



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**FARKLI LAZER PARAMETRELERİ KULLANILARAK BORLAMA İŞLEMİ
UYGULANMIŞ SLEİPNER SOĞUK İŞ TAKIM ÇELİĞİNİN MEKANİK VE
TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

TAHA ÖZEL

DANIŞMAN

DR. ÖĞR. ÜYESİ EMRE ALTAŞ

İKİNCİ DANIŞMAN

DR. ÖĞR. ÜYESİ SERKAN BATI

BARTIN-2025



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**FARKLI LAZER PARAMETRELERİ KULLANILARAK BORLAMA İŞLEMİ
UYGULANMIŞ SLEİPNER SOĞUK İŞ TAKIM ÇELİĞİNİN MEKANİK VE
TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Taha ÖZEL

JÜRİ ÜYELERİ

Danışman	: Dr. Öğr. Üyesi Emre ALTAŞ
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Mecit ÖGE
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Ömer BAYRAKTAR

BARTIN-2025

KABUL VE ONAY

Taha ÖZEL tarafından hazırlanan “FARKLI LAZER PARAMETRELERİ KULLANILARAK BORLAMA İŞLEMİ UYGULANMIŞ SLEİPNER SOĞUK İŞ TAKIM ÇELİĞİNİN MEKANİK VE TRIBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu çalışma, 18.08.2025 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak jürimiz tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Dr. Öğr. Üyesi Ömer BAYRAKTAR

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Emre ALTAŞ

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Mecit ÖGE

Bu tezin kabulü Lisansüstü Eğitimi Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/...../20... tarih ve 20...../.....-..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Zafer CEYLAN
Enstitü Müdürü

BEYANNAME

Bartın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Dr. Öğr. Üyesi Emre ALTAŞ danışmanlığında hazırlamış olduğum “FARKLI LAZER PARAMETRELERİ KULLANILARAK BORLAMA İŞLEMİ UYGULANMIŞ SLEIPNER SOĞUK İŞ TAKIM ÇELİĞİNİN MEKANİK VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı yüksek lisans tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

18.08.2025

Taha ÖZEL

ÖN SÖZ

“FARKLI LAZER PARAMETRELERİ KULLANILARAK BORLAMA İŞLEMİ UYGULANMIŞ SLEİPNER SOĞUK İŞ TAKIM ÇELİĞİNİN MEKANİK VE TRIBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” adlı bu çalışma, Bartın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

Lisansüstü eğitim sürecimin her aşamasında yanımda olan, bilimsel merakımı besleyen ve araştırma tutkusunu benimle paylaşan saygıdeğer danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Emre ALTAŞ'a en derin şükranlarımı sunuyorum. Kendisinin akademik vizyonu, yapıcı eleştirileri ve sürekli desteği olmadan bu çalışmanın tamamlanması mümkün olmazdı.

Ayrıca, ikinci danışmanım olarak lisansüstü sürecimde değerli katkılarını esirgemeyen, uzman görüşleri ve önerileriyle tez çalışmamı zenginleştiren saygıdeğer hocam Dr. Öğr. Üyesi Serkan BATI'ya da içten teşekkürlerimi sunmak isterim. Kendisinin alandaki derin bilgi birikimi, objektif bakış açısı ve yönlendirmeleri, araştırmamın kalitesinin artmasında ve farklı perspektifleri değerlendirmemde önemli rol oynamıştır.

Deneysel çalışmalarım için Sleipner çeliği tedariki ve ısıtma işlem uygulamalarını gerçekleştiren Uddeholm firmasına ve bu süreçteki değerli destekleri için Kıdemli İş Geliştirme Müdürü Sercan ÖZDEMİR'e teşekkürlerimi sunuyorum. Sağladıkları malzeme ve teknik destek, araştırmamın başarıyla tamamlanmasında kritik öneme sahip olmuştur.

Çalışmakta olduğum Seral Makina Mühendislik firmasına ve değerli sahipleri Serdal DEMİRTAŞ ile Sevda DEMİRTAŞ'a, tez çalışmam kapsamında ihtiyaç duyduğum CNC işleme ve lazer kaynak işlemlerinin gerçekleştirilmesi için gösterdikleri anlayış ve destekten dolayı minnettarlığımı ifade etmek isterim. Ayrıca, yüksek lisans eğitimimi sürdürebilmem için tanıdıkları esnek çalışma saatleri ve akademik gelişimime gösterdikleri destek, bu sürecin başarıyla tamamlanmasında büyük önem taşımıştır. Bu değerli katkıları için kendilerine sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu uzun ve zorlu süreçte yanımda olan, bana her zaman inanan ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen değerli aileme en derin teşekkürlerimi sunuyorum. Yüksek lisans eğitimim

boyunca gösterdikleri sabır, anlayış ve sevgi dolu yaklaşımları, karşılaştığım zorluklarla mücadele etme gücünü bulmamda en büyük motivasyon kaynağım olmuştur. Maddi ve manevi destekleri, cesaretlendirici sözleri ve her koşulda arkamda durmaları sayesinde bu hedefe ulaşabilmiş olmaktan gurur duyuyorum. Onların varlığı, akademik yolculuğumun en değerli kazancıdır.

Bu çalışmanın, lazer destekli borlama teknolojilerinin geliştirilmesi konularında gelecekteki araştırmalara ışık tutması dileğiyle...

Taha ÖZEL



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FARKLI LAZER PARAMETRELERİ KULLANILARAK BORLAMA İŞLEMİ UYGULANMIŞ SLEIPNER SOĞUK İŞ TAKIM ÇELİĞİNİN MEKANİK VE TRIBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Taha ÖZEL

Bartın Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Emre ALTAŞ

İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Serkan BATI

Bartın-2025, sayfa: 53

Bu çalışmada, Sleipner soğuk iş takım çeliği üzerine lazer kaynak teknolojisi kullanılarak bor kaplama işlemi uygulanmış ve farklı işlem parametrelerinin malzemenin tribolojik özelliklerine etkileri kapsamlı olarak incelenmiştir. Araştırma kapsamında, iki farklı lazer güç seviyesi (1500 W ve 1800 W) ve iki farklı salınım frekansı (20 Hz ve 40 Hz) parametreleri kullanılarak bor kaplamaların performansları değerlendirilmiştir. Aşınma testleri kuru ortam koşullarında, oda sıcaklığı (25 °C) ve yüksek sıcaklık (450 °C) olmak üzere iki farklı sıcaklık seviyesinde gerçekleştirilmiştir.

XRD analizleri sonucunda, tüm lazer kaplama koşullarında FeB ve Fe₂B borid fazlarının başarılı bir şekilde oluştuğu belirlenmiştir. Optik mikroskopi incelemeleri, 1500 W lazer gücünde daha homojen kaplama yapılarının elde edildiğini göstermiştir. Mikrosertlik ölçümlerinde en yüksek değer, 1500 W güç ve 20 Hz salınım frekansı koşullarında 988,9 HV olarak elde edilmiş olup, bu değer işlenmemiş Sleipner çeliğine (338,7 HV) göre %192'lik bir artış göstermiştir. Isıl işlem uygulaması ise 700,5 HV ile %107'lik artış sağlamıştır.

Tribolojik testler 10 N ve 20 N yük altında, ball-on-disc ve pin-on-disc düzenekleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Oda sıcaklığı koşullarında bor kaplamaların sürtünme katsayısında önemli iyileşmeler sağladığı görülmüştür. İşlenmemiş (Untreated-UT) numune en yüksek sürtünme katsayısı değerlerini (10 N'da $\sim 0,70 \mu$, 20 N'da $\sim 0,62 \mu$) sergilerken, bor kaplı numunelerde sürtünme katsayıları $0,30-0,48 \mu$ aralığına düşmüştür. En düşük spesifik aşınma oda koşullarında 1500–20 numunesinde 20 N yük altında $1,95 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ olarak ölçülmüştür. Ancak yüksek sıcaklık (450°C) koşullarında bor kaplamalı numunelerin performansları önemli ölçüde düşmüş, en dirençli yapı ısıtılmış (Heat Treated-HT) numunesinde 20 N'da $1,62 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ gözlenmiş, bor kaplamalı numuneler arasında ise en iyi performans 1800–40 numunesinde 20 N'da $9,50 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ olarak elde edilmiştir. SEM ve EDS analizleri, oda koşullarında WC-Co bilyenin yapısal bütünlüğünü koruduğunu, ancak yüksek sıcaklıkta (450°C) kobalt fazın oksitlenme ve tungsten transferi nedeniyle yapısal bozunma yaşandığını ortaya koymuştur. Aşınma mekanizmalarında oda koşullarında adhezyon aşınması ve triboyüzey oluşumu baskın olurken, yüksek sıcaklıkta yoğun oksitlenme gözlenmiştir.

Sonuç olarak, lazer destekli bor kaplama işlemi oda sıcaklığında etkili bir yüzey sertleştirme yöntemi olarak başarıyla uygulanabilir, ancak yüksek sıcaklık uygulamaları için alternatif yaklaşımlar değerlendirilmelidir.

Anahtar Kelimeler: Aşınma, borlama, lazer kaynak, Sleipner soğuk iş takım çeliği, sürtünme katsayısı.

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF MECHANICAL AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF SLEIPNER COLD WORK TOOL STEEL BORIDED USING DIFFERENT LASER PARAMETERS

Taha ÖZEL

Bartın University

Graduate School

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor: Assist. Prof. Dr. Emre ALTAŞ

Second Advisor: Assist. Prof. Dr. Serkan BATI

Bartın-2025, pp: 53

This study comprehensively investigated the effects of different processing parameters on the tribological properties of Sleipner cold work tool steel subjected to boron coating using laser welding technology. The research evaluated the performance of boron coatings using two different laser power levels (1500 W and 1800 W) and two different oscillation frequencies (20 Hz and 40 Hz). Wear tests were conducted under dry ambient conditions at two different temperature levels: room temperature (25 °C) and high temperature (450 °C).

XRD analyses revealed that FeB and Fe₂B boride phases were successfully formed under all laser coating conditions. Optical microscopy examinations showed that more homogeneous coating structures were obtained at 1500 W laser power. In microhardness measurements, the highest value was obtained as 988.9 HV under conditions of 1500 W power and 20 Hz oscillation frequency, representing a 192% increase compared to untreated Sleipner steel (338.7 HV). Heat treatment application provided a 107% increase with 700.5 HV.

Tribological tests were conducted under 10 N and 20 N loads using ball-on-disc and pin-on-disc configurations. Significant improvements in friction coefficient were observed for boron coatings under room temperature conditions. While the untreated (UT) specimen exhibited the highest friction coefficient values ($\sim 0.70 \mu$ at 10 N, $\sim 0.62 \mu$ at 20 N), boron-coated specimens showed friction coefficients reduced to the $0.30\text{--}0.48 \mu$ range. The lowest specific wear under room conditions was measured as $1.95 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ for the 1500-20 specimen under 20 N load. However, under high temperature (450°C) conditions, the performance of boron-coated specimens significantly decreased, with the most resistant structure observed in the heat-treated (HT) specimen at $1.62 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ under 20 N. Among boron-coated specimens, the best performance was achieved in the 1800-40 specimen at $9.50 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ under 20 N. SEM and EDS analyses revealed that the WC-Co ball maintained its structural integrity under room conditions, but experienced structural degradation at high temperature (450°C) due to cobalt phase oxidation and tungsten transfer. In wear mechanisms, adhesive wear and tribosurface formation were dominant under room conditions, while intensive oxidation was observed at high temperature.

In conclusion, laser-assisted boron coating can be successfully applied as an effective surface hardening method at room temperature, but alternative approaches should be considered for high-temperature applications.

Keywords: Boriding, friction coefficient, laser welding, Slepner cold work tool steel, wear

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY.....	ii
BEYANNAME	iii
ÖN SÖZ	iv
ÖZET	vi
ABSTRACT	viii
İÇİNDEKİLER.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
TABLolar DİZİNİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvi
1. GİRİŞ	1
2. SLEIPNER SOĞUK İŞ TAKIM ÇELİĞİNİN YAPISAL VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİ.....	4
3. BORLAMA İLE YÜZEY SERTLEŞTİRME YÖNTEMLERİ.....	7
4. LİTERATÜR TARAMASI	12
5. MATERYAL VE METOT	16
5.1. İş Parçası Malzemesi.....	16
5.2. Yüzey Hazırlığı ve Kanal İşleme.....	16
5.3. Lazer Kaynak Makinası Özellikleri	17
5.3. Lazer Kaplama İşlemi.....	18
5.4. Isıl İşlem Süreci	20
5.5. Yüzey işlemleri	21
5.6 Aşınma Davranışı Testleri.....	21
5.7 Mikroyapısal Karakterizasyon	22
5.8. Mikrosertlik Ölçümleri.....	23
5.9. X-Işını Kırınımı Analizi.....	23
6. BULGULAR TARTIŞMA	24
6.1. Mikroyapı Analiz Değerlendirme Sonuçları	24
6.2. Mikrosertlik Değerlendirme Sonuçları.....	26
6.3. X-Işını Kırınımı Analizi.....	28
6.4. Aşınma Testi Sonuçları.....	29
6.4.1. Sürtünme Katsayısı Sonuçları	30

6.4.2. Spesifik Aşınma ve Yüzey Morfolojisi	32
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	47
KAYNAKLAR.....	49
ÖZGEÇMİŞ.....	53



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
No	No
Şekil 5.1: Kanal açma işlemi tamamlanmış numuneler	17
Şekil 5.2: Kullanılan kaynak makinasının resmi ve teknik özellikleri.	17
Şekil 5.3: a) 1500 W 20 Hz lazer kaynak için lazer parametreleri b) 1500 W 40 Hz lazer kaynak için lazer parametreleri c) 1800 W 20 Hz lazer kaynak için lazer parametreleri d) 1800 W 40 Hz lazer kaynak için lazer parametreleri.	18
Şekil 5.4: Numunelere lazer ışını ile kaplamaların uygulanma anı.	19
Şekil 5.5: 1500 W lazer gücünde a) 20 Hz ve b) 40 Hz salınım frekansı ile kaplanmış numuneler.....	19
Şekil 5.6: Lazer ile kaplama öncesi altlık malzemelere uygulanmış bor macunu.....	20
Şekil 5.7: Isıl işlem uygulanmış numunenin görüntüsü.	20
Şekil 6.1: 1500 W lazer gücünde farklı salınım frekanslarının mikroyapıya etkisi.	25
Şekil 6.2: 1800 W lazer gücünde farklı salınım frekanslarının mikroyapıya etkisi.	26
Şekil 6.3: Farklı işlem koşullarına göre mikrosertlik değerleri.	28
Şekil 6.4: Farklı lazer parametrelerinde XRD desenleri.....	29
Şekil 6.5: Oda sıcaklığında a) 10 N yük altında, b) 20 N yük altında numunelerin sürtünme katsayısının zamana bağlı değişimi.....	30
Şekil 6.6: 450 °C ortam sıcaklığında a) 10 N yük altında, b) 20 N yük altında numunelerin sürtünme katsayısının zamana bağlı değişimi.....	31
Şekil 6.7: Numunelerin a) oda koşullarında, b) 450 °C ortam şartlarında elde edilen spesifik aşınma değerleri.....	33
Şekil 6. 8: a) ısıl işlem görmemiş ve b) ısıl işlem görmüş numunelerin oda koşullarında (RT) aşınma testi sonrası 3D profilometre görüntüleri.	35
Şekil 6.9: Farklı güçte ve farklı yalpalama frekansında lazer kaynağı ile borlama işlemine tabi tutulan numunelerin aşınma testi sonrası 3D profilometre görüntüleri.....	36
Şekil 6.10: Isıl işlem görmemiş (UT) ve ısıl işlem görmüş (HT) numunelerin 450°C sıcaklıkta 10 N ve 20 N yük altında aşınma testi sonrası 3D profilometre görüntüleri.....	37
Şekil 6.11: Farklı güçte ve yalpa frekansında borlanan numunelerin 450 °C sıcaklıkta	

10 N ve 20 N yük altında aşınma testi sonrası 3D profilometre görüntüleri.	39
Şekil 6.12: Isıl işlem görmemiş (UT) ve ısıtılmış (HT) numunelerin oda koşullarında (RT) 10 N ve 20 N yük altında aşınma testi sonrası SEM ve EDS sonuçları.	40
Şekil 6.13: Farklı güç ve frekansta lazer kaynağı ile borlanmış numunelerin oda koşullarında (RT) 10 N ve 20 N yük altında aşınma testi sonrası SEM ve EDS sonuçları.	42
Şekil 6.14: Isıl işlem görmemiş (UT) ve ısıtılmış (HT) numunelerin 450 °C sıcaklıkta 10 N ve 20 N yük altında aşınma testi sonrası SEM ve EDS sonuçları.	43
Şekil 6.15: Farklı güç ve frekansta lazer kaynağı ile borlanmış numunelerin 450 °C sıcaklıkta 10 N ve 20 N yük altında aşınma testi sonrası SEM ve EDS sonuçları.	

TABLolar DİZİNİ

Tablo	Sayfa
No	No
Tablo 5.1: Altlık malzeme olarak kullanılan Sleipner çeliğinin kimyasal kompozisyonu (%).....	16
Tablo 5.2: Tribolojik test parametreleri ve koşulları.....	22



EKLER DİZİNİ

Ek	Sayfa
No	No
EK 1: Lazer ışığı salınım hareketinin şematik gösterimi.....	52



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

°C	: derece Celsius
%	: yüzde
µm	: mikrometre
mm	: milimetre
m	: metre
W	: watt
Hz	: hertz
N	: Newton
m/s	: metre/saniye
GPa	: gigapaskal
HV	: Vickers sertliği
kJ/mol	: mol başına kilojoule
m ² /s	: metrekaare/saniye
mm ³ /N·m	: milimetreküp/newton·metre
B ₄ C	: Bor Karbür
FeB	: Demir Borür
Fe ₂ B	: Demir Diborür
KBF ₄	: Potasyum Tetrafluoroborat
MC	: Metal Karbür
M ₇ C ₃	: Metal Karbür (Tip 7C3)
M ₂₃ C ₆	: Metal Karbür (Tip 23C6)
Na ₂ B ₄ O ₇	: Boraks
NH ₄ Cl	: Amonyum Klorür
SiC	: Silisyum Karbür
WC-Co	: Tungsten Karbür-Kobalt

KISALTMALAR

CNC	: Bilgisayarlı Sayısal Kontrol (Computer Numerical Control)
CVD	: Kimyasal Buhar Biriktirme
EDS	: Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi
HT	: Isıl İşlem Görmüş (Heat Treated)
PVD	: Fiziksel Buhar Biriktirme
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
UT	: İşlem Görmemiş (Untreated)
XRD	: X-ışını Kırınımı
RT	: Oda sıcaklığı (Room temperature)

1. GİRİŞ

Takım çelikleri, yüksek sertlik, aşınma direnci ve tokluk özelliklerinin aynı anda sağlanması gereken zorlu üretim ortamlarında yaygın olarak kullanılan kritik bir mühendislik malzemesi sınıfını temsil eder. Bu malzemeler arasında, Sleipner soğuk işleme takım çeliği, aşınma direnci, boyutsal kararlılık ve işlenebilirlik özelliklerinin olağanüstü birleşimi nedeniyle tercih edilen bir seçenek olarak öne çıkmıştır. Dengeli kimyasal bileşimi ve üstün metalurjik özellikleriyle karakterize edilen bu yüksek kaliteli takım çeliği, yüksek yüzey gerilmelerine ve yoğun sürtünme koşullarına maruz kalan kesici takımlar, şekillendirme kalıpları, zımbalar ve çeşitli endüstriyel bileşenlerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Bryson, 2005). Ancak, bu çeliklerin performansı ve hizmet ömrü büyük ölçüde yüzey özelliklerine bağlıdır, bu da giderek daha katı hale gelen endüstriyel gereksinimleri karşılamak için gelişmiş yüzey modifikasyon tekniklerini gerektirmektedir.

