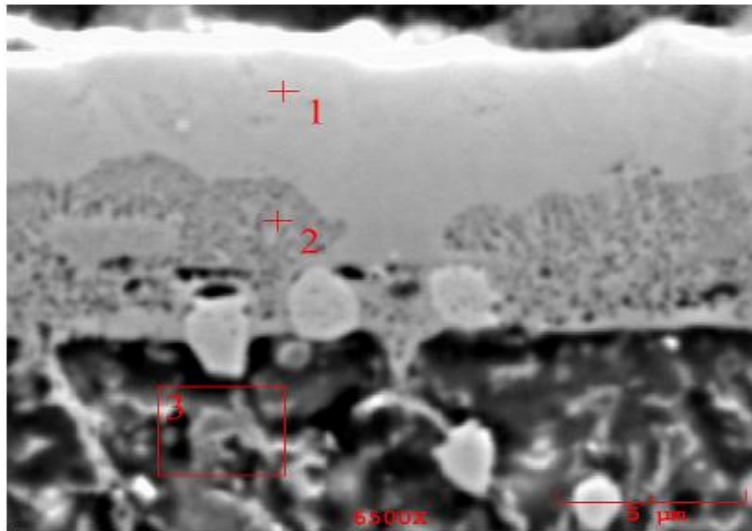


(d)

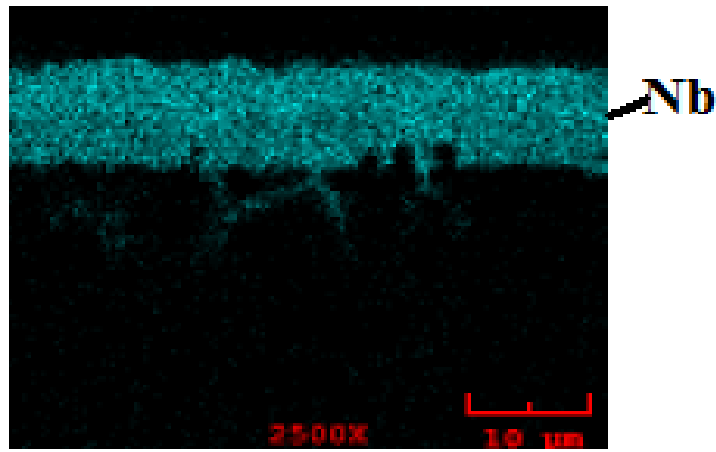


(e)

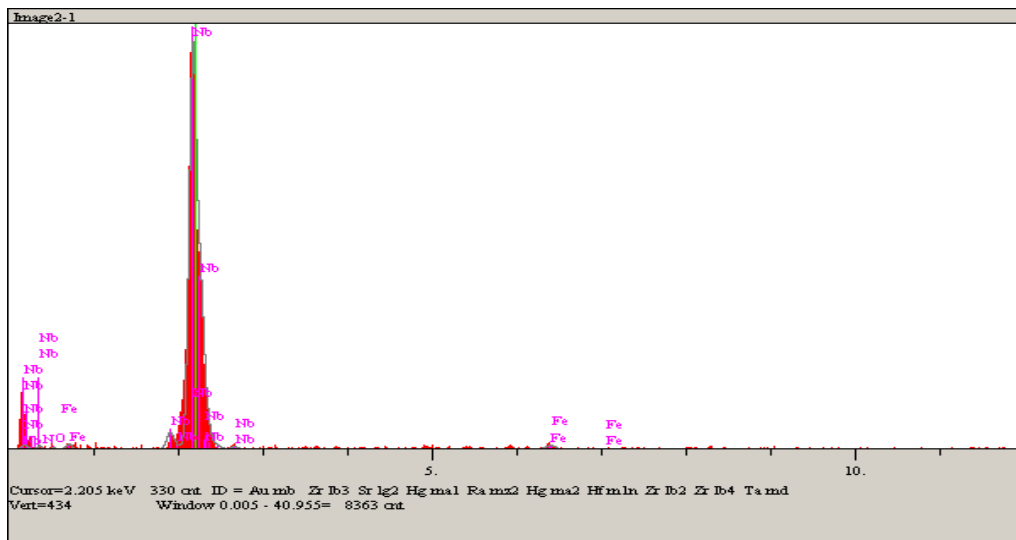
Şekil 7.51. Devam



(a)

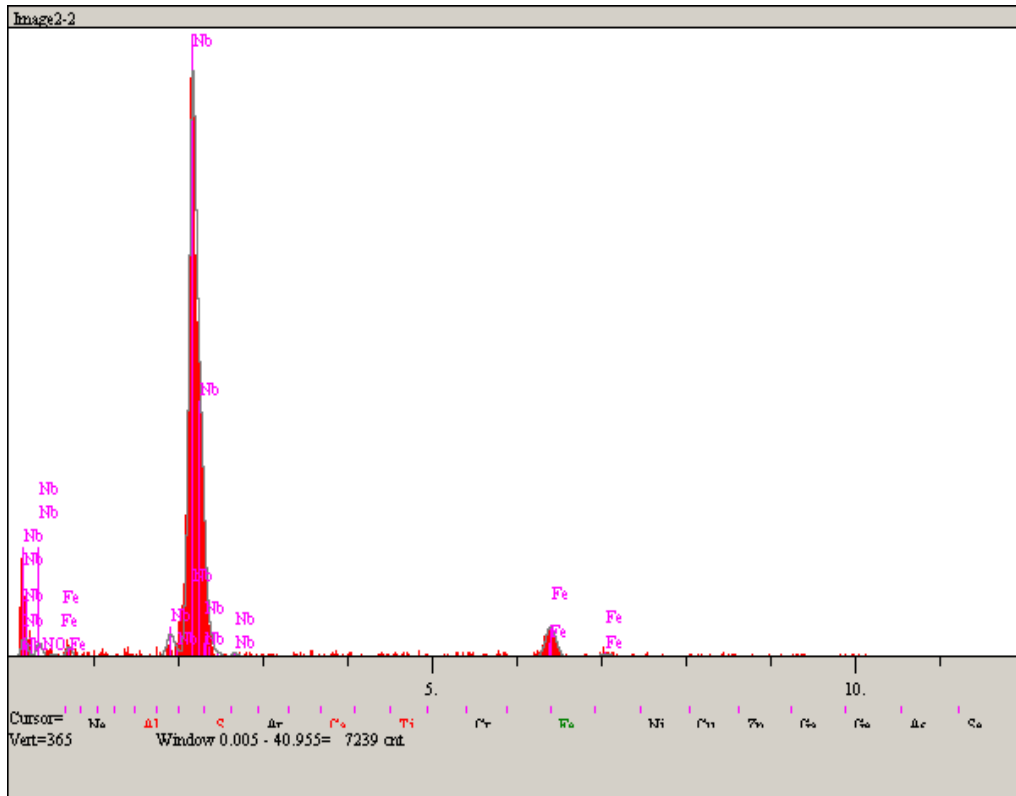


(b)

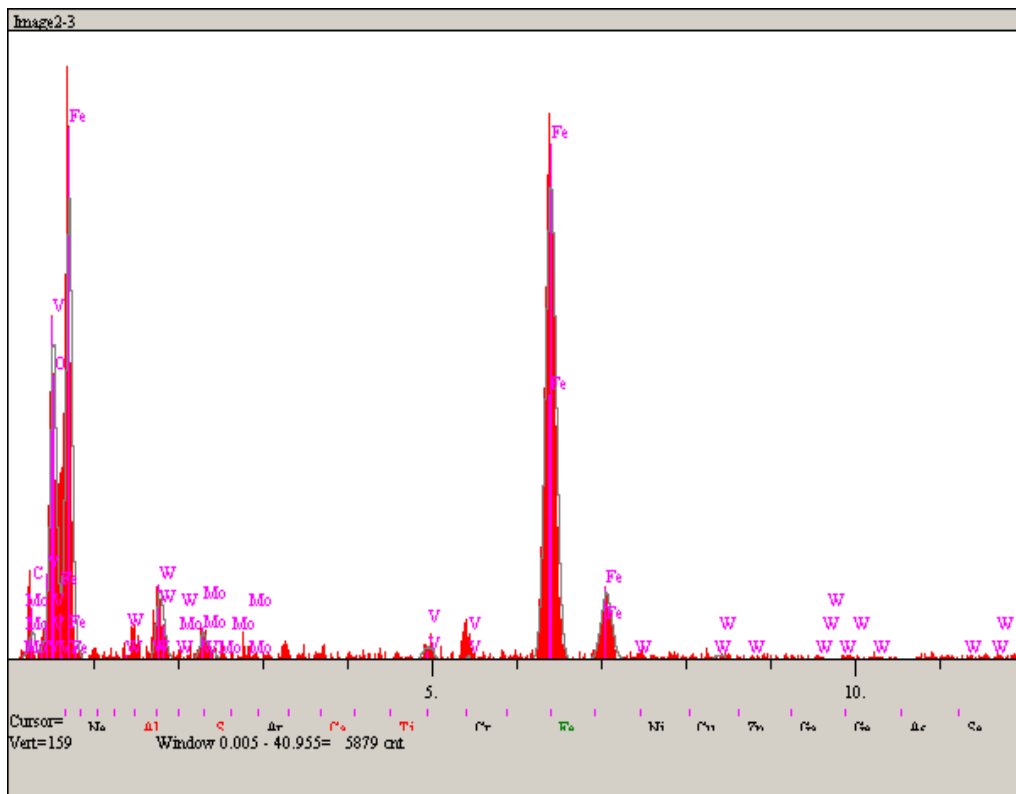


(c)

Şekil 7.52. 1000°C' de 2 saat süre ile niobyum nitür kaplanan AISI M2 çelik numunenin kaplama tabakasının (a) mikroyapı görüntüsü (b) elementel dağılım haritası (c) 1. (d) 2. (e) 3. noktaların EDS analizleri



(d)



(e)

Şekil 7.52. Devam

7.5. Sertlik Ölçümleri

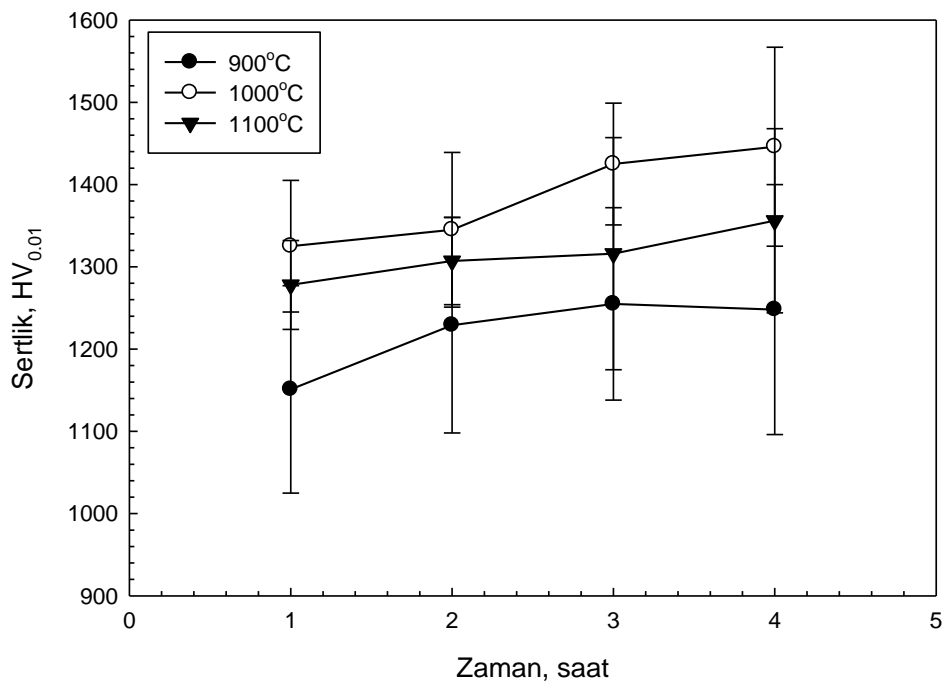
Niobyum nitrür kaplamaların gerçekleştirildiği AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çeliklerinin kaplama yüzeylerinden Vickers sertlik ucu kullanılarak 10gr yük altında gerçekleştirilen mikrosertlik ölçümleri sonucunda sertlik değerlerinin niobyum nitrür kaplanmamış çeliklere nazaran oldukça sert olduğu belirlenmiştir. İşlem görmemiş AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çeliklerinin sertlikleri sırasıyla 340 HV_(0,01), 400 HV_(0,01), 550 HV_(0,01), 650HV_(0,01) değerinde olup kaplama işlemiyle bu sertlik değerleri sırasıyla 4.25, 4.5, 2.90, 3.90 kat artış göstermiştir.

Kaplama işlemi yapılmış çelikleri kıyasladığımızda en sert kaplama tabakasının AISI M2 çeliğinde olduğu belirlenmiş olup bunun çeliklerin yüzeyinde oluşan NbN, Nb₂CN ve alaşım karbürlerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu durum x-ışını diraksiyon analizleriyle de teyit edilmektedir. Kaplama sıcaklığı ve süresine bağlı olarak elde edilen sertlik değerleri incelendiğinde, kaplama süresi arttıkça sertlik değerlerinin arttığı sıcaklığa bağlı olarak ise 1000C'ye kadar arttığı ancak 1100C'de azaldığı görülmektedir. En yüksek sertlik değerleri 1000C'de oluşturulan kaplama tabakalarında elde edilmiş olup bu durumun x-ışınlarında da görüldüğü üzere çok sert olan Nb₂CN faz miktarlarında görülen artıştan (pik şiddetlerinden) kaynaklandığı düşünülmektedir. Sıcaklık ve süreye bağlı olarak çeliklerin yüzeyinde elde edilen kaplama tabaka sertliklerinin 1151±126 HV_(0,01) ile 2550±196 HV_(0,01) değerleri arasında olduğu tespit edilmiştir. Kaplama sıcaklığı ve zamanına bağlı olarak çelik yüzeylerinin sertlikleri Tablo 7.2. ve Şekil 7.53- 7.56 'da görülmektedir.

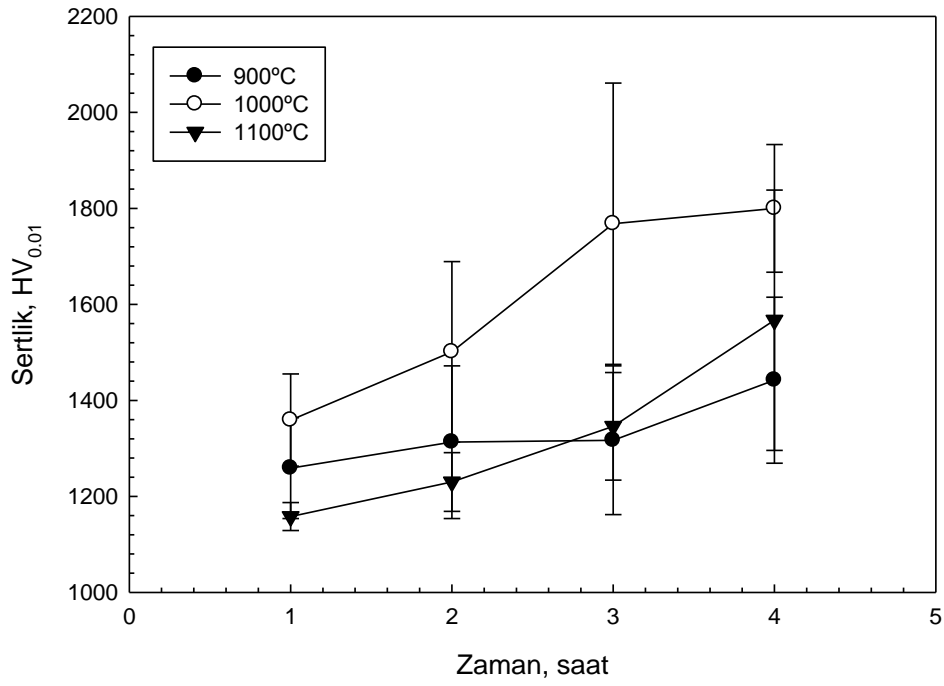
Ayrıca AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çelikleri için kaplama zamanı ve sıcaklığına bağlı olarak elde edilen sertlik değerlerinin değişimini gösteren bir kontur diyagramlar Şekil 7.57-7.60' da verilmiştir.

Tablo 7.2. Niobiyum nitrür kaplanan çeliklerde kaplama süresi ve sıcaklığına bağlı olarak elde edilen sertlik değerleri

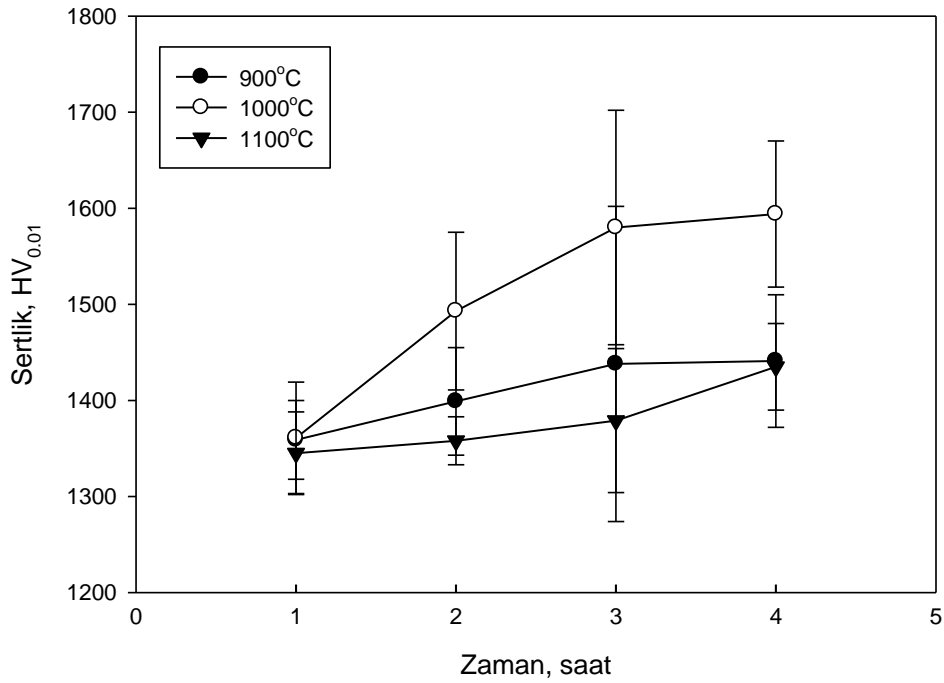
Kaplama Tabakasının Sertliği HV _(0,01)				
Numune	Zaman, saat	900°C	1000°C	1100°C
AISI 1010	1	1151±126	1325±80	1278±54
	2	1229±131	1345±94	1307±53
	3	1255±117	1425±74	1316±141
	4	1248±152	1446±121	1356±112
AISI 4140	1	1259±105	1359±96	1158±29
	2	1313±159	1501±188	1230±61
	3	1317±155	1768±293	1346±112
	4	1442±173	1800±133	1567±271
AISI D2	1	1359±41	1361±58	1345±43
	2	1399±56	1493±82	1358±25
	3	1438±164	1580±122	1379±75
	4	1441±69	1594±76	1435±45
AISI M2	1	1426±38	1582±111	1321±51
	2	1529±126	1824±205	1329±120
	3	1606±207	1915±134	1336±109
	4	1821±94	2550±196	1486±137



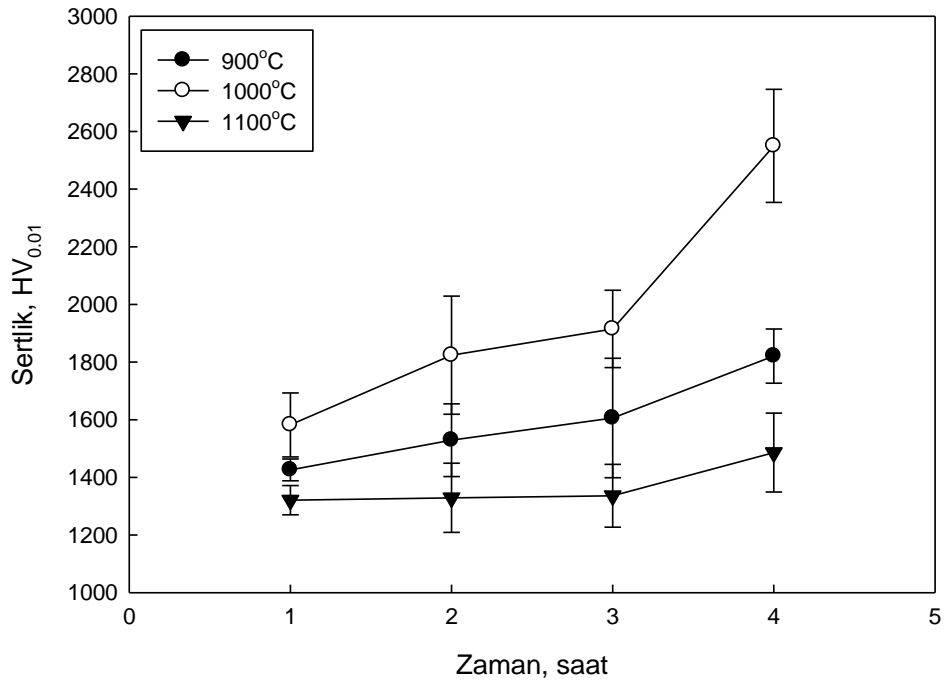
Şekil 7.53. 900°C, 1000°C ve 1100 °C' de niobiyum nitrür kaplama işlemine tabi tutulmuş AISI 1010 çeliğinin kaplama zamanına bağlı olarak sertlik dağılımı



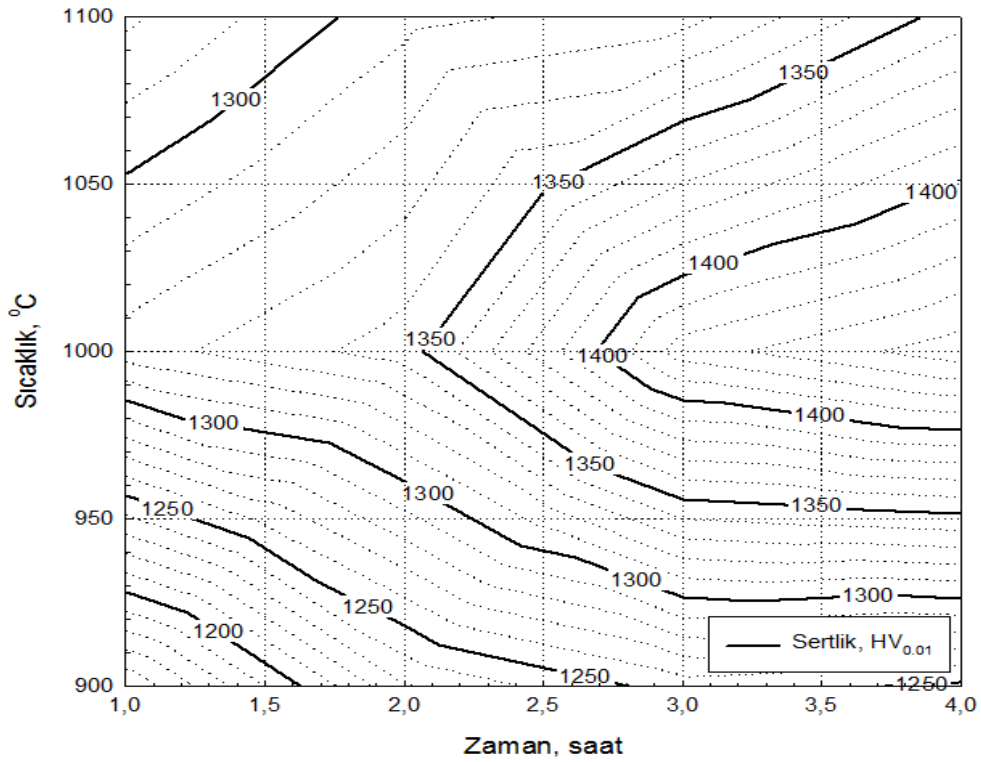
Şekil 7.54. 900°C, 1000°C ve 1100 °C’ de niyobum nitürü kaplama işlemine tabi tutulmuş AISI 4140 çeliğinin kaplama zamanına bağlı olarak sertlik dağılımı



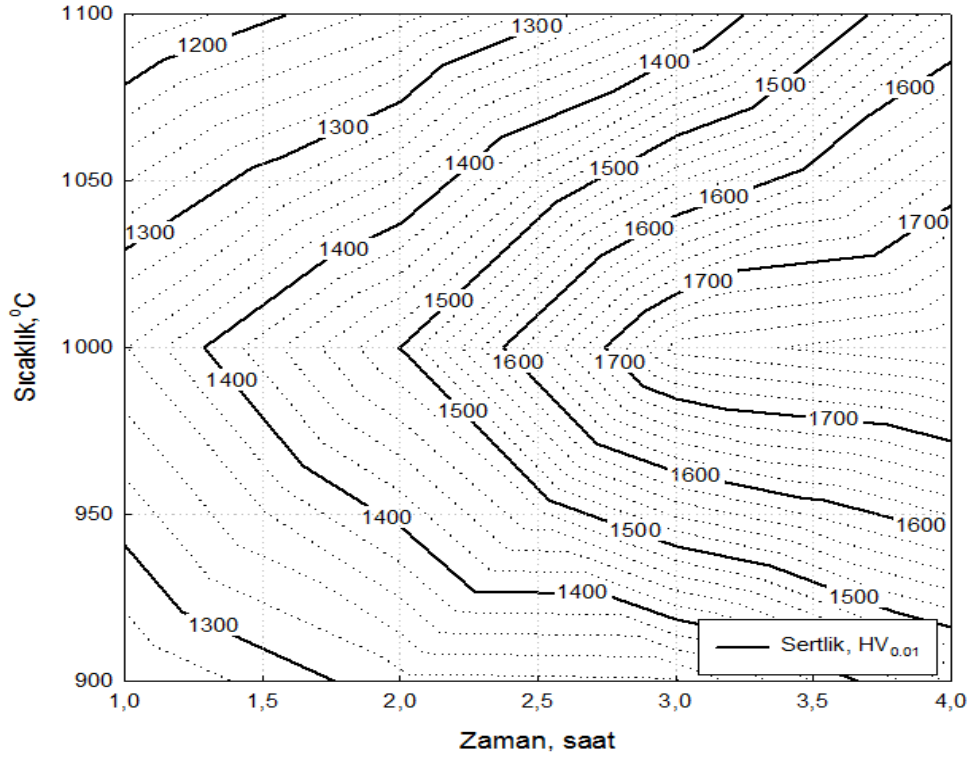
Şekil 7.55. 900°C, 1000°C ve 1100 °C’ de niyobum nitürü kaplama işlemine tabi tutulmuş AISI D2 çeliğinin kaplama zamanına bağlı olarak sertlik dağılımı



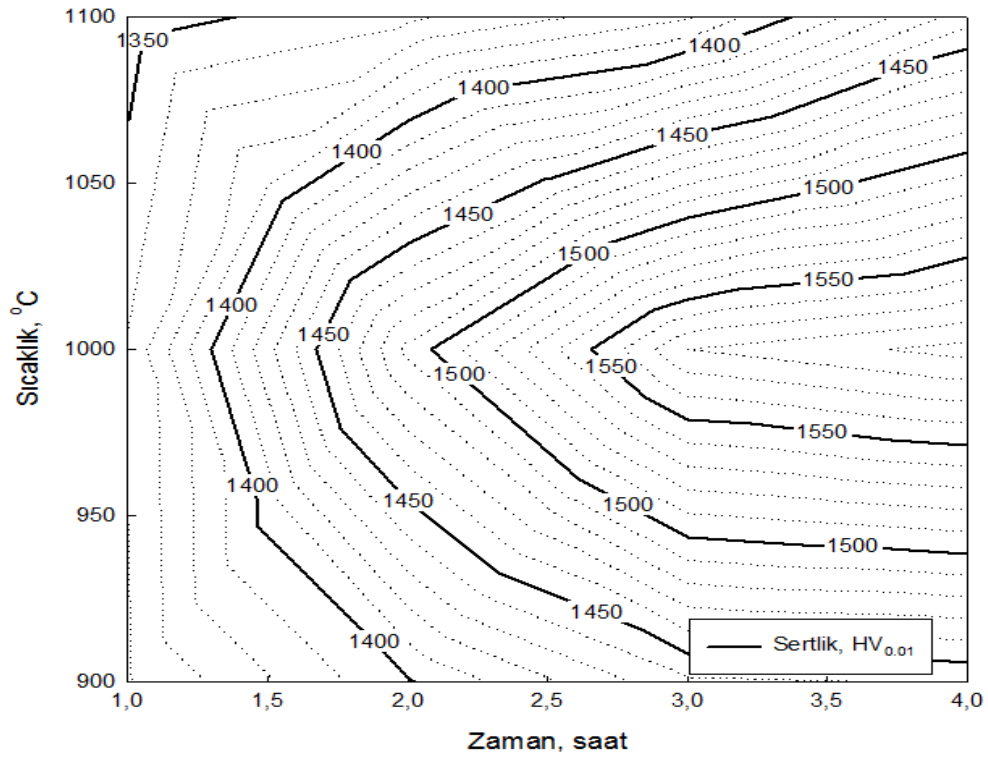
Şekil 7.56. 900°C, 1000°C ve 1100 °C’ de niobyum nitrür kaplama işlemine tabi tutulmuş AISI M2 çeliğinin kaplama zamanına bağlı olarak sertlik dağılımı



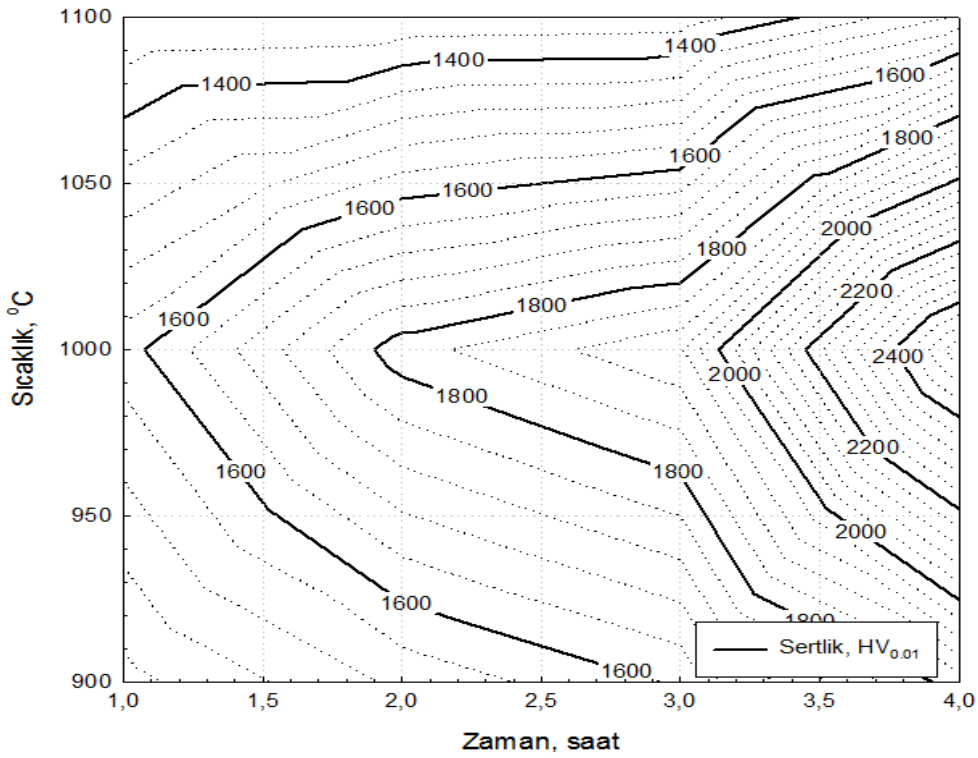
Şekil 7.57. Niobyum nitrür kaplama işlemine tabi tutulmuş AISI 1010 çeliğinde sıcaklık ve zamana bağlı olarak sertlik değişimi



Şekil 7.58. Niobiyum nitrür kaplama işlemine tabi tutulmuş AISI 4140 çeliğinde sıcaklık ve zamana bağlı olarak sertlik değişimi



Şekil 7.59. Niobiyum nitrür kaplama işlemine tabi tutulmuş AISI D2 çeliğinde sıcaklık ve zamana bağlı olarak sertlik değişimi



Şekil 7.60. Niobyum nitrür kaplama işlemine tabi tutulmuş AISI M2 çeliğinde sıcaklık ve zamana bağlı olarak sertlik değişimi

7.6. Aşınma Özellikleri

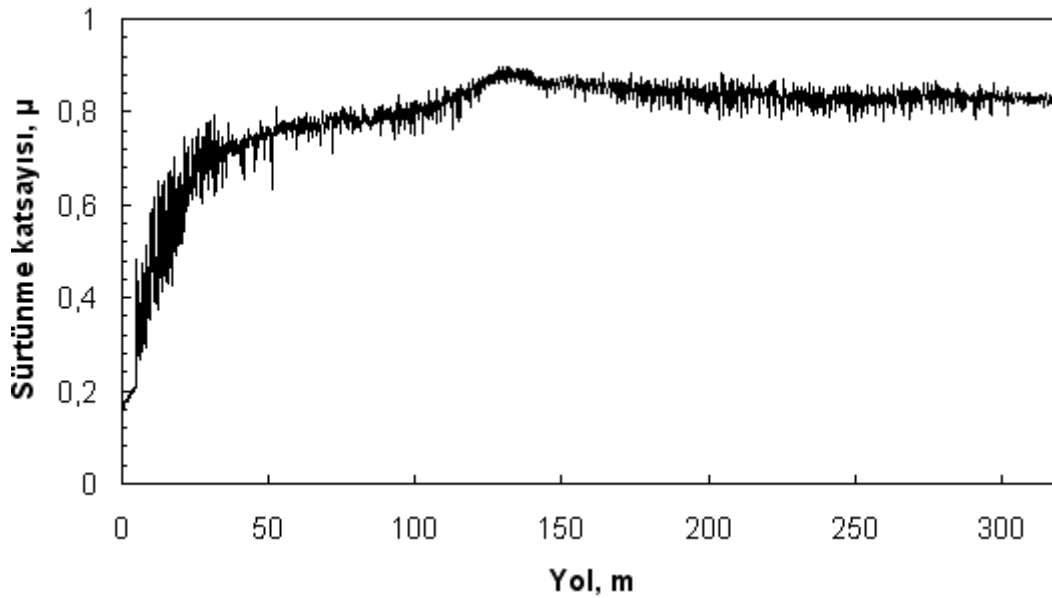
Aşınma deneyleri ASTM G-99 standardına uygun olan tribometre cihazında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde Ball-On Disk metodundan faydalanılarak, 9,5 mm çapında Alümina ve AISI M50 çelik bilyeler kullanılmıştır. Aşınma deneyleri 2,5N, 5N ve 10N yük altında, 320 metre mesafede 0.1m/s, hızda gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneyleri sonrasında oluşan aşınma izlerinin mikroyapıları, NIKON EPIHOT 200 marka optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri ile gerçekleştirilmiştir.

