

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TERMO-REAKTİF DİFÜZYON (TRD) YÖNTEMİ İLE
ÇELİKLERİN Nb-AI-N KAPLANMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Eray ABAKAY

**Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME
MÜHENDİSLİĞİ**
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Uğur ŞEN

Ağustos 2013

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TERMO-REAKTİF DİFÜZYON (TRD) YÖNTEMİ İLE
ÇELİKLERİN Nb-AI-N KAPLANMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Eray ABAKAY

**Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME
MÜHENDİSLİĞİ**

Bu tez 28/08/2013 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

**Prof. Dr. Cuma BİNDAL
Jüri Başkanı**

**Prof. Dr. Uğur ŞEN
Üye**

**Doç. Dr. Sakıp KÖKSAL
Üye**

TEŞEKKÜR

Öncelikle bütün hayatım boyunca yanımda olan, hiçbir maddi ve manevi yardımı esirgemeyen, üzerimdeki büyük emekleri olan annem, babam ve kardeşlerime teşekkür ederim.

Tez çalışmalarım esnasında çalışmalarımı yönlendiren, bilgi ve tecrübelerini paylaşmaktan çekinmeyen Prof. Dr. Uğur ŞEN'e ve Prof. Dr. Şaduman ŞEN'e, yine çalışmalarına desteklerini sunmaktan çekinmeyen Prof. Dr. Şenol YILMAZ ve Yrd. Doç. Dr. A. Şükran DEMİRKİRAN'a çalışmalarımda yardımlarını esirgemeyen Bülent KILINÇ ve Özkan KON'a teşekkürü bir borç bilirim.

Bugün bu seviyeye gelmemde emeklerini asla unutmayacağım Yıldız Teknik Üniversitesi Kimya Metalurji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine, beraber çalışmaktan gurur duyduğum Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü öğretim üyeleri, araştırma görevlileri ve diğer tüm çalışanlarına teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
ÖZET	xix
SUMMARY	xx

BÖLÜM 1.

GİRİŞ.....	1
------------	---

BÖLÜM 2.

ÇELİKLER HAKKINDA GENEL BİLGİLER	4
2.1. Giriş.....	4
2.2. Dünya’da ve Türkiye’de Demir Çelik Sektörü	5
2.3. Çeliklerin Sınıflandırılması.....	5
2.4. Kimyasal Kompozisyonuna Göre Çeliklerin Sınıflandırılması	6
2.4.1. Alaşım-sız karbonlu çelikler	6
2.4.2. Düşük alaşım-lı çelikler.....	7
2.4.3. Yüksek mukavemetli düşük alaşım-lı çelikler	10
2.4.4. Düşük karbonlu ultra yüksek mukavemetli çelikler	10
2.4.5. Takım çelikleri.....	11
2.4.1.1. Yüksek hız çelikleri	11
2.4.1.2. Sıcak iş takım çelikleri(AISI H serisi)	12
2.4.1.3. Soğuk iş takım çelikleri	12
2.4.1.4. Şoklara dirençli takım çelikleri (AISİ S serisi).....	13
2.4.1.5. Düşük alaşım-lı özel amaçlar için kullanılan takım çelikleri (AISI L serisi).....	13
2.4.1.6. Kalıp çelikleri (AISİ P serisi).....	14

2.4.1.7. Suda sertleştirilen takım çelikleri (AISI W serisi)	14
2.4.6. Paslanmaz çelikler.....	14
2.4.7. Maraging çelikleri	14

BÖLÜM 3.

NİTRÜRLER.....	16
3.1. Giriş.....	16
3.2. Nitrürlerin Sınıflandırılması	16
3.3. Nitrür Oluşumunu Etkileyen Faktörler	17
3.3.1. Nitrür oluşumu ve elektronegative.....	17
3.3.2. Nitrür şekli ve atom çapı.....	18
3.3.3. Nitrürlerin elektronsal bağları	18
3.4. Nitrürlerin Genel Özellikleri	18
3.4.1. Nitrür türlerine göre genel özellikler.....	18
3.4.1.1. Arayer nitrürleri	19
3.4.1.2. Kovalent nitrürler.....	19
3.4.1.3. Geçiş nitrürleri	19
3.4.1.4. Sodyum klorür benzeri nitrürler.....	19
3.4.2. Kristal yapısı ve kompozisyon	20
3.4.3. Fiziksel özellikler	21
3.4.4. Üretim yöntemleri	22
3.4.4.1. Plazma yöntemleri	22
3.4.4.2. Kimyasal buhar biriktirme(CVD).....	23
3.4.4.3. Fiziksel buhar biriktirme (PVD).....	24
3.5. Niyobyum Nitrür.....	24
3.6. Niyobyum Alüminyum Nitrür.....	26

BÖLÜM 4.

TERMO REAKTİF DİFÜZYON (TRD).....	28
4.1. Giriş.....	28
4.2. İşlem Özellikleri.....	29
4.2.1. Tuz banyosu yöntemi	29
4.2.1.1. Yöntemin avantajları.....	30

4.2.1.2. Yöntemin dezavantajları	31
4.2.1.3. Uygulama alanları	31
4.2.2. Akışkan yatak yöntemi.....	31
4.2.2.1. Avantajları	31
4.2.2.2. Kullanım alanları	31
4.2.3. Kutu sementasyon yöntemi	32
4.2.3.1. İşlemin prensibi.....	32
4.2.4. Kaplama kalitesini etkileyen işlem parametreleri.....	32
4.2.4.1. İşlem kutusunun tasarımı ve karışımda numune pozisyonu	33
4.2.4.2. Ferroalaşımların etkisi	33
4.2.4.3. Karışım tozlarının tane boyutuna etkisi	33
4.2.4.4. Kaplama/difüzyon sıcaklığı ve süresi	34
4.2.4.5. Aktivatör cinsi	34
4.3. Termo Reaktif Difüzyon Uygulanmış Malzemelerin Özellikleri.....	34
4.3.1. Sertlik	34
4.3.2. Aşınma dayanımı	35
4.3.3. Darbe dayanımı	36
4.3.4. Korozyon ve oksidasyon dayanımı	36
4.3.5. Yüzeiden tabaka kalkmasına karşı dayanım	37
4.4. Termo-Reaktif Difüzyonun Uygulama Alanları	38

BÖLÜM 5.

AŞINMA VE SÜRTÜNME	40
5.1. Aşınma Mekanizmalarının Sınıflandırılması	41
5.1.1. Mekanik aşınma	41
5.1.2. Kimyasal aşınma	41
5.1.3. Termal Aşınma	41
5.1.4. Aşınma mekanizmaları tipleri	42
5.2. Sürtünme	43
5.2.1. Sürtünme katsayısı	43

BÖLÜM 6.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR	46
6.1. Giriş.....	46
6.2. Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler.....	47
6.3. DeneYlerde Kullanılan Cihazlar.....	48
6.4. Kaplama İşlemleri.....	48
6.5. Mikroyapı İncelemeleri.....	50
6.5.1. Optik mikroyapı incelemeleri	50
6.5.2. Tarama elektron mikroskobu ve elementel analiz incelemesi	51
6.5.3. AFM incelemeleri	51
6.5.4. Sertlik deneyleri	51
6.5.5. Aşınma deneyleri	52

BÖLÜM 7.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER	54
7.1. Mikroyapı İncelemeleri.....	54
7.2. Kaplamalara Ait Yüzey Görüntüleri	82
7.3. Faz Analizleri	84
7.4. Kaplamaların Sertlikleri.....	111
7.5. Aşınma Deneyleri	113

BÖLÜM 8.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER	154
8.1. Sonuçlar	154
8.2. Öneriler	155

KAYNAKLAR.....	157
----------------	-----

ÖZGEÇMİŞ	160
----------------	-----

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

TRD	: Termo reaktif difüzyon
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
EDS	: Elementel yapı analizi
AFM	: Atomik kuvvet mikroskobu
XRD	: X-ışınları difraksiyon analizi
AISI	: American Iron and Steel Institute
HSLA	: Yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çelikler
ASTM	: American Society of Testing Materials
μ	: Sürtünme Katsayısı
L	: Hasar iz kalınlığı (mm)
r	: Aşındırıcı bilye çapı (mm)
S	: Hasar iz alanı mm^2
V	: Hasar hacmi mm^3
R	: Aşınma iz yarıçapı (mm)
θ	: Kesim açısı (radyal)
W	: Aşınma hızı (mm^3/m)
d	: Hasar derinliği (μm)
ΔG°	: Sistem standart serbest enerjisi

ŞEKİLLER LİSTESİ

- Şekil 3.1. Grup 4 ile Grup 6 arası geçiş metallerine ait kafes yapıları. (a)Sodyum klorür: ScC, VC, NbC, ScN, TiN, VN, NbN; (b) Hegzagonal Sıkı Paket: β -Mo₂C, β -W₂C (c); Kübik Yüzey Merkez: γ -Mo₂N, β -W₂N.....20
- Şekil 3.2. Bir CVD ünitesinin prensip şeması, reaksiyon $A + B \rightarrow C + D$ 23
- Şekil 4.1. Çeşitli kaplama teknikleri ile elde edilen sert kaplamalara ait sertlik değerleri.....35
- Şekil 4.2. Islah edilmiş, kromlanmış ve TRD işlemi yapılmış 3 farklı zımba için aşınma miktarı-darbe sayısı grafiği.....36
- Şekil 4.3. Oksidasyon deneyi sonucu kazanılan ağırlıkların karşılaştırılması, altlık malzeme AISI D2, süre 40 saat.....37
- Şekil 5.1. Şematik aşınma türleri: (a) sünek katı yüzeyden mikro kesimler vasıtasıyla oluşmuş abrezif aşınma, (b) adezif kesme ve transferlerle oluşmuş adezif aşınma, (c) birikmiş plastik kesme akışıyla oluşmuş akış aşınması, (d) çatlak oluşumu ve ilerlemesiyle oluşmuş yorulma aşınması, (e) sünek tibo-filmin kesilmesiyle oluşmuş korozyon aşınması, (f) gevrek tribo-filmin ayrılmasıyla oluşan korozyon aşınması, (g) toplanmış plastik kayma akımıyla veya yumuşak tribo-filmin etkisiyle oluşan korozyon aşınması, (i) lokal ergimelerle ve transfer veya saçılmayla oluşan ergime aşınması.....43
- Şekil 5.2. Yüzeyler arasında sürtünmenin olduğu bir sistemin şematik gösterilişi 44
- Şekil 5.3. Sürtünme kuvvetinin zamanla değişimi: a) Yapışma-kayma olmaksızın değişim b) Yapışıp-kaymalı değişim.....45
- Şekil 5.4. Zamana bağlı olarak sürtünme kuvvetindeki değişimlere örnekler.....45
- Şekil 6.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan numunelerin şekil ve boyutları.....47
- Şekil 6.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan potanın geometrik şekli ve boyutları (a) pota, (b) potanın iç kapağı, (c) potanın dış kapağı.....48
- Şekil 6.3. Kullanılan kaplama bileşenleri ve malzemeler.....49

Şekil 6.4. Aşınma cihazının şematik gösterimi.....	53
Şekil 7.1. 1 saat süre ile kaplama işlemine tabii tutulan AISI 4140 çeliği için a) katkısız, b)%0.5 Al, c)%1 Al, d) %1.5 Al ve e)%2Al oranlarda alüminyum içeren Nb-N ve Nb-Al-N esaslı kaplamaların optik mikroyapı görüntüleri.....	55
Şekil 7.2. 1 saat süre ile kaplama işlemine tabii tutulan AISI D2 çeliği için a) katkısız, b)%0.5 Al, c)%1 Al, d) %1.5 Al ve e)%2Al oranlarda alüminyum içeren Nb-N ve Nb-Al-N esaslı kaplamaların optik mikroyapı görüntüleri.....	56
Şekil 7.3. 1 saat süre ile kaplama işlemine tabii tutulan AISI M2 çeliği için a) katkısız, b)%0.5 Al, c)%1 Al, d) %1.5 Al ve e)%2Al oranlarda alüminyum içeren Nb-N ve Nb-Al-N esaslı kaplamaların optik mikroyapı görüntüleri.....	57
Şekil 7.4. 2 saat süre ile kaplama işlemine tabii tutulan AISI 4140 çeliği için a) katkısız, b)%0.5 Al, c)%1 Al, d) %1.5 Al ve e)%2Al oranlarda alüminyum içeren Nb-N ve Nb-Al-N esaslı kaplamaların optik mikroyapı görüntüleri.....	58
Şekil 7.5. 2 saat süre ile kaplama işlemine tabii tutulan AISI D2 çeliği için a) katkısız, b)%0.5 Al, c)%1 Al, d) %1.5 Al ve e)%2Al oranlarda alüminyum içeren Nb-N ve Nb-Al-N esaslı kaplamaların optik mikroyapı görüntüleri.....	59
Şekil 7.6. 2 saat süre ile kaplama işlemine tabii tutulan AISI M2 çeliği için a) katkısız, b)%0.5 Al, c)%1 Al, d) %1.5 Al ve e)%2Al oranlarda alüminyum içeren Nb-N ve Nb-Al-N esaslı kaplamaların optik mikroyapı görüntüleri.....	60
Şekil 7.7. 4 saat süre ile kaplama işlemine tabii tutulan AISI 4140 çeliği için a) katkısız, b)%0.5 Al, c)%1 Al, d) %1.5 Al ve e)%2Al oranlarda alüminyum içeren Nb-N ve Nb-Al-N esaslı kaplamaların optik mikroyapı görüntüleri.....	61
Şekil 7.8. 4 saat süre ile kaplama işlemine tabii tutulan AISI D2 çeliği için a) katkısız, b)%0.5 Al, c)%1 Al, d) %1.5 Al ve e)%2Al oranlarda alüminyum içeren Nb-N ve Nb-Al-N esaslı kaplamaların optik mikroyapı görüntüleri.....	62

- Şekil 7.9. 4 saat süre ile kaplama işlemine tabii tutulan AISI M2 çeliği için a) katkısız, b)%0.5 Al, c)%1 Al, d) %1.5 Al ve e)%2Al oranlarda alüminyum içeren Nb-N ve Nb-Al-N esaslı kaplamaların optik mikroyapı görüntüleri.....63
- Şekil 7.10. 2 saat süreyle Nb-N kaplanmış AISI 4140 çeliğinin (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c), (d) ve (e) sırasıyla 1,2 ve 4 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir.....65
- Şekil 7.11. 2 saat süreyle Nb-N kaplanmış AISI D2 çeliğinin (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c), (d) ve (e) sırasıyla 1,2 ve 4 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir.....66
- Şekil 7.12. 2 saat süreyle Nb-N kaplanmış AISI M2 çeliğinin (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c), (d) ve (e) sırasıyla 1,2 ve 5 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir.....67
- Şekil 7.13. 2 saat süreyle %0,5 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI 4140 çeliğinin (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c), (d) ve (e) sırasıyla 1,2 ve 5 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir.....68
- Şekil 7.14. 2 saat süreyle %0,5 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI D2 çeliğinin (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c), (d) ve (e) sırasıyla 1,2 ve 5 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir.....69
- Şekil 7.15. 2 saat süreyle %0,5 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI M2 çeliğinin (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c), (d) ve (e) sırasıyla 1,2 ve 5 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir.....70
- Şekil 7.16. 2 saat süreyle %1,0 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI 4140 çeliğinin (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c), (d) ve (e) sırasıyla 1,2 ve 5 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir.....71
- Şekil 7.17. 2 saat süreyle %1,0 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI D2 çeliğinin (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c), (d) ve (e) sırasıyla 1,2 ve 4 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir.....72
- Şekil 7.18. 2 saat süreyle %1,0 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI M2 çeliğinin (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c), (d) ve (e) sırasıyla 1,2 ve 5 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir.....73

- Şekil 7.19. 2 saat süreyle %1,5 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI 4140 çeliğinin (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c), (d) ve (e) sırasıyla 1,2 ve 5 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir.....74
- Şekil 7.20. 2 saat süreyle %1,5 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI D2 çeliğinin (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c), (d) ve (e) sırasıyla 1,2 ve 4 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir.....75
- Şekil 7.21. 2 saat süreyle %1,5 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI M2 çeliğinin (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c), (d) ve (e) sırasıyla 1,2 ve 5 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir.....76
- Şekil 7.22. 2 saat süreyle %2,0 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI 4140 çeliğinin (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c), (d) ve (e) sırasıyla 1,2 ve 5 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir.....77
- Şekil 7.23. 2 saat süreyle %2,0 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI D2 çeliğinin (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c), (d) ve (e) sırasıyla 1,2 ve 4 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir.....78
- Şekil 7.24. 2 saat süreyle %2,0 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI M2 çeliğinin (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c), (d) ve (e) sırasıyla 1,2 ve 5 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir.....79
- Şekil 7.25. 1000°C sıcaklıkta katkısız ve %0,5-2 arasında Al ilave edilmiş kaplama ortamlarında kaplanmış AISI 4140 çeliğinin üzerinde oluşan kaplama tabakalarının kalınlıklarının kaplama süresine bağlı olarak değişimi.....80
- Şekil 7.26. 1000°C sıcaklıkta katkısız ve %0,5-2 arasında Al ilave edilmiş kaplama ortamlarında kaplanmış AISI D2 çeliğinin üzerinde oluşan kaplama tabakalarının kalınlıklarının kaplama süresine bağlı olarak değişimi.....81
- Şekil 7.27. 1000°C sıcaklıkta katkısız ve %0,5-2 arasında Al ilave edilmiş kaplama ortamlarında kaplanmış AISI M2 çeliğinin üzerinde oluşan kaplama tabakalarının kalınlıklarının kaplama süresine bağlı olarak değişimi.....81
- Şekil 7.28. 2 saat süre ile 1000°C sıcaklıkta %2 alüminyum katkılı kaplama ortamında kaplanmış AISI 4140 çeliğinin yüzeyinden alınan (a) atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ve (b) SEM mikroyapı görüntüleri.....82

Şekil 7.29. 2 saat süre ile 1000°C sıcaklıkta %2 alüminyum katkılı kaplama ortamında kaplanmış AISI D2 çeliğinin yüzeyinden alınan (a) atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ve (b) SEM mikroyapı görüntüleri.....	82
Şekil 7.30. 2 saat süre ile 1000°C sıcaklıkta %2 alüminyum katkılı kaplama ortamında kaplanmış AISI M2 çeliğinin yüzeyinden alınan (a) atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ve (b) SEM mikroyapı görüntüleri.....	83
Şekil 7.31. AISI 4140 çeliği üzerine 1 saat süre ile gerçekleştirilen sırasıyla katkısız; %0,5Al; %1Al; %1,5Al ve %2Al içeren kaplamaların x-ışınları difraksiyonu analizleri.....	85
Şekil 7.32. AISI 4140 çeliği üzerine 2 saat süre ile gerçekleştirilen sırasıyla katkısız; %0,5Al; %1Al; %1,5Al ve %2Al içeren kaplamaların x-ışınları difraksiyonu analizleri.....	86
Şekil 7.33. AISI 4140 çeliği üzerine 4 saat süre ile gerçekleştirilen sırasıyla katkısız; %0,5Al; %1Al; %1,5Al ve %2Al içeren kaplamaların x-ışınları difraksiyonu analizleri.....	87
Şekil 7.34. 1,2 ve 4 saat süre ile Nb-N kaplanmış AISI 4140 çeliği için x-ışınları difraksiyon analizleri.....	88
Şekil 7.35. 1,2 ve 4 saat süre ile %0,5 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI 4140 çeliği için x-ışınları difraksiyon analizleri.....	89
Şekil 7.36 1,2 ve 4 saat süre ile %1alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI 4140 çeliği için x-ışınları difraksiyon analizleri.....	90
Şekil 7.37. 1,2 ve 4 saat süre ile %1,5 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI 4140 çeliği için x-ışınları difraksiyon analizleri.....	91
Şekil 7.38. 1,2 ve 4 saat süre ile %2 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI 4140 çeliği için x-ışınları difraksiyon analizleri.....	92
Şekil 7.39. AISI D2 çeliği üzerine 1 saat süre ile gerçekleştirilen sırasıyla katkısız; %0,5Al; %1Al; %1,5Al ve %2Al içeren kaplamaların x-ışınları difraksiyonu analizleri.....	94
Şekil 7.40. AISI D2 çeliği üzerine 2 saat süre ile gerçekleştirilen sırasıyla katkısız; %0,5Al; %1Al; %1,5Al ve %2Al içeren kaplamaların x-ışınları difraksiyonu analizleri.....	95

Şekil 7.41. AISI D2 çeliği üzerine 4 saat süre ile gerçekleştirilen sırasıyla katkısız; %0,5Al; %1Al; %1,5Al ve %2Al içeren kaplamaların x-ışınları difraksiyonu analizleri.....	96
Şekil 7.42. 1,2 ve 4 saat süre ile Nb-N kaplanmış AISI D2 çeliği için x-ışınları difraksiyon analizleri.....	97
Şekil 7.43. 1,2 ve 4 saat süre ile %0,5 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI D2 çeliği için x-ışınları difraksiyon analizleri.....	98
Şekil 7.44. 1,2 ve 4 saat süre ile %1 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI D2 çeliği için x-ışınları difraksiyon analizleri.....	99
Şekil 7.45. 1,2 ve 4 saat süre ile %1,5 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI D2 çeliği için x-ışınları difraksiyon analizleri.....	100
Şekil 7.46. 1,2 ve 4 saat süre ile %2 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI D2 çeliği için x-ışınları difraksiyon analizleri.....	101
Şekil 7.47. AISI M2 çeliği üzerine 1 saat süre ile gerçekleştirilen sırasıyla katkısız; %0,5Al; %1Al; %1,5Al ve %2Al içeren kaplamaların x-ışınları difraksiyonu analizleri.....	103
Şekil 7.48. AISI M2 çeliği üzerine 2 saat süre ile gerçekleştirilen sırasıyla katkısız; %0,5Al; %1Al; %1,5Al ve %2Al içeren kaplamaların x-ışınları difraksiyonu analizleri.....	104
Şekil 7.49. AISI M2 çeliği üzerine 4 saat süre ile gerçekleştirilen sırasıyla katkısız; %0,5Al; %1Al; %1,5Al ve %2Al içeren kaplamaların x-ışınları difraksiyonu analizleri.....	105
Şekil 7.50. 1,2 ve 4 saat süre ile Nb-N kaplanmış AISI M2 çeliği için x-ışınları difraksiyon analizleri.....	106
Şekil 7.51. 1,2 ve 4 saat süre ile %0,5 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI M2 çeliği için x-ışınları difraksiyon analizleri.....	107
Şekil 7.52. 1,2 ve 4 saat süre ile %1 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI M2 çeliği için x-ışınları difraksiyon analizleri.....	108
Şekil 7.53. 1,2 ve 4 saat süre ile %1,5 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI M2 çeliği için x-ışınları difraksiyon analizleri.....	109
Şekil 7.54. 1,2 ve 4 saat süre ile %2 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI M2 çeliği için x-ışınları difraksiyon analizleri.....	110

- Şekil 7.55. Kaplama ortamına ilave edilen alüminyum elementinin miktarına bağlı olarak 1000°C sıcaklıkta 2 saat süre ile AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çeliklerinin yüzeyinde elde edilen sertlik değerlerindeki değişimler...112
- Şekil 7.56. 4 saat süre ile 1000°C sıcaklıkta değişik oranlarda Al ilave edilen kaplama ortamlarında kaplanmış AISI 4140 çeliğine ait uygulanan yüke bağlı olarak (a) sürtünme katsayısının değişimi ve (b) bu grafiğe ait kontur diyagramı.....114
- Şekil 7.57. 4 saat süre ile 1000°C sıcaklıkta değişik oranlarda Al ilave edilen kaplama ortamlarında kaplanmış AISI D2 çeliğine ait uygulanan yüke bağlı olarak (a) sürtünme katsayısının değişimi ve (b) bu grafiğe ait kontur diyagramı..... 115
- Şekil 7.58. 4 saat süre ile 1000°C sıcaklıkta değişik oranlarda Al ilave edilen kaplama ortamlarında kaplanmış AISI M2 çeliğine ait uygulanan yüke bağlı olarak (a) sürtünme katsayısının değişimi ve (b) bu grafiğe ait kontur diyagramı..... 116
- Şekil 7.59. AISI 4140 çeliğine üzerinde 4 saat süre ile 1000°C sıcaklıkta kaplama ortamına değişik oranlarda Al ilave edilerek elde edilen kaplamaların (a) sürtünme katsayısı ve (b) aynı grafiğe ait kontur diyagramı..... 117
- Şekil 7.60. AISI D2 çeliğine üzerinde 4 saat süre ile 1000°C sıcaklıkta kaplama ortamına değişik oranlarda Al ilave edilerek elde edilen kaplamaların (a) sürtünme katsayısı ve (b) aynı grafiğe ait kontur diyagramı..... 119
- Şekil 7.61. AISI M2 çeliğine üzerinde 4 saat süre ile 1000°C sıcaklıkta kaplama ortamına değişik oranlarda Al ilave edilerek elde edilen kaplamaların (a) sürtünme katsayısı ve (b) aynı grafiğe ait kontur diyagramı..... 120
- Şekil 7.62. Kaplama ortamına değişik oranlarda Al ilave edilerek kaplanmış AISI 4140 çeliğinin uygulanan aşınma yüküne bağlı olarak (a) aşınma oranının ve (b) alümina bilyede aşınma oranının değişimi..... 122
- Şekil 7.63. Kaplama ortamına değişik oranlarda Al ilave edilerek kaplanmış AISI D2 çeliğinin uygulanan aşınma yüküne bağlı olarak (a) aşınma oranının ve (b) alümina bilyede aşınma oranının değişimi..... 123
- Şekil 7.64. Kaplama ortamına değişik oranlarda Al ilave edilerek kaplanmış AISI M2 çeliğinin uygulanan aşınma yüküne bağlı olarak (a) aşınma oranının ve (b) alümina bilyede aşınma oranının değişimi..... 124

Şekil 7.65	Kaplama ortamına değişik oranlarda Al ilave edilerek kaplanmış AISI 4140 çeliğinin uygulanan aşınma hızına bağlı olarak (a) aşınma oranının ve (b) alümina bilyede aşınma oranının değişimi.....	125
Şekil 7.66.	Kaplama ortamına değişik oranlarda Al ilave edilerek kaplanmış AISI D2 çeliğinin uygulanan aşınma hızına bağlı olarak (a) aşınma oranının ve (b) alümina bilyede aşınma oranının değişimi.....	126
Şekil 7.67.	Kaplama ortamına değişik oranlarda Al ilave edilerek kaplanmış AISI M2 çeliğinin uygulanan aşınma hızına bağlı olarak (a) aşınma oranının ve (b) alümina bilyede aşınma oranının değişimi.....	127
Şekil 7.68.	Nb-N kaplanmış AISI 4140 çeliğinin 5N yük altında alümina bilyeye karşı aşınma deneyi sonrası alınan (a) SEM mikroyapı görüntüsü, (b-f) EDS analizleri.....	139
Şekil 7.69.	Nb-N kaplanmış AISI D2 çeliğinin 5N yük altında alümina bilyeye karşı aşınma deneyi sonrası alınan (a) SEM mikroyapı görüntüsü, (b-f) EDS analizleri.....	140
Şekil 7.70.	Nb-N kaplanmış AISI M2 çeliğinin 5N yük altında alümina bilyeye karşı aşınma deneyi sonrası alınan (a) SEM mikroyapı görüntüsü, (b-f) EDS analizleri.....	141
Şekil 7.71.	%0,5 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI 4140 çeliğinin 5N yük altında alümina bilyeye karşı aşınma deneyi sonrası alınan (a) SEM mikroyapı görüntüsü, (b-f) EDS analizleri.....	142
Şekil 7.72.	%0,5 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI D2 çeliğinin 5N yük altında alümina bilyeye karşı aşınma deneyi sonrası alınan (a) SEM mikroyapı görüntüsü, (b-f) EDS analizleri.....	143
Şekil 7.73.	%0,5 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI M2 çeliğinin 5N yük altında alümina bilyeye karşı aşınma deneyi sonrası alınan (a) SEM mikroyapı görüntüsü, (b-f) EDS analizleri.....	144
Şekil 7.74.	%1,0 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI 4140 çeliğinin 5N yük altında alümina bilyeye karşı aşınma deneyi sonrası alınan (a) SEM mikroyapı görüntüsü, (b-f) EDS analizleri.....	145
Şekil 7.75.	%1,0 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI D2 çeliğinin 5N yük altında alümina bilyeye karşı aşınma deneyi sonrası alınan (a) SEM mikroyapı görüntüsü, (b-f) EDS analizleri.....	146

Şekil 7.76. %1,0 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI M2 çeliğinin 5N yük altında alümina bilyeye karşı aşınma deneyi sonrası alınan (a) SEM mikroyapı görüntüsü, (b-f) EDS analizleri.....	147
Şekil 7.77. %1,5 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI 4140 çeliğinin 5N yük altında alümina bilyeye karşı aşınma deneyi sonrası alınan (a) SEM mikroyapı görüntüsü, (b-f) EDS analizleri.....	148
Şekil 7.78. %1,5 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI D2 çeliğinin 5N yük altında alümina bilyeye karşı aşınma deneyi sonrası alınan (a) SEM mikroyapı görüntüsü, (b-f) EDS analizleri.....	149
Şekil 7.79. %1,5 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI M2 çeliğinin 5N yük altında alümina bilyeye karşı aşınma deneyi sonrası alınan (a) SEM mikroyapı görüntüsü, (b-f) EDS analizleri.....	150
Şekil 7.80. %2,0 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI 4140 çeliğinin 5N yük altında alümina bilyeye karşı aşınma deneyi sonrası alınan (a) SEM mikroyapı görüntüsü, (b-f) EDS analizleri.....	151
Şekil 7.81. %2,0 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI D2 çeliğinin 5N yük altında alümina bilyeye karşı aşınma deneyi sonrası alınan (a) SEM mikroyapı görüntüsü, (b-f) EDS analizleri.....	152
Şekil 7.82. %2,0 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI M2 çeliğinin 5N yük altında alümina bilyeye karşı aşınma deneyi sonrası alınan (a) SEM mikroyapı görüntüsü, (b-f) EDS analizleri.....	153

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Dünya ham çelik üretimi(bin ton).....	5
Tablo 2.2. Türk demir çelik sektörünün yıllara göre ham çelik üretimi (milyon ton) 5	
Tablo 2.3. Standart düşük alaşımlı çeliklerin tipleri.....	8
Tablo 3.1. Periyodik tablo.....	17
Tablo 3.2. Azot ve bazı elementlerin yaklaşık atom çapları ve nitrür türü.....	18
Tablo 3.3. Geçiş metalleri, bunların karbür ve nitrürlerine ait bazı özellikleri.....	23
Tablo 3.4. Niyobyum nitrüre ait özellikler.....	26
Tablo 4.1. TRD İşlemi ile üretilmiş takım elemanlarının kullanım alanları.....	39
Tablo 6.1. Aşınma hızı hesaplamalarında kullanılan değişken ve bağıntılar.....	52
Tablo 7.1. 1000 °C sıcaklıkta 2 saat süre ile Nb-N ve değişik oranlarda alüminyum içeren Nb-Al-N kaplamalara ait sertlik değerleri.....	112
Tablo 7.2. Nb-N kaplanmış AISI 4140 çeliğinin değişik yükler altında oluşan aşınma izlerinin mikroyapı görüntüleri.....	129
Tablo 7.3. Nb-N kaplanmış AISI D2 çeliğinin değişik yükler altında oluşan aşınma izlerinin mikroyapı görüntüleri.....	129
Tablo 7.4. Nb-N kaplanmış AISI M2 çeliğinin değişik yükler altında oluşan aşınma izlerinin mikroyapı görüntüleri.....	130
Tablo 7.5. %0,5 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI 4140 çeliğinin değişik yükler altında oluşan aşınma izlerinin mikroyapı görüntüleri.....	130
Tablo 7.6. %0,5 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI D2 çeliğinin değişik yükler altında oluşan aşınma izlerinin mikroyapı görüntüleri.....	131
Tablo 7.7. %0,5 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI M2 çeliğinin değişik yükler altında oluşan aşınma izlerinin mikroyapı görüntüleri.....	131
Tablo 7.8. %1,0 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI 4140 çeliğinin değişik yükler altında oluşan aşınma izlerinin mikroyapı görüntüleri.....	132
Tablo 7.9. %1,0 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI D2 çeliğinin değişik yükler altında oluşan aşınma izlerinin mikroyapı görüntüleri.....	132

Tablo 7.10. %1,0 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI M2 çeliğinin değişik yükler altında oluşan aşınma izlerinin mikroyapı görüntüleri.....	133
Tablo 7.11. %1,5 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI 4140 çeliğinin değişik yükler altında oluşan aşınma izlerinin mikroyapı görüntüleri.....	133
Tablo 7.12. %1,0 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI D2 çeliğinin değişik yükler altında oluşan aşınma izlerinin mikroyapı görüntüleri.....	134
Tablo 7.13. %1,5 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI M2 çeliğinin değişik yükler altında oluşan aşınma izlerinin mikroyapı görüntüleri.....	134
Tablo 7.14. %2,0 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI 4140 çeliğinin değişik yükler altında oluşan aşınma izlerinin mikroyapı görüntüleri.....	135
Tablo 7.15. %2,0 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI D2 çeliğinin değişik yükler altında oluşan aşınma izlerinin mikroyapı görüntüleri.....	135
Tablo 7.16. %2,0 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI M2 çeliğinin değişik yükler altında oluşan aşınma izlerinin mikroyapı görüntüleri.....	136

ÖZET

Anahtar kelimeler: Niyobyum, Nitrür, Niyobyum Alüminyum Nitrür, Termo-reaktif difüzyon kaplama, Aşınma.

Genellikle çelik malzemeler, mekanik etkileşimler sonucu aşınma, kimyasal reaksiyonlar sonucu korozyon türü hasarlarla servis dışı kalarak, ülke ekonomilerinde büyük kayıplara yol açmaktadırlar. Aşınma ve korozyonun neden olduğu hasarın, ülke ekonomilerine bu denli yük getirmesi bilimsel ve endüstriyel çevreleri harekete geçirmiş ve daha dayanıklı malzemeler arayışına itmiştir. Bu amaçla endüstride yoğun olarak kullanılan çelik malzemeler üzerine, difüzyonla ve/veya kimyasal ve fiziksel çökertme ile kaplama teknikleri geliştirilerek 2-10 µm kalınlığında sert tabakalar elde edilmiştir. Seramik karakterli olan bu tabakalar, aşınmaya, korozyona ve yüksek sıcaklık uygulamalarına karşı oldukça dirençlidir. Bundan dolayı, sert yüzey kaplama yöntemleri, hem bilimsel hem de endüstriyel çevrelerde önem kazanmıştır

Niyobyum nitrür, sahip olduğu üstün mekanik özellikler ve korozyon dayanımı, süper iletkenlik geçiş sıcaklığı değerleri ile araştırmacıların dikkatini çeken bir malzeme olmuştur. Yapılan çalışmalar Ti-Al-N ve Cr-Al-N üzerinde yoğunlaşmış olup, Ti-N ve Cr-N'e göre sertlik ve ısıl kararlılıkta artış sağlanmıştır. Niyobyum nitrüre alüminyum ilavesi son yıllarda araştırma konusu olmaya başlamıştır. Yapılan alüminyum ilavesinin metalik bağ yapısını kovalent bağ ile değiştirerek mekanik özellikler, korozyon dayanımı ve ısıl kararlılığı arttırması beklenmektedir. Literatürde niyobyum alüminyum nitrür ile ilgili yapılmış olan çalışma sayısı sınırlıdır.

Bu çalışmada, ilk aşamada nitrasyon işlemine, ikinci aşamada ise termoreaktif difüzyon (TRD) yöntemiyle 1000°C sıcaklıkta 1, 2 ve 4 saat sürelerde farklı Al bileşimlerinde hazırlanan ortamlarda yüzeyde oluşturulan Nb-Al-N tabakasının özellikleri incelenmiştir. Bu amaçla niyobyum alüminyum nitrür (Nb-Al-N) kaplanan çeliklerin mikro yapı incelemeleri optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve elementel yapı analizi (EDS) ve atomik kuvvet mikroskobu (AFM) analizleri ile gerçekleştirilmiştir. Niyobyum alüminyum nitrür esaslı tabakaların faz analizleri x-ışınları difraksiyon analizi (XRD) ile sertlikleri ise knoop indentasyon tekniği ile belirlenmiştir. Ayrıca, niyobyum nitrür ve niyobyum alüminyum nitrür kaplanmış numuneler üzerinde 2,5N, 5N ve 10 N yükler altında 180 metre mesafede ve 0,1m/s, 0,3m/s ve 0,5 m/s hızlarda aşınma deneyleri gerçekleştirilmiş ve aşınma hızı değerleri ile sürtünme katsayıları belirlenmiştir. Aşınma yüzeylerin incelemeleri optik, taramalı elektron mikroskopları ve 3D profilometre ile gerçekleştirilmiştir.

COATING OF STEELS WITH Nb-Al-N BY THERMO REACTIVE DIFFUSION (TRD) PROCESS

SUMMARY

Key Words: Niobium Nitride, Niobium Aluminum Nitride, Thermo Reactive Diffusion Process, Wear

Mechanical contact and chemical reactions causes wear and corrosion of steels. Corrosion and wear have been interested for scientists and industrialists so that they work for improving more resistant materials. So, hard coatings which have 2-10 μm thickness were obtained with diffusion and physical or chemical vapor techniques on steel substrates. These coatings have ceramic structure and they resistant to wear, corrosion or high temperature conditions. For these good properties, hard coating techniques are an important issue for scientists and industrialists.

Niobium nitride is known with good mechanical properties, corrosion resistance and superconducting properties. Ti-Al-N and Cr-Al-N are searched by researchers for many years. Addition of aluminum is improved hardness and thermal stability of Ti-N and Cr-N coatings. For Nb-N coatings, this technique has researched in a few years. Mechanical properties, corrosion resistance and thermal stability of Nb-N coatings can improve with addition of aluminum. There are only a few working for this issue.

In this investigation, firstly nitriding process was realized on the steel substrates then Nb-Al-N coating was obtained by thermo reactive diffusion process at 1000 °C for 1, 2 and 4 hours and different aluminum content in the bed composition was changed and coating properties realized on the steel samples according to aluminum content in the bed composition was investigated. Nb-Al-N coatings investigated by optical microscopy, scanning electron microscopy (SEM), elemental dispersive analysis (EDS) and atomic force microscopy (AFM). Phase analyses of coatings are investigated by x-ray diffraction analysis. Hardness was measured by knoop indentation test. Wear tests of Nb-N and Nb-Al-N were performed at 180 m distance by 2.5N, 5N and 10N loads at the sliding speeds of 0.1m/s, 0.3m/s and 0.5m/s. Wear properties of the coatings were investigated by optical microscopy, SEM and 3D profilometer.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Çeliklerin performansını artırmak için sadece yüzeye yönelik olarak yapılan çalışmalar yüzey işlemleri olarak bilinmektedir. Bu işlemlerin bir kısmı yüzeyde herhangi bir kimyasal bileşim değişimi meydana getirmeden uygulanmaktadır (alevle ve indüksiyonla yüzey sertleştirme). Bir kısmı ise ya yüzey bileşimini değiştirir (karbürleme, nitrürleme vb.) veya yüzeyde farklı bir tabaka oluşturur (silisyumlama, kromlama, vanadyumlama, niyobyumlama titanyumlama vb.). Yüzeyde bileşim değişmesine sebep olan yüzey işlemleri, genellikle ince bir yüzey tabakası oluşumuna yol açmaktadır. Yüzey işlemleri daha ucuz ve daha kolay üretilebilen altlık malzemesinin yüzeyini çeşitli işlemlerde değiştirerek, istenilen özellikte malzeme elde edilmesini ve bunu çok amaçlı kullanarak ekonomik fayda kazanılmasını da sağlamaktadır. Bu işlemlerin en önemli avantajı, ucuz bir altlık malzeme yüzeyine yapılacak işlemlerle yüzey-ortam etkileşmesine dayanan optik, manyetik, elektrik, termal, kimyasal, korozyon, oksidasyon, tribolojik vb. mühendislik özelliklerinin istenilen şekilde değiştirilebilmesidir.

Genellikle çelik malzemeler; mekanik etkileşimler sonucu aşınma, kimyasal reaksiyonlar sonucu korozyon türü hasarlarla servis dışı kalarak ülke ekonomilerinde büyük kayıplara yol açmaktadırlar. Makinelerde çıkan arızaların ve yapı elemanlarının kullanım dışı kalmasının en önemli sebeplerinde birisi aşınmadır. Sürtünme nasıl bir enerji kaybı nedeni ise aşınmada tekrar geriye kazanılamayan bir madde kaybı sebebidir. Aşınma ve korozyonun neden olduğu hasarın, ülke ekonomilerine bu denli yük getirmesi bilimsel ve endüstriyel çevreleri harekete geçirmiş ve daha dayanıklı malzemeler arayışına itmiştir. Bu amaçla endüstride yoğun olarak kullanılan çelik malzemeler üzerine, difüzyon, kimyasal ve fiziksel çökertme ile kaplama teknikleri geliştirilerek 2-10 µm kalınlığında sert tabakalar elde edilmiştir. Seramik karakterli olan bu tabakalar, aşınmaya, korozyona ve yüksek

sıcaklık uygulamalarına karşı oldukça dirençlidir. Bundan dolayı sert yüzey kaplama yöntemleri hem bilimsel hem de endüstriyel çevrelerde önem kazanmıştır [1].

Termo reaktif difüzyon (TRD) yöntemi, çelik malzemelerin yüzeyinde karbür, nitrür ve karbo-nitrür gibi sert ve aşınma direnci yüksek olan tabakaların oluşturulduğu bir metottur. TRD yönteminde çelik altlık malzemedeki karbon ve azot, vanadyum, niyobyum, tantal, krom, molibden veya tungsten gibi karbür veya nitrür oluşturu elementlerle birlikte bir tabaka oluşturmak için difüze olur. Difüze olan karbon ve azot biriken tabakada karbür ve nitrür oluşturu elementlerle altlık malzeme yüzeyinde metalurjik olarak bağlanmış olan karbür ve nitrür kaplamaları yoğun bir şekilde oluşturacak şekilde reaksiyona girer. TRD yöntemi geleneksel yüzey sertleştirme metotlarına benzemez. Diğer bazı konvansiyonel yüzey işleme yöntemleriyle elde edilmeyecek kadar yüksek abrasiv, adhesiv, fretting aşınma türlerine karşı dirençli, korozyon direnci ve oksidasyon direncinin sağlanabildiği nitrür kaplamaların üretilmesi sebebiyle, TRD yöntemi takımlar için kullanışlı olmaktadır. Çünkü geleneksel yüzey sertleştirme metotlarında karbon ve azot, altlık malzemenin yüzeyini sertleştirmek amacıyla dışarıdan difüze edilmektedir. TRD yöntemi konvansiyonel difüzyon metotlarına benzememesine rağmen, TRD yönteminde de altlık malzemenin yüzeyinde kaplama tabakasının oluşumu gerçekleşmektedir. TRD yönteminde elde edilen kaplama tabaka kalınlıklarına CVD veya PVD teknikleri kullanılarak ulaşılabilmektedir. Kıyaslanacak olursa, CVD kaplamaların kalınlıkları (2,5 µm), TRD yönteminde elde edilen kaplamaların kalınlıklarına yakındır.

Niyobyum nitrür, sahip olduğu üstün mekanik özellikler ve korozyon dayanımı, süper iletkenlik geçiş sıcaklığı değerleri ile araştırmacıların dikkatini çeken bir malzeme olmuştur.

Son 15 yıllık zaman içerisinde geçiş metallerinin nitrür bileşiklerine silisyum, alüminyum veya krom ilavesi ile özelliklerinin geliştirilmesi araştırılmıştır. Yapılan çalışmalar Ti-Al-N ve Cr-Al-N üzerinde yoğunlaşmış olup, Ti-N ve Cr-N'e göre sertlik ve ısıl kararlılıkta artış sağlanmıştır. Niyobyum nitrüre alüminyum ilavesi son yıllarda araştırma konusu olmaya başlamıştır. Yapılan alüminyum ilavesinin metalik

bağ yapısını kovalent bağ ile değiştirerek mekanik özellikler, korozyon dayanımı ve ısıl kararlılığı arttırması beklenmektedir. Ayrıca değişen bağ yapısının iletkenlik ve optik özellikler üzerinde de değişimlerin olması beklenmektedir.

Literatürde niyobyum alüminyum nitrür ile ilgili yapılmış olan çalışma sayısı sınırlıdır. Bu amaçla, yapılan bu çalışmada, AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çelik malzemelerin yüzeyinde termo reaktif difüzyon yöntemi kullanılarak niyobyum alüminyum nitrür (Nb-Al-N) tabakasının elde edilmesinin mümkün olup olmadığı araştırılmıştır. Çalışmada çelik altlıklar üzerine ilk aşamada nitrür tabakası oluşturulması ve daha sonra TRD yöntemiyle 1000°C sıcaklıkta 1,2 ve 4 saat süreyle farklı Al bileşimlerinde hazırlanan ortamlarda yüzeyde Nb-Al-N esaslı kaplamaların oluşturulması gerçekleştirilmiştir. Çelik yüzeyinde oluşturulan Nb-Al-N tabakalarının geniş bir spektrumda özellikleri araştırılmıştır. Bu amaçla optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ile mikro yapı incelemeleri ve elementel analizler, x-ışınları difraksiyon analizi ile faz analizleri gerçekleştirilmiştir. Aynı şekilde tabakaların mekanik özellikleri; mikro sertlik ölçümleri ve aşınma deneyleri ile belirlenmiştir.

BÖLÜM 2. ÇELİKLER HAKKINDA GENEL BİLGİLER

2.1. Giriş

Demir yer kabuğunda oksijen, silisyum ve alüminyumdan sonra en çok bulunan elementtir. Doğada demir; hematit ve manyetit cevherleri halinde, bunlara göre daha az miktarda ise siderit ve limonit cevherleri halinde bulunmaktadır [2]. Eski çağlardan beri kullanılmakta olan demirin nasıl bulunduğu hakkında bilgi yoktur. Demir elementinin atom numarası 26, atomik ağırlığı 55,845; ergime sıcaklığı 1538°C, kaynama sıcaklığı 2861°C ve yoğunluğu 7874 kg.m⁻³'tür. Demir kimyasal olarak oldukça reaktif olması ve hızlı bir şekilde korozyona uğraması nedeniyle doğada nadiren nabit halde bulunur [3].

Demir-karbon denge diyagramından hareketle, diyagramın %2,11'e kadar karbon içeren kısmı çelik bölgesi, 2,12 ile 6,67 %C içeren bölgesi ise dökme demir bölgesi olarak kabul edilmektedir.

Çeliği aşağıda verilen avantajları günümüzde en fazla kullanılan mühendislik malzemesi haline getirmiştir:

- a. Demir elementinin doğada fazla miktarda bulunması,
- b. Üretiminin diğer metallerin üretim maliyetleri ile kıyaslandığında daha ucuz olması,
- c. 1538 °C gibi yüksek ergime sıcaklığına sahip olması,
- d. Birçok alaşım ile kıyaslandığında üstün mekanik özelliklere sahip olması,
- e. Sahip olduğu mekanik özelliklerin çeşitli mukavemet artırıcı işlemler ile geliştirilmesi [4].

2.2. Dünya’da ve Türkiye’de Demir Çelik Sektörü

Tablo 2.1.’de Dünya’da son iki yıla ait demir çelik üretim miktarları verilmiştir. Dünya demir-çelik üretimi sektör verileri incelendiğinde, 2012 Temmuz ayına kadar dünyadaki toplam 62 üretici ülkede toplam 895 milyon ton ham çelik üretimi gerçekleşmiştir. En fazla üretim Asya kıtasına yapılırken, Avrupa Birliği, Kuzey Amerika ve Bağımsız Devletler Topluluğu bölgeleri sırasıyla Asya’yı takip etmiştir.

Tablo 2.1. Dünya ham çelik üretimi(bin ton)[5]

	2011-7 ay	2012-7 ay	% Değişim
AB(Toplam 27 Ülke)	108.145	103.212	-4,56
Diğer Avrupa Ülkeleri	21.171	22.337	5,51
B.D.T.	65.933	66.178	0,37
Kuzey Amerika	69.104	73.305	6,08
Güney Amerika	28.738	27.770	-3,37
Asya	570.065	579.149	1,59
Okyanusya	4.623	3.353	-27,47
Dünya (62 Ülke)	887.887	895.398	0,85

Tablo 2.2.’de verilen Türkiye’nin 2012 yılı Temmuz ayı sonuna kadar üretim verileri incelendiğinde, 21,1 milyon ton ham çelik üretimi yapıldığı görülmektedir. Bir önceki yılın üretim verileri ile karşılaştırıldığında 2011 yılı Temmuz ayı sonuna kadar 19,3 milyon ton ham çelik üretimi yapılmıştır. İki yılın üretim miktarları karşılaştırıldığında, ham çelik üretiminde bir önceki yıla göre %9,3 oranında bir artış görülmektedir. Bu üretim performansı ile ülkemiz dünya demir çelik üretici ülkeleri arasında 8. sırada Avrupa’da ise Almanya’nın ardından 2. sırada kendine yer bulmuştur [5].

Tablo 2.2. Türk demir çelik sektörünün yıllara göre ham çelik üretimi(milyon ton)[5]

2005	2007	2008	2009	2010	2011	2012-7
20,9	25,8	26,8	25,3	29,0	34,1	21,1

2.3. Çeliklerin Sınıflandırılması

Çeliklerin özellikleri, üretim yöntemleri gibi kriterleri göz önüne alınarak değişik sınıflandırma biçimleri geliştirilmiştir. Bunlar:

- a. Kimyasal kompozisyonuna göre sınıflandırma: örneğin; karbon, düşük alaşımli, alaşımli veya paslanmaz çelikler.
- b. Üretim yöntemine göre: örneğin; asidik veya bazik Siemens-Martin ocağı, Elektrik ark ocağı.
- c. Nihai şekil verme işlemi: örneğin sıcak haddeleme veya soğuk haddeleme.
- d. Ürünlerin şekli: örneğin; levha, şerit, lama, profil vb.,
- e. Kullanım yerine göre: Yapısal çelikler, yay çeliği veya yüksek mukavemetli çelikler.
- f. Oksijen giderme yöntemine göre: Söndürülmüş, yarı söndürülmüş, kapaklı, sakinleştirilmiş çelikler.
- g. Mikroyapısına göre: Ferritik, perlitik ve martenzitik çelikler.
- h. ASTM standartlarına ele alındığında, mukavemet değerine göre sınıflandırılma,
- i. Görmüş olduğu ısıl işlemlere göre: Suda soğutulmuş, tavllanmış, menevişlenmiş veya termomekanik işlemeye tabii tutulmuş vb.,
- j. Uluslararası veya ulusal çeşitli standartlara göre sınıflandırmadır [6].

2.4. Kimyasal Kompozisyonuna Göre Çeliklerin Sınıflandırılması

2.4.1. Alaşımısız karbonlu çelikler

Alaşımısız karbonlu çelikler karbona ilaveten 1,65%'e kadar mangan, 0,05%'e kadar kükürt, 0,04%'e kadar fosfor, 0,60%'e kadar silisyum ve 0,60%'e kadar bakır içerirler. Çeliklerde karbon içeriği, mekanik özellikler üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Karbon ilavesi çeliklerde sertlik ve mukavemetin artışı sağlamaktadır, bu nedenle alaşımısız karbonlu çelikler karbon içeriklerine göre düşük karbonlu, orta karbonlu, yüksek karbonlu ve ultra-yüksek karbonlu çelikler olarak sınıflandırılırlar [6].

Düşük karbonlu çelikler 0,25%'e kadar karbon içerirler. Bu çelikler çoğunlukla yassı haddelenmiş mamul (sac veya şerit) şeklindedir. Genellikle soğuk veya kritik tavlama sıcaklığı altındaki sıcaklıklarda son haddeleme işlemine tabii tutulurlar. Karbon içerikleri yüksek şekil verilebilirlik ve yüksek derin çekilebilirlik elde etmek

amacıyla oldukça düşük tutulur. En fazla 0,1 %C ve 0,40 %Mn içerirler. Bu tür çelikler genellikle otomobil gövde panellerinde, kalaylı saclarda, makinelerde ve tel mamullerde kullanılır [7].

0,1-0,25 %C içeren çelikler ısıtılma işlemi için uygun değildir. Bu çeliklerde yüzeye karbon ve azot yayındırılarak yüzey sertleştirme işlemi yapılabilir [4].

Orta karbonlu çelikler 0,30-0,55%C ve 0,60-1,65%Mn içeren, sahip oldukları mekanik özellikleri sayesinde yaygın bir kullanım alanına sahip olan çeliklerdir. Bu çeliklerde tavlama, menevişleme veya deformasyon sertleşmesi ile mekanik özellikler geliştirilebilir. Bu gruptaki çeliklerden nispeten daha düşük karbon içerenlerin özelliklerinin tavlama, normalizasyon, menevişleme gibi ısıtılma işlemleri ile kontrolü yaygın kullanımlarında önemli bir etken olmuştur. Yüksek miktarda karbon içerenlerin ise ısıtılma işlemi yapılmaksızın deformasyon sertleşmesi ile mekanik özellikleri iyileştirilebilmekte ve bu halleriyle kullanılmaktadır.

Orta karbonlu çelikler dövme parçaların imalatında yaygın bir kullanıma sahiptir. Otomobillerde krank mili, dişliler, bağlantı rotu gibi motor, transmisyon, süspansiyon parçaları, tren yolu rayları, tren aks ve tekerlekleri, tarım aletleri gibi birçok parçanın imalatında yaygın bir kullanım bulmaktadır.

Yüksek karbonlu alaşımsız çelikler 0,55-1,00%C ve 0,30-0,90%Mn içermektedir. Sahip oldukları yüksek karbon nedeniyle yüksek üretim maliyetine, düşük şekil alabilirliğe, kötü kaynak edilebilirliğe sahiptirler, bundan dolayı alaşımsız orta karbonlu çeliklere göre daha sınırlı bir kullanıma sahiptirler. Yüksek karbonlu çelikler hafif ve ince yaprak yaylar, soğuk sarılmış ağır yayların imalatında, tarım aletlerinde, derin çekme kalıplarında yüksek mukavemetli tellerde, müzik aletlerinde, halatlarda, takımlarda kullanılmaktadır.

2.4.2. Düşük alaşımlı çelikler

Genel olarak 2%'den fazla alaşım elementi içeren çeliklere alaşımlı çelikler adı verilir. Çeliklerde alaşım elementi oranı 50%'ye kadar çıkabilir. Yaygın olarak

kullanılan düşük alaşımlı çelikler tablo 2.3.'te verilmiştir. Alaşım elementleri çeliklere farklı amaçlar için katılabilir. Bunlardan bazıları şunlardır:

- Sertleşebilme kabiliyetini arttırmak,
- Yüksek dayanım sağlarken, sünekliği muhafaza etmek,
- Yüksek ve düşük sıcaklıklarda mekanik özelliklerin korunmasını sağlamak,
- Yüksek sıcaklıkta oksidasyon ve korozyon direnci sağlamak,
- Aşınma ve yorulma özelliklerini iyileştirmek [7].

Düşük alaşımlı çelikler sade karbonlu çeliklerle kıyaslandığında ilave edilen krom, nikel, molibden gibi elementlerin etkisiyle daha iyi mekanik özelliklere sahip olur. Birçok düşük alaşımlı çeliğe alaşım elementi ilave edilmesinin amacı sertleşebilirliği arttırmak ve ısı işlem sonrası mukavemet ve tokluk değerlerini iyileştirmektir. Bazı durumlarda ise çevresel etkiler nedeniyle yapıda bozulmalara engel olmak amacıyla alaşım elementleri ilave edilmektedir.

Tablo 2.3. Standart düşük alaşımlı çeliklerin tipleri [7]

AISI/SAE Kodu	Esas Alaşım Elementi	Esas ve Diğer Alaşım Elementleri (%)
13xx	Mn	1,75 %Mn
40xx	Mo	0,20-0,25 veya 0,25 %Mo ve 0,042%S
41xx	Cr+Mo	0,50, 0,80 veya 0,95 %Cr; 0,12, 0,20 veya 0,30 %Mo
43xx	Ni	1,83 %Ni, 0,50 veya 0,80 %Cr, %0,25 Mo
44xx	Mo	%0,53 Mo
46xx	Ni+Mo	0,85 %Ni, 1,83 %Mo, 0,20 veya 0,25 %Mo
47xx	Ni Cr Mo	1,05 %Ni, 0,45 %Cr, 0,20 veya 0,35 %Mo
48xx	Ni	3,5 %Ni, 0,25 %Mo
50xx	Cr	0,40 %Cr
51xx	Cr	0,80, 0,88, 0,93, 0,95 veya 1,00 %Cr
51xxx	Cr	1,03 %Cr
51xxx	Cr	1,45 %Cr
61xx	Cr+V	0,6 veya 0,95 %Cr, 0,13 %V
86xx	Ni Cr Mo	0,55 %Ni, 0,50%Cr, 0,20 %Mo
87xx		0,55 %Ni, 0,50%Cr, 0,25 %Mo
88xx		0,55 %Ni, 0,50%Cr, 0,35 %Mo
92xx	Si Si+Cr	2,00 %Si veya 1,40%Si, 0,70 %Cr
50Bxx	CrB	0,28 veya 0,50 %Cr
50Bxx	CrB	0,80 %Cr
81 Bxx	NiB	0,30 %Ni, 0,45 %Cr, 0,12 %Mo
94 Bxx	NiB	0,30 %Ni, 0,40 %Cr, 0,12 %Mo

Not: B borlu çeliği temsil etmektedir.

Düşük alaşımlı çelikleri 3 ana gruba ayırmak mümkündür:

- a. Kimyasal kompozisyonuna göre: nikel çelikleri, nikel krom çelikleri, molibden çelikleri, krom molibden çelikleri vb.
- b. Gördükleri ısıl işlem türüne göre: sertleştirilmiş ve menevişlenmiş, normalizasyon tavı yapılmış ve menevişlenmiş, tavllanmış vb.
- c. Kaynak edilebilirliklerine göre.

Düşük alaşımlı çeliklerin kimyasal kompozisyonda çeşitliliğinin fazla olması ve bazılarının birden fazla ısıl işlem grubuna uyması nedeniyle farklı bir sınıflandırma daha yapılarak 4 gruba ayrılmışlardır:

- a. Sertleştirilmiş ve menevişlenmiş düşük karbonlu çelikler,
- b. Orta karbonlu yüksek mukavemetli çelikler,
- c. Dişli çelikleri,
- d. Isıya dayanımlı Cr-Mo çelikleri.

Düşük karbonlu sertleştirilmiş ve menevişlenmiş çelikler yüksek akma dayanımına sahip olan (en az 690 MPa) çeliklerdir. Yüksek akma dayanımının yanı sıra yüksek çentik darbe tokluğu, süneklik, korozyon dayanımı ve kaynak edilebilirliğe sahiptirler. Bu çeliklerin genel kullanım alanları basınçlı kaplar, sondaj ve madencilik aletleri, çelik yapılarıdır. Ayrıca soğuk şekillendirilmiş bağlantı elemanları ve burçlar içinde sahip olduğu üstün özellikler sebebiyle kullanılmaktadır.

Orta karbonlu yüksek mukavemetli çelikler en az 1380 MPa akma dayanımı değerine sahip olan çeliklerdir. Kullanım alanları; dişliler, uçak iniş takımları, uçak gövdeleri, basınçlı kaplar, cıvatalar, vidalar, yaylar, akslar, bağlantı parçaları, makine parçaları, bağlantı rotları, krank milleri, piston rotları, petrol sondaj matkapları, yüksek basınç boruları, flanşlar, ingiliz anahtarları, dişli çarklar vb. yerlerdir.

Rulman çelikleri rulman makara ve bilyeleri için kullanılan düşük karbonlu yüzey sertleştirmeye uygun çelikler (0,1-0,2 %C), yüksek karbonlu (~1 %C) direk

sertleştirilebilen çelikler veya yüzeyden indüksiyonla sertleştirilmeye uygun çeliklerden oluşan gruptur.

Isıya dayanıklı krom molibden çelikleri 0,5-9 %Cr, 0,5-1 %Mo ve 0,20'den daha az %C içerirler. Bu çelikler; sertleştirilmiş ve menevişlenmiş, normalizasyon tavı uygulanmış ve menevişlenmiş veya tavllanmış olarak kullanılmaktadır. Cr-Mo çelikleri; petrol rafinerilerinde, petrol ve gaz sanayinde, kimya sanayinde, elektrik iletim elemanlarında, fosil yakıtla veya nükleer enerji ile çalışan santrallerde, borularda, ısı eşanjörlerinde, kızdırıcı borularda ve basınçlı kaplarda kullanılabilir [4].

2.4.3. Yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çelikler

Yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çelikler (HSLA çelikleri) düşük miktarda karbon, 1,8'e kadar %Mn, düşük miktarda alüminyum, mukavemet, tokluk, şekil verilebilirlik özelliklerini geliştirmek ve korozyon dayanımı özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla niyobyum, vanadyum veya titanyum gibi mikro alaşım elementlerinden bir veya bir kaçını içerir.

HSLA çelikleri sac, levha, şerit, bar, yapısal kesitler ve dövülmüş bar ürünlerde kullanım alanı bulmaktadır. Petrol ve gaz borularında, otomotiv sanayinde, emaye kaplamalarda, taşımacılıkta (demiryolu taşımacılığı, tırlar, kamyonlar vb.), tarım sektöründe, basınçlı kaplarda, off-shore yapılarda ve platformlarda, vinçlerde, köprülerde, yapılarda, madencilik aletlerinde, gemilerde, güç iletim hatlarında, kazı aletlerinde, televizyon kulelerinde, elektrik direklerinde, su oluklarında, çelik kazıklarda vb. HSLA çelikleri yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.4.4. Düşük karbonlu ultra yüksek mukavemetli çelikler

Düşük alaşımlı ultra yüksek mukavemetli çelikler en az 700 MPa çekme dayanımına sahiptir. Son on yıllık süreçte otomotiv sanayinde kullanımında artış görülen bu çelikler kapı kirişleri, tampon takviye kirişleri, yan destek demirleri, koltuklar ve

araç direkleri gibi güvenliğin önemli olduğu nokta ve parçalarda kullanım alanı bulmaktadır.

Bu çeliklerin istenilen özelliklerde ve yapıda elde edilmesi için ısıtma sonrası hızlı soğutma işlemi yapılarak, ferritik, ferritik - martenzitik (çift fazlı), çok fazlı yapılar elde edilmesi sağlanır. Üretimleri sonrası kaplama yapılarak veya kaplamasız olarak kullanılabilirler.

2.4.5. Takım çelikleri

Takım çelikleri diğer metallerin şekillendirilmesinde, kesilmesinde, dövülmesinde, basınçlı dökümünde; kâğıt, odun, kaya beton gibi madde ve malzemelerin kesilmesi ve şekillendirilmesinde kullanılmaktadır. Bu çelikler yüksek aşınmanın olduğu ve zorlu çalışma koşullarının olduğu ortamlar için tasarlanmıştır. Kimyasal kompozisyon bakımından sade karbonlu 1,2 %C içeren türlerinden 50 %'ye varan alaşım elementi içerenlere kadar çok çeşitli türleri vardır. Bazı yüksek karbonlu ve düşük karbonlu takım çeliklerinde karbon oranı geniş bir aralıkta değişmekte iken yüksek alaşımlı takım çeliklerinde karbon oranı nispeten daha dar bir aralıkta değişmektedir. Takım çeliklerinin sınıflandırılmasında 3 ana kriter öne çıkmaktadır. Bunlar; kimyasal kompozisyon, mekanik özellikler ve ısıtma koşullarıdır.

ASTM standartlarına göre takım çelikleri 7 ana grupta sınıflandırılmaktadır Bunlar:

2.4.1.1. Yüksek hız çelikleri

Bu çelikler yüksek kesme hızları ve talaşlı imalat koşullarında çalışmaya dayanıklı çeliklerdir. Yüksek hız takım çelikleri ısıtma sonrası sahip oldukları yüksek sertlik ve aşınma dayanımlarını yüksek sıcaklıklarda ve yüksek kesme hızlarında korurlar. Yüksek hız çelikleri için akkor halinde veya yüksek sıcaklıklardaki sertlik değeri önemlidir.

Yüksek hız çelikleri molibden tipi (M sınıfı) ve volfram tipi (T sınıfı) olarak ikiye ayrılır. M tipi yüksek hız çelikleri alaşım elementi olarak Mo, W, Cr, V, Co ve C

içerirken T tipi W, Cr, V, Co ve C alaşım elementleri içerir. Amerika'da üretilen yüksek hız takım çeliklerinin %95'i M tipidir. En yaygın kullanılan türleri M tipi için M1, M2, M4, M7, M10 ve M42; T tipi için T1 ve T15'tir.

M tipi yüksek hız çeliklerinin T tipine göre en önemli avantajı %40 daha ucuz üretim maliyetine sahip olmasıdır. Ancak dekarbürizasyon riski T tipine oranla M tipinde daha fazladır bu sebeple sıcaklık kontrolü T tipine oranla M tipinde daha önemlidir. Bazı durumlar için tuz banyosu veya yüzey kaplanması dekarbürizasyon riskini azaltır. Mekanik özellikler açısından iki grup kıyaslandığında M tipinin tokluk değeri T tipinden daha iyidir. Ayrıca sertlik değerleri birbiri ile aynıdır.

2.4.1.2. Sıcak iş takım çelikleri(AISI H serisi)

Sıcak iş takım çelikleri 3 ana gruba ayrılır:

- a. Krom esaslılar; H1 den H19'a kadar olanlar,
- b. Volfram esaslılar; H20'den H39'a kadar olanlar,
- c. Molibden esaslılar; H40'dan H59'a kadar olanlar.

Bu çeliklerin sınıflandırılmasında, yapıda bulunan ana alaşım elementi öne çıkar. Bu çeliklerde karbon içerikleri birbirine yakındır ve krom miktarı %3 ile %12,5 arası değişmektedir. En yaygın olarak kullanılanları H11, H12 ve H13'tür. 500 ile 550 °C sıcaklıklar arası 50 HRC'den yüksek sertlik değerine sahiptirler. Genellikle yüksek sıcaklıklarda yapılan şekil verme işlemlerinde kullanılırlar. Alüminyum ve magnezyumun basınçlı döküm ve ekstrüzyon işlemleri, plastik enjeksiyon kalıplama, sıkıştırma ve transfer kalıpları en yaygın kullanımının olduğu yerlerdir.

2.4.1.3. Soğuk iş takım çelikleri

Soğuk iş takım çelikleri 3 gruba ayrılır:

- a. Orta miktarda alaşım elementi içeren, havada soğutulmuş takım çelikleri (AISI A serisi)

- b. Yüksek karbon ve krom içeren takım çelikleri (AISI D serisi)
- c. Yağda sertleştirilmiş takım çelikleri (AISI O serisi)

AISI A serisi takım çelikleri yüksek sertleşebilirliğe sahiptir ve bunları havada sertleştirmek kolaydır. Havada sertleştirme ve menevişleme işlemleri, şekil verme, çekme ve kesme kalıpları gibi, yüksek tokluğun yanı sıra iyi aşınma dayanımı istendiği durumlarda tercih edilir. En fazla kullanılan tipi A2'dir. AISI D serisi takım çelikleri yüksek aşınma dayanımları ve zor deforme olma özellikleriyle öne çıkan çeliklerdir. Bu özellikleriyle soğuk şekil verme işlemlerinde yaygınlıkla kullanılmaktadır. Soğuk şekil verme kalıpları, çekme ve levha şekillendirme kalıpları, hadde merdaneleri, kesme ve delme kalıpları vb. parçalarda yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Soğuk iş takım çelikleri arasında en yaygın olarak kullanılanları AISI D serisidir. AISI O serisi daha fazla kesme, darplama, çekme ve şekillendirme kalıplarında kullanılmaktadır. Ayrıca zımbalar, kesme bıçakları, torna aynaları ve ölçü aletlerinde yağda sertleştirme ve menevişleme işlemi sonrası kullanılmaktadır. Aralarında O1 en yaygın olarak kullanılanlarıdır.

2.4.1.4. Şoklara dirençli takım çelikleri (AISI S serisi)

Bu çelikler vuruşlardan kaynaklı tekrarlanan gerilmelere karşı dayanıklı olarak çekiçlerde, keskilerde, perçin takımlarında, zımbalarda, matkaplarda, ıstampalarda ve kesme bıçaklarında sertleştirilmiş ve menevişlenmiş olarak kullanılmaktadır. Bu çeliklerde aranan en önemli özellik tokluktur. Sertlik ikinci sırada önemlidir. S5 ve S7 e yaygın olarak kullanılandır.

2.4.1.5. Düşük alaşımlı özel amaçlar için kullanılan takım çelikleri (AISI L serisi)

T tipi yüksek hız çelikleri ile aynı kimyasal kompozisyona sahiptir. İçerdiği yüksek krom ve diğer alaşımları iyi sertleşebilirlik ve aşınma dayanımı sağlamaktadır. L6 ve düşük karbonlu olan L2 tipi en yaygın olarak kullanılanlardır.

2.4.1.6. Kalıp çelikleri (AISI P serisi)

Düşük sıcaklıkta çalışan basınçlı döküm kalıpları, plastikler için; enjeksiyon kalıpları ve sıkıştırma kalıplarında kullanılmaktadırlar.

2.4.1.7. Suda sertleştirilen takım çelikleri (AISI W serisi)

W1 en yaygın kullanılanıdır. Kesme takımlarında, zımbalarda, kalıplarda, eğerlerde, kılavuzlarda, matkaplarda, usturalarda, ağaç işleme takımlarında ve cerrahi aletlerde sertleştirilmiş ve menevişlenmiş olarak kullanılmaktadır.

2.4.6. Paslanmaz çelikler

Paslanmaz çelikler en az 10,5 %Cr ve istenilen östenitik, ferritik, martenzitik, çift fazlı (ferritik+ostenitik) ve çökeltme sertleşmesi yapılabilen türlerine göre diğer alaşım elementlerini içeren yüksek alaşımli çeliklerdir. 3 sayıdan oluşan bir numaralandırma ile AISI bu çelikleri isimlendirmiştir.