Son yıllarda, geleneksel ısıtma işlem ve kaplama yöntemlerinin ötesine geçen yüzey sertleştirme teknolojilerine olan ilgi giderek artmaktadır. Bu ileri teknikler arasında, demir içeren malzemelerin yüzey özelliklerini önemli ölçüde iyileştirebilen bir termokimyasal yüzey işlemi olan borlama önemli bir ilgi görmektedir. Borlama işlemi, bor atomlarının yüksek sıcaklıklarda (genellikle 800 °C ila 1050 °C arasında) çelik alt tabakaya difüzyonunu içerir ve bu da yüzeyde son derece sert borür tabakalarının oluşmasına neden olur (Keddam, 2004). Bu işlem, öncelikle FeB ve Fe₂B fazlarından oluşan ve 1500 ile 2000 HV arasında değişen olağanüstü sertlik değerleri sergileyen ve geleneksel takım çeliklerinin sertliğini önemli ölçüde aşan bir bileşik katman oluşturur (Sen vd., 2005).

Borlama işlemi, alternatif yüzey modifikasyon tekniklerine göre birçok belirgin avantaj sunar. Geleneksel kaplamaların zorlu çalışma koşullarında yapışma sorunları veya geri kalkma yaşayabilmesine karşın, borür tabakaları alt tabakaya metalurjik olarak bağlanır ve işlem sırasında mükemmel yapışma ve bütünlük sağlar. Ayrıca, işlemin difüzyon temelli yapısı, kaplama kalınlığı sınırlamalarıyla ilgili endişeleri ortadan kaldırır ve karmaşık geometrilerde bile homojen bir kaplama sağlar (Taktak, 2007). Borür bileşiklerinin oluşumu, yüksek sertlikleri ve elverişli tribolojik özellikleri nedeniyle olağanüstü aşınma direnci ile sonuçlanır. Ayrıca, sıcaklık, zaman ve işlem ortamının bor potansiyeli gibi işlem parametrelerini ayarlayarak istenen katman kalınlığını ve mikroyapısal özellikleri elde

etmek için işlem hassas bir şekilde kontrol edilebilir (Bindal ve Erdemir, 1996).

Borlama işleminin etkinliği, çeşitli işlem koşulları ve alt tabaka özelliklerinden önemli ölçüde etkilenir. Paket sementasyon, sıvı borlama, plazma destekli borlama ve gaz borlama gibi farklı borlama atmosferleri, her biri kendine özgü avantajlar sunar ve farklı mikroyapısal özellikler ve özellik profilleri ile sonuçlanır (Martini vd., 2004). Alt tabakanın bileşimi, özellikle krom, nikel ve molibden gibi alaşım elementlerinin varlığı, borür tabakalarının büyüme kinetiğini ve sonuçta ortaya çıkan mekanik özellikleri belirlemede çok önemli bir rol oynar. Sıcaklık ve zaman parametreleri, borür tabakasının kalınlığını ve difüzyon bölgesinin derinliğini doğrudan etkilerken, işlem ortamındaki bor aktivitesi, oluşan tabakaların faz bileşimini ve morfolojisini etkiler (Campos-Silva vd., 2012).

Son araştırmalar, borlanmış takım çeliklerinin farklı çalışma koşulları altında mekanik davranışlarının, spesifik uygulama gereksinimleri ve yükleme senaryolarına bağlı olarak önemli ölçüde değişebileceğini göstermiştir. Değişen yük koşulları, temas basınçları ve çevresel faktörler altında, borür tabakalarının performansı aşınma mekanizmaları, arıza modları ve hizmet ömrü açısından farklı özellikler gösterebilir (Kayali vd., 2013). Bu farklılıkları anlamak, borlama işlemi parametrelerini optimize etmek ve belirli endüstriyel uygulamalarda işlenmiş bileşenlerin uzun vadeli performansını tahmin etmek için çok önemlidir.

Bu çalışma, farklı çalışma koşulları altında Sleipner soğuk işleme çeliğinin mekanik özellikleri ve aşınma davranışı üzerinde borlama işleminin etkisini kapsamlı bir şekilde araştırmayı amaçlamaktadır. Araştırma, borlanmış Sleipner çeliğinin mikroyapısal gelişimi, sertlik dağılımı ve tribolojik performansını karakterize etmeye odaklanmakta olup, özellikle farklı test koşullarının işlenmiş malzemenin genel performansını nasıl etkilediğini anlamaya özel önem vermektedir. Araştırma, borür tabakasının oluşumu, mekanik özelliklerin iyileştirilmesi ve borlama işlemiyle elde edilen aşınma direncinin iyileştirilmesinin ayrıntılı analizini kapsamaktadır.

Bu çalışma, Sleipner soğuk iş takım çeliği yüzeylerinin bor kaplanması için lazer kaynak teknolojisinin uygulanmasını araştırmakta ve farklı çalışma koşulları altında ortaya çıkan aşınma davranışını incelemektedir. Çalışma, değişen lazer güç seviyelerinin (1500 W ve

1800 W) ve salınım frekanslarının (20 Hz ve 40 Hz) yüzey sertliği, mikroyapısal özellikler ve tribolojik performans üzerindeki etkilerini değerlendirmektedir. Lazer ışını ile yüzeye bor kaplama işlemi, bilinen paket borlama yöntemlerine ek olarak takım çeliği uygulamaları için ileri seviye yüzey sertleştirme tekniklerinin geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır. Bulgular, endüstriyel uygulamalar için lazer destekli borlama parametrelerinin optimize edilmesine yardımcı olacak ve yüksek performanslı takım çelikleri için lazer tabanlı yüzey modifikasyon işlemlerinin anlaşılmasına katkıda bulunacaktır.



2. SLEIPNER SOĞUK İŞ TAKIM ÇELİĞİNİN YAPISAL VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİ

Sleipner çeliği, yüksek karbon ve krom içeriği ile karakterize edilen, olağanüstü aşınma direnci ve boyutsal kararlılık gerektiren zorlu soğuk iş uygulamaları için özel olarak tasarlanmış birinci sınıf soğuk iş alet çeliği olarak sınıflandırılır. Bu gelişmiş takım çeliği yaklaşık %0,9 karbon, %7,8 krom, %2,5 molibden ve %0,5 vanadyum içerir ve bu dengeli kimyasal bileşim, çeliğin sertliğini, aşınma direncini ve genel mekanik performansını doğrudan etkiler (Roberts vd., 1998). Sonuç olarak, Sleipner çeliği, yüksek yüzey yüklerine ve tekrarlayan gerilme koşullarına maruz kalan kesici aletler, şekillendirme kalıpları, zımbalar ve hassas bileşenlerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Bryson, 2005).

Uygun ısıtma işlem prosedürleri sayesinde Sleipner çeliği 60-62 HRC arasında değişen yüksek sertlik değerlerine ulaşabilir (Roberts vd., 1998). Bu olağanüstü sertlik, krom karbürler (M_7C_3 , $M_{23}C_6$) ve molibden-vanadyum karbürler (MC) dahil olmak üzere düzgün dağılmış birincil ve ikincil karbürler içeren martensitik matrise atfedilir. Bu karbür fazları, işlemin yapıldığı koşullar sırasında mikroyapısal kararlılığı korurken plastik deformasyonu sınırlayarak çeliğin hem yüzey hem de yığın özelliklerine önemli ölçüde katkıda bulunur.

Sleipner çeliği, geleneksel takım çeliklerine kıyasla üstün boyutsal kararlılık özellikleri sergiler. Isıl işlem sonrası meydana gelen minimum hacimsel değişiklikler, hassas bileşenlerde deformasyon riskini azaltır ve bu da onu hassas kalıplar ve takım bileşenleri imalatı için son derece uygun hale getirir. Bu özellik, bileşenin hizmet ömrü boyunca sıkı boyutsal toleransların korunmasını sağlar. Ancak, yüksek karbon içeriği ve karbür yapısı nedeniyle, çelik sınırlı darbe dayanımı gösterebilir; bu nedenle, ani yükleme koşulları içeren uygulamalar dikkatli tasarım değerlendirmeleri gerektirir (Berns ve Theisen, 2008).

Sleipner çeliğinin hava ile sertleşme özelliği, en önemli avantajlarından birini temsil eder. Bu özellik, sert su verme ortamına olan ihtiyacı ortadan kaldırarak ısıtma sırasında bozulma ve çatlama riskini azaltır. Durgun havada östenitleme sıcaklığından kontrollü soğutma, tam sertliğe ulaşmak için yeterlidir ve ısıtma sürecini daha öngörülebilir ve uygun maliyetli hale getirir (Bryson, 2005). Bu özellik, özellikle geleneksel söndürücülerle homojen soğutma elde etmenin zor olduğu karmaşık geometriler için faydalıdır.

Sleipner çeliğinin tribolojik özellikleri, yapısal özellikleriyle doğrudan ilişkilidir. Çeliğin, aşınma ve sürtünme gibi temas kaynaklı hasar mekanizmalarına karşı yüksek direnç gösterdiği gözlemlenmiştir. Özellikle aşındırıcı aşınma koşullarında, mikro yapıda bulunan sert karbür fazları çok önemli bir rol oynar. Bu fazlar, temas yüzeylerinde mikro kesme etkilerini azaltarak aşınma oranını düşürür (Hutchings, 1992). Martensitik matris boyunca karbürlerin ince dağılımı, tutarlı aşınma performansına katkıda bulunan homojen bir sertlik profili sağlar.

Sürtünme, iki yüzey arasındaki göreceli hareketin sonucu olarak ortaya çıkan direnç kuvveti olarak tanımlanır ve yüzey kalitesi, mikroyapısal homojenlik ve yağlayıcıların varlığı gibi birçok parametreden etkilenir (Gahr, 1987). Sleipner çeliği, sert yapısı sayesinde sürtünmeden kaynaklanan plastik deformasyonu sınırlayarak yüzeydeki hasar mekanizmalarını azaltır. Ancak, yüzey pürüzlülüğü ve düzensiz karbür dağılımı gibi mikro yapısal farklılıklar yerel aşınma eğilimlerini artırabilir (Khruschov, 1974).

Sleipner çeliğinin aşınma davranışı, esas olarak karbür içeriği ve dağılımı tarafından belirlenir. Kayma aşınması koşullarında, sert karbür parçacıkları yük taşıyıcı elemanlar olarak işlev görür ve daha yumuşak martensitik matrisi sayesinde doğrudan temas hasarından korunur. Karbür fazları ayrıca, aşınma ilerlemesine karşı ek koruma sağlayabilen kararlı bir tribolojik tabakasının oluşumuna da katkıda bulunur (Gahr, 1987). Sleipner çeliğinde bulunan molibden ve vanadyum karbürler, yüksek gerilimli tribolojik koşullar altında yapısal bütünlüğü korumada özellikle etkilidir.

Sleipner çeliğinin tribolojik performansını artırmak için çeşitli yüzey işleme teknikleri uygulanmaktadır. Bunlar arasında borlama, nitrürleme, karbonlama gibi yüzey sertleştirme işlemleri ve gelişmiş kaplama teknolojileri bulunmaktadır (Bell vd., 1998). Özellikle borlama, alt tabakaya iyi yapışmayı sürdürürken aşınma direncini önemli ölçüde artıran son derece sert demir borür tabakalarının oluşumu nedeniyle Sleipner çeliği için olağanüstü umut vaat etmektedir. Borlamanın difüzyona dayalı yapısı mükemmel metalürjik bağlanma sağlayarak kaplamanın geri kalkmasına ilişkin endişeleri ortadan kaldırır (Taktak, 2007).

Sleipner çeliğinin çeşitli yüzey modifikasyon teknikleriyle uyumluluğu, onu hibrit işlem yaklaşımları için ideal bir aday haline getirir. Çeliğin dengeli bileşimi, termokimyasal

işlemler sırasında yapısal kararlılığı korurken, ara elemanların etkili bir şekilde yayılmasını sağlar. Bu özellik, borlama uygulamaları için özellikle önemlidir, çünkü bu uygulamalarda homojen borür tabakalarının oluşumu, kontrollü difüzyon kinetiğine bağlıdır (Keddam, 2004).

Sonuç olarak, Sleipner çeliği, sert mikro yapısı, yüksek karbür içeriği ve boyutsal kararlılığı nedeniyle tribolojik uygulamalar için güvenilir bir malzeme olarak kabul edilmektedir. Aşınma ve sürtünme koşullarının yoğun olduğu sistemlerde etkili bir şekilde kullanılmaktadır ve bu performans, uygun yüzey modifikasyon stratejileri ve uygun işleme teknikleri ile daha da geliştirilebilir. Mükemmel temel özellikleri ve yüzey işleme uyumluluğunun birleşimi, Sleipner çeliğini üstün aşınma direnci ve uzun hizmet ömrü gerektiren zorlu endüstriyel uygulamalar için en uygun seçim haline getirir (Roberts vd., 1998).

3. BORLAMA İLE YÜZEY SERTLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

Mühendislik malzemelerinin performansı, sadece hacimsel yapısal özellikleri ile değil, aynı zamanda yüzey özellikleri ile de belirlenir. Aşınma, yorulma ve sürtünme gibi mekanizmalar yüzeyde meydana geldiğinden, birçok mekanik bileşenin hizmet ömrünü doğrudan etkiler (Holmberg ve Matthews, 1994). Bu nedenle, yüzey modifikasyon teknikleri özellikle yüksek yüzey dayanıklılığı ve uzun hizmet ömrü gerektiren uygulamalarda kullanılır. Yüzey sertleştirme, alt tabakanın yararlı kütle özelliklerini korurken malzemelerin yüzeye yakın özelliklerini iyileştirmeyi amaçlayan yüzey modifikasyon işlemlerinin özel bir kategorisini temsil eder (Bell vd., 1998).

Yüzey sertleştirme teknikleri genel olarak iki ana kategoriye ayrılabilir: kaplama işlemleri ve doğrudan yüzey işleme yöntemleri. Kaplama teknikleri genellikle alt tabaka üzerine film veya tabaka halinde başka bir malzeme fazının uygulanmasını içerir. Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD), Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD), elektro kaplama, termal püskürtme ve sol-jel yöntemleri bu kategoriye girer (Bunshah, 1994). Bu kaplamalar malzeme yüzeyini aşınmaya ve yüksek sıcaklıklara karşı daha dayanıklı hale getirebilirken, alt tabaka ile kaplama arasındaki yapışma sorunları veya kaplamanın çatlama eğilimi gibi hususlar da dikkate alınmalıdır (Holmberg ve Mathews, 1994).

Doğrudan yüzey işleme yöntemleri ise, malzemenin kendi yapısal özelliklerini kullanarak dış katman eklemekten yüzey özelliklerini iyileştirmeyi amaçlamaktadır. Isıl işlem, karbonlama, nitrürleme ve borlama gibi termokimyasal difüzyon işlemleri, iyon implantasyonu ve lazerle yüzey modifikasyonu bu kategoriye girer (Sen vd., 2005). Bu teknikler arasında borlama, alt tabakaya mükemmel metalürjik bağlanma özelliğine sahip son derece sert yüzey tabakaları oluşturma kabiliyeti nedeniyle büyük ilgi görmüştür.

Borlama, yüksek sıcaklıklarda (genellikle 800 °C ile 1050 °C arasında) çelik alt tabakaya bor atomlarının difüzyonunu içeren bir termokimyasal yüzey işleme işlemidir. Bu işlem sırasında, bor atomları çelik yüzeyine nüfus eder ve demirle reaksiyona girerek demir borür bileşikler, özellikle FeB ve Fe₂B fazları oluşturur (Keddam, 2004). Bu borür tabakaları, 1500 ile 2000 HV arasında değişen olağanüstü sertlik değerleri sergiler ve geleneksel sertleştirilmiş çeliklerin sertliğini önemli ölçüde aşar. Bu son derece sert metaller arası

bileşiklerin oluşumu, olağanüstü aşınma direnci ve boyutsal kararlılık sağlar.

Farklı bileşen geometrileri, üretim gereksinimleri ve ekonomik faktörlere uyum sağlamak için çeşitli borlama yöntemleri geliştirilmiştir. Paket sementasyon borlama, genellikle kutu borlama olarak adlandırılır ve endüstriyel uygulamalarda en geleneksel ve yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Bu yöntemde, bileşenler B_4C (bor karbür), SiC (silikon karbür), KBF_4 (potasyum tetrafloroborat) ve NH_4Cl veya NH_4F gibi bor bakımından zengin bileşikler içeren bir toz karışımı ile tamamen çevrelenir ve paketlenir, ardından kapalı bir kaptaki kontrollü atmosfer fırınında ısıtılır (Taktak, 2007). Toz karışımı hem bor kaynağı hem de koruyucu ortam görevi görür, oksitlenmeyi önlerken işlem döngüsü boyunca sabit bir bor aktivitesi sağlar.

Kutu borlama işlemi genellikle $850\text{ }^{\circ}C$ ile $950\text{ }^{\circ}C$ arasında değişen sıcaklıklarda gerçekleştirilir ve işlem süresi istenen tabaka kalınlığı ve alt tabaka malzemesine bağlı olarak 2 ile 8 saat arasında değişir. Aktivatör bileşikler, uçucu bor içeren türlerin oluşumu yoluyla bor salınımını ve çelik yüzeye taşınmasını kolaylaştırmada önemli bir rol oynar (Bindal ve Erdemir, 1996). Bu yöntem, mükemmel işlem kontrolü, karmaşık geometrilerin tek tip işlenmesi ve birden fazla bileşeni aynı anda işleme yeteneği sunarak, toplu üretim için oldukça uygun maliyetli hale getirir. Ancak, geleneksel kutu borlama işlemi, toz karışımlarının dikkatli bir şekilde işlenmesini gerektirir, atık malzemeler üretir ve termal difüzyon mekanizmalarına bağlı olması nedeniyle nispeten uzun işlem süreleri gerektirir.

Sıvı borlama, bileşenlerin $850\text{ }^{\circ}C$ ile $950\text{ }^{\circ}C$ arasındaki sıcaklıklarda boraks ($Na_2B_4O_7$) ve diğer bor bileşikler içeren erimiş tuz banyolarına daldırılmasıdır. Bu yöntem hızlı borür tabakası oluşumu ve mükemmel yüzey kalitesi sağlar, ancak erimiş tuzların işlenmesi için özel ekipman gerektirir ve çevresel kaygılar doğurur (Bindal ve Erdemir, 1996). Gaz borlama, kontrollü atmosferlerde BCl_3 veya B_2H_6 gibi gaz halindeki bor içeren bileşikler kullanılır, bor aktivitesini hassas bir şekilde kontrol eder ve belirli alanların seçici olarak işlenmesini sağlar.

Plazma destekli borlama, plazma teknolojisinin avantajlarını geleneksel borlama işlemleriyle birleştiren gelişmiş bir tekniktir. Bu yöntem, daha düşük işlem sıcaklıkları, daha kısa işlem süreleri ve katman özellikleri üzerinde daha iyi kontrol sağlar (Martini vd., 2004).

Plazma ortamı, difüzyon kinetiğini artıran ve karmaşık geometrilerde bile homojen borür katmanlarının oluşumunu sağlayan aktif bor türleri sağlar.

Borlama işleminin etkinliği, çeşitli işlem parametreleri ve alt tabaka özelliklerinden önemli ölçüde etkilenir. Sıcaklık ve süre parametreleri, borür tabakasının kalınlığını ve difüzyon bölgesinin derinliğini doğrudan etkiler. Daha yüksek sıcaklıklar ve daha uzun işlem süreleri genellikle daha kalın borür tabakaları ile sonuçlanır, ancak optimum kombinasyonlar belirli uygulama gereksinimlerine göre belirlenmelidir (Campos-Silva vd., 2012). Altlık malzeme bileşimi, özellikle krom, nikel ve molibden gibi alaşım elementlerinin varlığı, borür tabakalarının büyüme kinetiğini ve sonuçta ortaya çıkan faz bileşimini belirlemede çok önemli bir rol oynar.

Borlama sırasında mikroyapısal değişim, karmaşık difüzyon mekanizmaları ve faz dönüşümlerini içerir. İlk olarak, bor atomları çelik yüzeyinden difüze olur ve demirle reaksiyona girerek yüzeyde FeB oluşturur, ardından FeB ve alt tabaka arasındaki ara yüzde Fe_2B oluşur. Bu fazların göreceli kalınlık oranı borlama koşullarına bağlıdır ve belirli özellikleri optimize etmek için kontrol edilebilir (Bindal ve Erdemir, 1996). Borür tabakalarının iğne benzeri veya testere dişi morfolojisi, alt tabaka ile mükemmel mekanik kenetlenme sağlar ve uygulanan kaplamalara kıyasla üstün yapışma sağlar.