Yapılan aşınma deneyleri neticesinde, niobyum nitrür kaplanmış AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çelikleri için alümina bilye ve AISI M50 çelik bilye sürtünme katsayıları genel olarak yükün artışına bağlı olarak azalmaktadır. Bu azalmaya yük artışına bağlı olarak yüzeyde oksit oluşumunun, bazı yüklerde ise artışa yüzeyden partikül kopması ve aşınmayı desteklemesinin yol açtığı düşünülmektedir. Alümina bilye ile yapılan aşınma deneyleri neticesinde elde edilen

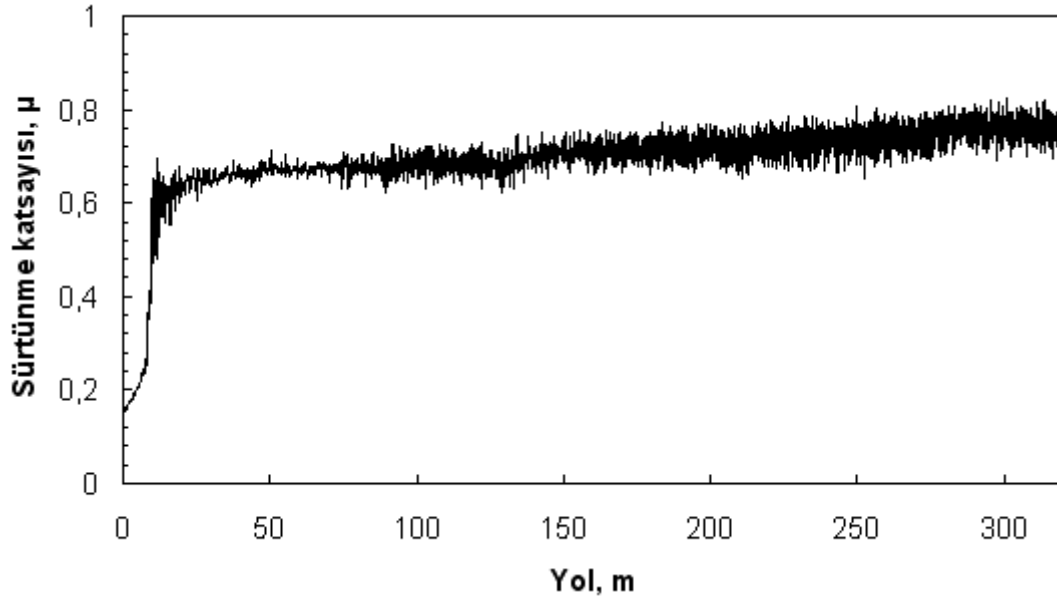
sürtünme katsayısı değerleri daha dar bir aralıkta seyrederken, AISI M50 çelik bilye ile yapılan aşınma deneyleri neticesinde elde edilen sürtünme katsayısı değerleri daha geniş bir aralıkta seyretmektedir.

Niobyum nitrür kaplanmış AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 numuneler ile alümina ve AISI M50 çelik aşındırıcı bilyeler arasındaki aşınma deneyleri gerçekleştirildikten sonra, ölçülen yanıl kuvvetlerden faydalanılarak, uygulanan yüklere göre sürtünme katsayılarındaki değişim Şekil 7.61- 7.68' de verilmiştir.

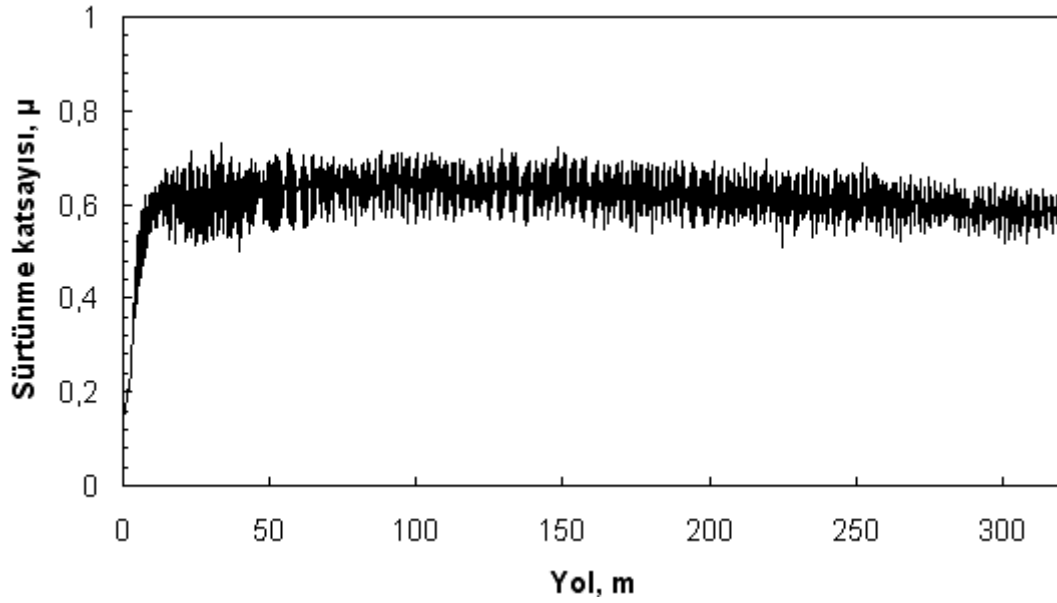
Niobyum nitrür kaplanmış AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 numuneler ile alümina ve AISI 50 çelik aşındırıcı bilyeler arasındaki sürtünme katsayılarının uygulanan yüklere ve hıza bağlı olarak değişimi Tablo 7.3 -7.4 ve Şekil 7.69- 7.72' da belirtilmiştir.



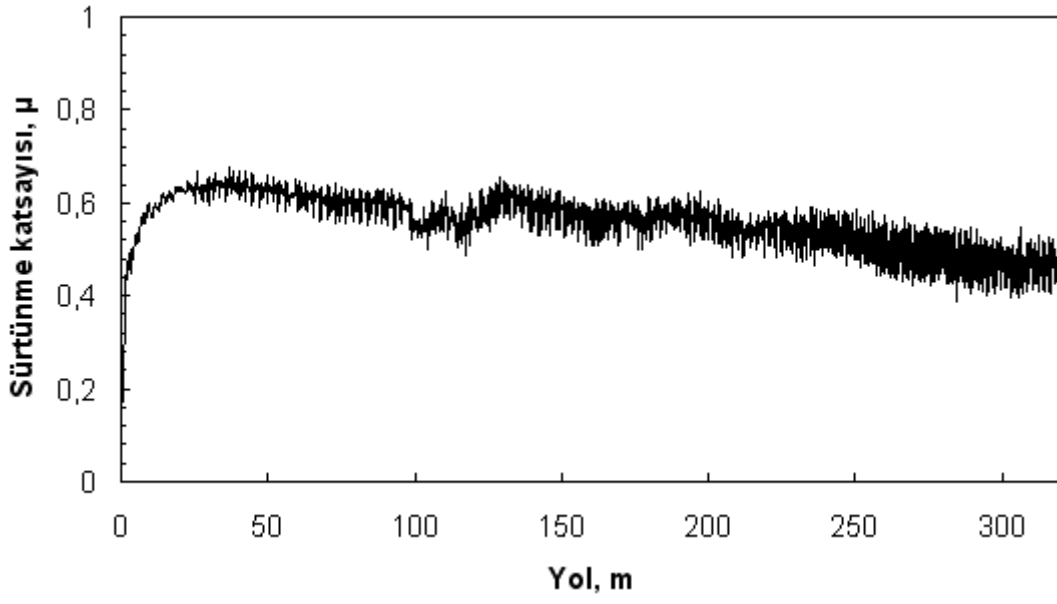
Şekil 7.61. 1000°C'de 2 saat süre ile niobyum nitrür kaplanmış AISI 1010 çeliğinin 0.1 m/s hız ve 5N yük altında Alümina bilyeye karşı yola bağlı olarak sürtünme katsayısındaki değişim



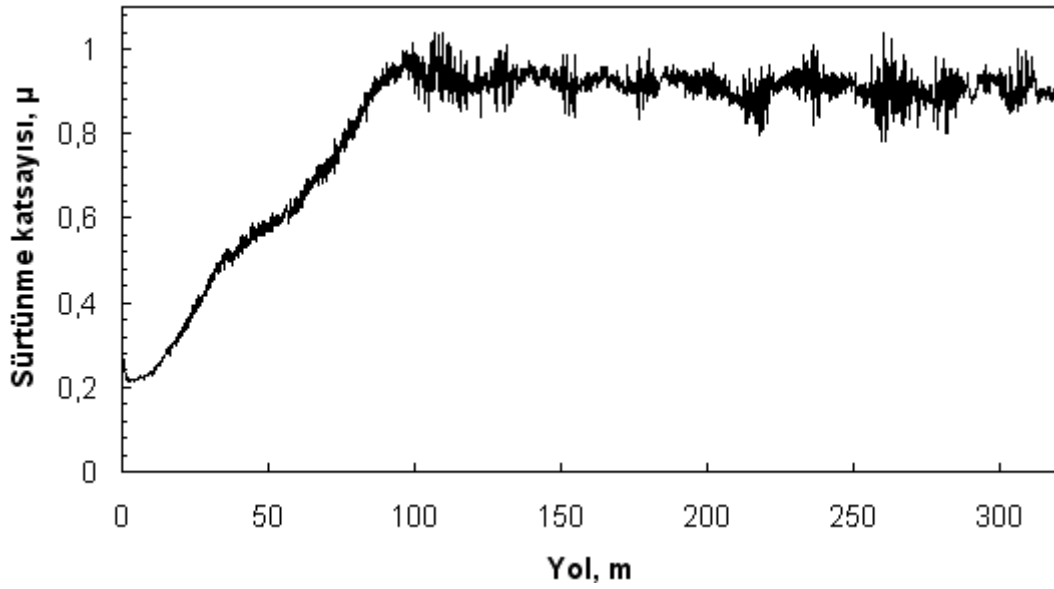
Şekil 7.62. 1000°C'de 2 saat süre ile niobyum nitrür kaplanmış AISI 4140 çeliğinin 0.1 m/s hız ve 5N yük altında Alümina bilyeye karşı yola bağlı olarak sürtünme katsayısındaki değişim



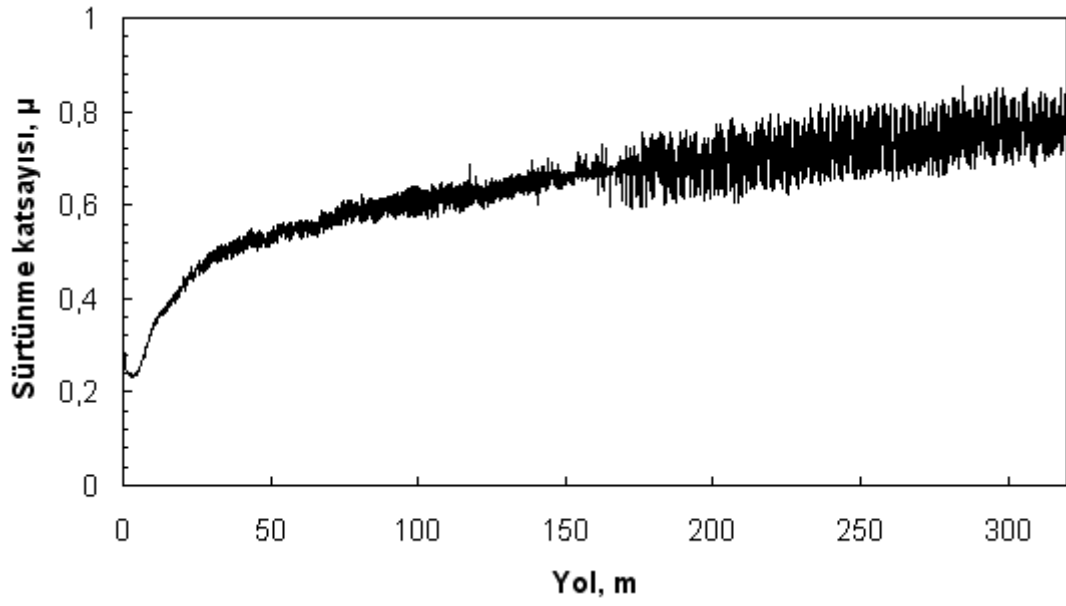
Şekil 7.63. 1000°C'de 2 saat süre ile niobyum nitrür kaplanmış AISI D2 çeliğinin 0.1 m/s hız ve 5N yük altında Alümina bilyeye karşı yola bağlı olarak sürtünme katsayısındaki değişim



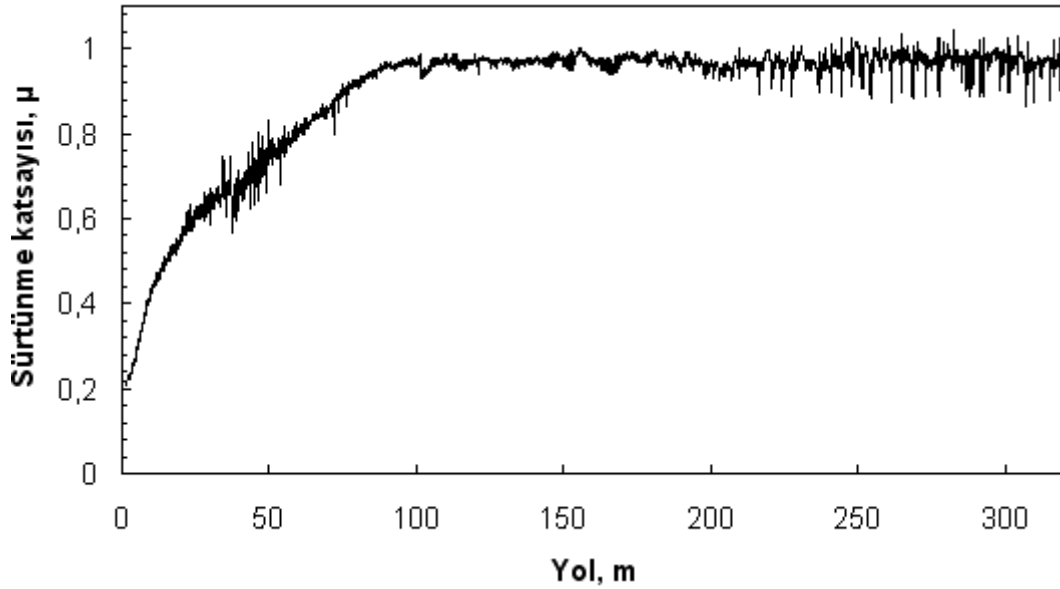
Şekil 7.64 1000°C’de 2 saat süre ile niobyum nitrür kaplanmış AISI M2 çeliğinin 0.1 m/s hız ve 5N yük altında Alümina bilyeye karşı yola bağlı olarak sürtünme katsayısındaki değişim



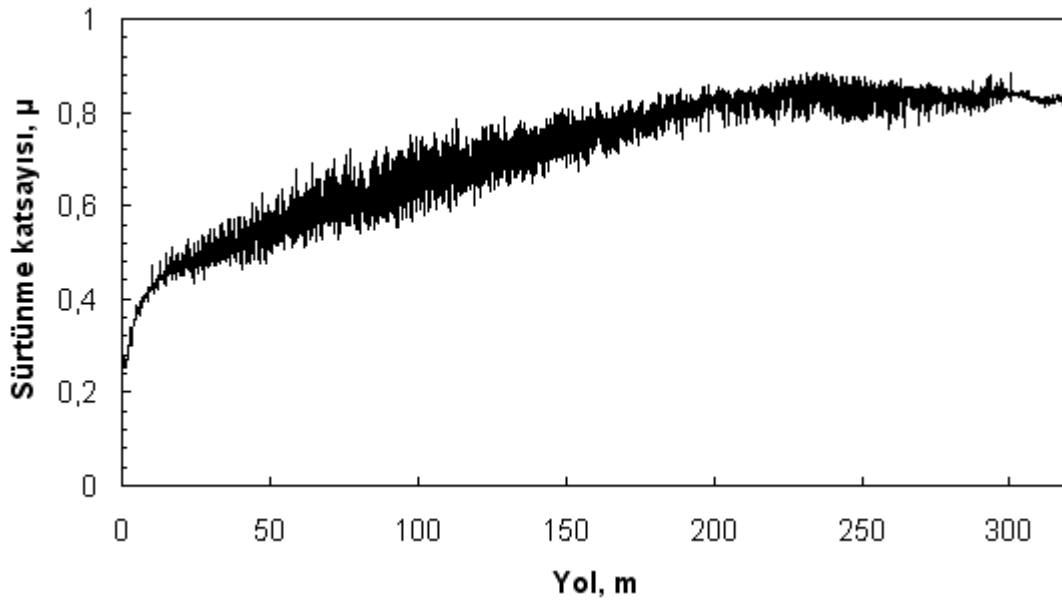
Şekil 7.65. 1000°C’de 2 saat süre ile niobyum nitrür kaplanmış AISI 1010 çeliğinin 0.1 m/s hız ve 5N yük altında AISI M50 çelik bilyeye karşı yola bağlı olarak sürtünme katsayısındaki değişim



Şekil 7.66. 1000°C'de 2 saat süre ile niobyum nitrid kaplanmış AISI 4140 çeliğinin 0.1 m/s hız ve 5N yük altında AISI M50 çelik bilyeye karşı yola bağlı olarak sürtünme katsayısındaki değişim



Şekil 7.67. 1000°C'de 2 saat süre ile niobyum nitrid kaplanmış AISI D2 çeliğinin 0.1 m/s hız ve 5N yük altında AISI M50 çelik bilyeye karşı yola bağlı olarak sürtünme katsayısındaki değişim



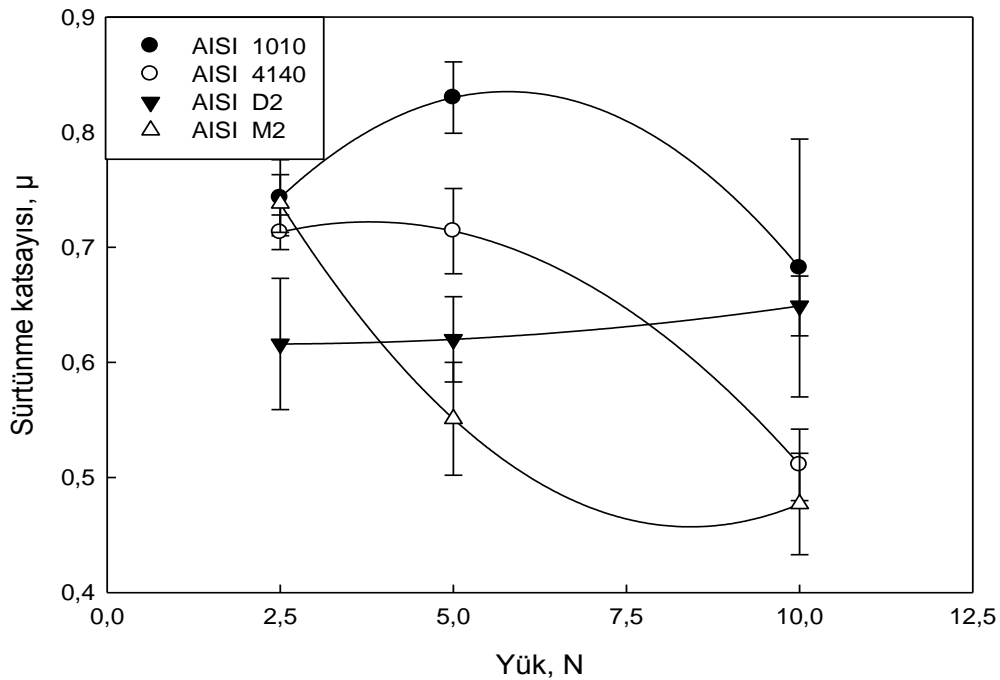
Şekil 7.68. 1000°C’de 2 saat süre ile niobyum nitrür kaplanmış AISI M2 çeliğinin 0.1 m/s hız ve 5N yük altında AISI M50 çelik bilyeye karşı yola bağlı olarak sürtünme katsayısındaki değişim

Tablo 7.3. 1000°C’de 2 saat süre ile niobyum nitrür kaplanmış ve kaplama işlemi uygulanmamış çeliklerin 0.1 m/s hızda, 320m mesafede Alümina bilyeye karşı oluşan sürtünme katsayısı değerleri

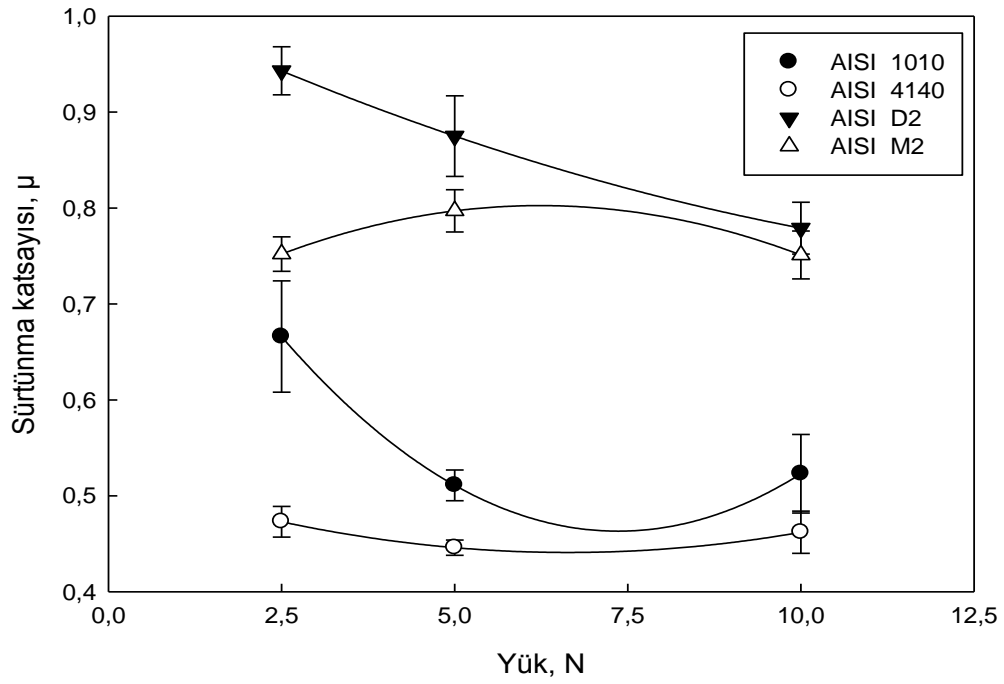
Sürtünme katsayısı, μ			
Numuneler ve uygulanan Yükler		NbN kaplı numuneler	Kaplı olmayan numuneler
AISI 1010	2,5N	0,743±0,033	0,666±0,058
	5N	0,830±0,031	0,511±0,016
	10N	0,682±0,112	0,523±0,041
AISI 4140	2,5N	0,713±0,015	0,473±0,016
	5N	0,714±0,037	0,446±0,008
	10N	0,511±0,031	0,462±0,022
AISI D2	2,5N	0,616±0,057	0,943±0,025
	5N	0,620±0,037	0,875±0,042
	10N	0,649±0,026	0,779±0,027
AISI M2	2,5N	0,738±0,025	0,752±0,018
	5N	0,551±0,049	0,797±0,022
	10N	0,477±0,044	0,751±0,025

Tablo 7.4. 1000°C'de 2 saat süre ile niobyum nitür kaplanmış ve kaplama işlemi uygulanmamış çeliklerin 0.1 m/s hızda, 320m mesafede AISI M50 çelik bilyeye karşı oluşan sürtünme katsayısı değerleri

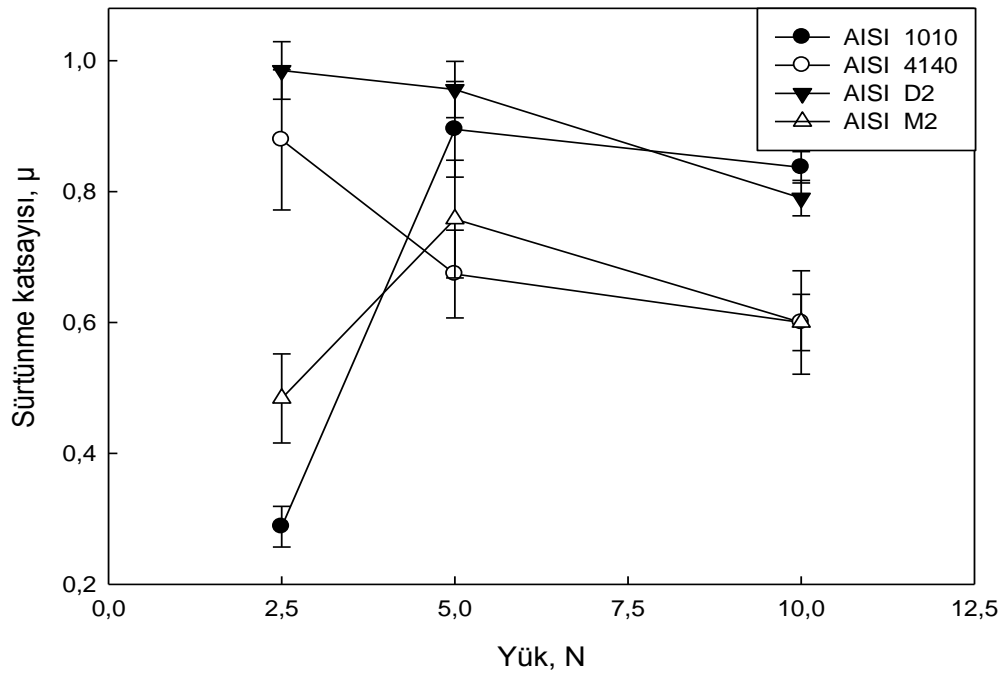
Sürtünme katsayısı, μ			
Numuneler ve uygulanan Yükler		NbN kaplı numuneler	Kaplı olmayan numuneler
AISI 1010	2,5N	0,288±0,031	0,907±0,022
	5N	0,895±0,073	0,555±0,018
	10N	0,837±0,024	0,553±0,012
AISI 4140	2,5N	0,879±0,107	0,617±0,012
	5N	0,674±0,067	0,585±0,006
	10N	0,600±0,043	0,586±0,012
AISI D2	2,5N	0,985±0,044	0,964±0,244
	5N	0,956±0,043	1,036±0,019
	10N	0,790±0,027	0,967±0,087
AISI M2	2,5N	0,484±0,068	1,068±0,020
	5N	0,758±0,090	0,972±0,018
	10N	0,600±0,079	0,942±0,027



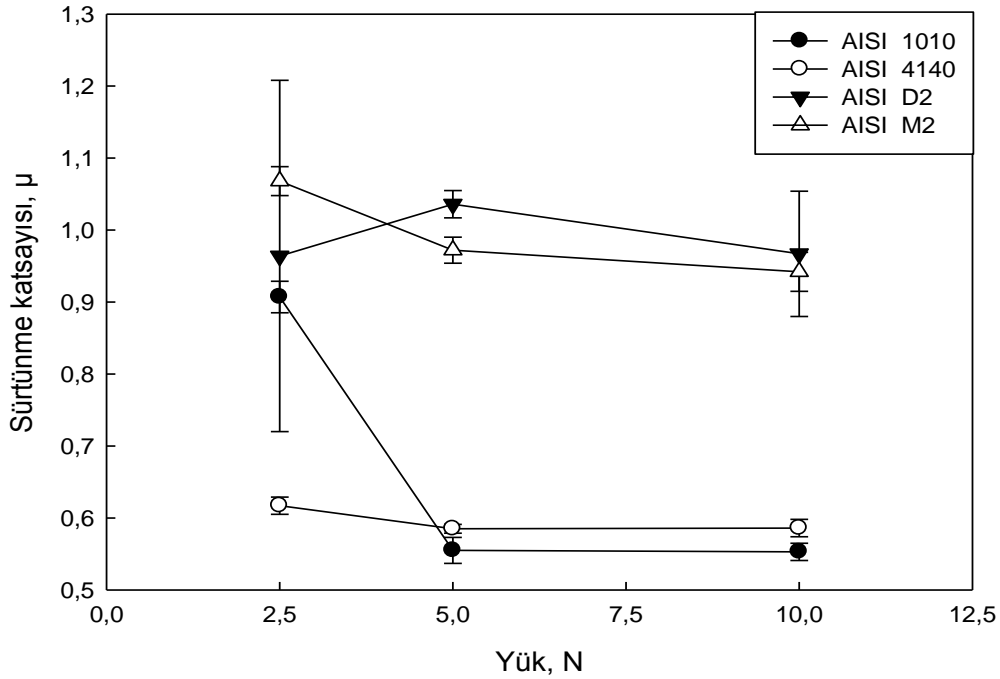
Şekil 7.69. 1000°C'de 2 saat süre ile niobyum nitür kaplanmış çeliklerin 0.1 m/s hızda, 320m mesafede alümina bilyeye karşı oluşan sürtünme katsayısı değerleri



Şekil 7.70. Kaplanmamış çeliklerin 0.1 m/s hızda, 320m mesafede alümina bilyeye karşı oluşan sürtünme katsayısı değerleri



Şekil 7.71. 1000°C'de 2 saat süre ile niobiyum nitrid kaplanmış çeliklerin 0.1 m/s hızda, 320m mesafede AISI M50 çelik bilyeye karşı oluşan sürtünme katsayısı değerleri

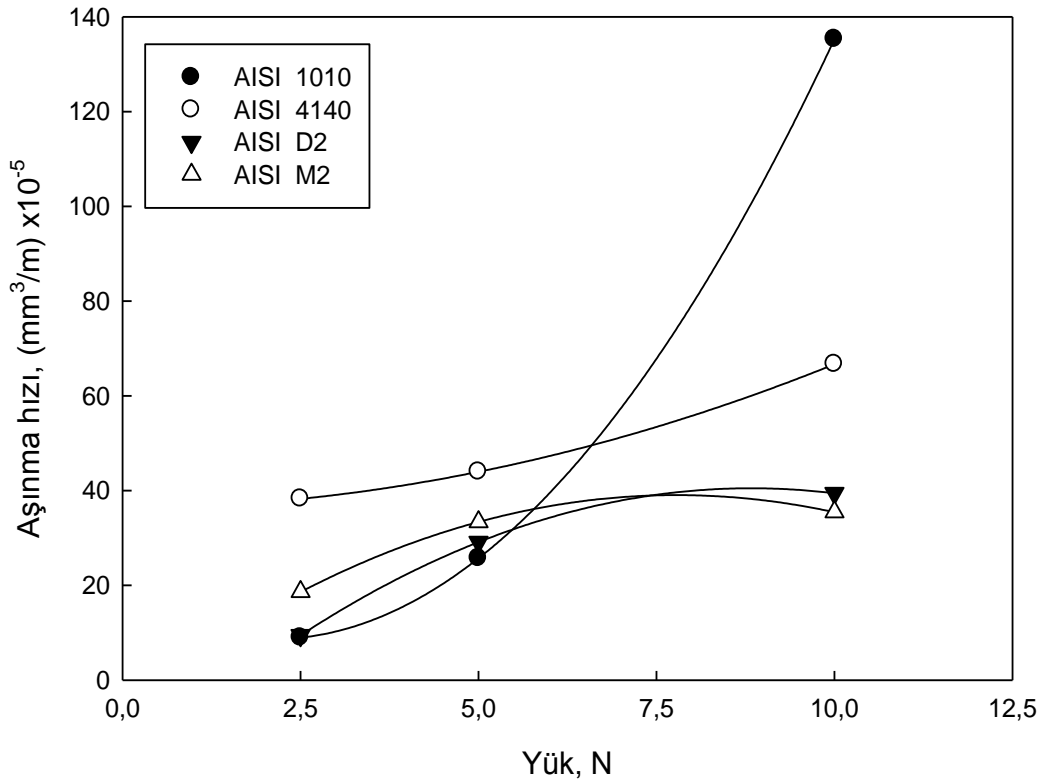


Şekil 7.72. Kaplanmamış çeliklerin 0.1 m/s hızda, 320m mesafede AISI M50 çelik bilyeye karşı oluşan sürtünme katsayısı değerleri

Yapılan aşınma deneyleri neticesinde aşınma hızlarındaki değişimler incelendiğinde, niobyum nitrür kaplanmış çeliklerin alümina bilye ile aşındırılması sonunda oluşan aşınma hızları, uygulanan yük artışıyla artış göstermektedir. Niobyum nitrür kaplanmış AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çeliklerinin alümina bilye karşısında gösterdiği aşınma hızı değerleri sırasıyla $8,960 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$ - $135,285 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$, $38,263 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$ - $66,677 \times 10^{-5}$, $9,446 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$ - $39,444 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$ ve $18,612 \times 10^{-5}$ - $35,446 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$ arasında değişim göstermektedir. Kaplanmış çeliklerin alümina bilyeye karşı oluşan aşınma hızlarının uygulanan yük ve sürtünme hızlarına bağlı olarak değişimi Tablo 7.5' de ve Şekil 7.73'de görülmektedir.