2.4.7. Maraging çelikleri

Maraging çelikleri düşük karbonlu yüksek mukavemetli çeliklerin özel bir grubudur. Sahip oldukları yüksek mukavemet, içerdikleri karbon miktarına değil yapıdaki intermetalik fazlara bağlıdır. Maraging çelikleri genellikle 17-19 %Ni, 8-12 %Co ve %5'e kadar Mo ve 0,2-1,6 %Ti içermektedir. Bu çeliklerde yüksek mukavemet elde edilmesi martenzitik dönüşüm ve daha sonrasında yapılan çökeltme sertleşmesi ile olmaktadır [7].

BÖLÜM 3. NİTRÜRLER

3.1. Giriş

Mühendislik alanında metallerin saf halde kullanımı oldukça nadiren olmaktadır. Genellikle metaller çeşitli işlemler vasıtası ile mekanik, fiziksel veya kimyasal özellikleri geliştirilerek kullanılmaktadır. Malzeme yüzeyine karbon veya azot difüzyonu ile yüzey özelliklerinin geliştirilmesi bu yöntemlerden birisidir.

Şekil 3.1.'de periyodik tablo görülmektedir [9]. Tablodaki 4 ile 6. gruplar arasında yer alan elementler geçiş metalleri olarak adlandırılmaktadır. Geçiş metallerinin karbür ve nitrür yaptıkları bileşikler, sahip olduğu özellikleri ile teknolojik birçok alanda kullanılmaktadır. Bu malzemeler, sahip oldukları yüksek mukavemet ve sertlik değerleri, üstün elektriksel, manyetik ve optik özellikler sayesinde matkap uçları, roket nozülleri, makine imalatında kullanılan takımlar, difüzyon bariyerleri, elektrik kontak malzemeleri, optik kaplamalar gibi yerlerde kullanılmaktadır [10].

3.2. Nitrürlerin Sınıflandırılması

Nitrürler elektron yapılarına ve bağ özelliklerine göre 5 ana gruba ayrılmaktadır.

Bunlar;

- a. Arayer nitrürleri,
- b. Kovalent nitrürler,
- c. Geçiş nitrürleri,
- d. Sodyum klorür benzeri nitrürler,
- e. Uçucu (molekül biçiminde) nitrürlerdir.

Tablo 3.1. Periyodik tablo [9]

hydrogen 1 H 1.0079																	helium 2 He 4.0026	
lithium 3 Li 6.941	beryllium 4 Be 9.0122											boron 5 B 10.811	carbon 6 C 12.011	nitrogen 7 N 14.007	oxygen 8 O 15.999	fluorine 9 F 18.998	neon 10 Ne 20.180	
sodium 11 Na 22.990	magnesium 12 Mg 24.305											aluminum 13 Al 26.982	silicon 14 Si 28.086	phosphorus 15 P 30.974	sulfur 16 S 32.065	chlorine 17 Cl 35.453	argon 18 Ar 39.948	
potassium 19 K 39.098	calcium 20 Ca 40.078	scandium 21 Sc 44.956	titanium 22 Ti 47.867	vanadium 23 V 50.942	chromium 24 Cr 51.996	manganese 25 Mn 54.938	iron 26 Fe 55.845	cobalt 27 Co 58.933	nickel 28 Ni 58.693	copper 29 Cu 63.546	zinc 30 Zn 65.39	gallium 31 Ga 69.723	germanium 32 Ge 72.61	arsenic 33 As 74.922	selenium 34 Se 78.96	bromine 35 Br 79.904	krypton 36 Kr 83.80	
rubidium 37 Rb 85.468	strontium 38 Sr 87.62	yttrium 39 Y 88.906	zirconium 40 Zr 91.224	niobium 41 Nb 92.906	niobium 42 Mo 95.94	technetium 43 Tc [98]	ruthenium 44 Ru 101.07	rhodium 45 Rh 101.07	palladium 46 Pd 106.42	silver 47 Ag 107.87	cadmium 48 Cd 112.41	indium 49 In 114.82	tin 50 Sn 118.71	antimony 51 Sb 121.76	tellurium 52 Te 127.60	iodine 53 I 126.90	xenon 54 Xe 131.29	
cesium 55 Cs 132.91	barium 56 Ba 137.33	57-70 * lanthanum 57 La 138.91	lutetium 71 Lu 174.97	hafnium 72 Hf 178.49	tantalum 73 Ta 180.95	tungsten 74 W 183.84	rhenium 75 Re 186.21	osmium 76 Os 190.23	iridium 77 Ir 192.22	platinum 78 Pt 195.08	gold 79 Au 196.97	mercury 80 Hg 200.59	thallium 81 Tl 204.38	lead 82 Pb 207.2	bismuth 83 Bi 208.98	polonium 84 Po [209]	astatine 85 At [210]	radon 86 Rn [222]
francium 87 Fr [223]	radium 88 Ra [226]	89-102 ** actinium 89 Ac [227]	lawrencium 103 Lr [260]	rutherfordium 104 Rf [261]	dubnium 105 Db [262]	seaborgium 106 Sg [263]	bohrium 107 Bh [264]	hassium 108 Hs [265]	meitnerium 109 Mt [266]	unnilium 110 Uun [271]	ununium 111 Uuu [272]	ununbium 112 Uub [273]	ununquadium 114 Uuq [288]					

* Lanthanide series

lanthanum 57 La 138.91	cerium 58 Ce 140.12	praseodymium 59 Pr 140.91	neodymium 60 Nd 144.24	promethium 61 Pm [145]	samarium 62 Sm 150.36	europium 63 Eu 151.96	gadolinium 64 Gd 157.25	terbium 65 Tb 158.93	dysprosium 66 Dy 162.50	holmium 67 Ho 164.93	erbium 68 Er 167.26	thulium 69 Tm 168.93	ytterbium 70 Yb 173.04
actinium 89 Ac [227]	thorium 90 Th 232.04	protactinium 91 Pa 231.04	uranium 92 U 238.03	neptunium 93 Np [237]	plutonium 94 Pu [244]	americium 95 Am [243]	curium 96 Cm [247]	berkelium 97 Bk [247]	californium 98 Cf [251]	einsteinium 99 Es [252]	fermium 100 Fm [257]	mendelevium 101 Md [258]	nobelium 102 No [259]

** Actinide series

3.3. Nitrür Oluşumunu Etkileyen Faktörler

Nitrürlerin oluşumunu etkileyen faktörleri 3 grupta toplamak mümkündür. Bunlar;

- Bileşimde bulunan elementlerin elektronegatiflikleri,
- Atomların çapları,
- Atomların bağ özellikleridir.

3.3.1. Nitrür oluşumu ve elektronegative

Azot, oksijen ve flor dışındaki elementlerden daha yüksek elektronegativiteye sahiptir. Azotla diğer elementlerin elektronegativiteleri arasındaki fark nitrürlerin yapısında ve yapıya ait bağ yapısında büyük öneme sahiptir.

Arayer nitrürleri için elektronegativitedeki farklılık diğer nitrür gruplarına göre daha fazladır (Ti-N:1.5, V-N:1.4, Zr-N:1.6, Hf-N:1.7, Ta-N:1.5). Kovalent nitrürler için bu değerler ise B-N:1.0, Al-N:1.5, Si-N:1,2 olmaktadır.

Tablo 3.2. Azot ve bazı elementlerin yaklaşık atom çapları ve nitrür türü [10]

Element	Atom Numarası	Atom Çapı mm	Nitrür Türü
Bor	5	0,088	Kovalent
Karbon	6	0,078	
Azot	7	0,074	
Oksijen	8	0,066	
Alüminyum	13	0,126	Kovalent
Silisyum	14	0,117	Kovalent
Titanyum	22	0,1467	Arayer
Vanadyum	23	0,1338	Arayer
Krom	24	0,1267	Geçiş
Mangan	25	0,1261	Geçiş
Demir	26	0,1260	Geçiş
Kobalt	27	0,1252	Geçiş
Nikel	28	0,1244	Geçiş
Zirkonyum	40	0,1597	Arayer
Niyobyum	41	0,1456	Arayer
Molibden	42	0,1386	Arayer
Hafniyum	72	0,1585	Arayer
Tantal	73	0,1457	Arayer
Volfram	74	0,1394	Arayer

3.3.2. Nitrür şekli ve atom çapı

Azot ve diğer bazı elementlere ait atom çapları Tablo 3.2.'de verilmiştir. Periyodik tabloda 4, 5 ve 6. grupta bulunan elementler kafes sistemlerinde azot atomlarının difüze olabileceği uygun kafes boşlukları bulundurur ve azot atomlarının arayer difüzyonu için uygun bir durum oluşur. Genel olarak atomların çapları arasındaki farklılık büyükse arayer nitrürlerin, eğer bu fark küçükse kovalent nitrürlerin oluşumunun gerçekleşmesi beklenir.

3.3.3. Nitrürlerin elektronsal bağları

Nitrürlerin bağ yapısını kontrol eden üçüncü faktör azot atomları ile diğer atomlar arasında oluşan bağlardır. Refrakter metallerin (Nb, Ta, W, Mo ve Re) nitrürlerinin bağ yapıları iyonik ve kovalent bağların karışımı veya kovalent, iyonik ve metalik bağların karışımı olabilmektedir.

3.4. Nitrürlerin Genel Özellikleri

3.4.1. Nitür türlerine göre genel özellikler

3.4.1.1. Arayer nitrürleri

Azot ile metal atomları arasındaki elektronegativite farkının fazla olması azot atomları metal kafesi içerisine difüzyonuna olanak sağlamaktadır. Ağırlıklı olarak metalik bağlar içerirler ve bununla beraber bazı kovalent ve iyonik bağlar da içerebilmektedir. Bu sebeple bu tür nitrürler yapıdaki metallere yakın ısı ve elektrik iletkenliği değerlerine sahiptir. Ayrıca yüksek ergime sıcaklığı, kimyasal kararlılığa ve yüksek sertlik değerlerine de sahiptir. Ancak sadece 4 ve 5. grup elementlerinin nitrürleri refrakter özelliği sağlamaktadır.

3.4.1.2. Kovalent nitrürler

Kovalent nitrürler, arayer nitrürleri gibi metalik bağlar içermezler. Atom çapları farkı ve elektronegatiflik değerleri farkı küçüktür. Genel olarak kovalent bağ yapısına sahiptir. Bu tür nitrürler 3B grubu elementleri ile silisyum ve fosfor elementlerini kapsar. Bunlardan sadece bor nitrür, silisyum nitrür ve alüminyum nitrür refrakter özelliği sağlamaktadır.

3.4.1.3. Geçiş nitrürleri

Periyodik tabloda 7 ve 8. grupta yer alan elementlerin oluşturmuş olduğu nitrürlerdir. Bu elementlerin oluşturduğu bileşiklerde arayer difüzyonu olmakla beraber, hepsi nitrür oluşturmaz. Kimyasal olarak çözünürlükleri kolaydır ve kimyasal kararlılıkları düşüktür. Bu gruba örnek olarak demir, nikel, kobalt ve mangan nitrürler verilebilir.

3.4.1.4. Sodyum klorür benzeri nitrürler

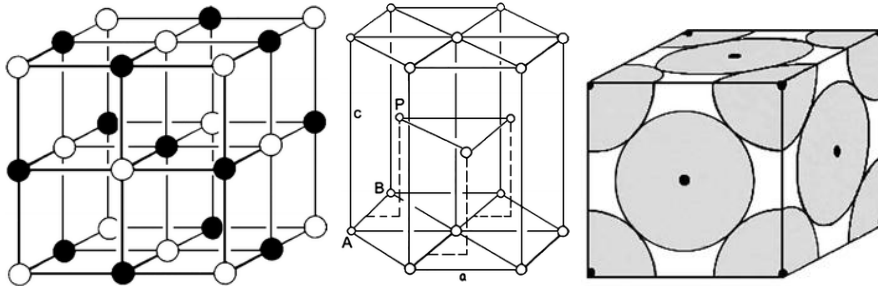
Sodyum klorür benzeri nitrürler azot elementi ile elektronegatifliği azottan yüksek olan alkali metaller, toprak alkali metaller ve periyodik tabloda 3. grupta bulunan metal atomları arasında oluşmaktadır. Azot atomları ile diğer element atomları arasındaki elektronegatiflik farkları büyüktür ve bağ yapısı genellikle iyoniktir. Sodyum klorür benzeri özellikler gösterirler ve karışık bir yapıya sahiptirler.

Sodyum klorür benzeri nitrürlerden bazıları yüksek ergime noktasına (toryum nitrür 2820°C, uranyum nitrür 2800°C, plütonyum nitrür 2550°C, berilyum nitrür 2200°C, baryum nitrür 2000°C) sahip olmasına rağmen, hidroliz reaksiyonlarına karşı hassastır. Su ve nem ile reaksiyona girerek amonyak, metal oksit ve hidroksit oluştururlar. Refrakter özelliğine sahip değildirler. Bazıları endüstriyel olarak alüminyum nitrür, silisyum nitrür ve bor nitrürlerin sinterlenmesinde kullanılmaktadır [11].

3.4.2. Kristal yapısı ve kompozisyon

Nitrürlerin kafes yapısı, periyodik tablo ele alındığında tabloda sola doğru gidildikçe kafes yapısı basitleşip saf metallerinkine benzemekte, aksi yönde ise daha karışık bir hal almaktadır.

Şekil 3.1.'de geçiş metallerinin nitrür bileşiklerine ait kafes yapıları görülmektedir. Nitrürler için sodyum klorür (NaCl) kafes yapısı, hegzagonal sıkı paket ve kübik yüzey kafes sistemleri olmak üzere 3 ana kafes yapısı olduğu söylenebilir.



Şekil 3.1. Grup 4 ile Grup 6 arası geçiş metallerine ait kafes yapıları. (a) Sodyum klorür: ScC, VC, NbC, ScN, TiN, VN, NbN; (b) Hegzagonal Sıkı Paket: β -Mo₂C, β -W₂C (c); Kübik Yüzey Merkez: γ -Mo₂N, β -W₂N [12]

Nitrürlerin kafes yapısının belirlenmesinde yapısal özellikler önemli rol oynamaktadır. Yapısal özelliklerin değişmesi ile metallerin, nitrürlerin kafes yapısında değişimler meydana gelir. Periyodik tabloda saf metallerin, sol tarafta bulunanları kübik hacim merkez, orta kısımdakileri hegzagonal sıkı paket ve sağ kısımdakiler ise kübik yüzey merkezli kafes yapısına sahiptirler. Bu durum Engel-Breuer teorisi ile de ifade edilmiştir. Her bir atom için sp valans elektronları (e/a) oranı 1-1,5 arasındaysa kübik yüzey merkezli kafes yapısı, 1,7-2,1 arasındaysa

hegzagonal sıkı paket kafes yapısı, 2,3-3,0 arasındaysa kübik yüzey merkezli kafes yapısı etkin olur.

Bir önceki paragrafta saf metaller için bahsedilen kafes yapıları 6. Grup metallerinin oluşturduğu M₂N stokiyometrisine sahip nitrürler için de aynıdır. Burada M, metalleri temsil etmektedir. 6. grup metalleri kübik hacim merkezli kafes yapısına sahip olmasına rağmen bu elementlerin karbürleri hegzagonal sıkı paket, nitrürleri ise kübik yüzey merkezli kafes yapısına sahiptir. Kafes yapısındaki bu değişimde karbon ve azottaki valans elektron sayısı ve bu elektron sayısının sp elektron sayısını arttırması etkilidir. 3 ile 5. grup arasındaki metaller incelendiğinde benzer durum söz konusudur. MX stokiyometrisine sahip olan bileşiklerde ametal oranı yüksektir ve hegzagonal sıkı paket yapısına sahip olan saf elementler bileşik oluşturduğunda kübik yüzey merkezli kafes yapısı ortaya çıkar.

Nitrürler ve karbürler için bileşikte birden fazla geçiş metali veya bir geçiş metali bulunduğu durumlarda kafes yapısı daha da karmaşık bir hal alır. Oluşan bu karışık yapıların çoğu iyonik bağ içermektedir ve yarı iletken veya yalıtkan özellik göstermektedir.

3.4.3. Fiziksel özellikler

Nitrürler yüksek sertlik ve mukavemete sahip olan bileşiklerdir. Tablo 3.3.'de saf metallerin, bu metallerin karbür ve nitrürlerine ait ergime sıcaklığı, sertlik ve elastite modülü değerleri verilmiştir. Saf metaller ile kıyaslandığında nitrürlerin değerlerinin saf metallerinkinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu özellikler ile nitrürler metallerden daha ziyade seramiklere benzemektedir. Ergime sıcaklığının yüksek olması bağ kuvvetinin yüksek olduğunun göstergesidir.

3.4.4. Üretim yöntemleri

Nitrürlerin üretimi için birçok yöntem mevcuttur. Bu yöntemleri ürünlerin fiziksel özellikleri ve kimyasal kompozisyonlarına göre 3 gruba ayrılabilir. Bunlar;

- a. Yüzey alanı küçük olan malzemeler için üretim yöntemleri (metal ile azot elementlerinin direkt reaksiyonu, kendinden difüzyon yöntemi, tek kristal üretimi)
- b. Büyük yüzey alanı olan malzemeler için üretim yöntemleri (metal veya bileşiklerin gaz fazında ajanlar ile reaksiyonu sonucu oluşan kaplamalar, metal halojenürlerin çözünmesi, sıcaklık ayarlamalı yöntemler, yüksek yüzey alanı destekli üretim, metal oksit buharı ile katı karbon reaksiyonu sonucu üretim, sıvı faz yöntemleri).
- c. İnce filmler ve kaplamalar: plazma yöntemleri, kimyasal buhar biriktirme, fiziksel buhar biriktirmedir [10].

3.4.4.1. Plazma yöntemleri

Bu yöntemde, yüksek moleküler bir gazın, atmosfer ortamında kararlı bir plazma oluşturması ve plazma nedeniyle bu gazın bileşenlerine ve türevlerine parçalanarak altlık yüzeyinde yoğunlaşması esasına dayanır. Yöntemin uygulama basıncının belirlenmesinde ana kıstas; serbest gaz parçacıklarının altlık ve kaplama ile çarpışma işleminin parçacıkların hacimsel çarpışma prosesinden daha etkin olmasıdır. Genel olarak uygun basınç değerleri 10-1 Pa ve daha düşük basınçlardır. Bu yöntem geliştirildiği günden bugüne kadar genel olarak iyon destekli kaplamaların (i-C) üretilmesinde kullanılmıştır. Bu tür kaplamalara hidrojenli amorf kaplamalar (a-C:H) adı da verilmektedir. Plazma yöntemlerini kendi arasında 4 gruba ayırmak mümkündür:

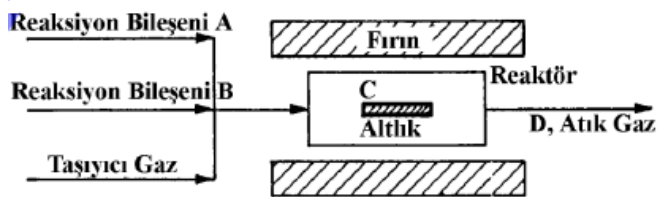
- a. DC plazma tekniği
- b. Akkor katot tekniği
- c. Yüksek frekans tekniği
- d. Mikrodalga plazma tekniği

Tablo 3.3. Geçiş metalleri, bunların karbür ve nitürlerine ait bazı özellikleri [12]

	Ergime Noktası (K)	Mikro Sertlik (kg/mm ²)	Elastite Modülü (GPa)
Grup 4			
Ti	1940	-	110
TiC	3370	3000	451
TiN	3220	2000	612
Zr	2120	-	95
ZrC	3670	2700	348
ZrN	3250	1500	460
Hf	2490	-	138
HfC	4170	2600	352
HfN	3660	1600	380
Grup 5			
V	2170	-	130
VC	2970	2900	422
VN	2450	1500	-
Nb	2740	80	101
NbC	3870	2000	338
NbN	2470	1400	-
Ta	3250	110	186
TaC	4070	1800	285
TaN	3360	1050	-
Grup 6			
Cr	2130	-	248
Cr ₃ C ₂	2070*	1400	373
CrN	1770	1100	-
Mo	2890	210	325
Mo ₂ C	2770	1500	533
W	3670	400	345
WC	3070*	(0001) 2200 (10 $\bar{1}$ 0)1300	696

3.4.4.2. Kimyasal buhar biriktirme(CVD)

Kısaca CVD (Chemical Vapour Deposition) olarak adlandırılan kimyasal buhar biriktirme ile yüzey kaplamalarının üretimi, bir gaz fazdan kimyasal reaksiyonlar sonucu elde edilen fazın yüzeyde çöktürülmesi esasına dayanır. CVD ile karbür ve nitürlerin yanı sıra, metal ve borürlerin üretilmesi de mümkün olmaktadır. Şekil 3.2.'de bir CVD ünitesinin şematik resmi görülmektedir.

Şekil 3.2. Bir CVD ünitesinin prensip şeması, reaksiyon $A + B \rightarrow C + D$ [13]

3.4.4.3. Fiziksel buhar biriktirme (PVD)

Bir malzemenin (M) çeşitli altlık malzemeleri üzerine ince film ve kaplama şeklinde biriktirilmesi, bu M malzemesinin buharının oda sıcaklığına yakın bir sıcaklıktaki altlık malzeme üzerinde yoğuşması ile gerçekleştirilebilir. Element veya bileşik şeklindeki M maddesi bir kaynağa yerleştirilerek veya yüksek sıcaklıklara ısıtılarak (buharlaşma) ya da yeterince yüksek enerjili iyonlarla bombardıman edilerek (sıçratma) buhar haline geçirilir. Katı haldeki kaynak malzemesinin yüzeyinden buhar fazına geçecek parçacıkların yüzeyden ayrılması için gerekli olan enerji buharlaşma tekniğinde ısı enerjisiyle, sıçratma tekniğinde ise bombardıman iyonlarının çarpma enerjisi ile sağlanır. Kaynağın buharlaşması ve bu fazın bir altlık yüzeyinde biriktirilmesi faz dönüşümlerini ve kütle transferini içeren fiziksel temel oluşumları kapsayan bir mekanizmadır. Bu nedenle bu tür biriktirme işlemlerine fiziksel buhar biriktirme (PVD, Physical Vapour Deposition) teknikleri adı verilmektedir [13].

3.5. Niyobyum Nitrür

Niyobyum refrakter metaller grubundan bir elementtir. Refrakter metaller; 2204 °C den daha yüksek ergime sıcaklıkları olan, niyobyum, molibden, tantal, volfram ve renyum elementlerinin oluşturduğu gruptur. Yüksek ergime sıcaklıklarının yanı sıra refrakter metaller aşağıda belirtilen özelliklere de sahiptir:

- a. Üstün korozyon direnci,
- b. Yüksek sıcaklık dayanımı,
- c. Üstün termal şok dayanımı,
- d. Üstün aşınma dayanımı,
- e. Üstün elektrik ve ısı iletimi.

Niyobyum alaşımları, alüminit veya silisit kaplamaları ile yüksek sıcaklık dayanımının önemli olduğu yerlerde kullanılmaktadır. B-66 ve Cb-752(Nb-10W-2,5W) niyobyum alaşımları yüksek sıcaklık dayanımlarının önemli olduğu gaz türbin

bıçaklarında, uçaklara ait kanat açma mekanizmalarında, roket motor nozülleri gibi yerlerde kullanılmaktadır [14].

Refrakter metaller ve nitrürleri sahip olduğu yüksek elektriksel iletkenlik, iyi mekanik özellikler, kimyasal çözeltilere karşı korozyon dayanımı gibi üstün özelliklere sahiptir. Mekanik özellikleri ve korozyon dayanımı niyobyum nitrürün gaz türbinleri ve uzay araçları gibi olağan üstü çalışma koşullarında çalışan rulman gibi parçalarında kullanılmasına olanak sağlamaktadır [14].

Niyobyum nitrür, geçmişten bugüne kadar değişik teknikler kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen kaplamaların özellikleri konusunda birçok literatür çalışması mevcuttur. Aşağıda mekanik ve fiziksel özellikleri hakkında yapılmış olan çalışmalara birkaç örnek sunulmuştur:

K. S. Havey ve arkadaşları [15] yapmış oldukları bir çalışmada manyetik alanda sıçratma tekniğini kullanarak 440C paslanmaz çelik altlık üzerinde NbN film elde etmişlerdir. Sonuçlara göre artan basınçla beraber kübik yapıdaki (sodyum klorür kafes yapısı) δ -NbN yerini hegzagonal δ' -NbN fazına bırakmıştır. Aşınma özellikleri ball-on-flat aşınma testi yardımıyla yapılmıştır. Burada bilye olarak Si₃N₄ ve paslanmaz çelik bilyeler kullanılmıştır. Aşınma testi sonucunda Si₃N₄ ve paslanmaz çelik bilyeler için sırasıyla sürtünme katsayısı 0,6 ve 0,7 olarak hesaplanmıştır. Nano sertlik ölçme yöntemleriyle yapılan sertlik ölçümlerinde ortalama 30 GPa sertlik elde edilmiştir. Son olarak çizme testi ile adhezyon değeri 2 ile 3 kgf arası belirlenmiştir.

M. S. Wong ve arkadaşları [16] yaptıkları bir çalışmada M2 takım çeliği üzerine manyetik alanda sıçratma tekniği ile NbN kaplamışlardır. Elde edilen sonuçlardan kafes yapısı olarak bir önceki paragrafta söz edilen durum ile aynı sonuçlarla karşılaşılmıştır. Sertlik olarak ise kaplama esnasında değişen enerji oranına bağlı olarak 17 GPa ile 40 GPa arasında değerler elde edilmiştir.

M. Larsson ve arkadaşları [17] M2 çeliği üzerine iyon hüzmesi destekli kaplama ve DC diyot kaplama teknikleri birlikte uygulanarak TiN/NbN çok katmanlı yapı elde etmişlerdir. Yapılan kaplamalar arasında tek NbN kaplama olan yapıda 33 GPa

sertlik değeri elde etmişlerdir. Niyobyum nitrüre ait diğer özellikler Tablo 3.4.'te verilmiştir [11].

Tablo 3.4. Niyobyum nitrüre ait özellikler [11]

Fazlar	Nb ₂ N, Nb ₃ N ₄ , NbN
Kafes ve Latis Parametreleri	Nb ₂ N(Hegzagonal): a=0,3054nm, c=0,5005nm NbN(Kübik): a=0,4395nm, c=4338nm
Boşluk Grubu	Nb ₂ N: P31m NbN: P63/mmc
Pearson Sembolü	Nb ₂ N: hP9 NbN: hP8
Kimyasal Kompozisyon(NbN)	NbN _{0,92} ile NbN _{1,06}
Moleküler Ağırlık (NbN)	106,91
Renk	Koyu Gri
X-Işını Yoğunluğu	7,3 g/cm ³
Ergime Sıcaklığı	Yaklaşık 2573 °C
Debye Sıcaklığı	307 K
Spesifik Isı (Cp)	39,01 J/mol. K
Dönüşme Isısı (-ΔHf) (298 K'de)	236 kJ/g-atom metal
Termal İletkenlik (K)	3,76 W/m.oC
Termal Genleşme	10,01 x 10 ⁻⁶ emu/mol
Elektriksel Özdirenç	58 μΩ.cm
Süperiletkenlik Geçiş Sıcaklığı	16 K
Hall Sabiti	-0,52 x 10 ⁻⁴ cm ³ /A.s
Manyetik Duyarlılık	31x10 ⁻⁶ emu/mol
Vickers Sertliği	13,3 GPa
Elastite Modülü	493 GPa
Oksidasyon Dayanımı	Yaklaşık 800°C'de açık atmosferde oksitlenmeye başlar
Kimyasal Dayanım	Oda sıcaklığında kararlıdır. Artan sıcaklıkla beraber konsantre asit çözeltilerinde dayanımı azalır.

3.6. Niyobyum Alüminyum Nitrür

Önceki bölümlerde hem niyobyum nitrürün hem de diğer geçiş metallerinin nitrür bileşiklerinin özelliklerinin hakkında bilgiler verilmiştir. Niyobyum nitrür, sahip olduğu üstün mekanik özellikler ve korozyon dayanımı, süper iletkenlik geçiş sıcaklığı değerleri ile araştırmacıların dikkatini çeken bir malzeme olmuştur.

Son 15 yıllık zaman içerisinde geçiş metallerinin nitrür bileşiklerine silisyum, alüminyum veya krom ilavesi ile özelliklerinin geliştirilmesi araştırılmıştır. Yapılan çalışmalar Ti-Al-N ve Cr-Al-N üzerinde yoğunlaşmış olup, Ti-N ve Cr-N'e göre sertlik ve ısıl kararlılıkta artış sağlanmıştır. Niyobyum nitrüre alüminyum ilavesi son yıllarda araştırma konusu olmaya başlamıştır. Yapılan alüminyum ilavesinin metallik bağ yapısını kovalent bağ ile değiştirerek mekanik özellikler, korozyon dayanımı ve

ısl kararlılığı arttırması beklenmektedir. Ayrıca değişen bağ yapısının iletkenlik ve optik özellikler üzerinde de değişimlerin olması beklenmektedir.

Literatürde niyobyum alüminyum nitrür ile ilgili yapılmış olan çalışma sayısı sınırlıdır. Barshilia ve ekibi [18] tarafından yapılmış olan çalışmalar incelendiğinde, DC diyot sıçratma tekniği ile bakır altlık üzerine değişen azot gaz akışı ve voltaja bağlı olarak oluşan kaplama özelliklerinin araştırıldığı görülmektedir. Elde edilen sonuçlara göre kaplamalarda 28 GPa sertlik değeri elde edilmiştir. Alüminyum ilavesi ile 350 ile 700 °C sıcaklıklar arasında oksidasyon direncinde iyileşmeler elde edilmiştir. Ayrıca 700 °C sıcaklığa kadar yapının kararlı olduğu gözlemlenmiştir.

Aynı şekilde R. Franz ve ekibi [19] tarafından yapılan bir diğer araştırmada, katodik ark tekniği ile Nb-Al-N kaplama elde edilmiş, değişen alüminyum oranının kafes yapısı, mekanik özellikler ve oksidasyon direnci üzerindeki etkileri incelenmiştir. Artan alüminyum oranı ile birlikte δ -NbN için olan kübik yüzey merkezli olan kafes yapısının AlN'e ait vurtzit kafes yapısına dönüştüğü gözlemlenmiştir. Diğer taraftan oksitlenmeye başlama sıcaklığının 600 °C'den 700 °C'ye çıktığı görülmüştür.

Yine R. Franz ve ekibi [20] katodik ark tekniği ile AISI M2 çeliğini Nb-Al-N kaplayarak aşınma özelliklerini incelemiştir. Yaptıkları aşınma çalışmalarında değişen alüminyum oranları ve aşınma ortam sıcaklıklarına bağlı olarak ortalama sürtünme katsayısı değerlerini 0,8-1,0 arasında bulmuşlardır. En iyi aşınma performansı 300-500 °C sıcaklıklar arasında Nb bakımından zengin kaplamalarda elde edilmiştir. Yüksek sıcaklıklarda yapılan aşınma deneylerinde alüminyumca zengin olan kaplamalarda oksidasyon daha az oranda gerçekleşmiş olup, düşük oranda oksidasyonun aşınma dayanımı bakımından yararlı olduğu belirtilmiştir.

BÖLÜM 4. TERMO REAKTİF DİFÜZYON (TRD)

4.1. Giriş

Termo reaktif difüzyon (TRD) tekniği 1968 yılında Toyota firması ve T. Arai tarafından geliştirilmiştir. Termo reaktif difüzyon tekniği, Toyota difüzyon kaplama tekniği (TD) ve termal difüzyon tekniği isimleri ile de bilinmektedir.

TRD tekniği; çeliklerin yüzeyinde sert ve aşınmaya dayanıklı karbür, nitrür veya karbonitrür kaplamaların elde edilmesi amacıyla geliştirilmiş bir yöntemdir. Bu yöntemde altlık malzemede bulunan azot ve/veya karbon; karbür veya nitrür yapıcı elementlerle (krom, titanyum, vanadyum, niyobyum gibi) beraber kaplama oluşan bölgeye yayınırlar. Bu bölgede azot veya karbon; karbür veya nitrür yapıcı elementler ile birleşerek yoğun ve birbirine kimyasal bağlarla bağlı bir tabaka oluşturur.

TRD tekniğinde diğer yüzey sertleştirme tekniklerinden farklı olarak, karbon veya azot katkı maddeleri yardımıyla altlık yüzeyine yayınarak sertleştirme gerçekleşir. Yine diğer yayınma tekniklerinden farklı olarak TRD tekniğinde altlık yüzeyinde kontrollü bir oluşum söz konusudur. Oluşan kaplama kalınlığı 5 ile 20 μm arasında değişmekte olup, kullanım alanları fiziksel buhar biriktirme (PVD) ve kimyasal buhar biriktirme (CVD) teknikleri ile aynıdır. Kaplama kalınlığı geleneksel CVD yöntemiyle karşılaştırıldığında, CVD kaplamalar genellikle 25 μm kalınlığın altındadır. Bu yönden bakıldığında TRD ile CVD kaplamalarda kalınlığının birbirine yakın olduğu söylenebilir [21].

4.2. İşlem Özellikleri

TRD tekniği çeliklere değişik ortamlarda uygulanabilmektedir. Kullanılan ortamlara göre yöntemin adı değişmektedir. Bunlar:

- a. Tuz banyosu
- b. Akışkan yatak ve
- c. Kutu sementasyon teknikleridir.

4.2.1. Tuz banyosu yöntemi

Tuz banyosu yönteminde ilk olarak çelik parçalar çarpılmayı azaltmak ve işlem süresini kısaltmak amacıyla 500 ile 700°C arası sıcaklıklara ısıtılır. Daha sonrasında bir elektrikli tuz banyosunda veya gaz ısıtmalı fırında ergimiş boraks ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ veya $\text{Na}_2\text{O}\cdot 2\text{B}_2\text{O}_3$), uygun karbür veya nitrür yapıcı element ve bor karbür, alüminyum gibi indirgeyici katkıları eklenerek 850 ile 1050°C arasında 0,5 ile 10 saat süreyle işlem yapılır. Banyo sıcaklığı seçilirken altlık olarak seçilen malzemenin sertleşme sıcaklığına uygunluğu göz önüne alınır. Tutma süresinin belirlenmesinde yüzeyde istenilen kaplama kalınlığı ve altlık malzemenin türü önemlidir. Karbür veya nitrür yapıcı elementin ilavesinde ferro-alaşım tozları veya bu elementlerin oksitleri kullanılabilir. Örneğin, vanadyum için ferro-vanadyum veya V_2O_5 kullanılabilir. Karbür veya nitrürlerin oluşumunda; titanyum, vanadyum, krom, molibden, niyobyum, volfram gibi elementler ergimiş boraks banyosunda çözünür, altlık malzemedeki karbon veya azot da altlık malzemedeki kaplama tabakasına yayılarak 2 ile 20 µm kalınlığında kaplama elde edilmiş olur. Kaplama işlemi sonrası malzemelerde boyutsal kararlılık elde edilmesi ve çarpılmaların önlenmesi amacıyla hava, su veya yağda soğutma ve 150 ile 200°C veya 500 ile 600°C sıcaklıklar arasında tek veya iki kademede menevişleme yapılır. Yüksek hız çelikleri ve diğer bazı çeliklerin ostenitleme sıcaklığı 1050°C üzerindedir. TRD işlemi sonrası malzemelerin tam sertlik değerlerinin elde edilmesi için ısıtma işlemleri, koruyucu atmosfer, vakum, koruyucu tuz ve benzeri ortamlarda yapılabilir. Düşük sıcaklıklarda TRD işlemi, önceden nitrasyon yapılmış çelikler için nitrasyon veya karbonitrasyon sıcaklıklarındaki düşük banyo sıcaklıklarında da uygulanabilmektedir.

4.2.1.1. Yöntemin avantajları

- a. Basit aletler, işlem kolaylığı, karbür ve nitrür yapıcı elementlerde kolay değişim ve koruyucu atmosfer gerektirmemesi,
- b. Küçük boyutta numuneler için kısa daldırma süreleri (<1 dakika) ve kaplama edilmesi,
- c. Banyodan alınma sonrası tüm parça kesitinde sertleştirmeye olanak sağlaması,
- d. Yorulma dayanımı, ömrü ve toklukta değişme olmaksızın üstün yüzey sertliği(1200-4000 HV) arası elde edilebilmesi,
- e. Abrasif, adesif, titreşimli aşınmalara ve termal şoklara karşı üstün dayanım,
- f. Soğuk dövme esnasında yüzeyden kaplama kalkmasına karşı üstün dayanım,
- g. Kullanım esnasında, alüminyum gibi zorlu parçalar da dâhil olmak üzere üstün kullanım ömrü,
- h. 800 °C sıcaklığa kadar daha iyi korozyon ve oksidasyon direnci,
- i. Ergimiş alüminyum ortamında üstün dayanım,
- j. Parçalarda ince tabaka, pullanma bulunmaması,
- k. D2 çelik altlık yüzeyine yapılan VC ve TiC kaplamalarda yüzeyde basma gerilmesinde gelişim,
- l. Elde edilen kaplamanın bakır veya paslanmaz çelikle kaplanabilmesi, termal spreyci işlemi uygulanabilmesi veya folyo ile sarılabilmesine olanak sağlaması,
- m. İşlem sonunda uygulama yapılan ortamda karbür veya nitrür tabakası oluşumu olmaması,
- n. Fiziksel buhar biriktirme (PVD) ve kimyasal buhar biriktirme (CVD) teknikleri ile aynı uygulama alanlarında kullanılabilmesi,
- o. Uzun banyo ömrü,
- p. Düşük işlem maliyetidir.

4.2.1.2. Yöntemin dezavantajları

İşlemin yüksek sıcaklıkta yapılması sebebiyle, özellikle büyük ve karmaşık şekilli parçalar için, çarpılma riskinin yüksektir. Ancak işlemin dikkatli biçimde yapılması, uygun altlık malzeme seçimi, TRD işlemi öncesinde ve sonrasında çarpılmayı önleyici işlemler yapılarak bu risk azaltılabilir.

4.2.1.3. Uygulama alanları

PVD ve CVD yöntemlerinin endüstriyel uygulamaları sınırlı olmasına karşın, TRD yöntemi makine imalat, otomobil ve pompa parçalarına 10 kat başarıyla uygulanabilmektedir (imalat çeliklerinden yapılan parçalara).

4.2.2. Akışkan yatak yöntemi

Akışkan yatakta TRD yönteminde temiz yüzeyli karbon içeren malzeme, alümina (-80 mesh), karbür/nitrür yapıcı madde olarak ferro-alaşım tozları 100-200 mesh) ve aktivatör olarak NH_4Cl kullanılır. Bu malzemeler 1073 ile 1300K arası akışkanlığın olduğu sıcaklıkta tutularak işlem yapılır. Daha sonrasında altlık malzemenin sertleştirilmesi için gerekli sertleştirme teknikleri uygulanır.

4.2.2.1. Avantajları

Akışkan yatak yöntemi, CVD ve tuz banyosu TRD yöntemleri ile üretilen sert kaplamalara göre daha iyi aşınma özellikleri, daha iyi adhezif özellikler ve daha iyi korozyon direnci gösterir. Klasik yüzey kaplama yöntemleri ile kıyaslandığında daha ucuz, temiz ve basit bir yöntemdir. Ön ısıtmadan menevişleme kademesine kadar bu yöntem otomasyona uygundur.

4.2.2.2. Kullanım alanları

Bu yöntem makine takımları ve basınçlı döküm kalıpları, metal şekillendirme zımbalarında kullanılan çeşitli parçaların üretiminde kullanılabilir [22].

4.2.3. Kutu sementasyon yöntemi

Kutu sementasyon ile yayınma yöntemi düşük karbon oranına sahip çeliklerin yüzeyine bir karbon kaynağı vasıtasıyla karbon yayındırma işlemini kapsayan yöntemdir. En eski kutu sementasyon yönteminde levhaların kaynaklanmasıyla elde edilmiş kutular kullanılmıştır. Bu kutular içerisinde yüksek sıcaklıkta baryum karbonat gibi ilaveler ile karbon kaynağı aktive edilerek CO gazı elde edilir. Daha sonra gaz halindeki CO'deki karbon atomik hale gelerek kaplanmak istenilen malzemenin yüzeyine yayılır. Günümüzde kutu sementasyon yönteminin kullanımı oldukça azalmıştır. Kutu sementasyon yöntemiyle alüminyumlama, silisyumlama, kromlama ve borlama işlemleri de yapılabilmektedir.

4.2.3.1. İşlemin prensibi

Kutu sementasyon yöntemi difüzyonel kaplamalar elde edilmesi amacıyla belirli bir sıcaklıkta (örneğin; 1050°C) ve sürede (örneğin; 16 saat) buhar fazında, kapalı veya havalandırılmalı bir kutu içerisinde yapılmaktadır. Geleneksel bir kutu sementasyon kutusu 4 ana bileşen içerir; altlık malzeme veya kaplanacak parça, master alaşım (yüzeyde biriktirme yapılacak element), aktivatör olarak halojenür tuz ve dolgu malzemesi. Master alaşımı, halojenür tuz, aktivatör ve dolgu malzemesi karıştırılır ve hazırlanan karışımın içerisine parça gömülür. Karışımın ısıtılmasıyla aktivatör tepkimeye girer ve metal halojenürlerini içeren bir aktif gaz ortamı oluşturur. Oluşan halojenürden altlık malzeme yüzeyine kaplanmak istenilen metal yayılarak kaplama elde edilir [22].

4.2.4. Kaplama kalitesini etkileyen işlem parametreleri

Kutu sementasyonu gibi termokimyasal difüzyon yöntemleri birçok değişkenden etkilenir. Her defasında problemlerin en uygun çözümleri, parametrelerin birbirine göre ayarlanması, deneysel çalışmalar sonucunda olmaktadır. Bu parametreler aşağıda sıralanmıştır:

4.2.4.1. İşlem kutusunun tasarımı ve karışımda numune pozisyonu

Kutu sementasyonunda toz bileşimi, altlığın kimyasal bileşimi, difüzyon sıcaklığı ve süresi gibi işlem parametreleri yanında, numunenin karışıma gömülme şekli ve pozisyonu da önemlidir. Proses geleneksel bir kutu içerisinde gerçekleştirildiği için, oksijen girişine karşı kutu sızdırmazlığının çok iyi bir şekilde sağlanması önemlidir. Kutu karışımı içerisinde bulunan veya dışarıdan içeriye giren oksijen, demir esaslı numuneler üzerinde bölgesel oksitlenmeler meydana getirir. Bu şekilde kısmi oksitlenmiş yüzeyler üzerinde herhangi bir kaplama tabakası ya oluşmaz ya da yeterli adhezyon göstermeksizin oluşabilir. Kutu sızdırmazlığının sağlanabilmesi için çeşitli kutu tasarımları geliştirilmiştir. Kaplama kutusunun iç içe iki kutudan oluşturulması, dıştaki kutunun demir talaşı veya odun kömürü ile doldurulması başarılı kutu tasarımlarıdır. Dış kutudaki demir talaşı veya odun kömürü işlemin başlangıç aşamasında oksijeni bağlar.

4.2.4.2. Ferroalaşımların etkisi

Kutu sementasyonu yönteminde kaynak malzeme olarak ferro-alaşımlar ve saf metal tozları kullanılmaktadır. Ticari, ucuz ve kolaylıkla bulunabilen ferro-alaşımların kullanılması durumunda metal tenörünün yüksek olmasına dikkat edilmelidir. Saf metal tozları ile de gerçekleşmesi mümkün olan işlemde, saf tozların pahalı olması sebebiyle maliyet artmaktadır. Başlangıçta, yöntem parametrelerinin belirlenmesinde saf metal tozları ile çalışmak avantajlıdır. Ayrıca saf metal tozları ile çalışıldığında difüzyon hızının arttığı ileri sürülmektedir.

4.2.4.3. Karışım tozlarının tane boyutuna etkisi

Karışımdaki tane boyutu ve dağılımı yüksek sıcaklıkta gerçekleştirilen kaplama işlemiyle direkt ilgilidir. Toz tane boyutunun çok küçük olması durumunda metal tozlarının birbiri ile sinterlenmesi olasılığı artmaktadır. Dolayısıyla altlık yüzeyine halojen buharı olarak taşınacak element miktarı azalma göstermektedir. Toz boyutunun aşırı büyük olması durumunda ise aktivatörle bağlanarak buhar fazına

geçen element miktarı azalmaktadır. Araştırmalar en ideal toz boyutunun $40 < d < 60$ μm olduğunu göstermektedir.

4.2.4.4. Kaplama/difüzyon sıcaklığı ve süresi

Difüzyonel kaplama işlemleri, sızdırmaz bir kutu içerisinde $900-1250^{\circ}\text{C}$ 'ye çıkabilen bir fırında 2 ile 25 saat süre ile uygulanır. Bu süre ve sıcaklıklar üretilecek tabaka cinsi ve kaplama kalınlığına bağlı olarak değişebilir. Numunenin soğuması genellikle kutu ve karışım içerisinde olmaktadır. Ayrıca fırın dışında yapılan soğutma ile ilgili çalışmalar da mevcuttur.

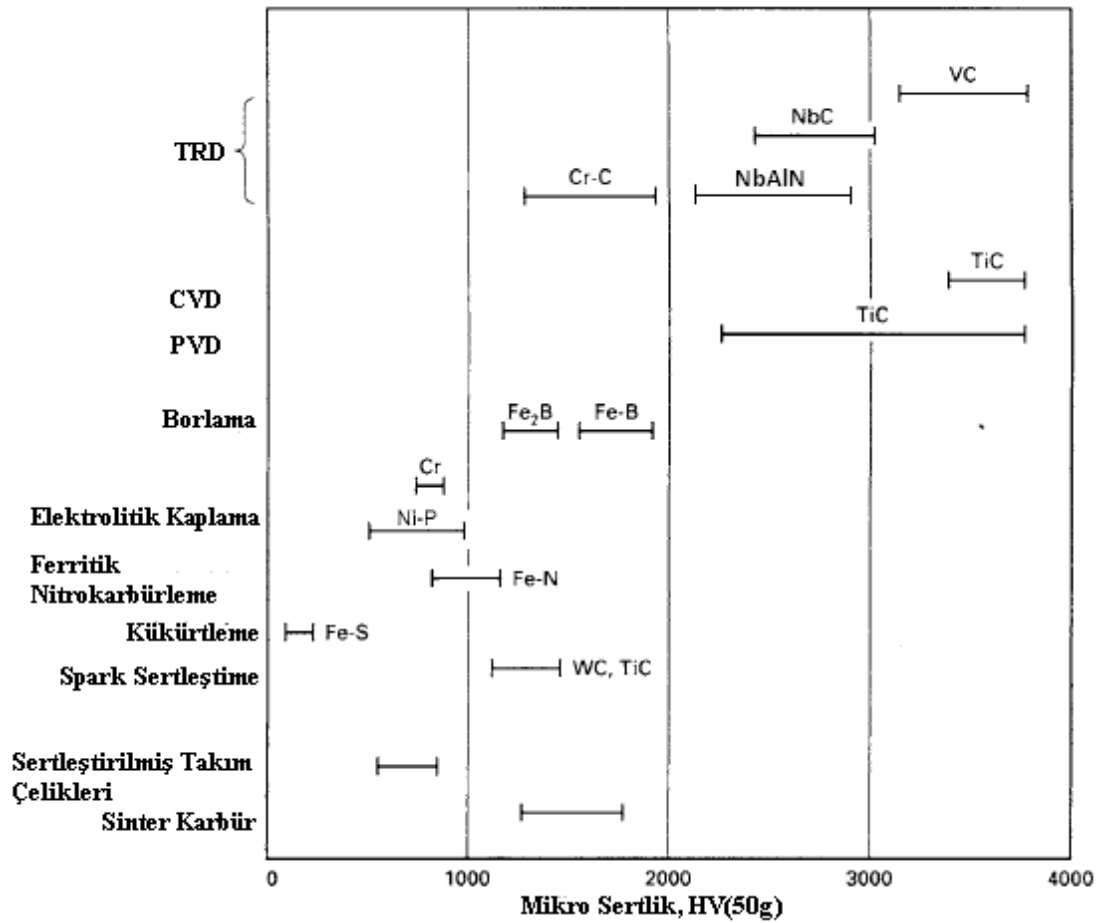
4.2.4.5. Aktivatör cinsi

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 oluşturulmuş olur. Aktivatör olarak muhtelif halojenür tuzları (NaF, -Cl, -Br, -I; NH_4F , -Cl, -Br, -I) kullanılır. Aktivatör seçiminde, kullanılan altlık malzemesinin cinsi ve aktif gaz ortamını oluşturacak ferro-alaşım elementlerinin kısmi basıncı önemli rol oynar [22].

4.3. Termo Reaktif Difüzyon Uygulanmış Malzemelerin Özellikleri

4.3.1. Sertlik

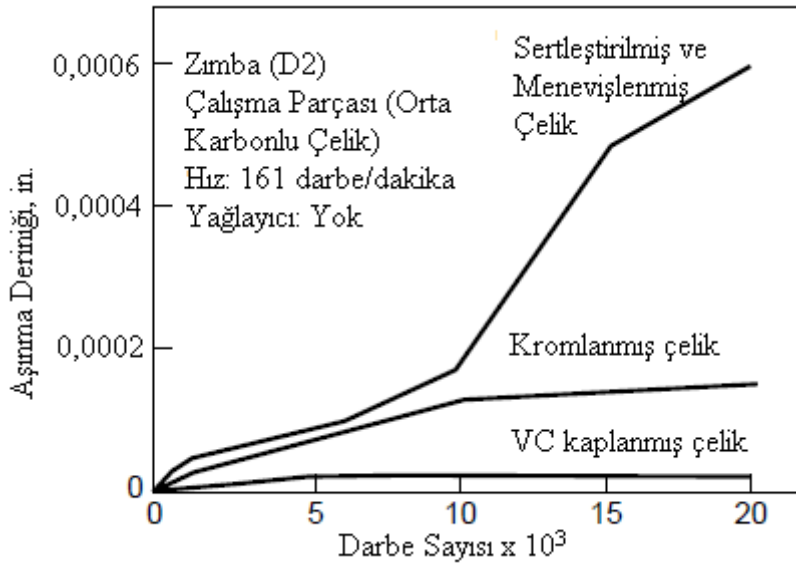
Şekil 4.1.'de çeşitli yüzey işlemleri ile elde edilmiş sert kaplamalara ait sertlik değerleri verilmiştir. TRD işlemi ile vanadyum karbür kaplanmış olan malzeme yüzeyinde 3000 ile 3800 HV arası sertlik ölçülmüştür. 800°C sıcaklığın üzerinde vanadyum karbür 1000 HV sertlik değerine sahiptir. Eğer oda sıcaklığına soğutulursa ısıtma öncesi sıcaklık değerine tekrar ulaşılır.



Şekil 4.1. Çeşitli kaplama teknikleri ile elde edilen sert kaplamalara ait sertlik değerleri [21]

4.3.2. Aşınma dayanımı

İşlem sonucu elde edilen kaplamalar; çelik, demir dışı alaşımlar, plastikler ve kauçuk karşısında üstün aşınma dayanımı göstermektedir. Şekil 4.2’de sertleştirilmiş ve menevişlenmiş, kromlanmış ve TRD ile vanadyum karbür kaplanmış takım çeliği kalıpların zımba olarak orta karbonlu çeliklerin şekillendirilmesinde kullanılmasıdaki aşınma dayanımları verilmiştir. Sertleştirilip menevişlenen parçada ciddiye alınabilecek aşınma kayıpları varken TRD işlemi yapılmış parçalarda aşınma oranı oldukça düşüktür.



Şekil 4.2. İslah edilmiş, kromlanmış ve TRD işlemi yapılmış 3 farklı zimba için aşınma miktarı-darbe sayısı grafiği [21]

4.3.3. Darbe dayanımı

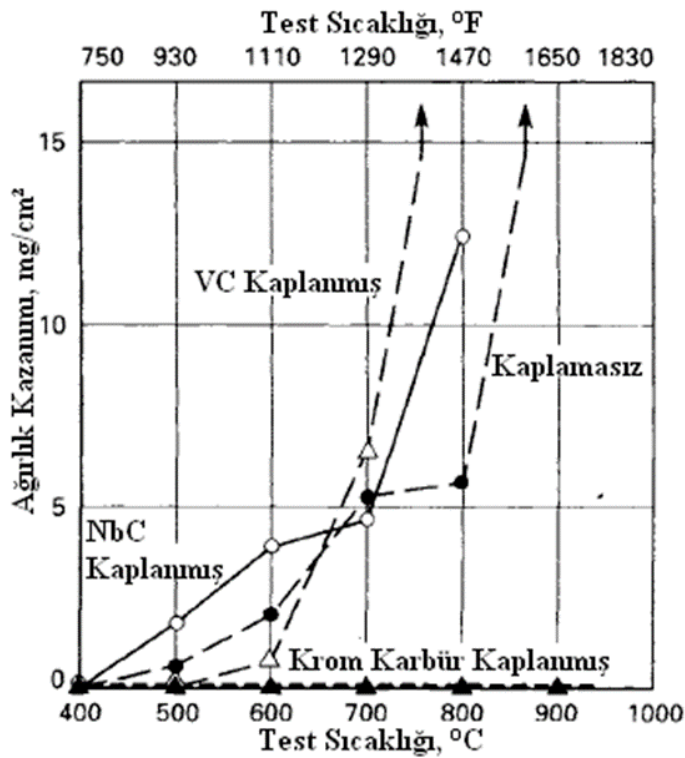
İzod darbe deneyine göre, TRD yapılmış çeliklerin, ıslah edilmiş çelikler ve altlık malzemelerin değerleri birbirine yakındır. Ancak yüksek darbe dayanımı olan bir altlık malzeme seçilmesi durumunda TRD işlemi sonrası kırma ve çentik açma işlemleri daha etkili hale gelir.

4.3.4. Korozyon ve oksidasyon dayanımı

TRD yapılmış çelikler %36 hidroklorik asit (HCl) içeren çözeltiye daldırıldığında korozyona uğramamışlardır. Şekil 4.3.'de HCl içerisinde, TRD yapılmış, kaplamasız, PVD, CVD ve kromlama işlemi yapılmış malzemelere ait ağırlık kaybı değerleri görülmektedir. Oksidasyon dayanımı istendiğinde krom karbür kaplamalar tercih edilir. Şekil 4.3.'te görüldüğü üzere, krom karbür kaplamalar oksidasyona 900°C sıcaklığa kadar dayanıklıdır.

4.3.5. Yüzeiden tabaka kalkmasına karşı dayanım

Kaplamalardan farklı olarak, TRD ile elde edilen katmanın yüzeiden kalkması oldukça zordur. Biriktirilmiş veya mekanik bağlarla bağlı kaplamalara göre difüzyonel bağlar altlık malzemeye metalurjik bağlar ile bağlıdır. Deneylede kaplama bulunan yüzeylerde aynı noktaya sivri uçlu bir çekiçle vurulmuştur. Kromlanmış yüzeyde vurulmaya başladıktan kısa bir sonra çatlaklar oluşmaya başlamış ve 50000. vuruştta kaplama yüzeiden kalkmıştır. PVD ve CVD yöntemleri ile biriktirilmiş TiC kaplamalara aynı işlem uygulandığında 50000. vuruştta çatlaklar oluşmaya başlamış ve 100000. vuruştta tabaka kalkmıştır. TRD ile elde edilmiş VC kaplamada ise 200000. vuruş sonunda ne bir çatlama ne de bir kalkma görülmüştür[21].



Şekil 4.3. Oksidasyon deneyi sonucu kazanılan ağırlıkların karşılaştırılması, altlık malzeme AISI D2, süre 40 saat [21]

4.5. Termo-Reaktif Difüzyonun Uygulama Alanları

Termo-reaktif difüzyon prosesi aşağıdaki takım ve kalıp parçalarının imalatında kullanılmaktadır:

- a. Metal saclar,
- b. Soğuk şekillendirme kalıpları,
- c. Sıcak şekillendirme kalıpları,
- d. Toz metalurjisi parçaları,
- e. Cam,
- f. Kumaş,
- g. Pompa parçaları,
- h. Makine parçaları
- i. Motor parçaları,
- j. Tel ve boru çekme parçaları.

Takım parçalarında kullanılan TRD ürünler Tablo 4.1.'de özetlenmiştir. Parçaların boyutları 1,2 mm çapındaki bir zımbadan 160 kg'lık bir hadde merdanesine kadar değişmektedir. TRD işleminin birçok uygulamada kullanım ömrünü 30 ile 50 kat arttırdığı görülmüştür.

Bazı uygulamalarda altlık malzemelerin sertliği aynı veya düşük olabilmektedir. Uygulamalarda dökülme veya kırılma büyük sorun oluşturur, bu sebeple genelde yumuşak ve tok bir altlık malzeme seçimi yapılmaktadır. Sert karbür kaplamalar bu yumuşak malzemeler üzerinde sert ve aşınmaya karşı dayanıklı kaplamalar elde edilmesini sağlamaktadır. Sertleştirilmemiş yüksek hız takım çelikleri gerekli tokluk değerine sahip olan malzemeler olarak kullanılabilirlerdir.

Ekstrüzyon ve soğuk şekil verme kalıpları gibi yüzeylerinde yüksek kuvvete maruz kalan parçalarda yüksek sertlikte altlık malzeme istenmektedir. Bu sebeple yüksek hız çelikleri TRD işlemi sonrası sertleştirilmektedir. Kobalt içerikli bazı yüksek hız çelikleri 1050 °C sıcaklıktaki TRD işlemi esnasında 60-65 HRC sertlik değerine

ulaşır. TRD işleminde en yüksek altlık sertliği veren malzeme sinter karbürlerdir. Bu parçalarda yüksek aşınma dayanımı yanı sıra korozyon dayanımı da istenmektedir:

Yüksek performanslı makinelerde kullanılan parçalar: Yarış motosikletleri ve otomobiller için makaralı rulman zincirleri, yüksek hızda çalışan burçlar, yüksek basınç altında çalışan dalgıç pompalar.

Olumsuz veya korozif ortam şartlarında çalışan parçalar: Kanatlı pompa kanatları, korozif sıvı atomizerleri, aşındırıcı tanecik içeren sıvıların taşınmasında kullanılan parçalar, cam şekillendirmede kullanılan bağlantı elemanları ve otomobillerin egzoz gazına maruz kalan parçaları.

Yukarıda bahsi geçen parçaların imalatında genellikle alaşımsız karbonlu çelikler grubundan AISI 10xx serisi ve düşük alaşımlı çelikler grubundan AISI 41xx grubu çelikler kullanılmaktadır. Düşük karbonlu çeliklerin karbürizasyonu TRD yöntemi ile yapılabilmektedir. Altlık malzemenin sertleştirilmesi TRD işlemi sonrası hızlı soğutma veya TRD işlemi sonrası tekrar ıslah işlemi yapılarak olabilmektedir [21].

Tablo 4.1. TRD İşlemi ile üretilmiş takım elemanlarının kullanım alanları [21]

Uygulama	Takım Elemanı
Sac Metal İşleme	Çekme kalıpları, eğme kalıpları, delme zımbaları, şekillendirme merdaneleri, kabartma zımbaları, darplama zımbaları, sıyırma zımbaları, bağlantı merdaneleri, kesme bıçakları, sıyırıcı kavuz pinleri ve kılavuzları, tutucu dikiler vb.
Boru İmalatı	Çekme kalıpları, sıkıştırma merdaneleri, kaba ezme merdaneleri, tahriksiz merdaneler, kılavuz merdaneler vb.
Boru İşleme	Eğme kalıpları, basınçlı kalıplar, malafalar, genişletme zımbaları, radyal dövme kalıpları, kesme bıçakları, besleme kılavuzları vb.
Tel İmalatı	Çekme kalıpları, doğrultma merdanesi, tufal kaldırma merdaneleri, besleme merdaneleri, kesme bıçakları.
Tel İşleme	Eğme kalıpları, kılavuz plakaları, kılavuz merdaneleri, kesme bıçakları.
Soğuk ve Ilık Dövme	Ekstrüzyon kalıp ve zımbaları, çekme kalıpları, şişirme kalıp ve zımbaları, darplama kalıp ve zımbaları, haddeleme kalıpları, masura merdaneleri vb.
Sıcak Dövme	Pres-dövme kalıpları, haddeleme kalıpları, şişirme kalıpları, döner tokaçlama kalıpları, kapalı dövme kalıpları vb.
Döküm(Alüminyum, Çinko vb.)	Gravite döküm maça pimleri, basınçlı döküm maça pimleri, kovanlar vb.
Kauçuk Şekillendirme	Şekillendirme kalıpları, ekstrüzyon kalıpları, ekstrüzyon vidaları, torpidolar, silindirik kovanlar, pistonlar, nozullar vb.
Plastik şekillendirme	Şekillendirme kalıpları, enjektör vidaları, kovanlar, pistonlar, silindirler, nozullar, geçiş yerleri vb.
Cam şekillendirme	Şekillendirme kalıpları, dalgıçlar, üfleme memeleri, makine parçaları vb.
Toz Sıkıştırma	Şekillendirme kalıpları, maça çubukları, ekstrüzyon kalıpları, vidalar vb.
Kesme ve Öğütme	Kesme takımları, kesme bıçakları, matkaplar, takımlar, gösterge pinleri, takım tutucular, klavuz levhalar vb.

BÖLÜM 5. AŞINMA VE SÜRTÜNME

Aşınma, bir yüzey hasarıdır ya da birbiri ile ilişkili olarak kayma, yuvarlanma ve çarpma hareketi yapan iki katı yüzeyin birinden veya her ikisinden malzemenin koparılmasıdır. Aşınma, birçok durumda yüzey boyunca pürüz uçlardaki etkileşimlerde meydana gelir. Hareket sırasında öncelikle yüzeye temas eden malzeme yer değiştirebilir; böylece katı gövdenin özellikleri en azından yüzeyde ya da yüzeye yakın konumda değişir, ancak malzeme kaybı ya çok azdır ya da hiç yoktur. Sonra malzeme yüzeyden kaldırılabilir ve birbirine geçen yüzeyler arasında transferle sonuçlanabilir ya da bir aşınma taneciği olarak ayrılabilir. Yüzeylerden birinde aşınma olmasına rağmen (net kütle veya net hacim kaybı ile) bir yüzeyden diğerine transfer olma durumunda ara yüzeydeki net hacim ve net kütle kaybı sıfırdır. Aşınma hasarı, aslında malzeme kaybıyla önde gelir ve aynı zamanda bağımsız olarak meydana gelebilir. Aşınmanın tanımı genellikle malzeme kaybına dayandırılır. Fakat hasarın, ağırlık veya net hacimde değişiklik olmadan belirli bir gövdede malzemenin yer değiştirmesinden dolayı meydana geldiğini ve aynı zamanda aşınmayı oluşturduğunun vurgulanması gerekir.

Aşınma, sürtünme olarak bir malzeme özelliği değildir, bir sistemin cevabıdır. İşletme şartları ara yüzey aşınmasını etkiler. Bazen hatalı bir şekilde yüksek sürtünmeli ara yüzeylerin yüksek aşınma oranı sergileyeceği varsayılır. Bu her zaman doğru değildir. Örneğin katı yağ bulunduran ara yüzeyler ve plastikler az sürtünmeye nispeten yüksek aşınma sergilerler, oysa seramikler orta bir sürtünmede aşırı derecede küçük aşınma sergilerler.

Aşınma, hem iyi hem de kötü olabilir. Yararlı aşınma örnekleri, kalem ile yazma, tormalama, cilalama ve taşlamadır, bunlar kontrollü aşındırma gerektirir. Neredeyse bütün makine uygulamalarında aşınma istenmez, örneğin; yataklar, contalar, kamlar, dişliler. Nispeten küçük bir malzemenin çıkartılmasından ya da yüzeyin gereğinden

fazla pürüzlenmiş olup olmadığı durumuna göre elemanları değiştirmek gerekli olabilir. İyi tasarlanmış tribolojik sistemlerde, malzemenin çıkarılması yavaş bir süreçtir fakat çok kararlı ve sürekli. Aşınma parçacıkların boyutuyla küçük ilgisi bulunan boşlukların olduğu makine uygulamalarında aşınma taneciklerinin meydana gelmesi ve dolaşımı, bir miktar aşınmanın olmasından daha büyük problem olabilir.

5.1. Aşınma Mekanizmalarının Sınıflandırılması

Aşınma mekanizmaları kısaca mekanik, kimyasal ve termal olarak sınıflandırılır, bunların aşınma tipleri ve şekillerine göre daha alt sınıflandırılmaları vardır

5.1.1. Mekanik aşınma

Mekanik aşınma, aşınmanın çoğunlukla deformasyon ve kopma işlemi tarafından belirlenmesi olarak tanımlanır. Deformasyon işlemi, sünek malzemelerin baştanbaşa aşınma işleminde büyük bir role sahiptir, kırılma işlemi ise gevrek malzemelerin aşınma işleminde büyük bir role sahiptir.

5.1.2. Kimyasal aşınma

Kimyasal aşınma, aşınmanın bir kimyasal reaksiyon filmi tarafından belirlenmesi olarak tanımlanır. Filmin büyüme oranı, mekanik olarak sürtünme tarafından hızlandırılır. Bu yüzden kimyasal aşınma “tribokimyasal aşınma” olarak da tanımlanır.

5.1.3. Termal Aşınma

Termal aşınma, aşınmanın sürtünme ısısından dolayı yüzeyin bölgesel erimesi tarafından belirlenmesi olarak tanımlanır. Difüzyon aşınma olayı aynı zamanda termal aşınma terimi içinde dâhildir, çünkü difüzyon aşınma yalnızca önemli ölçüde yüksek sıcaklıklarda meydana gelir. Gevrek malzemelerin aşınması termal şoklara ve kırılmalara neden olabilir, bu da termal aşınmalara dâhil edilebilir. Aşınmanın bu üç

tanımlaması, aşınmayı kısaca karakterize etmek için gereklidir. Bunlar aşınma oranını tahmin etmek ve aşınma tiplerini ortaya koymak için yeterli değildir.

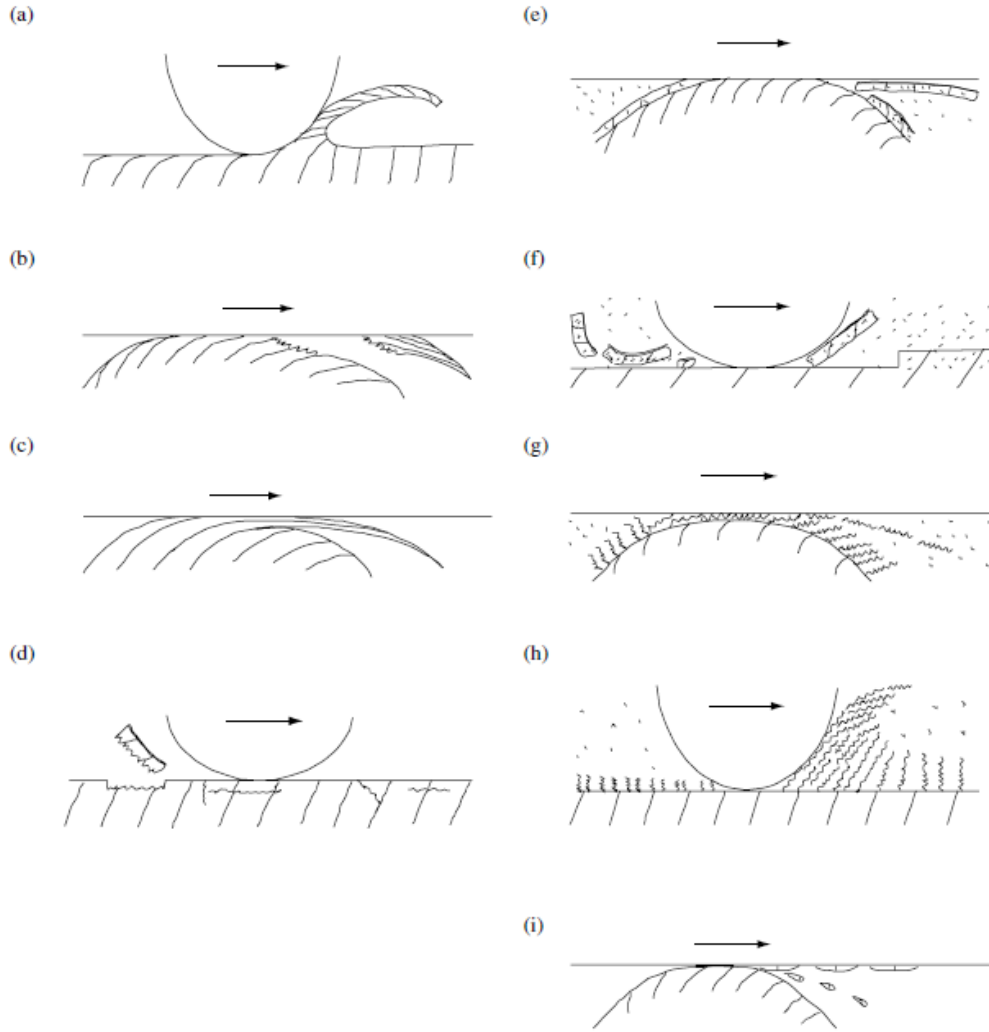
5.1.4. Aşınma mekanizmaları tipleri

Şekil 5.1.'de çeşitli aşınma türlerine ait şematik gösterimler verilmiştir. Aşağıda temel aşınma mekanizmaları ve bu mekanizmaların özel türleri verilmiştir. Temel aşınma mekanizmaları:

- a. Adhezif aşınma,
- b. Abrazif aşınma,
- c. Korozyon aşınma,
- d. Yorulma aşınması şeklinde sıralanabilir.

