

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**KATMANLI BOR KAPLAMA İŞLEMİNİN NAMLU ÇELİKLERİNİN MEKANİK VE TRİBOLOJİK
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Sadun KARABIYIK

**EKİM 2025
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**KATMANLI BOR KAPLAMA İŞLEMİNİN NAMLU ÇELİKLERİNİN MEKANİK VE
TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Sadun KARABIYIK

ORCID : - - -

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"DOKTOR (MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 17 / 09 / 2025

Tezin Savunma Tarihi : 13 / 10 / 2025

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Yasin ALEMDAĞ
ORCID : - - -

Trabzon 2025

ÖNSÖZ

“Katmanlı Bor Kaplama İşleminin Namlu Çeliklerinin Mekanik ve Tribolojik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Programı’nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca desteğini esirgemeyen ve bilim insanı olma yolundaki ilk adımlarımı atarken kıymetli bilgileriyle ve tecrübesiyle yolumu aydınlatan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Yasin ALEMDAĞ’a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, farklı yaklaşım ve önerileri ile bu teze önemli katkılar sunan saygıdeğer hocalarım Sayın Prof. Dr. Gençaga PÜRÇEK’e ve Sayın Prof. Dr. Sultan ÖZTÜRK’e, tez çalışması sürecinde desteklerini esirgemeyen arkadaşlarım Dr. Öğr. Üyesi Yaşar SERT, Arş. Gör. Muhammet UZUN, Öğr. Gör. Fatih ATCI, Mak. Müh. Murat KAR ve Mak. Müh. Akın TİMUR ile çizik testlerindeki yardımlarından dolayı Doç. Dr. Şengül DANIŞMAN’a, aşınma deneylerindeki yardımlarından dolayı da Dr. Öğr. Üyesi Harun YANAR’a teşekkür ederim.

Bu tez çalışması Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FDK-2022-10517 numaralı proje ve TİSAŞ A.Ş ile gerçekleştirilen FSI-2025-16121 kodlu üniversite-sanayi iş birliği projesi ile desteklenmiştir. Katkılarından dolayı Trabzon Silah A.Ş ailesine de teşekkür ederim.

Son olarak, bugünlere gelmemde en büyük paya sahip olan aileme ve tez çalışması süresince desteğini esirgemeyen eşim Zeynep Sultan KARABIYIK’a minnettarlığımı sunar, bu tezin bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Sadun KARABIYIK

Trabzon 2025

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Katmanlı Bor Kaplama İşleminin Namlu Çeliklerinin Mekanik ve Tribolojik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Yasin ALEMDAĞ’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 13/10/2025

Sadun KARABIYIK

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Çeliklere Uygulanan Difüzyon Esaslı Yüzey İşlemleri.....	5
1.3. Çelik Yüzeylerinde Bor ve Titanyum Esaslı Tabakaların Oluşumu.....	8
1.4. Bor ve Titanyum Kaplamaların Namlu Çeliklerinin Mekanik ve Tribolojik Özelliklerine Etkisi	12
1.4. Literatür Özeti.....	17
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	19
2.1. Kaplama İşlemleri.....	19
2.2. Yapısal Karakterizasyon İşlemleri.....	21
2.3. Mekanik Karakterizasyon İşlemleri.....	22
2.4. Sürtünme ve Aşınma Deneyleri	24
2.5. Kaplamaların Hafif Silah Namlusunun İç Yüzeyine Uygulanması.....	27
3. BULGULAR	29
3.1. Yapısal İncelemelerden Elde Edilen Bulgular.....	29
3.2. Sertlik, Rockwell-C Adezyon ve Çizik Deneylerinden Elde Edilen Bulgular	48
3.3. Sürtünme ve Aşınma Deneylerinden Elde Edilen Bulgular	62
3.4. Aşınma Yüzeylerinin ve Parçacıklarının İncelenmesinden Elde Edilen Bulgular ..	78
3.5. Kaplamaların Hafif Silah Namlusunun İç Yüzeylerine Uygulanmasına Yönelik Deneylerden Elde Edilen Bulgular	96
4. TARTIŞMA.....	101
5. SONUÇLAR.....	112

6. ÖNERİLER	115
7. KAYNAKLAR.....	116
ÖZGEÇMİŞ	



Doktora Tezi

ÖZET

KATMANLI BOR KAPLAMA İŞLEMİNİN NAMLU ÇELİKLERİNİN MEKANİK VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Sadun KARABIYIK

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Yasin ALEMDAĞ
2025, 123 Sayfa

Bu çalışmada; bor, titanyum, bor ve ardından titanyum kaplama işlemlerinin 42CrMo4 ve 32CrMoV12-10 namlu çeliklerinin yüzey özelliklerine ve aşınma davranışlarına etkisi sistematik olarak incelendi ve hem kaplanmamış hem de ticari nitrürlenmiş durumları ile karşılaştırıldı. Kaplama sonucu oluşan tabakaların özellikleri mikroskopik incelemeler ile sertlik, adezyon, çizik ve aşınma testleri yardımıyla belirlendi. Kaplama işlemleri sonucunda çeliklerin yüzeylerinde Fe_2B , FeB , TiC ve TiB_2 fazlarına sahip sertliği çok yüksek bor ve titanyum esaslı kaplamaların oluştuğu görüldü. Söz konusu kaplamalar arasında TiC tabakasının adezyon dayanımı kalitesinin en düşük olduğu gözlemlendi. En yüksek çizik direncini ise yüzeyinde tek fazlı borür tabakası bulunan 42CrMo4 çeliğinin sergilediği belirlendi. Diğer taraftan FeB fazının borlandıktan sonra yapılan titanyumlama işleminin ardından Fe_2B fazına dönüştüğü görüldü. Nitrürlenmiş çeliklerin oda sıcaklığında, borlandıktan sonra titanyumlanmış çeliklerin ise yüksek sıcaklıkta üstün aşınma direnci sergilediği gözlemlendi. Borlama ve borlandıktan sonra titanyumlama işlemleri 42CrMo4 çeliğinden üretilmiş namlu numunelerinin iç yüzeylerine uygulandı, ancak bu kapsamda sadece borlama işleminde bir başarı elde edildi.

Anahtar Kelimeler: Namlu çelikleri, Borlama, Titanyumlama, Çok katmanlı kaplamalar, Mekanik özellikler, Sürtünme ve aşınma

PhD. Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION ON THE EFFECT OF MULTI-LAYERED BORIDING ON THE MECHANICAL AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF BARREL STEELS

Sadun KARABIYIK

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Yasin ALEMDAĞ
2025, 123 Pages

In this study, the effect of boronizing, titanizing, and borotitanizing coating processes on the surface properties and wear behaviour of 42CrMo4 and 32CrMoV12-10 barrel steels were systematically investigated and compared with their uncoated and commercially nitrided conditions. The surface properties of coated steels were determined by microscopic examinations, hardness, Rockwell-C adhesion, scratch, and wear tests. The coating processes led to the formation of hard Fe₂B, FeB, TiC, and TiB₂ layers on the surface of steels. It was observed that the TiC layer had the poorest adhesion strength quality among the coatings. The highest scratch resistance was obtained from the 42CrMo4 steel having a single-phase boride layer on its surface. On the other hand, the borotitanizing process caused the transformation of the FeB phase to Fe₂B. Nitrided steels exhibited the highest wear resistance at room temperature wear tests, but the wear resistance of the borotitanized steels was determined to be superior at elevated temperature. Boronizing and borotitanizing coatings were performed on inner surfaces of barrel samples produced from 42CrMo4 steel; however, a proper coating at the inner surface of the sample was achieved with boronizing.

Keywords: Barrel steels, Boriding, Titanizing, Multi layered coatings, Mechanical properties, Friction and wear

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. a) α -Fe, b) Fe_2B ve c) FeB fazlarına ait kristal yapıların şematik gösterimi	10
Şekil 2. Kutu borlama ve titanyumlama işlemlerine ait şematik resim	20
Şekil 3. VDI 3198 standardına göre tabakada oluşabilecek hasar tiplerinin şematik gösterimleri ve sınıflandırılmaları	23
Şekil 4. Çizik testinin şematik gösterimi	23
Şekil 5. Bilye-disk esaslı ileri-geri hareketli aşınma deney düzeneğinin ve test bölgesinin şematik gösterimi	24
Şekil 6. Bilye-disk esaslı aşınma deney düzeneğinin ve test bölgesinin şematik gösterimi	27
Şekil 7. a) Borlama ve titanyumlama işlemlerine hazır hale getirilmiş namluya ve b) numunelerin bu namludan alındığı konumlara ait şematik resim.....	28
Şekil 8. Farklı bor oranlarında, sıcaklık ve sürelerinde borlanmış $32CrMoV12-10$ çeliğine ait numunelerin kesit SEM görüntüleri.....	30
Şekil 9. Farklı bor oranlarında, sıcaklık ve sürelerinde borlanmış $42CrMo4$ çeliğine ait numunelerin kesit SEM görüntüleri.....	31
Şekil 10. Farklı oranlarda bor içeren karışımlarda $900\text{ }^{\circ}C$ sıcaklıkta 3 saat süre ile borlanmış numunelerin kesitlerine ait detaylı SEM görüntüleri.....	32
Şekil 11. Borlanmış numunelerin yüzeylerinden elde edilen X-ışını kırınımı desenleri.....	33
Şekil 12. Borlanmış çeliklere ait numunelerin yüzeylerinde oluşan borür tabakası kalınlıklarının ortalama değerlerinin bor oranı, borlama sıcaklık ve sürelerine göre değişimlerini gösteren eğriler	35
Şekil 13. Farklı oranlarda bor içeren karışımlarda $900\text{ }^{\circ}C$ sıcaklıkta 3 saat borlanmış numunelerdeki difüzyon bölgelerini gösteren OM görüntüleri.....	36

Şekil 14.	% [55 Fe-Ti + 35 Al ₂ O ₃ +10 NH ₄ Cl] titanyumlama karışımında 1100 °C sıcaklıkta 3 saat titanyumlanmış çeliklere ait numunelerin kesit SEM görüntüleri.....	38
Şekil 15.	Titanyumlanmış 42CrMo4 çeliğine ait numune kesitinden yapılan çizgisel EDS analizi sonuçlarını gösteren eğriler	39
Şekil 16.	Titanyumlanmış numunelerin yüzeylerinden elde edilen X-ışını kırınımı desenleri	39
Şekil 17.	Borlanmış durumda çift ve tek fazlı borür tabakaları içeren numunelerin titanyumlama işlemi sonrasındaki kesitlerine ait SEM görüntüleri.....	41
Şekil 18.	Borlandıktan sonra titanyumlanan çeliklere ait numunelerin yüzeylerinden elde edilen X-ışını kırınımı desenleri.....	42
Şekil 19.	Borlandıktan sonra titanyumlanan 32CrMoV12-10 çeliğine ait numunenin elementel EDS analizi görüntüsü.....	43
Şekil 20.	Nitrürlenmiş numunelerin SEM görüntüleri.....	44
Şekil 21.	Nitrürlenmiş numunelerin X-ışını kırınımı desenleri	44
Şekil 22.	Nitrürlenmiş numunelere ait OM görüntüleri.....	45
Şekil 23.	32CrMoV12-10 ve 42CrMo4 çeliklerine ait numunelerin iç yapılarını gösteren OM görüntüleri.....	46
Şekil 24.	Numunelerden farklı kaplama işlemleri sonrasında alınan OM görüntüleri.....	47
Şekil 25.	Borlanmış ve borlandıktan sonra titanyumlanmış 32CrMoV12-10 çeliğine ait numunelerin yüzeylerindeki tabakaların sertlik değerlerinin yüzey derinliğine göre değişimlerini gösteren eğriler	50
Şekil 26.	Çift fazlı borür tabakası içeren 42CrMo4 çeliğine ait numunelerin titanyumlama işlemi sonrasında yüzeylerinde oluşan tabakaların sertlik değerlerinin yüzey derinliğine göre değişimlerini gösteren eğriler	51
Şekil 27.	Tek fazlı borür tabakası içeren 42CrMo4 çeliğine ait numunelerin titanyumlama işlemi sonrasında yüzeylerinde oluşan tabakaların sertlik değerlerinin yüzey derinliğine göre değişimlerini gösteren eğriler	51

Şekil 28.	Çeliklerin ana matrisine ait sertlik değerlerinin işlem koşullarına göre değişimlerini gösteren eğriler	52
Şekil 29.	Borlanmış bazı numunelerin yüzeylerinde oluşan girinti izlerine ait SEM görüntüleri	54
Şekil 30.	Titanyumlanmış numunelerin yüzeylerinde oluşan girinti izlerine ait SEM görüntüleri	55
Şekil 31.	Borlandıktan sonra titanyumlanmış numunelerin yüzeylerinde oluşan girinti izlerine ait SEM görüntüleri.....	56
Şekil 32.	Nitrürlenmiş numunelerin yüzeylerinde oluşan girinti izlerine ait SEM görüntüleri.....	57
Şekil 33.	Borlanmış numunelerin çizik deneylerinden elde edilen görüntü ve grafikler.....	58
Şekil 34.	Titanyumlanmış numunelerin çizik deneylerinden elde edilen görüntü ve grafikler.....	59
Şekil 35.	Borlandıktan sonra titanyumlanmış numunelerin çizik deneylerinden elde edilen görüntü ve grafikler.....	60
Şekil 36.	Nitrürlenmiş numunelerin çizik deneylerinden elde edilen görüntü ve grafikler.....	61
Şekil 37.	32CrMoV12-10 çeliğine ait borlanmış numunelerin sürtünme katsayılarının kayma mesafesine göre değişimini gösteren eğriler	62
Şekil 38.	42CrMo4 çeliğine ait borlanmış numunelerin sürtünme katsayılarının kayma mesafesine göre değişimini gösteren eğriler	63
Şekil 39.	Farklı oranda bor içeren borlama karışımlarında borlanmış 32CrMoV12-10 çeliğine ait numunelerin ortalama sürtünme katsayıları ve aşınma kayıpları	63
Şekil 40.	Farklı oranda bor içeren borlama karışımlarında borlanmış 42CrMo4 çeliğine ait numunelerin ortalama sürtünme katsayıları ve aşınma kayıpları	64

Şekil 41.	Borlanmış, titanyumlanmış, borlandıktan sonra titanyumlanmış ve nitrürlenmiş 32CrMoV12-10 çeliğine ait numunelerin sürtünme katsayılarının kayma mesafesine göre değişimini gösteren eğriler	65
Şekil 42.	Borlanmış, titanyumlanmış, borlandıktan sonra titanyumlanmış ve nitrürlenmiş 42CrMo4 çeliğine ait numunelerin sürtünme katsayılarının kayma mesafesine göre değişimini gösteren eğriler	66
Şekil 43.	Çeliklerin kaplanmamış durumuna ait numunelerin yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin optik profilometre ile elde edilen görüntüleri ve profilleri	67
Şekil 44.	Farklı oranda bor içeren borlama karışımında borlanmış çeliklere ait numunelerin yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin optik profilometre ile elde edilen görüntüleri ve profilleri	68
Şekil 45.	Titanyumlanmış çeliklere ait numunelerin yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin optik profilometre ile elde edilen görüntüleri ve profilleri.....	69
Şekil 46.	Çeliklerin borlanmış ve ardından titanyumlanmış numunelerinin yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin optik profilometre ile elde edilen görüntüleri ve profilleri.....	70
Şekil 47.	Çeliklerin nitrürlenmiş numunelerinin yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin optik profilometre ile elde edilen görüntüleri ve profilleri.....	71
Şekil 48.	32CrMoV12-10 çeliğine ait numunelerin ortalama sürtünme katsayıları ve aşınma kayıpları	72
Şekil 49.	42CrMo4 çeliğine ait numunelerin ortalama sürtünme katsayıları ve aşınma kayıpları.....	72
Şekil 50.	Nitrürlenmiş ve borlandıktan sonra titanyumlanmış numunelerin sürtünme katsayılarının kayma mesafesine göre değişimlerini gösteren eğriler.....	74
Şekil 51.	25 °C ve 500 °C sıcaklıklarda aşınma deneylerine tabi tutulan borlandıktan sonra titanyumlanmış ve sadece nitrürlenmiş 32CrMoV12-10 çeliğine ait numunelerin yüzeylerinden alınan optik profilometre görüntüleri ve aşınma profilleri	75
Şekil 52.	25 °C ve 500 °C sıcaklıklarda aşınma deneylerine tabi tutulan borlandıktan sonra titanyumlanmış ve sadece nitrürlenmiş 42CrMo4	

	çeliğine ait numunelerin yüzeylerinden alınan optik profilometre görüntüleri ve aşınma profilleri	76
Şekil 53.	Nitrülenmiş ve borlandıktan sonra titanyumlanmış numunelerin ortalama sürtünme katsayılarının sıcaklığa göre değişimini gösteren eğriler.....	77
Şekil 54.	Nitrülenmiş ve borlandıktan sonra titanyumlanmış numunelerin aşınma kayıplarının sıcaklığa göre değişimlerini gösteren eğriler	77
Şekil 55.	Kaplanmamış numunelerin yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin uç ve orta bölgelerine ait SEM görüntüleri	79
Şekil 56.	Farklı oranda bor içeren borlama karışımlarında borlanmış 32CrMoV12-10 çeliğine ait numunelerin yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin uç ve orta bölgelerinin SEM görüntüleri.....	80
Şekil 57.	Farklı oranda bor içeren borlama karışımlarında borlanmış 42CrMo4 çeliğine ait numunelerin yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin uç ve orta bölgelerinin SEM görüntüleri	81
Şekil 58.	Titanyumlanmış numunelerin yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin uç ve orta bölgelerine ait SEM görüntüleri	82
Şekil 59.	Borlanmış ve ardından titanyumlanmış numunelerin yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin uç ve orta bölgelerine ait SEM görüntüleri	83
Şekil 60.	Nitrülenmiş çeliklerin yüzeylerinde oluşan aşınma izinin uç ve orta bölgelerine ait SEM görüntüleri	84
Şekil 61.	25 °C ve 500 °C sıcaklıklarda aşınma deneylerine tabi tutulan borlandıktan sonra titanyumlanmış ve nitrülenmiş 32CrMoV12-10 çeliğine ait numunelerin yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin SEM görüntüleri.....	86
Şekil 62.	25 °C ve 500 °C sıcaklıklarda aşınma deneylerine tabi tutulan borlandıktan sonra titanyumlanmış ve nitrülenmiş 42CrMo4 çeliğine ait numunelerin yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin SEM görüntüleri	87
Şekil 63.	Aşınma deneylerinden sonra bazı numunelerden toplanan aşınma parçacıklarının SEM görüntüleri	89
Şekil 64.	Bazı numunelerin aşınmasında kullanılan bilyelerin temas yüzeylerine ait SEM görüntüleri	91

Şekil 65.	32CrMoV12-10 çeliğine ait numunelerin 25 °C ve 500 °C sıcaklıklardaki aşınma deneylerinden sonra toplanan aşınma parçacıklarının SEM görüntüleri	93
Şekil 66.	32CrMoV12-10 çeliğine ait numunelerin 25 °C ve 500 °C sıcaklıklardaki aşınma deneylerinde kullanılan bilyelerin temas yüzeylerinin SEM görüntüleri	95
Şekil 67.	Borlanmış a) 50 mm ve b) 70 mm uzunluklarındaki namlu numunelerinin orta kısımlarına ait dikey kesitlerini gösteren OM görüntüleri.....	97
Şekil 68.	Borlanmış a) 50 mm ve b) 70 mm uzunluklarındaki namlu numunelerinin yatay kesitlerine ait OM görüntüleri	98
Şekil 69.	Borlandıktan sonra titanyumlanmış 70 mm uzunluğundaki namlu numunesinin orta kısmından alınmış a) dikey ve b) yatay kesitlerine ait OM görüntüleri	100

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Kutu borlama işleminde en yaygın kullanılan bor verici ortam bileşenleri ve bunların yüzde oranları.....	7
Tablo 2. 42CrMo4 ve 32CrMoV12-10 çeliklerinin kutu borlama yoluyla borlanmasına ilişkin bazı çalışmalar.....	14
Tablo 3. Çeliklerin kimyasal bileşimleri.....	19
Tablo 4. Borlama koşulları, borlama karışımlarının kimyasal bileşimleri ve numune kodları	20
Tablo 5. Titanyumlama koşulları ve titanyumlama karışımlarının kimyasal bileşimleri	20
Tablo 6. Zımparalama işlemine tabi tutulan sürtünme ve aşınma numunelerinin ortalama yüzey pürüzlülükleri	26
Tablo 7. Borlanmış numunelerin bazı bölgelerine ait EDS analizi sonuçları.....	33
Tablo 8. Farklı bor oranlarında, sıcaklık ve sürelerinde borlanmış çeliklere ait numunelerin yüzeylerinde oluşan borür tabakası kalınlıklarının ortalama değerleri	34
Tablo 9. Fe-Ti oranı farklı karışımlarda 1000 °C ve 1100 °C sıcaklıklarda 3 saat titanyumlanmış numunelerin yüzeylerinde oluşan TiC tabakası kalınlığının ortalama değerleri.....	37
Tablo 10. % [55 Fe-Ti + 35 Al ₂ O ₃ +10 NH ₄ Cl] titanyumlama karışımında, 1100 °C sıcaklıkta 3 saat titanyumlanmış numunelerin EDS analizi sonuçları	38
Tablo 11. Borlandıktan sonra titanyumlanan çeliklere ait numunelerin işaretlenmiş ve numaralandırılmış bölgelerine ait EDS sonuçları.....	42
Tablo 12. Borlama ve ardından uygulanan titanyumlama işlemi sonrası yüzeyde oluşan tabakaların ortalama kalınlık değerleri.....	43
Tablo 13. Nitrür tabakasının EDS analizi sonuçları	45

Tablo 14.	Borlanmış numunelere ait borür tabakalarının mikrosertlikleri	48
Tablo 15.	Titanyumlanmış numunelerin yüzeylerinde oluşan TiC tabakasının mikrosertliği.....	49
Tablo 16.	Borlandıktan sonra titanyumlanmış numunelerin yüzeylerinde oluşan tabakaların mikrosertlikleri.....	49
Tablo 17.	Nitrülenmiş numunelerin yüzeylerinde oluşan Fe _{3,4} N tabakasının mikrosertliği.....	49
Tablo 18.	Borlanmış numunelere ait Rockwell-C adezyon deneyi sonuçları.....	53
Tablo 19.	Titanyumlanmış ve borlandıktan sonra titanyumlanmış numunelere ait Rockwell-C adezyon deneyi sonuçları	53
Tablo 20.	Nitrülenmiş numunelere ait Rockwell-C adezyon deneyi sonuçları	53
Tablo 21.	Kaplama tabakalarında ilk çatlağa yol açan kuvvet (Lc ₁) değerleri	61
Tablo 22.	Kaplanmamış numunelerin yüzeylerinde oluşan aşınma izinin bazı bölgelerinden alınan EDS analizi sonuçları.....	80
Tablo 23.	Borlanmış numunelerin yüzeylerinde oluşan aşınma izinin bazı bölgelerinden alınan EDS analizi sonuçları.....	81
Tablo 24.	Titanyumlanmış numunelerin yüzeylerinde oluşan aşınma izinin bazı bölgelerinden alınan EDS analizi sonuçları.....	82
Tablo 25.	Borlanmış ve ardından titanyumlanmış numunelerin yüzeylerinde oluşan aşınma izinin bazı bölgelerinden alınan EDS analizi sonuçları	84
Tablo 26.	Nitrülenmiş numunelerin yüzeylerinde oluşan aşınma izinin bazı bölgelerinden alınan EDS analizi sonuçları.....	85
Tablo 27.	25 °C ve 500 °C sıcaklıklarda aşınma deneylerine tabi tutulan borlandıktan sonra titanyumlanmış ve nitrülenmiş çeliklere ait numunelerin yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin bazı bölgelerinden alınan EDS analizi sonuçları.....	88
Tablo 28.	Aşınma parçacıklarının EDS analizi sonuçları	90
Tablo 29.	Bazı bilyelerin temas yüzeylerinden alınan EDS analizi sonuçları	92

Tablo 30.	32CrMoV12-10 çeliğine ait numunelerin 25 °C ve 500 °C sıcaklıklardaki aşınma deneylerinden sonra toplanan aşınma parçacıklarının EDS analizi sonuçları	94
Tablo 31.	32CrMoV12-10 çeliğine ait numunelerin 25 °C ve 500 °C sıcaklıklardaki aşınma deneylerinde kullanılan bilyelerin temas yüzeylerinin EDS analizi sonuçları	96
Tablo 32.	Namlu numunelerinin belirli bölgelerinden ölçülen borür tabakalarına ait kalınlıklar.....	98
Tablo 33.	Borlanmış 42CrMo4 çeliğinin hem düz hem de namlu biçimindeki iç yüzeylerinde oluşan borür tabakaları ile söz konusu çeliğin difüzyon bölgelerine ve taban malzemeye ait sertlik değerlerinin karşılaştırılması	99

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Savunma sanayine yönelik yapılan çalışmalar dışa bağımlılığın azaltılması için birçok ülkede önemli ölçüde desteklenmektedir (Hen-Tov, 2004; Sandler & George, 2016). Bu çalışmaların önemli bir bölümünü söz konusu alanda kullanılan malzemelere ait özelliklerin geliştirilmesi hususu oluşturmaktadır (Hen-Tov, 2004; Pavel vd., 2020). Savunma sanayine yönelik üretilen birçok ekipmanda ıslah çelikleri ile alaşımlı çelikler (takım çelikleri) kullanılmaktadır (Pavel vd., 2020). Bu durum söz konusu çeliklerin yüzey sertleştirme işlemlerine uygun oluşları, dövülerek şekillendirilebilmeleri ve iyi mekanik özellikler sergilemelerinden kaynaklanmaktadır (Krauss, 1992). Islah ve alaşımlı çelikler içerisinde silah namlularının yapımında daha çok 42CrMo4 (AISI 4140) ve 32CrMoV12-10 çelikleri tercih edilmektedir (Koçyiğit vd., 2020; Pavel vd., 2020; Pokorny vd., 2020). Ancak ülkemiz savunma sanayi namli imalatında daha çok 42CrMo4 çeliğini kullanmaktadır. Diğer taraftan 42CrMo4 çeliği savunma sanayinin yanı sıra birçok makine ve motor parçalarının, cıvataların, somunların, krank millerinin, aksların ve dişli çarkların imalatında da yaygın olarak tercih edilmektedir (Shihab vd., 2014). Bu durumun 32CrMoV12-10 çeliğinin ithalatının yüksek maliyet gerektirmesinden kaynaklandığı bilinmektedir (Koçyiğit vd., 2020; Pavel vd., 2020).

Silah namlularının ilk ateşleme anından başlayarak merminin namluyu terk etmesine kadar geçen süreç içerisinde ani değişken yüklere maruz kaldığı hem yüksek sıcaklık hem de söz konusu yükler altında aşındığı bilinmektedir (Lawton, 2001; Petitpas & Campion, 2003). Dolayısıyla bir silahın kullanım ömrü, ateşleme sonucu silah namlusunun iç yüzeyinde meydana gelen aşınma miktarı ile belirlenmektedir. Namlu iç yüzeyinin aşınması, mühimmatın isabet doğruluğunu ve namludan çıkış hızını düşürmekte olup silahın uzun süreli kullanımını kısıtlamaktadır (Lawton, 2001; Degirmenci, 2015). Bu durum namlu yapımında kullanılan çeliklerin yüzey özelliklerinin geliştirilmesinin gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu gereklilik doğrultusunda namlu imalatında kullanılan çeliklerin hem iç hem dış yüzeyleri elektrolitik yöntemle krom kaplanmaktadır (Chae vd., 2006). Ancak bu işlem için kullanılan hegzavalent krom banyolarının çevreye ve insan sağlığına ciddi zararlar verdiği tespit edilmiş olup kullanımı Amerika Birleşik Devletleri'nde ve Avrupa Birliği'nde kısıtlanmıştır (Barnhart, 1997; Gambelunghe vd., 2003). Bu nedenle krom kaplamaların

yerini alabilecek kaplama tekniklerinin geliştirilmesi savunma sanayi uygulamaları için öncelikli hedef olarak belirlenmiştir (Larisch vd., 1999; Baptista vd., 2018). Bu kapsamda fiziksel (PVD) ve kimyasal buhar biriktirme (CVD) yöntemleri ile çelik yüzeylerinin aşınma performanslarının geliştirilmesi denenmiş, bu işlemlerden sonra çelik yüzeylerinde kararlı, pürüzsüz ve aşınma direnci yüksek tabakalar elde edilmiştir (Rebenne & Bhat, 1994; Baptista vd., 2018). Ancak söz konusu yöntemlerin namlu biçimindeki silindirik parçalara uygulanmasında karşılaşılan zorluklar nedeniyle pek uygun olmadıkları görüşüne varılmıştır (Sheward, 1992; Zhang & Zhu, 1993). Bu nedenle düz yüzeylere uygulanan nitrürleme işlemlerinin uzun namlulu silahların namlu iç yüzeylerine de uygulanması yoluna gidilmiştir (Lee & Kim, 2004; Pokorný vd., 2011; Pokorny vd., 2020). Nitekim 42CrMo4 çeliği üzerinde yapılan nitrürleme işlemi sonucunda bu çeliğin yüzeyinde ϵ -Fe₂-₃N ve/veya γ -Fe₄N gibi demir nitrür bileşiklerinden oluşan ve kalınlığı 10-50 μ m, sertliği ise 700-1000 HV aralığında değişen bir tabaka oluşturulmuş ve bu tabakanın yüksek aşınma ve korozyon direnci sergilediği belirlenmiştir (Çelik & Karadeniz, 1996; Lee & Kim, 2004). Ancak farklı namlu uzunlukları üzerinde yapılan çalışmalarda namlu uzunluğu arttıkça nitrür tabakasının homojen bir dağılım sergilemediği, buna bağlı olarak farklı sertlik değerlerine sahip bölgelerin ortaya çıktığı gözlenmiştir (Lee & Kim, 2004; Pokorný vd., 2011). Diğer taraftan bu işlem esnasında oluşan artık gerilmelerin çatlak oluşumuna yol açtığı, bu çatlakların zamanla birleşmesi ile nitrür tabakasının yüzeyden soyulduğu belirtilmiştir (Kato vd., 1994; Vega-Morón vd., 2018). Nitrürlenmiş namlular üzerinde gerçekleştirilen atış testlerinde belirli bir atış sayısından sonra bu durumun belirgin bir biçimde ortaya çıktığı kanıtlanmıştır (Lee & Kim, 2004; Chae vd., 2006; Prochazka vd., 2020). Bu durum namlu iç yüzeylerinde nitrür tabakasına alternatif daha kararlı ve aşınma direnci yüksek tabaka veya tabakaların geliştirilmesi gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Bu nedenle düz yüzeyler üzerinde yapılan borlama çalışmaları sonucunda nitrür tabakasına göre daha yüksek sertlik (~1800 VSD) ve aşınma direncine sahip borür tabakaları oluşturulmuş, bu tabakalar esas alınarak geliştirilen katmanlı tabakaların namlu iç yüzeylerinin aşınma performansını iyileştirebileceği kanaatine varılmıştır (Campos-Silva & Rodríguez-Castro, 2015; Joshi vd., 2015).

Borlama yöntemleri içerisinde kutu borlama uygulama kolaylığı, düşük maliyeti ve farklı geometrideki parçalara uygulanabilirliği gibi özelliklerinden dolayı ön plana çıkmaktadır (Fichtl, 1981; Campos-Silva & Rodríguez-Castro, 2015). Kutu borlama işleminde numune ısıya dayanıklı bir kutu içerisinde bulunan katı (toz) haldeki borlama karışımı içerisine gömülerek bir fırın içerisine yerleştirilmektedir. Söz konusu kutu fırın

içerisinde belirlenen sıcaklıkta ve sürede tutularak borlama işlemi gerçekleştirilmektedir. Kutu borlama işleminde saf bor, bor karbür (B_4C) ve borik asit (H_3BO_3) gibi farklı bor verici ortamlar kullanılmaktadır (Ozbek & Bindal, 2002; Ulutan vd., 2010; Türkmen & Yalamaç, 2018; Kara & Purcek, 2020; Türkmen & Yalamaç, 2022). Bu ortamlar içerisinde B_4C , KBF_4 (aktivatör) ve SiC 'den (seyreltici) oluşan karışım hem bilimsel hem de ticari uygulamalarda daha çok tercih edilmektedir (Campos-Silva & Rodríguez-Castro, 2015). Ancak bor karbür içeren karışımların ithalat yolu ile temin edilmesi ve maliyetlerinin yüksek olması ülkemizde üretilen bor kaynaklarının kullanılarak araştırmaların yapılması gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu kapsamda yapılan araştırmalarda saf bor ön plana çıkmış, bu karışımlar kullanılarak titanyum ve bazı çeliklerin yüzeylerinde farklı kalınlıklara sahip borür tabakaları oluşturulmuştur (Brandstötter & Lengauer, 1997; Dybkov, 2007; Kara & Purcek, 2020).

Borlamış çeliklerin yüzeylerinde oluşan borür tabakalarının ve difüzyon (geçiş) bölgelerinin morfolojisi ve kalınlığı; borlama sıcaklığına ve süresine, işlemin yapıldığı ortamın bor potansiyeline ve çeliğin kimyasal bileşimine bağlıdır (Campos-Silva vd., 2010; Campos-Silva vd., 2011; Campos-Silva vd., 2017; Delai vd., 2021). Borür tabakaları bor ile demir arasındaki reaksiyonlar sonucu oluşan FeB ve Fe_2B fazlarından, geçiş bölgesi ise bor içerisinde çözünürlüğü çok düşük olan elementlerin demir ve bor ile oluşturdukları bileşiklerden meydana gelmektedir (Campos-Silva vd., 2010; Delai vd., 2021). $Fe-B$ faz diyagramı incelendiğinde borlama işlemi sırasında FeB ve Fe_2B tabakalarının ağırlıkça yaklaşık %16 ve %9'luk bor oranlarında olduğu görülmektedir (Campos-Silva vd., 2010; Delai vd., 2021). Ancak bu iki tabakanın farklı ısıl genleşme katsayılarına sahip olması (FeB tabakası için $23 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ C^{-1}$, Fe_2B tabakası için $7,85 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ C^{-1}$) borlama işleminden sonraki soğuma sırasında tabakalar arasında bir gerilmeye yol açmaktadır (Rile, 1974). Bu gerilme mekanik etkiler altında çatlak oluşturarak tabakaların parçalanmasına dolayısıyla borür tabakalarının yapısal bütünlüğünün bozulmasına neden olmaktadır (Rile, 1974; Campos-Silva vd., 2017; Türkmen & Yalamaç, 2018). Bu nedenle son yıllarda çift fazlı tabaka yerine tek fazlı borür tabakasının oluşturulması ve bu tabakanın performansının geliştirilmesine yönelik çalışmalar yürütülmektedir (Cimenoglu vd., 2014; Türkmen & Yalamaç, 2022). Bu çalışmalar sonucunda uygun borlama karışımları, sıcaklığı ve süresi ile çeliklerin yüzeylerinde tek fazlı borür tabakasının oluşturulabildiği gözlenmiş, oda sıcaklığında yapılan aşınma deneylerinde ise bu tabakanın çift fazlı tabakaya göre daha yüksek aşınma direnci sergilediği belirlenmiştir (Cimenoglu vd., 2014; Türkmen & Yalamaç, 2022).

Yüksek sıcaklık altında ($T \leq 500$ °C) gerçekleştirilen aşınma deneylerinde ise hem tek hem de çift fazlı borür tabakalarının aşınma dirençlerinin azaldığı gözlenmiştir (Taktak, 2006; Cimenoglu vd., 2014; Motallebzadeh vd., 2015). Bu durum sıcaklık ve mekanik etkilerden dolayı ortaya çıkan termal gerilmelere ve oksit oluşumuna dayandırılarak açıklanmıştır (Taktak, 2006; Cimenoglu vd., 2014; Motallebzadeh vd., 2015). Borlama sonrası oluşan borür tabakalarının yüksek sıcaklık ve mekanik etkiler altında aşınma direncinin iyileştirilmesi için çeliklerin yüzeylerinde birden fazla kaplama tabakasının oluşturulması esasına dayanan birleşik yöntemler denenmeye başlanmıştır. Bu kapsamda borlama işleminden sonra; karbürleme, nitrürleme, vanadyumlama ve titanyumlama gibi işlemler uygulanmaya başlanmış ve bu işlemlerden sonra elde edilen çok katmanlı tabakaların çeliklerin yüzey sertliğini ve aşınma direncini artırdığı belirlenmiştir (Pertek & Kulka, 2003; Sen, 2005; Samadi & Habibolahzade, 2010; Gómez-Vargas vd., 2016; Günen vd., 2017; Kurt vd., 2020; Ruiz vd., 2020).

Bu işlemler arasında borlama ve sonrasında titanyumlama işlemi, uygulama kolaylığı ve düşük maliyet yönleriyle endüstriyel kapsamda dikkat çekmektedir. Nitekim Inconel 625 alaşımı üzerinde yapılan bir çalışmada, borlama sonrası yapılan titanyumlama işleminin kutu borlama işlemine benzer bir yöntemle uygulanabildiği, borür tabakasının üzerinde oluşturulan titanyum diborür (TiB_2) tabakası ile yüzeyinin ısı ve aşınma direncinin iyileştirildiği gözlenmiştir (Günen vd., 2017). Ancak yapılan literatür incelemelerinde (Samadi & Habibolahzade, 2010; Günen vd., 2018; Kurt vd., 2020) borlandıktan sonra titanyumlama işleminin farklı çeliklere uygulandığı sınırlı sayıda çalışmaya rastlanmıştır. Bu çalışmalar arasında ise söz konusu işlemin 32CrMoV12-10 ve 42CrMo4 çelikleri için ele alınmadığı, bu konuda sistematik ve parametrik bir çalışmanın ortaya konulmadığı ve yüksek sıcaklık aşınma performanslarının belirlenmediği görülmüştür.

Bu tez çalışmasında 32CrMoV12-10 ve 42CrMo4 çeliklerinin yüzeylerinde saf bor ve ferro-titanyum kaynakları ve farklı işlem parametreleri kullanarak borür ve titanyum tabakalarını içeren çok katmanlı kaplamaların oluşturulması ve bu kaplamaların söz konusu çeliklerin mekanik özellikleri ile aşınma dirençlerine etkisinin sistematik bir biçimde incelenmesi amaçlanmaktadır. Çok katmanlı kaplanmış söz konusu çeliklerin performansının borlanmış, titanyumlanmış ve ticari olarak nitrürlenmiş durumları ile karşılaştırılması ise çalışmanın bir diğer amacını oluşturmaktadır. Çalışmanın son amacını ise en uygun kaplama işleminin hafif silah namı numunelerinin iç yüzeylerine uygulanabilirliğinin incelenmesi, kaplama tabakalarının namı uzunluğu boyunca, yiv ve set

bölgelerindeki dağılımlarının değerlendirilmesi ve sertliklerinin belirlenmesi oluşturmaktadır.

1.2. Çeliklere Uygulanan Difüzyon Esaslı Yüzey İşlemleri

Çeliklerin mekanik ve ısı etkilere karşı dayanıklılığının artırılması, aşınma ve korozyon dirençlerinin iyileştirilmesi amacıyla yüzeylerine çeşitli sertleştirme işlemleri uygulanmaktadır (Davis, 2002). Bu işlemler çeliğin kimyasal bileşimini değiştirmeden yapılabildiği gibi, yüzeylerinin kimyasal bileşimlerini değiştirerek de uygulanabilmektedir. Kimyasal bileşimi değiştirmeden yapılan geleneksel alevle ve indüksiyonla yüzey sertleştirme işlemleri ile orta karbonlu çeliklerin yüzeylerinde belirli bir kalınlıkta martenzit fazı içeren bir bölge oluşturulmaktadır. Ancak alevle sertleştirme nispeten kontrolsüz bir işlem olup martenzit faz bölgesi kalınlığının ayarlanmasında sorunlara yol açmaktadır. Diğer taraftan söz konusu yöntemler düşük oranlarda karbon ve alaşım elementi içeren çeliklere uygulanamamakla birlikte özellikle ısı etkilerin ve korozyonun yoğun olduğu durumlarda yeterli korozyon ve aşınma direnci sağlayamamaktadır (Krauss, 1992). Bu nedenle çeliklerin yüzeylerinde farklı bileşimlere sahip çok ince tabakaların oluşturulmasına dayalı yöntemler araştırılmış ve bu kapsamda PVD ve CVD gibi kaplama yöntemleri geliştirilmiştir. Ancak bu yöntemlerin yüksek maliyetler gerektirmesinin yanı sıra büyük boyutlu parçalara uygulanmasında da bazı zorluklar yaşanmaktadır (Lukaszewicz, 2011; Baptista vd., 2018). Bu nedenle özellikle çeliklerin yüzey bölgelerinin kimyasal bileşiminin değiştirilmesine dayalı, uygulaması basit ve ekonomik olan karbürleme, nitrürleme ve borlama gibi yöntemler ortaya konulmuştur (Fichtl, 1981; Larisch vd., 1999; Edenhofer vd., 2015). Bunlar arasında en yaygını karbürleme ve nitrürleme işlemleridir. Bu işlemler ise daha çok alaşımsız ve az alaşımlı çeliklere uygulanmaktadır. Ancak endüstriyel uygulamalarda alaşımsız, az alaşımlı ve yüksek alaşımlı olmak üzere pek çok çelik türü kullanılmaktadır. Dolayısıyla söz konusu yöntemler bu kapsamda yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle borlama işlemi farklı kimyasal bileşimlere sahip çeliklere kolay uygulanabilirliği açısından ön plana çıkmaya başlamıştır (Fichtl, 1981; Larisch vd., 1999; Edenhofer vd., 2015).

Bor kaplama termokimyasal bir işlem olup borun sıcaklık ve zamanın bir fonksiyonu olarak çelik yüzeylerine difüzyonu esasına dayanmaktadır. Bu işlem; katı borlama, sıvı borlama, gaz borlama ve plazma borlama şeklinde uygulanmaktadır (Fichtl, 1981; Zimmerman, 2013). Endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanılan katı ortamda borlama;

kutu borlama, akışkan yatakta borlama, pasta borlama ve çok bileşenli borlama yöntemleri ile yapılmaktadır. Bunlar arasında kutu borlama, işlem kolaylığı, bor kaynağının kolaylıkla değiştirilebilmesi, basit altyapı gerekliliği ve ucuz olması nedenlerinden dolayı geniş bir uygulama alanına sahiptir. Bu yöntemde borlanacak malzeme içerisinde bor verici ortam bulunan bir kutuya yerleştirilir. Kapağı hava girişini engelleyecek şekilde kapatılan kutu soy gaz veya atmosfer ortamına sahip bir fırına yerleştirilir. Bu fırında genellikle 840 °C ile 1050 °C arasındaki sıcaklıklarda 1 ile 8 saat aralığında bekletilen kutu ya fırında ya da dışarı çıkarılarak soğutulur (Fichtl, 1981; Zimmerman, 2013).

Kutu borlamada bor verici ortam olarak çeşitli tozların karışımı kullanılmaktadır. Bu karışımlar katı bor kaynağı, aktivatör ve inhibitör (tozların sinterlenmesini ve topaklanmasını engelleyici, oksijen tutucu) içeren kimyasal bileşenlerden oluşmaktadır (Fichtl, 1981; Campos-Silva & Rodríguez-Castro, 2015). Kutu borlamada en yaygın kullanılan bor verici ortamlar; bor karbür (B_4C), ferro-bor (Fe-B), borik asit (H_3BO_3) ve amorf (saf) bor gibi bor kaynaklarının, sodyum tetrafloroborat ($NaBF_4$) ve potasyum tetrafloroborat (KBF_4) gibi aktivatörlerin, silisyum karbür (SiC) ve alüminyum oksit (Al_2O_3) gibi inhibitörlerin belirli oranlardaki karışımlarından oluşmaktadır (Fichtl, 1981; Campos-Silva & Rodríguez-Castro, 2015). Bu bileşenlerin belirli oranlarda kullanılması ile gerçekleştirilen borlama deneyleri sonucunda Ekabor, Boropak ve Durborid gibi borlama karışımları geliştirilmiş, patentlenmiş ve ticarileştirilmiştir. Bugüne kadar çelikler üzerinde yapılan borlama çalışmalarında en yaygın kullanılan borlama karışımları ile bu karışımları oluşturan bileşenlerin yüzde oranları Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1’de sunulan borlama karışımlarının dışında kutu borlama işlemlerinde bor verici ortam olarak boraks ($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$), disodyum oktaborat ($Na_2B_8O_{13}$), aktivatör olarak ferro-silisyum (Fe-Si), sodyum klorür (NaCl), susuz boraks, inhibitör olarak sodyum karbonat (Na_2CO_3), sodyum hidroksit (NaOH) ve aktif karbon gibi bileşikler de kullanılmaktadır. Bu karışımlar kullanılarak yapılan deneyler sonucunda çelik ve titanyum gibi metallerin yüzeylerinde borür tabakaları başarılı bir biçimde oluşturulabilmiştir (Kara & Purcek, 2020; Kul vd., 2020; Türkmen & Yalamaç, 2022).

Tablo 1. Kutu borlama işleminde en yaygın kullanılan bor verici ortam bileşenleri ve bunların yüzde oranları

Bor verici ortama ait bileşenlerin yüzde ağırlık cinsinden oranları			
Bor kaynağı	Aktivatör	İnhibitör	Kaynaklar
%5, %10, %20 ve %50 B ₄ C	%5 ve %10 KBF ₄	%45 ve %70 - 90 SiC	(Chen & Wang, 1999; Martini vd., 2004; Spence & Makhlouf, 2005; Taktak, 2006; Samadi & Habibolahzade, 2010; Hernández-Sánchez vd., 2014; Campos-Silva vd., 2017; Kul vd., 2020)
%95 ve %25 B ₄ C	%5 ve %75 KBF ₄	-	(Spence & Makhlouf, 2005)
%90 ve %95 B ₄ C	%5 ve %10 NaBF ₄	-	(Günen vd., 2020; Karakaş, 2020; Çetin vd., 2021)
%22,5 H ₃ BO ₃	%5 KBF ₄ ve %5 NaBF ₄	%72,5 SiC	(Türkmen & Yalamaç, 2018; Türkmen & Yalamaç, 2022)
%92,5 - 99 Saf Bor	%1 - 7,5 KBF ₄	-	(Brandstötter & Lengauer, 1997; Dybkov, 2007)

Katı ortamda borlamanın bir diğer türü olan akışkan yatakta borlamada, akışkan ortam özel bir borlama tozunun soy bir gaz ile akıcı hale getirilmesiyle oluşturulmaktadır. Bu yöntem karmaşık şekilli parçaların seri bir biçimde borlanmasına imkan vererek, zaman ve enerjiden tasarruf sağlamaktadır. Ancak bu yöntem pek çok ekipmandan oluşan karmaşık bir sistem gerektirmektedir (Zimmerman, 2013). Pasta borlama yöntemi ise daha çok parçaların bir bölümünün kısmen borlanması için kullanılmaktadır. Bu yöntemde kullanılan pasta %45 B₄C ve %55 kriyolit (Na₃AlF₆) karışımından veya geleneksel borlama karışımının (B₄C + SiC + KBF₄) bir bağlayıcı ajan ile karıştırılması yolu ile hazırlanmaktadır (Zimmerman, 2013). Hazırlanan pasta 1 mm ile 2 mm arasında değişen kalınlıklarda çeliklerin yüzeylerine tatbik edilerek (genellikle püskürtme yoluyla) kurutulmaktadır. Daha sonra söz konusu çelikler koruyucu atmosfer içeren (Ar, NH₃ veya N₂) fırınlara yerleştirilerek 800 °C ile 1000 °C aralığındaki sıcaklıklarda 5 saat borlama işlemine tabi tutulmaktadır (Fichtl, 1981; Campos-Silva & Rodríguez-Castro, 2015).

Son yıllarda ise çok katmanlı borlama işlemleri konusunda çalışmalar yapıldığı dikkat çekmektedir. Bu işlemler bor atomunun yanı sıra alüminyum, krom, silisyum, vanadyum ve titanyum gibi elementlere ait atomların çelik yüzeyine birbiri ardına difüzyonu esasına dayanmaktadır. Çok katmanlı borlama işlemi genellikle 850 °C ile 1050 °C aralığındaki sıcaklıklarda farklı sürelerde gerçekleştirilmektedir. Bugüne kadar yapılan çalışmalar söz konusu işlemin bor-alüminyumlama, bor-kromlama, bor-titanyumlama, bor-nitrüleme, bor-karbürleme ve bor-vanadyumlama şeklinde çelik yüzeylerine uygulanabildiğini ve bor kaplanmış çeliklerin korozyon ve aşınma dirençlerinin iyileştirilebildiğini göstermektedir (Maragoudakis vd., 2002; Pertek & Kulka, 2003; Sen, 2005; Sen & Sen, 2009; Günen vd., 2017; Günen vd., 2018; Kurt vd., 2020; Mertgenç vd., 2021). Diğer taraftan çok katmanlı bor kaplamaların kutu borlama yöntemine benzer bir şekilde basit ve ekonomik bir biçimde uygulanabilme potansiyeline sahip oldukları belirlenmiştir. Bu nedenle söz konusu yöntemlerin ticari pek çok yönetime alternatif olabileceği önerilmiş, bunlar arasında bor ve ardından ferro-titanyum (Fe-Ti), alüminyum oksit (Al_2O_3) ve amonyum klorür (NH_4Cl) karışımında belirli sıcaklık ve sürede uygulanan titanyumlama işleminin çelik yüzeylerinde kararlı ve homojen dağılımlı, yük taşıma kabiliyeti yüksek, aşınmaya ve korozyona karşı dirençli tabakaların oluşumuna yol açabileceği vurgulanmıştır (Günen vd., 2017; Günen vd., 2018; Günen vd., 2018; Karakaş, 2020; Kurt vd., 2020).