Borlama yoluyla elde edilen mekanik özelliklerin iyileştirilmesi, yüzey sertliğinin iyileştirilmesinin ötesine geçer. Borür tabakalarının oluşumu, son derece sert yüzeyden dayanıklı alt tabaka çekirdeğine kademeli bir sertlik geçişi yaratarak, aşınma direnci ve kırılma tokluğunun optimal bir kombinasyonunu sağlar (Kayali vd., 2013). Bu karakteristik sertlik profili, yüksek temas gerilmeleri altında tabaka parçalanması veya yüzeyden ayrışma riskini en aza indirir, böylece borlanmış bileşenleri zorlu tribolojik uygulamalar için uygun hale getirir.

Borlanmış yüzeylerin tribolojik performansı, demir borür fazlarının benzersiz özellikleri nedeniyle olağanüstüdür. Borür bileşiklerinin yüksek sertliği, aşındırıcı aşınmaya karşı mükemmel direnç sağlarken, kimyasal kararlılıkları değişen çevre koşulları altında tutarlı performans sağlar. Borlama ile elde edilebilen pürüzsüz yüzey kaplaması, sürtünme katsayılarının azalmasına ve yağlama etkinliğinin artmasına katkıda bulunur (Taktak, 2007).

Ayrıca, borür tabakaları ile alt tabaka arasındaki metalürjik bağ, uygulanan yüzey işlemlerinde meydana gelebilecek kaplamanın yüzeyden kalkması ile ilgili endişeleri ortadan kaldırır. Son araştırmalar, borlamanın faydalı sıkıştırıcı artık gerilmeler oluşturarak ve gerilme yoğunlaşma bölgelerini ortadan kaldırarak işlenmiş bileşenlerin yorulma direncini önemli ölçüde artırabileceğini göstermiştir (Campos-Silva vd., 2012).

Yüzey işleme teknolojilerindeki son gelişmeler, farklı işleme yöntemlerinin avantajlarını birleştiren hibrit yaklaşımların araştırılmasına yol açmıştır. Lazer destekli borlama, lazer ısıtmayı geleneksel termokimyasal difüzyon süreçleriyle birleştiren yeni bir tekniktir. Geleneksel borlama, uzun süreli fırın ısıtmasına dayanırken, lazer destekli yöntemler, lazer sistemlerinin yüksek enerji yoğunluğu ve hassas kontrol yeteneklerini kullanarak lokalize ısıtma ve hızlandırılmış difüzyon kinetiği sağlar (Li ve Lawrence, 2001). Bu yaklaşım, seçici alan işleme, daha kısa işlem süreleri ve termal döngüler üzerinde daha iyi kontrol sağlar.

Ancak, lazer teknolojisi ile kutu borlama yöntemlerinin birleşimi literatürde büyük ölçüde araştırılmamıştır. Lazer ısıtma ile paket sementasyon borlamanın entegrasyonu, geleneksel yöntemlerin avantajlarını korurken sınırlamalarını potansiyel olarak aşabilecek yeni bir yaklaşım sunmaktadır. Böyle bir hibrit süreç, hassas sıcaklık kontrolü, lokalize tedavi yetenekleri, azaltılmış enerji tüketimi ve kontrollü termal değişimleri aracılığıyla özelleştirilmiş yüzey özellikleri oluşturma yeteneği sunabilir.

Bu araştırma, Sleipner soğuk işleme takım çeliği için lazer destekli kutu borlama uygulamasının öncülüğünü yapmakta ve yüzey işleme teknolojilerinin gelişmesine önemli bir katkı sağlamaktadır. Bu yenilikçi yaklaşımın, geleneksel yöntemlere göre birçok avantaj sağlaması beklenmektedir. Bunlar arasında şunlar sayılabilir: hızlandırılmış difüzyon kinetiği sayesinde daha kısa işlem süreleri, programlanabilir lazer parametreleri sayesinde borür tabakası özelliklerinin hassas kontrolü, karmaşık geometriler için seçici alan işleme kabiliyeti, lokalize ısıtma sayesinde artırılmış işlem verimliliği ve optimize edilmiş özellik dağılımlarına sahip gradyan mikro yapıları oluşturma potansiyeli. Paket sementasyonun düzgün bor tedariki ile lazer ısıtmanın hassasiyeti ve kontrolünün birleşimi, üstün performans özelliklerine ve gelişmiş işlem esnekliğine sahip yeni nesil yüzey sertleştirme işlemlerinin geliştirilmesi için fırsatlar sunmaktadır.

Sonuç olarak, borlama yüzey sertleştirme yöntemleri, elik bileşenlerin tribolojik ve mekanik özelliklerini iyileştirmek için son derece etkili tekniklerdir. Son derece sert demir borür tabakalarının oluşumu, mükemmel alt tabaka yapışması ve kontrollü mikro yapısal özelliklerle birleştiğinde, borlama zorlu endüstriyel uygulamalar için ideal bir seçim haline gelir. Geleneksel kutu borlama yöntemlerinden gelişmiş plazma destekli tekniklere kadar çeşitli borlama yöntemleri, belirli performans gereksinimlerini karşılamak için işlem parametrelerinin optimize edilmesine olanak tanır. Bu çalışmada incelenen yenilikçi lazer destekli kutu borlama yaklaşımı, yüzey işleme teknolojisinde önemli bir ilerlemeyi temsil eder ve gelişmiş işlem kontrolü, iyileştirilmiş verimlilik ve üstün yüzey özelliği uyarlama yetenekleri sunar (Keddam, 2004).



4. LİTERATÜR TARAMASI

Borlama yüzey işlemi, demir içeren malzemelerin tribolojik ve mekanik özelliklerini iyileştiren etkili bir yöntem olarak son yıllarda büyük ilgi görmektedir. Bu termokimyasal difüzyon işlemi, alt tabaka malzemesinin yararlı kütle özelliklerini korurken, yüzeyde son derece sert borür tabakaları oluşturur. Borlama uygulamalarına olan ilginin artması, işlem mekanizmalarını anlamaya, işlem parametrelerini optimize etmeye ve işlem verimliliğini ve etkinliğini artırmaya yönelik yeni yaklaşımlar keşfetmeye yönelik kapsamlı araştırma çabalarına yol açmıştır.

Milinoić ve arkadaşları, paket borlama işlemi sırasında farklı karbon çeliklerinin büyüme kinetiğini araştırmış ve bor difüzyonu için aktivasyon enerjilerini belirlemiştir. Çalışmaları, C15 çeliğinde elementel borun frekans faktörü D_0 ve difüzyon aktivasyon enerjisi Q 'nun sırasıyla $3,17 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ve $194,80 \text{ kJ/mol}$ olduğunu ortaya koymuştur. Araştırmacılar, borür tabakasının kalınlığının borlama süresi ile arttığını, ancak büyüme hızının işlem süresi uzadıkça önemli ölçüde azaldığını göstermiştir. Bulguları, karbon çeliklerinde borür tabakasının oluşumunu yöneten kinetik mekanizmaların temelini anlamaya yardımcı olmuştur (Milinoić vd., 2022).

Da Costa Aichholz ve arkadaşlar, tek fazlı demir borür (Fe_2B) tabakaları üretmek için toz paket borlama işlemi kullanarak borlanmış AISI 4140 çeliğinin tribokorozyon davranışını kapsamlı bir şekilde araştırmışlar. Araştırmaları, borlanmış yüzeylerin tribokorozyon testleri sırasında borlanmamış numunelere kıyasla önemli ölçüde daha düşük aşınma oranları ve daha düşük sürtünme katsayıları sergilediğini göstermiştir. Çalışma, tek Fe_2B tabakalarının tribolojik uygulamalarda üstün performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Demir borür tabakası, koruyucu tabakanın daha yüksek sertliği ve kimyasal inertliği nedeniyle aşınma direncinde önemli ölçüde artış göstermiştir (da Costa Aichholz vd., 2018).

Kumaravel ve Arunkumar, macun yöntemi ile borlama yoluyla geliştirilmiş EN19 çeliğinin aşınma özelliklerini araştırmışlar. Araştırmalarında, kaplanmış numunelerin aşınma davranışını belirlenen standartlara göre değerlendirmek için pin-on-disc tribometre testi kullanmışlar. Çalışma, borlama işleminin dişli ve mil imalatı gibi endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan EN19 çeliğinin aşınma özelliğini önemli ölçüde iyileştirdiğini

göstermiştir. Araştırmacılar, bor kaplı tabakanın yüksek yüzey sertliği ve düşük sürtünme katsayısının, yapışma, tribo-oksidasyon ve yüzey yorgunluğu gibi birincil aşınma davranışlarının iyileştirilmesinde başarılı sonuçlar sağladığı sonucuna varmışlardır (Kumaravel ve Arunkumar, 2018).

Orihel ve arkadaşları, 1173–1323 K sıcaklık aralığında 1 ila 10 saat süren Sleipner çeliğinin paket borlanmasına ilişkin bugüne kadarki en kapsamlı çalışmayı gerçekleştirdiler. Araştırmaları, borlanmış tabakaların faz bileşimini belirlemek için taramalı elektron mikroskobu ve X-ışını kırınım analizi yoluyla ayrıntılı mikro yapısal analizleri içermektedir. Araştırmacılar, borür tabakalarının FeB ve Fe₂B fazlarından oluştuğunu ve FeB'nin toplam tabaka kalınlığının sadece %32'sini oluşturduğunu bulmuşlar. Bu, FeB'nin tipik olarak yaklaşık %50'sini oluşturduğu diğer yüksek kromlu takım çeliklerinden farklıdır. Ayrıca, EDS haritalama kullanarak borlama sırasında elementlerin yeniden dağılımını araştırmışlar ve borlama işlemi sırasında alaşımlı çeliklerde tipik olarak görülen bir fenomen olarak krom ve silikonun yeniden dağılımını belirlediler (Orihel vd., 2024).

Škamat ve arkadaşları, alternatif bir yüzey sertleştirme işlemi olarak, eklemeli imalatla üretilmiş 18Ni-300 maraging çelik parçaların lazer borlanmasını araştırmışlar. Araştırmaları, numunelerin yüzeylerinin amorf bor macunu ile kaplanmasını ve ardından çeşitli güç yoğunlukları ve ısı girdileriyle CO₂ lazer kullanılarak lazer işlemi uygulanmasını içermektedir. Çalışma, modifiye edilmiş tabakaların mikro yapısının, ~630–780 HK_{0,5} sertlikteki hipoeutektik mikro yapıdan süper ince lameller nanoeutektik (~1000–1030 HK_{0,2}) ve daha sonra mikron altı boyutlu dendritik borür yapıya (~1770 HK_{0,2}) evrimleştiğini ortaya koymuştur. Araştırmacılar, lazer borlama tekniğinin, yaşlandırma öncesinde yüzey sertliğini temel malzemeye kıyasla üç katına, yaşlandırma sonrasında ise 2,3 katına çıkardığını göstermiştir (Škamat vd., 2022).

Kulka ve arkadaşları, 316L çeliğin bor ve nikel, krom ve kobalt gibi çeşitli metalik elementlerle lazerle yüzey alaşımını incelemişlerdir. Araştırmalarında, yüzey alaşımlı katmanlar oluşturmak için 1,43 ila 1,56 kW arasında değişen farklı lazer ışını güçleri ve belirli tarama parametreleri kullanmışlardır. Araştırma, lazer yüzey alaşımlama parametrelerinin uygun şekilde seçilmesinin, mikro çatlaklar ve gaz gözenekleri gibi tipik lazer işleme kusurlarından arınmış, kabul edilebilir kalitede yüzey katmanlarının oluşumuna

yol açtığını göstermiştir. Çalışma, kusursuz katmanlar elde etmek için en az 0,37'lik bir seyreltme oranının gerekli olduğunu ortaya koymuştur (Kulka vd., 2020).

Yang ve arkadaşları, hava püskürtmeli bileme ile desteklenen borlama işlemiyle H13 çeliğinin geliştirilmiş borlama kinetiği ve yüksek sıcaklık aşınma direncini araştırmışlar. Araştırmaları, hava püskürtmeli bileme ile üretilen nano yapıli yüzey tabakasının, çift katmanlı borlama işlemiyle çok daha kalın borlama tabakalarının sentezlenmesini sağladığını göstermiştir. Çalışma, bilyalı dövme işlemine tabi tutulmuş numuneler için bor difüzyonunun aktivasyon enerjisinin 227,4 kJ/mol olduğunu ortaya koymuştur. Bu değer, kaba taneli muadillerinin 260,4 kJ/mol değerinden önemli ölçüde düşük olup, yüzey nano yapılandırma yoluyla borlama kinetiğinin arttığını göstermiştir (Yang vd., 2016).

Hu ve arkadaşları, toz paket borlama işlemi kullanarak CoCrFeNiMn yüksek entropi alaşımının mikro yapısı ve mekanik özellikleri üzerinde borlama işleminin etkisini araştırmışlar. Araştırmalarında, borlama tabakasının kalınlığının zaman ve sıcaklıkla değişimi incelenmiş, yüksek entropili alaşımda B elementinin frekans faktörü D_0 ve difüzyon aktivasyon enerjisi Q sırasıyla $9,15 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ve 206,93 kJ/mol olarak hesaplanmıştır. Çalışma, yüzey mikro sertliğinin $23,8 \pm 1,4 \text{ GPa}$ 'ya önemli ölçüde arttığını, sürtünme katsayısının ise 0,86'dan 0,48~0,61'e düştüğünü göstermiştir (Hu vd., 2023).

Kayalı ve arkadaşları, çeşitli işlem koşulları altında borlanmış AISI 316L paslanmaz çeliğin korozyon ve aşınma davranışlarını araştırmışlar. Araştırmaları, borlama sıcaklığı arttıkça hem kuru hem de ıslak ortamlarda aşınma oranının azaldığını göstermiştir. Çalışma, borlama işleminin AISI 316L'nin yüzey sertliğini artırarak ve sürtünme katsayısını azaltarak aşınma direncine olumlu katkı sağladığı sonucuna varmışlardır. Ancak araştırmacılar, borlama işleminin belirli ortamlarda korozyon direncine bazı olumsuz etkileri olduğunu da belirtmişlerdir (Kayalı vd., 2013).

Medvedovski ve arkadaşları, kuyu içi petrol üretim ortamlarını simüle eden şiddetli erozyon-aşınma-korozyon koşulları altında demir borür kaplamaların performansı üzerine kapsamlı bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Araştırmaları, silika kumu ve tuzlar içeren su-yag bulamacının yüksek hızda erozyon akışına tüp bölümlerini maruz bırakmak için özel olarak tasarlanmış aşınma test ekipmanını içermektedir. Çalışma, borlanmış yüzeylerin mekanik

temasının minimum olduğu alanlarda pratik olarak bozulmadan kaldığını ve demir borür tabakasının mikro sertliğinin testten sonra orijinal seviyesinde (1600–1800 HK_{0.1}) kaldığını göstermişlerdir (Medvedovski vd., 2021).

Béjar ve Henríquez, boraks sulu çözeltileri kullanarak 4340, 4140, 1045, 3215 ve 1020 çelikleri dahil olmak üzere çeşitli çelik türlerinin plazma elektroliz borlama işlemlerini araştırmışlar. Araştırmaları, çelik numunelerin sertliğini önemli ölçüde artırmak için on beş dakikalık işlemlerin yeterli olduğunu göstermiştir. Çalışma, geleneksel borlama işlemlerinden farklı olarak, kromun bor difüzyonunu teşvik ederken karbon ve nikelin süreci karmaşılaştırmasıyla, yüzeyden alt tabakaya kademeli bir sertlik geçişi elde edildiğini ortaya koymuştur (Béjar ve Henríquez, 2009).

Rabeeh araştırmasında, yeni bir yüksek basınç tekniği kullanarak düşük karbonlu çeliğin ultra hızlı borlama ve yüzey sertleştirme işlemlerini araştırmışlardır. Araştırma, çelik numunelerin borik asit ve boraks ile doldurulması, özel bir sızdırmaz fiktürde 10 ton basınç altında 1050 °C'de 30 dakika ısıtılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışma, yaklaşık 1800 HV sertlik değerine ve 130–180 µm derinliğe sahip FeB ve Fe₂B fazlarından oluşan yüzey borür tabakaları elde etti ve hızlı, ekonomik yüzey sertleştirme işlemlerinin potansiyelini göstermiştir (Rabeeh, 2015).

Çeşitli çelik türlerinin borlanmasına ilişkin kapsamlı araştırmalara rağmen, yüksek performanslı takım çeliklerine lazer destekli borlama tekniklerinin uygulanmasına ilişkin mevcut literatürde önemli boşluklar bulunmaktadır. Geleneksel paket borlama, Sleipner çeliği için araştırılmış olsa da lazer ısıtma ile geleneksel kutu borlama yöntemlerinin kombinasyonunu inceleyen kapsamlı bir çalışma bulunmamaktadır. Bu araştırma, Sleipner soğuk iş takım çeliğine lazer destekli kutu borlama uygulamasını inceleyerek bu önemli boşluğu ele almaktadır. Bu uygulama, geleneksel yöntemlere kıyasla üstün işlem verimliliği ve gelişmiş yüzey özelliği kontrolü sunma potansiyeline sahiptir.

5. MATERİYAL VE METOT

Bu bölümde, Sleipner takım çeliği üzerine lazer kaplama ile bor tabakası oluşturma işlemi, uygulanan ısıtma işlemleri ve tribolojik test yöntemleri açıklanmaktadır. Deneysel çalışma, farklı lazer parametrelerinin kaplama özelliklerine ve aşınma performansına etkileri sistematik olarak incelenmiştir.

5.1. İş Parçası Malzemesi

Aşınma direnci, tokluğu ve termal kararlılığı nedeniyle altlık malzemesi olarak Sleipner soğuk iş takım çeliği seçilmiştir. Bu birinci sınıf takım çeliği, toz metalurjisi işlemleri ile üretilmekte ve zorlu tribolojik uygulamalar için uygun, homojen dağılımlı karbürler elde edilmektedir. Sleipner çelik altlığının kimyasal bileşimi Tablo 5.1'de sunulmaktadır.

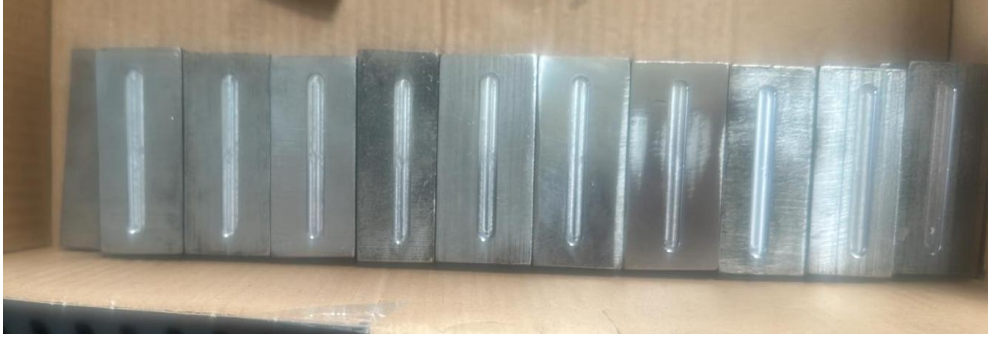
Tablo 5.1: Altlık malzeme olarak kullanılan Sleipner çeliğinin kimyasal kompozisyonu (%)

C	Si	Mn	Cr	Mo	V
0.90	0.90	0.50	7.8	2.5	0.50

5.2. Yüzey Hazırlığı ve Kanal İşleme

Altlık malzemeler, boyutsal doğruluk ve yüzey tutarlılığını sağlamak için hassas CNC işleme kullanılarak 10 mm x 20 mm x 50 mm standart boyutlarına işlenmiştir. Homojen toz dağılımını kolaylaştırmak ve sonraki lazer kaplama işlemi sırasında metalurjik bağlanmayı desteklemek için CNC frezeleme işlemleri kullanılarak altlık malzeme yüzeyinde sistematik olarak kanallar oluşturulmuştur. İşleme sürecinde, hassas kanal geometrisi elde etmek ve kalıntı gerilmeleri ile yüzey hasarını en aza indirmek için optimize edilmiş kesme parametrelerine sahip karbür uç freze kullanılmıştır. Lazer işleme sırasında yeterli malzeme desteği ve düzgün ısı dağılımı sağlamak için kanal boyutları 5,0 mm genişlik, 1,5 mm derinlik olacak şekilde ayarlanmıştır (Şekil 5.1). Frezeleme işlemi tamamlandıktan sonra tüm numuneler işleme artıklarını ve yüzey kirleticilerini gidermek için 15 dakika boyunca asetonda ultrasonik temizlemeye tabi tutulmuş, ardından lazer kaplama için optimum yüzey koşullarını elde etmek amacıyla etanol ile yağdan arındırma ve basınçlı hava ile kurutma

işlemleri uygulanmıştır.