Temel aşınma mekanizmalarına ek olarak en çok bilinen aşınma mekanizmaları:

- a. Fretting – spalling (titreşimli aşınma – kabarıp dökülme),
- b. Pitting – scoring (çukurlaştırma-çizme),
- c. Scuffing – galling (kazıma-sürtme),
- d. Gouging – cavitation (oyarak-kavitasyon),
- e. Electrical wear (elektriksel aşınma),
- f. Solution wear (çözünme aşınması)
- g. Melt wear (erime aşınması),
- h. Impact wear (çarpışma aşınması),
- i. Diffusive wear (yaygın aşınma),
- j. Mild wear (hafif aşınma) ve
- k. Severe wear (şiddetli aşınma) [24].

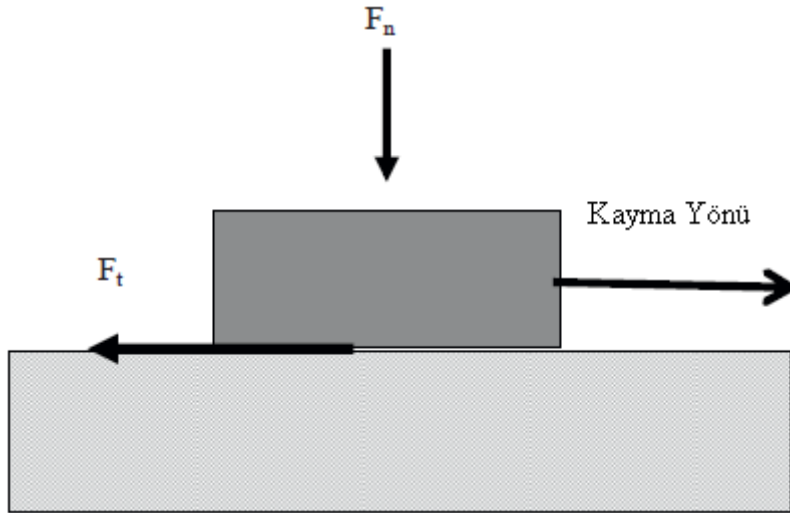


Şekil 5.1. Şematik aşınma türleri: (a) sünek katı yüzeyden mikro kesimler vasıtasıyla oluşmuş abrezif aşınma, (b) adezif kesme ve transferlerle oluşmuş adezif aşınma, (c) birikmiş plastik kesme akışıyla oluşmuş akış aşınması, (d) çatlak oluşumu ve ilerlemesiyle oluşmuş yorulma aşınması, (e) sünek tibo-filmin kesilmesiyle oluşmuş korozyon aşınması, (f) gevrek tribo-filmin ayrılmasıyla oluşan korozyon aşınması, (g) toplanmış plastik kayma akımıyla veya yumuşak tribo-filmin etkisiyle oluşan korozyon aşınması, (i) lokal ergimelerle ve transfer veya saçılmayla oluşan ergime aşınması [25]

5.2. Sürtünme

5.2.1. Sürtünme katsayısı

Bir cismin üzerinde, başka bir katı cismin dikey F_n kuvveti uyguladığı varsayılınsın. Daha sonrasında cisim yüzeyine paralel bir F kuvveti uygulanarak cismin V hızında hareket ettirilmesi sağlansın. Böyle bir durumda hareket yönüne ters doğrultuda levhada bir sürtünme kuvveti oluşacaktır. Şekil 5.2.'de şematik olarak olayın oluşumu gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Yüzeyler arasında sürtünmenin olduğu bir sistemin şematik gösterilişi[26]

Bilinen F_n kuvveti ve deneysel olarak belirlenen F_t kuvvetleri vasıtasıyla sürtünme katsayısı(μ) aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanabilir:

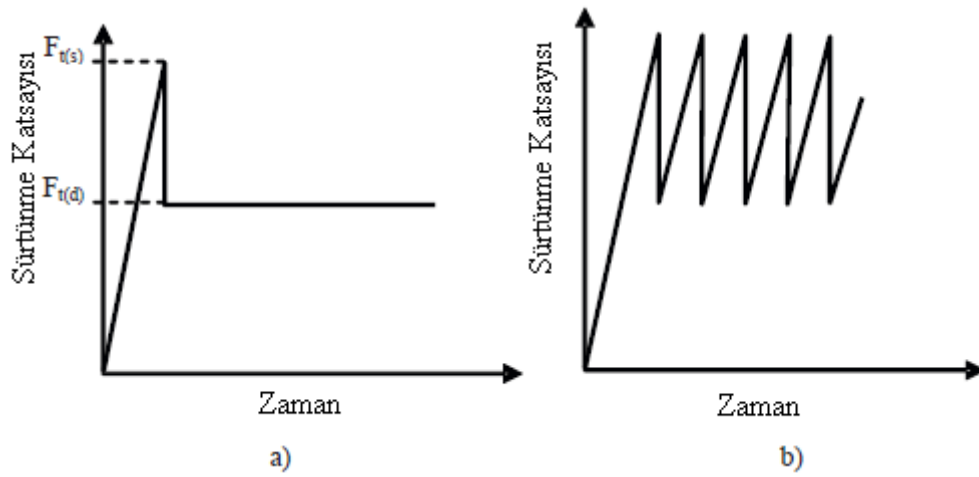
$$\mu = \frac{F_t}{F_n} \quad (5.1)$$

Şekil 5.2.'den de görüleceği üzere statik sürtünme katsayısının ($F_t=F_{t(s)}$ için μ_s) dinamik sürtünme katsayısından ($F_t=F_{t(d)}$ için μ_d) farklı olduğuna dikkat etmek gerekir.

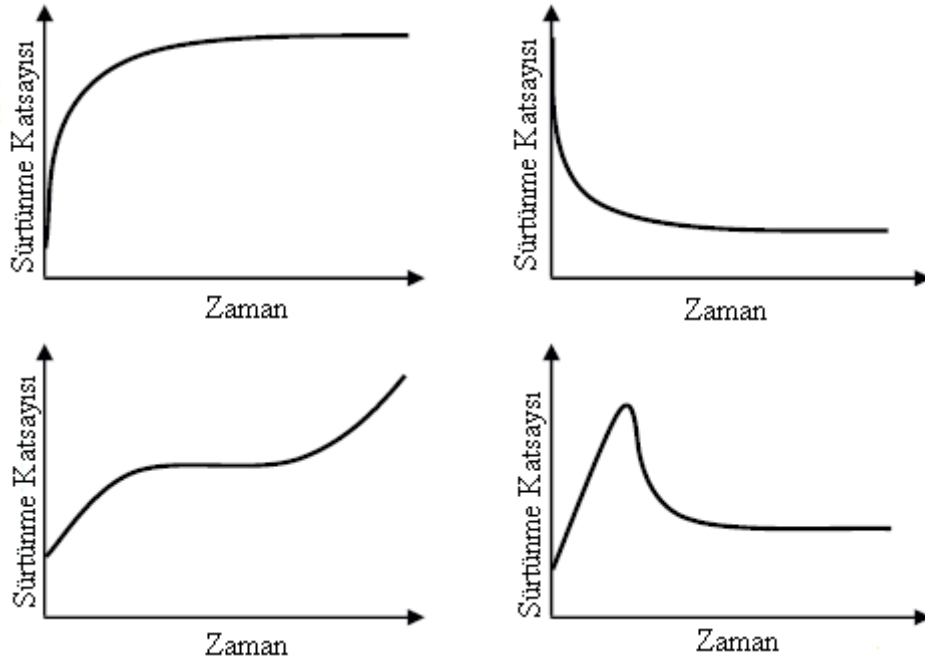
- $F_{t(s)}$ katıya hareket yönünde uygulanan en yüksek kuvvettir ve
- $F_{t(d)}$ hareket yönünde uygulanmaya devam edilen kuvvettir.

Sürtünme katsayısındaki değişim genellikle şekil 5.3.'de görüldüğü gibi olmaktadır. Bu durumun ortaya çıkmasına yapışıp-kayma durumu sonucu, temas noktaları ile karşı yüzeyler arasında ortaya çıkan yapışmalar ve kırılmalar neden olmaktadır.

Malzemelerin sahip olduğu özellikler ve deney şartları sebebiyle oluşan değişik durumlar şekil 6.4.'te verilmiştir. Kayma teması sırasında yüzeylerdeki kimyasal, topografik ya da yapısal değişimler sonucunda oksidasyon, allotropik faz dönüşümleri, amorflaşma, kristalleşme, difüzyon, ergime, parlama veya malzeme ayrılması meydana gelir.



Şekil 5.3. Sürtünme kuvvetinin zamanla değişimi: a) Yapışma-kayma olmaksızın değişim b) Yapışıp-kaymalı değişim[26]



Şekil 5.4. Zamana bağlı olarak sürtünme kuvvetindeki değişimlere örnekler[26]

Metal metal çifti için ultra vakum altında (10^{-7} Pa'den daha düşük) yapılan deneylerde sürtünme katsayısı atmosfer koşullarına göre 10 kat daha fazla ölçülmüştür (Fe/Fe için 12, Zr/Zr için 40, Ti/Ti için 60). Sistemdeki oksijen miktarının artmasıyla beraber sürtünme katsayısı sistematik bir şekilde azalmıştır [26].

BÖLÜM 6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1. Giriş

Bu çalışmada, termo reaktif difüzyon (TRD) yöntemiyle farklı kimyasal bileşim ve kullanım alanına sahip çeliklerin üzerinde oluşan Nb-Al-N tabakasının; mikro yapı ve kimyasal bileşimin, morfolojinin ve mekanik özelliklerin üzerine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla kullanılan malzemeler, AISI D2, AISI M2 ve AISI 4140 olacak şekilde seçilmiş ve aynı şartlarda Nb-N ve Nb-Al-N esaslı kaplamalar elde edilerek, kaplanan malzeme üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Seçilen malzemeler üzerine yapılan kaplamalar sonucu oluşan tabakaların özellikleri; mikro yapı incelemeleri, faz analizleri ve mekanik muayeneler ile belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla; optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu (SEM), x ışınları difraksiyonu (XRD), mikro sertlik cihazı, ball-on-disc aşınma test cihazı ve atomik kuvvet mikroskobu (AFM) kullanılmıştır.

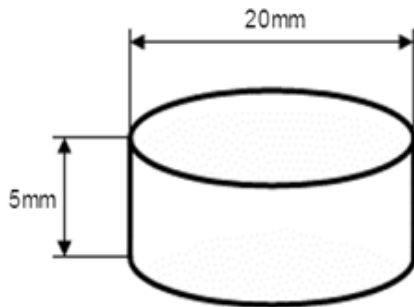
Çalışmada öncelikle bahsi geçen çeliklerden 20 mm çapında ve 5 mm kalınlığında numuneler CNC tezgâhlarında otomatik olarak kesilmiştir. Daha sonra bu numunelerin yüzeyleri nitrasyon işlemi için uygun yüzey kalitesi elde edilene kadar değişik zımpara adımlarından geçirilmiştir. Hazırlanan numuneler 530 °C sıcaklıkta 12 saat süre ile nitrasyon işlemine tabii tutulmuştur. Burada aktif difüzyon süresi 6 saattir. Nb-Al-N kaplama banyosu için ferro niyobyum, %99 safiyette alüminyum, alümina, amonyum klorür ve naftalinden oluşan bileşim kullanılmıştır. Kaplama işlemleri, niyobyuma farklı oranlarda katılan alüminyum bileşimlerinde yapılan işlemler sonucunda oluşan mikro yapı ve mikro sertlik sonuçları göz önünde bulundurularak 1000 °C sıcaklıklarda, 1,2 ve 4 saat sürelerde %0,5, %1,0, %1,5 ve %2,0 alüminyum ilavesi ile gerçekleştirilmiştir. Nb-Al-N kaplanan numuneler metalografik olarak hazırlanarak mikro yapı, mikro sertlik ve tabaka kalınlıkları

ölçümleri yapılmıştır. Aynı şekilde, hazırlanan malzemelerden taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile mikro yapı çekimleri gerçekleştirilmiştir. Nb-Al-N tabakasının içerdiği fazları belirlemek üzere numunelerin kaplanmış olan yüzeylerinden XRD alınarak faz analizleri yapılmıştır. Sadece nitrasyonlu, Nb-N kaplanmış ve Nb-Al-N kaplanmış numuneler üzerinde 2.5, 5 ve 10 N yükler altında, 180 metre mesafede ve 0.1m/s, 0.3m/s ve 0.5 m/s hızlarda aşınma deneyleri gerçekleştirilmiş ve hacimsel olarak aşınma değerleri ile sürtünme katsayıları hesaplanmıştır.

6.2. Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler

Deneylerde; Nb-Al-N kaplamanın malzeme içindeki alaşım elementi ve miktarına bağlı olarak kaplama tabakasında değişimin olup olmadığını görmek için 3 farklı çelik türü kullanılmıştır. Bu seçim yapılırken, değişik amaçlar için en yaygın kullanılan 3 çelik türü belirlenmiştir: İmalat çeliklerinden AISI normunda 4140 Avrupa normunda 42CrMo4 olarak bilinen düşük alaşımlı karbonlu çelik seçilmiştir. Soğuk iş takım çelikleri içerisinde AISI D2, EN ISO normunda X153CrMoV12 ile gösterilen yüksek alaşımlı çelik seçilmiştir. Yüksek hız çeliklerinden AISI normunda M2, EN ISO normunda HS 2-6-5-2C tercih edilmiştir.

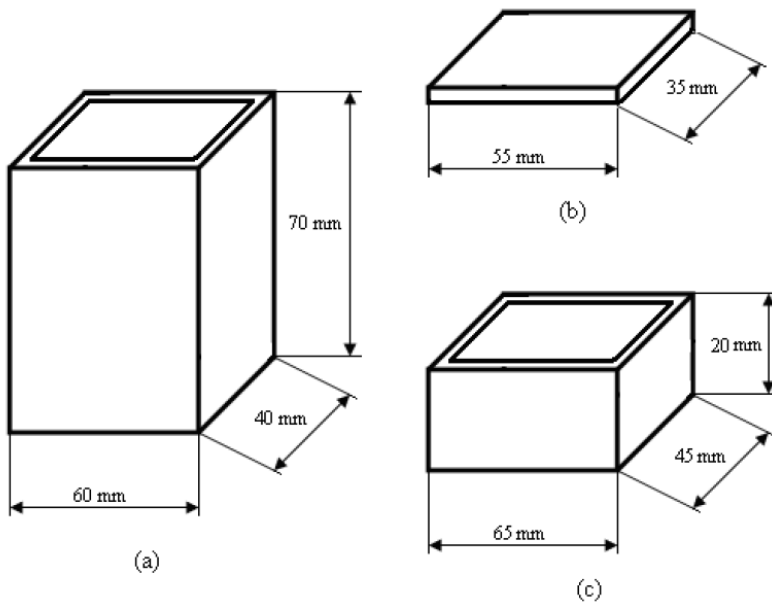
Metalografik inceleme, aşınma ve sertlik deneyleri için çapı 20 mm ve kalınlığı 5 mm olan numuneler CNC tezgâhında otomatik olarak kesilmiştir. Kesilen numunelere ait şematik görünüm Şekil 6.1.'de verilmiştir. Numune yüzeyleri metalografik numune hazırlama teknikleriyle 60, 120, 180, 240, 320, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 gridlik zımpara kullanılarak hazırlanmıştır.



Şekil 6.1. Deneyel çalışmalarda kullanılan numunelerin şekil ve boyutları

6.3. Deneylerde Kullanılan Cihazlar

Nb-Al-N kaplama işleminde Protherm marka PLF 120/7 model açık atmosferli elektrik direnç fırını kullanılmıştır. Fırın atmosferik şartlara açık olup, fırının sıcaklık hassasiyeti ± 1 °C' dir. Nb-Al-N kaplama işleminde 40x60x70 mm boyutlarında hazırlanmış çelik potalar kullanılmıştır. Potanın boyutları Şekil 6.2.' de verilmiştir.



Şekil 6.2. Deneyel çalışmalarda kullanılan potanın geometrik şekli ve boyutları (a) pota, (b) potanın iç kapağı, (c) potanın dış kapağı

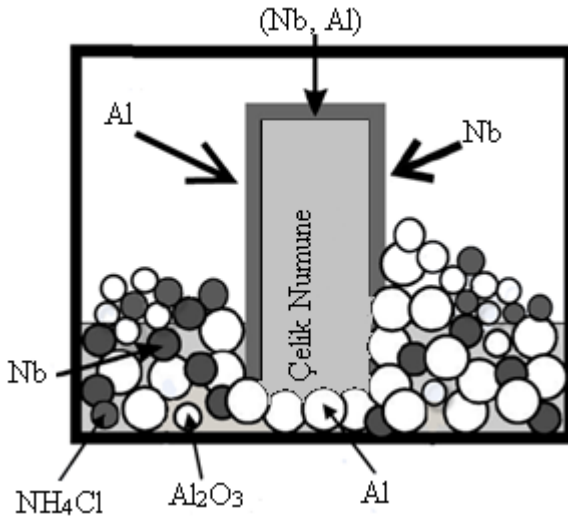
6.4. Kaplama İşlemleri

Şekil 6.1.'de gösterilen boyutlarda hazırlanan çelik numunelerin yüzeyleri, metalografik numune hazırlama teknikleriyle, sırasıyla; 60, 120, 180, 240, 320, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 gridlik zımpara ile hazırlanarak, etil alkol ortamında 15 dakika ultrasonik temizleme yapılmış, sonrasında Binder marka etüvde 100 °C 15 dakika kurutularak nitrasyona hazır hale getirilmiştir. Sonrasında numuneler 530 °C sıcaklıkta 12 saat süre ile gaz nitrasyon işlemine tabii tutulmuştur.

Kaplama işlemi için gerekli ferronyobyum kayaç halinde Aveks firmasından temin edilmiştir. Temin edilen ferronyobyum kırma işlemi sonrası Retsch Rs 100 marka

değirmende öğütülmüş ve Restsch marka titreşimli elekte 100 mikron altına elenmiştir.

Kullanılan Nb-Al-N kaplama banyosu içerik olarak; ferronyobyum (-100 μm), saf alüminyum tozu (-1 μm), alümina (inert dolgu malzemesi, -100 μm), amonyum klorür (NH_4Cl , aktivatör) ve naftalin (oksijen giderici) ihtiva etmektedir. Ferronyobyum, alümina (Al_2O_3), amonyum klorür, naftalin ve farklı oranlarda alüminyumla karıştırılmış ve toz karışımı homojen hale gelinceye kadar harmanlanmıştır. Kullanılan kaplama bileşenleri ve malzemeler, şematik olarak şekil 6.3.' de görülmektedir.

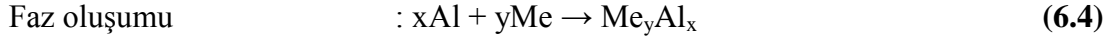
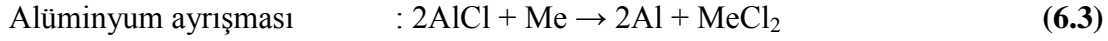
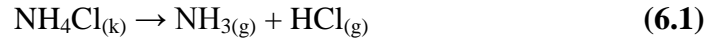


Şekil 6.3. Kullanılan kaplama bileşenleri ve malzemeler

İkinci aşamada, nitrürlenmiş numuneler yukarıda belirtilen kaplama banyosuna ilaveten alüminyum oranları ağırlıkça %0; 0,5; 1,0; 1,5; ve 2,0 olacak şekilde ayarlanarak 1000 °C ve 1, 2 ve 4 saat süre ile üretilmiştir. Her deney için yeni bir banyo hazırlanarak kaplama işlemi sonrası potalar oda sıcaklığına kadar soğutulmuştur. Karakterizasyon çalışmaları için üretilecek kaplamalarda Al bileşim oranına mikro yapı ve sertlik ölçümleri sonrası karar verilmiştir. Kaplama işlemi sırasında oluşan reaksiyonlar Al ve Nb elementleri için aşağıda verilmiştir [27].

Alüminyum için

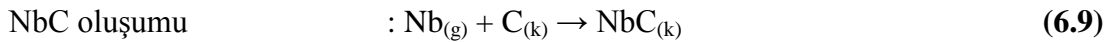
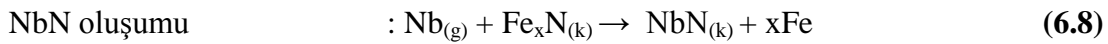
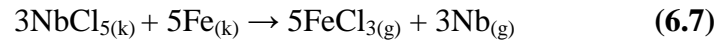
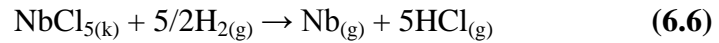
Amonyum klorürün parçalanması:



Niyobyum için



Yer değiştirme reaksiyonları ve Nb birikmesi:



Yukarıda verilen NbN, NbC ve Nb₂CN fazlarının oluşumu için gerekli serbest enerji değerleri aşağıdaki eşitliklerde verilmiştir [28].

Niyonbyum nitrür için 1000°C sıcaklıkta Gibbs serbest enerji (ΔG°) değeri:

$$\Delta G^\circ (\text{NbN}) = -140213 + 42,78T = -85754,06 \text{ J/mol} \quad (6.11)$$

Niyonbyum karbür için 1000°C sıcaklıkta Gibbs serbest enerji (ΔG°) değeri:

$$\Delta G^\circ (\text{NbC}) = -143524 + 70,74T + 9,91 \times 10^{-3}T^2 - 1,952 \times 10^{-6}T^3 + 1,897 \times 10^{-10}T^4 - 255950 - 9,65T \ln T = -128965,42 \text{ J/mol} \quad (6.12)$$

Niyonbyum karbonitrür için 1000°C sıcaklıkta Gibbs serbest enerji (ΔG°) değeri:

$$\Delta G^\circ (\text{Nb}_2\text{CN}) = -214719,48 \text{ J/mol} \quad (6.13)$$

6.5. Mikroyapı İncelemeleri

6.5.1. Optik mikroyapı incelemeleri

Kaplanan numuneler, metalografik inceleme için kaplanmış yüzeyler görünecek şekilde bakalite alınmışlardır. Bu numuneler 100, 220, 400, 800, 1000 ve 1200

grid'lik zımparalama işlemlerinden sonra 1 μ ' luk alümina pasta kullanılarak parlatma işlemine tabi tutulmuşlardır. Metalografik olarak parlatılmış olan yüzeyler %2' lik nitalle dağlanarak mikroyapılar ortaya çıkarılmıştır.

Hazırlanan numuneler NIKON ECLIPSE L150 marka optik mikroskop ile incelenmiştir. Yüzeye yakın olan Nb-Al-N fazı dağlama ile elde edilen renk farkından dolayı ayırt edilmiştir. Ayrıca tabaka kalınlıkları NIKON ECLIPSE L150 marka optik mikroskop cihazının bünyesinde bulunan mikrometre yardımıyla ölçülmüştür. Tabaka kalınlığı, numunelerin iki kenarında en az beş ölçüm yapılarak gerçekleştirilmiştir.

6.5.2. Tarama elektron mikroskobu ve elementel analiz incelemesi

Kaplama tabakalarının mikroyapı görüntülerinin çıkartılmasında, JEOL JSM – 6060 LV marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Ayrıca kaplama tabakasının belirli bölgelerinden elementel analiz değerlerinin belirlenmesi, taramalı elektron mikroskobuna (SEM) kombine edilmiş EDS (Electron Dispersive Spectroscopy) yardımıyla gerçekleştirilmiştir.

6.5.3. AFM incelemeleri

530 °C'de 12 saat süreyle gaz nitrasyona tabii tutulmuş, 1000 °C'de 2 saat süreyle Nb-Al-N kaplanmış %2,0 alüminyum içeren AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çeliklerine ait yüzey topografyaları atomik kuvvet mikroskobunda (AFM) incelenmiştir. Çalışmalar Quesant marka AFM cihazında 1000 piksel çözünürlükte, 3Hz. Hızda ve 40x40 μ m²lik alan taranarak gerçekleştirilmiştir.

6.5.4. Sertlik deneyleri

Kaplama tabakalarının ve matrisin sertlik dağılımları FutureTech FM 700 marka mikrosertlik cihazında Knoop sertlik ucu kullanılarak 10 gr. yük altında gerçekleştirilmiştir. Ölçme işlemi tabaka kalınlıkları ince olduğundan sadece

yüzeyden ve her bir numuneden en az üç değişik noktadan alınarak yapılmıştır. Sertlik ölçümleri, değişen alüminyum oranına bağlı olarak gerçekleştirilmiştir.

6.5.5. Aşınma deneyleri

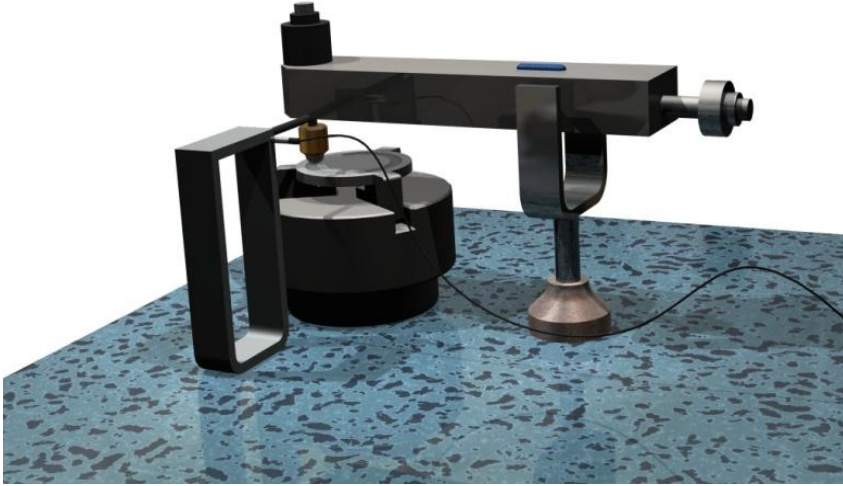
Aşınma deneyleri ASTM G-99 standardına uygun olarak imal edilmiş tribometre cihazında (Şekil 6.4) gerçekleştirilmiştir. Deneyler Ball-On Disk metoduyla, 10 mm çapında alümina bilyeler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneyleri 2.5N, 5N ve 10N yükler altında 180 m mesafede, 0.1 m/s, 0.3 m/s ve 0.5 m/s hızlarda gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneyleri sonrasında aşındırıcı bilyede ve kaplanmış çelikte oluşan aşınma izleri optik mikroskop, SEM ve profilometre yardımıyla incelenmişlerdir.

Tablo 6.1. Aşınma hızı hesaplamalarında kullanılan değişken ve bağıntılar

Aşınma Değişkeni	Birimi	Tanımı
L	(mm)	Hasar iz kalınlığı
R	(mm)	Aşındırıcı bilye yarıçapı
S	(mm ²)	Hasar alanı
V	(mm ³)	Hasar hacmi
R	(mm)	Aşınma iz yarıçapı
θ	(radyan)	Kesim açısı
W	(mm ³ /m)	Aşınma oranı
D	(μm)	Hasar derinliği

$$\theta = 2 \arcsin\left(\frac{L}{6}\right), \quad S = \frac{1}{2} r^2 (\theta - \sin \theta), \quad V = 2\pi \left(R + \frac{L}{2}\right) \cdot S,$$

$$W = \left(\frac{V}{\text{Toplam yol}}\right), \quad d = r - \sqrt{r^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2}$$

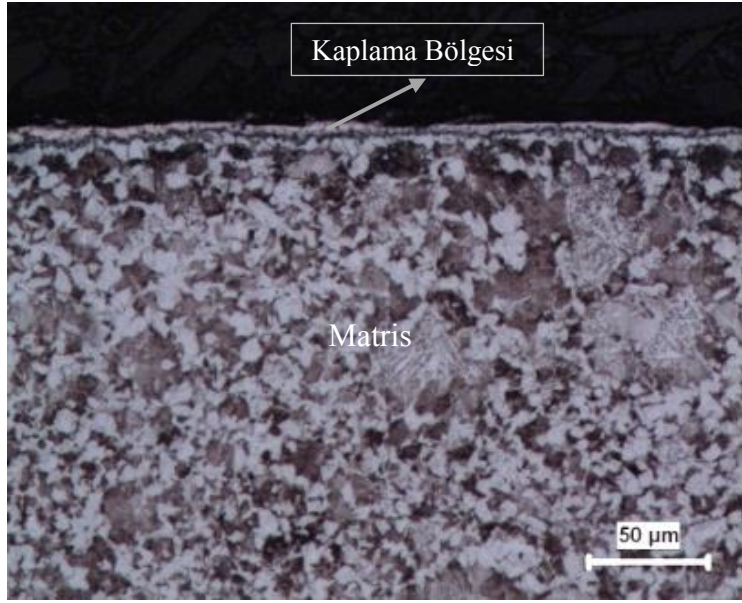


Şekil 6.4. Aşınma cihazının şematik gösterimi

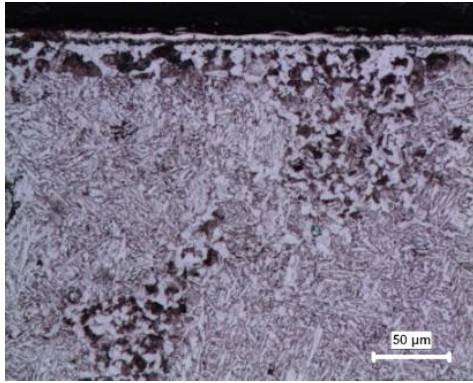
BÖLÜM 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1. Mikroyapı İncelemeleri

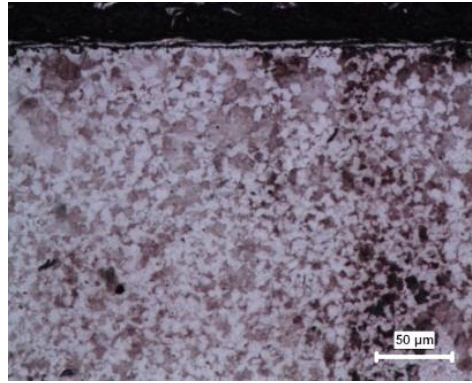
Şekil 7.1.-7.9'da, 1000 °C sıcaklıkta 1, 2 ve 4 saat sürelerle Nb-N ve değişik oranlarda alüminyum ilave edilmiş Nb-Al-N kaplanmış AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çelikleri üzerinde oluşturulan kaplamaların optik mikroyapı görüntüleri görülmektedir. Mikroyapı görüntülerinin gruplandırılmasında kaplama sıcaklığı ve süresi sabit tutularak kaplama banyosuna ilave edilen Al miktarına göre gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı görüntüleri incelendiğinde; altlık malzemelerin mikroyapıları ile üzerlerinde oluşan kaplama görüntüleri kontrast farklılığı göstermektedir. Kaplama tabakaları açık renkli olarak, mikroyapıda belirgin bir şekilde görülmektedir. Kaplama tabakası altlık malzeme üzerinde sürekli ve homojen bir yapıdadır.



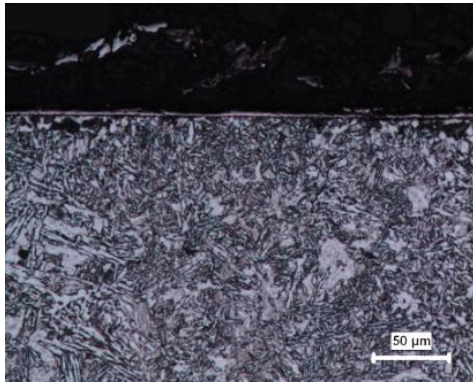
a)



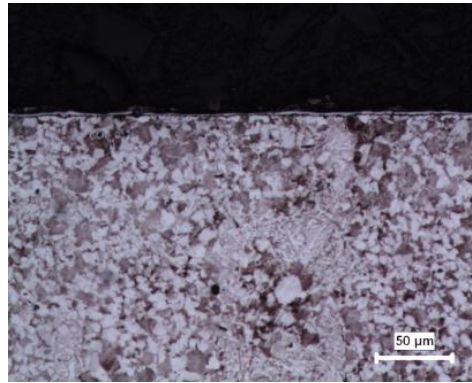
b)



c)

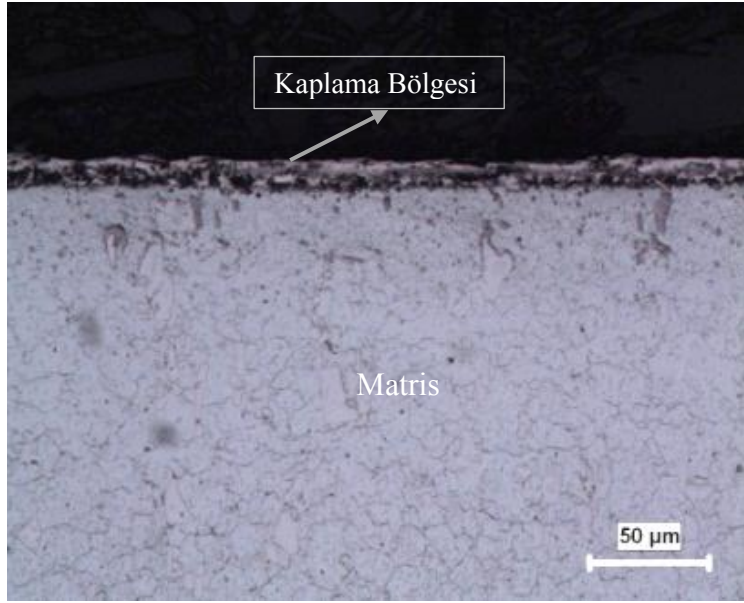


d)

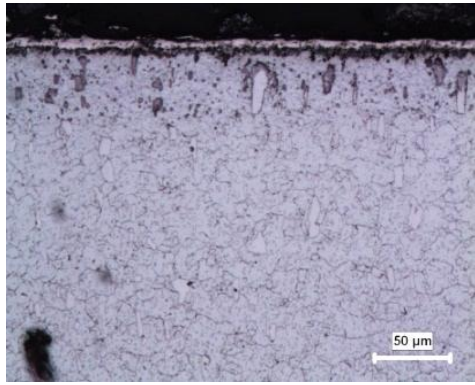


e)

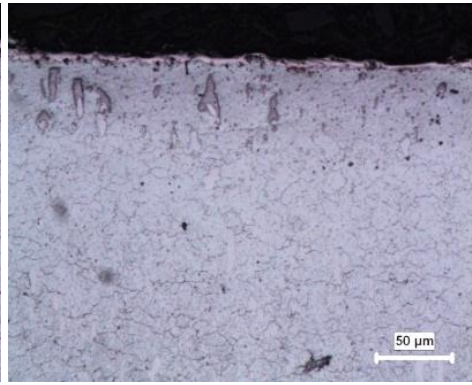
Şekil 7.1. 1 saat süre ile kaplama işlemine tabii tutulan AISI 4140 çeliği için a) katkısız, b)%0.5 Al, c)%1 Al, d) %1.5 Al ve e)%2Al oranlarda alüminyum içeren Nb-N ve Nb-Al-N esaslı kaplamaların optik mikroyapı görüntüleri



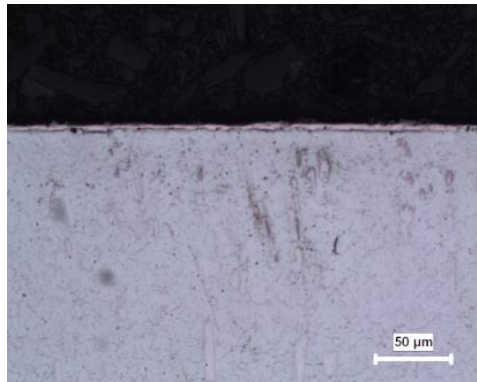
a)



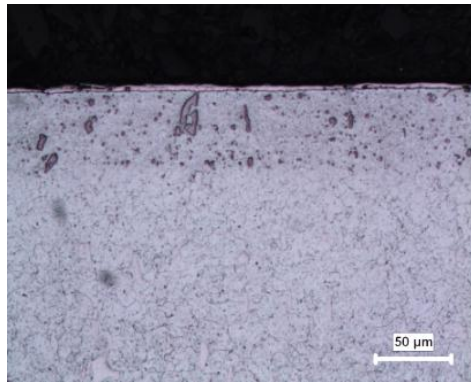
b)



c)

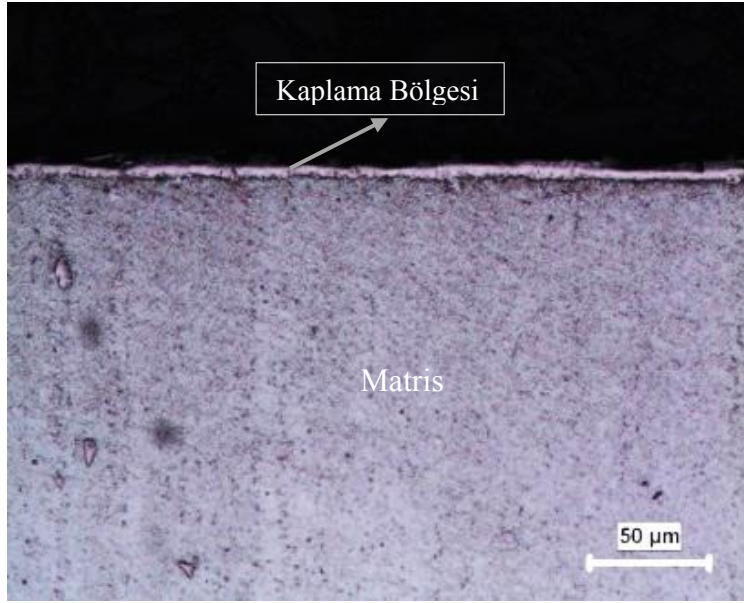


d)

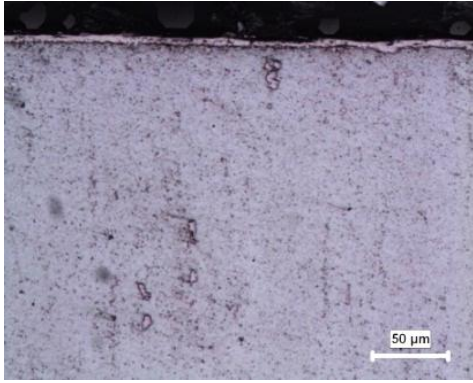


e)

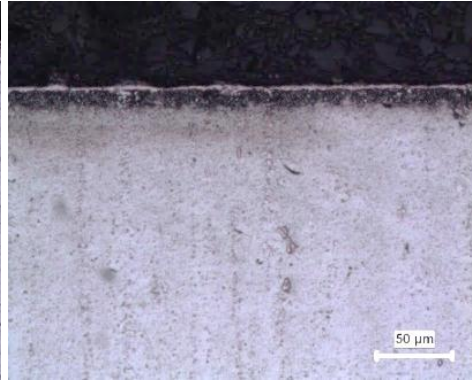
Şekil 7.2. 1 saat süre ile kaplama işlemine tabii tutulan AISI D2 çeliği için a) katkısız, b)%0.5 Al, c)%1 Al, d) %1.5 Al ve e)%2Al oranlarda alüminyum içeren Nb-N ve Nb-Al-N esaslı kaplamaların optik mikroyapı görüntüleri



a)



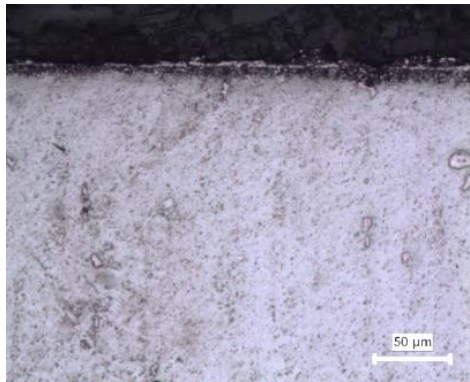
b)



c)

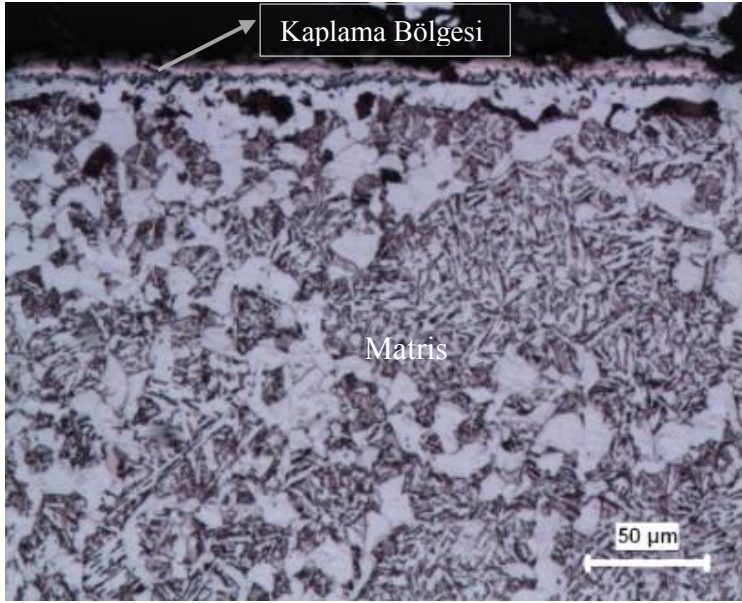


d)

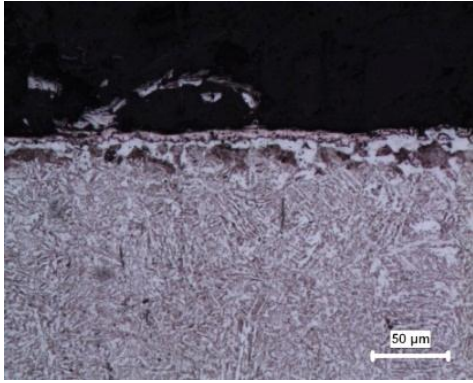


e)

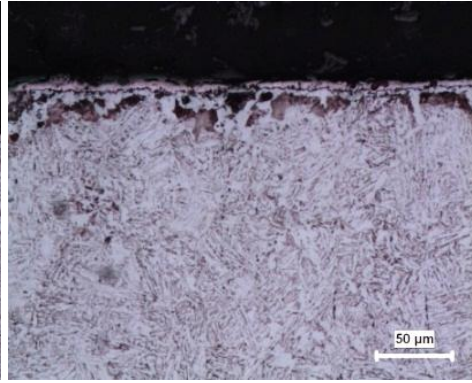
Şekil 7.3. 1 saat süre ile kaplama işlemine tabii tutulan AISI M2 çeliği için a) katkısız, b)%0.5 Al, c)%1 Al, d) %1.5 Al ve e)%2Al oranlarda alüminyum içeren Nb-N ve Nb-Al-N esaslı kaplamaların optik mikroyapı görüntüleri



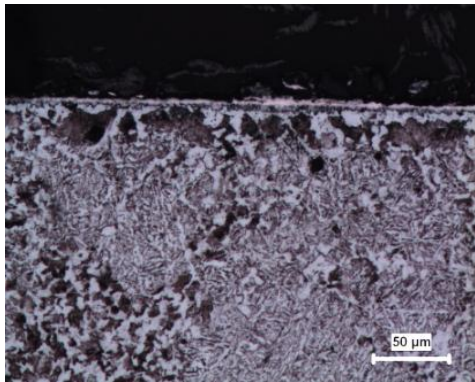
a)



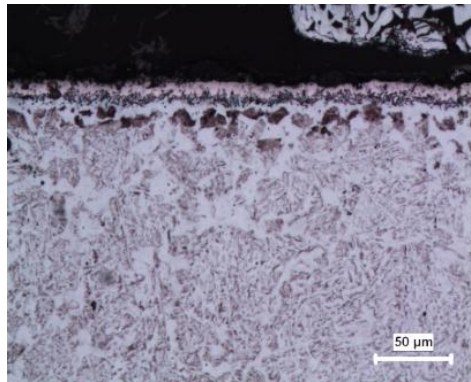
b)



c)

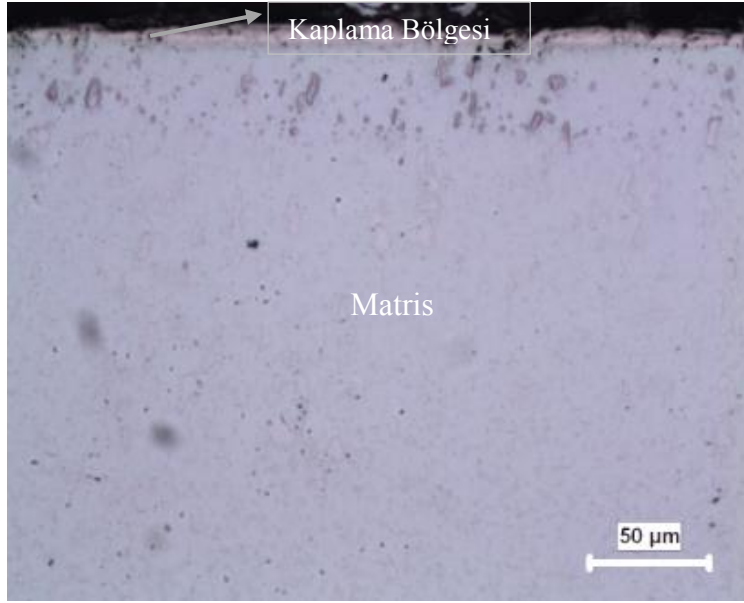


d)

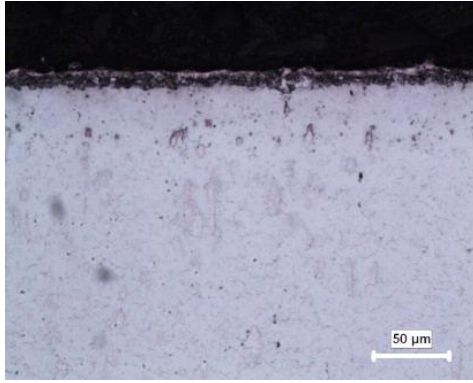


e)

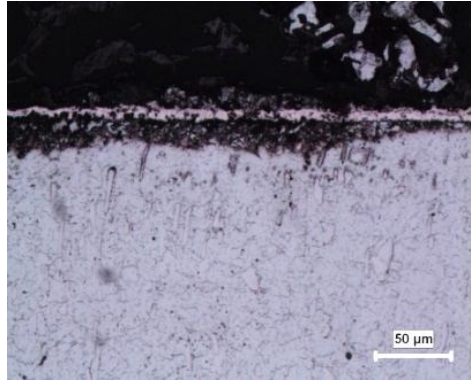
Şekil 7.4. 2 saat süre ile kaplama işlemine tabii tutulan AISI 4140 çeliği için a) katkısız, b)%0.5 Al, c)%1 Al, d) %1.5 Al ve e)%2Al oranlarda alüminyum içeren Nb-N ve Nb-Al-N esaslı kaplamaların optik mikroyapı görüntüleri



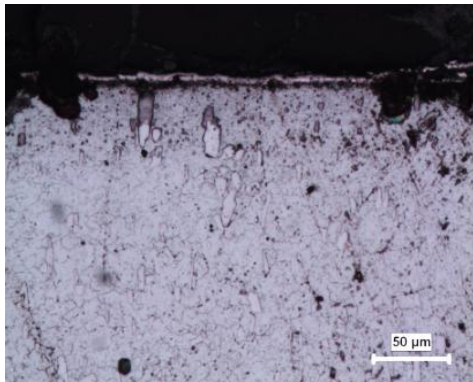
a)



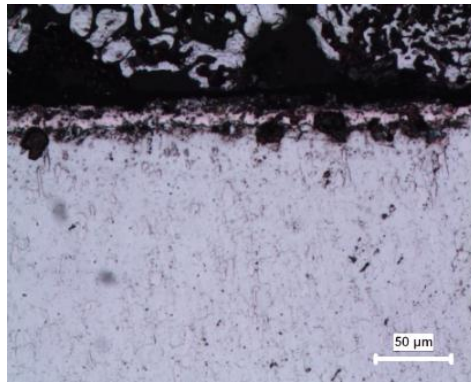
b)



c)

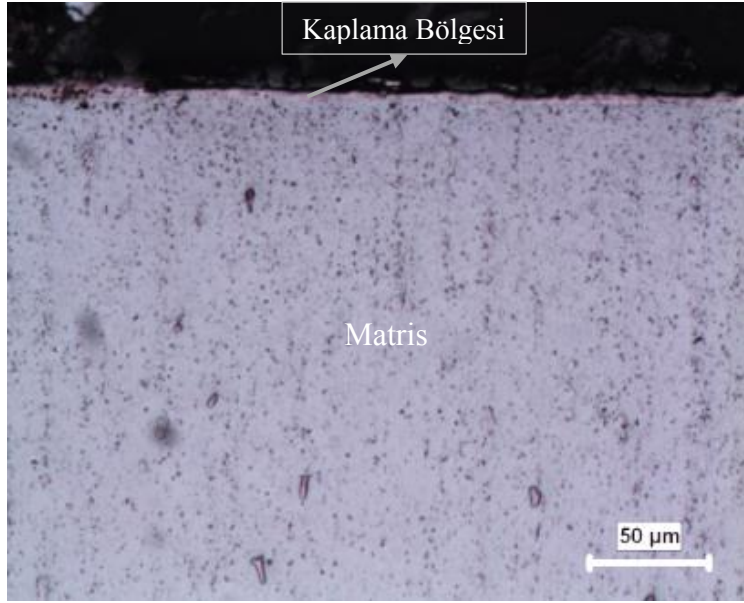


d)

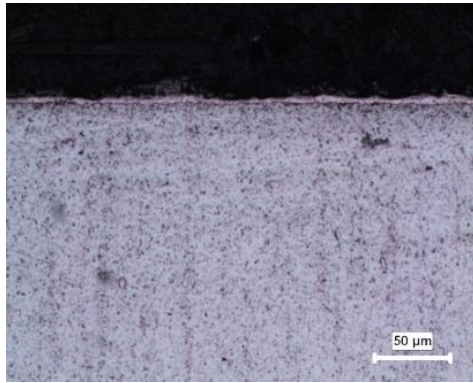


e)

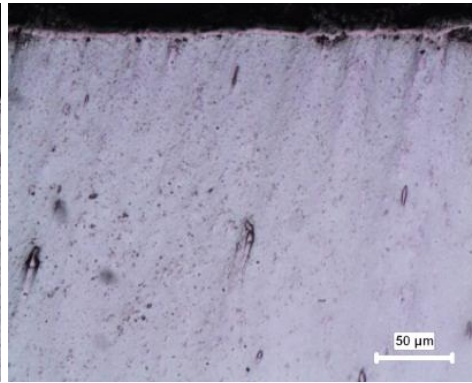
Şekil 7.5. 2 saat süre ile kaplama işlemine tabii tutulan AISI D2 çeliği için a) katkısız, b)%0.5 Al, c)%1 Al, d) %1.5 Al ve e)%2Al oranlarda alüminyum içeren Nb-N ve Nb-Al-N esaslı kaplamaların optik mikroyapı görüntüleri



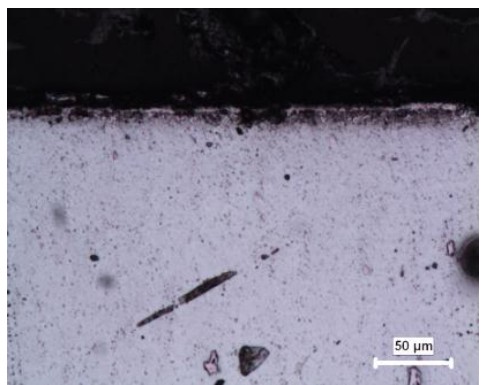
a)



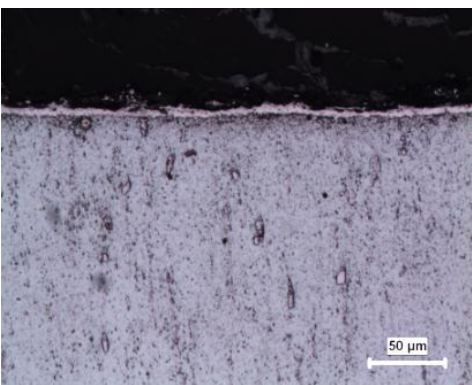
b)



c)

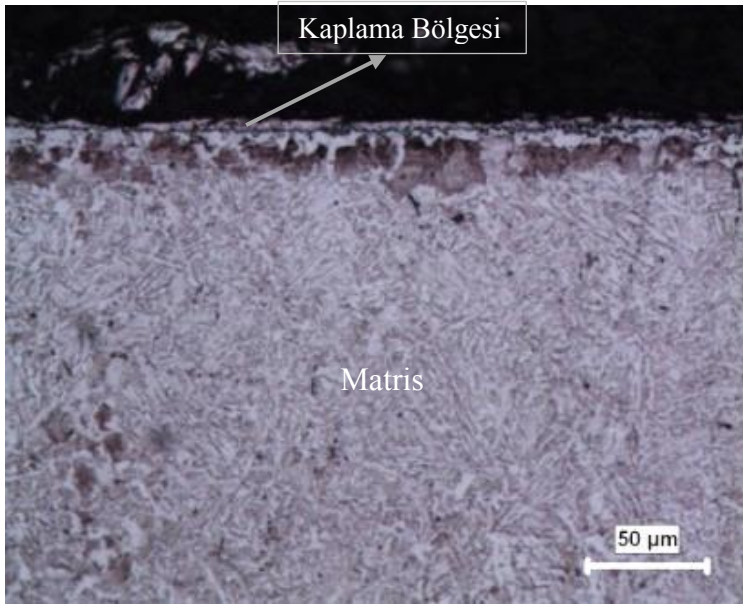


d)

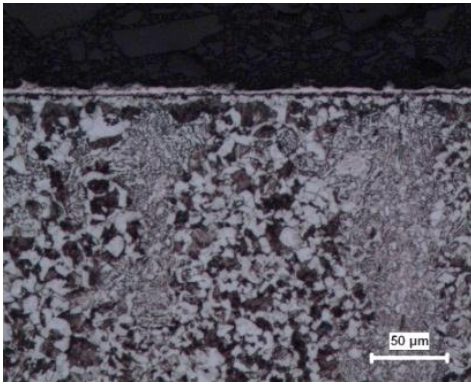


e)

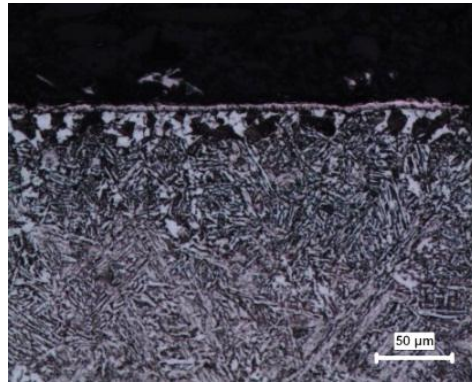
Şekil 7.6. 2 saat süre ile kaplama işlemine tabii tutulan AISI M2 çeliği için a) katkısız, b)%0.5 Al, c)%1 Al, d) %1.5 Al ve e)%2Al oranlarda alüminyum içeren Nb-N ve Nb-Al-N esaslı kaplamaların optik mikroyapı görüntüleri



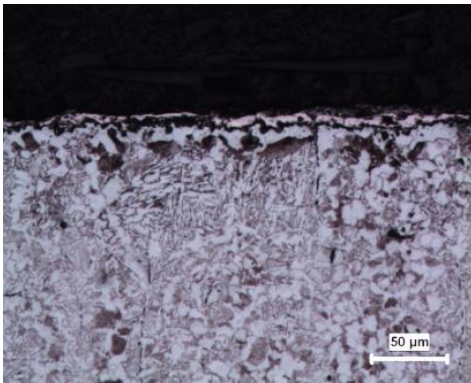
a)



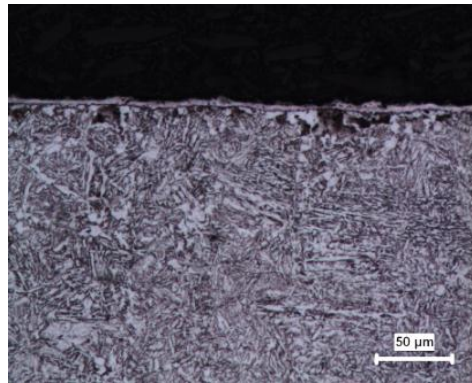
b)



c)

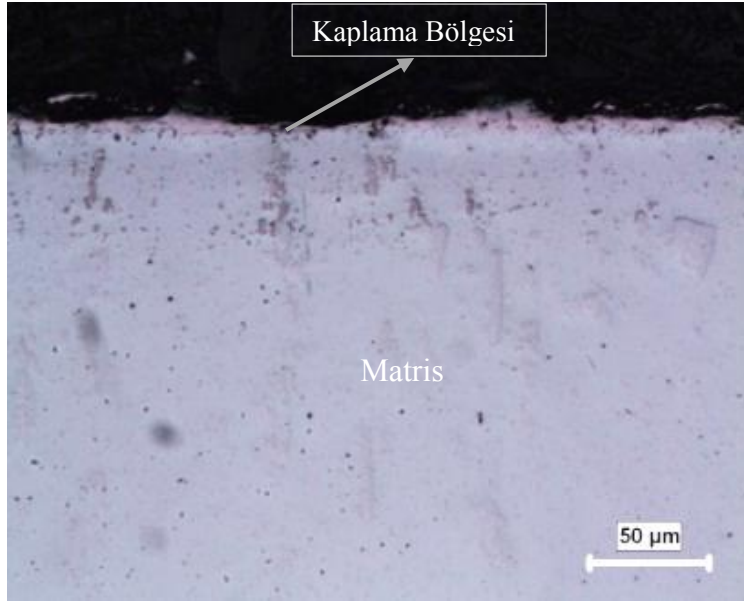


d)

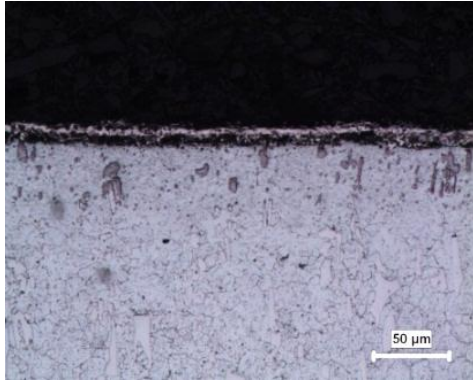


e)

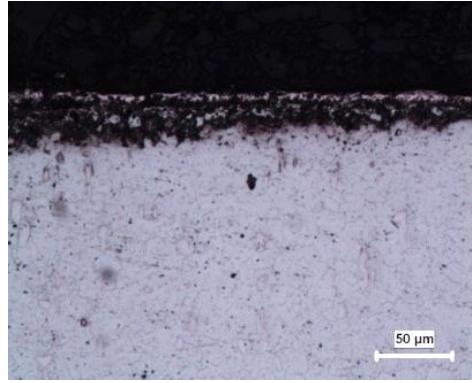
Şekil 7.7. 4 saat süre ile kaplama işlemine tabii tutulan AISI 4140 çeliği için a) katkısız, b)%0.5 Al, c)%1 Al, d) %1.5 Al ve e)%2Al oranlarda alüminyum içeren Nb-N ve Nb-Al-N esaslı kaplamaların optik mikroyapı görüntüleri



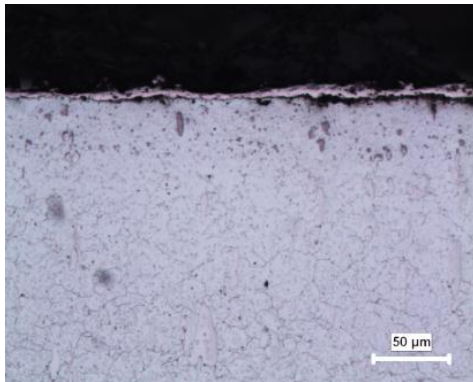
a)



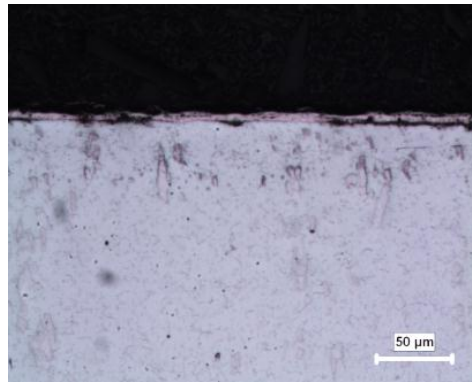
b)



c)

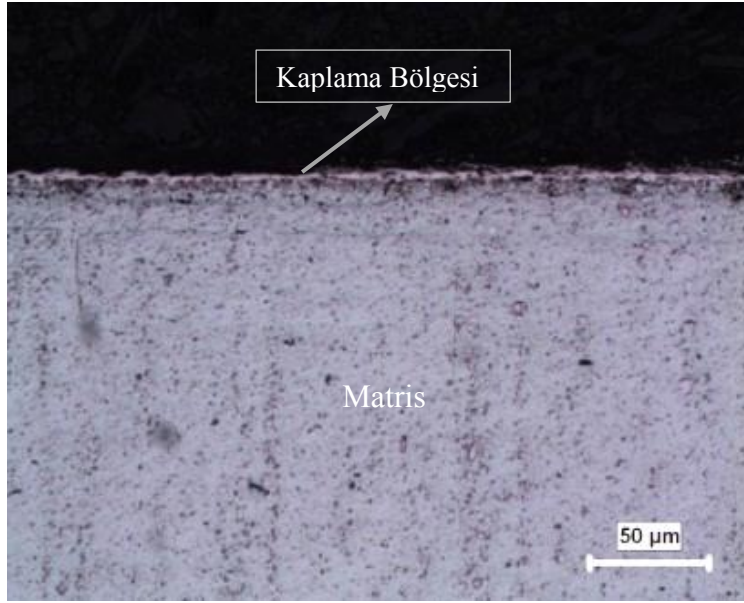


d)

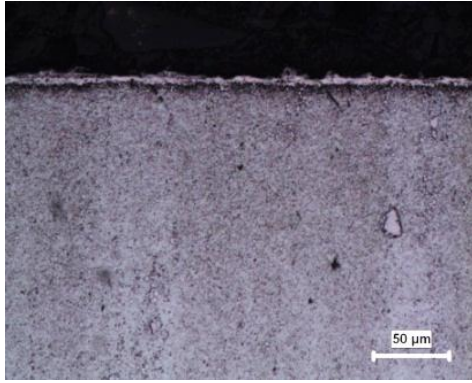


e)

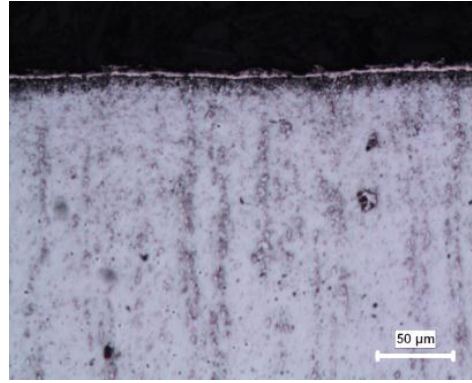
Şekil 7.8. 4 saat süre ile kaplama işlemine tabii tutulan AISI D2 çeliği için a) katkısız, b)%0.5 Al, c)%1 Al, d) %1.5 Al ve e)%2Al oranlarda alüminyum içeren Nb-N ve Nb-Al-N esaslı kaplamaların optik mikroyapı görüntüleri



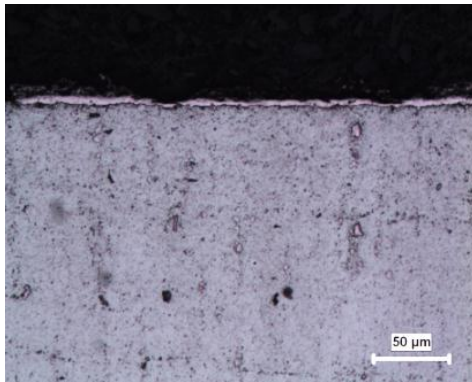
a)



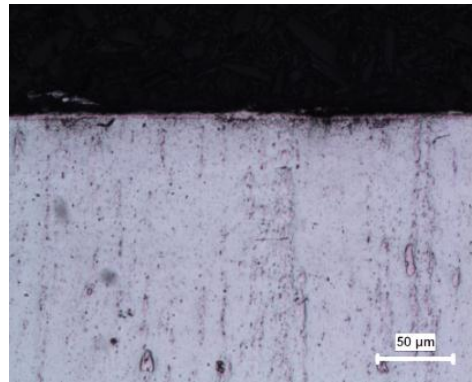
b)



c)



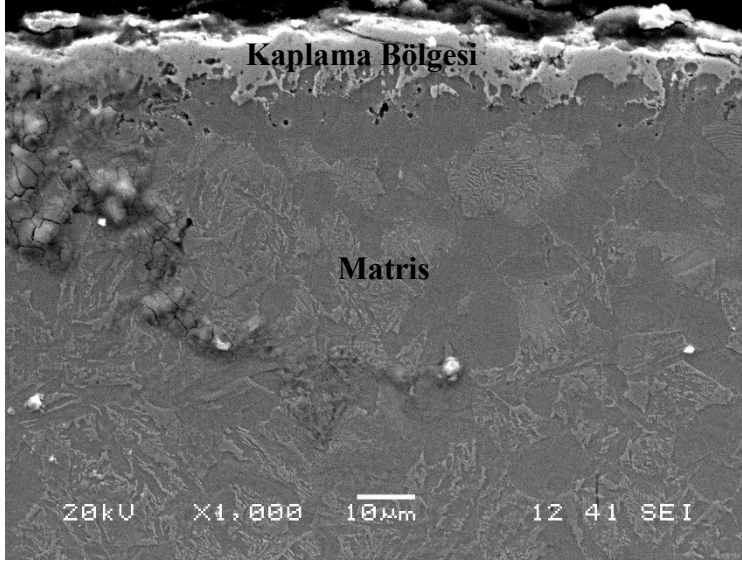
d)



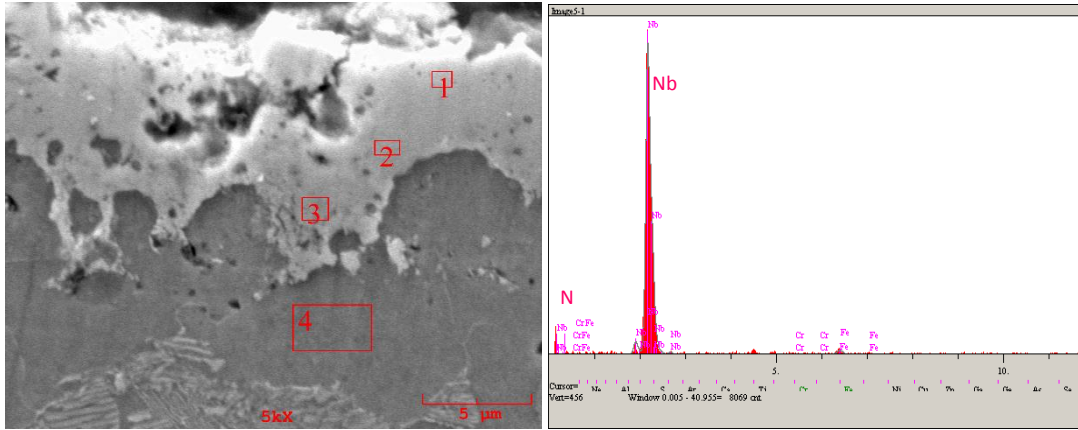
e)

Şekil 7.9. 4 saat süre ile kaplama işlemine tabii tutulan AISI M2 çeliği için a) katkısız, b)%0.5 Al, c)%1 Al, d) %1.5 Al ve e)%2Al oranlarda alüminyum içeren Nb-N ve Nb-Al-N esaslı kaplamaların optik mikroyapı görüntüleri

Şekil 7.10.-7.24.'te; AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çelikleri üzerine 1000 °C sıcaklıkta 2 saat süre ile Nb-N ve değişik oranlarda alüminyum ilave edilmiş Nb-Al-N kaplamalara ait SEM görüntüleri ve bölgelere bağlı olarak EDS analizleri görülmektedir. SEM mikroyapı görüntüleri incelendiğinde kaplama matris ara yüzeyinin klasik karbür esaslı TRD kaplamalara göre farklılık gösterdiği ve dalgalı bir yapı sergilediği görülmektedir [29]. Benzer davranış TRD tekniği ile kaplanmış TiN esaslı kaplamalarda da görülmüştür [30]. Çeliklerin içerdiği alaşım elementlerin miktarı arttıkça ve kaplama süresi kısaldıkça ara yüzeyin dalgalı yapısı daha düzgün bir yapı sergilemektedir. Kaplamaların belirli bölgelerinden alınan EDS analizlerine göre kaplama tabakalarının ana bileşen olarak Nb ve N elementlerini içerdiği, bununla birlikte, banyo bileşiminde bulunan Al içeriğine bağlı olarak Nb ve N elementlerinin yanında bir miktar Al elementinin bulunduğu görülmektedir. Altlık malzeme olarak kullanılan çeliklerin bileşiminde yer alan W, Cr, Mo gibi alaşım elementlerinin de kaplama tabakalarında bulunduğu EDS analizlerinde görülmektedir. Genel olarak kaplama tabakasının altında yer alan altlık malzemede ise çeliğin kimyasal bileşimi ile benzer bir elementel dağılım görülmektedir.