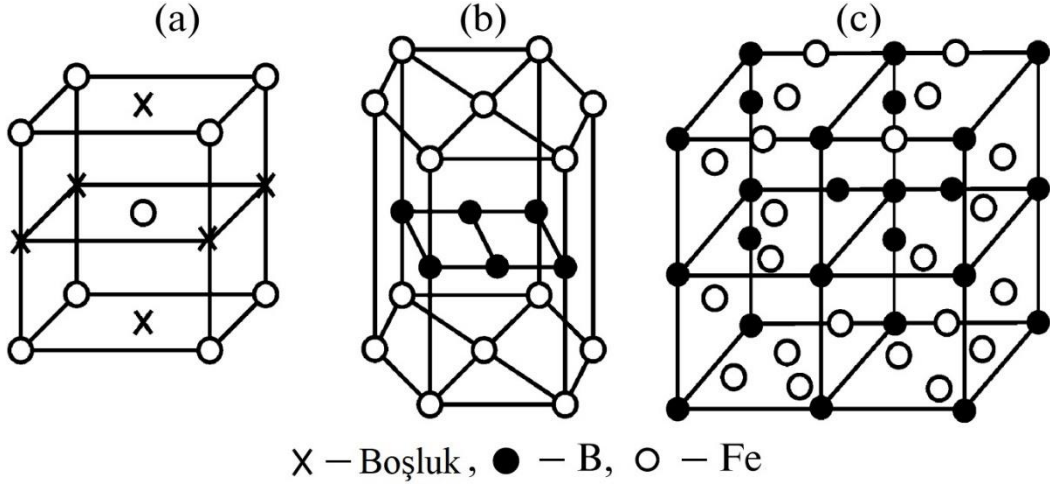
1.3. Çelik Yüzeylerinde Bor ve Titanyum Esaslı Tabakaların Oluşumu

Borlama işleminde bor atomları çelik yüzeyine difüzyon yoluyla yayınıp demirle reaksiyona girmekte ve çeşitli demir borür tabakaları oluşturmaktadır. Kutu borlamada bor atomları bor verici bir ortamda farklı sıcaklık ve sürelerde birtakım reaksiyonlar sonucunda açığa çıkmaktadır. Bu reaksiyonlar kapsamında ilk önce aktivatör olarak kullanılan KBF_4 , $KBF_4 (k) \rightarrow BF_3(g) + KF(k)$ reaksiyonu ile kısmen ayrışıp BF_3 gazına ve KF katısına dönüşmektedir. BF_3 gazı ise bor kaynağı ile $BF_3 + B(k) \rightarrow B_{(aktif)} +$ (diğer ürünler/bileşikler) şeklinde tepkimeye girerek aktif borun oluşumunu gerçekleştirmektedir. Aktif bor çeliklerin yüzeylerine yayınarak Fe ile reaksiyona girmektedir. Bu reaksiyon $2Fe(k) + B_{(aktif)} \rightarrow Fe_2B(k)$ şeklinde olup çeliğin yüzeyinde Fe_2B fazına sahip bir tabaka oluşumuna yol açmaktadır. Bu tabaka çelik yüzeyi ile borlama karışımı arasında bir engel yaratmakta ve BF_3 gazının yüzey ile doğrudan tepkimeye girmesini önlemektedir. Ancak ortamda bulunan aktif borun

konsantrasyonu arttıkça Fe_2B tabakası bor ile $\text{Fe}_2\text{B}_{(k)} + \text{B}_{(\text{aktif})} \rightarrow 2\text{FeB}_{(k)}$ şeklinde bir tepkimeye girmekte ve söz konusu tabakanın üzerinde FeB fazına sahip yeni bir tabaka oluşturmaktadır (Spence & Makhlouf, 2005).

Yukarıda belirtilen reaksiyonlarda $\text{B}_{(k)}$, bor kaynağını, diğer ürün ve bileşikler ise inhibitör ve bunların oksijen ile reaksiyonu sonucu oluşabilecek ürünleri göstermektedir. Şöyle ki bor kaynağı olarak B_4C kullanılması durumunda $2\text{Fe} + \text{BF}_{3(g)} + \text{B}_4\text{C}_{(k)} \rightarrow \text{Fe}_2\text{B} + \text{CF}_{4(k)} + \text{C}$ reaksiyon sunucunda Fe_2B fazının oluşumunun yanı sıra CF_4 ve C, bor karışımında SiC inhibitörü kullanılması durumunda ise SiF_4 , SiO_2 , CO ve Si gibi yan ürünler açığa çıkmaktadır (Spence & Makhlouf, 2005).

Borlama işlemi sonrasında çelik yüzeylerinde oluşan demir borürlerin (Fe_2B ve FeB) kristal yapıları Şekil 1’de gösterilmektedir. Bu yapılara bakıldığında her iki bileşiğinde arayer bileşikler oldukları, Fe_2B ’nin hacim merkezli tetragonal, FeB’nin ise ortorombik bir kristal yapıya sahip oldukları görülmektedir. Bu yapıların oluşumunda karbon atomlarının hareketleri etkin rol oynamaktadır. Şöyle ki, borürlerde karbonun çözünürlüğü oldukça düşük olup kristal yapı içerisinde karbon atomunun yer alması ancak fazlalık boşlukların varlığı ile mümkündür. Bu nedenle Fe_2B borürüne ait kristal yapı oluşurken Fe atomları küçük yer değiştirme, karbon atomları ise kısmi ötelenme hareketleri yapmaktadır. Bu durum tetragonal örgü içerisinde bor atomlarının, $\alpha\text{-Fe}$ ’ne ait demir düzlemleri arasında dikdörtgen bir ağ şeklinde yer almasına yol açmaktadır. FeB borürüne ait kristal yapısında ise her bir bor atomu, tepe noktalarında demir atomlarının yer aldığı trigonal bir prizmanın merkezinde bulunmaktadır. Bor atomlarının kristal yapı içerisindeki konumlarına bakıldığında bunların Fe_2B yapısında izole halde olduğu, FeB yapısında ise kendi aralarında B-B kovalent bağlı zincirler veya ağlar oluşturdukları dikkat çekmektedir. Bu durum FeB’nin kristal yapısında metalik karakterli Fe-Fe bağlarının kuvvetlenmesine dolayısıyla FeB’nin Fe_2B ’den daha yüksek sertliğe sahip olmasına neden olmaktadır. Özetle Fe_2B ve FeB fazlarına ait tabakalar arasındaki özellik farklılıkları bunların kristal yapısında bulunan bor düzlemlerinin ve yer değiştirme yönlerinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır (Pomel’nikova vd., 2011).



Şekil 1. a) α -Fe, b) Fe_2B ve c) FeB fazlarına ait kristal yapıların şematik gösterimi (Pomel'nikova vd., 2011)

Demir-bor faz diyagramına bakıldığında Fe_2B ve FeB fazları içerisinde bor çözünürlüğünün sırasıyla yaklaşık %9 ve %16 oranlarında olduğu görülmektedir (Fichtl, 1981; Spence & Makhlof, 2005). Bu nedenle borür tabakalarının türü ve kalınlığı; çeliğin kimyasal yapısına, bor verici ortamın kimyasal bileşimine, borlama sıcaklığına ve süresine bağlıdır (Campos-Silva & Rodríguez-Castro, 2015). Şöyle ki; az ve orta karbonlu çeliklerde borür tabakası genellikle testere ağzı biçiminde bir görünüm sergilerken, yüksek karbonlu çeliklerde bu görünüm nispeten ortadan kalkmaktadır. Diğer taraftan karbon oranı arttıkça demir borür tabakalarının sertlikleri artmakta, %0,4 karbon oranından sonra hemen hemen sabit kalmaktadır (Campos-Silva & Rodríguez-Castro, 2015). Karbonun dışındaki alaşım elementleri ise borun yayınma hızını düşürerek tabaka kalınlığının artmasını engellemektedir. Ancak söz konusu elementlerden bazıları (Cr, Ni, Mn, V, Mo gibi) borür tabakası içerisinde nispeten çözünebilmekte, bazıları (C, Si, Al, Cu gibi) ise hiç çözünmemektedir. Borür tabakası içerisinde çözünebilen alaşım elementleri kendi kararlı borür bileşiklerini oluştururken, çözünmeyenler ana matrise doğru itilmektedir. Bu durum çelik ile Fe_2B tabakası arasında bir difüzyon bölgesinin oluşumuna yol açmaktadır (Joshi & Hosmani, 2014; Campos-Silva & Rodríguez-Castro, 2015). Diğer taraftan bor verici ortamın kimyasal bileşiminde SiC bileşiğinin bulunması durumunda bu bileşik B_4C 'ün seyrelemesine, dolayısıyla ortamın bor atomu konsantrasyonunun düşmesine neden olmaktadır. Bu durum ise çeliklerin yüzeylerinde çift fazlı borür tabakaları yerine tek fazlı borür tabakasının oluşumunu kolaylaştırmaktadır (Spence & Makhlof, 2005). Borlama sıcaklığı ve süresinin artması durumunda ise tabaka kalınlıkları artmakta ve tabakaların ayırım yüzeylerinde

çatlaklar oluşmaktadır (Rile, 1974; Spence & Makhlouf, 2005; Campos-Silva vd., 2010).

Titanyumlama işlemlerinde oluşan tabakaların türü bu işlemin çelik yüzeyine doğrudan veya bor kaplanmış durumda uygulanmasına bağlıdır (Vallauri vd., 2008; Günen vd., 2017; Günen vd., 2018). Titanyumlamanın çelik yüzeyine doğrudan uygulanması durumunda bu çeliklerin yüzeyinde birtakım reaksiyonlar sonucunda TiC fazına sahip bir tabaka oluşmaktadır. Bu reaksiyonlara bakıldığında ilk önce titanyumlama karışımının bileşiminde katı halde yer alan NH_4Cl aktivatörü, $\text{NH}_4\text{Cl}_{(k)} \rightleftharpoons \text{NH}_{3(g)} + \text{HCl}_{(g)}$ reaksiyonu ile NH_3 ve HCl gazlarına, NH_3 gazı ise $2\text{NH}_{3(g)} \rightleftharpoons \text{N}_{2(g)} + 3\text{H}_{2(g)}$ reaksiyonu ile N_2 ve H_2 gazlarına ayrılmaktadır. Bunlardan HCl gazı ile Ti arasında $\text{Ti}_{(k)} + 4\text{HCl}_{(g)} \rightarrow \text{TiCl}_{4(g)} + 2\text{H}_{2(g)}$ şeklinde bir tepkime meydana gelmektedir. Her iki reaksiyon sonucunda TiCl_4 ve H_2 gazları açığa çıkmaktadır. Bu aşamadan sonra iki olasılık söz konusu olmaktadır. Bunların birincisinde TiCl_4 gazı hidrojen gazı ve çeliğin karbonu ile $\text{TiCl}_{4(g)} + 2\text{H}_{2(g)} + \text{C}_{(\text{çelik})} \rightarrow \text{TiC}_{(k)} + 4\text{HCl}_{(g)}$ şeklinde bir reaksiyon oluşturmakta ve TiC katısını ve HCl gazını meydana getirmektedir. İkinci olasılıkta ise TiCl_4 gazının çeliğin karbonu ve demiri ile girdiği $\text{TiCl}_{4(g)} + \text{C}_{(\text{çelik yüzeyi})} + 2\text{Fe}_{(k)} \rightarrow \text{TiC}_{(k)} + 2\text{FeCl}_{2(g/k)}$ reaksiyonu sonucunda TiC fazını ve gaz veya katı halde FeCl_2 bileşiğini oluşturmaktadır. Ortamda oksijen bulunması durumunda ise $\text{TiCl}_{4(g)} + 2\text{H}_2\text{O}_{(g)} \rightarrow \text{TiO}_{2(k)} + 4\text{HCl}_{(g)}$ reaksiyonu meydana gelmekte, bu durum TiC'nin yanı sıra TiO_2 bileşiğinin oluşmasına da yol açmaktadır. Titanyumlama işleminin borlanmış çelik yüzeylerine uygulanması durumunda ise yukarıda belirtilen ilk üç reaksiyondan sonra oluşan TiCl_4 gazı $\text{FeB/Fe}_2\text{B}$ tabakaları ile $\text{TiCl}_{4(g)} + 2\text{FeB}_{(k)} \rightarrow \text{TiB}_{2(k)} + 2\text{FeCl}_{2(g/k)}$ veya $2\text{TiCl}_{4(g)} + 2\text{Fe}_2\text{B}_{(k)} \rightarrow 2\text{TiB}_{2(k)} + 4\text{FeCl}_{2(g/k)}$ reaksiyonlarını gerçekleştirmekte ve bunların sonucunda TiB_2 tabakasını oluşturmaktadır. Belirtilen bu reaksiyonlarda çelik yüzeyinin dekarbürizasyonu, titanyumun ortamda oluşabilecek azot (N) ile reaksiyonu göz ardı edilmiş, Al_2O_3 tozunun ise soy (kimyasal tepki vermeyen) bir davranış sergilediği kabul edilmiştir (Chen & Wang, 1999; Sen, 2005).

Titanyum karbür kaya tuzu gibi iyonik bağlı bileşiklerdekine benzer yüzey merkezli kristal yapının bir formuna sahip olup, iyonik, kovalent ve metalik bağların karışımından oluşan bir bağ yapısına sahiptir. TiB_2 ise kovalent ve metalik bağların etkin olduğu hekzagonal kristal yapı sergilemektedir. Ancak TiC bileşiğinde yer alan kovalent bağların TiB_2 bileşiğinde yer alandan daha baskın olduğu bilinmektedir (Ogwu & Davies, 1996; Vallauri vd., 2008).

1.4. Bor ve Titanyum Kaplamaların Namlu Çeliklerinin Mekanik ve Tribolojik Özelliklerine Etkisi

Savunma sanayinde namlu çeliği olarak daha çok 42CrMo4 ve 32CrMoV12-10 çeliklerinin kullanıldığı bilinmektedir (Koçyiğit vd., 2020; Prochazka vd., 2020). Bu çeliklerin yüzeylerinde uygun borlama karışımlarında, sıcaklık ve sürelerinde gerek çift fazlı gerekse tek fazlı borür tabakalarının oluşturulabildiği belirlenmiştir (Dybkov, 2007; Cimenoglu vd., 2014; Joshi & Hosmani, 2014; Motallebzadeh vd., 2015; Türkmen & Yalamaç, 2018; Türkmen & Yalamaç, 2022). Söz konusu çelikler üzerinde yapılan çalışmalar Tablo 2’de özetlenmiştir. 42CrMo4 çeliği üzerine yapılan bir çalışmada (Ulutan vd., 2010) söz konusu çelik Ekabor-2 ticari borlama karışımında, 900 °C ile 1050 °C aralığındaki sıcaklarda 2, 4 ve 6 saat borlanmış, ardından farklı yük ve çevrimlerde aşınma deneylerine tabi tutulmuştur. Çalışmanın sonucunda borür tabakalarının kalınlıklarının artan süre ve sıcaklıkla arttığı ancak sertliklerinin değişmediği belirlenmiştir. Diğer taraftan borlama işleminin çeliğin aşınma direncini en az dört kat arttırdığı gözlenmiş, ancak belirli bir borür tabakası kalınlığından sonra borlanmış çeliklerin bu direncinde bir azalmanın meydana geldiği tespit edilmiştir. Bor kaplanmış çeliğin aşınmasında abrazyon ve oksidasyonun etkin olduğu görülmüştür.

Farklı hacimde üretilmiş borlama kutularında, sabit sıcaklık (950 °C) ve değişken sürelerde (2 ve 3 saat) Boropak ticari borlama karışımında borlanan 42CrMo4 çeliğinin yüzeyinde hem tek hem de çift fazlı borür tabakaları oluşturulmuştur (Joshi & Hosmani, 2014). Tek fazlı borür (Fe₂B) tabakasına sahip 42CrMo4 çeliğinin, normalize edilmiş ve sertleştirilmiş durumlarına göre üstün bir aşınma direnci sergilediği belirlenmiş ve bu durum tabakanın yüksek sertliğine dayandırılmıştır. 42CrMo4 çeliğinin yüzeyinde tek fazlı borür tabakası Ekabor ticari borlama karışımı ile 900 °C sıcaklıkta 2 saat borlanması sonucunda da oluşturulabilmiştir. Bu tabakanın sertliği yaklaşık olarak 1835 HV ölçülmüş ve borlama işleminin çeliğin sürtünme katsayısını olumsuz etkilediği ancak aşınma direncini arttırdığı belirlenmiştir (da Costa Aichholz vd., 2018).

Ekabor kullanılan başka bir çalışmada (Cimenoglu vd., 2014) 42CrMo4 çeliği 750 °C, 800 °C, 850 °C ve 900 °C sıcaklıklarda 12 saat borlanmış ve bunların 300 °C ile 500 °C sıcaklıklardaki tribolojik davranışı oda sıcaklığındaki durumu ile karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda yapılan çalışmalarda 750 °C ve 800 °C sıcaklıklarda söz konusu çeliğin yüzeyinde sırasıyla 22 µm ve 35 µm kalınlıklarında tek fazlı (Fe₂B) borür tabakası, 850 °C ve 900 °C sıcaklıklarda ise çift fazlı borür tabakaları oluşturulmuştur. Diğer taraftan bu çeliğin çift fazlı

borür tabakasına sahip durumlarının tek fazlı borür tabakası içeren durumlarına göre yük taşıma kabiliyetlerinin daha üstün olduğu, buna rağmen oda sıcaklığındaki aşınma deneyleri sonucunda birbirlerine yakın aşınma dirençleri sergiledikleri belirlenmiştir. Ancak sıcaklık arttırıldığında, her iki borür tabakasının da aşınma direncinin azaldığı, çift fazlı borür tabakalarına sahip çeliğin aşınma direncinin tek fazlı durumuna göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu durum yüksek sıcaklık altında gerçekleştirilen aşınma deneylerinde oluşan termal gerilmelerin varlığı ile açıklanmıştır. Şöyle ki, yüksek sıcaklık altında yapılan aşınma deneylerinde tek fazlı borür tabakasında çatlamların ve soyulmaların meydana geldiği, çift fazlı tabakalarda ise sadece çatlakların oluştuğu ve yüzeylerinde düzgün bir aşınma izinin yer aldığı görülmüştür. Oda sıcaklığında yapılan aşınma deneylerinde ince taşlama şeklinde gözlenen abrazif aşınmanın yüksek sıcaklıklardaki durumlarda oksidatif aşınmaya dönüştüğü, oluşan oksit tabakalarının parçalanarak abrazif etki yarattığı ve aşınma direncini düşürdüğü vurgulanmıştır (Cimenoglu vd., 2014).

Yapılan diğer bir çalışmada ise (Morón vd., 2020) çift fazlı borür tabakalarının ısıtım işlemi uygulanarak tek fazlı borür tabakasına dönüştürüldüğü gösterilmiştir. Bu çalışmada 900 °C sıcaklıkta ağırlıkça %5 B₄C, %5 KBF₄ ve %90 SiC karışımında 1 saat borlanan 42CrMo4 çeliğinin yüzeyinde oluşan çift fazlı borür tabakasının, söz konusu çeliğin 845 °C sıcaklıkta 5 dakika tavlama sonrasında ardından yağda soğutulup 200 °C sıcaklıkta 2 saat temperlenmesi sonrasında tek fazlı borür tabakasına dönüştüğü belirlenmiştir. Bu dönüşüm borun ısıtım işlemi sırasında yüzeyde bulunan FeB tabakasından ayrılması ile gerçekleşen deborlama mekanizmasına dayandırılmıştır.

32CrMoV12-10 çeliğinin borlanmasına ilişkin gerçekleştirilen sınırlı sayıda çalışmalarda (Çep vd., 2021; Hajek & Coufal, 2021) borlama işleminin ardından aşınma direncinin arttığı belirlenmiştir. Bu çalışmaların birinde (Hajek & Coufal, 2021) borlanmış 32CrMoV12-10 çeliğinin, sert krom kaplanmış ve nitrürlenmiş durumlarına göre aşınma performansı karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada 32CrMoV12-10 çeliği Durborid ticari borlama karışımında 900 °C sıcaklıkta 12 saat argon atmosferi altında borlanmış yüzeyinde 75 µm kalınlığında tek fazlı Fe₂B tabakası oluşturulmuştur. Bu tabakaya sahip çeliğinin belirtilen işlemleri görmüş durumlarından daha yüksek aşınma direnci sergilediği tespit edilmiştir. Vickers sertlik izi üzerinden ölçülen kırılma tokluğu sonuçlarında ise tek fazlı borür tabakasının kırılma tokluğunun nitrürlenmiş ve sert krom kaplanmış durumlarından daha düşük olduğu belirlenmiş ve gevrek bir davranış sergileyerek kırıldığı gözlenmiştir.

Borlanmış, krom kaplanmış, nitrokarbürleşmiş-oksitlenmiş ve nitrürlenmiş-oksitlenmiş 32CrMoV12-10 çeliğinin aşınma performanslarının karşılaştırıldığı diğer bir çalışmada (Çep vd., 2021), en yüksek yüzey sertliğinin çift fazlı borlanmış numunede ölçülmesine rağmen en yüksek aşınma direncinin nitrokarbürleşmiş-oksitlenmiş ve nitrürlenmiş-oksitlenmiş durumlarından elde edildiği görülmüştür. Bu durum oksidasyon işlemi sonucunda yüzeylerinde oluşan oksit tabakalarının bu yüzeylerin yük taşıma kabiliyetini arttırmasına dayandırılmıştır.

Tablo 2. 42CrMo4 ve 32CrMoV12-10 çeliklerinin kutu borlama yoluyla borlanmasına ilişkin bazı çalışmalar

Çelik	Borlama karışımı (% ağırlık)	Borlama işlem parametreleri (sıcaklık - süre)	Borür tabakasını oluşturan fazlar	Tabaka kalınlıkları (μm)	Kaynaklar
42CrMo4	Boropak	950 °C - 2 ve 3 saat	FeB + Fe ₂ B	30 - FeB 67-92 - Borür tabakası	(Joshi & Hosmani, 2014)
	Ekabor	900 °C - 0,5 - 3 saat	900 °C - 0,75 saat - Fe ₂ B Diğer koşullar - FeB + Fe ₂ B	Fe ₂ B - 42 FeB (48) + Fe ₂ B - 115	(da Costa Aichholz vd., 2018)

Tablo 2'nin devamı

42CrMo4	%5 B ₄ C + %5 KBF ₄ + %90 SiC	900 °C – 1 saat 5 dakika 845 °C + yağda su verme + 200 °C – 2 saat ısıtıl işlem*	FeB + Fe ₂ B *Fe ₂ B	25 *23	(Morón vd., 2020)
	%20 B ₄ C + %10 KBF ₄ + %70 SiC	900 °C - 0,5 saat	Fe ₂ B	23	(Márquez-Cortés vd., 2022)
	Ekabor	900, 950, 1000, 1050 °C - 2, 4, 6 saat	FeB + Fe ₂ B	57 - 290	(Ulutan vd., 2010)
	Ekabor	750, 800, 850, 900 °C - 12 saat	750 ve 800 °C - Fe ₂ B 850 ve 900 °C - FeB + Fe ₂ B	Fe ₂ B - 22-118 FeB - 32-52	(Cimenoglu vd., 2014)
32CrMoV12-10	-	850 °C - 6 saat	FeB + Fe ₂ B	4	(Çep vd., 2021)
	Durborid	900 °C - 12 saat	Fe ₂ B	75	(Hajek & Coufal, 2021)

Çeliklerin sadece titanyum ve borlandıktan sonra titanyum kaplanmasına ilişkin literatürde sınırlı sayıda çalışmaya rastlanmıştır. Bunlardan birinde (Güven vd., 2018) SKTM-13 çeliği ilk olarak Ekabor karışımı içerisinde 1000 °C sıcaklıkta 5 saat borlama ardından %45 Fe-Ti, %45 Al₂O₃ ve %10 NH₄Cl karışımı içerisinde 1000 °C sıcaklıkta 2 saat

titanyumlama işlemlerine tabi tutulmuştur. Bunlara ilave olarak söz konusu çeliğe aynı karışım ve sıcaklıkta 5 saat sadece titanyumlama işlemi uygulanmış ve elde edilen sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Borlama işleminin ardından SKTM-13 çeliğinin yüzeyinde Fe_2B ve FeB fazlarından oluşan toplam kalınlığı 244 μm olan borür tabakaları oluşmuştur. Borlanmış çeliğin titanyumlama işleminden sonra ise yüzeyinde bulunan FeB tabakasının kalınlığının azaldığı ancak yüzeyinde Fe_2B , FeB ve TiB_2 fazlarından oluşan ve toplam kalınlığı 261 μm olan çok katmanlı tabakaların yer aldığı görülmüştür. Sadece titanyum kaplanan çeliğin yüzeyinde ise 3,6 μm kalınlığında TiC fazını içeren bir tabaka meydana gelmiştir. Borür tabakalarının ortalama sertliği ile TiB_2 ve TiC tabakalarının sertlikleri sırasıyla 1417 HV, 2388 HV ve 2462 HV olarak ölçülmüştür. Oda, 250 °C ve 450 °C sıcaklıklarda yapılan aşınma deneyleri sonrasında ise en yüksek aşınma direnci borlandıktan sonra titanyumlanmış, en düşük aşınma direnci ise titanyumlanmış çelikten elde edilmiştir. Diğer taraftan artan sıcaklıkla birlikte borlanmış ve titanyumlanmış çeliklerde aşınma kaybı artarken, borlandıktan sonra titanyumlanmış durumunda ise bu değerin azaldığı gözlenmiştir. Söz konusu çeliğin aşınmasında oda sıcaklığında yorulma, yüksek sıcaklıklarda ise oksidasyonun etkili olduğu gözlenmiştir.

Diğer bir çalışmada ise (Karakaş, 2020) AISI D2 çeliği ağırlıkça %90 B_4C ve %10 NaBF_4 ve %45 Fe-Ti , %45 Al_2O_3 ve %10 NH_4Cl karışımlarında 1050 °C sıcaklıkta 3 saat sırasıyla borlama ve titanyumlama işlemine tabi tutulmuştur. Borlanmış çelik ise aynı karışım, sıcaklık ve sürede titanyumlanmıştır. Borlanan çelik yüzeyinde sırasıyla 55 μm ve 62 μm kalınlıklarında FeB ve Fe_2B tabakalarının oluştuğu belirlenmiş, titanyumlanmış ve borlandıktan sonra titanyumlanmış çeliğin yüzeylerinde ise sırasıyla 10 μm ve 8 μm kalınlıklarında TiC ve TiB_2 fazlarına ait tabakaların yer aldığı gözlenmiştir. Çift fazlı borür, TiC ve TiB_2 tabakalarının sertlikleri sırasıyla 1647 HV ile 2176 HV, 2447 HV ve 1720-2572 HV olarak ölçülmüştür. Rockwell-C adezyon testleri sonucunda borür ve TiC tabakalarının adezyon direncinin yüksek, TiB_2 tabakasının ise söz konusu özelliğinin düşük olduğu gözlenmiştir. TiB_2 tabakasının düşük adezyon özelliği titanyumlama işlemi sırasında söz konusu tabakanın oksitlenmesine dayandırılmıştır. Diğer taraftan borür ve TiC tabakalarına sahip çeliğin TiB_2 tabakasına sahip durumundan daha düşük aşınma kaybı sergilediği belirlenmiştir. Bu durumun TiB_2 tabakasının kalınlığının düşük olmasının yanı sıra zayıf bir adezyon dayanımı sergilemesinden kaynaklandığı ifade edilmiştir.

Yukarıda sunulan bilgilerden yola çıkarak titanyumlama, borlandıktan sonra titanyumlama işlemlerinin çelik türüne göre farklı aşınma davranışları ortaya koyduğu

sonucuna varılmıştır. Bu işlemlerin namı çeliği olarak bilinen 42CrMo4 ve 32CrMoV12-10 çeliklerin yüzey sertlikleri ve aşınma dirençleri üzerinde nasıl bir etki yaratacakları, oluşacak tabakaların adezyon ve çizilmeye karşı nasıl bir dayanım sergileyecekleri henüz araştırılmamıştır.

1.4. Literatür Özeti

Çeliklerin yüzeylerinde oluşan borür tabakalarının farklı ısı genleşme katsayılarına sahip oldukları ve bu durumun tabakalar arasında gerilmelerin oluşmasına yol açtığı bilinmektedir. Tabaka kalınlıkları arttıkça söz konusu gerilmeler artmakta ve bunun sonucunda tabakalar arasında çatlaklar meydana gelmektedir. Bu çatlaklar mekanik etkiler altında çalışan borlanmış çeliklerin yüzeylerindeki borür tabakalarının yapısal bütünlüğünün bozulmasına neden olmaktadır. Bu nedenle çeliklerin yüzeylerinde tek fazlı borür tabakasının oluşturulması yoluna gidilmiş ve sistematik çalışmalar sonucunda bu durum gerçekleştirilmiştir. Nitekim tek fazlı borür tabakası içeren çeliklerin mekanik etkiler altında daha üstün aşınma direnci sergilediği görülmüştür. Ancak tek fazlı borür tabakasının oluşumu borlama parametrelerinin dışında çeliğin kimyasal bileşimine de bağlıdır. Bu durum borlama parametrelerinin her bir çelik için optimize edilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır. Diğer taraftan yüksek sıcaklık altında yapılan aşınma deneyleri sonucunda hem tek hem de çift fazlı borür tabakalarının aşınma dirençlerinin azaldığı gözlenmiştir. Bu durum sıcaklık ve mekanik etkilerden dolayı ortaya çıkan termal gerilmelere ve oksit oluşumuna dayandırılarak açıklanmıştır.

Çeliklerin yüksek sıcaklık altındaki performanslarının artırılması için bunların yüzeylerinde çok katmanlı borür tabakalarının oluşturulması esasına dayanan birleşik yöntemler denenmektedir. Bu yöntemler borlamadan sonra karbürleme, nitrürleme, vanadyumlama ve titanyumlama gibi işlemleri içermektedir. Nitekim yapılan araştırmalar sonucunda çok katmanlı tabakaların çeliklerin yüzey sertliklerini ve aşınma direncini artırdığı gözlenmiştir. Bu işlemler arasında borlama ve sonrasında uygulanan titanyumlama, uygulama kolaylığı ve düşük maliyeti ile endüstriyel uygulamalar açısından ön plana çıkmaktadır. Ancak literatürde ardışık borlama ve titanyumlama işlemlerinin birkaç çelik türü üzerinde denendiği sınırlı sayıda çalışmaya rastlanmıştır.

Günümüz savunma sanayinde özellikle namı imalatında yapıcı kararlı, yüksek aşınma ve korozyon direnci sergileyen çelikler kullanılmaktadır. Bu malzemeler arasında

sahip olduğu üstün özelliklerden dolayı 42CrMo4 ve 32CrMoV12-10 çelikleri ön plana çıkmaktadır. Bu çelikler daha çok B₄C esaslı borlama karışımları kullanılarak borlanmış ve aşınma dirençleri araştırılmıştır. Ancak borlama ve titanyumlamadan oluşan çok katmanlı kaplamaların söz konusu çeliklerin mekanik ve tribolojik özelliklerine etkisi bilinmemektedir. Bu nedenle bu çalışmada saf bor esaslı bir borlama karışımı kullanarak söz konusu çeliklerin borlanması, bu çeliklerin yüzey özelliklerinin ve aşınma dirençlerinin, titanyumlanmış, borlandıktan sonra titanyumlanmış ve ticari olarak nitrürlenmiş durumları ile karşılaştırılması amaçlanmaktadır. Bu amaç doğrultusunda saf bor oranının ve borlama parametrelerinin söz konusu çeliklerin yüzeylerinde oluşan borür tabakalarının türüne ve kalınlığına, sertliğine, adezyona, çizilmeye ve aşınmaya karşı dayanımına etkisinin sistematik olarak araştırılması, söz konusu çelikler için en uygun borlama koşullarının belirlenmesi, en uygun koşullarda borlanmış çeliklerin titanyum kaplanması, çok katmanlı kaplamaların mekanik ve aşınma özelliklerine etkisinin ortaya koyulması ve son olarak en uygun kaplama işleminin söz konusu çeliklerden üretilen namlu numunelerinin iç yüzeylerine uygulanabilirliğinin incelenmesi hedeflenmektedir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Tez kapsamında yapılan çalışmalar; kaplama işlemleri, yapısal ve mekanik karakterizasyon, sürtünme ve aşınma deneyleri ile geliştirilen kaplamaların hafif silah namlularının iç yüzeylerine uygulanması aşamalarından oluşmaktadır.

2.1. Kaplama İşlemleri

Bu çalışmada taban malzeme olarak ticari 32CrMoV12-10 ve 42CrMo4 (AISI 4140) çelikleri kullanıldı. Bu çelikler sıcak haddeleme, su verme, menevişleme ve gerilme giderme tavı işlemlerine tabi tutularak ticari kullanıma sunulmuştur. Söz konusu çeliklerin kimyasal bileşimleri Tablo 3'te verilmiştir. 25 mm çap değerine tornalanan çelikler 5 mm kalınlığına sahip olacak şekilde tel-erozyon ile dilimlendi. Numuneler önce kalın daha sonra ince zımparalar kullanılarak taşlandı ve borlama, titanyumlama ve borlandıktan sonra titanyumlama işlemlerine tabi tutuldu. Tüm kaplamalar için kutu borlama ve titanyumlama yöntemleri kullanıldı.

Tablo 3. Çeliklerin kimyasal bileşimleri

Çelik	Element (% ağırlık)							
	C	Cr	Mn	Mo	Ni	Si	V	Fe
32CrMoV12-10	0,29	3,01	0,60	0,96	0,127	0,33	0,33	Kalan
42CrMo4	0,43	1,19	0,75	0,18	0,012	0,22	0,028	Kalan

Kutu borlama ve titanyumlama işlemlerinin şematik gösterimi Şekil 2'de verilmiştir. Kaplama işlemi için kullanılan kutular AISI 420 serisi paslanmaz çelikten imal edildi. Borlama ve titanyumlama işlemlerinde kullanılan karışımların kimyasal bileşimleri ise Tablo 4 ve Tablo 5'te verilmiştir. Borlama karışımları saf bor (%95-97, tane boyutu $\leq 1 \mu\text{m}$) ve potasyum tetrafloroborat (KBF_4), titanyumlama karışımları ise ferro-titanyum (Fe-Ti: %70-73 Ti, %0,25 Si, %0,5 C, %4 Al ve %kalan Fe, tane boyutu $\leq 25 \mu\text{m}$), alüminyum oksit (Al_2O_3) ve amonyum klorür (NH_4Cl) tozları kullanılarak hazırlandı. Karışımların hazırlanmasında mekanik karıştırma yöntemi kullanıldı. İki eşit miktara bölünen karışımlardan biri kutunun dip kısmına döküldü ve üzerine numune yerleştirildi. Diğer kısmı

tarafından 900 °C sıcaklıkta 3 saat B1090 kodlu 42CrMo4 ve B5050 kodlu 32CrMoV12-10 çeliklerine ait numunelerin yüzeylerinde en uygun özellikleri veren çift fazlı borür tabakalarının oluştuğu belirlendi. Bu numuneler çeliğin sadece titanyumlama işlemlerinde en uygun sonuçları veren $\%(55 \text{ Fe-Ti} + 35 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 10 \text{ NH}_4\text{Cl})$ karışımında 1100 °C sıcaklıkta 3 saat titanyumlama işlemine tabi tutuldu. Bu kapsamda yapılan çalışmalarda titanyumlama işleminin tek ve çift fazlı borür tabakalarının yapısal bütünlüğüne etkisi ve bu yüzeylerdeki performansı değerlendirildi. Borlandıktan sonra tek ve çift fazlı borür tabakaları içeren numunelerin titanyumlanmış durumları sırasıyla “B - TF + Ti” ve “B - ÇF + Ti” şeklinde kodlandı. Bu kodlamalarda B, borlama işlemini, TF, tek fazlı borür tabakasını, ÇF, çift fazlı borür tabakasını ve Ti ise titanyumlama işlemini ifade etmektedir.

Yapılan kaplamaların performansı söz konusu çeliklerin ticari olarak nitrürlenmiş durumları ile karşılaştırıldı. Nitrürlenme, Trabzon Silah Sanayi A.Ş (TİSAŞ) firmasının üretim hattında yer alan ticari ismi Tufftride olarak bilinen ferritik nitrokarbürizasyon işlemi kullanılarak yapıldı. Bu işlem için numunelere 350 °C sıcaklıkta ön ısıtma uygulandı. Daha sonra bu numuneler alkali siyanat ve alkali karbonattan oluşan bir tuz banyosunda 580 °C sıcaklıkta 2 saat nitrokarbürizasyon işlemine tabi tutuldu ve durulanarak soğutuldu.

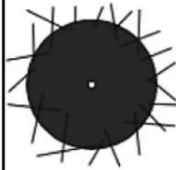
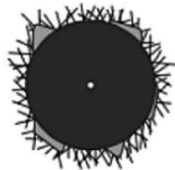
2.2. Yapısal Karakterizasyon İşlemleri

Kaplama işlemlerinin ardından numuneler ikiye bölünerek sıcak bakalite alındı. Bakalite alınan numuneler standart zımparalama ve parlatma işlemlerine tabi tutuldu ve %4'lük Nital çözeltisi (%4 nitrik asit ve %96 etil alkol) ile dağlandı. Oluşan tabakaların, difüzyon bölgelerinin ve taban malzemelerinin mikroyapısı optik mikroskop (OM) ve enerji dispersif spektrometresine (EDS) sahip bir taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelendi. Tabakaları oluşturan fazlar numunelerin yüzeylerinden yapılan X-ışını difraktometresi (XRD) analizleri ile tespit edildi. XRD analizleri 20° - 95° Bragg açıları arasında ve 1,25 °/dk tarama hızında, CuK α radyasyon kaynağı kullanılarak gerçekleştirildi. Tabakaların ortalama kalınlıkları bir görüntü analiz yazılımı yardımıyla numunelerin kesit SEM fotoğrafları üzerinden ölçüldü. Bu işlem için en az 15 adet ölçüm gerçekleştirildi ve ortalaması alındı.

2.3. Mekanik Karakterizasyon İşlemleri

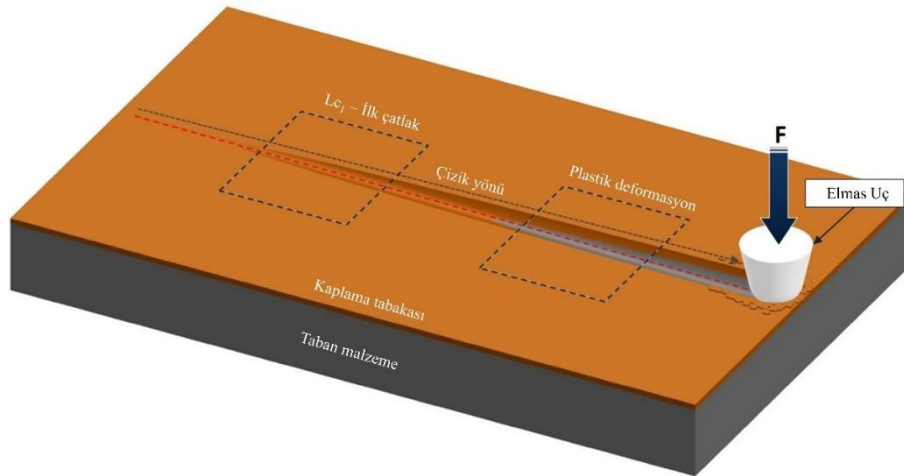
Numunelerin yüzeylerinde oluşan kaplamaların mekanik özellikleri mikrosertlik, Rockwell-C adezyon ve çizik testleri yardımıyla belirlendi. Mikrosertlik ölçümleri Vickers mikrosertlik yöntemi kullanarak 50 gr'lık yük altında yapıldı. Her bir ölçüm en az 10 kez tekrarlandı ve bu ölçümlerin ortalaması alındı. Kaplamaların sertliklerinin yüzeyden taban malzemeye kadar olan değişimleri her 15 μm 'lık derinlikte bir alınan ölçümlerle belirlendi. Taban malzemelerin kaplama işlemlerinden sonraki sertlikleri ise Brinell sertlik yöntemi ile ölçüldü. Bu ölçümlerde 62,5 kg'lık yük ve 2,5 mm çapında sertleştirilmiş çelik bilye kullanıldı.

Kaplamaların adezyon dayanımları ile kırılma mekanizmalarının belirlenmesi için Rockwell-C adezyon testi yapıldı. Bu testler VDI 3198 (Kaouka vd., 2013) standardına uygun olarak 150 kg'lık (1471 N) yük ve tepe açısı 120° olan elmas konik bir uç kullanılarak gerçekleştirildi. Kaplamaların yüzeylerinde oluşan Rockwell-C izleri SEM ile incelendi. Bu incelemelerden gözlemlenen hasarlar ilgili standartta verilen sınıflandırmalar ile ilişkilendirildi ve adezyon dayanım kaliteleri belirlendi. İlgili standartta HF1'den HF6'ya kadar sınıflandırılan hasar tiplerinin şematik gösterimleri ve kabul edilebilirlik durumları Şekil 3'te gösterilmiştir. Bu şekilde yer alan HF1 tabakada meydana gelen az sayıdaki çatlağı, HF2 çok sayıda çatlağı, HF3 çatlaklar ve az miktardaki delaminasyonu, HF4 çatlaklar ve kısmi delaminasyonu, HF5 az sayıda çatlak ve ileri seviye delaminasyonu ve HF6 tabakanın iz çevresinden tamamen delaminasyonunu göstermektedir.

Kabul Edilebilir Hata				Kabul Edilmeyen Hata	
HF1	HF2	HF3	HF4	HF5	HF6
					
HF 1	HF 2	HF 3	HF 4	HF 5	HF 6

Şekil 3. VDI 3198 standardına göre tabakada oluşabilecek hasar tiplerinin şematik gösterimleri ve sınıflandırılmaları (Kaouka vd., 2013)

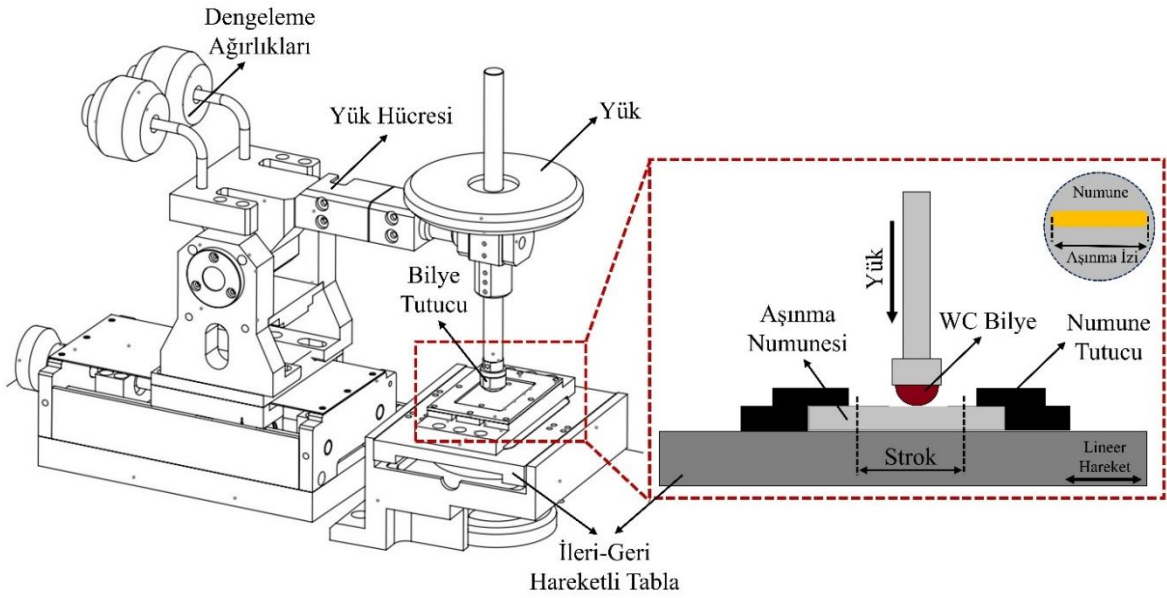
Kaplamaların yapışma performanslarının belirlenmesinde şematik gösterimi Şekil 4'te verilen ASTM C1624-5 standardına uygun olarak yapılan çizik testlerinden yararlanıldı. Bu testte tepe noktası yarı çapı 0,2 mm'lik küre olan bir elmas koni (Rockwell-C test ucu) uç kullanıldı. Bu uç, yükleme değeri 100 N'a ulaşana kadar 9 mm/dk kayma ve 90 N/dk yükleme hızında numune yüzeylerine uygulandı. Bu işlem sonucunda kaplamalarda ilk çatlağın oluştuğu kritik yük (L_{c1}) değerleri belirlendi. En az üç kez tekrarlanan bu testlerden sonra numune yüzeylerde oluşan hasarlar SEM ile incelendi. Hem Rockwell-C adezyon hem de çizik testlerinden önce numunelerin yüzeyleri zımparalanarak temizlendi.



Şekil 4. Çizik testinin şematik gösterimi (Sert, 2022)

2.4. Sürtünme ve Aşınma Deneyleri

Bir namlunun tribolojik performansını karakterize etmek için numuneler şematik gösterimi Şekil 5'te verilen bilye-disk esaslı ileri-geri hareketli bir düzenekte (ASTM G133) sürtünme ve aşınma deneylerine tabi tutuldu. Bu deneyler 10 N'luk yük altında, 10 mm'lik ileri-geri kayma mesafesinde (strok), $0,06 \text{ ms}^{-1}$ 'lik sabit kayma hızında ve 3 Hz'lik frekansta yapıldı. Diğer bir ifadeyle numuneler 25000 çevrime karşılık gelen 500 m'lik kayma mesafesinde belirtilen yük (10 N) ve hızda ($0,06 \text{ ms}^{-1}$) sürtünme ve aşınma deneylerine tabi tutuldu.



Şekil 5. Bilye-disk esaslı ileri-geri hareketli aşınma deney düzeneğinin ve test bölgesinin şematik gösterimi

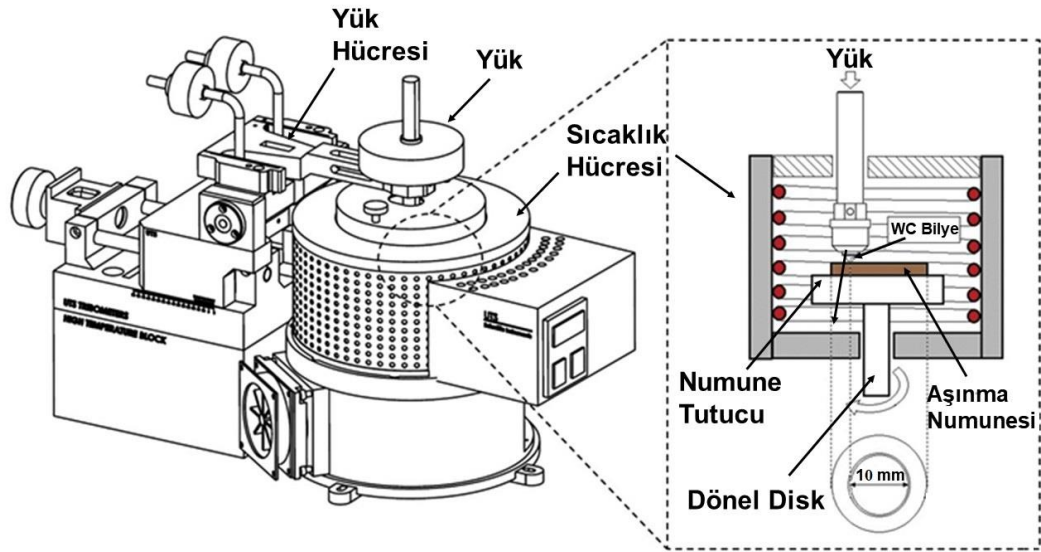
İleri-geri hareketli düzenekte yapılan sürtünme ve aşınma deneyleri sonucunda en üstün aşınma direnci sergileyen çok katmanlı ($\text{Fe}_2\text{B} + \text{TiB}_2$) tabakalara sahip numunelerin yüksek sıcaklık ($500 \text{ }^\circ\text{C}$) altındaki söz konusu dirençlerinin nitrürlenmiş durumları ile karşılaştırılması için ASTM-G99 standardına göre üretilmiş bilye-disk esaslı deney düzeneği kullanıldı. Bu düzeneğin şematik resmi Şekil 6'da verilmiştir. Bu düzenekte numuneler 10 N yük altında, $0,125 \text{ ms}^{-1}$ kayma hızında ve 250 m kayma mesafesinde sürtünme ve aşınma deneylerine tabi tutuldu. Söz konusu koşullar namluların atış sonrası sıcaklıkları (Mishra vd., 2010), bir merminin seri atış sırasında ortalama kendiliğinden ateş alma sıcaklığı (cook off temperature) (Hameed vd., 2014) ve atış sırasında namlu içinde oluşan en yüksek basınç

değeri referans alınarak belirlendi (Lawton, 2001). Her iki düzenek kullanılarak yapılan sürtünme ve aşınma deneylerinde karşı yüzey olarak 6 mm çapında tungsten karbür (%94 WC + %6 Co) bilye kullanıldı.

Aşınma deneyleri öncesinde numunelerin yüzeylerinde oluşan kaplama işlemlerinden kaynaklanan kalıntılar temizlendi. Bu işlem için numuneler 2500 numaralı zımpara ile taşlandıktan sonra alkol ve aseton karışımı içerisinde ultrasonik yıkandı. Taşlama işleminden sonra numunelerin ortalama yüzey pürüzlülükleri optik profilometre ile ölçüldü, Tablo 6. Numunelerin sürtünme katsayılarının kayma mesafesine göre değişimleri düzeneğin yazılımı vasıtasıyla çizdirildi. Numunelerin aşınma kayıpları (hacim kaybı) ise yüzeylerinde oluşan aşınma yolunun derinlik ve genişliklerinin optik profilometre ile taranarak hesaplanması sonucunda belirlendi. Numunelerin ve bilyelerin aşınma yüzeyleri ile aşınma parçacıkları SEM/EDS ile incelendi ve analiz edildi.

Tablo 6. Zımparalama işlemine tabi tutulan sürtünme ve aşınma numunelerinin ortalama yüzey pürüzlülükleri

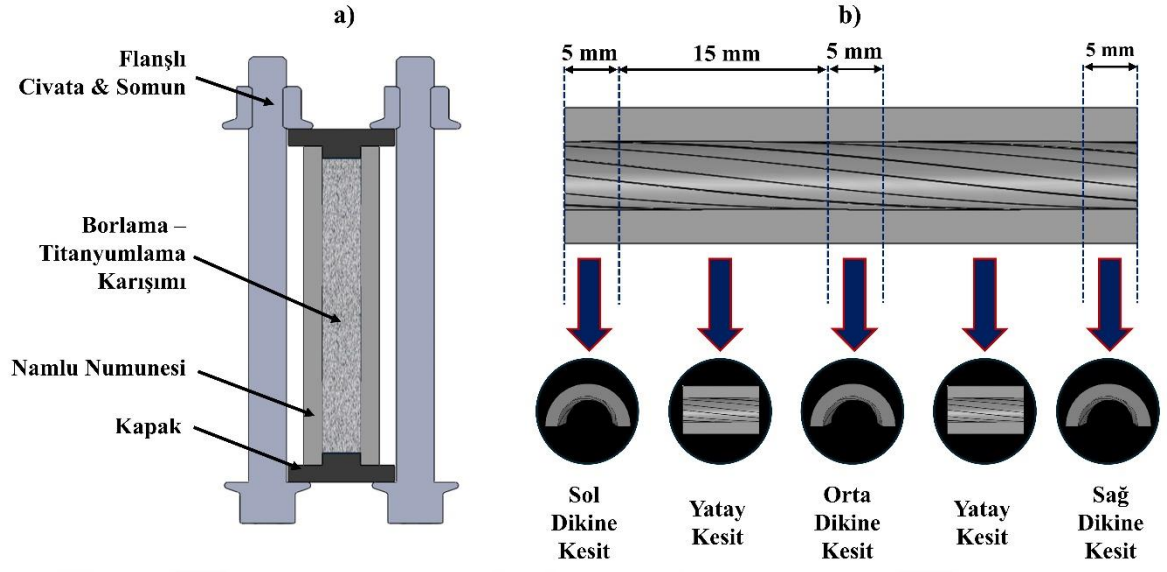
Çelik	Numune	Ortalama yüzey pürüzlülüğü, Ra (µm)
32CrMoV12-10	Kaplanmamış	0,237
	Borlanmış: B0595 - 900°C - 3 saat	0,611
	Borlanmış: B1090 - 900°C - 3 saat	0,475
	Borlanmış: B5050 - 900°C - 3 saat	0,639
	Borlanmış: B9010 - 900°C - 3 saat	0,677
	Borlanmış: B9505 - 900°C - 3 saat	0,604
	Titanyumlanmış: (55+35+10) - 1100°C - 3 saat	1,603
	B - ÇF + Ti	2,516
	Nitrülenmiş	0,632
42CrMo4	Kaplanmamış	0,491
	Borlanmış: B0595 - 900°C - 3 saat	0,502
	Borlanmış: B1090 - 900°C - 3 saat	0,665
	Borlanmış: B5050 - 900°C - 3 saat	0,643
	Borlanmış: B9010 - 900°C - 3 saat	0,610
	Borlanmış: B9505 - 900°C - 3 saat	0,588
	Titanyumlanmış: (55+35+10) - 1100°C - 3 saat	1,664
	B - ÇF + Ti	2,668
	B - TF + Ti	3,595
	Nitrülenmiş	0,651



Şekil 6. Bilye-disk esaslı aşınma deney düzeneğinin ve test bölgesinin şematik gösterimi (Purcek vd., 2020)

2.5. Kaplamaların Hafif Silah Namlusunun İç Yüzeyine Uygulanması

Borlama ve borlandıktan sonra titanyumlama işlemleri sonucunda oluşan çok katmanlı kaplama kalınlıklarının namlunun iç yüzeyinde, yiv ve setler üzerindeki dağılımlarını ve sertliklerini belirlemek için Trabzon Silah A.Ş tarafından 42CrMo4 çeliğinden soğuk dövme yolu ile üretilmiş 8,75 mm iç ve 18 mm dış çapa, 50 mm ve 70 mm uzunluklara sahip hafif silah namlu numuneleri kullanıldı. Namluların iç hacmi Şekil 7a’da gösterildiği gibi borlama ve titanyumlama karışımları ile doldurulduktan sonra uç kısımları cıvata ve somun yardımıyla kapatıldı. Borlama ve titanyumlama işlemleri B1090 ve % (55 Fe-Ti+35 Al₂O₃+ 10 NH₄Cl) karışımlarında sırasıyla 900 °C ve 1100 °C sıcaklıklarda 3 saatlik kaplama koşullarında yapıldı. Termal çarpılmaların önlenmesi için namlular fırın içerisine dikey yerleştirildi ve fırından alınan namlular havada soğutuldu. Namluluların dikine ve yatay kesitlerinden Şekil 7b’de gösterilen aralıklarda numuneler hazırlandı. Bu numuneler sıcak bakalite alındı ve detayları önceki bölümlerde belirtilen numune hazırlama, inceleme, kalınlık ve sertlik ölçme işlemlerine tabi tutuldu.