Tablo 7.5. 0,1 m/s hızda, 320 m mesafede Alümina bilye ile aşındırılan niobyum nitrür kaplamanın aşınma hızlarının uygulanan yüke bağlı olarak değişimi

Aşınma hızı (mm^3/m) $\times 10^{-5}$			
Yük (N) Malzeme	2,5 N	5 N	10 N
AISI 1010	8,960	25,715	135,285
AISI 4140	38,263	43,974	66,677
AISI D2	9,446	29,129	39,444
AISI M2	18,612	33,389	35,446



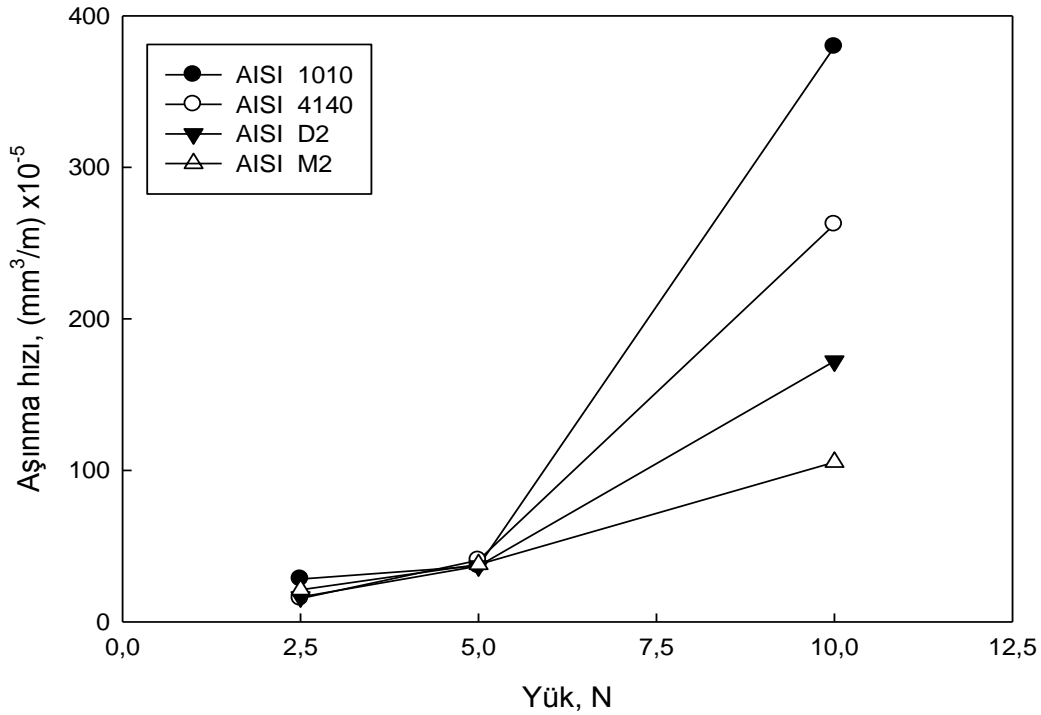
Şekil 7.73. 0,1 m/s hızda, 320 m mesafede Alümina bilye ile aşındırılan niobyum nitrür kaplamanın aşınma hızlarının uygulanan yüke bağlı olarak değişimi

Yüzeyi kaplanmamış AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çeliklerinin alümina bilye karşısında ölçülen aşınma hızı değerleri Tablo 7.6'da ve Şekil 7.74'de sırasıyla $28,305 \times 10^{-5} \text{mm}^3/\text{m}$ - $379,643 \times 10^{-5} \text{mm}^3/\text{m}$, $15,395 \times 10^{-5} \text{mm}^3/\text{m}$ - $262,310 \times 10^{-5}$, $16,459 \times 10^{-5} \text{mm}^3/\text{m}$ - $172,118 \times 10^{-5} \text{mm}^3/\text{m}$ ve $21,202 \times 10^{-5}$ -

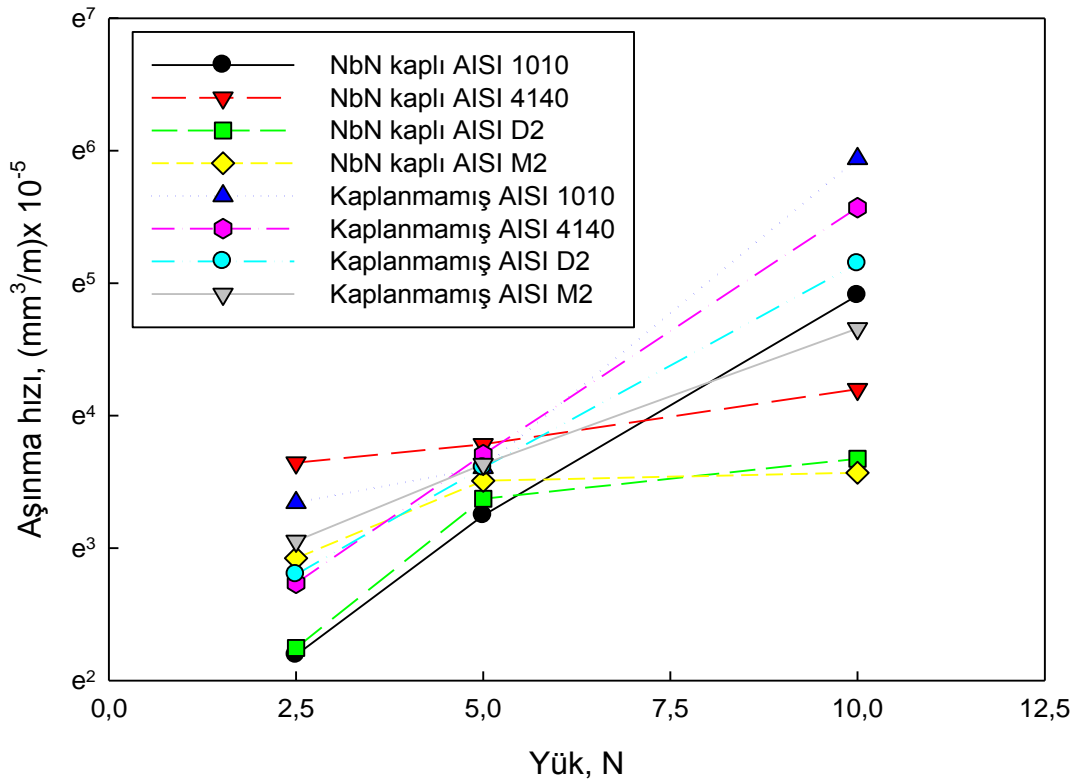
105,441x10⁻⁵mm³/m arasında değişim gösterdiği görülmektedir. Kaplama işlemleriyle çeliklerin aşınma hızları sırasıyla %68,34 ile %64,36, %59,76 ile %74,58, %42,60 ile %77.08, %12,21 ile %66,38 arasında artış göstermiştir. Aşınma deneylerinde kullanılan bilyeler ve uygulanan aşınma yüklerine bağlı olarak kaplama işlemleriyle çeliklerin aşınma hızlarındaki değişim oranları % olarak Tablo 7.7'de verilmiştir.

Tablo 7.6. 0,1 m/s hızda, 320 m mesafede kaplanmamış çeliklerin Alümina bilye ile aşındırılmasıyla oluşan aşınma hızlarının uygulanan yüke bağlı olarak değişimi

Aşınma hızı (mm ³ /m)x10 ⁻⁵			
Yük (N) Malzeme	2,5 N	5 N	10 N
AISI 1010	28,305	36,833	379,643
AISI 4140	15,395	40,673	262,310
AISI D2	16,459	36,833	172,118
AISI M2	21,202	37,843	105,441



Şekil 7.74. 0,1 m/s hızda, 320 m mesafede Alümina bilye ile aşındırılan kaplanmamış çeliklerde aşınma hızlarının uygulanan yüke bağlı olarak değişimi



Şekil 7.75. 0,1 m/s hızda, 320 m mesafede Alümina bilye ile aşındırılan niobyum nitrür kaplanmış çelikler ile kaplanmamış çeliklerin aşınma hızlarının uygulanan yüke bağlı olarak değişimleri

Tablo 7.7. 1000°C’de 2 saat Niobyum nitrür kaplanmış çelik ile kaplanmamış çeliğin alümina bilye karşısındaki aşınma hızı % değişimi

Aşınma hızı % değişimi			
Yük Çelikler	2,5 N	5 N	10 N
AISI 1010	68,34	30,18	64,36
AISI 4140	59,76	7,50	74,58
AISI D2	42,60	20,91	77,08
AISI M2	12,21	11,76	66,38

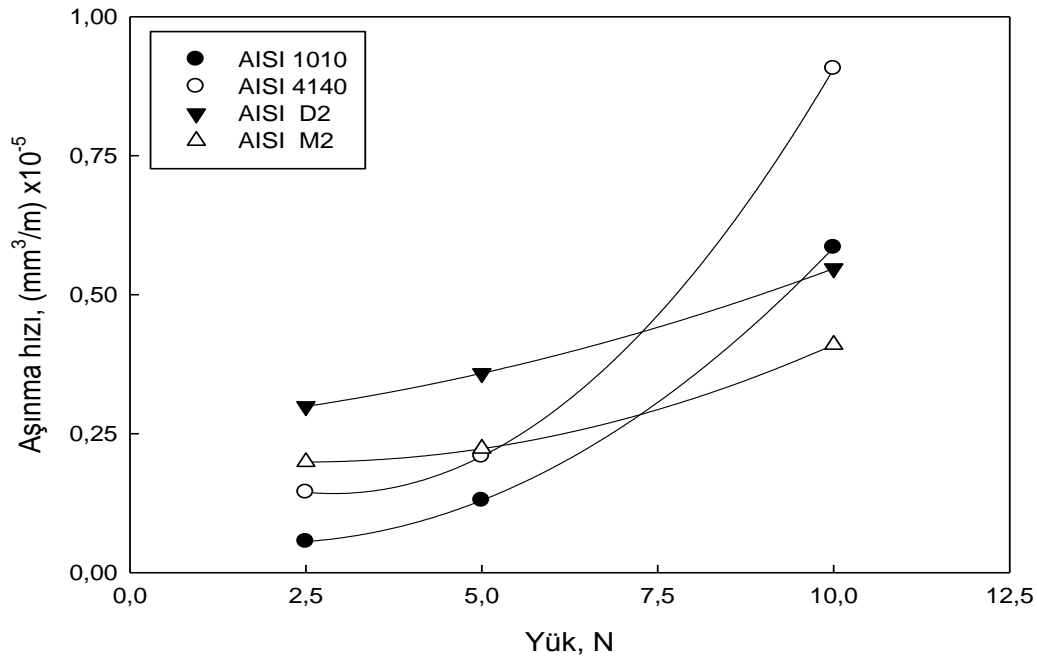
Niobyum nitrür kaplanmış 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çeliklerine karşı aşındırılan alümina ve AISI M50 çelik bilyelerin aşınma hızlarının uygulanan yüke bağlı olarak değişimleri sırası ile Tablo 7.8 -7.9’da ve Şekil 7.76-7.77’de verilmektedir.

Tablo 7.8. 0,1 m/s hızda, 320 m mesafede Niobyum nitür kaplanmış çeliklere karşı aşındırılan Alümina bilyedeki aşınma hızlarının uygulanan yüke bağlı olarak değişimi

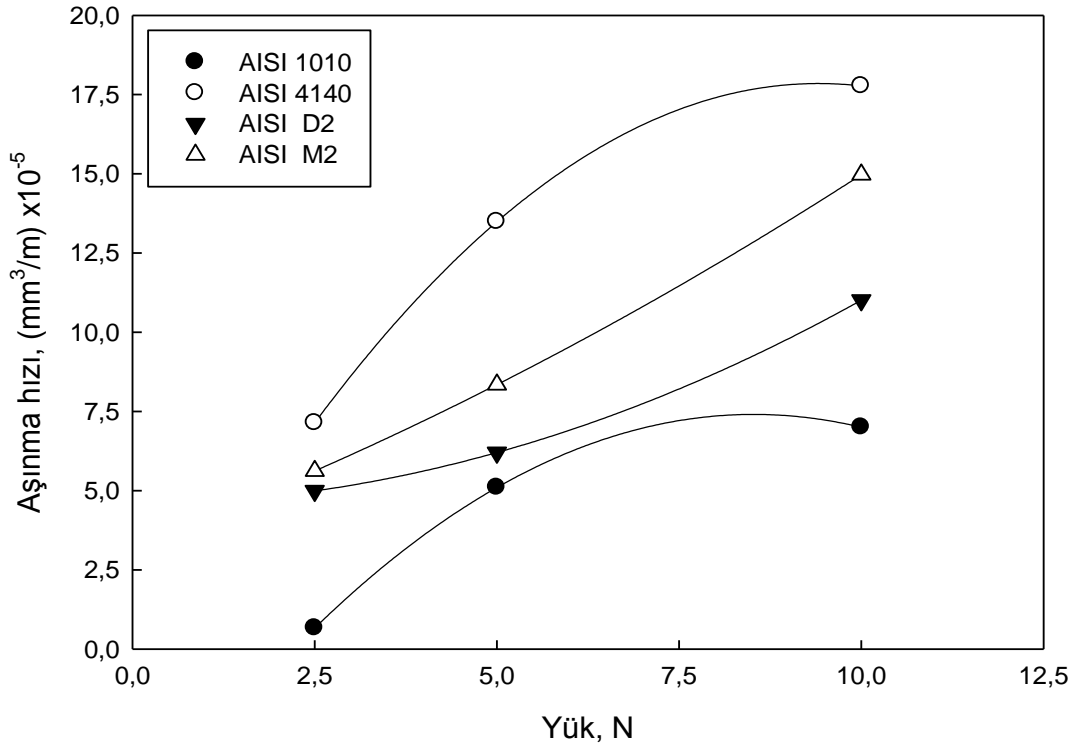
Aşınma hızı (mm^3/m) $\times 10^{-5}$			
Yük (N) Malzeme	2,5 N	5 N	10 N
AISI 1010	0,056	0,130	0,585
AISI 4140	0,144	0,209	0,906
AISI D2	0,299	0,358	0,547
AISI M2	0,199	0,223	0,410

Tablo 7.9. 0,1 m/s hızda, 320 m mesafede Niobyum nitür kaplanmış çeliklere karşı aşındırılan AISI M50 çelik bilyedeki aşınma hızlarının uygulanan yüke bağlı olarak değişimi

Aşınma hızı (mm^3/m) $\times 10^{-5}$			
Yük (N) Malzeme	2,5 N	5 N	10 N
AISI 1010	0,661	5,098	7,000
AISI 4140	7,137	13,485	17,771
AISI D2	4,991	6,202	11,011
AISI M2	5,621	8,345	14,971



Şekil 7.76 0,1 m/s hızda, 320 m mesafede Niobyum nitür kaplanmış çeliklere karşı aşınma deneyine tabi tutulan alümina bilyedeki aşınma hızının uygulanan yüke bağlı olarak değişimi



Şekil 7.77. 0,1 m/s hızda, 320 m mesafede Niobyum nitrür kaplanmış çeliklere karşı aşınma deneyine tabi tutulan AISI M50 çelik bilyedeki aşınma hızının uygulanan yüke bağlı olarak değişimi

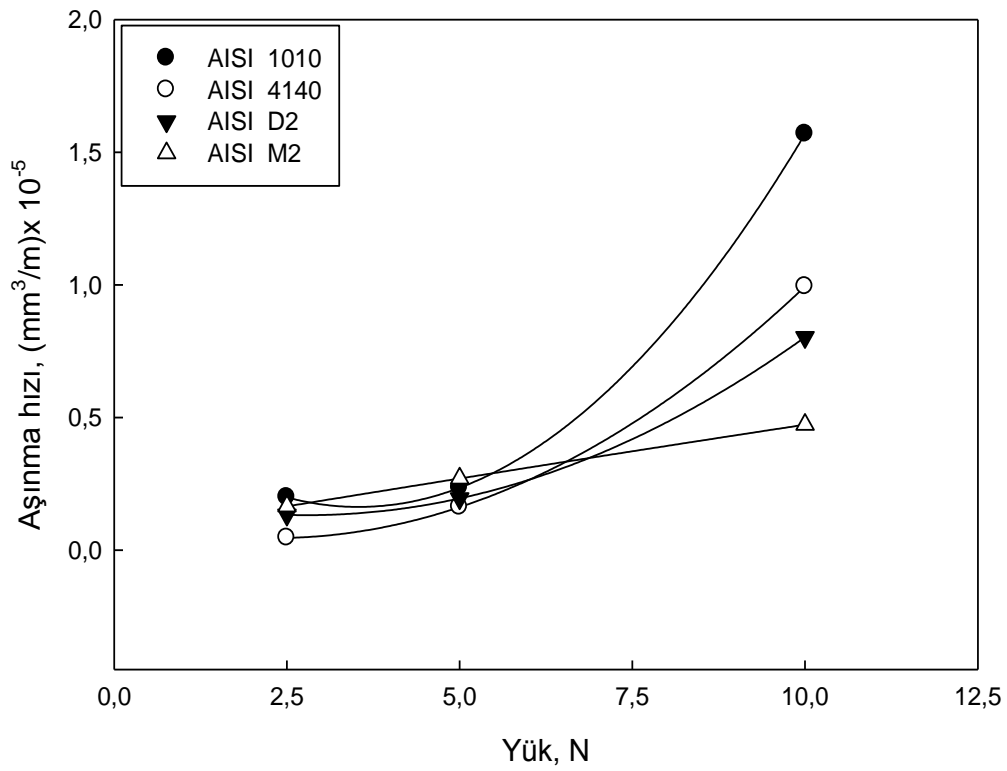
Kaplama işlemi uygulanmamış 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çeliklerine karşı aşındırılan alümina ve AISI M50 çelik bilyelerin aşınma hızlarının uygulanan yüke bağlı olarak değişimleri sırası ile Tablo 7.10-7.11 ve Şekil 7.78-7.79'de verilmektedir.

Tablo 7.10. 0,1 m/s hızda, 320 m mesafede kaplanmamış çeliklere karşı aşındırılan Alümina bilyedeki aşınma hızlarının uygulanan yüke bağlı olarak değişimi

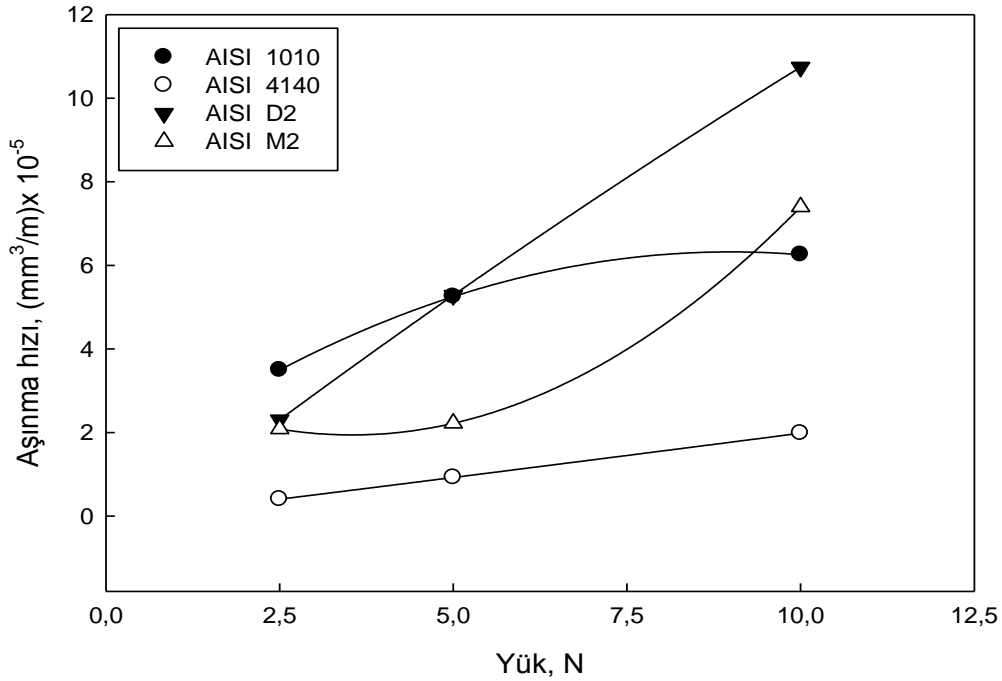
Aşınma hızı (mm ³ /m)x10 ⁻⁵			
Yük (N) Malzeme	2,5 N	5 N	10 N
AISI 1010	0,199	0,235	1,569
AISI 4140	0,046	0,162	0,994
AISI D2	0,133	0,195	0,803
AISI M2	0,165	0,270	0,473

Tablo 7.11. 0,1 m/s hızda, 320 m mesafede kaplanmamış çeliklere karşı aşındırılan AISI M50 çelik bilyedeki aşınma hızlarının uygulanan yüke bağlı olarak değişimi

Aşınma hızı ($\text{mm}^3/\text{m}) \times 10^{-5}$			
Yük (N) Malzeme	2,5 N	5 N	10 N
AISI 1010	3,495	5,252	6,256
AISI 4140	0,405	0,925	1,985
AISI D2	2,304	5,284	10,745
AISI M2	2,085	2,221	7,397



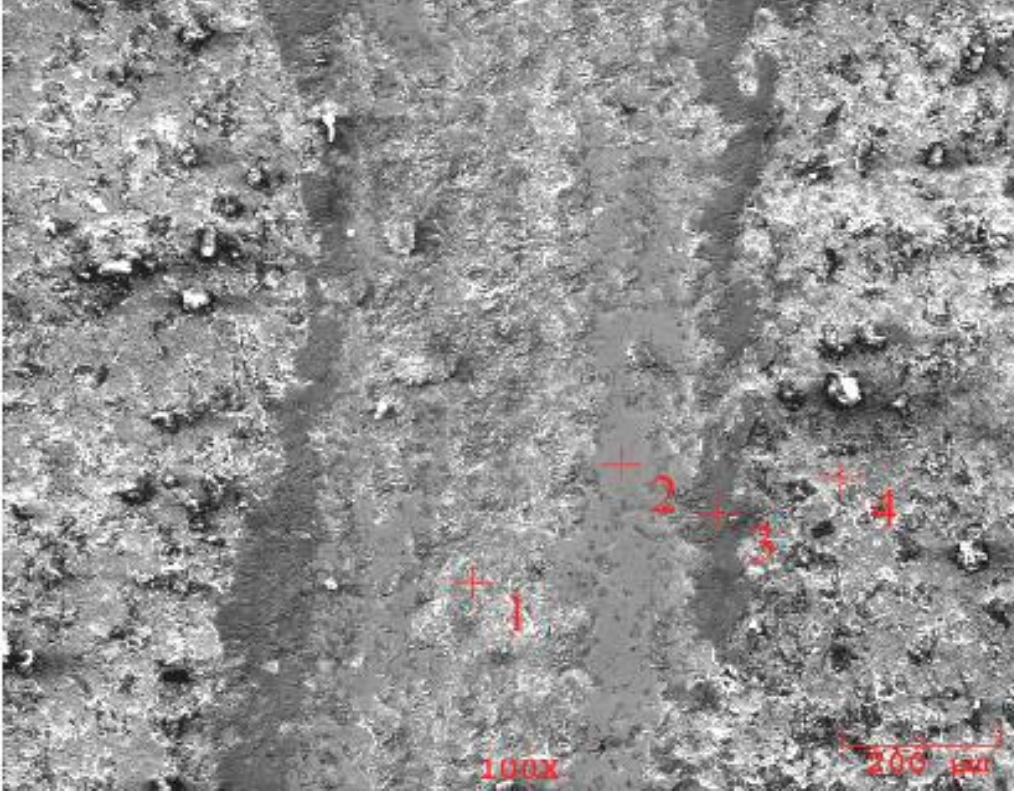
Şekil 7.78. 0,1 m/s hızda, 320 m mesafede kaplanmamış çeliklere karşı aşınma deneyine tabi tutulan alümina bilyedeki aşınma hızının uygulanan yüke bağlı olarak değişimi



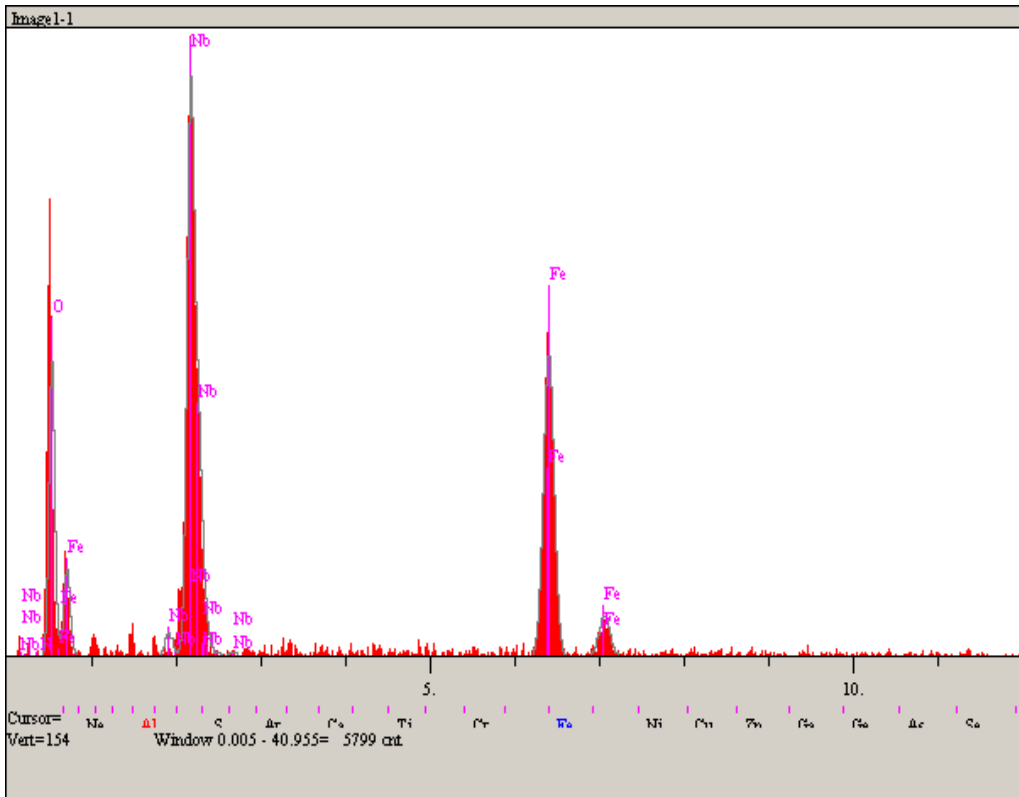
Şekil 7.79. 0,1 m/s hızda, 320 m mesafede kaplanmamış çeliklere karşı aşınma deneyine tabi tutulan AISI M50 çelik bilyedeki aşınma hızının uygulanan yüke bağlı olarak değişimi

Şekil 7.76 ile Şekil 7.79 arasındaki grafikler incelendiğinde sürtünme hızının artışına ve aşınma yükünün artışına bağlı olarak bilyelerdeki aşınma hızları artış göstermektedir. Alümina bilye ile yapılan aşınma deneylerinde, niobyum nitrür kaplanmış AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çeliklerine karşı aşındırılan alümina bilyedeki aşınma hızlarının sırası ile $0,056 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$ - $0,585 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$, $0,144 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$ - $0,906 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$, $0,229 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$ - $0,547 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$ ve $0,199 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$ - $0,410 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$ arasında değişmektedir. Yapılan aşınma deneylerinde, niobyum nitrür kaplanmış AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çeliklerine karşı aşındırılan AISI M50 çelik bilyedeki aşınma hızları sırası ile $0,661 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$ - $7,0 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$, $7,137 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$ - $17,771 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$, $4,991 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$ - $11,011 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$ ve $5,621 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$ - $14,971 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$ arasında değiştiği görülmektedir.