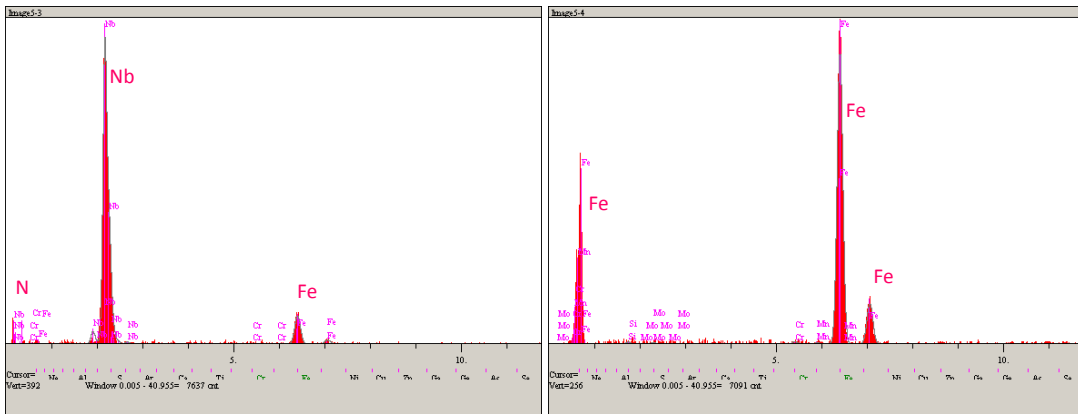


(a)



(b)

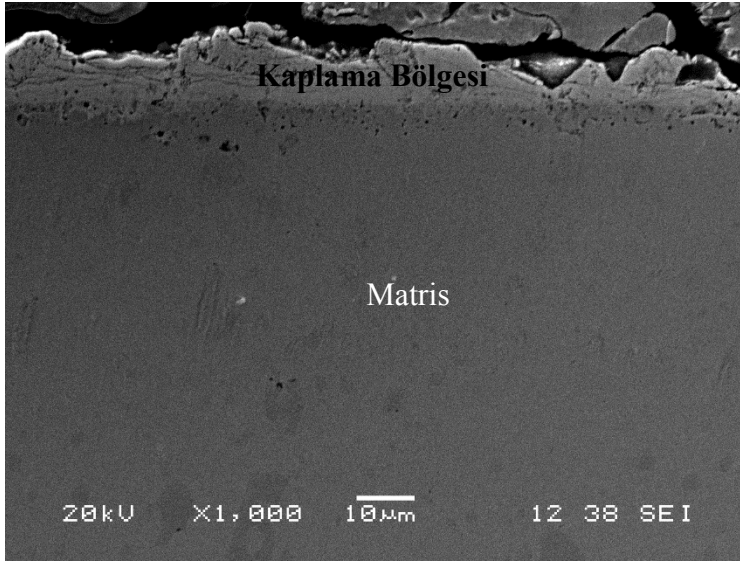
(c)



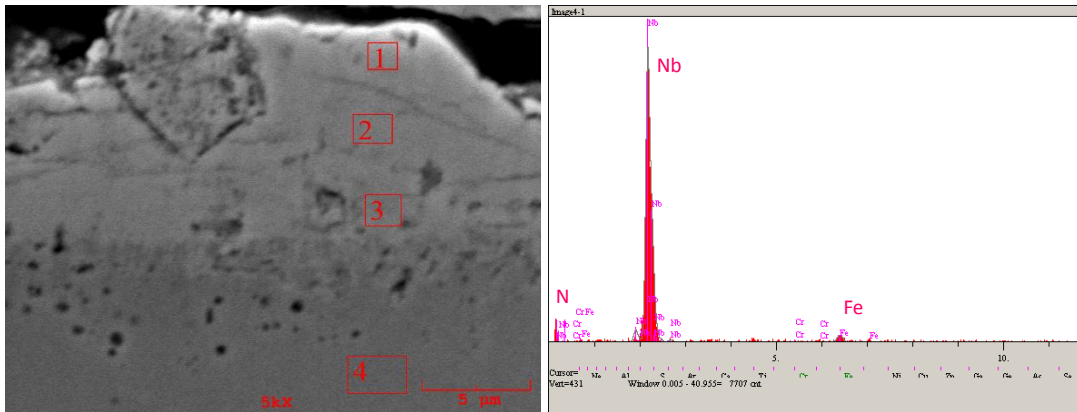
(d)

(e)

Şekil 7.10. 2 saat süreyle Nb-N kaplanmış AISI 4140 çeliğinin (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c), (d) ve (e) sırasıyla 1,2 ve 4 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir

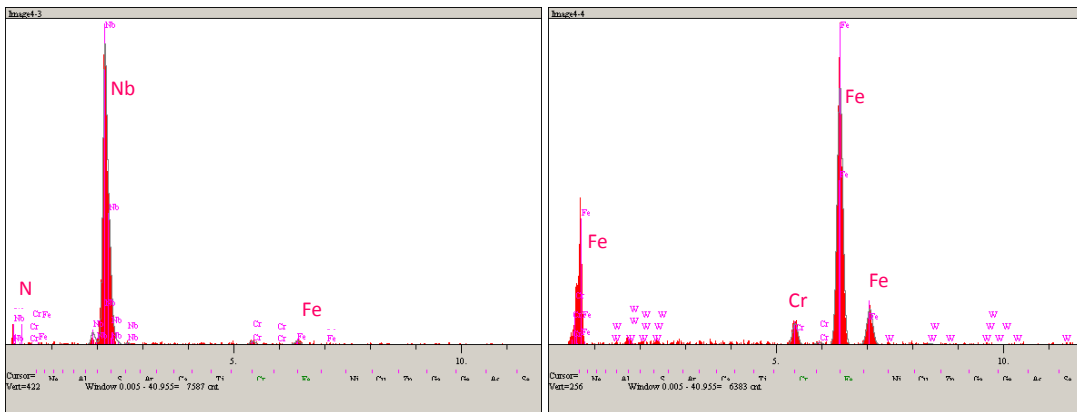


(a)



(b)

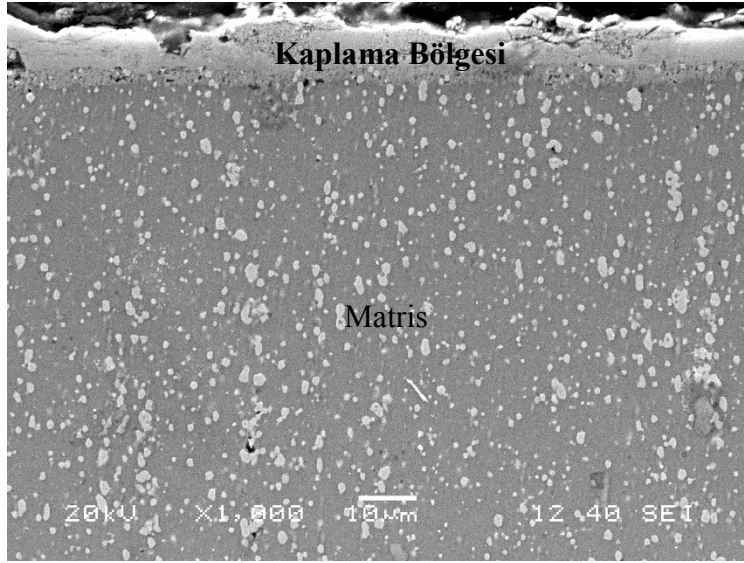
(c)



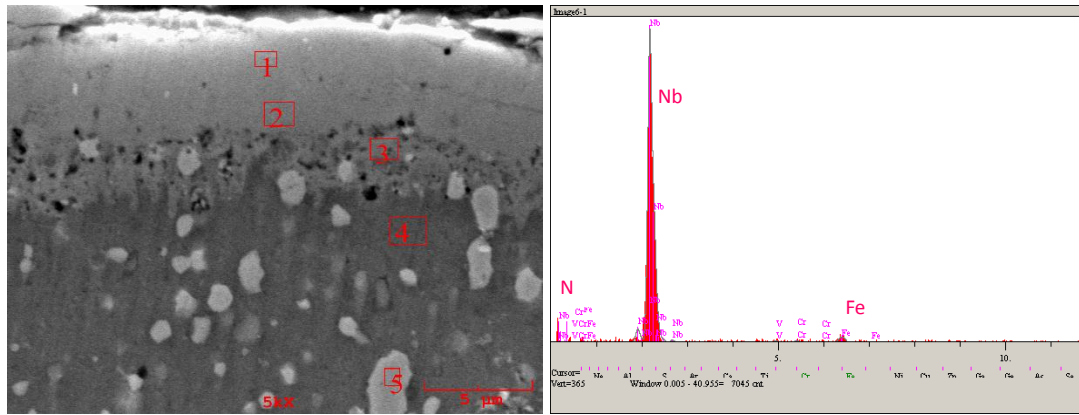
(d)

(e)

Şekil 7.11. 2 saat süreyle Nb-N kaplanmış AISI D2 çeliğinin (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c), (d) ve (e) sırasıyla 1,2 ve 4 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir

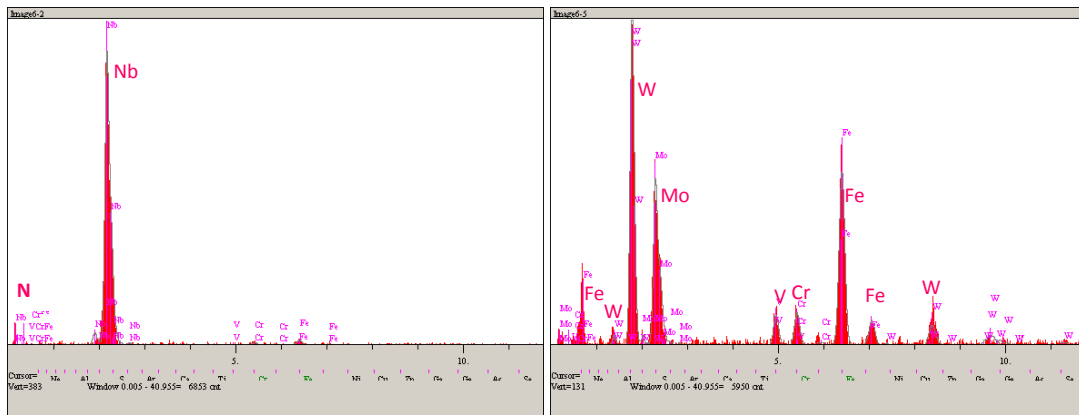


(a)



(b)

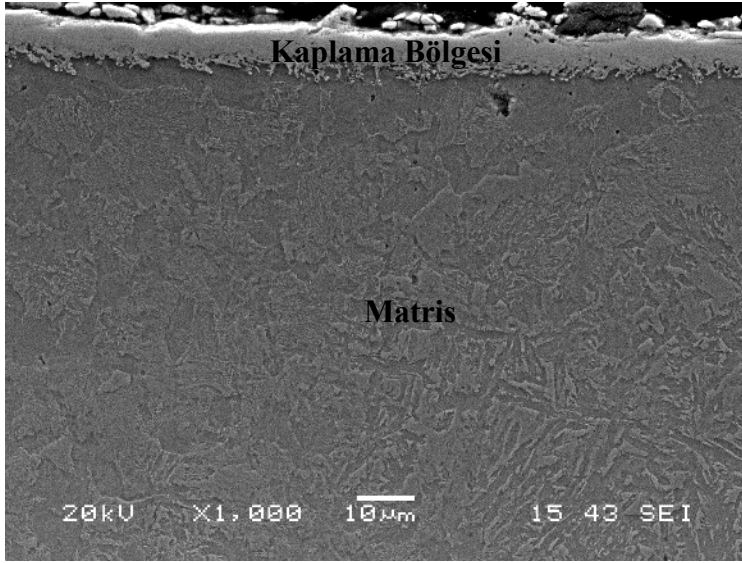
(c)



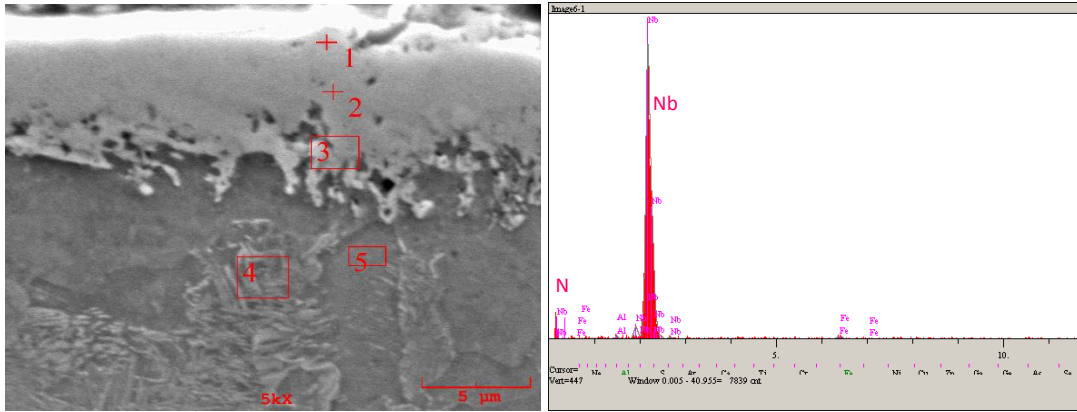
(d)

(e)

Şekil 7.12. 2 saat süreyle Nb-N kaplanmış AISI M2 çeliğinin (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c), (d) ve (e) sırasıyla 1,2 ve 5 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir

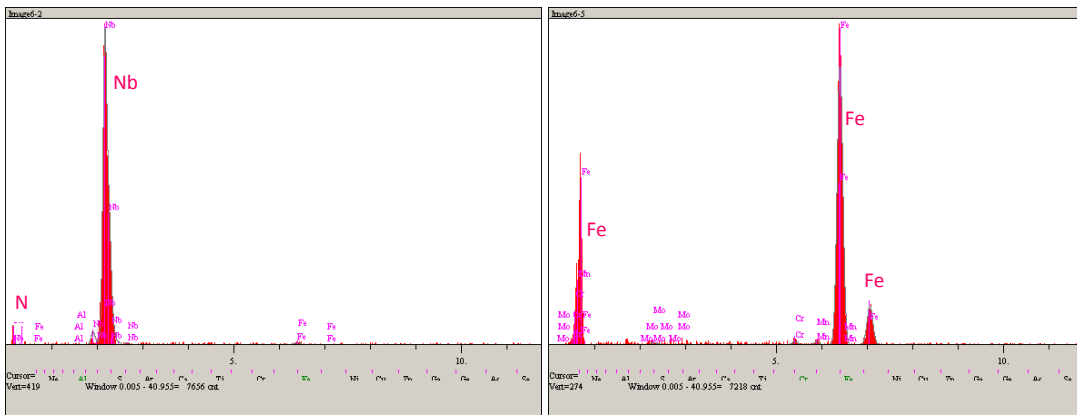


(a)



(b)

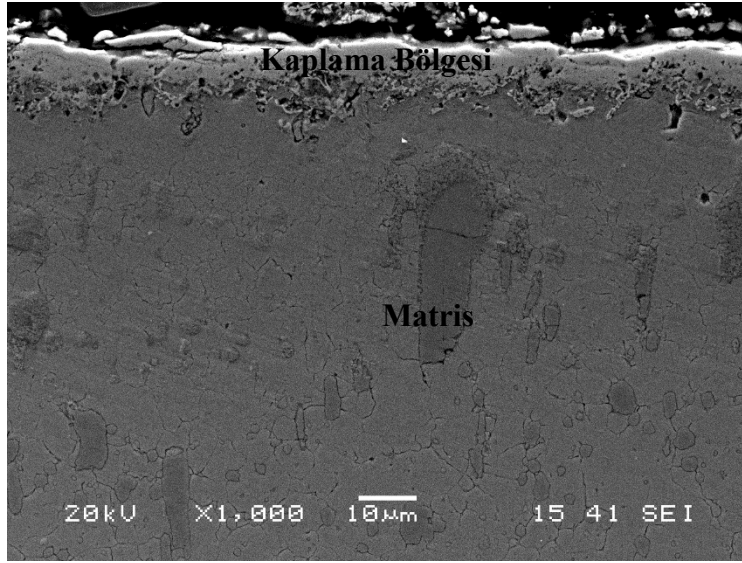
(c)



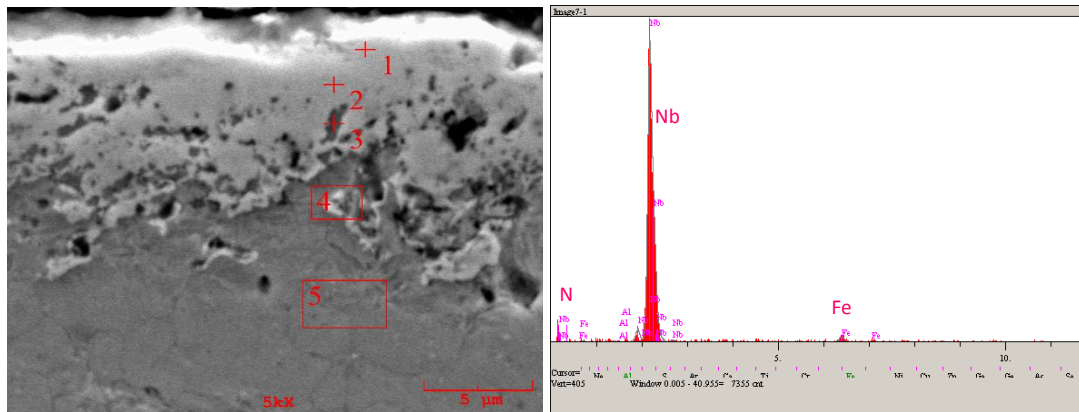
(d)

(e)

Şekil 7.13. 2 saat süreyle %0,5 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI 4140 çeliğinin (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c), (d) ve (e) sırasıyla 1,2 ve 5 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir

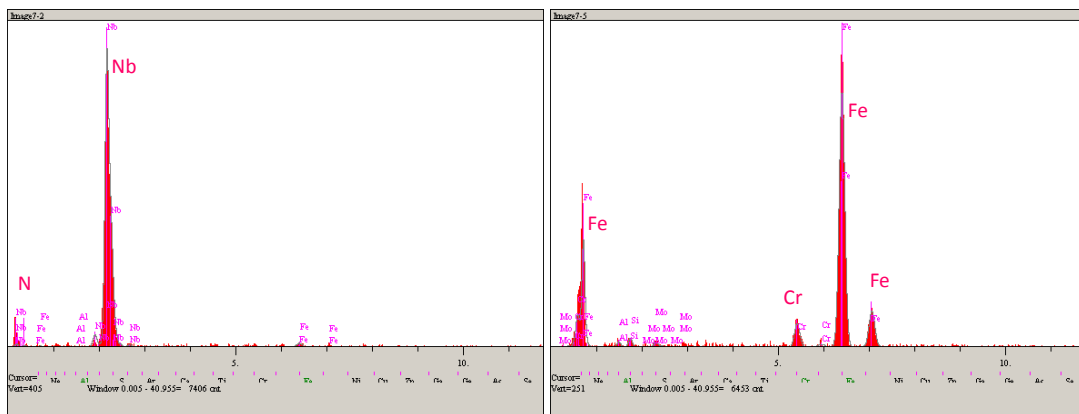


(a)



(b)

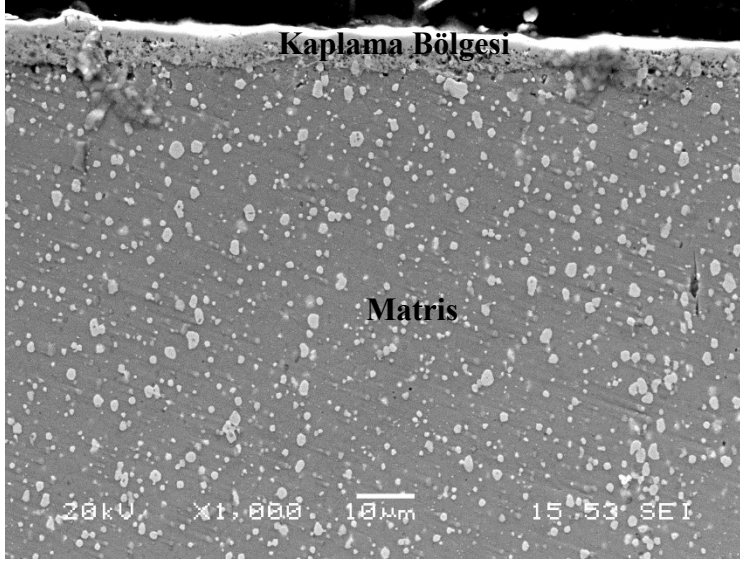
(c)



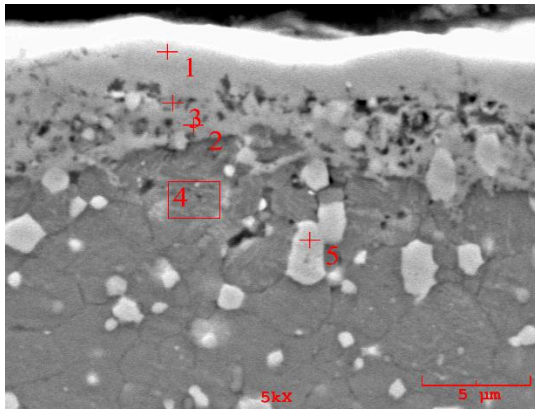
(d)

(e)

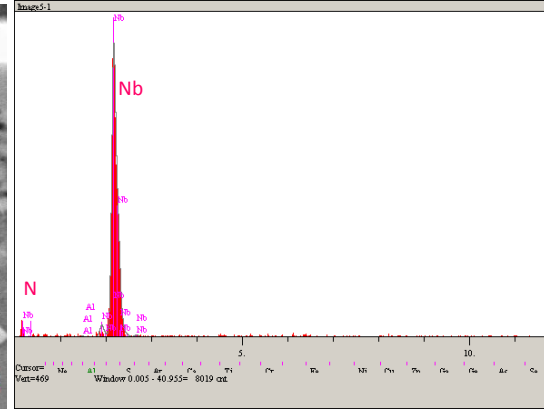
Şekil 7.14. 2 saat süreyle %0,5 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI D2 çeliğinin (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c), (d) ve (e) sırasıyla 1,2 ve 5 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir



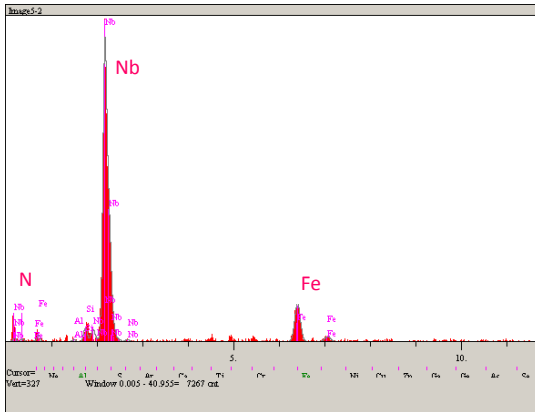
(a)



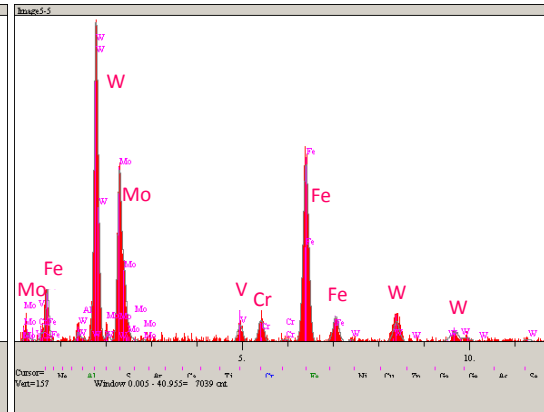
(b)



(c)

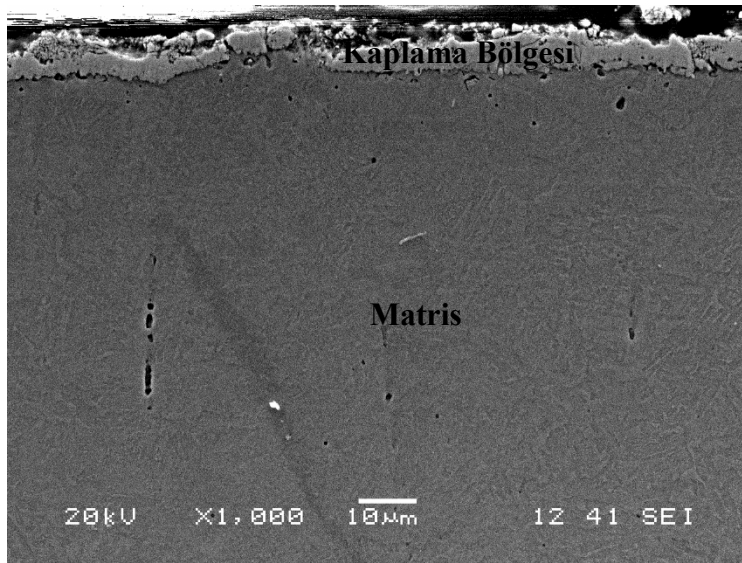


(d)

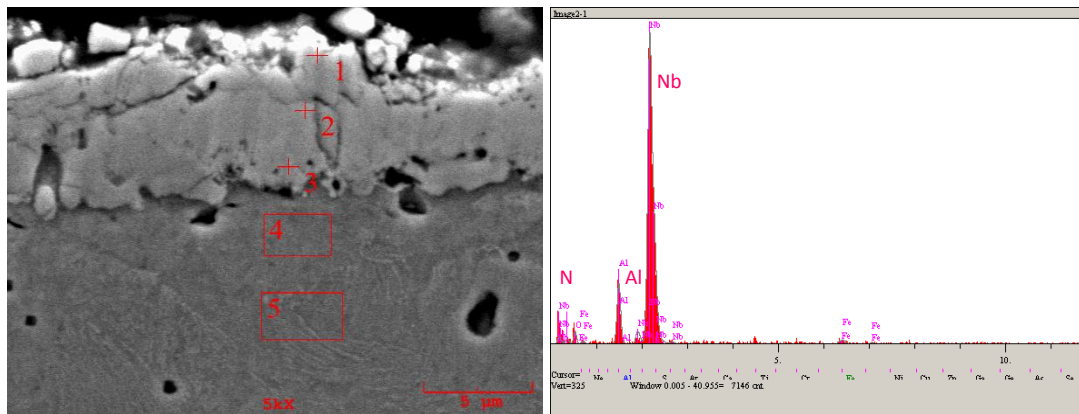


(e)

Şekil 7.15. 2 saat süreyle %0,5 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI M2 çeliğinin (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c), (d) ve (e) sırasıyla 1,2 ve 5 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir

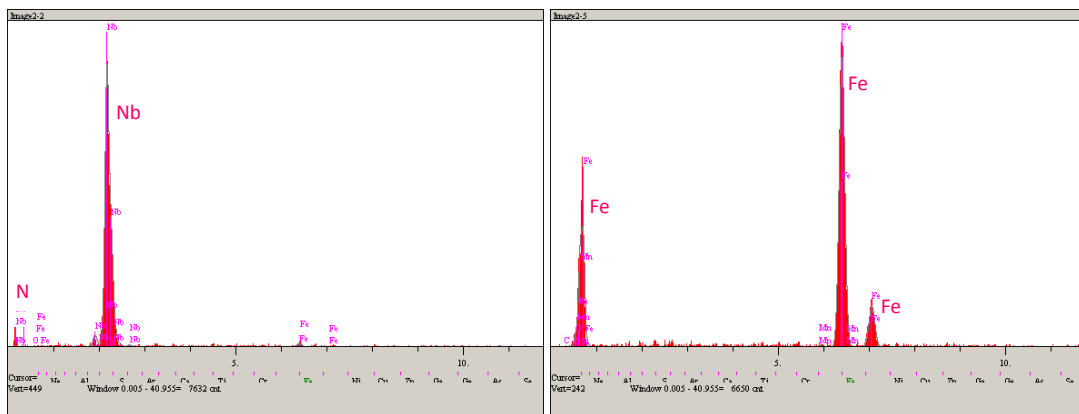


(a)



(b)

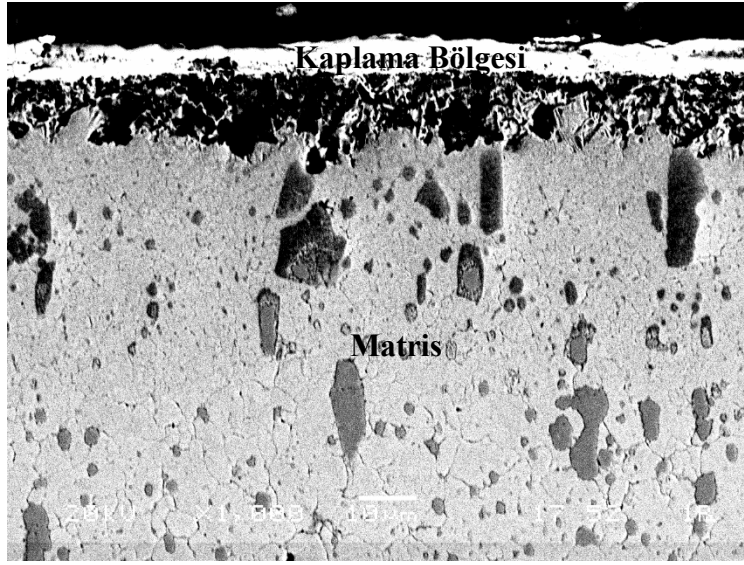
(c)



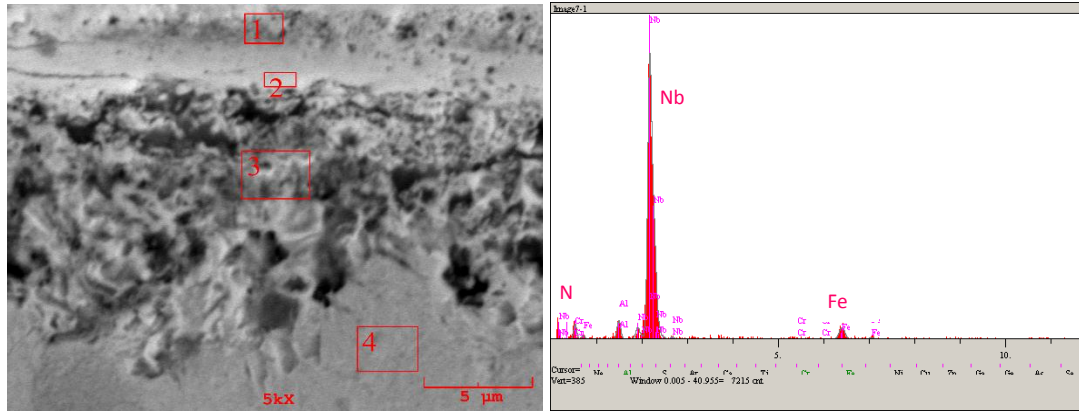
(d)

(e)

Şekil 7.16. 2 saat süreyle %1,0 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI 4140 çeliğinin (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c), (d) ve (e) sırasıyla 1,2 ve 5 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir

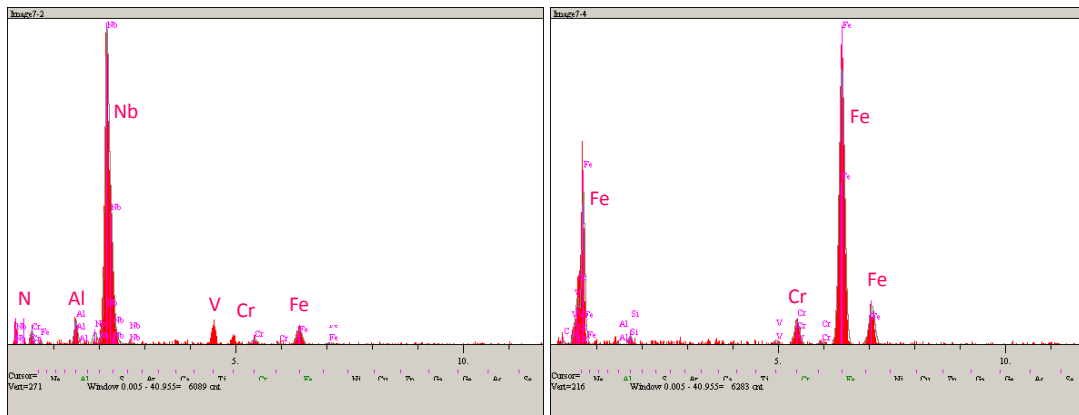


(a)



(b)

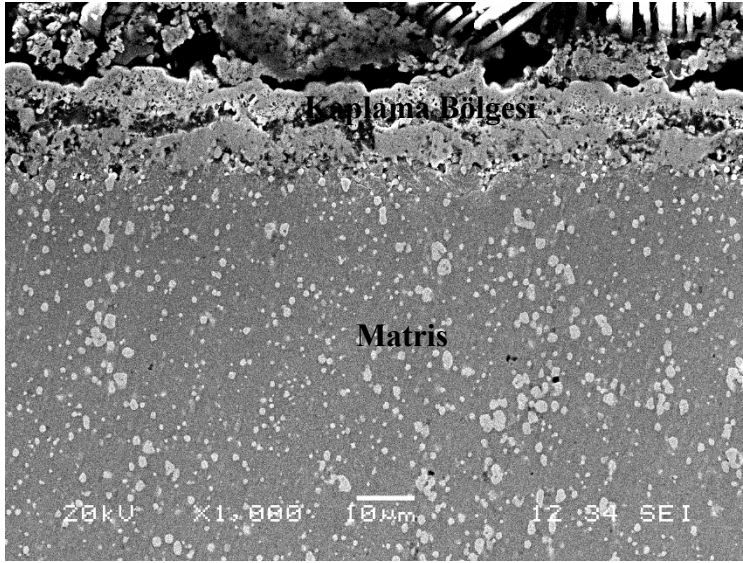
(c)



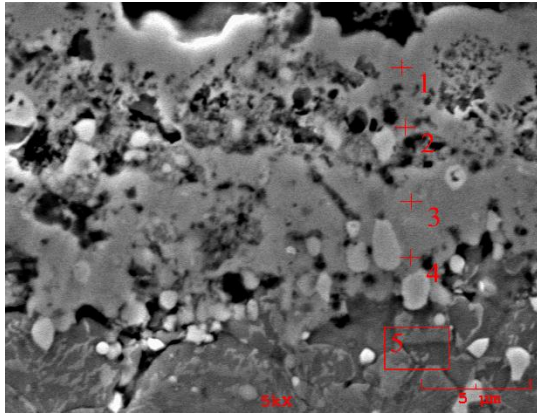
(d)

(e)

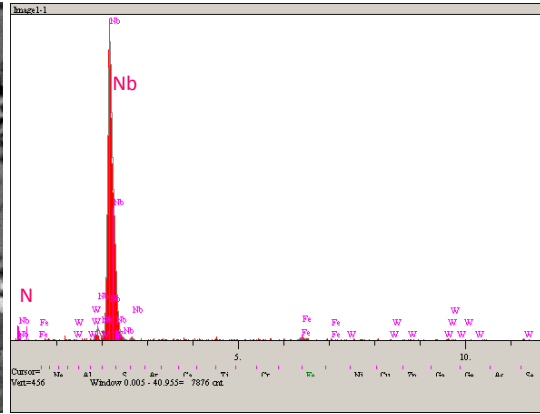
Şekil 7.17. 2 saat süreyle %1,0 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI D2 çeliğinin (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c), (d) ve (e) sırasıyla 1,2 ve 4 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir



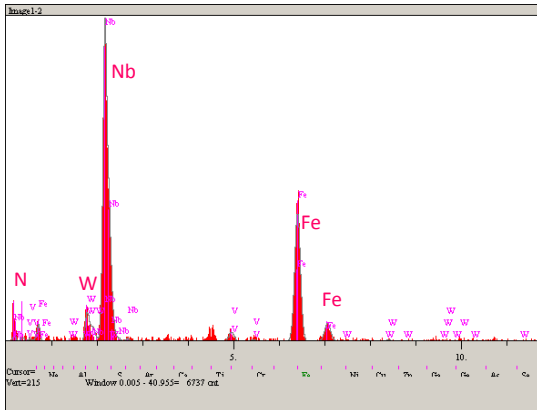
(a)



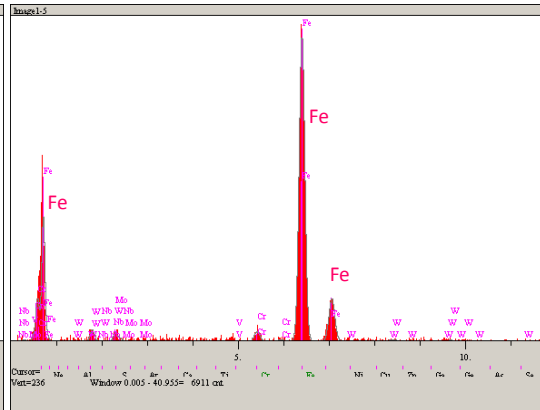
(b)



(c)

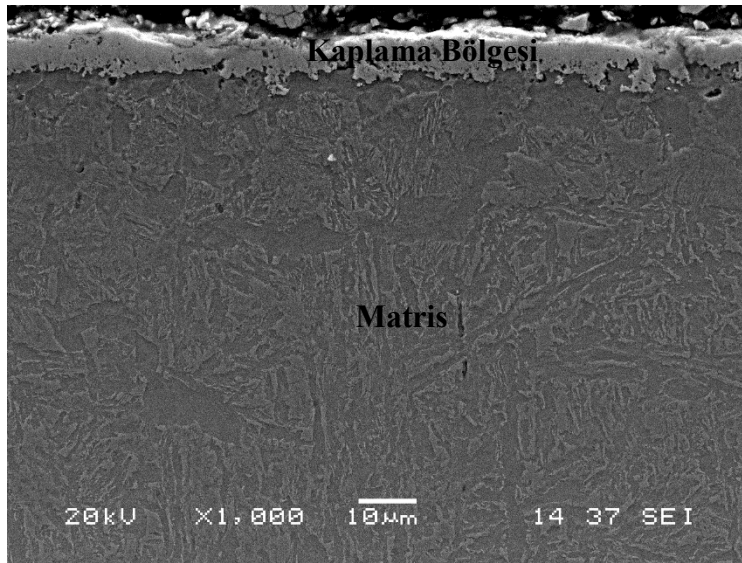


(d)

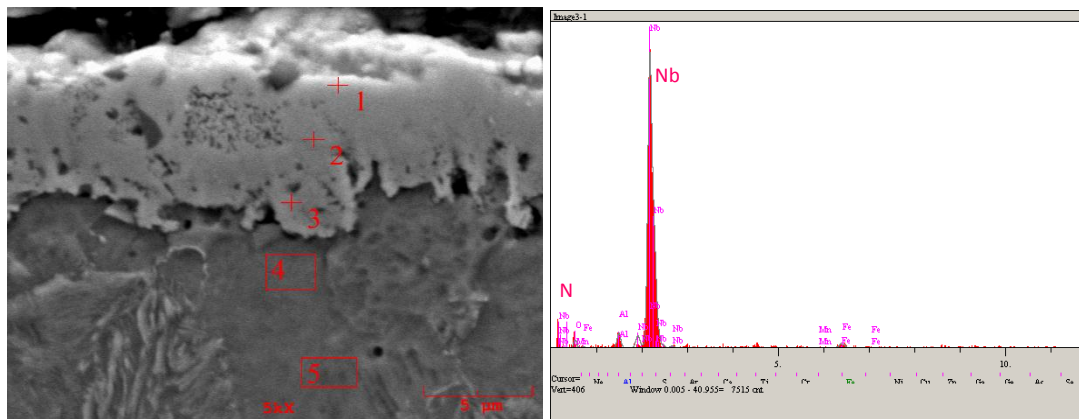


(e)

Şekil 7.18. 2 saat süreyle %1,0 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI M2 çeliğinin (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c), (d) ve (e) sırasıyla 1,2 ve 5 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir

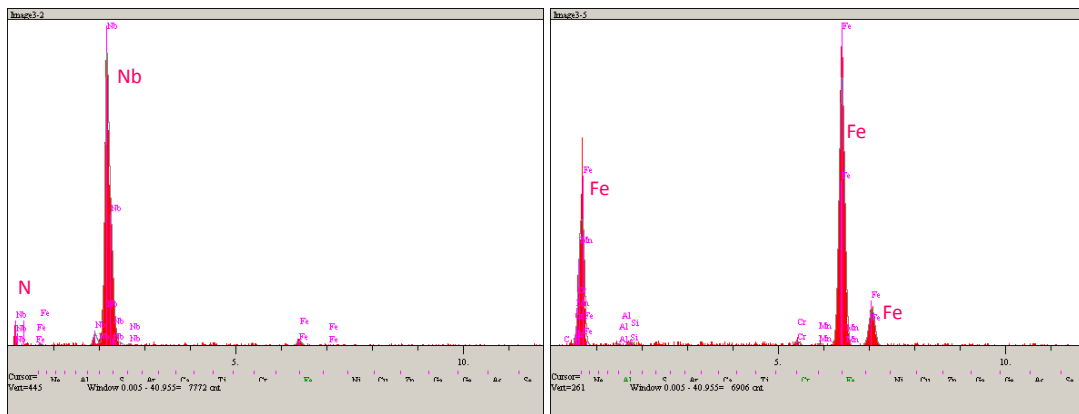


(a)



(b)

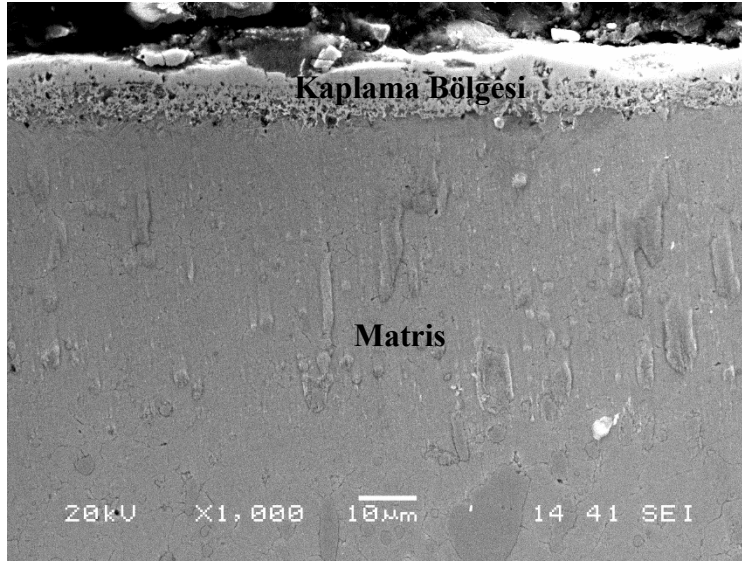
(c)



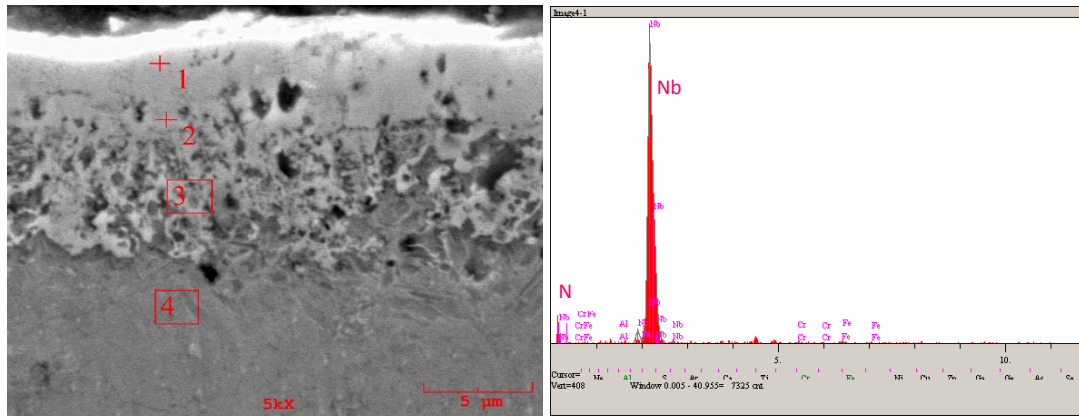
(d)

(e)

Şekil 7.19. 2 saat süreyle %1,5 alüminyum ilaveli Nb-Al-Nkapanmış AISI 4140 çeliğinin (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c), (d) ve (e) sırasıyla 1,2 ve 5 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir

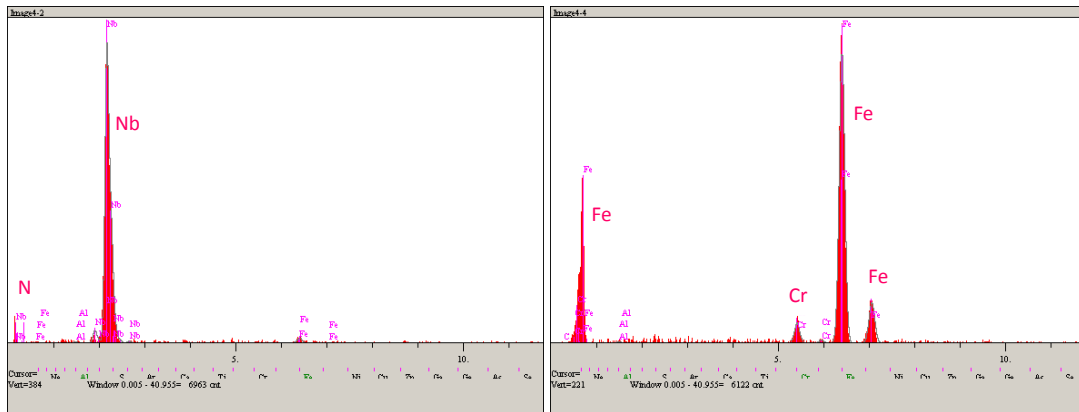


(a)



(b)

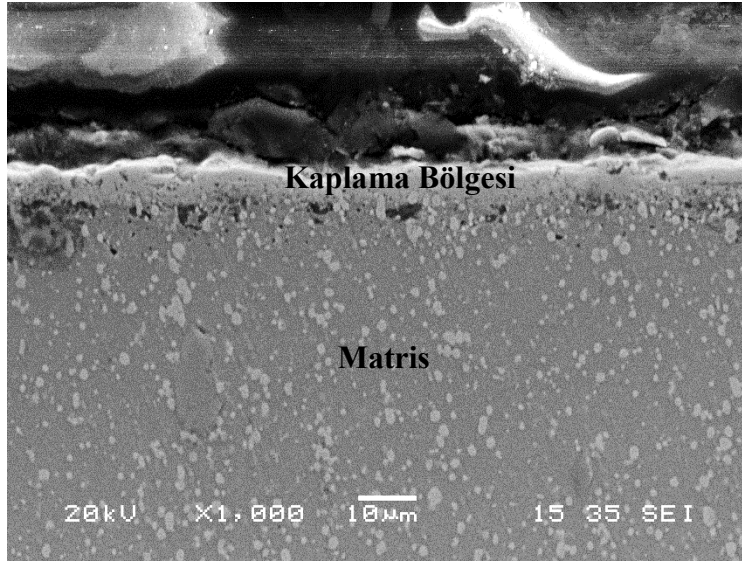
(c)



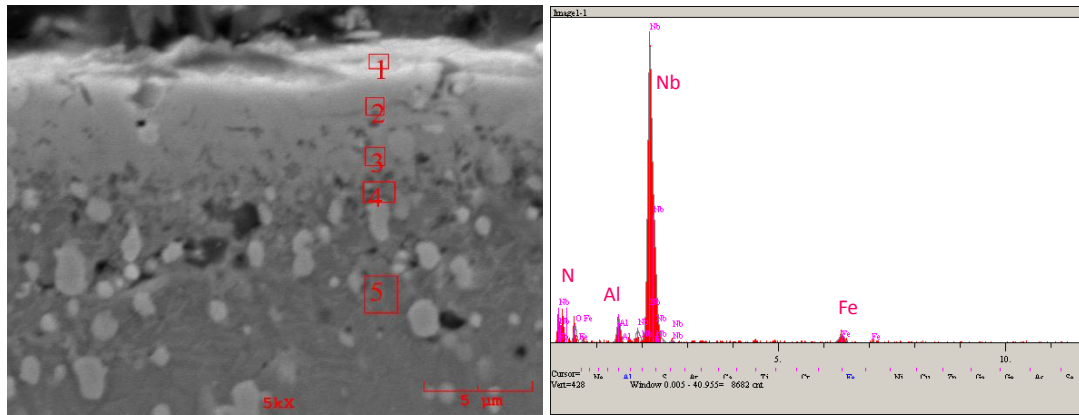
(d)

(e)

Şekil 7.20. 2 saat süreyle %1,5 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI D2 çeliğinin (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c), (d) ve (e) sırasıyla 1,2 ve 4 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir

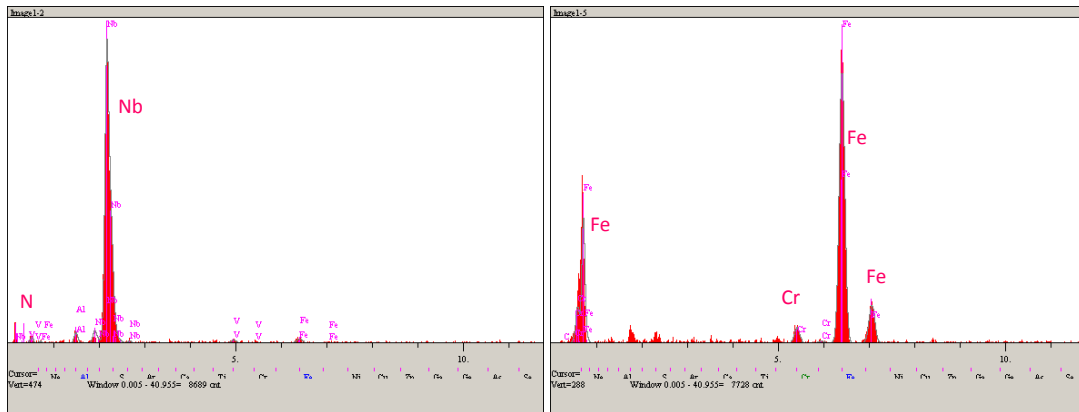


(a)



(b)

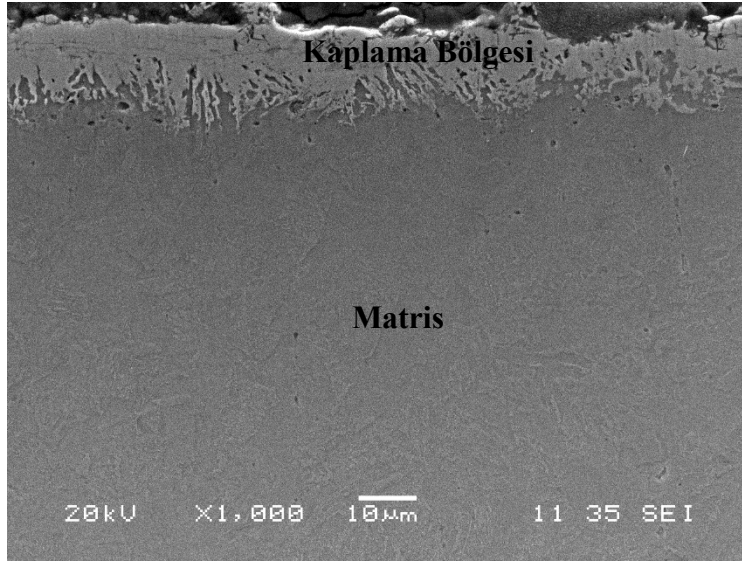
(c)



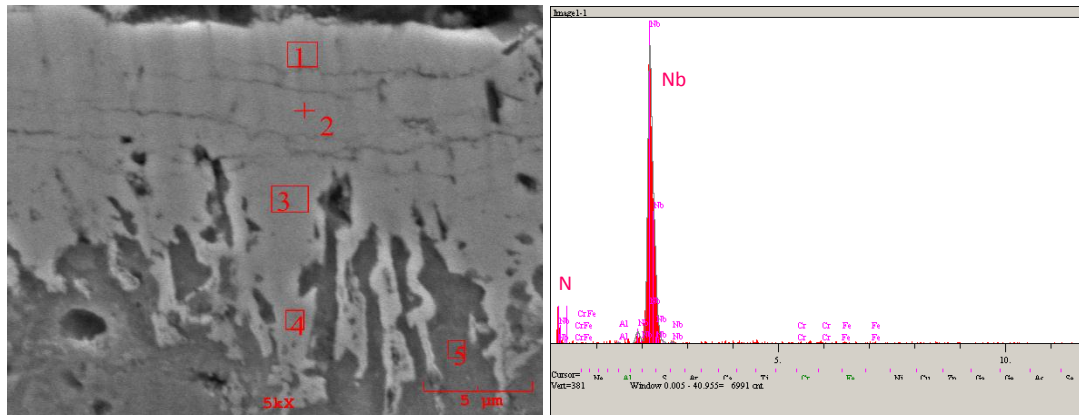
(d)

(e)

Şekil 7.21. 2 saat süreyle %1,5 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI M2 çeliğinin (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c), (d) ve (e) sırasıyla 1,2 ve 5 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir

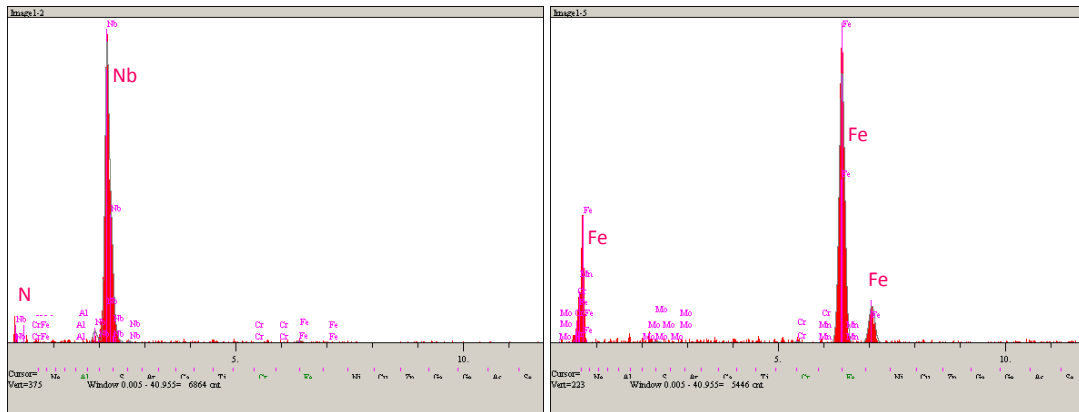


(a)



(b)

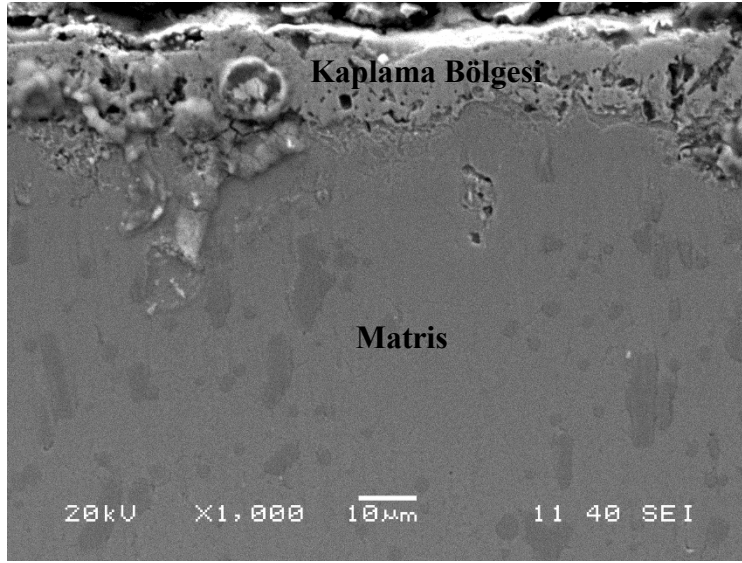
(c)



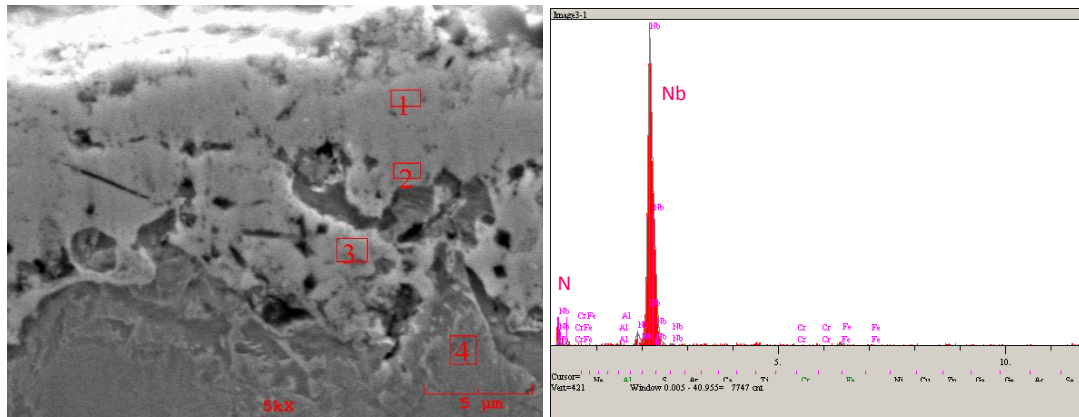
(d)

(e)

Şekil 7.22. 2 saat süreyle %2,0 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI 4140 çeliğinin (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c), (d) ve (e) sırasıyla 1,2 ve 5 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir

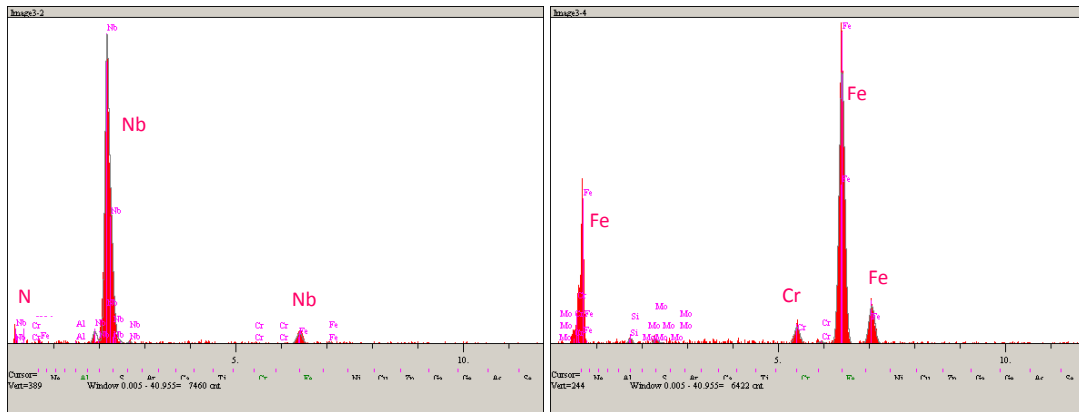


(a)



(b)

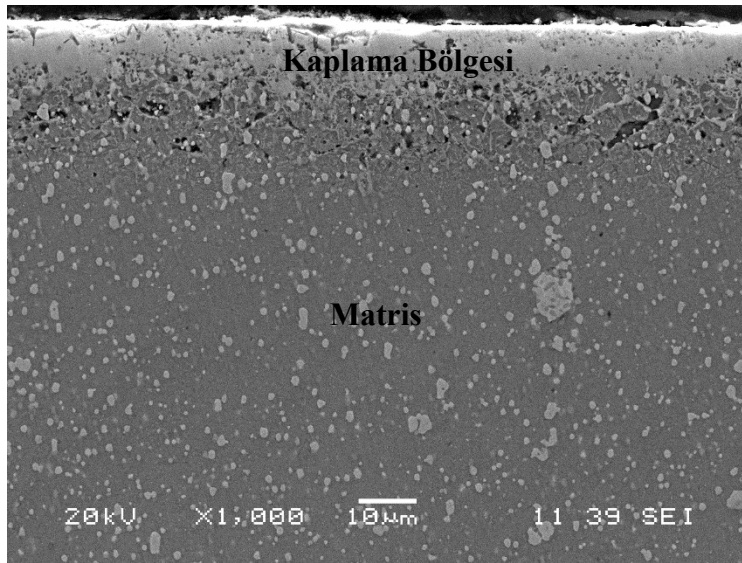
(c)



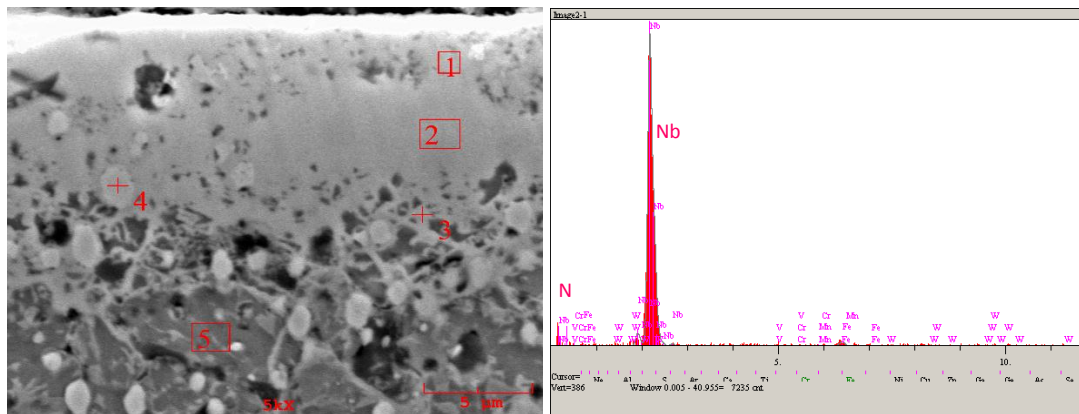
(d)

(e)

Şekil 7.23. 2 saat süreyle %2,0 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI D2 çeliğinin (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c), (d) ve (e) sırasıyla 1,2 ve 4 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir

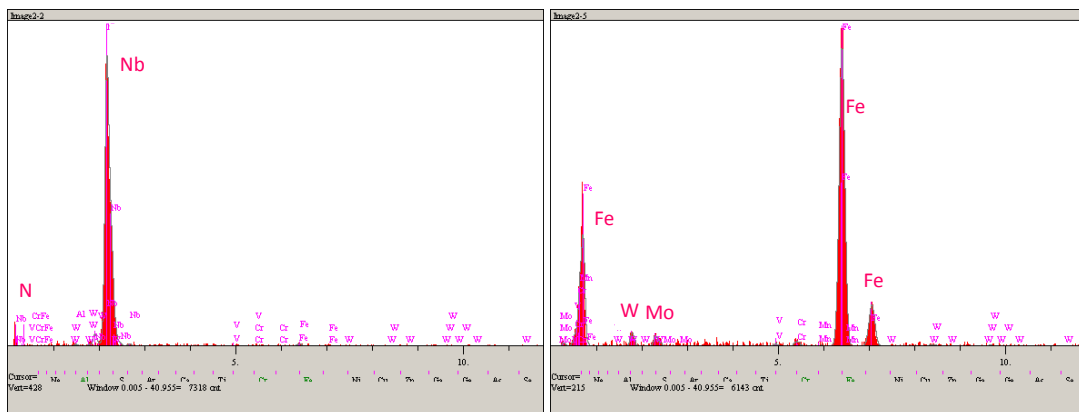


(a)



(b)

(c)



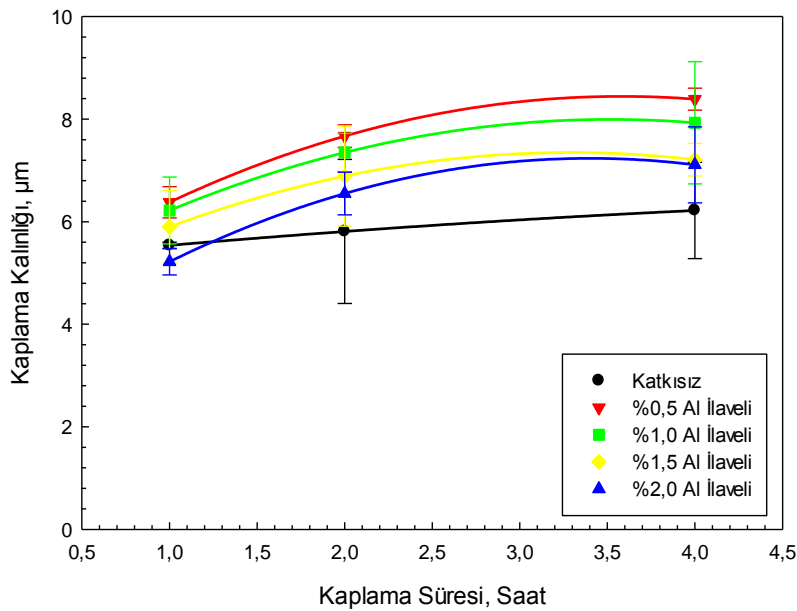
(d)

(e)

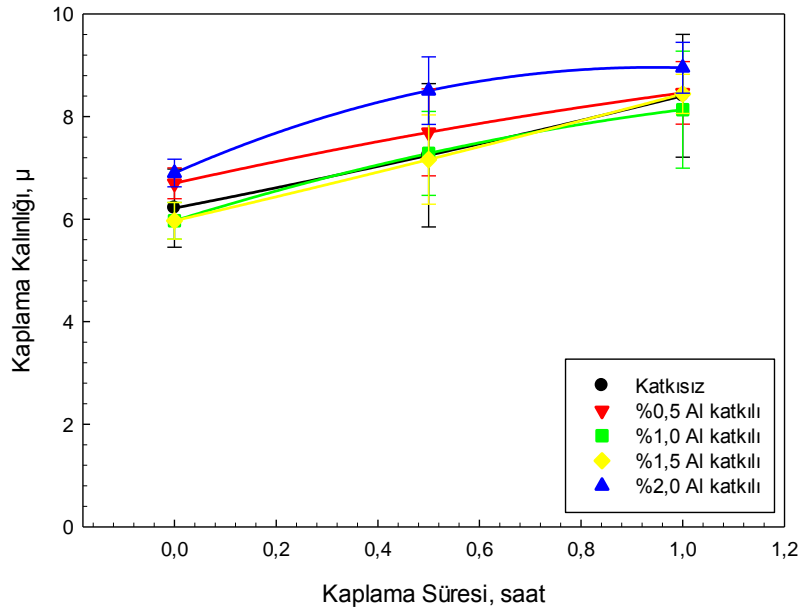
Şekil 7.24. 2 saat süreyle %2,0 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI M2 çeliğinin (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c), (d) ve (e) sırasıyla 1,2 ve 5 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir

Kaplamaların süresine bağlı olarak, özellikle AISI 4140 çeliği ve AISI D2 çeliği üzerinde oluşan kaplama tabakalarının çok daha homojen bir yapı sergilediği görülürken, AISI M2 çeliğinin yüzeyinde oluşan kaplama tabakalarının sürenin artışına bağlı olarak düzgünlüğünün bozulduğu, kaplama tabakasının altında porozitelerin yer aldığı ve kaplamalarda kısmi çatlakların oluştuğu görülmüştür.

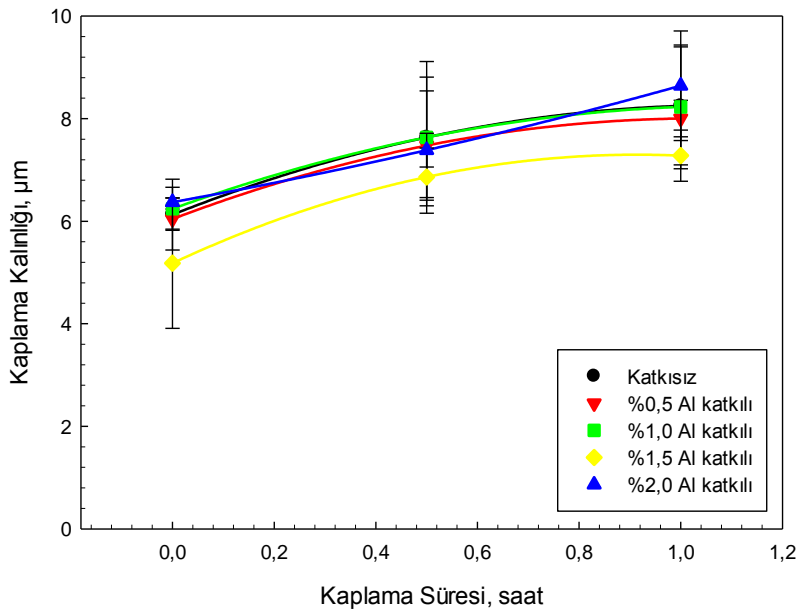
1000 °C sıcaklıkta 1-4 saat süreyle 0-2 aralığında %Al içeren kaplama ortamlarında kaplama işlemine tabii tutulan AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çeliklerinin yüzeyinde oluşan kaplama tabakalarının tabaka kalınlıklarının süreye bağlı olarak değişimi Şekil 7.25.-7.27.'de verilmektedir. Oluşan kaplamaların kalınlıkları; kaplama ortamlarının bileşimine, altlık malzeme olarak kullanılan çeliklerin bileşimine ve kaplama sürelerine bağlı olarak, 3,63µm ile 10,05 µm arasında değişim göstermektedir. Mikroyapılar incelendiğinde elde edilen en kalın kaplamalar AISI D2 çeliği üzerinde oluşurken en ince kaplamalar da AISI 4140 çeliği üzerinde oluşmuştur. Buradan anlaşılacağı üzere; çeliklerin içerdiği alaşım elementinin miktarı arttıkça kaplama tabakalarının kalınlığının arttığı görülmektedir.