Şekil 5.1: Kanal açma işlemi tamamlanmış numuneler

5.3. Lazer Kaynak Makinası Özellikleri

İşlem esnasında Otekso marka maksimum 3KW lazer gücüne sahip lazer kaynak makinası kullanılmıştır (Şekil 5.2).



Şekil 5.2: Kullanılan kaynak makinasının resmi ve teknik özellikleri.

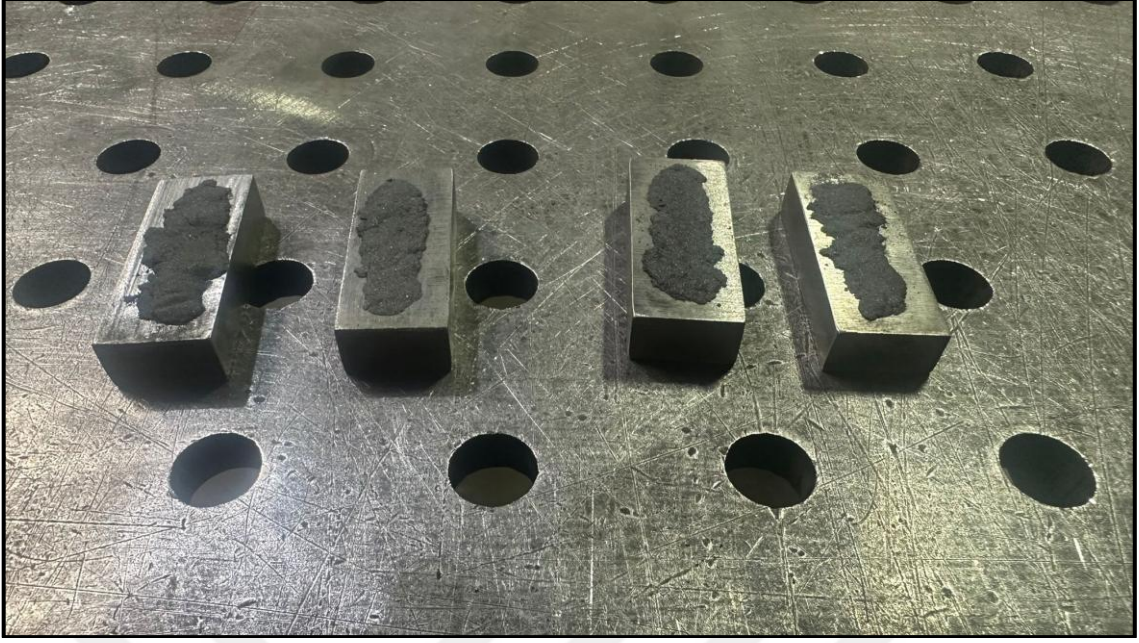
Otomatik çift tel besleme sistemine sahip lazer kaynak makinası, 10 metre fiber optik



Şekil 5.4: Numunelere lazer ışını ile kaplamaların uygulanma anı.



Şekil 5.5: 1500 W lazer gücünde a) 20 Hz ve b) 40 Hz salınım frekansı ile kaplanmış numuneler.



Şekil 5.6: Lazer ile kaplama öncesi altlık malzemelere uygulanmış bor macunu.

5.4. Isıl İşlem Süreci

Isıl işlemin malzeme özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak için referans numunelerden biri ısıtılma işlemine tabi tutulmuştur. Bu numune, oksitlenmeyi önlemek için koruyucu argon atmosferi altında vakumlu fırında dakikada 10 °C kontrollü hızla 520 °C'ye ısıtılmıştır. Numune 520 °C sıcaklıkta gerilim giderme ve mikroyapısal dengeyi sağlamak için 2 saat bekletilmiştir. Ardından termal gerilimleri en aza indirmek ve çatlamayı önlemek için fırında dakikada yaklaşık 5 °C hızla oda sıcaklığına soğutulmuştur (Şekil 5.7). Bu ısıtılma işlemi, lazer kaplama sonrası bir işlem adımı değil, sadece ısıtılma işleminin etkilerini karşılaştırmalı olarak değerlendirmek amacıyla bağımsız bir numune üzerinde uygulanmıştır. 1500-20, 1500-40, 1800-20, 1800-40 işlem parametrelerine sahip bor kaplanmış numunelere herhangi bir ısıtılma işlemi uygulanmamıştır.



Şekil 5.7: Isıl işlem uygulanmış numunenin görüntüsü.

5.5. Yüzey işlemleri

Lazer kaplama ve ısıtım işlem süreçlerinin ardından, tüm numuneler tribolojik test için tutarlı bir yüzey topografyası elde etmek amacıyla sistematik yüzey hazırlığına tabi tutulmuştur. Yüzey hazırlama süreci, uygun karbür freze uç ile CNC dik işleme tezgahında kaba temizlik işlemi yapılmış daha sonra 60'tan 2500 grit'e kadar kademeli olarak azalan tane boyutlarına sahip silisyum karbür (SiC) aşındırıcı kağıtlar kullanılarak ince yüzey işlemi gerçekleştirilmiştir.

5.6 Aşınma Davranışı Testleri

Tribolojik testler, farklı temas geometrileri ve gerilim durumları altında aşınma mekanizmalarını kapsamlı bir şekilde değerlendirmek için ball-on-disc ve pin-on-disc test düzenekleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ball-on-disc test düzeneğinde ileri-geri hareket sistemi, pin-on-disc düzeneğinde ise dairesel hareket sistemi uygulanmıştır. Sürtünme katsayısı ölçümleri, bilgisayarda yüklü özel yazılım programı aracılığıyla anlık olarak kaydedilmiştir.

Aşındırıcı bilye olarak, üstün sertlik özellikleri (yaklaşık 19 GPa), kimyasal kararlılığı ve test koşulları altında minimal aşınma karakteristikleri nedeniyle 6 mm küresel geometriye sahip tungsten karbür-kobalt (WC-Co) malzemesi tercih edilmiştir. Her bir testten sonra bilyenin kullanım yönü değiştirilerek bir sonraki deneyler gerçekleştirilmiş ve böylece aynı bilyenin farklı yüzey bölgeleri kullanılmıştır. Test edilen numuneler altı farklı kategoride hazırlanmıştır: işlem görmemiş (Untreated-UT), ısıtım işlem görmüş (Heat treated-HT) numune ve dört farklı lazer kaplama parametresiyle elde edilen numuneler (1500-20, 1500-40, 1800-20 ve 1800-40) şeklinde sınıflandırılmıştır. Tribolojik test parametreleri ve koşulları Tablo 5.2'de detaylı olarak verilmiştir.

Aşınma hacim kaybı ve aşınma oranları 3D optik profilometre ile ölçülerek belirlenmiştir. Sürtünme katsayısı değerleri, bilgisayar ortamında kaydedilen veriler Excel programı kullanılarak hesaplanmıştır. Aşınma yüzeylerinin incelenmesi taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) ile gerçekleştirilerek aşınma mekanizmaları karakterize edilmiştir. Deneysel verilerin güvenilirliğini korumak amacıyla tüm testler üç kez tekrarlanmıştır.

Tablo 5.2: Tribolojik test parametreleri ve koşulları.

Parametre	Değer
Test düzeneği	Ball-on-disc, Pin-on-disc
Normal yük	10 N, 20 N
Kayma hızı	0,034 m/s
Test süresi	30 dakika
Toplam kayma mesafesi	61,2 m
Test sıcaklığı	Oda Sıcaklığı (25 °C), Yüksek Sıcaklık (450 °C)
Test ortamı	Kuru kayma koşulları
Test numuneleri	UT, HT, 1500-20, 1500-40, 1800-20, 1800-40
Aşındırıcı bilye	WC-Co (Tungsten Karbür-Kobalt)
Bilye çapı	6 mm
Bilye sertliği	~19 GPa

5.7 Mikroyapısal Karakterizasyon

Lazer kaplama işleminin mikroyapısal etkilerini incelemek için seçilen numuneler standart metalografik hazırlama işlemlerine tabi tutulmuştur. Numuneler kesitlere ayrılarak iletken bakelite içinde monte edilmiş ve ardından 240-2500 grit silisyum karbür zımpara kağıtları ile kademeli olarak zımparalanmıştır. Son parlatma işlemi 3 µm ve 1 µm elmas pasta kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Mikroyapısal incelemeleri için Nital çözeltisi (etil alkolde %2 nitrik asit) kullanılarak 30 saniye kimyasal dağlama işlemi uygulanmıştır. Dağlama işlemi tamamlandıktan sonra numuneler etil alkol ile durulanarak reaksiyon durdurulmuştur.

Kaplama kalınlığı, ara yüz bağlanması ve mikroyapısal özellikler optik mikroskop ile incelenmiştir. Detaylı mikroyapısal analizler için taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmış ve element dağılımı enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) ile belirlenmiştir.

5.8. Mikrosertlik Ölçümleri

Sleipner altlık malzemesi ve lazer kaplama tabakasının mekanik özelliklerini değerlendirmek için Vickers mikrosertlik testleri gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümleri, metalografik olarak hazırlanmış numune kesitleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Mikrosertlik testleri, 100 gf yük altında 15 saniye bekleme süresi ile yapılmıştır. Altlık malzemedan kaplama yüzeyine kadar farklı bölgelerde ölçümler alınarak sertlik profili oluşturulmuştur. Her bölgede en az beş ölçüm yapılarak ortalama sertlik değerleri hesaplanmıştır. Ölçümler kaplama tabakası, kaplama-altlık ara yüzü ve Sleipner altlık malzemesi bölgelerinde sistematik olarak gerçekleştirilerek lazer işleminin sertlik dağılımına etkisi belirlenmiştir.

5.9. X-Işını Kırınımı Analizi

Lazer kaplama işlemi sonrasında oluşan bor tabakasının faz yapısını belirlemek için X-ışını kırınımı (XRD) analizleri gerçekleştirilmiştir. XRD ölçümleri 2θ açısı 20° ile 90° arasında tarama yapılarak gerçekleştirilmiştir. Kırınım desenlerinden hareketle kaplama tabakasında bulunan borid fazları, metaller arası bileşikler ve kalıntı fazlar belirlenmiştir. XRD sonuçları, mikroyapısal gözlemler ve sertlik ölçümleri ile karşılaştırılarak işlem parametrelerinin faz oluşumuna etkisi karakterize edilmiştir.

6. BULGULAR TARTIŞMA

Bu bölümde, Sleipner soğuk iş takım çeliği altlık malzemesi üzerine farklı lazer parametreleri kullanılarak gerçekleştirilen bor kaplama işlemlerinin sonuçları kapsamlı bir şekilde değerlendirilmektedir. Çalışma kapsamında elde edilen numunelerin mikroyapısal özellikleri, mekanik performansları ve tribolojik davranışları sistematik olarak incelenmiş ve analiz edilmiştir. Bu doğrultuda mikroyapı analizleri, mikrosertlik ölçümleri, X-ışını kırınımı (XRD) analizleri ve farklı sıcaklık koşullarında gerçekleştirilen aşınma testleri ile elde edilen bulgular detaylı olarak sunulmakta ve literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırmalı olarak tartışılmaktadır.

6.1. Mikroyapı Analiz Değerlendirme Sonuçları

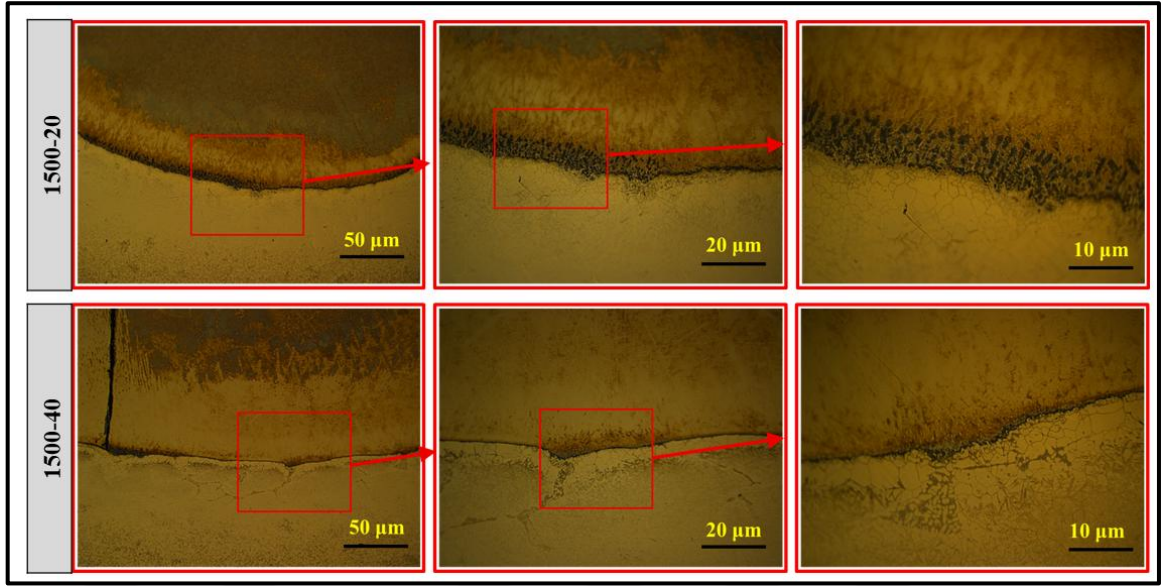
Sleipner çelik altlık malzemesi üzerindeki lazer kaplama ile elde edilen bor kaplamalarının mikroyapısal özelliklerini değerlendirmek için 200x, 500x ve 1000x büyütmelerde optik mikroskopi incelemeleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.1 ve Şekil 6.2). Mikroskop görüntüleri, bor tozu ile lazer kaplama işlemi sonucunda oluşan kaplama tabakalarının varlığını ortaya koymaktadır.

1500 W – 20 Hz koşulu değerlendirildiğinde, optik mikroskop görüntüleri, Sleipner altlık malzemesi yüzeyinde kaplama tabakasının oluştuğunu göstermektedir. Düşük büyütmede (50 μm ölçeğinde), işlenmiş tabaka ile altlık malzemesi arasındaki ara yüzün görüldüğü genel kaplama yapısı değerlendirilebilmektedir. Kaplamanın lazer işlemi ile başarıyla elde edildiği gözlenmektedir.

Yüksek büyütme incelemelerinde (20 μm ve 10 μm ölçeklerinde), kaplama mikroyapısının ayrıntılı görüntüleri elde edilmiştir. İşlenmiş bölge, etkilenmemiş altlık malzemesine kıyasla mikroyapısal değişiklikler göstermekte ve bu durum yüzey bölgesinin lazer ile başarılı bir şekilde modifiye edildiğini göstermektedir.

1500 W – 40 Hz koşulu değerlendirildiğinde, 1500 W – 40 Hz işleme koşulunda benzer kaplama oluşumu gözlenmiştir. Mikroskop görüntüleri, bor tozu ile lazer kaplama işlemi sonucunda oluşan modifiye edilmiş yüzey tabakasının varlığını göstermektedir. Kaplama

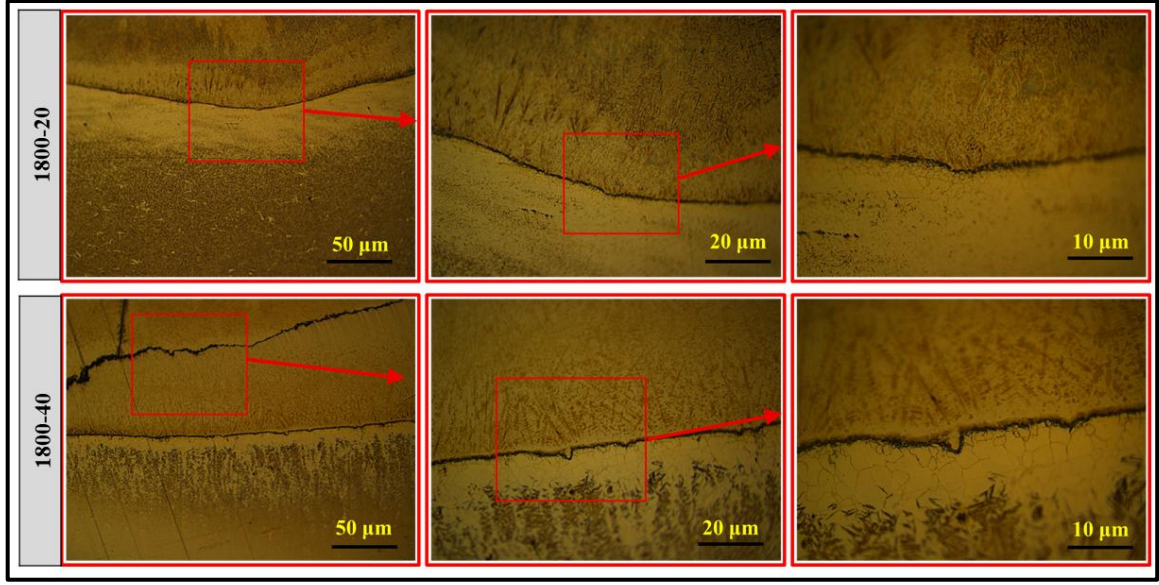
yapısı, incelenen tüm büyütme seviyelerinde lazer işleminin etkilerini sergilemektedir.



Şekil 6.1: 1500 W lazer gücünde farklı salınım frekanslarının mikroyapıya etkisi.

1800 W – 20 Hz koşulu değerlendirildiğinde, mikroskop görüntüleri yüksek lazer gücünün mikroyapısal etkilerini göstermektedir. Düşük büyütmede (50 µm ölçeğinde), kaplama tabakasının oluştuğu ancak 1500 W koşullarına kıyasla farklı bir mikroyapısal karakter sergilediği gözlenmektedir. Yüksek büyütme incelemelerinde (20 µm ve 10 µm ölçeklerinde), artan lazer gücünün mikroyapısal özelliklerde değişikliklere yol açtığı görülmektedir. İşlenmiş bölge, yüksek enerji girdisi sonucunda oluşan karakteristik mikroyapısal özellikler sergilemektedir.

1800 W – 40 Hz işlem koşulunda hem yüksek güç hem de yüksek salınım frekansının birleşik etkisi mikroyapısal gelişimde kendini göstermektedir. Mikroskop görüntüleri, bu parametre kombinasyonunun kendine özgü mikroyapısal karakteristikler oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Farklı büyütmelerdeki incelemeler (50 µm, 20 µm ve 10 µm), yüksek enerji girdisi ve artırılmış salınım frekansının mikroyapısal değişimlerde etkili olduğunu göstermektedir (Zhong vd., 2025). Kaplama tabakası oluşumu gerçekleşmiş olmakla birlikte, işlem parametrelerinin mikroyapısal özellikler üzerindeki etkisi belirgin şekilde gözlenmektedir.



Şekil 6.2: 1800 W lazer gücünde farklı salınım frekanslarının mikroyapıya etkisi.

6.2. Mikrosertlik Değerlendirme Sonuçları

Mikrosertlik ölçümleri, Şekil 6.3'te sunulduğu gibi, farklı işleme koşullarında yüzey sertliğinde önemli farklılıklar ortaya koymaktadır. İşlenmemiş (UT) Sleipner çelik altlık malzemesi, karakteristik martensitik matrisi ve düzgün dağılmış karbürleri ile bu soğuk iş takım çeliğinin teslim alınan durumunu temsil eden 338,7 HV temel sertlik göstermiştir.

Sleipner altlık malzemesinin ısıtılma işlemi (HT), sertlikte önemli bir artışla 700,5 HV'ye ulaşarak işlenmemiş duruma göre %107'lik bir iyileşme sağlamıştır. Bu iyileşme, martensitik yapı içinde gerilim giderme, karbür çökeltisi ve mikroyapısal optimizasyonu destekleyen 520 °C'deki kontrollü termal döngüye atfedilebilir.