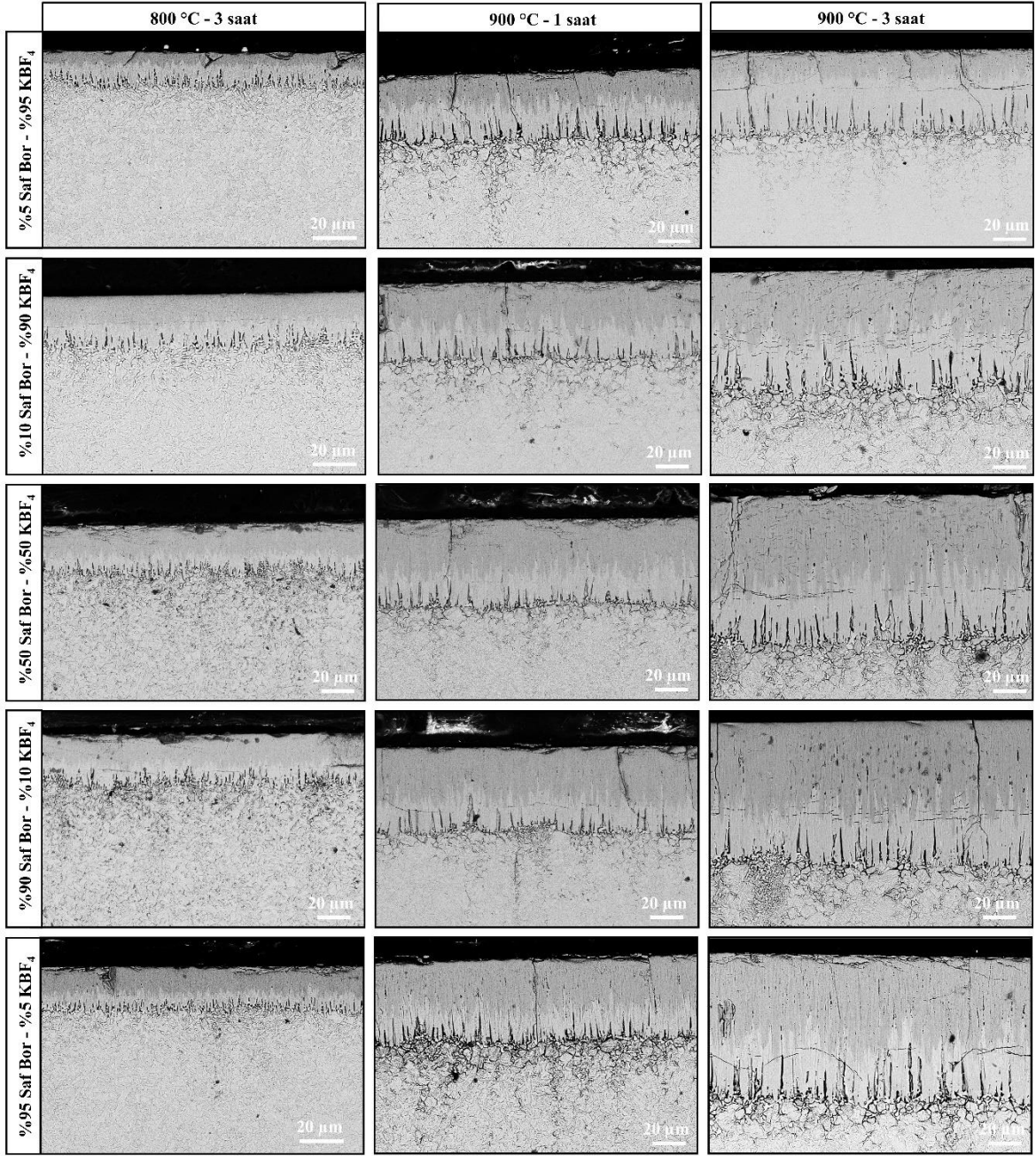
Şekil 7. a) Borlama ve titanyumlama işlemlerine hazır hale getirilmiş namluya ve b) numunelerin bu namludan alındığı konumlara ait şematik resim

3. BULGULAR

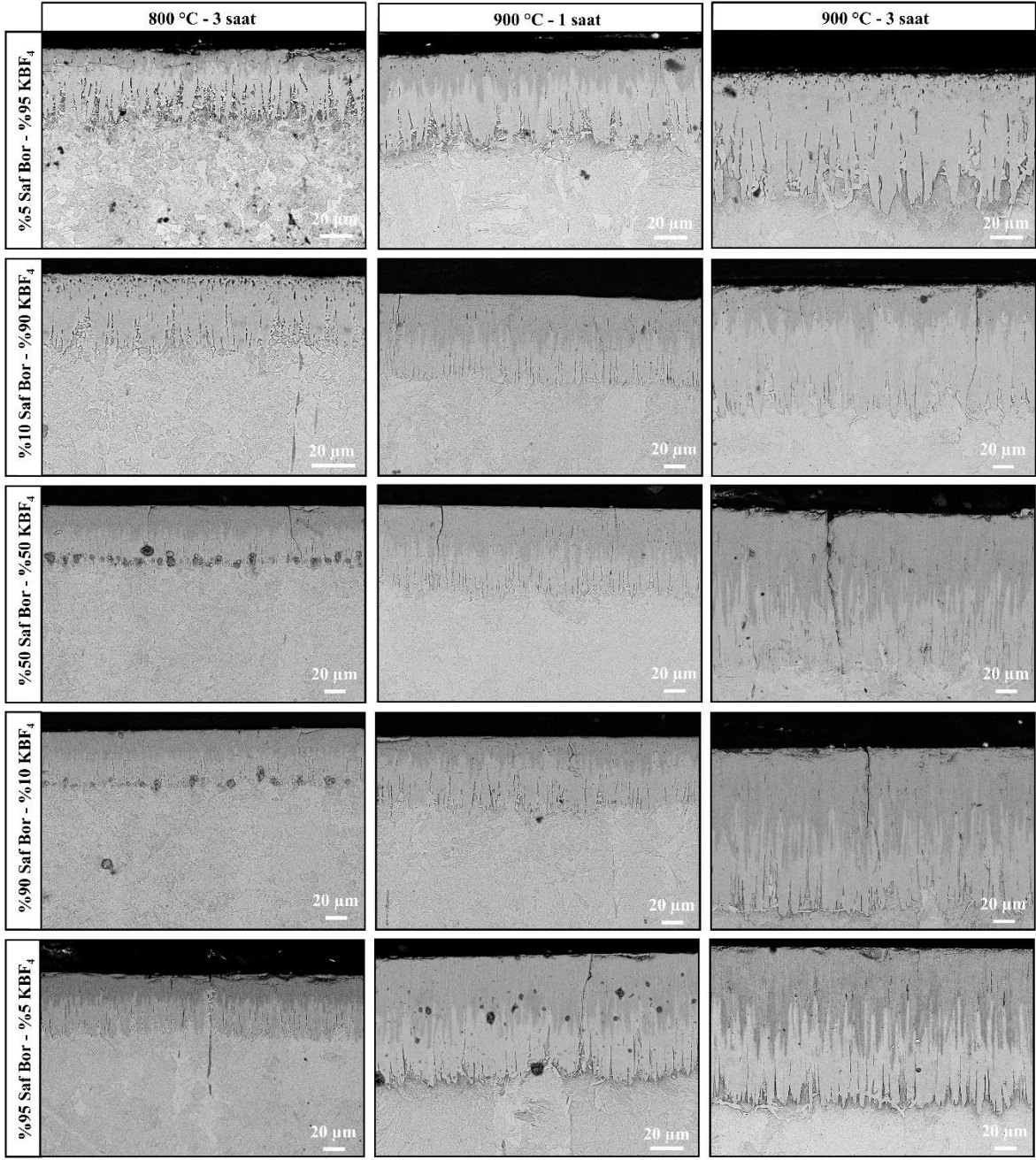
3.1. Yapısal İncelemelerden Elde Edilen Bulgular

Farklı oranlarda bor içeren borlama karışımlarında, sıcaklık ve sürelerinde borlama işlemine tabi tutulan numunelere ait kesit SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 8 ve Şekil 9’da verilmektedir. Bu görüntüler işlem koşullarına bağlı olarak numunelerin yüzeylerinde farklı kalınlıklara sahip tabakaların oluştuğunu göstermektedir. Numunelerden bazılarına ait detaylı SEM görüntüleri ile XRD analizleri Şekil 10 ve Şekil 11’de, bu görüntülerde yer alan ayrıntıların (kırmızı renk ile işaretlenmiş ve numaralandırılmış) EDS analizleri Tablo 7’de sunulmaktadır. Bu görüntü ve analizlerden numunelerin yüzeylerindeki tabakaların FeB ve Fe₂B fazlarına ait borür tabakaları oldukları, hem birbirlerine hem de taban malzemelere testere ağzı biçiminde kenetlendikleri belirlendi. Diğer taraftan B0595 borlama karışımı kullanılarak borlanan 42CrMo4 çeliğine ait numunenin yüzeyinde tek fazlı Fe₂B tabakasının, diğer tüm koşullarda borlanan numunelerin yüzeylerinde ise çift fazlı borür tabakalarının oluştuğu görüldü. Çift fazlı tabakaların ara kesitlerinde yatay çatlakların oluştuğu ve artan tabaka kalınlıkları ile bu çatlakların daha belirgin hale geldikleri gözlemlendi.

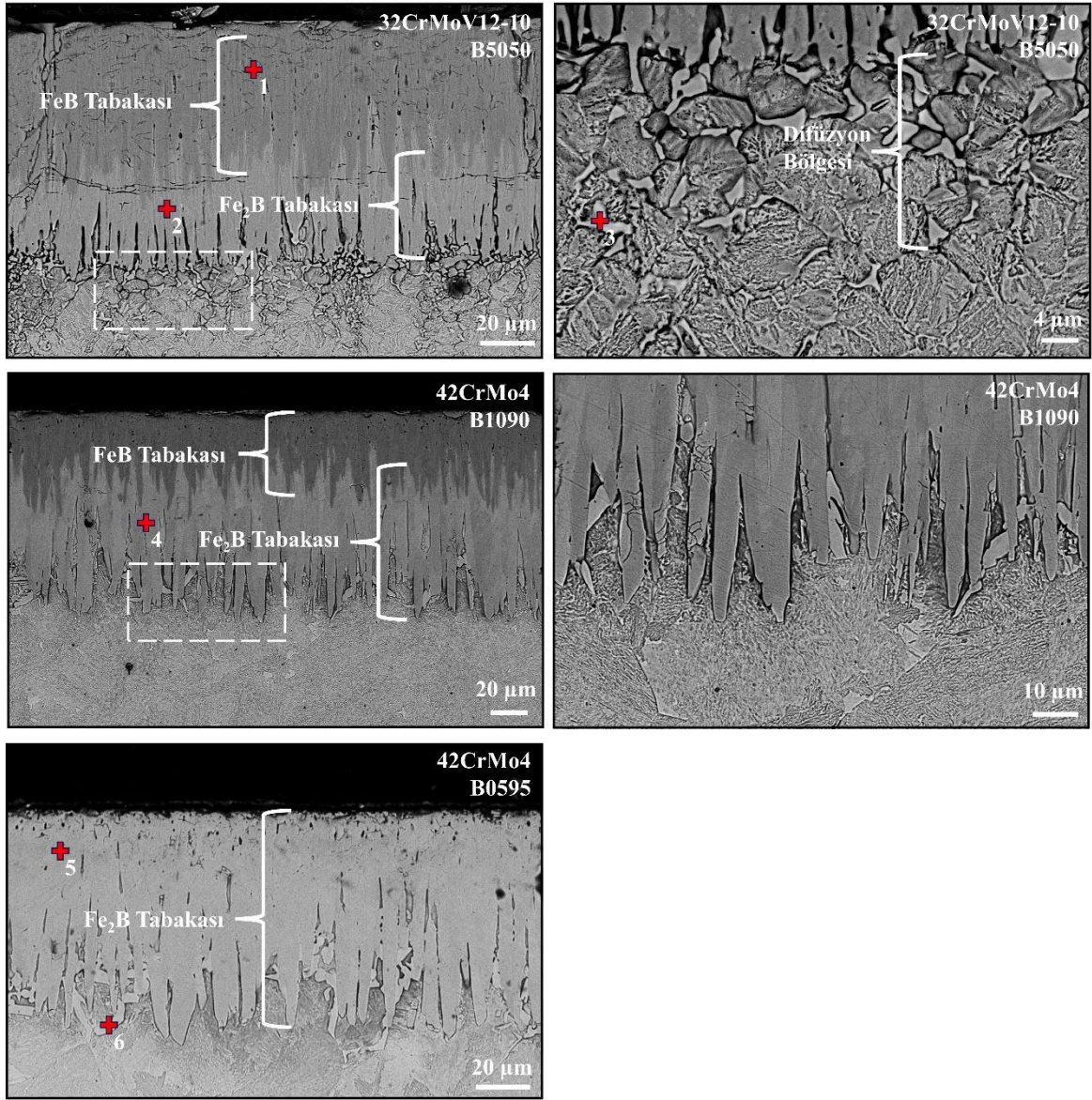
Kesit görüntüleri üzerinden ölçülen borür tabakalarına ait kalınlıklar Tablo 8’de, bu kalınlıkların ortalama değerlerinin borlama karışımının bor oranına, borlama sıcaklığına ve süresine göre değişimlerini gösteren eğriler ise Şekil 12’de verilmektedir. Bu eğrilerden borür tabakası kalınlıklarının karışımın artan bor oranı, borlama süresi ve sıcaklıkları ile arttığı belirlendi.



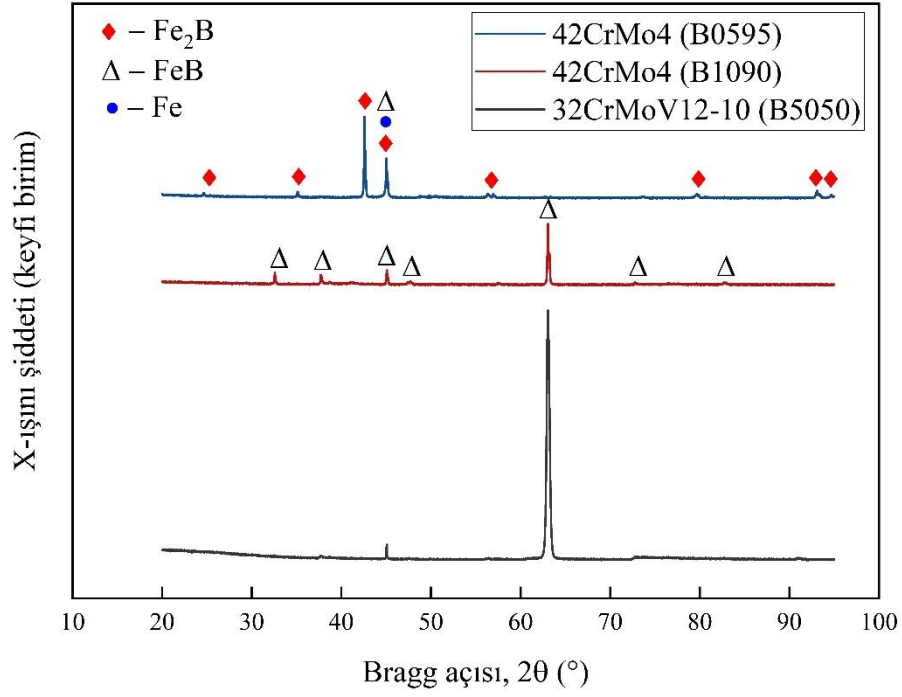
Şekil 8. Farklı bor oranlarında, sıcaklık ve sürelerinde borlanmış 32CrMoV12-10 çeliğine ait numunelerin kesit SEM görüntüleri



Şekil 9. Farklı bor oranlarında, sıcaklık ve sürelerinde borlanmış 42CrMo4 çeliğine ait numunelerin kesit SEM görüntüleri



Şekil 10. Farklı oranlarda bor içeren karışımlarda 900 °C sıcaklıkta 3 saat süre ile borlanmış numunelerin kesitlerine ait detaylı SEM görüntüleri



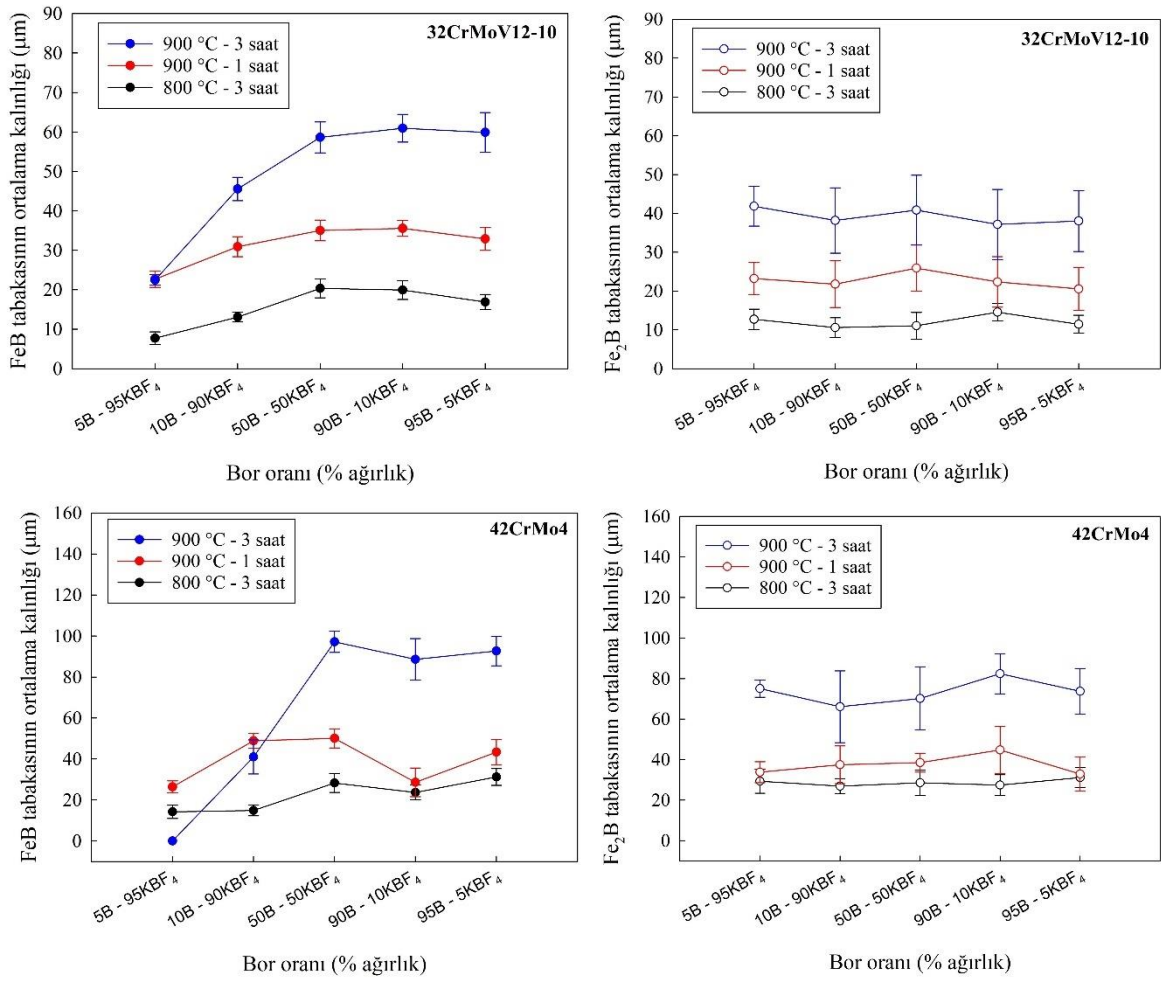
Şekil 11. Borlanmış numunelerin yüzeylerinden elde edilen X-ışını kırınımı desenleri

Tablo 7. Borlanmış numunelerin bazı bölgelerine ait EDS analizi sonuçları

Element (% ağırlık)	EDS analizi yapılan bölgeler					
	EDS 1	EDS 2	EDS 3	EDS 4	EDS 5	EDS 6
B	57,60	56,40	4,10	49,10	43,30	3,30
Fe	39,40	40,20	75,50	47,40	47,30	80,66
C	0,20	0,30	12,60	2,20	8,90	10,50
O	2,00	2,00	2,60	0,80	0,20	4,90
Cr	0,80	1,10	3,30	0,50	0,30	0,64
Mo	-	-	1,90	-	-	-

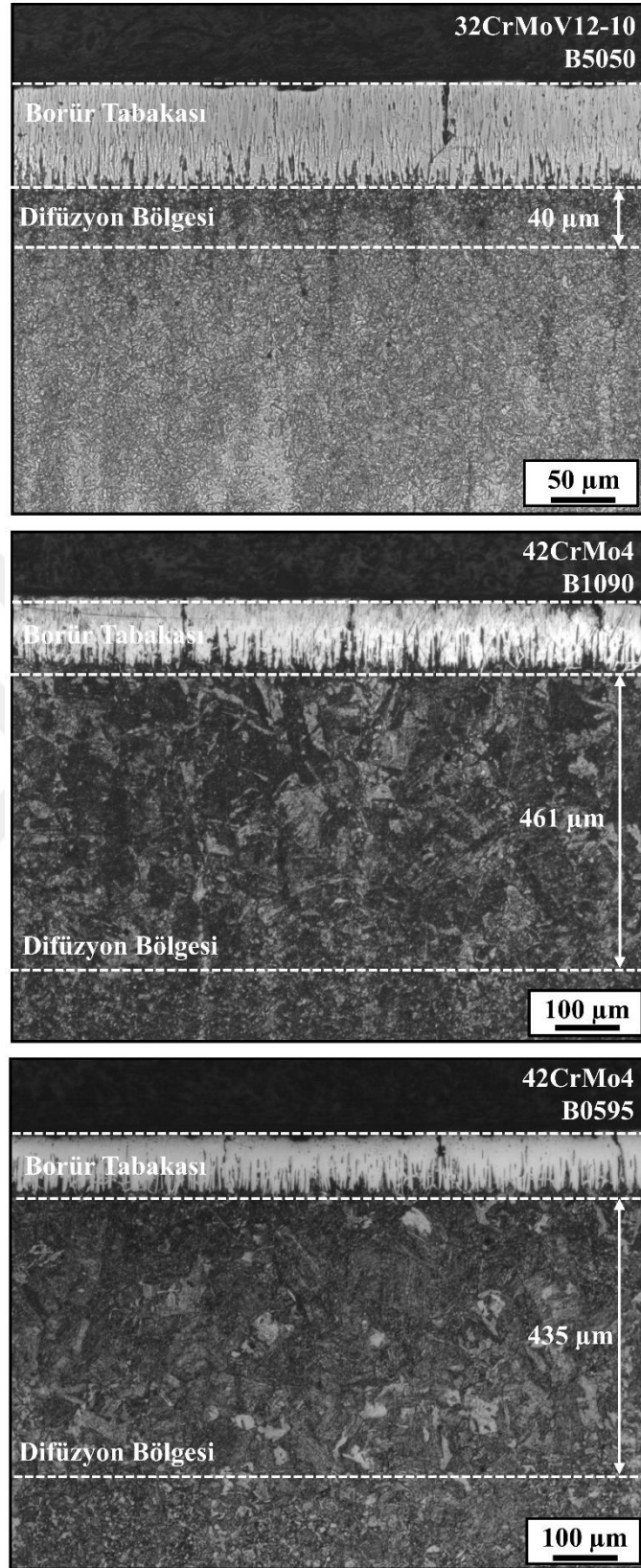
Tablo 8. Farklı bor oranlarında, sıcaklık ve sürelerinde borlanmış çeliklere ait numunelerin yüzeylerinde oluşan borür tabakası kalınlıklarının ortalama değerleri

Numune	Borlama parametreleri	Borlama karışımı	Tabaka kalınlığı (μm)	
			FeB	Fe ₂ B
32CrMoV12-10	800 °C - 3 saat	B0595	7,70 ± 1,61	12,71 ± 2,63
		B1090	13,08 ± 1,23	10,57 ± 2,53
		B5050	20,33 ± 2,36	11,06 ± 3,44
		B9010	19,92 ± 2,40	14,54 ± 2,23
		B9505	16,89 ± 1,91	11,42 ± 2,32
	900 °C - 1 saat	B0595	22,67 ± 2,08	23,20 ± 4,14
		B1090	30,90 ± 2,53	21,76 ± 6,02
		B5050	35,02 ± 2,63	25,89 ± 5,93
		B9010	35,56 ± 2,02	22,33 ± 6,52
		B9505	32,89 ± 2,89	20,55 ± 5,52
	900 °C - 3 saat	B0595	22,46 ± 1,32	41,85 ± 5,16
		B1090	45,55 ± 2,95	38,17 ± 8,44
		B5050	58,63 ± 3,93	40,86 ± 8,96
		B9010	60,95 ± 3,50	37,14 ± 9,06
		B9505	59,92 ± 5,01	38,03 ± 7,87
42CrMo4	800 °C - 3 saat	B0595	14,20 ± 3,21	29,33 ± 5,97
		B1090	14,89 ± 2,61	26,87 ± 3,68
		B5050	28,26 ± 4,56	28,55 ± 6,23
		B9010	23,67 ± 3,58	27,38 ± 5,17
		B9505	31,23 ± 4,07	31,12 ± 4,94
	900 °C - 1 saat	B0595	26,40 ± 2,92	33,79 ± 5,17
		B1090	48,86 ± 3,57	37,43 ± 9,32
		B5050	50,04 ± 4,66	38,47 ± 4,67
		B9010	28,62 ± 7,01	44,70 ± 11,61
		B9505	43,31 ± 6,24	32,89 ± 8,48
	900 °C - 3 saat	B0595	-----	75,05 ± 4,24
		B1090	40,98 ± 8,32	66,10 ± 17,75
		B5050	97,19 ± 5,17	70,14 ± 15,55
		B9010	88,65 ± 10,11	82,38 ± 9,87
		B9505	92,71 ± 7,18	73,69 ± 11,24



Şekil 12. Borlanmış çeliklere ait numunelerin yüzeylerinde oluşan borür tabakası kalınlıklarının ortalama değerlerinin bor oranı, borlama sıcaklık ve sürelerine göre değişimlerini gösteren eğriler

Çift fazlı ve tek fazlı borür tabakası içeren borlanmış numunelerden bazılarının dağlanmış durumlarındaki OM görüntüleri Şekil 13'te verilmektedir. Bu numuneler üzerinde yapılan incelemelerde yüzeylerindeki Fe₂B tabakasının hemen altında bir difüzyon (geçiş) bölgesinin olduğu tespit edildi. Numunelerdeki bu bölgelerin bor ile reaksiyona giren alaşım elementleri tarafından oluşturulduğu EDS analizleri ile doğrulandı. Diğer taraftan 42CrMo4 çeliğindeki difüzyon bölgesinin 32CrMoV12-10 çeliğinin söz konusu bölgesinden daha geniş olduğu ve ferrit fazı sütunları içerdiği görüldü.

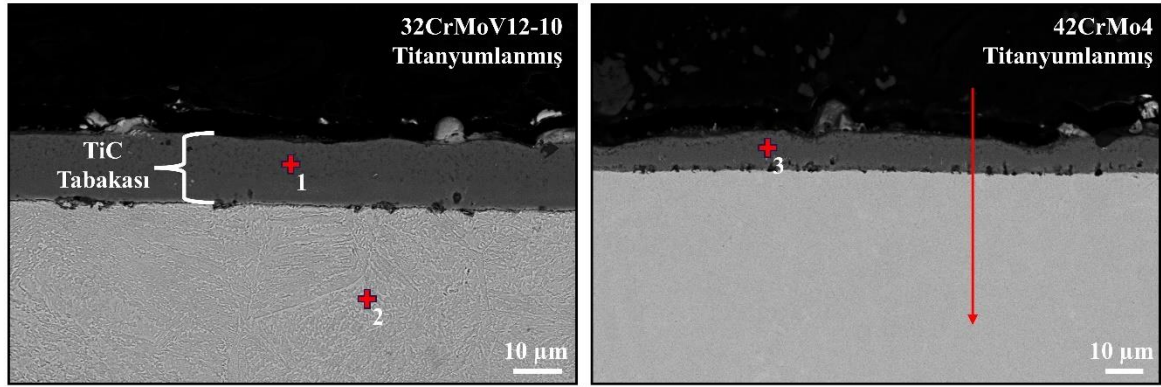


Şekil 13. Farklı oranlarda bor içeren karışımlarda 900 °C sıcaklıkta 3 saat borlanmış numunelerdeki difüzyon bölgelerini gösteren OM görüntüleri

Fe-Ti oranı farklı karışımlarda 1000 °C ve 1100 °C sıcaklıklarda 3 saat titanyumlanmış numunelerin yüzeylerinde oluşan tabaka kalınlıkları Tablo 9’da verilmektedir. Bu tablodan aynı kompozisyon ve sürede titanyumlanan 32CrMoV12-10 çeliğine ait numunelerin yüzeyinde oluşan tabaka kalınlığının artan titanyumlama sıcaklığı ile yaklaşık iki kat arttığı, ancak bu kalınlığın 42CrMo4 çeliğine ait numunelerde değişmediği görüldü. Diğer taraftan karışımın Fe-Ti oranının kaplama kalınlıkları üzerinde belirgin bir etki yaratmadığı belirlendi. Bu nedenle her iki çeliğe ait numuneler aynı karışım (%55 Fe-Ti + %35 Al₂O₃ + %10 NH₄Cl), sıcaklık (1100 °C) ve sürede (3 saat) titanyumlama işlemine tabi tutuldu ve elde edilen sonuçlar karşılaştırıldı. Bu çeliklerin dikey kesitine ait SEM görüntüleri Şekil 14’te, EDS ve XRD analizleri sırasıyla Tablo 10, Şekil 15 ve Şekil 16’da verilmektedir. Söz konusu analizlerden numunelerin yüzeylerinde TiC fazına ait bir tabakanın oluştuğu ve Ti₄Fe₂O oksidini içerdiği belirlendi. Çizgisel EDS analizi ise titanyumun sadece yüzeyde biriktiğini ve yüzey altına doğru bir yayınma eğilimi sergilemediğini gösterdi.

Tablo 9. Fe-Ti oranı farklı karışımlarda 1000 °C ve 1100 °C sıcaklıklarda 3 saat titanyumlanmış numunelerin yüzeylerinde oluşan TiC tabakası kalınlığının ortalama değerleri

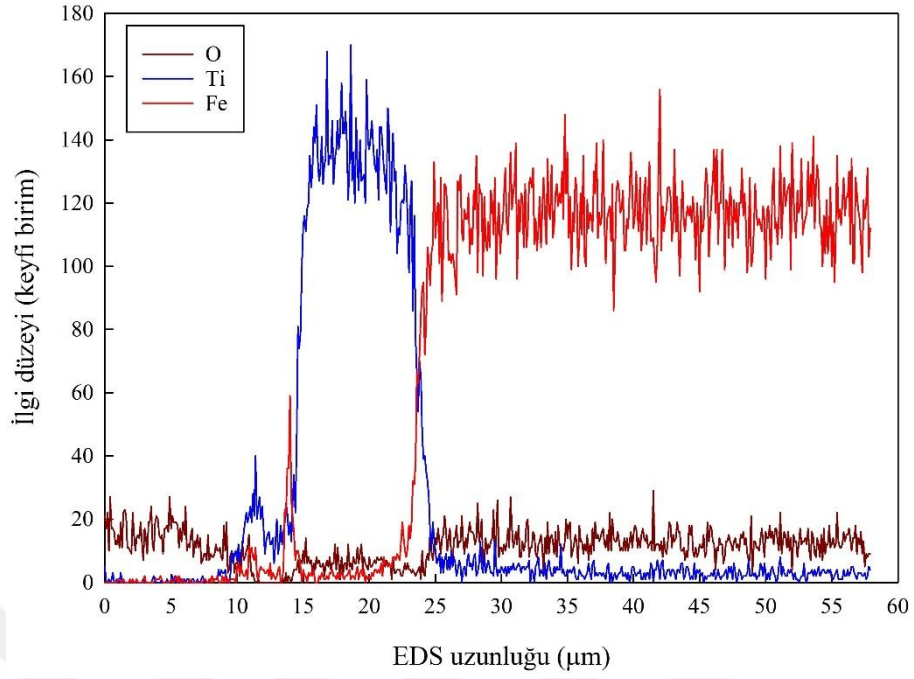
Numune	Titanyumlama koşulları	Titanyumlama karışımı [Fe-Ti + Al ₂ O ₃ + NH ₄ Cl] (% ağırlık)	TiC tabakasının ortalama kalınlığı (µm)
32CrMoV12-10	1000 °C - 3 saat	55 + 35 + 10	6,35 ± 0,75
	1100 °C - 3 saat	35 + 55 + 10	12,11 ± 0,64
		55 + 35 + 10	13,46 ± 0,57
42CrMo4	1000 °C - 3 saat	55 + 35 + 10	9,28 ± 0,60
	1100 °C - 3 saat	35 + 55 + 10	8,26 ± 0,59
		55 + 35 + 10	9,02 ± 0,83



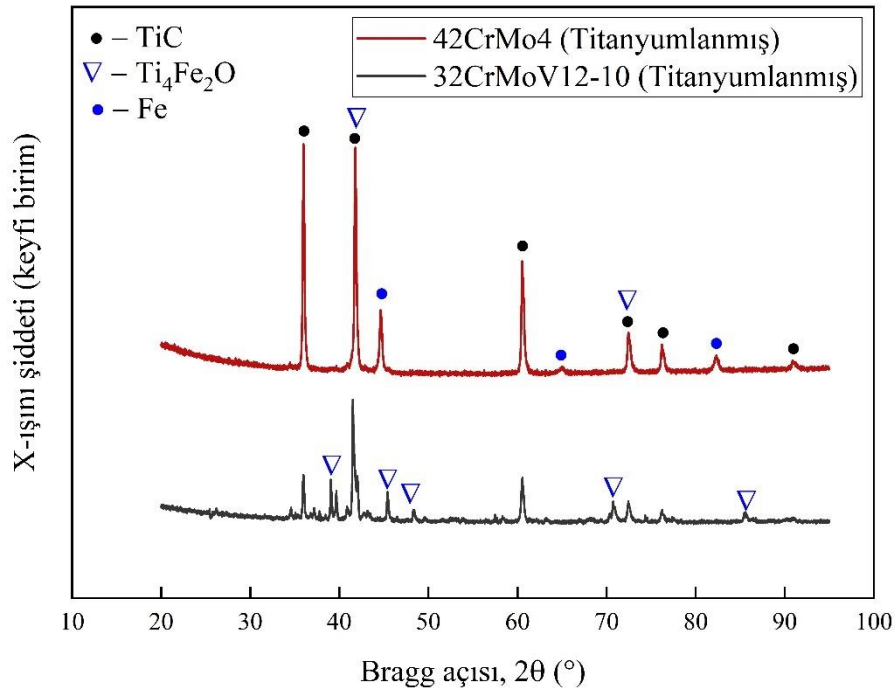
Şekil 14. % [55 Fe-Ti + 35 Al₂O₃ +10 NH₄Cl] titanyumlama karışımında 1100 °C sıcaklıkta 3 saat titanyumlanmış çeliklere ait numunelerin kesit SEM görüntüleri

Tablo 10. % [55 Fe-Ti + 35 Al₂O₃ +10 NH₄Cl] titanyumlama karışımında, 1100 °C sıcaklıkta 3 saat titanyumlanmış numunelerin EDS analizi sonuçları

Element (% ağırlık)	EDS analizi yapılan bölgeler		
	EDS 1	EDS 2	EDS 3
Fe	1,10	92,50	1,50
Ti	81,80	-	79,70
C	16,80	1,90	13,40
Cr	0,20	4,40	0,40
O	0,10	1,20	5,00

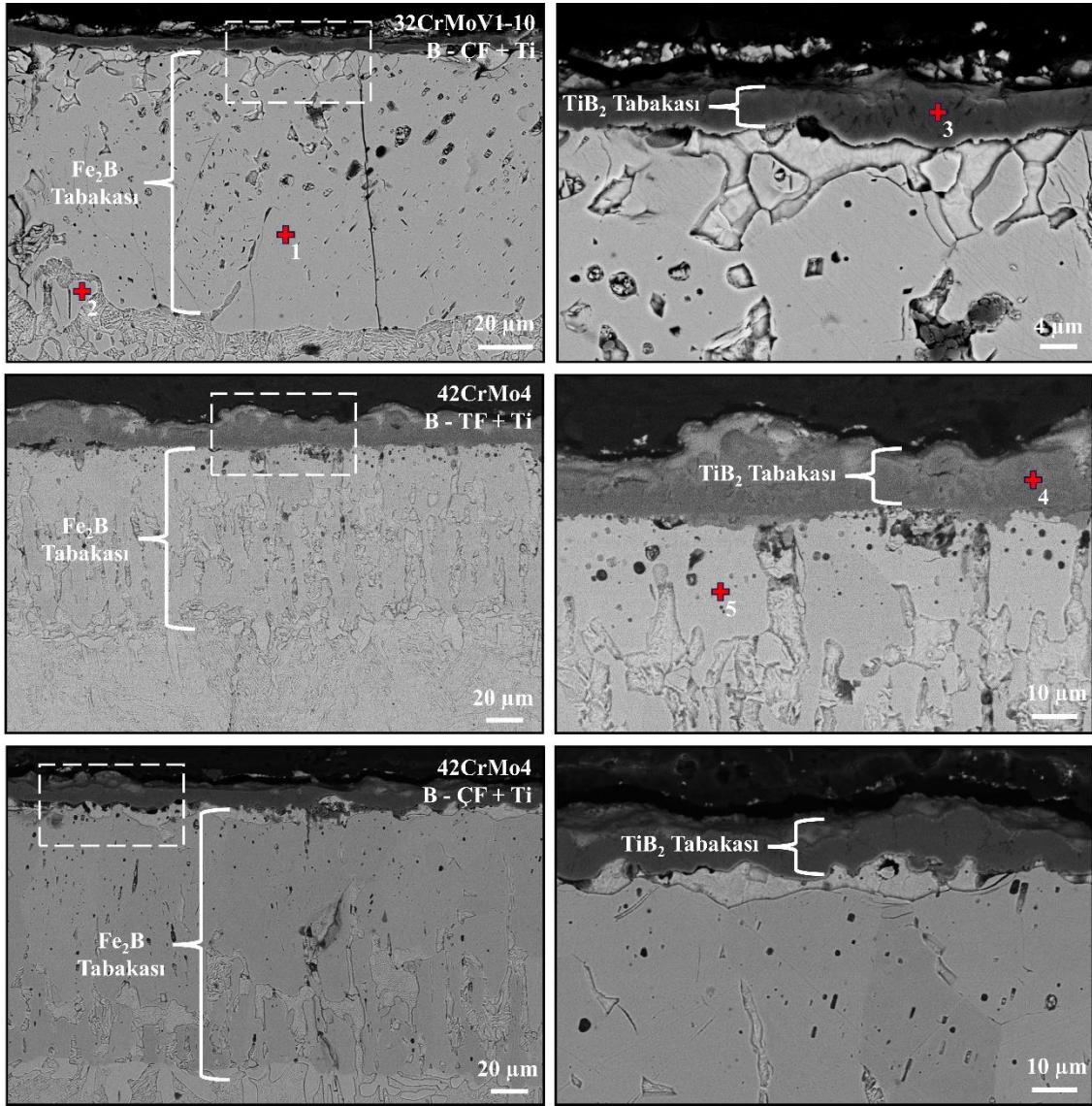


Şekil 15. Titanyumlanmış 42CrMo4 çeliğine ait numune kesitinden yapılan çizgisel EDS analizi sonuçlarını gösteren eğriler

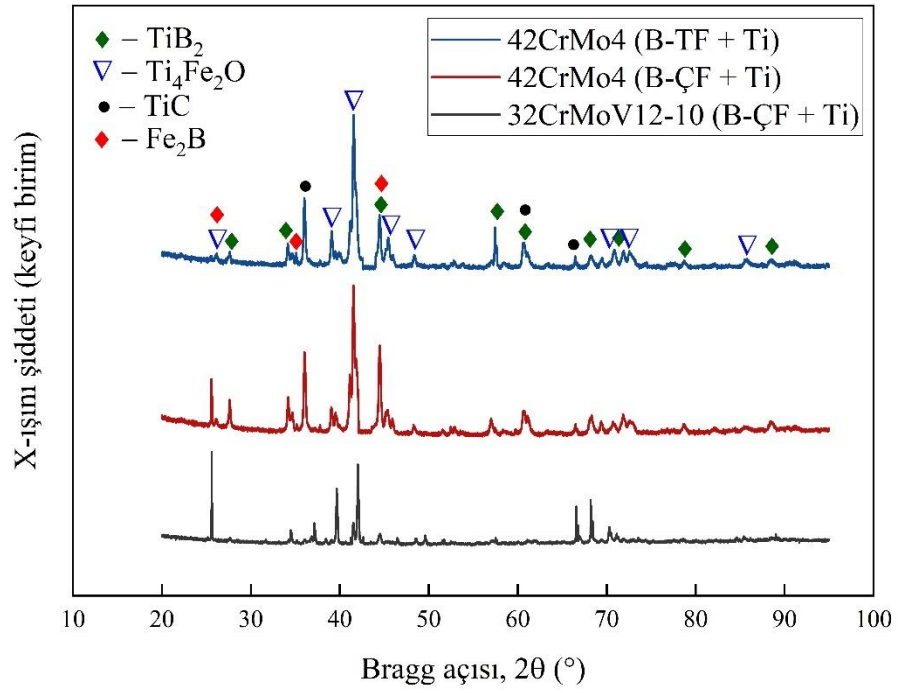


Şekil 16. Titanyumlanmış numunelerin yüzeylerinden elde edilen X-ışını kırınımı desenleri

Çift ve tek fazlı tabakalar içeren borlanmış numunelerin titanyumlanmış durumlarına ait kesit SEM fotoğrafları ile X-ışını kırınımı desenleri sırasıyla Şekil 17 ve Şekil 18’de, seçilmiş bölgeler üzerinden yapılan EDS analizi sonuçları ise Tablo 11’de verilmektedir. Bu incelemeler sonucunda söz konusu çeliklerin yüzeylerinde TiB_2 tabakasının oluştuğu ve bu tabakanın yanında Ti_4Fe_2O oksidinin yer aldığı belirlendi. Diğer taraftan numunelerin yüzeylerindeki FeB fazına ait tabakanın Fe_2B fazına ait tabakaya dönüştüğü görüldü. 32CrMoV12-10 çeliği için yapılan ve Şekil 19’da sunulan elementel EDS haritalamasında titanyumun bor tabakasına doğru bir yayınıma eğilimi sergilemediği gözlemlendi. SEM görüntüleri üzerinden ölçülen Fe_2B ve TiB_2 tabakalarının ortalama kalınlıkları Tablo 12’de verilmektedir. Kalınlık ölçümleri sonucunda aynı koşullarda yapılan titanyumlama işleminden sonra 42CrMo4 çeliğine ait numunelerin yüzeyinde oluşan TiB_2 tabakasının 32CrMoV12-10 çeliğine ait numuneninkinden yaklaşık 4 kat daha kalın olduğu belirlendi.



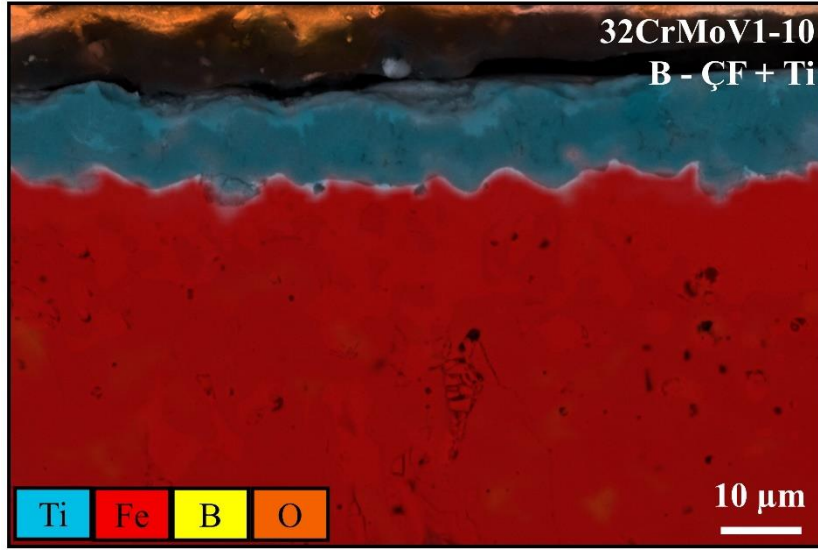
Şekil 17. Borlanmış durumda çift ve tek fazlı borür tabakaları içeren numunelerin titanyumlama işlemi sonrasındaki kesitlerine ait SEM görüntüleri



Şekil 18. Borlandıktan sonra titanyumlanan çeliklere ait numunelerin yüzeylerinden elde edilen X-ışını kırınımı desenleri

Tablo 11. Borlandıktan sonra titanyumlanan çeliklere ait numunelerin işaretlenmiş ve numaralandırılmış bölgelerine ait EDS sonuçları

Element (% ağırlık)	EDS analizi yapılan bölgeler				
	EDS 1	EDS 2	EDS 3	EDS 4	EDS 5
B	55,90	56,20	38,00	25,45	48,41
Fe	32,80	35,90	2,40	8,30	44,05
Ti	-	-	47,20	57,90	-
C	10,00	6,10	12,40	6,43	7,40
O	1,30	1,80	-	1,92	0,14

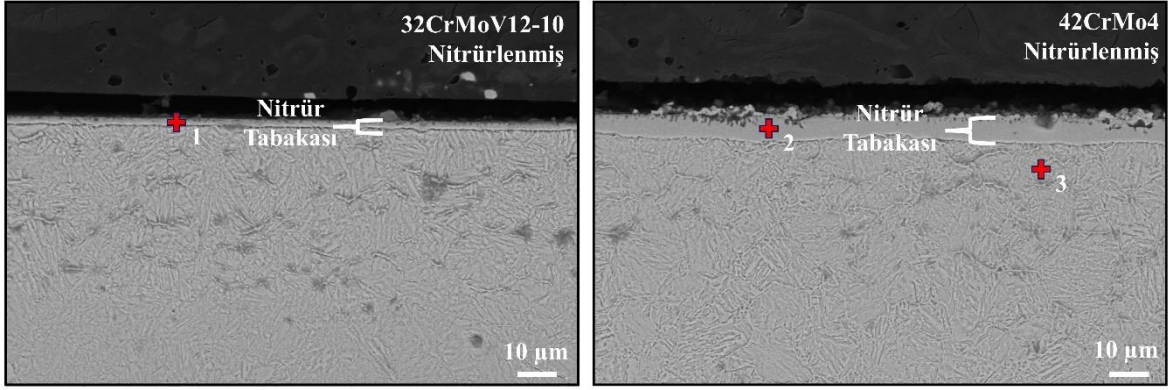


Şekil 19. Borlandıktan sonra titanyumlanan 32CrMoV12-10 çeliğine ait numunenin elementel EDS analizi görüntüsü

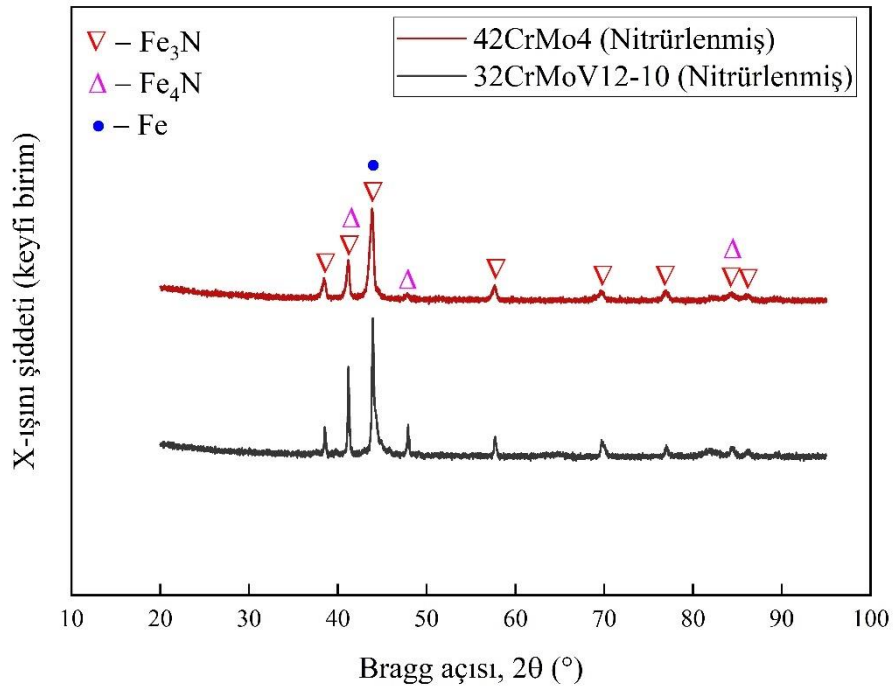
Tablo 12. Borlama ve ardından uygulanan titanyumlama işlemi sonrası yüzeyde oluşan tabakaların ortalama kalınlık değerleri

Borlandıktan sonra titanyumlanmış numuneler	Tabakalar ve ortalama kalınlıkları (μm)	
	Fe ₂ B	TiB ₂
32CrMoV12-10 (B-ÇF + Ti)	91,95 ± 9,89	4,30 ± 0,88
42CrMo4 (B-ÇF + Ti)	106,94 ± 5,83	15,13 ± 3,87
42CrMo4 (B-TF + Ti)	89,58 ± 7,93	16,69 ± 3,41

Nitrüleme işlemine tabi tutulan çeliklere ait numunelerin kesit SEM görüntüleri Şekil 20’de verilmektedir. Bu görüntüler üzerinden nitrür tabakası kalınlıkları 32CrMoV12-10 çeliğine ait numunede $1,75 \pm 0,24 \mu\text{m}$, 42CrMo4 çeliğine ait numunede ise $4,10 \pm 0,42 \mu\text{m}$ olarak ölçüldü. Diğer taraftan numunelerin yüzeyindeki nitrür tabakasının homojen bir dağılım sergilediği gözlemlendi. Nitrür tabakasının XRD ve EDS analizleri sırasıyla Şekil 21 ve Tablo 13’te sunulmaktadır. Bu analizler nitrür tabakasının Fe_{3,4}N bileşikler tarafından oluşturulduğunu gösterdi. Her iki numune için Şekil 22’de verilen optik mikroskop görüntülerinden Fe_{3,4}N tabakasının altında iri taneli bir difüzyon bölgesinin oluştuğu ve yapılan analizlerde bu bölgede nitrür içeren fazların da yer aldığı gözlemlendi.