Şekil 7.25. 1000°C sıcaklıkta katkısız ve %0,5-2 arasında Al ilave edilmiş kaplama ortamlarında kaplanmış AISI 4140 çeliğinin üzerinde oluşan kaplama tabakalarının kalınlıklarının kaplama süresine bağlı olarak değişimi



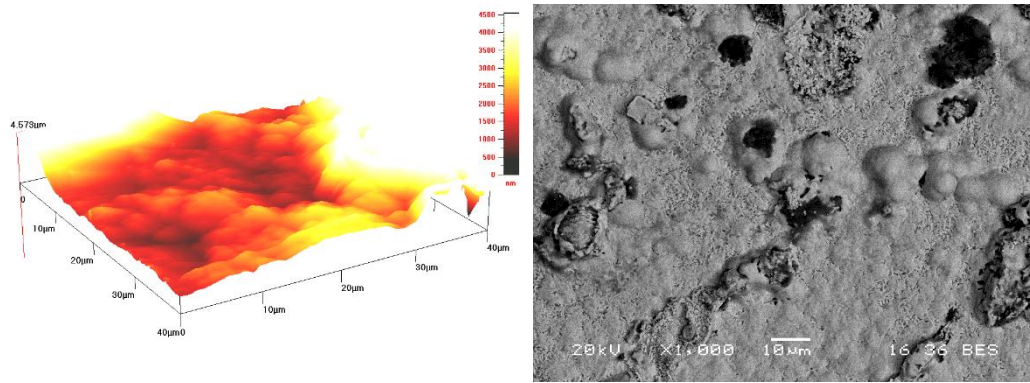
Şekil 7.26. 1000°C sıcaklıkta katkısız ve %0,5-2 arasında Al ilave edilmiş kaplama ortamlarında kaplanmış AISI D2 çeliğinin üzerinde oluşan kaplama tabakalarının kalınlıklarının kaplama süresine bağlı olarak değişimi



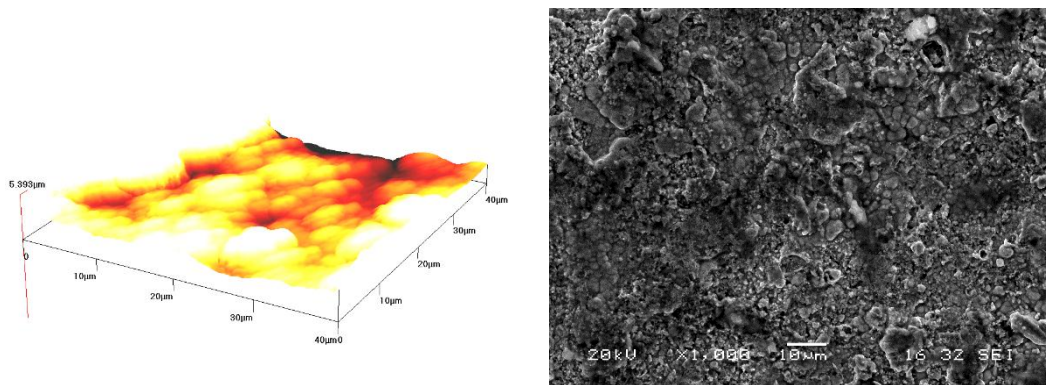
Şekil 7.27. 1000°C sıcaklıkta katkısız ve %0,5-2 arasında Al ilave edilmiş kaplama ortamlarında kaplanmış AISI M2 çeliğinin üzerinde oluşan kaplama tabakalarının kalınlıklarının kaplama süresine bağlı olarak değişimi

7.2. Kaplamalara Ait Yüzey Görüntüleri

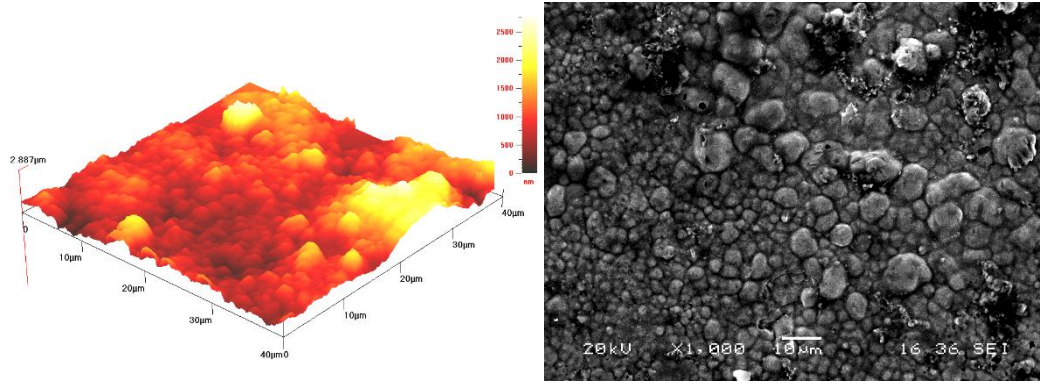
Elde edilen kaplamaların yüzey pürüzlülüğünün incelenmesi; atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ve taramalı elektron mikroskobu yardımıyla, yüzeyinde 1000 °C sıcaklıkta 2 saat süre ile %2 alüminyum içeren Nb-Al-N esaslı kaplamalar elde edilmiş AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çelikleri üzerinde yapılmıştır. Yapılan incelemelerde gerek nitrasyon işlemi öncesine gerekse nitrasyon işlemi sonrasında kaplama öncesine göre yüzey pürüzlülüğü artmıştır. Diğer yandan yüzeyde kaplamanın birikmesi her bir altlık malzeme için farklılıklar göstermiştir. AISI D2 çeliği yüzeyi en pürüzsüz yüzey olarak gözükürken AISI M2 çeliği yüzeyi en fazla pürüzlülüğe sahiptir. İncelemelere ait AFM ve SEM görüntüleri şekil 7.28.-7.30.'da verilmiştir.



Şekil 7.28. 2 saat süre ile 1000°C sıcaklıkta %2 alüminyum katkılı kaplama ortamında kaplanmış AISI 4140 çeliğinin yüzeyinden alınan (a) atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ve (b) SEM mikroyapı görüntüleri



Şekil 7.29. 2 saat süre ile 1000°C sıcaklıkta %2 alüminyum katkılı kaplama ortamında kaplanmış AISI D2 çeliğinin yüzeyinden alınan (a) atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ve (b) SEM mikroyapı görüntüleri

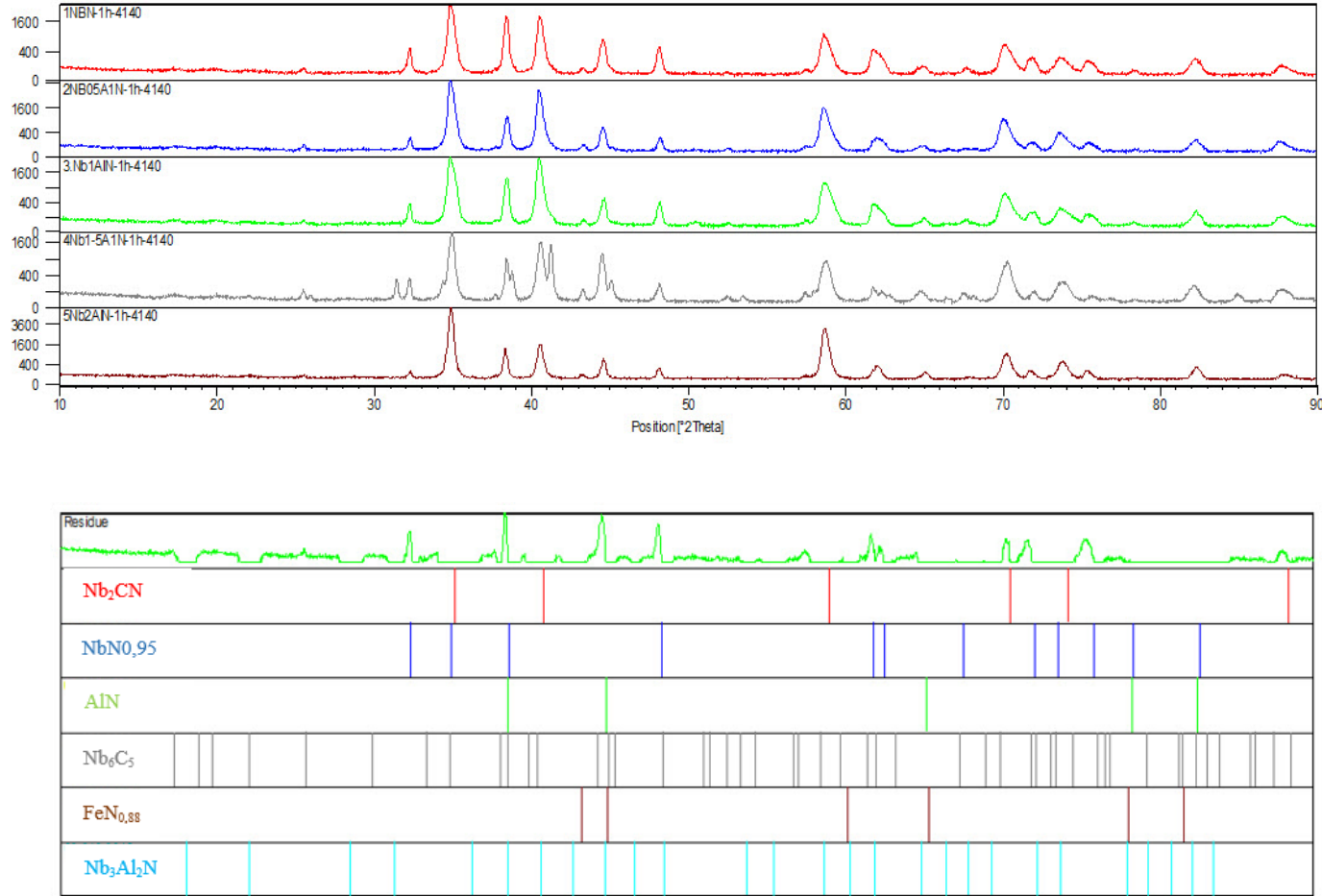


Şekil 7.30. 2 saat süre ile 1000°C sıcaklıkta %2 alüminyum katkılı kaplama ortamında kaplanmış AISI M2 çeliğinin yüzeyinden alınan (a) atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ve (b) SEM mikroyapı görüntüleri

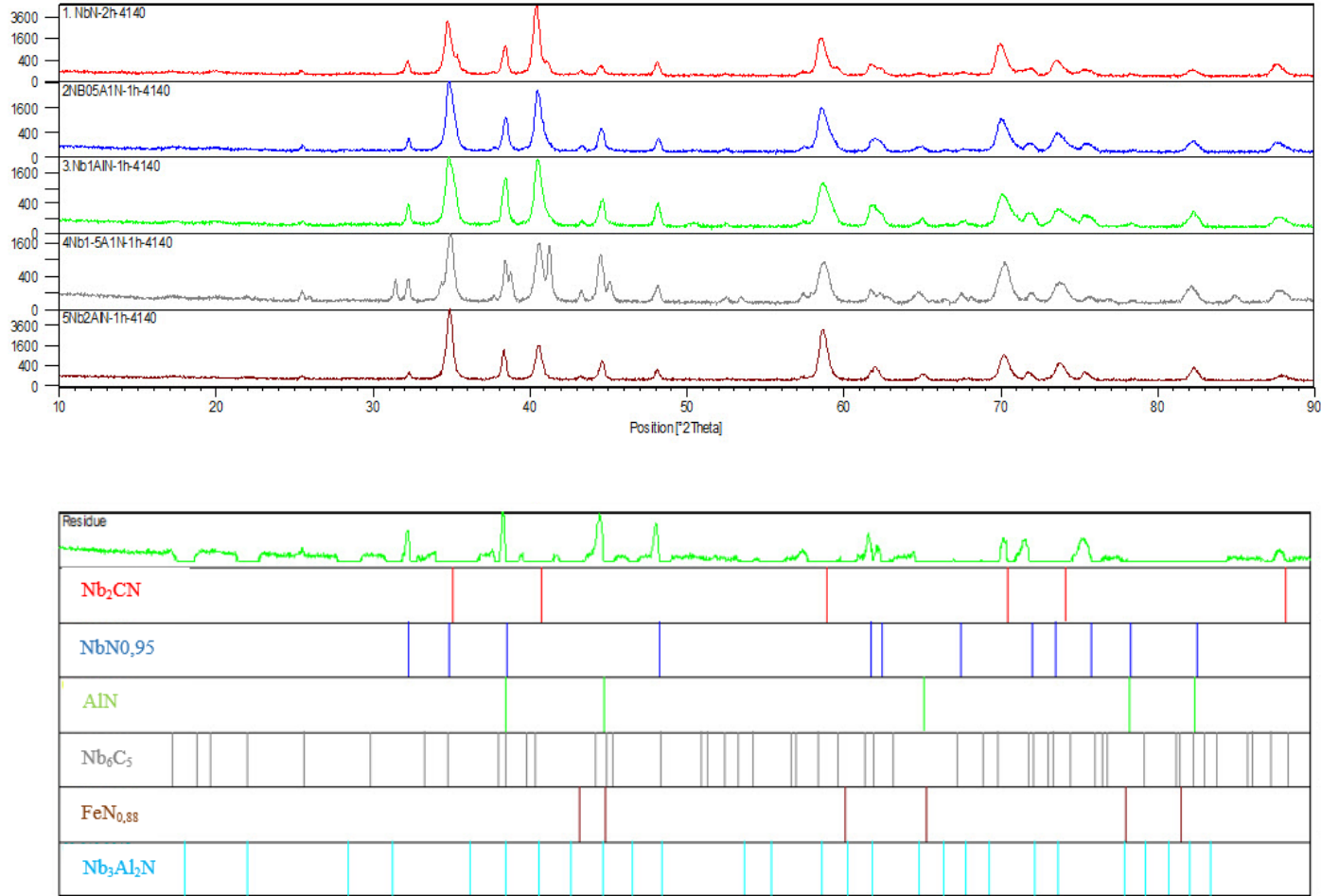
7.3. Faz Analizleri

Kaplama ortamında bulunan Al elementinin miktarına ve kaplama süresine bağlı olarak, AISI 4140 çeliğinin yüzeyinde oluşan kaplama tabakalarının içerdiği fazlar, x-ışınları difraksiyonu analizleri ile tespit edilmiştir (Şekil 7.31-7.33). Genel olarak Nb-N ve Nb-Al-N kaplamalarda Nb_2CN ve $NbN_{0,95}$ fazlarının hâkim fazlar olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, kaplama ortamına ilave edilen Al elementi miktarının x-ışınlarının pik boylarının değişmesinde ve $FeN_{0,88}$, AlN ve Nb_3Al_2N minör fazların oluşmasında etkili olduğu görülmüştür. Şekil 7.34.-7.38.'te sırasıyla 1,2 ve 4 saat süre ile AISI 4140 çeliklerinin yüzeyinde kaplama ortamında Al miktarının değişimine bağlı olarak gerçekleştirilen kaplama işlemi sonucunda oluşan kaplamaların x-ışınları ve difraksiyon analizleri görülmektedir.

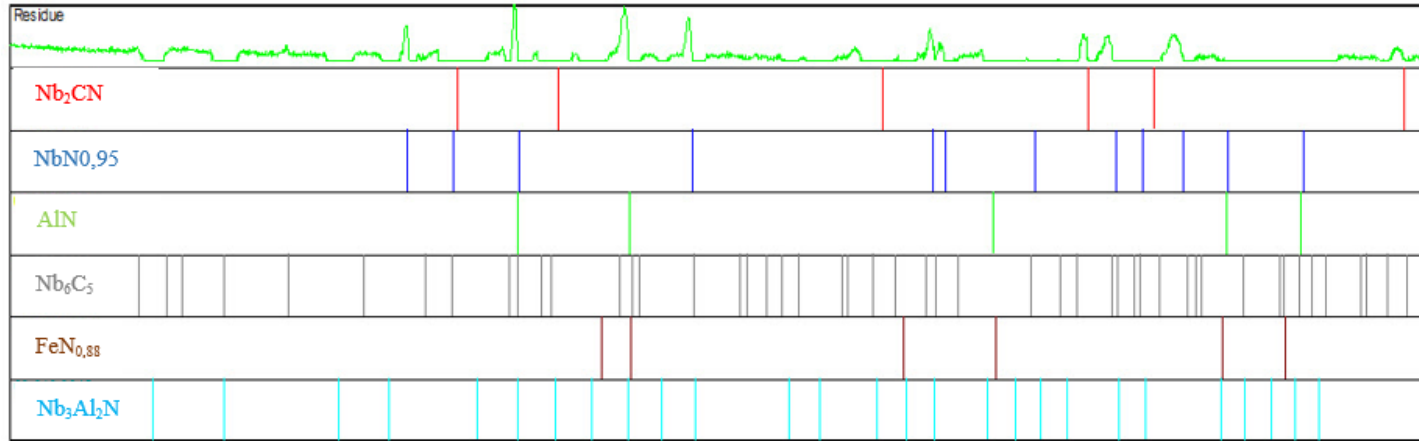
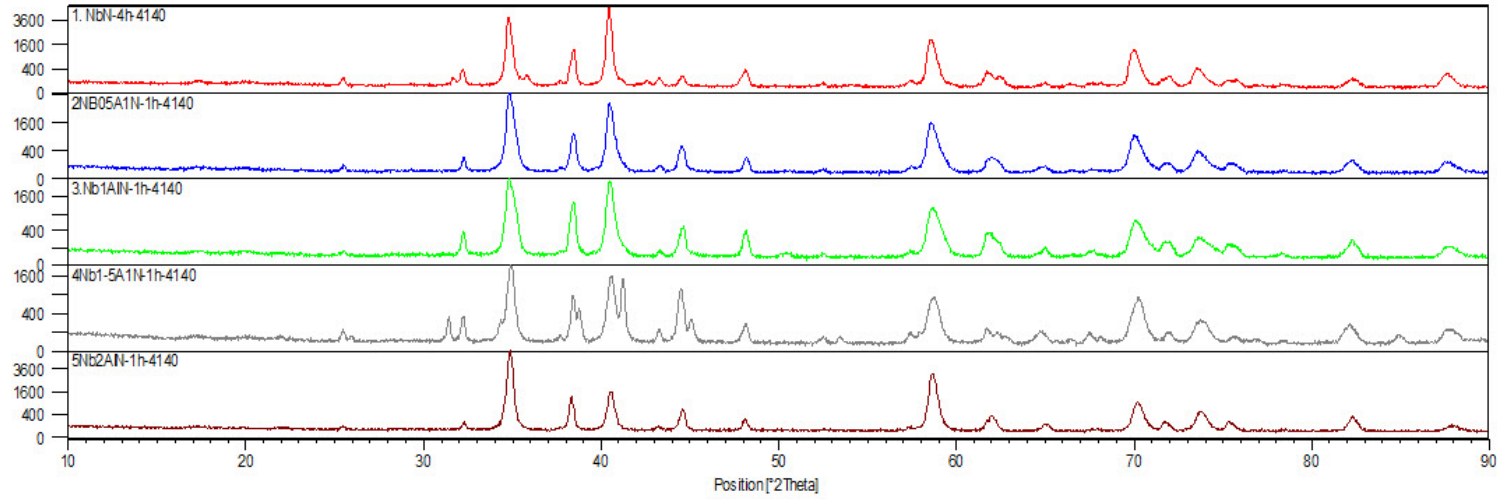
AISI 4140 çeliğinin yüzeyinde oluşan kaplamaların x-ışınları incelendiğinde kaplama süresinin artışıyla Nb_2CN fazının arttığı buna karşılık $NbN_{0,95}$ fazının kısmen azaldığı görülmektedir. Bununla birlikte aksine alüminyum konsantrasyonunun artışıyla birlikte hâkim faz olarak $NbN_{0,95}$ fazının arttığı Nb_2CN fazının azaldığı, minör faz olarak AlN fazının pik boyunun arttığı da tespit edilmiştir.



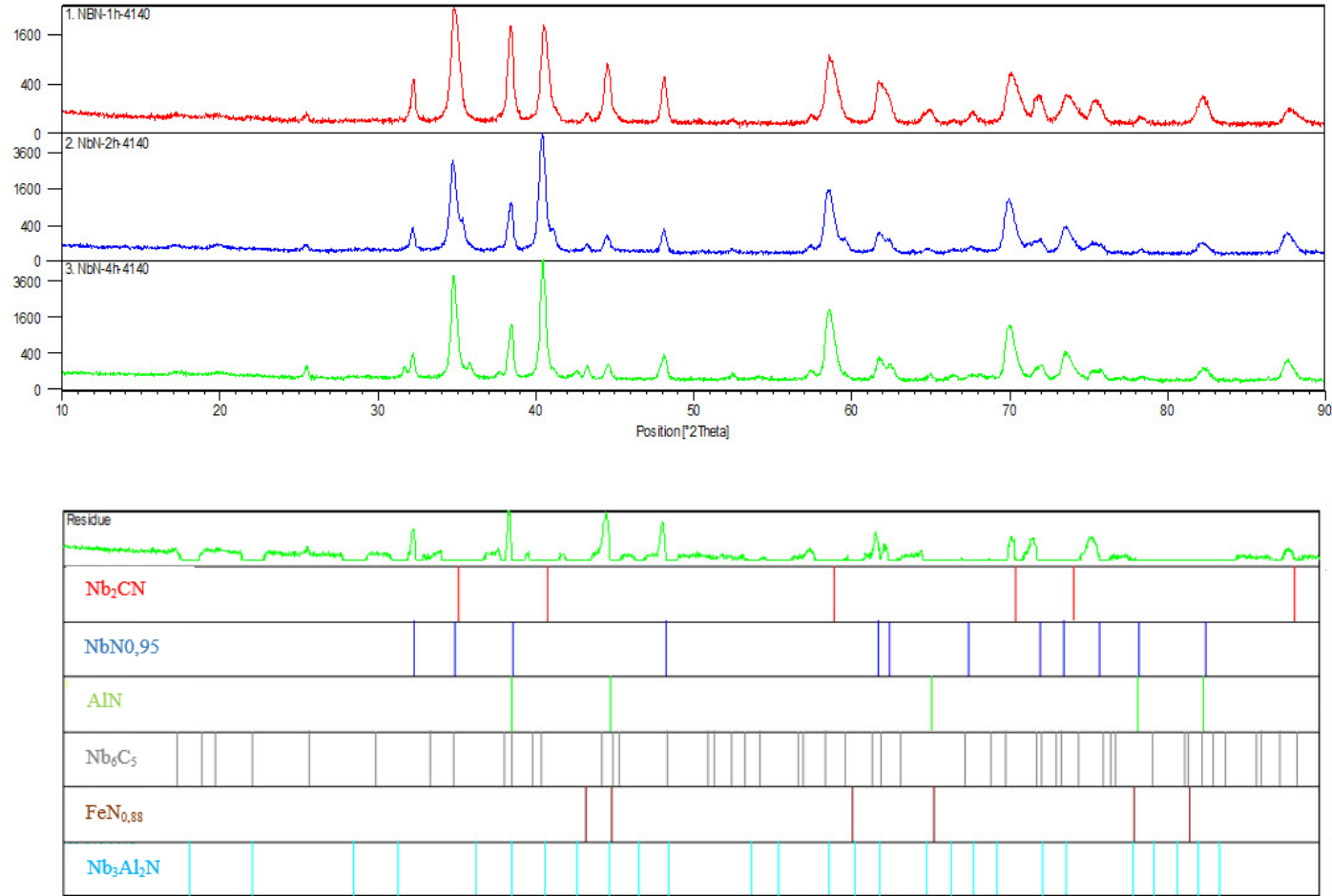
Şekil 7.31. AISI 4140 çeliği üzerine 1 saat süre ile gerçekleştirilen sırasıyla katkısız; %0,5Al; %1Al; %1,5Al ve %2Al içeren kaplamaların x-ışınları difraksiyonu analizleri



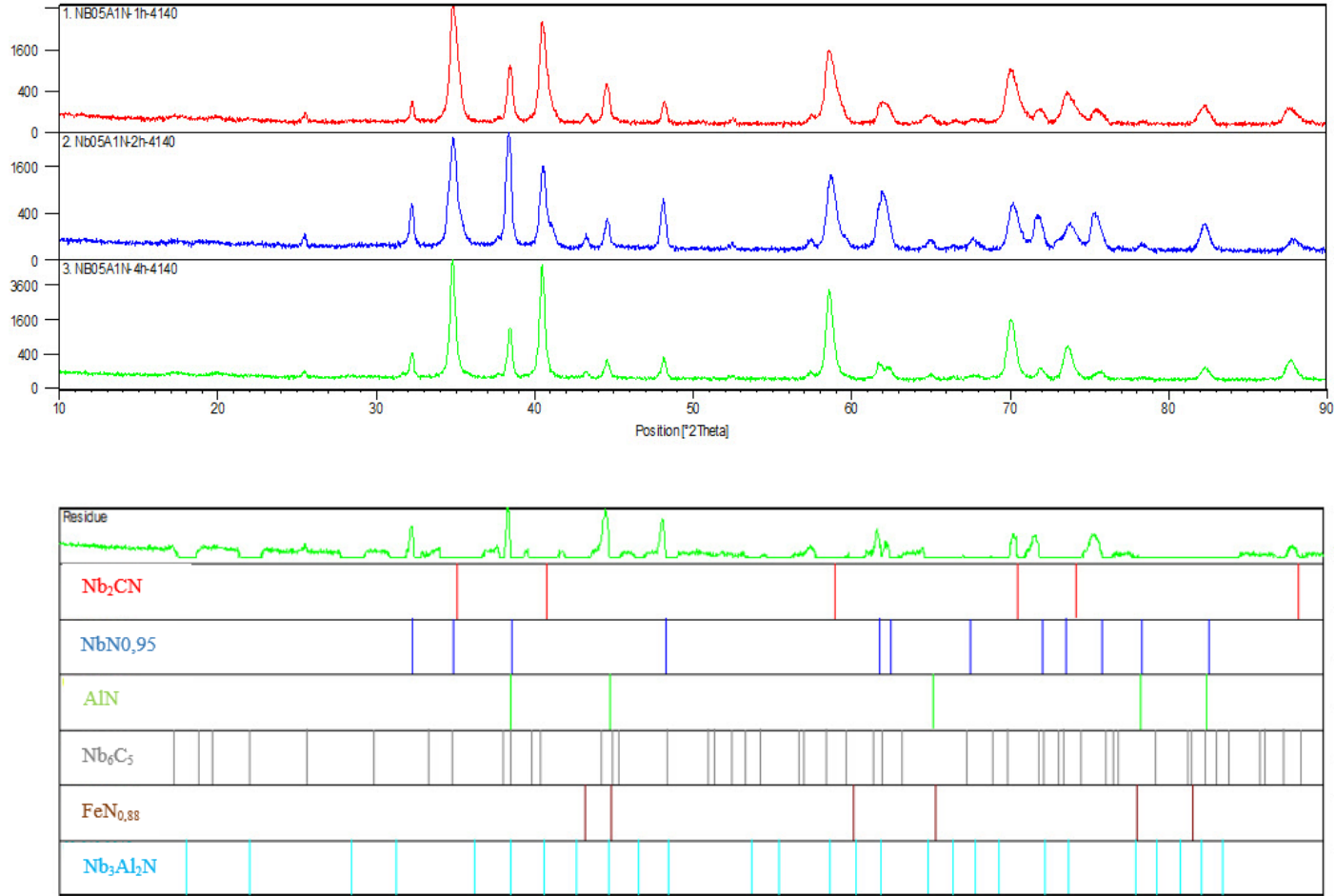
Şekil 7.32. AISI 4140 çeliği üzerine 2 saat süre ile gerçekleştirilen sırasıyla katkısız; %0,5Al; %1Al; %1,5Al ve %2Al içeren kaplamaların x-ışınları difraksiyonu analizleri



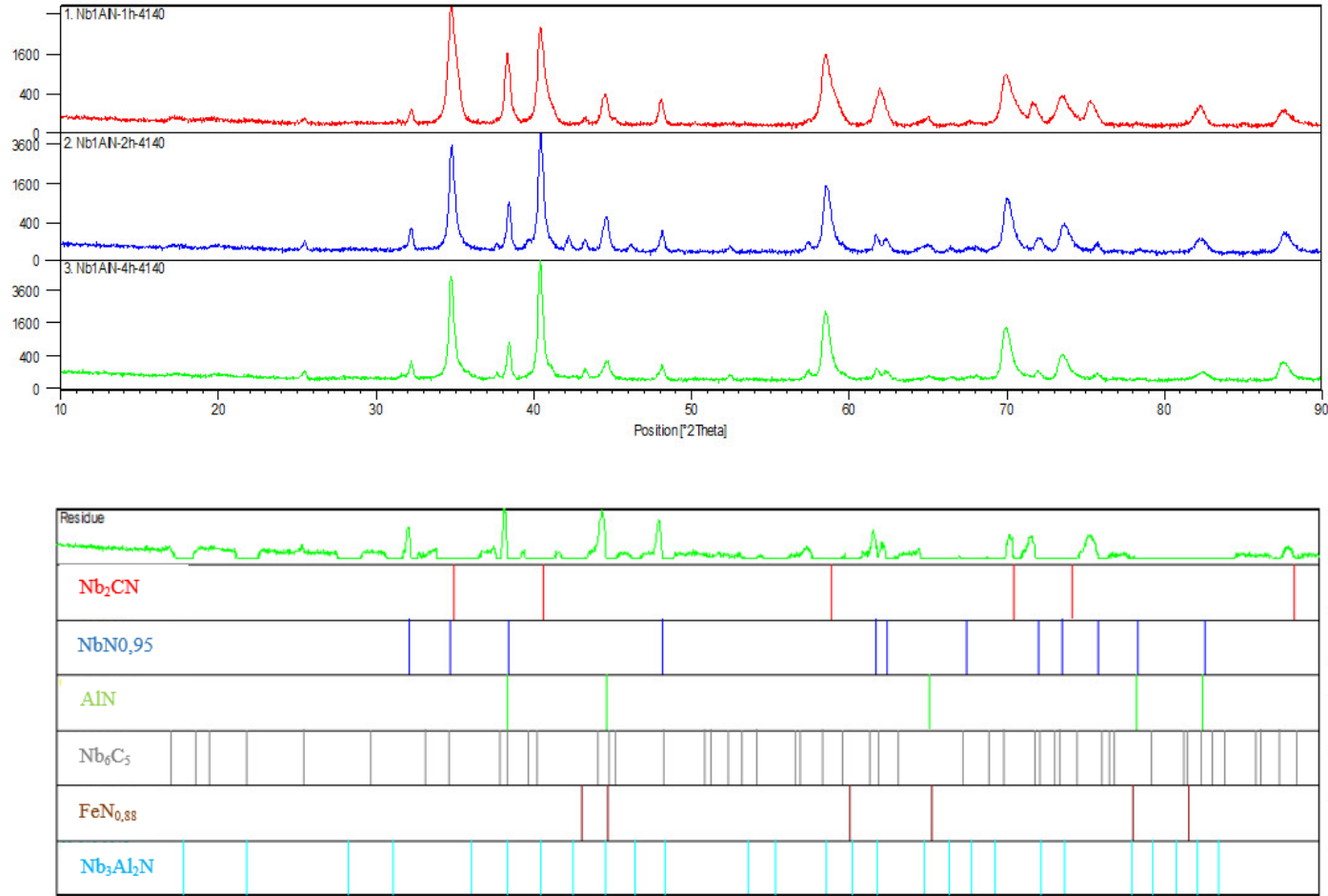
Şekil 7.33. AISI 4140 çeliği üzerine 4 saat süre ile gerçekleştirilen sırasıyla katkısız; %0,5Al; %1Al; %1,5Al ve %2Al içeren kaplamaların x-ışınları difraksiyonu analizleri



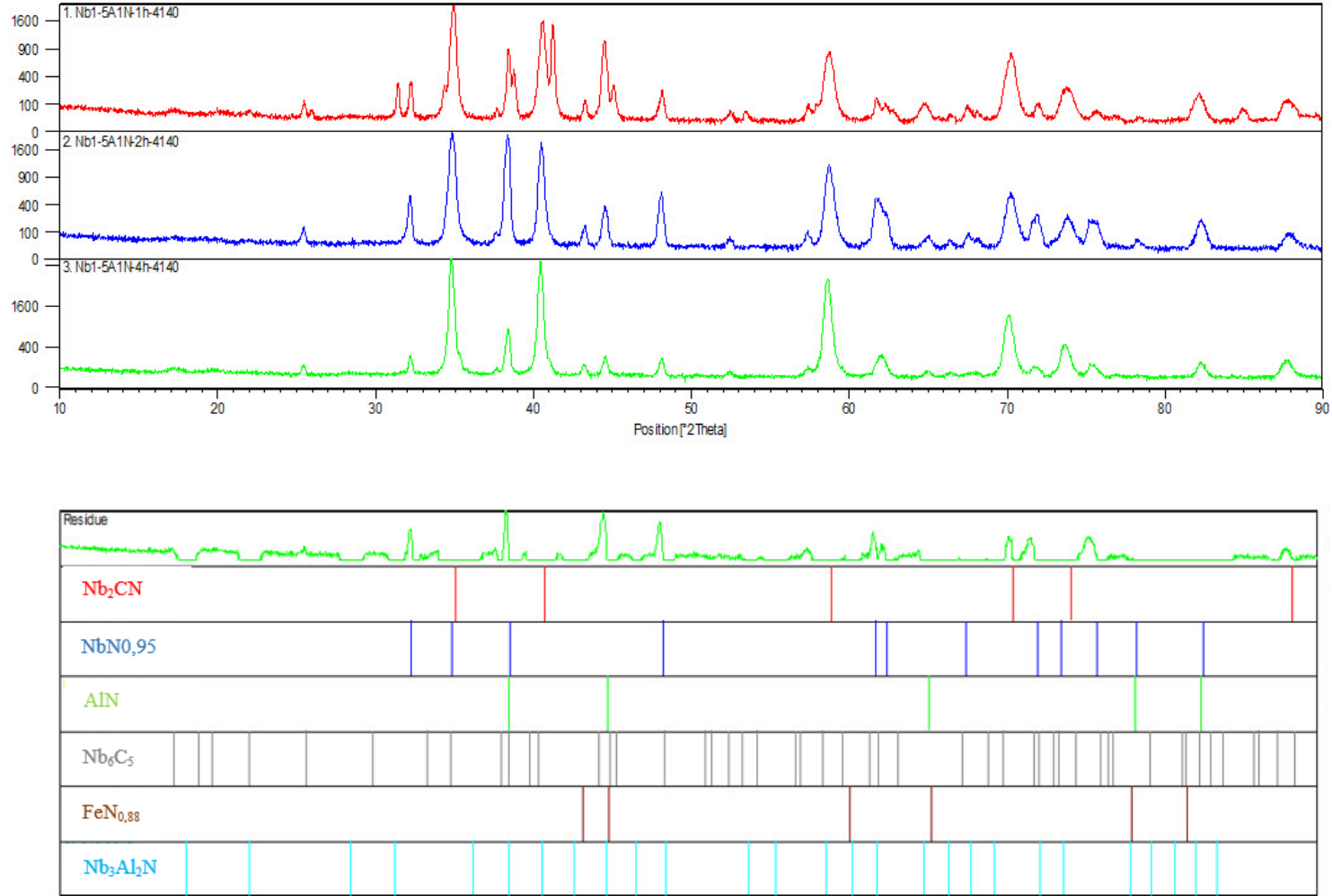
Şekil 7.34. 1,2 ve 4 saat süre ile Nb-N kaplanmış AISI 4140 çeliği için x-ışınları difraksiyon analizleri



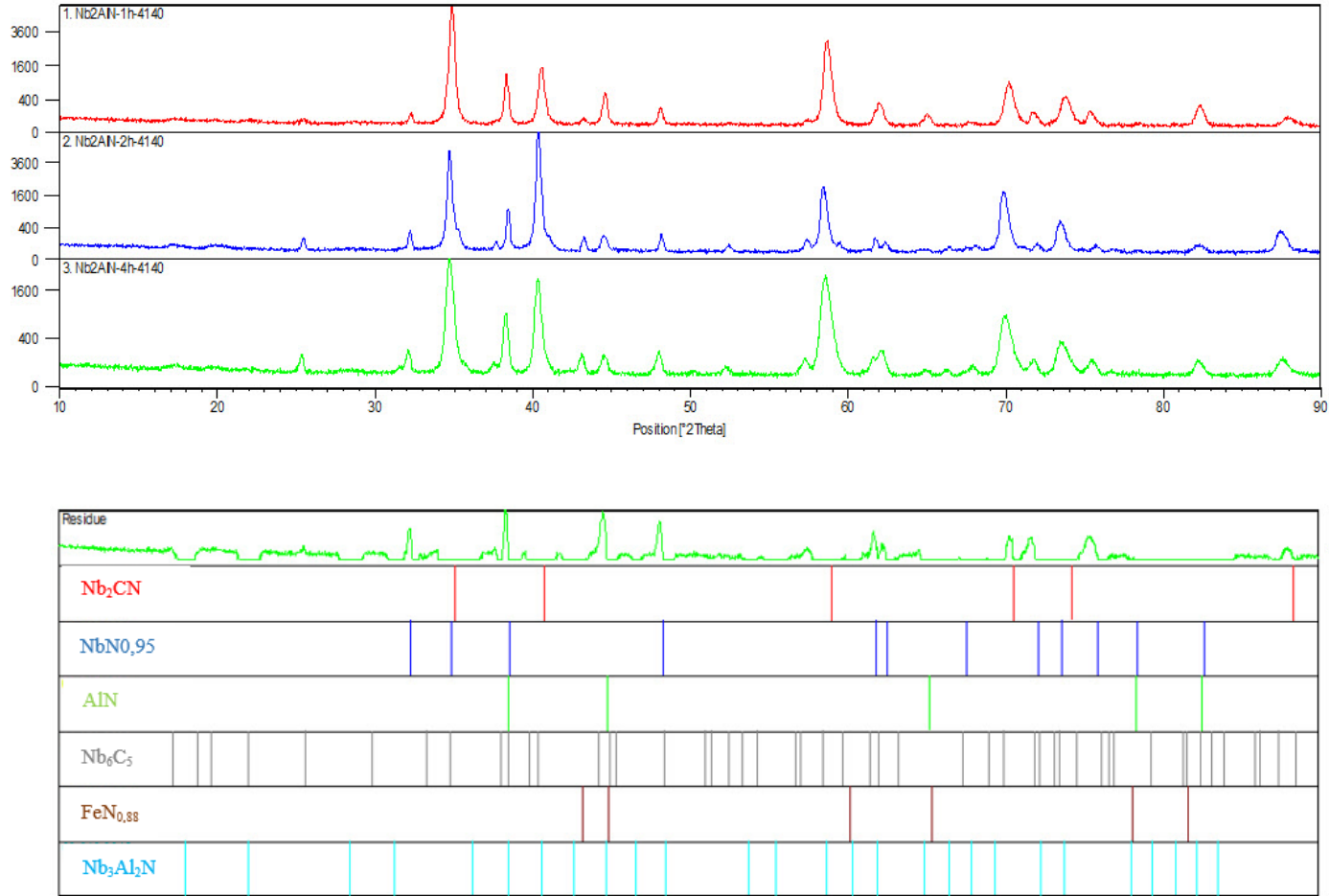
Şekil 7.35. 1,2 ve 4 saat süre ile %0,5 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI 4140 çeliği için x-ışınları difraksiyon analizleri



Şekil 7.36 1,2 ve 4 saat süre ile %1alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI 4140 çeliği için x-ışınları difraksiyon analizleri



Şekil 7.37. 1,2 ve 4 saat süre ile %1,5 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI 4140 çeliği için x-ışınları difraksiyon analizleri



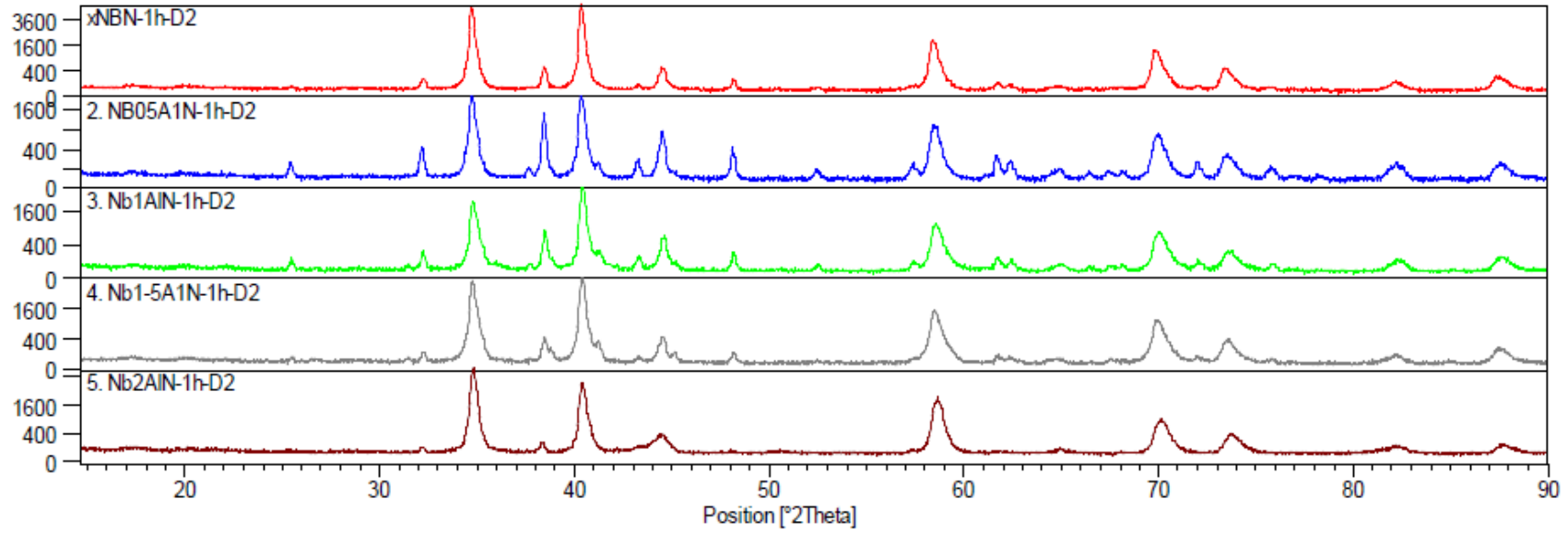
Şekil 7.38. 1,2 ve 4 saat süre ile %2 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI 4140 çeliği için x-ışınları difraksiyon analizleri

Kaplama ortamında bulunan Al elementinin miktarına ve kaplama süresine bağlı olarak, AISI D2 çeliğinin yüzeyinde oluşan kaplama tabakalarının içerdiği fazlar, x-ışınları difraksiyonu analizleri ile tespit edilmiştir (Şekil 7.39.-7.41.). Genel olarak Nb-N kaplama ve Nb-Al-N kaplamalarda Nb_2CN ve $NbN_{0,95}$ fazlarının hakim fazlar olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, kaplama ortamına ilave edilen Al elementinin ve altlık olarak kullanılan çeliğin alaşım elementlerinin konsantrasyonunun x-ışınlarının pik boylarının değişmesinde ve çeşitli minör fazların oluşmasında etkili olduğu görülmüştür. Şekil 7.42.-7.46.'da sırasıyla 1,2 ve 4 saat süre ile AISI D2 çeliklerinin yüzeyinde kaplama ortamında Al miktarının değişimine bağlı olarak gerçekleştirilen kaplama işlemi sonucunda oluşan kaplamaların x-ışınları ve difraksiyon analizleri görülmektedir.

Yapıdaki hakim fazların Nb_2CN ve $NbN_{0,95}$ olduğu tespit edilmiştir. Bu iki ana fazın yanında düşük miktarda Fe-Cr, Nb_3Al_2N , Fe_3C , AlN ve Nb_2AlC fazlarının da varlığı görülmüştür.

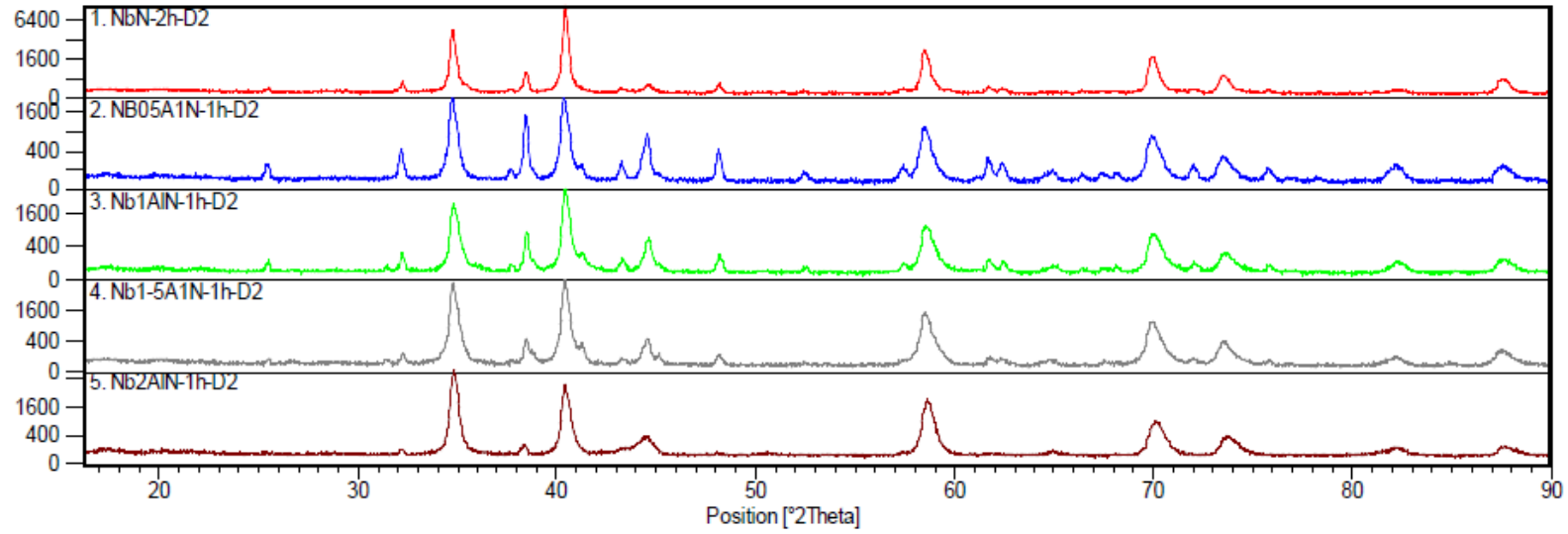
Yapıya ilave edilen Al yapıda bulunan fazların oranlarında değişime neden olmuştur. İlave edilen Al ile beraber $NbN_{0,95}$ fazında artma meydana gelirken Nb_2CN fazında azalma gözlemlenmiştir. Bununla birlikte yapıda bulunan minör fazlarda da bir miktar artış gözlemlenmiştir.

Kaplama işlem süresinin artışı yapıda oluşan fazların oranını etkilemektedir. Artan süreye bağlı olarak ana fazlardan Nb_2CN fazında artış görülürken $NbN_{0,95}$ fazının oranında düşüş görülmüştür. Minör fazlarda ise önemli bir değişim görülmemiştir.



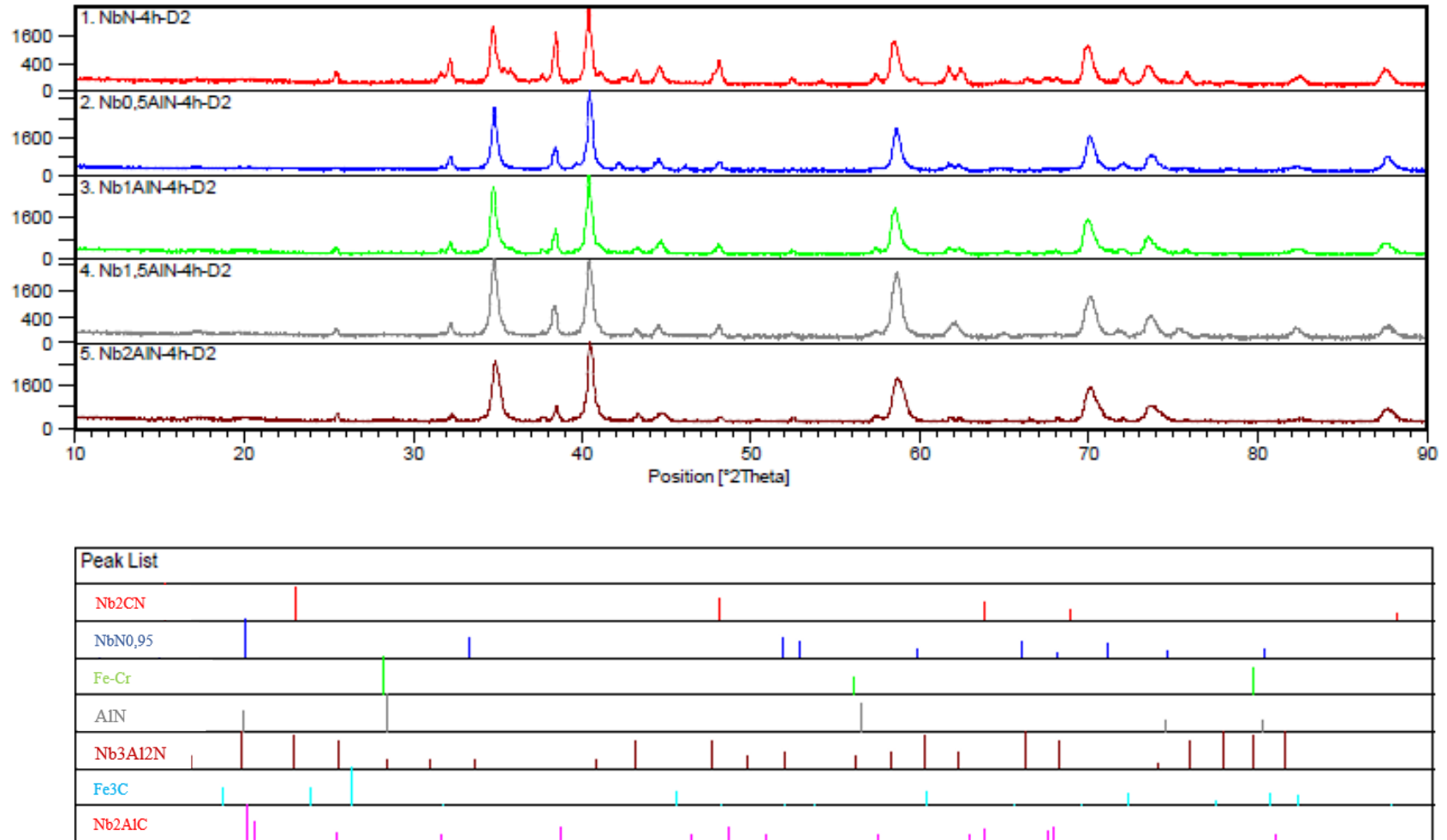
Peak List
Nb2CN
NbN0,95
Fe-Cr
AlN
Nb3Al2N
Fe3C
Nb2AlC

Şekil 7.39. AISI D2 çeliği üzerine 1 saat süre ile gerçekleştirilen sırasıyla katkısız; %0,5Al; %1Al; %1,5Al ve %2Al içeren kaplamaların x-ışınları difraksiyonu analizleri

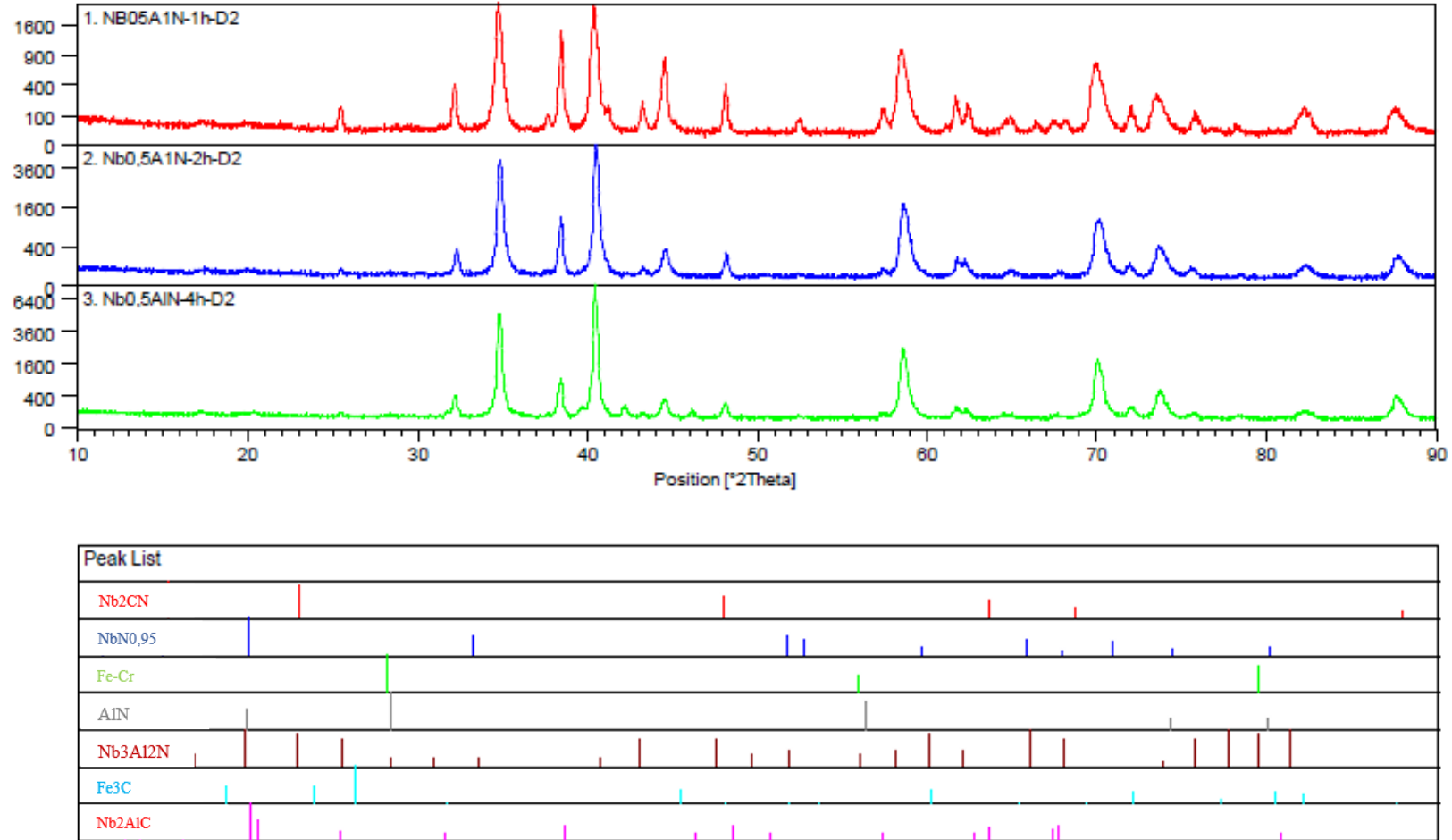


Peak List
Nb ₂ CN
NbN _{0,95}
Fe-Cr
AlN
Nb ₃ Al ₂ N
Fe ₃ C
Nb ₂ AlC

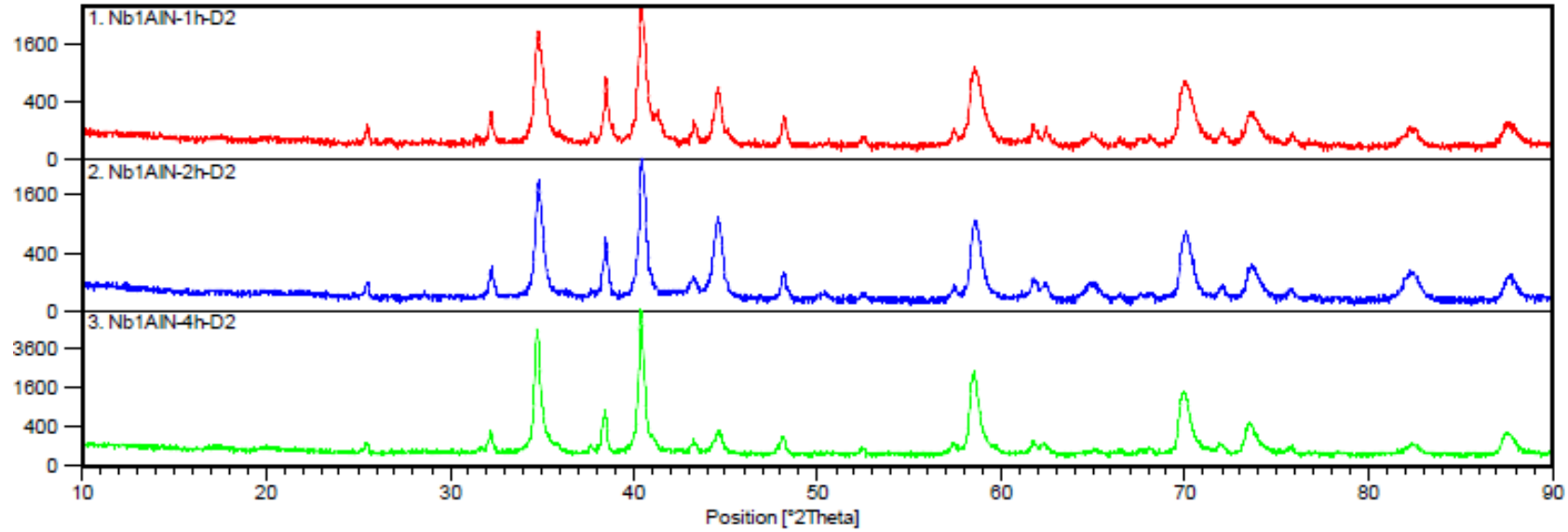
Şekil 7.40. AISI D2 çeliği üzerine 2 saat süre ile gerçekleştirilen sırasıyla katkısız; %0,5Al; %1Al; %1,5Al ve %2Al içeren kaplamaların x-ışınları difraksiyonu analizleri



Şekil 7.41. AISI D2 çeliği üzerine 4 saat süre ile gerçekleştirilen sırasıyla katkısız; %0,5Al; %1Al; %1,5Al ve %2Al içeren kaplamaların x-ışınları difraksiyonu analizleri

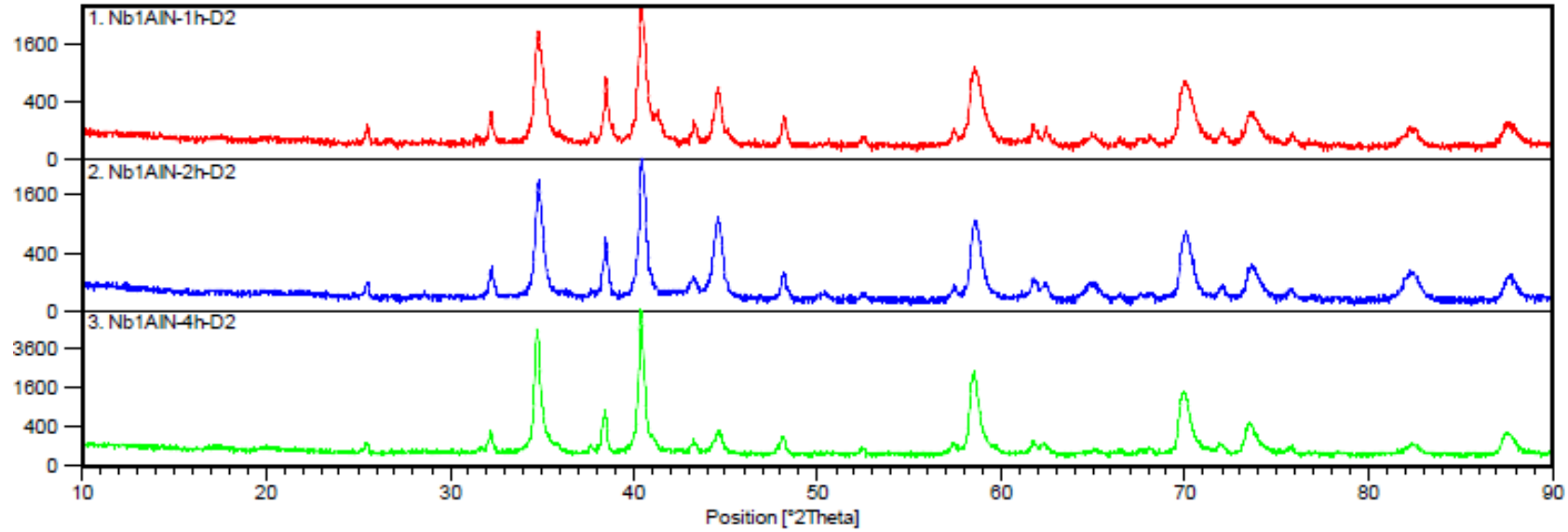


Şekil 7.42. 1,2 ve 4 saat süre ile Nb-N kaplanmış AISI D2 çeliği için x-ışınları difraksiyon analizleri



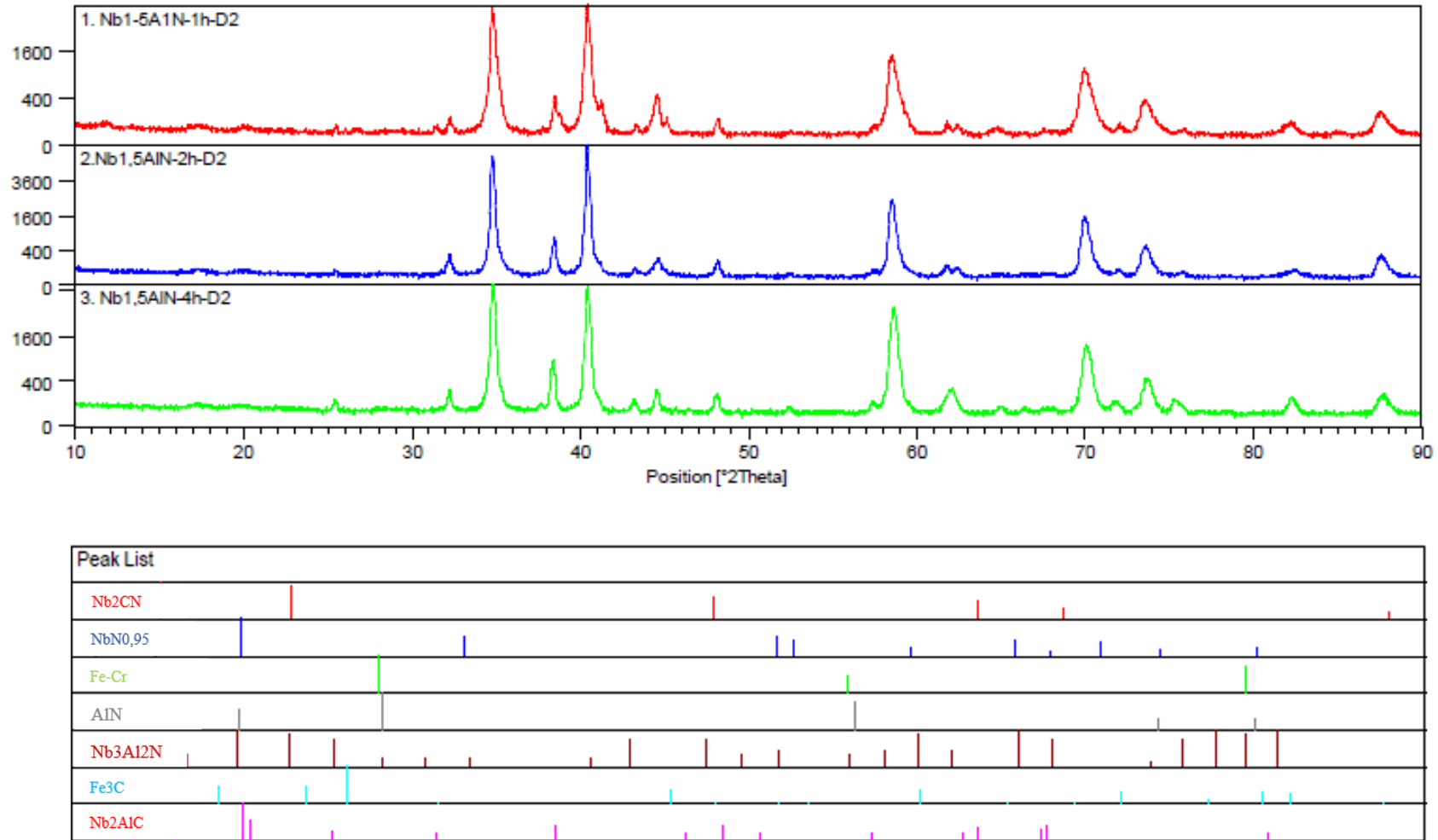
Peak List
Nb2CN
NbN0,95
Fe-Cr
AlN
Nb3Al2N
Fe3C
Nb2AlC

Şekil 7.43. 1,2 ve 4 saat süre ile %0,5 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI D2 çeliği için x-ışınları difraksiyon analizleri

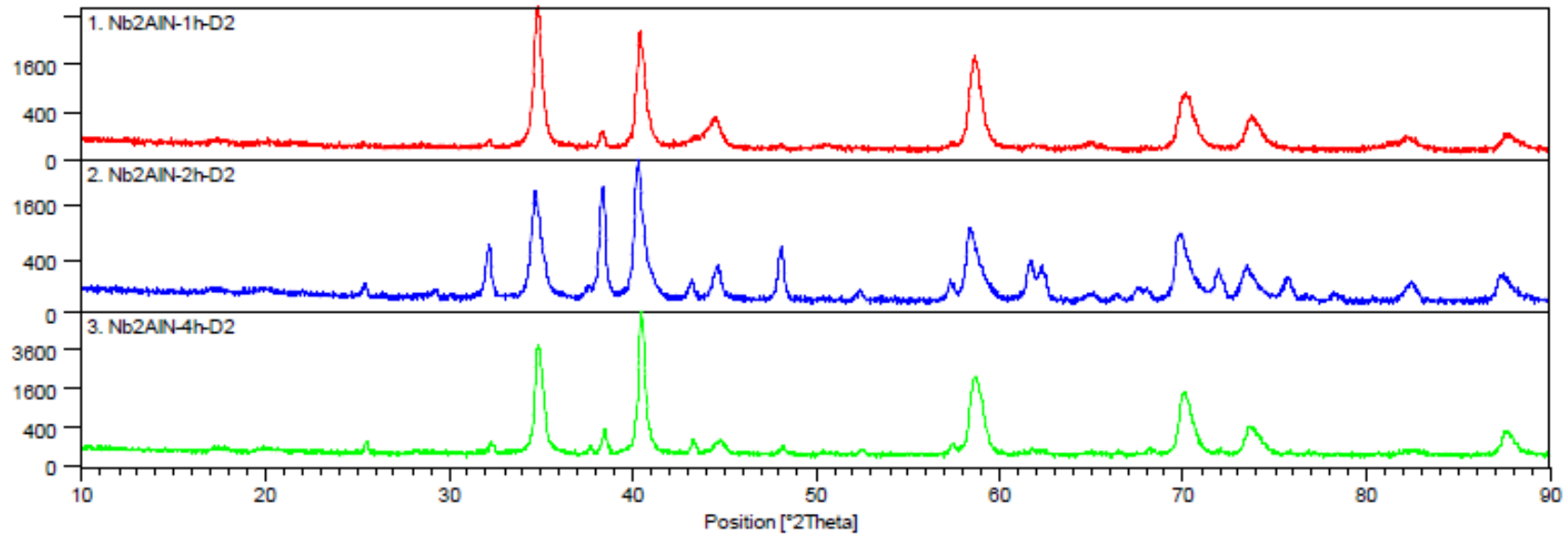


Peak List
Nb ₂ CN
NbN _{0,95}
Fe-Cr
AlN
Nb ₃ Al ₂ N
Fe ₃ C
Nb ₂ AlC

Şekil 7.44. 1,2 ve 4 saat süre ile %1 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI D2 çeliği için x-ışınları difraksiyon analizleri



Şekil 7.45. 1,2 ve 4 saat süre ile %1,5 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI D2 çeliği için x-ışınları difraksiyon analizleri



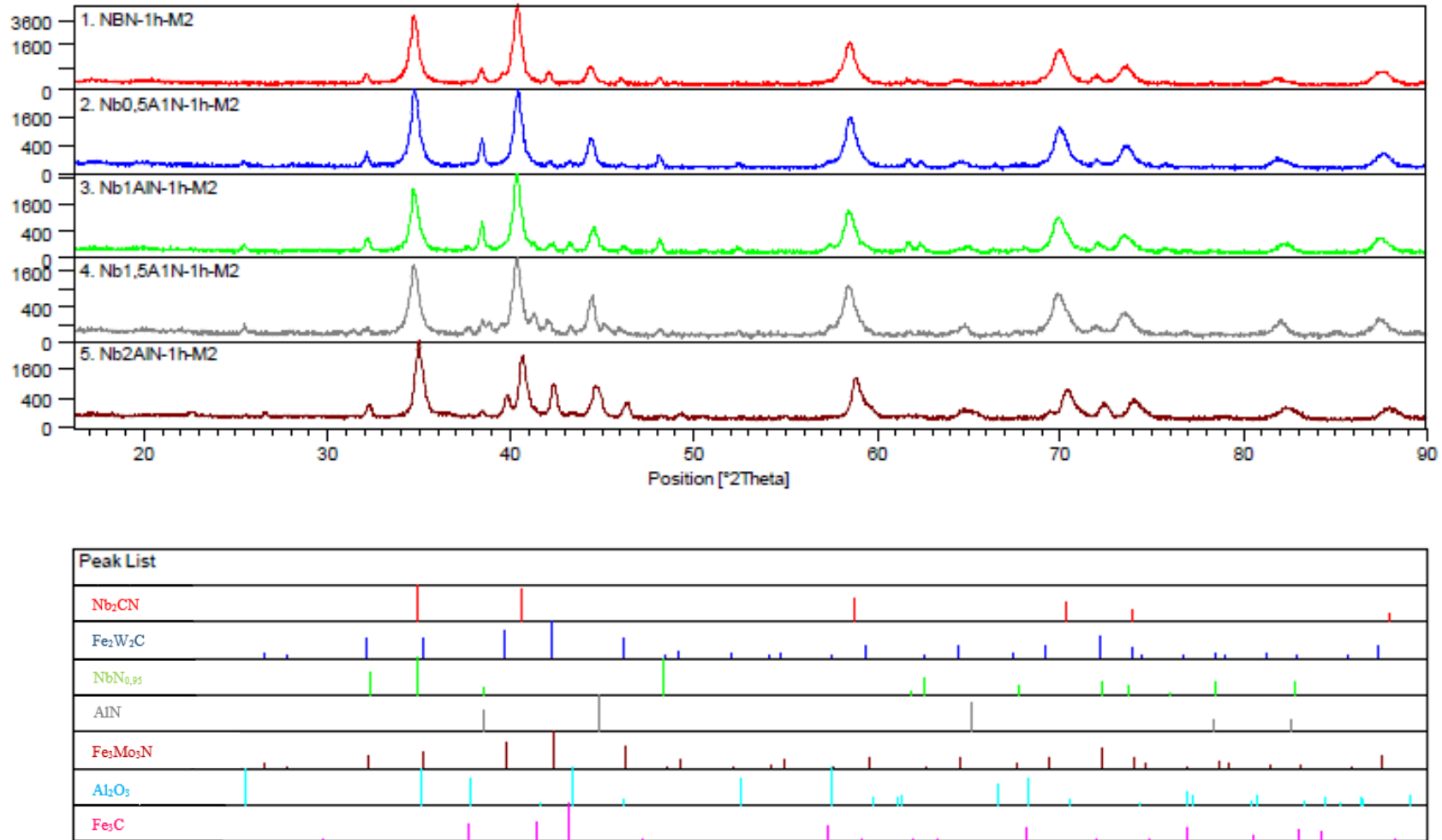
Peak List
Nb ₂ CN
NbN _{0,95}
Fe-Cr
AlN
Nb ₃ Al ₂ N
Fe ₃ C
Nb ₂ AlC

Şekil 7.46. 1,2 ve 4 saat süre ile %2 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI D2 çeliği için x-ışınları difraksiyon analizleri

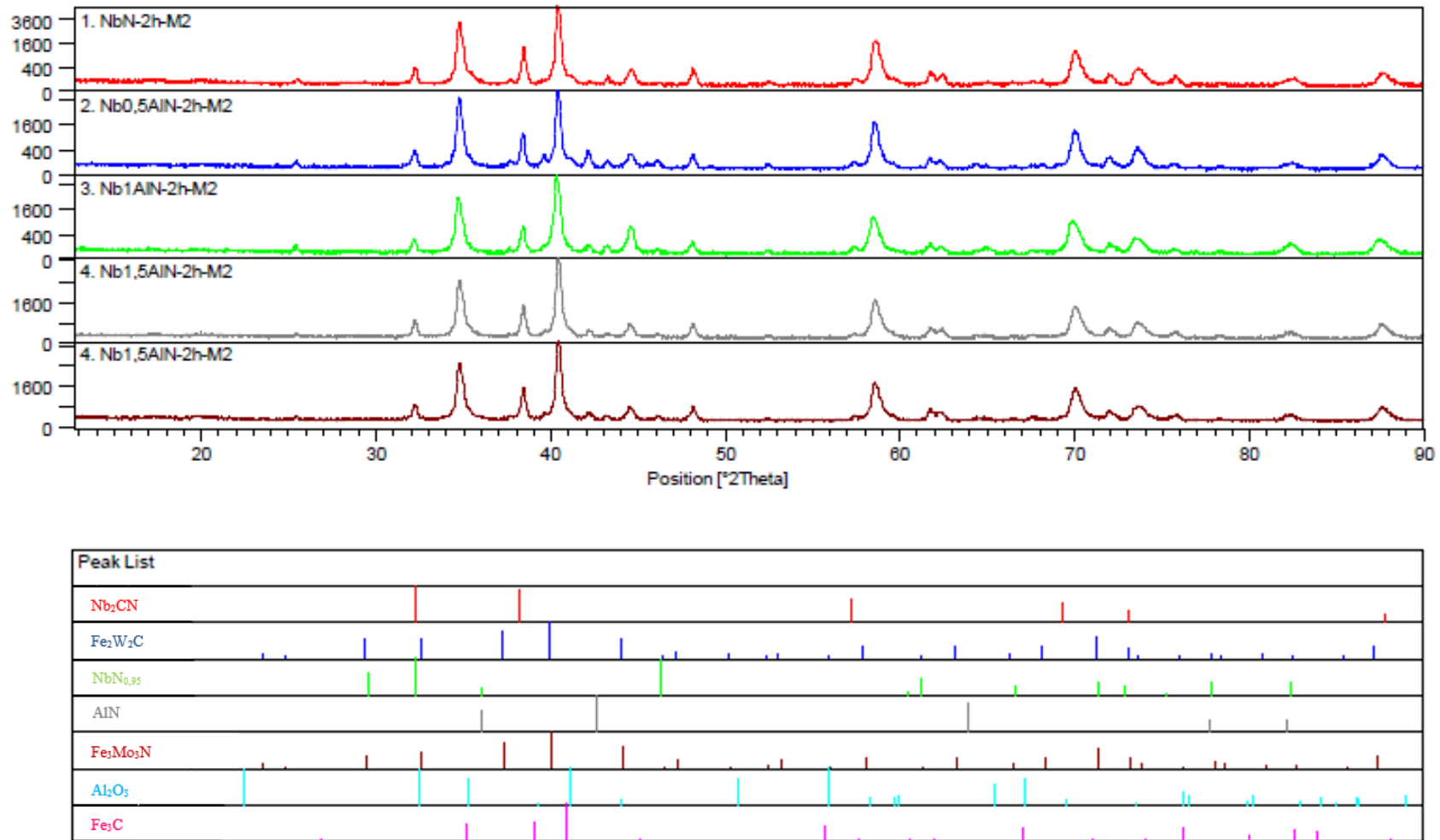
AISI M2 çeliğinin Nb-N ve Nb-Al-N kaplanması sonrasında ait x-ışınları difraksiyon analizleri Tablo 7.47.-7.54.'te verilmiştir. Yapıda AISI 4140 ve AISI D2 çeliklerinde olduğu gibi Nb₂CN ve NbN_{0,95} fazlarının hâkim fazlar olduğu söylenebilir. Bu fazların yanı sıra alüminyum ilavesi ile yapıda bulunmaya başlayan AlN, AISI M2 çeliğinin yapısında bulunan alaşım elementlerinin oluşturduğu Fe₂W₂C ve Fe₃C fazları da düşük miktarda bulunmaktadır. Bu fazların yanında, kaplama banyosunda bulunan alüminanın yüzeye yapışması neticesinde x-ışınlar analizinde Al₂O₃ fazı da tespit edilmiştir.