Aşınma deneyleri sonucunda elde edilen aşınma izleri ve aşınma üzerinden alınan EDS analizleri Şekil 7.80 ile Şekil 7.87' de verilmektedir. 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.

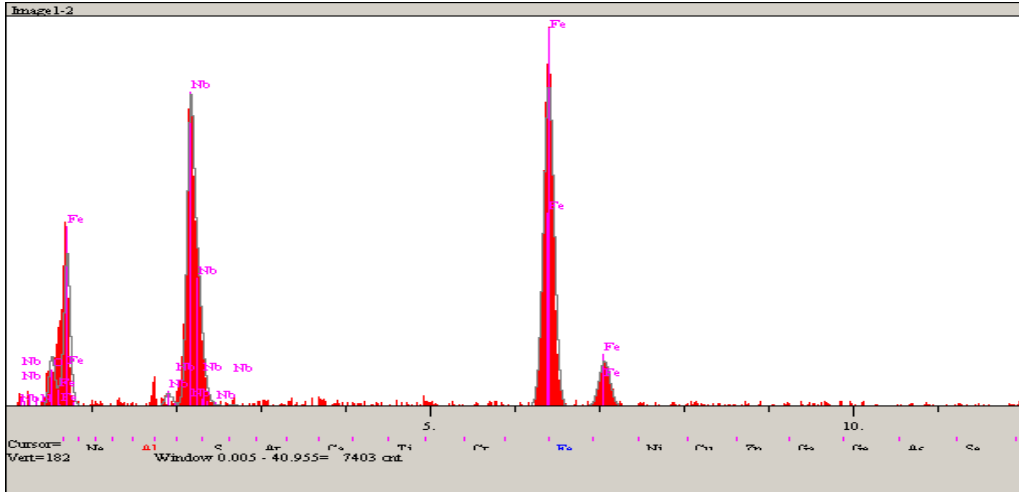


(a)

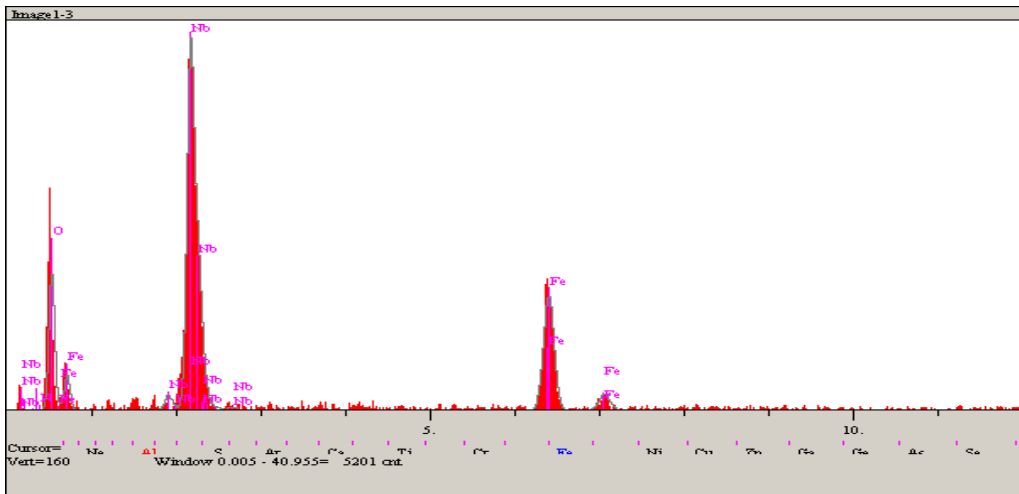


(b)

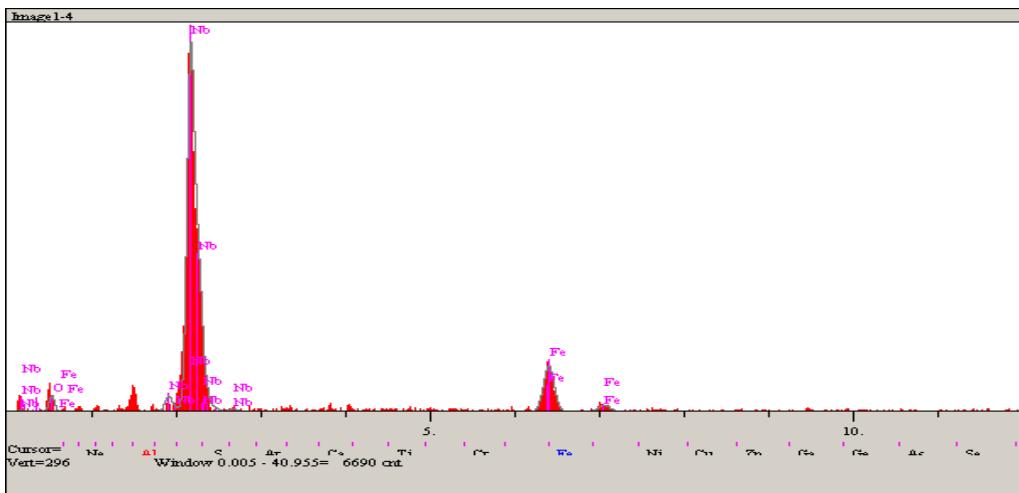
Şekil 7.80. 1000°C'de 2 saat süre ile niobyum nitür kaplanmış AISI 1010 çeliğinin 5N yük altında, 0.1 m/s hızda ve 320 m mesafede Alümina bilyeye karşı aşındırılmasıyla oluşan izin (a)SEM mikroyapısı, (b) 1. (c) 2. (d) 3. (e) 4. noktaların EDS analizleri



(c)

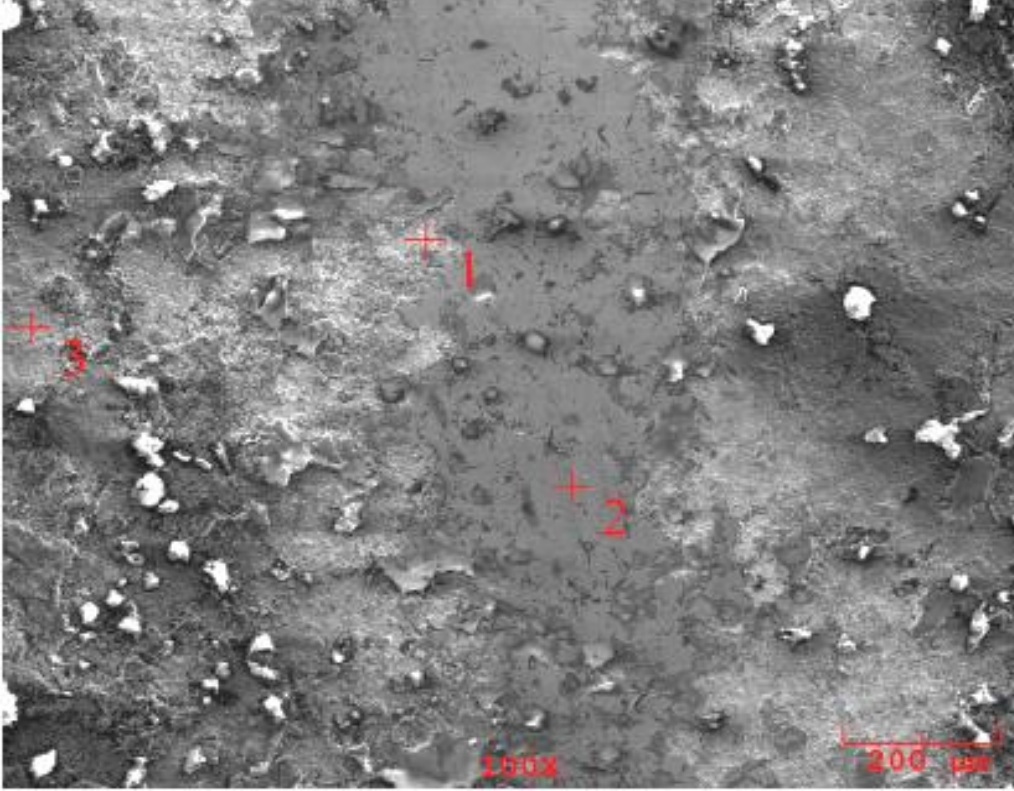


(d)

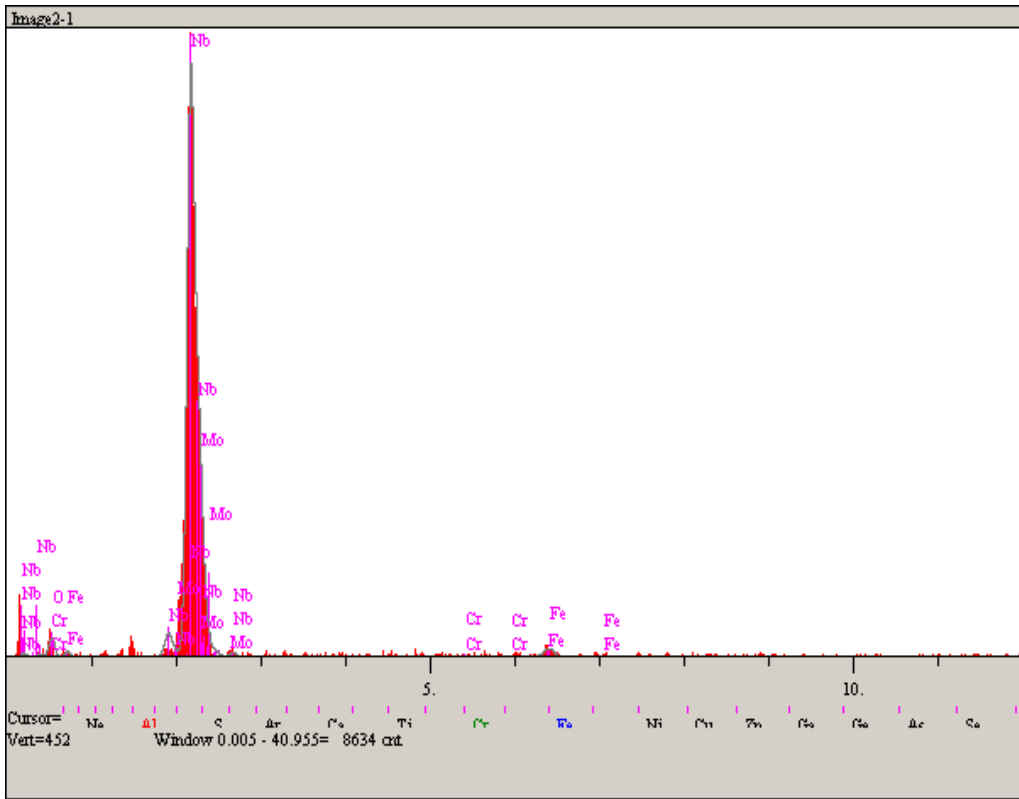


(e)

Şekil 7.80. Devam

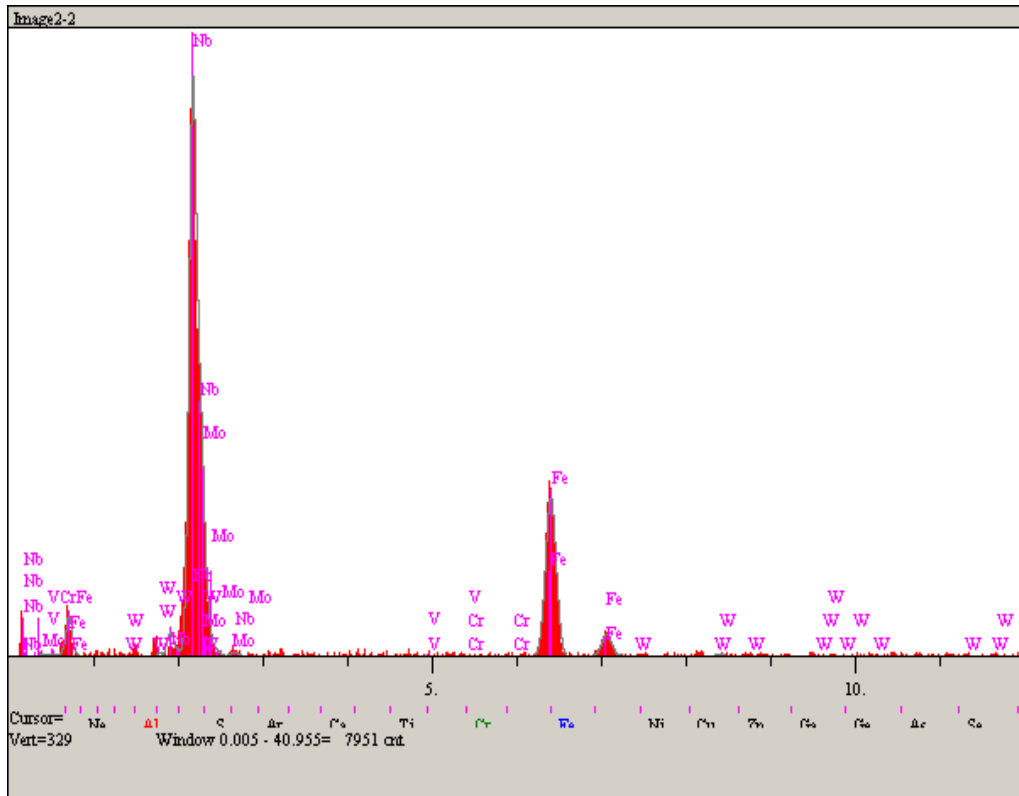


(a)

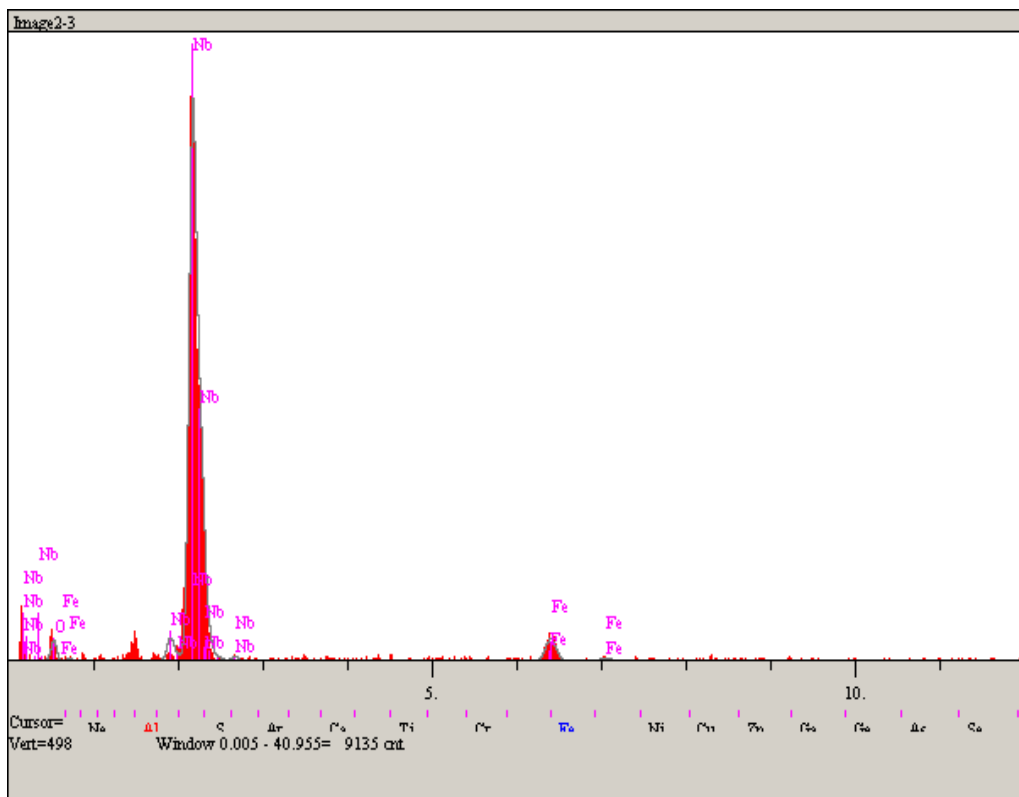


(b)

Şekil 7.81. 1000°C'de 2 saat süre ile niobyum nitürü kaplanmış AISI 4140 çeliğinin 5N yük altında, 0.1 m/s hızda ve 320 m mesafede Alümina bilyeye karşı aşındırılmasıyla oluşan izin (a)SEM mikroyapısı, (b) 1. (c) 2. (d) 3. noktaların EDS analizleri

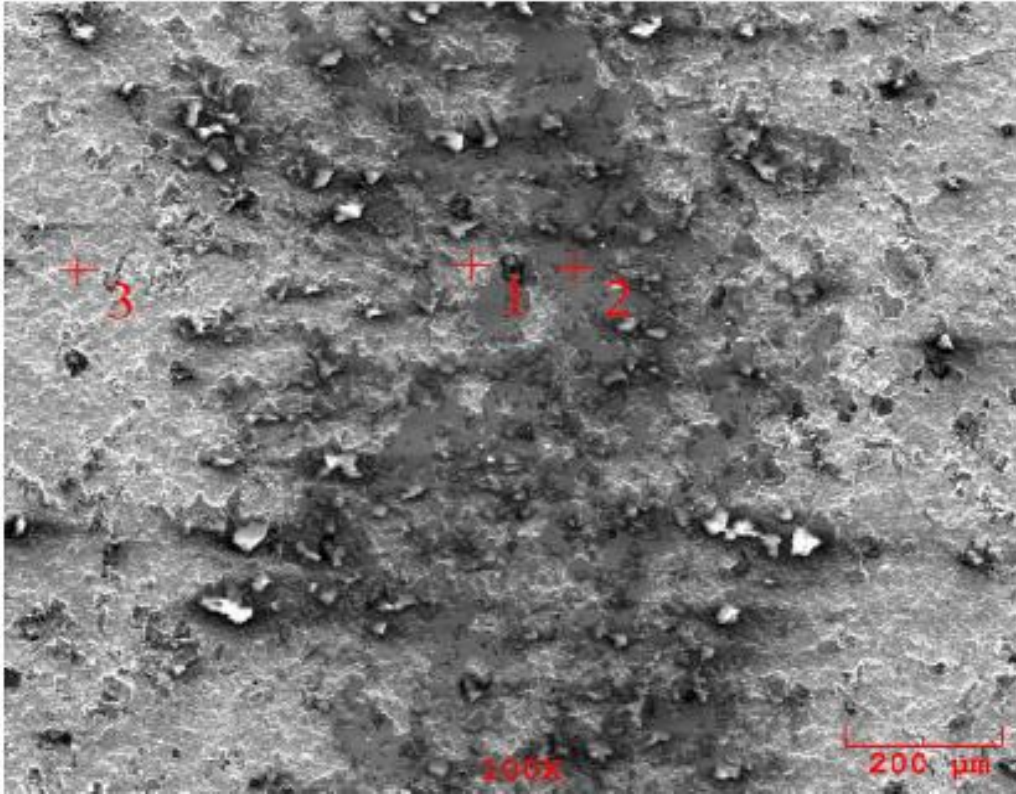


(c)

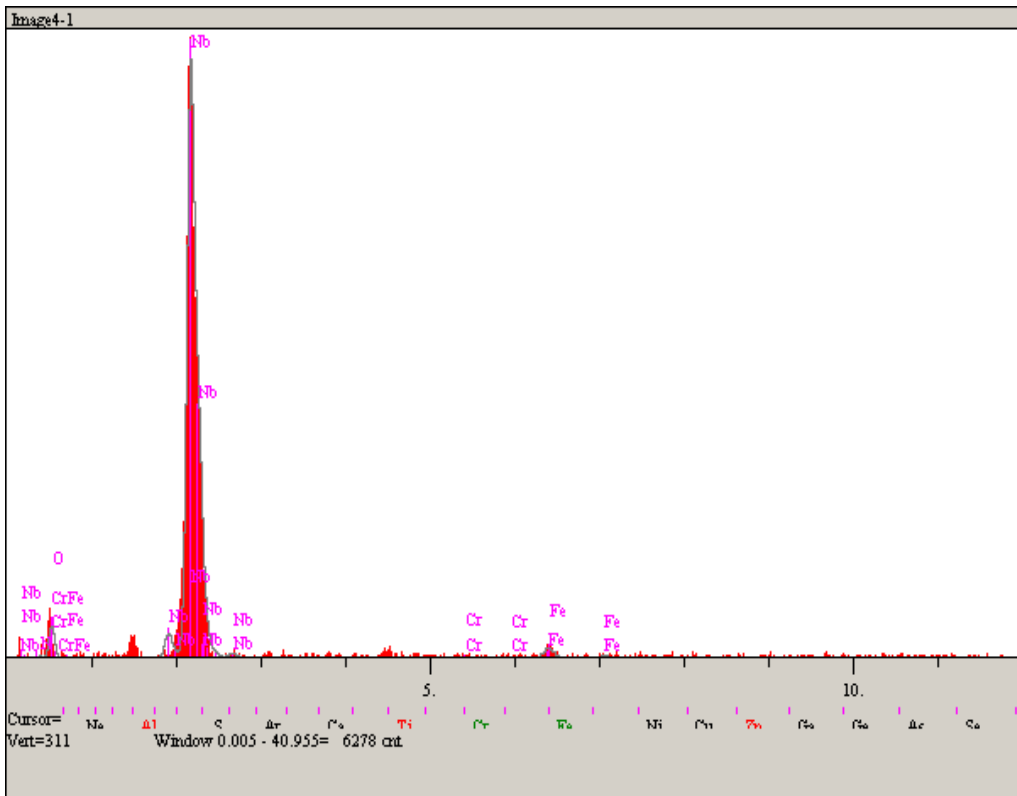


(d)

Şekil 7.81. Devam

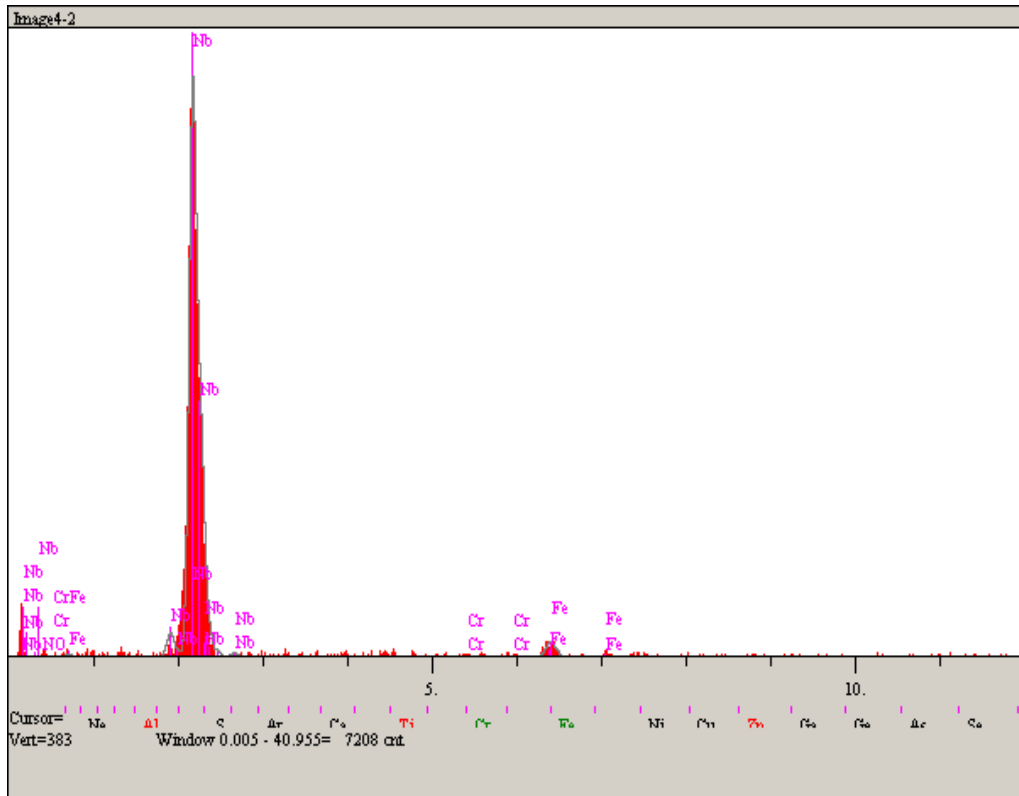


(a)

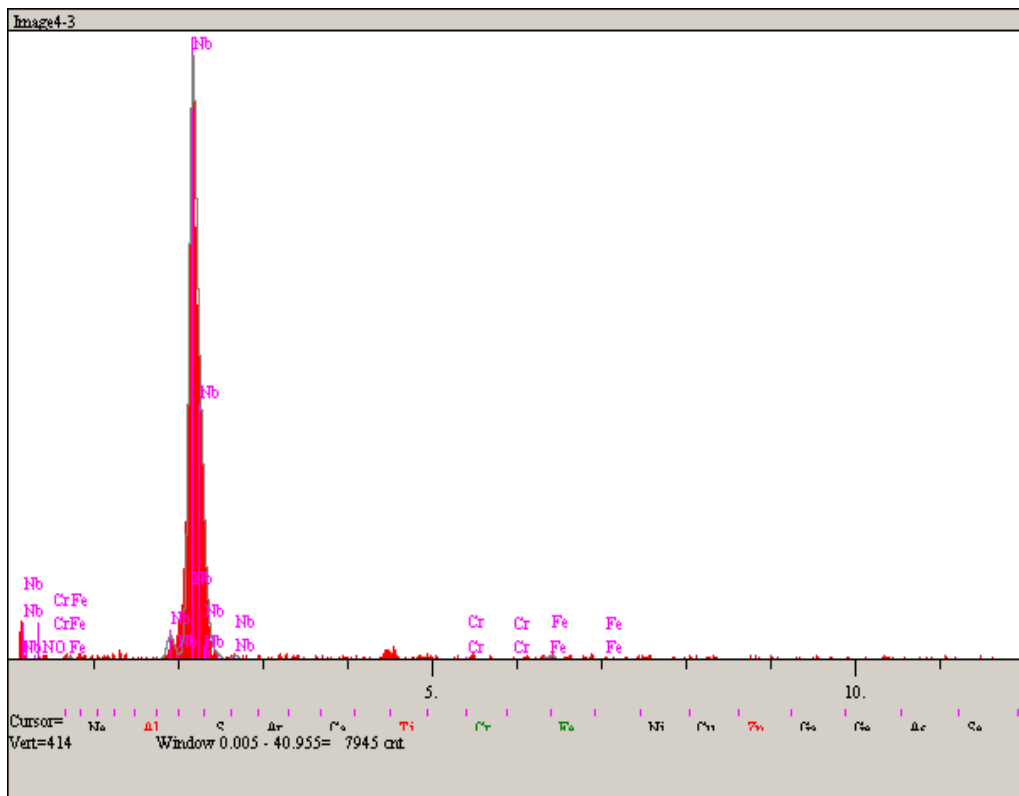


(b)

Şekil 7.82. 1000°C’de 2 saat süre ile niobyum nitürü kaplanmış AISI D2 çeliğinin 5N yük altında, 0.1 m/s hızda ve 320 m mesafede Alümina bilyeye karşı aşındırılmasıyla oluşan izin (a)SEM mikroyapısı, (b) 1. (c) 2. (d) 3. noktaların EDS analizleri

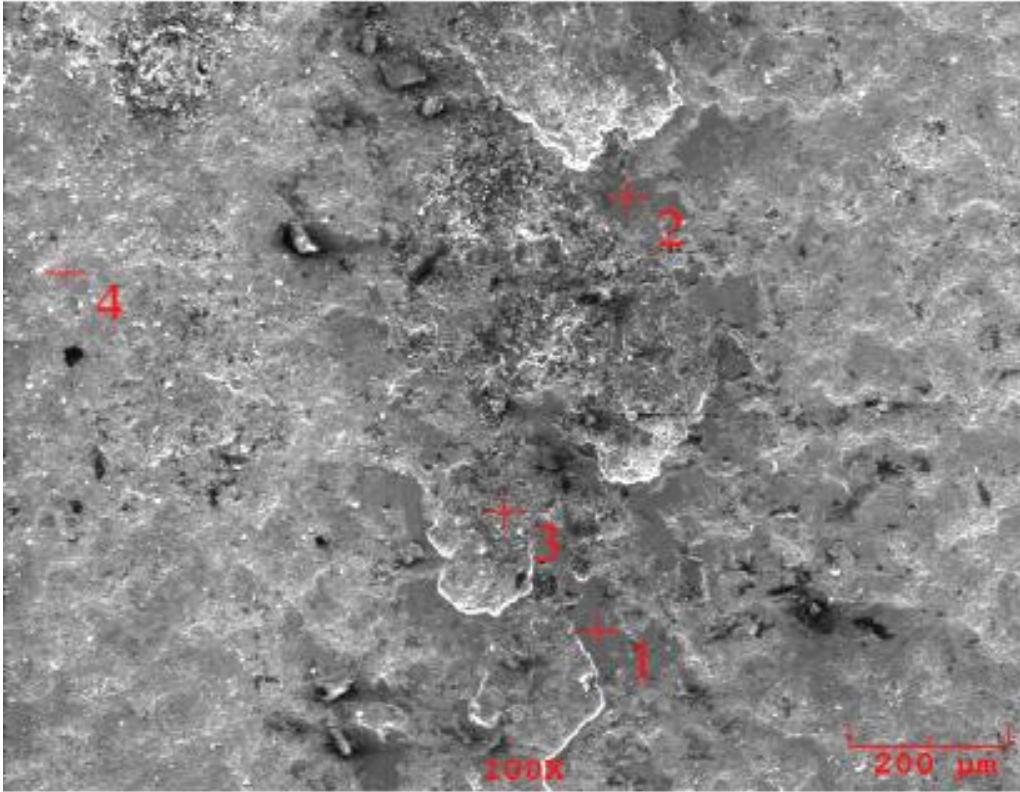


(c)

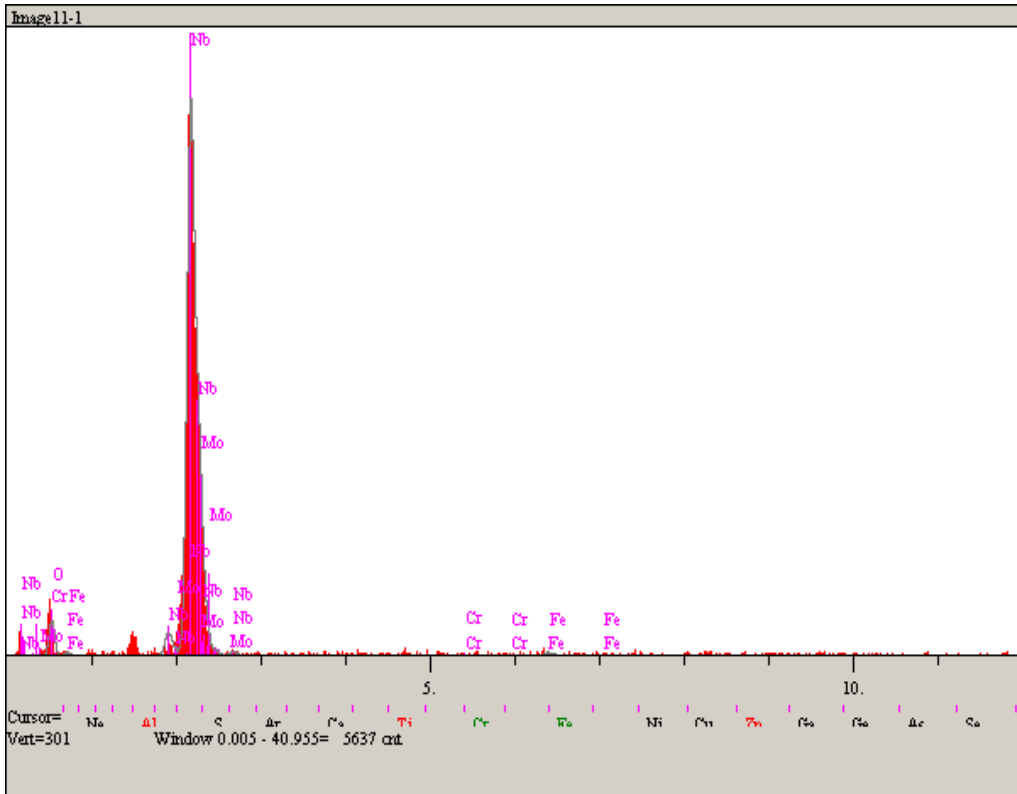


(d)

Şekil 7.82. Devam

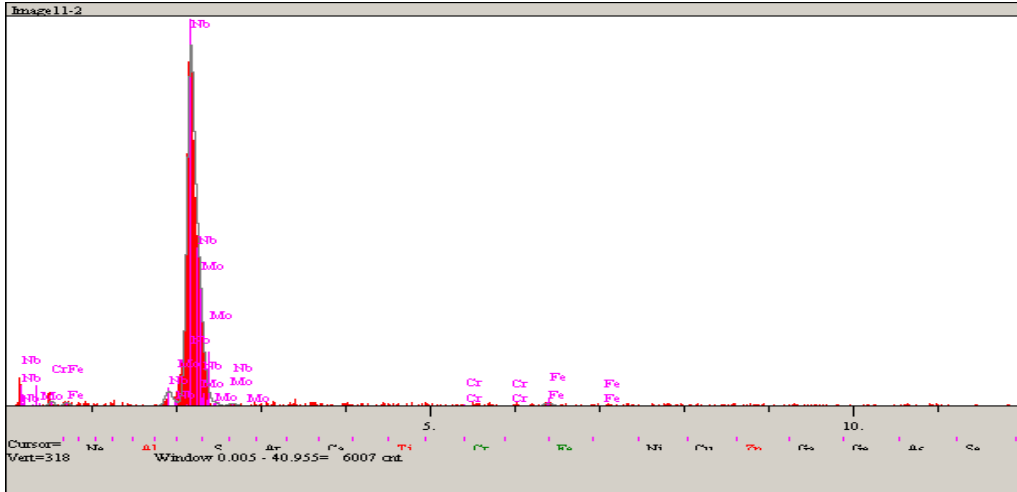


(a)

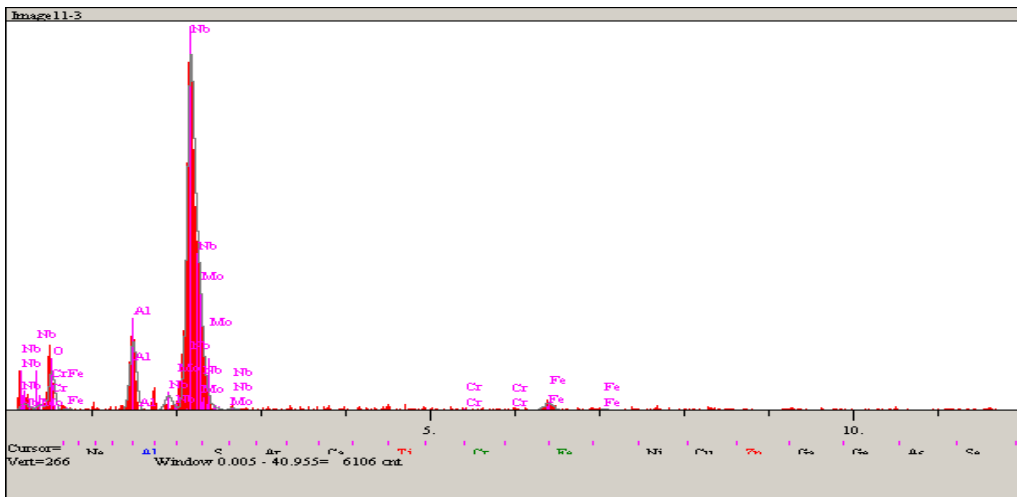


(b)

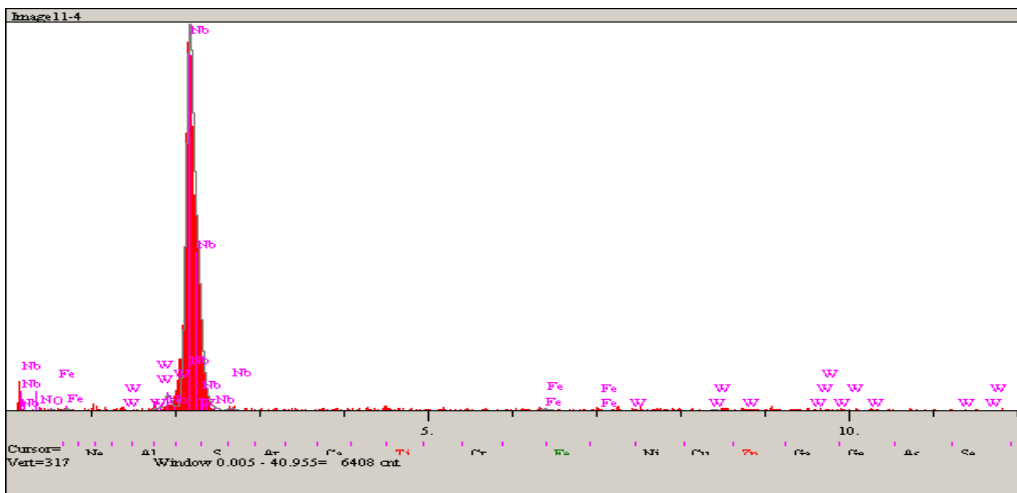
Şekil 7.83. 1000°C’de 2 saat süre ile niobyum nitrid kaplanmış AISI M2 çeliğinin 5N yük altında, 0.1 m/s hızda ve 320 m mesafede Alümina bilyeye karşı aşındırılmasıyla oluşan izin (a)SEM mikroyapısı, (b) 1. (c) 2. (d) 3. (e) 4. noktaların EDS analizleri



(c)

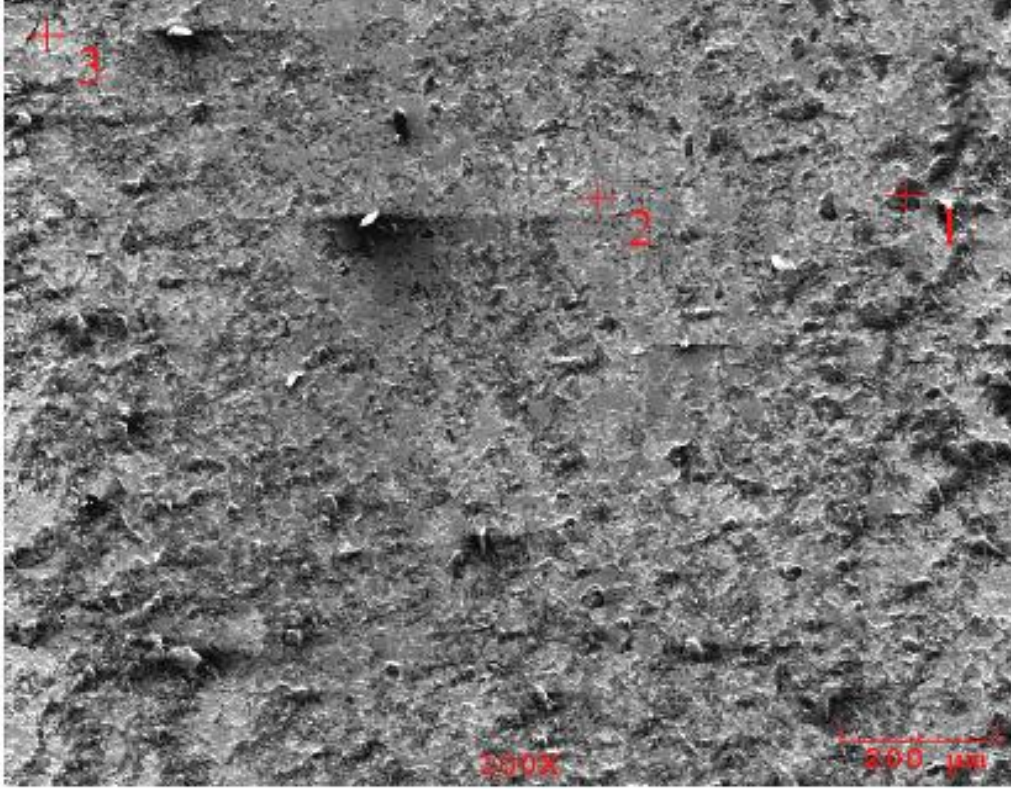


(d)

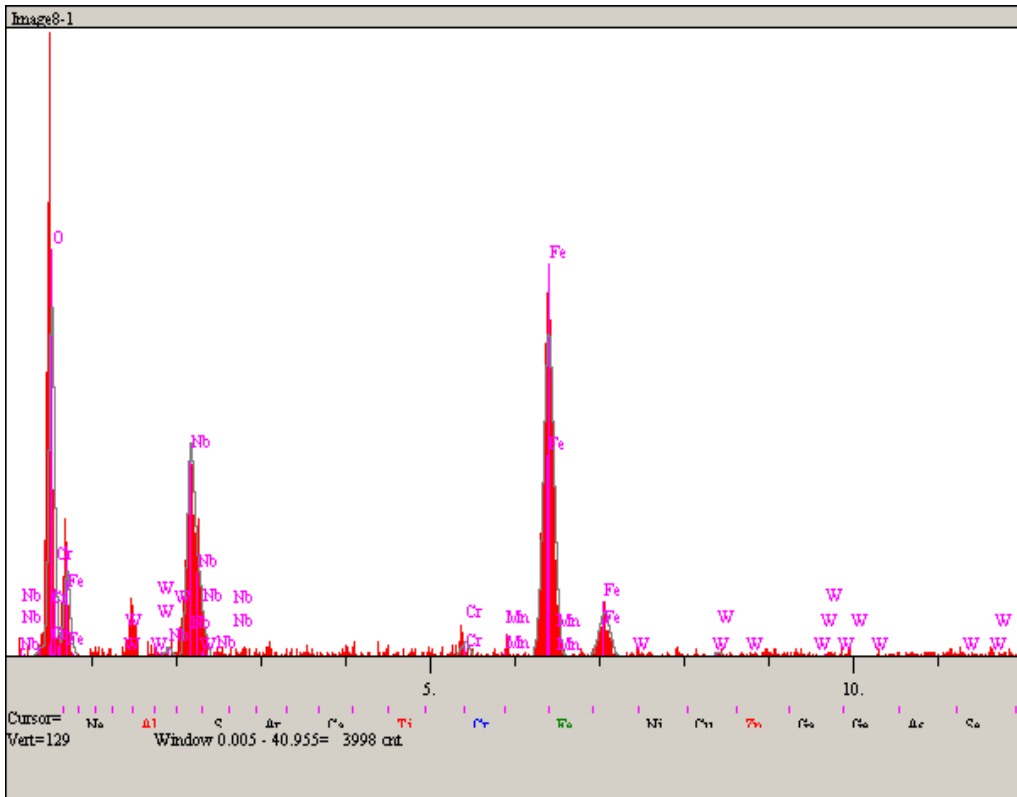


(e)

Şekil 7.83. Devam

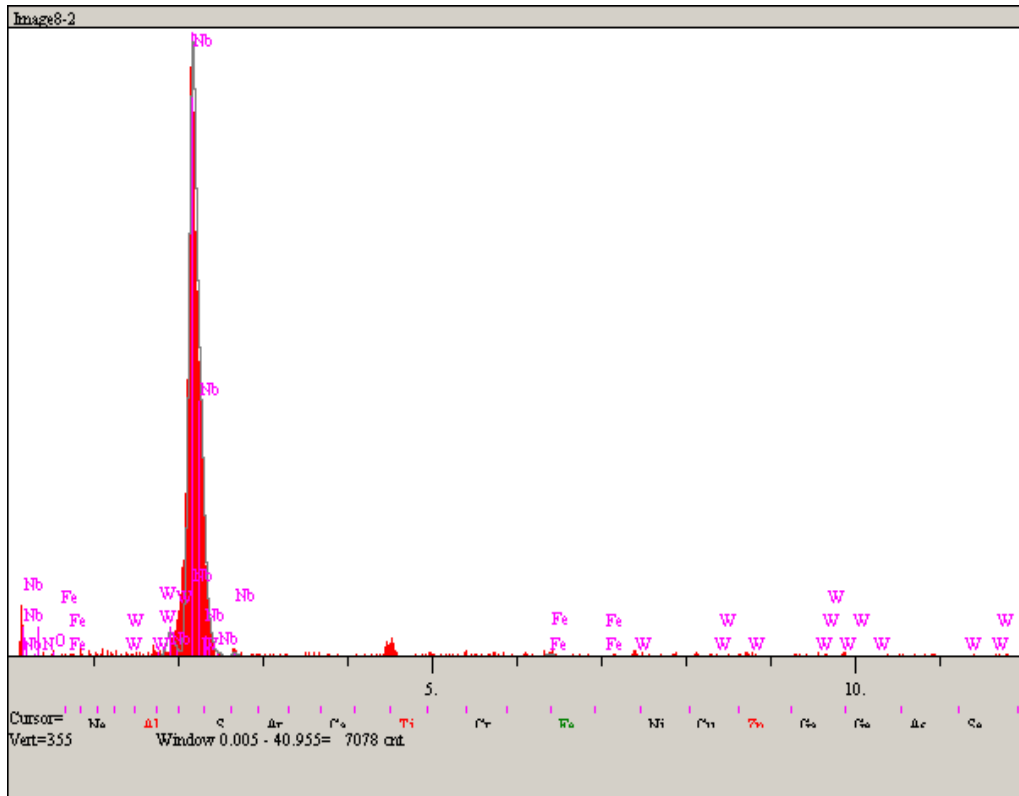


(a)

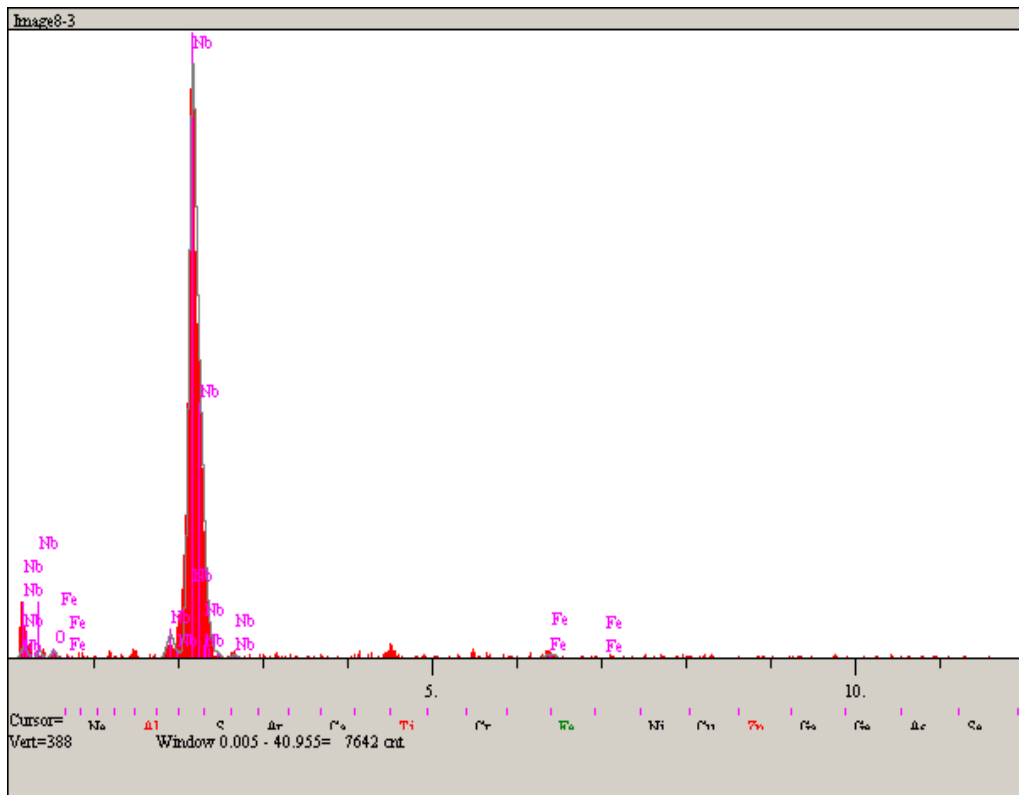


(b)

Şekil 7.84. 1000°C’de 2 saat süre ile niobyum nitür kaplanmış AISI 1010çeliğinin 5N yük altında, 0.1 m/s hızda ve 320 m mesafede AISI M50 çelik bilyeye karşı aşındırılmasıyla oluşan izin (a)SEM mikroyapısı, (b) 1. (c) 2. (d) 3. noktaların EDS analizleri

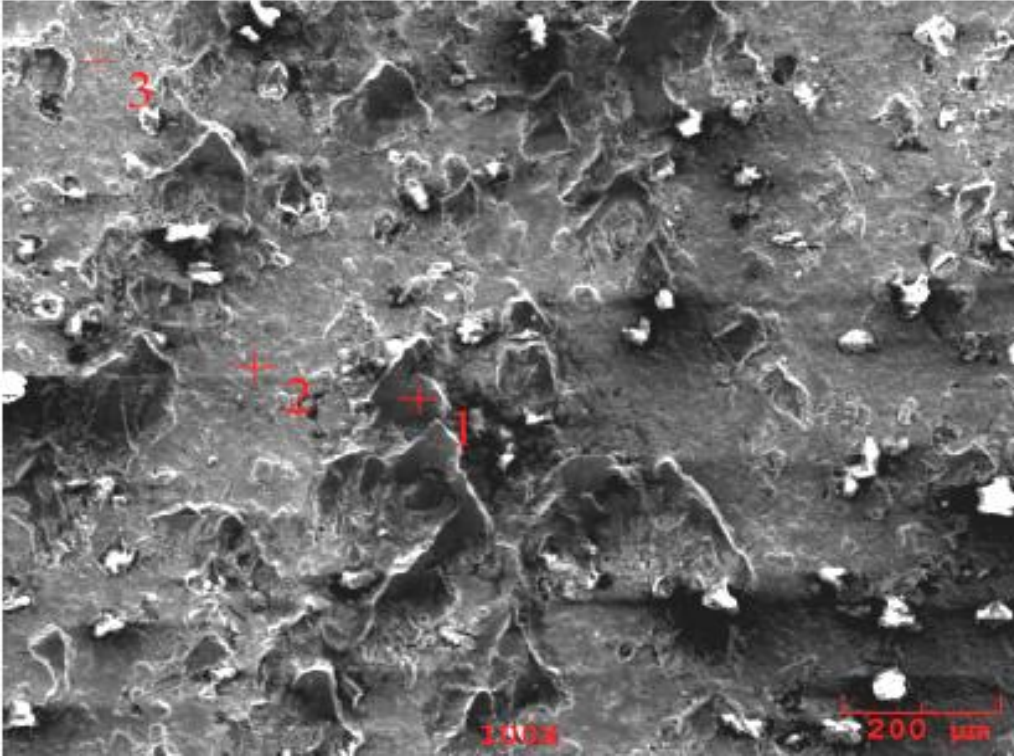


(c)

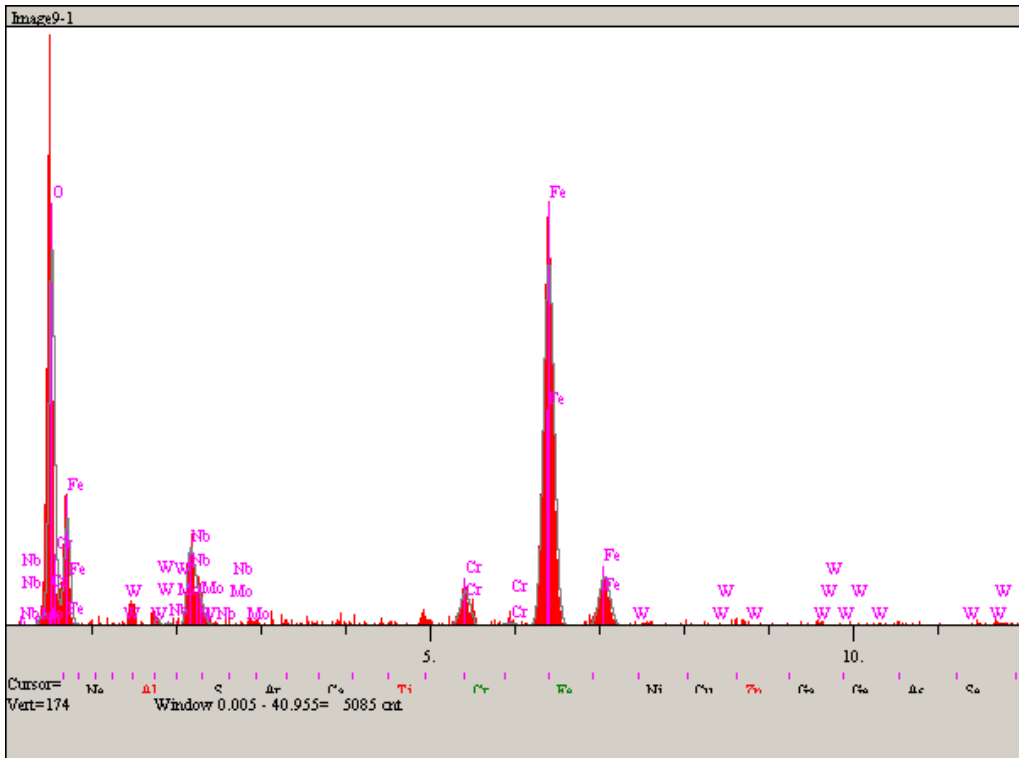


(d)

Şekil 7.84. Devam

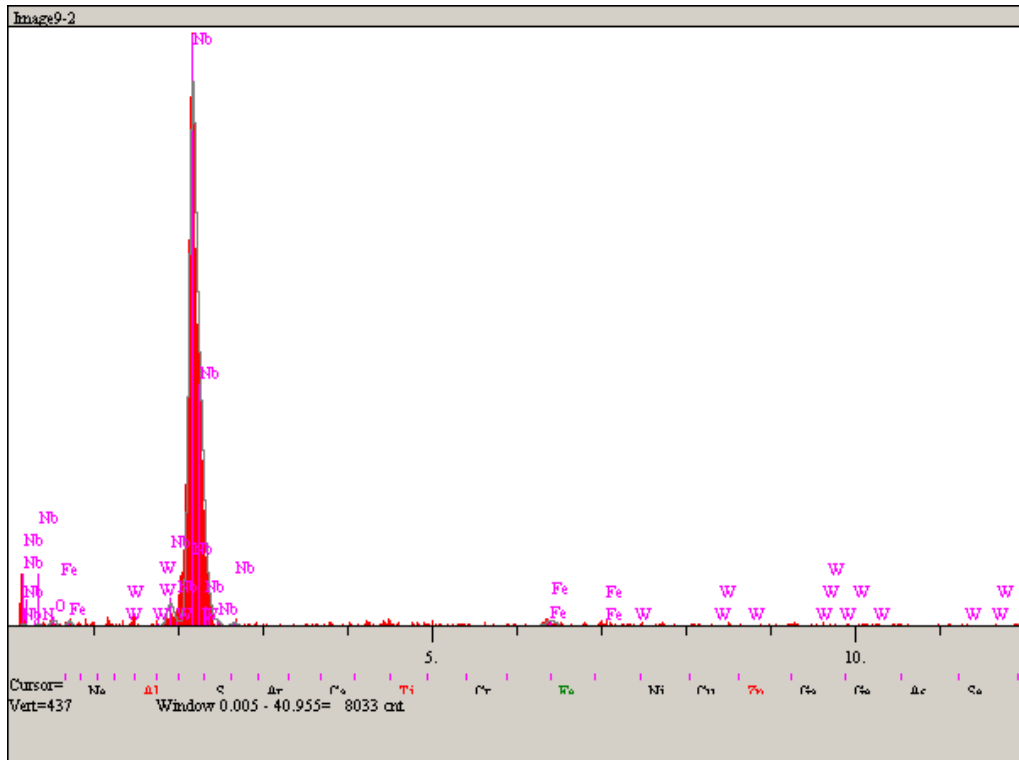


(a)

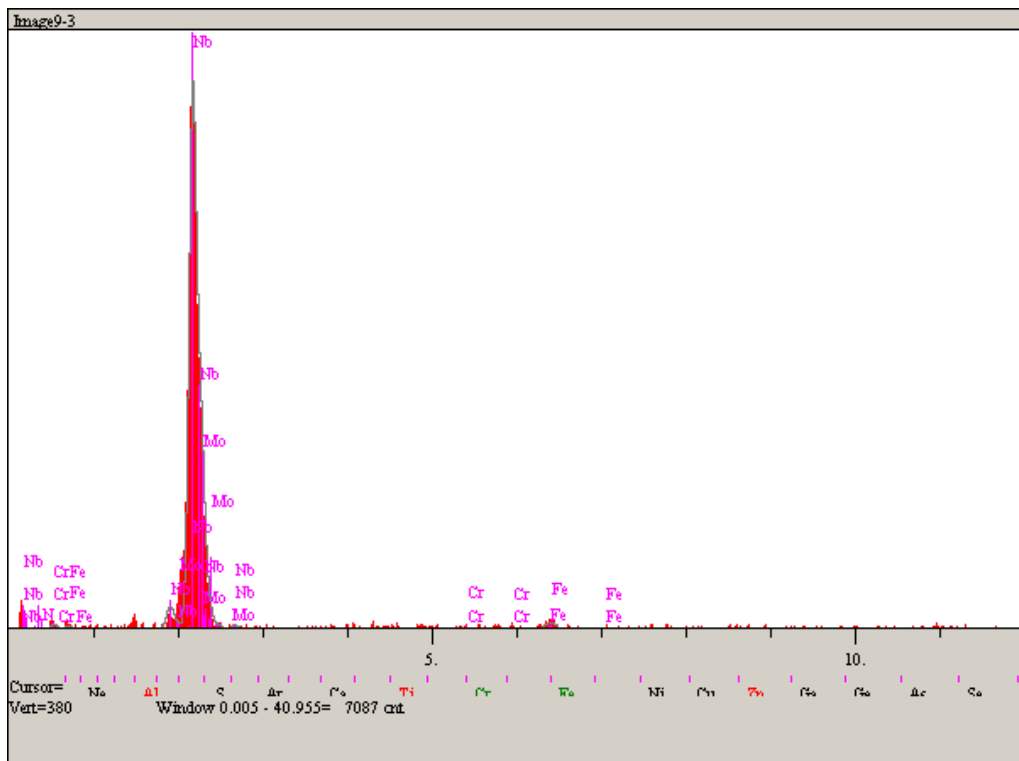


(b)

Şekil 7.85. 1000°C’de 2 saat süre ile niobyum nitür kaplanmış AISI 4140 çeliğinin 5N yük altında, 0.1 m/s hızda ve 320 m mesafede AISI M50 çelik bilyeye karşı aşındırılmasıyla oluşan izin (a)SEM mikroyapısı, (b) 1. (c) 2. (d) 3. noktaların EDS analizleri

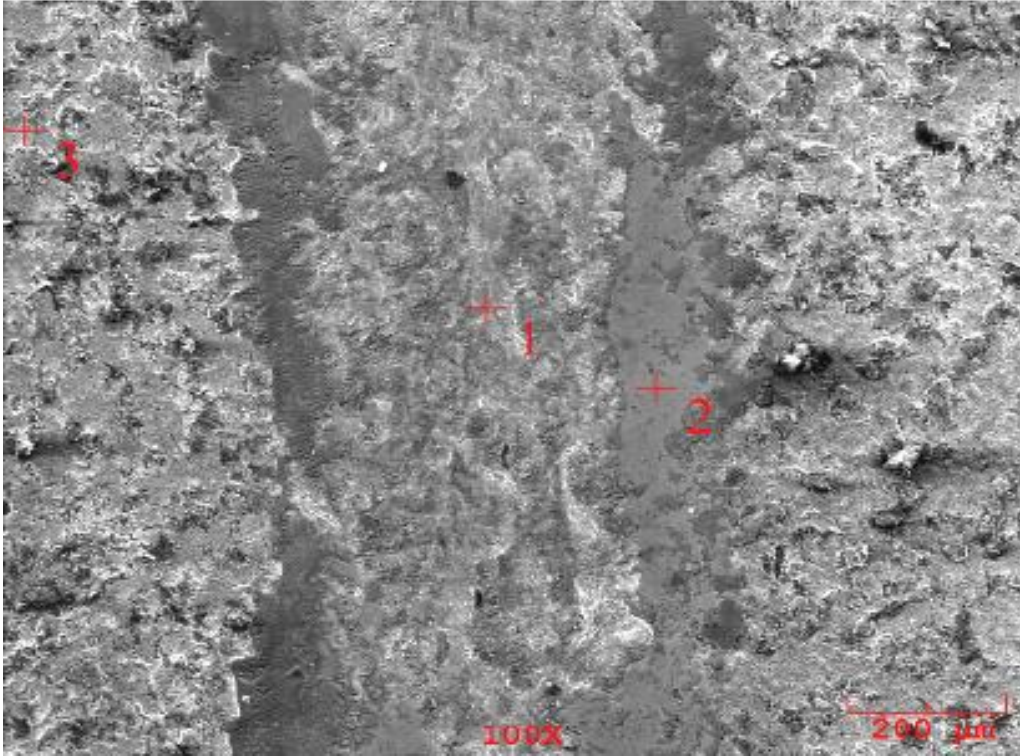


(c)

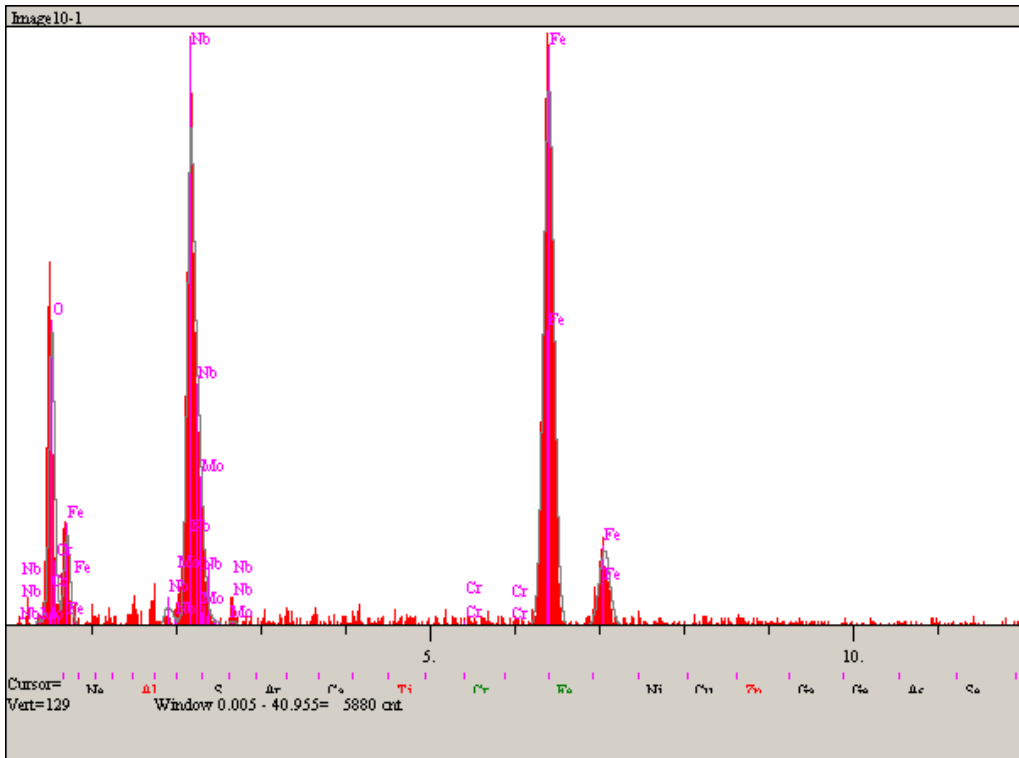


(d)

Şekil 7.85. Devam

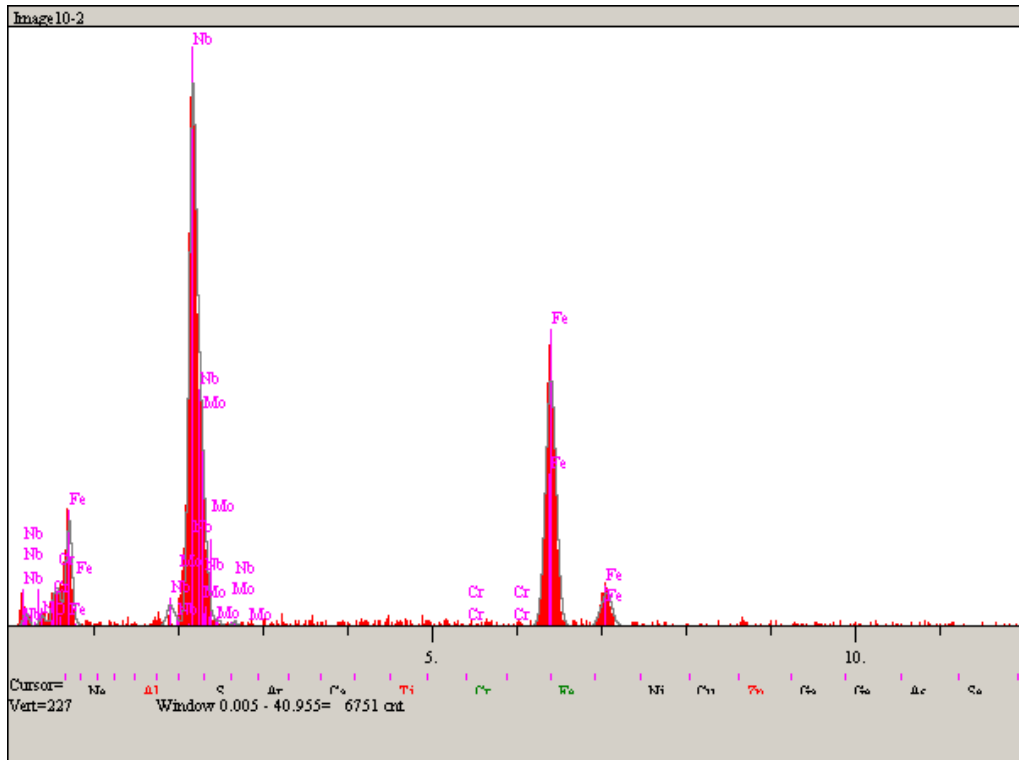


(a)

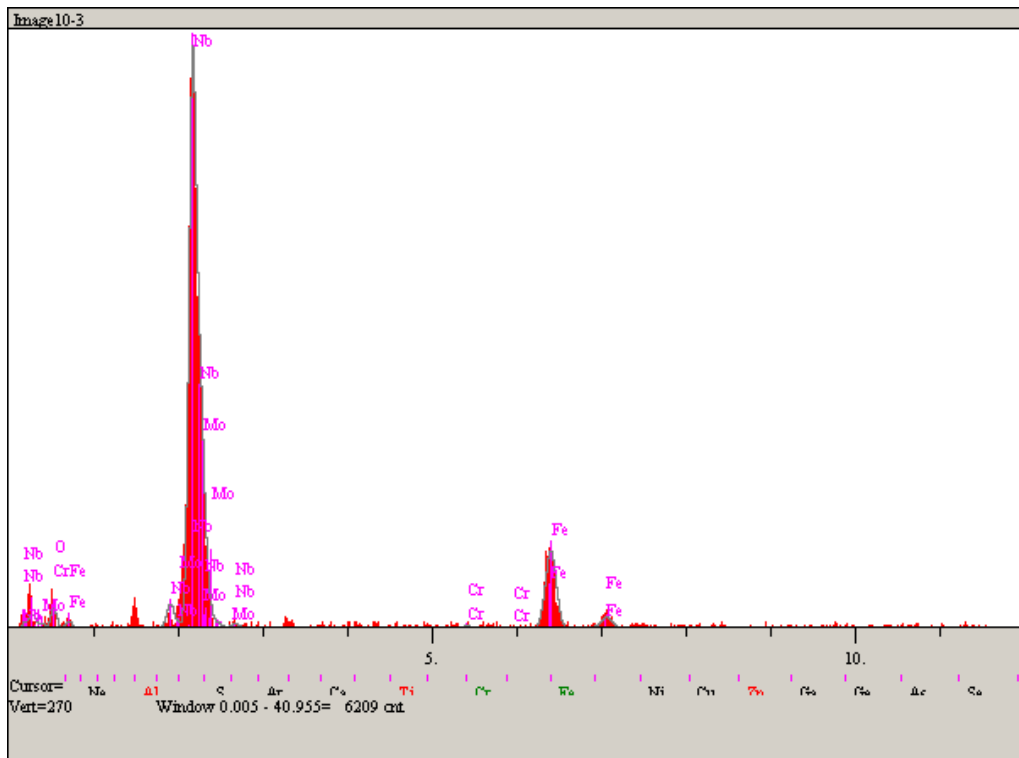


(b)

Şekil 7.86. 1000°C’de 2 saat süre ile niyobum nitür kaplanmış AISI D2 çeliğinin 5N yük altında, 0.1 m/s hızda ve 320 m mesafede AISI M50 çelik bilyeye karşı aşındırılmasıyla oluşan izin (a)SEM mikroyapısı, (b) 1. (c) 2. (d) 3. noktaların EDS analizleri

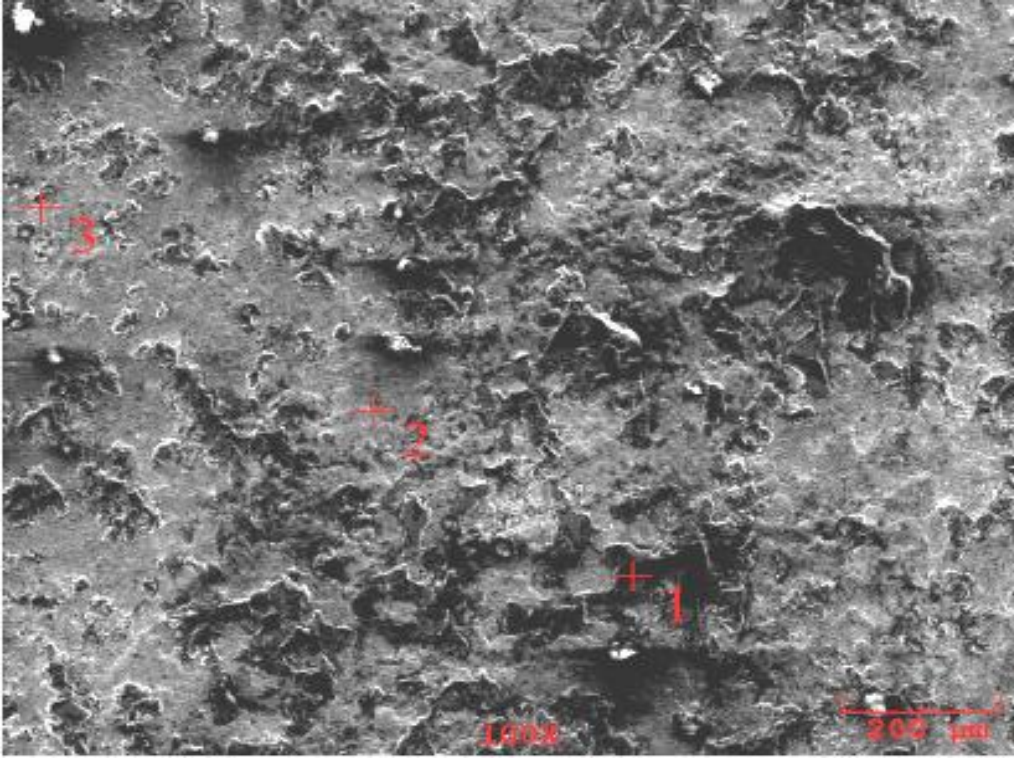


(c)

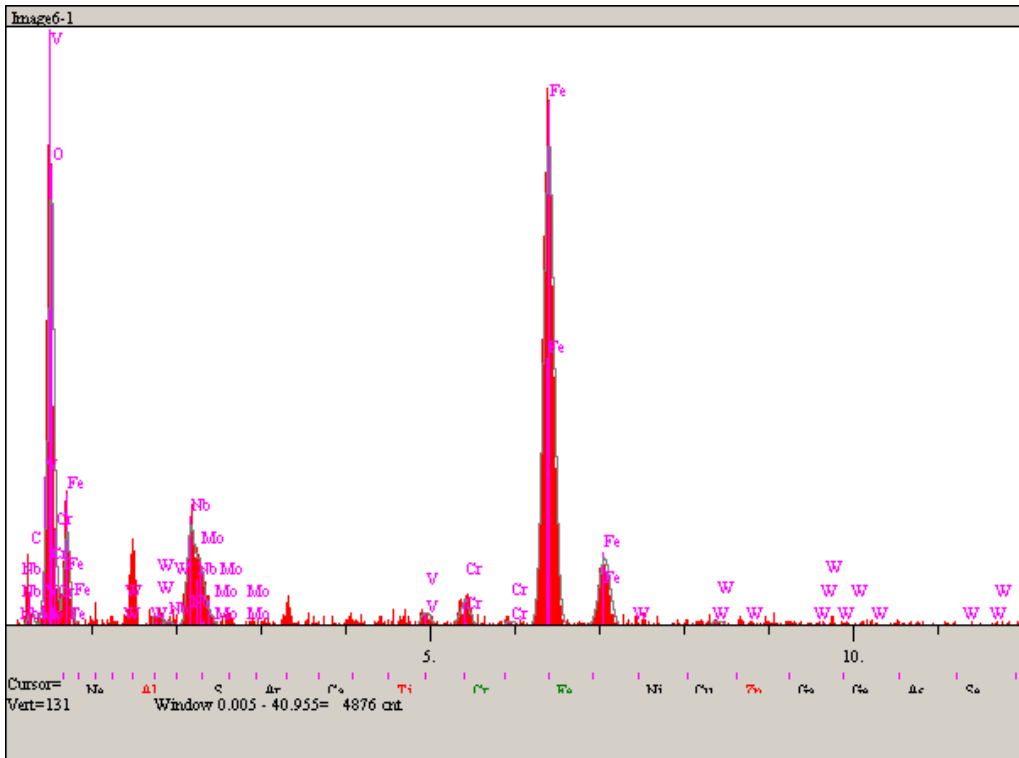


(d)

Şekil 7.86. Devam

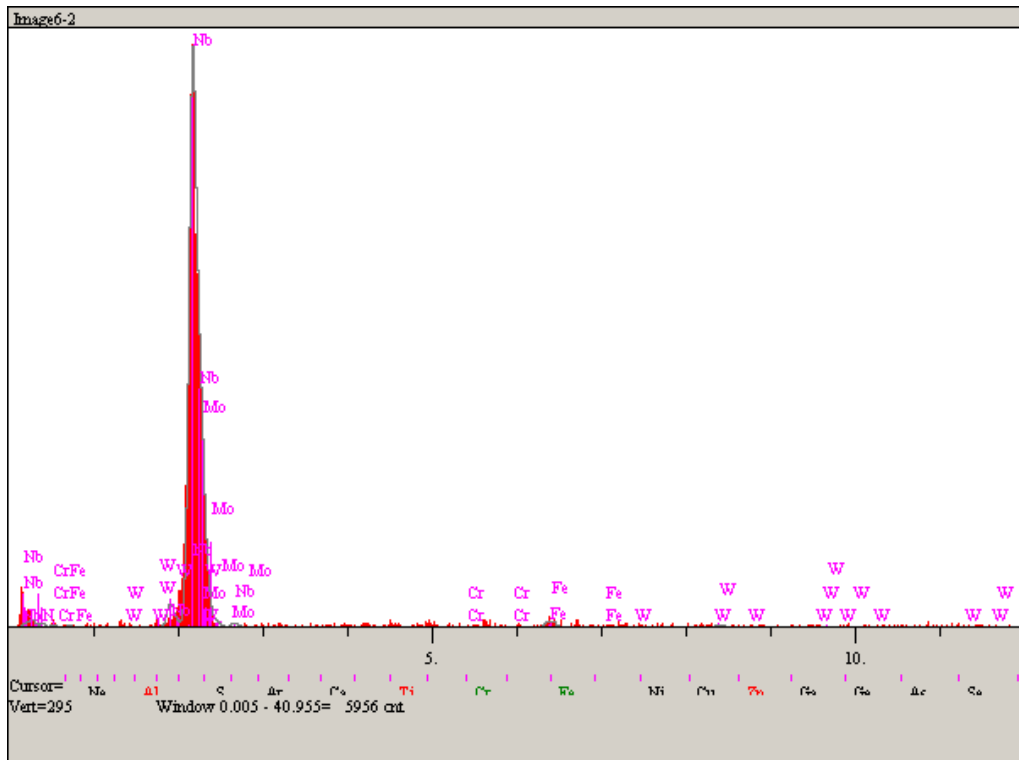


(a)

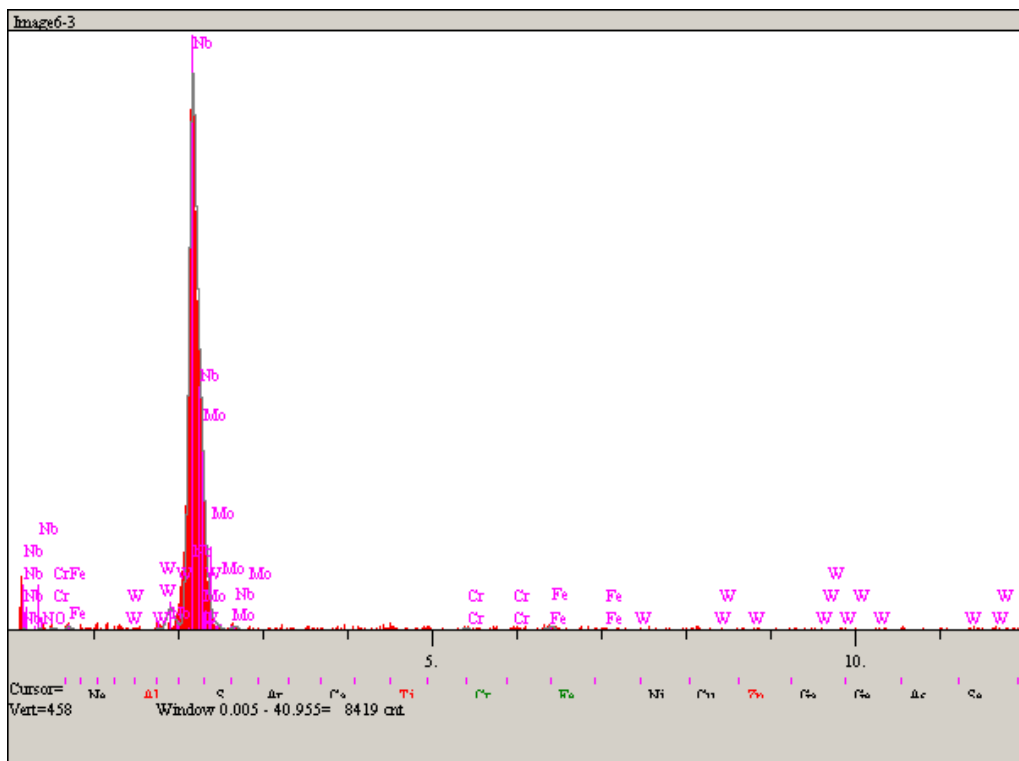


(b)

Şekil 7.87. 1000°C'de 2 saat süre ile niyobum nitürü kaplanmış AISI M2 çeliğinin 5N yük altında, 0.1 m/s hızda ve 320 m mesafede AISI M50 çelik bilyeye karşı aşındırılmasıyla oluşan izin (a)SEM mikroyapısı, (b) 1. (c) 2. (d) 3. noktaların EDS analizleri



(c)

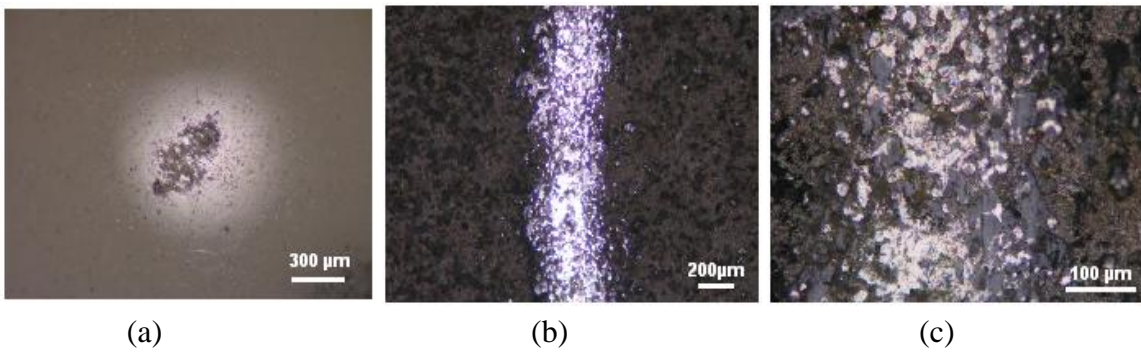


(d)

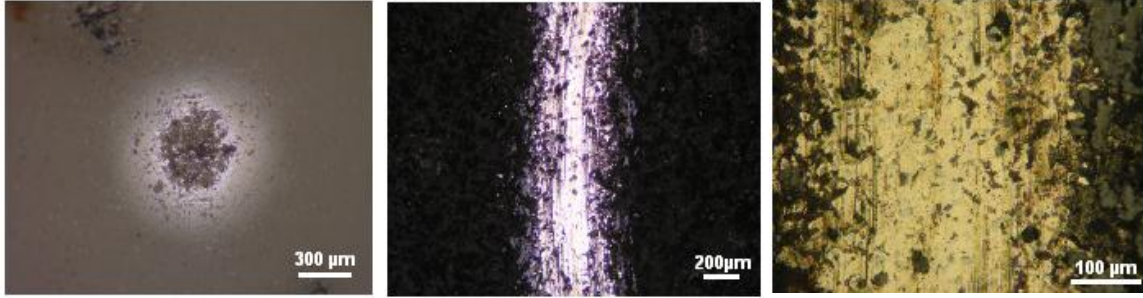
Şekil 7.87. Devam

Niobyum Nitrür kaplanmış AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çelikleri ile alümina ve AISI M50 çelik bilyeleri arasında gerçekleştirilen 2,5N, 5N ve 10N yükler altında, 0.1 m/s, hızında 320 m mesafede gerçekleştirilen aşınma deneyleri neticesinde meydana gelen numunelerdeki ve bilyelerdeki aşınma izleri Şekil 7.88-Şekil 7.135 arasında gösterilmektedir. Aşınma izlerinden alümina bilye ile yapılan aşınma deneyleri sonucunda oluşan aşınmanın abrasif karakterde M50 bilye ile yapılan deneylerde ise adhesif aşınmanın olduğu görülmektedir. Çelik bilye ile yapılan deneylerde bilyeden kopan partiküller kaplanmış çelik diskler üzerine yapışmaktadır. Bu durum aşınma izlerinden alınan EDS analizlerinde de açıkça görülmektedir.

Kaplanmış çeliklerde oluşan aşınma izlerinin kaplanmamış çelik yüzeylerine nazaran daha az oranda olduğu belirlenmiştir. Alümina bilye ile AISI M50 çelik bilyenin aşındırılması ile oluşan iz genişlikleri, niobyum nitrür kaplanmış ve kaplanmamış bütün çeliklerde uygulanan yük miktarının artışıyla birlikte arttığı görülmektedir.



Şekil 7.88. Niobyum nitrür kaplanmış AISI 1010 çeliğinin 320 metre mesafede 2,5N yük, 0,1m/s hızda alümina bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri

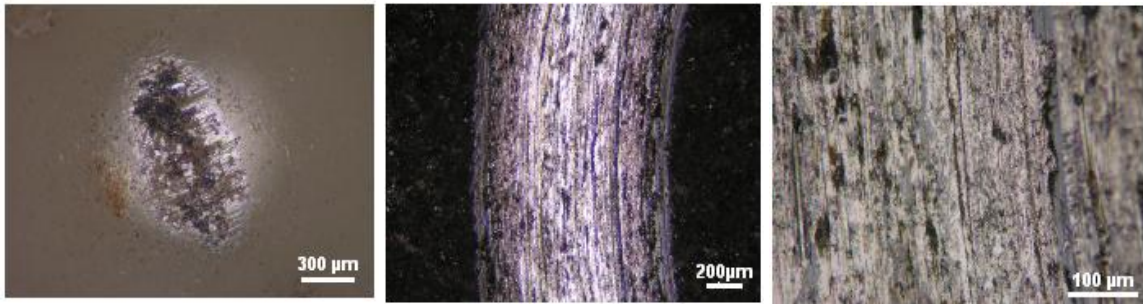


(a)

(b)

(c)

Şekil 7.89. Niobiyum nitrür kaplanmış AISI 1010 çeliğinin 320 metre mesafede 5N yük, 0,1m/s hızda alümina bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri

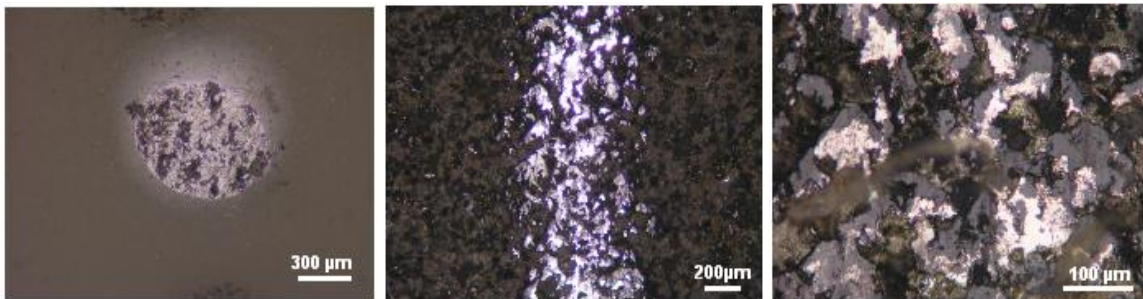


(a)

(b)

(c)

Şekil 7.90. Niobiyum nitrür kaplanmış AISI 1010 çeliğinin 320 metre mesafede 10N yük, 0,1m/s hızda alümina bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri

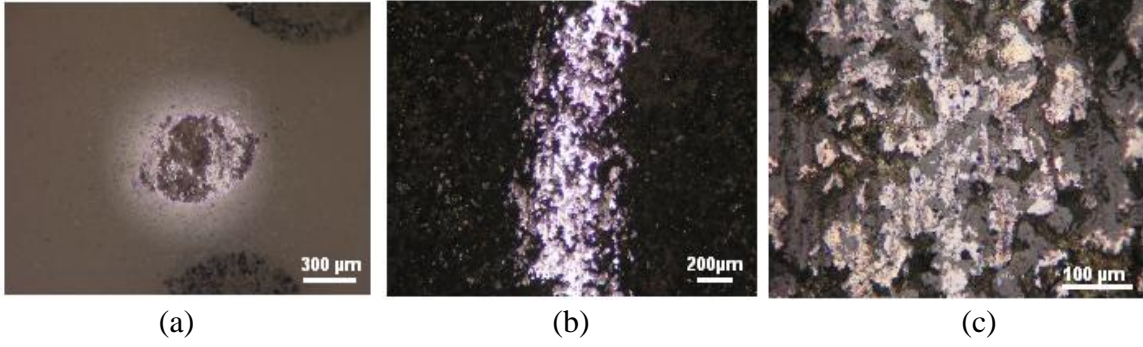


(a)

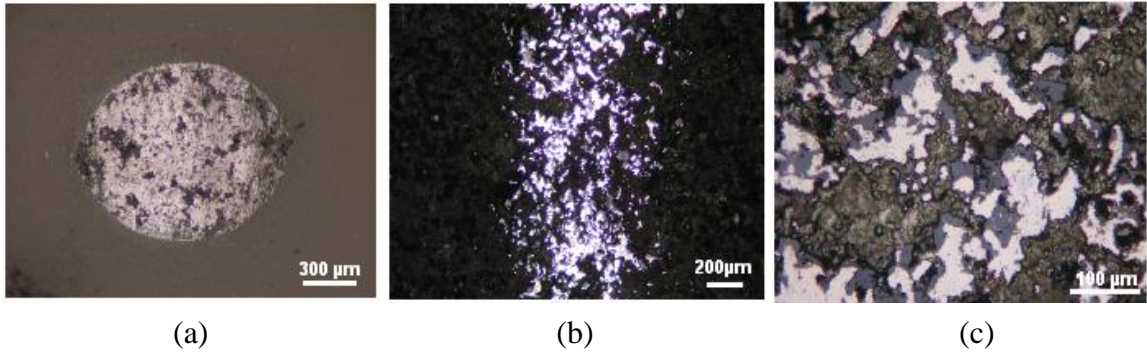
(b)

(c)

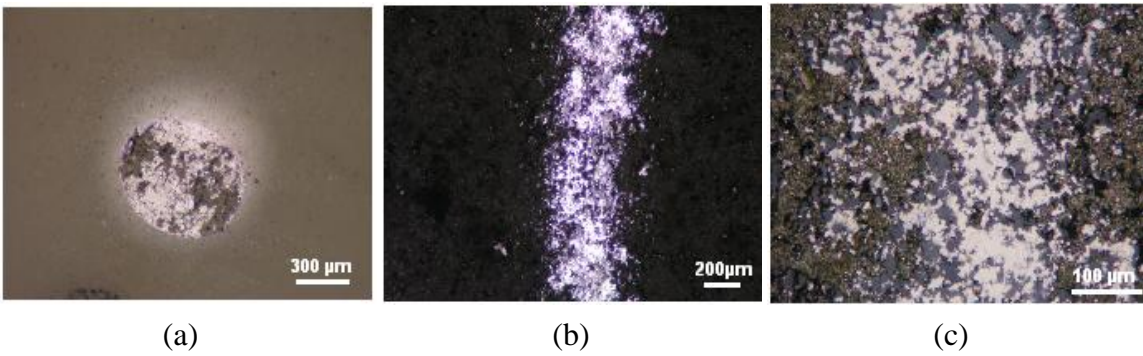
Şekil 7.91. Niobiyum nitrür kaplanmış AISI 4140 çeliğinin 320 metre mesafede 2,5N yük, 0,1m/s hızda alümina bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri



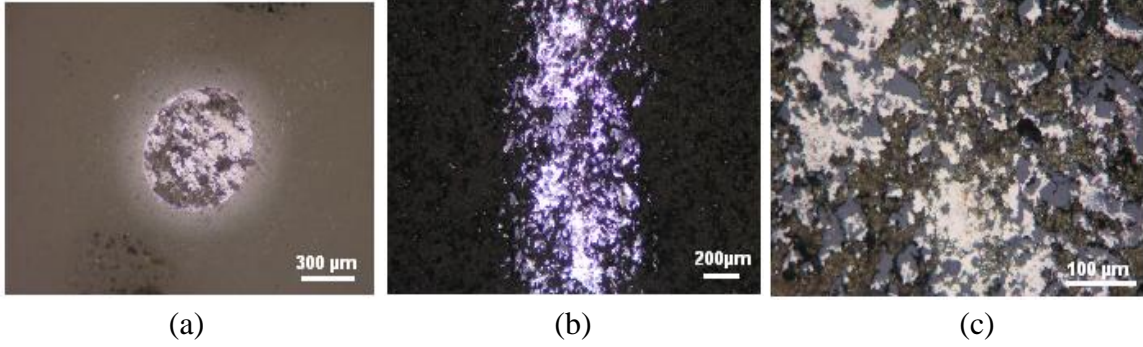
Şekil 7.92. Niobyum nitrür kaplanmış AISI 4140 çeliğinin 320 metre mesafede 5N yük, 0,1m/s hızda alümina bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri



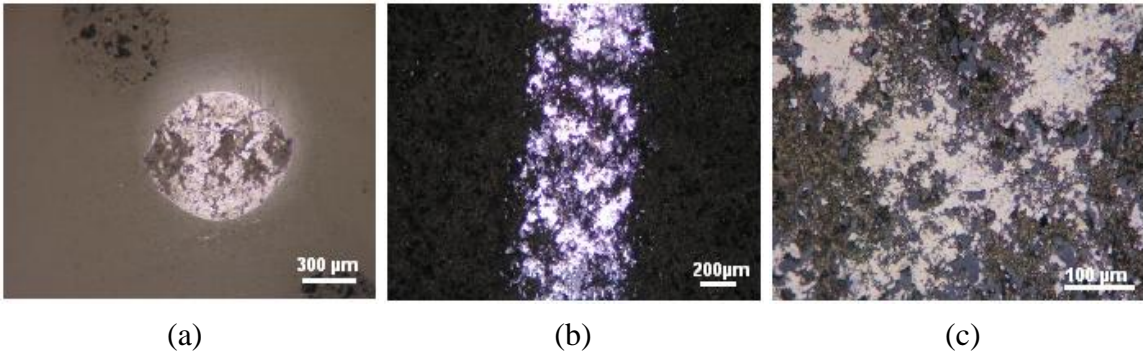
Şekil 7.93. Niobyum nitrür kaplanmış AISI 4140 çeliğinin 320 metre mesafede 10N yük, 0,1m/s hızda alümina bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri



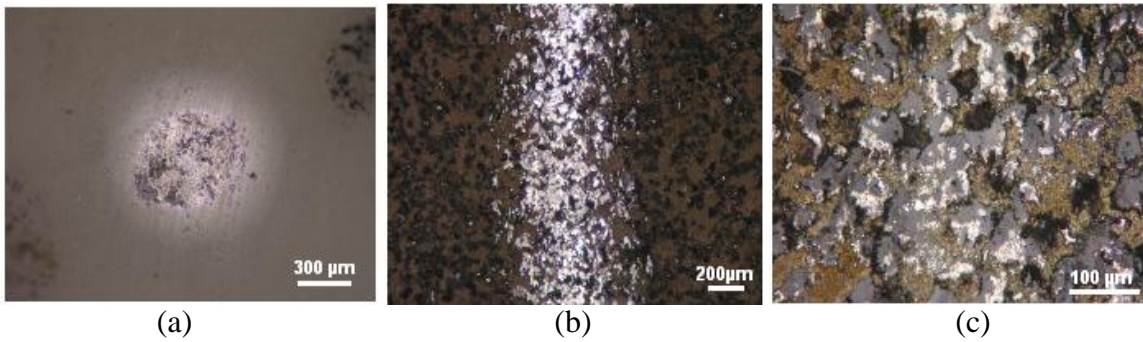
Şekil 7.94. Niobyum nitrür kaplanmış AISI D2 çeliğinin 320 metre mesafede 2,5N yük, 0,1m/s hızda alümina bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri



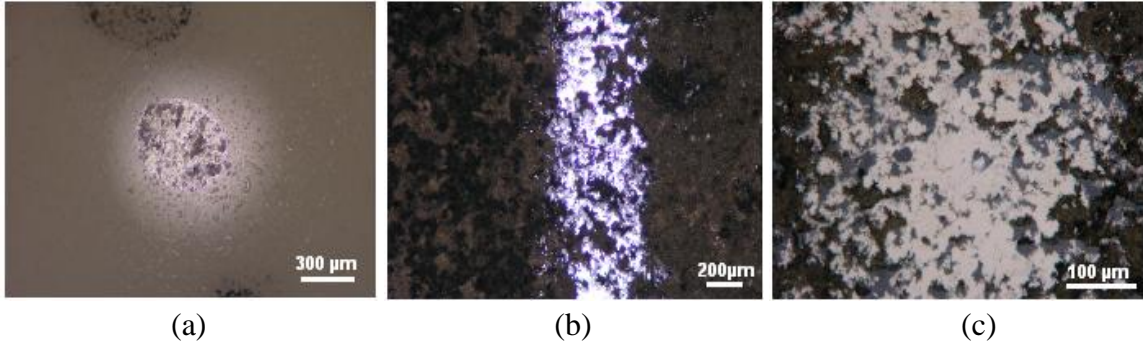
Şekil 7.95. Niobyum nitrür kaplanmış AISI D2 çeliğinin 320 metre mesafede 5N yük, 0,1m/s hızda alümina bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri



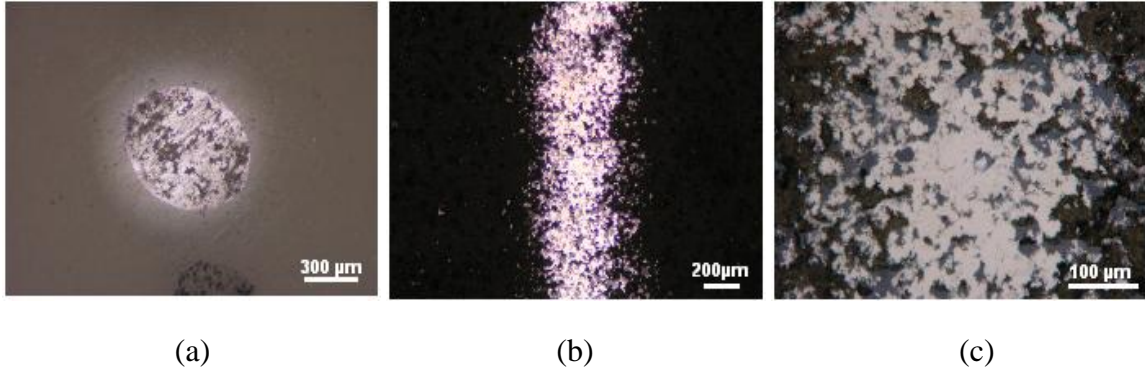
Şekil 7.96. Niobyum nitrür kaplanmış AISI D2 çeliğinin 320 metre mesafede 10N yük, 0,1m/s hızda alümina bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri



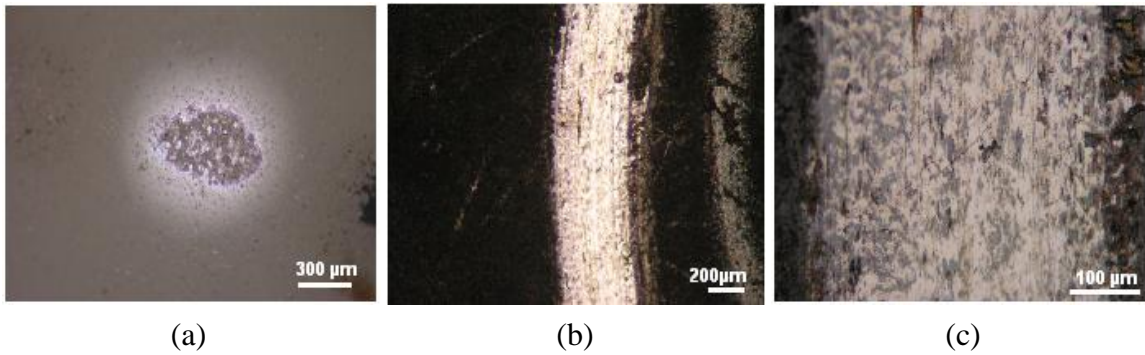
Şekil 7.97. Niobyum nitrür kaplanmış AISI M2 çeliğinin 320 metre mesafede 2,5N yük, 0,1m/s hızda alümina bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri



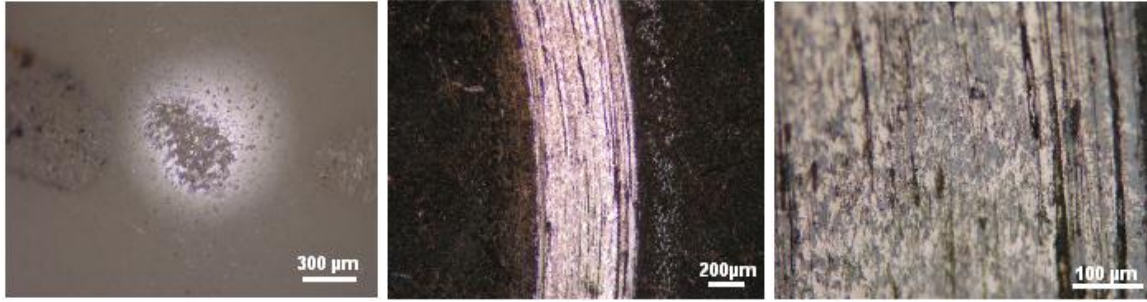
Şekil 7.98. Niobyum nitrür kaplanmış AISI M2 çeliğinin 320 metre mesafede 5N yük, 0,1m/s hızda alümina bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri



Şekil 7.99. Niobyum nitrür kaplanmış AISI M2 çeliğinin 320 metre mesafede 10N yük, 0,1m/s hızda alümina bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri



Şekil 7.100. Kaplanmamış AISI 1010 çeliğinin 320 metre mesafede 2,5N yük, 0,1m/s hızda alümina bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmamış çeliğin mikroyapı görüntüleri

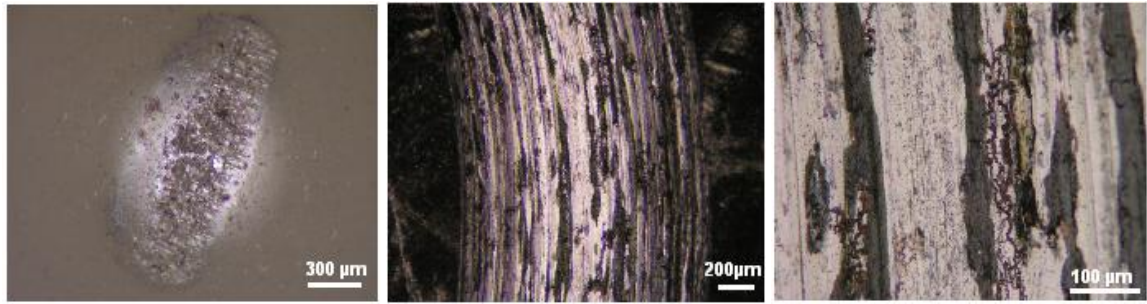


(a)

(b)

(c)

Şekil 7.101. Kaplanmamış AISI 1010 çeliğinin 320 metre mesafede 5N yük, 0,1m/s hızda alümina bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri

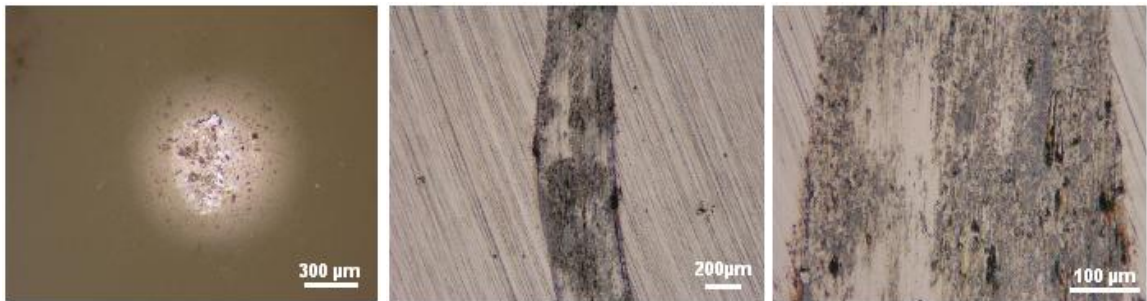


(a)

(b)

(c)

Şekil 7.102. Kaplanmamış AISI 1010 çeliğinin 320 metre mesafede 10N yük, 0,1m/s hızda alümina bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri

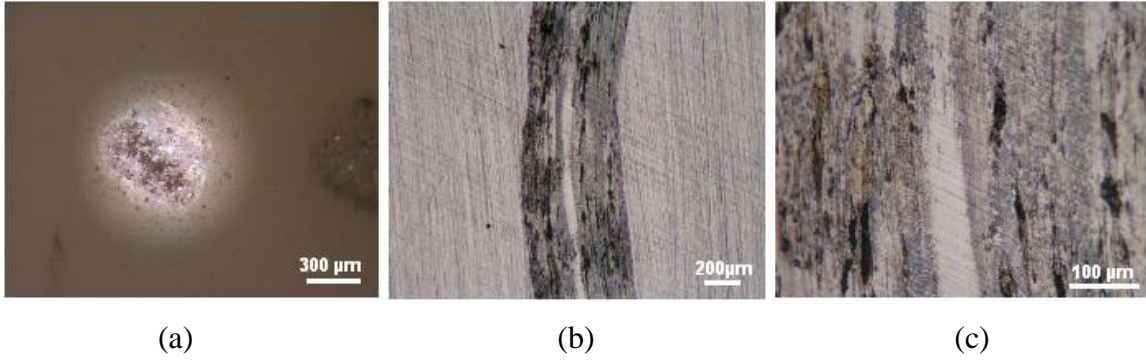


(a)

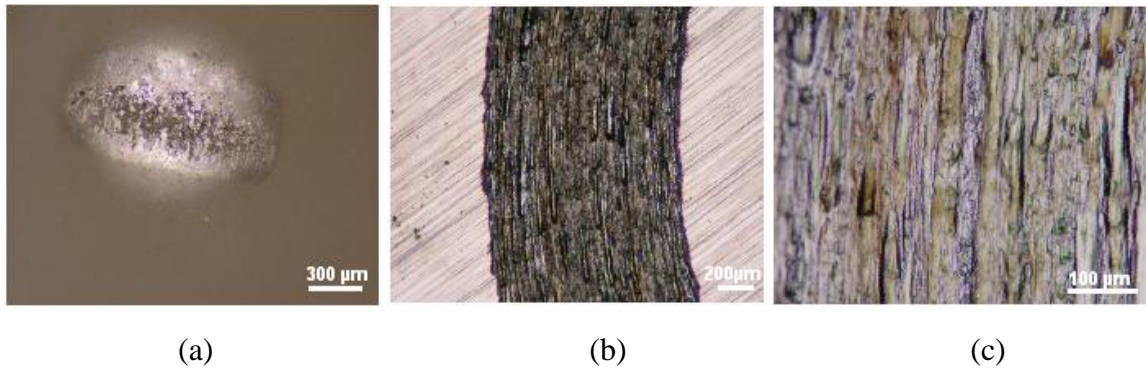
(b)

(c)

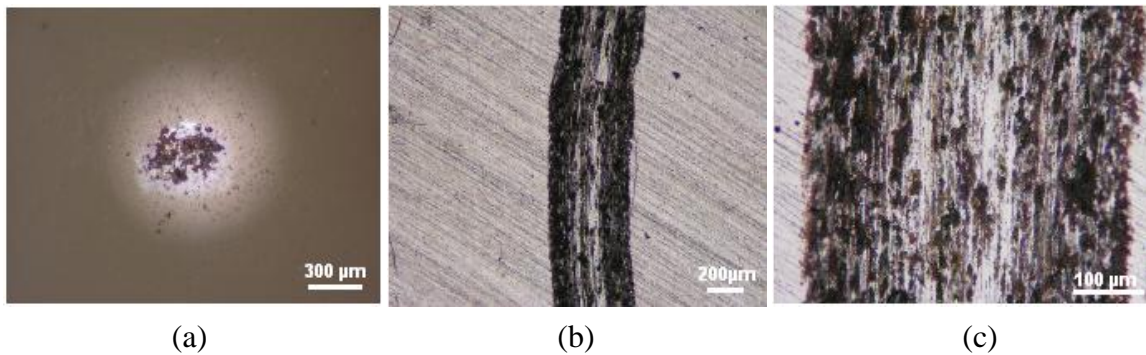
Şekil 7.103. Kaplanmamış AISI 4140 çeliğinin 320 metre mesafede 2,5N yük, 0,1m/s hızda alümina bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri



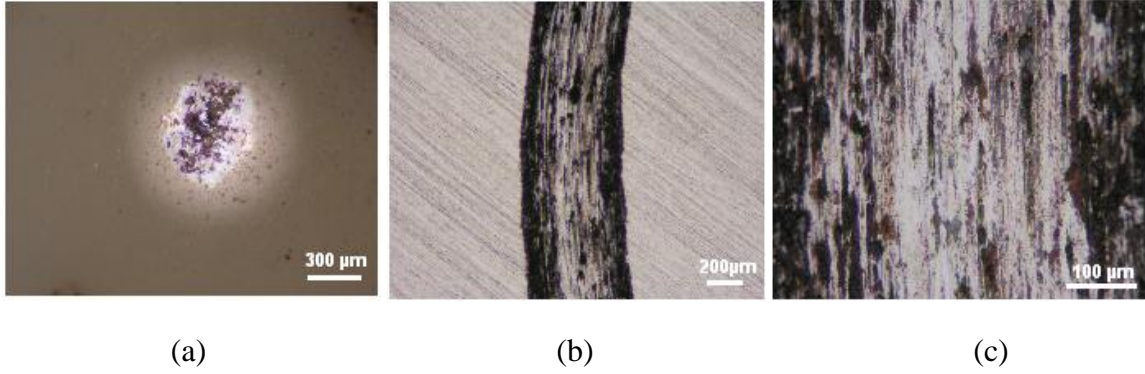
Şekil 7.104. Kaplanmamış AISI 4140 çeliğinin 320 metre mesafede 5N yük, 0,1m/s hızda alümina bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri



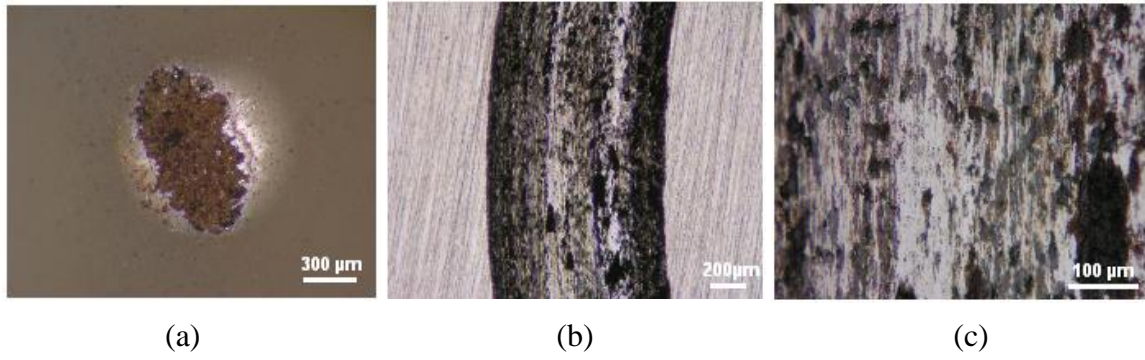
Şekil 7.105. Kaplanmamış AISI 4140 çeliğinin 320 metre mesafede 10N yük, 0,1m/s hızda alümina bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri



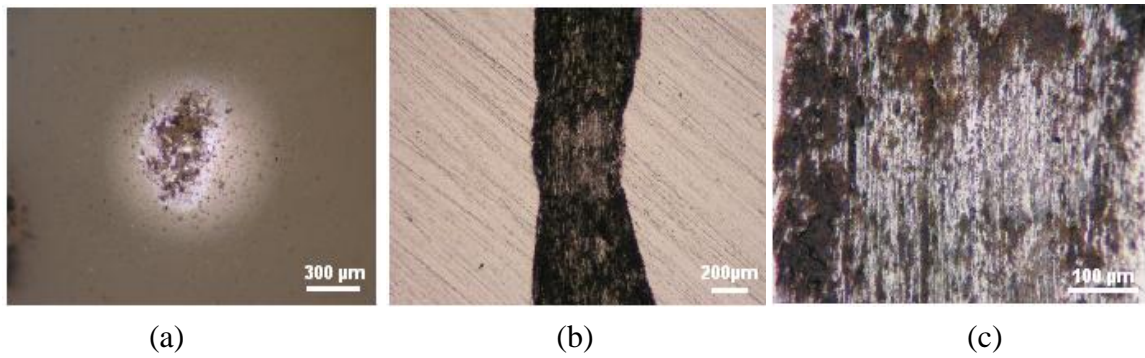
Şekil 7.106. Kaplanmamış AISI D2 çeliğinin 320 metre mesafede 2,5N yük, 0,1m/s hızda alümina bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri



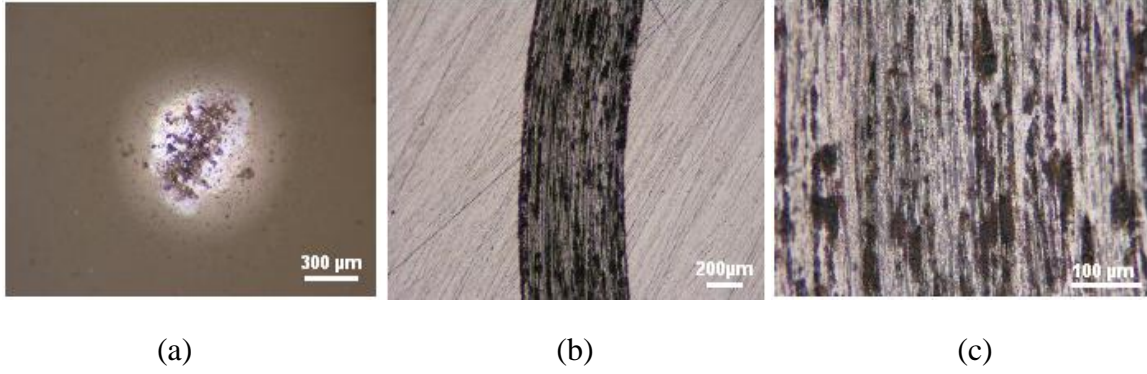
Şekil 7.107. Kaplanmamış AISI D2 çeliğinin 320 metre mesafede 5N yük, 0,1m/s hızda alümina bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri



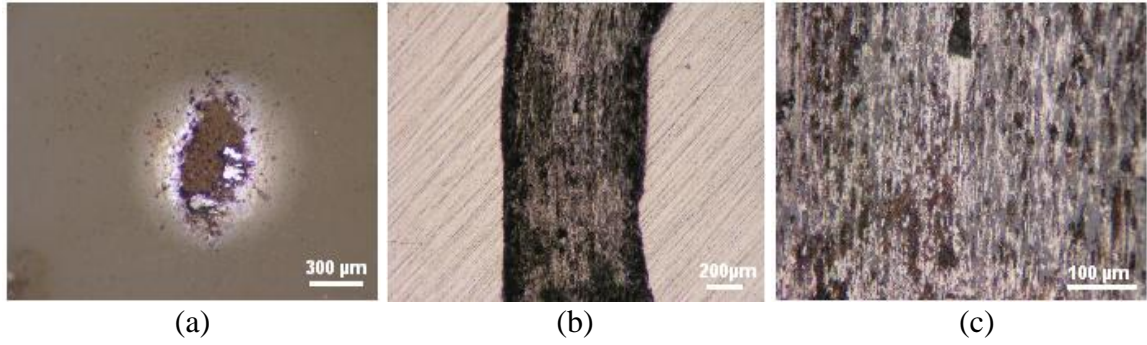
Şekil 7.108. Kaplanmamış AISI D2 çeliğinin 320 metre mesafede 10N yük, 0,1m/s hızda alümina bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri



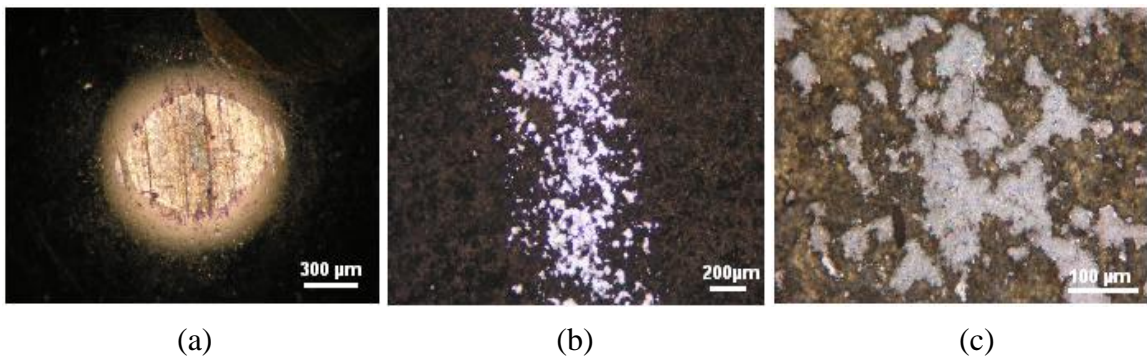
Şekil 7.109. Kaplanmamış AISI M2 çeliğinin 320 metre mesafede 2,5N yük, 0,1m/s hızda alümina bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri



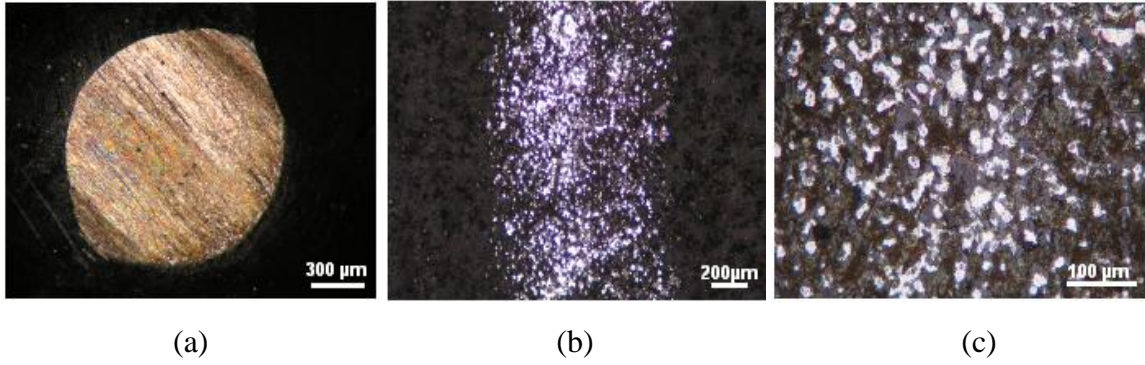
Şekil 7.110. Kaplanmamış AISI M2 çeliğinin 320 metre mesafede 5N yük, 0,1m/s hızda alümina bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri



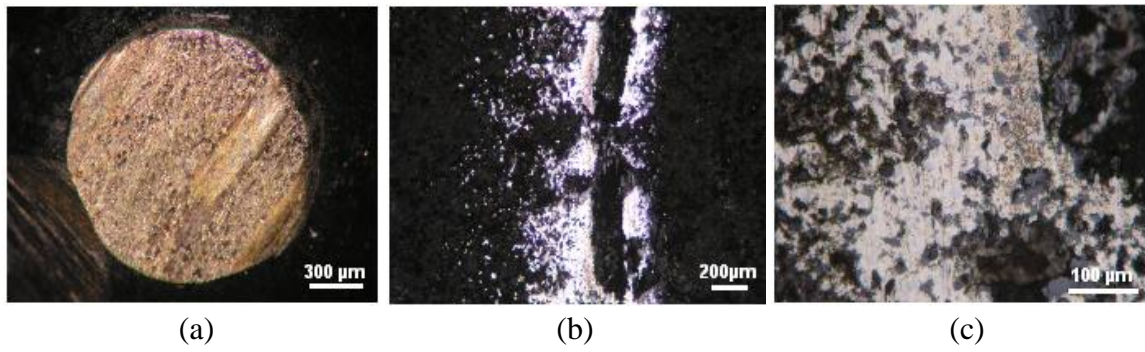
Şekil 7.111. Kaplanmamış AISI M2 çeliğinin 320 metre mesafede 10N yük, 0,1m/s hızda alümina bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri



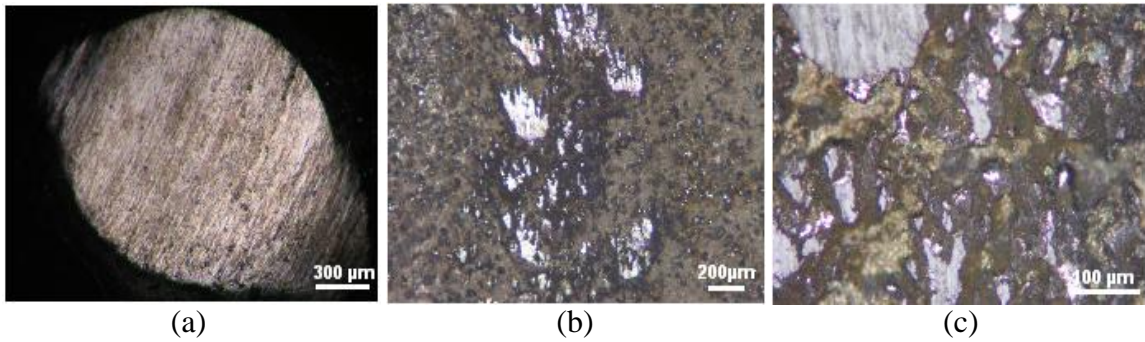
Şekil 7.112. Niobiyum nitrür kaplanmış AISI 1010 çeliğinin 320 metre mesafede 2,5N yük, 0,1m/s hızda AISI M50 çelik bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri



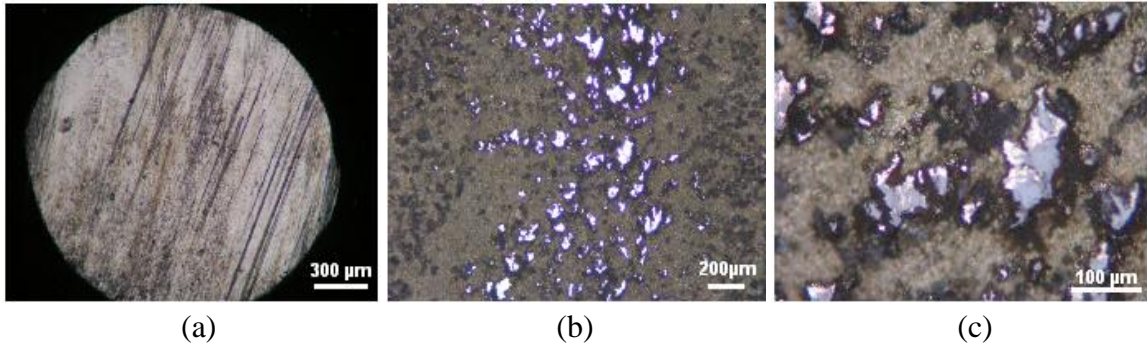
Şekil 7.113. Niobyum nitrür kaplanmış AISI 1010 çeliğinin 320 metre mesafede 5N yük, 0,1m/s hızda AISI M50 çelik bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri



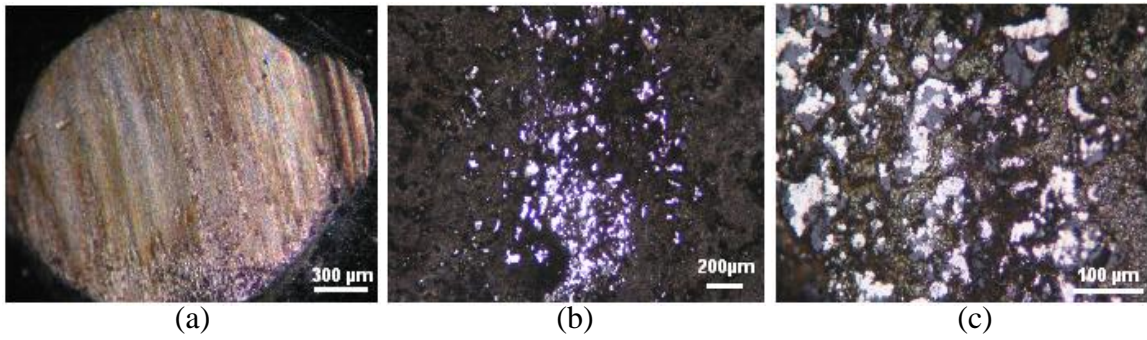
Şekil 7.114. Niobyum nitrür kaplanmış AISI 1010 çeliğinin 320 metre mesafede 10N yük, 0,1m/s hızda AISI M50 çelik bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri



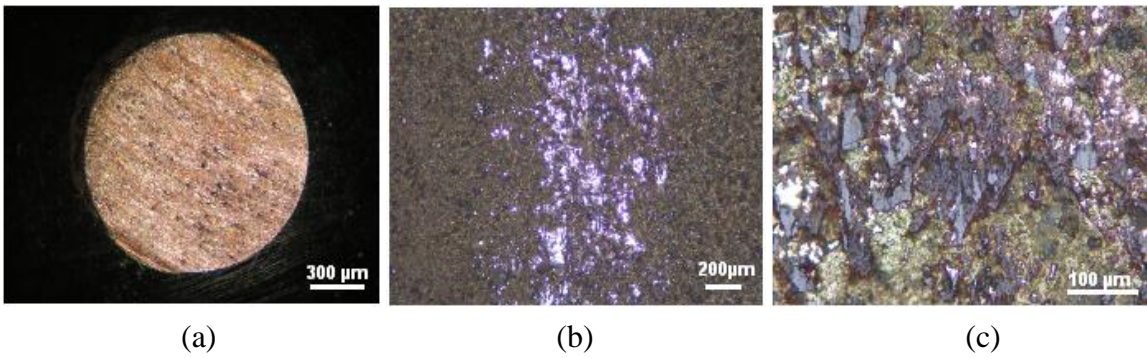
Şekil 7.115. Niobyum nitrür kaplanmış AISI 4140 çeliğinin 320 metre mesafede 2,5N yük, 0,1m/s hızda AISI M50 çelik bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri



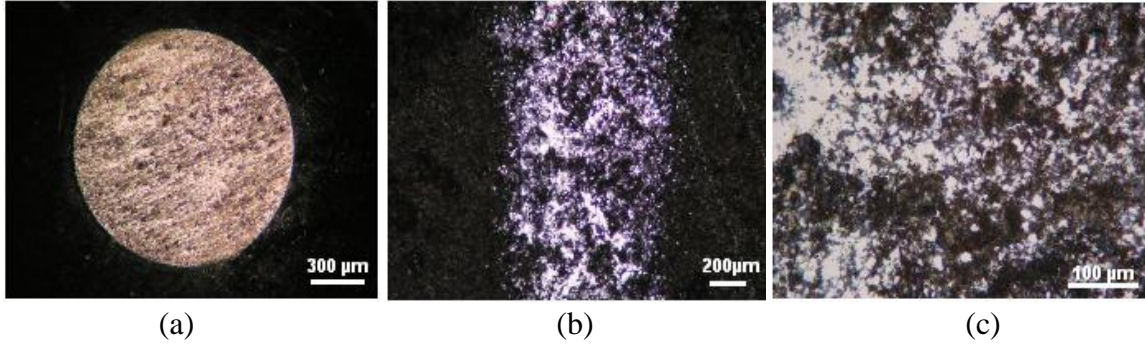
Şekil 7.116. Niobyum nitrür kaplanmış AISI 4140 çeliğinin 320 metre mesafede 5N yük, 0,1m/s hızda AISI M50 çelik bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri



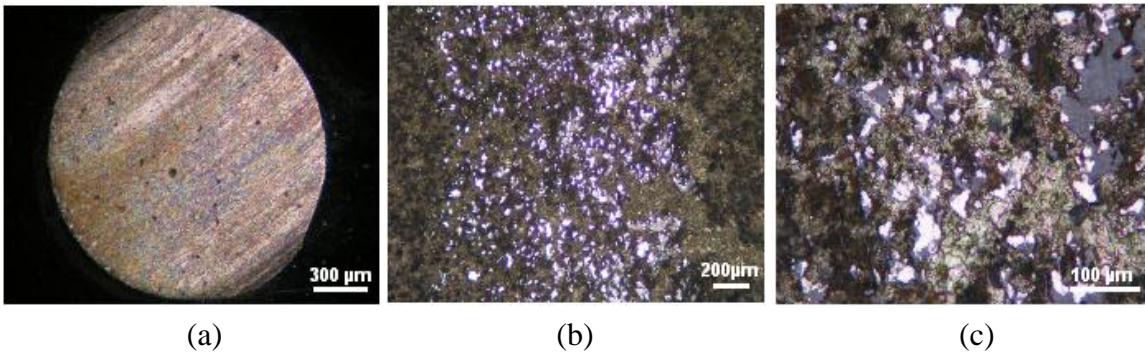
Şekil 7.117. Niobyum nitrür kaplanmış AISI 4140 çeliğinin 320 metre mesafede 10N yük, 0,1m/s hızda AISI M50 çelik bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri



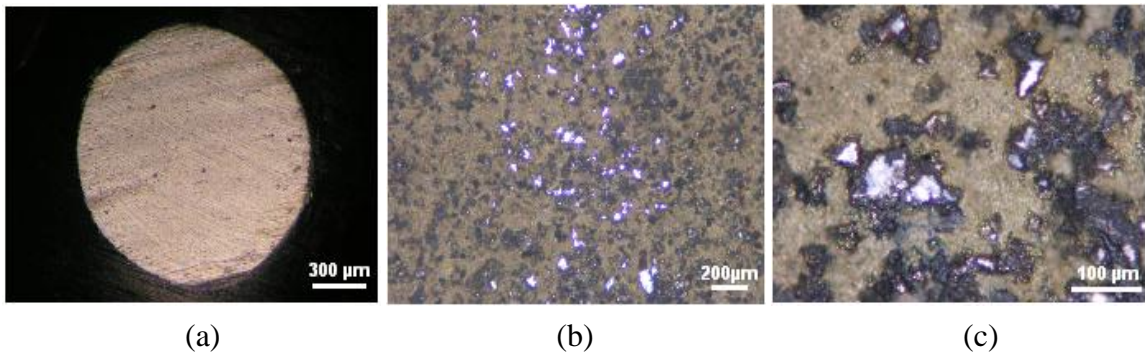
Şekil 7.118. Niobyum nitrür kaplanmış AISI D2 çeliğinin 320 metre mesafede 2,5N yük, 0,1m/s hızda AISI M50 çelik bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri



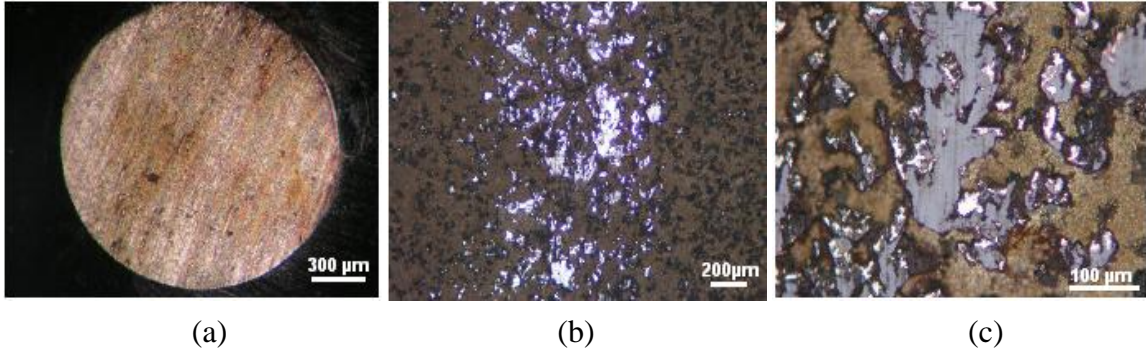
Şekil 7.119. Niobyum nitrür kaplanmış AISI D2 çeliğinin 320 metre mesafede 5N yük, 0,1m/s hızda AISI M50 çelik bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri



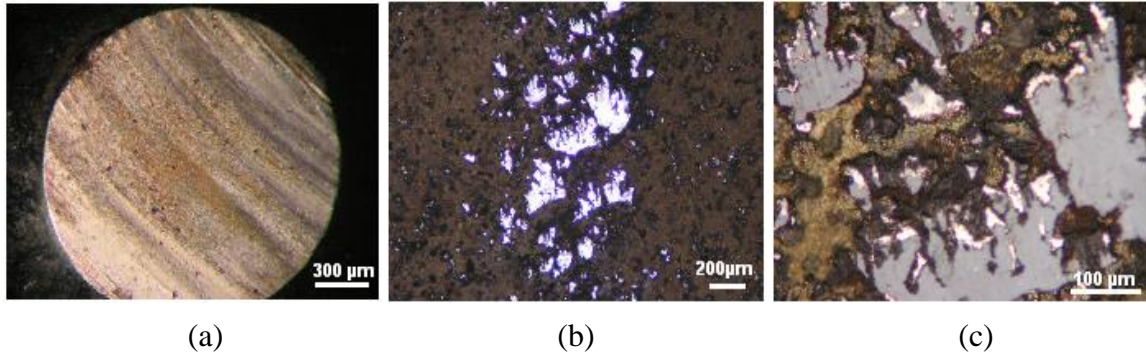
Şekil 7.120. Niobyum nitrür kaplanmış AISI D2 çeliğinin 320 metre mesafede 10N yük, 0,1m/s hızda AISI M50 çelik bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri



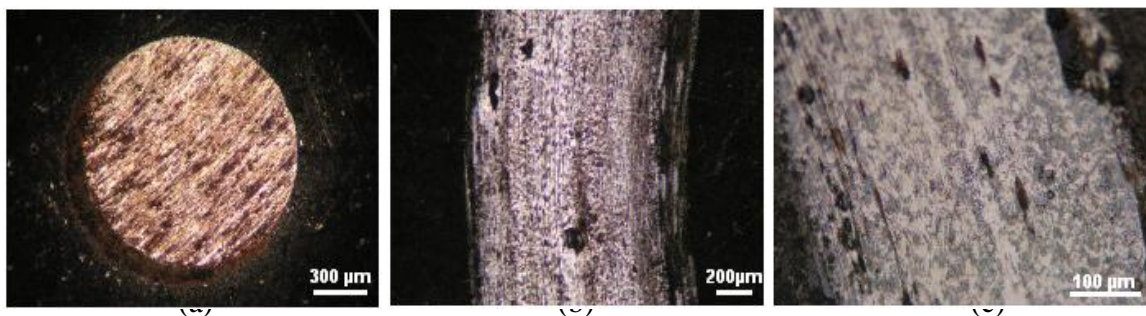
Şekil 7.121. Niobyum nitrür kaplanmış AISI M2 çeliğinin 320 metre mesafede 2,5N yük, 0,1m/s hızda AISI M50 çelik bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri



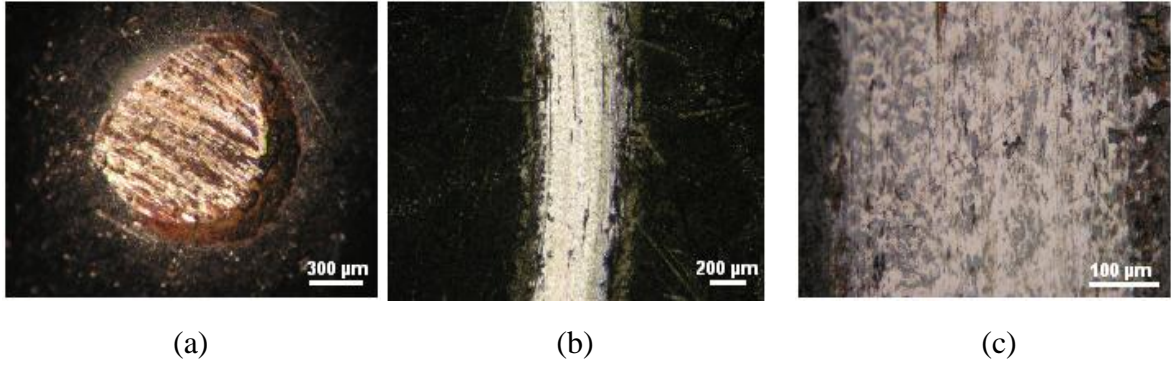
Şekil 7.122. Niobiyum nitrür kaplanmış AISI M2 çeliğinin 320 metre mesafede 5N yük, 0,1m/s hızda AISI M50 çelik bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri



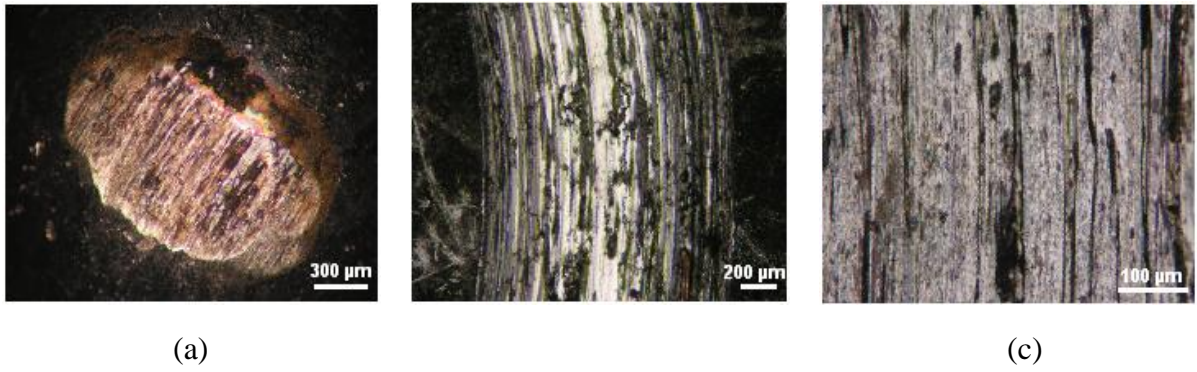
Şekil 7.123. Niobiyum nitrür kaplanmış AISI M2 çeliğinin 320 metre mesafede 10N yük, 0,1m/s hızda AISI M50 çelik bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri



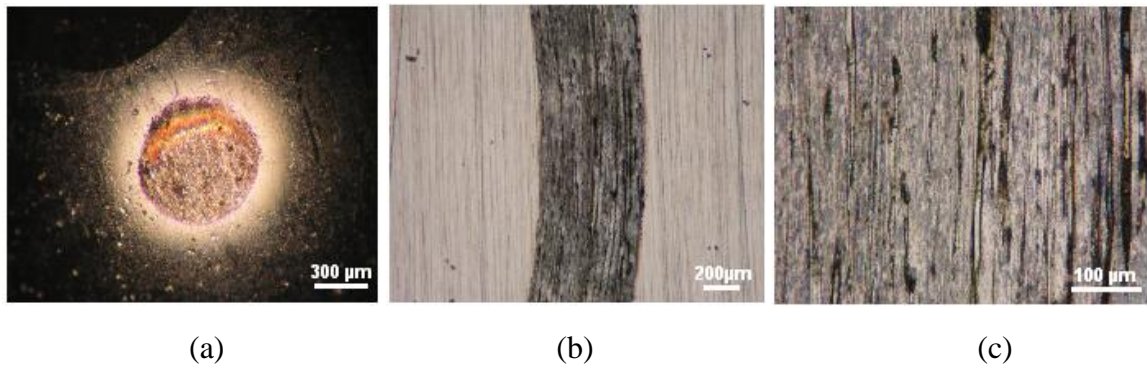
Şekil 7.124. Kaplanmamış AISI 1010 çeliğinin 320 metre mesafede 2,5N yük, 0,1m/s hızda AISI M50 çelik bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri



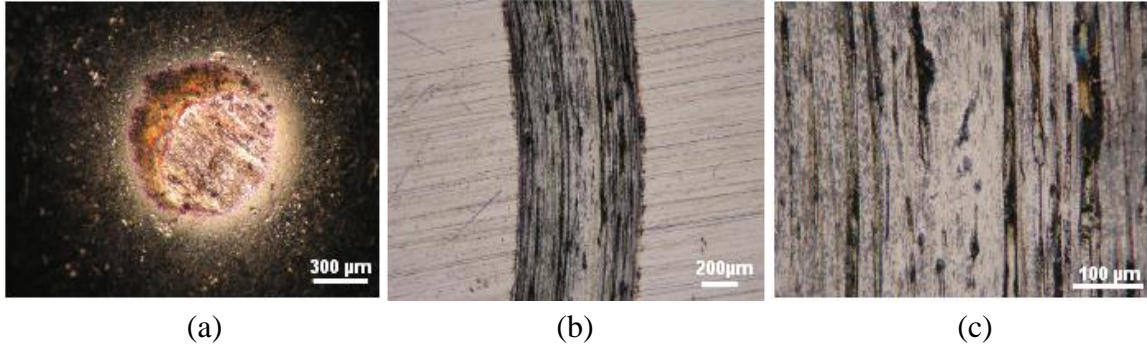
Şekil 7.125. Kaplanmamış AISI 1010 çeliğinin 320 metre mesafede 5N yük, 0,1m/s hızda AISI M50 çelik bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri



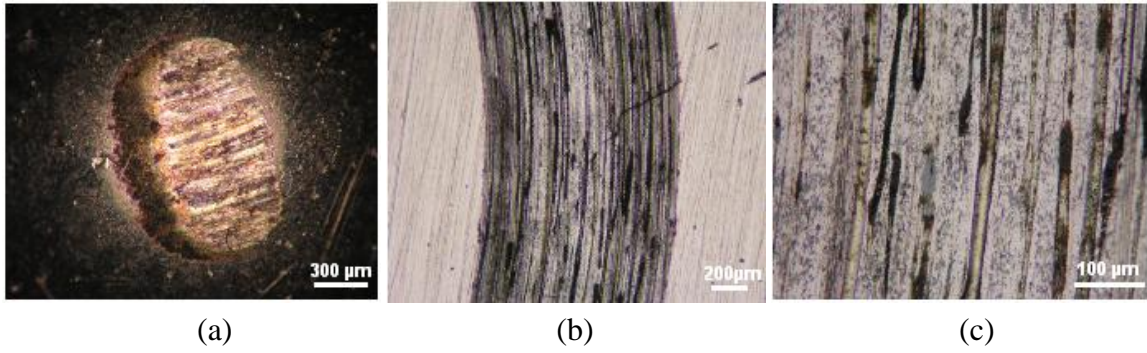
Şekil 7.126. Kaplanmamış AISI 1010 çeliğinin 320 metre mesafede 10N yük, 0,1m/s hızda AISI M50 çelik bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri



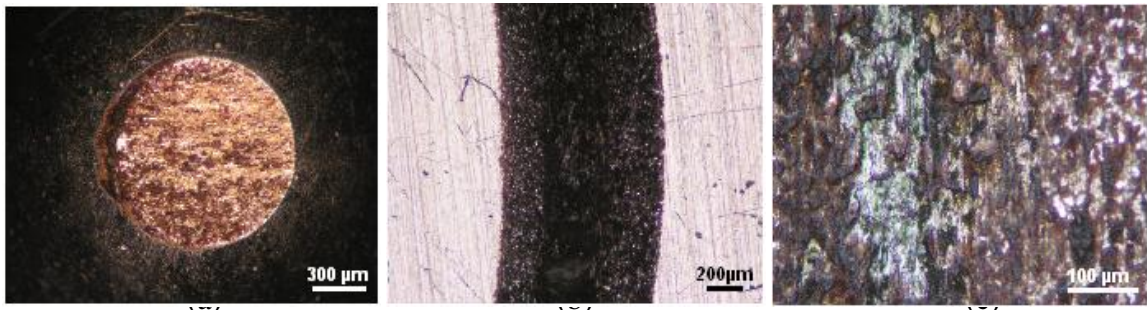
Şekil 7.127. Kaplanmamış AISI 4140 çeliğinin 320 metre mesafede 2,5N yük, 0,1m/s hızda AISI M50 çelik bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri



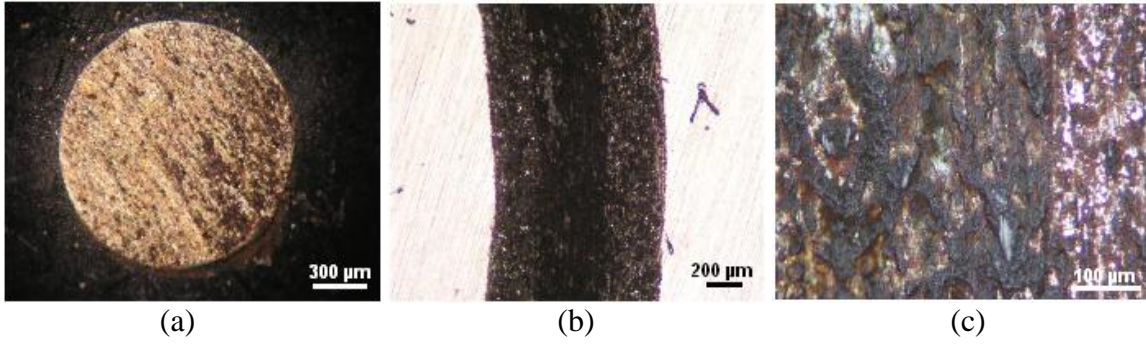
Şekil 7.128. Kaplanmamış AISI 4140 çeliğinin 320 metre mesafede 5N yük, 0,1m/s hızda AISI M50 çelik bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri



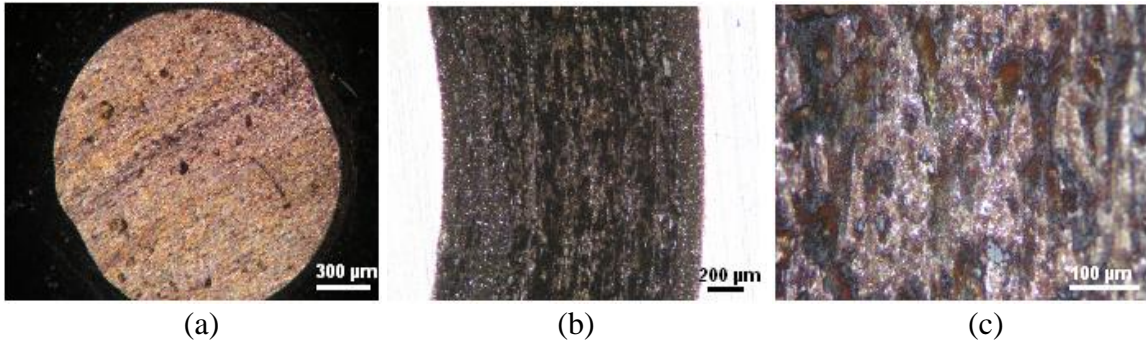
Şekil 7.129. Kaplanmamış AISI 4140 çeliğinin 320 metre mesafede 10N yük, 0,1m/s hızda AISI M50 çelik bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri



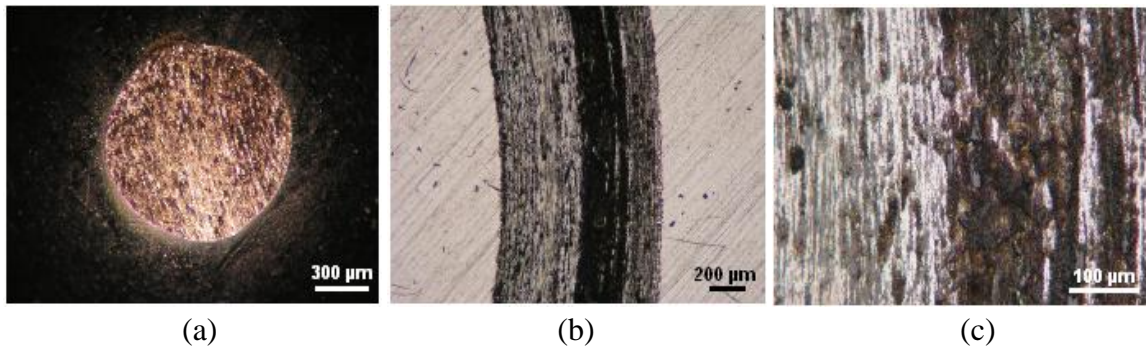
Şekil 7.130. Kaplanmamış AISI D2 çeliğinin 320 metre mesafede 2,5N yük, 0,1m/s hızda AISI M50 çelik bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri



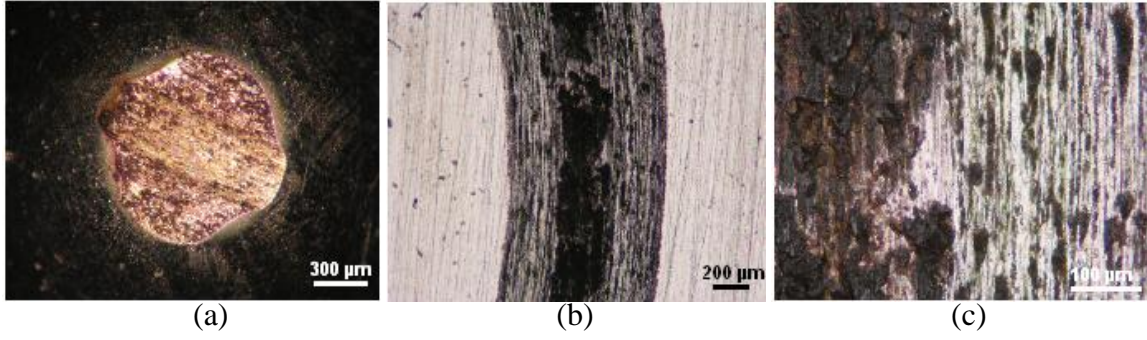
Şekil 7.131. Kaplanmamış AISI D2 çeliğinin 320 metre mesafede 5N yük, 0,1m/s hızda AISI M50 çelik bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri



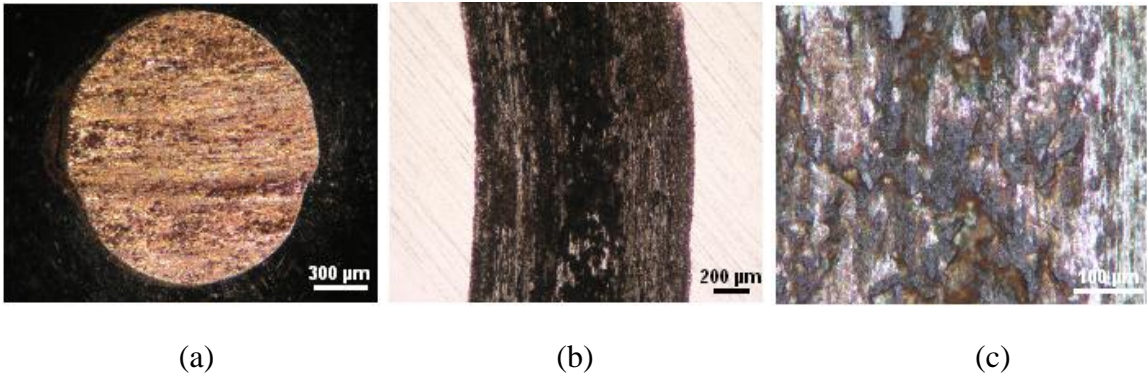
Şekil 7.132. Kaplanmamış AISI D2 çeliğinin 320 metre mesafede 10N yük, 0,1m/s hızda AISI M50 çelik bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri



Şekil 7.133. Kaplanmamış AISI M2 çeliğinin 320 metre mesafede 2,5N yük, 0,1m/s hızda AISI M50 çelik bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri



Şekil 7.134. Kaplanmamış AISI M2 çeliğinin 320 metre mesafede 5N yük, 0,1m/s hızda AISI M50 çelik bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri



Şekil 7.135. Kaplanmamış AISI M2 çeliğinin 320 metre mesafede 10N yük, 0,1m/s hızda AISI M50 çelik bilyeye karşı gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda (a) alümina bilyenin, (b) ve (c) kaplanmış çeliğin mikroyapı görüntüleri

BÖLÜM 8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

9.1. Sonuçlar

- AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çeliklerinin tamamında 900°C, 1000°C ve 1100°C sıcaklıklarda, 1-4 saat sürelerde niobyum nitrür kaplamalar başarı ile gerçekleştirilmiştir.
- Farklı şartlarda kaplama işlemine tabi tutulmuş çeliklerin yüzeylerinde düz ve homojen ve süreklilik arz eden bir tabakanın oluştuğu görülmektedir. Kaplamanın tabaka halinde gerçekleştiği matrisden farklı bir renk arz etmesi nedeniyle ayırt edilmiştir.
- SEM mikroyapı görüntüleri ile elementel 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.
- Niobyum nitrür kaplamalar yoğun ve kompakt olarak çeliklerin yüzeylerinde elde edilmiştir. TRD yöntemiyle elde edilen niobyum nitrür tabakaların NbN, Nb₂CN, Fe₃Nb₃C ve çeliğe göre değişen çeşitli karbürlerden oluştuğu belirlenmiştir.
- Elde edilen niobyum nitrür 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 nitrür

tabakalarının kalınlıkları sırası ile 2.80 μm - 11.89 μm , 3.61 μm - 13.71 μm , 3.16 μm - 13.16 μm ve 3.85 μm -16.77 μm değerleri arasında değişmektedir.

- Niobyum nitrür kaplamaların geręekleştirdiđi AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çeliklerinin kaplama yüzeylerinde geręekleştirilen mikrosertlik ölçümleri sonucunda sertlik değerlerinin niobyum nitrür kaplanmamış çeliklere göre sırasıyla 4.25, 4.5, 2.90, 3.90 kat artış göstermiştir. Bu artış kaplamanın süresine ve faz dönüşümlerine bağlı olarak değiştirdiği belirlenmiştir.
- Aşınma deneylerinde AISI M50 çelik bilye ve alümina bilyeye karşı aşındırılan niobyum nitrür kaplanmış çeliklerde sürtünme katsayıları genel olarak artan yüke bağlı olarak azalmaktadır.
- Yapılan aşınma deneylerinde alümina ve AISI M50 çelik bilyelerin aşınma hızlarının, aşınma yüküne bağlı olarak arttığı görölmektedir. Benzer şekilde alümina bilyeye karşı aşındırılan niobyum nitrür kaplanmış çeliklerin aşınma hızlarında aşınma yüke bağlı olarak artış göstermiştir. Kaplama işlemleriyle AISI 1010, AISI 4140, AISI D2 VE AISI M2 çeliklerin aşınma hızları kaplanmamış çeliklere oranla sırasıyla %68,34 ile %64,36, %59,76 ile %74,58, %42,60 ile %77.08, %12,21 ile %66,38 arasında artış göstermiştir.

9.2. Öneriler

- Niobyum nitrür kaplamaların korozyon ve oksidasyon çalışmalarını yapmak faydalı olacaktır.
- Niobyum nitrür kaplamaların pratik olarak geręek uygulamalarda test edilmesi önemli sonuçlar verebilir.

- Niobyum nitrürün süper iletkenlik özelliğine sahip olması nedeniyle iletkenlik testlerin yapılması faydalı olacaktır.
- Demir dışı metallere benzer yöntemle niobyum nitrür 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] ÖZDEMİR, U., ERTEN, M., "Plazma (İyon) Nitrüleme Yöntemi ve Malzeme Özellikleri Üzerindeki Etkisi" Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi Temmuz 2003 Cilt 1 Sayı 2 (41-48)
- [2] Bhushan, B., Gupta, K. B., Handbook of Tribology, McGraw-Hill, U.S.A, (1991).
- [3] ÇELİK, A., ALSARAN, A., KARAKAN, M., "Plazma İle Termokimyasal Yüzey İşlemleri" Mühendis ve Makina Temmuz 2002 - Sayı 510
- [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 1999
- [5] DİKEÇ, F., "Çelik Malzeme Standartları ve Seçimi" Yavuz Kırtasiye Büro Donanımları Tic. Ltd. Şti., Aralık 1987 / İstanbul
- [6] www.gencbilim.com
- [7] Asil Çelik Teknik Yayınlar Serisi", Bölüm 5, s: 4-28 Bölüm 6, s: 4-48, Bölüm 7, s: 1-62, 1982
- [8] www.egemakres.com
- [9] YILMAZ, A., "Her Derde Deva Hazineimiz Bor", Bilim ve Teknik Dergisi, TÜBİTAK, Mayıs 2002, s: 414, s:38-48
- [10] DEMİR DIŞI METALLERİN KAYNAGI, Burhan Oguz,OERLIKON Yayını
- [11] Sekizinci beş yıllık kalkınma planı madencilik özel ihtisas komisyonu raporu DPT: 2622 - ÖİK: 633 ANKARA 2001
- [12] www.hascelik.com
- [13] www.teknolojikarastirmalar.com
- [14] AKSELAND, D.R., "Refractory Metaterials", ASTM Handbook, Volume 9 pp: 324-328, 1994

- [15] www.kimyaevi.org
- [16] <http://tr.wikipedia.org>
- [17] www.teknikmetalltd.com
- [18] www.standardlab.org
- [19] www.itusozluk.com
- [20] DOSSETT, J., ASM Handbook, V.4: Heat Treating, OH: ASM International; 1991. p. 376-436.
- [21] ASİL ÇELİK, “Takım Çelikleri”, Asil Çelik Teknik Yayınları 7, Syf. 36.
- [22] İPEK, M., “Kutu Sementasyon Yöntemiyle Çelik Yüzeylerin TiC Kaplanması”, Yüksek Lisans Tezi, SAÜ Metalurji Mühendisliği Bölümü, Sakarya, 1996.
- [23] TEKİN, E., “Mühendisler için Çelik Seçimi”, TMMOB Yayınları, Yayın No: 119, Syf. 336-338, Ankara, 1986.
- [24] TOPBAŞ, M. A., “Isıl İşlemler”, Yıldız Teknik Üniversitesi, Metalurji Mühendisliği, İstanbul, 1993
- [25] www.formmak.com
- [26] AKGÜL, A., “6. Metalurji Kongre ve Sergisi Bildirim Kitabı”, Cilt II, Syf. 416-417.
- [27] DALDAL, S., “Niobyum Karbür Kaplamaların Özellikleri” Yüksek Lisans tezi, S.A.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2002
- [28] ÇEĞİL, Ö., “AISI 8620 Çeliğinin Bor-Vanadyumlanması ve Yüzey Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, Haziran, 2002.
- [29] ÇAPAN L., ÖKTEM Z., ÇEP H., “Termoaktif difüzyon yöntemiyle çelik yüzeylerin karbür kaplanması” Metal Dünyası Dergisi, Sayı 19,Yıl 2, Kasım,1994.
- [30] ŞEN, U., “Thermo-reactive diffusion vanadium nitride coatings on AISI 1020 steel”, ECERS. Eighth Conference and Exhibition of the European Ceramic Society, Istanbul, Turkey, 29 June–3 July 2003. p. 777–81.

- [31] "Heat Treatment"ASM Handbook, ASM International, Materials Information Society, Vol. 4, 1991, PP. 437-447.
- [32] ÜSTEL, F., "Kutu Sementasyon Tekniği ile Yüksek Hız Çeliği Yüzeyinde TiC_xNL-x Türü Yüksek Sert Tabakalarının Üretilirliğinin Araştırılması", Doktora Tezi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, SAÜ, 1998.

ÖZGEÇMİŞ

Kadir Kocaman, 28.07.1981 de Sakarya'nın Serdivan beldesinde doğdu. İlk ve orta eğitimini Arifiye'de, Lise eğitimini Sapanca'da tamamladı.1999 yılında Sapanca Teknik Lisesi Elektrik Bölümünden mezun oldu. 2001 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesinde Metal Öğretmenliği bölümünü 2005 yılında bitirdi. 2005 yılında Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi EABD Öğrencisi olarak kaydını yaptırdı. Halen aynı enstitüde yüksek Lisans son sınıf öğrencisi olarak eğitimine devam etmektedir.