



T.C.

HİTİT ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**BORLANMIŞ HASTELLOY C-276 SÜPER ALAŞIMININ AŞINMA
DAVRANIŞININ DENEYSEL İNCELENMESİ**

Yüksek Lisans

Mehmet Can UÇGUN

Çorum- 2022

**BORLANMIŞ HASTELLOY C-276 SÜPER ALAŞIMININ AŞINMA
DAVRANIŞININ DENEYSEL İNCELENMESİ**

Mehmet Can UÇGUN

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

Yüksek Lisans Tezi

TEZ DANIŞMANI

Dr. Öğr. Üyesi Yusuf KANCA

İkinci Danışman: Doç. Dr. Ali GÜNEN

Çorum 2022

KABUL VE ONAY

Mehmet Can UÇGUN tarafından hazırlanan “Borlanmış Hastelloy C-276 Süper Alaşımının Aşınma Davranışının Deneysel İncelenmesi” adlı tez çalışması 24/01/2022 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği ile Hitit Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Bülent KURT

.....

Dr. Öğr. Üyesi Yusuf KANCA

.....

Doç. Dr. Ali GÜNEN

.....

Doç. Dr. Mevlüt GÜRBÜZ

.....

Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Emin ERDİN

.....

Hitit Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun .../.../..... tarih ve sayılı kararı ile’ın Anabilim Dalında Yüksek Lisans derecesi alması onanmıştır.

(İmza)

Prof. Dr. Muhammed Asif YOLDAŞ

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını beyan ederim.

(İmza)

Mehmet Can UÇGUN

BORLANMIŞ HASTELLOY C-276 SÜPER ALAŞIMININ AŞINMA DAVRANIŞININ DENEYSEL İNCELENMESİ

Mehmet Can UÇGUN

ORCID: 0000-0003-2263-9625

HİTİT ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Yüksek Lisans Tezi

Şubat 2022

ÖZET

Endüstriyel uygulamalarda kullanılan malzemelerde aşınma kaynaklı kayıplar gayri safi yurtiçi hasılasının yaklaşık %7'sine denk gelmektedir. Aşınma hasarlarının minimize edilmesi için termal, termokimyasal ve kaplama yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Termokimyasal yüzey sertleştirme yöntemlerinden biri olan borlama diğer yöntemlere göre daha yüksek mekanik performans ve daha kalın tabaka göstermesinden dolayı ön plana çıkmaktadır. Bu tez çalışmasında, kimyasal ve nükleer sanayide kullanılan Ni esaslı Hastelloy C-276 süper alaşımının aşınma dayanımının iyileştirilmesi amacıyla alaşımın yüzeyine 975°C'de 5 ve 7 saat süreyle kutu-borlama işlemi uygulanmıştır. C-276'nın yüzeyinde elde edilen borür tabakasının karakteristik özelliklerini belirlemek amacıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılım spektroskopisi (EDS), X-ışını kırınımı (XRD) ve nanoindentasyon analizleri yapılmıştır. Elde edilen borür tabakalarının aşınma dirençlerine etkisi lineer aşınma test düzeneğinde 60 mms⁻¹ hızında, 300 metre kayma mesafesinde ve 5, 10 ve 20N yükler altında 6 mm çapında alümina aşındırıcı bilyeye karşı test edilmiştir. Analizler sonucunda borür tabaka kalınlığı 86,5-132,7 µm aralığında bulunmuştur ve borlama süresindeki artış ile borür tabaka kalınlığında artış gözlemlenmiştir. Borür tabaka sertlik değeri ise 2016-2210 HV_{0.1} aralığında bulunmuştur. Borlama işlemi sonrasında aşınma testlerinde uygulanan yüke bağlı olarak taban malzemenin sürtünme katsayısında %26-%32 azalma ve aşınma direncinde ise 54-71 kat iyileşme meydana gelmiştir. Aşınma mekanizması olarak işlemsiz numunelerde abrasif aşınma ve plastik deformasyon etkin olurken borlanmış numunelerde ise oksidasyon destekli delaminasyon türü mekanizmalar hakimdir. Sonuç olarak, borlama işlemi C-276'nın sertliğini, aşınma ve sürtünme performansını ve dolayısıyla çalışma ömrünü iyileştirmiştir.

Anahtar Kavramlar: Süper alaşım, Termokimyasal kaplama, Borlama, Sürtünme, Aşınma

Bilim Kodu: 91421

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF WEAR BEHAVIOR OF BORIDED HASTELLOY C-276 SUPERALLOY

Mehmet Can UÇGUN

ORCID: 0000-0003-2263-9625

HITIT UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL

Master of Science

February 2022

ABSTRACT

Wear failure of materials used in industrial applications corresponds to approximately 7% of the gross domestic product. Thermal, thermochemical and coating techniques are widely used to reduce wear-related failure. Boriding, a thermochemical surface hardening process, has been of interest due to providing higher mechanical performance and thicker coating layers than other methods. In this thesis, boride layers were formed on Ni-based Hastelloy C-276 superalloy, used in chemical and nuclear fields, at 975 °C for 5 and 7 h by powder-pack boriding to improve its wear resistance. Grown boride layers were characterized using scanning electron microscopy (SEM) equipped with energy dispersive spectroscopy (EDS), X-ray diffractometry (XRD) and nanoindentation. To investigate the effect of boride layers on the wear resistance untreated and borided surfaces were reciprocated against an alumina ball (6 mm in diameter) at a velocity of 60 mms⁻¹, a sliding distance of 300 m under the loads of 5, 10 and 20 N. The results showed that the thickness of the boride layer increased at the boriding temperature elevated, which was in the range of 86.5-132.7 µm. The hardness of the coatings was observed to be 2016-2210 HV_{0.1}. Boriding process caused a decrease in friction coefficients by 26-32% and an increase in wear resistance by 54-71 times at different applied loads. As dominant wear mechanisms untreated C-276 found abrasive wear and plastic deformation while in the borided samples the wear mechanisms changed to oxidation-assisted delamination. In conclusion, boriding process significantly improved the hardness and wear and friction performance and thus the service life of Hastelloy C-276.

Keywords: Superalloy, Thermo chemical coating, Boriding, Friction, Wear

Science Code: 91421

TEŞEKKÜR

Öncelikle tez çalışmalarım sırasında bilgi birikimi ve manevi desteği ile sürekli yanımda olan, tezimin her adımında bana desteğini esirgemeyen, en önemlisi ise yüksek lisansımın bu aşamasına gelmemi sağlayan lisansüstü tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Yusuf KANCA hocama sonsuz teşekkürler eder ve saygılarımı sunarım.

Tez çalışmasının çeşitli aşamalarında bilgi birikimlerinden yararlandığım ve ikinci tez danışmanım olan Doç. Dr. Ali GÜNEN hocama teşekkür ederim.

Bap numarası FBE19004.20.009 numaralı bu çalışmanın gerçekleşmesinde maddi imkan sağlayan Hitit Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) birimine katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

Bana her zaman inanıp güvenen ve eğitim hayatımda bugünlere gelmemde en büyük pay sahibi olan, anlayış ve teşvikleri için eşim Damla Nur ŞENEL UÇGUN' a, annem Sevda UÇGUN' a ve babam Yaşar UÇGUN' a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLolar DİZİNİ.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
RESİMLER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiv
GİRİŞ.....	1

1.BÖLÜM

SÜPER ALAŞIMLAR

1.1. Süper Alaşımların Tarihi	4
1.2. Süper Alaşımların Özellikleri.....	4
1.3. Süper Alaşımların Kullanım Alanları.....	5
1.4. Süper Alaşımların Metalürjisi.....	5
1.4.1. Demir esaslı süper alaşımlar.....	8
1.4.2. Kobalt esaslı süper alaşımlar	8
1.4.3. Nikel esaslı süper alaşımlar.....	9

2. BÖLÜM

HASTELLOY C-276 SUPER ALAŞIMI

2.1.Fiziksel Özellikleri.....	12
2.2. Kimyasal Bileşimi	14

3. BÖLÜM

BORLAMA İŞLEMİ

3.1. Borlamanın Tanımı.....	15
3.2. Borlama ile Meydana Gelen Yapılar Borür Tabakası.....	16
3.2.1. İşlem sıcaklığı ve sürenin tabaka kalınlığına etkisi	17
3.2.2. Borür tabakasının sertliği	17
3.2.3. Borür tabakasının aşınma dayanımı.....	19
3.3. Borlamanın Avantajları.....	19
3.4. Borlamanın Dezavantajları.....	20
3.5. Borlamanın Yöntemleri	20
3.5.1. Kutu borlama.....	21
3.5.2. Sıvı borlama	22
3.5.3. Gaz borlama	22
3.5.4. Pasta borlama.....	23
3.5.5. Plazma borlama.....	23
3.6. Nikel Esaslı Süper Alaşımların Borlanması	23

4. BÖLÜM

MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. Hastelloy C-276.....	26
4.2. Borlama İşlemlerinin Uygulanması	26
4.3. Numune Hazırlama İşlemleri	28
4.4. SEM Analizleri.....	28
4.5. XRD Analizleri.....	29
4.6. Nanoinventasyon Analizleri.....	29
4.7. Triboloji Testleri.....	31

5. BÖLÜM

DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. XRD Analizleri.....	35
5.2. Kaplama Tabakası SEM İncelemeleri	36
5.3. Borür Tabakalarının Kalınlık ve Mikro Sertlik Değerleri.....	42
5.4. Nanoinventasyon Test Sonuçları	43
5.5. Aşınma Testi Sonuçları.....	46
5.5.1. Ağırlık değişimi	47
5.5.2. 2B aşınma izi profili.....	49
5.6. Sürtünme Sonuçları.....	54
5.7. SEM EDS Analizleri	57
SONUÇ VE ÖNERİLER	66
KAYNAKÇA	68

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo	Sayfa
Tablo 1.1. Süper alaşımlara eklenen elementlerin oluşturduğu etkiler	6
Tablo 1.2. Süper alaşımların sınıflandırılması	7
Tablo 2.1. Hastelloy C-276 fiziksel özellikleri	12
Tablo 2.2. İşlenmiş parçaların ısıtılması	13
Tablo 2.3. Hastelloy C-276 isimlendirilmesi	13
Tablo 2.4. Kimyasal bileşim	14
Tablo 3.1. Çeşitli borlanmış metallerin mikro sertliği ve faz oluşumu	18
Tablo 3.2. Kimyasal bileşime bağlı faz oluşum tablosu	19
Tablo 3.3. Sıvı ortam borlanmasında kullanılan ana bor kaynakları ve özellikleri	22
Tablo 4.1. Hastelloy C-276 Ni esaslı süper alaşımın kimyasal bileşimi	26
Tablo 5.1. Hastelloy C-276 üzerinde elde edilen kaplamaların bazı özellikleri	42
Tablo 5.2. Nanoindentasyon test sonuçları	45
Tablo 5.3. Deney sonrasında aşınma izi ortalama yüzey pürüzlülük değerleri	53

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Periyodik Tablodaki bazı elementlerin süper alaşımlara etkileri	7
Şekil 3.1. Nikel-bor denge diyagramı	16
Şekil 3.2. Bor tabakası, geçiş bölgesi ve ana yapının şematiği.....	17
Şekil 4.1. Yük- yer değiştirme eğrisi.....	30
Şekil 4.2. MATLAB programında aşınma izi yüzey alanının hesaplanması.....	34
Şekil 5.1. Borlanmış Hastelloy C-276 alaşımı XRD analiz sonuçları	35
Şekil 5.2. 975°C’de 5 saat süre ile borlanmış Hastelloy C-276 alaşımının kenar köşelerini gösteren SEM mikro yapısı	36
Şekil 5.3. 975°C’de 7 saat süre ile borlanmış Hastelloy C-276 alaşımının kenar köşelerini gösterir SEM mikro yapısı.....	37
Şekil 5.4. 975°C’de 5 saat süre ile borlanmış Hastelloy C-276 alaşımının 1200X büyütme sonucu elde edilen SEM mikro yapı görüntüleri	38
Şekil 5.5. 975°C’de 5 saat süre ile borlanmış Hastelloy C-276 alaşımının 2000X büyütme sonucu elde edilen SEM mikro yapı görüntüleri	39
Şekil 5.6. 975°C’de 7 saat süre ile borlanmış Hastelloy C-276 alaşımının 1000X büyütme sonucu elde edilen SEM mikro yapı görünü	40
Şekil 5.7. 975°C’de 7 saat süre ile borlanmış Hastelloy C-276 alaşımının 1200X büyütme sonucu elde edilen SEM mikro yapı görüntüleri	41
Şekil 5.8. 975°C 5 saat numune için yük–yer değiştirme eğrileri.....	44
Şekil 5.9. 975°C – 7 saat numune için yük–yer değiştirme eğrileri.....	44
Şekil 5.10. İşlemsiz ve borlanmış Hastelloy C-276 numunelere 5, 10 ve 20 N altında yapılan aşınma deneyi sonrası numunelerin yüzey fotoğrafları.....	46
Şekil 5.11. 5, 10 ve 20 N altında yapılan aşınma deneyi sonucunda elde edilen hacim kaybı	47
Şekil 5.12. 5, 10 ve 20 N altında yapılan aşınma deneyi sonucunda elde edilen aşınma oranları.....	48
Şekil 5.13. İşlemsiz numune 5, 10 ve 20 N altında aşınma izi profilleri.....	49
Şekil 5.14. 975-5saat numune 5, 10 ve 20 N altında aşınma izi profilleri	50
Şekil 5.15. 975-7saat numune 5, 10 ve 20 N altında aşınma izi profilleri	50

Şekil 5.16. 5, 10 ve 20 N altında 2B aşınma izi profillerinden elde edilen hacim kaybı	51
Şekil 5.17. 5, 10 ve 20 N altında 2B aşınma izi profillerinden elde edilen aşınma oranı	52
Şekil 5.18. 5 N altında sürtünme katsayısı – zaman grafiği	54
Şekil 5.19. 10 N altında sürtünme katsayısı – zaman grafiği	55
Şekil 5.20. 20 N altında sürtünme katsayısı – zaman grafiği	55
Şekil 5.21. Ortalama sürtünme katsayısı	56
Şekil 5.22. 5 N yük altında işlemsiz numunenin aşınma izi SEM görüntüsü ve EDS analizi	57
Şekil 5.23. 10 N yük altında işlemsiz numunenin aşınma izi SEM görüntüsü ve EDS analizi..	58
Şekil 5.24. 20 N yük altında işlemsiz numunenin aşınma izi SEM görüntüsü ve EDS analizi..	59
Şekil 5.25. 5 N yük altında 975°C-5 saat numunenin aşınma izi SEM görüntüsü ve EDS analizi.....	60
Şekil 5.26. 10 N yük altında 975°C-5saat numunenin aşınma izi SEM görüntüsü ve EDS analizi.....	61
Şekil 5.27. 20 N yük altında 975°C-5saat numunenin aşınma izi SEM görüntüsü ve EDS analizi.....	62
Şekil 5.28. 5 N yük altında 975°C-7saat numunenin aşınma izi SEM görüntüsü ve EDS analizi.....	63
Şekil 5.29. 10 N yük altında 975°C-7saat numunenin aşınma izi SEM görüntüsü ve EDS analizi.....	64
Şekil 5.30. 20 N yük altında 975°C-7saat numunenin aşınma izi SEM görüntüsü ve EDS analizi.....	65

RESİMLER DİZİNİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Borlama potası görüntüsü.....	27
Resim 4.2. Atmosfer kontrollü fırın	27
Resim 4.3. SEM cihazı	28
Resim 4.4. Malvern Panalytical EMPYREAN Cihazı.....	29
Resim 4.5. Hyston T1 950 Triolndenter Cihazı.....	31
Resim 4.6. Aşınma testi cihazı.....	32
Resim 4.7. MarSurf / M 300 Portatif 2D Optik Profilometre.....	33

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

γ	Gama
γ'	Gama Prime
γ''	Gama Double Prime
Al	Alüminyum
Ar	Argon
B	Bor
Ce	Seryum
Co	Kobalt
Cr	Krom
Fe	Demir
Hf	Hafniyum
La	Lantan
Mo	Molibden
N	Azot
Nb	Niyobyum
Ni	Nikel
O	Oksijen
P	Fosfat
Re	Renyum
Ru	Rutenyum
S	Kükürt
Si	Silisyum
Ta	Tantal
Ti	Titanyum
W	Tungsten
Y	İtriyum
Zr	Zirkon
Al_2O_3	Alüminyum Oksit
B_2H_6	Diboran

B_4C	Bor Karbür
$NaBF_4$	Sodyum Tetraborflorür
BCl_3	Bor Triklorür
BF_3	Bor Triflorür
$(C_2H_5)_3B$	Bor Trietil
$(CH_3)_3B$	Bor Trimetil
FeB	Demir Borür
KBF_4	Potasyum Terafloraborat
$Na_2B_4O_7$	Susuz Boraks veya Sodyum Tetraborat
$Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$	Boraks Dekahidrat
Na_3AlF_6	Sodyum Hekzafloroalüminat

Kısaltmalar

CVD	Kimyasal Buhar Biriktirme
HMK	Hacim Merkezli Kübik
HSP	Hekzagonal Sıkı Paket
HV	Vickers Sertlik
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
XRD	X-ışını Difraksiyonu
YMK	Yüzey Merkezli Kübik
HSP	Hekzagonal Sıkı Paket
PVD	Fiziksel Buhar Biriktirme
XRD	X-ışını Difraksiyonu
R_a	Ortalama yüzey pürüzlülüğü
R_z	10 noktanın ortalama pürüzlülük değeri

GİRİŞ

Makine endüstrisi uygulamalarda kullanılan malzemelerin aşınma ve korozyon hasarından dolayı dünyada her yıl önemli miktarda malzeme kayıpları olmaktadır (Ediz vd., 2001; Fichtl vd., 1981). Makine elemanlarının aşınma dayanımlarının iyileştirilmesinde yararlanılacak en ekonomik ve pratik uygulamaların başında ısıtma işlemleri ve kaplama uygulamaları gelir. Makine elemanlarının aşınma dirençlerinin geliştirilmesinde kullanılan yöntemlerden biri de borlama ısıtma işlemidir (Badani vd., 1987; Badani vd., 1988; Culha vd., 2008). Demir esaslı malzemeler 850~1150°C sıcaklıkta, 2-8 saat sürelerde borlandığında, malzeme yüzeyinde demir borür (Fe_2B , FeB) fazından oluşan yaklaşık 1-150 μm tabaka kalınlıklarında, 2500 HV kadar tabaka sertliğine ulaşabilen bir difüzyon tabakası meydana gelir (Genel 2006; Ozbek vd., 2002; Ozbek vd., 2004). Borlama ısıtma işlemi ile oluşan borür tabakası termokimyasal yöntemle dayalı olarak geliştiğinden ana malzemeye tutunma kabiliyeti çok iyidir ve tabaka özellikleri, işlem parametresine bağlı olarak değişir (Calık vd., 2002; Çelebi vd., 2004).

Borlama uygulaması yüksek yüzey sertliği ve aşınma direnci sağlamanın yanı sıra, bu özelliklerini 1000 °C'yi aşan yüksek sıcaklıklarda da koruyabilmesinden dolayı yüksek sıcaklık ve basınç koşullarının bulunduğu uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Borlanmış yüzeylerde sürtünme katsayısı önemli miktarda azaldığı için borlama işlemi çağın ilerleyişine uygun şekilde önem kazanan bir yüzey sertleştirme işlemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu sebeple, makine ekipmanlarındaki aşınma kayıplarının azaltılması çalışmalarında borlama işleminin alternatif yöntem olarak her geçen gün önem kazandığı bilinmektedir. Borlamanın uygulanmaya başlandığı ilk yıllarda geleneksel çeliklerin borlanması üzerine odaklanılmış iken süper alaşımların borlanması 1998'de başlamış olup bu alaşımların borlanması ile ilgili açıklığa kavuşturulması gereken birçok husus bulunmaktadır.

Borlama işlemi alüminyum ve silisyumlu yatak çeliklerinin dışında yapı çelikleri, takım çelikleri ve paslanmaz çelikler gibi birçok demir alaşımlarına da uygulanırken bunlara ek molibden, nikel ve kobalt esaslı alaşımlar da borlanabilmektedir (Fichtl vd., 1987; Nair vd., 2000). Nikel esaslı alaşımlara, korozyon direncinden ödün vermeden, aynı zamanda olağanüstü sert yüzey aşınma direnci elde edecek şekilde borlama yapmak mümkündür. Nitrürlü, kurşunlu ve kükürtlü çelikler ise borlama işlemine uygun olmayan çeliklerdir (Campos-Silva vd., 2018; Özbek 2000; Oliveira vd., 2010).

Süper alaşımlar; yüksek sıcaklıklarda yüksek yüzey kararlılığı, korozyon direnci ve mekanik mukavemet sergileyen bir alaşım türüdür. Bu alaşımlar genellikle nikel, kobalt, demir ve yüksek kromlu elementlerin çeşitli kombinasyonlarından oluşturulur ve yüksek sıcaklıklarda eriyen az miktarda molibden ve tungsten elementleri içerir. Literatürde süper alaşımlara borlama işlemi uygulamaları ve bu alaşımların aşınması üzerine deneysel araştırmalar bulunmaktadır (Nair vd., 2000; Özbek, 2000; Uslu vd., 2007). Bu çalışmalar sonucunda, borlanan süper alaşımın kimyasal bileşimi, borlama sıcaklığı ve süresi, kullanılan borlama tozları gibi birçok parametreye bağlı olarak sertlik değerlerinde (1250-2800 HV) iyileşme,

aşınma dirençlerinde artma ve sürtünme katsayılarında azalma elde edilmiştir. Dolayısıyla süper alaşımı oluşturan kimyasal bileşim ve borlama şartlarına bağlı olarak borür tabakalarındaki oluşabilecek olan faz oluşumları büyük önem arz etmektedir.

Hastelloy C-276, çok zorlu ve agresif koşullardaki ortamlarda iyi korozyon direnci için geliştirilmiş bir süper alaşımdır. İçerdiği düşük karbon oranı ($<0.01\%$) malzemenin kolay kaynak yapılabilmesine olanak sağlar (Şahin, 2009). Yüksek nikel ve molibden oranı ile malzeme çeşitli aşındırıcı ortamlarda uzun süre dayanıklılığını korur. Özellikle malzemede bulunan $\%15$ molibden elementi malzemenin oyuklanma direncini arttırmaktadır. Ancak, diğer Ni esaslı süper alaşımlarda olduğu gibi yüzey sertliği düşüktür. Dolayısıyla aşınma direnci tatmin edici değildir (Mu vd., 2010).

Süper alaşımlar üzerine yapılan borlama çalışmalarından bazıları: (Sista vd., 2013) $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de kısa bir süre boraks esaslı erimiş elektrolit banyosunda Inconel 600'e elektrokimyasal borlama işlemi uygulamıştır. Bu çalışma Inconel 600 üzerinde oluşturulan tabakanın sert ve koruyucu olduğunu ve böylece diğer tekniklere alternatif olarak düşünülebileceğini ortaya koymuşlardır (Sista vd., 2013; Günen vd., 2017). Nikel esaslı Inconel 625 süper alaşım çeliği üzerinde borlama uygulamıştır. Sertlik değerleri standart borlama işlemleriyle elde edilenlerden önemli ölçüde yükselmiştir. Kullanılan nano boyutlu borlama ajanları nedeniyle, yüzeyde oluşturulan kaplamalar nitrüleme, macun borlama ve paket borlama gibi yöntemlerle elde edilen kaplamalardan daha kalın ve lazer borlama ile karşılaştırılabilir nitelikte olduğunu bildirmişlerdir. Aşınma direnci, borlanmamış Inconel 625 ile karşılaştırıldığında 10 kat'a kadar iyileştirilmiştir (Deng vd., 2015). Inconel 718 süper alaşım yüzeyine borlama işlemi uygulayarak borlu tabakanın bileşik tabaka ve bor difüzyon bölgesinden oluştuğunu gözlemlemiştir. Borlu katmanın üstün sertliği nedeniyle işlem görmemiş Inconel 718 ile kıyaslandığında aşınma oranında ve sürtünme katsayısında önemli bir azalma elde edilmiştir. Ancak, borlama işleminin alaşımın korozyon direncinin bir miktar azalttığını bildirmişlerdir (Makuch vd., 2017). Nimonic 80A alaşımı üzerinde 920°C 'de 2 saat süreyle kutu borlama işlemi gerçekleştirmiştir ve borlanmış yüzeylerin aşınma direncinin yükseldiğini tespit etmiştir (Lou vd., 2009). Nimonic 90'ın borlanması için optimum sıcaklık ve süre çalışmaları gerçekleştirmiştir ve yüzey mikro sertliğinin borlamadan sonra önemli ölçüde yükseldiğini bildirmişlerdir.

Bu amaçla Hastelloy C-276 alaşımının ısı işlem uygulamaları göz önünde bulundurularak $975\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık ve 5 ve 7 saat sürelerde borlama işlemi uygulanmıştır. Ardından, borlanmış numuneler hassas kesme cihazı ile kesitleri baz alınacak şekilde kesilerek bakalite alma, geleneksel zımparalama ve parlatma kademelerinden sonra metalografik inceleme ve mikro sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. OM, SEM ve XRD analizleri yapılarak kaplanan numune yüzeylerinin metalografik ve mikro yapı özellikleri incelenmiştir. Borür tabakası mikro sertlik değerleri Vickers mikro sertlik tekniği ve nanoindentasyon berkovich tekniğiyle belirlenmiştir. Sürtünme ve aşınma davranışı pin-on-disk tipi test cihazı ile belirlenmiştir. Aşındırıcı olarak

alümina aşındırıcı topraklar (Al_2O_3) kullanılmıştır. Deneyler 5-10-20 Newton yüklerde gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneyi öncesi ve sonrasında borlanmış ve borlanmamış süper alaşımların ağırlıkları 0,1 mg hassasiyetli teraziyle ölçülerek ağırlık kayıpları tespit edilmiştir. Ayrıca, aşınma testi sonrası aşınma iz genişlik ve derinlikleri profilometre belirlenerek ağırlık kayıpları ile optik profilometre ölçümleri arasındaki aşınma kayıpları değerlendirilmiştir. Aşınma mekanizmalarının belirlenmesi amacıyla aşındırılan yüzeyler SEM ile incelenmiş ve bazı bölgelerden EDS analizi gerçekleştirilmiştir.



1. BÖLÜM

SÜPER ALAŞIMLAR

Temel yapıları demir (Fe), kobalt (Co) veya nikelden (Ni) meydana gelen ve yüksek miktarda krom (Cr), düşük miktarda da tungsten (W), molibden (Mo), alüminyum (Al) ve titanyum (Ti) içeren alaşımlar süper alaşımlar olarak adlandırılır.

1.1. Süper Alaşımların Tarihi

Yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılan malzemeler, dayanımlarını kaybetmeden kullanıldıkları ortamın korozyon etkilerine karşı koyabilmeli ve aynı zamanda metalürjik stabilitelerini koruyabilmelidir. Bu gereksinimleri karşılamak için tasarımcılar, 20. yüzyılın ortalarında tasarımlarında paslanmaz çeliği geliştirdi ve kullandı. Ancak paslanmaz çeliğin yetersiz mukavemeti nedeniyle, paslanmaz çeliğin bileşiminin çeşitlendirilmesiyle “süper alaşımlar” fikri ortaya çıkmıştır (Donacihe vd., 2002).

Süper alaşımların en eski örnekleri modifiye östenitik paslanmaz çeliklerdi ve bugün hala kullandığımız süper alaşımların çoğu 1950 ile 1970 arasında geliştirildi. 1980'lere gelindiğinde, teknolojik gelişmeler belirli elementleri süper alaşımlarla birleştirmeyi mümkün kıldı. Bu alaşımlar, yüksek sıcaklık dayanımı gibi günümüzde gerekli olan belirli mekanik özelliklerin birçoğunu elde etmek için farklı elementlerle katkılanabilir.

Süper alaşımlar, yüzey dengesinin gerektiği ve yüksek gerilmelerin yaşandığı 650 °C ve üstü sıcaklıklarda tercih edilmektedir. “Süper alaşım” ifadesi demir, nikel, kobalt ve krom kombinasyonları veya demir, nikel ve kobalt esaslı malzeme alaşımları için kullanılabilir. Bu alaşımlar daha düşük miktarlarda tungsten, molibden, tantal, niyobyum ve alüminyum olmak üzere çeşitli demir, nikel, kobalt ve krom elementleri içerirler. Sürünme-kırılma (creep-rupture) direncini arttırmak için, nikel esaslı süper alaşımlara, düşük miktarlarda bor, zirkonyum ve hafniyum katılır (Ezugwu vd., 1998).

Süper alaşımlara yüksek sıcaklık alaşımları da denmektedir. Mühendislik malzemelerinde aranan daha iyi dayanım-ağırlık oranı, yüksek ısılarda stabilite ve korozyon dirençleri sağladıklarından dolayı geliştirilmişlerdir. Süper alaşımlar yüksek ısı, aerodinamik sürtünme ve korozyon etkilerinin çok hissedildiği uzay ve havacılık endüstrisinde, turbo jet motorlarının türbin kanatları ve fırın parçalarında, korozyon etkili kimyasalların muhafaza ve taşınmasında kullanılan potalarda ve petrol rafineri tesisleri gibi bazı endüstrilerde, diğer alaşımlara göre çok iyi sonuçlar verdiğinden dolayı tercih edilmektedirler (Anonim, 2009).

1.2. Süper Alaşımların Özellikleri

Süper alaşımların yüksek sıcaklık altında dayanımları yüksektir yani yüksek bir ısı dirence sahiptirler. Süper alaşımların yüksek sıcaklıklarda oksidasyon ve korozyon dayanımı yüksektir, üstün kopma ve sürtünme dayanımına sahiptirler.

Süper alaşımların %15-%20'si üstün korozyon direncine sahip ve yüksek miktarlarda krom içeren materyallerdir (Anonim, 2009).

1.3. Süper Alaşımların Kullanım Alanları

1950'lü yıllarda gaz türbinleri üzerinde kullanım amacıyla geliştirilen süper alaşımlar, günümüzde endüstrinin birçok alanında kullanılmaktadır. Bu alaşımlar genellikle şu alanlarda kullanılır.