Yapıya ilave edilen alüminyum miktarı ile beraber NbN_{0,95} fazında artış meydana gelirken Nb₂CN fazında azalma gözlemlenmiştir. Minör fazlardan AlN ilave edilen alüminyum miktarı ile artış gösterirken diğer fazların oranında değişim görülmemiştir.

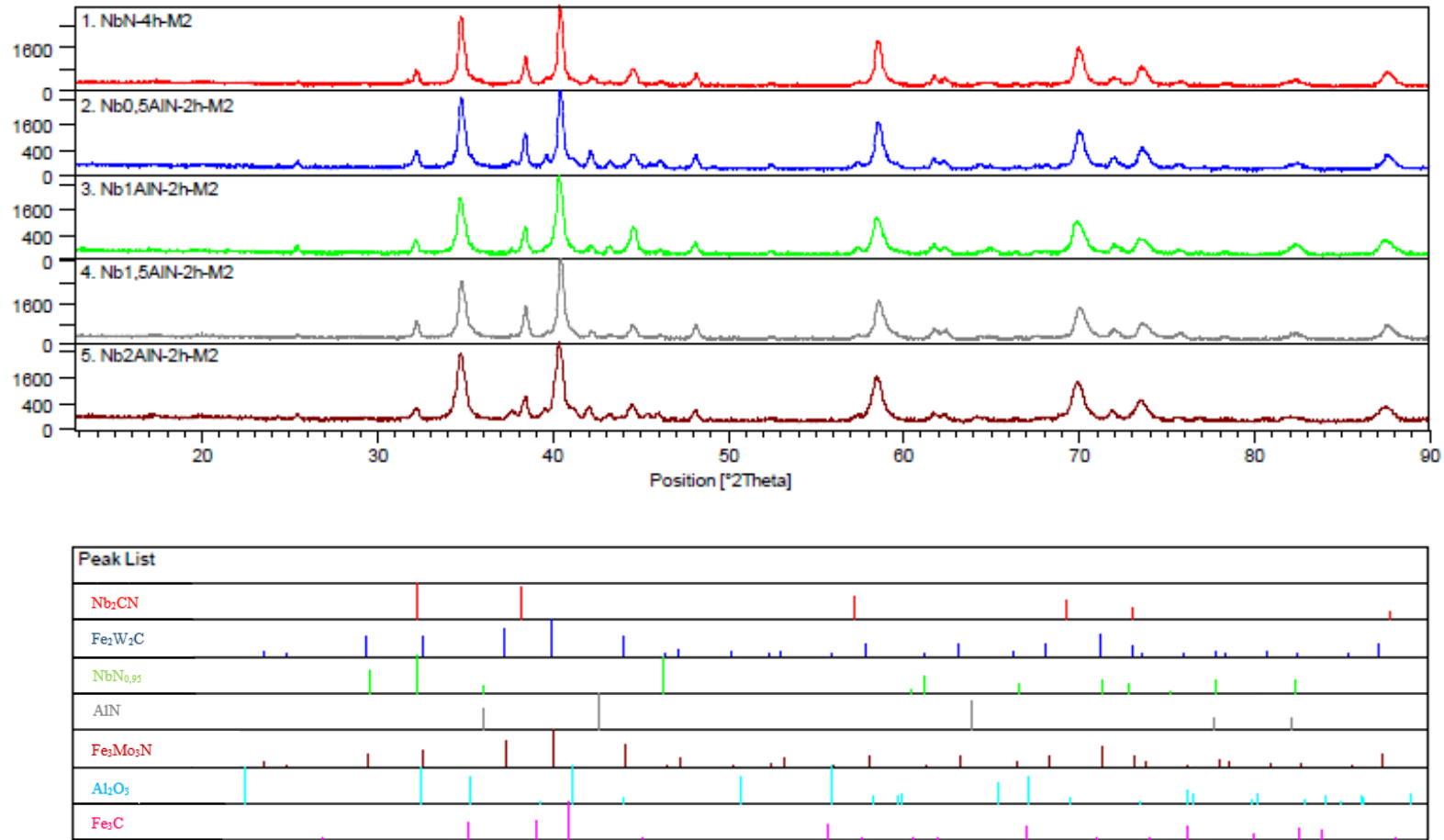
Kaplama süresindeki artışla beraber yapıdaki Nb₂CN fazında artış olurken NbN_{0,95} fazında azalma görülmüştür. Minör fazlardan AlN fazında artış gözlenirken diğer fazlarda önemli bir değişim görülmemiştir.



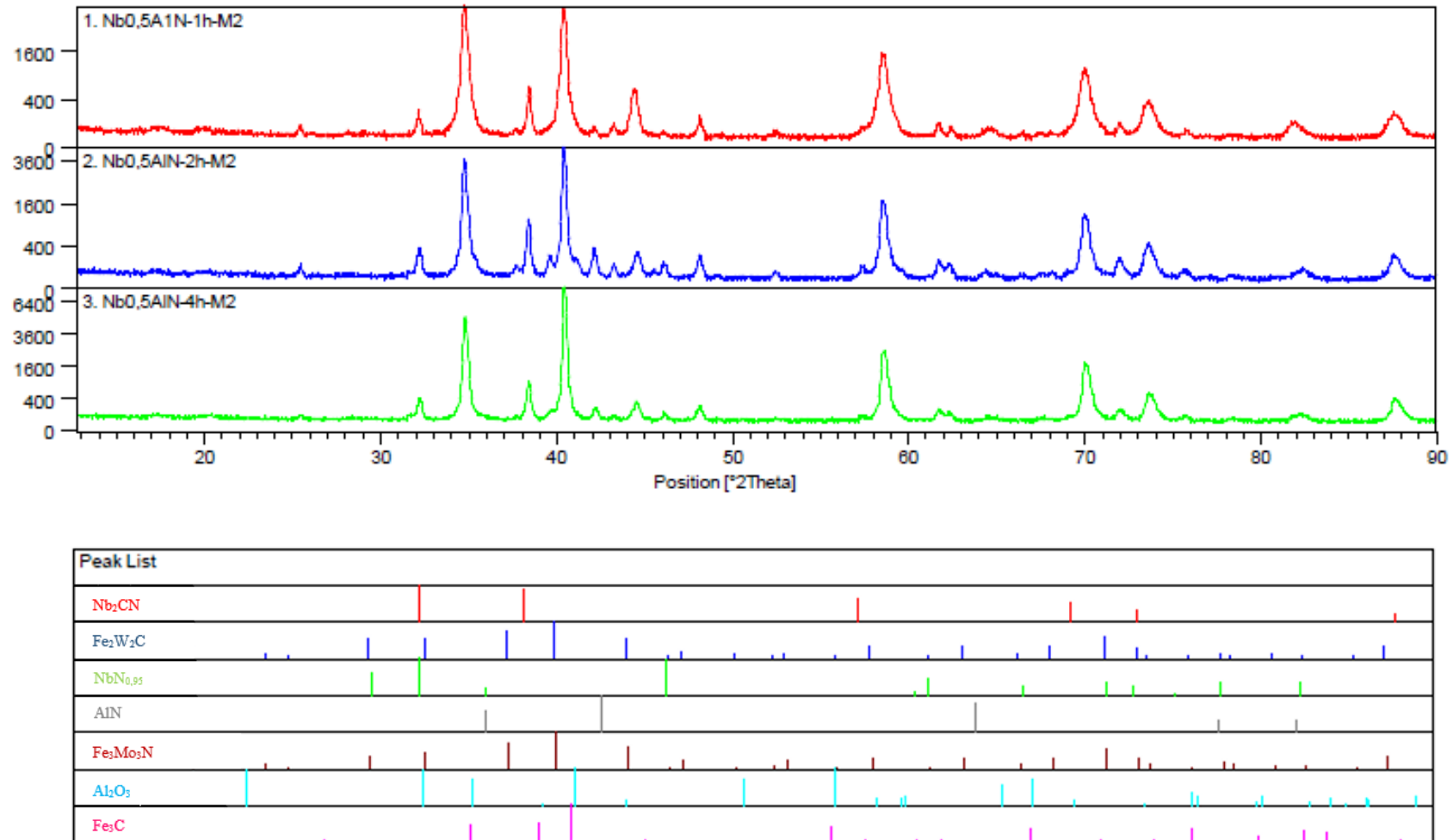
Şekil 7.47. AISI M2 çeliği üzerine 1 saat süre ile gerçekleştirilen sırasıyla katkısız; %0,5Al; %1Al; %1,5Al ve %2Al içeren kaplamaların x-ışınları difraksiyonu analizleri



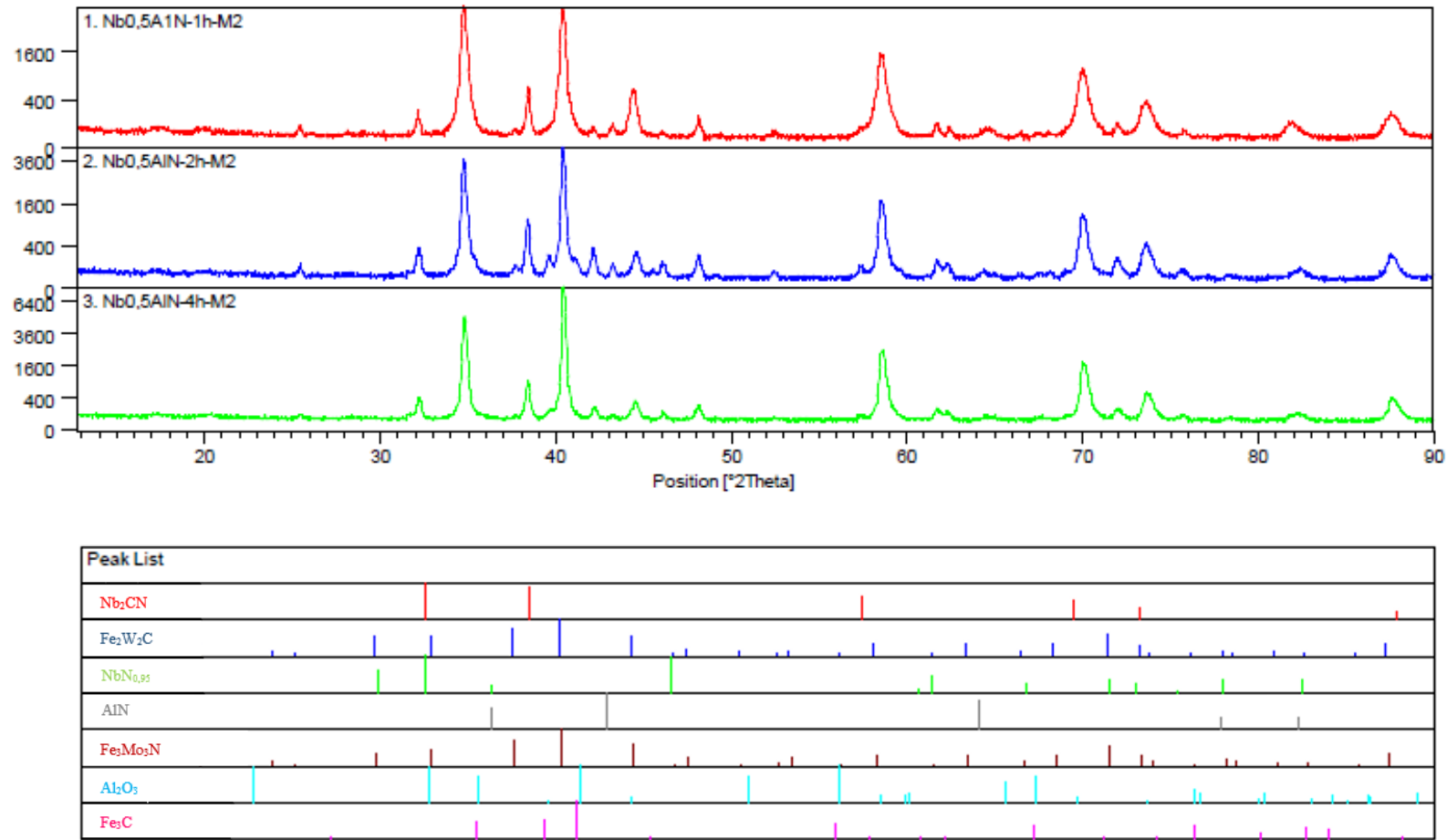
Şekil 7.48. AISI M2 çeliği üzerine 2 saat süre ile gerçekleştirilen sırasıyla katkısız; %0,5Al; %1Al; %1,5Al ve %2Al içeren kaplamaların x-ışınları difraksiyonu analizleri



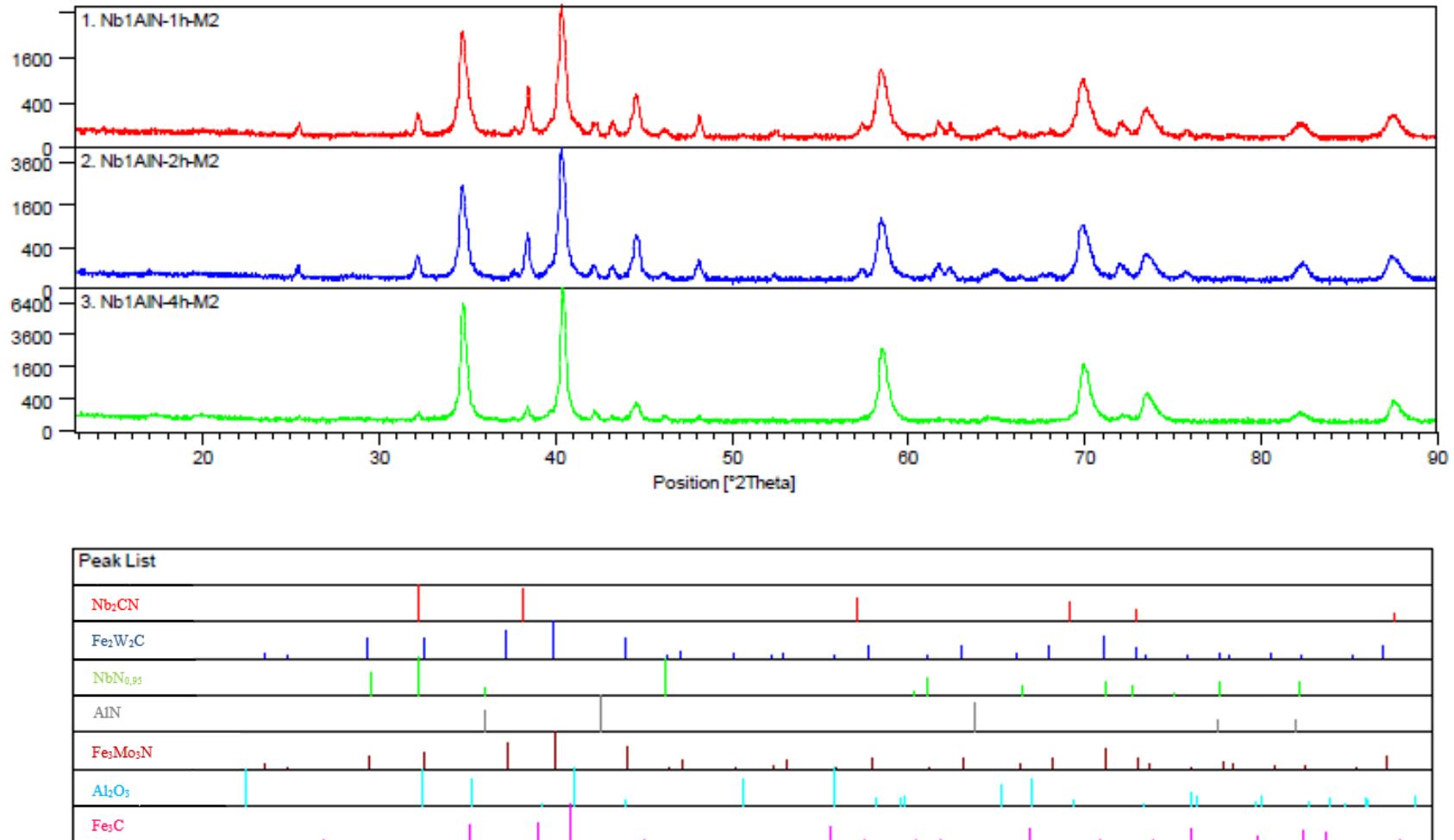
Şekil 7.49. AISI M2 çeliği üzerine 4 saat süre ile gerçekleştirilen sırasıyla katkısız; %0,5Al; %1Al; %1,5Al ve %2Al içeren kaplamaların x-ışınları difraksiyonu analizleri



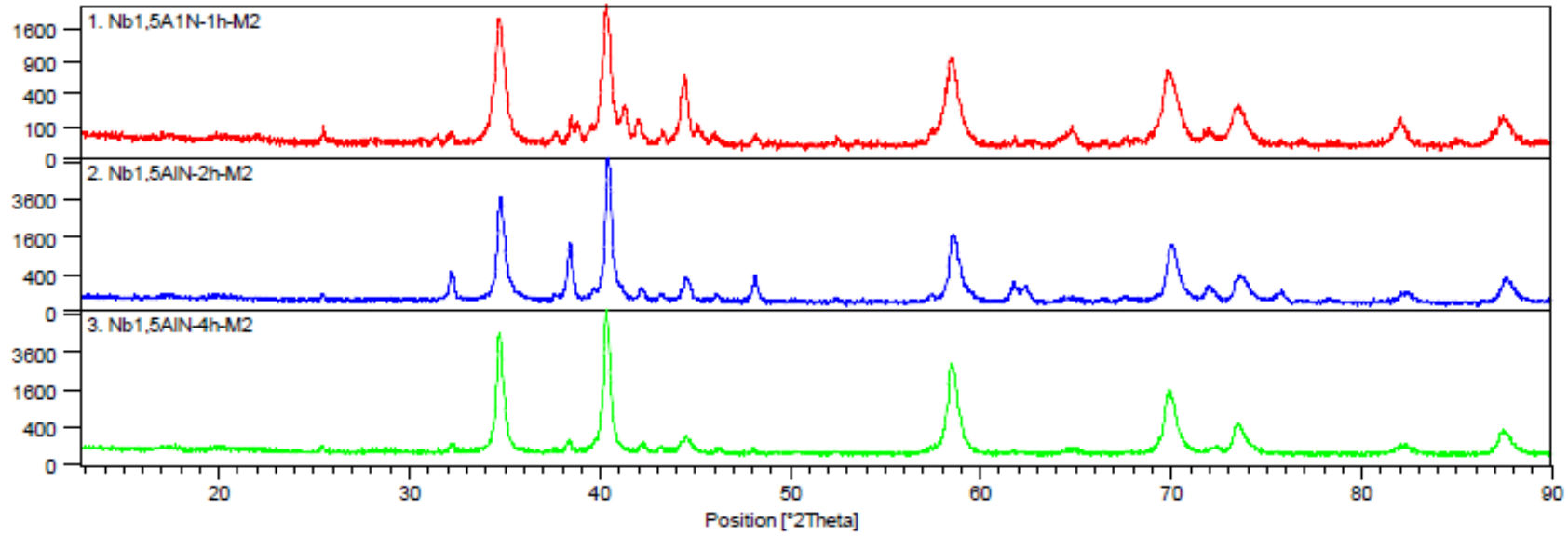
Şekil 7.50. 1,2 ve 4 saat süre ile Nb-N kaplanmış AISI M2 çeliği için x-ışınları difraksiyon analizleri



Şekil 7.51. 1,2 ve 4 saat süre ile %0,5 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI M2 çeliği için x-ışınları difraksiyon analizleri

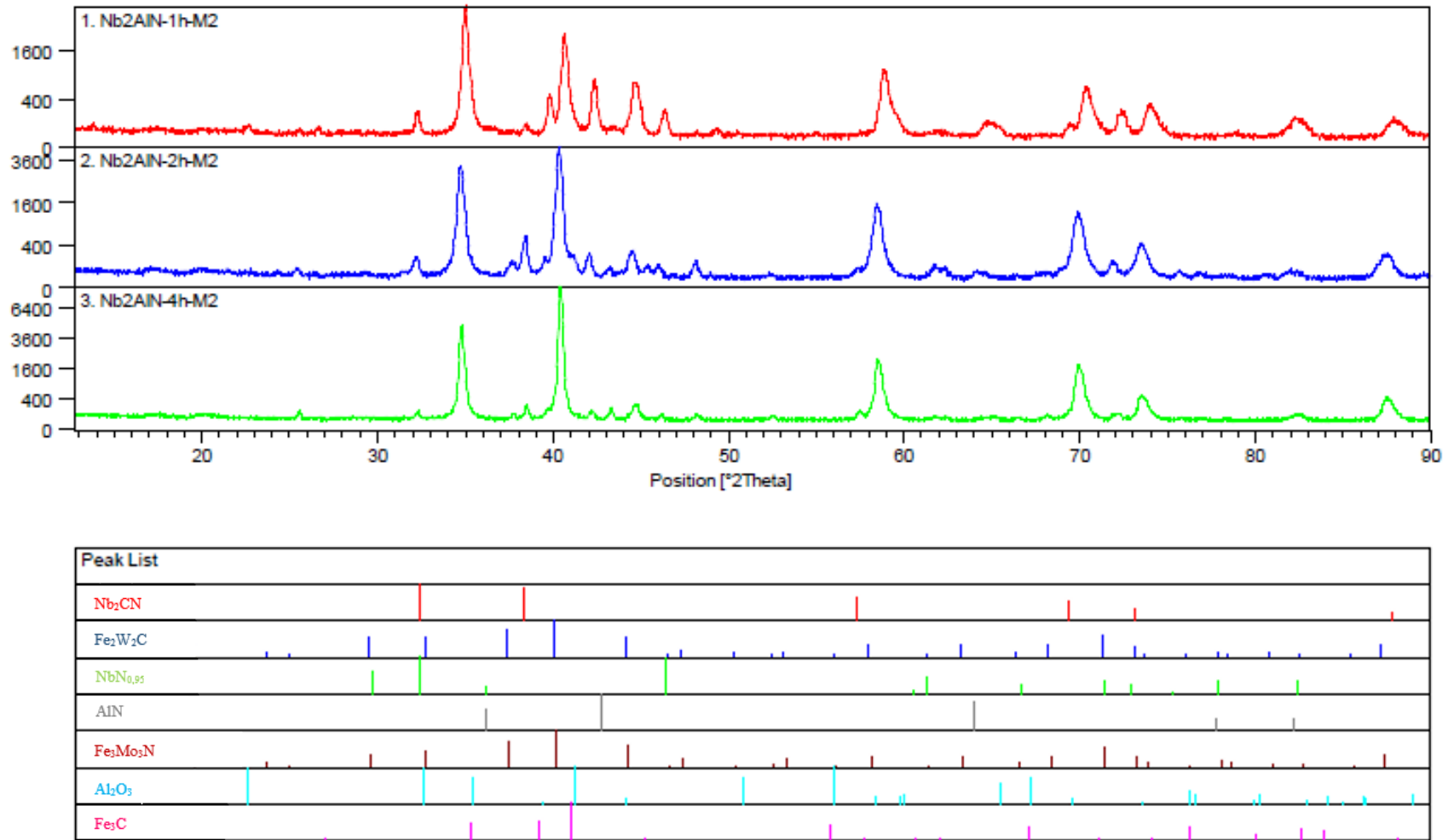


Şekil 7.52. 1,2 ve 4 saat süre ile %1 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI M2 çeliği için x-ışınları difraksiyon analizleri



Peak List	
Nb_2CN	35, 40, 58, 70, 85
Fe_2W_2C	35, 40, 58, 70, 85
$NbN_{0,95}$	35, 40, 58, 70, 85
AlN	35, 40, 58, 70, 85
Fe_3Mo_3N	35, 40, 58, 70, 85
Al_2O_3	35, 40, 58, 70, 85
Fe_3C	35, 40, 58, 70, 85

Şekil 7.53. 1,2 ve 4 saat süre ile %1,5 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI M2 çeliği için x-ışınları difraksiyon analizleri



Şekil 7.54. 1,2 ve 4 saat süre ile %2 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI M2 çeliği için x-ışınları difraksiyon analizleri

7.4. Kaplamaların Sertlikleri

1000 °C sıcaklıkta 1, 2 ve 4 sürelerde Nb-N ve değişik miktarlarda alüminyum ilave edilerek Nb-Al-N kaplanmış AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çeliklerin sertlikleri 2 saatlik süre ile kaplanmış numuneler üzerinde incelenmiştir. Elde edilen kaplamaların sertlik ölçümleri FutureTech FM700 marka mikrosertlik ölçüm cihazıyla, 10 sn süre ve 10 g yük altında yapılmıştır. Tablo 7.1. her bir altlık malzeme üzerindeki kaplamaların ilave edilen alüminyum miktarına göre değişen sertlik değerlerini göstermektedir.

Ölçüm sonuçlarına göre; ortalama sertlik değerleri sırasıyla 433 HK_{0.01}, 755 HK_{0.01} ve 1081 HK_{0.01} olan AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çeliklerinin yüzeyinde, %2,0 Al içeren kaplama ortamında elde edilen Nb-Al-N kaplamalarda sırasıyla 2078 HK_{0.01}, 2577 ve 2636 HK_{0.01} sertlik değerlerine ulaşılmıştır. Sertlik değerlerindeki artış AISI 4140 çeliği için %498; AISI D2 çeliği için %239 ve AISI M2 çeliği için %244 nispetinde sertlik artışı elde edilmiştir.

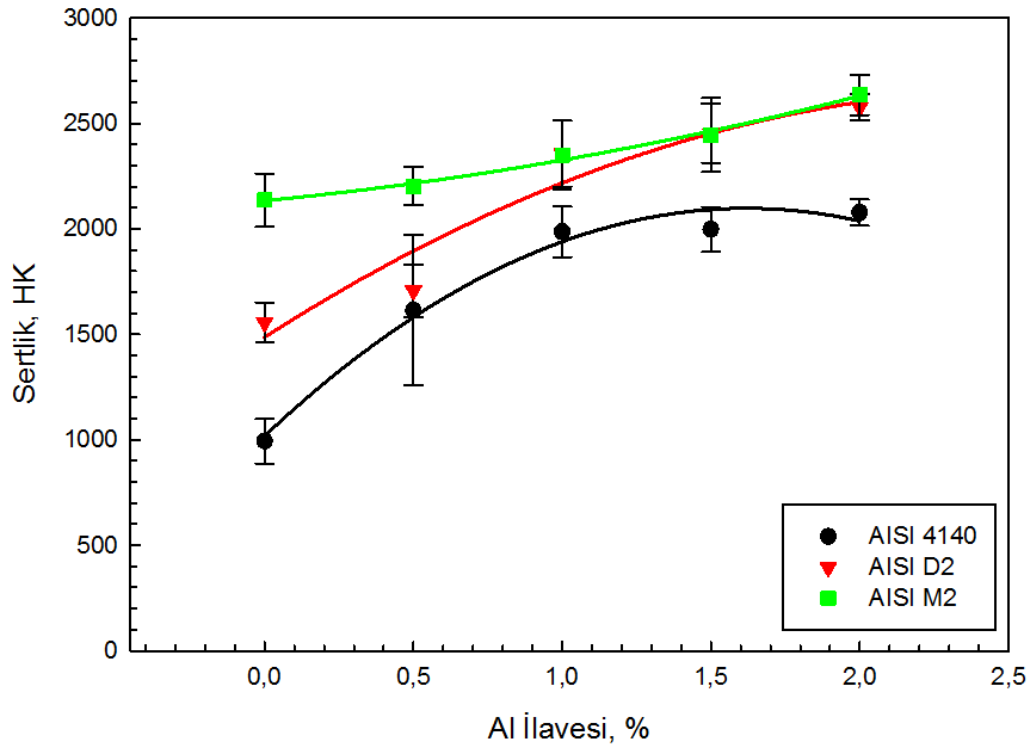
Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, aynı altlık malzeme üzerinde elde edilen kaplamaların kaplama banyosundaki Al miktarının artışı ile sertlik değerinin de artmasına sebep olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeni, x-ışınları difraksiyon analizlerinden de görülebileceği üzere (bkz. Şekil 7.31.-7.54.); alüminyum miktarındaki değişim yapıda bulunan NbN_{0,95} ve Nb₂CN ana fazlarının oranının değişmesine, AlN ve Nb₃Al₂N gibi minör fazlarının oluşmasına ve artan alüminyum miktarı ile beraber yapıdaki bu minör faz oranlarının artmasına neden olmuştur. Muhtemelen bu fazlar ve faz oranlarındaki değişim kaplama tabakalarının sertliklerinin artışına sebep olmaktadır.

Diğer taraftan; aynı bileşime sahip ancak farklı altlık malzemelere sahip malzemelerin sertlikleri incelendiğinde AISI M2, AISI D2 ve AISI 4140 sıralamasında kaplamaların sertlik değerleri azalmaktadır. Bunun nedeni olarak çeliklerde bulunan alaşım elementleri ve bunların miktarlarının kaplama bölgesinde oluşturdukları karbür ve nitrürlerin etkisi olduğu söylenebilir. AISI M2 çeliği için x-

ışınları difraksiyon analizlerinde yapıda bulunan W, Mo, Cr ve V alaşım elementlerinin oluşturduğu karbür ve nitrürlerin varlığı görülmüştür. Yine AISI D2 çeliği için yapıda bulunan Cr alaşım elementinin karbür ve nitrürler oluşturduğu görülmüştür. Düşük alaşımli AISI 4140 çeliği için ise bu tür karbürler ve nitrürlere rastlanmamıştır.

Tablo 7.1. 1000 °C sıcaklıkta 2 saat süre ile Nb-N ve değişik oranlarda alüminyum içeren Nb-Al-N kaplamalara ait sertlik değerleri

Bileşim	AISI 4140	AISI D2	AISI M2
Katkısız	993,65±106,25	1557,42±125,71	2136,88±94,61
%0,5 Al Katkılı	1613,58±357,49	1708,3±89,95	2203,78±124,26
%1,0 Al Katkılı	1987±119,89	2358,02±162,63	2350,32±±157,56
%1,5 Al Katkılı	1997,72±105,76	2454,38±175,65	2445,88±140,71
%2,0 Al Katkılı	2077,58±194,65	2577,62±95,40	2636,42±62,10

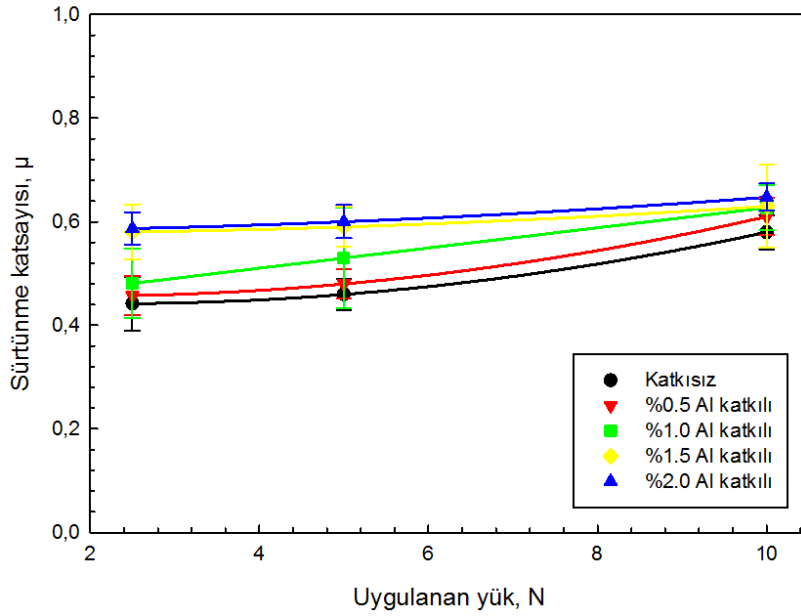


Şekil 7.55. Kaplama ortamına ilave edilen alüminyum elementinin miktarına bağlı olarak 1000°C sıcaklıkta 2 saat süre ile AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çeliklerinin yüzeyinde elde edilen sertlik değerlerindeki değişimler

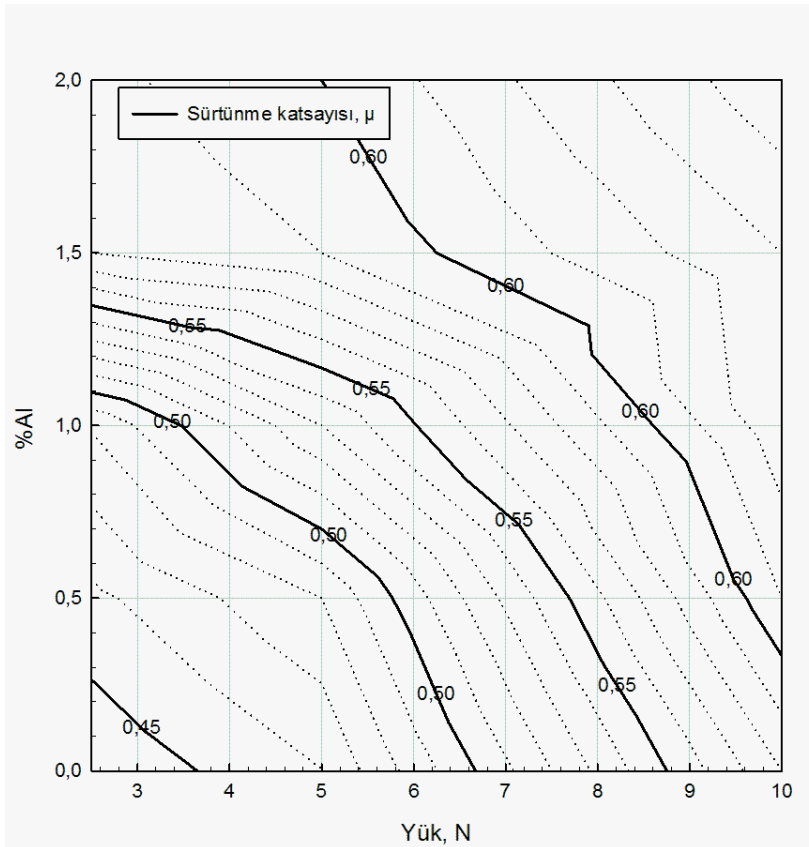
7.5. Aşınma Deneyleri

Elde edilen kaplamalardan 1000 °C sıcaklıkta 4 saat süre ile Nb-N ve değişik oranlarda alüminyum ilave edilerek Nb-Al-N kaplanmış olan çeliklerin aşınma deneyleri ASTM G-99 standardına uygun olarak imal edilmiş tribometre ile yapılmıştır. Ball-on-disk yöntemiyle yapılan aşınma deneylerinde kaplamaların aşındırılmasında 10mm çapında alümina bilye kullanılmıştır. Her bir numune için 0.1 m/s hızda 2.5N, 5N ve 10N yükler altında ve 5N yük altında 0.1m/s, 0.3m/s ve 0.5m/s hızlarda aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler öncesinde ve sonrasında disk ve bilyenin yüzeyi etil alkol ile yüzey temizleme işlemine tabi tutulmuştur. Deneyler esnasında oda sıcaklığı 22°C olup ortamın nemi %53 ile %65 arasında değişme göstermiştir.

Şekil 7.56.-7.58.'de uygulanan yüke bağlı olarak sürtünme katsayısının değişimi ve değişime bağlı olarak elde edilen kontur diyagramları verilmiştir. Buna göre; değişen altlık malzemeye göre sürtünme katsayısının değişimi farklılık göstermektedir. AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çelikleri için kaplama ortamlarına ve uygulanan yüke bağlı olarak sürtünme katsayısı değerlerinde önemli bir değişim görülmemiştir.

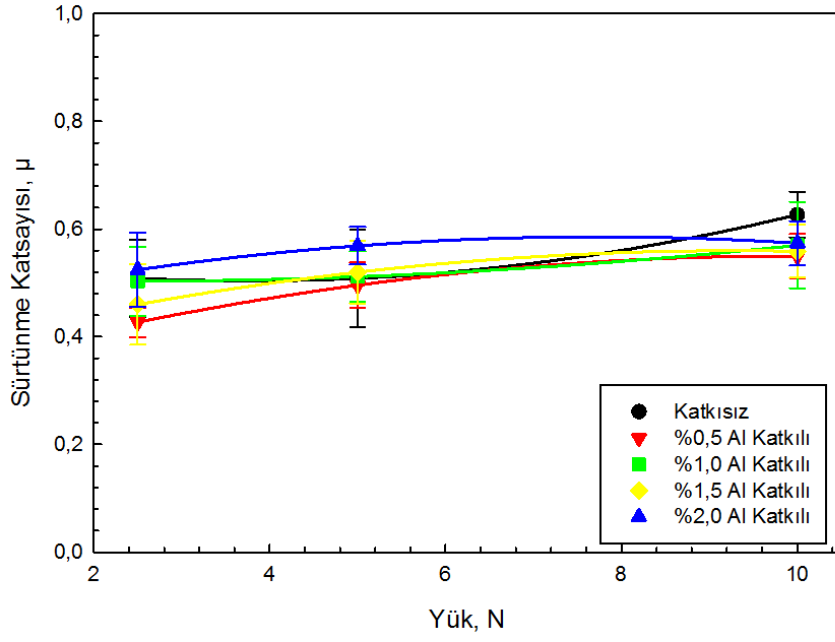


(a)

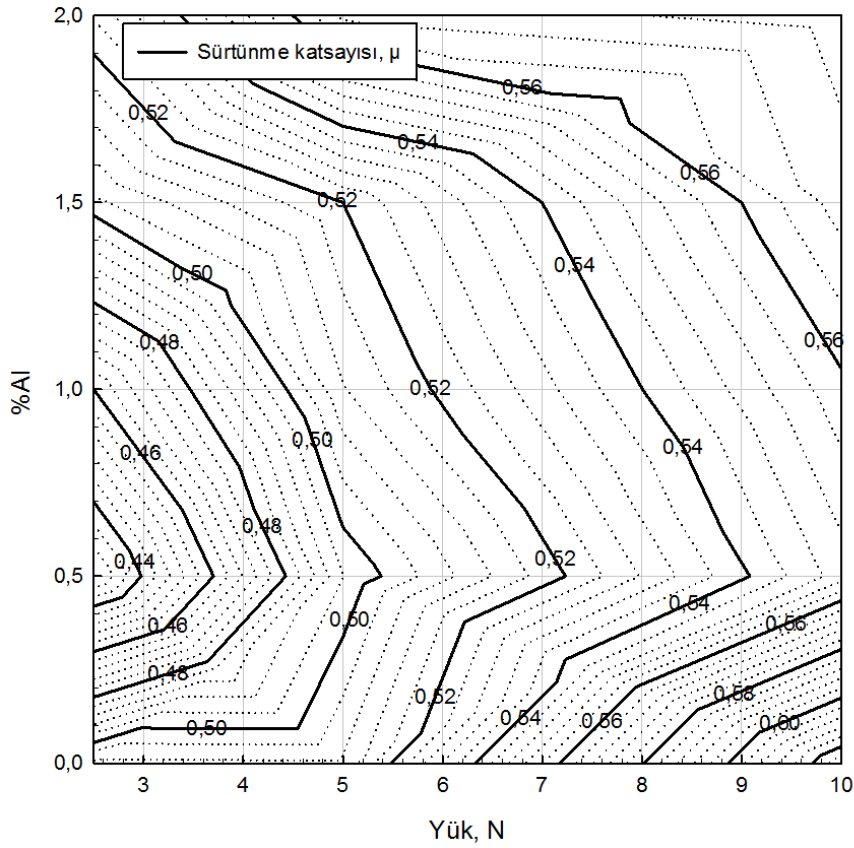


(b)

Şekil 7.56. 4 saat süre ile 1000°C sıcaklıkta değişik oranlarda Al ilave edilen kaplama ortamlarında kaplanmış AISI 4140 çeliğine ait uygulanan yüke bağlı olarak (a) sürtünme katsayısının değişimi ve (b) bu grafiğe ait kontur diyagramı

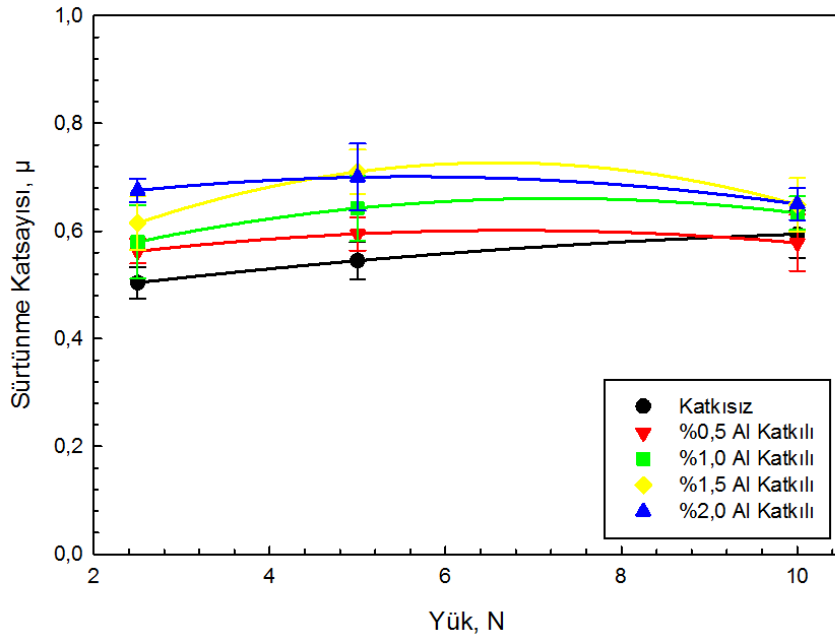


(a)

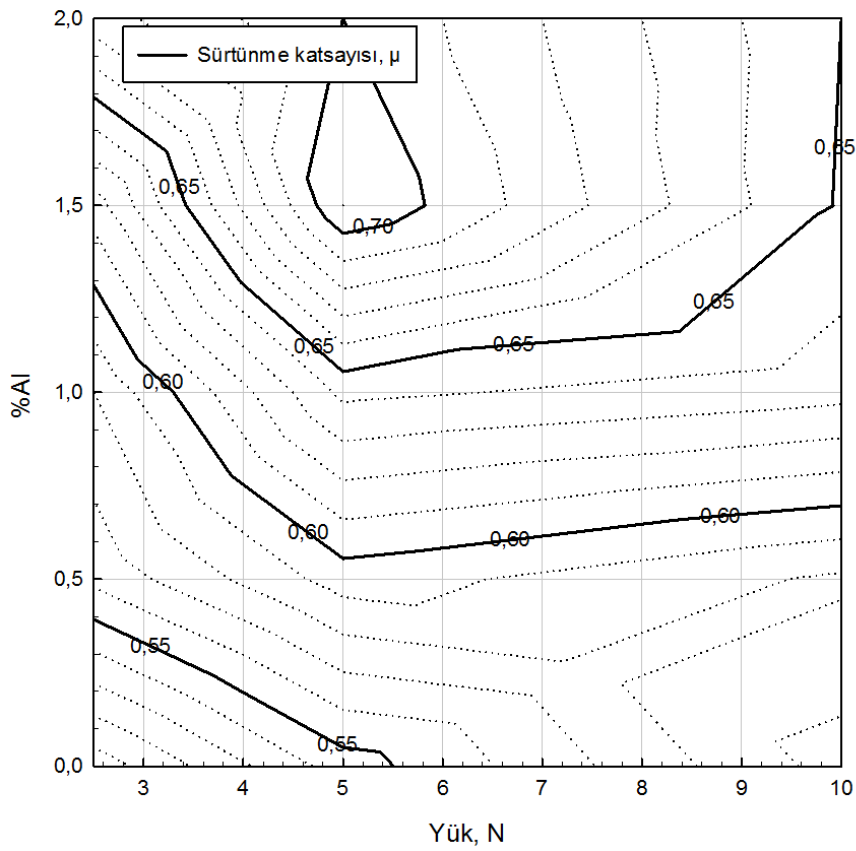


(b)

Şekil 7.57. 4 saat süre ile 1000°C sıcaklıkta değişik oranlarda Al ilave edilen kaplama ortamlarında kaplanmış AISI D2 çeliğine ait uygulanan yüke bağlı olarak (a) sürtünme katsayısının değişimi ve (b) bu grafiğe ait kontur diyagramı



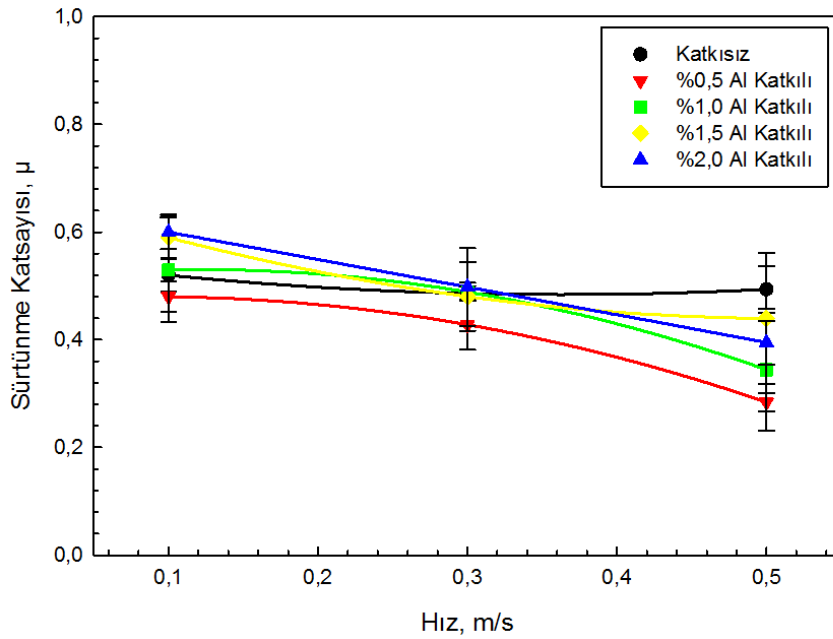
(a)



(b)

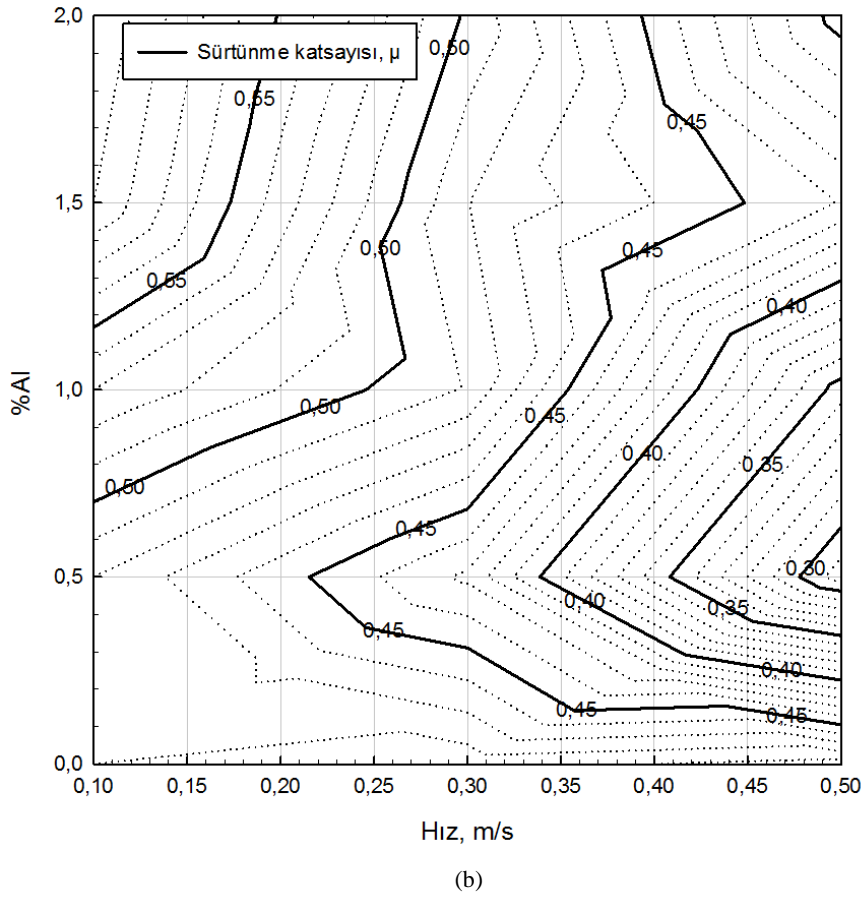
Şekil 7.58. 4 saat süre ile 1000°C sıcaklıkta değişik oranlarda Al ilave edilen kaplama ortamlarında kaplanmış AISI M2 çeliğine ait uygulanan yüke bağlı olarak (a) sürtünme katsayısının değişimi ve (b) bu grafiğe ait kontur diyagramı

Şekil 7.59.-7.61.'de kaplama ortamına ilave edilen Al elementinin konsantrasyonuna bağlı olarak 1000 °C sıcaklıkta 4 saat süreyle elde edilen kaplamaların 5N yük altında değişen sürtünme hızına bağlı olarak sürtünme katsayısındaki değişimler görülmektedir. Şekillerden görüldüğü üzere, genel olarak artan sürtünme hızına bağlı olarak kaplamaların sürtünme katsayılarında azalma görülmektedir. Kaplama ortamına ilave edilen Al elementinin miktarı arttıkça, sürtünme katsayısı değerinde bir miktar artış görülmektedir.

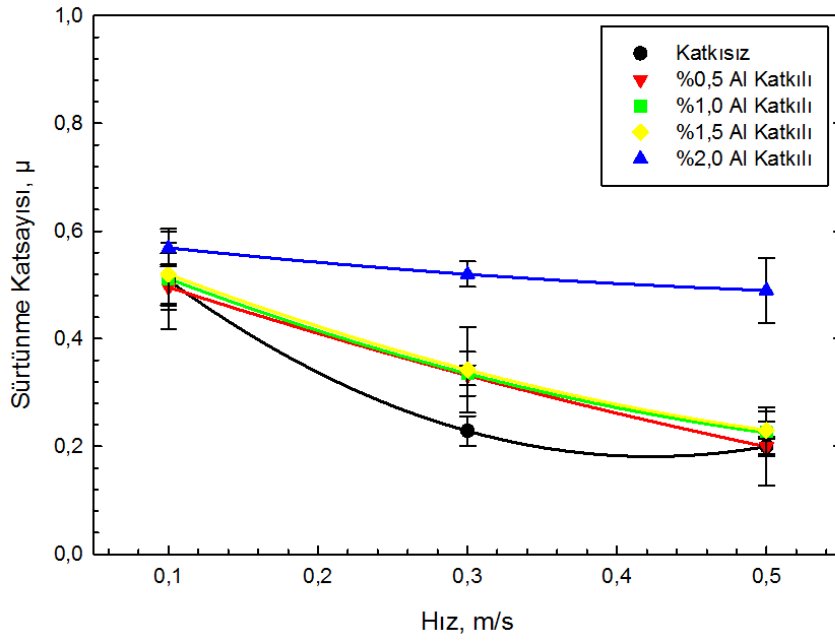


(a)

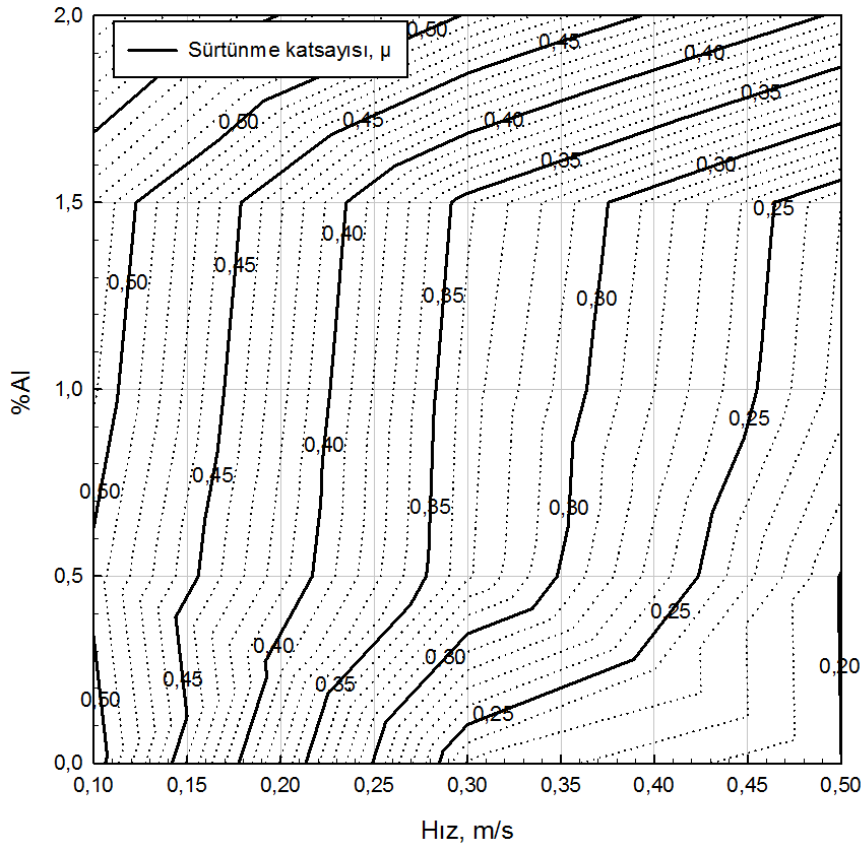
Şekil 7.59. AISI 4140 çeliğine üzerinde 4 saat süre ile 1000°C sıcaklıkta kaplama ortamına değişik oranlarda Al ilave edilerek elde edilen kaplamaların (a) sürtünme katsayısı ve (b) aynı grafiğe ait kontur diyagramı



Şekil 7.59. AISI 4140 çeliğine üzerinde 4 saat süre ile 1000°C sıcaklıkta kaplama ortamına değişik oranlarda Al ilave edilerek elde edilen kaplamaların (a) sürtünme katsayısı ve (b) aynı grafiğe ait kontur diyagramı (devamı)

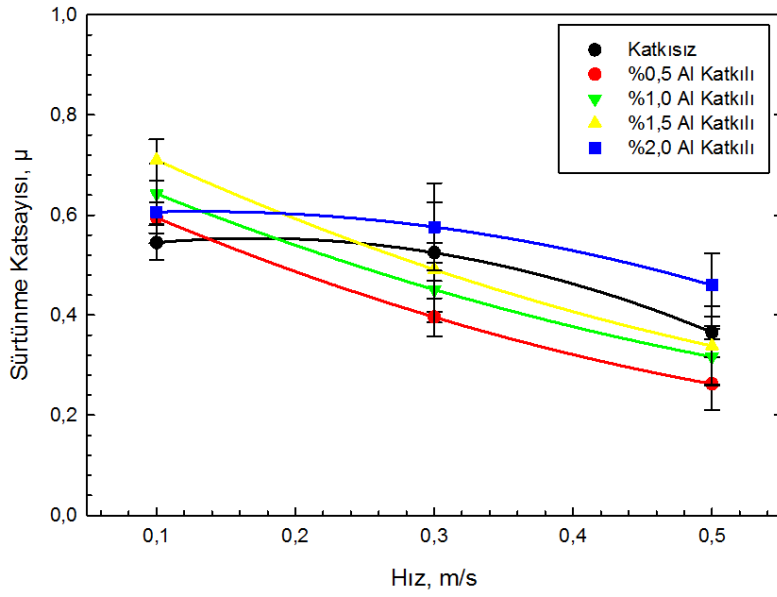


(a)

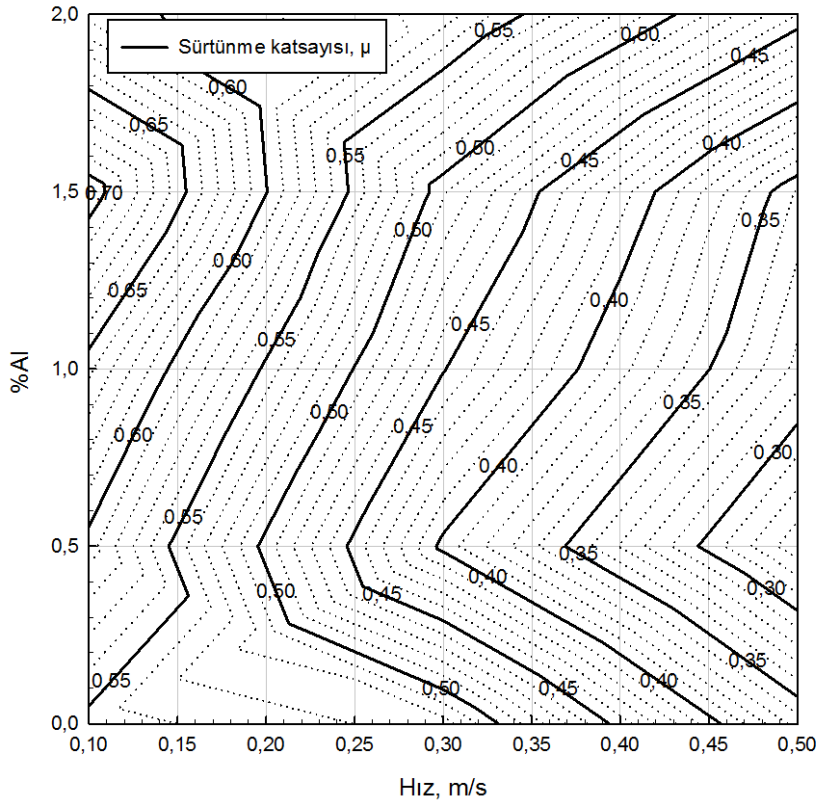


(b)

Şekil 7.60. AISI D2 çeliğine üzerinde 4 saat süre ile 1000°C sıcaklıkta kaplama ortamına değişik oranlarda Al ilave edilerek elde edilen kaplamaların (a) sürtünme katsayısı ve (b) aynı grafiğe ait kontur diyagramı



(a)

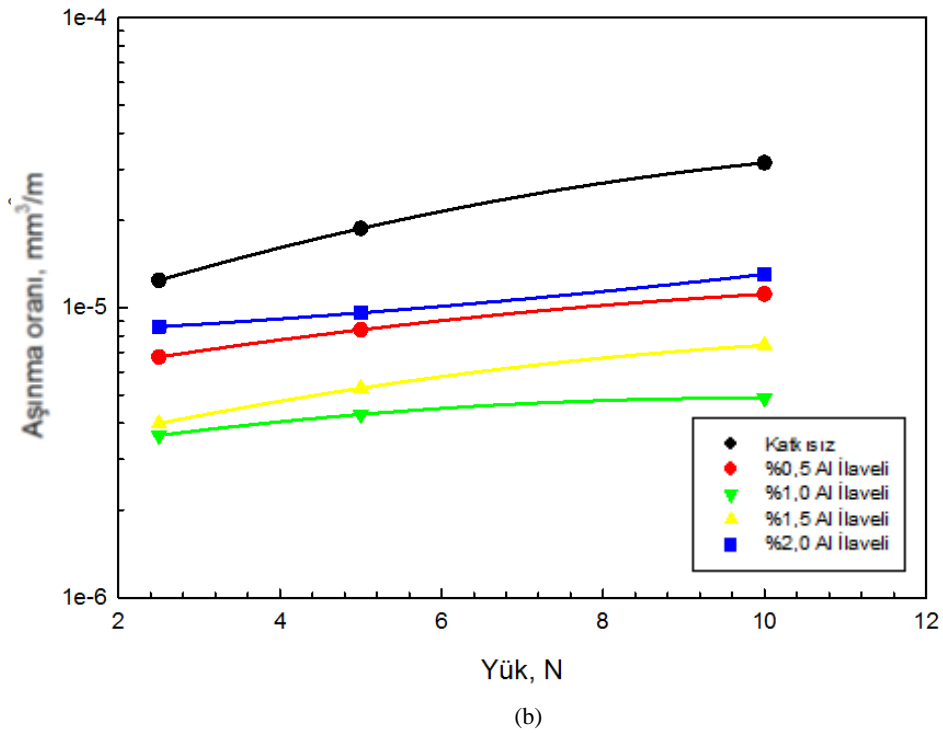
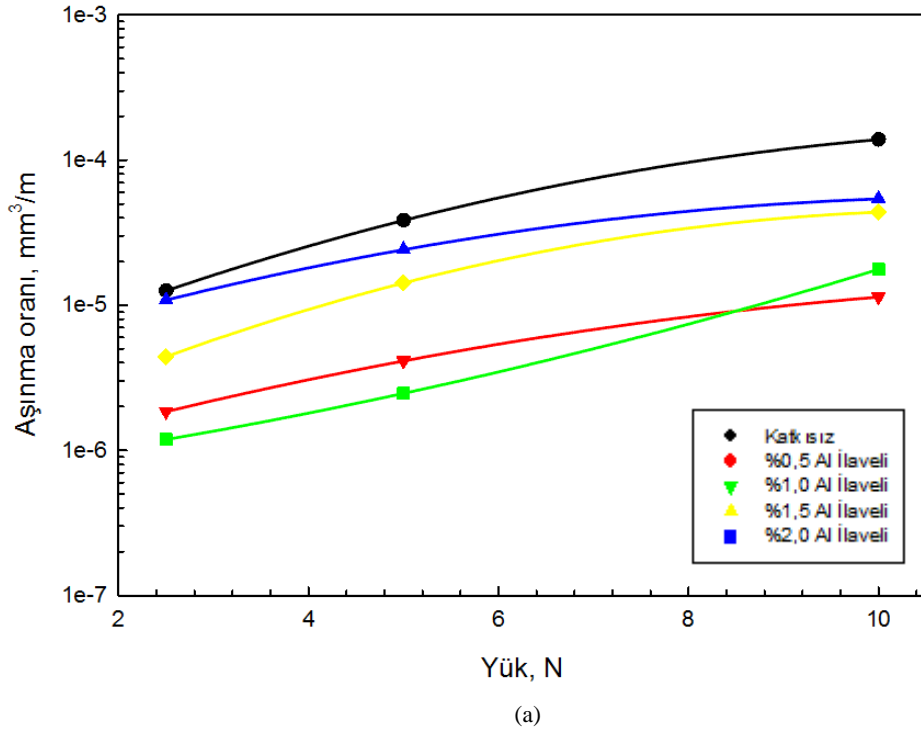


(b)

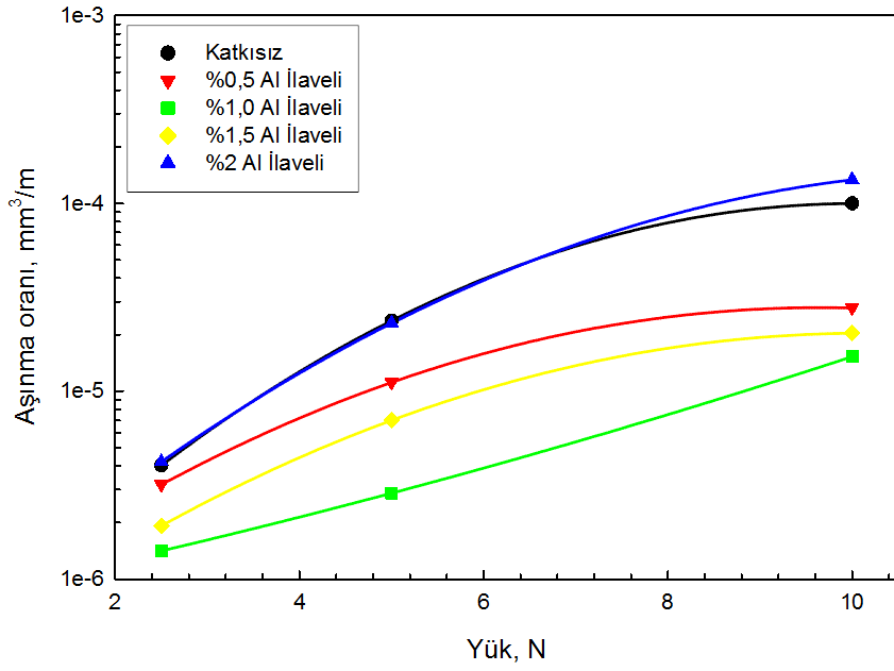
Şekil 7.61. AISI M2 çeliğine üzerinde 4 saat süre ile 1000°C sıcaklıkta kaplama ortamına değişik oranlarda Al ilave edilerek elde edilen kaplamaların (a) sürtünme katsayısı ve (b) aynı grafiğe ait kontur diyagramı

Şekil 7.62.-7.67.'de kaplanmış AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çeliklerinde ve deneylerde kullanılan bilyelerde aşınma deneyleri sonucunda meydana gelen aşınma miktarının yüke göre değişimi verilmektedir. Aşınma hızlarının hesaplanması için kaplanmış malzemelerin aşınan bölgelerinin profilometre yardımıyla aşınma derinlikleri ve çapları bulunmuştur. Bulunan değerlerden aşınan bölge hacimleri hesap edilmiştir. Deneyde kullanılan bilye için ise aşınan bölgenin çapı bulunmuş ve bu değer yardımıyla aşınan bölgenin hacmi geometrik olarak hesaplanmıştır.