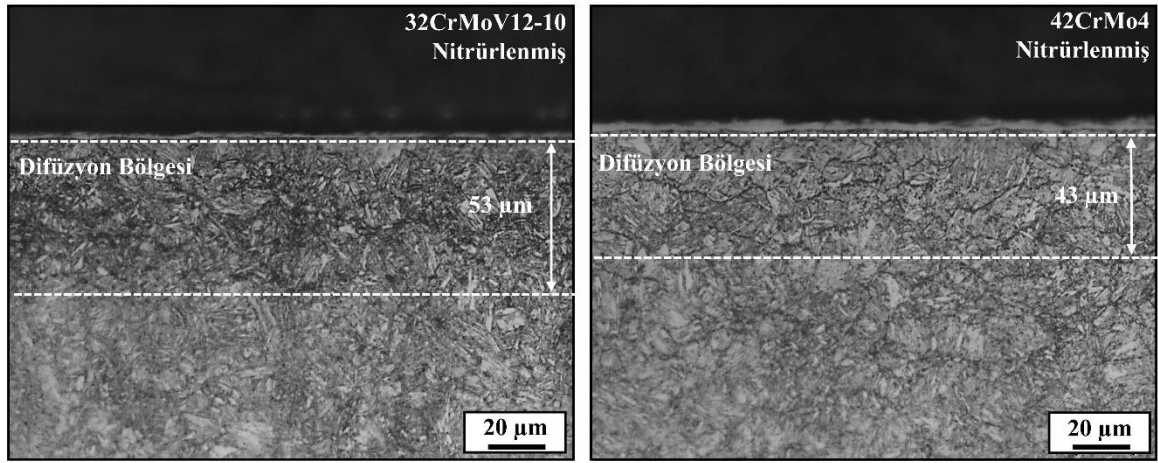
Şekil 20. Nitrülenmiş numunelerin SEM görüntüleri



Şekil 21. Nitrülenmiş numunelerin X-ışını kırınımı desenleri

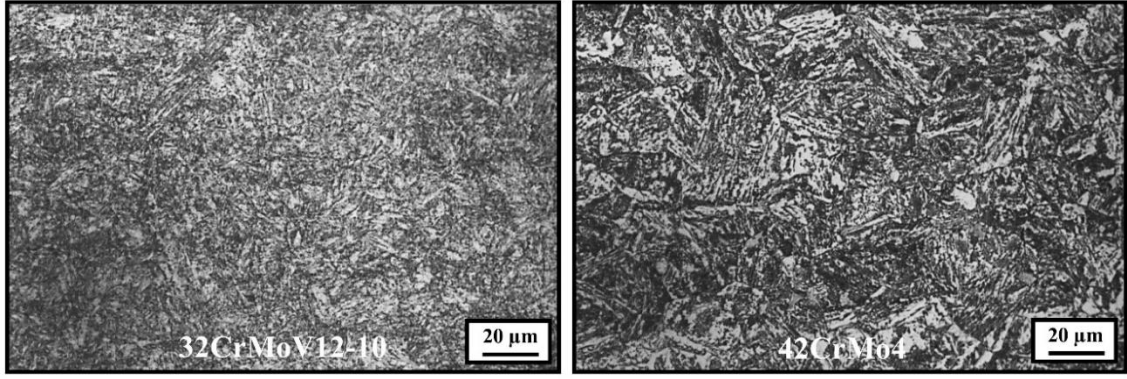
Tablo 13. Nitrür tabakasının EDS analizi sonuçları

Element (% ağırlık)	EDS analizi yapılan bölgeler		
	EDS 1	EDS 2	EDS 3
N	5,38	5,37	1,05
Fe	86,76	86,49	81,65
O	1,74	0,60	0,23
C	6,12	7,54	10,02
Cr	-	-	1,27
Mo	-	-	5,78

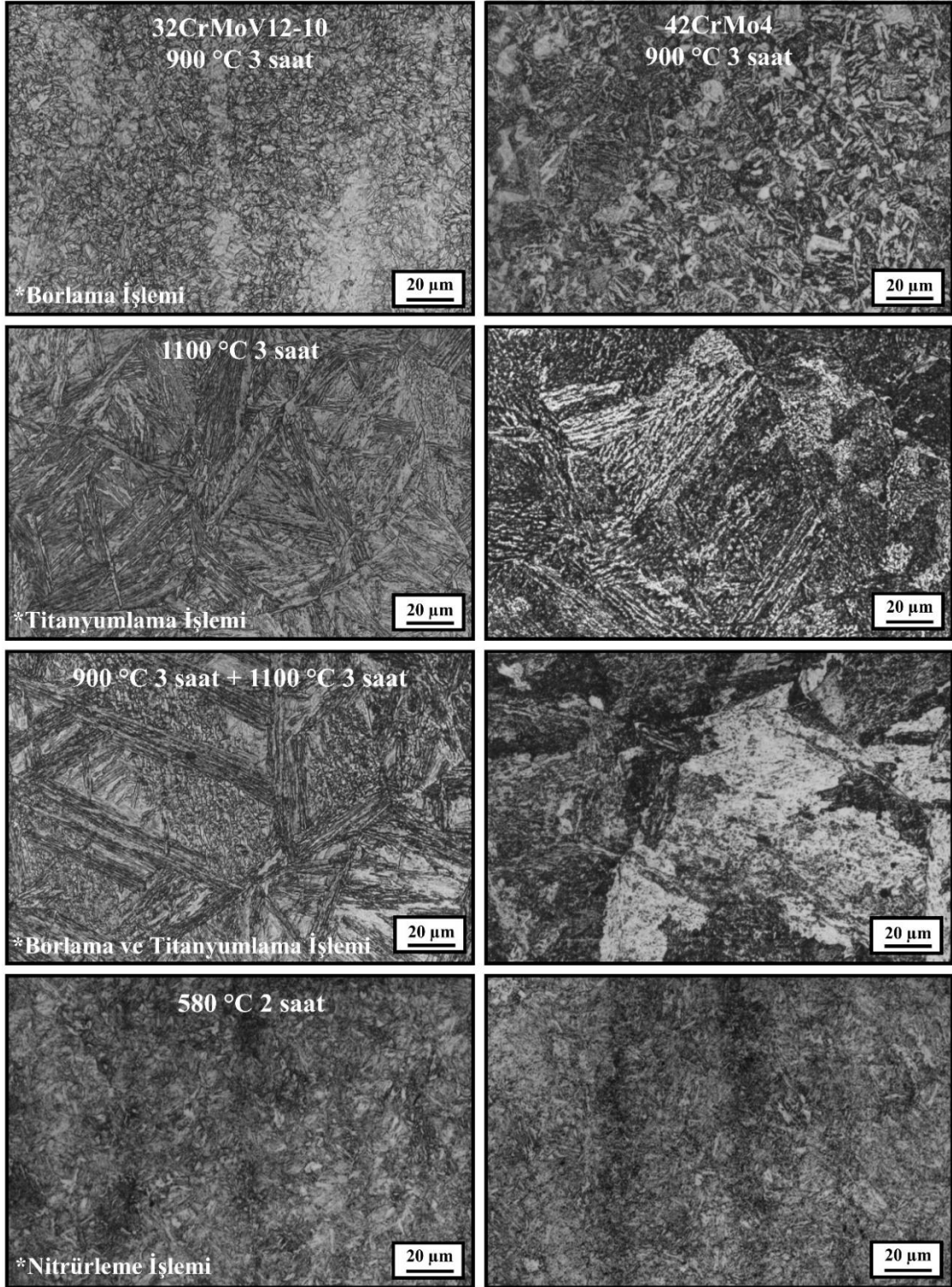


Şekil 22. Nitrülenmiş numunelere ait OM görüntüleri

Kaplama işleminde kullanılan çeliklere ait numunelerin iç yapılarını gösteren optik mikroskop görüntüleri Şekil 23'te verilmektedir. Bu görüntülerden söz konusu çeliklerin temperlenmiş martenzitik bir yapıya sahip oldukları, 32CrMoV12-10 çeliğine ait numunede yer alan martenzit iğnelerinin daha ince ve sık dizildikleri belirlendi. 580°C, 900 °C ve 1100 °C sıcaklıklarda uygulanan farklı kaplama işlemlerinden sonra havada soğutulan söz konusu çeliklerin iç yapı görüntüleri ise Şekil 24'te sunulmaktadır. 900 °C sıcaklıkta yapılan işlemlerden sonra numunelerin normalize oldukları, ferrit ve perlit fazlarını içerdikleri görüldü. 1100 °C sıcaklıkta yapılan işlemlerden sonra ise 32CrMoV12-10 çeliğine ait numunede iri taneli martenzit, 42CrMo4 çeliğine ait numunede beynitik bir yapı olduğu gözlemlendi. Ancak 580°C sıcaklıkta yapılan nitrürlenme işleminden sonra numunelerin yapısal özelliklerinde belirgin bir değişim gözlenmedi.



Şekil 23. 32CrMoV12-10 ve 42CrMo4 çeliklerine ait numunelerin iç yapılarını gösteren OM görüntüleri



Şekil 24. Numunelerden farklı kaplama işlemleri sonrasında alınan OM görüntüleri

3.2 Sertlik, Rockwell-C Adezyon ve Çizik Deneylerinden Elde Edilen Bulgular

Borlanmış, titanyumlanmış, borlandıktan sonra titanyumlanmış numuneler ile nitrürlenmiş numunelerin yüzeylerinde oluşan tabakalarının mikrosertlikleri sırasıyla Tablo 14-17’de verilmektedir. Sertlik ölçümleri sonucunda borlama karışımına ait bor oranının borür tabakalarının sertliği üzerinde belirgin bir etki oluşturmadığı belirlendi. Ancak FeB tabakasının sertliğinin Fe₂B tabakasının sertliğinden yaklaşık 200 HV kadar yüksek olduğu görüldü. Diğer taraftan işlem koşullarının TiC tabakasının sertliği üzerinde de belirgin bir etki yaratmadığı belirlendi. Ancak 32CrMoV12-10 çeliğine ait numunenin yüzeyinde oluşan TiC tabakasının sertliğinin 42CrMo4 çeliğine ait numuneninkinden yüksek olduğu görüldü. Gerek çift fazlı gerekse tek fazlı borür tabakası içeren numunelere uygulanan titanyumlama işleminden sonra oluşan tek fazlı (Fe₂B) tabakanın sertliğinin değişmediği ancak bu numunelerin yüzeylerinde oluşan TiB₂ tabakasının sertliğinin FeB tabakasının sertliğinden yüksek, TiC tabakasının söz konusu değerinden düşük olduğu belirlendi. Numunelerin yüzeylerinde oluşan nitrür tabakasının sertliğinin ise diğer tüm tabakaların sertliğinden çok daha düşük olduğu görüldü.

Tablo 14. Borlanmış numunelere ait borür tabakalarının mikrosertlikleri

Numune	Borlama karışımı	Borlama sıcaklığı ve süresi	Sertlik (HV _{0,05})	
			FeB	Fe ₂ B
32CrMoV12-10	B0595	900 °C - 3 saat	2213 ± 51	2012 ± 59
	B1090		2143 ± 51	1999 ± 64
	B5050		2183 ± 112	2064 ± 72
	B9010		2133 ± 54	1998 ± 49
	B9505		2253 ± 78	2028 ± 51
42CrMo4	B0595		-----	2027 ± 51
	B1090		2283 ± 104	1978 ± 82
	B5050		2299 ± 114	1981 ± 110
	B9010		2196 ± 67	1978 ± 114
	B9505		2118 ± 130	1965 ± 45

Tablo 15. Titanyumlanmış numunelerin yüzeylerinde oluşan TiC tabakasının mikrosertliği

Numune	Titanyumlama koşulları	Titanyumlama karışımı [Fe-Ti + Al ₂ O ₃ + NH ₄ Cl] (% ağırlık)	Sertlik (HV _{0,05})
			TiC
32CrMoV12-10	1100 °C - 3 saat	35 + 55 + 10	4311 ± 146
		55 + 35 + 10	4354 ± 225
42CrMo4	1100 °C - 3 saat	35 + 55 + 10	3835 ± 150
		55 + 35 + 10	3683 ± 175

Tablo 16. Borlandıktan sonra titanyumlanmış numunelerin yüzeylerinde oluşan tabakaların mikrosertlikleri

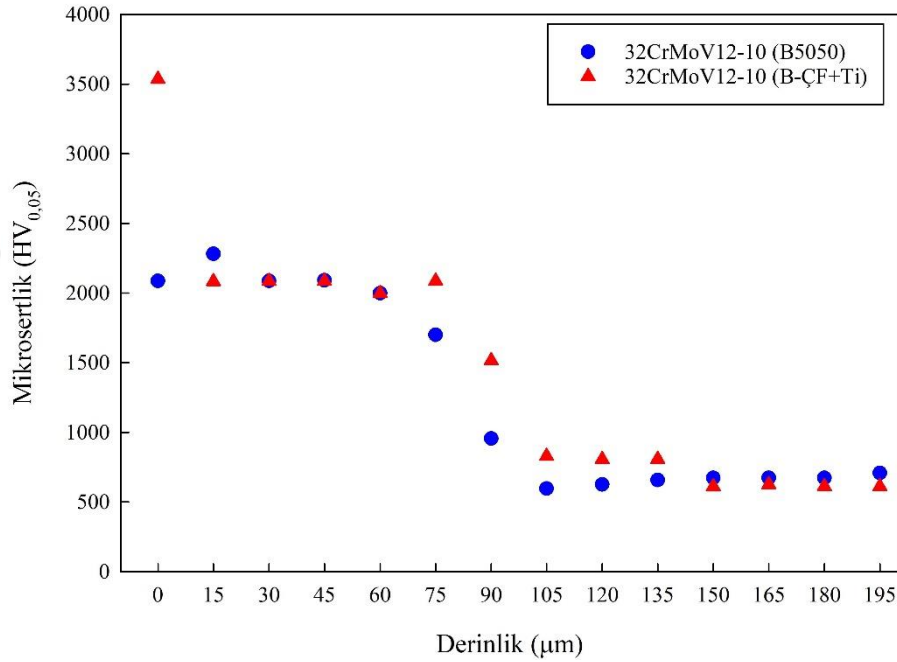
Numune	Sertlik (HV _{0,05})	
	Fe ₂ B	TiB ₂
32CrMoV12-10 (B - ÇF + Ti)	2105 ± 109	3682 ± 170
42CrMo4 (B - ÇF + Ti)	2108 ± 168	3606 ± 150
42CrMo4 (B – TF + Ti)	2116 ± 143	3557 ± 91

Tablo 17. Nitrürlenmiş numunelerin yüzeylerinde oluşan Fe_{3,4}N tabakasının mikrosertliği

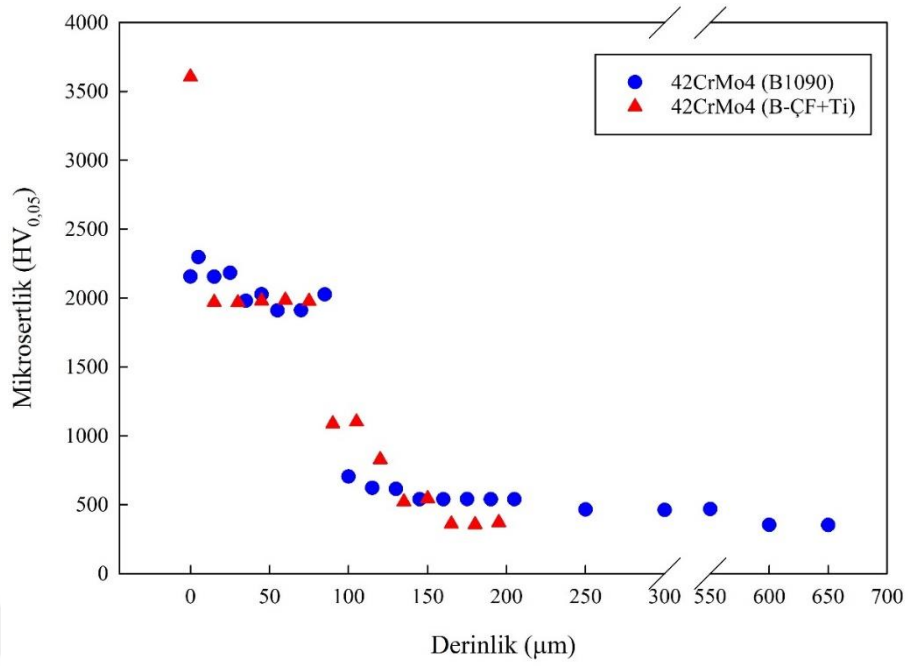
Numune	Sertlik (HV _{0,05})
	Fe _{3,4} N
32CrMoV12-10	1074 ± 127
42CrMo4	1105 ± 37

Borlanmış, titanyumlanmış, borlandıktan sonra titanyumlanmış çeliklere ait numunelerin sertlik değerlerinin yüzey derinliğine göre değişimlerine gösteren eğriler sırasıyla Şekil 25-27’de verilmektedir. Sertlik ölçümlerinden derinlik arttıkça sadece Fe₂B tabakasının sertliğinin azaldığı, diğer tabakaların sertliklerinin ise belirgin bir değişim sergilemediği belirlendi. Sertlik düşüşünün borlanmış numunelerde difüzyon bölgesine yakın derinliklerde başladığı gözlemlendi. Borlandıktan sonra titanyumlanmış 42CrMo4 çeliğine ait numunelerdeki sertlik düşüşünün titanyumlama öncesi borlanmış numunelerin çift fazlı ve tek fazlı oluşlarına göre değişim sergilediği gözlemlendi. Bu numunelerde titanyumlama işlemi sonrasında yaklaşık 106 µm ve 80 µm kalınlıklarında tek fazlı Fe₂B

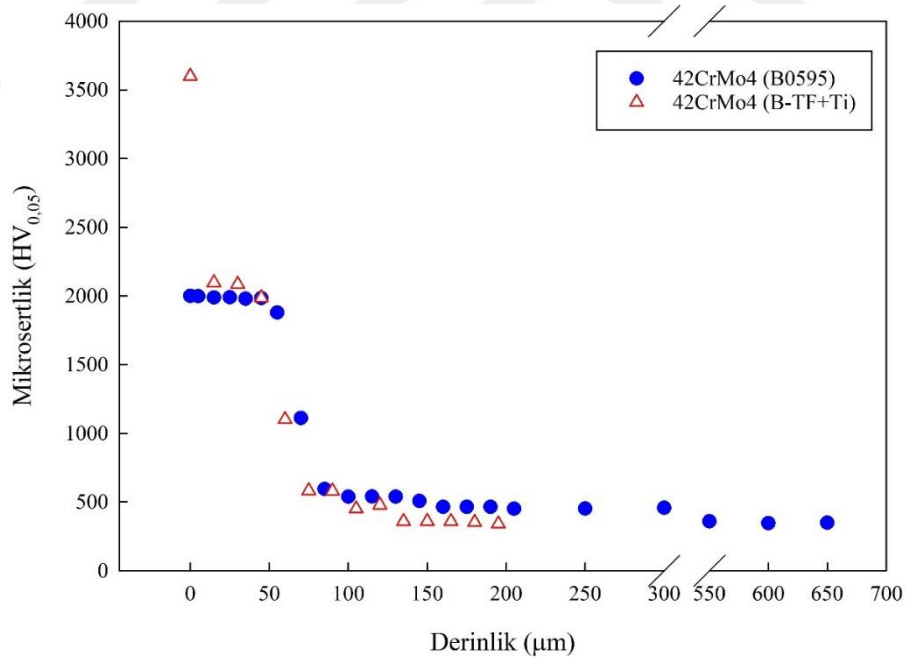
tabakasının oluştuğu, bu tabakanın sırasıyla yaklaşık 75 μm ve 45 μm derinliklerinde sertlik düşüşün belirgin bir biçimde başladığı belirlendi. Diğer taraftan benzer durum 32CrMoV12-10 çeliğine ait numunelerin titanyumlama işleminden sonra da gözlemlendi. Bu numunelerde sertlik düşüşün yüzeyden yaklaşık 75 μm derinlikte (tabaka kalınlığı: $\sim 90 \mu\text{m}$) meydana geldiği görüldü. Kaplama işleminden sonra ana malzemenin sertliğini gösteren eğriler Şekil 28’de verilmektedir. Bu eğriler 32CrMoV12-10 çeliğinin ana matris sertliğinin kaplama işlemlerinden sonra arttığını, 42CrMo4 çeliğinin ise söz konusu değerinin değişmediğini gösterdi. Diğer taraftan 42CrMo4 çeliğine ait borlanmış numuneler ile borlandıktan sonra titanyumlanmış numunelerde oluşan difüzyon bölgesi sertliğinin ana malzemenin sertliğinden yüksek olduğu belirlendi. Borlanmış 32CrMoV12-10 çeliğine ait numunelerde oluşan difüzyon bölgesi sertliğinin ise ana matris ile aynı sertlik değerine sahip olduğu görüldü.



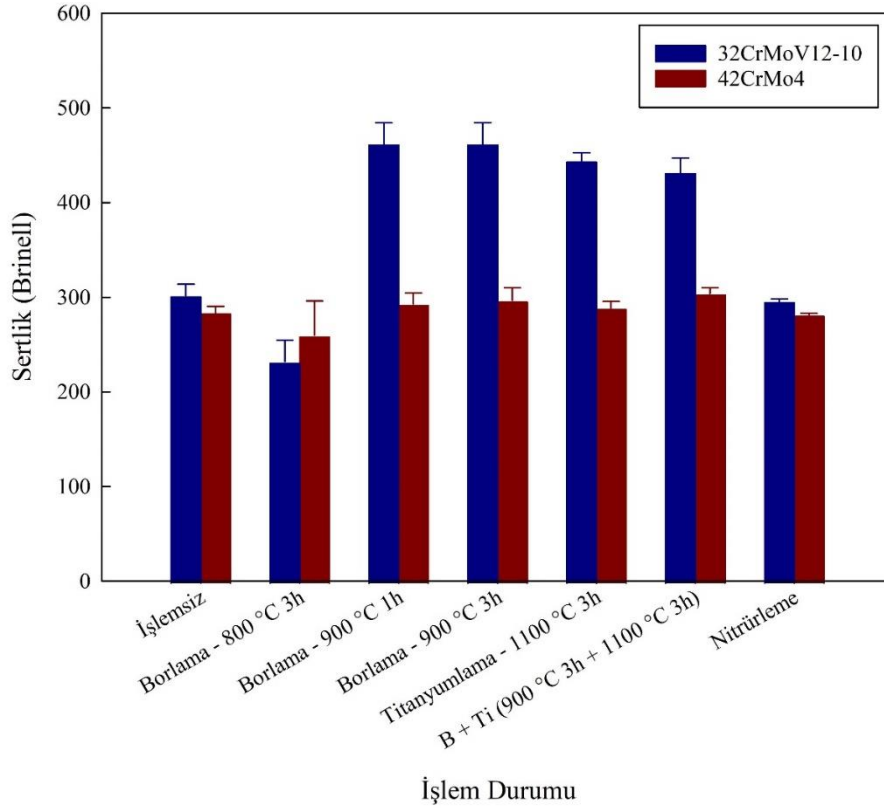
Şekil 25. Borlanmış ve borlandıktan sonra titanyumlanmış 32CrMoV12-10 çeliğine ait numunelerin yüzeylerindeki tabakaların sertlik değerlerinin yüzey derinliğine göre değişimlerini gösteren eğriler



Şekil 26. Çift fazlı borür tabakası içeren 42CrMo4 çeliğine ait numunelerin titanyumlama işlemi sonrasında yüzeylerinde oluşan tabakaların sertlik değerlerinin yüzey derinliğine göre değişimlerini gösteren eğriler



Şekil 27. Tek fazlı borür tabakası içeren 42CrMo4 çeliğine ait numunelerin titanyumlama işlemi sonrasında yüzeylerinde oluşan tabakaların sertlik değerlerinin yüzey derinliğine göre değişimlerini gösteren eğriler



Şekil 28. Çeliklerin ana matrisine ait sertlik değerlerinin işlem koşullarına göre değişimlerini gösteren eğriler

Kaplanmış numunelerin Rockwell-C adezyon test sonuçları sırasıyla Tablo 18-20’de sunulmaktadır. B9010 karışımında 900 °C sıcaklıkta 3 saat borlanmış 32CrMoV12-10 çeliğine ait numune ile titanyumlanmış numune hariç diğer tüm koşullarda kaplanmış numunelerin kabul edilebilir adezyon (yapışma) dayanımı kalitesine sahip oldukları belirlendi. İlgili teste tabi tutulan numunelerden bazılarının yüzeylerine ait SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 29-32’de verilmektedir. Borlanmış numunelerin yüzey görüntüleri üzerinde yapılan incelemeler sonucunda uca ait girinti izininin etrafında radyal çatlakların oluştuğu ve delaminasyonlar (soyulma) meydana geldiği belirlendi. Ancak tek fazlı borür tabakası içeren 42CrMo4 çeliğine ait numunenin yüzeyindeki girinti izininin etrafında ağırlıklı olarak sadece çatlak oluştuğu gözlemlendi. Titanyumlama işlemine tabi tutulmuş çeliklerin yüzeyinde oluşan izin etrafında ise aşırı parçalanmanın ve kopmaların meydana geldiği belirlendi. Ancak bu durum borlama işlemine tabi tutulduktan sonra titanyumlanmış çeliklerin yüzeylerinde gözlenmedi. Söz konusu işlemlere tabi tutulmuş çeliklerin yüzeyinde düzgün bir iz ve etrafında birkaç çatlak görüldü. Benzer şekilde nitrürlenmiş çeliklere ait numunelerin yüzeylerinde de düzgün bir girinti izininin oluştuğu ve bu izin etrafında sadece çatlakların meydana geldiği gözlemlendi.

Tablo 18. Borlanmış numunelere ait Rockwell-C adezyon deneyi sonuçları

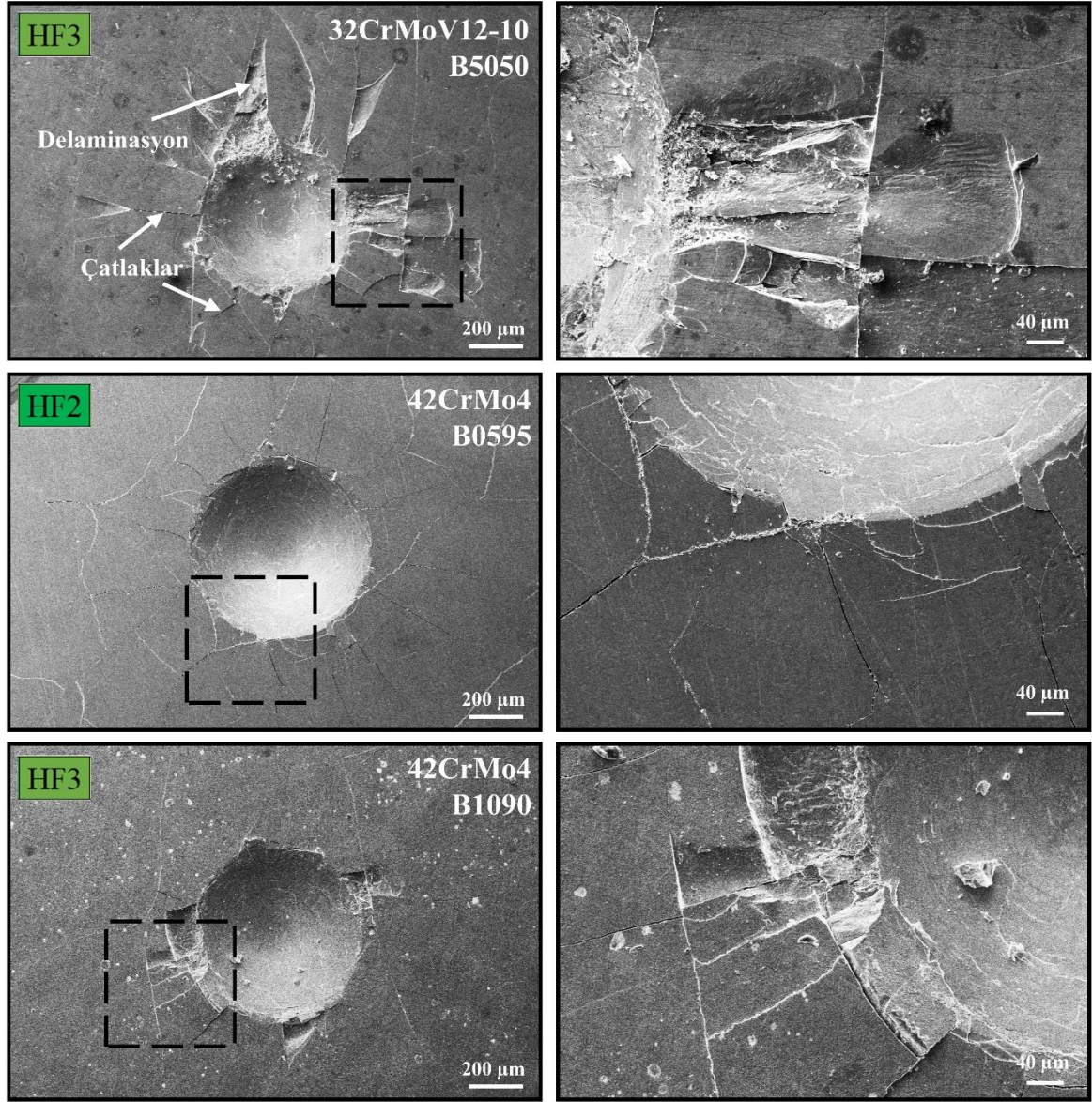
Borlama koşulları	Numune									
	42CrMo4					32CrMoV12-10				
	Borlama karışımı (% ağırlık)									
	B0595	B1090	B5050	B9010	B9505	B0595	B1090	B5050	B9010	B9505
800 °C - 3 saat	HF2	HF3	HF3	HF3	HF3	HF3	HF3	HF3	HF4	HF3
900 °C - 1 saat	HF3	HF3	HF3	HF3	HF2	HF4	HF3	HF4	HF3	HF4
900 °C - 3 saat	HF2	HF3	HF2	HF3	HF2	HF4	HF4	HF3	HF5	HF3

Tablo 19. Titanyumlanmış ve borlandıktan sonra titanyumlanmış numunelere ait Rockwell-C adezyon deneyi sonuçları

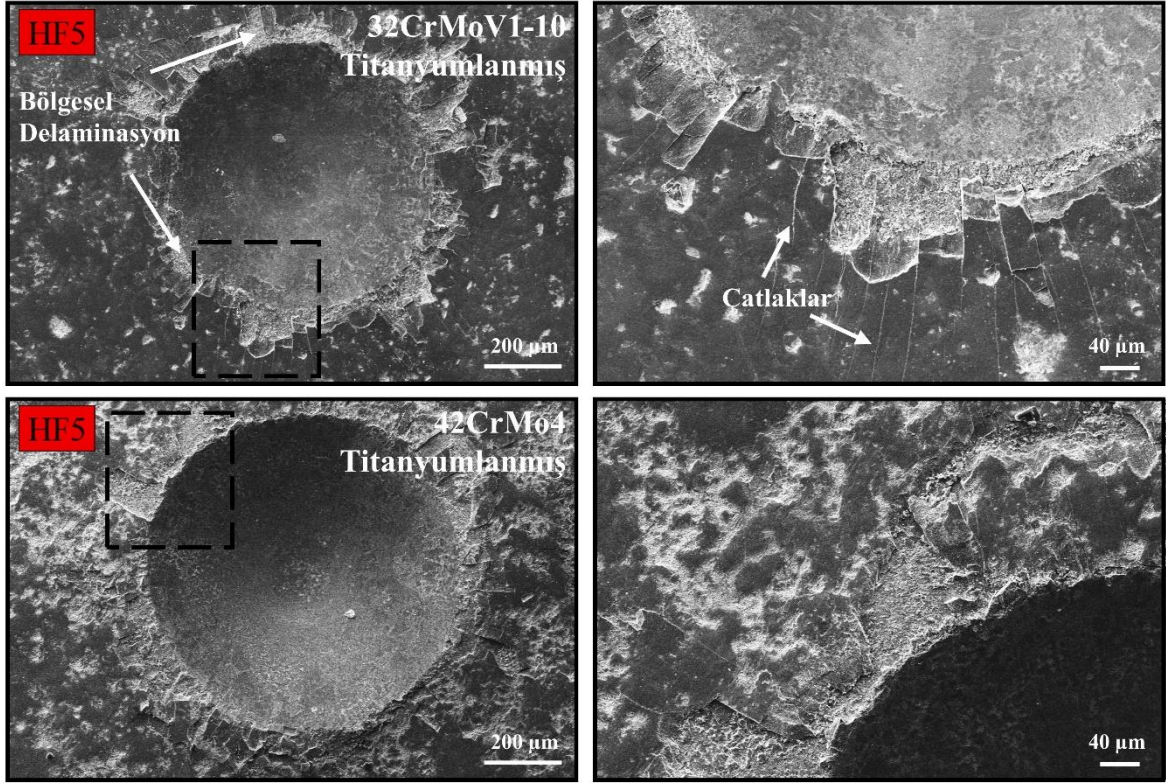
Titanyumlama koşulları	Numune			
	42CrMo4		32CrMoV12-10	
	Titanyumlama karışımı [Fe-Ti + Al ₂ O ₃ + NH ₄ Cl] (% ağırlık)			
	35 + 55 + 10	55 + 35 + 10	35 + 55 + 10	55 + 35 + 10
1000 °C - 3 saat	-	HF5	-	HF5
1100 °C - 3 saat	HF5	HF5	HF5	HF5
	-	HF1 (B - ÇF + Ti)	HF1 (B - TF + Ti)	HF1 (B - ÇF + Ti)

Tablo 20. Nitrürlenmiş numunelere ait Rockwell-C adezyon deneyi sonuçları

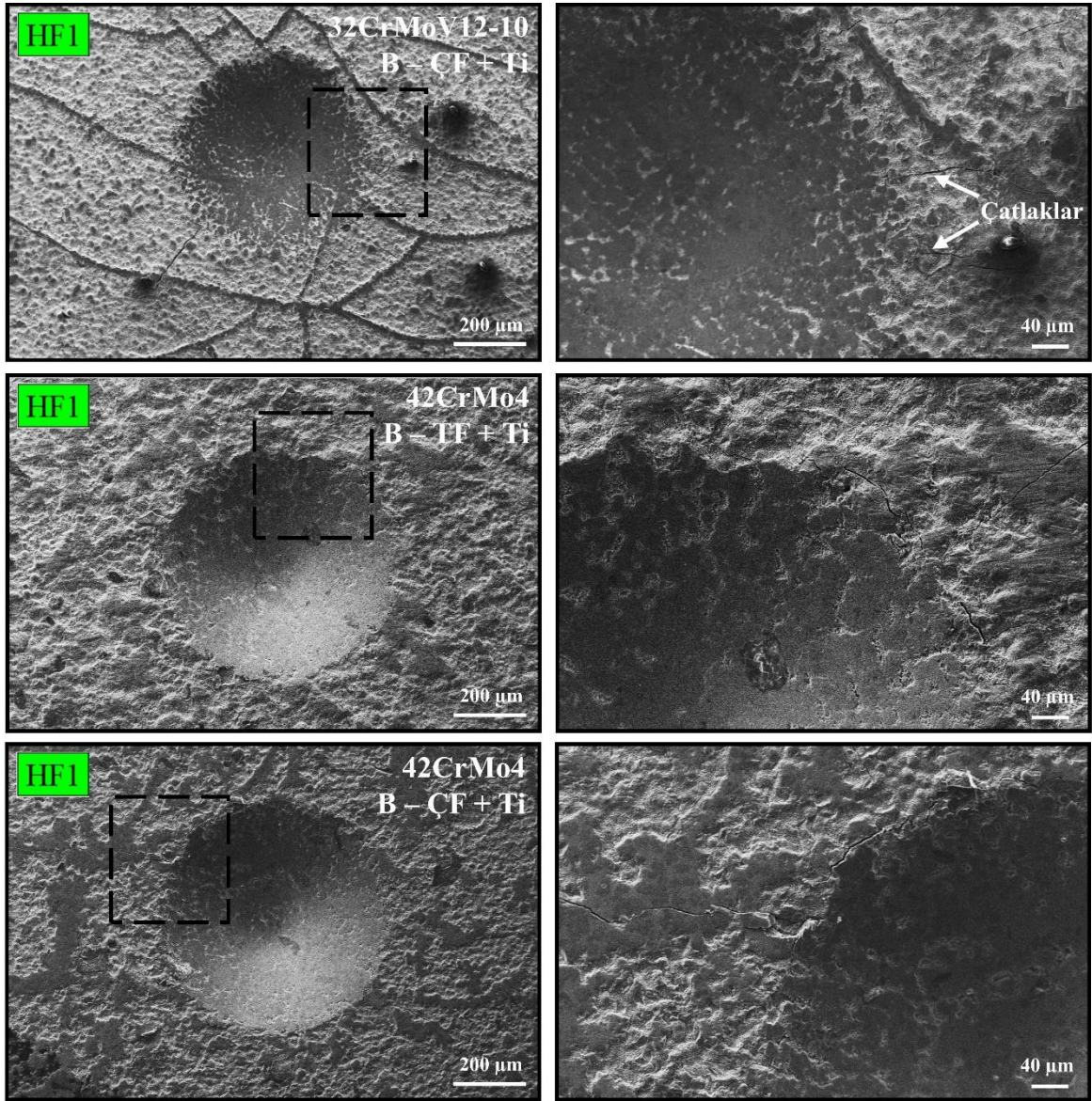
Nitrürlenme koşulları	Numune	
	42CrMo4	32CrMoV12-10
580 °C - 2 saat	HF2	HF2



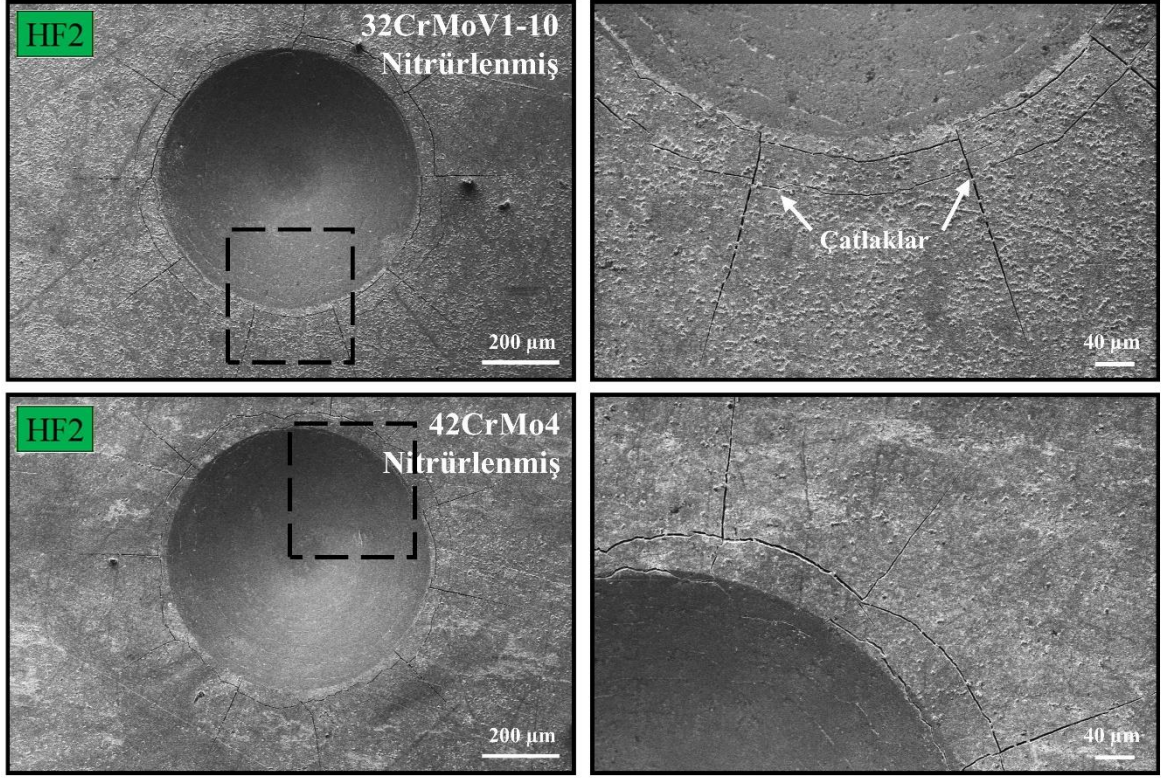
Şekil 29. Borlanmış bazı numunelerin yüzeylerinde oluşan girinti izlerine ait SEM görüntüleri



Şekil 30. Titanyumlanmış numunelerin yüzeylerinde oluşan girinti izlerine ait SEM görüntüleri



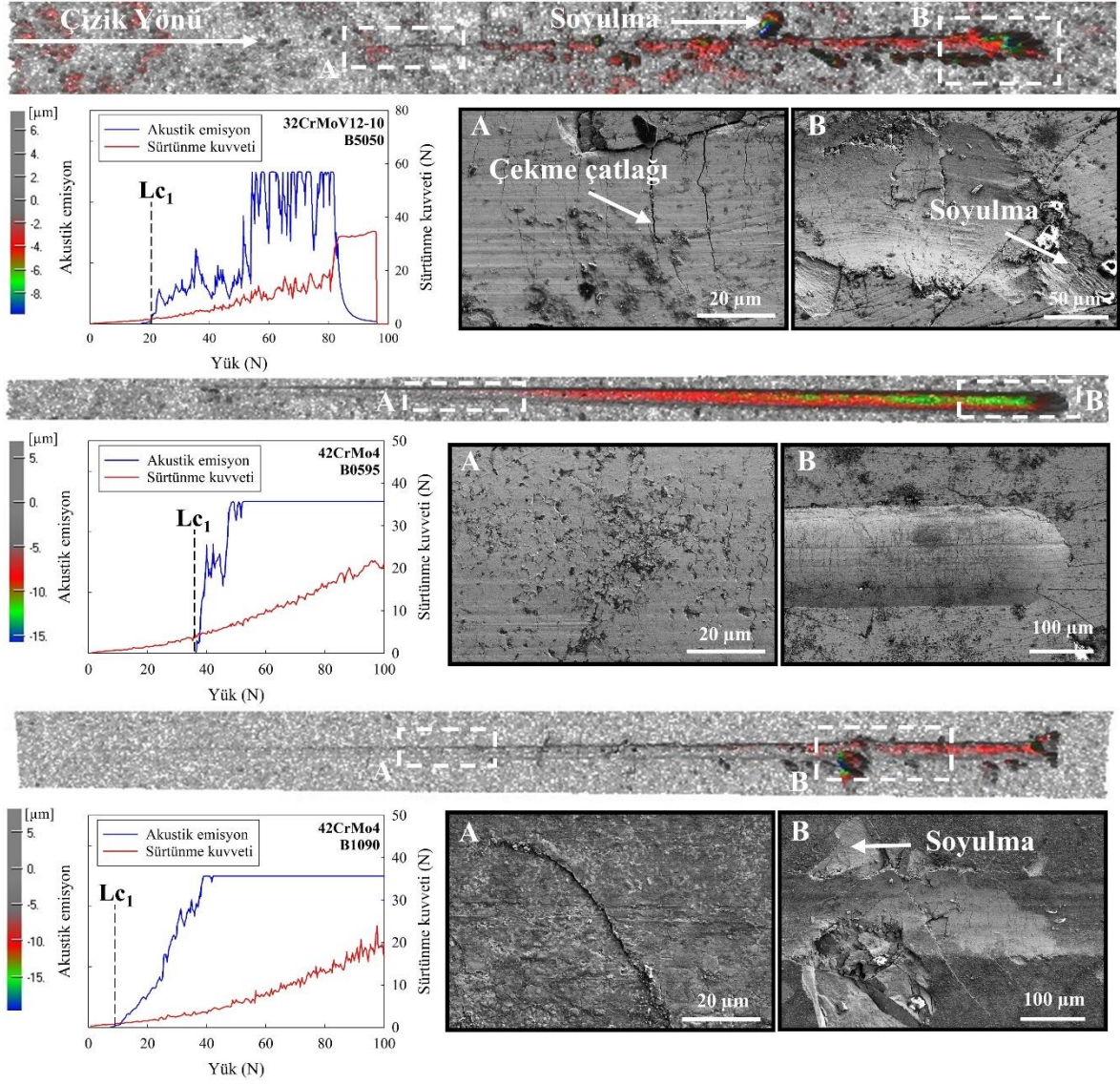
Şekil 31. Borlandıktan sonra titanyumlanmış numunelerin yüzeylerinde oluşan girinti izlerine ait SEM görüntüleri



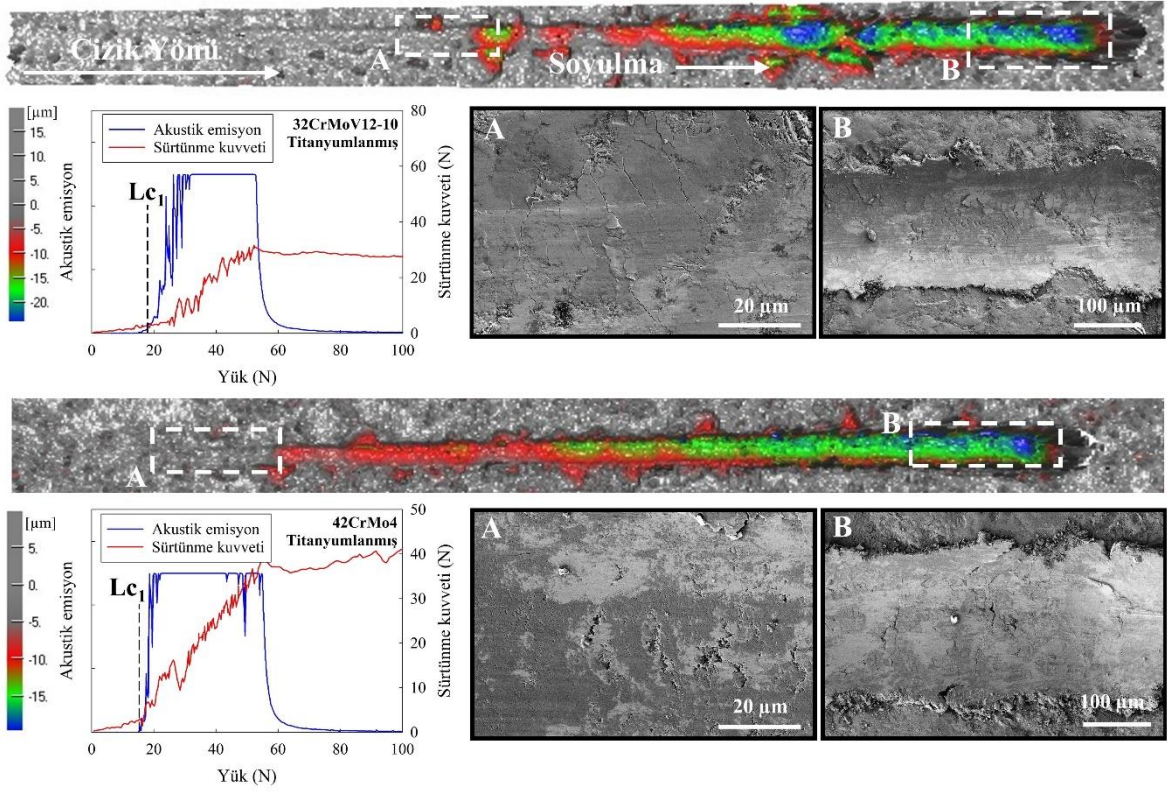
Şekil 32. Nitrürlenmiş numunelerin yüzeylerinde oluşan girinti izlerine ait SEM görüntüleri

Kaplanmış numunelerin çizik deneylerinden elde edilen görüntüler sırasıyla Şekil 33-36'da, çizik sırasında söz konusu numunelerde ilk çatlakla yol açan kritik yük değerleri ise Tablo 21'de verilmektedir. Genel olarak kaplamaların yüzeylerinde aşırı plastik deformasyon içeren çizik izlerinin ve çekme çatlaklarının oluştuğu, iz boyu etrafında ise kopmaların meydana geldiği gözlemlendi. Borlanmış durumda tek fazlı tabakaya sahip olan 42CrMo4 çeliğine ait numune ilk çatlak en yüksek yük değerinde oluşurken, aynı numunenin B1090 koşullarında borlanmış (çift fazlı) durumunda ilk çatlak en düşük yük değerinde meydana geldiği belirlendi. Diğer taraftan çift fazlı tabaka içeren borlanmış numunelerde belirgin soyulmaların oluştuğu, ancak tek fazlı tabaka içeren numunelerde bu durumun meydana gelmediği gözlemlendi. Ayrıca akustik emisyon değerlerindeki dalgalanmalardan ve derinlik ölçeğinden çatlakların artan adezyon kuvvetiyle devam ettiği, TiC ve TiB₂ tabakalarının belirli yük değerlerinden sonra yüzeyden kalktığı ve plastik deformasyonun alt tabakalarda meydana geldiği gözlemlendi. Nitrürlenmiş numunelerde ise çatlakların çizik izi boyunca sürekli meydana geldiği görüldü. Diğer taraftan borlama işleminden sonra titanyumlanan numunelerin yüzeylerindeki TiB₂ tabakası kalktıktan sonra oluşan izin daha düzgün olduğu, nispeten çatlak içermediği ve etrafında soyulmanın

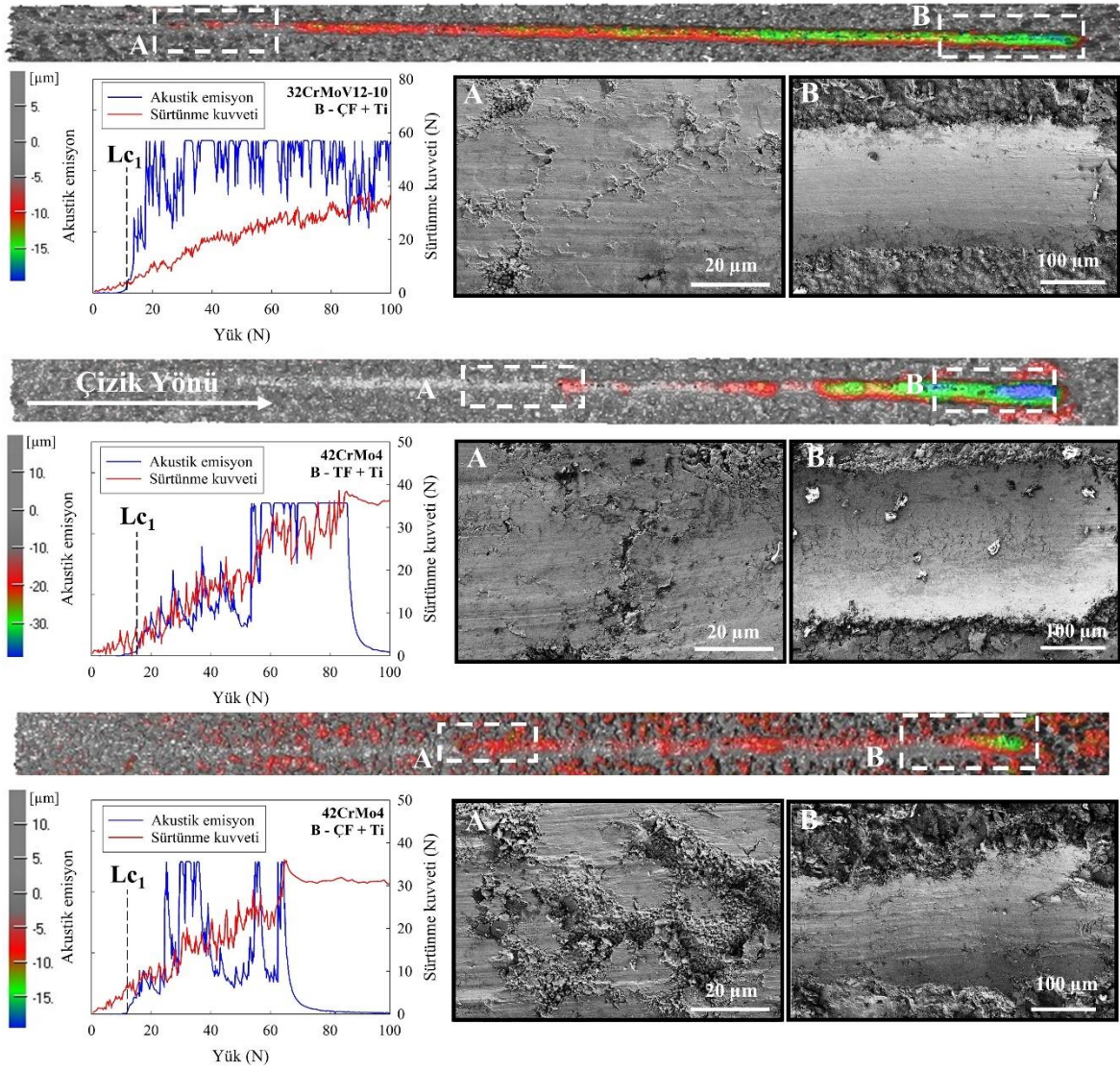
meydana gelmediği görüldü. Bu bulgulardan yola çıkarak borlama işleminden sonra titanyumlanmış numunelerin daha yüksek çizik direncine sahip oldukları sonucuna varıldı.



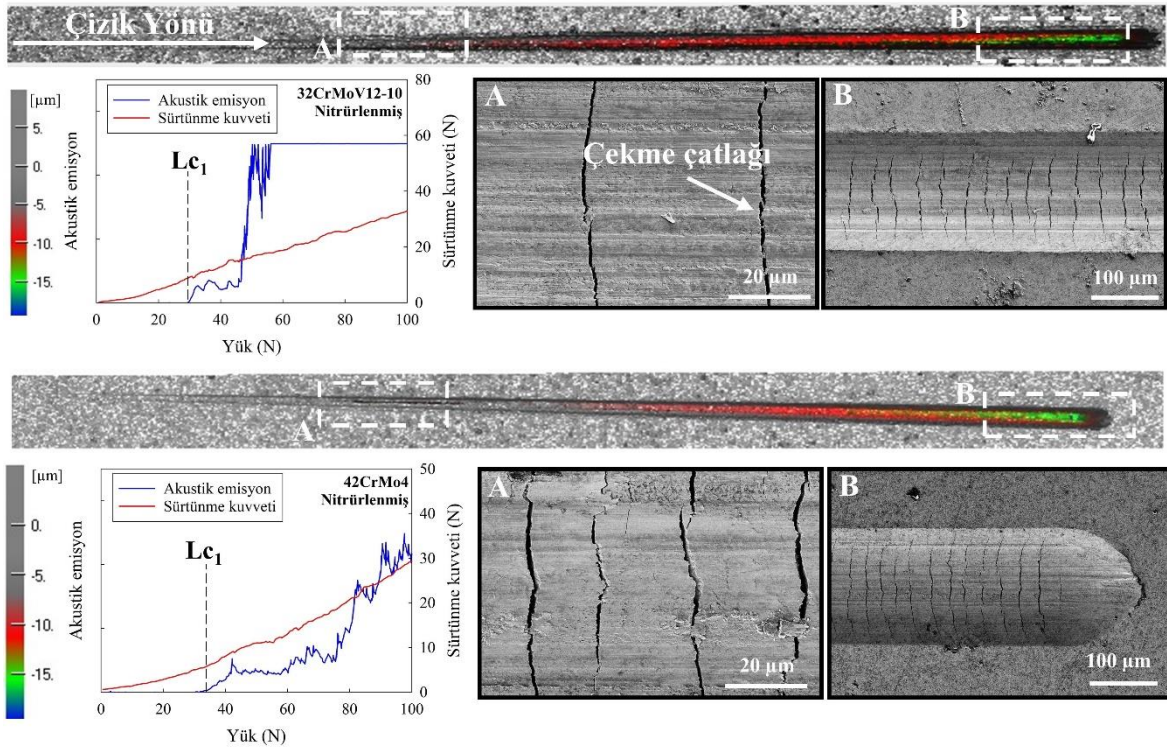
Şekil 33. Borlanmış numunelerin çizik deneylerinden elde edilen görüntü ve grafikler



Şekil 34. Titanyumlanmış numunelerin çizik deneylerinden elde edilen görüntü ve grafikler



Şekil 35. Borlandıktan sonra titanyumlanmış numunelerin çizik deneylerinden elde edilen görüntü ve grafikler



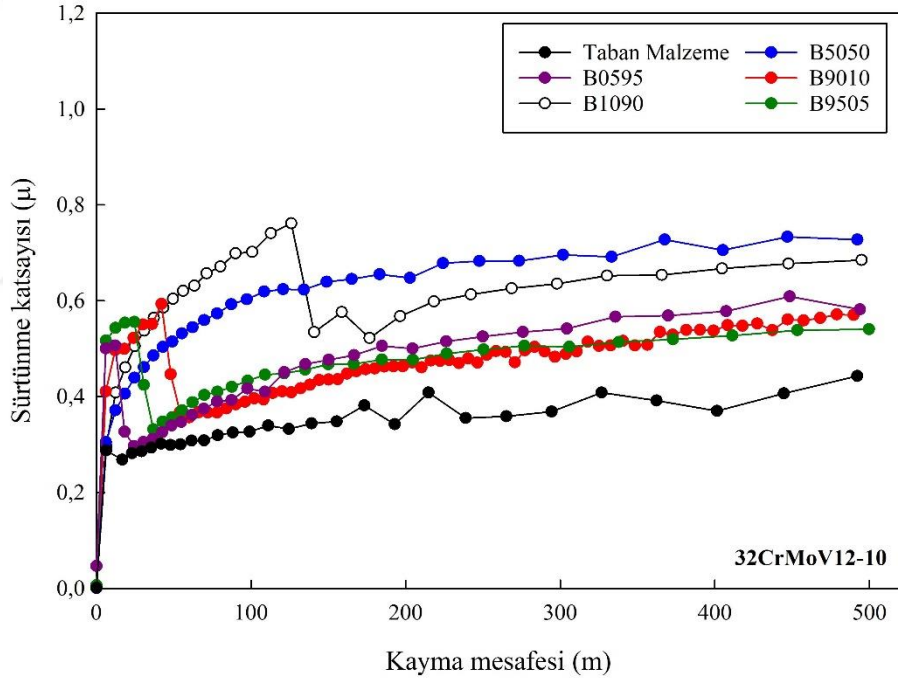
Şekil 36. Nitrülenmiş numunelerin çizik deneylerinden elde edilen görüntü ve grafikler

Tablo 21. Kaplama tabakalarında ilk çatlağa yol açan kuvvet (L_{c1}) değerleri

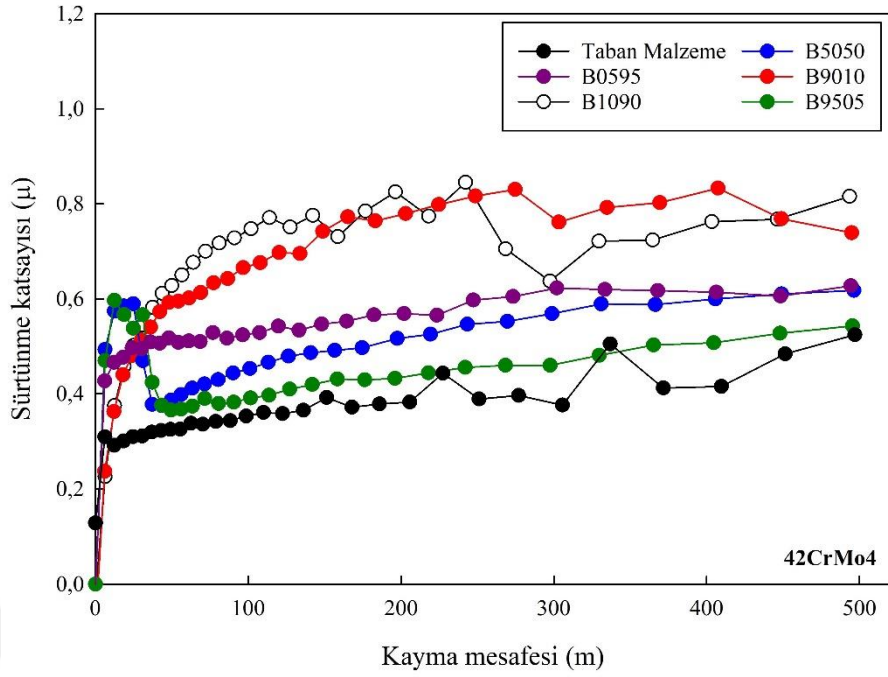
Numune	Numune durumu	Kritik Yük (N) (L_{c1})
32CrMoV12-10	Borlanmış: B5050 - 900°C - 3 saat	20,40
	Titanyumlanmış: (55+35+10) - 1100°C - 3 saat	16,88
	B - ÇF + Ti	13,34
	Nitrülenmiş	29,70
42CrMo4	Borlanmış: B0595 - 900°C - 3 saat	36,25
	Borlanmış: B1090 - 900°C - 3 saat	10,42
	Titanyumlanmış: (55+35+10) - 1100°C - 3 saat	15,83
	B - TF + Ti	15,88
	B - ÇF + Ti	12,00
	Nitrülenmiş	35,00

3.3. Sürtünme ve Aşınma Deneylerinden Elde Edilen Bulgular

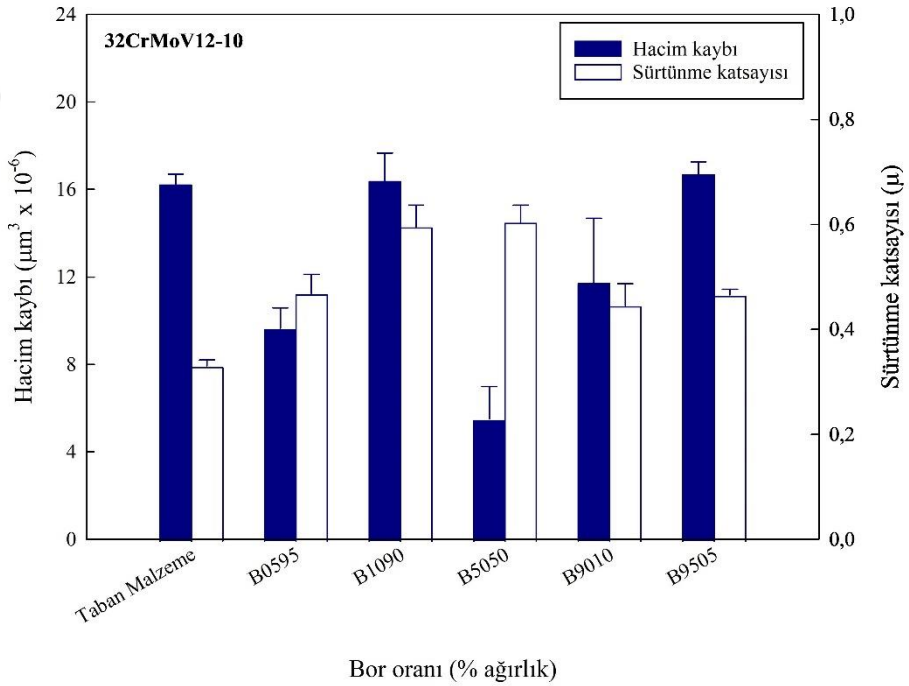
Farklı oranda bor içeren borlama karışımlarında, aynı sıcaklık ve sürede borlanmış 32CrMoV12-10 ve 42CrMo4 çeliklerine ait numunelerin sürtünme katsayısının alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler Şekil 37 ve Şekil 38’de verilmektedir. Numunelerin sürtünme katsayılarının çalışmanın başlangıç aşamasında arttığı daha sonra ani bir düşüşün ardından düşük bir eğimle tekrar arttığı görüldü. Numunelerin ortalama sürtünme katsayısı ile aşınma kaybının kullanılan bor karışımına göre değişimleri Şekil 39 ve Şekil 40’ta verilen çubuk grafiklerinde sunulmaktadır. 32CrMoV12-10 çeliğine ait numuneler içerisinde en düşük aşınma kaybı B5050 karışımı kullanılarak borlanan numuneden elde edildi. 42CrMo4 çeliğine ait numuneler arasında ise en düşük aşınma kaybını B0595 ve B1090 karışımlarında borlanmış (tek fazlı ve çift fazlı) numuneler sergiledi.



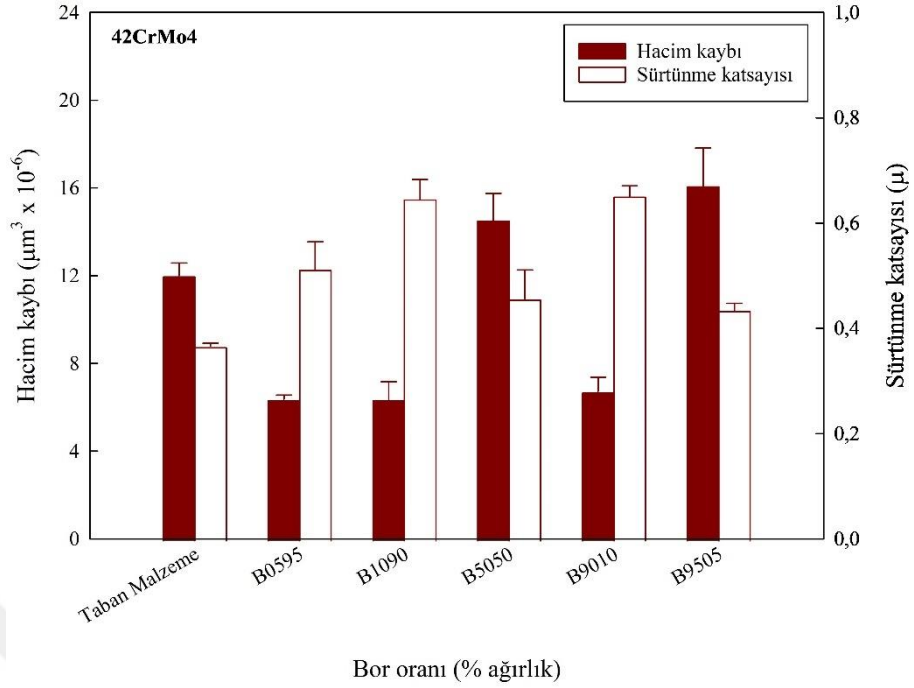
Şekil 37. 32CrMoV12-10 çeliğine ait borlanmış numunelerin sürtünme katsayılarının kayma mesafesine göre değişimini gösteren eğriler



Şekil 38. 42CrMo4 çeliğine ait borlanmış numunelerin sürtünme katsayılarının kayma mesafesine göre değişimini gösteren eğriler



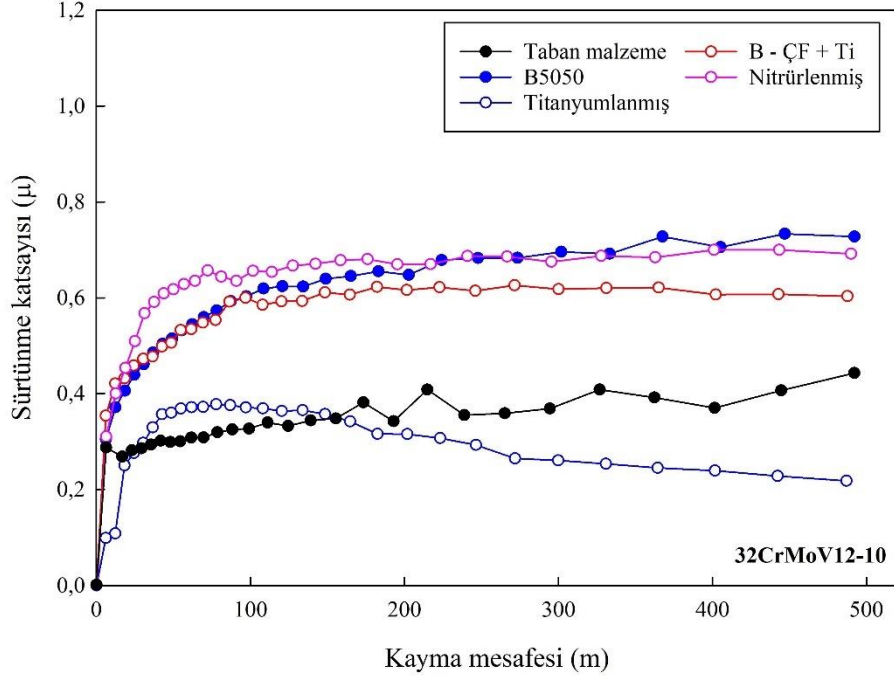
Şekil 39. Farklı oranda bor içeren borlama karışımlarında borlanmış 32CrMoV12-10 çeliğine ait numunelerin ortalama sürtünme katsayıları ve aşınma kayıpları



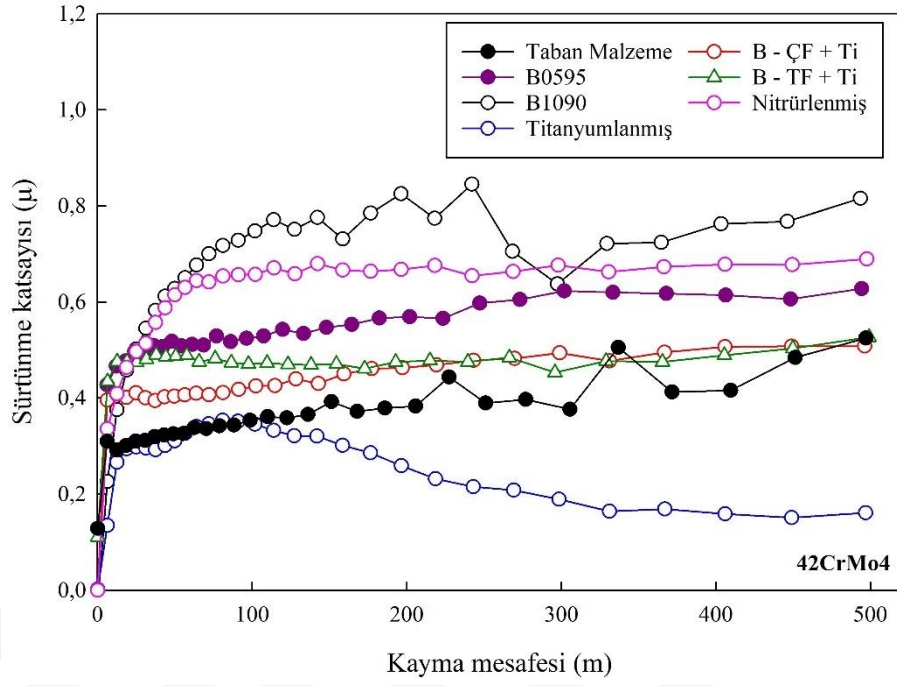
Şekil 40. Farklı oranda bor içeren borlama karışımlarında borlanmış 42CrMo4 çeliğine ait numunelerin ortalama sürtünme katsayıları ve aşınma kayıpları

Borlanmış durumda en düşük aşınma kaybı sergileyen numuneler ile bunların titanyumlanmış, sadece titanyumlanmış ve nitrürlenmiş durumlarının sürtünme katsayılarının kayma mesafesine göre değişimlerini gösteren eğriler sırasıyla Şekil 41 ve Şekil 42’de verilmektedir. Numunelerin sürtünme katsayılarının diğer numunelerde olduğu gibi kayma mesafesine göre benzer değişim sergilediği, sadece titanyum kaplanmış numuneler hariç diğer tüm numunelerin kaplanmamış numuneden daha yüksek sürtünme katsayısına sahip olduğu görüldü. Bu numunelerin aşınmış yüzeylerinin optik profilometre incelemelerinden elde edilen görüntü ve grafikler ise sırasıyla Şekil 43-47’de gösterilmektedir. Bu görüntüler üzerinden yapılan incelemeler sonucunda, borlandıktan sonra titanyumlanmış her iki çeliğe ait numuneler ile tek fazlı borlanmış durumda titanyumlanmış 42CrMo4 çeliğine ve nitrürlenmiş çeliklere ait numunelerin yüzeylerinde düzgün ve nispeten pürüzsüz bir aşınma izinin oluştuğu görüldü. Titanyumlanmış numunelerde ise aşınma izinin diğer numunelerinkinden çok daha derin olduğu belirlendi. Her iki çeliğe ait numunelerin ortalama sürtünme katsayıları ile aşınma izine ait üç boyutlu görüntülerden hesaplanan aşınma kaybı değerleri sırasıyla Şekil 48 ve Şekil 49’da verilen çubuk grafiklerinde karşılaştırılmaktadır. Bu karşılaştırmanın sonucunda nitrürlenmiş numunelerin kaplanmış numunelere göre daha üstün aşınma direnci sergiledikleri belirlendi. Diğer taraftan borlama işleminin ardından titanyumlanmış 32CrMoV12-10 çeliğine ait

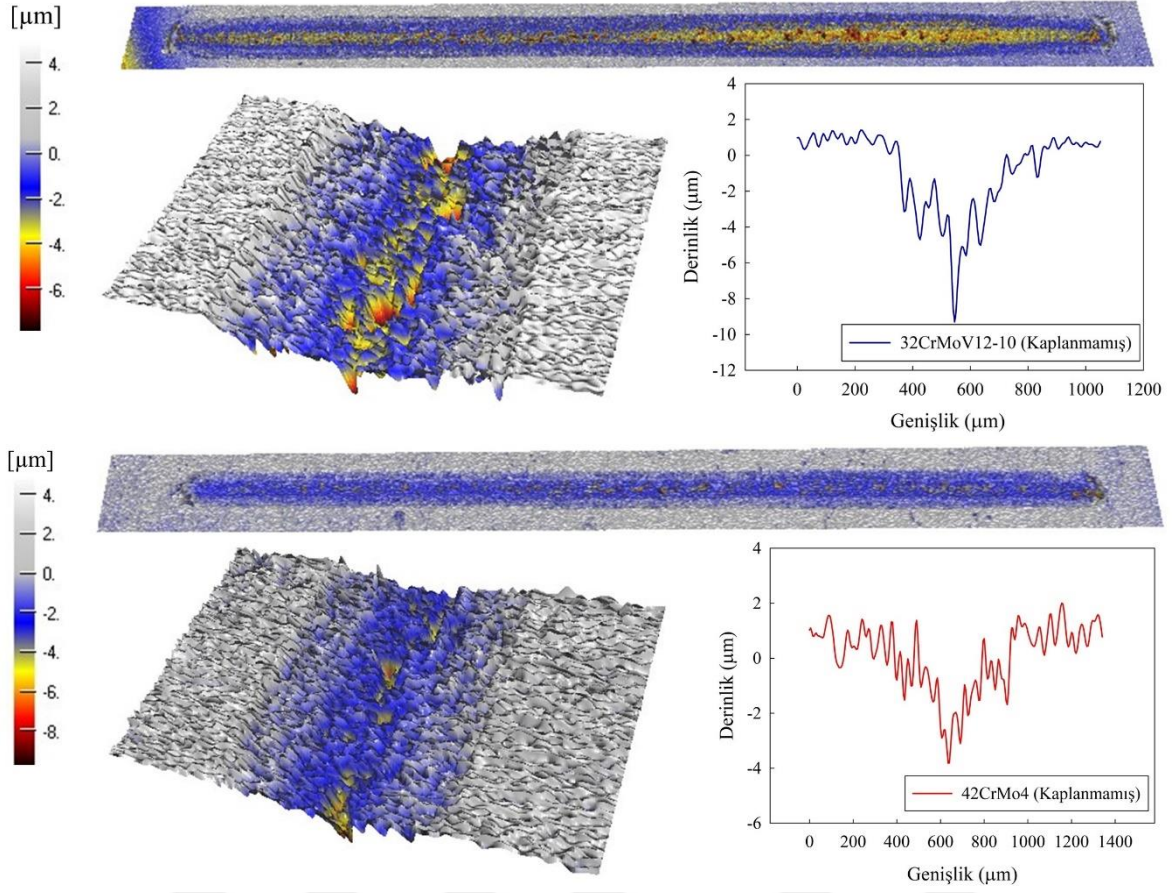
numunelerin borlanmış ve sadece titanyumlanmış durumlarına göre daha üstün aşınma direncine sahip oldukları görüldü. Diğer taraftan çift fazlı borür tabakası içeren 42CrMo4 çeliğine ait numunenin aşınma kaybının titanyumlama işleminden sonra borlanmış, titanyumlanmış ve tek fazlı borür tabakası üzerine titanyumlama işlemi uygulanmış durumlarına göre daha düşük olduğu belirlendi.



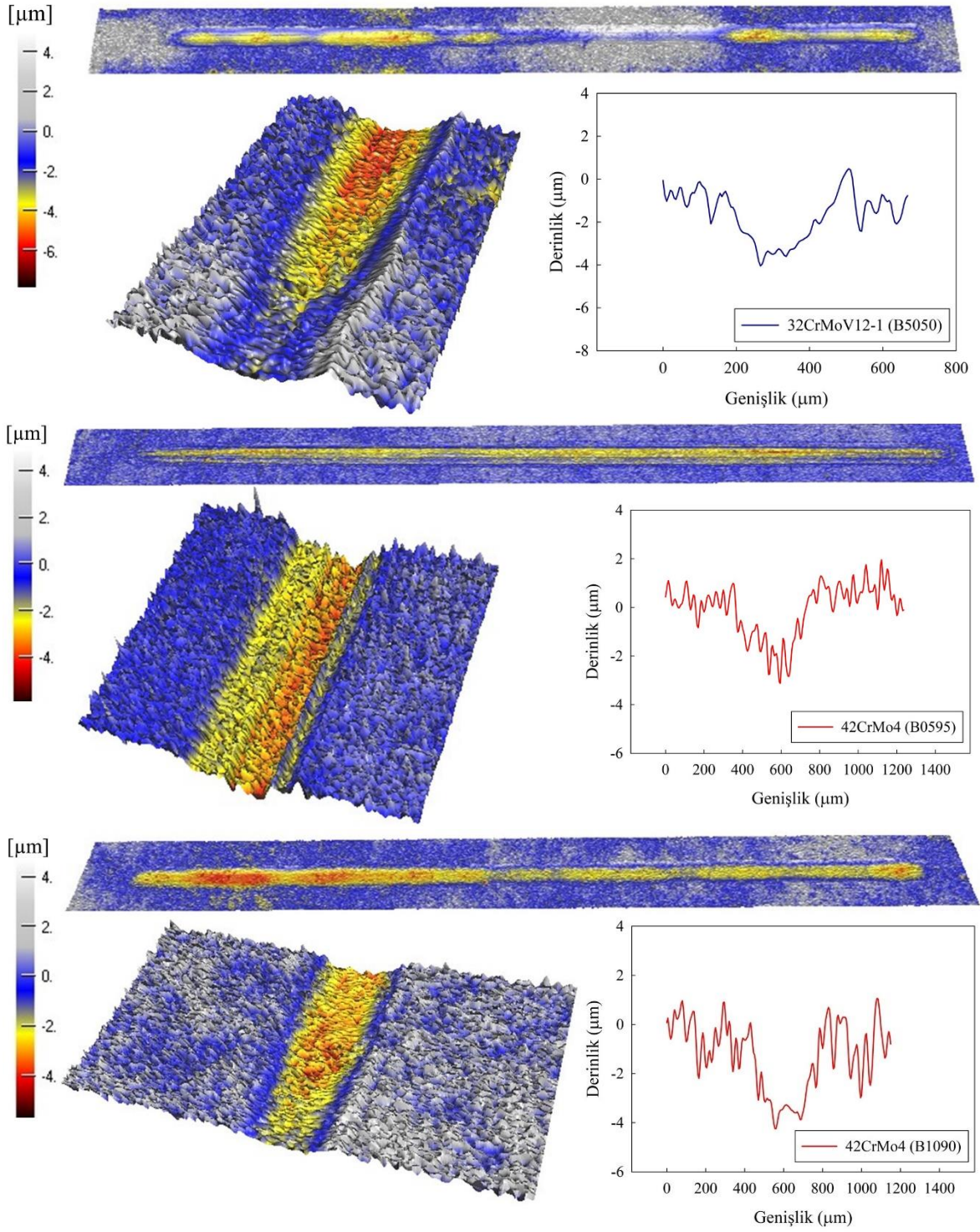
Şekil 41. Borlanmış, titanyumlanmış, borlandıktan sonra titanyumlanmış ve nitrürlenmiş 32CrMoV12-10 çeliğine ait numunelerin sürtünme katsayılarının kayma mesafesine göre değişimini gösteren eğriler



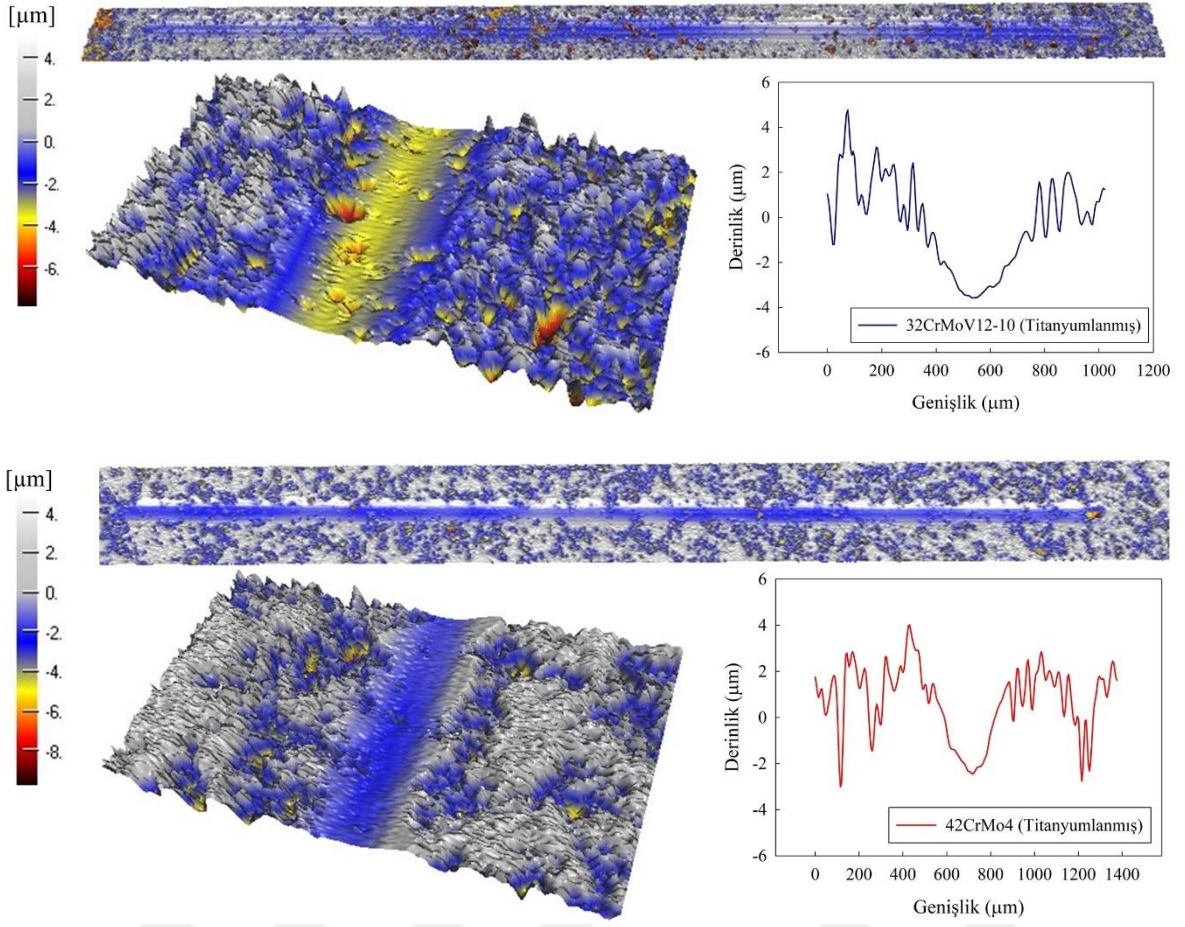
Şekil 42. Borlanmış, titanyumlanmış, borlandıktan sonra titanyumlanmış ve nitrürlenmiş 42CrMo4 çeliğine ait numunelerin sürtünme katsayılarının kayma mesafesine göre değişimini gösteren eğriler



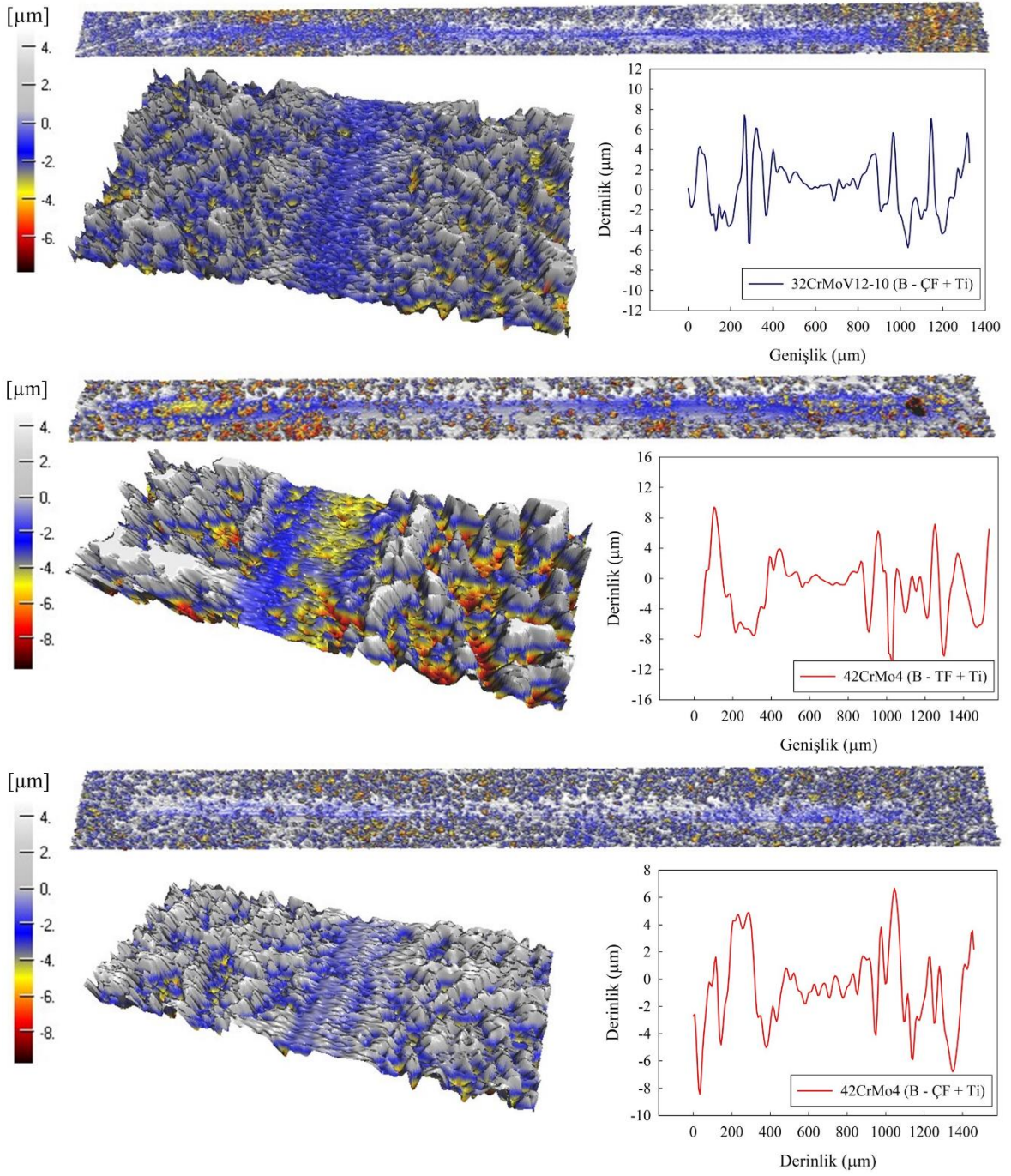
Şekil 43. Çeliklerin kaplanmamış durumuna ait numunelerin yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin optik profilometre ile elde edilen görüntüleri ve profilleri



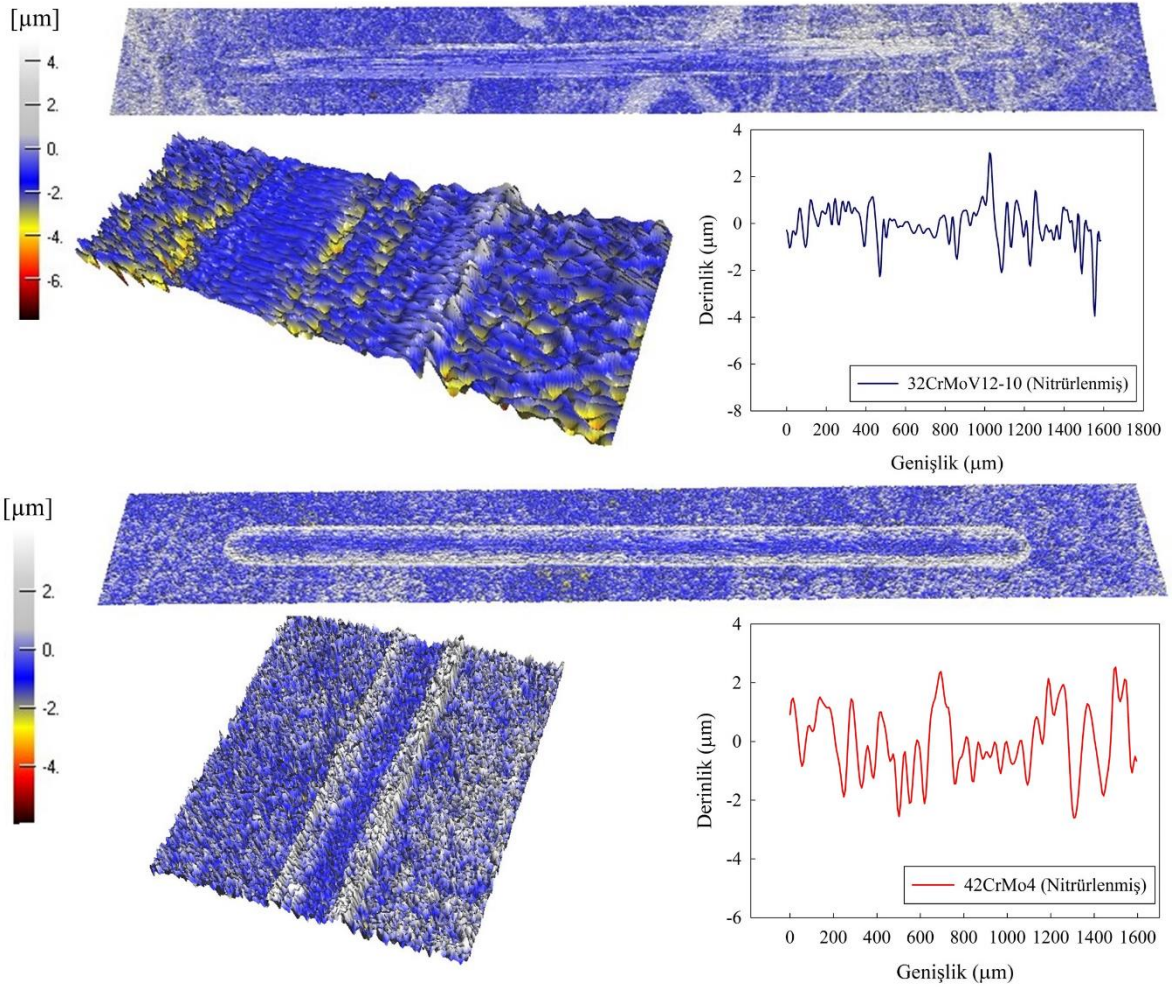
Şekil 44. Farklı oranda bor içeren borlama karışımında borlanmış çeliklere ait numunelerin yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin optik profilometre ile elde edilen görüntüleri ve profilleri



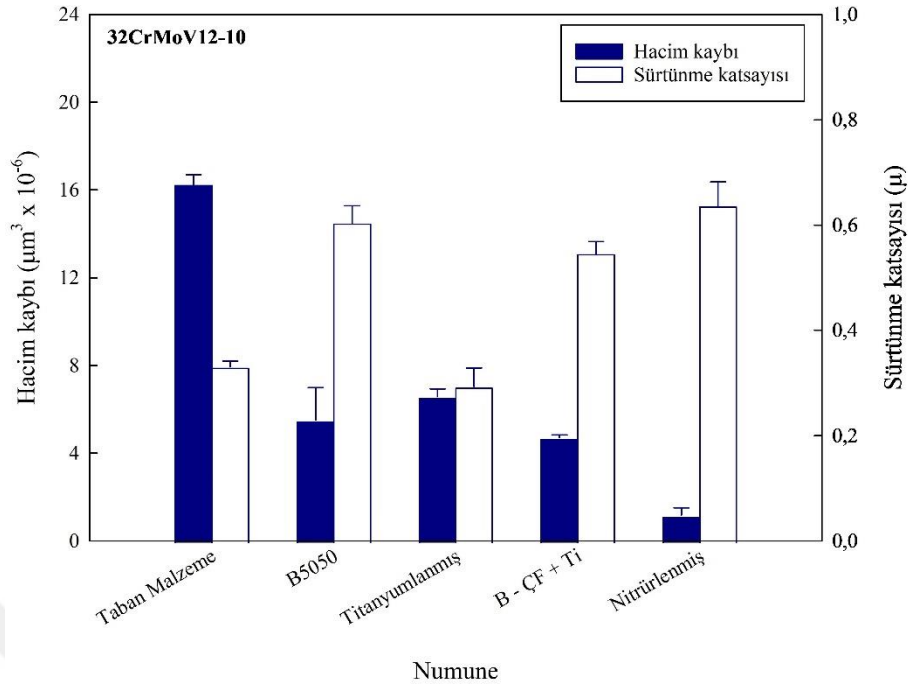
Şekil 45. Titanyumlanmış çeliklere ait numunelerin yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin optik profilometre ile elde edilen görüntüleri ve profilleri



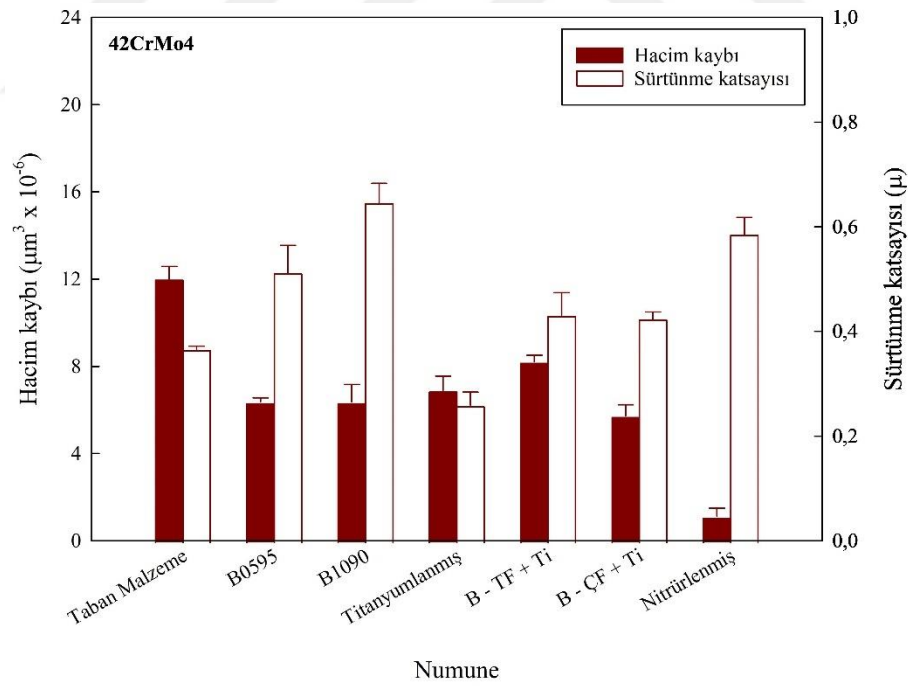
Şekil 46. Çeliklerin borlanmış ve ardından titanyumlanmış numunelerinin yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin optik profilometre ile elde edilen görüntüleri ve profilleri



Şekil 47. Çeliklerin nitr lenmi  numunelerinin yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin optik profilometre ile elde edilen görüntüleri ve profilleri



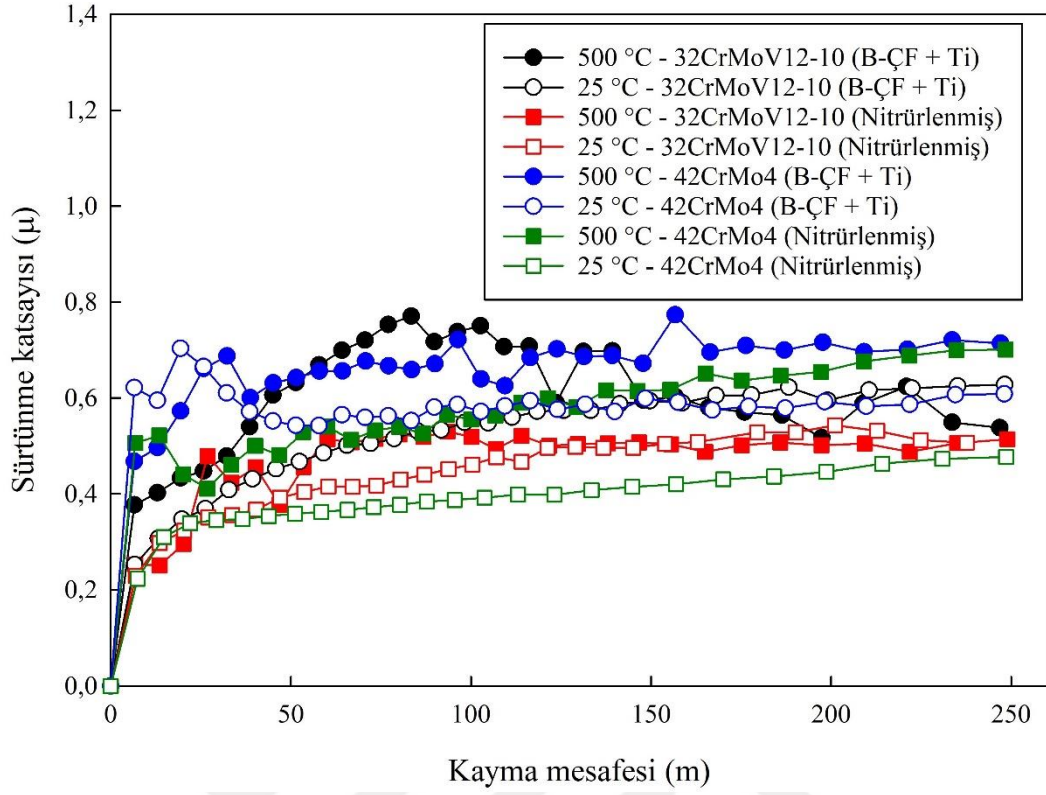
Şekil 48. 32CrMoV12-10 çeliğine ait numunelerin ortalama sürtünme katsayıları ve aşınma kayıpları



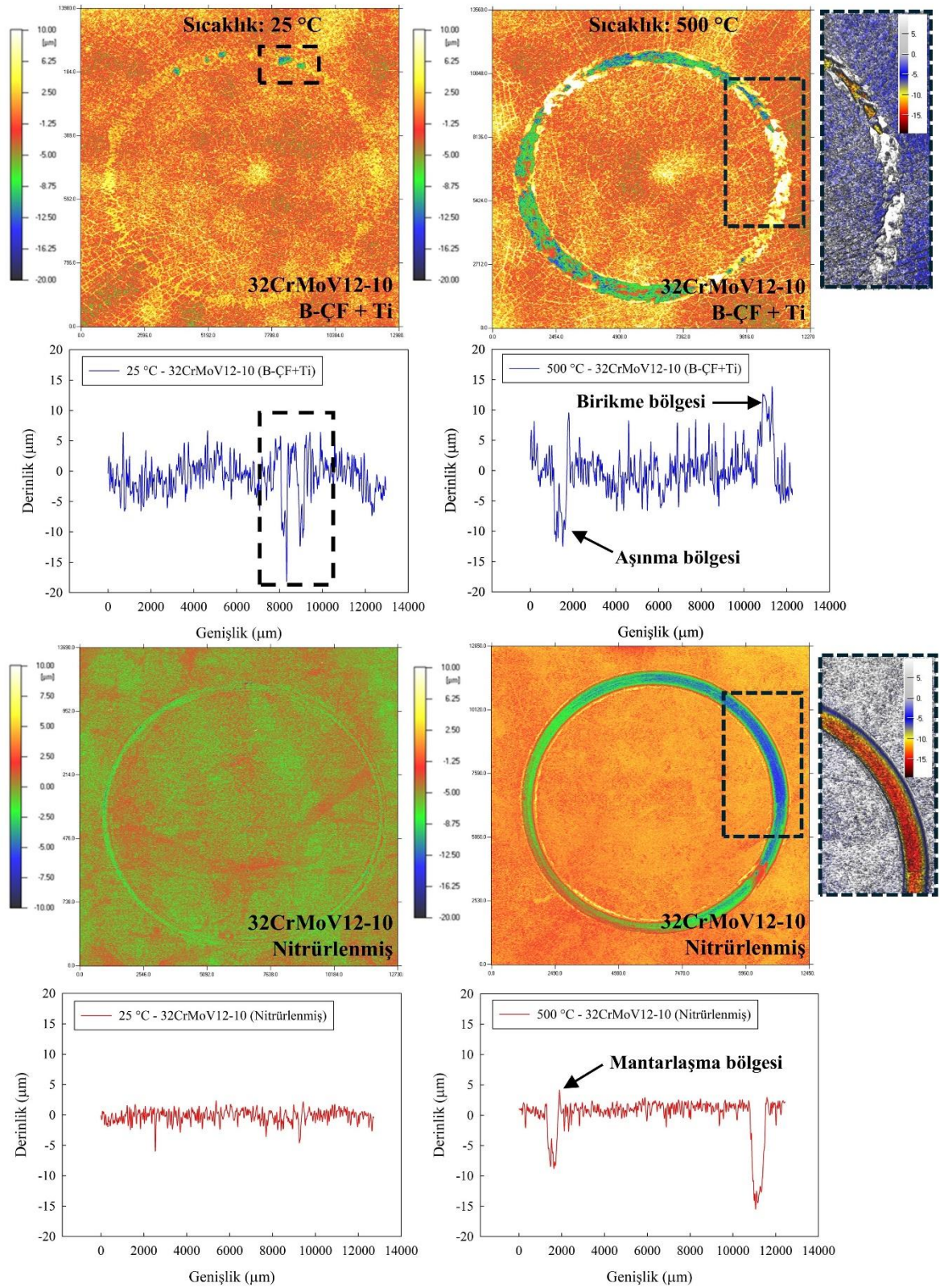
Şekil 49. 42CrMo4 çeliğine ait numunelerin ortalama sürtünme katsayıları ve aşınma kayıpları

Yukarıdaki incelemelerden yola çıkarak, en yüksek aşınma direnci nitrürlenmiş 32CrMoV12-10 ve 42CrMo4 çeliklerine ait numunelerden ve söz konusu çeliklerin

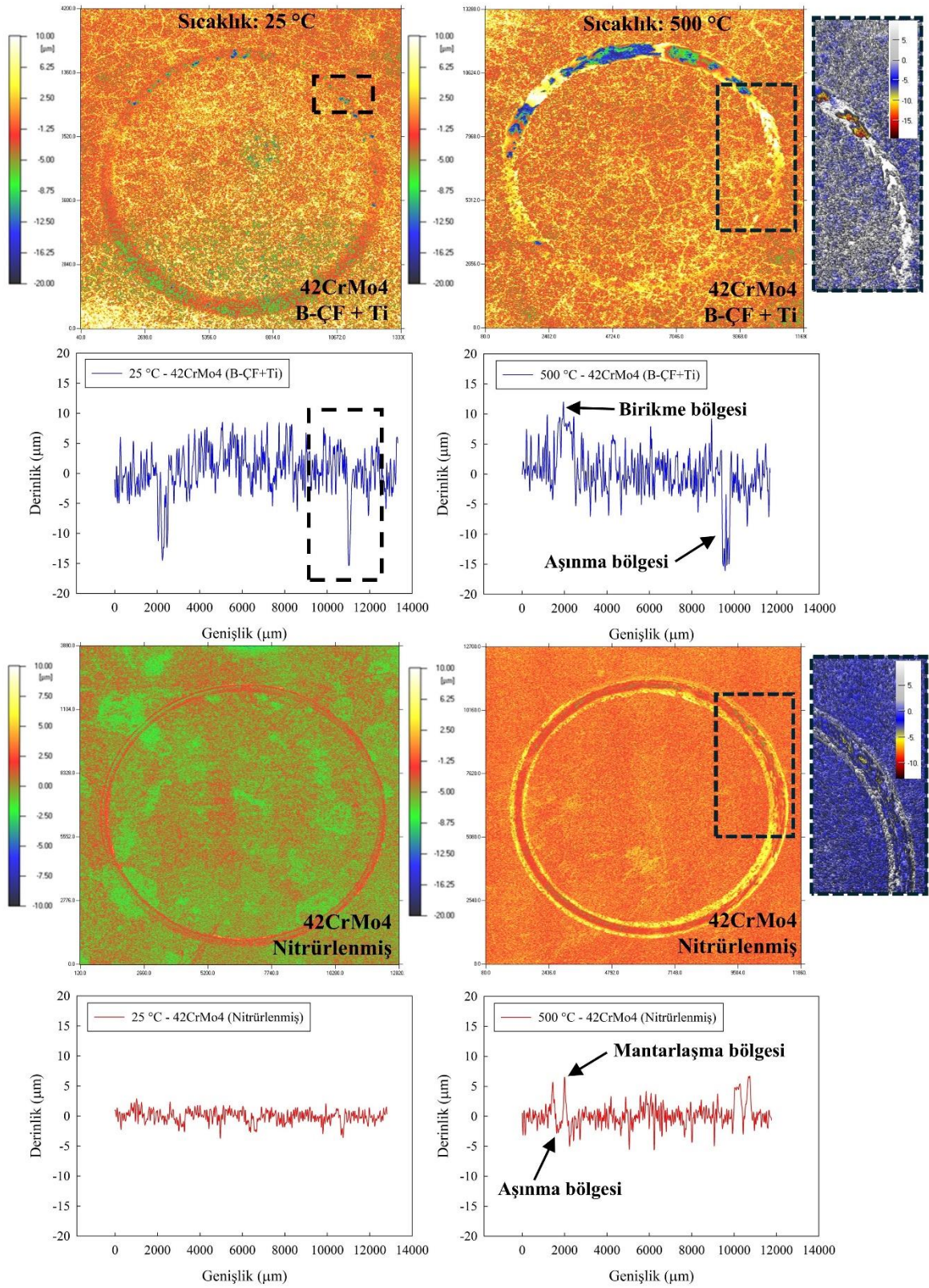
borlandıktan sonra çift faz içeren numunelerinin titanyumlanmış durumlarından elde edildi. Bu nedenle söz konusu numunelerin 25 °C (oda sıcaklığı) ve 500 °C sıcaklıklar altındaki sürtünme ve aşınma davranışları karşılaştırıldı. Numunelerin bu sıcaklıklar altındaki sürtünme katsayılarının kayma yoluna göre değişimleri Şekil 50’de verilmektedir. Bu eğrilerden numunelerin sürtünme katsayılarının başlangıçta ani bir artış sergiledikleri kısa bir kayma mesafesi içerisinde azaldıktan sonra kararlı durumlarına ulaştıkları görüldü. Bu çeliklerin aşınmış yüzeylerine ait optik profilometre görüntüleri ise sırasıyla Şekil 51 ve Şekil 52’de sunulmaktadır. Bu görüntülerden yüksek sıcaklık altında titanyumlanmış numunelerin yüzeylerindeki aşınma izinin bir bölümünde aşınma derinliği yerine yükseltisinin meydana geldiği belirlendi. Bu durum söz konusu ize ait derinlik-genişlik eğrileri ile de doğrulandı. Diğer taraftan, titanyumlanmış numunelerde yüksek sıcaklıklarda aşınan parçacıkların aşınma izi yüzeyine yapışma eğilimi sergiledikleri gözlemlendi. Nitrürlenmiş numunelerin yüksek sıcaklıklardaki aşınma deneylerinden sonra yüzeylerinde geniş ve derin bir aşınma izinin meydana geldiği ve bu izin etrafında mantarlaşma oluştuğu belirlendi. Numunelerin aşınma izi profillerinden hesaplanan aşınma kaybı değerleri ile ortalama sürtünme katsayılarının sıcaklığa göre değişimleri Şekil 53 ve Şekil 54’te verilmektedir. Bu eğrilerden numunelerin ortalama sürtünme katsayılarının artan sıcaklıkla arttığı, aşınma kayıplarının ise azaldığı görüldü. Diğer taraftan borlandıktan sonra titanyumlanmış çeliklere ait numunelerin yüksek sıcaklıklarda nitrürlenmiş numunelerden daha üstün aşınma direnci sergiledikleri belirlendi.



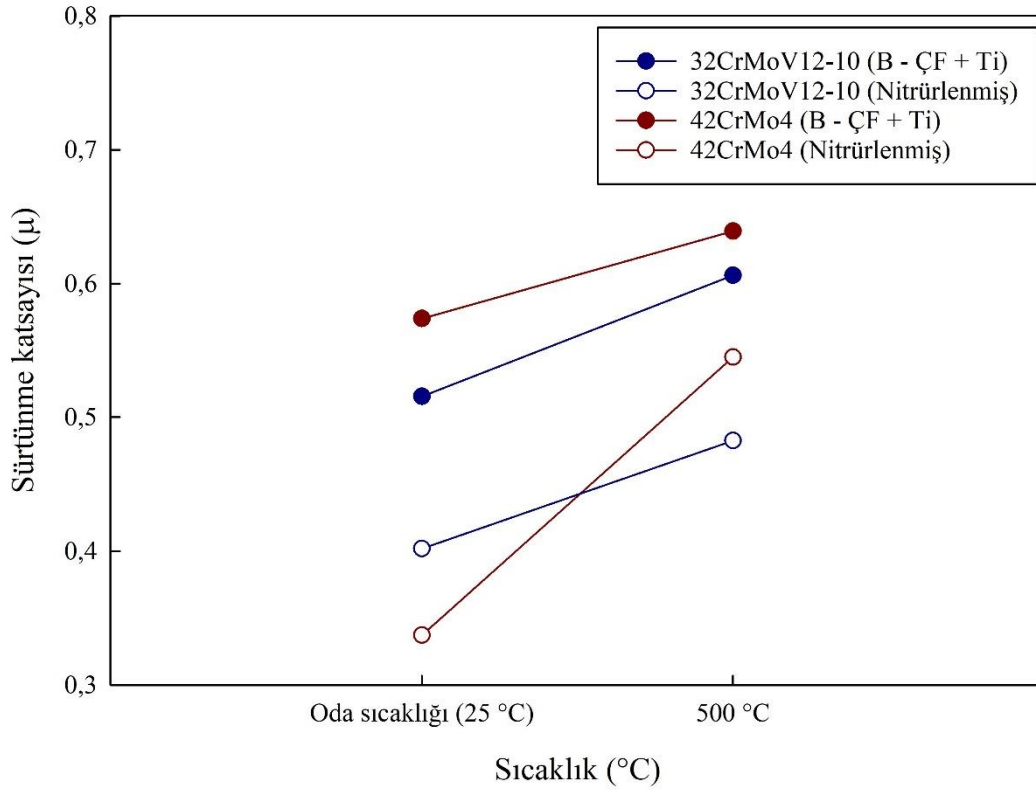
Şekil 50. Nitrürlenmiş ve borlandıktan sonra titanyumlanmış numunelerin sürtünme katsayılarının kayma mesafesine göre değişimlerini gösteren eğriler



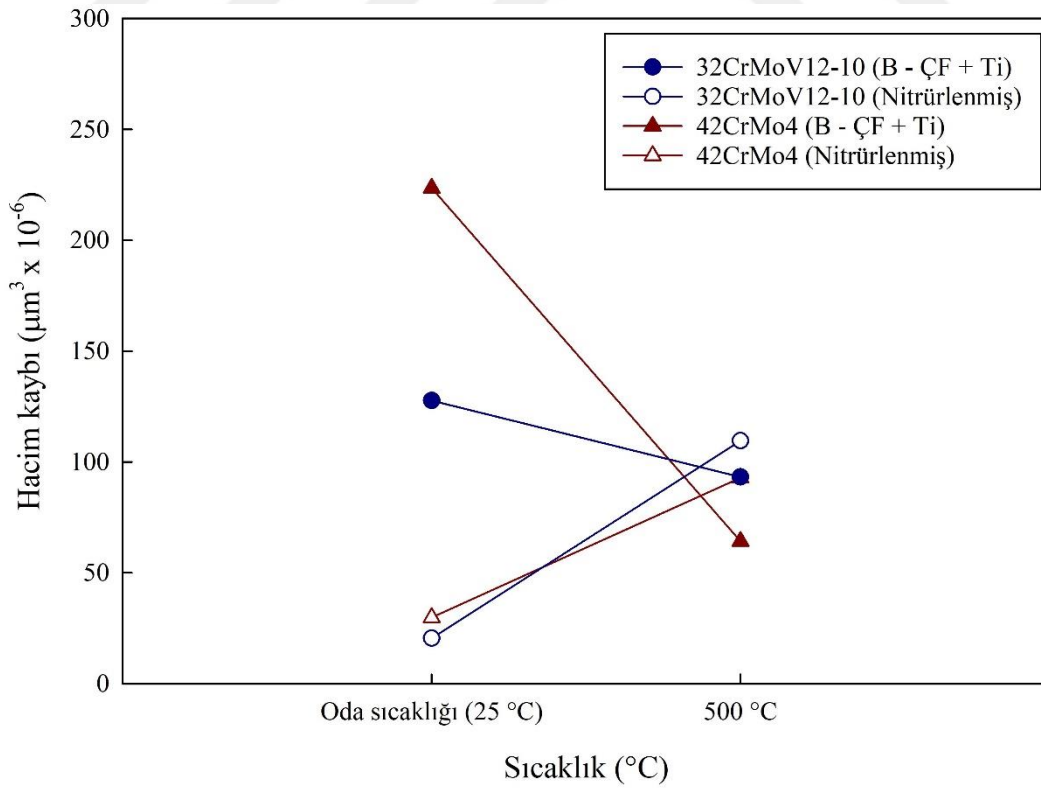
Şekil 51. 25 °C ve 500 °C sıcaklıklarda aşınma deneylerine tabi tutulan borlandıktan sonra titanyumlanmış ve sadece nitrürlenmiş 32CrMoV12-10 çeliğine ait numunelerin yüzeylerinden alınan optik profilometre görüntüleri ve aşınma profilleri



Şekil 52. 25 °C ve 500 °C sıcaklıklarda aşınma deneylerine tabi tutulan borlandıktan sonra titanyumlanmış ve sadece nitrülenmiş 42CrMo4 çeliğine ait numunelerin yüzeylerinden alınan optik profilometre görüntüleri ve aşınma profilleri



Şekil 53. Nitrürlenmiş ve borlandıktan sonra titanyumlanmış numunelerin ortalama sürtünme katsayılarının sıcaklığa göre değişimini gösteren eğriler

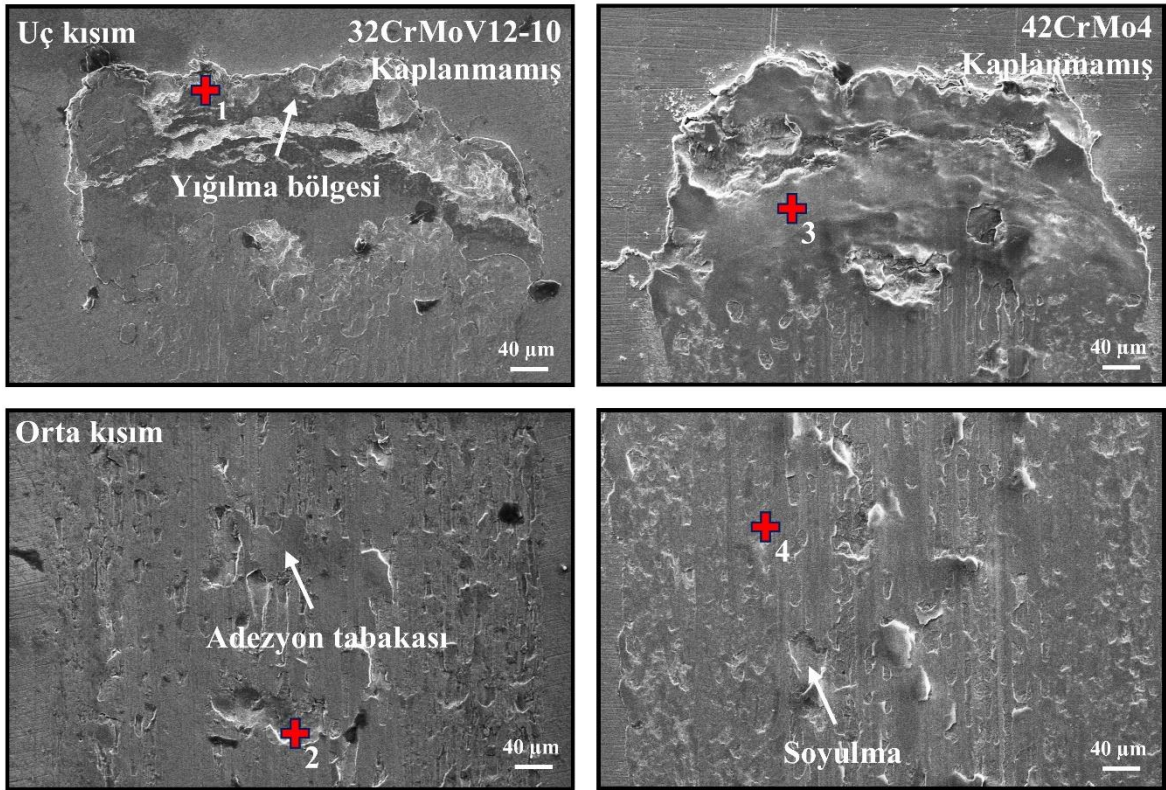


Şekil 54. Nitrürlenmiş ve borlandıktan sonra titanyumlanmış numunelerin aşınma kayıplarının sıcaklığa göre değişimlerini gösteren eğriler

3.4. Aşınma Yüzeylerinin ve Parçacıklarının İncelenmesinden Elde Edilen Bulgular

Kaplanmış ve kaplanmamış çeliklere ait numunelerin ileri-geri hareketli deney düzeneğinde yapılan aşınma deneyleri sonucunda yüzeylerinde oluşan aşınma izinin uç ve orta kısımlarından alınan SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 55 – Şekil 60'ta verilmektedir. Bu yüzeylerden yapılan EDS analizleri sonuçları ise her bir görüntüden sonra sırasıyla Tablo 22 - Tablo 26'da sunulmaktadır. Kaplanmamış çeliğin aşınma yüzeylerinde adezyon tabakalarının oluştuğu, bu tabakaların yer yer soyulduğu ve oluşan parçacıkların bir bölümünün aşınma izinin uç kısımlarına doğru itilerek sıkıştırıldığı görüldü. EDS analizlerinden aşınma izinin uç kısımlarının orta kısmına göre daha yüksek oranda oksijen ve volfram içerdiği belirlendi. Adezyon tabakalarının ise ağırlıklı demir olmak üzere karşı yüzeyden gelen elementleri içerdiği görüldü. Borlanmış çeliklere ait numunelerin ise aşınma yüzeylerinin borlama karışımının bor oranına, tek ve çift fazlı oluşuna göre değişim sergilediği gözlemlendi. B1090 (bor oranı düşük) karışımında borlanmış 32CrMoV12-10 çeliğine ait numunelerin aşınma yüzeyinde yoğun kopmaların meydana geldiği ve nispeten çatlakların oluştuğu görüldü. Söz konusu çeliğin B5050 (bor oranı yüksek) karışımında borlanmış numunelerinin aşınma yüzeyinde çatlak yoğunluğunun arttığı, küçük parçacıklar halinde yer yer soyulmaların meydana geldiği gözlemlendi. Genel olarak borlanmış, titanyumlanmış ve borlandıktan sonra titanyumlanmış çeliklere ait numunelerin yüzeylerinde ince taşlamaya benzer homojen bir abrazyon aşınmanın meydana geldiği, aşınma izinin uç kısımlarında oksijen ve demir içeriği yüksek aşınma parçacıklarının seyrekte olsa biriktikleri belirlendi. Diğer taraftan soyulan bölgelerde de yüksek oranda oksijen tespit edildi. Tek fazlı borür tabakası içeren 42CrMo4 çeliğine ait numunenin aşınma yüzeyinin çift fazlı durumuna göre çok daha az çatlak içerdiği gözlemlendi. Nitekim bu numunelerin aşınma yüzeyinin soyulmadan bütünlüğünü koruduğu görüldü. Titanyumlanmış ve borlandıktan sonra titanyumlanmış çeliklere ait numunelerin aşınma yüzeylerindeki aşınma tabakasının düzgün, pürüzsüz ve parlak bir görünüme sahip olduğu gözlemlendi. Ancak titanyumlanmış çeliklere ait numunelerin aşınma yüzeylerindeki TiC tabakasının yer yer soyulduğu görüldü. EDS analizleri soyulan bölgelerin bazılarının yüksek oranda demir, düzgün ve pürüzsüz bölgelerin ise yüksek oranda titanyum içerdiğini gösterdi. Diğer taraftan bu numunelere ait aşınma izinin uç kısımlarında oksijen içeriği yüksek ezilmiş veya sıkıştırılmış aşınma parçacıkları gözlemlendi.

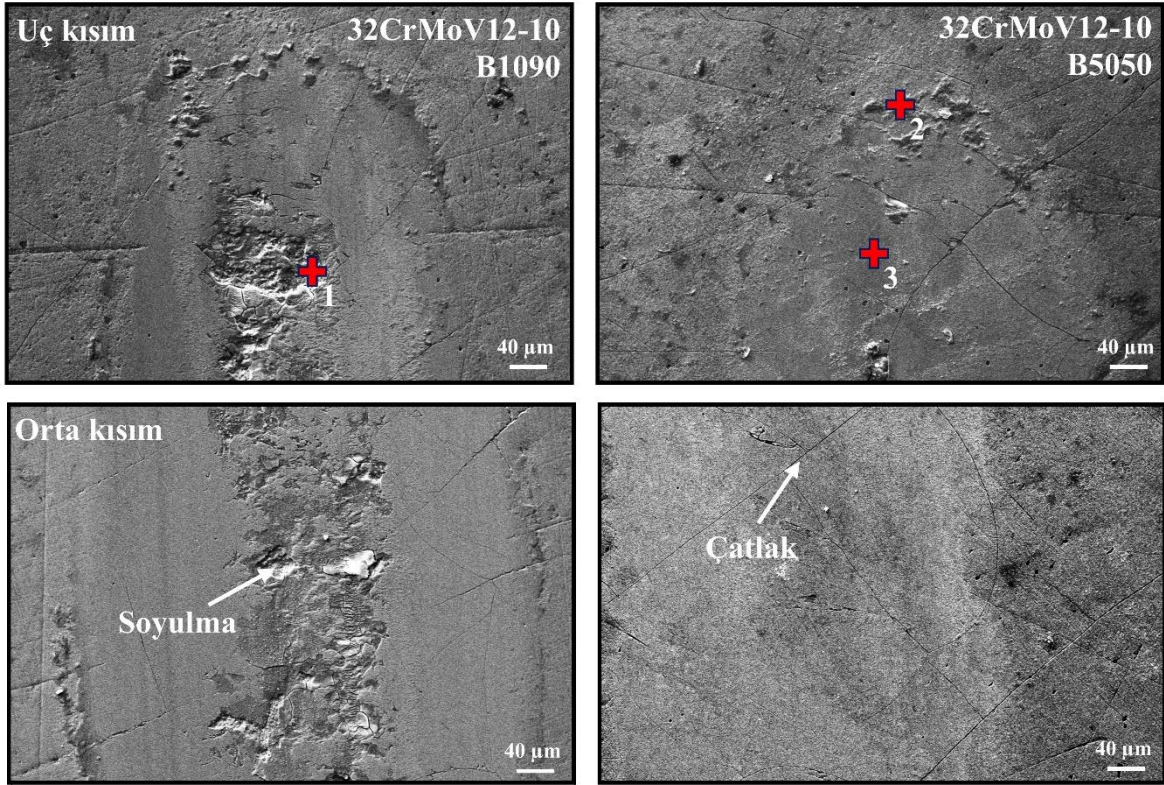
Nitr rl nmiş 32CrMoV12-10  eliğine ait numunelerin aşınma yüzeylerinde adezyon tabakalarının yanı sıra çok ince çiziklerin meydana geldiği gözlendi. Nitr rl nmiş 42CrMo4  eliğine ait numunelerin aşınma yüzeylerinde ise $Fe_{3,4}N$ tabakasının yer yer soyulduğu görüldü. Bu numunelerin uç bölgelerine de aşınma parçacıklarının toplandığı gözlendi. EDS analizleri aşınma izinin uç bölgelerinde oksijen, orta bölgelerinde ise demir ve azot oranının yüksek olduğunu gösterdi.



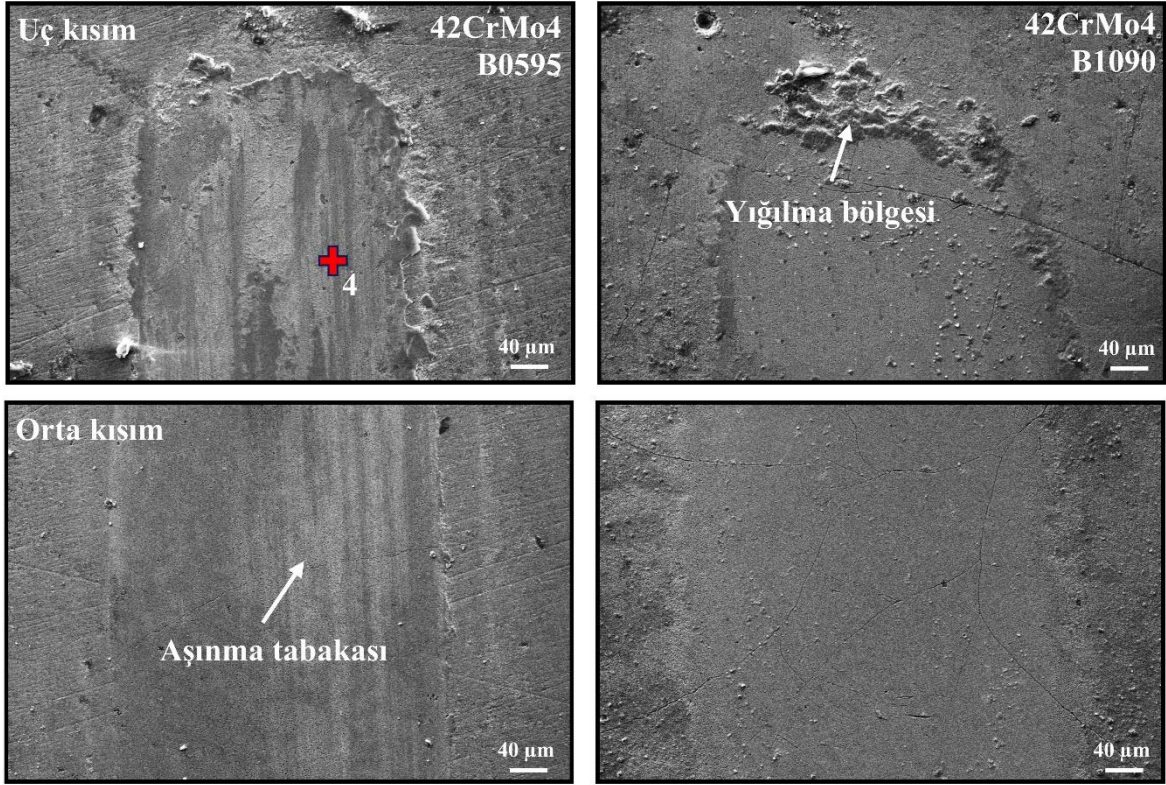
şekil 55. Kaplanmamış numunelerin yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin uç ve orta bölgelerine ait SEM görüntüleri

Tablo 22. Kaplanmamış numunelerin yüzeylerinde oluşan aşınma izinin bazı bölgelerinden alınan EDS analizi sonuçları

Element (% ağırlık)	EDS analizi yapılan bölgeler			
	EDS 1	EDS 2	EDS 3	EDS 4
C	8,03	11,17	6,28	6,64
O	24,04	17,13	33,39	10,17
Fe	45,81	63,73	41,65	74,33
W	17,41	6,50	15,54	5,72
Co	1,87	1,28	1,60	1,24
Cr	2,16	2,58	1,02	1,20
Mo	0,68	0,61	0,52	0,70



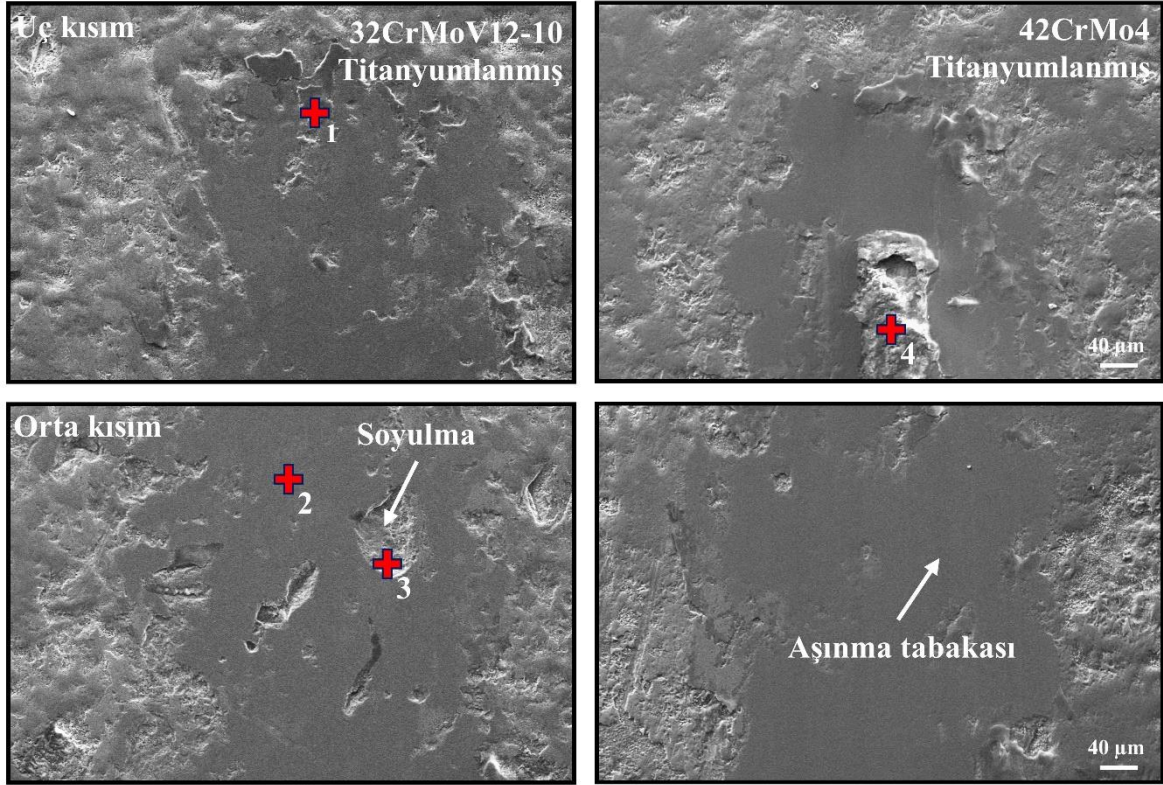
Şekil 56. Farklı oranda bor içeren borlama karışımlarında borlanmış 32CrMoV12-10 çeliğine ait numunelerin yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin uç ve orta bölgelerinin SEM görüntüleri



Şekil 57. Farklı oranda bor içeren borlama karışımlarında borlanmış 42CrMo4 çeliğine ait numunelerin yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin uç ve orta bölgelerinin SEM görüntüleri

Tablo 23. Borlanmış numunelerin yüzeylerinde oluşan aşınma izinin bazı bölgelerinden alınan EDS analizi sonuçları

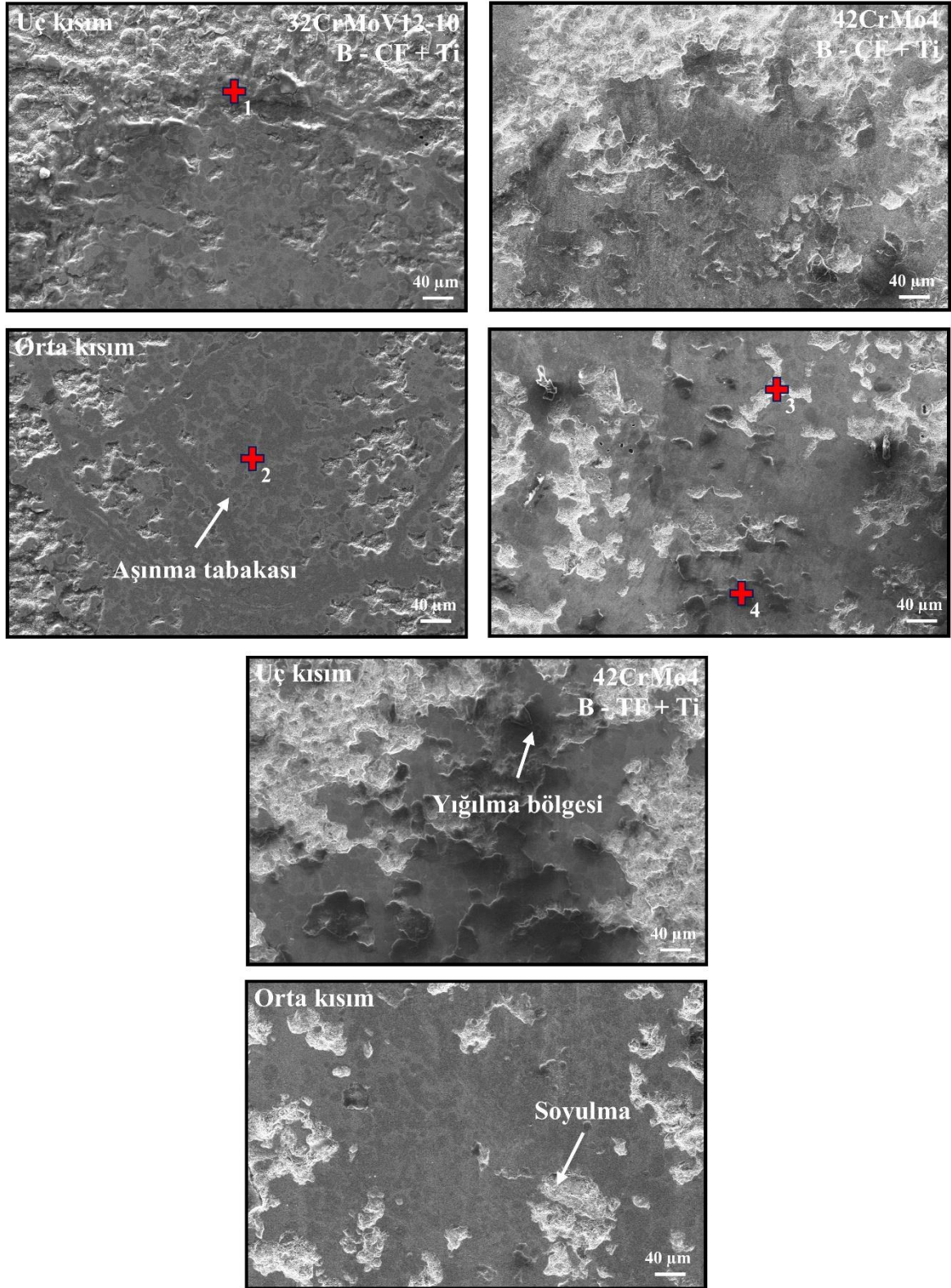
Element (% ağırlık)	EDS analizi yapılan bölgeler			
	EDS 1	EDS 2	EDS 3	EDS 4
B	4,51	5,17	12,30	7,02
C	7,56	13,26	9,42	8,43
O	27,33	27,78	6,88	2,81
Fe	57,07	50,22	66,23	75,81
W	2,52	2,69	4,15	4,47
Co	1,04	0,88	1,02	1,46



Şekil 58. Titanyumlanmış numunelerin yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin uç ve orta bölgelerine ait SEM görüntüleri

Tablo 24. Titanyumlanmış numunelerin yüzeylerinde oluşan aşınma izinin bazı bölgelerinden alınan EDS analizi sonuçları

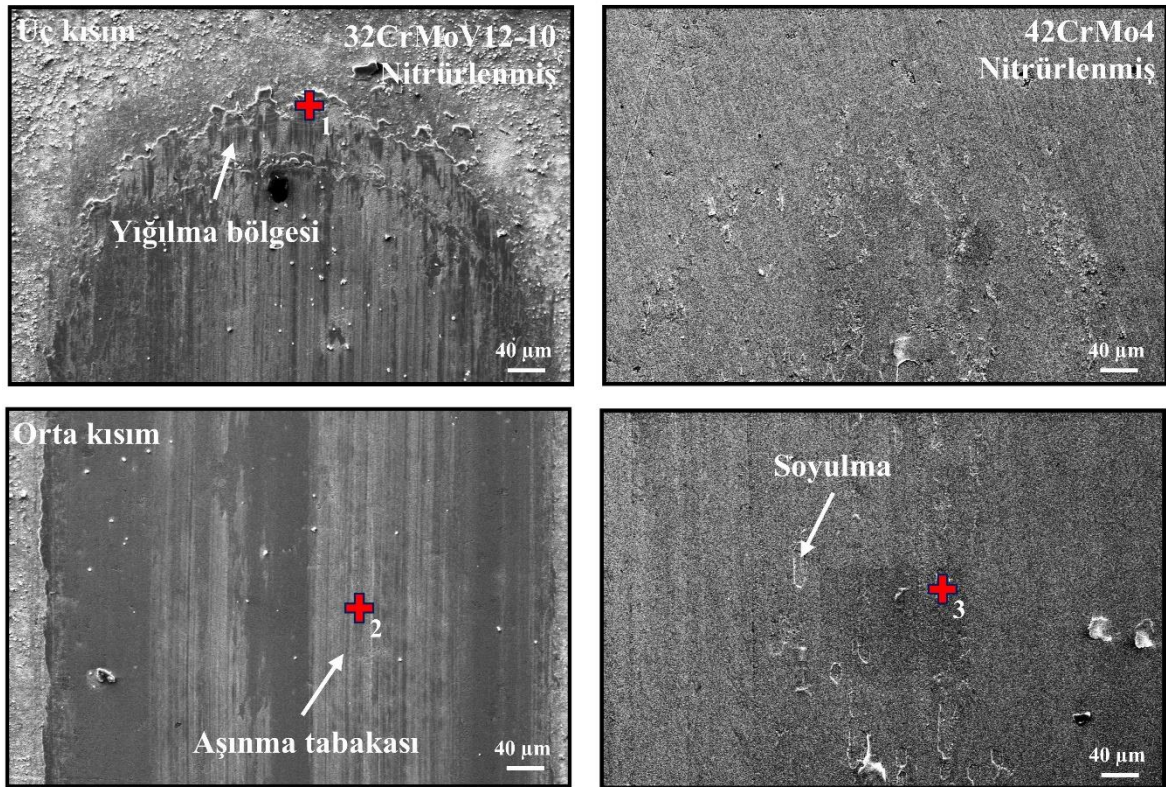
Element (% ağırlık)	EDS analizi yapılan bölgeler			
	EDS 1	EDS 2	EDS 3	EDS 4
Ti	44,08	71,40	56,66	40,50
C	5,12	18,85	26,72	6,67
O	44,51	4,30	11,51	46,06
Fe	2,35	1,23	1,53	2,57
W	3,67	3,37	3,00	3,64
Co	0,70	0,85	0,58	0,56



Şekil 59. Borlanmış ve ardından titanyumlanmış numunelerin yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin uç ve orta bölgelerine ait SEM görüntüleri

Tablo 25. Borlanmış ve ardından titanyumlanmış numunelerin yüzeylerinde oluşan aşınma izinin bazı bölgelerinden alınan EDS analizi sonuçları

Element (% ağırlık)	EDS analizi yapılan bölgeler			
	EDS 1	EDS 2	EDS 3	EDS 4
B	6,41	17,40	2,83	5,62
Ti	27,03	56,50	64,86	3,84
C	4,17	7,19	7,96	10,50
O	53,28	10,92	7,75	73,45
Fe	5,13	3,68	13,39	2,02
W	3,54	3,72	2,62	3,83
Co	0,44	0,59	0,59	0,74

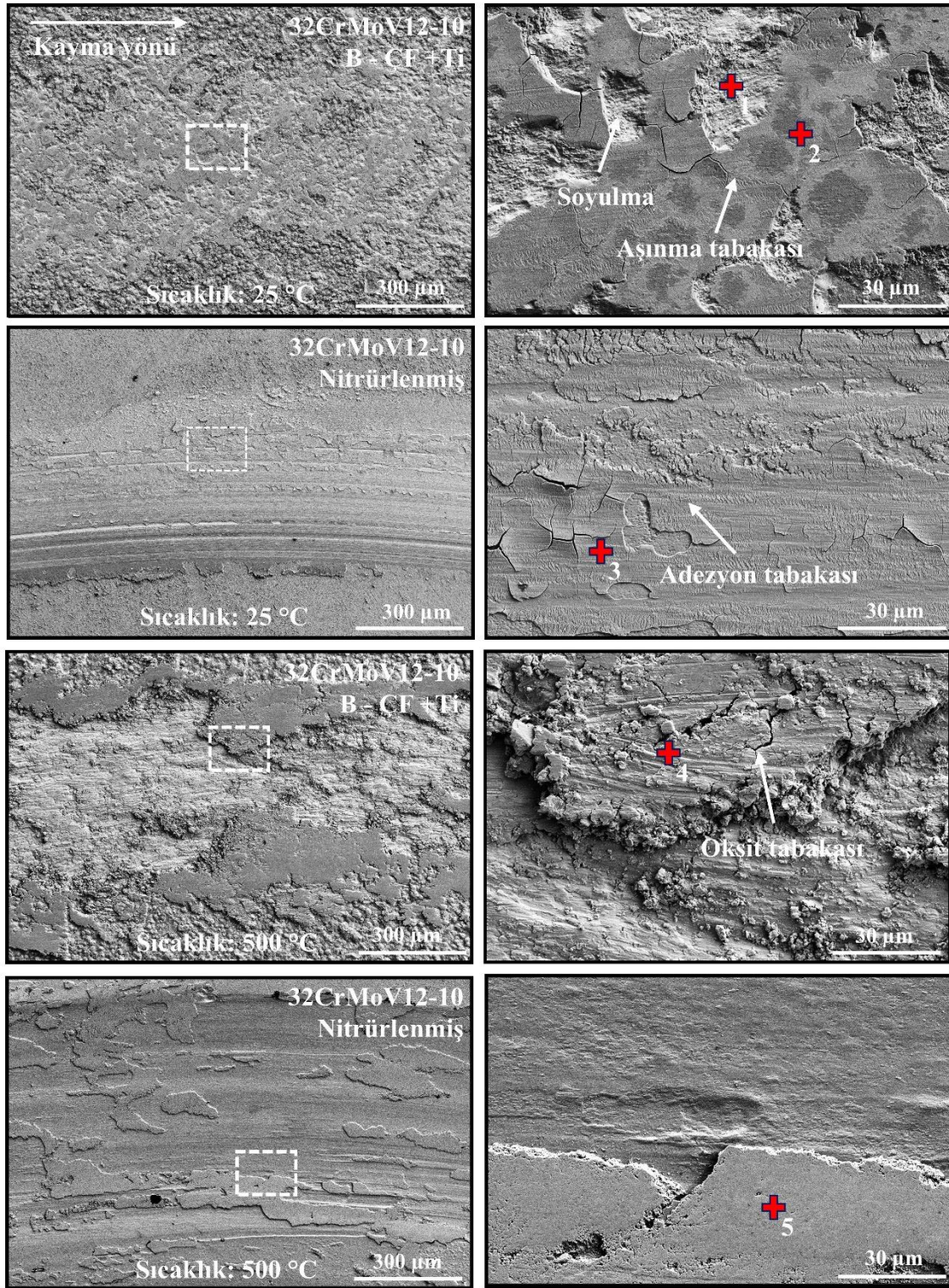


Şekil 60. Nitrürlenmiş çeliklerin yüzeylerinde oluşan aşınma izinin uç ve orta bölgelerine ait SEM görüntüleri

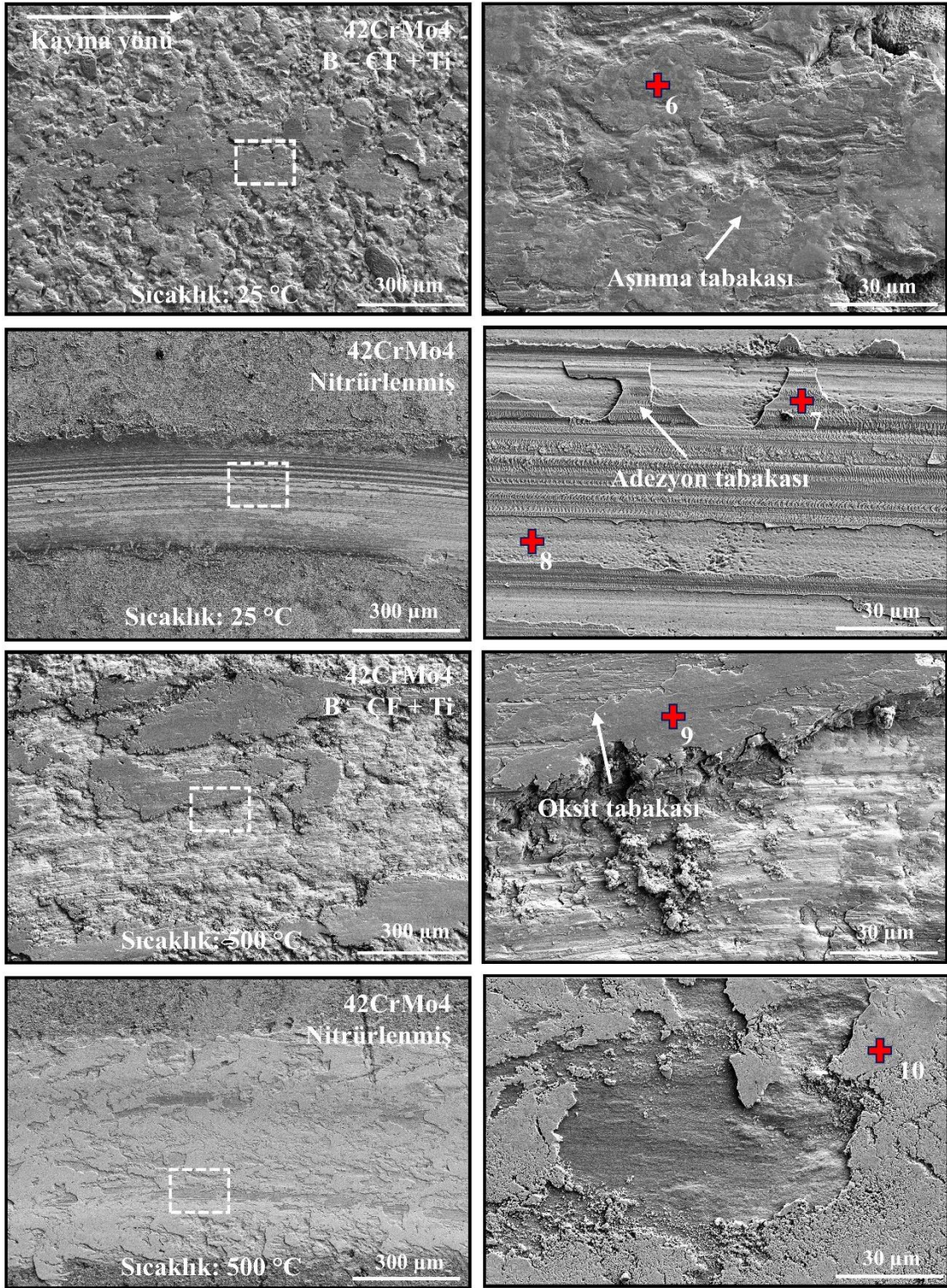
Tablo 26. Nitr rl nmiş numunelerin yüzeylerinde oluşan aşınma izinin bazı bölgelerinden alınan EDS analizi sonuçları

Element (% ağırlık)	EDS analizi yapılan bölgeler		
	EDS 1	EDS 2	EDS 3
N	1,82	4,73	5,97
C	5,92	4,99	7,56
O	26,37	7,75	4,47
Fe	32,13	74,50	75,04
W	31,70	7,14	5,53
Co	2,06	0,89	1,43

Bilye-disk esaslı aşınma deney düzeneğinde 25  C ve 500  C sıcaklıklarda aşınma deneyine tabi tutulan numunelerin yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin SEM görüntüleri şekil 61 ve şekil 62’de, bunların EDS analizi sonuçları ise Tablo 27’de verilmektedir. Borlandıktan sonra titanyumlanmış numunelerin oda sıcaklığındaki aşınma deneylerinden sonraki yüzeylerinde, bir aşınma tabakasının oluştuğı ve bu tabakanın yer yer parçalanarak yüzeyden ayrıldığı gözlendi. Aynı numunelerin 500  C sıcaklıkta yapılan aşınma deneyi sonucunda ise yüzeylerinde bir adezyon tabakasının meydana geldiğı ve bu tabakanın kısmen kazınarak yüzeylerden ayrıldığı görüldü. EDS analizleri sunucunda yüksek sıcaklıkta aşınma deneyine tabi tutulan numunelerin yüzeyindeki tabakanın oda sıcaklığında deneye tabi tutulmuş durumlarından daha yüksek oranda oksit i erdiğı belirlendi. Söz konusu çeliklerin nitr rl nmiş durumlarındaki aşınma yüzeylerinde oluşan adezyon tabakasının 500  C sıcaklıkta yapılan deneylerden sonra geniş bölgeler halinde soyulduğı görüldü. Diğ r taraftan bu numunelerin yüzeylerinde oda sıcaklığındaki aşınma sonucu oluşan geniş çiziklerin yüksek sıcaklık altında aşınmış durumlarında nispeten ortadan kalktığı gözlendi.



Şekil 61. 25 °C ve 500 °C sıcaklıklarda aşınma deneylerine tabi tutulan borlandıktan sonra titanyumlanmış ve nitrürlenmiş 32CrMoV12-10 çeliğine ait numunelerin yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin SEM görüntüleri

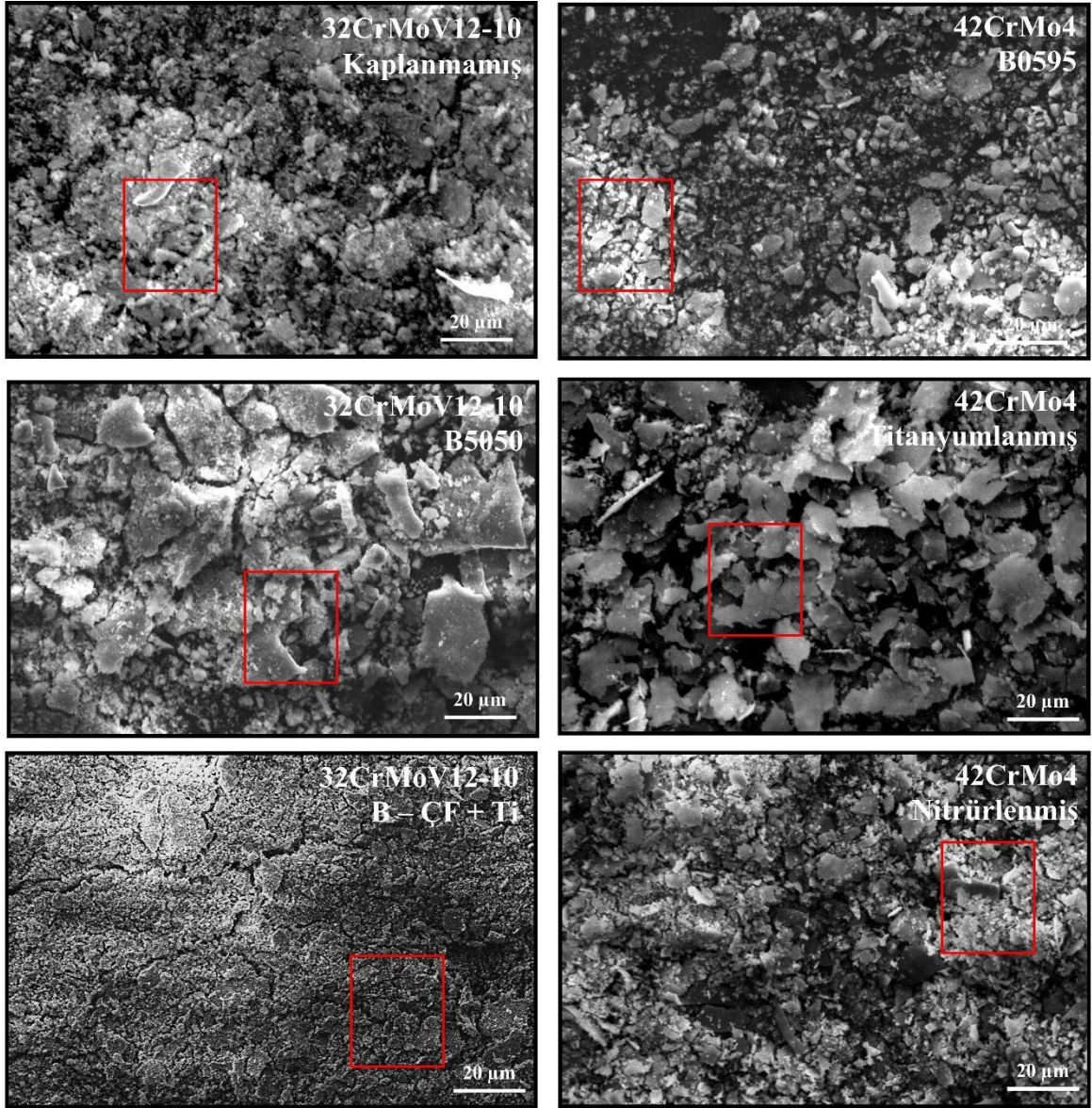


Şekil 62. 25 °C ve 500 °C sıcaklıklarda aşınma deneylerine tabi tutulan borlandıktan sonra titanyumlanmış ve nitrürlenmiş 42CrMo4 çeliğine ait numunelerin yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin SEM görüntüleri

Tablo 27. 25 °C ve 500 °C sıcaklıklarda aşınma deneylerine tabi tutulan borlandıktan sonra titanyumlanmış ve nitrürlenmiş çeliklere ait numunelerin yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin bazı bölgelerinden alınan EDS analizi sonuçları

Element (% ağırlık)	EDS analizi yapılan bölgeler									
	EDS 1	EDS 2	EDS 3	EDS 4	EDS 5	EDS 6	EDS 7	EDS 8	EDS 9	EDS 10
Ti	94,50	60,90	-	29,10	-	52,30	-	-	28,40	-
N	-	-	4,40	-	1,50	-	3,90	4,50	-	1,60
B	0,80	0,20	-	9,10	-	0,20	-	-	14,50	-
C	1,60	2,00	2,90	2,30	1,20	1,50	4,30	2,70	3,10	2,10
O	-	15,40	5,20	36,30	26,50	13,70	12,40	-	32,60	24,00
Fe	2,70	16,60	77,20	18,50	60,50	30,00	71,10	92,50	18,60	53,40
W	0,30	4,20	9,20	4,10	9,10	2,20	7,80	0,20	2,50	15,90
Co	0,10	0,70	1,10	0,60	1,20	0,10	0,50	0,10	0,30	3,00

İleri-geri aşınma deney düzeneğinde aşınma deneyine tabi tutulan numunelerden toplanan aşınma parçacıklarının irili ufaklı toz ve yonga biçiminde parçacıklardan oluştuğu görüldü. Bunlardan bazılarına ait SEM görüntüleri ve EDS analizleri sırasıyla Şekil 63 ve Tablo 28’de verilmektedir. Borlanmış, titanyumlanmış ve nitrürlenmiş numunelerin aşınmasından sonra daha çok yonga, borlandıktan sonra titanyumlanmış numunelerin aşınmasından sonra ise daha çok ince toz biçiminde aşınma parçacıklarının meydana geldiği gözlemlendi. EDS analizleri sonucunda bu parçacıkların oksit oranının yüksek olduğu ve aşınma tabakalarını oluşturan elementleri içerdiği belirlendi.

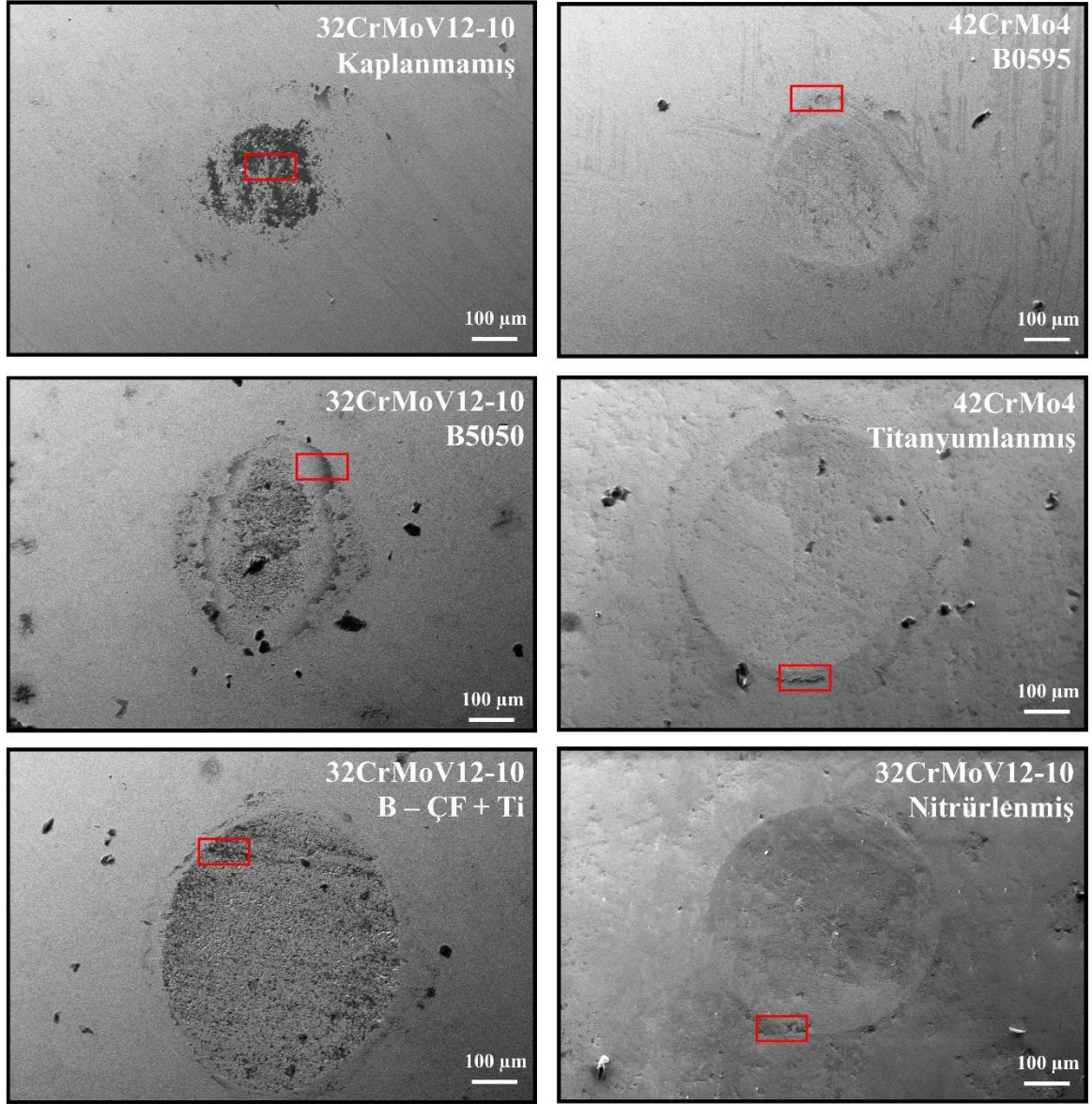


Şekil 63. Aşınma deneylerinden sonra bazı numunelerden toplanan aşınma parçacıklarının SEM görüntüleri

Tablo 28. Aşınma parçacıklarının EDS analizi sonuçları

Element (% ağırlık)	Numune					
	32CrMoV12-10			42CrMo4		
	Kaplanmamış	B5050	B + Ti (ÇF)	B0595	Titanyumlanmış	Nitrürlenmiş
B	-	10,91	5,31	5,17	-	-
Ti	-	-	26,46	-	23,87	-
N	-	-	-	-	-	1,59
C	20,33	22,28	6,17	26,77	30,34	15,08
O	33,77	35,92	52,13	35,51	42,26	40,89
Fe	28,48	27,84	4,94	29,22	-	26,03
W	15,91	2,59	4,15	2,80	3,04	14,90
Co	1,51	0,46	0,84	0,53	0,49	1,51

SEM incelemeleri sonucunda WC bilyelerin temas yüzeylerinde de aşınmaların meydana geldiği ve bu yüzeylerin düzleşme eğilimi sergilediği gözlemlendi. Söz konusu duruma ilişkin bazı numunelerin aşınmasında kullanılan bilyelerin temas yüzeylerine ait SEM görüntüleri Şekil 64'te verilmektedir. Bu görüntüler üzerinden yapılan incelemeler sonucunda sert tabakaya sahip numunelerin aşınmasında kullanılan bilyelerin yüzeylerinde daha yoğun aşınmaların meydana geldiği belirlendi. Diğer taraftan söz konusu yüzeylerde az da olsa kaplama tabakasına ait parçacıkların bulunduğu gözlemlendi. Tablo 29'da verilen EDS analizleri bu parçacıkların oksijen oranının nispeten yüksek olduğunu gösterdi.

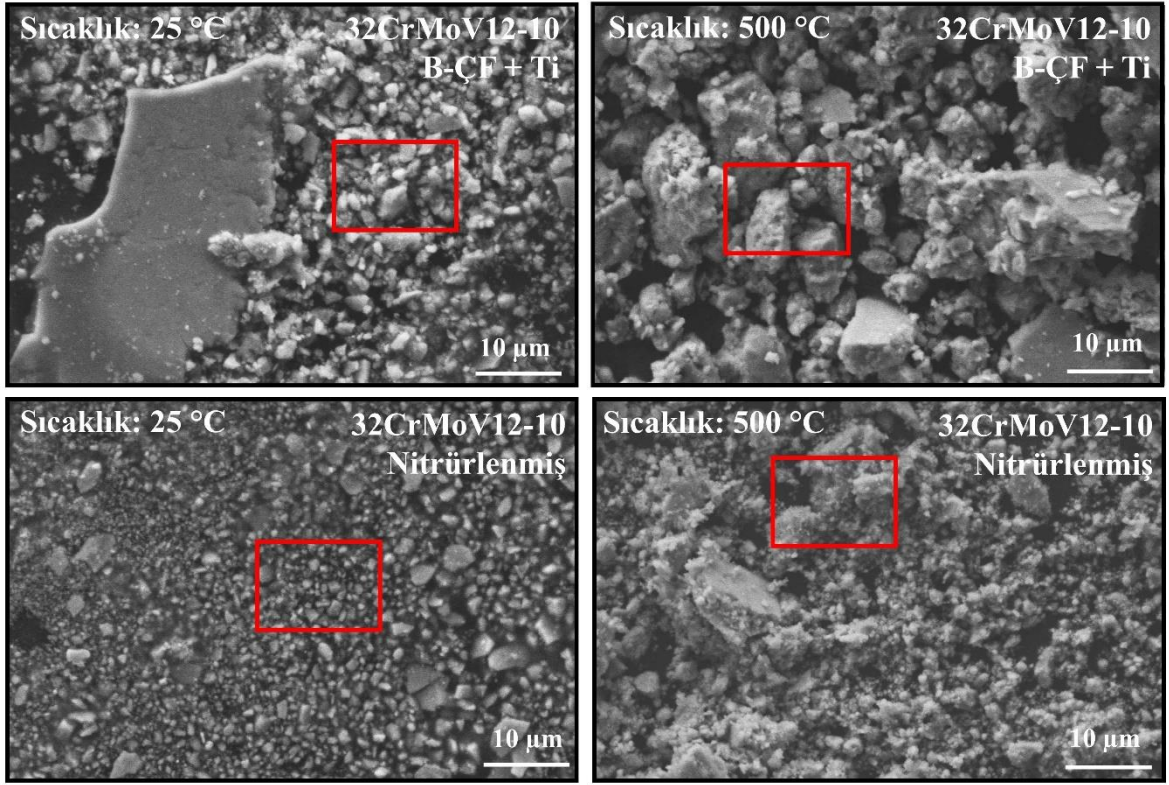


Şekil 64. Bazı numunelerin aşınmasında kullanılan bilyelerin temas yüzeylerine ait SEM görüntüleri

Tablo 29. Bazı bilyelerin temas yüzeylerinden alınan EDS analizi sonuçları

Element (% ağırlık)	Numune					
	32CrMoV12-10				42CrMo4	
	Kaplanmamış	B5050	B – ÇF + Ti	Nitrürlenmiş	B0595	Titanyumlanmış
B	-	2,87	4,07	-	1,93	-
Ti	-	-	6,67	-	-	2,63
N	-	-	-	1,55	-	-
C	38,02	15,03	9,29	17,03	23,16	15,30
O	7,88	15,35	25,11	16,55	9,35	11,30
Fe	1,74	3,69	1,79	1,57	2,63	4,36
W	50,74	60,76	50,54	55,87	60,02	62,75
Co	1,62	2,30	2,53	7,43	2,91	3,66

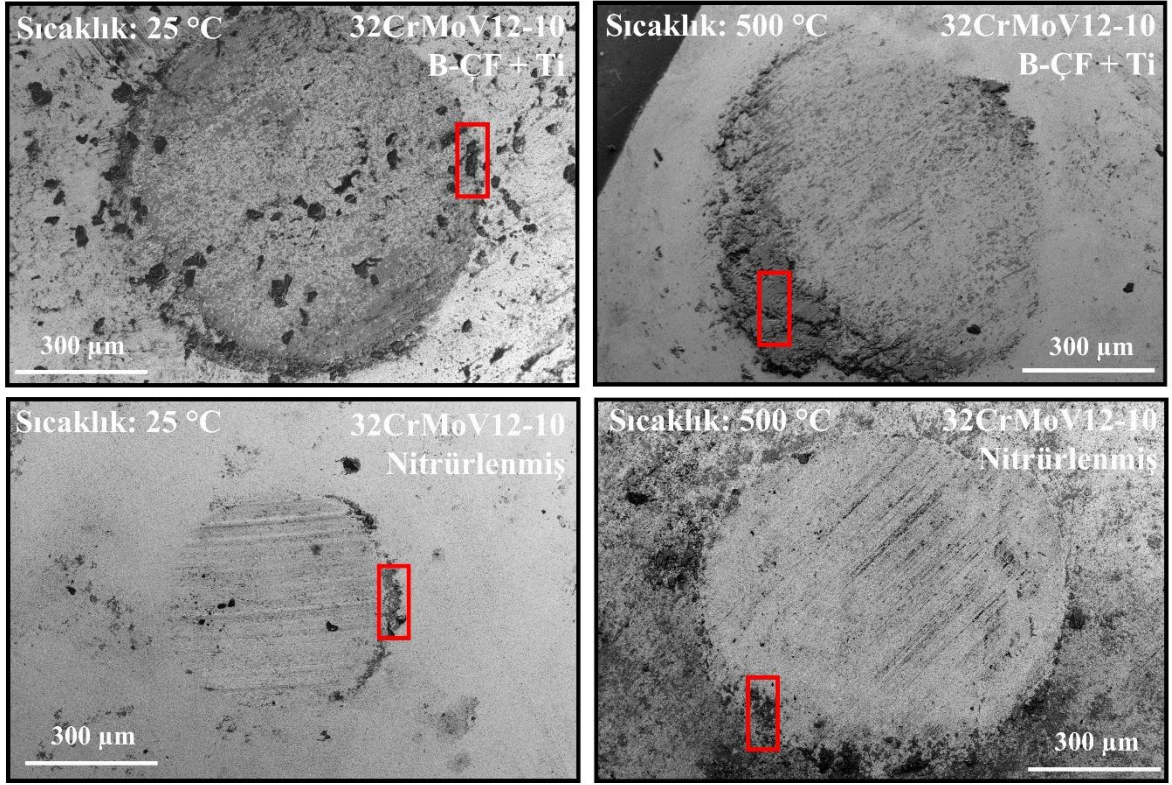
25 °C ve 500 °C sıcaklıklarda aşınma deneyine tabi tutulan numunelerden toplanan aşınma parçacıklarının ve bu numunelerin aşınmasında kullanılan bilyelerin görüntüleri karşılaştırılmalı olarak Şekil 65 ve Şekil 66’da, EDS analizleri ise Tablo 30 ve Tablo 31’de sunulmaktadır. 25 °C sıcaklıkta aşınma deneyine tabi tutulan borlandıktan sonra titanyumlanmış numunelerden toplanan aşınma parçacıklarının daha çok geniş yongalar biçiminde olduğu gözlemlendi. Söz konusu numunelerin 500 °C sıcaklıktaki aşınma deneylerinden sonra toplanan aşınma parçacıklarının ise irili ufaklı kum tanelerine benzer bir görünüme sahip olduğu belirlendi. Diğer taraftan bu çeliklerin nitrürlenmiş durumlarının yüksek sıcaklıktaki aşınma deneylerinden sonra toplanan parçacıkların da benzer bir görünüm sergiledikleri gözlemlendi. EDS analizleri bu tozların Fe, Ti, B, N ve W elementlerine sahip olduklarını ve yüksek oranda O içerdiklerini gösterdi. Bu numunelerin aşınmasında kullanılan bilyelerin yüzeylerinde de aşınmanın meydana geldiği ve bu yüzeylerin nispeten düzgünleştiği gözlemlendi. Ayrıca bilye yüzeylerinde toplanmış aşınma parçacıklarına ve aşırı deformasyonlara rastlandı. Bilye yüzeylerindeki düzleşen kısmın çapının borlandıktan sonra titanyumlanmış numunelerin oda sıcaklığındaki aşınma deneylerinde daha düşük, nitrürlenmiş numunelerin 500 °C sıcaklıkta yapılan aşınma deneylerinde ise daha büyük olduğu gözlemlendi.



Şekil 65. 32CrMoV12-10 çeliğine ait numunelerin 25 °C ve 500 °C sıcaklıklardaki aşınma deneylerinden sonra toplanan aşınma parçacıklarının SEM görüntüleri

Tablo 30. 32CrMoV12-10 çeliğine ait numunelerin 25 °C ve 500 °C sıcaklıklardaki aşınma deneylerinden sonra toplanan aşınma parçacıklarının EDS analizi sonuçları

Element (% ağırlık)	Numune			
	25 °C		500 °C	
	32CrMoV12-10 B - ÇF + Ti	32CrMoV12-10 Nitrürlenmiş	32CrMoV12-10 B - ÇF + Ti	32CrMoV12-10 Nitrürlenmiş
B	23,20	-	19,70	-
Ti	12,50	-	37,80	-
N	-	9,00	-	4,00
O	31,40	31,20	24,20	28,80
Fe	5,40	47,80	16,60	61,80
W	25,80	11,10	1,40	4,90
Co	1,70	0,90	0,30	0,50



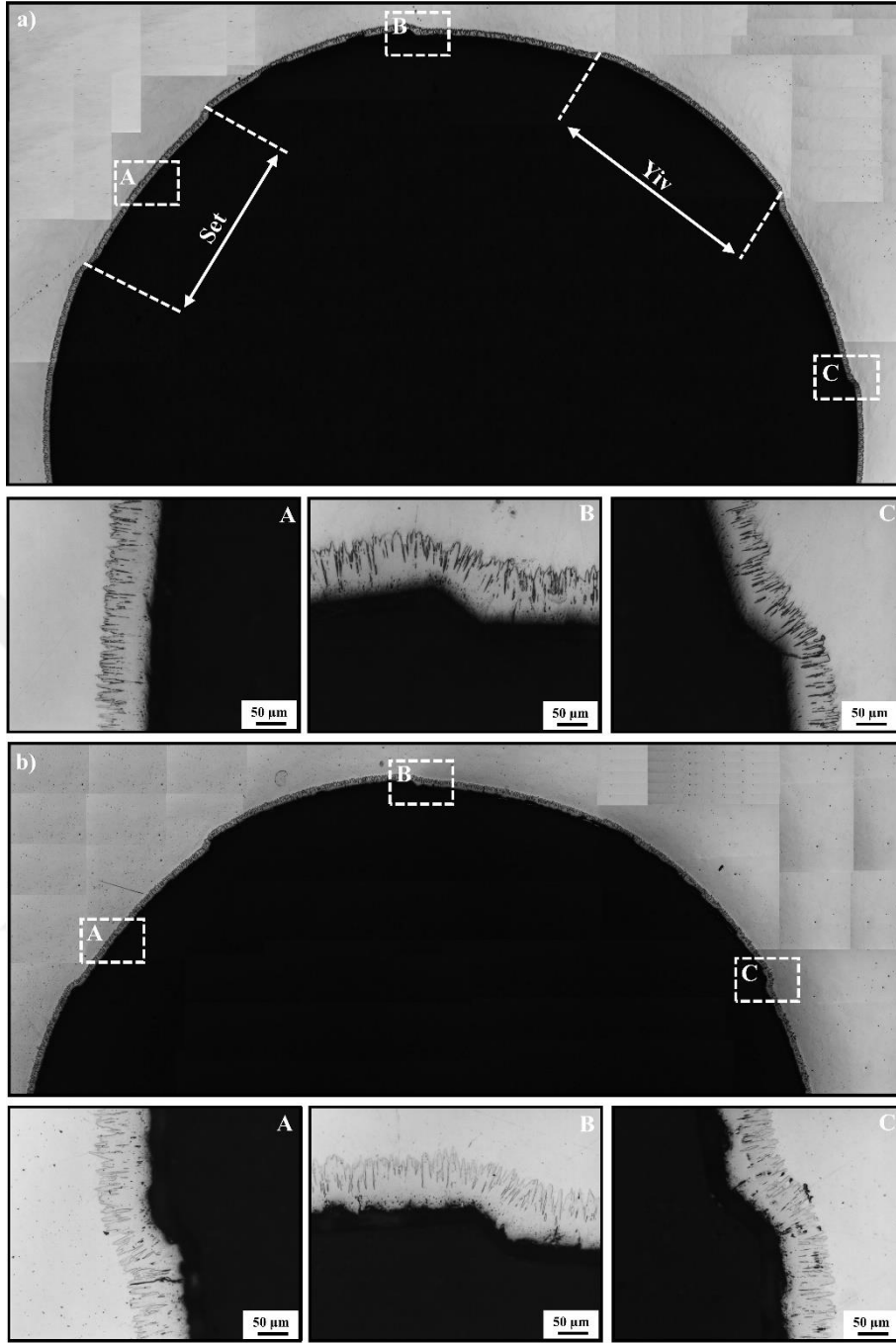
Şekil 66. 32CrMoV12-10 çeliğine ait numunelerin 25 °C ve 500 °C sıcaklıklardaki aşınma deneylerinde kullanılan bilyelerin temas yüzeylerinin SEM görüntüleri

Tablo 31. 32CrMoV12-10 çeliğine ait numunelerin 25 °C ve 500 °C sıcaklıklardaki aşınma deneylerinde kullanılan bilyelerin temas yüzeylerinin EDS analizi sonuçları

Element (% ağırlık)	Numune			
	25 °C		500 °C	
	32CrMoV12-10 B - ÇF + Ti	32CrMoV12-10 Nitrürlenmiş	32CrMoV12-10 B - ÇF + Ti	32CrMoV12-10 Nitrürlenmiş
B	1,40	-	4,70	-
Ti	2,50	-	10,80	-
N	-	2,60	-	2,10
C	10,00	4,10	8,30	18,10
O	9,90	18,60	25,70	16,20
Fe	2,80	18,50	4,50	11,60
W	68,90	53,50	43,00	49,20
Co	4,50	2,70	3,0	2,80

3.5. Kaplamaların Hafif Silah Namlusunun İç Yüzeylerine Uygulanmasına Yönelik Deneylerden Elde Edilen Bulgular

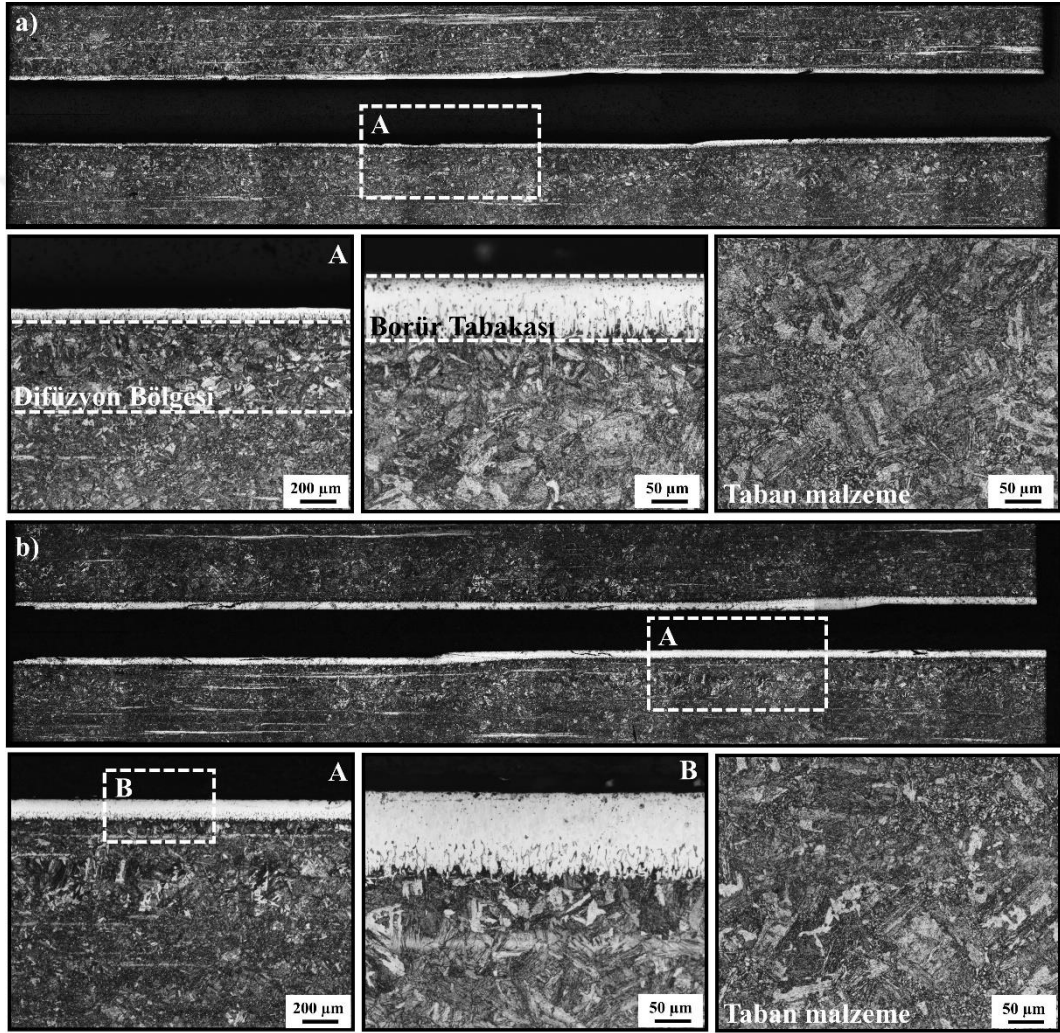
İç yüzeyi borlanmış namlu numunelerinin orta kısımlarının dikey kesitlerine ait OM görüntüleri Şekil 67’de verilmektedir. Bu görüntülerden yola çıkarak namlu iç yüzeylerinde oluşan çift fazlı (Fe_2B ve FeB) borür tabakasının set, yiv ve bunların kesişim bölgelerinde hemen hemen aynı kalınlıkta olduğu ve homojen bir dağılım sergilediği belirlendi. Ancak, söz konusu tabaka kalınlığının namlu numunelerinin üst kısmından (sol) alt kısmına (sağ) doğru azaldığı tespit edildi, Tablo 32. Farklı uzunluklara sahip namlu numunelerinin yatay kesitleri ise Şekil 68’de gösterilmektedir. Namluların yatay kesitleri üzerinden yapılan incelemelerden bunların iç yüzeylerinde oluşan borür tabakasının kesintisiz olduğu diğer bir ifadeyle süreklilik sergilediği görüldü. 42CrMo4 çeliğinin hem düz biçimdeki dış yüzeyine hem de namlu biçimindeki iç yüzeyine uygulanan borlama işleminin ardından elde edilen tabakaların, difüzyon bölgesinin ve taban malzemenin mikrosertlik değerleri karşılaştırmalı olarak Tablo 33’te sunulmaktadır. Bu karşılaştırma sonucunda her iki durumda da elde edilen sertlik değerlerinin hemen hemen aynı olduğu görüldü. Bu sonuçlar borlama işleminin 42CrMo4 çeliğinden üretilen namlu iç yüzeylerine de uygulanabileceğini gösterdi.



Şekil 67. Borlanmış a) 50 mm ve b) 70 mm uzunluklarındaki namlu numunelerinin orta kısımlarına ait dikey kesitlerini gösteren OM görüntüleri

Tablo 32. Namlu numunelerinin belirli bölgelerinden ölçülen borür tabakalarına ait kalınlıklar

Ortalama borür tabakası kalınlığı (μm)					
50 mm boyundaki namlu numunesi			70 mm boyundaki namlu numunesi		
Sol	Orta	Sağ	Sol	Orta	Sağ
110 ± 3	95 ± 5	90 ± 6	87 ± 4	87 ± 5	64 ± 2

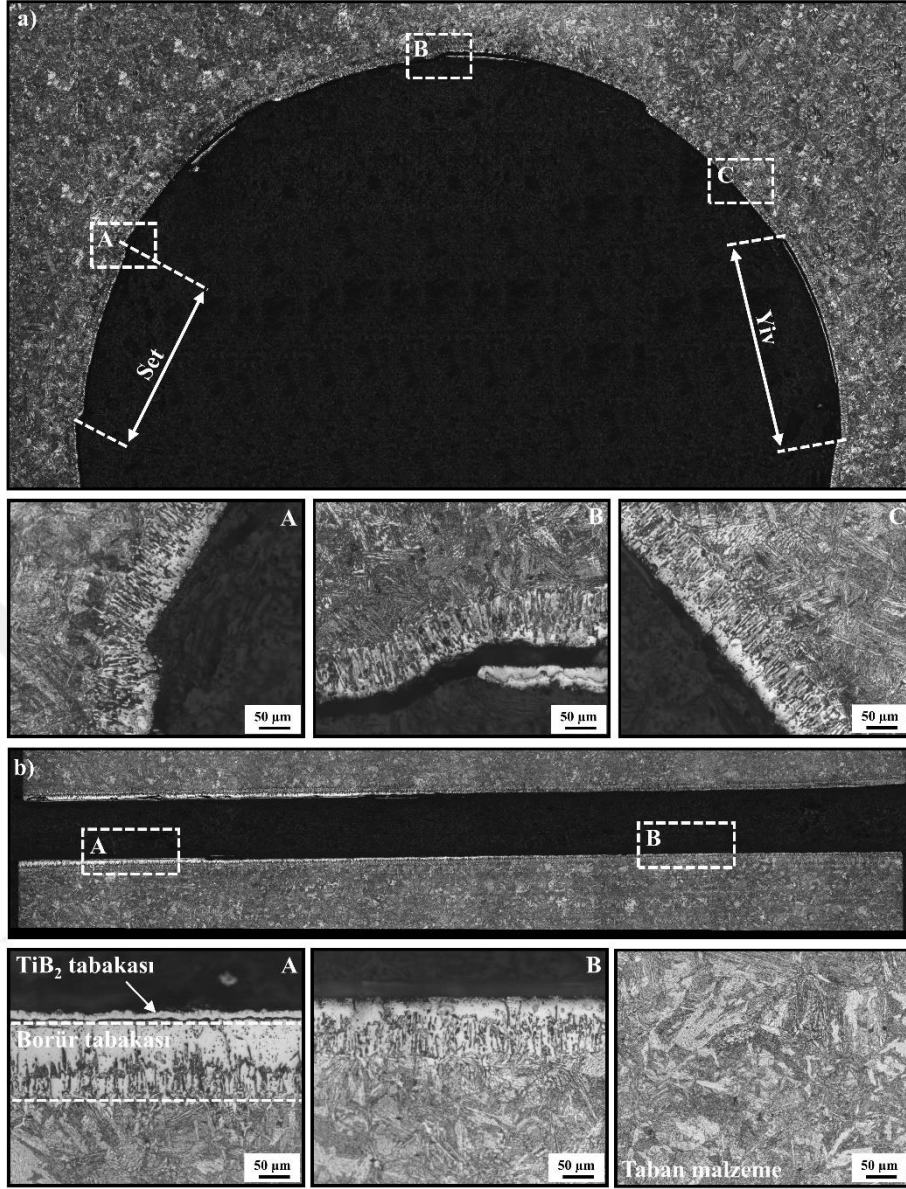


Şekil 68. Borlanmış a) 50 mm ve b) 70 mm uzunluklarındaki namlu numunelerinin yatay kesitlerine ait OM görüntüleri

Tablo 33. Borlanmış 42CrMo4 çeliğinin hem düz hem de namlu biçimindeki iç yüzeylerinde oluşan borür tabakaları ile söz konusu çeliğin difüzyon bölgelerine ve taban malzemeye ait sertlik değerlerinin karşılaştırılması

Bölgeler	Mikrosertlik (HV _{0,05})		
	Düz numune	Namlu numunesi (50 mm)	Namlu numunesi (70 mm)
FeB	2155,50 ± 25,60	2042,30 ± 61,80	2086,45 ± 15,20
Fe ₂ B	1956,10 ± 60,60	1864,80 ± 44,80	1839,15 ± 27,10
Difüzyon bölgesi	538,20 ± 4,10	485,80 ± 6,40	572,60 ± 17,45
Taban malzeme	356,20 ± 3,60	359,40 ± 5,10	360,60 ± 12,10

Borlanmış ve ardından titanyumlanmış 70 mm uzunluğundaki namlu numunesinin orta kısmının dikeyinden ve yatayından alınan kesitlerin OM görüntüleri Şekil 69'da verilmektedir. Bu kesitler üzerinden yapılan incelemelerde namlu numunesinin iç yüzeylerine ait yerel bölgelerde TiB₂ fazına ait tabakanın oluştuğu, ancak bu tabakanın süreklilik sergilemediği ve borür tabakasıyla bağlantısının zayıf olduğu tespit edildi. Diğer taraftan borür tabakalarının yapısal bütünlüğünün bu işlem sonrasında bozulduğu gözlemlendi.



Şekil 69. Borlandıktan sonra titanyumlanmış 70 mm uzunluğundaki namlu numunesinin orta kısmından alınmış a) dikey ve b) yatay kesitlerine ait OM görüntüleri

4. TARTIŞMA

900 °C sıcaklıkta 3 saat süreyle B0595 karışımı kullanılarak borlanan 42CrMo4 çeliğine ait numunenin yüzeyinde tek fazlı borür tabakası, diğer tüm koşullarda borlanan 32CrMoV12-10 ve 42CrMo4 çeliklerine ait numunelerin yüzeylerinde ise çift fazlı borür tabakası oluşmuştur, Şekil 8 ve Şekil 9. Tek fazlı borür tabakasının Fe₂B fazından, çift fazlı borür tabakalarının ise Fe₂B (alt tabaka) ve FeB (üst tabaka) fazlarından oluştuğu belirlenmiştir. Çift fazlı borür tabakalarının ara kesitlerinde çatlaklar gözlenmiştir. Diğer taraftan borür tabakalarının hem birbirlerine hem de ana matrise testere ağzı biçiminde bağlandıkları görülmüştür. Bu bulgular çeliklerin borlanmasında kullanılan karışımın bor oranına, borlama sıcaklığına ve süresine, borür tabakalarının oluşum ve büyüme mekanizmalarına dayandırılarak açıklanabilir (Gutierrez-Noda vd., 2019; Triani vd., 2020; Delai vd., 2021). Daha önceki çalışmalarda (Joshi & Hosmani, 2014; Campos-Silva vd., 2017) ifade edildiği gibi belirli sıcaklıkta atom haline gelen bor çeliklerin yüzeyinden merkezine doğru yayılmaktadır. Yayınma esnasında bu atomlar çeliğin esas elementi olan demirin kristal yapısında bulunan boşluklara yerleşmektedir. Demir kristalindeki bor oranı %9'a ulaştığında ilk olarak Fe₂B fazına sahip tabaka, %16 ya ulaştığında ise bu tabakanın üzerinde FeB fazına sahip bir tabaka oluşmaktadır (Spence & Makhlof, 2005). Oluşan tabakalar yayınma yönünde diğer bir ifadeyle yüzeye dik yönde hızlı bir büyüme sergilemektedir. Ancak bor oranının ve yayınma hızının yüzeyden merkeze doğru azaldığı bilinmektedir (Campos-Silva & Rodríguez-Castro, 2015). Bu durum söz konusu tabakaların anizotropik büyümesine yol açarak testre ağzı biçiminde bir görünüm sergilemelerine neden olmaktadır (Campos-Silva & Rodríguez-Castro, 2015). Ancak bu tabakalar farklı termal genleşme katsayılarına sahiptirler (Rile, 1974). Bu farklılık iç gerilmelere dolayısıyla tabakaların ara kesitlerinde çatlakların oluşmasına yol açmaktadır. Diğer taraftan B0595 karışımında 800 °C sıcaklıkta 3 saat ve 900 °C sıcaklıkta 1 saat borlanan 42CrMo4 çeliğine ait numunenin yüzeyinde çift fazlı borür tabakası oluşmaktadır, Şekil 9 ve Şekil 10. 900 °C borlama sıcaklığında borlama süresinin 3 saate çıkarılması durumunda ise söz konusu çeliğin yüzeyinde tek fazlı Fe₂B tabakasının oluştuğu görülmektedir, Şekil 10. Bu bulgular uzun süreli borlama işleminde oluşan de-boronizasyon mekanizmasına dayandırılarak açıklanabilir (Campos-Silva vd., 2017; Türkmen & Yalamaç, 2018). Şöyle ki, 800 °C sıcaklıkta 3 saat ve 900 °C sıcaklıkta 1 saatlik sürelerde B0595 karışımı çift fazlı borür

tabakalarının oluşumu için gerekli bor miktarını üretmektedir. Ancak 900 °C sıcaklıkta bir saatten sonra karışımın bor miktarı azalmakta veya tükenmektedir. Bu aşamadan sonra sürenin artırılması durumunda FeB tabakasındaki bor atomları de-boronizasyon eğilimi sergilemektedir. De-boronizasyon ise FeB tabakasının bor oranının azalmasına dolayısıyla tek fazlı Fe₂B tabakasına dönüşmesine yol açmaktadır. Diğer taraftan aynı koşullarda borlanmış 32CrMov10-12 çeliğine ait numunelerde benzer durumun oluşmaması diğer bir ifadeyle söz konusu koşullarda borlanan bu numunelerin yüzeyinde çift fazlı borür tabakasının oluşması; çeliğin bileşiminde yüksek oranda bulunan alaşım elementlerinin bor ile reaksiyona girerek de-boronizasyonu engellemesinden kaynaklanmış olabilir (Joshi & Hosmani, 2014; Campos-Silva & Rodríguez-Castro, 2015).

Numunelerin yüzeylerindeki Fe₂B tabakasının kalınlığının borlama karışımının artan saf bor oranı ile belirgin bir değişim sergilemediği belirlenmiştir. Ancak FeB tabakası kalınlığının karışımın artan bor oranı ile arttığı, B5050 karışımında en yüksek değerine ulaştığı, bunun üzerindeki oranlarda ise hemen hemen sabit kaldığı görülmüştür, Tablo 8 ve Şekil 12. Fe₂B tabakasının kalınlığının artan bor ile değişmemesi içerisindeki bor çözünürlüğünün düşük olmasından kaynaklanmış olabilir (Gutierrez-Noda vd., 2019; Triani vd., 2020; Delai vd., 2021). Bu durum karışımdan gelen fazlalık bor atomlarının söz konusu tabaka üzerinde toplanmasına yol açmaktadır. Nitekim karışımın bor oranı arttıkça söz konusu tabakanın yüzeyinde daha çok bor atomu kümelenmekte ve demir ile reaksiyona girerek FeB tabakasının kalınlığının artmasına yol açmaktadır. Ancak yeterli doygunluğa ulaşan FeB tabakası belirli bir bor oranından sonra karışımdan gelen fazlalık boru çözememektedir. Bu durum karışımın bor oranının artmasına rağmen, FeB tabakasının kalınlığının belirli bir bor oranından sonra hemen hemen sabit kalmasına neden olmaktadır. Ancak her iki tabakanın kalınlığının artan borlama sıcaklığı ve süresiyle artması borun ana matris içerisindeki çözünürlüğünün ve difüzyon hızının söz konusu koşullarda artmasından kaynaklanmış olabilir (Spence & Makhlof, 2005; Campos-Silva vd., 2013; Campos-Silva vd., 2017; Türkmen & Yalamaç, 2018; Delai vd., 2021).

Borlama işleminden sonra Fe₂B tabakasının hemen altında bir difüzyon bölgesinin oluştuğu gözlenmiştir, Şekil 13. 42CrMo4 çeliğine ait numunelerde oluşan bu bölgenin 32CrMoV12-10 çeliğine ait numunelerin söz konusu bölgesinden daha geniş olduğu belirlenmiştir. Difüzyon bölgesinin çeliklerin kimyasal bileşiminde bulunan elementlerin demir borür içerisinde çözünmemesi sonucunda oluştuğu bilinmektedir (Joshi & Hosmani, 2014). Ancak 42CrMo4 çeliğinin alaşım elementi oranlarının düşük olması ve bu

elementlerin borlama sıcaklıklarında ferrit fazı içerisinde nispeten çözünmesiyle birlikte ferrit fazı sütunları oluşmaktadır. Bu durum söz konusu çeliklerde daha geniş difüzyon bölgesinin oluşmasına yol açmaktadır (Joshi & Hosmani, 2014). Diğer taraftan 32CrMoV12-10 çeliğinde yüksek oranda bulunan krom, bor ile reaksiyona girerek krom borür çökeltileri oluşturabilmektedir. Aynı zamanda yüksek alaşım elementleri söz konusu çeliğin kritik soğuma hızını düşürdüğü için ferritik dönüşümü de engellemektedir (Speich & Leslie, 1972). Bu nedenle 32CrMoV12-10 çeliğinde 42CrMo4 çeliğine göre aynı sıcaklık ve sürelerde nispeten daha dar bir difüzyon bölgesi oluşmaktadır.

Titanyumlama işleminde sonra 32CrMoV12-10 ve 42CrMo4 çeliklerine ait numunelerin yüzeylerinde işlem koşullarına bağlı olarak kalınlıkları sırasıyla 6 μm -14 μm ve 8 μm -10 μm arasında değişen bir TiC tabakasının oluştuğu gözlenmiştir, Tablo 9 ve Şekil 14. Borlandıktan sonra titanyumlama işlemine tabi tutulan 32CrMoV12-10 ve 42CrMo4 çeliklerine ait numunelerin yüzeylerinde ise yaklaşık 5 μm ve 17 μm kalınlıklarında bir TiB₂ tabakasının oluştuğu belirlenmiştir, Şekil 17 ve Tablo 12. Söz konusu tabakaların oluşumu titanyumlama sırasında numunelerde meydana gelen de-karbürizasyon ve de-boronizasyon mekanizmalarına dayandırılarak açıklanabilir (Pertek & Kulka, 2003; Sen, 2005; Samadi & Habibolahzade, 2010; Gómez-Vargas vd., 2016; Günen vd., 2017; dos S. de Almeida vd., 2018; Kurt vd., 2020; Ruiz vd., 2020). Titanyumlama işlemi sırasında atom haline gelen karbon ve bor numunelerin yüzeyinden dış ortama doğru bir yayınma sergilemektedirler. Bu atomlar numunelerin yüzeylerinde çekirdeklenmeye başlayan titanyum atomları ile reaksiyona girerek söz konusu tabakaları oluşturmaktadır (Günen vd., 2017; Karakaş, 2020; Kurt vd., 2020; Özdemir Öge vd., 2025). Ancak borlandıktan sonra titanyumlanan çift fazlı 32CrMoV12-10 ve 42CrMo4 çeliklere ait numunelerin yüzeylerinde bulunan FeB tabakasının söz konusu işlemten sonra tek fazlı Fe₂B tabakasına dönüştüğü gözlenmiştir. Bu dönüşüm TiB₂ oluşumu için gerekli borun FeB tabakası tarafından sağlanmış olmasından kaynaklanmış olabilir. Nitekim söz konusu numunelerdeki borür tabakalarının kalınlıklarının titanyumlamadan sonra hemen hemen aynı olması bu durumu desteklemektedir. Diğer taraftan tek fazlı borür tabakası üzerine yapılan titanyumlama işleminden sonra bu tabakada belirgin boşlukların oluştuğu gözlenmiştir, Şekil 17. Bu boşlukların borun Fe₂B tabakasından ayrılmasından sonra geride bıraktığı boşluklar olduğu değerlendirilmiştir.

Borlama karışımındaki bor oranının borlanmış çeliklerin yüzeylerinde oluşan Fe₂B ve FeB tabakalarının sertlikleri üzerinde belirgin bir etki yaratmadığı belirlenmiştir, Tablo 14.

Bu durum söz konusu tabakaların belirli oranlarda bor çözünürlüğüne sahip olmasından kaynaklanmış olabilir (Brandstötter & Lengauer, 1997; Türkmen & Yalamaç, 2022). Ancak Fe_2B tabakasının sertliğinin difüzyon bölgesine yaklaştıkça bir azalma eğilimi sergilediği görülmüştür, Şekil 25-27. Bu durum söz konusu tabakanın testere ağzı biçimindeki bölgeleri arasında farklı demir borür bileşiklerinin oluşmasından kaynaklanmış olabilir (Ozbek & Bindal, 2002). Diğer taraftan FeB tabakasının sertliğinin Fe_2B tabakasından daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durumun söz konusu tabakadaki bor çözünürlüğünün yüksek olmasından ve FeB bileşiğindeki kovalent ve iyonik bağların baskın olmasından kaynaklandığı bilinmektedir (Pomel'nikova vd., 2011).

TiC tabakasının TiB_2 tabakasından yaklaşık 1000 HV daha yüksek sertliğe sahip olduğu görülmüştür, Tablo 15 ve Tablo 16. Ayrıca bu tabakaların her ikisinin de sertliğinin FeB tabakasından yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu bulgular söz konusu fazların bağ yapılarına dayandırılarak açıklanmaktadır (Han vd., 2007; Vallauri vd., 2008). Şöyle ki TiC, TiB_2 ve FeB bileşiklerinin bağ yapısının karmaşık olmasına karşın, kovalent bağın her üç bileşik içinde de baskın olduğu bilinmektedir (Han vd., 2007; Vallauri vd., 2008; Pomel'nikova vd., 2011). Ancak TiC bileşiği iyonik bağlı bileşiklere (örneğin NaCl) benzer bir kristal yapı sergilemekte olup çok güçlü kovalent bağlara sahiptir. TiB_2 bileşiği ise hekzagonal bir kristal yapıya sahip olup bağ kuvveti TiC bileşiğine göre düşük ancak ortorombik kristal yapıya sahip FeB bileşiğinden daha yüksektir (Munro, 2000; Han vd., 2007; Vallauri vd., 2008). Bu durum oluşan tabakaların farklı sertlik değerleri sergilemesine yol açmaktadır.

Borlanmış numunelerin adezyon (yapışma) dayanımı kalitelerinin HF2 ile HF4 aralığında yer aldığı belirlenmiştir, Tablo 18. Borlanmış numunelerin kabul edilebilir aralıkta yapışma kalitesine sahip olmaları bunların birbirlerine ve ana malzemeye testere ağzı biçimindeki bir ara bağlantı ile bağlanmasından kaynaklandığı bilinmektedir (Gutierrez-Noda vd., 2019; Triani vd., 2020; Delai vd., 2021). Kalite aralığındaki değişimin ise FeB tabakasının kalınlığına bağlı olduğu gözlenmiştir. Bu durumun FeB tabakasının kalınlığı arttıkça gevrekliğinin artmasından ve ara yüzey çatlaklarının baskın hale gelmesinden kaynaklandığı ifade edilmektedir (Chen & Wang, 1999; Campos-Silva vd., 2013; Cimenoglu vd., 2014). Şöyle ki gevreklik ve iç çatlaklar yapışma testine tabi tutulan numunelerin yüzeyinde oluşan izin etrafında radyal çatlaklar ve deliminasyonlar oluşturarak söz konusu numunelerin yapışma kalitesini düşürmektedir. Nitekim çatlak içermeyen ve nispeten yumuşak tek fazlı borür (Fe_2B) tabakasına sahip numunenin yüzeyindeki izin

etrafında sadece çatlakların meydana gelmesi, diğer borlanmış numunelerde olduğu gibi soyulmaların oluşmaması bu ifadeyi doğrulamaktadır, Şekil 29. Diğer taraftan sadece titanyum kaplanmış numunelerin kabul edilebilir sınırların dışında yapışma dayanım kalitesine sahip oldukları gözlenmiştir, Tablo 19. Bu durum söz konusu tabakanın taban malzemeye göre sertliğinin çok yüksek olmasından kaynaklanmış olabilir. Şöyle ki bu sertlik farkı, tabaka ve ana metalin şekil değiştirme oranlarının farklı olmasına yol açmaktadır. Bu farklılık yüksek gerilmeler oluşturmakta ve TiC tabakasının çatlayarak parçalanmasına neden olmaktadır, Şekil 30. Borlanmış numunelerin titanyumlama işleminden sonra yüksek yapışma kabiliyeti sergiledikleri belirlenmiştir. Bu durum ise borlanmış numunelerinin yüzeylerinde oluşan çift fazlı borür tabakalarının titanyumlama işleminden sonra tek fazlı borür (Fe_2B) tabakasına dönüşmesinden kaynaklanmış olabilir.

Aynı koşullarda borlanmış 42CrMo4 çeliğine ait numunelerin 32CrMoV12-10 çeliğine ait numunelerden daha yüksek yapışma dayanımı kalitesine sahip oldukları görülmüştür, Tablo 18. Bu durum 32CrMoV12-10 çeliğinin yüksek oranda krom içermesinden kaynaklanmış olabilir. Şöyle ki yüksek oranda alaşım elementlerinin çelikte martenzitik dönüşümü kolaylaştırdığı bilinmektedir (Speich & Leslie, 1972; Bilal vd., 2019). Bu dönüşüm sırasında yüksek iç gerilmeler ortaya çıkmaktadır. Bu bağlamda söz konusu gerilmelerin Fe_2B tabakasında çatlak oluşturma eğilimi yaratabileceği ve borlanmış 32CrMoV12-10 çeliğine ait numunelerin yapışma kalitesini olumsuz etkileyebileceği söylenebilir.

Çizik testine tabi tutulan borlanmış numunelerde ilk çatlak sadece titanyumlanmış ve borlandıktan sonra titanyumlanmış durumlarına göre daha yüksek çizik kuvvetlerinde oluşmuştur, Tablo 21. Bu durum daha öncede ifade edildiği gibi borür tabakalarının birbirlerine testere ağzı biçiminde kenetlenmelerinden kaynaklanmaktadır (Gutierrez-Noda vd., 2019; Triani vd., 2020; Delai vd., 2021). Ancak çizik kuvveti arttıkça FeB tabakası yüzeyinde oluşan çizik izine ait derinliğin arttığı ve bu izin etrafında soyulmaların meydana geldiği görülmüştür, Şekil 33. Bu durum ise artan çizik kuvveti ile tabakalarda bulunan çatlakların aktif hale gelerek bor tabakasının yüzeyden kalkmasına yol açmasından kaynaklanmış olabilir (Márquez-Cortés vd., 2022). Diğer taraftan TiC tabakasının ve TiB_2 tabakalarının çizik deneyinin ilk aşamalarında yüzeyden kalktığı ve özellikle TiC tabakasındaki izin etrafında aşırı soyulmaların meydana geldiği gözlenmiştir, Şekil 34 ve Şekil 35. Bu durum söz konusu tabakaların kalınlığının düşük, sertliğinin ise yüksek olmasından kaynaklanmış olabilir. TiB_2 tabakasının kalkmasından sonra ise bu numunelerin

yüzeylerinde daha düzgün bir çizik izinin olduğu ve bu izin etrafında soyulmaların meydana gelmediği görülmüştür, Şekil 35. Bu durum söz konusu tabakanın altında daha yumuşak ve çatlak içermeyen Fe_2B tabakasının yer almasından kaynaklanmış olabilir (Márquez-Cortés vd., 2022). Şöyle ki Fe_2B tabakası çizik testi sırasında kopan parçacıkların yüzeye sıvanmasını kolaylaştırarak, aynı zamanda çatlak oluşumunu engelleyerek borlandıktan sonra titanyumlanmış numunelerin yüzeyinde düzgün bir çizik izinin oluşmasına yol açmış olabilir. Nitekim en yüksek çizik direncini tek fazlı tabakaya sahip borlanmış numunenin sergilemesi, yüzeyinde düzgün bir çizik izinin oluşması ve etrafında soyulmaların meydana gelmemesi bu durumu doğrulamaktadır.

Nitrürlenmiş numunelerin HF2 kalitesinde yapışma dayanımına sahip oldukları görülmüştür, Tablo 20. Bu durum nitrürlenmiş numunelerin düşük sertliklerinden dolayı plastik deformasyon kabiliyetlerinin yüksek olmasından kaynaklanmış olabilir. Bu numunelerdeki ilk çatlağın, tek fazlı bor kaplanmış numunelerden düşük, diğer kaplanmış numunelerden ise daha yüksek çizik kuvvetinde meydana geldiği belirlenmiştir, Tablo 21. Çizik testi sırasında bu numunelerin yüzeyindeki $Fe_{3,4}N$ (beyaz tabaka) tabakasının soyulduğu, ardından derin bir çizik izi ile bu iz boyunca çekme çatlakların olduğu gözlenmiştir, Şekil 36. Bu durum beyaz tabaka kalınlığının düşük olmasından ve nitrür bileşiklerinin çizik testi sırasında dislokasyon hareketlerini engellemesinden kaynaklanmış olabilir (Çelik & Karadeniz, 1996; Karamiş & Gerçekcioğlu, 2000). Nitekim dislokasyon hareketlerinin engellenmesi bu bileşikler etrafında gerilme yığılmasına dolayısıyla çizik izi boyunca çatlak oluşumuna yol açmaktadır.

Tüm numunelerin sürtünme katsayısı çalışmanın başlangıç aşamasındaki ani artışın ardından düşmüş ve belirli bir kayma mesafesinden sonra kararlı durumlarına ulaşmıştır, Şekil 37 ve Şekil 38 ile Şekil 41 ve Şekil 42. Bu durum başlangıçtaki temas alanının düşük, devam eden süreçlerde ise artarak kararlı durumlarına ulaşmasından kaynaklanmış olabilir (Mahato vd., 2010). Şöyle ki başlangıçta numunelerin yüzey pürüzlülüklerinin yüksek olması temasın pürüzlerin uç kısımlarında gerçekleşmesine yol açmaktadır. Bu durum temas alanının başlangıçta düşük, sürtünme katsayısının ise yüksek olması anlamına gelmektedir. Ancak devam eden kayma mesafelerinde pürüzlülük azalmakta ve gerçek temas alanı artmaktadır. Bu aşamadan sonra ise numunelerin sürtünme katsayıları kararlı durumuna ulaşmaktadır. Her iki çeliğinde farklı borlama karışımlarında borlanmış numunelerinin ortalama sürtünme katsayılarının 0,4 ile 0,7 aralığında değişim sergilediği gözlenmiştir, Şekil 39 ve Şekil 40. Bu değişim bor tabakalarının kalınlığına dayandırılarak açıklanabilir.

Şöyle ki, tabaka kalınlığı arttıkça borür tabakaları arasındaki çatlak oluşma eğilimi artmaktadır (Campos-Silva vd., 2010). Bu çatlaklar sürtünme sonucu ortaya çıkan kayma gerilmelerinin etkisiyle üst tabakaya doğru ilerlemekte ve tabakanın parçalanmasına yol açmaktadır. Çatlakların birleşmesiyle oluşan aşınma parçacıkları yüzeyler arasında hareket ederken harekete karşı direnç göstererek sürtünme katsayısını artırmaktadır. Diğer taraftan en düşük aşınma kaybı 32CrMoV12-10 çeliği için B5050 karışımında, 42CrMo4 çeliği için B0595 ve B1090 karışımlarında borlanmış numunelerden elde edilmiştir, Şekil 39 ve Şekil 40. Bu durum söz konusu koşullarda numunelerin yüzeylerinde oluşan borür tabakalarının daha az çatlak ve gözenek gibi kusurları içermesinden, aynı zamanda bu tabakaların kabul edilebilir sınırlar içerisinde yapışma dayanımı kalitesine sahip olmasından kaynaklanmış olabilir (Cimenoglu vd., 2014; Hernández-Ramírez vd., 2020; Arteaga-Hernandez vd., 2021; Fernández-Valdés vd., 2021; Türkmen & Yalamaç, 2022).

Borlama, borlamadan sonra titanyumlama ve sadece titanyumlama işlemleri 32CrMoV12-10 ve 42CrMo4 çeliklerine ait numunelerin aşınma direncini belirgin bir şekilde artırmıştır, Şekil 48 ve Şekil 49. Bu durum söz konusu numunelerin yüzeylerinde oluşan tabakaların sertliğine dayandırılarak açıklanabilir (Martini vd., 2004; Ulutan vd., 2010; Günen vd., 2018; Günen vd., 2018; Kurt vd., 2020). Şöyle ki kaplama işlemlerinden sonra numunelerin yüzey sertlikleri en az 7 kat artmıştır. Bu artış kaplanmış numunelerin hem yük taşıma kabiliyetlerini iyileştirmiş hem de ince taşlama veya parlatma şeklindeki bir abrazyon aşınma sergilemelerine yol açmıştır. Söz konusu bu durum kaplanmış numunelerdeki aşınma kaybının azalmasına dolayısıyla kaplanmamış durumlarına göre aşınma dirençlerinin en az %100'ün üzerinde artmasına neden olmuştur. Diğer taraftan çift fazlı borür tabakasına sahip numunelerin titanyumlama işleminden sonra aşınma dirençlerinin arttığı görülmüştür. Ancak bu durum tek fazlı borür tabakası içeren 42CrMo4 çeliğine ait numunenin titanyumlama işleminden sonra gözlenmemiştir. Titanyumlamadan sonraki aşınma direncindeki iyileşme çift fazlı borür tabakasının bu işlem sırasında tek fazlı borür tabakasına dönüşmesinden kaynaklanmış olabilir (Günen vd., 2017; Günen vd., 2018). Şöyle ki tek fazlı borür tabakasının çatlak içermemesi TiB₂ tabakasının bütünlüğünü korumasına ve bu tabakanın yüksek aşınma direnci sergilmesine yol açmaktadır. Ancak aynı durumun tek fazlı borür tabakası içeren 42CrMo4 çeliğine ait numunede gözlenmemesi, TiB₂ oluşumu sırasında gerekli borun Fe₂B tabakasından karşılanması nedeniyle bünyesindeki boşlukların artmasından kaynaklanmış olabilir. Nitekim bor oranı azalan bu tabakasındaki yoğun gözeneklerin oluştuğu ve sertliğinin yüzeye yakın mesafelerden itibaren düşmeye başladığı

gözlenmiştir, Şekil 27. Fe_2B tabakasında meydana gelen bu durum, TiB_2 tabakasının yük taşıma kabiliyetini olumsuz etkileyerek aşınma direncindeki artışı baskılamış olabilir (Ozbek & Bindal, 2002). Sadece titanyumlanmış numunelerin ise diğer numuneler arasında en düşük aşınma direncini sergilediği belirlenmiştir, Şekil 48 ve Şekil 49. Bu durum söz konusu numunelerin yüzeyinde çok yüksek sertliğe sahip TiC tabakasının oluşmasından kaynaklanmış olabilir. Nitekim adezyon ve çizik testleri bu sert tabakanın yapışma dayanımı kabiliyetinin düşük olduğunu, parçalanarak ve kazınarak yüzeyden ayrıldığını göstermiştir, Şekil 30 ve Şekil 34. Benzer durum söz konusu numunelerin aşınması sırasında da gözlenmiştir. Dolayısıyla TiC tabakasının aşınma sırasında yüzeyden soyulması veya parçalanarak ayrılması titanyumlanan numunelerin diğer kaplanmış numunelere göre daha düşük aşınma direnci sergilemelerine yol açmaktadır.

Borlama, titanyumlama ve borlandıktan sonra titanyumlanan numunelerin nitrürlenmiş durumlarına göre aşınma dirençlerinin düşük olduğu belirlenmiştir, Şekil 48 ve Şekil 49. Bu bulgu nitrürlenmiş numunelerin yüzey özelliklerine ve aşınma mekanizmasına dayandırılarak açıklanabilir (Kato vd., 1994; Karamiş & Gerçekcioğlu, 2000; Joshi vd., 2015; Vega-Morón vd., 2018). Şöyle ki, nitrürlenmiş numunelerin yüzeyinde oluşan beyaz tabakanın aşınma esnasında kalktığı, ancak bu tabakanın altında bulunan ve nitrür bileşikler içeren yüzeyin yükü taşıdığı gözlenmiştir, Şekil 22. Diğer taraftan nitrürlenmiş numunelerin yüzey sertliğinin diğer numunelerden düşük olması kopan parçacıkların bir bölümünün yüzeye yapışmasını da kolaylaştırmaktadır. Bu durumlar nitrürlenmiş numunelerin aşınma kaybını düşürerek diğer numunelerden daha üstün aşınma direnci sergilemelerine yol açmıştır.

Oda sıcaklığında yapılan aşınma deneyleri sonucunda çift bazlı borür tabakasına sahip çeliklere ait numunelerin titanyumlandıktan sonra diğer tüm durumlarına göre yüksek, nitrürlenmiş durumlarına göre ise daha düşük aşınma direnci sergiledikleri görülmüştür. Ancak yüksek sıcaklık altında ($500\text{ }^{\circ}\text{C}$) yapılan deneylerden bu durumun tam tersi sonuçlar elde edilmiştir, Şekil 54. Bu bulgular söz konusu numunelerin yüksek sıcaklıklardaki aşınma mekanizmalarına dayandırılarak açıklanabilir (Karamiş & Gerçekcioğlu, 2000; Cimenoglu vd., 2014; Motallebzadeh vd., 2015; Günen vd., 2018; Günen, 2020). Şöyle ki, yüksek sıcaklıkdaki aşınma sırasında nitrürlenmiş numunelerin yüzeylerinde oluşan adezyon tabakası soyularak yüzeyden ayrılmaktadır, Şekil 51 ve Şekil 52. Benzer durum borlandıktan sonra titanyumlanan numunelerin yüzeylerinde de ortaya çıkmaktadır. Ancak bu numunelerden kopan oksit tabakalarının bir bölümü aşınma yolu üzerine sıvanarak aşınma

yolunu doldurmaktadır. Diğer taraftan yüksek sıcaklıklarda titanyumun oksitlenme eğiliminin artması aşınma sırasında bu numunelerin yüzeyinde oksit birikmesine neden olmaktadır, Şekil 51 ve Şekil 52. Bu durumlar söz konusu numunelerin yüksek sıcaklık altında aşınma kaybının azalmasına dolayısıyla aşınma dirençlerinin artmasına yol açmaktadır. Ancak kopan oksit parçacıkları veya bunların kopması sırasında ortaya çıkan direnç kuvvetleri bu numunelerin düşük aşınma kaybına karşın yüksek sürtünme katsayısı sergilemelerine neden olmaktadır (Karamiş & Gerçekcioğlu, 2000; Cimenoglu vd., 2014; Motallebzadeh vd., 2015; Günen vd., 2018; Günen, 2020).

Kaplama işlemi öncesi aşınma deneyine tabi tutulan numunenin aşınma yüzeyinde yapışmaya dayalı aşınma tabakalarının oluştuğu ve bu tabakaların bazı bölgelerinden koparak yüzeyden ayrıldığı gözlenmiştir, Şekil 55. Aşınma tabakalarının (adezyon tabakası) yüzeyler arasında transfer olan aşınma parçacıklarının yüzeylere yapışması sonucunda oluştukları bilinmektedir (Carrera-Espinoza vd., 2016; Koçyiğit vd., 2020; Morón vd., 2020). Ancak bu tabakalar belirli bir kalınlığa ulaştıktan sonra gevrekleşmekte ve bazı bölgelerinden koparak yüzeylerden ayrılmaktadır.

Kaplanmış numunelerin aşınma yüzeylerinin ince taşlama ya da parlatma sonucunda oluşan yüzeylere benzer bir görünüm sergiledikleri gözlenmiştir, Şekil 56 - Şekil 60. Borlanmış numunelerin aşınma yüzeylerinde ise çatlaklar meydana gelmiştir, Şekil 56 ve Şekil 57. Diğer taraftan kaplanmış numunelerin yüzeylerindeki aşınma tabakalarının bazı bölgelerinden soyulduğu ancak bu soyulmaların TiC tabakasına sahip numunelerde daha yoğun olduğu belirlenmiştir, Şekil 58. Bu gözlem ve bulgular tabakaların sertliğine ve yapışma kabiliyetlerine dayandırılarak açıklanabilir (Carrera-Espinoza vd., 2016; Günen vd., 2017; Günen vd., 2018; Günen vd., 2018; Kurt vd., 2020; Arteaga-Hernandez vd., 2021; Türkmen & Yalamaç, 2022). Şöyle ki tabakaların sertliğinin yüksek olması ve sert bir yüzey tarafından aşınmaya zorlanması borlanmış numunelerde taşlama, titanyumlanmış numunelerde ise parlatma etkisine benzer bir etki oluşturmaktadır. Titanyum kaplanmış numunelerin aşınma yüzeylerindeki bu görünüm pürüzlerin ezilerek yüzeye sıvanması, bir kısmının ise koparak pürüzler arasındaki boşlukları doldurması sonucu ortaya çıkmaktadır, Şekil 59. Ancak titanyumlanmış numunelerin aşınma yüzeylerindeki soyulmaların TiC tabakasının gevrek ve yapışma dayanımı kabiliyetinin düşük olmasından, borlanmış numunelerdeki aynı durumun ise iç çatlakların yüzeye doğru büyümesinden kaynaklanabilir. Bu soyulmalar sonucunda söz konusu tabakalardan toz biçimindeki aşınma parçacıklarının yanında yonga biçiminde parçacıkların da oluştuğu gözlenmiştir, Şekil 63.

Nitekim bu gözlemler söz konusu numunelerin başta ince abrazyon olmak üzere soyulma yoluyla aşındığını işaret etmektedir. Nitrürlenmiş çeliklerin aşınma yüzeylerinde ise adezyon ve abrazyona dayalı etkiler gözlenmiştir, Şekil 60. Adezyonun soyulan parçacıkların yüzeye yapışmasından, abrazyonun ise söz konusu parçacıkların yüzeyi kazımasından kaynaklandığı bilinmektedir (Zhang & Alpas, 1993; Rigney, 2000). Diğer taraftan ileri-geri aşınma deneyine tabi tutulan numunelerin yüzeylerindeki aşınma izinin uç kısımlarında kopan parçacıkların biriktikleri, ancak sert kaplama içeren numunelerde bunların yüzeye gevşek tutundukları ve numunelerinin temizlenmesi sonrasında nispeten döküldükleri görülmüştür. Bu durum yüksek sertliğe sahip tabakaların aşınma parçacıklarının yüzeye yapışmalarını kısıtlanmasından kaynaklanmış olabilir (Carrera-Espinoza vd., 2016; Günen vd., 2017; Günen vd., 2018; Günen vd., 2018; Kurt vd., 2020; Arteaga-Hernandez vd., 2021; Türkmen & Yalamaç, 2022). Nitekim aşınma numunelerinden üretilen parçacıklara bakıldığında abrazyon sonucu üretilenlerin toz, soyulma sonucu oluşanların ise yonga biçiminde oldukları gözlenmiştir, Şekil 63. Bu tozların kimyasal bileşimlerinin hemen hemen tabakaların bileşimine yakın olduğu ancak tabakalardan farklı olarak oksijen içeriklerinin yüksek olduğu belirlenmiştir, Tablo 28. Parçacıkların oksijen miktarının yüksek olması aşınma sırasında ortaya çıkan sürtünme ısısından kaynaklanmış olabilir.

500 °C sıcaklıkta aşınma deneyine tabi tutulan numunelerin aşınma yüzeylerinde yoğun adezyon tabakalarının oluştuğu gözlenmiştir, Şekil 61 ve Şekil 62. Bu durum titanyumun yüksek sıcaklıklardaki oksitlenme eğiliminden kaynaklanmış olabilir. Şöyle ki titanyumun 450 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda oksitlenme eğilimin arttığı bilinmektedir (Vaquila vd., 1999). Bu oksitler adezyon tabakasının her ne kadar parçalanmasına yol açmış olsa da kopan parçacıkların birbirine tutunarak aşınma yolu üzerinde birikmelerine neden olmaktadır. Nitekim bu numunelerin aşınma izlerine ait 3D görüntülerinde izin etrafında mantarlaşmanın meydana geldiği ve bazı bölgelerinde aşınma derinliği yerine yükseltilerinin oluştuğu gözlenmiştir, Şekil 51 ve Şekil 52. Bu durum söz konusu numunelerde 500 °C sıcaklıkta oksidatif aşınmanın etkin olabileceğini göstermektedir. Oksidatif aşınma aynı zamanda bu numunelerden iri kum taneleri biçiminde aşınma parçacıkları üretilmesine yol açmaktadır, Şekil 65. Diğer taraftan nitrürlenmiş numunelerin 500 °C sıcaklıkta yapılan aşınma deneylerine ait numunelerinin yüzeyindeki aşınma izi derinliğinin ve genişliğinin arttığı görülmüştür. Bu durum nitrürlenmiş numunelerde söz konusu sıcaklıkta soyulmaya

dayalı aşınmanın meydana gelmesinden kaynaklanmış olabilir (Karamiş & Gerçekcioğlu, 2000).

Kaplama tabakalarının sert oluşlarından dolayı bunların aşınmasında kullanılan bilyelerin de yüzeylerinin aşındığı ve düzleştiği gözlenmiştir, Şekil 64 ve Şekil 66. Bu durum oksit içeriği yüksek aşınma parçacıklarının bilye yüzeylerini aşındırmasından kaynaklanmış olabilir (Carrera-Espinoza vd., 2016; Günen, 2020; Fernández-Valdés vd., 2021). Bazı parçacıklar ise kazıma etkisi yaparak bilye yüzeylerinde derin çizikler oluşturmaktadır. Bilye yüzeylerindeki en yoğun aşınmanın titanyumlanmış numunelerin aşınmasında kullanılan bilyelerin yüzeyinde olduğu gözlenmiştir. Bu durum TiC tabakasının sertliğinin kullanılan bilyenin söz konusu değerinden daha yüksek olmasından kaynaklanmış olabilir.

Borür tabakalarının namlu iç yüzeylerinde bulunan set, yiv ve bunların geçiş bölgelerinde homojen kalınlıkta bir dağılım sergiledikleri görülmüştür, Şekil 67 ve Şekil 68. Ancak bu dağılımın namlu uzunluğu boyunca homojen olmadığı gözlenmiştir, Tablo 32. Bu durum namlu uzunluğu boyunca bor konsantrasyonunun değişimi ile ilişkili olabilir (Pokorny vd., 2020; Prochazka vd., 2020). Şöyle ki, namlu geometrisindeki numunelerde bor atomları düz yüzeylerden farklı olarak hem radyal hem de dikey doğrultuda yayılmaktadır. Bu durum namlu uzunluğu boyunca bor atomlarının konsantrasyonun değişmesine dolayısıyla tabakaların söz konusu uzunluk boyunca homojen olmayan kalınlıklara sahip olmasına yol açmaktadır. Diğer taraftan borlandıktan sonra yapılan titanyumlama işlemi sonucunda düz yüzeylerde olduğu gibi namlu iç yüzeylerinde sürekli ve borür tabakaları ile ara yüzey etkileşimi iyi olan TiB_2 fazına ait bir tabaka meydana gelmemiştir, Şekil 69. Bu durum namlu iç yüzey hacminin yetersiz oluşundan veya bu hacim içerisinde yer alan titanyum karışımının TiB_2 tabakasının oluşumu için gerekli Ti atomlarını sağlayamamasından kaynaklanmış olabilir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada borlama, titanyumlama ve borlandıktan sonra titanyumlama işlemlerinin 42CrMo4 ve 32CrMoV12-10 çeliklerinin yüzey özelliklerine ve aşınma davranışlarına etkisi sistematik bir biçimde incelenmiş, elde edilen sonuçlar söz konusu çeliklerin ticari nitrürlenmiş durumları ile karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda gerçekleştirilen çalışmalar neticesinde ulaşılan sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

1. Saf bor esaslı karışımlar ile 42CrMo4 ve 32CrMoV12-10 çeliklerinin yüzeylerinde birbirine testere ağzı biçiminde kenetlenmiş ve sertlikleri 2000-2200 HV arasında değişen borür tabakaları oluşturulabilmektedir.
2. B0595 borlama karışımında 900 °C sıcaklıkta 3 saat borlanan 42CrMo4 çeliğinin yüzeyinde tek fazlı (Fe_2B) borür tabakası oluşmaktadır.
3. Karışımının bor oranı arttıkça 42CrMo4 ve 32CrMoV12-10 çeliklerinin yüzeylerinde oluşan Fe_2B tabakasının kalınlığı değişmemekte ancak FeB tabakasının kalınlığı artmakta ve belirli bir bor oranından (B5050) sonra sabit kalmaktadır.
4. Bileşen oranları aynı olan karışımlarda borlanan 42CrMo4 ve 32CrMoV12-10 çeliklerinin yüzeylerinde oluşan Fe_2B ve FeB tabakalarının kalınlıkları artan borlama sıcaklığı ve süresi ile artmaktadır.
5. 42CrMo4 ve 32CrMoV12-10 yüzeylerinde oluşan borür tabakalarının sertlikleri karışımının bor oranı, borlama sıcaklık ve süresinden bağımsızdır.
6. Çeliklerin yüzeylerinde oluşan Fe_2B tabakasının sertliği difüzyon bölgesine yakın derinliklerde azalmaktadır.
7. Titanyumlama ve borlandıktan sonra titanyumlama işlemleri 42CrMo4 ve 32CrMoV12-10 çeliklerinin yüzeylerinde sertlik değerleri yaklaşık 4000 HV ve 3600 HV olan TiC ve TiB_2 tabakaları oluşturmaktadır.
8. Borlandıktan sonra titanyumlama işlemi 42CrMo4 ve 32CrMoV12-10 çeliklerinin yüzeylerinde bulunan çift fazlı (Fe_2B ve FeB) borür tabakalarını tek fazlı (Fe_2B) borür tabakasına dönüştürmektedir.
9. Tek fazlı borür (Fe_2B) tabakasına sahip 42CrMo4 çeliğine uygulanan titanyumlama işlemi bu tabakada belirgin boşlukların oluşmasına yol açmaktadır.
10. Borlama işlemi çeliklerde Fe_2B tabakasının hemen altında bir difüzyon bölgesi oluşumuna neden olmaktadır.

11. Nitrürleme işleminden sonra çeliklerin yüzeylerinde sertliği yaklaşık 1100 HV olan $\text{Fe}_{3,4}\text{N}$ fazına sahip bir tabaka ve bu tabakanın hemen altında nitrür bileşikleri içeren bir difüzyon bölgesi oluşmaktadır.

12. Borlama ve nitrürleme işlemleri çeliklerin yüzeylerinde kabul edilebilir sınırlar içerisinde yapışma (adezyon) dayanımı kalitesine sahip tabakalar oluşturmaktadır. Borlama ve ardından uygulanan titanyumlama işlemi ise tabakaların yapışma dayanımı kalitesini önemli ölçüde iyileştirmektedir.

13. Tek fazlı borür tabakasında ilk çatlak sırasıyla nitrür, çift fazlı borür, TiC ve TiB_2 tabakalarına göre daha yüksek çizik kuvvetinde meydana gelmektedir. Diğer taraftan tek fazlı Fe_2B borür ve TiB_2 tabakasına sahip çeliklerin yüzeylerinde diğer tabakalara göre daha homojen çizik izleri oluşmaktadır.

14. Titanyumlama işleminden sonra 42CrMo4 ve 32CrMoV12-10 çeliklerinin sürtünme katsayıları düşmekte ancak borlama ve borlandıktan sonra yapılan titanyumlama işleminden sonra artmaktadır.

15. Borlama, nitrürleme, titanyumlama, borlandıktan sonra titanyumlama işlemleri 42CrMo4 ve 32CrMoV12-10 çeliklerinin aşınma dirençlerini belirgin bir biçimde artırmaktadır.

16. B0595 ve B1090 karışımlarında 900 °C sıcaklıkta 3 saat borlanan 42CrMo4 çeliği ile B5050 karışımında aynı parametrelerde borlanan 32CrMoV12-10 çeliği diğer tüm karışımlarda borlanmış durumlarından daha yüksek aşınma direnci sergilemektedir.

17. Borlandıktan sonra titanyumlama işlemi 42CrMo4 ve 32CrMoV12-10 çeliklerinin aşınma dirençlerini artırmaktadır.

18. Oda sıcaklığındaki (25 °C) aşınma koşullarında nitrürlenmiş çelikler borlandıktan sonra titanyumlanmış durumlarından, yüksek sıcaklıktaki aşınma koşullarında (500 °C) ise borlandıktan sonra titanyumlanmış çelikler nitrürlenmiş durumlarına göre daha üstün aşınma direnci sergilemektedir.

19. Kaplanmamış çeliklerin aşınma mekanizmaları esas olarak adezyon, kısmen de oksidasyon ve soyulmadan oluşmaktadır. Kaplanmış çelikler ise ince taşlamaya benzer bir abrazif aşınma sergilemektedir. Ancak titanyumlanmış çeliklerin aşınması sırasında yüzeylerinde belirgin soyulmalar, borlanmış çeliklerin ise çatlaklar oluşmaktadır.

20. Yüksek sıcaklıkta aşınma deneyine tabi tutulan kaplanmış çeliklerin aşınma yüzeylerinde oksit tabakaları oluşmakta ve söz konusu yüzeylerde oksitlenmiş yığınlar meydana gelmektedir.

21. Kaplanmış eliklerin aşınmasında kullanılan bilyelerin yüzeyleri aşınmakta ve kaplamaların sertliğı arttıkça bu bilyelerin yüzeyleri düzleşmektedir.
22. Kaplanmış eliklerin aşınması sonucunda esas olarak ince toz kısmen de yonga biçiminde aşınma parçacıkları oluşmaktadır.
23. 42CrMo4 çeliğinden imal edilen kısa namlulu bir silaha ait namlu numunesinin iç yüzeyinde homojen dağılım sergileyen borür tabakaları oluşturulabilmektedir. Borlanmış iç yüzeyin titanyumlanması ise uygulanan parametrelerde aynı homojenlikte TiB₂ tabakası elde edilememektedir.



6. ÖNERİLER

Bu çalışmanın yürütülmesi sırasında düşünülen ve gelecek çalışmalarda yapılması planlanan araştırmalara ilişkin öneriler aşağıda verilmiştir.

1. Geliştirilen kaplamaların farklı yükler ve sıcaklıklar altında sürtünme ve aşınma davranışları incelenebilir.
2. Kaplamaların uzun namlulu silahların namlu iç yüzeylerine uygulanabilirliği araştırılıp, performansları atış testleri ile belirlenebilir.
3. Geliştirilen kaplamaların korozyonu ve/veya tribokorozyonu araştırılabilir.



7. KAYNAKLAR

- Arteaga-Hernandez, L. A., Cuao-Moreu, C. A., Gonzalez-Rivera, C. E., Alvarez-Vera, M., Ortega-Saenz, J. A. & Hernandez-Rodriguez, M. A. L. (2021). Study of boriding surface treatment in the tribological behavior of an AISI 316L stainless steel. *Wear*, 477, 203825.
- Baptista, A., Silva, F., Porteiro, J., Míguez, J. & Pinto, G. (2018). Sputtering Physical Vapour Deposition (PVD) Coatings: A Critical Review on Process Improvement and Market Trend Demands. *Coatings*, 8(11).
- Barnhart, J. (1997). Occurrences, Uses, and Properties of Chromium. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 26(1), S3-S7.
- Bilal, M. M., Yaqoob, K., Zahid, M. H., haq, E. u., Tanveer, W. H., Wadood, A. & Ahmed, B. (2019). Effect of austempering conditions on the microstructure and mechanical properties of AISI 4340 and AISI 4140 steels. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(6), 5194-5200.
- Brandstötter, J. & Lengauer, W. (1997). Multiphase reaction diffusion in transition metal-boron systems. *Journal of Alloys and Compounds*, 262-263, 390-396.
- Campos-Silva, I., Flores-Jiménez, M., Bravo-Bárcenas, D., Balmori-Ramírez, H., Andraca-Adame, J., Martínez-Trinidad, J. & Meda-Campaña, J. A. (2017). Evolution of boride layers during a diffusion annealing process. *Surface and Coatings Technology*, 309, 155-163.
- Campos-Silva, I., Hernández-Sánchez, E., Rodríguez-Castro, G., Cimenoglu, H., Nava-Sánchez, J. L., Meneses-Amador, A. & Carrera-Espinoza, R. (2013). A study of indentation for mechanical characterization of the Fe₂B layer. *Surface and Coatings Technology*, 232, 173-181.
- Campos-Silva, I., Ortiz-Domínguez, M., Cimenoglu, H., Escobar-Galindo, R., Keddám, M., Elías-Espinosa, M. & López-Perrusquia, N. (2011). Diffusion model for growth of Fe₂B layer in pure iron. *Surface Engineering*, 27(3), 189-195.
- Campos-Silva, I., Ortiz-Domínguez, M., López-Perrusquia, N., Meneses-Amador, A., Escobar-Galindo, R. & Martínez-Trinidad, J. (2010). Characterization of AISI 4140 borided steels. *Applied Surface Science*, 256(8), 2372-2379.
- Campos-Silva, I. E. & Rodríguez-Castro, G. A. (2015). *Thermochemical Surface Engineering of Steels: Boriding to improve the mechanical properties and corrosion resistance of steels*. Oxford: Woodhead Publishing.
- Carrera-Espinoza, R., Figueroa-López, U., Martínez-Trinidad, J., Campos-Silva, I., Hernández-Sánchez, E. & Motallebzadeh, A. (2016). Tribological behavior of

- borided AISI 1018 steel under linear reciprocating sliding conditions. *Wear*, 362-363, 1-7.
- Chae, J. W., Lee, S. B., Lee, C., Kim, H. J. & Lee, Y. S. (2006). A Study on the Surface Treatments of the Barrel of Small Arms under the Firing Condition. *Key Engineering Materials*, 326-328, 631-634.
- Chen, F.S. & Wang, K.L. (1999). The kinetics and mechanism of multi-component diffusion on AISI 1045 steel. *Surface and Coatings Technology*, 115(2), 239-248.
- Cimenoglu, H., Atar, E. & Motallebzadeh, A. (2014). High temperature tribological behaviour of borided surfaces based on the phase structure of the boride layer. *Wear*, 309(1), 152-158.
- Çelik, A. & Karadeniz, S. (1996). Investigation of compound layer formed during ion nitriding of AISI 4140 steel. *Surface and Coatings Technology*, 80(3), 283-286.
- Çep, H., Kovacı, H., Çimenoglu, H. & Çelik, A. (2021). Effects of Boriding, Nitrocarburizing, Nitriding and Post-oxidation Treatments on The Tribological Properties of DIN 32CrMoV12-10 Steel. *Erzincan University Journal of Science and Technology*, 14(3), 936-949.
- Çetin, M., Günen, A., Kalkandelen, M. & Karakaş, M. S. (2021). Microstructural, wear and corrosion characteristics of boronized AISI 904L superaustenitic stainless steel. *Vacuum*, 187, 110145.
- da Costa Aichholz, S. A., Sostag Meruvia, M., Soares Júnior, P. C. & Torres, R. D. (2018). Tribocorrosion behavior of boronized AISI 4140 steel. *Surface and Coatings Technology*, 352, 265-272.
- Davis, J. R. (2002). *Surface Hardening of Steels: Understanding the Basics*. Ohio: ASM international.
- Degirmenci, E. (2015). Semi-empirical prediction of internal pressure distribution and muzzle velocity in the rifled barrel of a light weapon. *Measurement*, 70, 123-128.
- Delai, O., Xia, C. & Shiqiang, L. (2021). Growth kinetics of the FeB/Fe₂B boride layer on the surface of 4Cr5MoSiV1 steel: experiments and modelling. *Journal of Materials Research and Technology*, 11, 1272-1280.
- dos S. de Almeida, E. A., Milan, J. C. G., Costa, H. L., Krelling, A. P. & da Costa, C. E. (2018). Sliding wear of borided sintered AISI M2 steel coated with AlTiN/CrN multilayer. *Wear*, 410-411, 11-24.
- Dybkov, V. I. (2007). Growth of boride layers on the 13% Cr steel surface in a mixture of amorphous boron and KBF₄. *Journal of Materials Science*, 42(16), 6614-6627.
- Edenhofer, B., Joritz, D., Rink, M. & Voges, K. (2015). *Thermochemical Surface Engineering of Steel*. Oxford: Woodhead Publishing.

- Fernández-Valdés, D., Meneses-Amador, A., López-Liévano, A. & Ocampo-Ramírez, A. (2021). Sliding wear analysis in borided AISI 316L steels. *Materials Letters*, 285, 129138.
- Fichtl, W. (1981). Boronizing and its practical applications. *Materials & Design*, 2(6), 276-286.
- Gambelunghe, A., Piccinini, R., Ambroggi, M., Villarini, M., Moretti, M., Marchetti, C., Abbritti, G. & Muzi, G. (2003). Primary DNA damage in chrome-plating workers. *Toxicology*, 188(2), 187-195.
- Gómez-Vargas, O. A., Solis-Romero, J., Figueroa-López, U., Ortiz-Domínguez, M., Oseguera-Peña, J. & Neville, A. (2016). Boro-nitriding coating on pure iron by powder-pack boriding and nitriding processes. *Materials Letters*, 176, 261-264.
- Gutierrez-Noda, L., Cuao-Moreu, C. A., Perez-Acosta, O., Lorenzo-Bonet, E., Zambrano-Robledo, P. & Hernandez-Rodriguez, M. A. L. (2019). The effect of a boride diffusion layer on the tribological properties of AISI M2 steel. *Wear*, 426-427, 1667-1671.
- Günen, A. (2020). Properties and High Temperature Dry Sliding Wear Behavior of Boronized Inconel 718. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 51(2), 927-939.
- Günen, A., Kanca, E., Çakir, H., Karakaş, M. S., Gök, M. S., Küçük, Y. & Demir, M. (2017). Effect of borotitanizing on microstructure and wear behavior of Inconel 625. *Surface and Coatings Technology*, 311, 374-382.
- Günen, A., Kanca, E., Karakaş, M. S., Koç, V., Gök, M. S., Kanca, Y., Çürük, A. & Demir, M. (2018). High temperature wear behavior of the surface-modified externally cooled rolls. *Surface and Coatings Technology*, 348, 130-141.
- Günen, A., Kanca, Y., Karahan, İ. H., Karakaş, M. S., Gök, M. S., Kanca, E. & Çürük, A. (2018). A Comparative Study on the Effects of Different Thermochemical Coating Techniques on Corrosion Resistance of STKM-13A Steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 49(11), 5833-5847.
- Günen, A., Karahan, İ. H., Karakaş, M. S., Kurt, B., Kanca, Y., Çay, V. V. & Yıldız, M. (2020). Properties and Corrosion Resistance of AISI H13 Hot-Work Tool Steel with Borided B₄C Powders. *Metals and Materials International*, 26(9), 1329-1340.
- Hajek, J. & Coufal, V. (2021). Boronizing in Arms Industry. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1178(1), 012014.
- Hameed, A., Azavedo, M. & Pitcher, P. (2014). Experimental investigation of a cook-off temperature in a hot barrel. *Defence Technology*, 10(2), 86-91.
- Han, Y., Dai, Y., Shu, D., Wang, J. & Sun, B. (2007). Electronic and bonding properties of TiB₂. *Journal of Alloys and Compounds*, 438(1), 327-331.

- Hen-Tov, E. (2004). The political economy of Turkish military modernization. *Middle East Review of International Affairs*, 8(4), 49-59.
- Hernández-Ramírez, E. J., Guevara-Morales, A., Figueroa-López, U. & Campos-Silva, I. (2020). Wear resistance of diffusion annealed borided AISI 1018 steel. *Materials Letters*, 277, 128297.
- Hernández-Sánchez, E., Domínguez-Galicia, Y. M., Orozco-Álvarez, C., Carrera-Espinoza, R., Herrera-Hernández, H. & Velázquez, J. C. (2014). A Study on the Effect of the Boron Potential on the Mechanical Properties of the Borided Layers Obtained by Boron Diffusion at the Surface of AISI 316L Steel. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014(1), 249174.
- Joshi, A. A. & Hosmani, S. S. (2014). Pack-Boronizing of AISI 4140 Steel: Boronizing Mechanism and the Role of Container Design. *Materials and Manufacturing Processes*, 29(9), 1062-1072.
- Joshi, A. A., Hosmani, S. S. & Dumbre, J. (2015). Tribological Performance of Boronized, Nitrided, and Normalized AISI 4140 Steel against Hydrogenated Diamond-Like Carbon-Coated AISI D2 Steel. *Tribology Transactions*, 58(3), 500-510.
- Kaouka, A., Allaoui, O. & Keddou, M. (2013). Growth kinetics of the boride layers formed on SAE 1035 steel. *Matériaux & Techniques*, 101(7), 705.
- Kara, G. & Purcek, G. (2020). Mechanical properties and cell proliferation response of borided biomedical titanium alloys with different crystalline structures. *Surface and Coatings Technology*, 397, 126051.
- Karakas, M. S. (2020). Tribocorrosion behavior of surface-modified AISI D2 steel. *Surface and Coatings Technology*, 394, 125884.
- Karamiş, M. B. & Gerçekcioğlu, E. (2000). Wear behaviour of plasma nitrided steels at ambient and elevated temperatures. *Wear*, 243(1), 76-84.
- Kato, H., Eyre, T. S. & Ralph, B. (1994). Sliding wear characteristics of nitrided steels. *Surface Engineering*, 10(1), 65-74.
- Koçyiğit, F., Yıldız, F., Gök, M. S. & Çay, V. V. (2020). Dry-sliding wear behavior of AISI 4140 barrel steel at elevated temperatures. *Materials Testing*, 62(2), 189-195.
- Krauss, G. (1992). Advanced surface modification of steels. *Journal of Heat Treating*, 9(2), 81-89.
- Kul, M., Danacı, I., Gezer, Ş. & Karaca, B. (2020). Effect of boronizing composition on hardness of boronized AISI 1045 steel. *Materials Letters*, 279, 128510.
- Kurt, B., Özdoğan, L., Güney, B., Bölükbaşı, Ö. S. & Günen, A. (2020). Characterization and wear behavior of TiBC coatings formed by thermo-reactive diffusion technique on AISI D6 steel. *Surface and Coatings Technology*, 385, 125332.

- Larisch, B., Brusky, U. & Spies, H. J. (1999). Plasma nitriding of stainless steels at low temperatures. *Surface and Coatings Technology*, 116-119, 205-211.
- Lawton, B. (2001). Thermo-chemical erosion in gun barrels. *Wear*, 251(1), 827-838.
- Lee, M.-J. & Kim, K.-W. (2004). Microscopic Cracking and Spalling Behavior of the Duplex Layer of a Gas-Nitrided Gun Bore Surface. *Tribology Letters*, 17(1), 61-67.
- Lukaszewicz, K. (2011). Review of nanocomposite thin films and coatings deposited by PVD and CVD technology. *Nanomaterials*, 145-163.
- Mahato, A., Perry, T. A., Jayaram, V. & Biswas, S. K. (2010). Pressure and thermally induced stages of wear in dry sliding of a steel ball against an aluminium–silicon alloy flat. *Wear*, 268(9), 1080-1090.
- Maragoudakis, N. E., Stergioudis, G., Omar, H., Pavlidou, E. & Tsipas, D. N. (2002). Boronitriding of steel US 37-1. *Materials Letters*, 57(4), 949-952.
- Márquez-Cortés, R., Martínez-Trinidad, J. & García-León, R. A. (2022). Adhesion behaviour of borided AISI 4140 steel. *Surface Engineering*, 38(10-12), 977-984.
- Martini, C., Palombarini, G., Poli, G. & Prandstraller, D. (2004). Sliding and abrasive wear behaviour of boride coatings. *Wear*, 256(6), 608-613.
- Mertgenç, E., Kayalı, Y. & Talaş, Ş. (2021). Effect of Boronizing and Aluminizing on the Wear Resistance of Steel AISI 1010. *Metal Science and Heat Treatment*, 63(7), 388-395.
- Mishra, A., Hameed, A. & Lawton, B. (2010). A Novel Scheme for Computing Gun Barrel Temperature History and Its Experimental Validation. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 132(6), 061202.
- Morón, R. C., Arellano-Ortiz, G. A., Rodríguez-Castro, G. A., Meneses-Amador, A., Cruz-Ramírez, A., Méndez-Méndez, J. V. & Campos-Silva, I. (2020). Wear Performance Under Dry and Lubricated Conditions of Post Boriding Heat Treatment in 4140 Steel. *Journal of Tribology*, 143(2).
- Motallebzadeh, A., Dilektasli, E., Baydogan, M., Atar, E. & Cimenoglu, H. (2015). Evaluation of the effect of boride layer structure on the high temperature wear behavior of borided steels. *Wear*, 328-329, 110-114.
- Munro, R. G. (2000). Material Properties of Titanium Diboride. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 105(5), 709-720.
- Ogwu, A. A. & Davies, T. J. (1996). The densification and mechanical properties of a TiC and TiB₂ hardmetal sintered with a reactive alloy binder. *Physica Status Solidi (A)*, 153(1), 101-116.
- Ozbek, I. & Bindal, C. (2002). Mechanical properties of boronized AISI W4 steel. *Surface and Coatings Technology*, 154(1), 14-20.

- Özdemir Öge, T., Günen, A., Öge, M., Küçük, Y., Ateş, B., Kanca, Y., Dakes, K. & Gök, M. S. (2025). Tribological response of pack-boronized inconel 601 superalloy surfaces at elevated temperatures. *Tribology International*, 203, 110387.
- Pavel, C. C., Tzimas, E., Dias, P. A. & Blagoeva, D. T. (2020). *Raw and Processed Materials Used in the European Defence Industry*. Luxembourg: Publication Office of the European Union.
- Pertek, A. & Kulka, M. (2003). Two-step treatment carburizing followed by boriding on medium-carbon steel. *Surface and Coatings Technology*, 173(2), 309-314.
- Petitpas, E. & Campion, B. (2003). Crack Propagation in a Gun Barrel Due to the Firing Thermo-Mechanical Stresses. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 125(3), 293-298.
- Pokorny, Z., Dobrocky, D. & Joska, Z. (2020). The modification of surface of barrels by gas nitriding. *Manufacturing Technology* 20(6), 802-808.
- Pokorný, Z., Kadlec, J., Hrubý, V., Joska, Z., Tran, D. & Beran, D. (2011). Plasma Nitriding of Bored Barrels. *Advances in Military Technology*, 6(1), 69-76.
- Pomel'nikova, A. S., Shipko, M. N. & Stepovich, M. A. (2011). Features of structural changes due to the formation of the boride crystal structure in steels. *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 5(2), 298-304.
- Prochazka, J., Pokorny, Z. & Dobrocky, D. (2020). Service Behavior of Nitride Layers of Steels for Military Applications. *Coatings*, 10(10).
- Purcek, G., Yanar, H., Demirtas, M., Shangina, D. V., Bochvar, N. R. & Dobatkin, S. V. (2020). Microstructural, mechanical and tribological properties of ultrafine-grained Cu–Cr–Zr alloy processed by high pressure torsion. *Journal of Alloys and Compounds*, 816, 152675.
- Rebenne, H. E. & Bhat, D. G. (1994). Review of CVD TiN coatings for wear-resistant applications: deposition processes, properties and performance. *Surface and Coatings Technology*, 63(1), 1-13.
- Rigney, D. A. (2000). Transfer, mixing and associated chemical and mechanical processes during the sliding of ductile materials. *Wear*, 245(1), 1-9.
- Rile, M. (1974). Reasons for the formation of cracks in boride coatings on steel. *Metal Science and Heat Treatment*, 16(10), 836-838.
- Ruiz, M. D., Perrusquia, N. L., Miguel, C. R. T. S., Saucedo, N. M. & Domínguez, V. O. (2020). Characterization of Microstructure Obtained by Boronitriding of an AISI H13 Steel. *Microscopy and Microanalysis*, 26(S2), 2452-2453.
- Samadi, V. & Habibolahzade, A. (2010). Evaluation of microstructures and wear properties of duplex boride coatings. *Materials Science and Technology*, 26(1), 41-46.

- Sandler, T. & George, J. (2016). Military Expenditure Trends for 1960–2014 and What They Reveal. *Global Policy*, 7(2), 174-184.
- Sen, S. (2005). The characterization of vanadium boride coatings on AISI 8620 steel. *Surface and Coatings Technology*, 190(1), 1-6.
- Sen, S. & Sen, U. (2009). The effect of boronizing and boro-chromizing on tribological performance of AISI 52100 bearing steels. *Industrial Lubrication and Tribology*, 61(3), 146-153.
- Sert, Y. (2022). *Sıcak Dövme Kalıpları İçin Yüzey Kaplama Tabakası Geliştirilmesi*. K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.
- Sheward, J. A. (1992). The coating of internal surfaces by PVD techniques. *Surface and Coatings Technology*, 54-55, 297-302.
- Shihab, S. K., Khan, Z. A., Mohammad, A. & Siddiquee, A. N. (2014). A review of turning of hard steels used in bearing and automotive applications. *Production & Manufacturing Research*, 2(1), 24-49.
- Speich, G. R. & Leslie, W. C. (1972). Tempering of steel. *Metallurgical Transactions*, 3(5), 1043-1054.
- Spence, T. W. & Makhlof, M. M. (2005). Characterization of the operative mechanism in potassium fluoborate activated pack boriding of steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 168(1), 127-136.
- Taktak, S. (2006). Tribological behaviour of borided bearing steels at elevated temperatures. *Surface and Coatings Technology*, 201(6), 2230-2239.
- Triani, R. M., Gomes, L. F. D. A., Neto, A. L., Totten, G. E. & Casteletti, L. C. (2020). Production and Characterization of Boride and Carbide Layers on AISI 15B30 Steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 29(6), 3534-3541.
- Türkmen, İ. & Yalamaç, E. (2018). Growth of the Fe₂B layer on SAE 1020 steel employed a boron source of H₃BO₃ during the powder-pack boriding method. *Journal of Alloys and Compounds*, 744, 658-666.
- Türkmen, İ. & Yalamaç, E. (2022). Effect of Alternative Boronizing Mixtures on Boride Layer and Tribological Behaviour of Boronized SAE 1020 Steel. *Metals and Materials International*, 28, 1114-1128.
- Ulutun, M., Yildirim, M. M., Çelik, O. N. & Buytoz, S. (2010). Tribological Properties of Borided AISI 4140 Steel with the Powder Pack-Boriding Method. *Tribology Letters*, 38(3), 231-239.
- Vallauri, D., Atías Adrián, I. C. & Chrysanthou, A. (2008). TiC–TiB₂ composites: A review of phase relationships, processing and properties. *Journal of the European Ceramic Society*, 28(8), 1697-1713.

- Vaquila, I., Vergara, L. I., Passeggi, M. C. G., Vidal, R. A. & Ferrón, J. (1999). Chemical reactions at surfaces: titanium oxidation. *Surface and Coatings Technology*, 122(1), 67-71.
- Vega-Morón, R. C., Rodríguez-Castro, G. A., Jiménez-Tinoco, L. F., Meneses-Amador, A., Méndez-Méndez, J. V., Escobar-Hernández, J., Reséndiz-Calderón, C. D. & Nava-Sánchez, J. L. (2018). Multipass Scratch Behavior of Borided and Nitrided H13 Steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27(8), 3886-3899.
- Zhang, J. & Alpas, A. T. (1993). Delamination wear in ductile materials containing second phase particles. *Materials Science and Engineering: A*, 160(1), 25-35.
- Zhang, S. & Zhu, W. (1993). TiN coating of tool steels: a review. *Journal of Materials Processing Technology*, 39(1), 165-177.
- Zimmerman, C. (2013). *Boriding (Boronizing) of Metals*. Ohio: ASM International.

ÖZGEÇMİŞ

Sadun KARABIYIK 1994 yılında Karabük'te doğdu. 2012 yılında 75. Yıl Karabük Anadolu Lisesini bitirdi. 2016 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden Makine Mühendisi unvanı ile mezun oldu. Aynı yıl Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı. Yüksek lisans eğitimini 2019 yılında tamamladı ve aynı yıl doktora öğrenimine başladı. 2018 Ocak ayında Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Malzeme Anabilim Dalı'na araştırma görevlisi olarak atanan Sadun KARABIYIK halen bu görevine devam etmekte olup iyi derecede İngilizce bilmektedir.