Son yıllarda artan bu talepler ile süper alaşımlar; Uçak ve endüstriyel gaz türbinlerinde cıvatalar, şaftlar, sabit kanatçıklar ve yanma odalarında kullanılmaktadır. Çevirmeli motorlarda turbo şarjlar, egzoz valfleri, sıcak bujiler, valf-yatağı saplamalarında kullanılmaktadır. Uzay araçlarında aerodinamik olarak ısınan yüzeylerinde kullanılmaktadır. Kimya ve Petro-kimya endüstrisinde reaksiyon kapları, borular ve pompalarda kullanılmaktadır. Tıbbi uygulamalarda dişçilik ve protez cihazlarında kullanılmaktadır. Isıl işlem cihazlarında tepsiler, fişstürler ve bant kayışlarında kullanılmaktadır. Gaz türbinli güç jeneratörlerinde yaylar, kanallar ve valf saplamalarında kullanılmaktadır (D. Özel T. Vd., 2011).

1.4. Süper Alaşım Metalürjisi

Genellikle süper alaşımlara ilave edilen katkı elementleri, alaşımların mekaniksel özelliklerini bileşim oranlarına bağlı olarak değiştirmektedir. Bu elementler alaşımların;

Dayanımını artırır,

Sertliği yükseltir,

Sertleşmeyi kolaylaştırır,

Korozyona karşı dayanımı yükseltir,

Mıknatıslanma özelliğini geliştirir,

Yüksek sıcaklıklara karşı dayanımı artırır,

Elektrik direncini yükseltir,

Isı etkisi altında genleşmeyi ayarlar,

Kristal yapısını inceltir.

Yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılan malzemeler, dayanımlarını kaybetmeden ve metalürjik stabilitelerini koruyarak, kullanıldıkları ortamın aşındırıcı etkilerine dayanabilmelidir. Çok yüksek sıcaklıklı uygulamalarda VA (V, Nb, Ta) ve VI-A (Cr, Mo, W) grubu metallere ihtiyaç duyulduğu gibi, metal olarak kullanılan metallerin düşük oksidasyon direncinden dolayı sıklıkla kullanılan seramikler de gereklidir. Öte yandan, seramik malzemeler birçok yapısal uygulama için yeterince sağlam değildir (W.C vd., 1972). Uygulamalarda yetersiz kalan malzeme teknolojisi ve mevcut teknolojideki sınırlamalar, süper

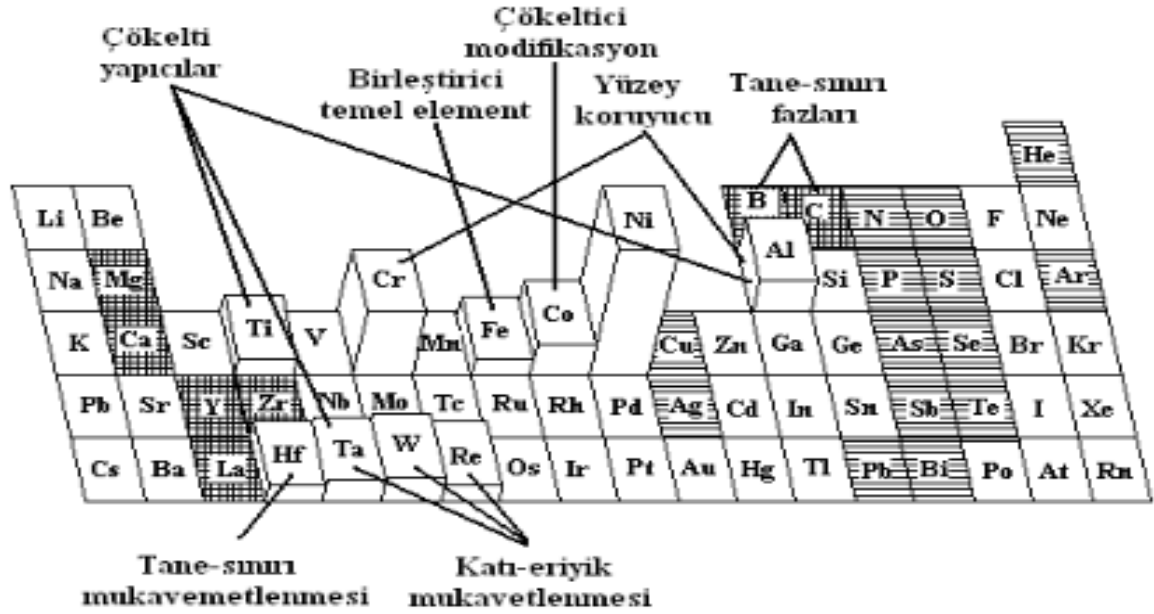
alaşım malzemelerinin kullanımını kaçınılmaz hale getirmiştir. Yüksek sıcaklık altında çalışma şartlarında yüksek performans gerektiren alanlarda kullanılan bu alaşımlar ilk kez 20. yüzyılın ilk yarısının sonlarında kullanılmıştır. Daha sonraki yıllarda süper alaşımların kullanım alanları giderek artmış ve gaz türbinleri, havacılık, roket motorları, kimyasal ve petrol tesisleri gibi endüstrilerde çok talep gören malzemeler haline gelmiştir (C.R., 2006).

Süper alaşımlar genel olarak östenitik ana matris ile geniş bir ikincil faz yapısına sahiptir. γ' (gama prime) intermetalik fazı ve MC, $M_{23}C_6$, M_7C_3 metal karbürleri ikincil fazlar olarak bulunurlar (Davis, 1997). Niyobyum veya Ni-Ta ihtiva eden alaşımlarda ise hacim merkezli γ'' (gama double prime) fazı görülmektedir. Bu bahsedilen fazların yanında istenmeyen fazlar da görülebilmektedir. Demir, kobalt ve nikel esaslı alaşımlarda aşağıdaki tabloda bulunan elementlerin ilavesi sonucu çeşitli element etkileri elde edilebilirler. Element etkileri Tablo 1.1'de gösterilmiştir (Donachie, 1984; Zietara, 2011).

Tablo 1.1. Süper alaşımlara eklenen elementlerin oluşturduğu etkiler

Elemet Etkileri	Fe Esaslı	Co Esaslı	Ni Esaslı
Katı çözelti mukavemetlendirici	Cr, Mo	Nb, Cr, Mo, Ni, Ta	Co, Cr, Fe, Mo, W, Ta
YMK Matris stabilize edici	C, W, Ni	Ni	
MC tipi karbür oluşturunucu	Ti	Ti, Ta, Nb	W, Ta, Ti, Mo, Nb
M_7C_3 tipi karbür oluşturunucu		Cr	Cr
$M_{23}C_6$ tipi karbür oluşturunucu	Cr	Cr	Cr, Mo, W
M_6C tipi karbür oluşturunucu	Mo	Mo, W	Mo, W
M (CN) tipi karbür oluşturunucu	C, N	C, N	C, N
γ' - $Ni_3(Al, Ti)$ oluşturunucu	Al, Ti, Ni		Al, Ti
Hegzagonal η (Ni_3Ti) oluşumu geciktirici	Al, Z		Al, Ti
γ' fazının çözünme sıcaklığı yükseltici			Co
γ' fazının çözünme sıcaklığını düşürücü			Cr
γ' irileşmesini geciktirici			Re
Sertleştirici çökeltirler ve/veya ara metaller	Al, Ti, Nb	Al, Mo, W, Ta, Ti	Al, Ti, Nb
$\gamma''(Ni_3Nb)$ oluşturunucu			Nb
Oksitlenme direnci arttırıcı	Cr	Al, Cr	Al, Cr
Sıcak korozyon direnci geliştirici	La, Y	La, Y, Th	La, Th
Sülfidasyon direnci arttırıcı	Cr	Cr	Cr
Kopma sünekliğini arttırıcı	B	B, Zr	B, Zr
Tane sınırı segregasyonu neden olucu			B, C, Zr
İşlenebilirlik arttırıcı		Ni_3Ti	
Ara sıcaklı sünekliği geliştirici			HF
Karbürlerin genel çökelticileri	P		

Periyodik tablodaki bazı elementlerin süper aşımara etkisine ise aşağıda şekil 1.2.'de yer verilmiştir.



Şekil 1.1. Periyodik Tablodaki bazı elementlerin süper aşımara etkileri (Koster, 2010)

Gerçekte çok karmaşık alaşım bileşimlerine sahip olan süper aşımara bünyesinde bulundurdıkları ana elementlere göre üç grupta incelenirler. Süper aşımara, nikel esaslı süper aşımara, demir esaslı süper aşımara ve kobalt esaslı süper aşımara olmak suretiyle üç ana grupta incelenirler. Süper aşımara sınıflandırılması Tablo 1.3'de verilmiştir (Choudhurt vd., 1998).

Tablo 1.2. Süper aşımara sınıflandırılması

Nikel Esaslı	Demir Esaslı	Kobalt Esaslı
Inconel(587, 597, 600, 617, 625, 706, 718, X-750, 901)	Incoloy (800, 801, 802, 807, 825, 903, 907, 909)	Haynes 188
Nimonic (75, 80A, 90, 105, 115, 263, 942, PE.16, PK33, C-263)	A-286	L-605
Rene (41, 95)	Alloy 901	MAR-M918
Udimet (400, 500, 520, 630, 700, 710, 720)	Discaloy	MP159
Pyromet 860	Haynes 556	Stallite 6B
Astroloy	H-155	Elgilov
Hastelloy (C-22, G-30, S, X)		
M-252		
Waspaloy		
Unitemp AF2-IDA6		

1.4.1. Demir esaslı süper alaşımlar

Demir esaslı alaşımlar, esas element olarak demir içerip, buna ek olarak önemli oranlarda Cr, Ni ve çok az oranda da Mo veya W ihtiva etmektedir. Demir esaslı süper alaşımlara; %15-60 Fe, %25-45 Ni, katı çözelti mukavemetini elde etmek için %1-6 Mo, yüksek sıcaklık şartlarında oksidasyon direnci sağlayabilmek için ise %15-28 Cr ilave edilir. Bazı türlerinde Ti ve Al eklenmesi ile Ni intermetalik bileşik meydana getirmek koşuluyla çökelti sertleşmesi de oluşturulabilmektedir. Demir esaslı süper alaşımlara kobalt (Co), boron (B), zirkonyum (Zr) ve karbon (C) gibi farklı elementlerde eklenebilir. Incolloy 801, A-286 ve ASTM A297 alaşımları, ticari olarak kullanılan demir esaslı süper alaşım grubundandır (Kahraman, 2008).

Krom, Demir esaslı süper alaşımlarda oksidasyon direncini yükselten element olarak bilinir. Kromla birlikte takviye olarak nikel ve mangan da oksidasyon direncini yükseltmekte yardımcı olurlar. Ayrıca yüksek sıcaklık dayanımını arttırmak için düşük oranda bor elementi katılabilir. 504 °C üzeri sıcaklıklarda YMK yapıda olmaları demir esaslı süper alaşımların öne çıkan özelliklerindendir. Kafes yapısının kapalı paketli olması yapının direncini arttırmaktadır. Mukavemetlendirme mekanizması intermetalik çökelti tarafından sağlanan demir esaslı süper alaşımların ilk uygulama alanları arasında, gaz türbin motorlarının bıçakları, diskleri ve bağlama ekipmanları sayılabilir. Gaz türbin motorlarının bazı tipleri, gaz türbin diskleri ve jantları A-286 alaşımından yapılmaktadır. Ayrıca A-286 alaşımı türbin kutuları yapımında da kullanılmaktadır (Veli Çay vd., 2005). Demir esaslı süper alaşımlar: INCOLOY (800, 801, 802, 807, 825, 903, 907, 909), A-286, ALLOY 901, DISCALOY, HAYNES 536, H-155, V-57'dir.

Süper alaşımlar 650 °C sıcaklığa kadar dayanıklıdır. Tabi bu alaşımların dayanıklılığı nikel ve kobalt esaslı süper alaşımlara göre daha düşük olduğundan yüksek mekanik ve termal işlemlerin olduğu uygulamalarda kullanılmazlar.

Demir esaslı süper alaşımların diğer alaşımlara göre daha ucuz olması sebebiyle diskler, şaftlar, gaz türbini motorları ve buhar türbinlerindeki bazı parçalarda bu alaşımlar kullanılır.

1.4.2. Kobalt esaslı süper alaşımlar

Kobalt esaslı süper alaşımlarda, ana element olarak kobalttır. Ayrıca kompozisyonda önemli miktarda Ni, Cr, W az miktarda Mo, Nb, Ta, Ti ve nadiren de Fe gibi elementler bulunur. Kobalt esaslı süper alaşımlarında mukavemetlendirme mekanizması olarak katı eriyik ve karbür fazları etkindir.

Katı eriyik kobalt alaşımları:

Haynes 188, UMCö-50 ve S-816 alaşımlarıdır. Çalışma sıcaklıkları 650°C – 1150°C arasındadır.

MP-35N ve MP-159 alaşımlarıdır. Bunlarda yaklaşık 650°C sıcaklıkta bağlayıcı alaşımlar olarak sınıflandırılır.

Stellite6B alaşımı bu da aşınma dirençli alaşım grubundadır.

Kobalt esaslı süper alaşımları ikincil karbür fazları veya intermetalik fazları içerdiğinden dolayı tamamen katı eriyik alaşımı sayılmazlar. Bunun sonucunda da yaşlanma ve oda sıcaklığında süneklik kaybı meydana gelir (Bahadır, 2010).

Kobalt alaşımlarında uygulanan katı eriyik sertleştirilmesi, tungsten, molibden, tantal ve krom gibi refrakter elementlerin çözünürlük sınırına kadar eklenmesi ile yapılır. Karbonitrür çökmesi krom, hafniyum, tantan, tungsten, niyobyum ve titanyum eklenmesi ile oluşturulur. Bu elementler çoğunlukla koherant olmayan mono karbürler (MC) ya da değişik şekillerde krom karbür (M_3C_2 , M_7C_3 veya $M_{23}C_6$) yaparlar (Özdoğan vd., 2002).

MAR-M302, MAR-M509, X-40 ve WI-52 gibi ikincil karbür faz mukavemetlendirmeli kobalt esaslı süper alaşımlar daha çok uçakların yakıt motor türbinlerinde ve sabit kanatlarda tercih edilmektedirler. İyi kaynak kabiliyeti, yüksek çalışma sıcaklığı ve oksidasyon direnci gibi özellikler bu alaşımların özelliklerindendir (Bradley, 1988).

Kobalt esaslı Süper alaşımlar: ELGILOY, HAYNES 188, L-605, MAR-M918, MP35N, MP159, STELLITE 6B başlıca örneklerdir.

1.4.3. Nikel esaslı süper alaşımlar

Nikel esaslı süper alaşımlar çok fazla sayıda elementin bir araya gelmeleri sonucu oluştuğu için oldukça karmaşık yapılardır. Ayrıca sülfür, silisyum, oksijen, nitrojen ve fosfor gibi sağlığa zararlı elementler uygun ergime uygulamaları boyunca kontrol edilmelidir. Aynı zamanda kurşun, bizmut ve selenyum gibi diğer elementler de önemli bölümler için çok küçük oranlarda (milyonda bir düzeyinde) tutulmalıdır. Birçok nikel esaslı dövme alaşımlar ağırlıkça %10-20 arası krom, %8 titanyum ile alüminyum karışımı, %5-15 arası kobalt ve az miktarda bor, magnezyum, karbon ve zirkonyum ihtiva ederler. Mukavemet kazandırma ve karbür oluşumu etkisi gösteren diğer yaygın alaşım elementleri niyobyum, tungsten ve molibdendir. Ayrıca yüzey stabilizasyonunun gelişimi için alüminyum ve krom sırasıyla Al_2O_3 ve Cr_2O_3 oluşturur ve bu oluşum bu gelişim için gereklidir (Aggen, 1990).

Nikel esaslı süper alaşımlarda katı eriyikler ve ikincil faz intermetalik çökelti mekanizmaları yapının mukavemetlendirilmesinde önemli rol oynamaktadır. Katı eriyik nikel alaşımları daha çok tavlama sıcaklığında ve tavlama temperlenmesinde kullanılır. Maksimum süneklik ve yorulma dayanımı, 870-980°C'lik düşük tavlama sıcaklığında elde edilir. Optimum yorulma direnci ise 1120-1200°C'lik bir yüksek sıcaklık tavlamasında elde edilir. Aynı zamanda yüksek sıcaklık tavlama 600°C'den daha yüksek çalışma koşullarında sürünme kopma özelliklerini sağlar. Katı eriyik nikel alaşımları genellikle uzay uygulamalarında kullanılırlar. Hastelloy X, Inconel 601, Inconel 625 gibi süper alaşımlar bazı önemli katı eriyik nikel alaşımlarındandır (Anonim, 2009).

Son yıllarda oldukça yaygın olarak kullanılan bazı nikel esaslı süper alaşımların kompozisyonları ve kullanım alanları aşağıdaki gibidir (İnt. Kyn.):

Inconel 600 (76Ni-15Cr-8Fe), standart inşaat malzemesi olarak nükleer reaktörlerde, kimya endüstrisindeki ısıtıcılarda, damıtma cihazlarında, buharlaştırıcılarda ve yoğunlaştırucularda kullanılan bir alaşımdır.

Nimonic 75 (Ti ve C ilaveli 80/20 Ni-Cr alaşımı) gaz türbinlerinde, fırın bileşenlerinde ve ısı işlem ekipmanlarında kullanılan bir alaşımdır.

Inconel 601, geliştirilmiş oksidasyon ve nitrasyon direnci ile kimyasal işleme, kirlilik kontrolü, havacılık ve güç üretimi için alüminyum ve silikon ilaveleri ile azaltılmış nikel (%61 oranında Ni ihtiva eden) alaşımdır.

Inconel X750, alüminyum ve titanyum ilaveleriyle yaşlanma sertleşmesi yapılır, bu sayede gaz türbinlerinde, roket motorlarında, nükleer reaktörlerde, basınçlı kaplarda, alet yapımında ve uçak yapılarında kullanılır.

Inconel 718, (55Ni-21 Cr-5Nb-3Mo), Kaynak sırasında çatlama sorunlarının üstesinden gelmek için içeriğine niyobyum ilave edilmiştir. Uçak ve yerleşik gaz türbin motorlarında ve kriyojenik tanklarda kullanılır.

Alaşım X (48Ni-22 Cr-18Fe-9Mo + W), Havacılık uygulamaları için yüksek sıcaklıkta yassı haddelenmiş bir alaşımdır.

Waspaloy (60Ni-19Cr-4Mo-3Ti-1.3Al), Jet motoru uygulamaları için tescilli alaşımdır.

ATI 718 Plus, Standart Inconel 718 alaşımının çalışma sıcaklığı kapasitesini 55 °C kadar artıran daha düşük maliyetli bir alaşımdır, motor üreticilerinin yakıt tüketim verimliliğini artırmasına olanak tanır.

Nimonic 90, (Ni en az %54, Cr %18-21, Co %15-21, %Ti 2-3, Al %1-2): Türbin kanatları, diskler, dövme parçalar ile sıcak işleme kesici takımlarda kullanılır.

Rene' N6, (4Cr-12Co-1Mo-W6-Ta7-Al5.8-Hf0.2-Re5-denge Ni) Jet motorlarında kullanılan 3. nesil tek kristalli alaşımdır.

TMS 162, (3Cr- 6Co-4Mo-6W-6Ta-6Al-5Re-6Ru-denge Ni) Türbin bıçaklarında kullanılan 5. nesil tek kristalli alaşımdır.

2. BÖLÜM

HASTELLOY C-276 SÜPER ALAŞIMI

Hastelloy C-276, Haynes International firmasının geliştirdiği bir alaşımdır. Bu malzeme aynı zamanda Alloy C276 olarak da adlandırılmaktadır. Alloy C276 yaklaşık elli sene önce çeşitli asitlere ve birçok zorlu ortama dayanabilmesi için geliştirilmiş bir malzemedir ve günümüzde bu malzemenin kullanımı oldukça yaygınlaşmaktadır. UNS standardına göre UNS N10276 olarak gösterilen bu malzemenin malzeme numarası 2.4819 olarak gösterilmektedir.

Alloy C-276 malzeme çok zor ve agresif koşullu ortamlarda mükemmel derecede iyi korozyon direncine sahip olmak için üretilmiş ve geliştirilmiş bir malzemedir. Bu yüksek nikel ve molibdenli malzeme, oldukça farklı birçok korozif ortamda uzun süre dayanıklılığını koruyabilmektedir. Özellikle malzeme içerisinde yer alan yüzde 15 civarındaki molibden elementi malzemenin çukurcuk korozyonuna karşı dayanımını arttırmaktadır. Bu nikel alaşım malzeme çok düşük oranda karbon içermektedir. Bu malzemenin içerdiği karbon oranı yüzde 0,01'den azdır ve bu içerdiği az karbon malzemenin daha kolay kaynak yapılabilmesine olanak sağlar. Düşük karbonla beraber kaynak işlemi sırasında karbürleme en aza inmiş olur ve bu sayede kaynak yapılan bölgelerde korozyon direncinde ve mekanik yapıda bir gerileme olmaz. Ayrıca Alloy C-276 malzemenin içerisinde ciddi bir oranda Tungsten elementi bulunmaktadır.

Hastelloy C-276 veya diğer yaygın kullanılan adıyla Inconel Alloy C-276 birçok kimyasal tepkimenin olduğu alanda kullanılmaktadır. Ayrıca çeşitli özel filtrelerde, kâğıt üretiminde kâğıt hamuruyla temas eden parçalarda, kâğıt üretiminde, endüstriyel atıkların depolanmasında, doğal gaz ile temas eden bazı parçalarda, özel fan parçalarında, sıcaklık değiştiricilerinde, kimyasal birçok reaksiyonun gerçekleştiği özel kaplarda ve tanklarda, sıvı buharlaştırıcı sistemlerde ve bu sistemlerin boru aksamalarında sıkça kullanılan bir nikel alaşım malzemesidir.

Bu yüksek nikelli ve yüksek molibdenli nikel alaşım malzeme aynı zamanda yüzde 15 civarında krom içermektedir. Tüm bu elementlere ilave olarak Hastelloy C-276 malzeme yüzde 4 civarında tungsten elementi içermektedir ve tüm bu elementlerin birleşimiyle meydana gelen Alloy C-276 malzeme oldukça zor koşullardaki ortamlarda bile mükemmel derecede iyi bir korozyon direncine sahiptir.

Düşük karbon içeren bu malzeme kaynak yapılması kolay olan bir malzemedir ve içerdiği düşük karbon sayesinde kaynak esnasında karbürlenme olmasını en aza indirgenmiştir.

Kâğıt üretimi, endüstriyel atıkların toplanması, kaynak olan bölgeler, ısı değiştiricileri, sıvı buharlaştırıcı sistemler ve endüstriyel atıkların toplanmasında Hastelloy Alloy C-276 sıkça tercih edilmektedir.

Bu alaşım, agresif ortam koşullarında mükemmel korozyon ve oksidasyon direncine sahip tungsten ilaveli bir nikel-krom-molibden alaşımıdır.

Alloy C-276 malzeme birçok aside karşı dayanabilen bir malzemedir. Asitlere karşı yüksek bir direnç gösteren bu kalite nikel alaşım malzeme, çeşitli oranlarda seyreltilmiş olan Asetik Asit, Formik Asit, Hidroklorik Asit, Hidroflorik Asit, Nitrik Asit, Fosforik Asit ve Sülfürik Asit gibi çeşitli asitlere seyreltilmişlik oranlarına göre çeşitli süreler dayanabilmektedir.

Hastelloy C276 alaşımı, Gaz Metal Ark (GMA / MIG), Gaz Tungsten Arkı (GTA / TIG) ve Korumalı Metal Ark (SMA / Stick) kaynak proseslerine çok uygundur.

Bu özellikleri sayesinde Hastelloy C-276 alaşımı, sülfürik asit reaktörleri, kağıt endüstrisi, baca gazı kükürt giderme tesislerinde, asidik gaz altında çalışan bileşenlerde, ısı eşanjörleri gibi birçok zorlu ortamda kullanılmaktadır. Hem oksitleyici hem de redükleyici ortam koşullarında korozyona karşı iyi bir dirence sahip olan bu alaşım deniz suyu ortamlarında, özellikle aralık korozyonu koşullarında korozyona karşı mükemmel direnci sayesinde, deniz uygulamaları için oldukça çekici bir malzeme olmuştur. Hem durgun deniz suyu hem de akışkan deniz suyu ortamında yapılan aralık korozyonu testleri, Hastelloy C276 alaşımının korozyona uğramadığını göstermiştir. ASTM G48-C ve D standartlarına göre yapılan testlerde, kritik aralık ve kritik çukurcuk korozyonu sıcaklıkları AISI 304, Incoloy 825 ve 925, Inconel 625 ve 725 alaşımlarına kıyasla Hastelloy C-276 alaşımının aralık ve çukurcuk korozyonuna karşı daha yüksek dirençli olduğunu göstermiştir. Aynı zamanda yüksek mukavemete ve iyi tokluğa sahip olmasında dolayı Hastelloy C-276 alaşımı havacılık endüstrisi, petrokimya endüstrisi, nükleer endüstri gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır (Manikandan vd., 2015; Dokumacı, 2006; DuPont vd., 2009; Çulha, 2019).

2.1. Fiziksel Özellikleri

Hastelloy C-276' nın fiziksel özelliklerine aşağıdaki Tablo 2.1. de yer verilmiştir.

Tablo 2.1. Hastelloy C-276 Fiziksel Özellikleri

Yoğunluk	Oda sıcaklığı	8.89 g/cm ³
Elektriksel direnç	Oda sıcaklığı	1.23 µohm.m
Termal iletkenlik	50 °C	10.5 W/m.°C
Ortalama termal genleşme katsayısı	24-100 °C	10.002
Manyetik geçirgenlik özısı	15.9 kA/m	427 J/kg. °C
Dinamik modül esneklik	Oda Sıcaklığı	205 Gpa
Erime aralığı	1323-1371 °C	
Poisson Oranı	Oda sıcaklığı	0.31

İşlenmiş parçaların ısı işlemleri Tablo 2.2. de bulunmaktadır.

Tablo 2.2. İşlenmiş Parçaların Isıl İşlemi

Durum	Tip	Sıcaklık		Süre (Hız)	Soğutma
		°C	°F		
Tavlanmış ve yay menevişi	Gerilim giderme	400-450	750-840	2	Hava
Özellikler					
Durum	Yaklaşık çekme kuvveti		Yaklaşık çalışma sıcaklığı		
	N/mm ²	ksi	°C	°F	
Tavlanmış	850-1050	123-152	-200 to +400	-330 to +750	
Yay menevişi	1300-1600	189-232	-200 to +400	-330 to +750	

Tablo 2.3' te Hastelloy C-276 (N10276, W10276) isimlendirilmeleri bulunmaktadır.

Tablo 2.3 Hastelloy C-276 (N10276, W10276) İsimlendirilmeleri

Levha, saç ve şerit	ASME SB 575/ ASTM B 575
Kütük ve çubuk	ASME SB 574/ ASTM B 574
Kaynak elektrotları	SFA S.11/A S.11 (ENiCrMo-4) DIN 2.4887 (EL-NiMo15Cr15W)
Kaynak teli	SFA 5.14/A 5.14 (ERNiCrMo-4) DIN 2.4886 (SG-NiMo16Cr16W)
Dikişsiz boru ve tüp	ASME SB 622/ ASTM B 62
Kaynaklı boru ve tüp	ASME SB 619/ ASTM B 61
Dövme	ASME SB 564/ ASTM B 56
DIN	17744 No. 2.4819 NiMo16Cr15W
Diğerleri	NACE MR0175 ISO 15156

2.2. Kimyasal Bileşimi

Tablo 2.4' te kimyasal bileşim mevcuttur.

Tablo 2.4. Kimyasal Bileşim

Kimyasal bileşim			Standart	Tanım	Öne çıkan özellikler	Genel kullanım
Element	Min %	Max %	ASTM B574 ASTM B575 ASTM B619 ISO 15156-3 (NACE MR 0175)	W.Nr 2.4819 UNS N10276 AWS 054	Kükürtlü bileşikler ve klorür iyonları dahil olmak üzere çok çeşitli koroziif ortamlarda mükemmel korozyon direnci. Çukurluğa, aralık korozyonuna ve stres korozyona karşı yüksek direnç. Islak klor gazı, hipoklorit ve klor dioksidin koroziif etkilerine karşı dayanım gösterir. deniz suyu uygulamaları için iyidir.	Kirlilik kontrolü Kimyasal işlem Atık arıtma Deniz Mühendisliği Kağıt hamuru ve kağıt üretimi
Mo	15.00	17.00				
Cr	14.50	16.50				
Fe	4.00	7.00				
W	3.00	4.50				
Co		2.50				
C		0.01				
Si		0.08				
Mn		1.00				
V		0.35				
P		0.04				
S		0.03				
Ni	Bal					
Yoğunluk				8.89 g/cm ³	0.321 lb/in ³	
Erime noktası				1370 °C	2500°F	
Genleşme katsayısı				11.2 µm/m °C (20-100 °C)	6.2* 10-6 in/in °F (70-212°F)	
Esneklik katsayısı				78.6 kN/mm ²	11400 ksi	
Esneklik katsayısı				205.5 kN/mm ²	29806 ksi	

3. BÖLÜM

BORLAMA İŞLEMİ

Borlama, bor atomlarının yüksek sıcaklıklarda (700-1000°C) ana malzeme kafesine difüzyon yoluyla girmesi sonucu yapıdaki demir, krom, nikel, molibden ve titanyum gibi borür oluşturu metal esaslı alaşımlar elementleri ile sert borürler oluşturan termokimyasal bir ısıl işlem yöntemidir. Borlama ilk olarak çeliklere uygulanmış olsa da günümüzde demir dışı alaşımlara (titanyum, molibden vb), dökme demirlere, süper alaşımlara, sermetlere ve hatta yüksek entropi alaşımlarına kadar uygulanmış ve genellikle olağanüstü aşınma ve korozyon dirençleri sağladığı birçok çalışmada bildirilmiştir. Borlama işlemi katı, sıvı, gaz, macun, plazma ve akışkan yatak ortamlarında gerçekleştirilebilmesine rağmen, basitliği ve düşük maliyeti nedeniyle katı hal paket borlama(kutu borlama) teknikleri en çok olarak kullanılan borlama yöntemidir.

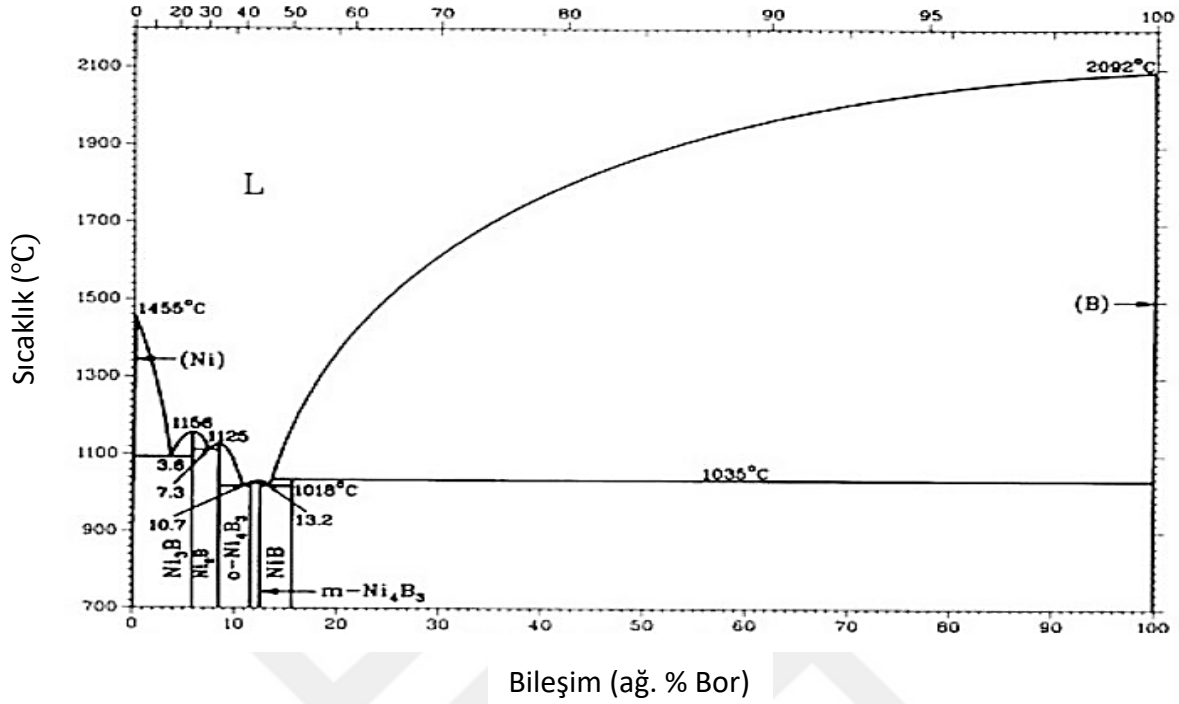
3.1. Borlamanın Tanımı

Dünyada bulunan madeni bor yataklarının takribi olarak %72'si ülkemizdedir. Ancak bu önemli rezervin yalnızca %18'inden Borat üretimi yapılmaktadır. Bu alanda ileri teknolojiye sahip üretim yapan ülkeler boratlardan saf borun yanı sıra, bornitrür (BN), bortrioksit (B_2O_3), diboran (B_2H_6), borkarbür (B_4C) ve ferrobör (Fe-B) gibi saflaştırılan bileşik eldesini sanayinin birçok alanında uygulamışlardır (Özsoy vd., 1993). Bor ve bileşikleri; tarım sektörü, inşaat-çimento sektörü, seramik sanayi, ilaç ve kozmetik sanayi, tıp, tekstil sektörü, otomobil sanayi, kimya sanayi, metalürji ve malzeme, enerji sektörü, elektrik-elektronik ve iletişim sanayi, uzay ve havacılık sanayi, nükleer sanayi ve cam sanayi olmak üzere oldukça geniş kullanım alanlarına sahiptir (Özbek, 2000). Endüstriyel uygulamalarda aşınmanın minimize edilmesi amacıyla Borlama işleminin uygulaması hem akademik camia hem de sektör tarafından oldukça yaygın kullanılan bir yöntemdir.

Borlama, metal esaslı yüzeylerinin mekanik ve tribolojilerini geliştirmek için uygulanan ve bor atomunun metalik parçaya yayılması sonucu yüzeyde intermetalik borür bileşiği/bileşikler oluşumuna dayanan yüzey işlemidir. Borlama ilk kez Moissan tarafından 1895 senesinde ortaya çıkarılmıştır (Matuschka vd., 1980). Borlama işlemi yüzeyi çok iyi temizlenmiş malzemelere 700- 1000 °C sıcaklık aralığında ve 1- 10 saat sürede katı, sıvı, gaz veya pasta gibi farklı yöntemlerle uygulanabilmektedir (Genel, 2006; Uslu vd., 2007). Günümüzde borlama, teknolojik olarak gelişmiş ve son çalışmalar, akışkan yatakta borlama ve plazma borlama gibi yeni tekniklerin geliştirildiğini göstermektedir.

(Ueda vd., 2000) saf nikelin(Ni) Si içermeyen borlama tozu ile katı borlama yöntemi ile 700-900 °C ' de 2 saat sürede borlama sonucu 45-100 µm kalınlığında ve 1300 HV sertliğinde Ni_2B fazı elde edildiğini belirtmişlerdir. Yazarlar elde edilen Ni_2B fazı dolayısıyla saf Ni'ye göre sürtünme katsayısı değerlerinde azalma aşınma dirençlerinde iyileşme sağladığını bildirmişlerdir.

Nikel-Bor denge diyagramı Şekil 3.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Nikel-Bor denge diyagramı.

3.2. Borlama ile Meydana Gelen Borür Tabakası

Borlama işleminde kaplama tabakası, borun malzeme yüzeyine yayılması sonucu altlık malzemenin en üst bölümünde oluşan bileşik tabaka (borlu bölge), bileşik tabakanın altında ki geçiş bölgesi ve en iç kısmında ise borlamanın etkilerinden etkilenmeyen matris 19 (çekirdek bölgesi) den meydana gelir. Borür tabakasının kalınlığı farklı parametrelere göre değişebilir bunlar; malzemenin kimyasal kompozisyonu, işlem sıcaklığı, işlem yöntemi ve işlem süresine bağlıdır (Çalık, 2002).

Şekil 3.2' de bor tabakası, geçiş bölgesi ve ana yapının şematik resmi verilmiştir (Taşçı, 1993).



Şekil 3.2. Bor tabakası, geçiş bölgesi ve ana yapının şematik resmi (Taşçı,1993)

Tabakların oluşumu difüzyonun sonucudur. Difüzyon, geçişme veya yayılma olarak da bilinir, maddelerin çok yoğun ortamdan, az yoğun ortama doğru kendiliğinden yayılmasıdır. Fiziksel kimyada ise moleküllerin kinetik enerjilerine bağlı olarak rastgele hareketlerine denir. Difüzyona olanak sağlayan kuvvet yoğunluk farkı olduğundan, difüzyon geçişi iki ortamın yoğunlukları eşitleninceye kadar devam eder. Malzeme işlemlerindeki reaksiyon ve süreçlerin çoğu atomik düzeyde kütle transferine dayalı yayılma (difüzyon) ile gerçekleşir. Bu olay atomların bir kafes boşluğundan diğerine geçişiyle gerçekleşir (Taşçı, 1993).

Tek tip elementten oluşan malzemelerde de atomik yayılma gerçekleşir (kendinde yayılma). Atomların yayılma hareketini gerçekleştirebilmesi için etrafında boşluk ve yeterli enerji bulunmalıdır. Enerji ve boşluk sayısı sıcaklığın artışıyla artacağından yayılma yeteneği de sıcaklıkla artar. Atomlar oda sıcaklığında yaklaşık olarak 10^{13} frekansında ve 10^{-3} nm genliğinde titreşir. Sıcaklık ve enerji arttıkça titreşim frekansı ve genliği büyüyerek bağları koparır ve sıvılaşma olur. Bu olay yayılma mekanizmasının sıcaklıkla değişimini açıklar. Metallerde yayılma, boşluk ve arayer yayılma mekanizmaları ile açıklanır (Bayça vd., 2004).

3.2.1. İşlem sıcaklığı ve sürenin tabaka kalınlığına etkisi

Bor elementi B_4C 'den belirli sıcaklık ortamında serbest kalabilir. FeB ve Fe_2B borürlerini oluşturan demir ve B_2O_3 'ün koredüksiyonu (birlikte redüksiyonu), ayrı ayrı redüksiyonlarından daha hızlıdır. İşlem sürdükçe yüzeye olan bor yayılımı sürecektir. Bu sayede borür tabakasının kalınlığında artış meydana gelecektir. Ancak borlama işlemi süresince redüksiyon işlemi de sürmelidir. Redüksiyon işlemi borlama sıcaklığına bağlı olarak gerçekleşir. Borlama süresi, malzemenin borlama işlem sıcaklığında kaldığı süredir (Bayça vd., 2004).

3.2.2. Borür tabakasının sertliği

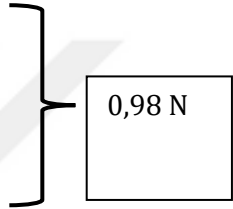
Altık malzemenin cinsi ve yüzeyde oluşan borür tabakasının fazları borlanmış malzemelerin sertliğini etkiler. Çeliklerde oluşan borür fazları genellikle tekli faz Fe_2B veya çift fazlı $FeB+Fe_2B$

yapısıdır. FeB fazı, Fe₂B fazından daha gevrek ve serttir. Borlama sonucunda oluşan Fe₂B tabakasının Vickers sertliği 1800 ile 2000 HV aralığındadır. Oluşan iki fazlı Fe₂B ve FeB tabakasının Vickers sertliği 1900 ile 2400 HV aralığındadır. İki fazlı tabaka daha yüksek Vickers sertlik değerine sahiptir. Ancak alaşımlı çelikler, süper alaşımlar, yüksek entropili alaşımlarda ise kimyasal bileşimin içeriğine bağlı olarak Tablo 3.1 ve Tablo 3.2’de verilen birçok fazın oluşumu söz konusudur. Borlanmış malzemelerin sertliği malzeme yüzeyinden malzemenin iç kısmına doğru azalmaktadır. Tabaka altında bulunan bölgenin deformasyona uğramasına ve borür tabakasının bozulmasına sebebiyet vereceğinden Rockwell ve Brinell sertlik yöntemleri tercih edilmez (Matuschka vd., 1980).

Tablo 3.1. Çeşitli borlanmış metallerin mikro sertliği ve faz oluşumu (Matuschka vd., 1980).

Element	Borür Tabakası	Vickers mikrosertliği kg/mm ²	Sertlik (GPa)
Fe	FeB	1900- 2100	19-21
	Fe ₂ B	1800- 2000	18-20
Co	CoB	1850	18,5
	Co ₂ B	1550	15,5
Ni	Ni ₄ B ₃	1600	16
	Ni ₂ B	1500	15
	Ni ₃ B	900	9
Ti	TiB ₂	2500	25
	TiB	(Birleşik sertlik)	
Zr	ZrB ₂	2500	25
	ZrB	(Birleşik sertlik)	
Ta	Ta ₂ B	3200-3500	32-35
W	W ₂ B ₅	-2700	27
	WB	(Birleşik sertlik)	
	W ₂ B		
Mo	Mo ₂ B ₅	2400-2700	24-27
	Mo ₂ B	(Birleşik sertlik)	

Tablo 3.2. Kimyasal bileşime bağlı faz oluşum tablosu (Matuschka vd, 1980).

Borür Tabakası	Vickers mikrosertliği kg/mm ²	Sertlik (GPa)	Yük Değeri (N)
CrB ₂	Sinterlenmiş	17.67	
	Kaynaşmış	24.55	
	(001)	22.47-20.37	
Cr ₃ B	Sinterlenmiş	10,80	
TiB ₂	Sıcak Preslenmiş		26,6
MoB ₂	(100)	24.24-21.30	
WB ₂	(100)	22.18-20.51	
CrB	(010)	19.23-22.96	
CrB ₄	(010)	20.90-22.96	
Cr ₃ B ₂	(010)	20.71-24.04	
Cr ₂ B ₃	(010)	20.31-22.47	

3.2.3. Borür tabakasının aşınma dayanımı

Daha yumuşak ve daha yüksek sürtünme katsayısına sahip malzemeler aşınan, daha sert ve daha düşük sürtünme katsayısına sahip malzemeler ise aşındıran malzemelerdir. Malzemelerde aşınma malzeme yüzeyinden başladığından bulunduğu ortamdan oluşturdıkları makine parçaları ve mekanizmalarda güvenilirlik, ömür gibi önemli etkenler yüzey özellikleri ile doğrudan ilişkilidir. Aşınma dayanımı ve sürtünme katsayısı bir sistemin özelliklerini oluşturmakla birlikte malzemenin sertliğiyle de doğrudan ilgilidir. Borür tabakasının oluşturan fazların türü, sertlik değerleri ve yapıdaki oranları t aşınma dayanımını etkiler. Şöyle ki FeB fazında oluşan aşınma Fe₂B fazında oluşan aşınmadan daha fazladır. FeB fazının Fe₂B fazından daha gevrek oluşu buna neden olmaktadır. Cr-B fazları sahip oldukları yüksek sertlik ve oksijene karşı affinite dolayısıyla Fe-B fazlarına göre daha iyi aşınma direnci sağlarlar. Bor elementinin oksijenle olan bağ kuruculuğunun yüksek olması metalik yüzey üzerinde oluşturduğu koruyucu oksit tabakasının yüzeyde yağlayıcı görevi üstlenerek sürtünme katsayısını düşürür ve yüzeylerin sıcaklık sonucunda birbirine kaynamasını da önler (Bayça vd, 2004).

3.3. Borlamanın Avantajları

Borlama işleminin olumlu özellikleri aşağıdaki gibi açıklanabilir (Yapar vd., 2002);

Çelik içerikli alaşımlarda 1600- 2800 HV arasında yüksek sertlik değerleri elde edilebilir . Sade karbonlu çeliklerde oluşan borür tabakalarının sertliği, diğer geleneksel sertleştirme yöntemleri olan sementasyon ve nitrürasyona göre daha yüksektir.

Borür tabakasının sertliği yüksek sıcaklıklarda (11500 °C) sabit kalmaktadır. Borlanan malzemelerin yorulma ömürleri korozi ortamlarda dahi %25 oranında arttırılabilir.

Borlama, uygulanacak yüzeylerin düzensiz karmaşık şekillere homojen bir şekilde uygulanabilir.

Borlama demir esaslı malzemelerin seyreltik asitlere karşı korozyon direncini ve erozyon direncini arttırmaktadır. Borlama işlemi ile alaşımı düşük çeliklerin H_2SO_4 , H_3PO_4 ve HCl gibi asitlere karşı dayanımını arttırmak mümkündür.

Borlanmış çeliklerin yüksek sıcaklıklardaki (850 °C) oksidasyon direnci ve sıcak metal korozyonuna direnci yüksektir.

Bor bileşikleri yağlayıcı kullanımını azaltmaktadır. Soğuk kaynaklanma eğilimini düşürmektedir. Bunların sebebi ise borlamanın sürtünme katsayısını düşürmesinden kaynaklıdır.

Borlama yüzeyi, çok hassas bir şekilde parlatılabilir.

3.4. Borlamanın Dezavantajları

Borlama işleminin dezavantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir [50];

Uygulama prosesleri zor olduğundan çok özen ister ve diğer termokimyasal yüzey serleştirme yöntemlerine oranla çok maliyetlidir.

Borlama işlemi ile kaplama uygulanan malzemelerin hacminde %0,5-%0,25' lik artış olmaktadır. Örneğin, 20µm 'lik bir tabaka kalınlığı 1,20-6,20 µm 'lik bir büyümeye sebep olmaktadır.

Düşük tolerans istendiğinde borlanmış yüzeylere sadece elmas taşlama yoluyla yüksek hassasiyet sağlanmaktadır. Çünkü geleneksel yöntemlerde yüzeylerde kırılmalara meydana geliyor. Bu yüzden kusursuz borlama işlemleri çoğunlukla geniş kesitli parçalara uygulanır.

Borlamadan sonra parçanın vakumlu veya yansız bir ortamda sertleştirilmesine ve temperlenmesine ihtiyaç duyulur. Bu sayede borür tabakasının bütünlüğü ve sağlamlığı arttırılır.

Genelde borlanmış alaşımlı çelik parçaların dairesel işleme alanlarında yorulma özellikleri yüksek basınçlı yüzeylerde (2000 N) nitrasnyonlu ve karbürizasyonlu malzemelerle kıyaslandığı zaman oldukça zayıf kalmaktadır. Borlamanın bu özelliği sebebiyle, dişli üretiminde bir sınırlama söz konusudur.

3.5. Borlama yöntemleri

Borlama yöntemleri, termokimyasal ve termokimyasal olmayan yöntemler olmak üzere iki ana grupta gerçekleştirilir. En çok kullanılan yöntem ise termokimyasal yöntemlerdir. Termokimyasal borlama yöntemleri bor atomunun metale sıcaklık ve zamanın birbirlerine bağlı fonksiyonu ile difüze olması işlemine dayanmaktadır. Bu yöntemler; kutu borlama, sıvı borlama, pasta borlama ve plazma (gaz ortamında) borlama olarak sıralanabilir.

Termokimyasal olmayan borlama yöntemleri ise fiziksel buhar biriktirme (PVD), kimyasal buhar biriktirme (CVD), plazma sprey ve iyon biriktirme yöntemleridir (Sinha, 1991).

3.5.1. Kutu borlama

Kutu borlama, borlanacak malzeme bor verici ortam olarak tanımlanan bir toz karışımı içinde belirli sıcaklık ve sürelerde beklemesi suretiyle gerçekleşir. Borlanacak malzeme, çevresi yeterli miktarda (yaklaşık 10-20 mm) olacak şekilde bor verici ortamın içine gömülür ve üst bölüme (pota ağzı ile bor verici ortam arasına) SiC ya da türevleri olan dolgu malzemesi (yaklaşık 10 mm) eklenir ve pota kapağı, havanın işlem ortamına girmesi engellenecek şekilde kapatılır. Kutu borlama işleminde çeşitli bor bileşenleri kullanılmaktadır. Toz karışımlarını oluşturan ve kutu borlama işleminde kullanılan bileşenler; aktivatörler, akışkanlar ve katı bor kaynaklarıdır. Bu toz karışımları genellikle ticari uygulamalarda kutu borlama işlemlerinde kullanılmak üzere tercih edilmektedir. Sementasyona benzeyen bu yöntem; ekonomik olarak ucuzluk, gereken cihazın ve donanımların basitliği, fazda mevcut bileşenlerin değişikliğe uğramaması, toz bileşiminin kolayca değiştirilebilmesi ve işlem kolaylığı gibi faktörlerle geniş uygulama alanlarına sahiptir. Potanın işlem esnasında kalkmalara, çatlaklara ve yüksek iç gerilmelere neden olmaması ve yeniden toz ilavesiyle (%20-50) borlama işlemine devam edebilmesi bakımından fırının toplam hacmi %60 geçmemelidir. Pota malzemesi olarak alümina, paslanmaz çelik veya alaşımsız çelikler kullanılabilir. Fırın içinde homojen olarak ısı dağılımı sağlamak adına borlama işlemine tabi tutulacak parçalar fırına uygun bir şekillere sahip olmalı ve fırının içine parçalar yerleştirilirken bu durumlar dikkate alınmalıdır [Matuschka vd, 1980; Sinha, 1991].

Tipik ticari borlama toz karışımlarının bileşimleri (% ağırlıkça)

%5 B₄C, %90 SiC, %5 KBF₄

%50 B₄C, %45 SiC, %5 KBF₄

%85 B₄C, %15 Na₂B₄O₇

%95 B₄C, %5 Na₂B₄O₇

%84 B₄C, %16 Na₂B₄O₇

Amorf bor (%95-97)

% (40-80) B₄C + % (20-60) Fe₂O₃

%60 B₄C + %5 B₂O₃ + %5NaF + %30 Demir oksit

%50 Amorf bor + %1 NH₄HF.HF+%49Al₂O₃

%100 B₄C

%20 B₄C + %5 KBF₄ + %75 Grafit

%95 Amorf bor, %5 KBF₄

Amorf bor, ferrobor ve bor karbür (B₄C) yaygın olarak kullanılan bor kaynaklarıdır. Amorfbor ve ferrobor kalın borür tabakası oluşturmurlar ve çok iyi bor kaynaklarıdır. Akışkan olarak Al₂O₃ ve SiC, aktivatör olarak ise Na₂CO₃, KBF₄, NaBF₄, BaF₂, Na₂B₄O₇, NH₄Cl, Na₂CO₃ ve (NH₄)₃BF₄ kullanılmaktadır. Borlama işlemi hem uygun bir toz karışımlarıyla hem de çeşitli ticari toz karışımlarıyla da yapılabilmektedir (Fichtl, 1981).

3.5.2. Sıvı borlama

Bor bileşikleri, içerisinde aktivatörler ve redükleyici maddelerden meydana gelen erimiş tuz bileşiğine, iş parçasının daldırılması yöntemidir. Borlama işlemi 2-9 saat süre ile 900-1100 °C sıcaklıkta yapılır. Bu yöntemdeki en büyük dezavantaj sıcaklıktır. Sıcaklığın 850 °C 'nin altına düşmesi durumunda erimiş boraks akıcılığını yitirerek, borlamayı imkansız hale getirecektir (Yurtseven, 2008).

Tablo 3.3. Sıvı ortam borlamasında kullanılan ana bor kaynakları ve özellikleri (Matuschka vd, 1980).

Bor sağlayıcılar	Kimyasal formül	Molekül ağırlığı (g)	Teorik bor miktarı (%)	Ergime sıcaklığı (°C)
Boraks	Na ₂ B ₄ O ₇ ·10H ₂ O	381,42	11,35	
Susuz boraks	Na ₂ B ₄ O ₇	201,26	21,5	741
Metabor asidi	HBO ₂	43,83	24,69	
Sodyum bor florür	NaBF ₄	109,81	9,85	
Bor oksit	B ₂ O ₃	69,64	31,07	450
Bor karbür	B ₄ C	55,29	78,28	2450
Potasyum bor karbür	KBF ₄	69,67	15,52	

Sıvı ortamda yapılan borlama iki çeşittir. Borlama işlemi elektrik akımı uygulanarak meydana getiriliyorsa elektrolitik borlama denirken elektrik akımı uygulanmadan meydana gelirse normal sıvı ortamda borlama olarak adlandırılır. Akışkan yatakta borlama işlemi de sıvı borlama yöntemi olarak yapılmaktadır. Bununla beraber sıvı ortamda borlama işlemi, tuz eriyiği içine elektrolitik veya elektrolitsiz (daldırma) işlemleri derişik çözeltide de gerçekleştirilir [47].

3.5.3. Gaz borlama

Gaz borlama işleminde bor taşıyabilen gazlar kullanılır. Bu gazlar bor hidrürler ve bor halojenlerdir. Borlayıcı ortam olarak en çok;

(CH₃)₃B ve (C₂H₅)₃B gibi organik bor bileşikleri,

Borhalid-H₂ veya %75 N₂, %25 H₂ gazları karışımı,

Diboran (B_2H_6)- H_2 karışımı kullanılır.

Gaz borlama işlemi basit bir işlem olsa da kompleks ekipmanlar gerektirir. Diboran oldukça pahalı ve zehirli bir borlayıcıdır [51]. Patlayıcı ve zehirli olan Diboran H_2 karışımı ticari olarak kullanılmamaktadır. Organik bor bileşiklerinin kullanılmasıyla borür ve karbür bileşikleri oluşur. Gaz borlama işlemi için en çok tercih edilen borlayıcı BCl_3 'dür. İşlem 700-950 °C sıcaklık aralığında 67 KPa (0,67 bar) basınç altında 1:15 $BCl_3:H_2$ gaz ortamında gerçekleşir. H_2 yerine 75:25 oranında $N_2:H_2$ kullanımının tabaka kalitesinin artmasına ve FeB fazının azalmasına neden olur (Hegewaldt vd, 1984).

3.5.4. Pasta borlama

Pasta borlama, kutu borlamanın karmaşık şekilli ve kitlesel parçalar için güçlük çıkarıcı ve daha pahalı olduğu veya zaman kaybının meydana geldiği uygulamalarda işlem gören bir metodudur. Bu yöntemde borlayıcı ortam olarak %45 B_4C ve %55 kriyolit (N_3AlF_6) ya da bütül asetat içinde çözünmüş nitro selüloz bağlayıcı ve geleneksel borlama tozu karışımı ($B_4C-SiC-KBF_4$) kullanılabilir. Bu toz malzemeler, macun haline getirilip parça üzerine sürülerek ya da püskürtülerek yaklaşık 2 mm kalınlığında tabaka elde edilir. Parça fırınlanmadan önce kurumaya bırakılır. Daha sonra ise borlanacak malzeme 800-1000 °C sıcaklıkta 2 ile 10 saat arasında muhafazalı atmosfer altında borlama işlemine tabii tutulmaktadır. Ar ya da N_2 gazı koruyucu atmosfer olarak kullanılabilir (Campos, 2005).

3.5.5. Plazma borlama

Kutu, sıvı ve gaz borlama gibi geleneksel borlama yöntemleri, uygulandıkları malzeme yüzeyinde oluşan borür tabakalarının kontrolünün sağlanamaması ve gözenek oluşumu gibi birçok dezavantajlara sahiptir. Plazma borlama işlemi diğer yöntemlere göre ekonomik oluşu, işlem parametrelerinin kontrolünün kolay olması ve düşük işlem sıcaklıklarında borlama işleminin gerçekleştirilebilmesi gibi birçok avantaja sahiptir (Ülker, 2012). Plazma borlama BCl_3 , BF_3 , B_2H_6 ve TEB (triethyl boran) gibi bor bileşikleri ve redüktan olarak hidrojen gaz kullanılarak, 800- 1100 °C sıcaklıkta, yaklaşık 2- 10 Pa gibi düşük bir basınçta oluşturulmuş bir plazma içerisinde yapılan borlamadır. Plazma borlamanın mekanizması yüksek sıcaklıktaki malzemelerin taşıyıcı metal yüzeyine püskürtülmesini kapsar. Katı ve sıvı borlama uygulamalarında 600 °C gibi düşük sıcaklıklarda borlama işleminin mümkün olmadığı durumlarda, $B_2H_6-H_2$ gaz karışımı ile çeşitli çelikler üzerinde bor tabakaları oluşturulmaktadır. Ancak bu uygulamada gaz borlamada meydana geldiği gibi büyük dezavantajı ise sarf edilen bor halid gazlarının çok tehlikeli olması ve ilk yatırım maliyetinin çok fazla olmasıdır. (Panus, 2006).

3.6. Nikel Esaslı Alaşımların Borlanması

Nikel esaslı alaşımlar muhteşem korozyon dayanımları mevcuttur. Bu yüzden bu süper alaşımlar yüksek sıcaklık ve koroziv ortam şartlarında sıklıkla tercih edilirler. Petrol endüstrisi ve enerji endüstrileri nikel esaslı süper alaşımların uygulama sahalarının önde gelenlerinden sayılabilmektedir. Yalnız, Ni esaslı süper alaşımların yüzey sertlikleri çok yüksek değildir. Dolayısıyla bu malzemeler abrasif veya adhezif aşınma şartlarında kullanılacak ise elverişli bir aşınma önleyici gerektirmektedirler (Makuch vd., 2014). Geçen senelerde uygulanan borür kaplamalar, aşınma ve abrasyona karşı sinterlenmiş karbürlerle mukayese edilebilecek bir aşınma direnci gösterdiğinden önemli bir yere sahiptir. Borlama, metal ve alaşımlarının mekanik zorlama, korozyon gibi servis ömrüne tesir eden dış faktörlere karşı gereçlerin dayanımı ve servis ömrünü yükselten termokimyasal bir yüzey değişkenlik prosesidir (Sinha, 1991). Borlama işlemi triboloji dayanımı bakımından başka termokimyasal işlemlere oranla daha iyi bir aşınma dayanımı meydana getirdiği hatta borür tabakalarının nitrülenmiş, karbürlenmiş, karbo-nitrülenmiş veya krom kaplı malzemelere göre 2 katından daha fazla aşınma dayanımları gösterdikleri birçok çalışmada ifade edilmiştir (Venkataraman vd., 1995). Borlama metodu olarak farklı türde metotlar uygulansa da genel olarak katı (kutu borlama), sıvı (borür tuzları içerisinde) ve gaz ortamı şekillerinde tatbik edilebilir. Kutu borlama yöntemi en kullanışlı yöntem olup kutu sementasyona benzemektedir. Borlama, çeliklere uygulanmasının yanında nikel, kobalt, molibden, titanyum gibi demir dışı metaller ve sermetlere uygulanmaktadır. Ancak, nikel esaslı süper alaşımların üzerine araştırılan çalışmalar az miktardadır (Deng vd., 2015). Nikel esaslı alaşımlarda başlıca NiXBY, CrXBY, FeXBY fazları oluşmaktadır. NiXSiy fazı ise özellikle aşınma uygulamaları için istenmeyen bir fazdır. Çünkü silisyum içerikli tabaka 100-500 HV gibi düşük sertlik değerleri ile yüzeyde gözenekli şekilde olduğundan tribolojik uygulamalarında yüzeyden basit bir şekilde kalkar ve aşındırıcı olarak vazife yaparak malzemenin aşınma dayanımını azaltır.

Literatürde nikel alaşımlı süper alaşımlara borlama işlemi uygulamaları ve bu alaşımların aşınması üzerine deneysel araştırmalar bulunmaktadır. Daha önce yapılan bu araştırmaları incelediğimizde yapılan deney parametrelerinin borlanan süper alaşımın ısıtma işlem prosedürlerine uygun seçildiği tespit edilmiştir. Yapılan araştırmaların büyük oranda kutu borlama tekniği kullanılarak gerçekleştirildiği görülmüştür. Bu tez çalışmasında basitliği ve ekonomikliğiyle diğer borlama yöntemlerine göre bir adım önde bulunan kutu borlama tekniği kullanılmıştır. Kutu borlama yönteminde borlama sıcaklıklarının borlanacak alaşımın oranına bağlı olarak 700°C -1050 °C arasında değişimler gösterirken Süper alaşımların yüksek oranda alaşım elementleri içermesi dolayısıyla difüzyon olayının daha yavaş meydana gelebileceği dolayısıyla daha homojen borür tabakalarının 950 °C ile 1000 °C arasında elde edildiği görülmüştür. Bizde bu tez çalışmasında da Hastelloy C-276 alaşımının ısıtma işlem prosedürü göz önünde bulundurularak borlama sıcaklıklarını 975 °C olarak belirlenmiştir. Borlama süreleri ise 2-6 saat aralığında gerçekleştirildiğinden hareket ile tez çalışmasında 5 ve 7 saat süreleri seçilmiştir. Aşınma testleri için borür tabakaların maruz kalacağı yükler göz önünde bulundurularak ve literatüre paralel olarak 5N, 10N ve 20N olarak belirlenmiştir. Aşınma testi

deneylerimizi oda sıcaklığında kuru sürtünme ile pin on flat yönteminde 5000 s süreyle 15 mm strok boyunda 60 mm/saniye hızla 300 m uzunluğunda gerçekleştirilmiştir. Aşınma testlerini uygularken aşındırıcı top olarak 6 mm çapında yüzey pürüzlülüğü G20 olan 1650 MPa sertlikteki Al_2O_3 (alümina) toprak kullanılmıştır.



4. BÖLÜM

MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, Hastelloy C-276 alaşımına 975 °C'de 5 saat ve 7 saat süre ile borlama işlemi uygulanmıştır. Kaplama tabakaları taramalı elektron mikroskobu (SEM), X-ışını kırınımı (XRD) ve nanoindentasyon analizleri ile incelenmiştir. Kaplama tabakasının sürtünme ve aşınma performansı lineer aşınma testleri ile belirlenmiştir.

4.1. Hastelloy C-276

Deneylerde kullanılan Hastelloy C-276 nikel esaslı süper alaşımı numunesi 25x30x3mm ebadında hassas kesme cihazında hazırlanmıştır. Hastelloy C-276 nikel esaslı süper alaşımının kimyasal bileşimi tablo 4.1.'de görülmektedir.

Tablo 4.1. Hastelloy C-276 Ni esaslı süper alaşımın kimyasal bileşimi (ağ. %).

Kalite	Ni	Cr	Mo	Fe	W	Co	Mn	Nb	Si	Cu	V
Hastelloy C-276	58,34	16,10	15,36	6,07	3,37	0,05	0,37	0,01	0,02	0,02	0,14

4.2. Borlama işlemlerinin uygulanması

30x30x5 mm ebatlarında kesilmiş numuneler borlama öncesi 320-800 aralığında SiC zımpara kağıtları ile zımparalanarak yüzeydeki oksit, yağ vb. kalıntılar giderilmiş ardından etil alkol ve damıtılmış su ile temizlenmiştir. Borlama uygulamaları, paslanmaz çelikten imal edilmiş ve dişli yapıları sayesinde hava almayacak şekilde tasarlanmış potaların (Resim 4.1) içerisine %90 B₄C (bor karbür) ve %10 NaBF₄ (sodyum tetraborflorür) tozları karışımı ile doldurularak numunelerin her tarafında en az 10 mm borlama tozları olacak şekilde doldurulmuş ve ağızları sıkıca kapatılmıştır. Ardından potalar 975 °C'de hazır bekletilen atmosfer kontrollü fırın (Resim 4.2) içerisine yerleştirilmiş ve fırının sıcaklığının 925 °C'ye düşmesi sebebiyle tekrar 975°C'ye çıkması için yaklaşık 10 dak beklenmiştir. Fırın 975 °C çıktığı andan itibaren borlama süresi olan 5 ve 7 saat süreleri boyunca numuneler fırında bekletilmiştir. Borlama işlemi endüstriyel uygulamalarda daha maliyet etkenli olması sebebiyle açık hava ortamında gerçekleştirilmiştir. Borlama süresi sonunda potalar fırından çıkarılarak açık hava ortamında soğumaya bırakılmıştır. Soğuyan potaların içerisinden numuneler alınarak yüzeylerindeki toz kalıntıları toz alma fırçası yardımıyla giderilmiştir.



Resim 4.1. Borlama işleminde kullanılan paslanmaz AISI 321 çeliğinden imal edilmiş borlama potasının görünümü



Resim 4.2. Borlama işlemlerinin gerçekleştirildiği atmosfer kontrollü fırın

4.3. Numune Hazırlama İşlemleri

Numuneler, mikro yapı analizleri, XRD analizleri ve aşınma testleri için sırasıyla 10x10x3, 20x20x3 ve 25x30x3 mm ebatlarında olacak şekilde hassas kesme cihazı ile kesilmiştir. Mikro yapı incelemeleri için numuneler bakalite alma cihazı ile kesit yüzeyleri üste gelecek şekilde bakalite alınmıştır. Ardından mekanik zımparalama yoluyla numunelerin tüm yüzeyler 180-240-320-400-600-800-1000-1200 ve 2500 meshlik SiC zımparayla zımparalanmış ve 1 µm'lik elmas pasta ile parlatılmıştır. Mikro yapının net gözlemlenmesi için parlatılmış numuneler dağlanmıştır. Sonrası numunelerin yüzeyi damıtılmış su ile temizlenmiş ve sıcak hava ile kurutulmuştur.

4.4. SEM Analizleri

Mikro yapı incelemeleri için hazırlanan numunelerin SEM analizleri, Thermo Fisher Scientific Apreo S (SEM) cihazıyla yapılmıştır (Resim 4.3). Kaplama tabakası ve difüzyon bölgesinde oluşan fazlar ve alaşım elementlerinin dağılımı SEM cihazı üzerindeki EDS atachmanı ile belirlenmiştir. Aşınma deneyi sonrası aşınma mekanizmaları SEM EDS analizleri sonucunda elde edilmiştir.



Resim 4.3. SEM cihazı

4.5. XRD Analizleri

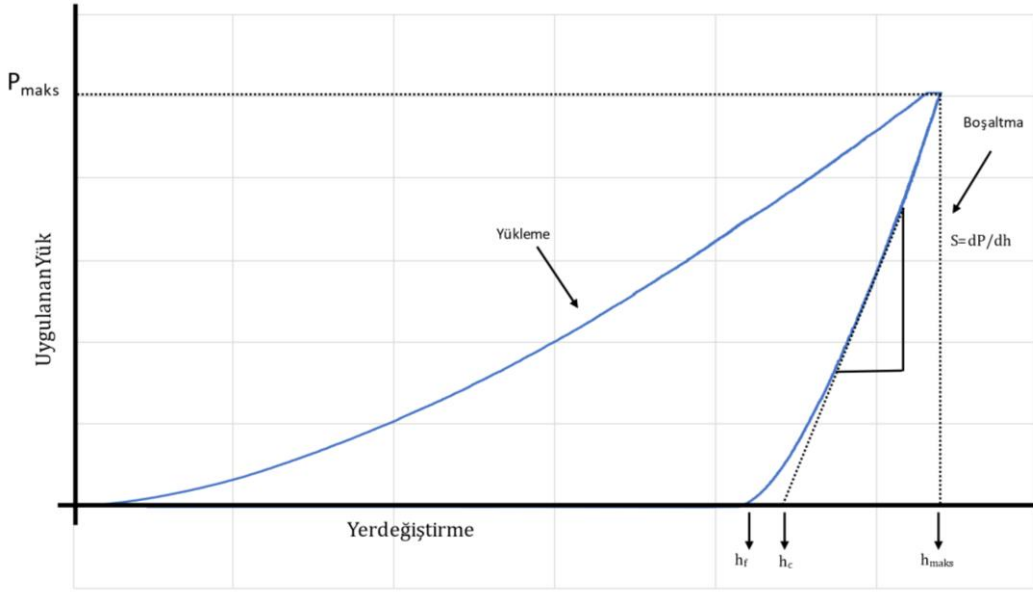
Farklı sıcaklık ve sürelerde borlama işlemi yapılan Hastelloy C-276 nikel esaslı süper alaşımının borlanmış yüzeyi temizleme işleminden geçirildikten sonra yüzeyde oluşan borür fazlarını tespit etmek amacıyla X-ışını analizi yapılmıştır. X-ışını analizleri, Malvern Panalytical EMPYREAN (3. Nesil) marka cihaz kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Resim 4.4). Film örneklerinin kırınım deseni 10-90° açı aralığında, 1°/dakika hızında ve 0,01° adım genişliğinde alınmış olup sabit bir grazing açısı (0,8°) kullanılarak güçlü sinyaller elde edilmiştir.



Resim 4.4. Malvern Panalytical EMPYREAN Cihazı

4.6. Nanoindentasyon Analizleri

Kaplama tabakasının mekanik özelliklerini (sertlik ve elastikte modülü) ve yük-yer değiştirme eğrilerini belirlemek amacıyla numunelere nanoindentasyon testleri uygulanmıştır. Bu işlemler için HYSTRON TI 950 TRIOLNDENTER cihazı kullanılmıştır (Resim 4.5). Test sonuçlarının analizi için Oliver-Pharr yöntemi kullanılmıştır. Sertlik, elastisite modülü, yükleme ve boşaltma eğrilerinden belirlenmiştir (Oliver Pharr vd., 2004). Yükleme-yer değişimi karakteristik eğrisi Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Yük-yer değiştirme eğrisi

Sertlik (H) ve indirgenmiş elastik modülü (E_r) aşağıdaki formüllerden elde edilmektedir;

$$H = \frac{P_{max}}{A_c} \quad (1)$$

$$h_c = h_{max} - \beta \frac{P_{max}}{S} \quad (2)$$

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1-v_s^2}{E_s} - \frac{1-v_i^2}{E_i} \quad (3)$$

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \chi \frac{S}{A_c} \quad (4)$$

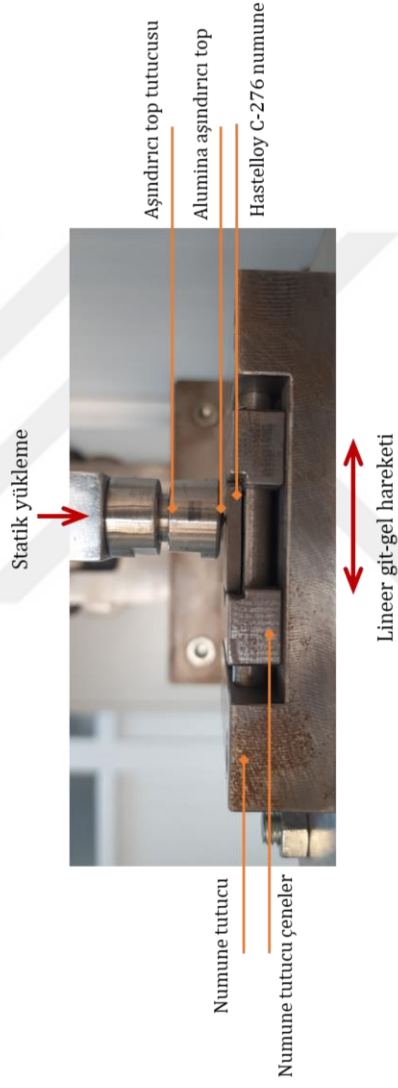
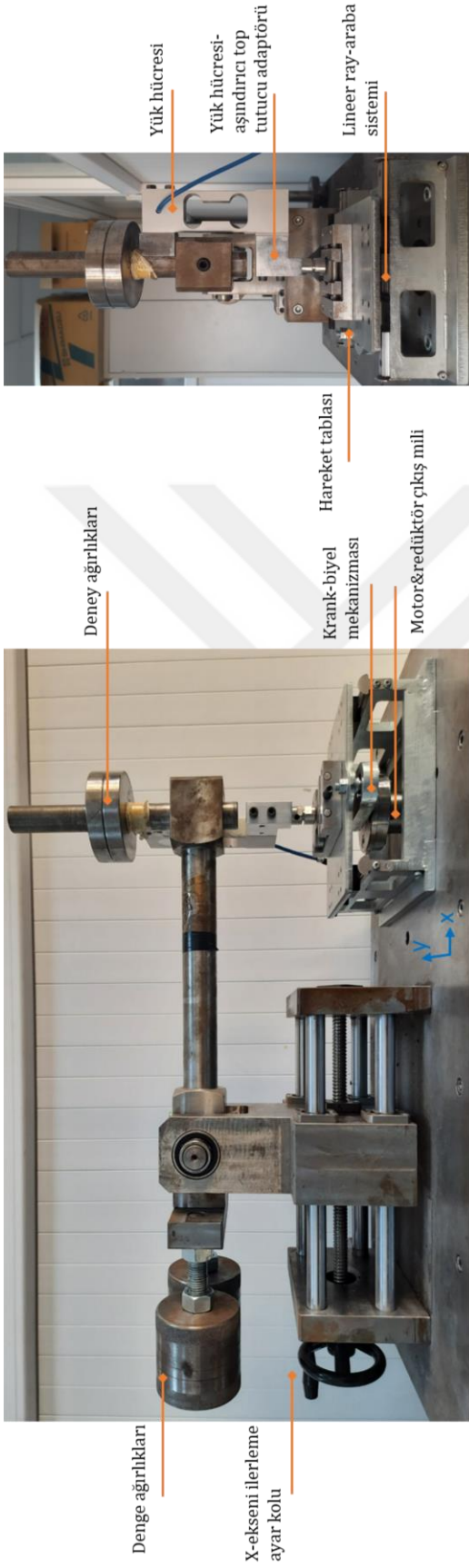
Burada, H nano sertlik değerini, P_{maks} uygulanan maksimum yükü, A_c ise kontak alanını ifade eder. h_c kontak derinliği, h_{max} maksimum derinliği, S boşalma eğrisinin eğimini, E_r ise indirgenmiş elastik modülünü temsil etmektedir. E ve ν Young modülü ve Poisson oranıdır. Alt indis olarak kullanılan s numunenin, i ise Berkovich ucun Young modülü ve Poisson oranını ifade eder. Dolayısıyla, geleneksel nanoindentasyon ölçümü ile indirgenmiş elastisite modülü, maksimum yükte boşaltma eğrisinin eğiminden belirlenir (Demir vd., 2020).



Resim 4.5. Hysteron T1 950 Triolndenter Cihazı

4.7. Triboloji Testleri

30x30x3 mm ebatlarında işlemsiz ve borlanmış Hastelloy C-276 numunelere aşınma testleri kuru sürtünme koşullarında ASTM G-133 standardına göre yapılmıştır. Deneye başlamadan önce numuneler asetonlu pamuk ile üzerindeki toz ve yağlardan arındırılmak için temizlenmiştir. Temizliği tamamlanan numunelerin 0,1 mg hassasiyetinde terazide ön tartımları yapılmıştır. Aşınma test cihazına ait görseller Resim 4.6'da verilmiştir. Resimde görüldüğü üzere, motor-redüktör çıkış milinin dönme hareketi krank-biyel mekanizması ile hareket tablasının lineer ray-araba sistemi üzerinde Y-ekseni git-gel hareketine çevrilmiştir. Hareket tablasının üzerindeki çenelere bağlanan numuneler ile karşı yüzeyi oluşturan hareketsiz durumdaki aşındırıcı top arasında temas yüzeyi oluşturulmuştur. X-ekseni ayar kolu ile aşındırıcı top, numune üzerinde aşınma izinin oluşturulacağı konuma getirilmiştir. Denge ağırlıklarıyla yatay konuma getirilen yük kolunun ilgili kısmına şekildeki gibi deney ağırlıkları yerleştirilmiştir ve deney başlatılmıştır.



Resim 4.6. Aşınma Testi Cihazı

Deney numuneleri 3 farklı malzemeye (borlanma işlemi yapılmamış ve 975 °C sıcaklıkta 5 ve 7 saat borlanmış) 3 farklı yükleme yapacak şekilde (5, 10 ve 20 N) 9 gruptan oluşmaktadır. Deneyler her bir grup için en az üç tekrar olacak şekilde 5000 s süreyle 15 mm strok boyunda 60 mm/saniye hızla 300 m uzunluğunda gerçekleştirilmiştir. Aşınma testlerini uygularken aşındırıcı top olarak 6 mm çapında yüzey pürüzlülüğü G20 olan 1650 Mpa sertlikteki Al₂O₃ (alümina) toplar kullanılmıştır. Test sonrasında numuneler asetonlu pamuk ile temizlenerek hassas terazide tekrar tartılmıştır.

Aşınma hacim kaybı için kullanılan yöntemler:

1) Ağırlık kaybı yöntemi için aşağıdaki formül kullanılmıştır;

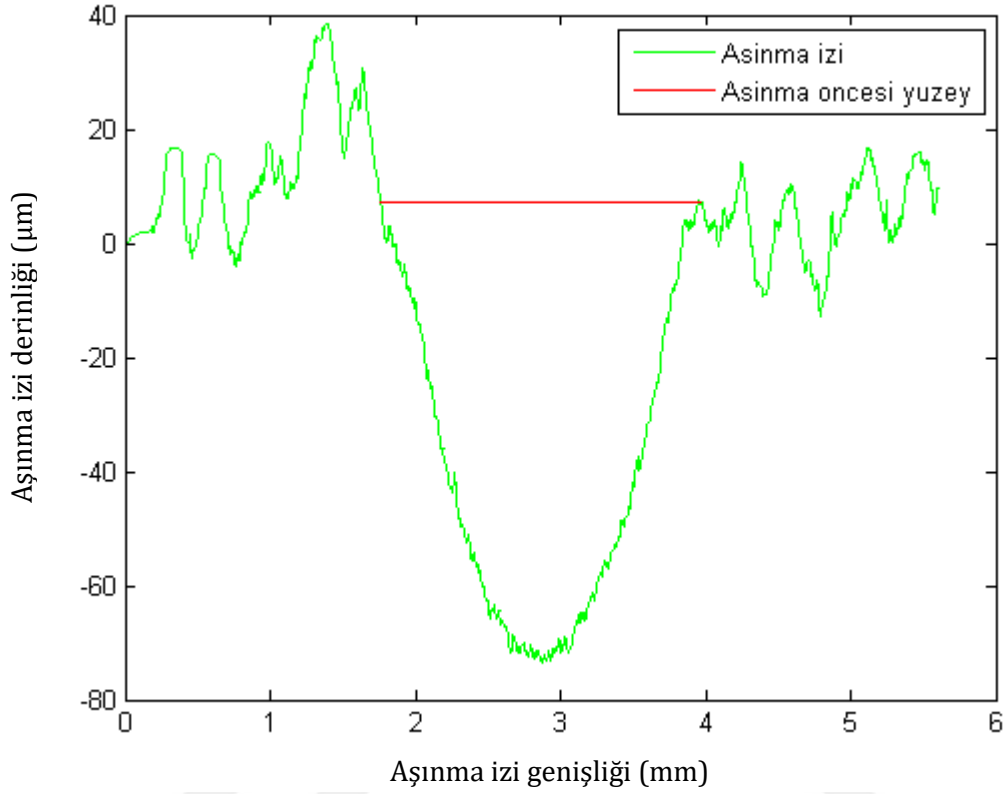
$$\Delta V = (W_i - W_s) / \rho \quad (5)$$

W_i numunenin test öncesi ağırlığı (g), W_s numunenin test sonrası ağırlığı (g) ve ρ özgül ağırlığıdır (g/cm³).

2) MarSurf / M300 Portatif 2B profilometre (Resim 4.6) ile 0,5 mm/s hızında ve 5,6 mm uzunluğunda tarama yaparak numunelerin aşınma izi profilleri (Örnek için Şekil 4.2 bakınız) elde edilmiştir. Geliştirilen MATLAB kodu ile aşınma öncesi tahmini yüzey oluşturulmuş ve bu yüzeyden aşınma sonrası yüzeyi çıkarılarak aşınma izine ait alan kaybı hesap edilmiştir. Her bir aşınma izi için 3 farklı bölgeden ölçüm alınarak ortalaması alınmıştır. Hacim kaybını hesaplamak için alan kaybı aşınma izi uzunluğu (15 mm) ile çarpılarak hacim kaybı hesaplanmıştır. Aşınma izi uzunluğu kumpas ile 15 mm olarak ölçülmüştür.



Resim 4.7. MarSurf / M 300 Portatif 2D Optik Profilometre



Şekil 4.2. MATLAB programında aşınma izi yüzey alanının hesaplanması

Aşınma oranı (W) hesabı için aşağıdaki formül kullanılmıştır;

$$W = \Delta V / (F_N S) \quad (6)$$

Burada, ΔV hacim kaybı (mm^3), F_N normal yük (N) ve S kayma mesafesi (m)'dir.

Aşınma deneyi öncesi ve sonrası yüzey pürüzlülük değerleri (R_a ve R_z) MarSurf / M300 cihazında 0,5 mm/s hızında ve 1 mm uzunluğunda tarama sonucunda elde edilmiştir. R_a aritmetik ortalama sapma değeri iken R_z 5 tane en yüksek 5 tane en düşük noktanın ortalamasıdır.

Sürtünme kuvveti 15 N kapasiteli yük hücresi ile deney süresince ölçülmüştür ve bir veri kaydedici ile 40 Hertz'de kaydedilmiştir. Sürtünme katsayısı aşağıdaki formülle elde edilmiştir;

$$\mu = F_S / F_N \quad (7)$$

Burada, F_S sürtünme kuvveti (g) ve F_N normal kuvveti (deney ağırlığını) (g) temsil etmektedir.

Bu tezde, strokun orta kısımlarında oluşan dinamik sürtünme katsayıları rapor edilmiştir. Sürtünme kuvveti verilerinden dinamik sürtünme katsayısı verilerinin oluşturulması için MATLAB kodu kullanılmıştır.

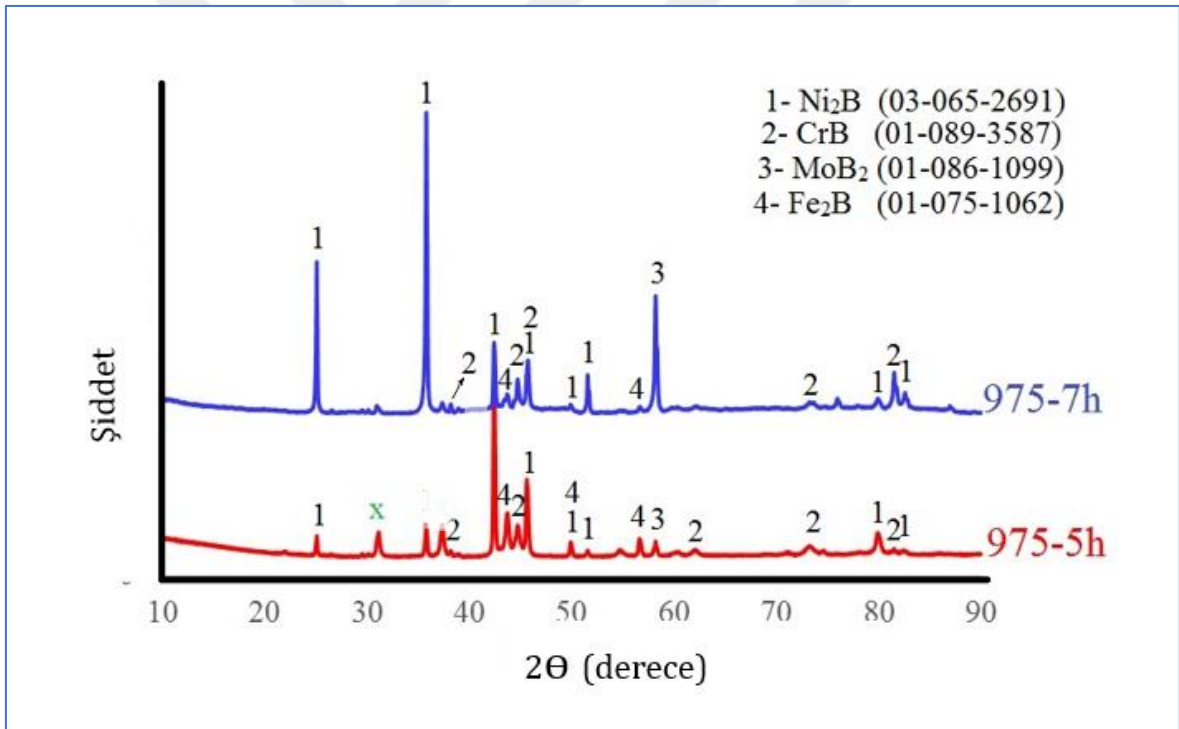
5. BÖLÜM

DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu kısımda borlanmış hastelloy C-276 alaşımın XRD analizleri, SEM ve EDS incelemeleri, Mikro sertlik ve Nanoindentasyon verileri, Tabaka kalınlıkları ve Aşınma test sonuçları verileri verilerek tartışılacaktır.

5.1. XRD Analizleri

Hastelloy C-276 numunelerinde oluşan yapı fazların belirlenmesi için XRD analizleri Malvern Panalytical EMPYREAN (3. Nesil) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. XRD analizleri $2\theta = 10^\circ - 90^\circ$ açı aralığında, 0.01° adım ebadı ve $1^\circ/\text{dak}$ tarama hızında yapılmıştır. XRD diyagramları PDXL 2 yazılımı kullanılarak incelenmiş ve numuneye ait yapı fazları tanımlanmıştır. XRD incelemeleri $10^\circ \leq 2\theta \leq 90^\circ$ aralığında gerçekleştirilen numunelerden elde edilen X ışını kırınım desenleri Şekil 5.1 de verilmiştir.



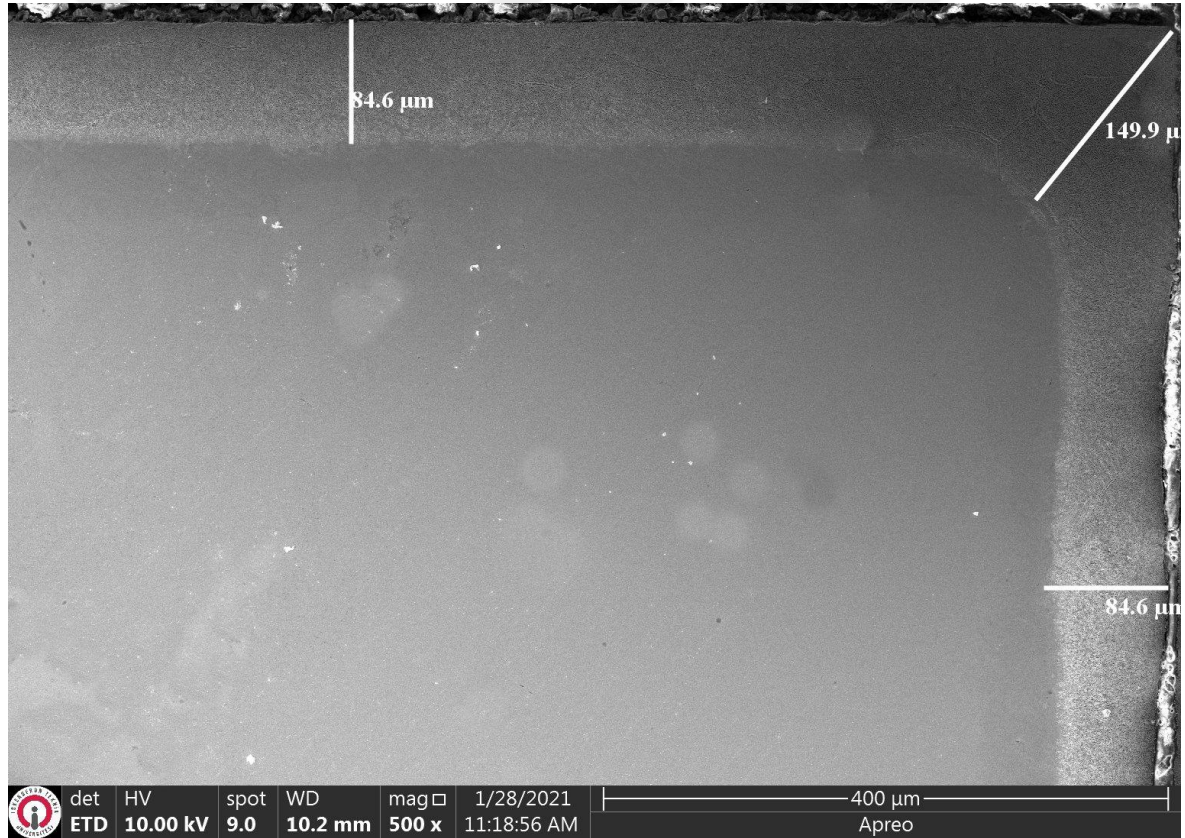
Şekil 5.1. Borlanmış Hastelloy C-276 alaşımı XRD analiz sonuçları

XRD diyagramına bakıldığında (Şekil 5.1), 975-5h örneğinde Ni_2B (ICDD: 03-065-2691), CrB (ICDD: 01-089-3587), Fe_2B (ICDD: 01-075-1062), MoB_2 (ICDD: 01-086-1099) fazlarının yapıya hâkim olduğu görülmektedir. Hastelloy C-276 numunesinin yapıya ait en şiddetli piki $42,39^\circ$ açısızal konumda Ni_2B fazı olduğu görülmektedir. Bu durum Hastelloy C-276 Ni esaslı süper alaşım içeriğindeki yüksek miktardaki Ni içeriğine atfedilebilir. Bu pik (002) düzlemine ait yansıma sahip Ni_2B fazı olmakla birlikte düzlemler arası mesafesi $2,1303\text{\AA}$ olarak

belirlenmiştir. Hastelloy 975 °C 7h örneğinde ise 5 saatlik numune ile Ni₂B (ICDD: 03-065-2691), CrB (ICDD: 01-089-3587), Fe₂B (ICDD: 01-075-1062), MoB₂ (ICDD: 01-086-1099) fazları tespit edilmiştir. Ancak 7 saatlik borlanmış numunede yapıya ait en şiddetli piki 42,39° dan 35,673° ye kaydığı görülmektedir. Buna ilaveten MoB₂ ve CrB fazlarının pik şiddetleri artarken Fe₂B fazının pik şiddetinin düştüğü görülmektedir. Bu durum kaplama süresinin artmasına bağlı olarak MoB₂ ve CrB fazlarının arttığı bununda mekanik özellikleri etkileyebileceği öngörülmektedir. Ancak, her iki numunede de Ni₂B fazının baskın faz olduğu ve Hastelloy C-276 alaşımının içeriğindeki yüksek miktarda bulunan Ni içeriği ile uyumludur.

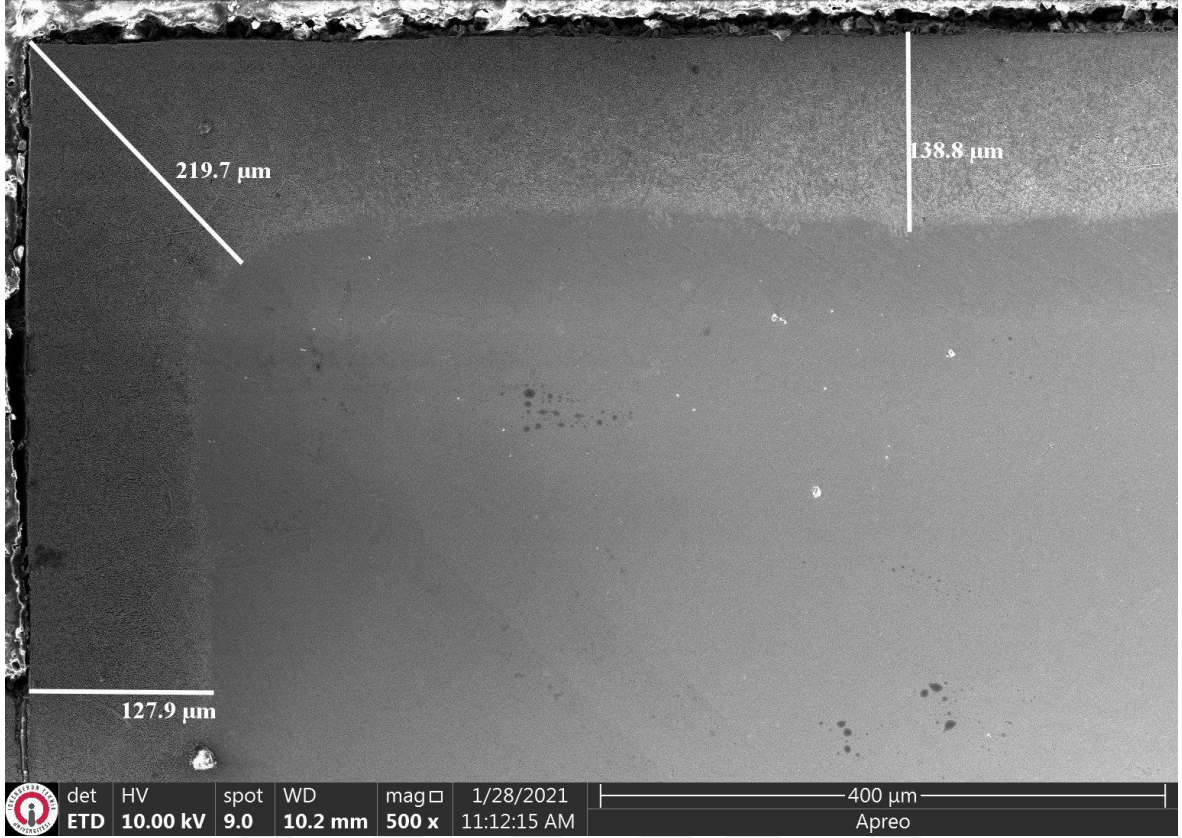
5.2. Kaplama Tabakası SEM İncelemeleri

975°C’de 5 saat ve 7 saat süre ile borlanmış Hastelloy C-276 alaşım numunelerin kesitlerinden kenar köşelerini gösterecek şekilde alınan SEM mikro yapı görüntüleri Şekil 5.2 ve Şekil 5.3’de gösterilmiştir.



Şekil 5.2. 975°C’de 5 saat süre ile borlanmış Hastelloy C-276 alaşımının kenar köşelerini gösteren SEM mikro yapısı

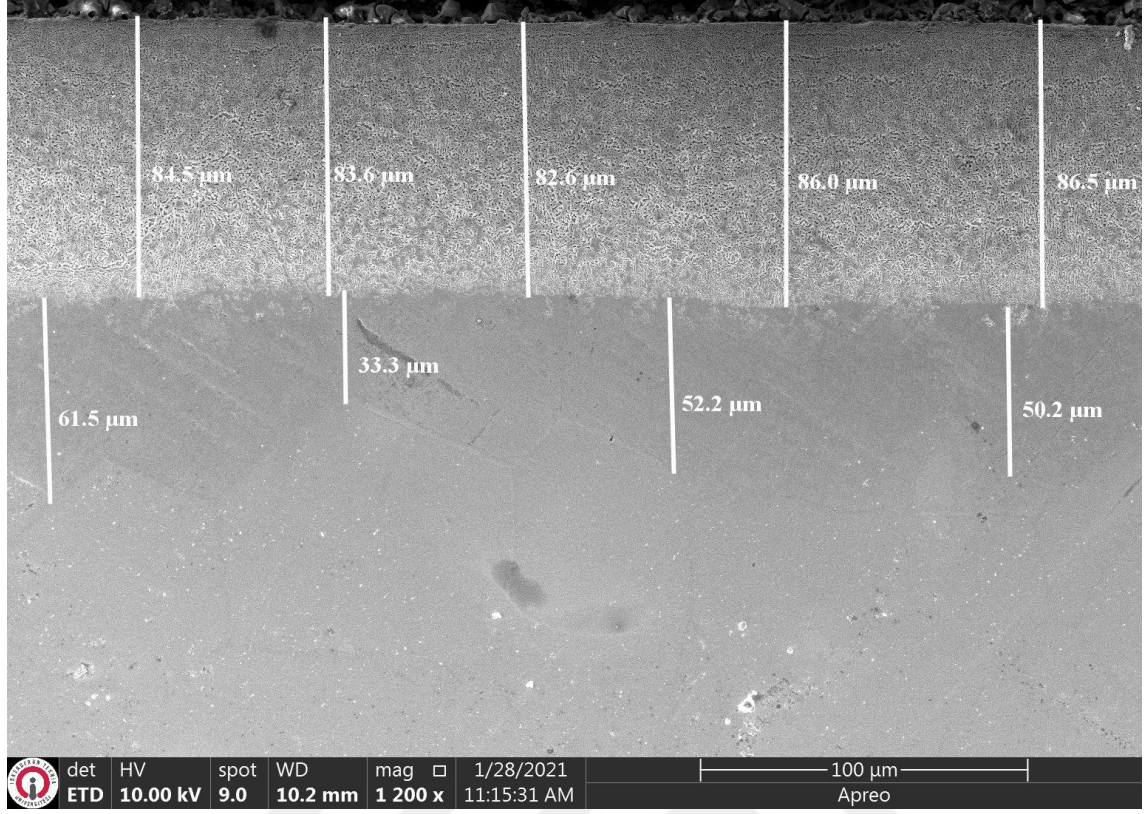
Şekil 5.2’de görüldüğü üzere 975°C’de 5 saat süre ile borlama işlemi sonucunda numunenin yüzeyinde 85 μm kalınlığı civarında numunenin her tarafında çatlak, porozite vb. olumsuzlukları içermeyen en önemlisi köşelerde daha homojen olarak oluşmuş olan bir kaplama tabakasının oluştuğu görülmektedir.



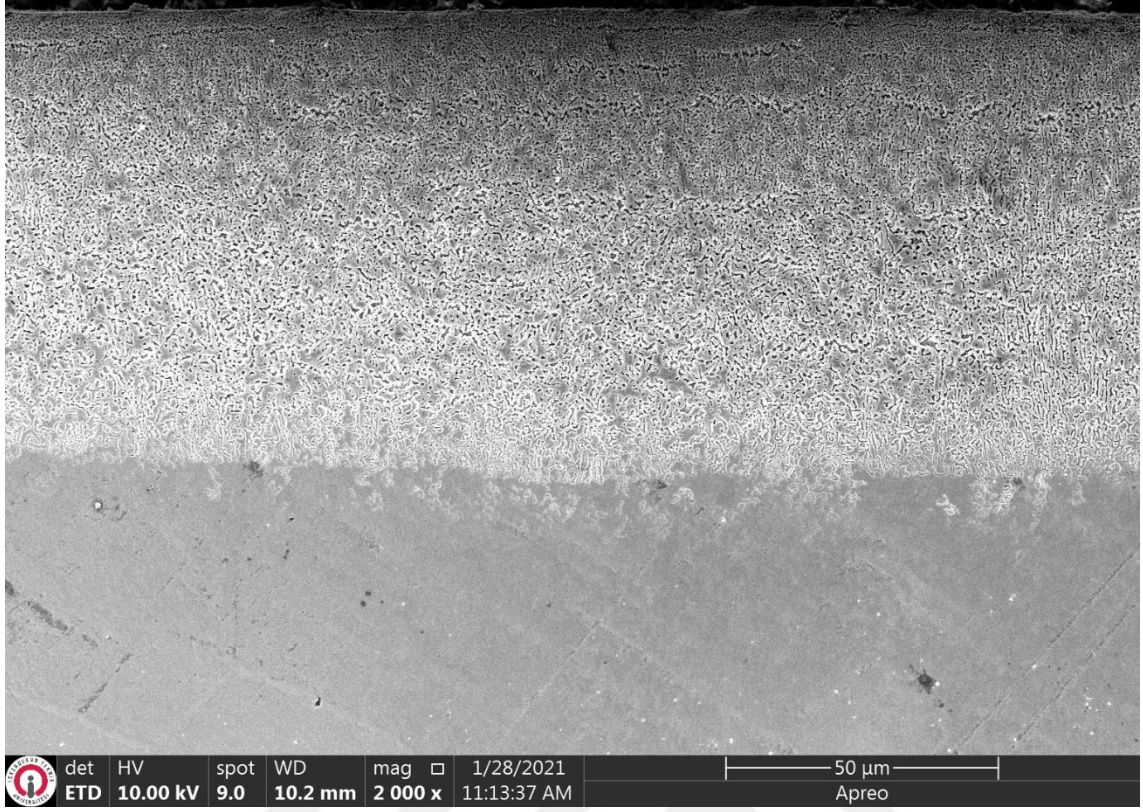
Şekil 5.3. 975°C’de 7 saat süre ile borlanmış Hastelloy C-276 alaşımının kenar köşelerini gösterir SEM mikro yapısı

Şekil 5.3’de ise 975°C’de 7 saat süre ile borlama işlemi sonucunda numunenin yüzeyinde oluşan kaplama tabakasının 130 μm civarında olduğu ve 5 saat süre ile borlanan numunede olduğu gibi her tarafında çatlak, porozite vb. olumsuzlukları içermeyen en önemlisi köşelerde daha homojen olarak oluşmuş olan bir kaplama tabakasının burada da oluştuğu görülmektedir. Bu durum borlama parametresi olarak belirlenen 975°C’de 5 saat ve 7 saat sürelerinin doğru bir seçim olduğunu göstermektedir.

Yüzeyde oluşan kaplama tabakalarının daha net ortaya konulması amacıyla alınan daha büyük büyültmelerdeki SEM resimleri Şekil 5.4, Şekil 5.5, Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’de verilmiştir.

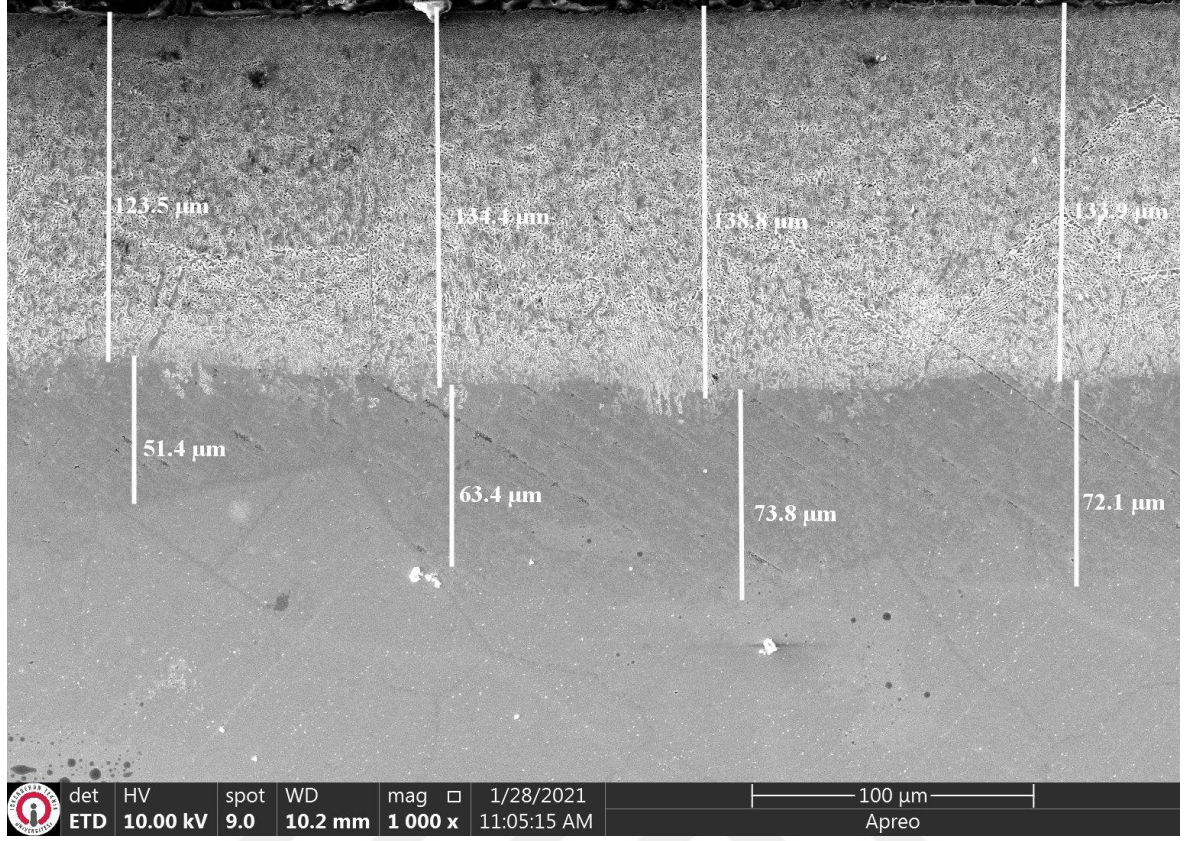


Şekil 5.4. 975°C'de 5 saat süre ile borlanmış Hastelloy C-276 alaşımının 1200X büyütme sonucu elde edilen SEM mikro yapı görüntüleri

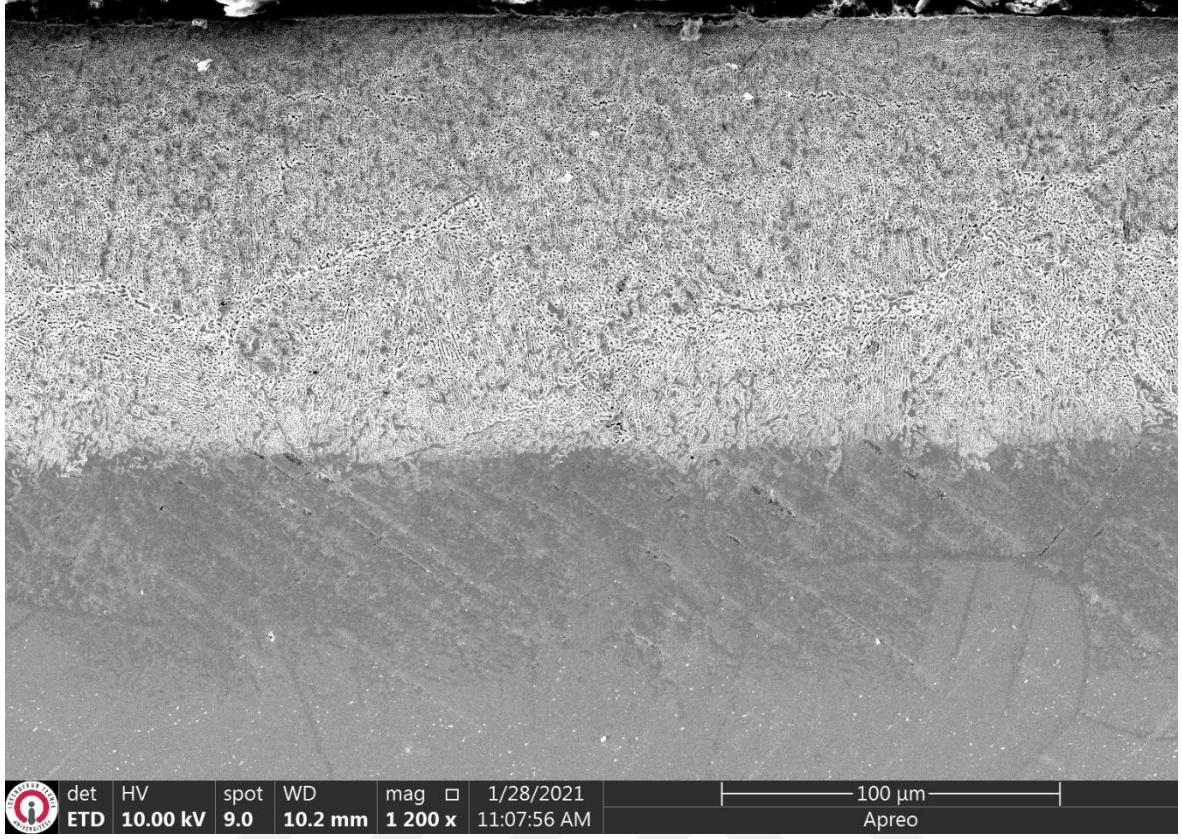


Şekil 5.5. 975°C’de 5 saat süre ile borlanmış Hastelloy C-276 alaşımının 2000X büyütme sonucu elde edilen SEM mikro yapı görünümleri

1200X büyütme resimleri Şekil 5.4 net olarak gözükmeyen kaplama tabakasının altında bir farklı renk konsantrasyonuna sahip bir bölgenin varlığı görülmektedir. Bu bölge çeliklerin borlanmasında kimi çalışmalarda geçiş bölgesi kimi çalışmalarda ise difüzyon bölgesi olarak adlandırılmıştır. Bu bölgenin kaplama ile altlık arasındaki farklı termal genleşme katsayılarından dolayı ısınma ve soğutma işlemleri arasında köprü vazifesinin görmesinin yanı sıra kaplama tabakası ile altlık malzeme arasındaki adhezyon kuvvetini artırdığı birçok çalışmada bildirilmiştir. Bu geçiş bölgesi çeliklerin borlanmasında birçok çalışmada belirtilmiş ve kaplama tabakası kalınlığından daha yüksek olduğu bildirilmiş olsa da süper alaşımların uygulandığı borlama çalışmalarında ise kaplama tabakasından daha düşük bir kalınlığa sahip olduğu bildirilmiştir. Bu durum süper alaşımların sahip olduğu alaşım elementlerinden Bor’un difüzyonunu yavaşlatarak iç kısımlara doğru ilerleyişinde engel oluşturmaları nedeniyledir. Nitekim alaşımsız çeliklerde aynı süre ve sıcaklıklarda daha kalın borür tabakaları ve geçiş bölgeleri elde edilirken alaşımlı çelikler, paslanmaz çelikler, süper alaşımlar ve yüksek entropili alaşımlarda daha düşük kalınlığa sahip tabakalar elde edilir.



Şekil 5.6. 975°C'de 7 saat süre ile borlanmış Hastelloy C-276 alaşımının 1000X büyütme sonucu elde edilen SEM mikro yapı görüntüleri



Şekil 5.7. 975°C’de 7 saat süre ile borlanmış Hastelloy C-276 alaşımının 1200X büyütme sonucu elde edilen SEM mikro yapı görüntüleri

Şekil 5.6’da görülen SEM resmi incelendiğinde 5 saat süre ile borlanmış resmin (Şekil 5.4) mikro yapısında olduğu gibi kaplama tabakası, geçiş bölgesi ve altlık olmak üzere 3 kısımdan oluştuğu görülmektedir. Şekil 5.2 ve Şekil 5.3 arasındaki fark artan borlama süresine bağlı olarak kaplama tabakası ve geçiş bölgesi kalınlıklarında meydana gelen artış olmuştur. Borlama işlemi difüzyonel esaslı bir işlem olması dolayısıyla bu durum beklenen bir sonuçtur. Çünkü Birinci Fick yasası gereği difuze olan atomların akışı ile eğimi arasında doğru bir orantı olacağı ve konsantrasyonun yüksek olduğu bölgelerden düşük olduğu bölgelere doğru bir akış seyri izleyeceği bildirilmiştir. Ancak, artan borlama süresine oranı ile kaplama tabakası ve geçiş bölgesinin bir miktar daha az olması ise İkinci Fick kanunun işleyişini göstermektedir. Buda artan zamana bağlı olarak konsantrasyon gradyantının düşmesi ve difuze olacak atomların daha uzak mesafeler difuze olmaları gerektiğinden difüzyon hızının bir miktar yavaşlayacağı anlamına gelmektedir.

5.3. Borür Tabakaların Kalınlık ve Mikro Sertlik Değerleri

Tablo 5.1. Hastelloy C-276 üzerinde elde edilen kaplamaların bazı özellikleri

Numune	Borür Tabaka Kalınlığı (μm)	Geçiş Bölgesi (μm)	Mikro Sertlik (HV _{0.05})	Yüzey Pürüzlülüğü (R _a , μm)	Yüzey Pürüzlülüğü (R _z , μm)
İşlemsiz Hastelloy C-276	-	-	250±10	0.601±0.074	3.434±0.337
975°C-5 saat	86,5±1,62	49,3±11,74	2016±125	0.537±0.161	3.192±0.835
975°C-7 saat	132,65±5,61	65,18±10,25	2210±130	0.948±0.075	5.039±0.489

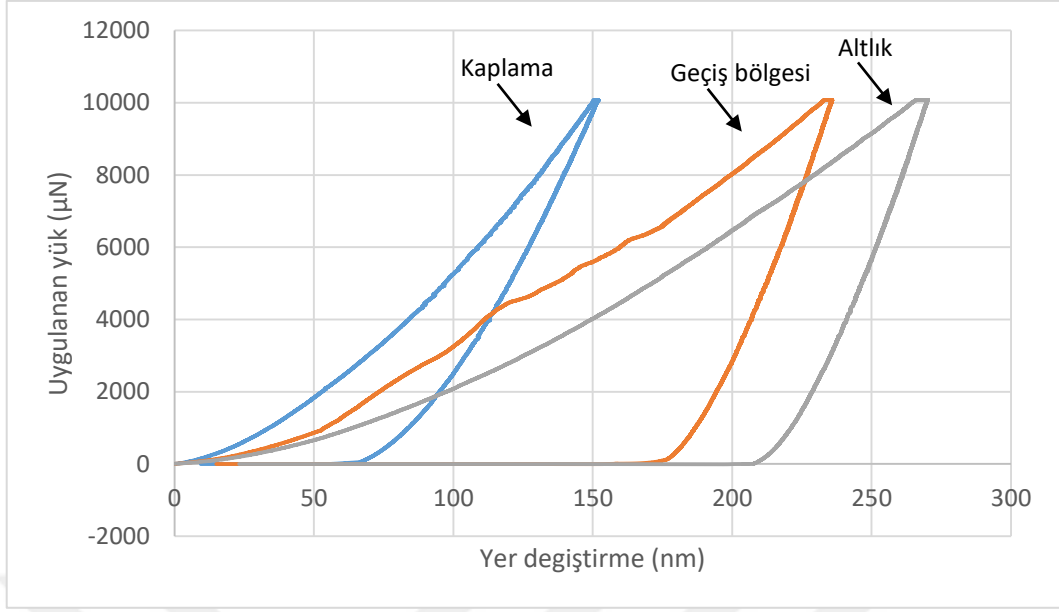
Elde edilen kaplamaların sertlik değerleri 2016- 2210 HV aralığında olup borlama işlemi uygulanmış Ni esaslı süper alaşımların bir kısmının sertlik değerlerinden yüksek iken bir kısmının sertlik değerleri ile uyum içindedir. (Çalı, 2021) 700 °C ve 750 °C sıcaklıklarda 2 ve 4 saat sürelerince %100 susuz boraks pasta borlama tekniği ile borladığı Inconel 718 alaşımının yüzeyinde 1181-1763 HV_{0,05} sertliğinde kaplama tabakaları elde etmiştir. (Dinç, 2013) Ekabor-2 tozu kullanarak 800, 900 ve 1000 °C’de 2,4,6 ve 8 saat süre ile borladığı Ni esaslı Inconel 718 alaşımının yüzeyinde silisid ve borür olmak üzere 2 farklı kaplama tabakası elde ettiği ve kaplama tabakasının 2-60μm aralığında olduğunu sertlik değerlerinin ise 609-1900HV sertlik değerlerinde olduğunu bildirmiştir. (Duran, 2019) bor ve kömür tozu kullanarak 950°C’de 4, 8, 16 saat süre ile borladığı Inconel 718 alaşımının yüzeyinde elde ettiği silisid ve borür tabakasının sertlik değerlerinin 1300-1400 HV aralığında olduğunu bildirmiştir. (Günen vd., 2017) Inconel 625 alaşımını 1000°C’de 3 saat süre ile 3 farklı bor tozu (Nanobor, hBN ve Ekabor 2 tozu ile borladıkları çalışmalarında sırasıyla yaklaşık olarak 72, 63, 23 μm kalınlığında borür, Nitrür-borür ve silisid-borür tabakaları elde ettiklerini ve bu tabakaların sertlik değerlerinin sırasıyla 2167, 1453 ve 1750 HV olduğunu bildirmişlerdir. Yazarlar Ni esaslı süper alaşımlarda elde ettikleri en yüksek kaplama tabakası kalınlığı sertlik değerinin Si içeriksiz Elementel Nanobor tozu ile elde edilmesini silisid tabakasının oluşmaması dolayısıyla difüzyonun hızlı olması ve daha yüksek bor içerikli kaplama tabakalarının elde edilmesi gerektiğini bildirmişlerdir.

5.4. Nanoindentasyon Test Sonuçları

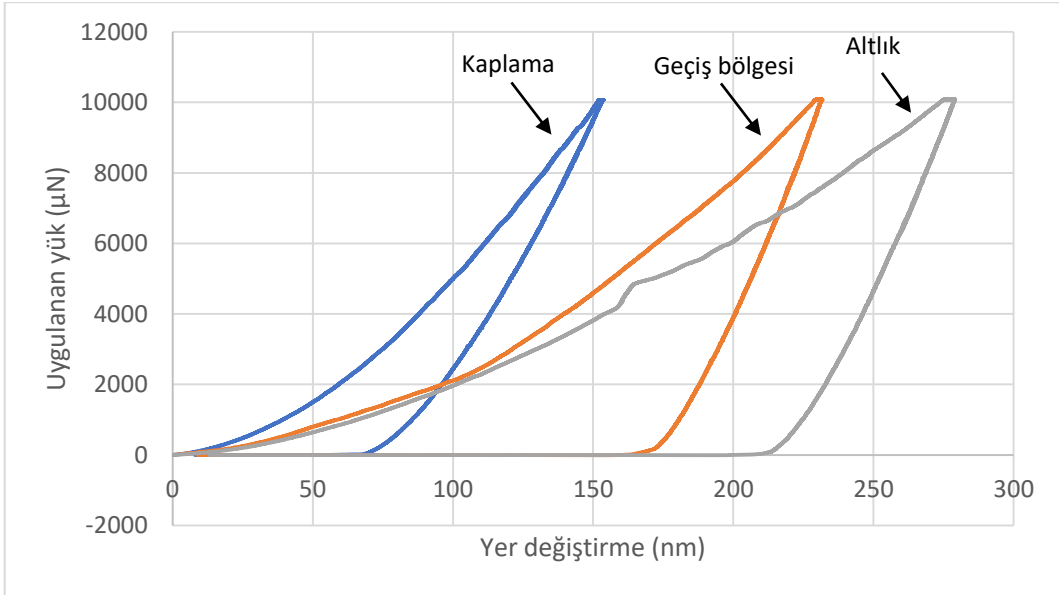
Kaplamaların sertlik ve elastite modülü değerleri, tane büyüklüğü, kristalin oryantasyonu, gözenek yapısı, düzlemsel yoğunluk, tane sınırı, kalıntı gerilmesi ve atomlar arası mesafe gibi birçok faktöre bağlı olarak değişiklik gösterebilir (Jesuraj vd., 2019). Özellikle ince kaplamaların sertlik değerlerinin tespiti çok daha zordur. Bu nedenle son yıllarda ince kaplamaların sertlik değerlerinin tespitinde sıkça kullanılan nanoindentasyon tekniği bu çalışmada mikro sertlik çalışmalarının sonuçlarının doğrulanması ve elde edilen borür tabakalarının elastite modüllerinin hesaplanması amacıyla kullanılmıştır.

Nanoindentasyon (Nano sertlik) testinden elde edilen yük-yer değiştirme eğrilerini analiz etmek için kullanılan birçok analitik yöntem bulunmasına rağmen (Oliver Pharr vd., 1992; Cheng, 2000; Bull, 2005) bunlar arasında literatürde en yaygın kullanılan Oliver-Pharr yöntemi çalışmada kullanılmıştır. Bu yöntemle göre sertlik ve elastite modül, yükleme ve boşalma eğrisinden belirlenmektedir (Oliver Pharr vd., 2004).

Şekil 5.8 975°C'de 5 ve 7 saat süre ile borlanmış Hastelloy alaşımının yüzeyinden iç kısımlara doğru gerçekleştirilen nanoindentasyon ölçümleri sonucu elde edilen yük-yer değiştirme eğrileri verilmiştir.



Şekil 5.8. 975°C 5 saat numune için yük–yer değiştirme eğrileri



Şekil 5.9. 975°C – 7 saat numune için yük–yer değiştirme eğrileri

Farklı sürelerde borlanmış numunelerin nanoindentasyon testlerinden elde edilen yük-yer değiştirme eğrileri incelendiğinde borlama süresinin artışı ile beraber kaplanmış numunelerin farklı bölgelerinde aynı yük altında yer değiştirme değerinin bir miktar azaldığı dolayısıyla sertlik analizi yapılan bölgenin daha sert bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca 975°C 7 saat süre ile borlanan numunenin 975°C'de 5 saat süre ile kaplanmış numunelerin kaplama bölgelerinden alınan eğrilerin birbirlerine yakın değerlere sahip olduğu görülmektedir. Bu durum kaplama tabakasının her iki parametrede gerçekleştirilen deneylerde de homojen oluşmuş olduğunu göstermektedir. Yer değiştirme eğrilerinin yüzeyden iç kısımlara doğru genişlemiş olması sertlik değerlerinin kaplama tabakasından geçiş bölgesine oradan da altlığa doğru bir düşüş seyri sergilediğini ve EDS analizlerinde belirtilen geçiş bölgesini iddiasını destekler niteliktedir.

Nanoindentasyon test sonuçları Tablo 5.2'de görülmektedir. Bu tabloda Pmax test esnasında uygulanan maksimum yükü, hmax maksimum derinliği, A oluşan iz alanı, Er indirgenmiş elastik modülü ve H sertlik değerleri göstermektedir. 975-5h ve 975-7h numunelerinde kaplama bölgesinde 24.85-24.93 GPa, geçiş bölgesinde 8.06-8.61 GPa ve altlık malzemedede 5.89-6.05 GPa aralığında sertlik değerleri elde edilmiştir. Asyon test sonuçları Tablo 5.2'de vermiştir. 5 ve 7 saat kaplama süresinde kaplama bölgesinde 25 GPa, geçiş bölgesinde 8 GPa ve altlık malzemedede 6 GPa sertlik değerleri elde edilmiştir. Bu tabloda Pmax test esnasında uygulanan maksimum yükü, hmax maksimum derinliği, A oluşan iz alanı, Er indirgenmiş elastik modülü ve H sertlik değerlerini göstermektedir.

Tablo 5.1. Nanoindentasyon test sonuçları

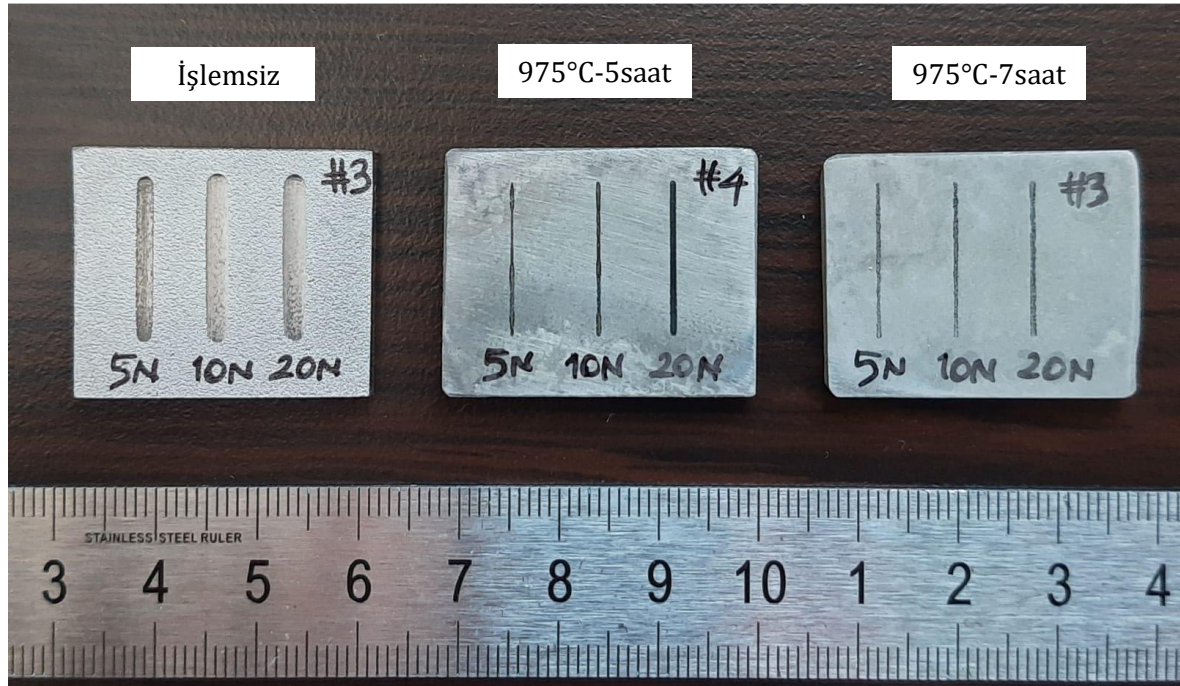
Numune	Bölge	Pmax(μ N)	A(nm^2)	hmax(nm)	Er(GPa)	H(GPa)
975°C-5saat	Kaplama	10068.16	405077.84	152.11	250.16	24.85
	Geçiş	10074.08	1249498.03	235.91	189.45	8.06
	Altık	10076.06	1664436.88	270.30	163.40	6.05
975°C-7saat	Kaplama	10067.09	403807.89	153.71	239.35	24.93
	Geçiş	10072.84	1169987.46	231.76	178.68	8.60
	Altık	10076.12	1711478.95	279.15	137.36	5.88

Tablo 5.2 incelendiğinde kaplama süresinin artması ile aynı yük altında yer değiştirme değerinin azaldığı dolayısıyla malzemenin azda olsa daha sert bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Aynı zamanda yükle- boşaltma eğrileri arasında kalan bölgenin ise daraldığı dolayısıyla alaşımdan yayılan enerjinin azaldığı görülmektedir. Numunelerin nano sertlik değerlerinin mikro-sertlik değerlerine göre bir miktar yüksek olarak ölçülmüştür. Bunun birkaç nedeni vardır. Öncelikle mikro sertlik malzemenin ortalama sertlik değerini verirken, nano sertlik ise malzemenin daha küçük bir bölgesi üzerinden alınan sertlik değerini

vermektedir (Özarslan, 2018). Magnezyum-kalay esaslı biyobozunur alaşımların üzerine gerçekleştirdiği doktora çalışmasında küçük yüklerde malzemenin nano sertlik değerinin keskin bir artış gösterdiğini ve bunun nedeninin yerel dislokasyon mekanizmaları olduğunu belirtmiştir. Dolayısıyla nano sertliği ölçülen malzemelerin sertlik değerinin mikro sertlik değerinden daha fazla çıkması olası bir durumdur (Houghton vd., 2011)

5.5. Aşınma Testi Sonuçları

Süper alaşımlar kullanıldıkları aşındırıcı ortamlardan dolayı sürekli aşınma tehdidi altındadır. Süper alaşımların temas ettiği makine elemanlarıyla teması sonucu harekete zorlanmaları durumunda iki cisim arasında sürtünme olayı meydana gelecektir. Birbirlerine göre izafi hareket eden ve/veya etkileşim halindeki yüzeyler arasında sürtünme hareketi meydana gelir. Makine elemanlarının kısmi bölgelerinde başlayan bu sürtünme hareketi sonucu daha sert olan malzeme daha yumuşak olan malzemeyi çizer, kopartır veya delaminasyona uğratar. Kopan aşınma partikülleri ya sistemden uzaklaşır ya da bazı durumlarda daha yumuşak malzemeye batma veya yapışma davranışı gösterir. Bu husus malzemenin yüzey özellikleri özelliklerini değiştirdiğinden malzemenin bir sonraki aşamada farklı bir sürtünme davranışı göstermesine neden olur. Sürtünme katsayısı çoğu zaman malzemelerin aşınma direnci hakkında bilgi sağlar. Sürtünme kuvveti zorlayıcı ve uygulanan kuvvete zıt yönde olduğundan malzemelerin aşınarak ömürlerini tamamlamalarına neden olur. Bundan dolayı genellikle yüksek sürtünme katsayısı yüksek aşınma kaybı anlamına gelmektedir. Sürtünme ve aşınma kayıplarından dolayı makine elemanlarının hizmet ömrü veya performansında azalma ve dolayısıyla ekonomik kayıplar meydana gelebilir.



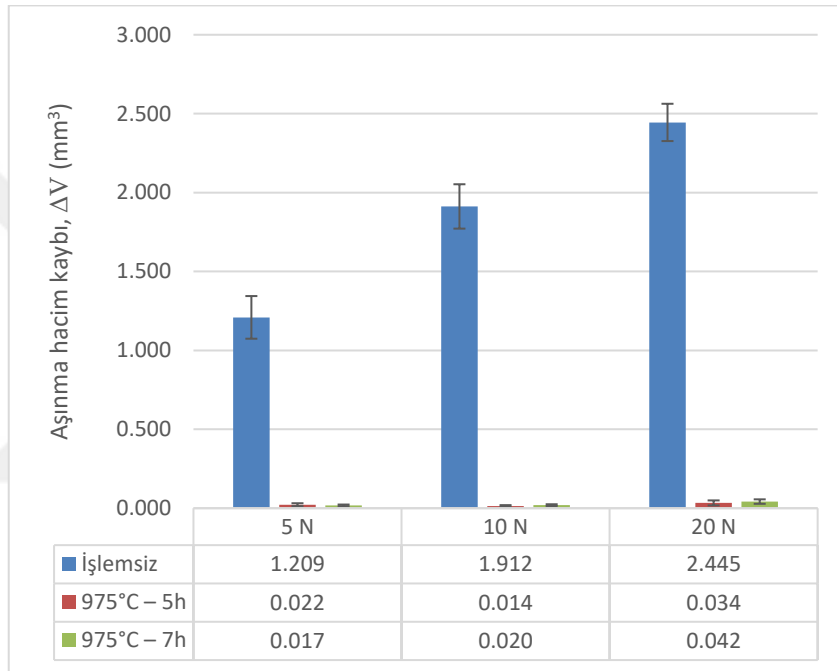
Şekil 5.10. İşlemsiz ve borlanmış Hastelloy C-276 numunelere 5, 10 ve 20 N altında yapılan aşınma deneyi sonrası numunelerin yüzey fotoğrafları

Aşınma testleri için deney grupları en az 3 kere tekrar edilmiştir. Grafiklerde ortalama ve standart sapma değerleri gösterilmiştir. Aşınma deney sonucunda aşınma izi hacim kaybı ve aşınma oranı iki farklı yöntemle bulunmuştur;

- 1- Ağırlık değişimi
- 2- 2B aşınma izi profili

5.5.1. Ağırlık değişimi

Bu yöntemde numunenin aşınma deneyi sonrası ağırlık kaybı özgül ağırlığına oranlanarak malzemeye ait hacim kaybı hesap edilmiştir (Şekil 5.11).



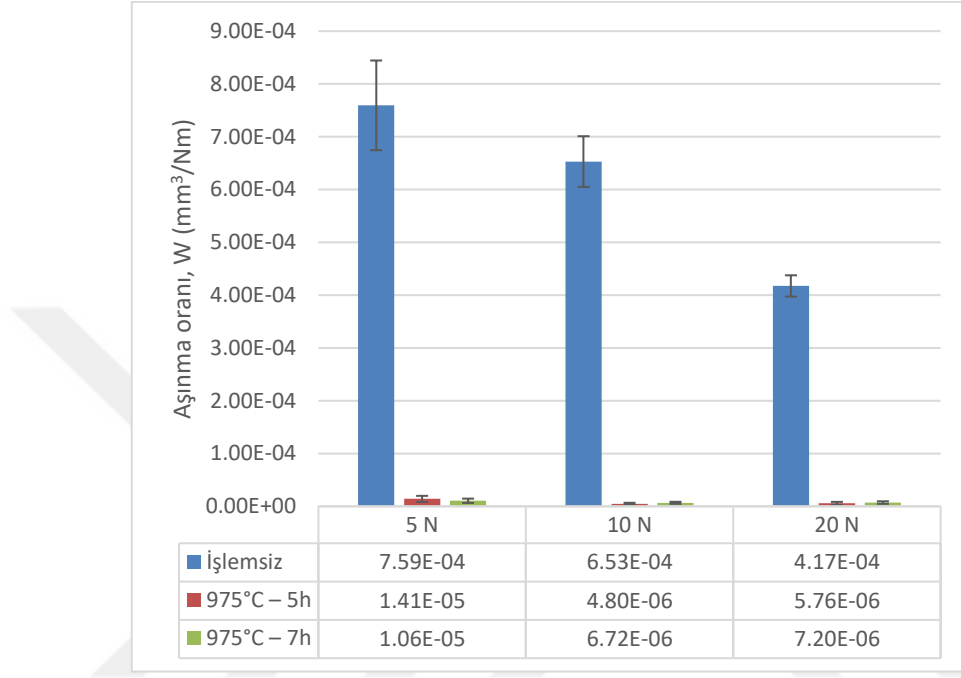
Şekil 5.11. 5, 10 ve 20 N altında yapılan aşınma deneyi sonucunda elde edilen hacim kaybı

Şekil 5.11'a göre hem işlemsiz hem de borlanan numunelerde artan yük ile hacim kayıpları genel olarak artmıştır. Hastelly C-276 alaşım yüzeyinin kaplanması aşınma direncini büyük oranda arttırmıştır. Şekil 5.11 incelendiğinde aşınma deneyleri sonucunda;

- 5N yük altında hacim kaybı, işlemsiz numunelere kıyasen 975°C'de 5 saat süre ile borlanmış numunelerde 55 kat azalırken aynı sıcaklıkta 7 saat borlanmış numunelerde 71 kat azalmıştır.
- 10N yük altında hacim kaybı, işlemsiz numunelere kıyasen 975°C'de 5 saat süre ile borlanmış numunelerde 137 kat azalırken aynı sıcaklıkta 7 saat borlanmış numunelerde 96 kat azalmıştır.

- 20N yük altında hacim kaybı, işlemsiz numunelere kıyasen 975°C'de 5 saat süre ile borlanmış numunelerde 72 kat azalırken aynı sıcaklıkta 7 saat borlanmış numunelerde 58 kat azalmıştır.

Aşınma hacim kayıplarının test esnasında uygulanan yük ile toplam alınan yol çarpımına bölünmesiyle aşınma oranları hesap edilmiştir. Sonuçlar Şekil 5.12'de verilmiştir.



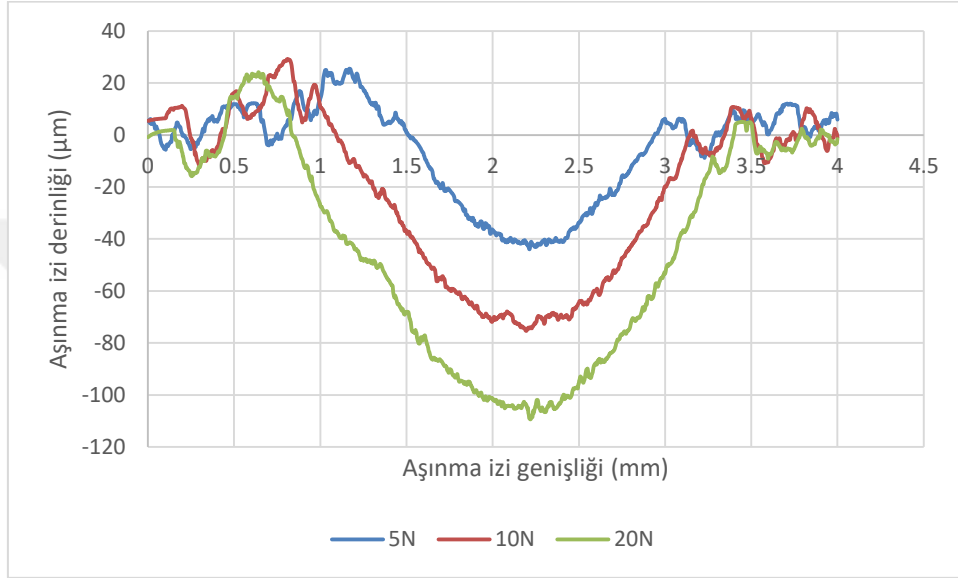
Şekil 5.12. 5, 10 ve 20 N altında yapılan aşınma deneyi sonucunda elde edilen aşınma oranları

Şekil 5.12'e göre hem işlemsiz hem de borlanmış numunelerde artan yük ile aşınma oranları genellikle azalmıştır. İşlemsiz numunelere kıyasen borlanmış numunelerde aşınma oranları çok daha düşük bulunmuştur. 975°C-5saat ile 975°C-7saat arasında kayda değer bir fark gözlemlenmemiştir. Şekil 5.12 incelendiğinde aşınma deneyleri sonucunda; mm³/Nm

- 5N yük altında aşınma oranları, işlemsiz numunelere kıyasen 975°C'de 5 saat süre ile borlanmış numunelerde 54 kat azalırken aynı sıcaklıkta 7 saat borlanmış numunelerde 72 kat azalmıştır.
- 10N yük altında aşınma oranları, işlemsiz numunelere kıyasen 975°C'de 5 saat süre ile borlanmış numunelerde 136 kat azalırken aynı sıcaklıkta 7 saat borlanmış numunelerde 97 kat azalmıştır.
- 20N yük altında aşınma oranları, işlemsiz numunelere kıyasen 975°C'de 5 saat süre ile borlanmış numunelerde 72 kat azalırken aynı sıcaklıkta 7 saat borlanmış numunelerde 58 kat azalmıştır.

5.5.2. 2B aşınma izi profili

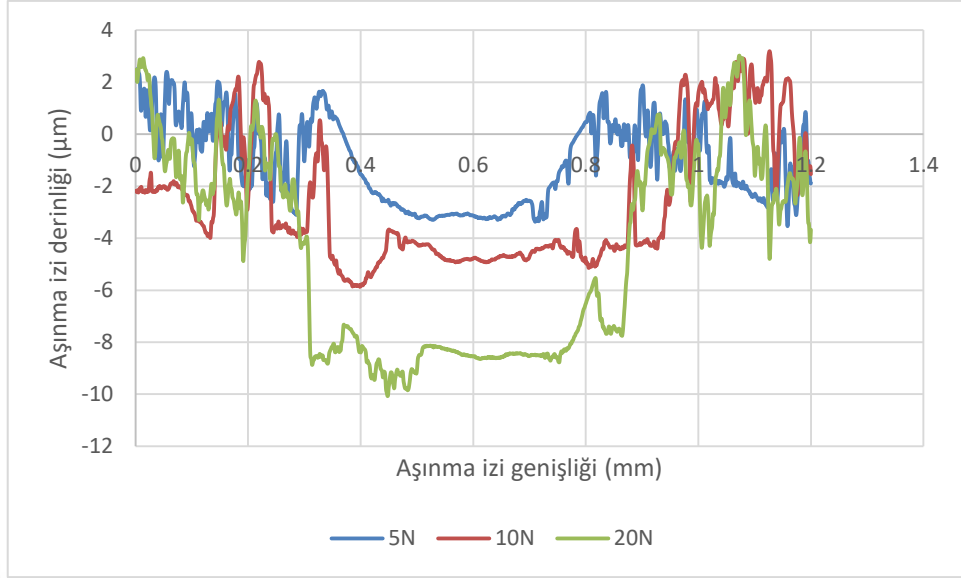
İşlemsiz ve borlanmış numunelere ait aşınma izi profilleri 2B temaslı profilometre ile ölçülmüştür. Her bir test grubu için deneylerin en az 3 kere tekrar edildiği ve her bir aşınma izine ait 3 profil ölçümü alındığı göz önünde bulundurulduğunda yaklaşık 100' e yakın profil ölçümü alınmıştır. Şekil 5.13 – Şekil 5.15 arasında farklı test gruplarına ait karakteristik profiller verilmiştir. Şekil 5.13'de ise aşınma izi genişliği ve derinliğine ait ortalama $\pm$ standart sapma değerleri rapor edilmiştir.



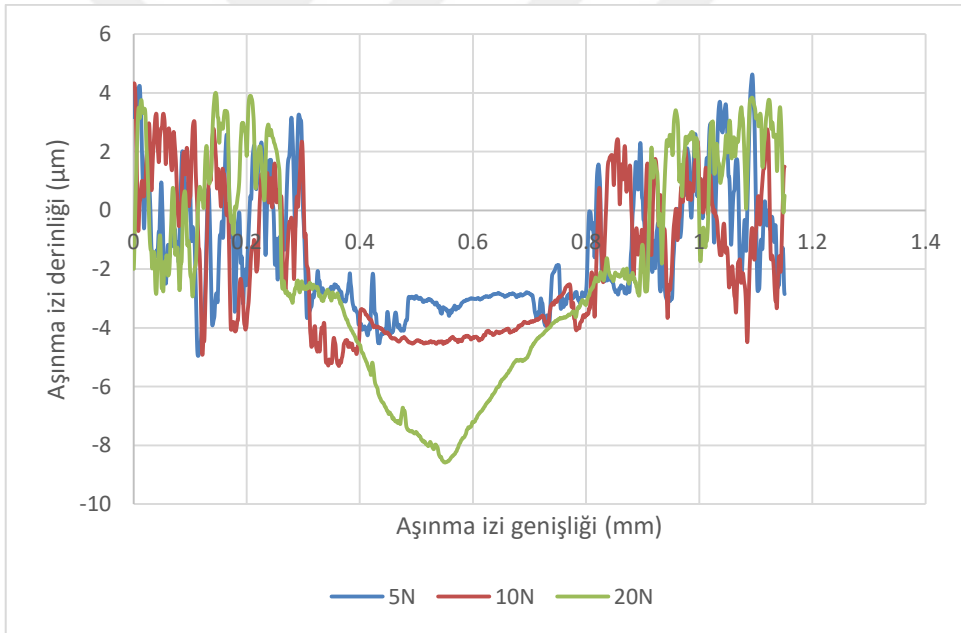
Şekil 5.13. İşlemsiz numune 5, 10 ve 20 N altında aşınma izi profilleri

İşlemsiz ve borlanmış Hastelloy C-276 numunelere ait aşınma izi genişliği ve derinliği aşınma testlerinde uygulanan kuvvet artışı ile artmıştır. Örnek olarak, işlemsiz numunelere uygulanan 5N yük altında aşınma izi genişliği ve derinliği yaklaşık olarak 1,71 mm ve 40 µm bulunmuştur. 10N altında bu değerler artarak yaklaşık olarak 2,15 mm ve 74 µm ve 20N altında ise daha da artarak yaklaşık olarak 2,6 mm ve 105 µm olmuştur.

5 saat ve 7 saat borlanmış yüzeylerde aşınma izleri 5N yükde derinlik 0,42 ve 0,45 µm yükselirken genişlik 2,7 ve 4 mm olarak görülmektedir. 10N yük altında derinlik 0,5 ve 0,37 µm, genişlik ise 5 ve 4,5 mm olarak görülmektedir. 20N yük altında derinlikler 0,6 ve 0,32 µm görülürken genişlikleri 10 ve 8,2 mm ölçülmüştür.



Şekil 5.14. 975-5saat numune 5, 10 ve 20 N altında aşınma izi profilleri



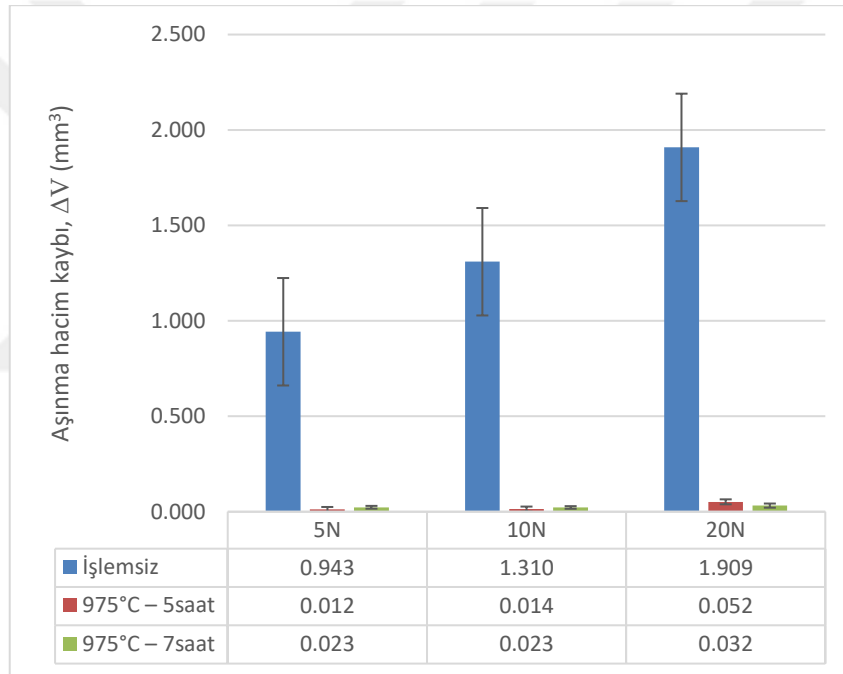
Şekil 5.15. 975-7saat numune 5, 10 ve 20 N altında aşınma izi profilleri

Borlama öncesi aşınma izleri küresel bir yapıda görünürken borlama işlemi sonrasında malzemelerin aşınma izi genişliklerinde dalgalanmalar görülmektedir. Bu durumun başlıca sebebi yüzey sertliğinin artmasından kaynaklı aşındırıcı topun yüzeyle arasında gerçekleşen adhezif aşınma ile parça kopmaları meydana gelmesidir. Sem görüntülerinde bu durumu destekler niteliktedir. Daha önce yapılan çalışmalar incelendiğinde aynı şekilde borlama ile yüzey sertlik değerlerinin artması ile gerilmeler çok küçük yük durumlarında dahi akma gerilmesi sınırına erişirler ve akarak plastik deformasyona uğrarlar. Plastik deformasyona uğrayan bu yüzeyler üzerinden cisimler, birbirine mikro kaynaklar ile bağlanırlar. Bu sırada iki

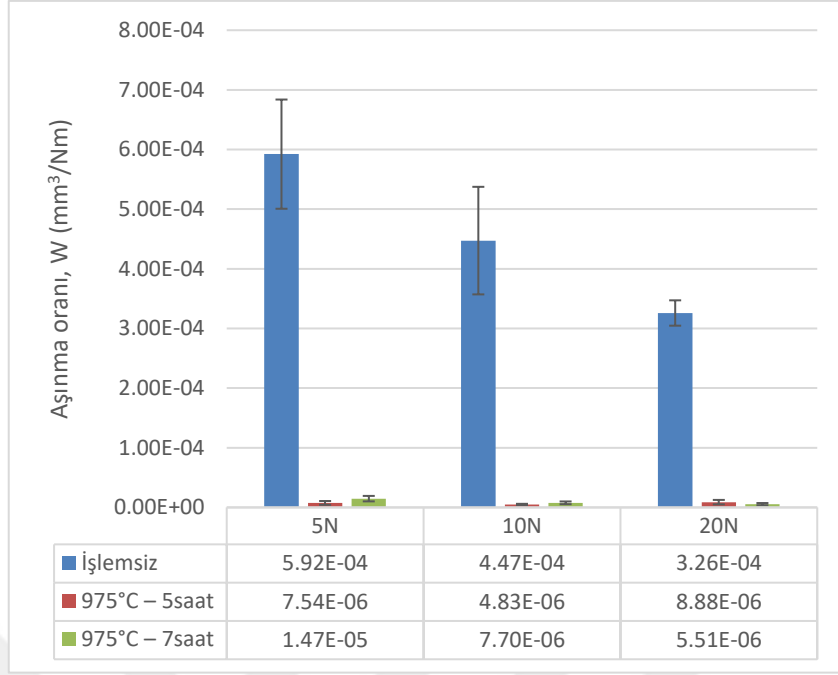
cisim arasında devam eden izafi hareket sebebiyle kaynak bağı kopar. Bu kopma sonucu kaplama işlemi uygulanmış cismin yüzeyinde boşluklar oluşur, diğer yüzeydeyse çıkıntılar meydana gelir ve iki yüzey arasına adhezif parçacıklar dökülür [79]

Aşınma izi profilleri işlemsiz numunelerde yarım elipse şeklinde bir morfoloji gözlemlenirken 5 ve 7 saat süreyle borlama uygulanan yüzeylerde daha doğrusal bir yüzey elde edilmiştir. Bu durumun başlıca sebeplerinde borür tabakasında meydana gelen faz değişikliklerinden kaynaklanmaktadır.

Alan kaybının (deney öncesi tahmini yüzeyden aşınma izi yüzeyinin çıkarılması ile elde edilmiştir) aşınma izi uzunluğu ile çarpılması sonucunda hesaplanan aşınma hacim kayıpları Şekil 5.16'te verilmiştir.



Şekil 5.16. 5, 10 ve 20 N altında 2B aşınma izi profillerinden elde edilen hacim kaybı



Şekil 5.17. 5, 10 ve 20 N altında 2B aşınma izi profillerinden elde edilen aşınma oranları

Aşınma testlerinden önce ve sonra bütün numunelerin yüzey pürüzlülükleri ölçülmüştür. İşlemsiz ve borlanmış Hastelloy C-276 numunelerin farklı yükler altında aşınma izlerinden alınan ortalama yüzey pürüzlülük (Ra) ve 10 nokta ortalama yüzey pürüzlülük (Rz) değerleri Tablo 5.3’de verilmiştir.

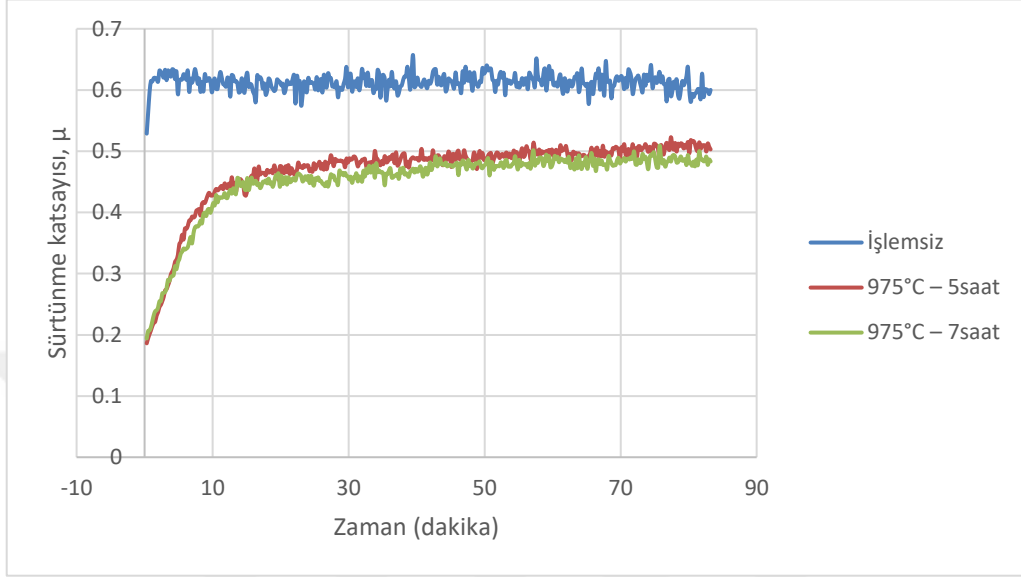
Tablo 5.3. Deney sonrasında aşınma izi ortalama yüzey pürüzlülük değerleri

Malzeme	Yük (N)	Ra (μm)	Rz (μm)
İşlemsiz	5	0.434±0.034	2.293±0.304
975°C-5saat		0.372±0.199	2.280±0.992
975°C-7saat		0.435±0.086	2.694±0.458
İşlemsiz	10	0.484±0.055	2.648±0.248
975°C-5saat		0.319±0.155	1.922±0.757
975°C-7saat		0.422±0.048	2.397±0.141
İşlemsiz	20	0.515±0.085	2.929±0.596
975°C-5saat		0.206±0.123	1.311±0.772
975°C-7saat		0.260±0.044	1.610±0.302

Tablo 5.3’e göre işlemsiz numunelerin aşınma izlerinden alınan yüzey pürüzlülük değerleri genel olarak borlanmış numunelerin aşınma izlerinden alınan yüzey pürüzlülük değerlerinden yüksek çıkmıştır. Ayrıca, işlemsiz numunelerde artan yük ile yüzey pürüzlülük değerlerinde artış meydana gelmesine rağmen (Ra=0,434-0,515 μm) borlanmış numunelerde artan yük ile yüzey pürüzlülük değerlerinde azalma meydana gelmiştir (975°C-5saat için Ra=0,206-0,372 μm; 975°C-7saat için Ra=0,260-0,435 μm).

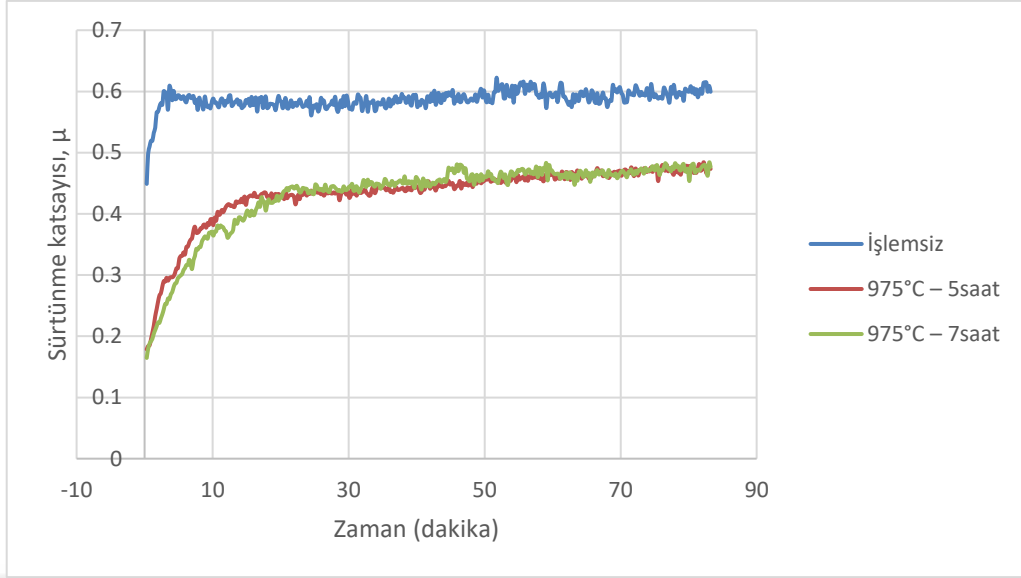
5.6. Sürtünme Sonuçları

Borlama işleminin sürtünme katsayısına etkisi hakkında bilgi edinmek için aşınma deneyleri sırasında sürtünme katsayıları da ölçülmüştür ve sonuç grafikleri Şekil 5.17- Şekil 5.20 arasında verilmiştir.



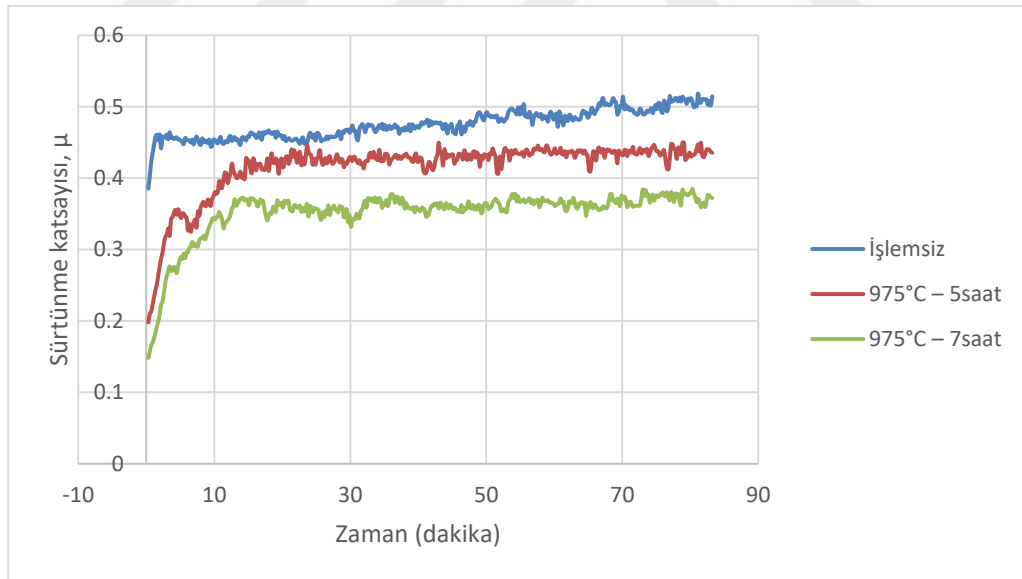
Şekil 5.18. 5 N altında sürtünme katsayısı – zaman grafiği

Şekil 5.18'de sürtünme katsayısı grafiklerinde görüldüğü üzere, işlemsiz Hastelloy alaşımının 5N yük altındaki sürtünme katsayısı 0,52'den 0,6'nın üzerine 1 dakikadan daha kısa bir sürede çıkarken borlanmış numunelerde 0,2 seviyesinden başlamış ve 30 dak sonunda stabil bir seyre ulaşarak 0,5 seviyesinde devam etmiştir.



Şekil 5.19. 10 N altında sürtünme katsayısı – zaman grafiği

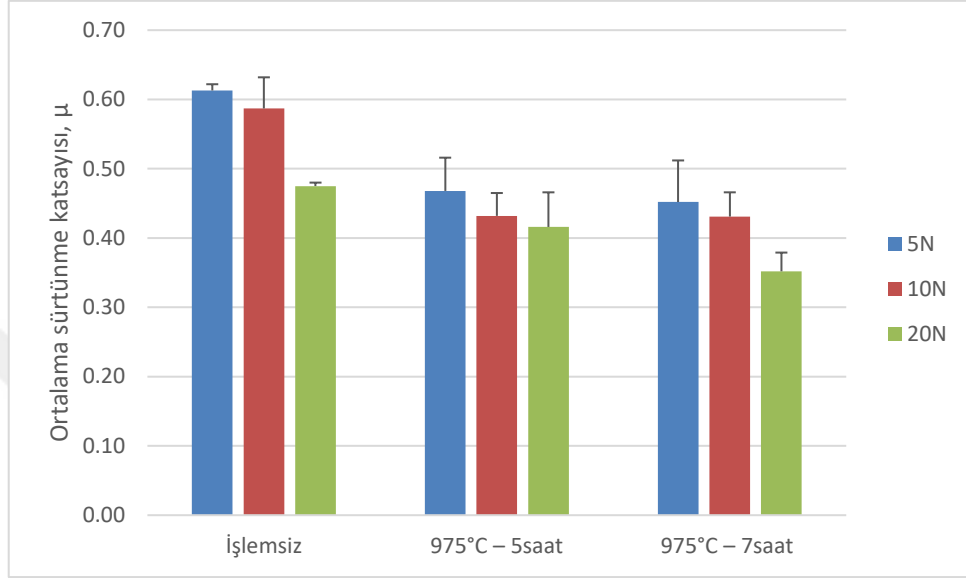
Şekil 5.19’de ise 10N olarak uygulanan yük altında Hastelloy C-276 alaşımın sürtünme katsayısının çok az bir düşüş ile 0,58 civarında seyrettiği görülmektedir. Borlanmış numunelerde 0,2’nin altından başlayarak 10 dakikada 0,4 seviyesine çıkmış ve deney süresinin sonuna kadar 0,4-0,48 aralığında azda olsa artan bir seyir izlemiştir.



Şekil 5.20. 20 N altında sürtünme katsayısı – zaman grafiği

Aşınma işlemi sırasında uygulanan yükün 20N’a çıkarıldığında 5 ve 10N ‘da stabil olan işlemsiz Hastelloy alaşımının 0,4-0,52 aralığında artan bir seyir izlediği görülmektedir. Buna karşın borlanmış numunelerin ise kararlı sürtünme katsayısı rejimine 10 dakikada ulaştıkları ve bunun devamında da 975°C’de 5 saat süre ile borlanan numune 0,44 civarında bir seyir izlerken 975°C’de 7 saat süre ile borlanan numune ise 0,37 civarında bir seyir izlemiştir.

Uygulanan farklı yüklere göre sürtünme katsayıları değerlendirildiğinde artan yüke bağlı olarak hem işlemsiz Hastelloy hem de borlanmış Hastelloy alaşımlarının daha düşük sürtünme katsayısı seyri izledikleri tespit edilmiştir. Bu durum artan yük ile beraber malzeme yüzeyinden daha kolay malzeme koparılabileceği için sürtünme katsayısı azalmıştır. Borlanmış numunelerde de benzer bir durum söz konusudur.



Şekil 5.21. Ortalama sürtünme katsayısı

Uygulanan testler sırasında kayıt edilen sürtünme katsayısı değişimleri incelendiğinde;

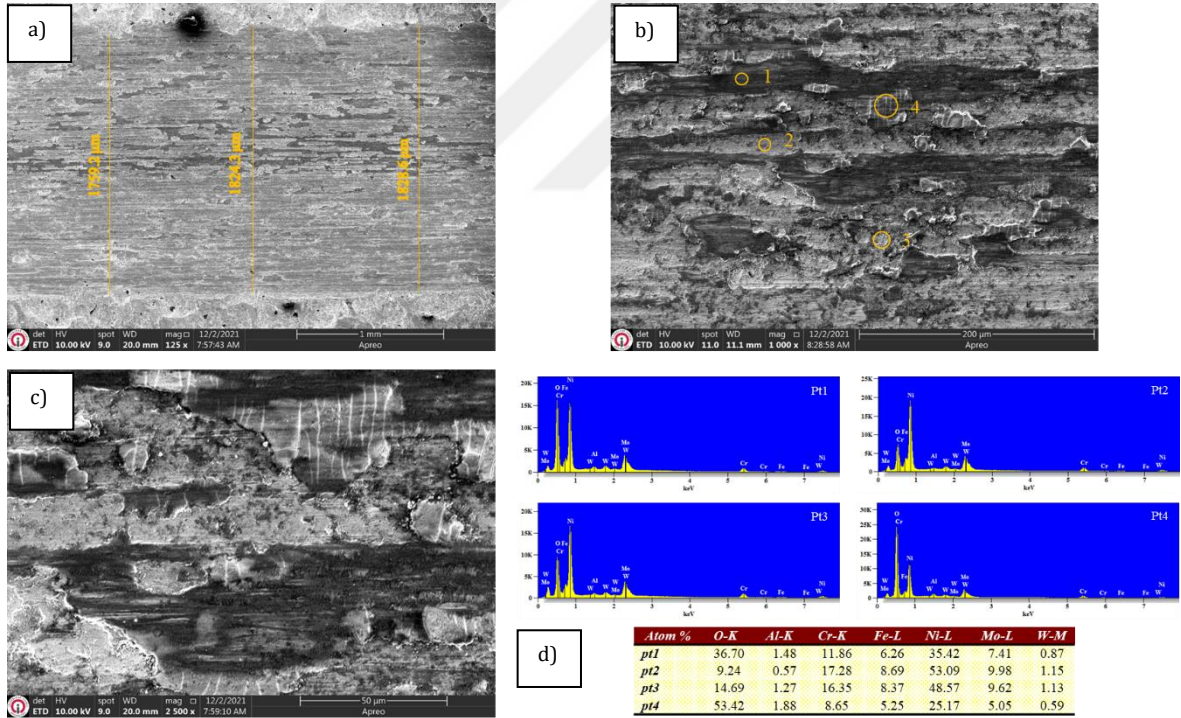
- 5N yük altında sürtünme katsayıları, işlemsiz numunelere kıyasen 975°C’de 5 saat süre ile borlanan numunelerde %30 oranında azalırken 7 saat süre ile borlanan numunelerde %32 oranında azalmıştır.
- 10N yük altında sürtünme katsayıları, işlemsiz numunelere kıyasen 975°C’de 5 saat süre ile borlanan numunelerde %28 oranında azalırken 7 saat süre ile borlanan numunelerde %30 oranında azalmıştır.
- 20N yük altında sürtünme katsayıları, işlemsiz numunelere kıyasen 975°C’de 5 saat süre ile borlanan numunelerde %13 oranında azalırken 7 saat süre ile borlanan numunelerde %26 oranında azalmıştır.

5.7. SEM EDS Analizleri

Farklı yükler altında işlemsiz ve borlanmış malzemelere yapılan aşınma deneyleri sonrasında numunelerin yüzeylerinde oluşan aşınma izleri SEM ve EDS analizleri ile incelenerek aşınma mekanizmaları hakkında bilgi elde edilmiştir. Sonuçlar Şekil 5.22 ile 5.30 arasında verilerek yorumlanmıştır.

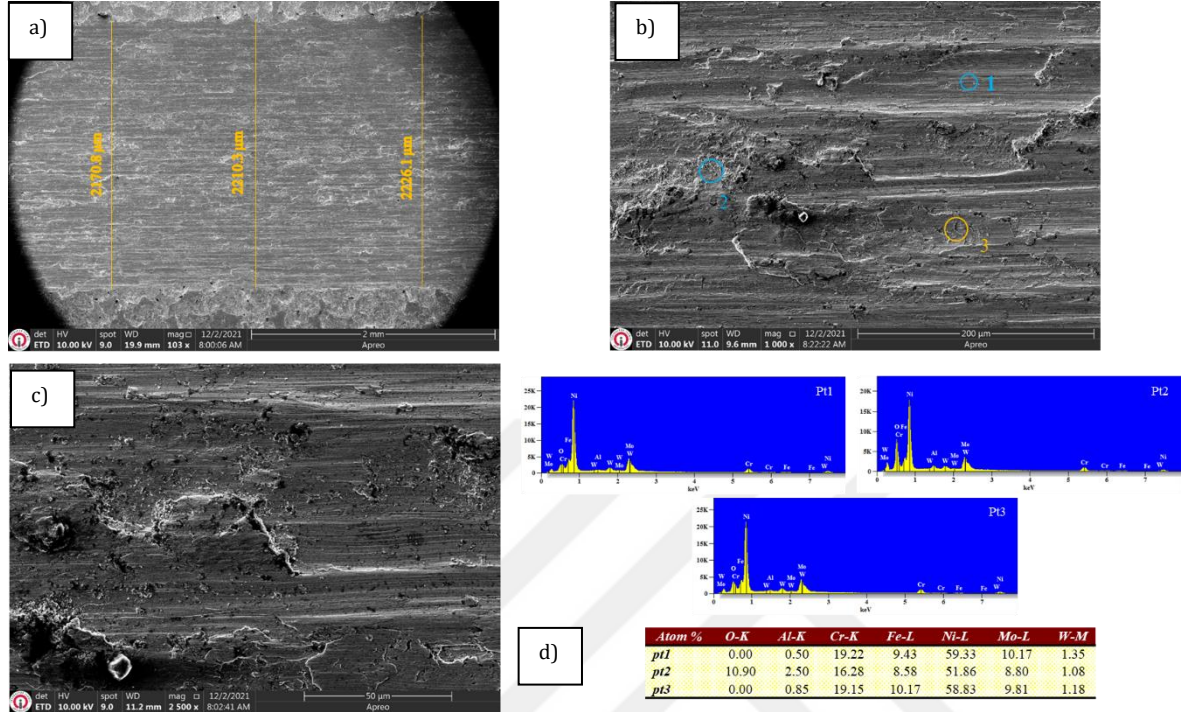
Şekil 5.22'te 5 N yük altında test edilen işlemsiz numunenin aşınma izine ait SEM görüntüleri ve EDS analizleri verilmiştir. Bu numuneye ait aşınma izi genişliği 1759,2-1828,6 μm olarak bulunmuştur.

EDS analizlerine göre Hastelloy C-276 kimyasal içeriğinde bulunan Ni, Cr, Mo, Fe ve W elementlerine aşınma izinde de rastlanmıştır. Bu elementlere ek olarak aşındırıcı top olarak kullanılan alümina kimyasal bileşiminde bulunan Al ve O elementleri de aşınma izinde bulunmuştur. SEM görüntüsünde koyu renkli bölgelerde O elementi oranı açık renkli bölgelere kıyasen daha yüksek çıkması aşındırıcı topun bu bölgelere daha fazla hasar vererek çatlamların meydana geldiğini göstermektedir. Plastik olarak deformasyona uğrayan bölgelerde bu elementin oranı daha düşüktür.



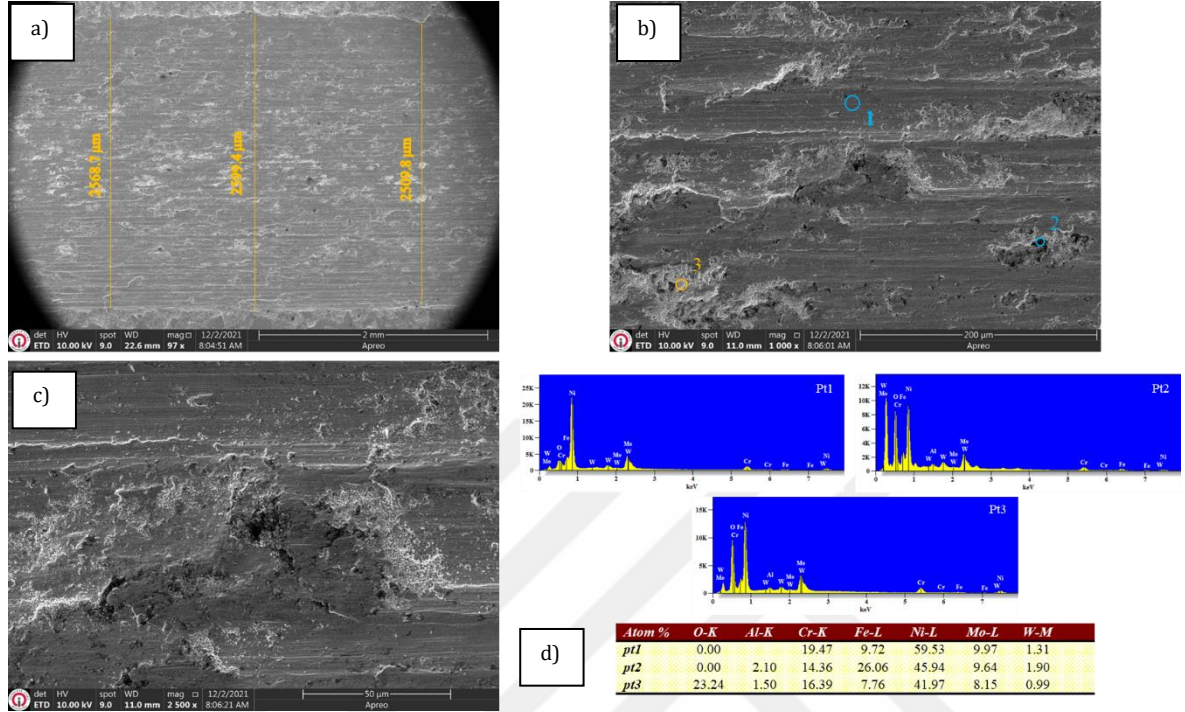
Şekil 5.22. 5 N yük altında işlemsiz numunenin aşınma izi SEM görüntüsü a) 125X b) 1000X c) 2500X ve d) EDS analizi

Şekil 5.23'te 10 N yük altında test edilen işlemsiz numunenin aşınma izine ait SEM görüntüleri ve EDS analizleri verilmiştir. Bu numuneye ait aşınma izi genişliği (2170,8-2226,1 μm) 5 N altında yapılan teste kıyasen daha yüksek bulunmuştur.



Şekil 5.23. 10 N yük altında işlemsiz numunenin aşınma izi SEM görüntüsü ve EDS analizi
a) 125X b) 1000X c) 2500X ve d) EDS analizi

Şekil 5.24'da 20 N yük altında test edilen işlemsiz numunenin aşınma izine ait SEM görüntüleri ve EDS analizleri verilmiştir. Bu numuneye ait aşınma izi genişliği ise (2509,8-2299,4 µm) 10 N altında yapılan teste kıyasen daha yüksek bulunmuştur.

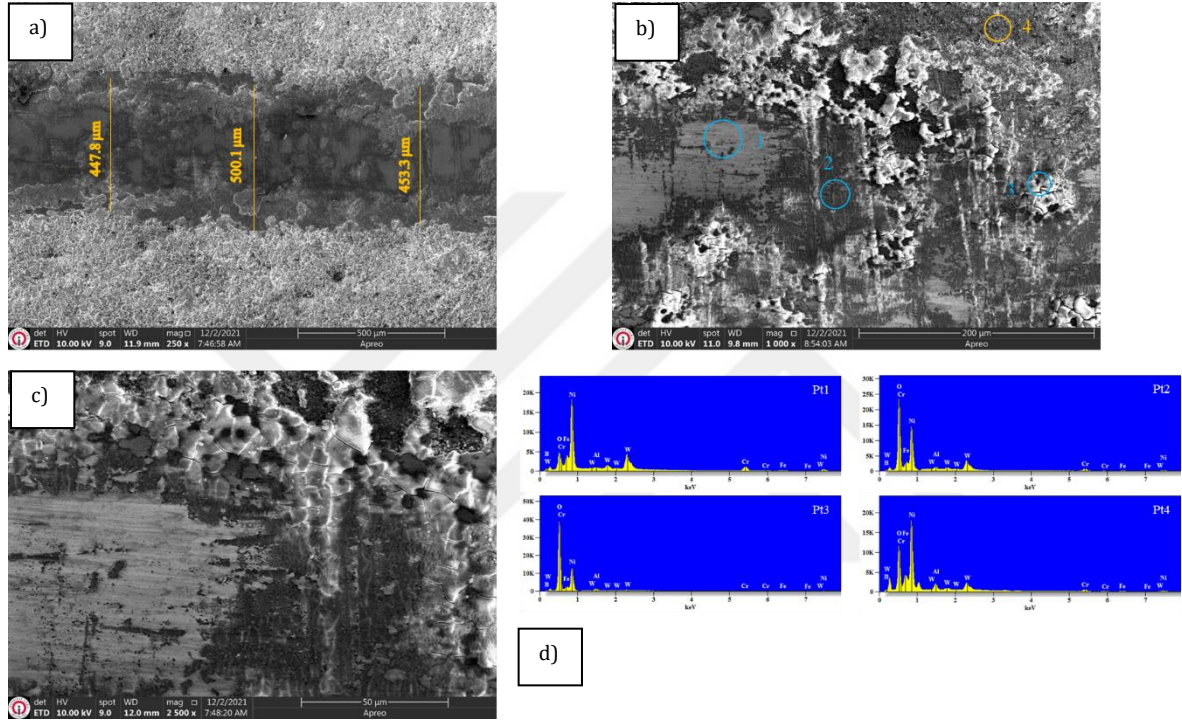


Şekil 5.24. 20 N yük altında işlemsiz numunenin aşınma izi SEM görüntüsü ve EDS analizi

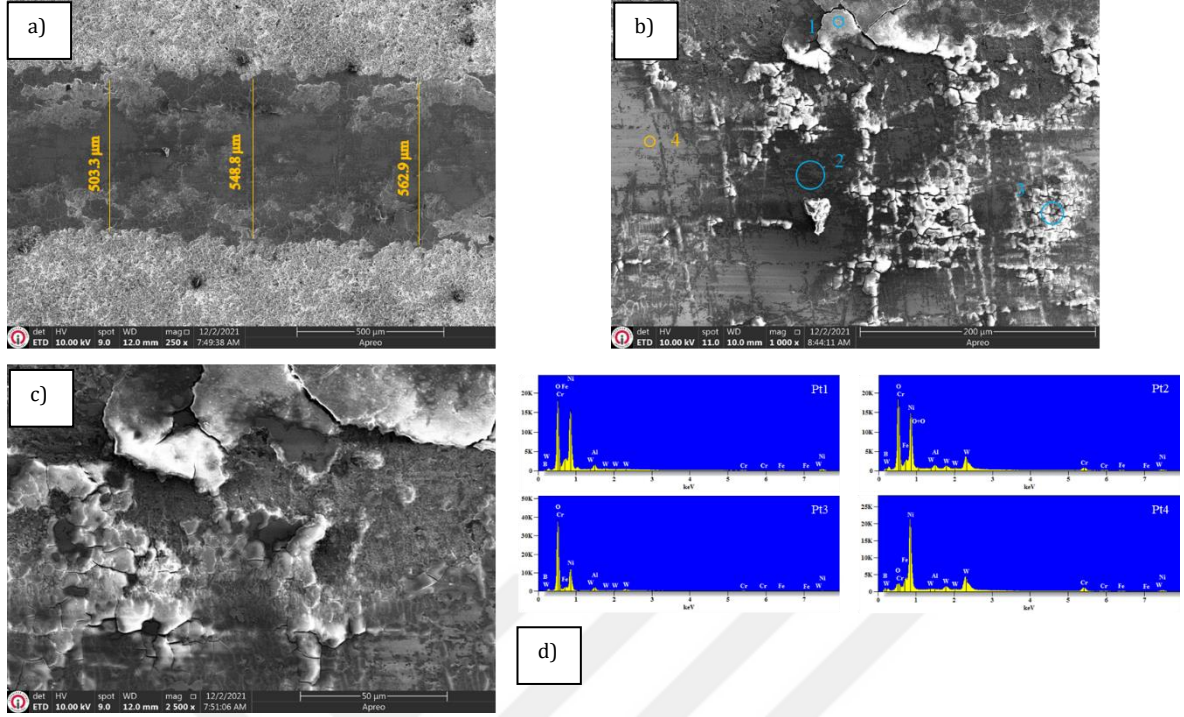
a) 125X b) 1000X c) 2500X ve d) EDS analizi

İşlemsiz numunenin aşınma izi genişliği borlanmış numunelere kıyasen daha büyük olduğu görülmüştür. Numune hacim kayıplarında da daha yüksek oran işlemsiz numunelerde elde edilmesi SEM ve hacim kaybı sonuçları arasındaki paralelliği ortaya koymuştur.

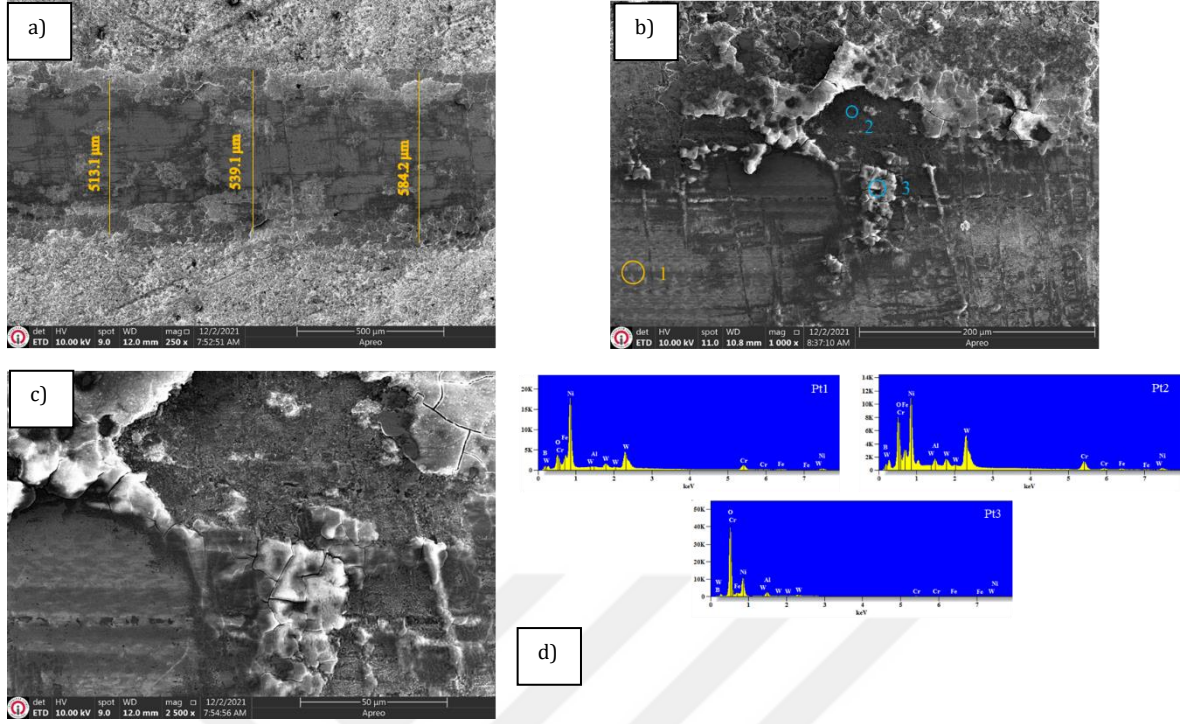
İşlemsiz numunelere kıyasen borlanmış numunelerin aşınma izlerinde daha yüksek oranda Al ve O elementleri varlığı dikkati çekmektedir. Bu durum aşındırıcı toptan (Al_2O_3) aşınmaya karşı direnci yüksek olan borlanmış yüzeylere daha fazla element transferinin oluşumunu ortaya koymuştur.



Şekil 5.25. 5 N yük altında 975°C-5saat numunenin aşınma izi SEM görüntüsü ve EDS analizi
a) 125X b) 1000X c)2500X ve d) EDS analizi

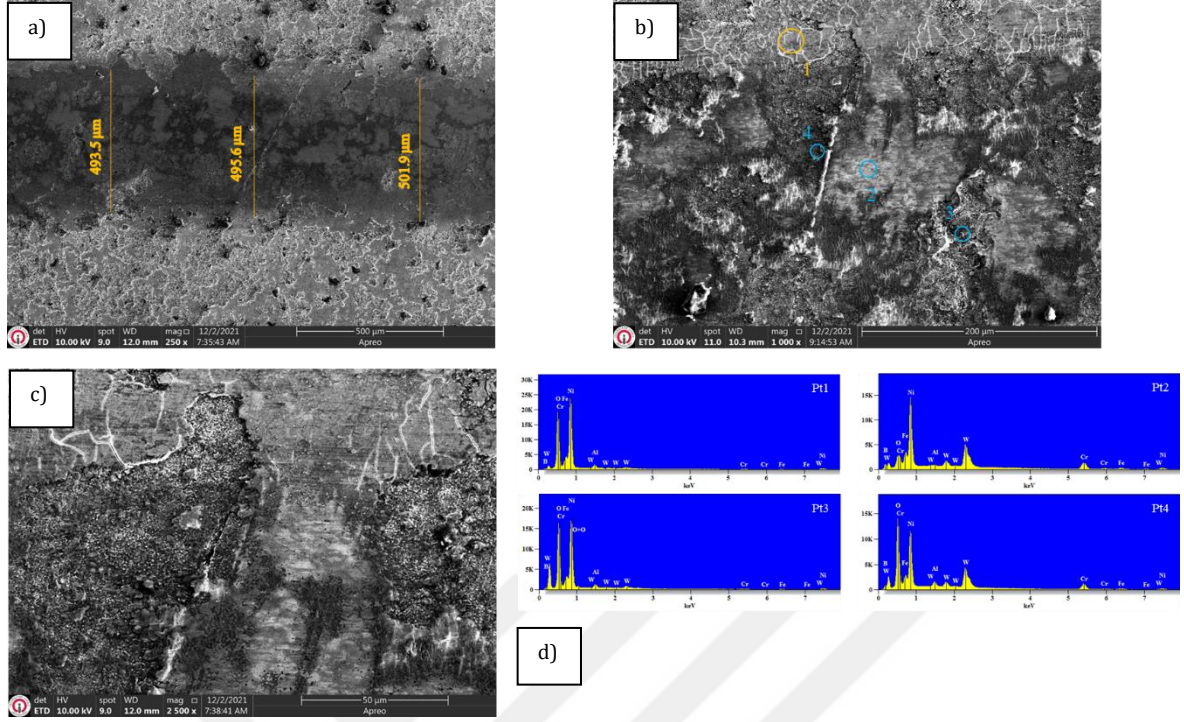


Şekil 5.26. 10 N yük altında 975°C-5saat numunenin aşınma izi SEM görüntüsü ve EDS analizi a) 125X b) 1000X c)2500X ve d) EDS analizi

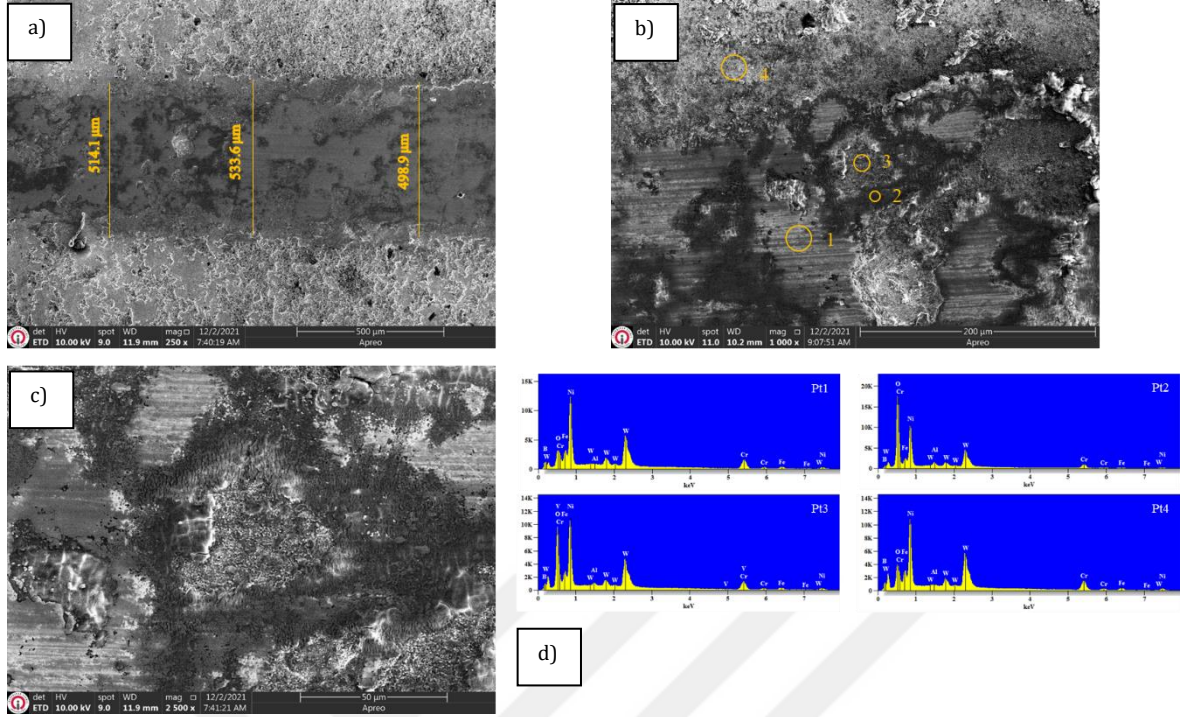


Şekil 5.27. 20 N yük altında 975°C-5saat numunenin aşınma izi SEM görüntüsü ve EDS analizi a) 125X b) 1000X c)2500X ve d) EDS analizi

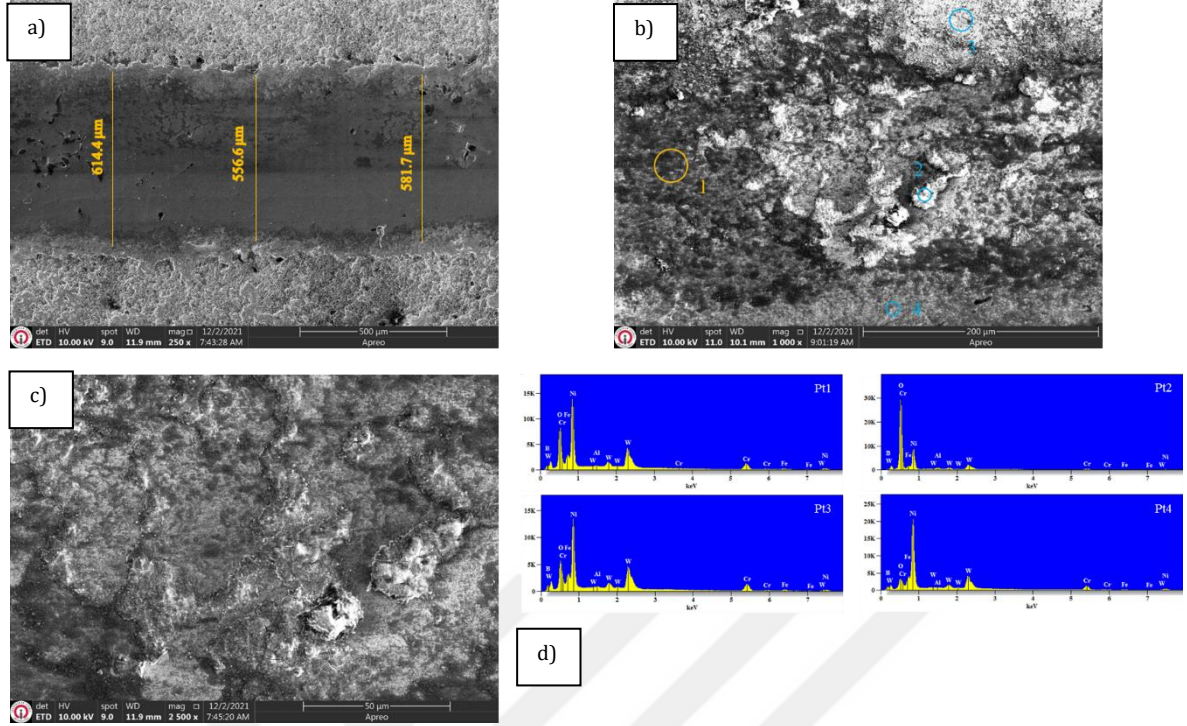
Şekil 5.25, şekil 5.26 ve şekil 5.27 incelendiğinde 975 °C 5 saat borlanan numunelerin 5,10 ve 20N yük altında eds ve sem görüntüleri incelendiğinde malzemelerin işlemsiz ürünlere oranla aşınma genişliklerinde meydana gelen aşınma genişliğinde 5 kat azalışı görülmektedir. Ancak şekilde 5 saat borlamanın yüklere göre bakıldığında 5N luk yük 10N çıktığında genişlik %10 artış görülürken 20N yük altında ki artışı %24 oranında görülmektedir.



Şekil 5.28. 5 N yük altında 975°C-7saat numunenin aşınma izi SEM görüntüsü ve EDS analizi
a) 125X b) 1000X c) 2500X ve d) EDS analizi



Şekil 5.29. 10 N yük altında 975°C-7saat numunenin aşınma izi SEM görüntüsü ve EDS analizi a) 125X b) 1000X c)2500X ve d) EDS analizi



Şekil 5.30. 20 N yük altında 975°C-7saat numunenin aşınma izi SEM görüntüsü ve EDS analizi a) 125X b) 1000X c) 2500X ve d) EDS analizi

Şekil 5.28, Şekil 5.29 ve şekil 5.30 incelendiğinde 975 °C 7saaat borlanan numunelerin 5,10 ve 20N yük altında EDS ve SEM görüntüleri incelendiğinde malzemelerin 5 saat borlanmış numunelere göre aşınma genişliklerinde meydana gelen aşınma genişliği ortalamada yüzde 20 artışı görülmektedir. Bu durum malzemenin daha az aşındığını göstermektedir. Aynı şekilde 5 saat borlama ile 5N luk yük 10N yüklerde genişlik %10 artış görülürken 20N yük altında ki artışı %24 oranında görülmektedir.

İşlemsiz yüzeylere göre 5 saat kaplama uygulanan malzemelerin yüzeylerinde Mo ve Fe piklerinde ciddi azalışlar görülmektedir. Aşınma izi profilleri işlemsiz numunelerde yarım elipse şeklinde bir morfoloji gözlemlenirken 5 ve 7 saat süreyle borlama uygulanan yüzeylerde daha doğrusal bir yüzey elde edilmiştir. Bu durumun başlıca sebeplerinde borür tabakasında meydana gelen sert fazlardan dolayı aşındırıcı topun altlık ile ilk temas noktalarının bir miktar aşınmış olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında Ni esaslı C-276 süper alaşım malzemenin aşınma dirençlerinin iyileştirilmesi amacıyla borlama işlemi uygulanmıştır. Borlanmış C-276 süper alaşımının yüzeyinde oluşturulan borür tabakalarının karakterizasyonu SEM, EDS, XRD analizleri, mikrosertlik ve nanoindentasyon, optik profilometre ve aşınma testleri ile gerçekleştirilmiştir.

Bu ölçümler sonucunda elde edilen sonuçlar:

- 1- Uygulan 975 °C'de 5 saat ve 7 saat süre işlemleri sonucunda yüzeyde 87-133 μm kalınlığında 2016-2210 $\text{HV}_{0.05}$ sertliğinde yüzey boyunca hatta köşelerde dahi sürekliliği bulunan çatlak, porozoite vb. oluşumları içermeyen ve silisid içeriksiz borür tabakaları elde edilmiştir.
- 2- Ekabor yerine Si içeriksiz bor toz karışımının kullanılması sayesinde literatürde Ekabor tozu ile gerçekleştirilen borlanmış süper alaşımlar üzerindeki çalışmalara göre daha yüksek kaplama tabakası kalınlık ve mikrosertlik değerleri elde edilmiştir.
- 3- Borlama süresinin artışına bağlı olarak kaplama kalınlıklarında ciddi bir artış tespit edilmiş iken sertlik değerlerindeki artışın ise daha sınırlı olduğu tespit edilmiştir. Artan borlama sürenin artışı I. Fick kanunu ile ilgilidir. Mikro sertlik değerlerinde ki artış ise yapıda düşük oranda oluşmuş olan CrB , MoB_2 ve Fe_2B fazlarının borlama süresinin artışı ile yapıda daha yüksek oranlarda oluşmuş olmasına atfedilebilir.
- 4- X-ışınları analizleri borlama işlemi sonucunda her iki borlama süresinde de baskın fazın Ni_2B olduğu bunun yanında CrB , MoB_2 ve Fe_2B fazlarının da düşük oranlarda yapıda bulunduklarını tespit edilmiştir. Ni_2B fazının sertlik değeri olan 1500 HV üzerinde sertlik değerlerinin hem mikro sertlik hem de nanoindentasyon ile belirlenmiş olması yapıda düşük oranda oluşmuş olan CrB , MoB_2 ve Fe_2B fazlarının da oluşmuş olmasının bir sonucudur.
- 5- 4- Borlama işlemi öncesi 0.54 μm Ra ve 3,19 μm Rz yüzey pürüzlülük değerlerine sahip olan numuneler 975 °C'de 5 saat süre ile borlama işlemi sonrası 0.54 μm Ra ve 3.19 μm Rz şeklinde ölçülmüştür Öte yandan 975 °C'de 7 saat süre ile borlama işlemi sonucunda ise Ra 0.95 μm ve Rz 5.04 μm değerlerinde şeklinde tespit edilmiş olup borlama süresine bağlı olarak yüzey pürüzlülük değerlerinde azalma olabileceği gibi artış olabileceği belirlenmiştir. Burada önemli olan parametrenin borlama öncesi yüzey pürüzlülük değerlerinin olduğu düşünülmektedir.
- 6- Uygulanan farklı yüklerde sürtünme katsayı değerlerinin artan yüke bağlı olarak hem borlanmış hem de işlemsiz malzemelerde daha düşük sürtünme katsayısı tespit edilmiştir. Borlama işlemi sürtünme katsayısı değerlerinde düşüş sağlamıştır
- 7- Borlama işlemi tüm aşınma testlerinde borlanmamış numunelere göre daha iyi aşınma direnci sağlamıştır. Borlama işlemi ile 5N yükte 65 Kat 10N yükte 95Kat ve 20 N yükte

60 kat olduğu tespit edilmiştir. 20N 'daki aşınma dirençlerindeki iyileşmenin diğerk yüklerle daha düşük olması seramik esaslı borür kaplamaların yüksek yüklerde kırılğanyapıları dolayısıyla daha fazla tahribata uğramalarından kaynaklandığı düşünölmektedir.

- 8- İşlemsiz numunenin aşınma mekanizması abrasiv aşınma ve plastik deformasyon şeklinde meydana gelmiş iken borlanmış numunelerdeki aşınma mekanizmasının ise oksidatif destekli delaminasyon mekanizması şeklinde olmuştur.
- 9- İşlemsiz numunelerin yüzeyinde aşındırıcı topta malzeme transferi meydana gelmemiş iken borlanmış numunelerin yüzeyinde ise Al tespit edilmiş olması yüksek sertlikteki borür tabakalarının aşındırıcı topu bir miktar hasara uğratmalarının bir sonucudur.
- 10- Uygulanan borlama işlemi düşük yüzey sertlikleri sebebiyle aşınma dirençleri tatmin edici olmayan Hastelloy C-276 alaşımının aşınma dirençlerinin borlama yöntemiyle iyileştirilebileceğı dolayısıyla bu alaşımdan imal edilen alaşımların kullanım ömürlerinin artırılabilceğı sonucuna varılmıştır.

Tez kapsamında görölen öneriler ise:

- 1) Borlanmış C-276 süper alaşım malzemelerin sabit yüklerde farklı aşınma mesafelerindeki ve farklı hızlardaki sonuçları incelenebilir.
- 2) Borlanmış C-276 süper alaşımın farklı aşındırıcı ortamlar altındaki davranışları incelenebilir.
- 3) C-276 süper alaşımının farklı borlama yöntemlerindeki aşınma davranışları incelenebilir.
- 4) Borlanmış süper alaşımların yüksek sıcaklıklarda aşınması incelenebilir.
- 5) Difüzyon tabakası, aktivasyon enerjisi ve borlama kinetiğı bölümlerine ağırlık verilerek çalışma geliştirilebilir.

KAYNAKÇA

- A. Houghton, R. Lewis, U. Olofsson, J. Sundh, Characterising and reducing seizure wear of inconel and incoloy superalloys in a sliding contact, *Wear*, Volume 271, Issues 9–10, 2011, Pages 1671-1680.
- Aggen G, 1990, The Materials Information Society, Metals Handbook, Wrought and P/M Superalloys, Volume 1, ASM International, ABD.
- Ali Günen, Kadir Mert Döleker, Mehmet Erdi Korkmaz, Mustafa Sabri Gök, Azmi Erdogan, Characteristics, high temperature wear and oxidation behavior of boride layer grown on nimonic 80A Ni-based superalloy, *Surface and Coatings Technology*, Volume 409, 2021, 126906.
- Ali Günen, Mourad Keddami, Sabri Alkan, Azmi Erdoğan, Melik Çetin, Microstructural characterization, boriding kinetics and tribo-wear behavior of borided Fe-based A286 superalloy, *Materials Characterization*, Volume 186, 2022, 111778.
- Anonim, 2009 Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 25 (1-2) 302 - 330 Erişim Tarihi: 20.05.2015.
- Badini C., Gianoglio C., Paradelli G. (1987). The effect of carbon, chromium and nickel on the hardness of borided layers. *Surface and Coatings Technology*, 30(2), 157-170.
- Badini, C., & Mazza, D. (1988). The texture of borided layers grown on Fe-Ni and Fe-Cr alloy. *Journal of materials science letters*, 7(6), 661-662.
- Bahadır, B. (2010). Süper Alaşımların Açık ve Kontrollü Atmosferde Dökümü. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 65 s.
- Bayça, S.U. ve Şahin, S (2004) Borlama. *Mühendis ve Makine*, 532:51-59.
- Bradley, E.F, (1988). " Microstructure" in Superalloys, A technical guide, ASM International.
- C.R. (2006). Historical Development of Superalloys. *The Superalloys Fundamentals and Applications*, Cambridge University Press., s. 363.
- Campos, I. (2005). Effect Of Boron Paste Thickness On The Growth Kinetics Of Fe₂B Boride Layers During The Boriding Proces. *Applied Surface Science*, 243: 429-436.
- Campos-Silva, I., Contla-Pacheco, A. D., Ruiz-Rios, A., Martínez-Trinidad, J., RodríguezCastro, G., Meneses-Amador, A., & Wong-Angel, W. D. (2018). Effects of scratch tests on the adhesive and cohesive properties of borided Inconel 718 superalloy. *Surface and Coatings Technology*, 349, 917-927.
- Choudhurt M. A, El-Baradie I. A, 1998, Machining nickel base superalloys: Inconel 718, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, c. 212, sayı 3, 195–206.
- Culha, O., Toparli, M., Sahin, S., & Aksoy, T. (2008). Characterization and determination of Fe₂B layers' mechanical properties. *Journal of materials processing technology*, 206(1-3), 231-240.

Çakır,(2016) çift katmanlı kaplanan inconel 625 alaşımının aşınma direncinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İskendurun Teknik Üniversitesi yüksek lisans tezi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı.

Çalı,(2021) inconel 718 süper alaşımının farklı yöntemlerle borlanması, Yüksek Lisans Tezi, Afyon kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı.

Çalık A.,2002. Türkiye'nin Bor Madenleri ve Özellikleri. Mühendis ve Makine Dergisi, Sayı 508, Ankara.

Çalık, A., & Özsoy, A. (2002). Termal Çevirimli Borlama İşleminin Ç1010 Çeliğine Etkileri. 11. Uluslararası Malzeme Sempozyumu, İstanbul.

Çelebi, G., İpek, M., Yılmaz, S., Bindal, C., 2004, AISI 8620 Çeliği Üzerinde Oluşan Borürlerin Bazı Mekanik Özellikleri, 10. Denizli Malzeme Sempozyumu ve Sergisi, s. 2529.

Çulha A., Inconel 718 Alaşımında Bilyalı Dövmenin Malzeme Özellikleri ve Erozif Aşınma Davranışına Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

D, Özel T, 2011, Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 51, 250-280.

Demir, M., Kanca, E., & Karahan, İ. H. (2020). Characterization of electrodeposited Ni–Cr/hBN composite coatings. Journal of Alloys and Compounds.

Deng, D. W., Wang, C. G., Liu, Q. Q., & Niu, T. T. (2015). Effect of standard heat treatment on microstructure and properties of borided Inconel 718. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 25(2), 437-443.

Dinç, H. (2013). Inconel 718 süperalaşımının termokimyasal borlanması (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).

Dokumacı E., Investigation of High and Low Temperature Corrosion Behaviour of Nickel-Base Alloys, Dokuz Eylül University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, İzmir, 2006, 202380.

Donachie M. J, 1984, Superalloys a technical guide, ASM International, ABD, 110–221.

Donacihe, M., Donacihe, S., (2002). Superalloys A Technical Guide, 1-18 Second edition, ASM International.

DuPont J.N., Lippold J.C., Ksner S. D., Welding Metallurgy and Weldability of Nickel-Base Alloys, I. Edition, 2009.

Duran, H. (2019). Süper alaşım malzemenin yüzey işlemleriyle özelliklerinin geliştirilmesi ve karakterizasyonu (Master's thesis, Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).

Ediz, N., & Özdağ, H. (2001). Bor mineralleri ve ekonomisi. Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, (002), 133-151.

Ezugwu, O., Wanga Z., M., Machadop A. R., 1998 “The machinability of nickel based alloys: a review”, Journal of materials Processing Technology, Volume 86, Issues 1-3, 1-16.

Fichtl, W. (1981). Boronizing and its practical applications. Materials & Design, 2(6), 276-286.

Fichtl, W., Trausner, N., & Matuschka, A. G. (1987). Boronizing with Ekabor. Elektroschmelzwerk Kempten GmbH, 8(6).

Genel, K. (2006). Boriding kinetics of H13 steel. Vacuum, 80(5), 451-457.

Güven, A., & Kanca, E. (2017). Farklı bor kimyasalları ile borlanmış Inconel 625 alaşımının karakterizasyonu. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 23(4), 411-416.

Güven, A., Kanca, E., Çakır, 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.

Güven (2020). Properties and High Temperature Dry Sliding Wear Behavior of Boronized Inconel 718. The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International 2019.

Hegewaldt F, Singheisser L, Türk M, 1984, Gasborieren, HTM, 39, 1, 7, 15.

İnt. Kyn. 1 <https://bircelik.com/tr/kategori/hastelloy-c-276>.

Kahraman, F. (2008). Süper Alaşımların Nitrülenerek Yüzey Özelliklerinin İyileştirilmesi. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konstrüksiyon İmalat Anabilim Dalı, İzmir, 92 s.

Lou, D. C., Solberg, J. K., Akselsen, O. M., & Dahl, N. (2009). Microstructure and property investigation of paste boronized pure nickel and Nimonic 90 superalloy. Materials Chemistry and Physics, 115(1), 239-244.

Makuch, N, Kulka, M. (2014). Microstructural Characterization And Some Mechanical Properties Of Gas-Borided Inconel 600-Alloy. Applied Surface Science, 314: 1007- 1018.

Makuch, N., Kulka, M., & Paczkowska, M. (2017). Nanomechanical properties of gas-borided layer produced on Nimonic 80A-alloy. Ceramics International, 43(11), 8255-8261.

Manikandan Manoharan, Arivazhagan Natarajan ve Nageswara Rao Muktinutalapati (25 Kasım 2015). Korozyona Dirençli Superalloy C-276, Superalloys, Mahmood Aliofkhazraei, IntechOpen.

Matuschka, A.G.V., 1980. Boronizing. München, Wien, Hanser, 100 s.

Mu, D., & Shen, B. L. (2010). Oxidation resistance of boronized CoCrMo alloy. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 28(3), 424-428.

N. Makuch, M. Kulka, A. Piasecki, The effects of chemical composition of Nimonic 80A-alloy on the microstructure and properties of gas-borided layer, Surface and Coatings Technology, Volume 276, 2015, Pages 440-455.

Nair, F., Karamış, M. B., & Taşdemirci, A. (2000). Endüstriyel Uygulamalarda Borlanmış Çeliklerin Aşınma Davranışının İncelenmesi. 8. Denizli Malzeme Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 334-343.

Oliveira, C. K. N., Casteletti, L. C., Neto, A. L., Totten, G. E., & Heck, S. C. (2010). Production and characterization of boride layers on AISI D2 tool steel. Vacuum, 84(6), 792-796.

Oliver, W.C. and Pharr, G.M., (2004). Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology. *Journal of materials research*, 19 (1): 3-20.

Ozbek, I., & Bindal, C. (2002). Mechanical properties of boronized AISI W4 steel. *Surface and Coatings Technology*, 154(1), 14-20.

Özbek, İ., 2000 Borlama Yöntemiyle (AISI M50, AISI M2) Yüksek Hız Çeliklerinin ve AISI W1 Çeliğinin Yüzey Performanslarının Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

Ozbek, I., Sen, S., Ipek, M., Bindal, C., Zeytin, S., & Ucisik, A. H. (2004). A mechanical aspect of borides formed on the AISI 440C stainless-steel. *Vacuum*, 73(3-4), 643-648.

Özdoğru, F.E., Kaya, A.A. ve Kayalı, E. S. (2002). Bir Süper Alaşımın Yüksek Sıcaklıkta Oksidasyon ve Karbürizasyon Davranışı. XI. Uluslararası Metalürji ve Malzeme Kongresi, 5-9 Haziran 2002, İstanbul, s. 162-168.

Özsoy A, Yaman Y.M, 1993, The Effect of Thermocycling Liquid Boronizing on The Thickness of The Boride Layer and The Transition Zone, *Scripta Metallurgica et Materialia*, 29, 231-236.

Panus, D.A. (2006). In Vitro Characterization of Borided Titanium Alloy by Means of Corrosion and Electrochemical impedance Spectroscopy Methods in Simulated Body Fluids, *New Jersey Institute of Technology*, Newark, 121 s.

Sinha, A.K., 1991. *ASM Handbook, Boronizing*, 4, Asm International, Materials Park, Ohio, Usa , S.437.

Sista, V., Kahvecioglu, O., Kartal, G., Zeng, Q. Z., Kim, J. H., Eryilmaz, O. L., & Erdemir, A. (2013). Evaluation of electrochemical boriding of Inconel 600. *Surface and Coatings Technology*, 215, 452-459.

Şahin, S. (2009). Effects of boronizing process on the surface roughness and dimensions of AISI 1020, AISI 1040 and AISI 2714. *Journal of materials processing technology*, 209(4), 1736-1741.

Taşçı A., 1993. "Borlanmış çeliklerin Aşınma ve Korozyon Dayanımları", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tezi İTÜ. İstanbul.

Ueda, N., Mizukoshi, T., Demizu, K., Sone, T., Ikenaga, A., Kawamoto, M. (2000). Boriding of nickel by the powder-pack method. *Surface and coatings technology*, 126(1), 25-30.

Uslu, I., Comert, H., Ipek, M., Celebi, F. G., Ozdemir, O., & Bindal, C. (2007). A comparison of borides formed on AISI 1040 and AISI P20 steels. *Materials & design*, 28(6), 1819-1826.

Ülker, Ş., (2012). Farklı Gaz Karışımlarında Plazma Pasta Borlanmış AISI 8620 Çeliğinin Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Anabilim Dalı, Afyon, 177 s.

Venkataraman, B. ve Sundararajan, G. (1995). The High Speed Sliding Wear Behaviour Of Boronized Medium Carbon Steel. *Surface Coating Technology*, 73 (3): 177-184.

Veli Çay V, Ozan S., 2005 "Süperalaşımlar Ve Uygulama Alanları". Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları. Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü-ELAZIĞ.

W.C. ve Wiley, J. (1972). The Superalloys. New York, 192 s.

Yapar, Taştan., 2002. Çeliklerde Borlama Yoluyla Yüzey Sertleştirme, Metal Dünyası, 115, 69-74.

Yurtseven, R., 2008. Tel Çekme Sanayinde Borlamanın Endüstriyel Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.

Zietara M., 2011. Microstructure Stability of Second and Fourth Generation Single Crystal Nickel-Base Superalloys During High Temperature Creep Deformation” Kraków.