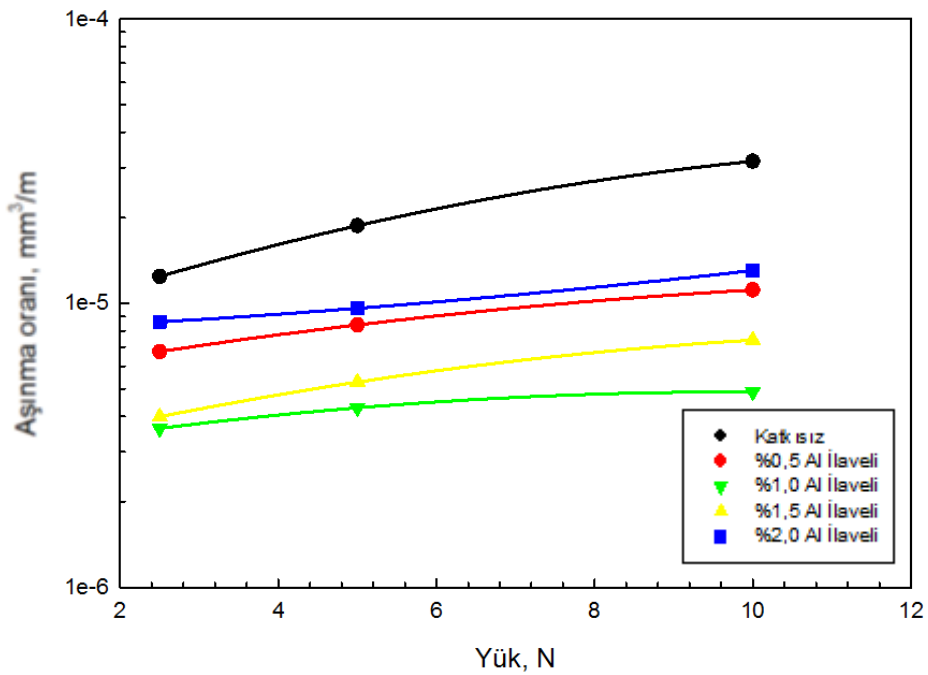
Gerçekleştirilen tüm kaplamalar için yükün artışına bağlı olarak aşınma miktarında artış gözlemlenmiştir. Ayrıca aşınma hızı, kaplama ortamına ilave edilen Al miktarına bağlı olarak incelenmiştir. Bütün kaplama şartları içerisinde en düşük aşınma %1 Al içeren kaplama ortamında elde edilen kaplamalarda tespit edilmiştir. Diğer ortamlar için sırasıyla en az aşınan kaplamalar %1,5Al; %0,5Al; %2Al ve katkısız kaplamalar şeklinde devam ettiği görülmüştür. Bilyenin aşınma hızının da kaplama bileşimi ile paralel hareket ettiği gözlemlenmiştir.



Şekil 7.62. Kaplama ortamına değişik oranlarda Al ilave edilerek kaplanmış AISI 4140 çeliğinin uygulanan aşınma yüküne bağlı olarak (a) aşınma oranının ve (b) alümina bilyede aşınma oranının değişimi

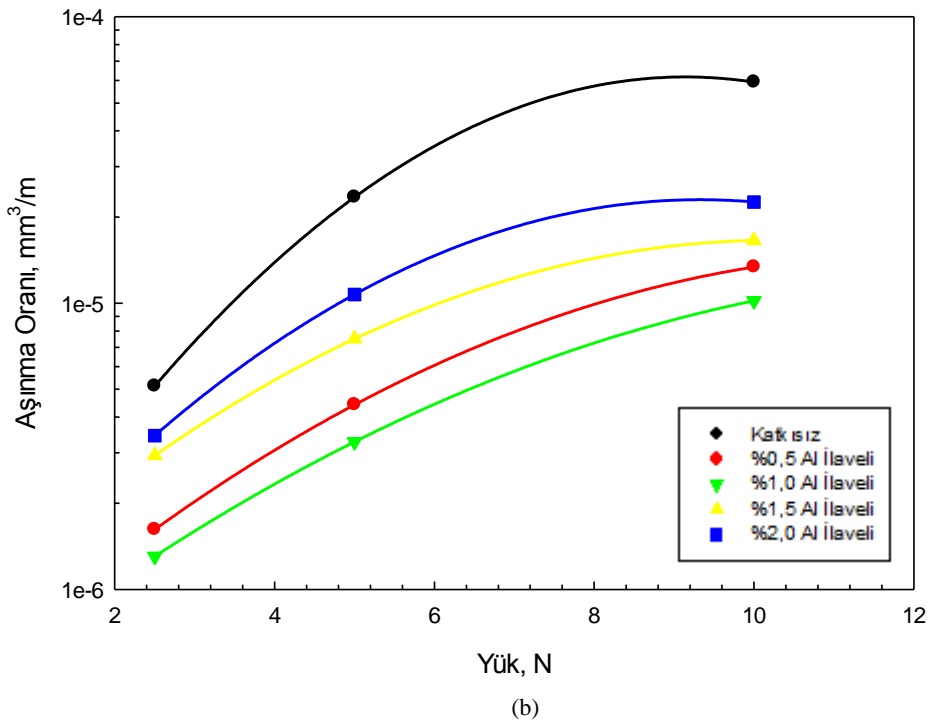
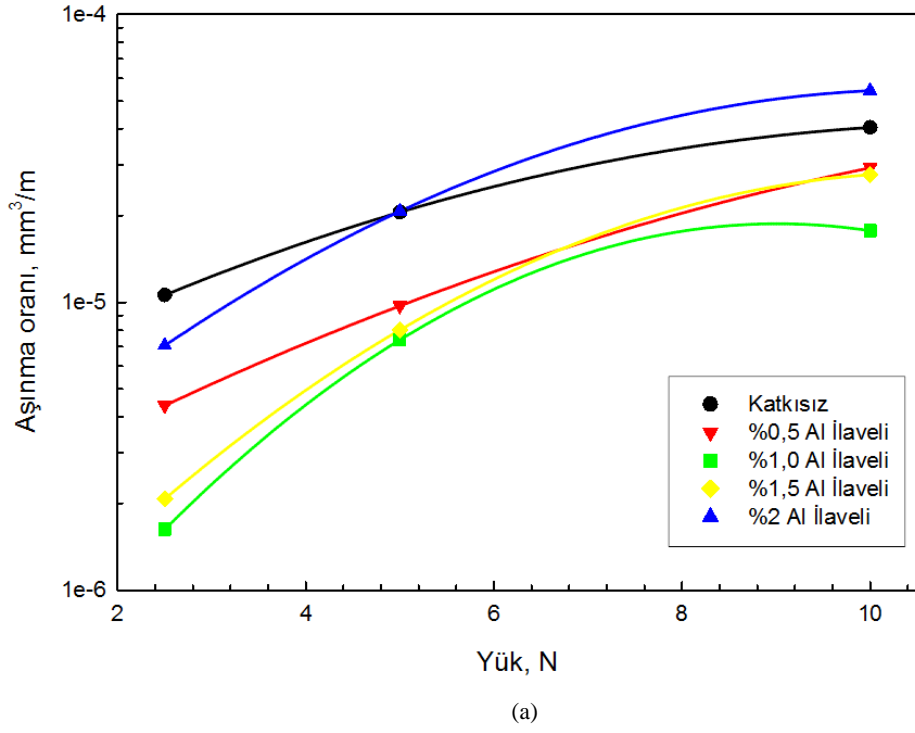


(a)

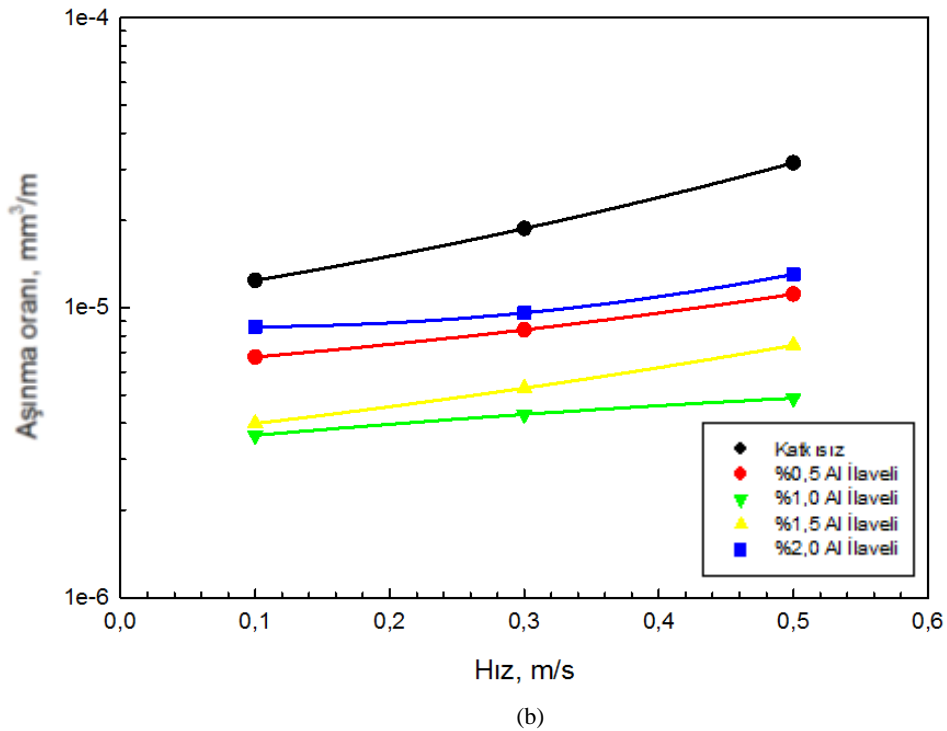
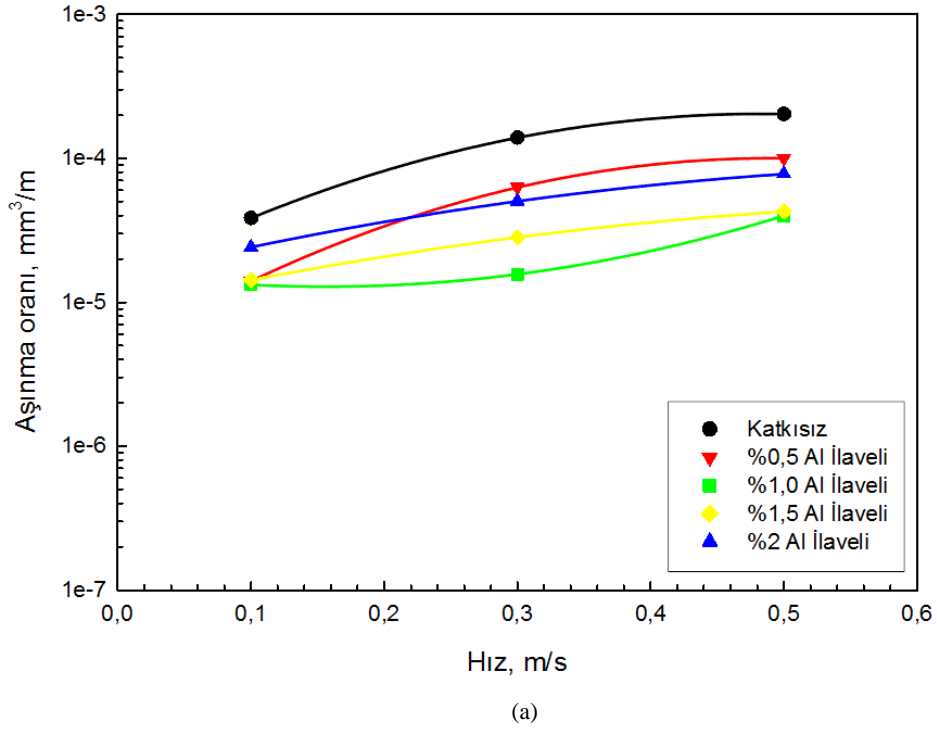


(b)

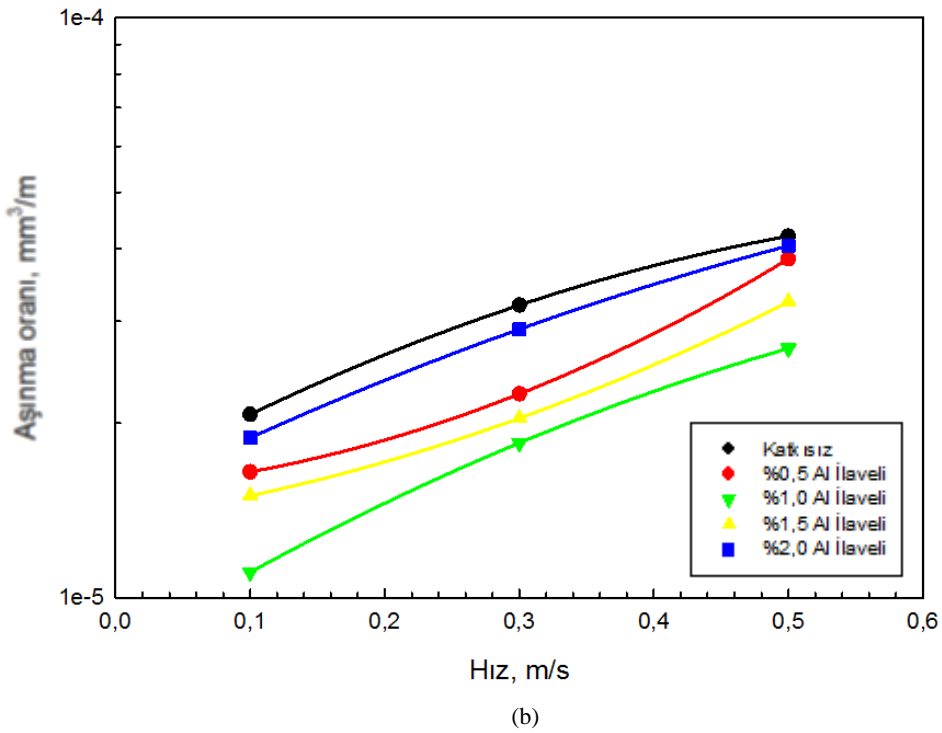
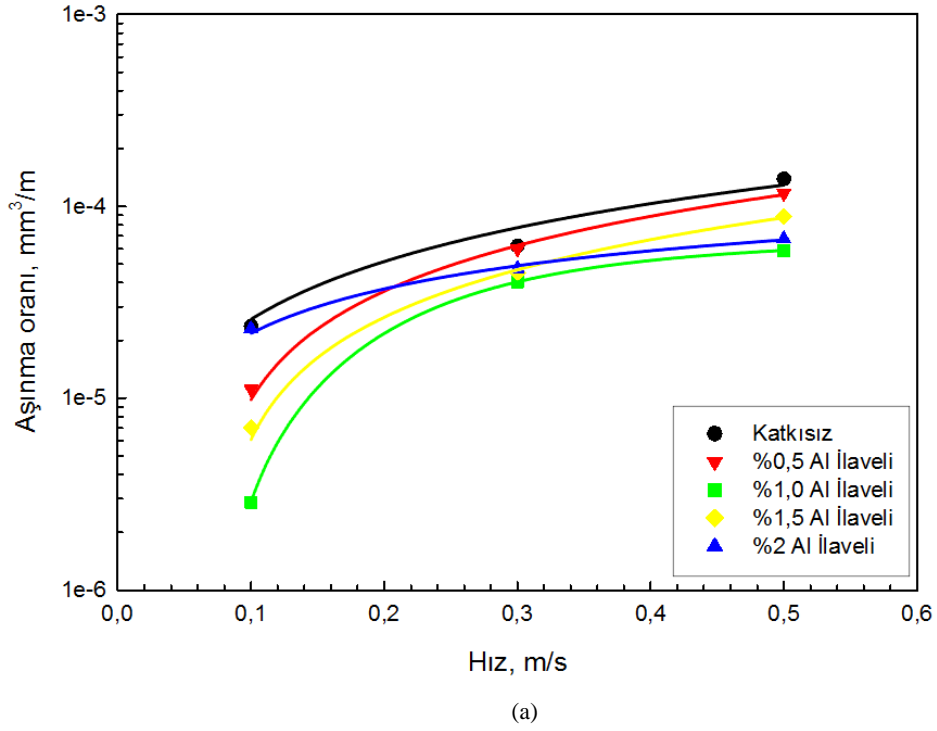
Şekil 7.63. Kaplama ortamına değişik oranlarda Al ilave edilerek kaplanmış AISI D2 çeliğinin uygulanan aşınma yüküne bağlı olarak (a) aşınma oranının ve (b) alümina bilyede aşınma oranının değişimi



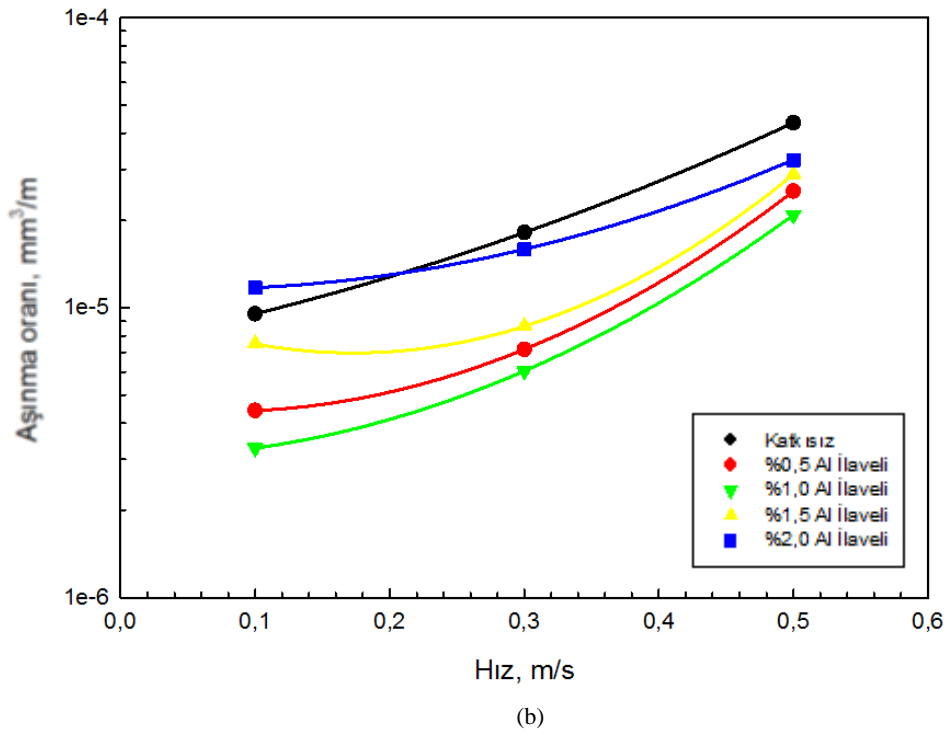
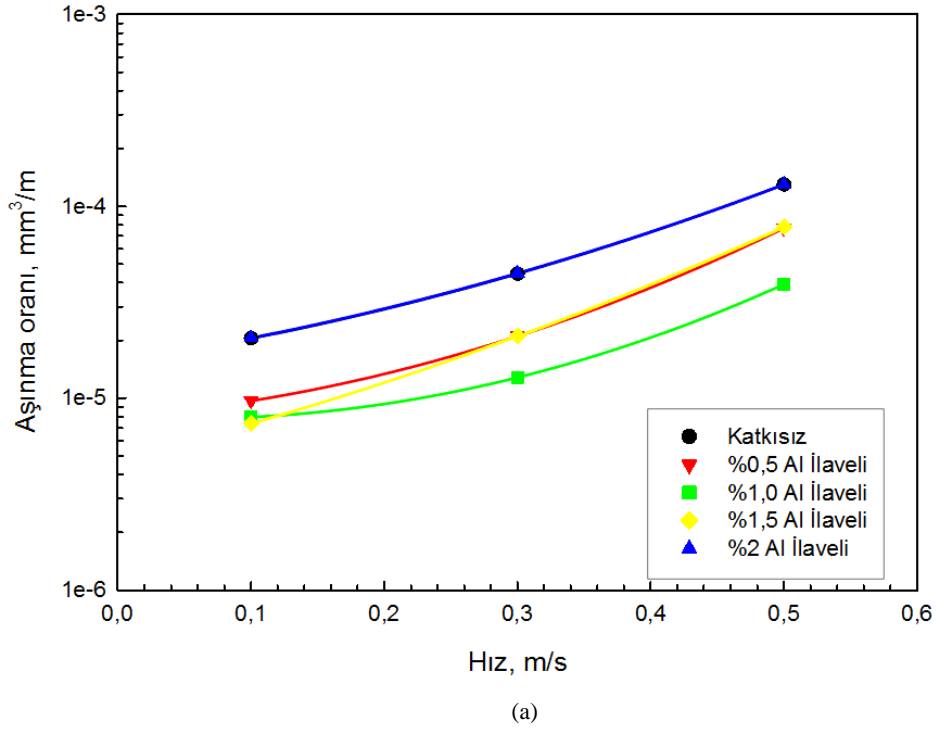
Şekil 7.64. Kaplama ortamına değişik oranlarda Al ilave edilerek kaplanmış AISI M2 çeliğinin uygulanan aşınma yüküne bağlı olarak (a) aşınma oranının ve (b) alümina bilyede aşınma oranının değişimi



Şekil 7.65. Kaplama ortamına değişik oranlarda Al ilave edilerek kaplanmış AISI 4140 çeliğinin uygulanan aşınma hızına bağlı olarak (a) aşınma oranının ve (b) alümina bilyede aşınma oranının değişimi



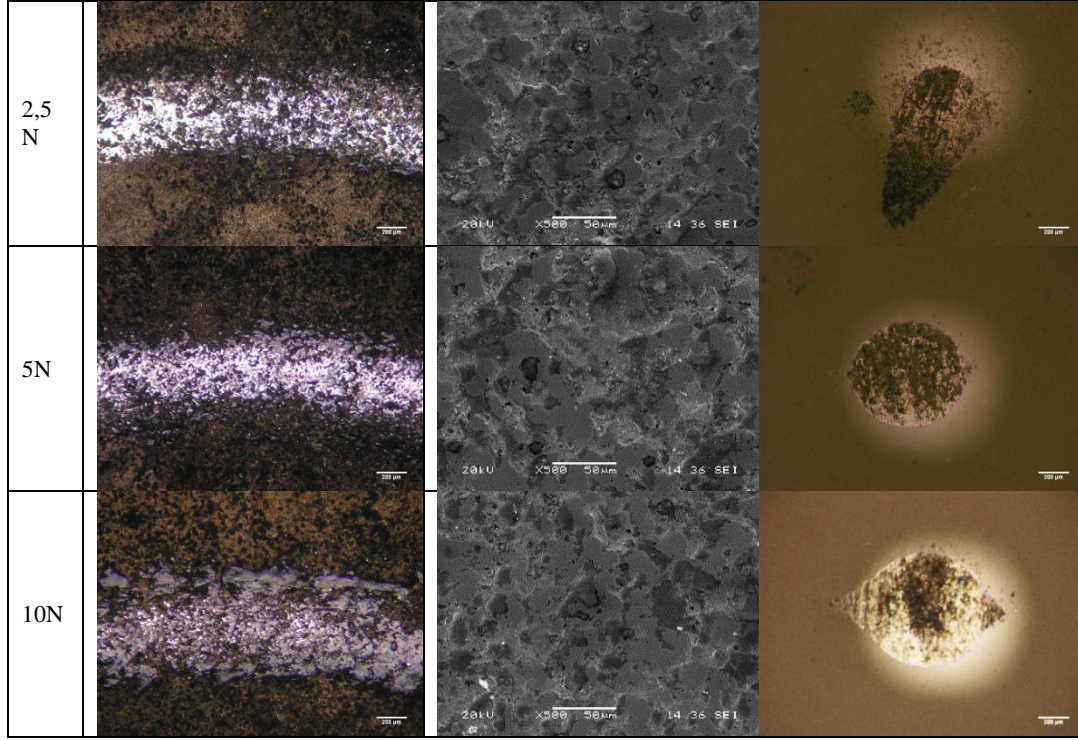
Şekil 7.66. Kaplama ortamına değişik oranlarda Al ilave edilerek kaplanmış AISI D2 çeliğinin uygulanan aşınma hızına bağlı olarak (a) aşınma oranının ve (b) alümina bilyede aşınma oranının değişimi



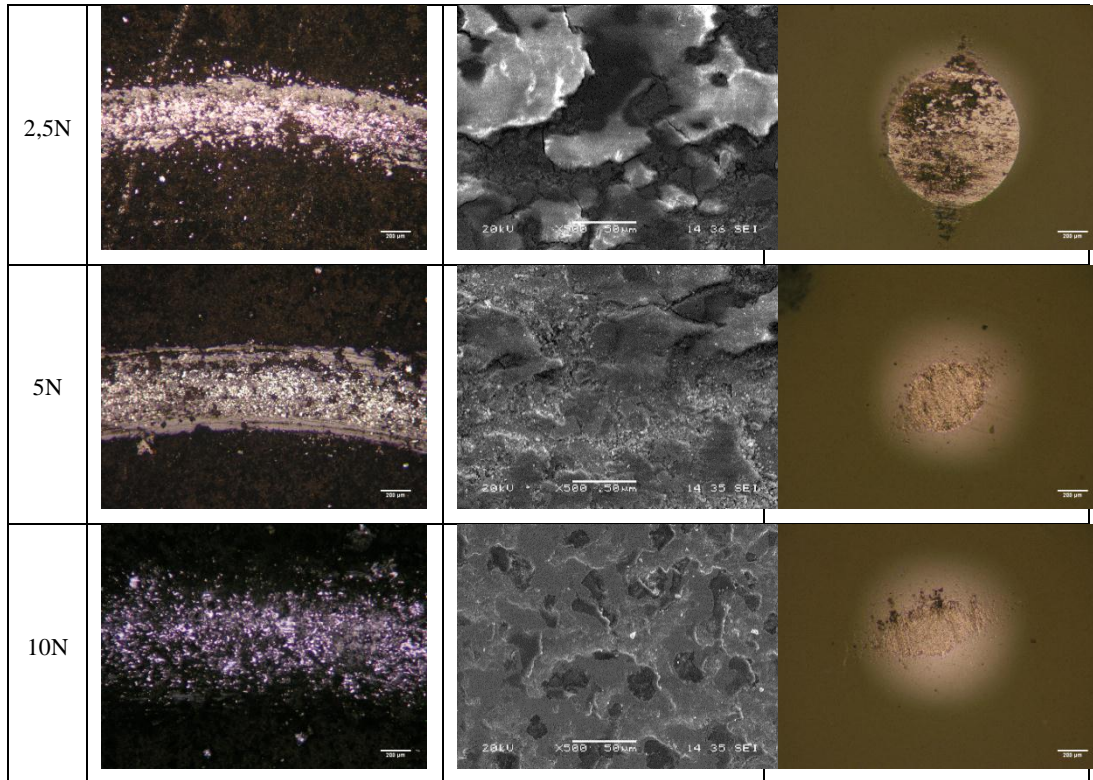
Şekil 7.67. Kaplama ortamına değişik oranlarda Al ilave edilerek kaplanmış AISI M2 çeliğinin uygulanan aşınma hızına bağlı olarak (a) aşınma oranının ve (b) alümina bilyede aşınma oranının değişimi

Tablo 7.2.-7.16.'da 1000 °C sıcaklıkta 4 saat süre ile değişik oranlarda Al ilave edilmiş kaplama ortamlarında kaplanmış AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çeliklerine ait alümina bilyeye karşı, çeşitli yükler ve hızlar altındaki aşınma deneyleri sonrasındaki optik mikroyapı fotoğrafları, SEM görüntüleri ve bilyeye ait optik mikroyapı fotoğrafları görülmektedir. Mikroyapılardan da görüleceği üzere artan yük ve hıza bağlı olarak iz genişliklerinin arttığı, yani aşınma oranlarının arttığı görülmektedir. Bununla birlikte optik mikroyapılarda kaplanmış numunelerin üzerinde oluşan aşınma izlerinde bilyeden transfer olan alüminanın kaplama üzerine sıvandığı da görülmektedir. Burada etkili olan unsur Archard eşitliğinde[31] de yer alan malzemenin sertliği ile yakından ilişkilidir. Elde edilen Nb-Al-N kaplamalar alüminadan daha sert kaplamalardır ve alüminanın aşınması burada daha kolay gerçekleşmektedir. Bununla birlikte optik ve SEM mikroyapılar incelendiğinde, kaplamaların mikroyapıları üzerinde yer alan tepe bölgelerde kısmi aşınmaların olduğu, bu aşınmaların yükün artışıyla ve hızın artışıyla birlikte vadi kısımlara kadar indiği görülmektedir. Aşınan parçacıklar çukur bölgelerde kısmen birikmekte ve malzeme üzerinde yer alan aşınma izinde kısmi sıvanmalarda beraberinde görülmektedir. Aşınan parçacıkların sert olmaları sebebiyle parlatma (polishing) etkisi belirgin olarak ortaya çıkarken, mikro-abrasif aşınmaların hâkim olduğu da ortaya çıkmaktadır.

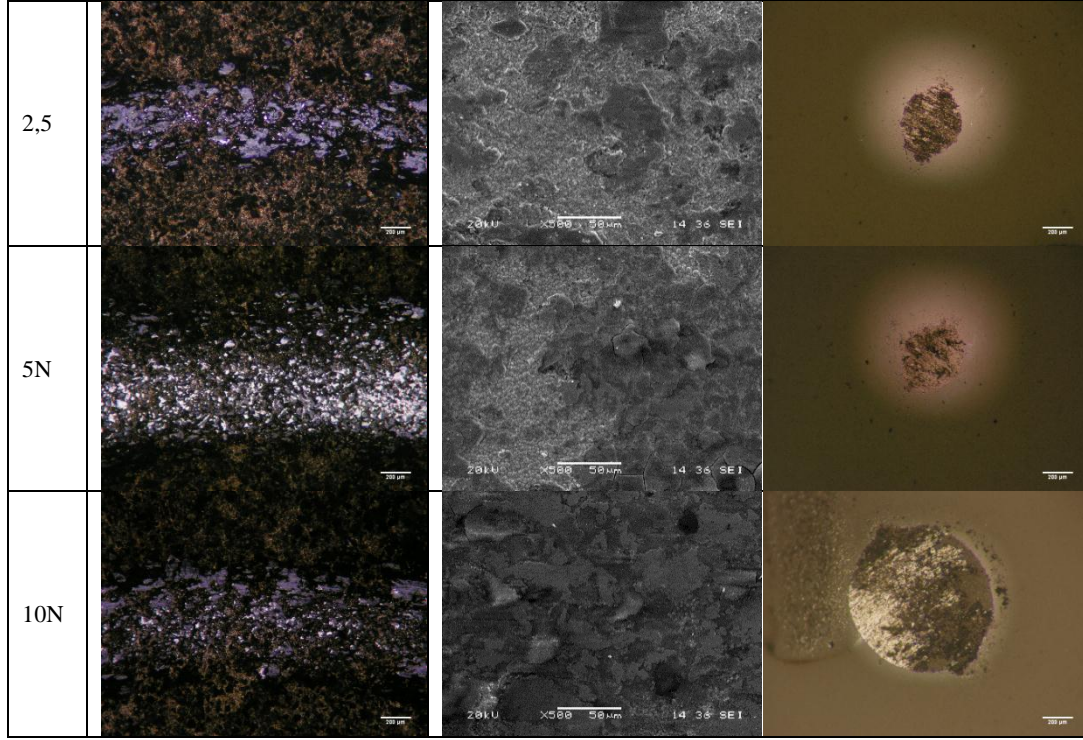
Tablo 7.2. Nb-N kaplanmış AISI 4140 çeliğinin değişik yükler altında oluşan aşınma izlerinin mikroyapı görüntüleri



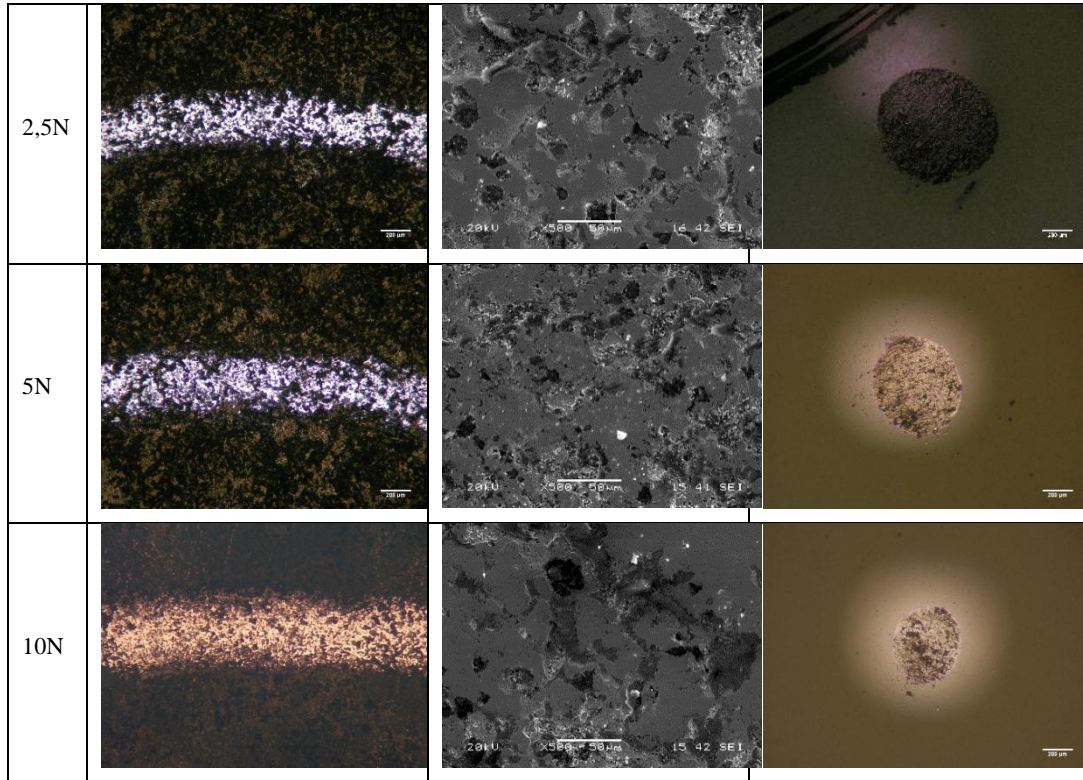
Tablo 7.3. Nb-N kaplanmış AISI D2 çeliğinin değişik yükler altında oluşan aşınma izlerinin mikroyapı görüntüleri



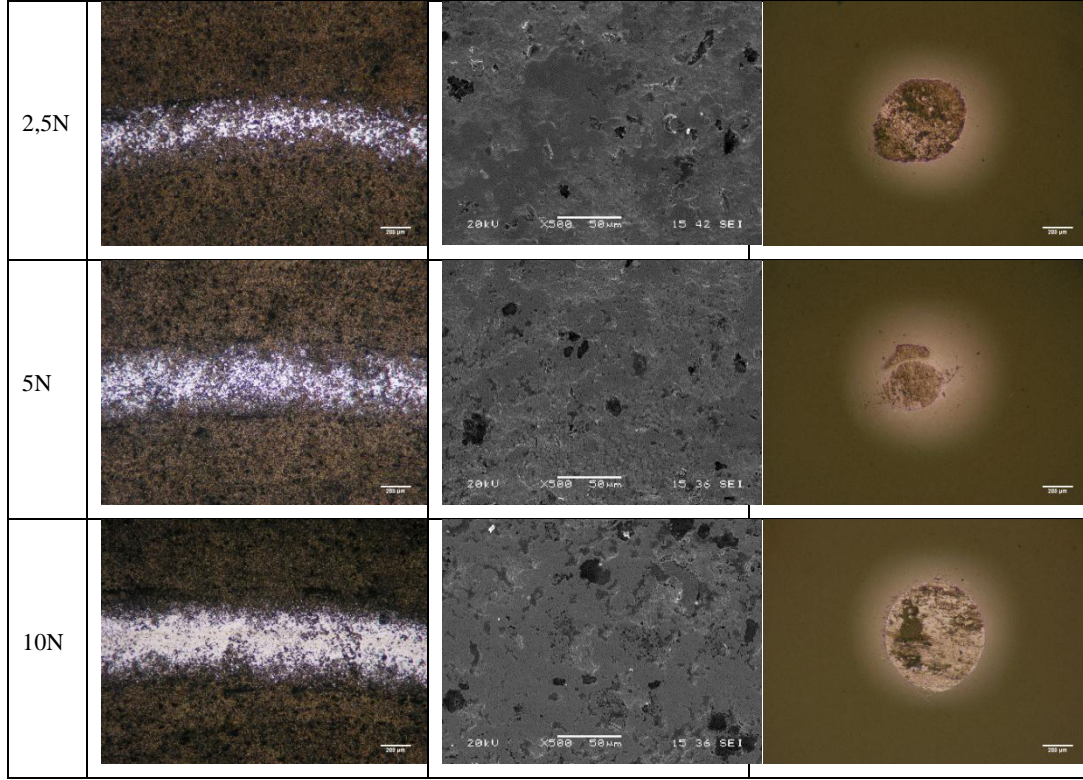
Tablo 7.4. Nb-N kaplanmış AISI M2 çeliğinin değişik yükler altında oluşan aşınma izlerinin mikroyapı görüntüleri



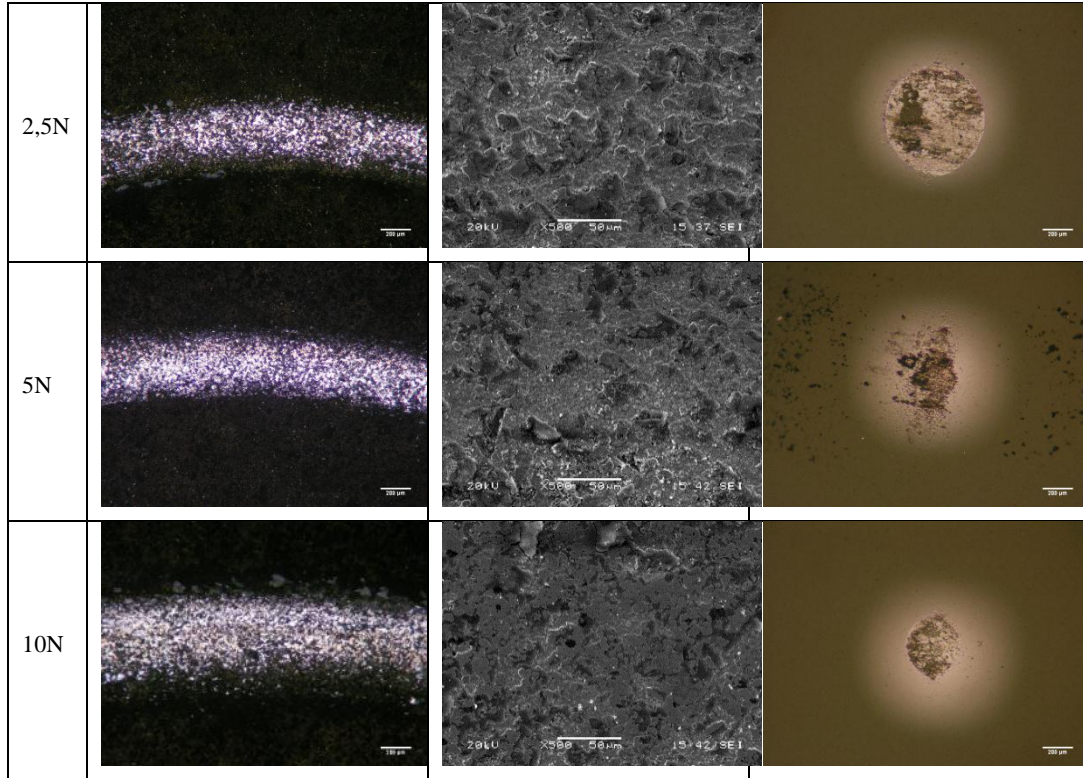
Tablo 7.5. %0,5 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI 4140 çeliğinin değişik yükler altında oluşan aşınma izlerinin mikroyapı görüntüleri



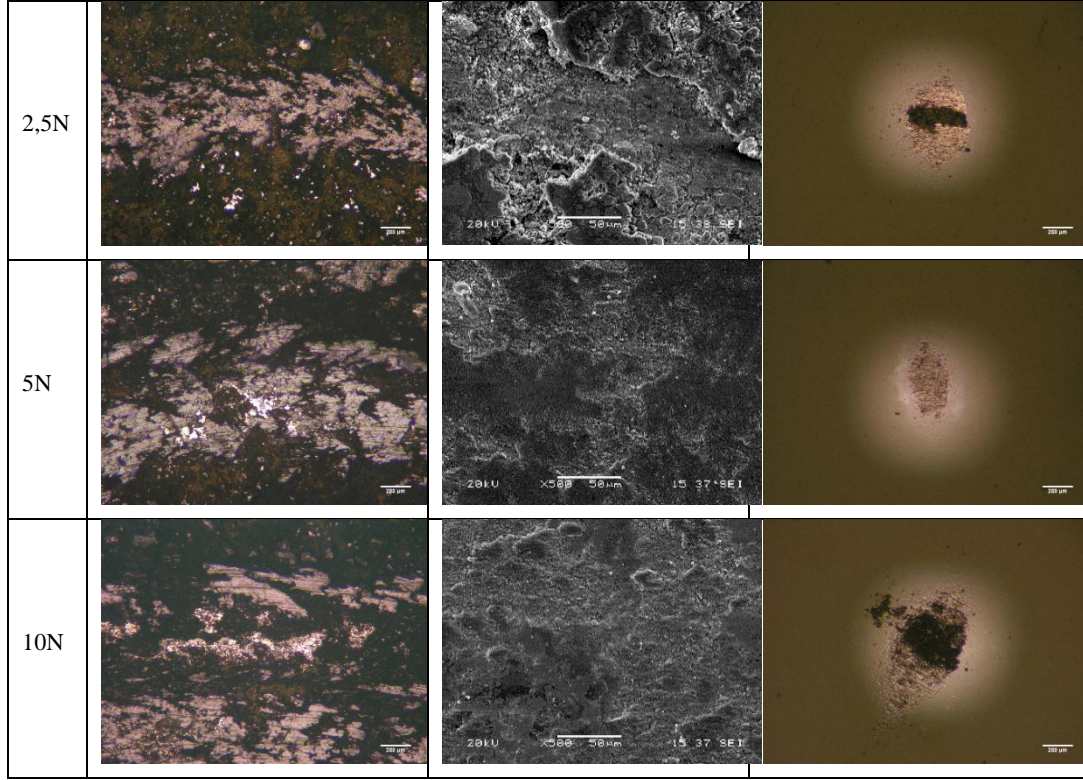
Tablo 7.6. %0,5 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI D2 çeliğinin değişik yükler altında oluşan aşınma izlerinin mikroyapı görüntüleri



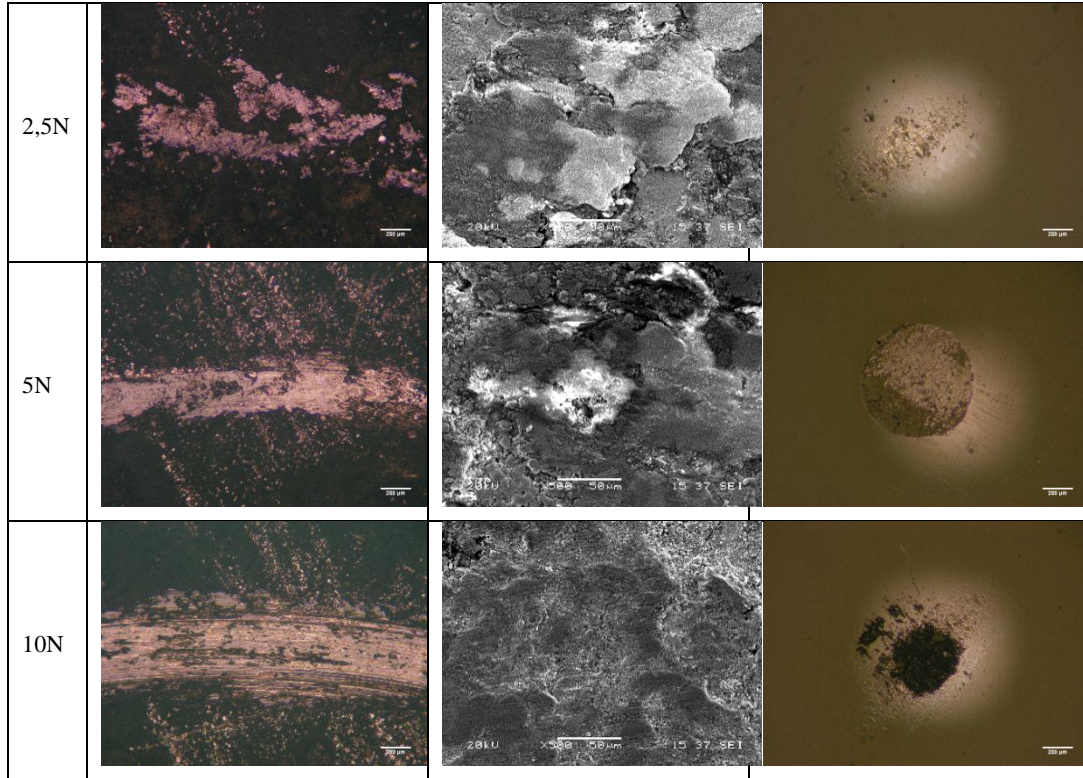
Tablo 7.7. %0,5 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI M2 çeliğinin değişik yükler altında oluşan aşınma izlerinin mikroyapı görüntüleri



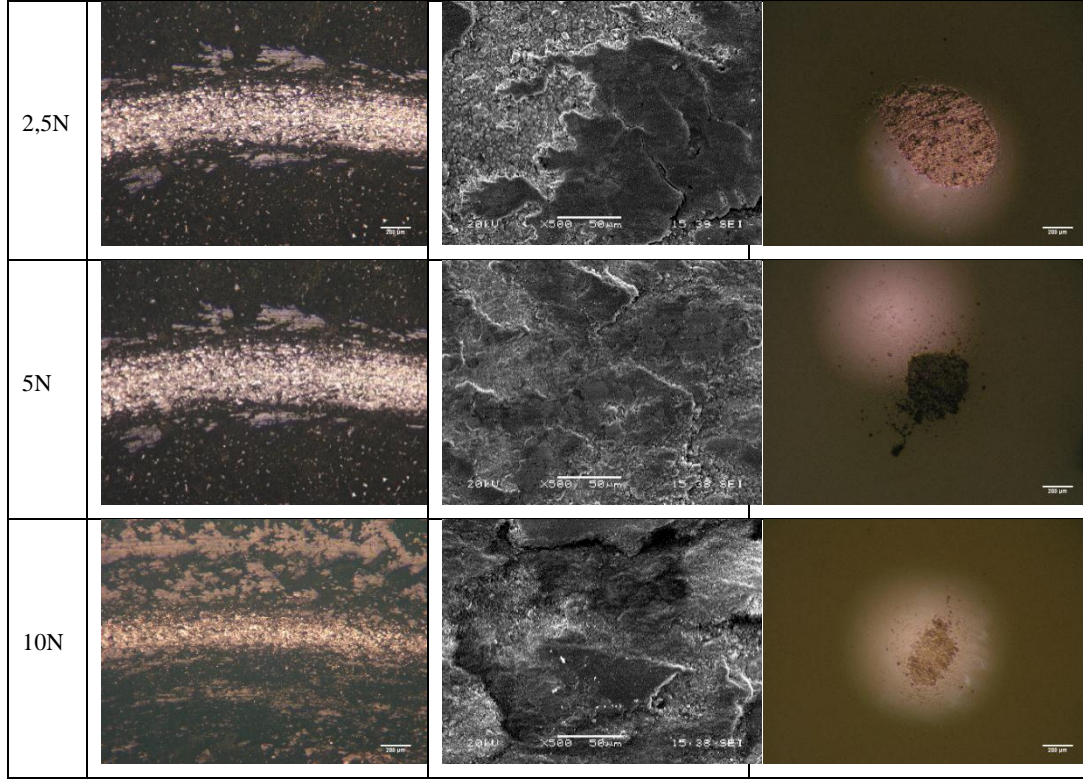
Tablo 7.8. %1,0 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI 4140 çeliğinin değişik yükler altında oluşan aşınma izlerinin mikroyapı görüntüleri



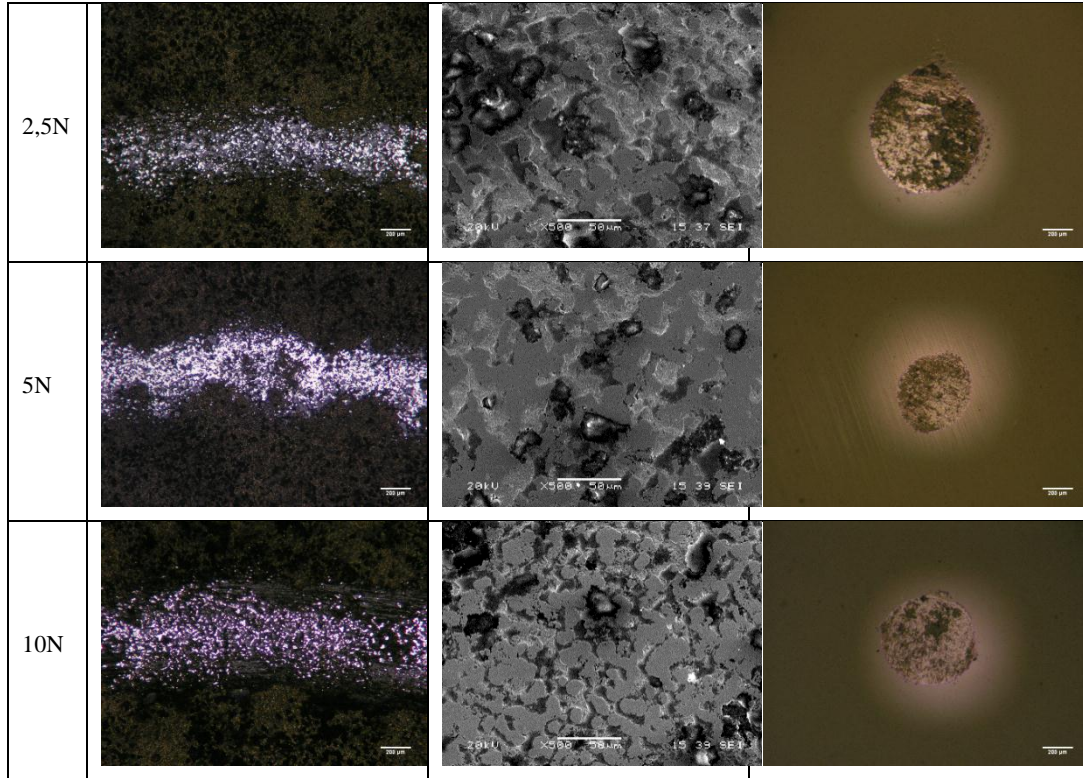
Tablo 7.9. %1,0 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI D2 çeliğinin değişik yükler altında oluşan aşınma izlerinin mikroyapı görüntüleri



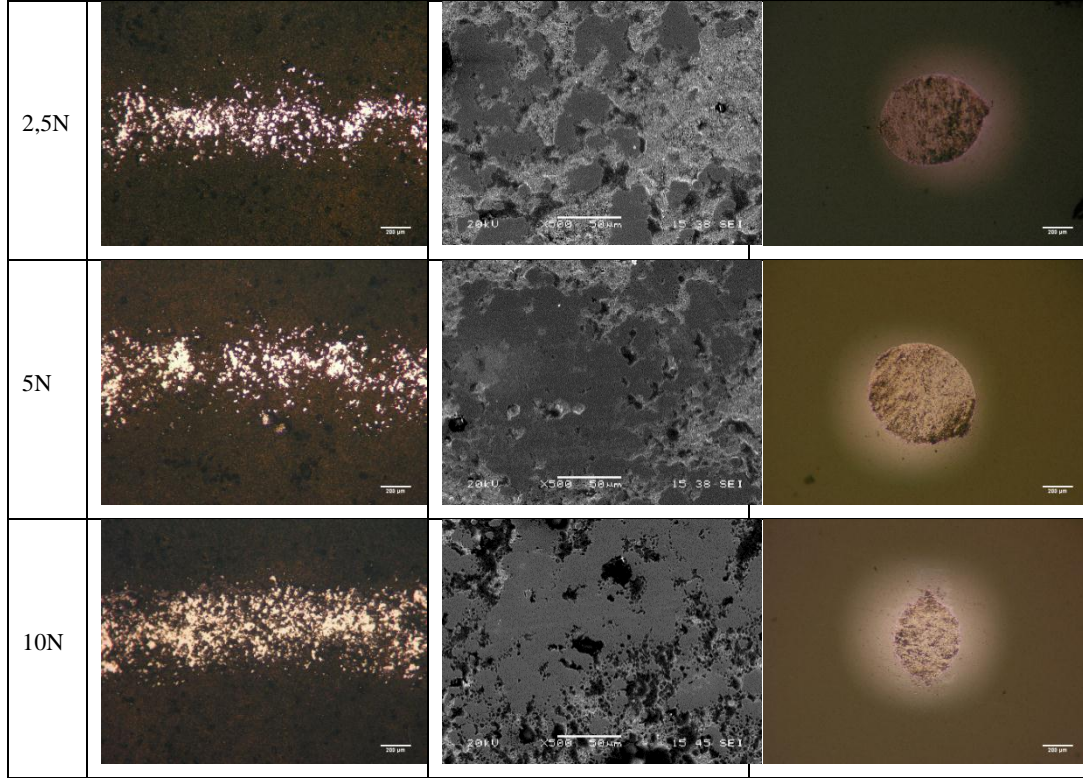
Tablo 7.10. %1,0 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI M2 çeliğinin değişik yükler altında oluşan aşınma izlerinin mikroyapı görüntüleri



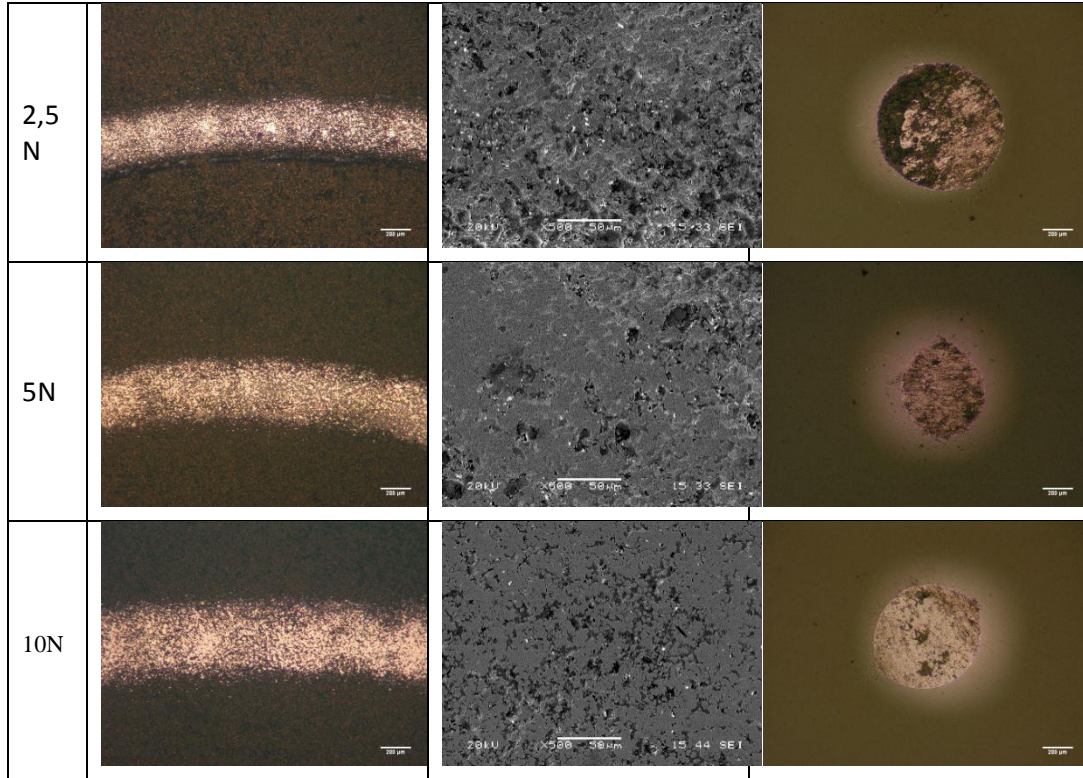
Tablo 7.11. %1,5 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI 4140 çeliğinin değişik yükler altında oluşan aşınma izlerinin mikroyapı görüntüleri



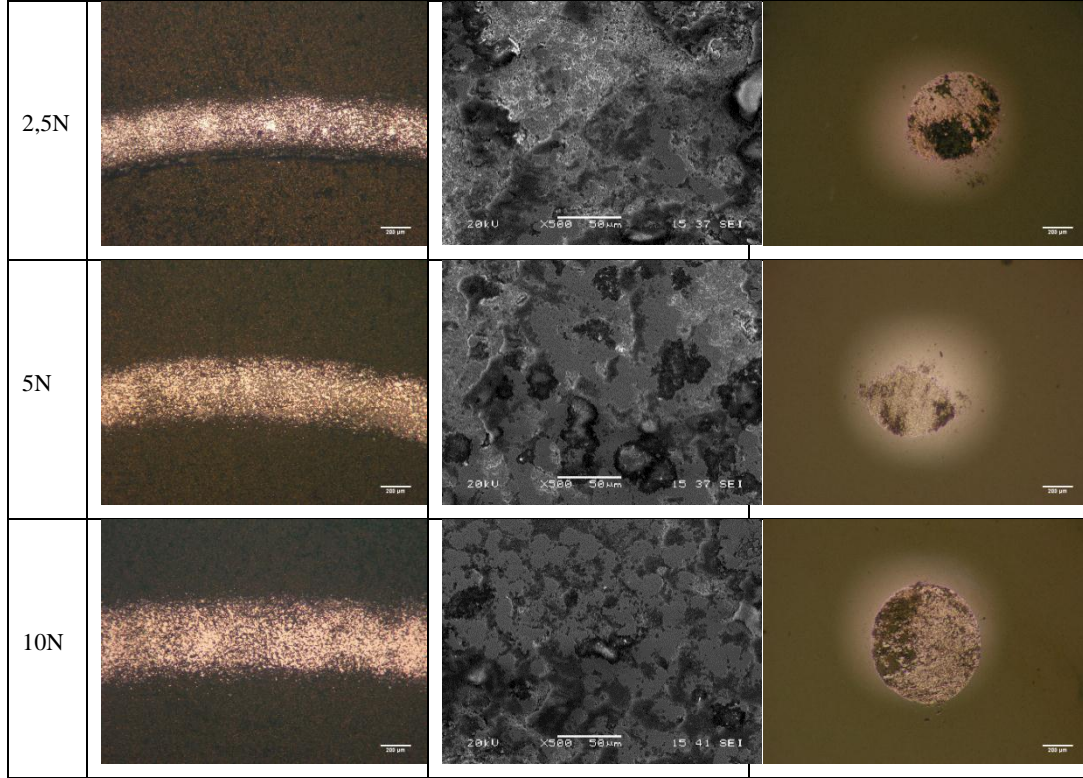
Tablo 7.12. %1,0 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI D2 çeliğinin değişik yükler altında oluşan aşınma izlerinin mikroyapı görüntüleri



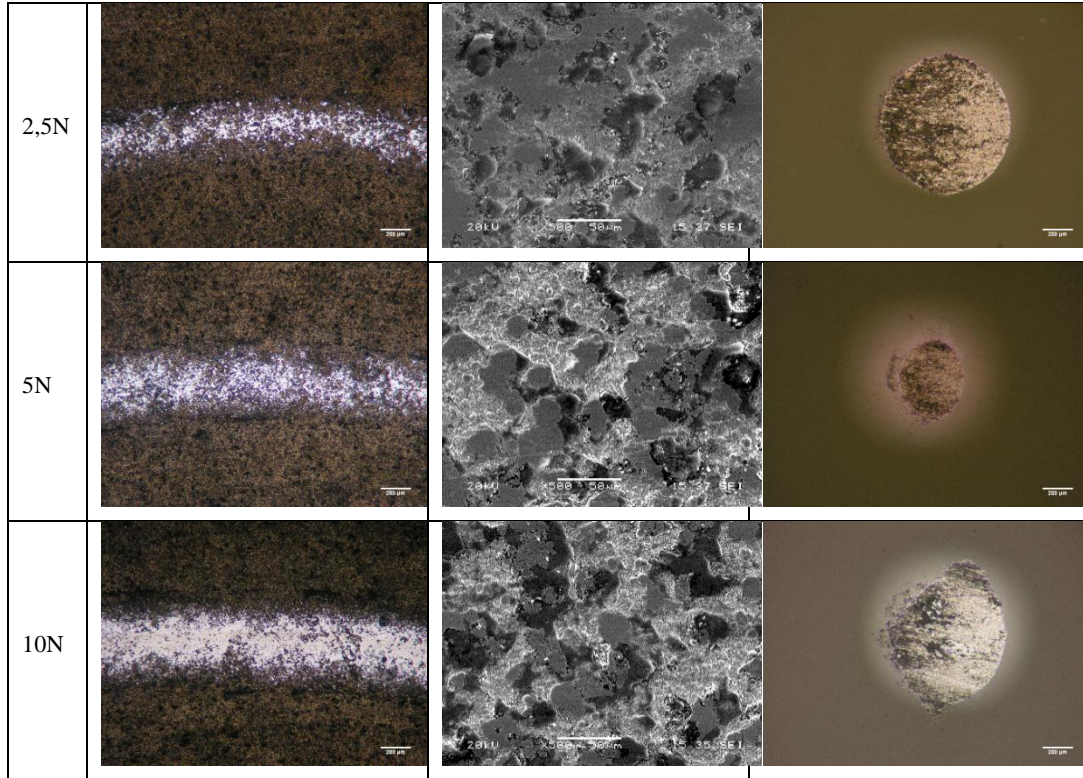
Tablo 7.13. %1,5 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI M2 çeliğinin değişik yükler altında oluşan aşınma izlerinin mikroyapı görüntüleri



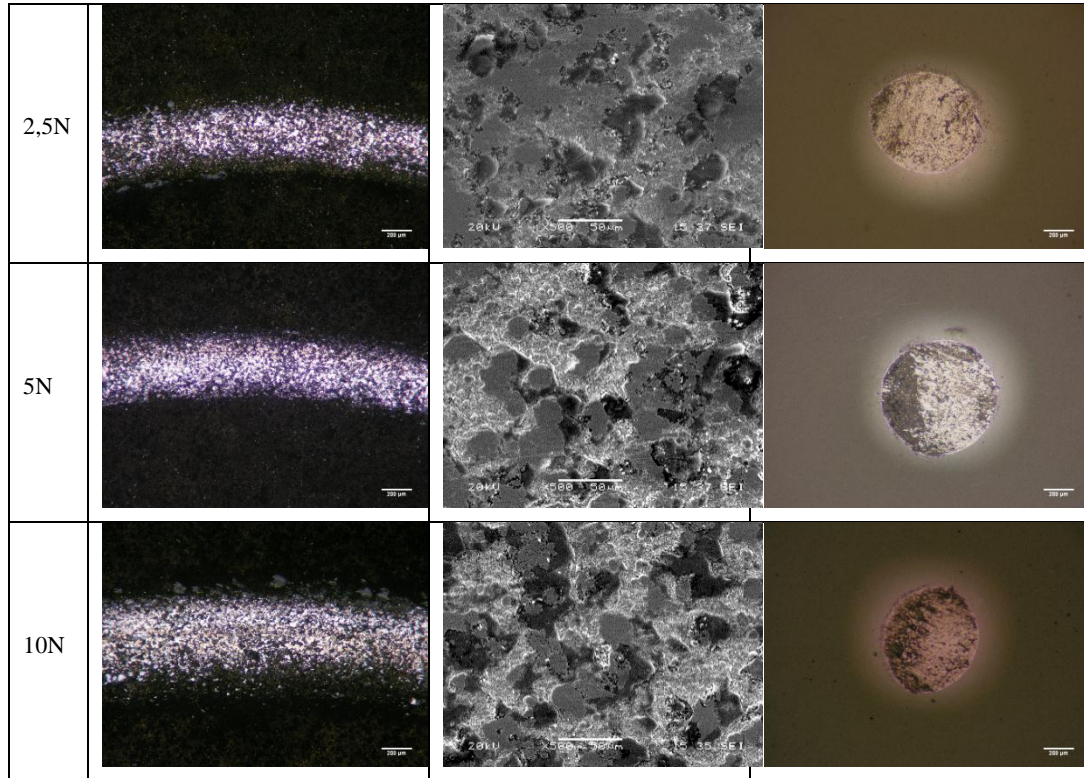
Tablo 7.14. %2,0 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI 4140 çeliğinin değişik yükler altında oluşan aşınma izlerinin mikroyapı görüntüleri



Tablo 7.15. %2,0 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI D2 çeliğinin değişik yükler altında oluşan aşınma izlerinin mikroyapı görüntüleri



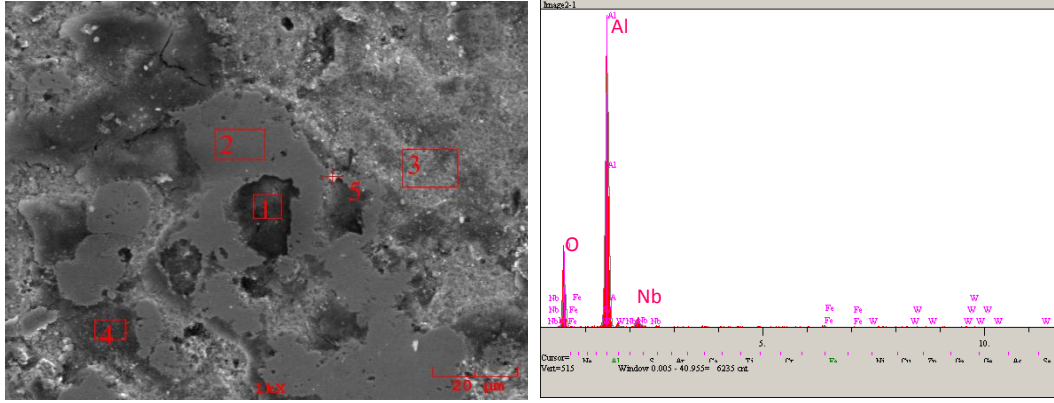
Tablo 7.16. %2,0 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI M2 çeliğinin değişik yükler altında oluşan aşınma izlerinin mikroyapı görüntüleri



Şekil 7.68 incelendiğinde katkısız Nb-N kaplamaların SEM mikroyapı görüntüsünde 1 numaralı bölge aşınma sırasında alümina bilyeden transfer olan parçacıkların sıvandığı ve biriktiği bölgeleri temsil etmekte ve bu bölgede elementel analizlerin baskın olarak Al ve O elementlerinden oluştuğunu göstermesi bu fikri hâkim kılmaktadır. 2 ve 3 numaralı bölgeler aşınmadan etkilenmeyen daha çok kaplamanın etkilenmemiş bölgelerini göstermektedir ve burada daha çok Nb ve N elementleri varlıklarını göstermektedir. 4 ve 5 numaralı bölgelerde ise aşınmaların etkili olduğu bölgeler görülmektedir ve daha çok Nb, O ve Al elementlerinin bu bölgelerde hâkim olduğunu görmekteyiz. Aşınma sırasında sürtünmeden kaynaklanan etki sebebiyle oksijene afinitesi yüksek olan Nb elementini bu aşamada oksitlendiği ve alümina bilyeden transfer olan alümina ile birlikte birikerek yüzeyde Nb-Al-O esaslı bir yapının oluşmasına yol açmaktadır. Mikroyapı incelendiğinde; bu bölgelerde kısmi çatlakların oluşması sürtünme sırasında sıvanan birikintilerin zamanla yorulma tipi çatlaklara yol açtığını söylemekte mümkündür. Bu aşamada aşınma mekanizmasının oksidatif mikro-abrasif karakterli olduğunu göstermektedir. Kısmi adhesyonların (yapışma, sıvanma) olması, kısmen de olsa adeziv aşınmanın da olabileceğine işaret etmektedir. Şekil 7.69 incelendiğinde ise AISI D2 çeliğinde aşınma sırasında bütün bölgelerde O elementinin varlığı kendini göstermektedir. Burada çelik içerisinde yer alan %12 civarındaki Cr elementinin kaplamada bulunması ve oksitlenmede afinitesi sebebiyle etkili olduğunu göstermektedir. AISI D2 çeliğinde oluşturulan kaplamalarda oksidatif bir aşınmanın etkili olduğu görülmektedir. Burada da parlatma (polishing) etkisinin varlığı görülmekte ve çukur bölgelerde O ve Al piklerin boyu artmaktadır. Buradan anlaşılacağı üzere; aşınan bilyenin çukur bölgelere transfer olarak birikmesi ve sıvanması söz konusudur. Genel olarak AISI 4140 çeliğinde olduğu gibi mikro abrasif oksidatif bir aşınma söz konusudur. Oksidasyon etkisi burada kendini daha belirgin olarak göstermektedir. AISI M2 çeliği üzerinde oluşan aşınma izleri ise şekil 7.70. de gösterilmektedir. Mikroyapı incelendiğinde 2 numarayla temsil edilen aşınmanın olmadığı bölge, 1 numarayla temsil edilen yüzeysel olarak malzeme kaybının olduğu aşınma bölgesi ve 3, 4 ve 5 numaralı bölgeler ise aşınma ürünlerinin transfer olduğu yapıştığı ve biriktiği bölgeleri göstermektedir. Buradaki davranış AISI 4140 çeliğine benzemekle birlikte mikro çatlakların çok daha fazla olduğu ve aşınma ürünlerinin adezyonunun çok daha fazla gerçekleştiği bir aşınmanın abrasif olduğunu göstermektedir. AISI M2

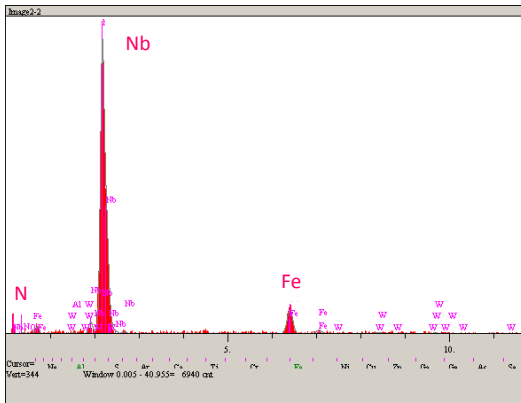
çeliği üzerinde oluşan kaplamaların diğerlerine göre daha sert olması muhtemelen burada alüminanın aşındırılmasında ve sıvanmasında etkili olmuştur. 1 ve 2 numaralı bölgede daha çok bulunan elementler Nb ve N'dur ve kaplamanın etkilenmemiş veya yüzeyinden kısmen aşınmış bölgelerini işaret etmektedir. 3, 4 ve 5 numaralı bölgelerde Al ve O piklerinin boyları oldukça önemli oranda artmış ve Nb piki ile birlikte bulunmaktadır, buradan aşınma ürünlerinin adezyonunun olduğu ve kısmi oksitlenmelerin olduğuna işaret etmektedir. Bu bölgelerin geniş olması ve çok sayıda mikro-çatlak içermesi oksidatif mikro-abrasif ve yorulmalı aşınmayı işaret etmektedir.