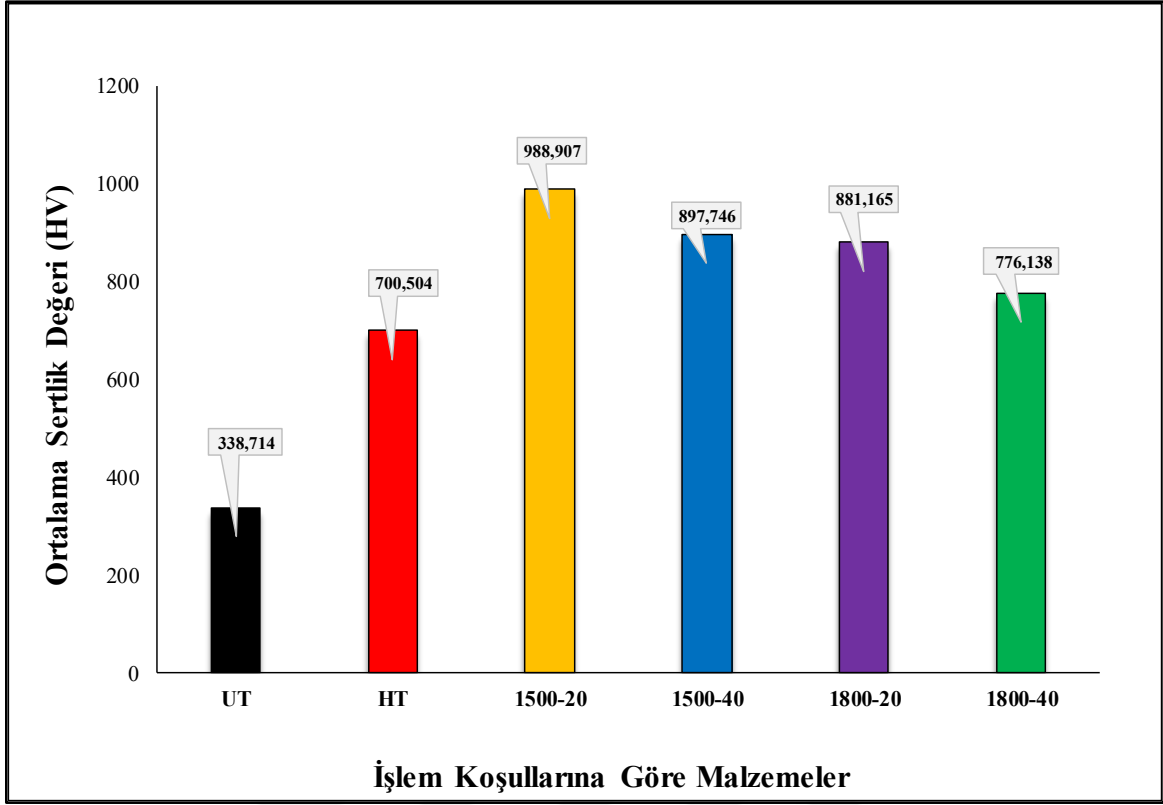
Lazer kaynağı ile bor kaplama, test edilen tüm işleme parametrelerinde dikkate değer sertlik iyileştirmeleri sağlamıştır. Bor kaplamalı numuneler arasında 1500-20 koşulu, borid tabaka oluşumu için optimum işleme koşullarını gösteren 988,9 HV ile en yüksek sertlik değerini göstermiş ve işlenmemiş duruma göre %192'lik dramatik bir artış sergilemiştir. Bu olağanüstü sertlik artışı, öncelikle demir boridler (Fe_2B , FeB) ve Sleipner altlık malzemesinden alaşım elementleri içeren kompleks boridler dahil olmak üzere sert borid fazlarının oluşumuna atfedilebilir (Kresser vd., 2023).

Sabit lazer gücünde (1500 W) salınım frekansının etkisi, 1500-20 ve 1500-40 koşulları karşılaştırıldığında açıkça görülmektedir. Daha yüksek salınım frekansı (40 Hz), daha düşük frekansa (20 Hz) kıyasla %9'luk bir sertlik azalmasına neden olarak 897,7 HV değeri vermiştir. Bu durum, artan salınım frekansının ısı dağılımını ve borid fazı oluşum kinetiğini etkileyebileceğini göstermektedir (Wang vd., 2025).

Daha yüksek lazer gücünde (1800 W), her iki salınım frekansı da 1500 W koşullarına kıyasla daha düşük sertlik değerleri vermiştir. 1800-20 koşulu 881,2 HV'ye ulaşırken (%160 artış), 1800-40 koşulu bor kaplamalı numuneler arasında en düşük sertliği 776,1 HV (%129 artış) ile göstermiştir. Bu eğilim, aşırı lazer gücünün altlık seyrelmesinde artışa yol açarak kaplama tabakasındaki borid fazlarının konsantrasyonunu azaltabileceğini ve potansiyel olarak mikroyapısal bütünlüğü etkileyebileceğini göstermektedir (Han vd., 2022).

Artan lazer gücü ve salınım frekansı ile birlikte sertlikte görülen sistematik azalma, 1500-20 parametre kombinasyonunun borid tabakası oluşumu için optimum koşullar sağladığını göstermektedir. Daha düşük güç ve frekans kombinasyonu, eritme ve katılaşma süreçleri üzerinde daha iyi kontrol sağlayarak daha homojen borid çökeltisi ve altlık seyrelmesinde azalma ile sonuçlanmaktadır (Deng vd., 2024).

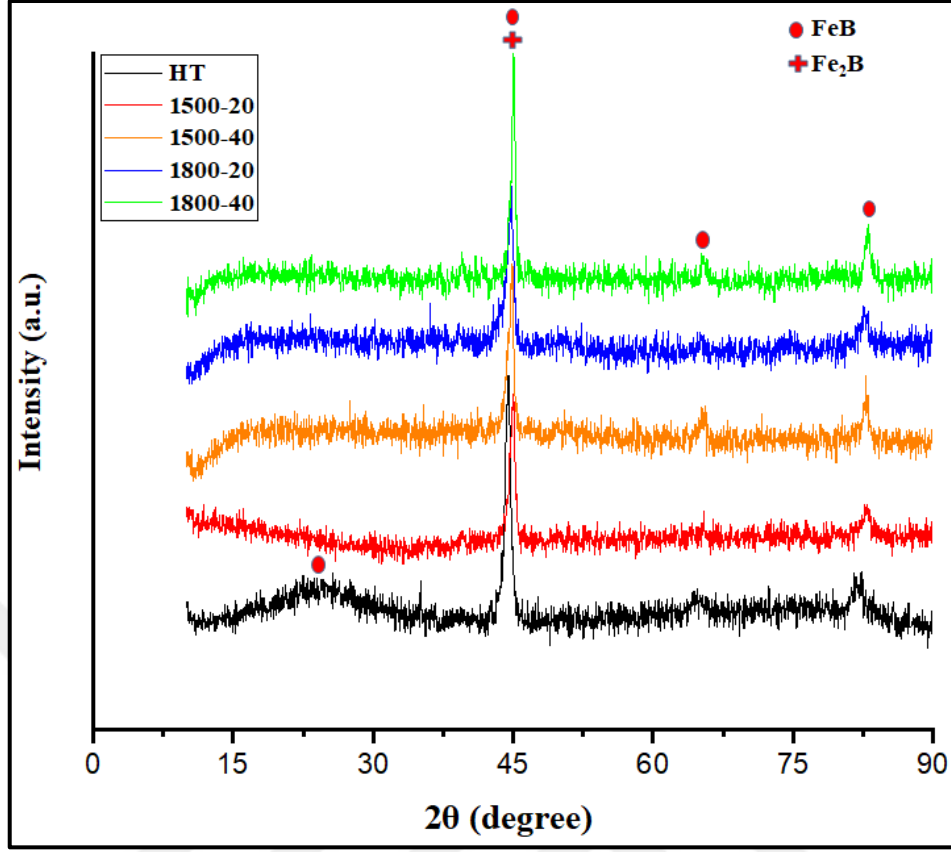
Tüm bor kaplama koşulları hem işlenmemiş hem de ısıtılmış Slepner çeliğine kıyasla üstün sertlik göstermiş ve bu durum lazer kaynağı ile bor kaplama işleminin yüzey sertleştirme uygulamaları için etkinliğini doğrulamıştır. Tüm lazer işleme koşulları için elde edilen 750 HV'yi aşan sertlik değerleri, tribolojik uygulamalarda gelişmiş aşınma direnci için kritik öneme sahip başarılı kaplama işlemini göstermektedir.



Şekil 6.3: Farklı işlem koşullarına göre mikrosertlik değerleri.

6.3. X-Işını Kırınımı Analizi

X-ışını kırınımı (XRD) analizleri, lazer kaynağı ile bor kaplama işlemi sonrasında oluşan faz yapılarını belirlemek amacıyla 20° ile 90° 2θ aralığında gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.4). XRD spektrumlarında, ısıtılmış (HT) numune ile lazer kaplamalı numuneler arasında belirgin spektral farklılıklar gözlenmiştir. Tüm lazer kaplama koşullarında (1500-20, 1500-40, 1800-20, 1800-40) FeB ve Fe₂B borid fazlarına ait karakteristik kırınım pikleri tespit edilmiştir. FeB fazı yaklaşık 45° 2θ açısında, Fe₂B fazı ise yaklaşık 85° 2θ açısında belirgin pikler göstermiştir. Lazer kaplama işlemi uygulanmış numunelerde benzer borid faz dağılımları gözlenmiş olmakla birlikte, farklı güç seviyeleri ve salınım frekanslarının pik şiddetlerinde küçük değişikliklere yol açtığı görülmüştür. XRD sonuçları, lazer kaynağı ile bor kaplama işleminin tüm parametre koşullarında başarılı FeB ve Fe₂B borid fazları oluşturduğunu ve bu fazların varlığının işlem parametrelerinden bağımsız olarak korunduğunu göstermektedir.

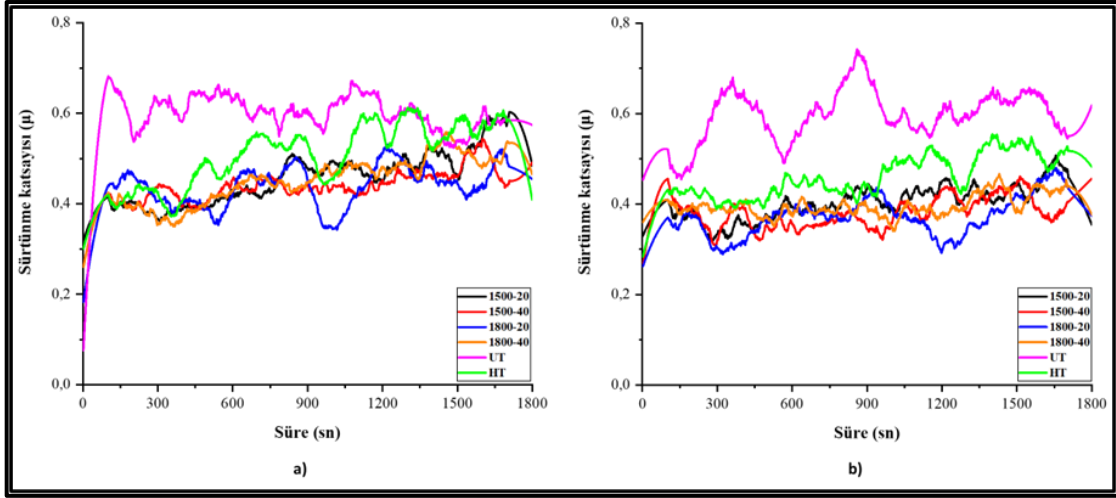


Şekil 6.4: Farklı lazer parametrelerinde XRD desenleri

6.4. Aşınma Testi Sonuçları

Bu bölümde, farklı işlem koşullarına tabi tutulan Sleipner çelik numunelerin tribolojik performansları kapsamlı olarak değerlendirilmektedir. Aşınma testleri, WC-Co bilye kullanılarak ball-on-disk aşınma aparatında ileri geri hareket modunda ve pin-on-disk yöntemiyle dairesel hareket modunda iki farklı sıcaklık koşulunda (oda sıcaklığı ve 450 °C) ve iki farklı normal yük altında (10 N ve 20 N) gerçekleştirilmiştir. Testler sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı değerleri, spesifik aşınma oranları ve aşınma sonrası yüzey morfolojileri sistematik olarak analiz edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda ısıl işlem görmemiş (UT), ısıl işlem görmüş (HT) ve farklı lazer parametreleriyle bor kaplanmış numunelerin tribolojik davranışları detaylı olarak incelenmiştir.

6.4.1. Sürtünme Katsayısı Sonuçları



Şekil 6.5: Oda sıcaklığında a) 10 N yük altında, b) 20 N yük altında numunelerin sürtünme katsayısının zamana bağlı değişimi.

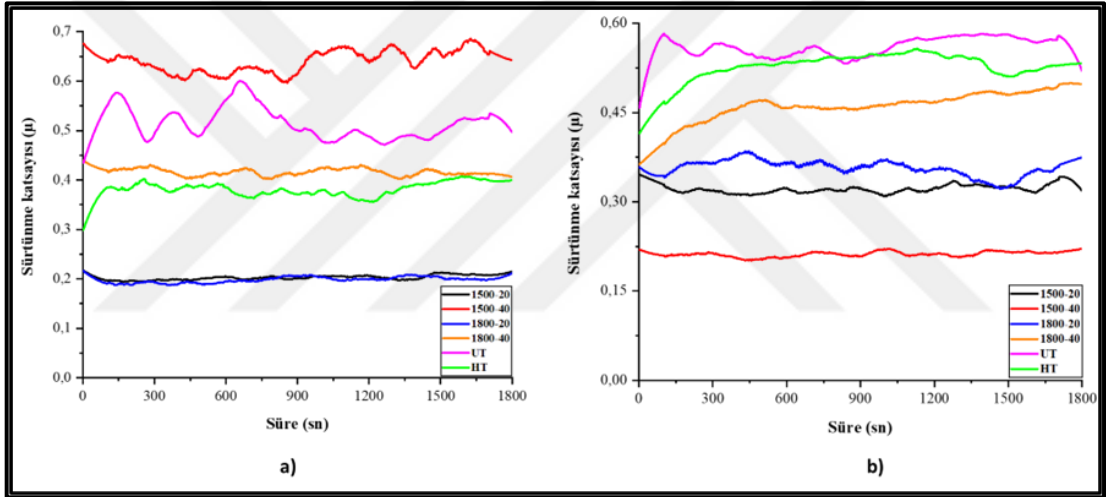
Şekil 6.5'te oda koşullarında malzemelerin zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimleri görülmektedir. Bu grafiği incelediğimizde sürtünme katsayısının başlangıçta arttığı daha sonrasında ise kararlı sayılabilecek bir düzeyde seyrettiği görülmektedir. Bu durum, ilk temas sırasında yüzeydeki pürüzlerin ya da zamanla oluşan düzensiz oksit tabakaların etkili olduğunu, zamanla sürtünmenin de etkisiyle temas yüzeyinin daha homojen bir hale geldiğini nispeten kararlı sayılabilecek bir hale geldiğini göstermektedir.

Isıl işlem görmemiş olan (UT) numunesi her iki yük durumunda da en yüksek sürtünme katsayısı değerlerini sergilemiştir. Şekil 6.5a'da 10 N yük altında UT numunesi yaklaşık 0,70 seviyesine kadar ulaşan sürtünme katsayısı ile ön plana çıkarken, HT numunesi yaklaşık 0,55 seviyelerinde kararlı hale gelmiştir. Bor kaplı numunelerin ise genel olarak 0,38–0,48 aralığında daha düşük ve kararlı sürtünme katsayıları gösterdiği belirlenmiştir. Şekil 6.5b'de 20 N yük altında sürtünme katsayılarının tüm numunelerde azaldığı gözlenmiştir. UT numunesi yine en yüksek değeri göstererek yaklaşık 0,62 seviyesine ulaşırken, HT numunesi yaklaşık 0,50 civarında seyretmiştir. Bor kaplamaya sahip numunelerde ise sürtünme katsayılarının 0,30–0,42 aralığında daha düşük seviyelerde kaldığı tespit edilmiştir. Isıl işlem görmemiş numunede oluşan bu durum yüzeyin diğerlerine nispeten yumuşak olması ve daha çok tutunmaya (adhezyon aşınmasına) maruz kalmasından dolayı olabileceği düşünülmektedir. Kuvvetin artmasıyla birlikte sürtünme katsayılarının da düştüğü görülmektedir (Liu vd., 2016). Bu durumun Eşitlik 1'deki bağıntı ile açıklandığını

belirtmişlerdir:

$$\mu = \alpha \frac{A}{F} + \beta \quad (1)$$

Bu bağıntıya göre yüzey molekül katsayısı olan α ve mekanik etki katsayısı olan β aynı test koşullarında sabittirler. A temas alanını, F yükü ve μ sürtünme katsayısını temsil eder. Bu denklem yük ile sürtünme katsayısı arasında ters orantılı, temas alanıyla ise doğru orantılı bir ilişki olduğunu gösterir. Benzer şekilde diğer araştırmacılar tarafından da artan kuvvetle beraber sürtünme katsayısının azaldığı rapor edilmiştir (Tyagi vd., 2011; Xu vd., 2014; Zou vd., 2021).



Şekil 6.6: 450 °C ortam sıcaklığında a) 10 N yük altında, b) 20 N yük altında numunelerin sürtünme katsayısının zamana bağlı değişimi.

Şekil 6.6’da 450 °C ortam şartlarında malzemelerin zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimleri görülmektedir. Grafikler incelendiğinde sıcaklığın etkisiyle malzemelerin daha nispeten yumuşayarak ve yüzeyde daha kaygan bir yapı oluşturduğu ve bu oluşan yapının sürtünme katsayısının oldukça kararlı bir şekilde seyretmesine neden olduğu söylenebilir. Daha az dalgalanmanın olduğu bu durumun temel sebebinin ısı etkisiyle koruyucu oksit tabaka oluşumunun daha hızlı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 6.6a’da 10 N yük altında, bor kaplama uygulanmamış UT numunesi yaklaşık 0,60 seviyelerinde seyreden en yüksek sürtünme katsayısını sergilemiştir. HT numunesinde bu değer yaklaşık 0,45 civarında kalırken, bor kaplamalı numuneler arasında en düşük sürtünme katsayısı değeri 1800-20 numunesinde yaklaşık 0,22 olarak ölçülmüştür. Diğer borlu numuneler ise

0,25–0,38 aralığında sürtünme katsayısı göstermiştir. Şekil 6.6b’de 20 N yük altında, sürtünme katsayısı değerlerinin genel olarak düştüğü gözlemlenmiştir. UT numunesi yaklaşık 0,52 seviyesinde kalırken, HT numunesi 0,48 civarında değerler göstermiştir. Bor kaplamalı numunelerde sürtünme katsayısı, test boyunca 0,20–0,42 aralığında daha düşük ve kararlı bir dağılım sergilemiştir. Özellikle 1500-40 numunesi bu yük altında en düşük ortalama sürtünme katsayısı ($\sim 0,21$) ile dikkat çekmiştir. Sürtünme katsayısı değerlerinin, hem ısıtıl işlem görmüş (HT) hem de ısıtıl işlem görmemiş (UT) numunelerde diğer numunelere nispeten daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu numunelerin yüzeyinde artan sıcaklıkla beraber daha fazla oksitlenme, adhezyon ve tutunma olduğu düşünülmektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, 450 °C ortam sıcaklığında sürtünme katsayısı değerlerinin hem UT hem de HT numunelerinde oda sıcaklığına göre daha düşük seviyelerde ve daha stabil bir seyir izlediği; bor kaplamalı numunelerde ise sıcaklığın etkisiyle kaygan yüzey oluşumunun daha belirgin hale gelerek sürtünmeyi anlamlı düzeyde azalttığı anlaşılmaktadır.

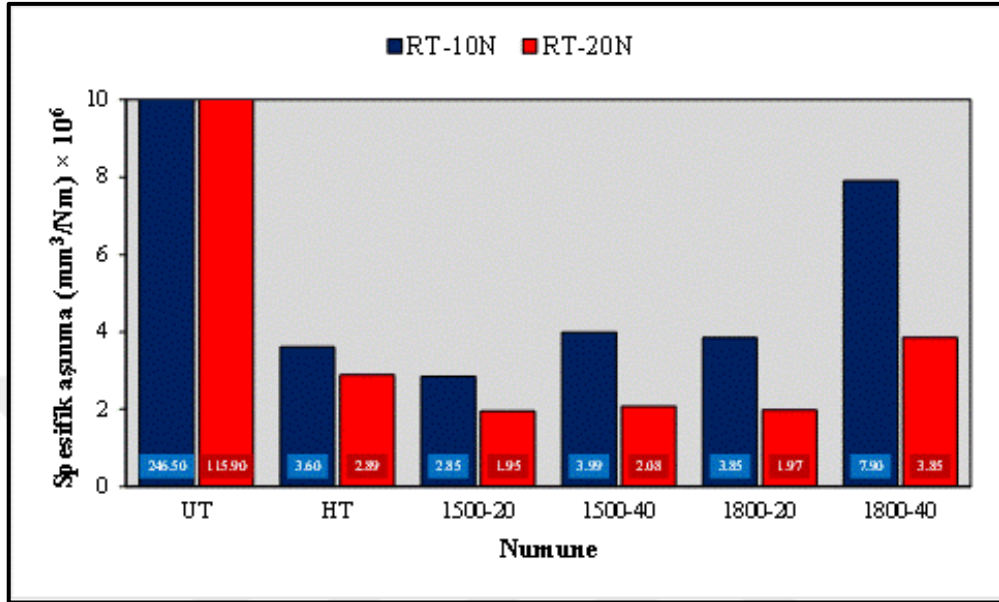
6.4.2. Spesifik Aşınma ve Yüzey Morfolojisi

Bu çalışmada Sleipner tipi soğuk takım çeliğine borlama işlemi uygulanmıştır. Ancak borlama işleminin etkilerini tam olarak anlayabilmek için hem ısıtıl işlem görmemiş hem de ısıtıl işlem görmüş çelikte beraber oda koşullarında ve 450 °C sıcak ortam şartlarında 10 N ve 20 N yüklerde farklı aşınma testleri uygulanmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

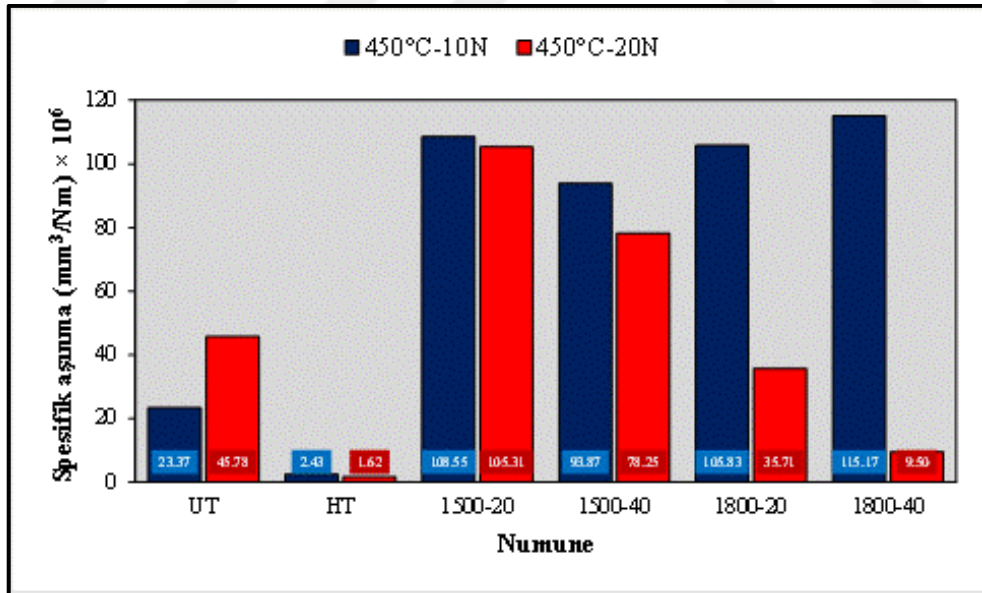
Öncelikle aşınma performansının daha iyi anlaşılabilmesi için malzemelerin sertlik değerleri ve XRD analizi ile oluşan fazları belirlemek gereklidir. Daha sonrasında ise aşınma testi sonrası yüzey morfolojisini incelemek malzemenin aşınma direncini daha iyi kavrayabilmek için önemlidir. Aşınma performansının daha iyi anlaşılabilmesi için malzeme sertlik değerleri, XRD analizi ve aşınma sonrası yüzey morfolojisi detaylı olarak incelenmiştir.

Aşınma hacmi bir malzemenin gerçek performansını anlayabilmek için yeterli değildir. Bir malzemenin aşınma performansını tam olarak değerlendirebilmek için testlerin aynı koşullarda yapılmış olması gerekir ancak yapılan birçok testte mesafe ya da uygulanan yük değiştirilir. Bu durumda malzemenin gerçek aşınma performansının değerlendirilebilmesi

için elde edilen hacimsel aşınmanın yükten ve mesafeden bağımsız bir birime yani spesifik aşınmaya dönüştürülmesi gerekir. Bu bağlamda hesaplanan spesifik aşınma sonuçları Şekil 6.7.'de sunulmuştur.



a)



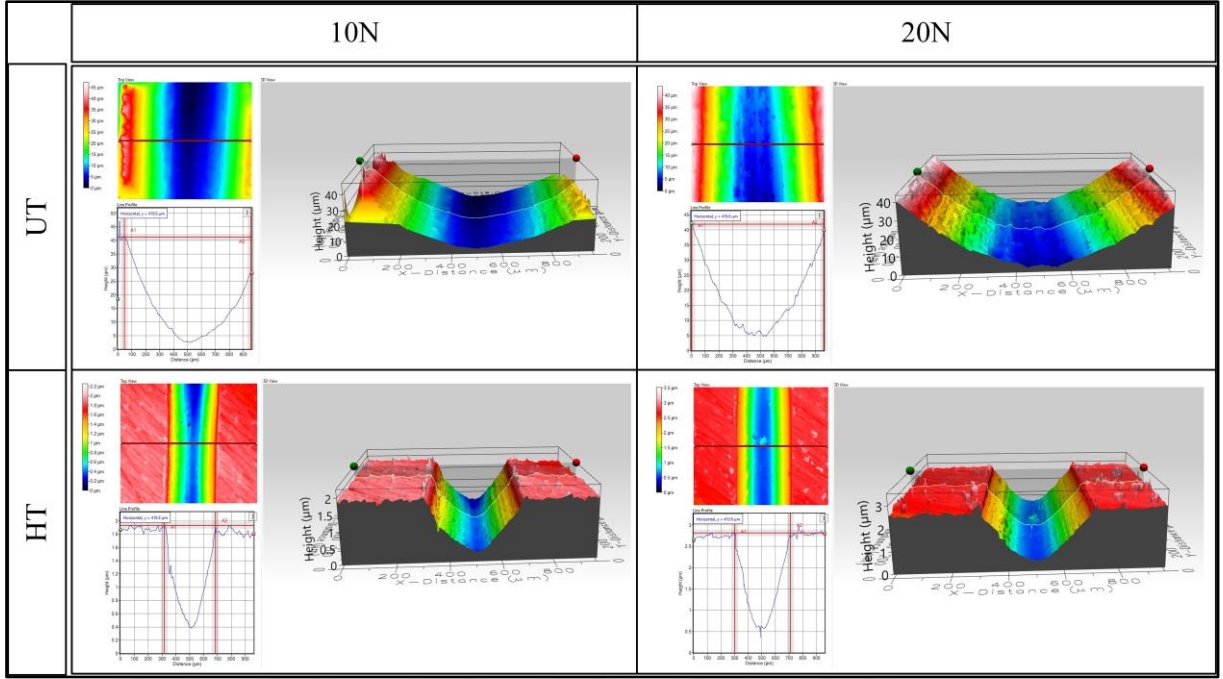
b)

Şekil 6.7: Numunelerin a) oda koşullarında, b) 450 °C ortam şartlarında elde edilen spesifik aşınma değerleri.

Şekil 6.7'deki sonuçlar incelendiğinde, oda koşullarında numunelerden beklendiği gibi ısıtım işlem görmemiş malzemenin daha düşük aşınma direnci göstererek hem 10 N hem de 20 N

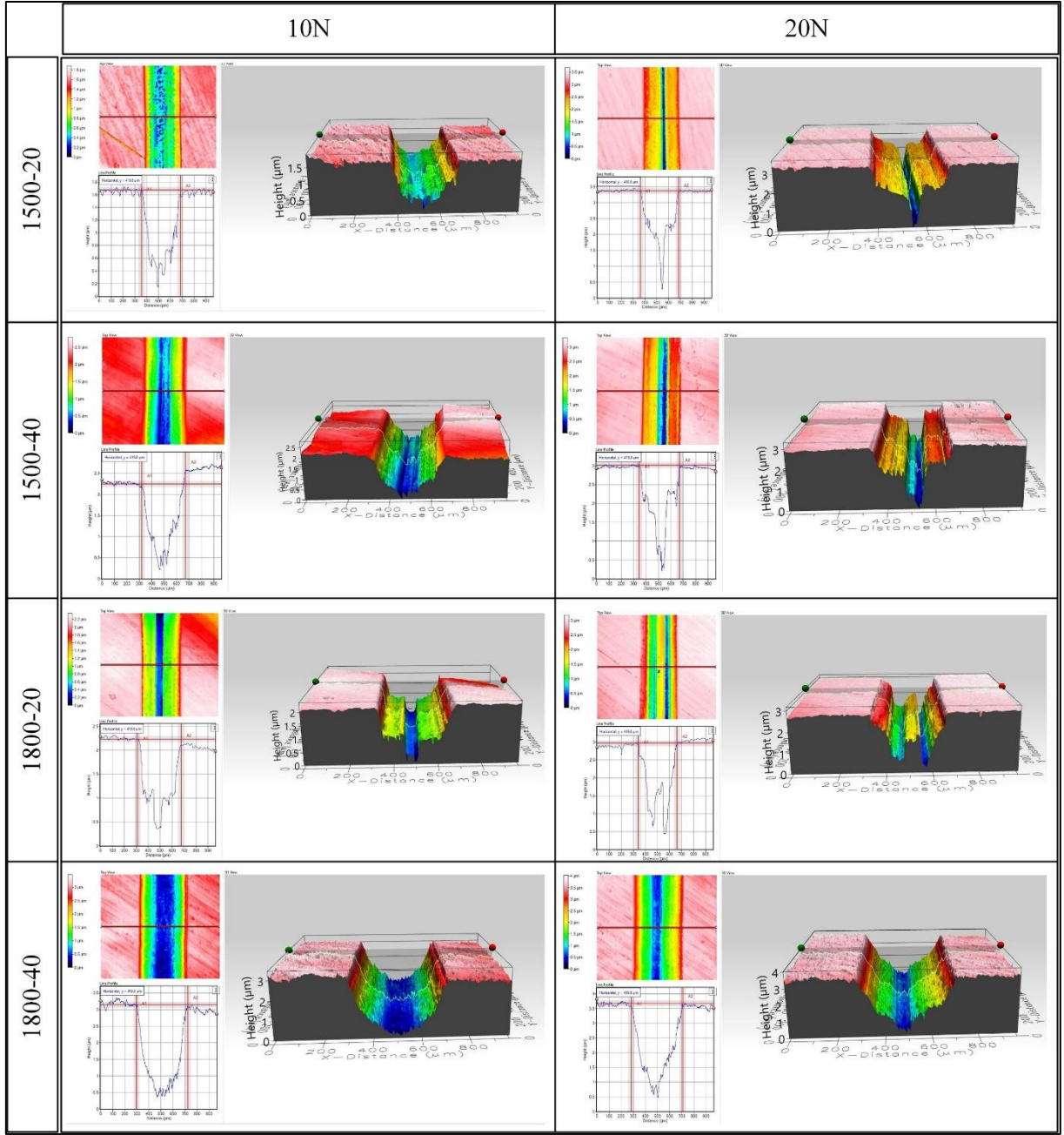
yük altında yüksek spesifik aşınma değerleri gösterdiği görülmektedir. Şekil 6.7a'da görüldüğü üzere, oda koşullarında gerçekleştirilen testler arasında en yüksek spesifik aşınma değeri, ısıl işlem görmemiş (UT) numunede 10 N yük altında $246,50 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ olarak ölçülmüştür. En düşük değer ise 1500-20 numunesinde 20 N yük altında $1,95 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ olarak belirlenmiştir. Isıl işlem görmüş (HT) numune, UT numunesine kıyasla belirgin şekilde daha iyi aşınma direnci göstermiştir (10 N'da $3,60 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$, 20 N'da $2,89 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$). Borlama işlemi uygulanan numunelerde ise parametrelere bağlı olarak değişen performans gözlenmiştir. Artan yüklerle beraber spesifik aşınmanın düştüğü görülmektedir ki bu durum malzemenin aşınma direnci gösterecek bir ortam oluşturduğuna işaret eder. Genelde bu olayın sebebi oksitlenme kaynaklıdır. Aşınan parçalar sürtünme kaynaklı ısıya maruz kalarak oksitlenir ve oksitlenen yüzey aşınmaya dirençli triboyüzey denilen kaygan bir yapıya dönüşür. Oda koşullarında yapılan test sonuçlarında tüm numuneler benzer bir performans göstermiş olup aşınma performansının tam değerlendirilebilmesi için EDS sonuçları analiz edilecektir.

Yüksek sıcaklık koşullarında ise malzemelerin davranışları değişken ve daha az tahmin edilebilir hale gelmiştir. Şekil 6.7b'de 450 °C koşullarında ise durum tersine dönmüştür. En düşük spesifik aşınma değeri HT numunesinde 20 N yük altında $1,62 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ olarak ölçülürken, en yüksek değer 1800-40 numunesinde 10 N yük altında $115,17 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ 'ye ulaşmıştır. Yüksek sıcaklık koşullarında borlanan numunelerin performansının önemli ölçüde düştüğü görülmektedir. En dirençli yapının ısıl işlem görmüş çelikte, daha sonrasında ise ısıl işlem görmemiş çelik malzemede olduğu görülmektedir. Bor ile kaplanan yüzeylerin sertlikleri 776 ile 988 Vickers sertliği arasında değişirken, ısıl işlem görmüş Sleipner çeliğinin sertliği 700 HV civarında ölçülmüştür. Bu durumda malzemelerden beklenen daha sert olan yüzeyin daha dirençli olmasıdır. Ancak borlanan yüzeylerin 450 °C sıcaklıkta aşınma esnasında bütünlüğünü koruyamayarak çok fazla aşındığı görülmektedir. Elde edilen veriler, düşük sertlikteki numunelerin adhezyon aşınmasına karşı daha hassas olduğunu, buna karşın bor kaplamanın oda koşullarında aşınma direncini artırdığını, ancak yüksek sıcaklıklarda yapısal bütünlüğünü koruyamadığını ortaya koymaktadır. Bu sonuçların daha iyi anlaşılabilmesi için yüzey morfolojisinin incelenmesi gerekmektedir. Şekil 6.8 ve Şekil 6.9'da yüzeylerden elde edilen 3D profilometre görüntüleri görülmektedir.

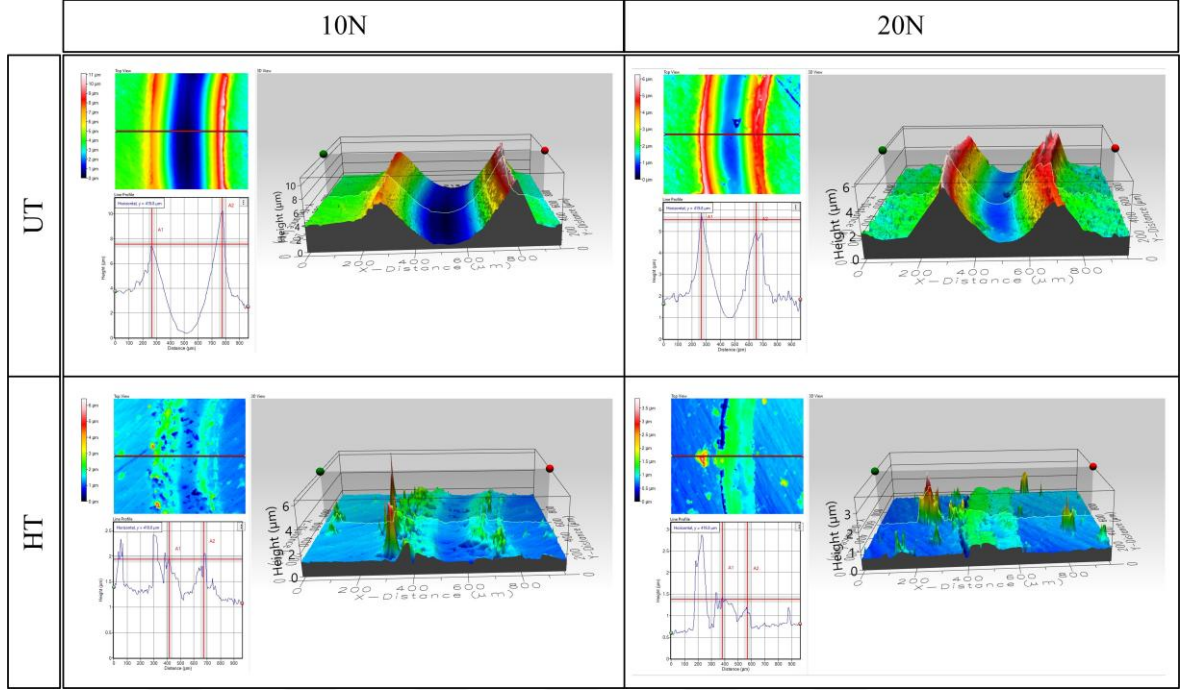


Şekil 6. 8: a) ısıt işlem görmemiş ve b) ısıt işlem görmüş numunelerin oda koşullarında (RT) aşınma testi sonrası 3D profilometre görüntüleri.

Şekil 6.8'deki 3D profilometre görüntüleri incelendiğinde ısıt işlem görmemiş olan numunelerin ısıt işlem görmüş numunelere oranla çok fazla aşındığı görülmektedir. Yüzey sertliği 338 HV civarında olan ısıt işlemsiz çeliklerin 700 HV civarında sertliğe sahip ısıt işlem görmüş çeliğe oranla daha az dirençli olması beklenen bir durumdur. Isıt işlem görmeyen numunelerden 20 N yük altında test yapılan numunede bazı yerlerde yüzeyden kopan parçalar neticesinde üç elemanlı abrasif aşınma izlerine rastlanırken bu izlere 10 N yük altında yapılan testlerde daha az rastlanılmaktadır. Bu durum yükün artmasıyla birlikte yüzeyde daha fazla oksit tabakanın oluştuğuna ve bu oksit tabakalardan kopan partiküllerin aşındırıcı ve aşınan yüzey arasında sıkışarak abrasif aşınmaya sebep olduklarına işaret etmektedir.



Şekil 6.9: Farklı güçte ve farklı yalpalama frekansında lazer kaynağı ile borlama işlemine tabi tutulan numunelerin aşınma testi sonrası 3D profilometre görüntüleri.



Şekil 6.10: Isıl işlem görmemiş (UT) ve ısıtılmış (HT) numunelerin 450°C sıcaklıkta 10 N ve 20 N yük altında aşınma testi sonrası 3D profilometre görüntüleri.

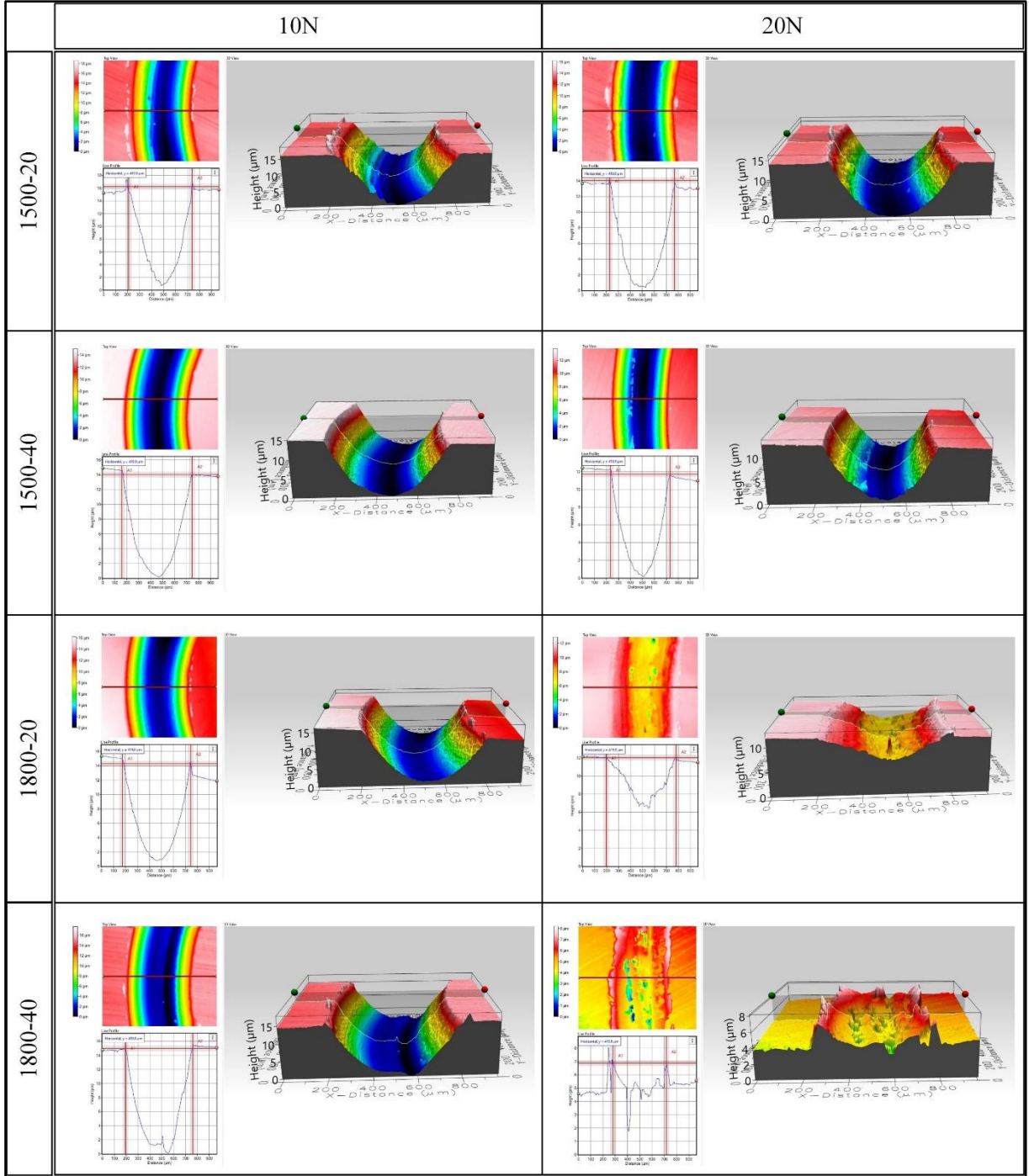
Şekil 6.10’da 450 °C’de iki farklı yükte (10 N ve 20 N) aşınma testleri sonucu ısıtılmamış ve ısıtılmış numune yüzeylerinde oluşan 3D aşınma profilleri görülmektedir. Görüntüler incelendiğinde ısıtılmamış numunelerde yüksek sıcaklık altında Şekil 6.10’daki aşınma test sonuçlarını destekler nitelikte oda koşullarına nazaran daha az aşınma olduğu görülmektedir. Yüksek ısıyla birlikte yüzeylerin daha çabuk oksitlenerek aşınmaya dirençli triboyüzeyler oluşturduğu düşünülmektedir. Isının etkisiyle yumuşayan yüzeyden kenarlara doğru malzemenin sıvandığı ve normal yüzeyden daha yüksek tepe şeklinde deformasyon bölgeleri oluşturduğu görülmektedir.

Isıl işlem görmüş (HT) numunelerde ise çok farklı bir yüzey morfolojisi ortaya çıkmaktadır. Yüzeyde aşınmadan çok birikme olduğu görülmektedir. Bunun temel sebebinin yüksek sıcaklık ve sert bir yüzeyle temas halinde olan WC-Co bilyenin bütünlüğünü kaybederek malzeme yüzeyine biriktiği düşünülmektedir. Normalde WC-Co bilyeler yapıları itibarıyla sıcaklığa dirençli malzemeler olmalarına rağmen bu koşullar altında bütünlüklerini koruyamamışlardır.

Şekil 6.11’de ise borlama işlemi ile yüzeylerine ferrobor (FeB ve Fe₂B) tabakası biriktirilen numunelerin 450 °C ortam koşullarında 10 N ve 20 N yük altında yüzey morfolojilerinde

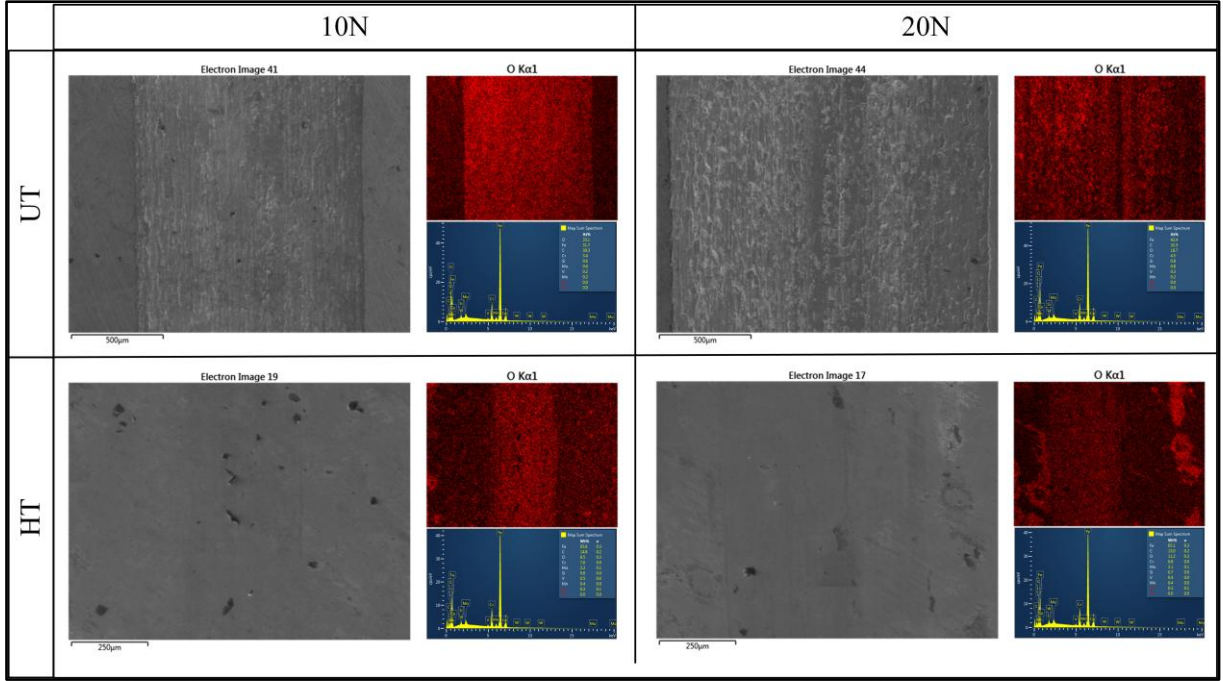
meydana gelen değişimler görülmektedir. Görüntüler incelendiğinde yüksek direnç göstermesi beklenen ferrobor tabakaların sıcaklığın etkisiyle yapısal bütünlüklerini kaybederek yüksek oranda aşındıkları görülmektedir. 1800 Watt güçte ve 20 Hz yalpa frekansında 20 N yük altında borlanan numunenin 1500 Watt gücünde 20 Hz ve 40 Hz yalpa frekansında borlanan numunelere oranla daha az aşındığı görülmektedir. Her ne kadar 10 N yük altında bu malzeme daha düşük aşınma direnci gösterse de 20 N yük altında direncinin arttığı görülmektedir. Bu durumun temel sebebi aşındırıcı bilyenin yapısal bütünlüğünü kaybetmiş olması olabilir.

1800 Watt güçte ve 40 Hz yalpa frekansında borlanan numunenin 20 N yük altında yüzeyinde ısıl işlem görmüş numunede olduğu gibi aşınma yerine birikme olduğu görülmektedir. Bu bölgelerde WC-Co aşındırıcı bilyenin özelliğini kaybederek iş parçası yüzeyine birikip birikmediği EDS mapping sonuçları ile belirlenecektir.



Şekil 6.11: Farklı güçte ve yalpa frekansında borlanan numunelerin 450 °C sıcaklıkta 10 N ve 20 N yük altında aşınma testi sonrası 3D profilometre görüntüleri.

Şekil 6.12 ve Şekil 6.13'te aşınma testi sonrası yüzeylerden alınan SEM görüntüleri ile EDS sonuçları görülmektedir.



Şekil 6.12: Isıl işlem görmemiş (UT) ve ısıl işlem görmüş (HT) numunelerin oda koşullarında (RT) 10 N ve 20 N yük altında aşınma testi sonrası SEM ve EDS sonuçları.

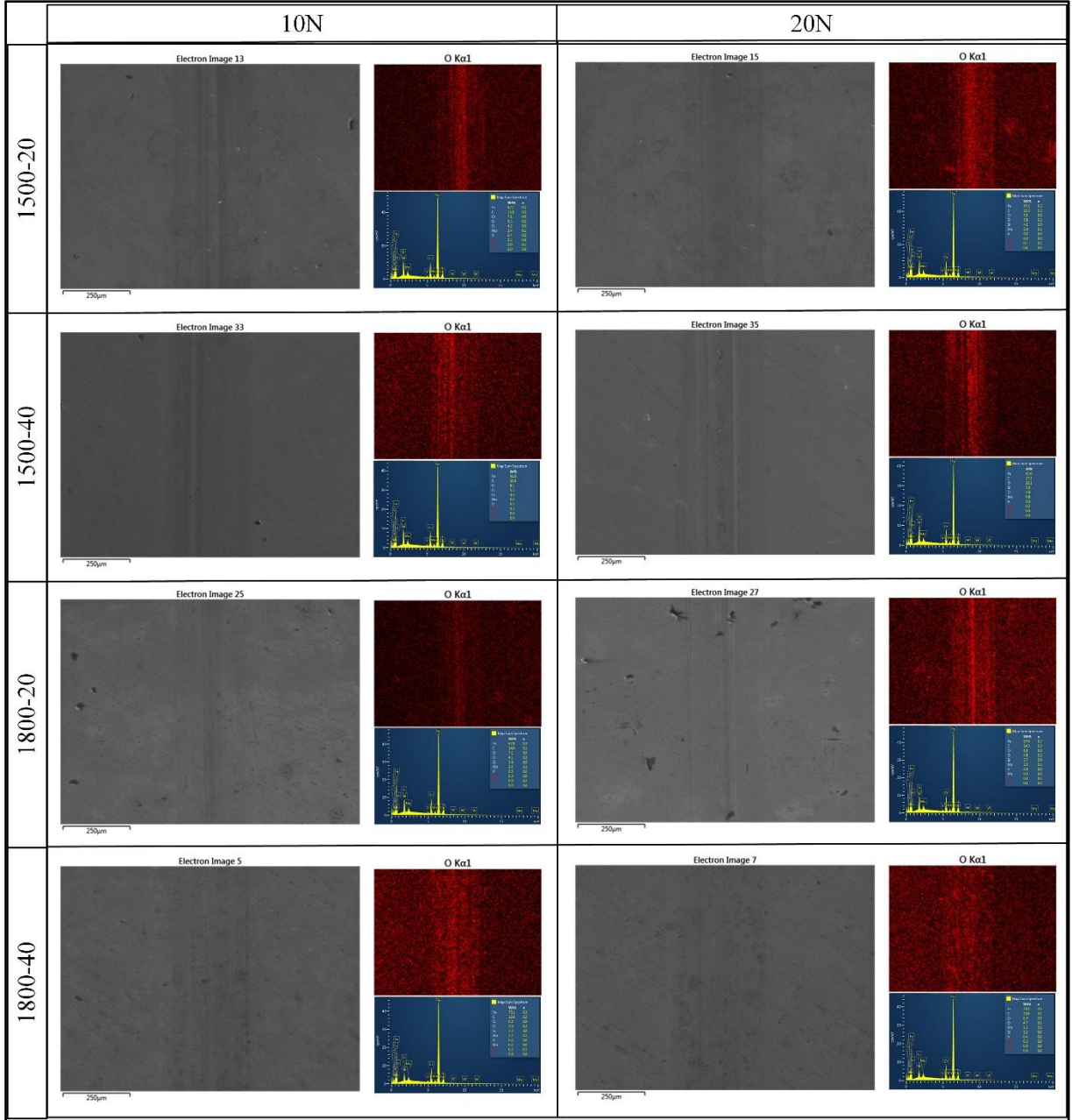
Şekil 6.12’de ısıl işlem görmemiş ve ısıl işlem görmüş numunelerin aşınma testi sonucunda yüzeylerinde meydana gelen değişimleri anlamak için yapılan SEM ve EDS sonuçları görülmektedir. Daha önceden de belirtildiği gibi yüzeylerde aşınma ve yükün etkisiyle triboyüzey adı verilen aşınmaya dirençli yapıların oluşacağı öngörülmekteydi. Şekil incelendiğinde aşınma yüzeylerinde oksit tabakalarının yoğunlaştığı net bir şekilde görülmektedir. Özellikle ısıl işlem görmemiş numunelerde bu oksit tabakaların daha yoğun olduğu görülmektedir. Bu tabakaların ısıl işlemli numunede daha az oluşmasının sebebi ısıl işlem etkisiyle malzeme bütünlüğünün daha iyi korunmasıdır. Ayrıca oluşan yüzeylerden de anlaşılmaktadır ki ısıl işlem görmüş numuneler daha dar bir aşınma yüzeyine sahip olup aşınmaya karşı beklendiği üzere daha dirençlidirler. Ayrıca ısıl işlem görmüş numunelerin yüzeyleri daha pürüzsüz olmuşlardır. Bu da plastik deformasyona karşı daha dirençli olduklarını göstermektedir.

Şekil 6.13’te borlama işlemi ile ferrobora tabakası ile kaplanan numunelerin aşınma yüzeylerinde meydana gelen değişimler görülmektedir. Isıl işlem görmüş ve ısıl işlem görmemiş numunelere nazaran daha az belirgin ve pürüzsüz yüzeye sahip olan bu numunelerde az da olsa oksit tabakalarının olduğu görülmektedir. EDS spektrumlarında tungsten oranının %0 olması WC-Co aşındırıcı bilyenin oda koşullarında yapılan kuru

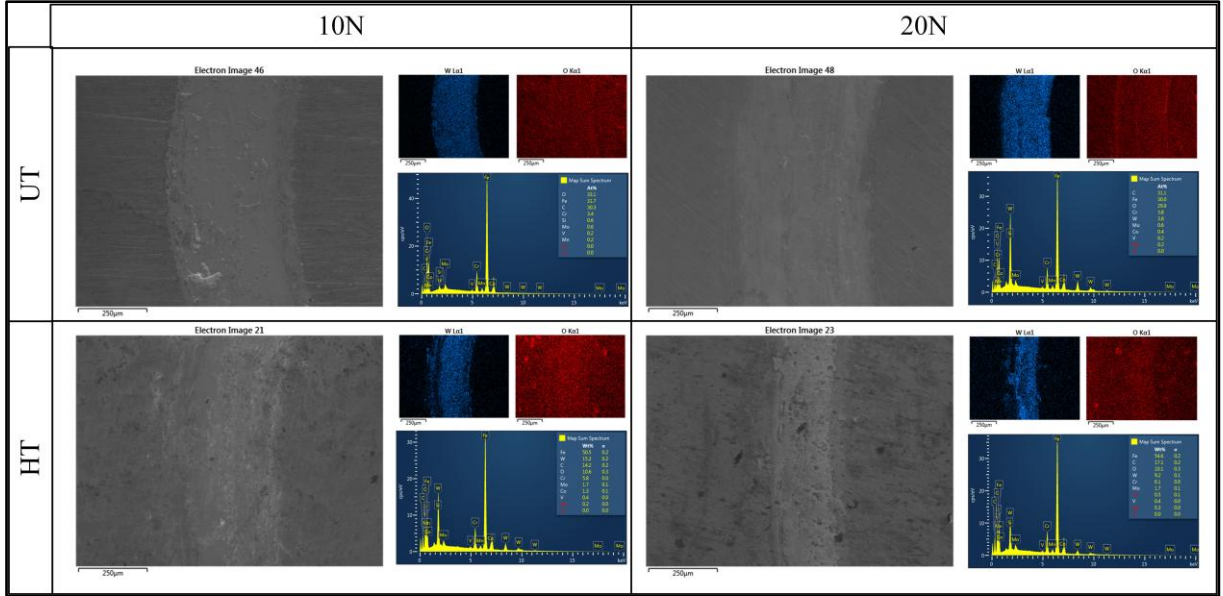
aşınma testinde yapısal bütünlüğünü koruduğunu göstermektedir. Borlanan yüzeylerde aşınma sırasında oksit tabakaların oluşması, borlanan yüzeylerin her ne kadar XRD sonuçlarında Fe_2B ve FeB ferrobor bileşiklerini oluştursalar da başarılı bir şekilde borlama işleminin gerçekleştirilemediğini göstermektedir. Daha iyi bir sonuç eldesi için $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'deki yüzeylerden elde edilen SEM ve EDS sonuçlarını incelemek gerekmektedir.

Şekil 6.14 ve Şekil 6.15'te $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta kuru aşınma koşullarında meydana gelen değişimlerin SEM ve EDS sonuçları görülmektedir.





Şekil 6.13: Farklı güç ve frekansta lazer kaynağı ile borlanmış numunelerin oda koşullarında (RT) 10 N ve 20 N yük altında aşınma testi sonrası SEM ve EDS sonuçları.

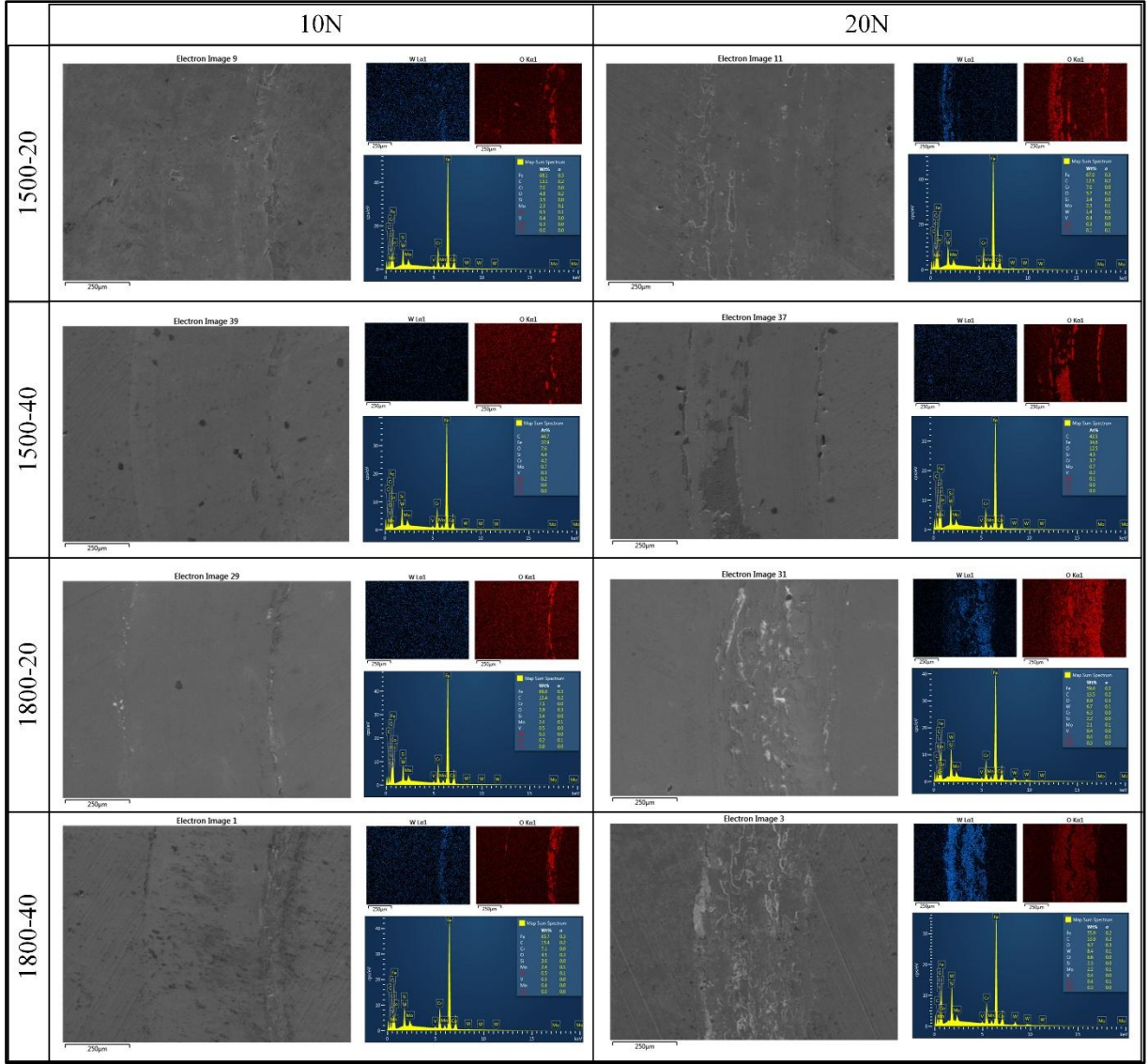


Şekil 6.14: Isıl işlem görmemiş (UT) ve ısıl işlem görmüş (HT) numunelerin 450 °C sıcaklıkta 10 N ve 20 N yük altında aşınma testi sonrası SEM ve EDS sonuçları.

Şekil 6.14'deki SEM ve EDS sonuçları incelendiğinde ısıl işlem görmüş numunede aşınma izi gibi görünse de yüzeyde birikme olduğu 3D profilometre görüntülerinde belirlenmiş ve bunun temel sebebinin WC-Co aşındırıcı bilyenin yapısal bütünlüğünün bozulmasına bağlanmıştı. Bu sonucu destekler nitelikte EDS mapping sonuçlarında tungsten varlığı net bir şekilde görülmektedir. Her ne kadar ısıl işlem görmemiş ve 10 N yük altında aşınma testine tabi tutulan numunenin EDS mapping sonucunda da tungsten görülse de EDS spektrumunda tungsten oranı %0 olduğu için bunun başka bir element olduğu düşünülmektedir. Ancak diğer numunelerde görülen tungsten EDS spektrumunda da bulunduğundan dolayı WC-Co bilyenin yapısal bütünlüğünün bozulduğu belirlenmiştir.

WC-Co kompozit bir malzeme olup yüksek sertlikteki WC partikülleri kobalt matris içerisine dağılmıştır. WC 3000 °C, kobalt ise yaklaşık 1500 °C erime sıcaklığına sahiptir. Kobalt bağlayıcı faz olarak yer alırken aşınma direnci genel olarak tungsten karbür partiküllerden ileri gelmektedir. Bu durumda kobaltın erime noktasına oranla nispeten düşük bir sıcaklık olan 450 °C'de oksitlenmeye uğrayarak kompozitten ayrılmış olabileceği düşünülmektedir. EDS spektrumlarında kobalt varlığına rastlanılmaması oksitlenen kobaltın aşınma testi esnasındaki mekanik etkilerle sistemden uzaklaşmış olabileceğini ve yüzeyde kalmadığını düşündürmektedir. Bu durum, kobaltın 400-500 °C sıcaklıklarda oksitlenmeye uğrayarak WC-Co kompozitlerinin yüzeyinden tükendiğinin bildirilmesi ile tutarlıdır (Liu vd., 2016). Ayrıca tüm yüzeylerde sıcaklığın etkisiyle oksitlenme olduğu gözlenmiştir.

Şekil 6.15’de ise 3D profilometre sonuçlarını destekleyen 20 N yük altında 1800 Watt 20 Hz lazer kaynağı ile borlanan numunede ve yine 20 N yük altında 1800 watt 40 Hz lazer kaynağı ile borlanan numunede yüzeyde tungsten varlığı hem EDS mapping hem de EDS spektrumunda net bir şekilde görülmektedir. Bu da yüzeyde biriken malzemenin WC-Co bilyeden iş parçasına difüze olan ya da biriken tungsten varlığını kanıtlar niteliktedir. Ayrıca neredeyse tüm numunelerde hem EDS mapping hem de EDS spektrumunda tungsten varlığı belirgindir. Bu durum bize tungstenin yüksek sıcaklık ve dirençli kaplam yüzeyi sebebiyle yapısal bütünlüğünün bozulduğunu göstermektedir. Johnston ve Catledge tarafından literatürde gerçekleştirilen çalışmada, tungsten transferinin WC-Co altlık üzerinde PECVD borlama çalışmalarından elde edilen gözlemlerle kavramsal olarak desteklendiği belirtilmiştir. Bu çalışmalarda tungsten-borid fazlarının (örn. WCoB, CoB veya W_2CoB_2) oluşumu ve EDS analizi ile tespit edilen tungsten yeniden dağılımı gösterilmiştir. Bu durum, tungstenin yüksek sıcaklık ve dirençli kaplama yüzeyi sebebiyle yapısal bütünlüğünün bozulduğunu göstermektedir (Johnston ve Catledge, 2016). Ayrıca aşınma yüzeylerinde olduğu görülen oksit tabakalarının temel sebebinin uygulanan yöntem sebebiyle demir ile yeterince bileşik oluşturamayan borların oksitlenerek B_2O_3 gibi oksit fazları oluşturmuş olabileceği değerlendirilmektedir.



Şekil 6.15: Farklı güç ve frekansta lazer kaynağı ile borlanmış numunelerin 450 °C sıcaklıkta 10 N ve 20 N yük altında aşınma testi sonrası SEM ve EDS sonuçları.

Yüksek güç ile birlikte daha yüksek ısının ortaya çıkması daha homojen bir borlama oluşturarak daha yüksek oranda ferrobör bileşiklerini oluşturduğunu göstermektedir.

Yapılan aşınma testlerinin sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde, XRD sonuçları göstermektedir ki lazer kaynağı ile yapılan borlama işlemi başarılı bir şekilde ferrobör bileşiklerini oluşturduğunu göstermektedir. Ancak geleneksel difüzyon teknikleriyle yapılmayan borlama işlemi her ne kadar ferrobör bileşiklerini oluştursa da aşınma testi sonuçları yeterli bağlanma ve yeterli difüzyon olmadığını ve yüzey ve altlık arasında bağların zayıf olduğunu göstermektedir. Özellikle oda koşullarında ferrobör tabakalar yeterli mukavemeti gösterebilirler de yüksek sıcaklık koşullarında sınırlı dayanım göstermişlerdir. Bu

durum lazer kaynaklı yüzey alaşımlama tekniğinin geleneksel difüzyon ile yapılan borlama işlemine oranla yetersiz bir işlem olduğunu göstermektedir. Gerçekleştirilen bu çalışma, Bartkowska vd. tarafından difüzyonla borlanmış katmanların lazer modifikasyonunun (tabaka kalınlığını ve sertliği arttırırken) geleneksel difüzyon borid kaplamaya göre daha zayıf mekanik ve tribolojik performansa yol açtığına gösterildiği literatürdeki çalışma ile uyumludur (Bartkowska vd., 2021).

Öte yandan, yapılan testler ısıtılma işleminin Sleipner çeliği için etkili bir yöntem olduğunu göstermiştir. Isıl işlem uygulanmış numuneler hem oda koşullarında hem de yüksek sıcaklık koşullarında iyi bir aşınma direnci göstermiş, dolayısıyla ek bir yüzey kaplama işlemine gerek duyulmadan da hem oda koşullarında hem de yüksek sıcaklık ortamlarında kullanılabileceği ortaya konmuştur.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Sleipner soğuk iş takım çeliği üzerine lazer kaynak teknolojisi kullanılarak bor kaplama işlemi uygulanmış ve farklı işlem parametrelerinin malzemenin tribolojik özelliklerine etkileri sistematik olarak araştırılmıştır. Çalışma kapsamında iki farklı lazer güç seviyesi (1500 W ve 1800 W) ve iki farklı salınım frekansı (20 Hz ve 40 Hz) ile gerçekleştirilen bor kaplamaların performansları, ısıtıl işlem görmüş ve işlem görmemiş referans numuneler ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- XRD analizleri, tüm lazer kaplama koşullarında FeB ve Fe₂B borid fazlarının başarılı bir şekilde oluştuğunu ortaya koymuştur. Optik mikroskopi incelemeleri ise 1500 W lazer gücünde daha homojen kaplama yapıları elde edildiğini göstermiştir. Bu sonuçlar, lazer kaynak ile bor kaplama işleminin faz oluşumu açısından başarılı olduğunu kanıtlamıştır.
- Mikrosertlik ölçümlerinde en yüksek değer 1500 W güç ve 20 Hz salınım frekansı koşullarında 988,9 HV olarak elde edilmiş, bu değer işlenmemiş Sleipner çeliğine (338,7 HV) göre %192'lik bir artış göstermiştir. Isıl işlem uygulaması ise 700,5 HV ile %107'lik artış sağlamıştır. Artan lazer gücü ve salınım frekansı ile birlikte sertlikte sistematik azalma gözlenmiştir.
- Oda sıcaklığı tribolojik testlerinde bor kaplamaların sürtünme katsayısında önemli iyileşmeler sağladığı görülmüştür. Sürtünme katsayıları 0,30-0,48 μ aralığına düşerken, en düşük spesifik aşınma 1500-20 numunesinde $1,95 \times 10^{-6}$ mm³/N·m olarak ölçülmüştür. Ancak yüksek sıcaklık (450 °C) koşullarında bor kaplamalı numunelerin performansları önemli ölçüde düşmüş, en dirençli yapı ısıtıl işlem görmüş çelikte gözlenmiştir.
- Aşınma mekanizmalarında oda koşullarında adhezyon aşınması, oksitlenme ve triboyüzey oluşumu baskın olurken, bor kaplı numunelerde daha düzgün aşınma yüzeyleri gözlenmiştir. Yüksek sıcaklıkta ise yoğun oksitlenme, kobalt fazın bozunması ve tungsten transferi nedeniyle aşınma mekanizması değişmiştir.
- SEM ve EDS analizleri, oda koşullarında WC-Co bilyenin yapısal bütünlüğünü koruduğunu, ancak yüksek sıcaklıkta tungsten transferi nedeniyle yapısal

bozunmaya uğradığını göstermiştir. Bu durum, bor kaplamaların yüksek sıcaklıktaki performans kaybını açıklamaktadır.

Bu çalışmanın sonuçları doğrultusunda, gelecekteki araştırmalar ve endüstriyel uygulamalar için aşağıdaki öneriler sunulmaktadır:

- Lazer güç parametrelerinin daha geniş aralıklarda (800-1200 W) optimize edilmesi, çok geçişli kaplama tekniklerinin araştırılması ve farklı bor kaynaklarının (B_4C , BN) etkilerinin incelenmesi önerilmektedir.



KAYNAKLAR

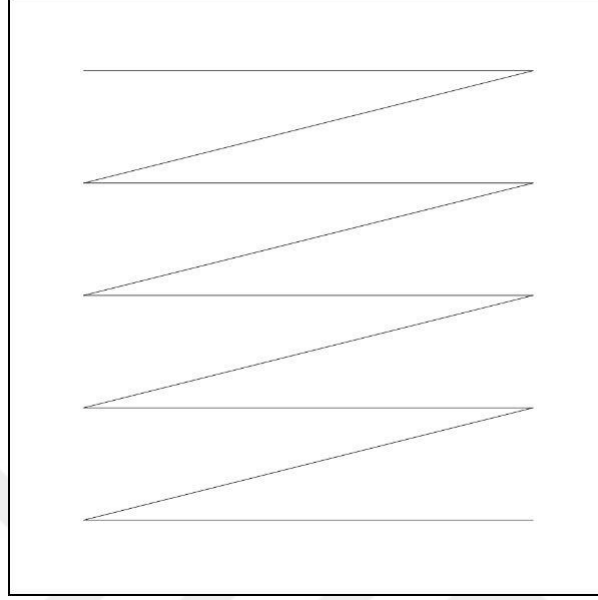
- Bartkowska, A., vd. (2021). Laser Processing of Diffusion Boronized Layer Produced on Monel[®] Alloy 400—Microstructure, Microhardness, Corrosion and Wear Resistance Tests. *Materials*, 14(24): 7529.
- Béjar, M., ve Henríquez, R. (2009). Surface Hardening of Steel by Plasma-Electrolysis Boronizing. *Materials & Design*, 30(5): 1726-1728.
- Bell, T., Mao, K., ve Sun, Y. (1998). Surface Engineering Design: Modelling Surface Engineering Systems for Improved Tribological Performance. *Surface and Coatings Technology*, 108-109: 360-368.
- Berns, H., ve Theisen, W. (2008). Ferrous Materials: Steel and Cast Iron. Springer Berlin Publications, Heidelberg, 123-213.
- Bindal, C., ve Erdemir, A. (1996). Ultralow Friction Behavior of Borided Steel Surfaces after Flash Annealing. *Applied physics letters*, 68(7): 923-925.
- Bryson, W. E. (2005). Heat Treatment, Selection, and Application of Tool Steels (2nd ed.). Hanser Publications, Cincinnati, 1-9.
- Bunshah, R. F. (1994). Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings: Science, Applications and Technology (2nd ed.). Noyes Publications, Park Ridge.
- Campos-Silva, I., vd. (2012). Kinetics and Boron Diffusion in the FeB/Fe₂B Layers Formed at the Surface of Borided High-Alloy Steel. *Journal of materials engineering and performance*, 21(8): 1714-1723.
- da Costa Aichholz, S. A., vd. (2018). Tribocorrosion Behavior of Boronized Aisi 4140 Steel. *Surface and Coatings Technology*, 352: 265-272.
- Deng, R., vd. (2024). A Review of Recent Advances in Integrated Laser Remelting and Laser Cladding Processes. *Metallurgical Research & Technology*, 121(4): 402.
- Gahr, K.-H. (1987). Microstructure and Wear of Materials (Vol. 10). Elsevier Publications, Amsterdam, 8-79.
- Han, T., vd. (2022). Research Progress on Laser Cladding Alloying and Composite Processing of Steel Materials. *Metals*, 12(12): 2055.
- Holmberg, K., ve Mathews, A. (1994). Coatings Tribology: A Concept, Critical Aspects and Future Directions. *Thin Solid Films*, 253(1-2): 173-178.
- Holmberg, K., ve Matthews, A. (1994). Coatings Tribology: Properties, Mechanisms, Techniques and Applications in Surface Engineering. Elsevier Science.
- Hu, M., vd. (2023). Effect of Boronizing on the Microstructure and Mechanical Properties of CoCrFeNiMn High-Entropy Alloy. *Materials*, 16(10): 3754.

- Hutchings, I. (1992). Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials: Edward Arnold. Elsevier Publications, London, 352.
- Johnston, J. M., ve Catledge, S. A. (2016). Metal-Boride Phase Formation on Tungsten Carbide (Wc-Co) during Microwave Plasma Chemical Vapor Deposition. *Applied Surface Science*, 364: 315-321.
- Kayali, Y., Büyüksağış, A., ve Yalçın, Y. (2013). Corrosion and Wear Behaviors of Boronized Aisi 316l Stainless Steel. *Metals and materials international*, 19(5): 1053-1061.
- Keddam, M. (2004). A Kinetic Model for the Borided Layers by the Paste-Boriding Process. *Applied Surface Science*, 236(1-4): 451-455.
- Khrushchov, M. (1974). Principles of Abrasive Wear. *Wear*, 28(1): 69-88.
- Kresser, S., vd. (2023). Influence of Partitioning Effects on the Retained Austenite Content and Properties of Martensitic Stainless Steel. *steel research international*, 94(4): 2200502.
- Kulka, M., vd. (2020). Laser Surface Alloying of Austenitic 316l Steel with Boron and Some Metallic Elements: Microstructure. *Materials*, 13(21): 4852.
- Kumaravel, D., ve Arunkumar, K. (2018). Improve the Wear Property of En19 Steel by Boronizing Process. *Advances in Manufacturing Processes: Select Proceedings of ICEMMM 2018*, 15-16 February 2018, Chennai, 123-131.
- Li, L., ve Lawrence, J. (2001). Laser Modification of the Wettability Characteristics of Engineering Materials. Professional Engineering Publishing, United Kingdom.
- Liu, Y., vd. (2016). Tribological Properties of Alcrufeni2 High-Entropy Alloy in Different Conditions. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 47(7): 3312-3321.
- Martini, C., Palombarini, G., ve Carbucicchio, M. (2004). Mechanism of Thermochemical Growth of Iron Borides on Iron. *Journal of Materials Science*, 39(3): 933-937.
- Medvedovski, E., Leal Mendoza, G., ve Vargas, G. (2021). Influence of Boronizing on Steel Performance under Erosion-Abrasion-Corrosion Conditions Simulating Downhole Oil Production. *Corrosion and Materials Degradation*, 2(2): 293-324.
- Milinoić, A., vd. (2022). Effect of Carbon Content and Boronizing Parameters on Growth Kinetics of Boride Layers Obtained on Carbon Steels. *Materials*, 15(5): 1858.
- Orihel, P., vd. (2024). Pack-Boriding of Slepner Steel: Microstructure Analysis and Kinetics Modeling. *Materials Testing*, 66(1): 43-55.
- Rabeeh, B. M. (2015). Ultra-Fast Boriding and Surface Hardening of Low Carbon Steel. The Minerals, Metals & Material Series *TMS 2015 144th Annual Meeting & Exhibition: Supplemental Proceedings*, Cham, 1499-1506.

- Roberts, G. A., Kennedy, R., ve Krauss, G. (1998). Tool Steels. ASM international.
- Sen, S., Sen, U., ve Bindal, C. (2005). An Approach to Kinetic Study of Borided Steels. *Surface and Coatings Technology*, 191(2-3): 274-285.
- Škamat, J., Bučelis, K., ve Černašėjus, O. (2022). Laser Boronizing of Additively Manufactured 18Ni-300 Maraging Steel Part Surface. *Materials*, 15(13): 4631.
- Taktak, S. (2007). Some Mechanical Properties of Borided Aisi H13 and 304 Steels. *Materials & Design*, 28(6): 1836-1843.
- Tyagi, R., Xiong, D., ve Li, J. (2011). Effect of Load and Sliding Speed on Friction and Wear Behavior of Silver/H-Bn Containing Ni-Base P/M Composites. *Wear*, 270(7-8): 423-430.
- Wang, K., vd. (2025). Microstructure Evolution, Wear and Corrosion Behaviors of Oscillating Laser Clad Nickel-Based Coatings by Different Oscillation Frequencies. *Journal of Materials Research and Technology*, 36: 3846-3861.
- Xu, Z., vd. (2014). Effect of Sliding Speed and Applied Load on Dry Sliding Tribological Performance of Tial Matrix Self-Lubricating Composites. *Tribology Letters*, 55(3): 393-404.
- Yang, H., vd. (2016). Enhanced Boronizing Kinetics and High Temperature Wear Resistance of H13 Steel with Boriding Treatment Assisted by Air Blast Shot Peening. *Surface and Coatings Technology*, 307: 506-516.
- Zhong, Y., vd. (2025). Effects of Laser Oscillation Frequency on the Microstructure and Properties of Tic/Fe-Based Alloy Composite Coatings. *Advanced Engineering Materials*, 27(2): 2401774.
- Zou, Y., vd. (2021). Ex-Situ Additively Manufactured Fecrmocb/Cu Bulk Metallic Glass Composite with Well Wear Resistance. *Tribology International*, 162: 107112.

EKLER

EK 1: Lazer ışığı salınım hareketinin şematik gösterimi.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı

Doğum Yeri ve Tarihi

Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi

Bildiği Yabancı Diller

Bilimsel

Faaliyet/Yayınlar

İş Deneyimi

Çalıştığı Kurumlar

İletişim

E-Posta Adresi :