Kaplama banyosuna Al ilavesi ile elde edilen Nb-Al-N esalı kaplamaların aşınması sonucunda oluşan aşınma izleri (bkz Şekil 7.71.-7.82) incelendiğinde; AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çelikleri üzerinde oluşan izlerin benzerlik gösterdiği ancak, oksitlenmiş alanların arttığı buna karşılık aşınma ürünlerinin sıvanmasının daha az gerçekleştiği görülmektedir. Aşınmanın daha çok oksidatif ve mikro-abrasif parlatma (polishing) karakterli olduğunu göstermektedir. Kaplamanın aşınma şartları karşısında daha sağlam durduğu ve kısmen kaplama topografyasında yer alan tepe noktalardan parlatma aşınmasının gerçekleştiği ve sürtünme etkisiyle yüzeysel oksitlenmelerin görüldüğünü söylemek mümkündür. Bu açıdan Al ilavesi aşınmış yüzeylerin mikroyapısal olarak incelendiğinde adezyondan çok mikro-abrasif aşınmayla parlatma etkisine doğru yöneldiğini söylemek uygun olacaktır.

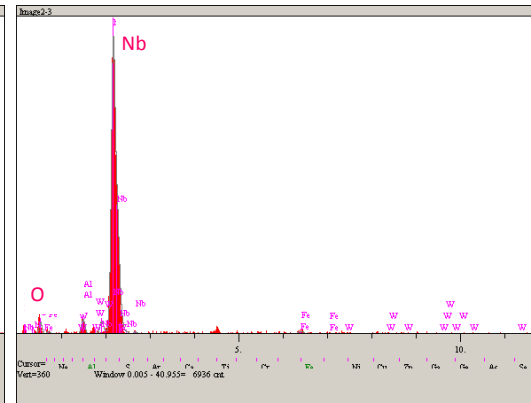


(a)

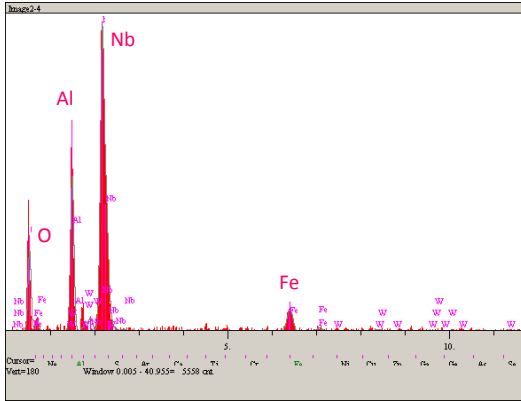
(b)



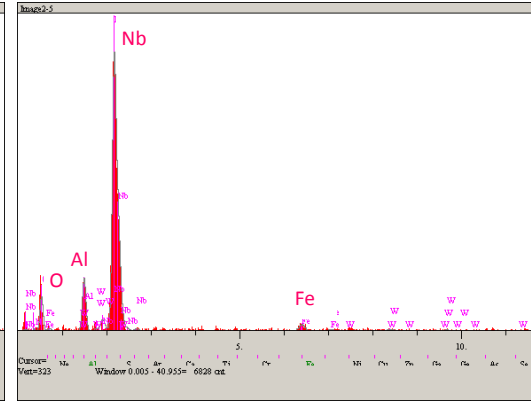
(c)



(d)

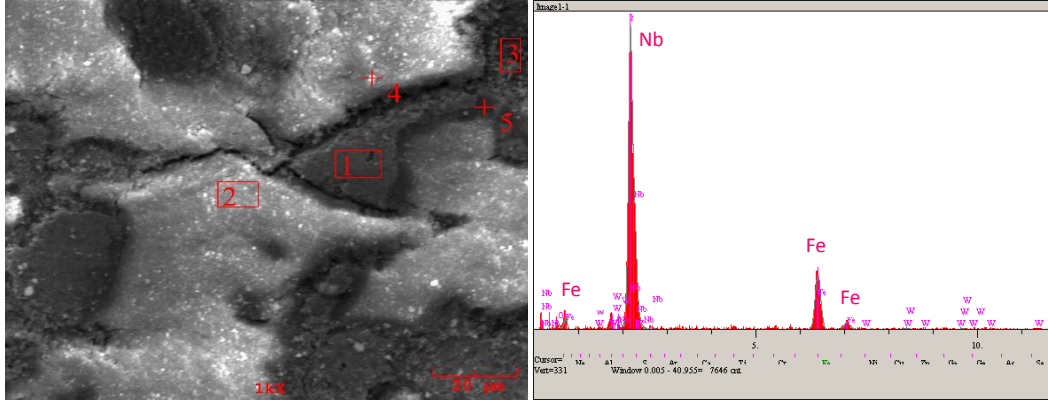


(e)



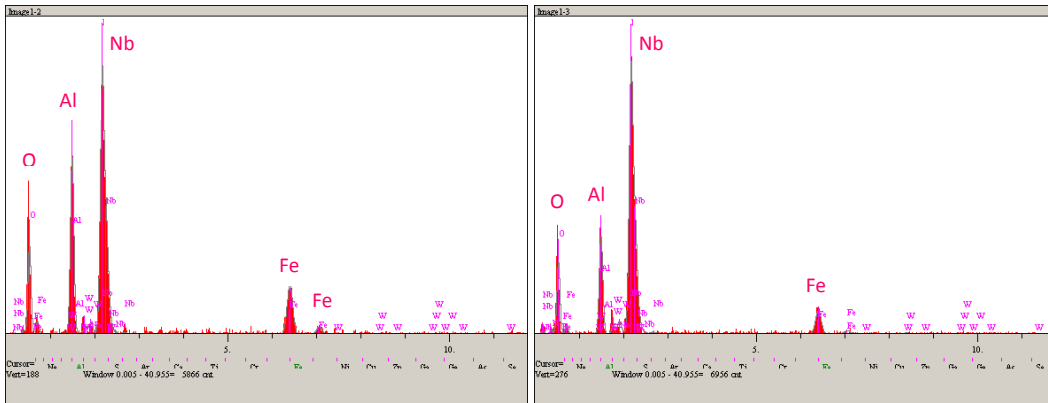
(f)

Şekil 7.68. Nb-N kaplanmış AISI 4140 çeliğinin 5N yük altında alümina bilyeye karşı aşınma deneyi sonrası alınan (a) SEM mikroyapı görüntüsü, (b-f) EDS analizleri



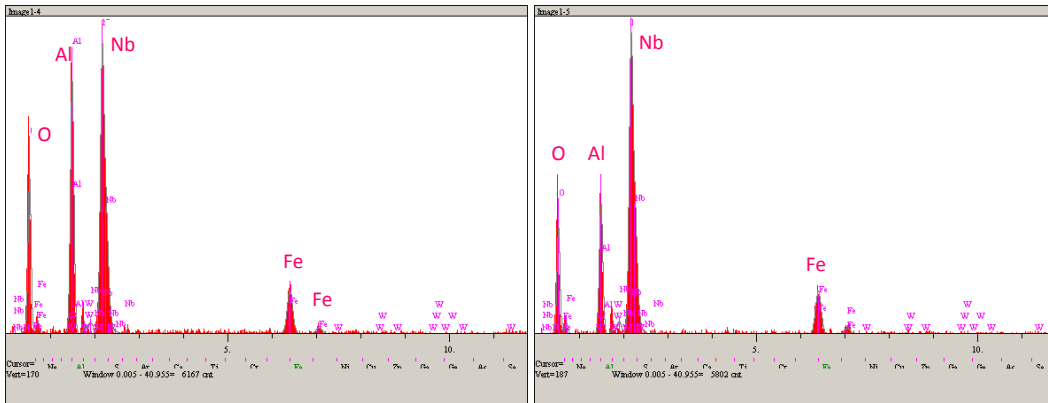
(a)

(b)



(c)

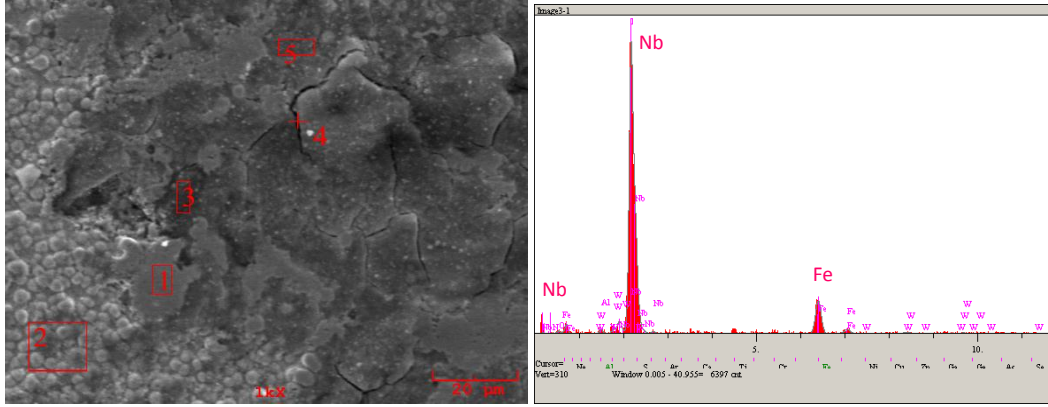
(d)



(e)

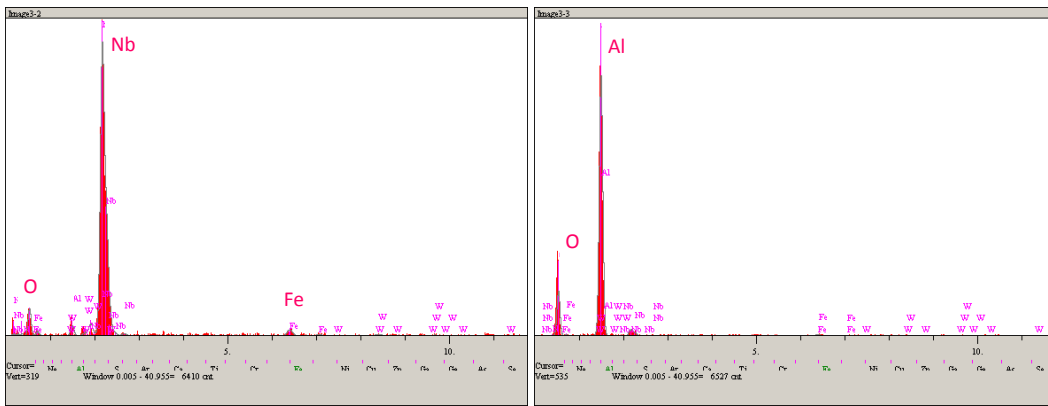
(f)

Şekil 7.69. Nb-N kaplanmış AISI D2 çeliğinin 5N yük altında alümina bilyeye karşı aşınma deneyi sonrası alınan (a) SEM mikroyapı görüntüsü, (b-f) EDS analizleri



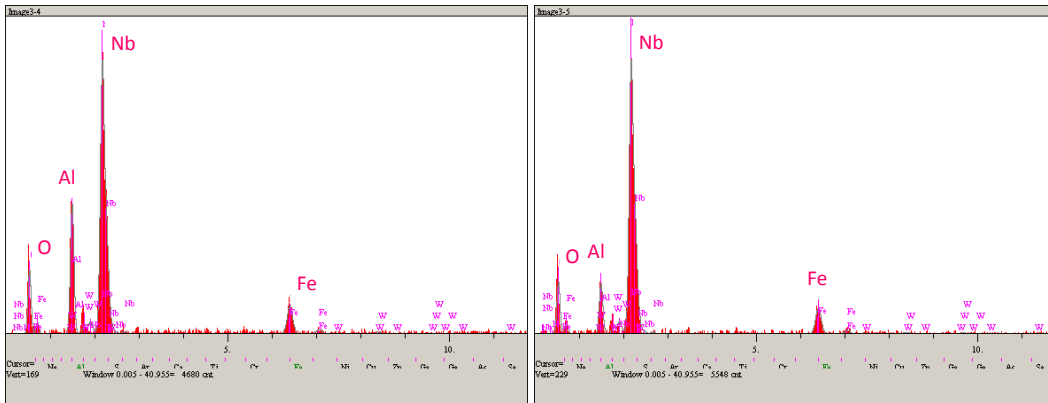
(a)

(b)



(c)

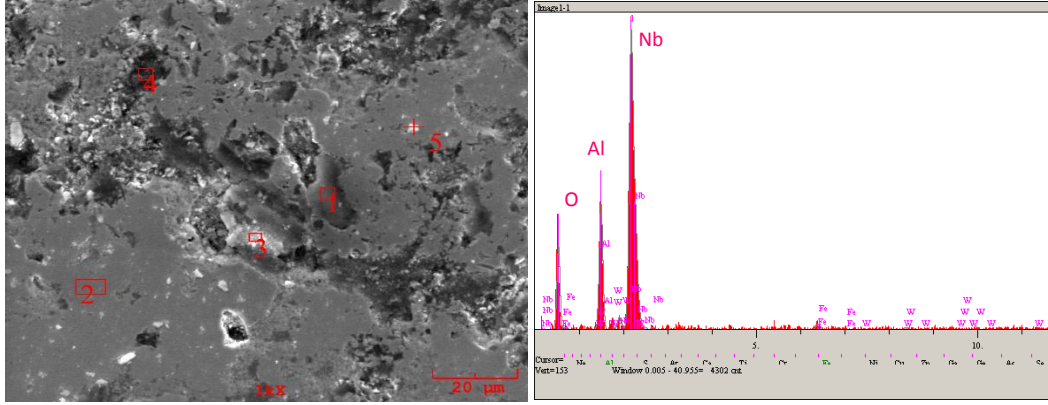
(d)



(e)

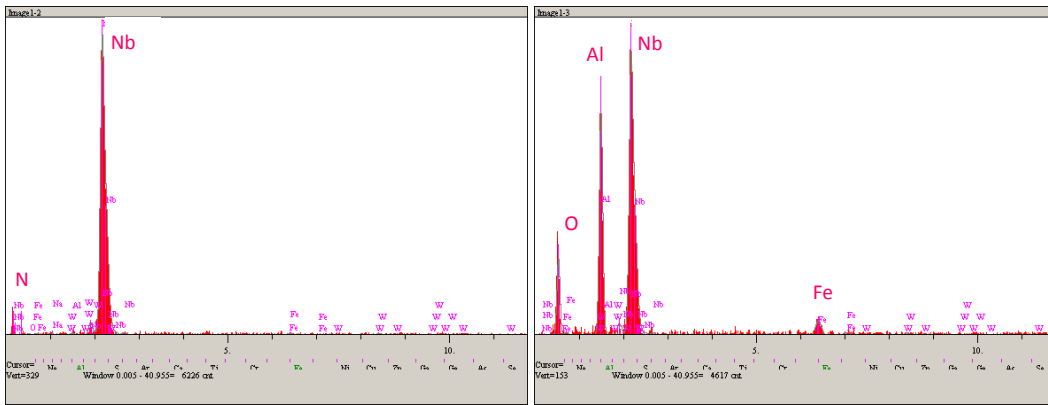
(f)

Şekil 7.70. Nb-N kaplanmış AISI M2 çeliğinin 5N yük altında alümina bilyeye karşı aşınma deneyi sonrası alınan (a) SEM mikroyapı görüntüsü, (b-f) EDS analizleri



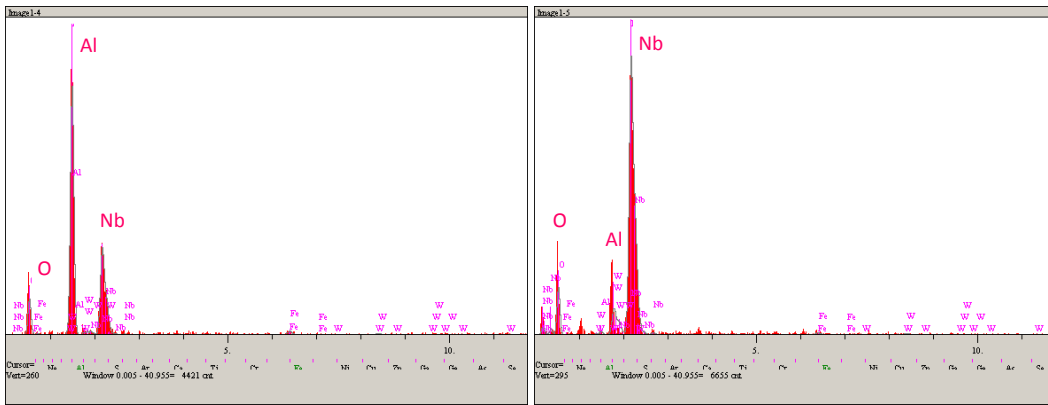
(a)

(b)



(c)

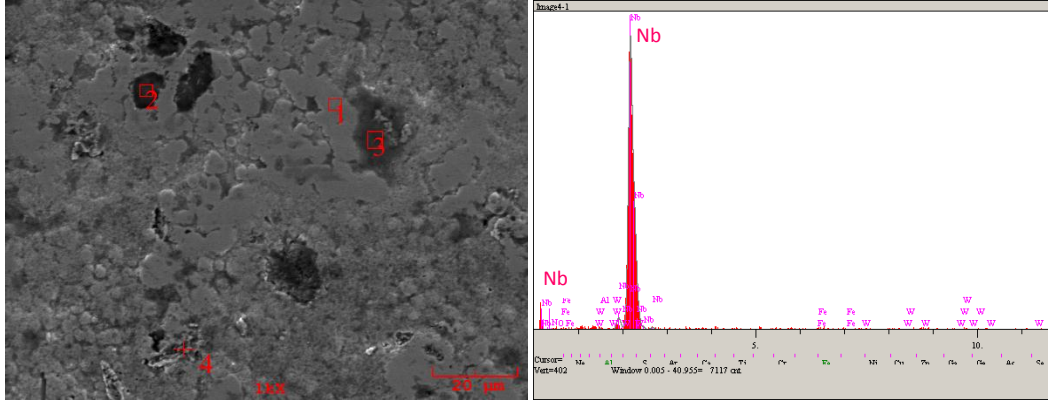
(d)



(c)

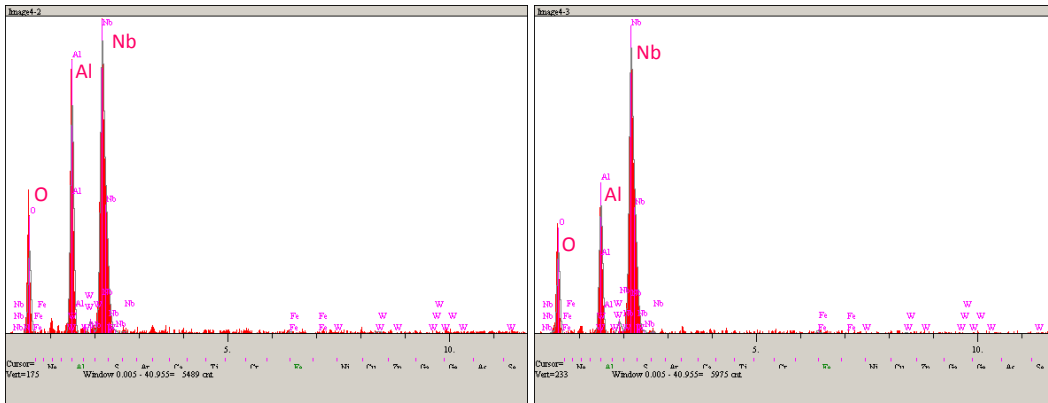
(d)

Şekil 7.71. %0,5 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI 4140 çeliğinin 5N yük altında alümina bilyeye karşı aşınma deneyi sonrası alınan (a) SEM mikroyapı görüntüsü, (b-f) EDS analizleri



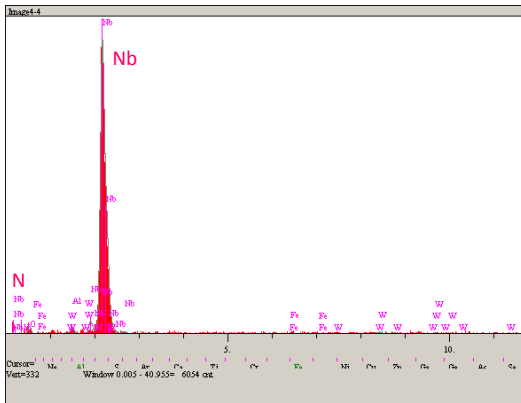
(a)

(b)



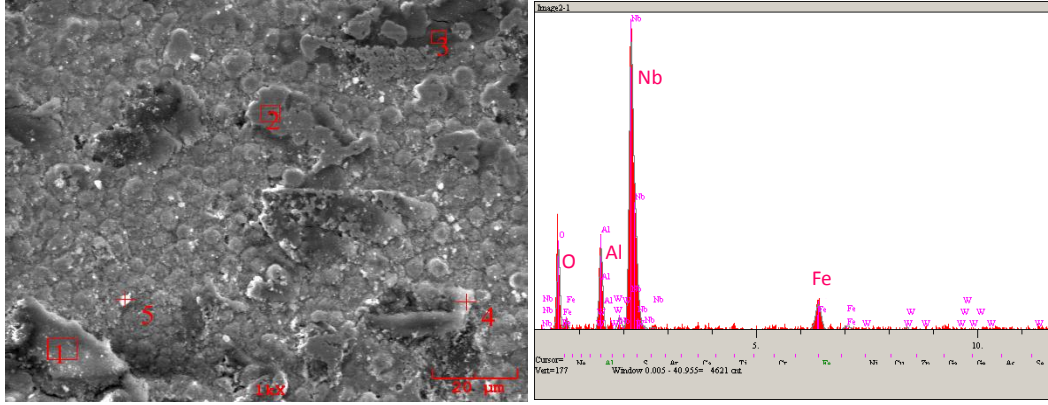
(c)

(d)



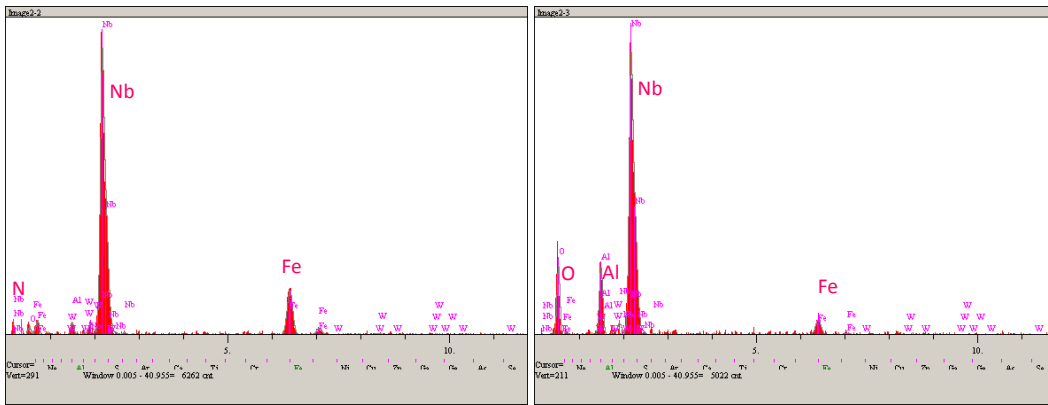
(e)

Şekil 7.72. %0,5 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI D2 çeliğinin 5N yük altında alümina bilyeye karşı aşınma deneyi sonrası alınan (a) SEM mikroyapı görüntüsü, (b-f) EDS analizleri



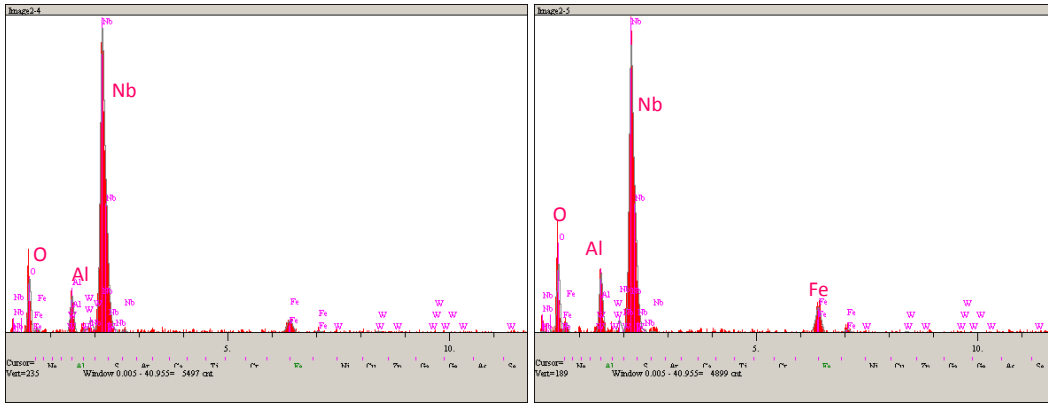
(a)

(b)



(c)

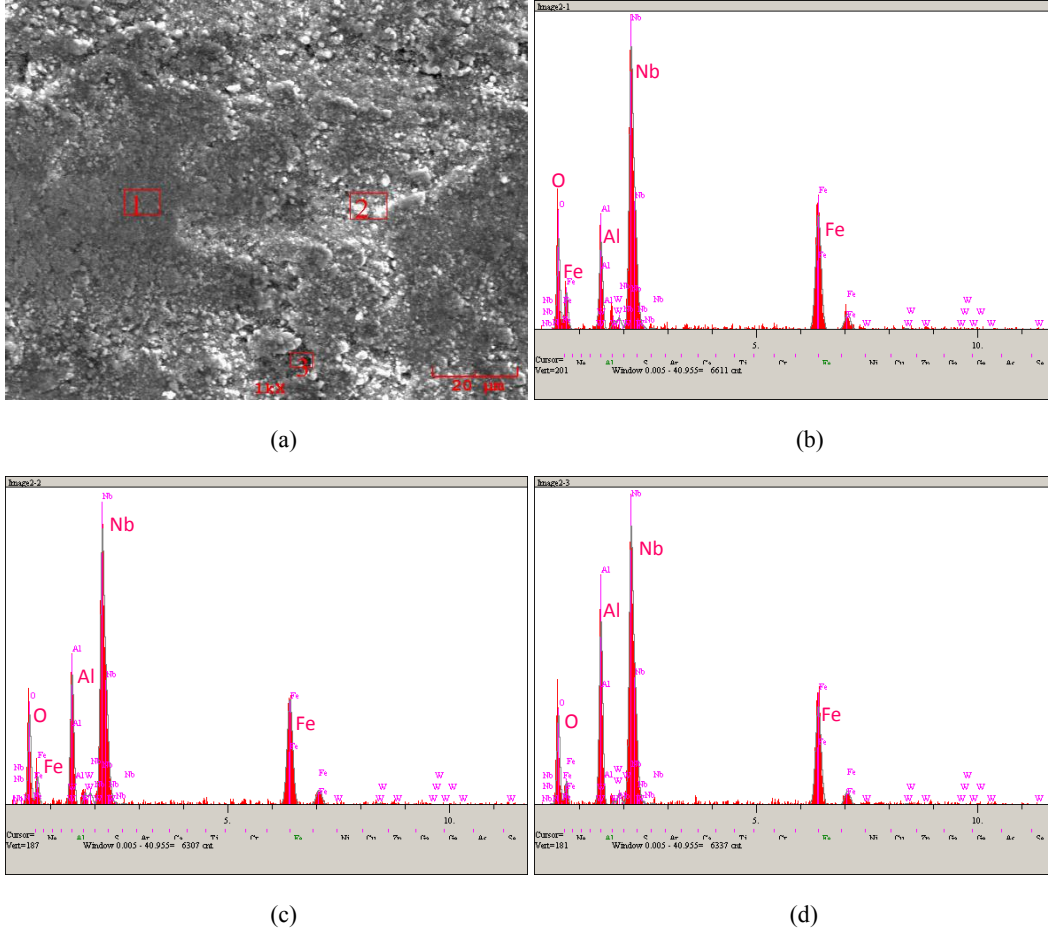
(d)



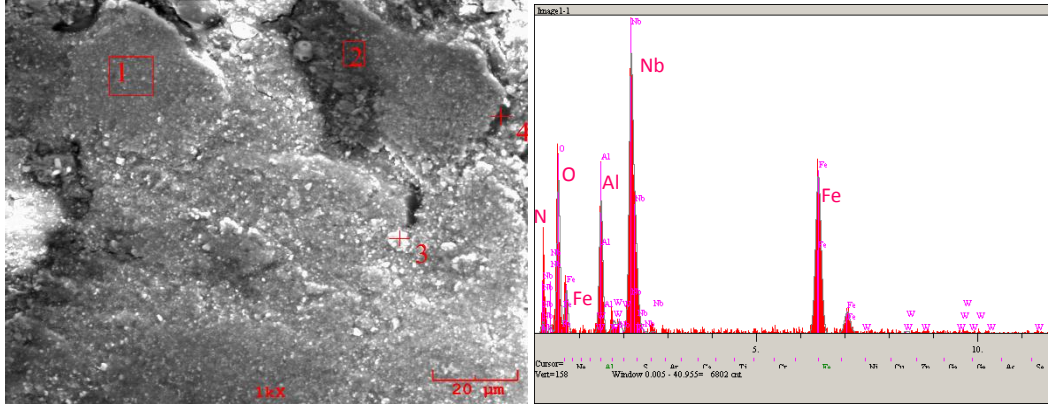
(e)

(f)

Şekil 7.73. %0,5 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI M2 çeliğinin 5N yük altında alümina bilyeye karşı aşınma deneyi sonrası alınan (a) SEM mikroyapı görüntüsü, (b-f) EDS analizleri

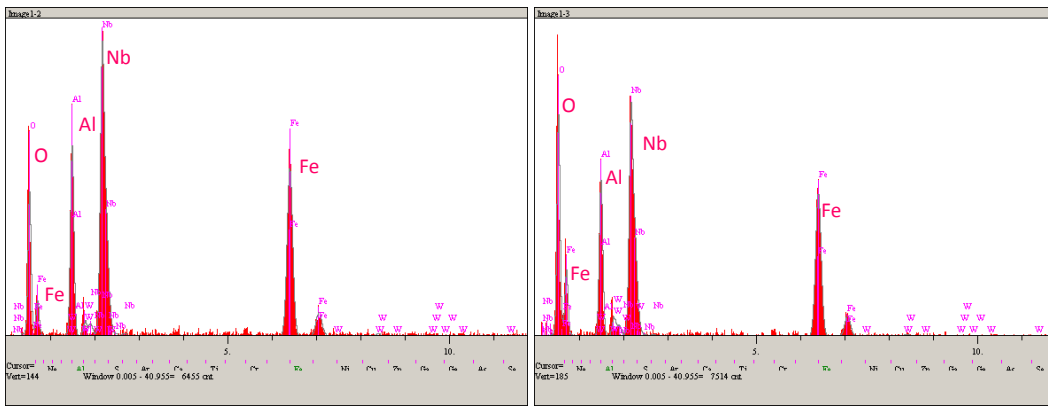


Şekil 7.74. %1,0 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI 4140 çeliğinin 5N yük altında alümina bilyeye karşı aşınma deneyi sonrası alınan (a) SEM mikroyapı görüntüsü, (b-f) EDS analizleri



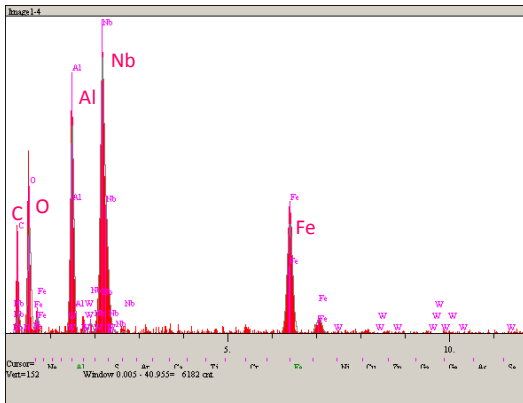
(a)

(b)



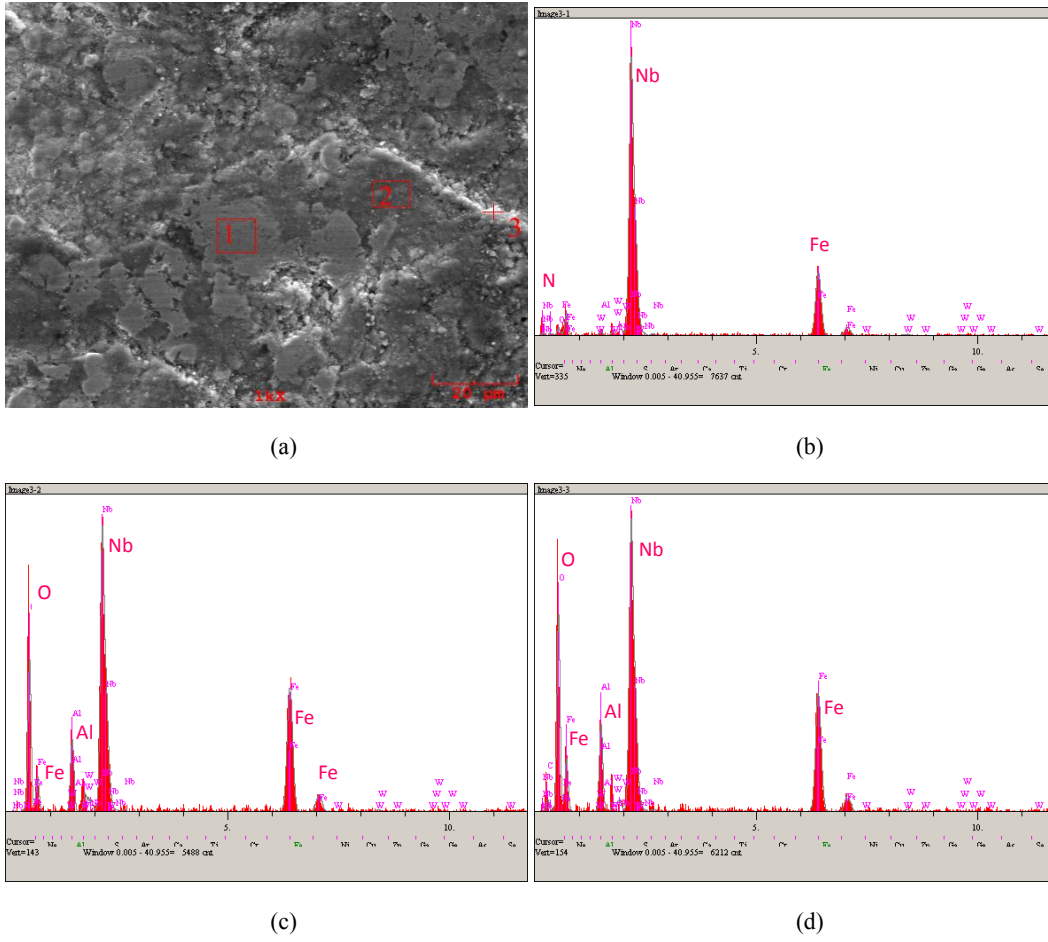
(c)

(d)

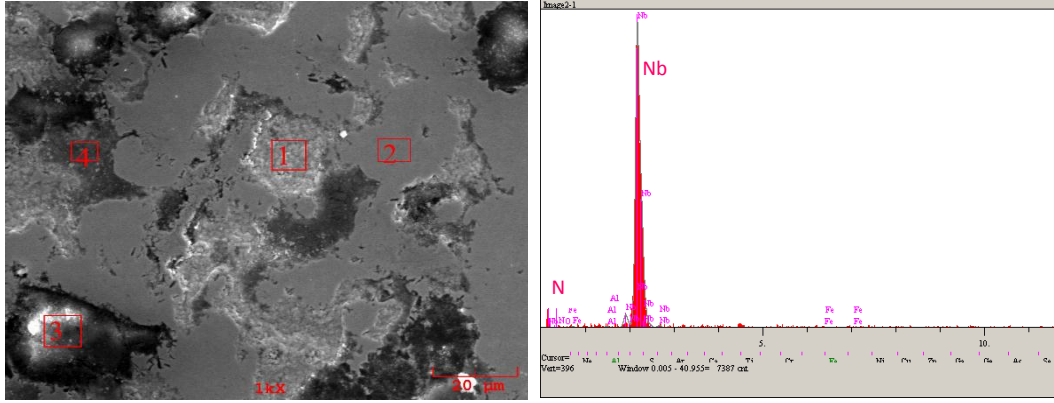


(e)

Şekil 7.75. %1,0 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI D2 çeliğinin 5N yük altında alümina bilyeye karşı aşınma deneyi sonrası alınan (a) SEM mikroyapı görüntüsü, (b-f) EDS analizleri

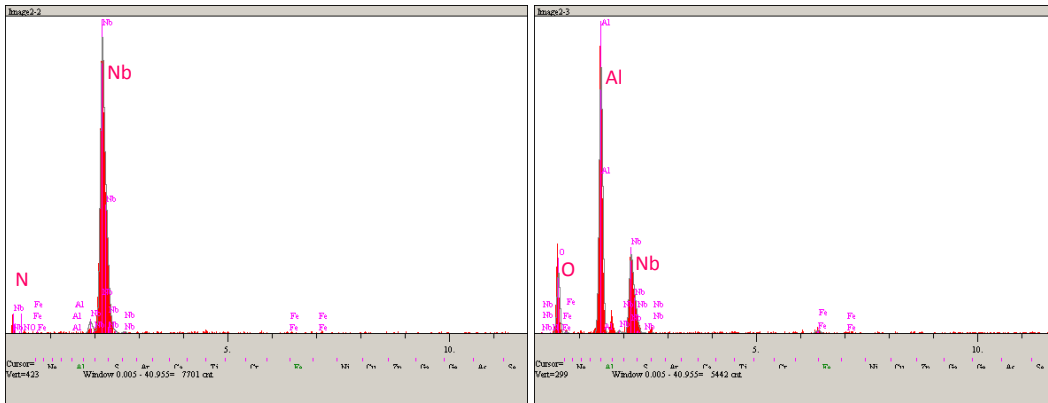


Şekil 7.76. %1,0 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI M2 çeliğinin 5N yük altında alümina bilyeye karşı aşınma deneyi sonrası alınan (a) SEM mikroyapı görüntüsü, (b-f) EDS analizleri



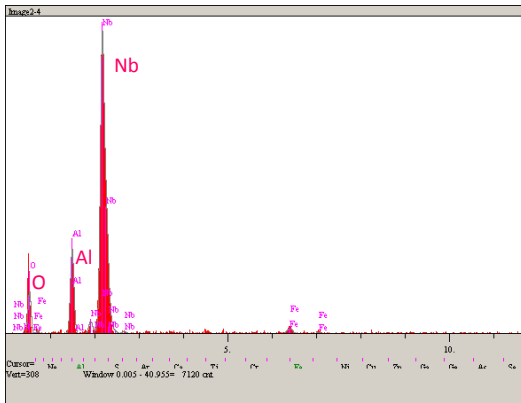
(a)

(b)



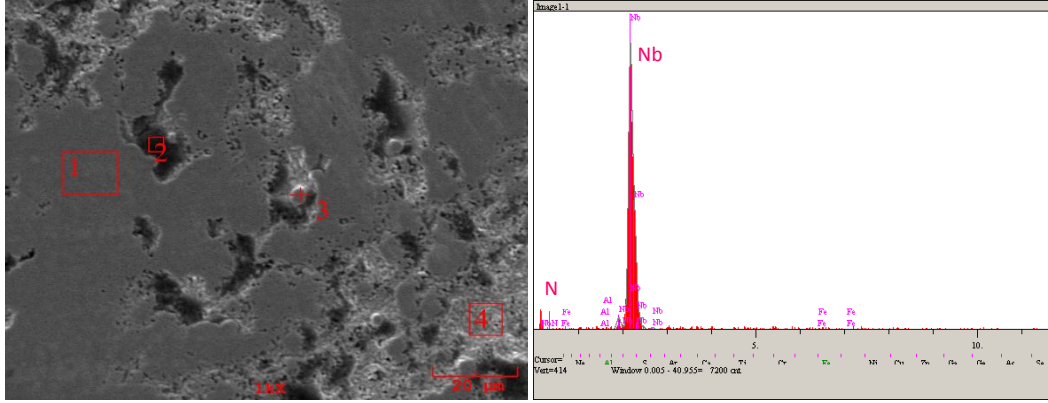
(c)

(d)



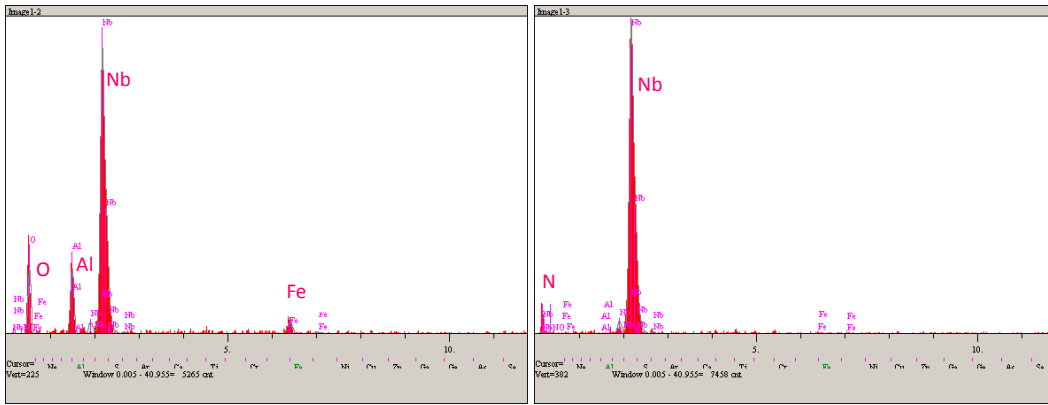
(e)

Şekil 7.77. %1,5 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI 4140 çeliğinin 5N yük altında alümina bilyeye karşı aşınma deneyi sonrası alınan (a) SEM mikroyapı görüntüsü, (b-f) EDS analizleri



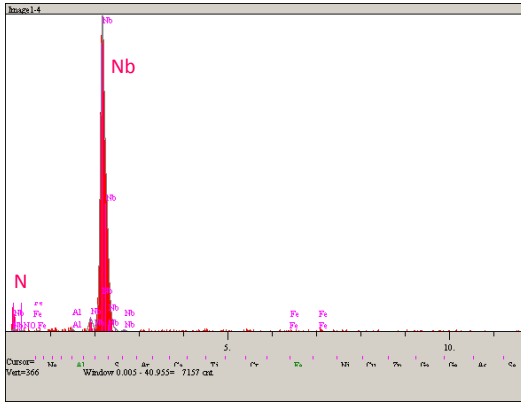
(a)

(b)



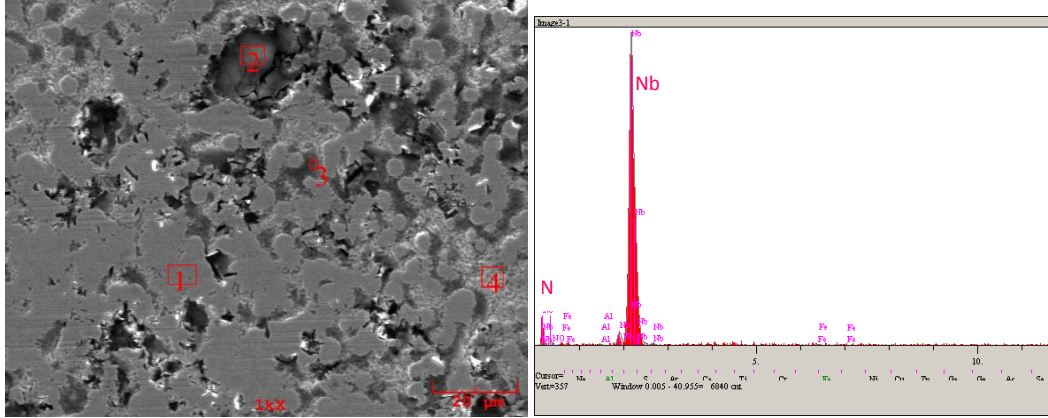
(c)

(d)



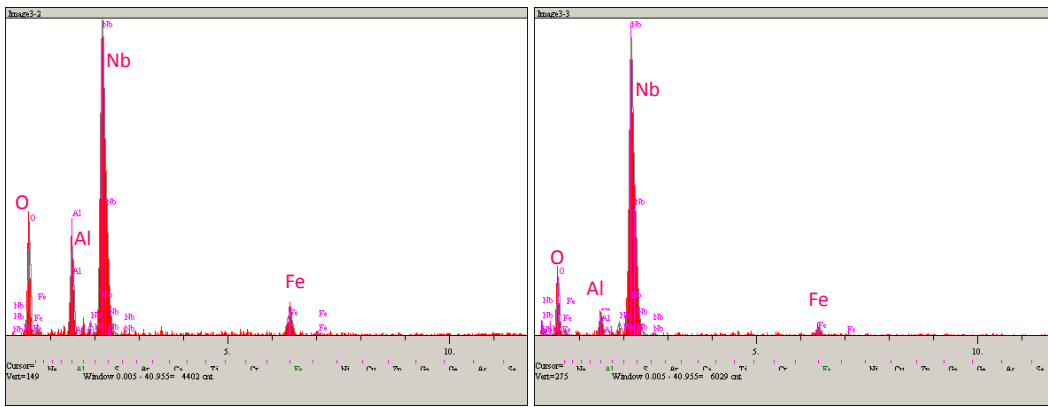
(e)

Şekil 7.78. %1,5 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI D2 çeliğinin 5N yük altında alümina bilyeye karşı aşınma deneyi sonrası alınan (a) SEM mikroyapı görüntüsü, (b-f) EDS analizleri



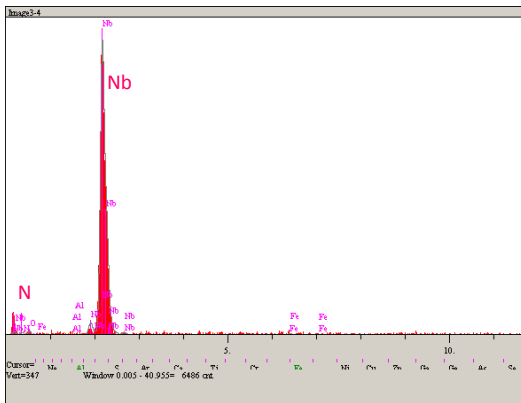
(a)

(b)



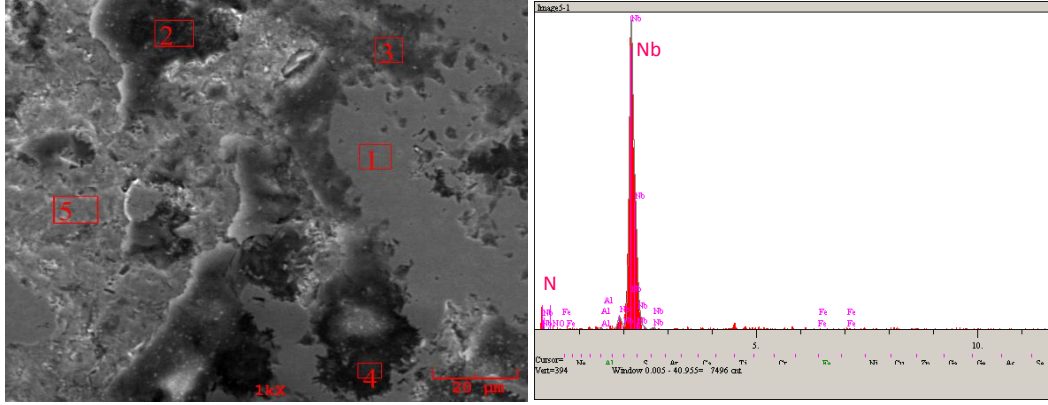
(c)

(d)



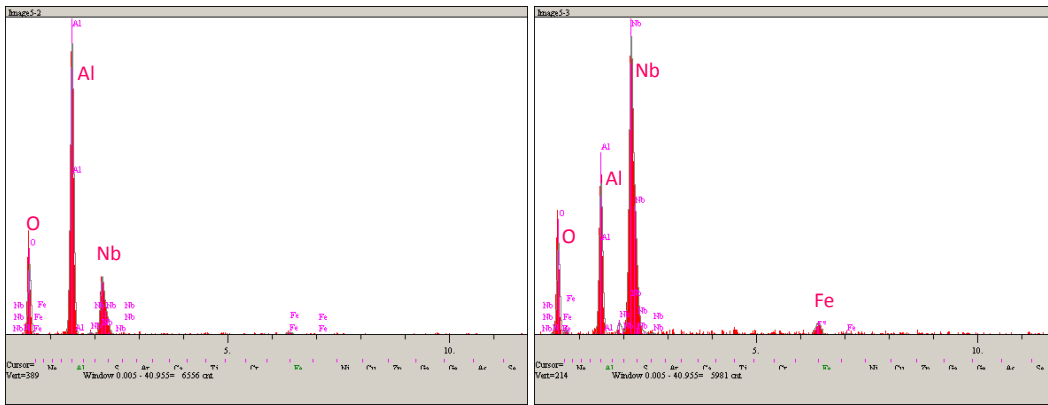
(e)

Şekil 7.79. %1,5 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI M2 çeliğinin 5N yük altında alümina bilyeye karşı aşınma deneyi sonrası alınan (a) SEM mikroyapı görüntüsü, (b-f) EDS analizleri



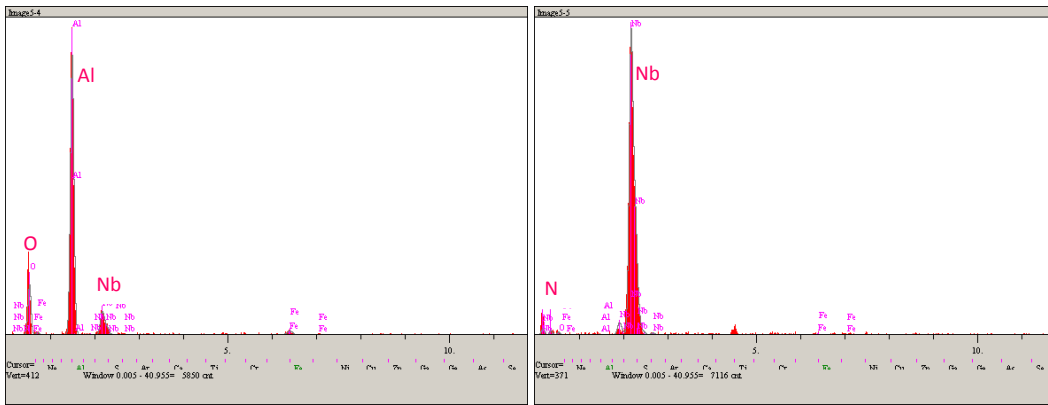
(a)

(b)



(c)

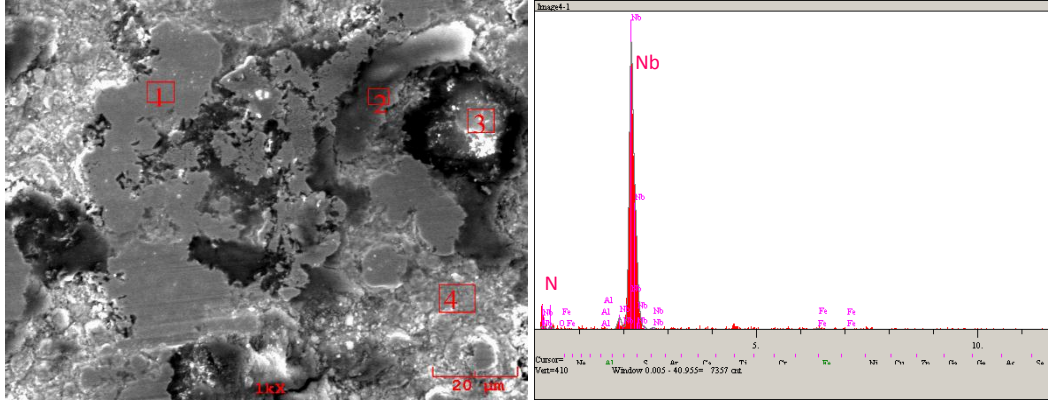
(d)



(e)

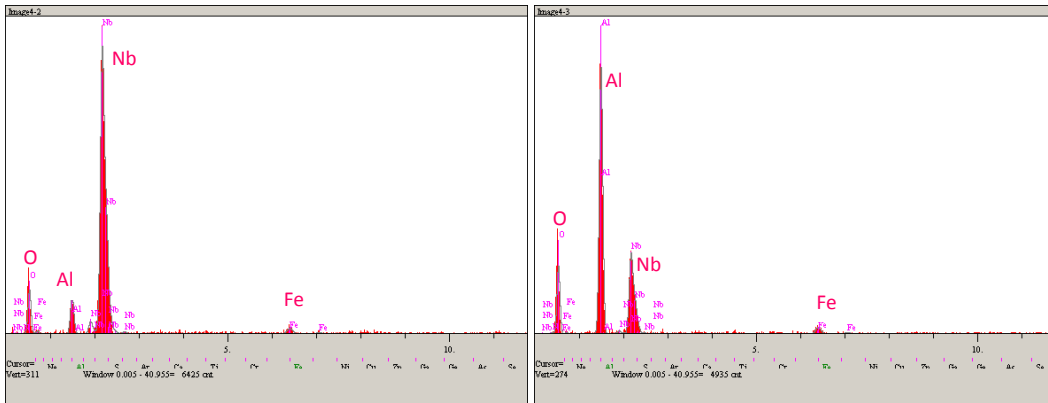
(f)

Şekil 7.80. %2,0 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI 4140 çeliğinin 5N yük altında alümina bilyeye karşı aşınma deneyi sonrası alınan (a) SEM mikroyapı görüntüsü, (b-f) EDS analizleri



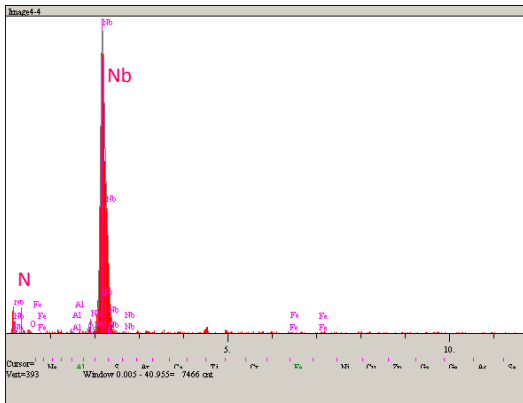
(a)

(b)



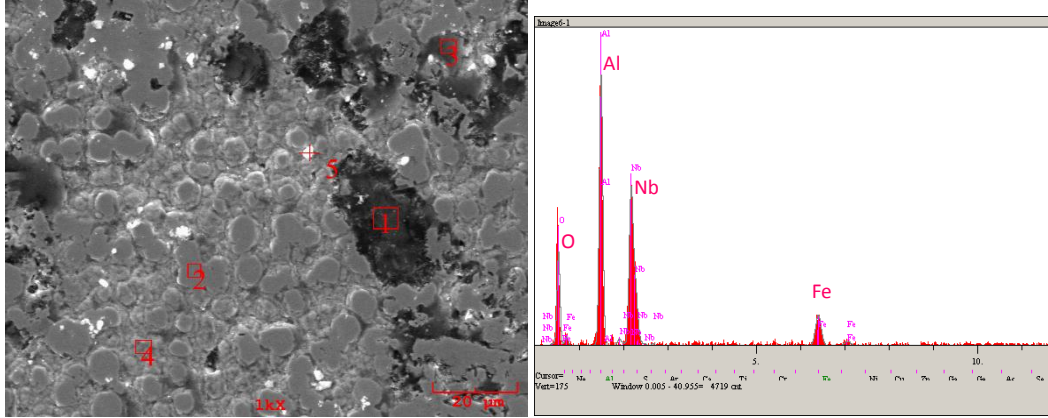
(c)

(d)



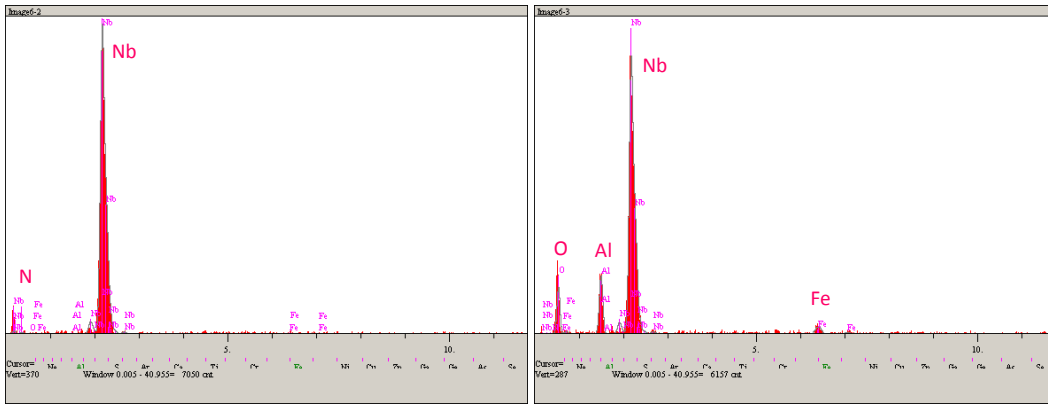
(e)

Şekil 7.81. %2,0 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI D2 çeliğinin 5N yük altında alümina bilyeye karşı aşınma deneyi sonrası alınan (a) SEM mikroyapı görüntüsü, (b-f) EDS analizleri



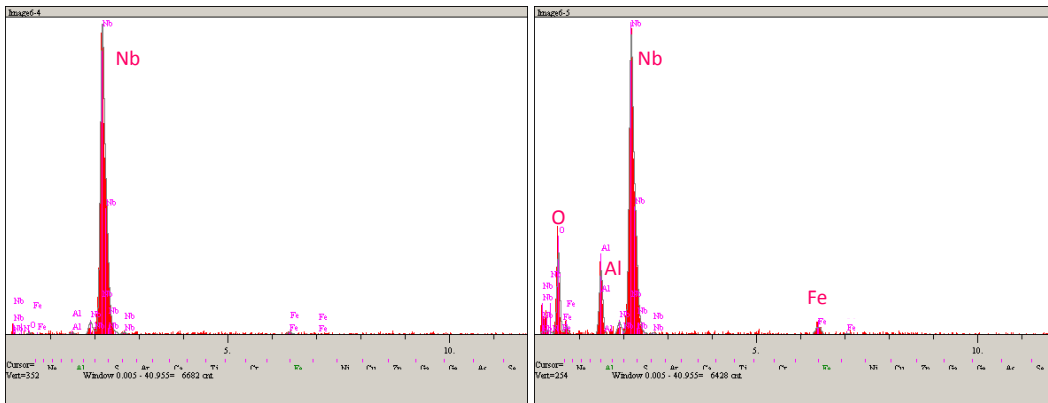
(a)

(b)



(c)

(d)



(e)

(f)

Şekil 7.82. %2,0 alüminyum ilaveli Nb-Al-N kaplanmış AISI M2 çeliğinin 5N yük altında alümina bilyeye karşı aşınma deneyi sonrası alınan (a) SEM mikroyapı görüntüsü, (b-f) EDS analizleri

BÖLÜM 8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

8.1. Sonuçlar

-Yapılan incelemelerde AISI 4140, AISI D2 ve AISI M2 çeliklerinin yüzeyinde Nb-Al-N esaslı kaplamaların elde edilebildiği görülmüştür.

-Elde edilen Nb-Al-N nitrür kaplamaların homojen ve süreklilik gösteren bir yapıda olduğu görülmektedir.

-Yüzeyde oluşan kaplamanın kalınlığı; altlık malzeme türüne ve kaplama süresine ve banyo bileşiminde yer alan alüminyum miktarına göre farklılık göstermektedir.

-Artan kaplama süresi ile birlikte yapıda bulunan ana fazlardan $NbN_{0,95}$ fazında azalma meydana gelirken Nb_2CN fazında artış olmaktadır. Bununla birlikte artan alüminyum oranı ile beraber AlN ve Nb_3Al_2N gibi minör fazlarının oranında artış meydana gelmiştir.

-Kaplama bileşimine ilave edilen alüminyum Nb-Al-N kaplamalarının sertliğini arttırıcı etki sağlamıştır. Sertliğin artmasında ilave edilen alüminyumla beraber yapıda oranı artan $NbN_{0,95}$, AlN ve Nb_3Al_2N gibi fazlarının etkili olduğu düşünülmektedir.

-3 ayrı altlık malzeme için sertlik değerleri karşılaştırıldığında; aynı bileşim ve kaplama süresinde AISI M2 çeliğinin sertliğinin en yüksek olduğu görülmüştür. Bunun sebebi olarak, yapıda bulunan W, Mo, V, Cr gibi alaşım elementlerinin oluşturduğu karbür ve nitrürlerin etkisi olduğu düşünülmektedir. Sırasıyla en sert kaplamalar AISI D2 ve AISI 4140 çelikleridir.

-Nb-N kaplamalara alüminyum ilavesi aşınma dayanımını arttırmıştır. En iyi aşınma dayanımı %1 Al içeren kaplamalarda elde edilmiştir.

-Aşınma deneylerinde artan yüke bağlı olarak sürtünme katsayısında önemli bir değişim meydana gelmezken, artan hızla beraber sürtünme katsayısında düşüş gözlemlenmiştir.

-Kaplanan malzemeler bütün bileşimler ve altlık malzeme türleri için mikro-abrasif ve oksidatif aşınma davranışı gözlemlenmiştir.

8.2. Öneriler

-Nb-Al-N kaplamaların elde edilebilirliği sadece 3 ayrı çelik grubu üzerinde incelenmiştir. Bunun yanında değişik çelik türleri ve demir dışı malzemeler üzerinde de incelemeler yapılabilir.

-Elde edilen kaplamalar için sadece 1000 °C sıcaklıkta incelemeler yapılmıştır. Bunun yanında değişik sıcaklıkların kaplamaların üzerine etkileri incelenebilir.

- Nb-Al-N kaplamalarda sadece alüminyum elementinin etkisi incelenmiştir. Farklı bileşimlerle yapısal özelliklerin geliştirilmesine çalışılabilir. Yapıya ilave edilecek vanadyum, titanyum gibi alaşım elementlerinin yapısal özellikler üzerindeki etkileri inceleme konusu olabilir

-Nb-Al-N kaplamaların korozyon davranışları değişik korozif ortamlar için incelenebilir.

-Kaplamaların oksidasyon davranışları incelenebilir.

-Aşınma deneyleri sadece oda sıcaklığında ve kuru ortamda yapılmıştır. Bu ortamların yanı sıra farklı sıcaklıklar, yağlayıcı ortamları ve farklı gaz ortamları gibi farklı koşullarda aşınma özellikleri incelenebilir.

-Aşınma deneylerinde sadece alümina bilye kullanılmıştır. Farklı bilyeler ile aşınma özellikleri incelenebilir.

-Erosif ve abrasif aşınma deneyleri gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] ARAI, T., Thermoreactive Deposition/Diffusion Process for Surface Hardening of Steels, ASM Metals Handbook Vol 4: Heat Treating, ASM International 1991: 1000-1004.
- [2] YALÇIN T., ATEŞOK G., “Demir Cevherinin Zenginleştirilmesi”, Madencilik Dergisi, 18/2,(1979).
- [3] webelements.com, Erişim tarihi: 16.01.2013.
- [4] E. G. TOTTEN, “Steel Heat Treatment Handbook”, Taylor & Francis 2006, 1:8-33.
- [5] T.C. Bilim, Sanayi ve Sanayi Bakanlığı, “Demir-Çelik Sektör Raporu”, Sektörel Raporlar ve Analizler Serisi, (2012), Ankara.
- [6] GUTHRIE R.I.L. ve JONAS J.J., ASM Metal Handbook Vol 1: Properties and Selection: Irons Steels and High Performance Alloys, ASM International 1990, 2:329.
- [7] SINHA A. K., Physical Metallurgy Handbook, Mc-Graw Hill Publications 2003, 1:47-51.
- [8] SMİTH W. F., Mühendislik Alaşımının Yapı ve Özellikleri Cilt 1: Demir Alaşımları, Nobel Yayın Dağıtım Ltd. Sti. 2000, 4:120.
- [9] http://www.bpc.edu/mathscience/chemistry/images/periodic_table_of_elements.jpg, Erişim Tarihi: 11.06.2013.
- [10] OYAMA, S. T., The Chemistry of Transition Metal Carbides and Nitrides, Blackie Academic and Personal 1996; 2-29.
- [11] PIERSON, H. O., Handbook of Refractory Carbides and Nitrides: Properties, Characteristics and Applications, Noyes Publications 1996; 2:8-15.
- [12] SIRDESHMUKH, D. B., SIRDESHMUKH L. ve SUBHADRA K. G., Springer Series in Materials Science: Atomistic Properties of Solids, Springer-Verlag 2011; 10.1007/978-3-642-19971-4_3.

- [13] KELEŞOĞLU, E., Sert Kaplamalar, Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü 2011; pp.21-31.
- [14] BAUCCIO, M., ASM Metals Reference Book, ASM International 1993; 1:120.
- [15] HAVEY K.S., ZABINSKI Z.S. ve WALCK S.D., The chemistry, structure, and resulting wear properties of magnetron-sputtered NbN thin films, Thin Solid Films 1997; 303:238-245.
- [16] WONG M. S., SPROUL W. D, CHU X., ve BARNETT S. A., Reactive Magnetron Sputter Deposition of Niobium Nitride Films, Journal of Vacuum Science & Technology A 1993; 11(4):1528-1534.
- [17] LARSSON M., HOLLMAN P, HEDENQVIST P., HOGMARK S., WAHLSTRÖM U., HULTMAN L., Deposition and Microstructure of PVD TiN-NbN Multilayered Coatings by Combined Reactive Electron Beam Evaporation and DC Sputtering, Surface and Coatings Technology 1996; 86-87: 351-356.
- [18] BARSHILIA H.C., DEEPTHI B. ve RAJAM K.S., Structure and Properties of reactive Current Magnetron Sputtered Niobium Aluminum Nitride Coatings, Journal of Materials Research 2008, 23: 1258-1268.
- [19] FRANZ R., LECHTHALER M., POLZER C. ve MITTERER C., Structure, Mechanical Properties and Oxidation Behavior of Arc-Evaporated NbAlN Hard Coatings, Surface and Coatings Technology 2010, 204: 2447-2453.
- [20] MITTERER C., LECHTHALER M. ve POLZER C, Tribological Properties of Arc-Evaporated Nb-Al-N Hard Coatings, Tribology Letters 2012, 45: 143-152.
- [21] DAVIS, J. R., Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance, ASM International 2001, 6:116-117.
- [22] ÜSTEL, F., Çelik Yüzeylerinin Kaplanması, Erdemir Bilim ve Teknoloji Serisi 2006, 5:102-106.
- [23] DAVIS, J.R., Surface Hardening of Steels, ASM Internatioal 2002, 9:227-236.
- [24] KALELİ H., Triboloji Prensipleri ve Uygulama Örnekleri Ders Notları, YTU Makine Fakültesi Makine Fakültesi, Otomotiv anabilim Dalı, 7: 54-56.

- [25] KATO K., *Wear: Materials, Mechanisms and Practice*, John Wiley and Sons Ltd. (2006), 2:10-12
- [26] TAKADOUM J., *Materials and Surface Engineering in Tribology*, John Wiley and Sons Ltd. (2007), 2:62-66.
- [28] SEN, S., A Study on Kinetics of Cr_xC -Coated High-Chromium Steel by Thermo-Reactive Diffusion Technique, *Vacuum* 2005, 79:63-70.
- [29] SUDIRAKOV M. V., ZHIKHAREV V. M. ve LYKASOV A.A., Gibbs Energy of Formation of Cubic NbC_xN_y , *Inorganic Materials* 1999, 37:309-313.
- [30] SEN, U., Friction and Wear Properties of Thermo-Reactive Diffusion Coatings Against Titanium Nitride Coated Steels, *Materials and Design* 2005; 26: 167-174.
- [31] MENG H.C. ve LUDEMA K. C., Wear Models and Predictive Equations: Their Form and Content, *Wear* 1995, 181-183: 443-453.

ÖZGEÇMİŞ

Eray Abakay; 12 Nisan 1986 tarihinde Çorum ili Sungurlu ilçesinde doğmuştur. İlköğretiminin ilk 3 yılını Sungurlu Atatürk İlkokulunda sonraki 5 yılını İstanbul Bağcılar Fûruzan Sadıkoğlu İlköğretim Okulunda tamamlamıştır. Orta öğrenimini 2000-2004 yılları arasında İstanbul Bahçelievler Dede Korkut Anadolu Lisesinde sürdürmüştür. 2005 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Kimya - Metalurji Fakültesinde başladığı lisans eğitimini, 2010 yılında tamamlamıştır. 2010-2011 yılları arasında Çetin Cıvata Sanayi A.Ş.'de vardiya mühendisi, 2012 yılında 6 ay süre ile Bilge Döküm Makine Sanayi A.Ş.'de kalite güvence mühendisi olarak görev yapmıştır. Askerlik görevini 2011-2012 yılları arasında K.K.K. Malatya ASAL Bölge Başkanlığına bağlı Adıyaman Askerlik Şubesinde gerçekleştirmiştir. 2010 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalında Başladığı lisansüstü eğitime 2012 yılı itibariyle Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında devam etmektedir. Halen Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünde araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır.