



**WC VE TiCN KAPLANMIŞ SICAK HADDE
MERDANELERİNİN KURU VE BOR YAĞI
ORTAMINDA AŞINMA DAVRANIŞLARININ
İNCELENMESİ**

Mert PEHLİVANOĞLU

**2020
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı
Dr. Öğr. Üyesi Muhammet Hüseyin ÇETİN**

**WC VE TiCN KAPLANMIŞ SICKAK HADDE MERDANELERİNİN KURU
VE BOR YAĞI ORTAMINDA AŞINMA DAVRANIŞLARININ
İNCELENMESİ**

Mert PEHLİVANOĞLU

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı
Dr. Öğr. Üyesi Muhammet Hüseyin ÇETİN**

**KARABÜK
AĞustos 2020**

Mert PEHLİVANOĞLU tarafından hazırlanan “WC VE TiCN KAPLANMIŞ SICAK HADDE MERDANELERİNİN KURU VE BOR YAĞI ORTAMINDA AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Muhammet Hüseyin ÇETİN
Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 17/08/2020

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu) İmzası

Başkan : Doç. Dr. Okan ÜNAL (KBÜ)

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Muhammet Hüseyin ÇETİN (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Fuat KARTAL (KÜ)

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Mert PEHLİVANOĞLU

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

WC VE TiCN KAPLANMIŞ SICAK HADDE MERDANELERİNİN KURU VE BOR YAĞI ORTAMINDA AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Mert PEHLİVANOĞLU

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Dr. Öğr. Üyesi Muhammet Hüseyin ÇETİN

Ağustos 2020, 72 sayfa

Bu çalışmada TiCN ve WC-Co kaplamalarının küresel grafitli dökme demir malzemelerinin tribolojik performansına etkisi aşınma deneyleri ile incelenmiştir. Kaplama işlemlerinin mekanik ve fiziksel etkisi, mikrosertlik ölçümleri ve görüntüleme yöntemleriyle (SEM, EDX, XRD) analiz edilmiştir. WC-Co ve TiCN kaplamalı numunelerin tribolojik etkisi 50N yük ve 60 dev/dk kayma hızı parametrelerinde kuru ve 5% konsantrasyon oranında hazırlanmış bor yağı emülsiyonu koşullarında gerçekleştirilen ball-on-plate aşınma deneyleri ile incelenmiştir. Kaplama prosesinin ve bor yağı emülsiyonunun sürtünme ve aşınma davranışına etkisinin incelenmesi için sürtünme katsayısı ve aşınma hacmi verileri elde edilmiştir. Aşınmış yüzeylerden elde edilen SEM görüntüleri ile aşınma mekanizmaları belirlenmiş, EDX görüntüleri ile yüzeyler elemental olarak analiz edilmiştir.

Ayrıca yüzey pürüzlülük ölçümleri ve 2D - 3D topoğrafya görüntüleri ile yüzey form değişiklikleri incelenmiştir. Mikrosertlik ölçüm sonuçlarına göre, 290 HV sertliğindeki küresel grafitli dökme demirin TiCN kaplamasıyla 1559 HV, WC-Co kaplamasıyla 1440 HV değerlerine ulaştığı görülmüştür. Aşınma deneyi sonuçlarına göre TiCN ve WC-Co kaplamalarının sürtünme katsayısını sırasıyla %54,78 ve %41,58, aşınma hacmini %88,33 ve %75,92 oranında azalttığı belirlenmiştir. Bor yağı kullanımının kuru ortam koşullarına kıyasla aşınma performansına etkisi incelendiğinde ise; sürtünme katsayısı ve aşınma hacminin sırasıyla maksimum 66.99% ve 53.70% oranında azaldığı sonucuna varılmıştır. Yüzey morfolojisi analiz sonuçlarına göre bor yağı emülsiyonunun kullanıldığı deneylerde pürüzlülük değerlerinin azaldığı görülmüştür. Fakat, TiCN kaplama yüzey kalitesini iyileştirmesine rağmen, WC kaplama yüzey kalitesini olumsuz etkilemiştir. 2D ve 3D topoğrafya ile elde edilen yüzey formu görüntüleri de pürüzlülük değerlerindeki değişimi destekler niteliktedir.

Anahtar Sözcükler : Hadde merdaneleri, kaplama, WC, TiCN, PVD, HVOF, aşınma.

Bilim Kodu : 91421

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

INVESTIGATION OF ABRASION BEHAVIOR OF WC AND TiCN- COATED HOT ROLLING ROLLS IN DRY AND BORON OIL ENVIRONMENTAL CONDITIONS

Mert PEHLİVANOĞLU

**Karabük University
Institute of Graduate Programs
Department of Mechanical Engineering**

Thesis Advisor:

Assist.Prof.Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN

August 2020, 72 pages

In this study, the effect of TiCN and WC-Co coatings on the tribological performance of spheroidal graphite cast iron materials was investigated by wear tests. Mechanical and physical effects of coating processes were analyzed by microhardness measurements and imaging methods (SEM, EDX, XRD). The tribological effect of WC-Co and TiCN coated samples was investigated by ball-on-plate abrasion tests carried out under dry and 5% concentration prepared boron oil emulsion conditions at 50N load and 60 rpm sliding speed parameters. Friction coefficient and wear volume data were obtained to examine the effect of coating process and boron oil emulsion on friction and wear behavior. Erosion mechanisms were determined with SEM images obtained from worn surfaces, surfaces were analyzed elementally with EDX images. In addition, surface roughness measurements and 2D - 3D topography images and surface form changes were examined. According to the microhardness measurement

results, it was observed that the spheroidal graphite cast iron with 290 HV hardness reached 1559 HV with TiCN coating and 1440 HV with WC-Co coating. According to the abrasion test results, it was determined that TiCN and WC-Co coatings decreased the friction coefficient by 54.78% and 41.58%, and the wear volume by 88.33% and 75.92%, respectively. When the effect of boron oil use on wear performance compared to dry environment conditions is examined; It was concluded that the friction coefficient and wear volume decreased by a maximum of 66.99% and 53.70%, respectively. According to the surface morphology analysis results, it was seen that the roughness values decreased in the experiments where the boron oil emulsion was used. However, although the TiCN coating improved the surface quality, the WC coating negatively affected the surface quality. Surface form images obtained with 2D and 3D topography also support the change in roughness values.

Key Word : Rolling mill rolls, coating, WC, TiCN, PVD, HVOF, wear.

Science Code : 91421

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocam Dr. Öğr. Üyesi Muhammet Hüseyin ÇETİN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimim boyunca manevi desteğiyle yanımda olan Işık Çelik San. Ve Tic. A.Ş. Yönetim Kurulu Başkanı Pehlivan BAYLAN'a teşekkür ederim.

Bu tezin hazırlanması süresince yoğun çalışmalarım esnasında, sabırla hiçbir yardımı esirgmeden yanımda olan sevgili eşim Merve PEHLİVANOĞLU'na tüm kalbimle teşekkür ederim.

Ayrıca bu günlere gelmemde bana ışık tutan ve her zaman yanımda olarak maddi ve manevi desteğini esirgemeyen annem Nermin PEHLİVANOĞLU'na, babam Erdiñ PEHLİVANOĞLU'na ve son olarak da kardeşim Berk PEHLİVANOĞLU'na sonsuz şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvi
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	5
HADDE MERDANELERİ	5
2.1. HADDE MERDANELERİNİN KONSTRÜKTİF ÖZELLİKLERİ.....	5
2.2. HADDE MERDANESİ NİTELİKLERİ	5
2.2.1. Dökme Demir Merdaneler Ve Çelik Merdanelerde Alaşım Elementlerinin Etkisi	6
2.2.2. Dökme Demir Merdaneler ve Çelik Merdanelerde Döküm Uygulamalarının Etkisi.....	7
2.3. HADDE MERDANESİ MALZEME ÇEŞİTLERİ.....	7
2.3.1. Dökme Demir Merdaneler.....	7
2.3.1.1. Taneli Merdaneler	7
2.3.1.2. Belirgin Chill Dökme Demir Merdaneler (CCCI)	8
2.3.1.3. Belirsiz Chill Dökme Demir Merdaneler (ICCI)	10
2.3.1.4. Küresel Grafitli Dökme Demir Merdaneler (SGCI)	11
2.3.1.5. Çift Döküm veya Kompozit Demir Merdaneler	14
2.3.2. Çelik Merdaneler	15

	<u>Sayfa</u>
2.3.2.1. Dövme Çelik Merdaneler.....	15
2.3.2.2. Dökme Çelik Merdaneler.....	16
BÖLÜM 3	18
KAPLAMA YÖNTEMLERİ	18
3.1. PVD (FİZİKSEL BUHAR BİRİKTİRME) YÖNTEMİ	19
3.2. HVOF (HIGH-VELOCITY OXYFUEL) KAPLAMA.....	20
BÖLÜM 4	22
AŞINMA	22
4.1. AŞINMA ÇEŞİTLERİ	22
4.1.1. Abrazif Aşınma.....	22
4.1.2. Adhezif Aşınma.....	22
4.1.3. Eroziv Aşınma.....	23
4.1.4. Korozyon Aşınması	24
BÖLÜM 5	25
LİTERATÜR ÖZETİ	25
BÖLÜM 6	35
MATERYAL VE METOT	35
6.1. TEST NUMUNELERİ VE KAPLAMA SÜRECİ.....	36
6.2. AŞINMA TESTLERİ.....	38
6.3. HACİM KAYBI VE YÜZEY MORFOLOJİSİ ANALİZİ.....	39
BÖLÜM 7	42
BULGULAR VE TARTIŞMA	42
7.1. KAPLAMANIN KARAKTERİZASYONU	42
7.2. SÜRTÜNME VE AŞINMA DAVRANIŞI.....	46
7.3. YÜZEY MORFOLOJİSİ ANALİZİ	48

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 8	59
SONUÇLAR	59
KAYNAKLAR	62
ÖZGEÇMİŞ	72



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1.	Kaplanacak malzemenin bulunduğu fiziksel duruma bağlı olarak kaplamaların sınıflandırılması.....	18
Şekil 3.2.	Farklı yüzey kaplama yöntemlerinin uygulama kalınlıkları	19
Şekil 3.3.	Yüksek hız oksit yakıt sistemi (HVOF) yanal kesiti.....	21
Şekil 4.1.	Adheziyon aşınmanın şematik gösterimi	23
Şekil 4.2.	Kılavuz kanadına ait bir erozyon aşınma örneği	23
Şekil 6.1.	DeneySEL çalışma için şematik diyagram.	36
Şekil 6.2.	Aşınma deney düzeneği fotoğrafı.	39
Şekil 6.3.	2D profilometreden elde edilen boyut grafiği örneği.....	40
Şekil 7.1.	(a) Temel malzeme, (b) TiCN kaplanmış malzeme, ve (c) WC-8%Co kaplanmış malzeme SEM görüntüleri ve EDX ölçüm sonuçları.	44
Şekil 7.2.	(a) Temel malzeme, (b) TiCN kaplanmış malzeme, ve (c) WC-8%Co kaplanmış malzemenin çizgi boyu EDX ölçüm sonuçları.	45
Şekil 7.3.	(a) Temel malzeme, (b) TiCN kaplanmış malzeme, ve (c) WC-8%Co kaplanmış malzemenin XRD ölçüm sonuçları.....	45
Şekil 7.4.	Temel malzeme, (b) TiCN kaplanmış malzeme, ve (c) WC-8%Co kaplanmış malzemenin mikro sertlik ölçüm sonuçları.....	46
Şekil 7.5.	Kuru ve yağlanmış koşullarda kaplanmamış ve kaplanmış malzemelerin sürtünme katsayıları.	47
Şekil 7.6.	Kuru ve yağlanmış koşullar altında kaplanmamış ve kaplanmış malzemelerin aşınma hacimleri.....	48
Şekil 7.7.	Kaplamasız yüzeye ait (a, a1) kuru ve (b, b1) bor yağı ortamında oluşan aşınma yüzey topografya görüntüleri.	51
Şekil 7.8.	TiCN kaplamalı yüzeye ait (a, a1) kuru ve (b, b1) bor yağı ortamında oluşan aşınma yüzey topografya görüntüleri.	51
Şekil 7.9.	WC-Co kaplamalı yüzeye ait (a, a1) kuru ve (b, b1) bor yağı ortamında oluşan aşınma yüzey topografya görüntüleri.	52
Şekil 7.10.	Kaplamasız, TiCN kaplı ve WC-% 8 Co kaplı yüzeylerin SEM görüntüleri.	54
Şekil 7.11.	Kuru ve bor yağı koşulları altında TiCN kaplanmış numune için EDX ölçüm sonuçları.	55
Şekil 7.12.	Kuru koşul altında WC kaplanmış numune için EDX ölçüm sonucu.....	57

Şekil 7.13. Kaplanmamış ve kaplanmış numunelerin aşınma davranışının şematik gösterimi..... 58



ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Dökme demir merdaneler ve çelik merdanelerde alaşım elementlerinin etkisi.....	6
Çizelge 2.2. Merdane yapısında bulunan serbest karbon miktarına göre merdane sınıflandırılması	7
Çizelge 2.3. Taneli merdanelerin kimyasal analizi	8
Çizelge 2.4. Taneli merdanelerin mekanik özellikleri	8
Çizelge 2.5. Belirgin chill dökme demir merdanelerin kimyasal analizi.....	9
Çizelge 2.6. Belirgin chill dökme demir merdanelerin mekanik özellikleri.....	9
Çizelge 2.7. Belirsiz chill dökme demir merdanelerin kimyasal analizi	10
Çizelge 2.8. Belirsiz chill dökme demir merdanelerin mekanik özellikleri	11
Çizelge 2.9. Perlitik yapılı küresel grafitli dökme demir merdanelerin kimyasal analizi.....	12
Çizelge 2.10. Perlitik yapılı küresel grafitli dökme demir merdanelerin mekanik özellikleri	12
Çizelge 2.11. Asiküler yapılı küresel grafitli dökme demir merdanelerin kimyasal analizi.....	13
Çizelge 2.12. Asiküler yapılı küresel grafitli dökme demir merdanelerin mekanik özellikleri	13
Çizelge 2.13. Özel küresel grafitli dökme demir merdanelerin kimyasal analizi	14
Çizelge 2.14. Özel küresel grafitli dökme demir merdanelerin mekanik özellikleri ..	14
Çizelge 2.15. Çift döküm veya kompozit demir merdanelerin kabuk kimyasal analizi.....	14
Çizelge 2.16. Çift döküm veya kompozit demir merdanelerin çekirdek kimyasal analizi.....	15
Çizelge 2.17. Çift döküm veya kompozit demir merdanelerin mekanik özellikleri ..	15
Çizelge 2.18. Dövme çelik merdane tipleri ve özellikleri	16
Çizelge 2.19. Dökme çelik merdane tipleri ve özellikleri	16
Çizelge 2.20. 75-90° Shore sertlikte dökme çelik merdanelerin kimyasal analizi.....	16
Çizelge 6.1. Kaplama parametreleri.....	38
Çizelge 6.2. Deney tasarımı verileri.	38
Çizelge 6.3. Perlitik küresel grafitli dökme demirin kimyasal bileşimi.	39
Çizelge 6.4. AISI 52100 (100Cr6) kimyasal bileşimi.....	39

Çizelge 6.5. Sertlik ölçümü ve görsel analiz için kullanılan cihazlar..... 41



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

C	: karbon
Co	: kobalt
Cr	: krom
CrN	: krom nitrür
Cu	: bakır
Mg	: magnezyum
Mn	: mangan
Mo	: molibden
MoS ₂	: molibden disülfid
N	: newton
Ni	: nikel
P	: fosfor
S	: kükürt
Si	: silisyum
Ti	: titanium
TiAlN	: titanium alüminyum nitrür
TiB ₂	: titanium borit
TiC	: titanium karbür
TiCN	: titanyum karbonitrür
TiN	: titanyum nitrür
V	: vanadyum
W	: tungsten
WC	: tungsten karbür
° C	: santigrat derece
µm	: mikrometre

KISALTMALAR

- AISI : American Iron and Steel Institute (Amerika Demir ve Çelik Enstitüsü)
- APS : Atmospheric Plasma Sprey (Atmosferik Plazma Spreyleme)
- CCCI : Clear Chill Cast Iron (Belirgin Chill Dökme Demir)
- CVD : Chemical Vapor Deposition (Kimyasal Buhar Biriktirme)
- DC : Direct Current (Doğru Akım)
- DIN : Deutch Industrie Normen (Alman Endüstri Normları)
- EDX : Energy-Dispersive X-Ray Spectroscopy (Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi)
- HSS : High-Speed Steel (Yüksek Hız Çeliği)
- HV : Vickers Pyramid Number (Vickers Sertliği)
- HVOF : High Velocity Oxygen Fuel (Yüksek Hızda Oksi Yakıt Püskürtme)
- IBAD : Ion Beam Assisted Deposition (İyon Demeti Destekli Biriktirme)
- ICCI : Indefinite Chill Cast Iron (Belirsiz Chill Dökme Demir)
- PVD : Physical Vapor Deposition (Fiziksel Buhar Biriktirme)
- SEM : Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
- SGCI : Spheroidal Graphite Cast Iron (Küresel Grafitli Dökme Demir)
- VPS : Vacuum Plasma Spray (Vakum Plazma Spreyleme)
- XRD : X-Ray Diffractometer (X-Işını Difraktometresi)

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Sıcak haddeleme işlemi, minimum güç tüketimi ve yüksek verimlilikle kompleks geometrilerdeki profillerin elde edilebilmesini sağlaması sebebiyle en çok tercih edilen plastik şekil verme yöntemlerinden biridir. Termo-mekanik koşullarda işlev gören hadde silindirleri yüksek sıcaklık koşulları ve silindir-iş parçası arasındaki yüksek yuvarlanma-kayma hızlarına bağlı olarak radyal basma zorlanması, kayma gerilmesi ve termal gerilmeye maruz kalmaktadır [1–9]. Bu durum hem hadde silindirinin aşınmasına hem de boyutsal açıdan üniform olmayan ürün eldesine neden olmaktadır. Sıcak haddeleme prosesinde en çok karşılaşılan aşınma mekanizmaları; termal yorgunluk, adhesyon, abrasyon, yorulma ve oksidasyon aşınmasıdır [8–11]. Meydana gelen bu deformasyonlar, silindir malzemesinin şekillendirme performansını sınırlandırmanın yanı sıra kullanım ömrünü azaltmaktadır. Yüksek üretim performansı ve ürün kalitesi için silindir malzemesinin mekanik ve tribolojik performansının artırılması büyük önem taşımaktadır.

Aşınma ve sıcaklık kaynaklı problemlerin minimizasyonu için mekanik ve termal dayanımı yüksek silindir malzemelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu gereksinim için yüksek sıcaklık koşullarında aşınma direnci, sertlik ve termal dayanımı yüksek olan HSS (yüksek hız çelikleri) malzemeler ağırlıklı olarak kullanılmaktadır [3,9,12–14]. Fakat HSS merdanelerin yüksek sertlik değerlerinde imal edilmesi ve zorlu çalışma koşullarında (yüksek termal çevrim ve ağır yük) iş parçası ve merdane yüzeyinde oksit tabakası oluşumuna neden olması haddeleme performansını kısıtlamaktadır [1,5,7–9,15,16]. Yüzey sertliğinin fazla olması, silindirlerde çatlak oluşumu ve gevrek kırılma riskini arttırmaktadır. Oksit tabakası oluşumu ise iş parçasının silindire yapışmasını önleyerek başta avantaj sağlasa da [4], tabaka kalınlığının belirli bir seviyenin üstüne çıkması halinde iş parçası ve silindir malzemesinin aşınmasına sebebiyet vererek yüzey kalitesini olumsuz etkilemektedir [5,10]. Bu durumda yüzey

kalitesinin artırılması için ekstra işlemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum zaman kaybına ve üretim maliyetinin artmasına neden olmaktadır.

HSS malzemesine alternatif olarak küresel grafitli dökme demirden imal edilmiş sıcak hadde merdaneleri dikkat çekmektedir. Bu malzeme üstün mekanik özellikleri (aşınma direnci, çekme mukavemeti, yüksek sıcaklık koşullarında oksidasyon dayanımı, yorulma direnci, titreşim sönümlenme kabiliyeti, yüksek süneklik, yüksek işlenebilirlik ve şekillendirilme kabiliyeti) sayesinde haddeleme prosesi için uygun karakteristiğe sahiptir [17–22]. Fakat yüksek sıcaklık, ağır yük ve yüksek hız parametrelerinin oluşturduğu zorlu çalışma koşulları küresel grafitli dökme demirden üretilmiş sıcak hadde merdanelerinin aşınma direncini azaltmaktadır. Literatürde alaşım elementi takviyesi ve ısıl işlem yöntemleri ile küresel grafitli dökme demirin aşınma dayanımının artırıldığı çalışmalar mevcuttur [19,23–27]. Fakat bu yöntemler malzemenin hem yüzeyinde hem de iç yapısında değişikliğe sebebiyet verdiği için sünekliğin ve şekillendirilebilirliğin azalmasına neden olmaktadır. Bu problemin minimizasyonu için, sadece malzeme yüzeyinin fiziksel ve kimyasal yapısını değiştirerek tribolojik üstünlük sağlayan yüzey kaplama işlemleri dikkat çekmektedir [28]. Özellikle de endüstriyel alanda yaygın şekilde kullanılan WC ve Ti kaplamaları sayesinde malzemelerin tokluğu ve aşınma direnci ciddi oranda artırılabilir [29–38]. WC ve Ti kaplamalarının malzeme sertliğini ciddi oranda artırması (~1500 HV) ve yüksek sıcaklıkta (400 °C'ye kadar) aşınma dayanımı sağlaması sıcak hadde merdanesinin tribolojik performansı açısından büyük önem taşımaktadır [29–31,39]. Literatürde WC ve TiC kaplanmış küresel grafitli dökme demir malzemelerinin aşınma performansının incelendiği çalışmalar mevcuttur. Mahmoud ve El-Labban [39], TiC kaplamalı küresel grafitli dökme demirin mikroyapı ve aşınma davranışını inceleyerek kaplama işleminin tribolojik performansa etkisini araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre sertliği 240 HV olan malzemenin TiC malzeme ile kaplandığında 1330 HV değerine ulaştığı ve aşınma direncinin ciddi oranda arttığı belirlenmiştir. Jiansheng vd. [40], WC-8Co kaplamalı küresel grafitli dökme demir malzemesinin tribolojik performansını mikroyapı ve aşınma davranışını inceleyerek araştırmışlardır. Kaplama malzemesinin sertlik, sürtünme katsayısı, oksit tabakası ve aşınma mekanizmaları oluşumuna etkisi analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre kaplama malzemesiyle sertliğin (17410 MPa) arttığı ve sürtünme katsayısı

değerlerinin (0,18) azaldığı belirlenmiştir. Aşınma direnci analiz edildiğinde ise kaplama tabakasının yüzey altı tabakaya kıyasla aşınma direncini 2,1 kat arttırdığı sonucu elde edilmiştir. Mevcut literatür çalışmalarından elde edilen sonuçlara göre WC ve TiC kaplamalarının küresel grafitli dökme demir malzemesinin yüksek sıcaklık ve ağır yük koşullarında aşınma direncini arttırdığı belirlenmiştir. Fakat yüzey kaplama işlemi uygulanmış küresel grafitli dökme demir malzemesinin yağlayıcı ortamındaki aşınma davranışının incelendiği yeterli sayıda çalışma bulunmamaktadır.

Merdanelerin aşınma performansını etkileyen diğer bir faktör de kesme sıvısının tribolojik performansıdır. Sıcak haddeleme proseslerinde şekillendirme için gerekli sıcaklık ve prosesteki sürtünme kuvvetleri sebebiyle yüksek değerlerde sıcaklık oluşumu meydana gelmektedir. Bu durum merdane ve iş parçası arasında adhezyon oluşumunu hızlandırarak hem ürün kalitesini hem merdanelerin kullanım ömrünü olumsuz etkilemektedir [1,4,7,8,10]. Belirtilen sebeplerden dolayı yüksek sıcaklık koşullarında üstün tribolojik performans sergileyen kesme sıvısı kullanımı büyük önem taşımaktadır. Yüksek sıcaklık ve ağır yük koşullarında yağlayıcılık performansına sahip bor yağı kullanımı ile zorlu koşullarda çalışan makine parçalarının aşınma direnci arttırılabilmektedir [41–44]. Literatürde bor yağı takviyeli yağlayıcı kullanımının aşınma performansına etkisinin incelendiği çalışmalar mevcuttur. Serin [45], bor katkılı yağlayıcıların sıcak ortam koşullarında aşınma performansına etkisini araştırmıştır. Geliştirilen yağlayıcının 60N yük, iki farklı hız (2,5 m/s ve 3,5 m/s) ve farklı sıcaklık (oda sıcaklığı, 50°C, 80 °C) koşullarındaki aşınma performansı ball-on-disk aşınma deneyleri ile test edilmiştir. Deney sonuçlarına göre 50 °C sıcaklık ve bor katkılı yağlayıcı ortam koşullarında diğerlerine kıyasla daha düşük sürtünme katsayısı ve aşınma miktarı değerleri ve daha yüksek yüzey kalitesi elde edilmiştir. Baş ve Karabacak, farklı konsantrasyonlarda (ağırlıkça %2, %4 ve %6) hazırlanmış borik asit ve boron nitrit katkılı yağlayıcıların AISI 52100 malzemesinin tribolojik performansına etkisini pin-on-disk aşınma deneyleriyle araştırmışlardır. Deney sonuçlarına göre temas yükü ve hız arttıkça borik asit ve boron nitrit katkılı yağlayıcıların tribolojik performanslarının arttığı, her iki yağlayıcı için de %4 oranın optimum konsantrasyon oranı olduğu belirlenmiştir. Yağlayıcılar arasında kıyaslama yapıldığında ise borik asit katkılı yağlayıcıların boron nitrit katkılı yağlayıcılara kıyasla daha iyi aşınma performansı sağladığı sonucuna varılmıştır.

Ucun vd. [46], bor yağı takviyeli soğutucuların (%1 bor yağı + su ve %5 bor yağı + su) aşınma performansını mermer kesme işleminde kullanılan elmas kesici disklerin aşınma davranışını inceleyerek araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre bor yağı katkılı soğutucuların aynı zamanda yağlayıcı etkisi sebebiyle disk ve mermer arasındaki sürtünme kuvvetinin azaldığı, bu duruma bağlı olarak aşınma miktarının azaldığı belirlenmiştir.

Mevcut literatür çalışmalarında WC ve TiCN kaplamalarının malzemelerin aşınma direncini arttırdığı belirlenmiştir. Literatürdeki çalışmada WC ve TiCN kaplamalarının küresel grafitli dökme demirin aşınma direncine etkisi sadece kuru ortam koşullarında incelenmiştir. Fakat WC ve TiCN kaplamalı küresel grafitli dökme demir malzemelerin bor yağı ortamında aşınma performansının incelendiği çalışma bulunmamaktadır. Küresel grafitli dökme demirden üretilen hadde silindirleri genellikle bor emülsiyonunun soğutucu ve yağlayıcı olarak kullanıldığı koşullarda çalışmaktadır. Bu çalışmanın özgün değeri WC ve TiCN kaplamalarının ve bor yağı emülsiyonu kullanımının küresel grafitli dökme demir malzemelerinin aşınma performansına etkisinin belirlenmesidir. Çalışma kapsamında WC ve TiCN kaplanmış perlitik yapıdaki küresel grafitli dökme demir malzemeleri 50 N yük ve 60 dev/dk kayma hızı parametrelerinde, kuru ve %5 konsantrasyonda hazırlanmış bor yağı emülsiyonu ortam koşullarında ball-on-plate aşınma deneylerine tabi tutulmuştur. Deneylerden elde edilen sürtünme katsayısı ve aşınma hacmi değerleri kuru ve bor yağı emülsiyonu koşulları için WC ve TiCN kaplamalı malzemeler arasında kıyaslama yapılarak incelenmiştir. Yüzey morfolojisi analizi için aşınmış yüzeylerden elde edilen 3D topoğrafya görüntüleri ve pürüzlülük değerleri incelenmiştir. Ayrıca SEM görüntüleri ve EDX analizleri ile yüzeyde oluşan aşınma mekanizmaları belirlenmiştir.

BÖLÜM 2

HADDE MERDANELERİ

Hadde merdaneleri haddeleme prosesinin en pahalı araçları olup, haddelenen malzemenin deforme edilmesi için kullanılırlar.

2.1. HADDE MERDANELERİNİN KONSTRÜKTİF ÖZELLİKLERİ

Hadde merdaneleri üç kısımdan oluşmaktadır:

- Gövde: Haddelemenin yapıldığı kısım.
- Muylu: Gövdeyi destekler ve yuvarlanma basıncına direnç gösteren kısım.
- Wobblers: Merdaneye tahrik veren kuvvetin, döner şaftlar yardımıyla merdaneye aktarıldığı kısım [47].

Saclar, lamalar ve plakalar için düz yüzeyli merdaneler (çiftler halinde) kullanılırken, çubuk ve şekilli profiller için oluklu veya şekil verilmiş merdaneler kullanılır [47].

Kütük hadde merdaneleri, kütük ve ingotları haddeleyerek çubuk, profil veya plakaya dönüştürürler. Bu merdaneler; kaba grup haddeleme merdaneleridir. Kaba grup haddeleme merdanelerinin ardından, orta grup hadde merdaneleri ve finiş grubu hadde merdaneleri kullanılır.

2.2. HADDE MERDANESİ NİTELİKLERİ

Çelik merdaneler ve dökme demir merdaneler iki ana merdane kategorisidir. Herhangi bir amaç için kullanımları, gerçekleştirdikleri göreve ve işe bağlıdır. Haddelemede bir merdanenin mekanik özellikleri en önemli etkidir. Bu özellikler; tokluk, termal çatlamaya direnç, ani yüklere direnç ve aşınma direncidir.

Merdanelerin sınıflandırılması, merdane bünyesinde bulunan karbon yüzdesine bağlıdır [47].

2.2.1. Dökme Demir Merdaneler Ve Çelik Merdanelerde Alaşım Elementlerinin Etkisi

Dökme demir merdaneler ve çelik merdanelerde karbon içeriği önemli bir etkiye sahiptir ve Çizelge 2.1’de gösterilmiştir. Genel olarak, karbon içeriği ne kadar yüksek olursa merdane o kadar sert olur. Ters durumda, düşük karbon içeriği merdanenin daha yumuşak olmasına yol açar [47].

Çizelge 2.1. Dökme demir merdaneler ve çelik merdanelerde alaşım elementlerinin etkisi [47].

Dökme Demir Merdaneler	Element	Çelik Merdaneler
Sertliği, aşınma direncini, kırılabilirliği ve chill tabakanın sünekliğini artırır.	Karbon	Sertliği, kırılabilirliği ve aşınma direncini artırır.
Grafit içeriğini artırır, temiz bir dökme demir sağlar.	Silisyum	% 0,2-0,35 oranında ilave edilirse çeliği temizler, sertliği artırır, oksijenden arındırır ve sağlam döküm sağlar.
Sertliği ve kırılabilirliği artırır.	Fosfor	Sertliği ve kırılabilirliği artırır. Sünekliği azaltır.
Sertliği ve chill tabaka derinliğinin kırılabilirliğini artırır.	Kükürt	Sertliği ve kırılabilirliği artırır. Sünekliği azaltır, ihtiyari olarak kullanılmalıdır.
Dar aralıktaki chill tabakayı azaltır, geniş aralıktaki chill tabakayı artırır, nikel ve krom ile kombinasyon halinde sertliği ve kırılabilirliği artırır.	Mangan	Sertliği ve kırılabilirliği artırır, oksitler ve sülfürler için temizleyici görev görür, çekme mukavemetini ve aşınma direncini artırır.
Çekme mukavemetini ve aşınma direncini artırır, chill tabaka derinliğini azaltır.	Nikel	Diğer elementler ile birlikte ateş çatlaklarına karşı mukavemeti ve aşınma direncini artırır.
İnce taneli yapı sağlayarak genel mukavemeti artırır; ateş çatlaklarına karşı mukavemetini ve direncini artırır.	Molibden	Genel mukavemeti ve sertliği artırır.
Ni veya Mo veya her ikisi ile birlikte sertleştirici olarak kullanılır, chill tabaka derinliğini artırır.	Krom	Ni veya Mo veya her ikisi ile birlikte sertleştirici olarak kullanılır.
Çekme mukavemetini ve aşınma direncini artırır, chill tabaka derinliğini azaltır.	Bakır	Diğer elementler ile birlikte ateş çatlaklarına karşı mukavemeti ve aşınma direncini artırır.
Sertleştirici olarak dikkatle kullanılır.	Bor	Sertliği artırır.

2.2.2. Dökme Demir Merdaneler ve Çelik Merdanelerde Döküm Uygulamalarının Etkisi

Merdanelerin sınıflandırılması ayrıca merdanenin imalatı için benimsenen döküm uygulamasına, yani aşağıdaki Çizelge 2.2’de gösterildiği gibi merdanenin yapısında serbest karbonun mevcut olduğu şekil ve yüzdeye dayanmaktadır [47].

Çizelge 2.2. Merdane yapısında bulunan serbest karbon miktarına göre merdane sınıflandırılması [47].

Merdane	Çelik Merdaneler		Çelik Temelli Merdaneler	Dökme Demir Merdaneler
Mikro Yapı	Ferrit ve Perlit	Perlit ve Sementit	Küresel Sementit ve Perlit (yani ısıtılmış işlem görmüş)	Sementit veya Grafit + Perlit, Sorbit veya Martensit
C %	0,80		1,25	>2,5

2.3. HADDE MERDANESİ MALZEME ÇEŞİTLERİ

Hadde merdanesi üretiminde dökme çelik ve dökme demir malzemeler başı çekmektedir.

2.3.1. Dökme Demir Merdaneler

2.3.1.1. Taneli Merdaneler

Taneli merdaneler (kaba haddeleme merdaneleri), diğer tüm dökme demir merdanelerden daha düşük karbon içeriğine sahiptir. Serbest grafit taneleri içerdiği için gri dökme demir olarak adlandırılır. Merdanenin yapısı, merdane boyunca uniformdur ve ateş çatlaklarına karşı yüksek direnç özelliğine sahiptir. Bir dereceye kadar, yapısındaki serbest grafit varlığı nedeniyle kendi kendini yağlar. Serbest grafitin varlığı, yüzeyde adhezyon oluşmasına ve merdane muylularının aşınmasına direnç sağlar. Bu nedenle, muyluların haddeleme sırasında uç miktarda itmeye mukavemet göstermesi gereken bölgelerde bu tip dökme demir merdanenin kullanılması her zaman avantajlıdır [47].

Taneli merdanelerin kimyasal analizi Çizelge 2.3'te verilmiştir.

Çizelge 2.3. Taneli merdanelerin kimyasal analizi [47].

C	Mn	Si	Cr	Mo
% 1,50-2,50	%0,70-1,20	%0,70-1,10	%0,90-1,10	%0,20-0,80

Taneli merdanelerin mekanik özellikleri Çizelge 2.4'te verilmiştir.

Çizelge 2.4. Taneli merdanelerin mekanik özellikleri [47].

Gerilme Dayanımı N/mm²	Darbe Dayanımı J/cm²	Sertlik Sh°C
590-785	1,0-3,0	40-55

Merdanelerin kalitesini artırmak için taneli merdanelere çeşitli alaşım elementleri eklenir. Böylece sertlik, tokluk ve eğilme mukavemeti bu ölçüde iyileştirilebilir. Bu merdaneler kaba haddeme grupları ve orta haddeme grupları için kullanılabilir. Taneli merdanelere alaşım ilaveleri eklendiğinde buna "Alaşımli Taneli Çelik Merdaneler" denir [47].

Taneli merdaneler şu alanlarda kullanılır:

- Orta ve yüksek kesitli haddelerde,
- Demiryolu rayı, yapı çeliği üretiminde orta grup ve finiş tezgahlarında,
- Çubuk haddeleri orta grup tezgahlarında [47].

2.3.1.2. Belirgin Chill Dökme Demir Merdaneler (CCCI)

Belirgin chill dökme demir merdanelerin imalatı, kimyasal bileşimi ve soğutma oranını kontrol ederek, demir- karbon sisteminin benzersiz özelliğini kullanır. Yüzey tabakasında istenen ötektik karbür elde edilebilir (istenen belirli derinliğe kadar). Bu belirgin chill tabakası yüzey tabakasında herhangi bir serbest grafit içermeyecektir; çünkü bu chill bölge veya tabakada sertlikte herhangi bir düşüş beklenmemektedir. Chill bölgeyi bir alacalı bölge takip eder ve ardından merdane gri dökme demir bir çekirdeğe sahip olacaktır. Belirgin chill döküm merdane, haddeme yüküne

dayanmak için tok ve yumuşak çekirdek ile birlikte sert bir çalışma katmanına sahip olacaktır. Döküm işlemi sırasında; muylu kısmı kum içerisinde dökülür, gövdeler kokil kalıp içerisinde dökülür, serbest sementit olmadan tam gri dökme demir muylu elde edilir ve karbon kütlesi serbest grafit olarak bulunur [47].

Buna göre:

- Alaşımlandığında mükemmel bir aşınma direncine, kırılmaya, ateş çatlaklarına ve kavlamaya karşı yeterli dirence sahip olur.
- Beyaz dökme demirin yüzey tabakasında, kokil kalıpta chill oluşturarak hızlı bir şekilde soğutulduğunda serbest grafit oluşumu engellenecektir. Kum kalıplarda diğer kısımlara göre çok daha yavaş şekilde soğutma gerçekleştiğinden, gri dökme demir yapı oluşturur.
- Düşük maliyetlidir [47].

Belirgin chill dökme demir merdanelerin kimyasal analizi Çizelge 2.5'te verilmiştir.

Çizelge 2.5. Belirgin chill dökme demir merdanelerin kimyasal analizi [47].

C	Mn	Si	Cr	Mo	P	S	Ni
% 2,90-3,60	%0,20-0,60	%0,20-1,00	%0,20-0,40	%0,30-0,40	%0,20-0,40	%0,055-0,40	% 1,80-2,20

Belirgin chill dökme demir merdanelerin mekanik özellikleri Çizelge 2.6'da verilmiştir.

Çizelge 2.6. Belirgin chill dökme demir merdanelerin mekanik özellikleri [47].

Gerilme Dayanımı N/mm ²	Eğilme Dayanımı N/mm ²	Darbe Dayanımı J/cm ²	Sertlik Sh°C
180-250	300-400	2,0-3,0	60-75

Belirgin chill dökme demir merdaneler şu alanlarda kullanılır:

- Sac, levha, şerit haddelemede finiş merdaneleri olarak,
- Düşük kesitli çubuk ve kangal haddelemede orta grup ve finiş tezgahlarında [47].

2.3.1.3. Belirsiz Chill Dökme Demir Merdaneler (ICCI)

Belirgin chill ve belirsiz chill dökme demir merdane arasındaki en büyük fark, belirsiz chill merdanelerin yapısında serbest mikroskobik grafitin varlığıdır. Matris, alaşım elementlerinin yüzdesine bağlı olarak ince perlitten beynite değişir. Kimyasal olarak kontrol edilebilen karbür / grafit dengesi değiştirilerek istenilen sertlik elde edilir. Belirsiz chill dökme demir merdanelerinin açıkça tanımlanmış bir chill derinliği yoktur. Sert yüzeyden yumuşak merdane çekirdeğine geçiş kademeli olacak ve belirgin chill dökme demir merdanelerde olduğu gibi alacalı bölge (gri+beyaz dökme demir) veya geçiş bölgesi olmayacaktır. ICCI merdanelerde Ni, Cu, Mo ve Si'nin alaşımlanmasıyla, çalışma yüzeyi artık tamamen beyaz dökme demir olmayacak, ancak küçük bir miktar ince taneli grafitte sahip olacaktır; fakat birincil karbürlerde gerçekleşen azalmaya bağlı olarak chill derinliği ile miktarı ve tane boyutu artabilir. Bu tip merdanelerin çekirdeği ve muyluları tamamen gri dökme demir olmaktadır [47].

ICCI merdaneleri, belirgin chill dökme demir merdanelerden daha güçlü ve daha toktur. Yüzey yapısındaki grafit kavlamayı azaltır, darbeye karşı dayanımı ve ateş çatlaklarını iyileştirir. ICCI merdanelerindeki kademeli sertlik değişimi, yapı çeliği üreten haddelerin derin pasolara sahip merdaneleri olarak kullanılmasını mümkün kılar. Yüzeyden merdane çekirdeğine sertliğin düşme hızı, kimyasal bileşimde ve ayrıca ısıl işlemde değişiklik yapılarak dikkatlice seçilir. ICCI merdaneler, küresel grafitli dökme demir merdanelerden daha ucuzdur ancak aşınmaya karşı direnci çok yüksek değildir. Bu merdaneler kullanıldığında, haddeleme sırasında şiddetli sıcaklık değişimlerinden kaçınılması tavsiye edilir [47].

Belirsiz chill dökme demir merdanelerin kimyasal analizi Çizelge 2.7'de verilmiştir.

Çizelge 2.7. Belirsiz chill dökme demir merdanelerin kimyasal analizi [47].

C	Mn	Si	Cr	Mo	P	S	Ni
% 3,00-3,50	%0,50-1,20	%0,90-1,40	%0,90-1,40	%0,25-0,40	Maks. %0,30	Maks. %0,10	%0,70-2,00

Belirsiz chill dökme demir merdanelerin mekanik özellikleri Çizelge 2.8'de verilmiştir.

Çizelge 2.8. Belirsiz chill dökme demir merdanelerin mekanik özellikleri [47].

Gerilme Dayanımı N/mm ²	Eğilme Dayanımı N/mm ²	Darbe Dayanımı J/cm ²	Sertlik Sh [°] C
200-280	350-450	2,0-4,0	55-75

Belirsiz chill dökme demir merdaneler şu alanlarda kullanılır:

- Kütük demir ve ticari profillerin haddelenmesinde kaba haddeleme tezgahlarında,
- Filmaşın, ticari profil ve hafif yapı çeliklerinin orta grup ve finiş tezgahlarında [47].

2.3.1.4. Küresel Grafitli Dökme Demir Merdaneler (SGCI)

SGCI merdanelerin özellikleri hem dökme demiri hem de dökme çeliği kapsadığı için günümüzde en kabul edilebilir ve çok yönlü merdane malzemelerinden biri olarak kabul edilmektedir. Bu özelliklerin bir kombinasyonu, bu merdanelerin kaba işleme, orta ve finiş gruplarında kullanılmasını sağlayabilir. Kullanımına bağlı olarak, perlitik, beynitik ila martensitik yapıya sahip çok çeşitli SG demir merdaneler mevcuttur ve ayrıca chill döküm veya kuma döküm şeklinde de mevcuttur. SG merdanelerin sertliği 42° ile 80° shore arasında değişir. Burada grafit, pul grafitin çentik etkisini ortadan kaldırmak ve merdanelerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için küresel veya nodül şeklini alır. SGCI merdaneler genellikle chill dökümdür; sementite ve serbest küresel grafitlere sahip çalışma yüzeyini elde etmek için kullanılır. Ötektik karbür oranı, küresel grafit miktarındaki artışla birlikte merdane yüzeyinden çekirdeğe doğru azalır.

SGCI, daha ağır çekme yüklerine dayanması için ICCI merdanelerinden çok daha fazla mukavemete ve tokluğa sahiptir. SGCI merdanelerdeki grafit varlığı, kendi kendini yağlamayı sağlaması nedeniyle, merdane ısı ve sürtünmeye maruz kaldığında önemlidir. Grafit varlığı, ateş çatlaklarına karşı direnci de artırır. Diğer merdane malzeme çeşitlerine göre haddelenmiş malzeme yüzeyi çok daha iyidir. Ayrıca, mekanik gerilmeler ve ateş çatlakları nedeniyle oluşan kavlamamanın önlenmesine yardımcı olan sönümlenme etkisi sağlar [47].

2.3.1.4.1. Perlitik Yapılı Küresel Grafitli Dökme Demir Merdaneler

Yüzeyin yapısı, perlitik matristeki ötektik sementit ve grafit nodülleridir. Perlitik yapı, yüksek sıcaklıkta iyi termal yorulma direncine sahiptir.

Perlitik yapılu küresel grafitli dökme demir merdaneler, üstün mukavemet, kavlamaya karşı iyi aşınma direnci ve ateş çatlaklarına karşı direnç kombinasyonu nedeniyle birçok geleneksel çelik ve dökme demir merdane için iyi bir alternatiftir [47].

Perlitik yapılu küresel grafitli dökme demir merdanelerin kimyasal analizi Çizelge 2.9'da verilmiştir.

Çizelge 2.9. Perlitik yapılu küresel grafitli dökme demir merdanelerin kimyasal analizi [47].

C	Ni	Mo	Mg
% 3,00-3,50	% 1,50-2,50	% 0,20-0,50	% 0,04-0,07

Perlitik yapılu küresel grafitli dökme demir merdanelerin mekanik özellikleri Çizelge 2.10'da verilmiştir.

Çizelge 2.10. Perlitik yapılu küresel grafitli dökme demir merdanelerin mekanik özellikleri [47].

Gerilme Dayanımı N/mm²	Darbe Dayanımı J/cm²	Sertlik Sh^oC
400-600	2,0-4,0	45-65

Perlitik yapılu küresel grafitli dökme demir merdaneler şu alanlarda kullanılır:

- Blum, slab ve filmaşın haddelenmesinde kaba grup ve orta grup haddeleme tezgahlarında,
- Ağır yapı çeliklerinin haddelenmesinde kaba grup, orta grup ve finiş haddeleme tezgahlarında,
- Sac haddelemesinde finiş haddeleme tezgahlarında [47].

2.3.1.4.2. Asiküler Yapılı Küresel Grafitli Dökme Demir Merdaneler

Asiküler yapılu küresel grafitli dökme demir merdaneler yapısı, beynit matrisindeki grafit nodüllerinden oluşur. Daha fazla mukavemet elde etmek için yüksek alaşım içeriğine sahiptir. Belirli bir aşınma direnci derecesini elde etmek için, asiküler yapılu küresel grafitli dökme demir merdaneler perlitik yapılu küresel grafitli dökme demir merdanelere göre daha toktur ve darbe dayanımı daha yüksektir [47].

Asiküler yapılu küresel grafitli dökme demir merdanelerin kimyasal analizi Çizelge 2.11'de verilmiştir.

Çizelge 2.11. Asiküler yapılu küresel grafitli dökme demir merdanelerin kimyasal analizi [47].

C	Ni	Mo	Mg
% 3,20-3,50	%1,80-3,00	%0,40-1,00	%0,04-0,07

Asiküler yapılu küresel grafitli dökme demir merdanelerin mekanik özellikleri Çizelge 2.12'de verilmiştir.

Çizelge 2.12. Asiküler yapılu küresel grafitli dökme demir merdanelerin mekanik özellikleri [47].

Gerilme Dayanımı N/mm ²	Darbe Dayanımı J/cm ²	Sertlik Sh°C
500-600	3,0-5,0	65-85

Asiküler yapılu küresel grafitli dökme demir merdaneler şu alanlarda kullanılır:

- Ağır yapı çeliklerinin haddelenmesinde orta grup ve finiş grubu haddeleme tezgahlarında [47].

2.3.1.4.3. Özel Küresel Grafitli Dökme Demir Merdaneler

Hem Perlitik hem de Asiküler küresel grafitli dökme demir merdanelerin kombinasyonundan oluşan merdanelerdir. Küresel grafitler ferrit ile çevrilidir (Boğa gözü formu). Ateş çatlaklarına ve termal problemlere karşı gelişmiş direnç sağlar. İstenilen mekanik özelliklere ulaşmak için özel ısıl işlem yapılır [47].

Özel küresel grafitli dökme demir merdanelerin kimyasal analizi Çizelge 2.13'te verilmiştir.

Çizelge 2.13. Özel küresel grafitli dökme demir merdanelerin kimyasal analizi [47].

C	Mn	Si	Cr	Mo	P	S	Ni
% 2,80-3,50	%0,50-0,65	%1,40-2,30	< %0,30	%0,50-1,00	< %0,10	< %0,025	%2,00-3,50

Özel küresel grafitli dökme demir merdanelerin mekanik özellikleri Çizelge 2.14'te verilmiştir.

Çizelge 2.14. Özel küresel grafitli dökme demir merdanelerin mekanik özellikleri [47].

Gerilme Dayanımı N/mm²	Sertlik Sh°C
450-600	45-55

2.3.1.5. Çift Döküm veya Kompozit Demir Merdaneler

Daha yüksek aşınma direnci ve tokluğa sahip merdaneler elde etme çabası, çift döküm merdanelerinin geliştirilmesine yol açtı. Bu tür merdaneler genellikle sert kabuğa ve tok çekirdeğe sahip kompozit merdanelerdir. Yüksek aşınma direnci için beynitik veya martensitik yapı elde etmek mümkündür. Uygulamaya bağlı olarak, merdanelerin yüzeyinde sert alaşımlı demir ve çekirdek olarak yumuşak gri dökme demir veya küresel grafitli dökme demir olacaktır. Karbür ve grafitin uygun şekilde dağıldığı kabuk matrisi, yüksek aşınma direnci ve iyi yüzey kalitesi sağlar. Daha yumuşak çekirdek ise iyi mekanik özellikler ve darbeli yüklere karşı direnç sağlar [47].

Çift döküm veya kompozit demir merdanelerin kabuk kimyasal analizi Çizelge 2.15'te verilmiştir.

Çizelge 2.15. Çift döküm veya kompozit demir merdanelerin kabuk kimyasal analizi [47].

C	Ni	Mo	Cr
% 3,15-3,45	%3,80-4,50	%0,30-0,50	%1,40-1,90

Çift döküm veya kompozit demir merdanelerin çekirdek kimyasal analizi Çizelge 2.16'da verilmiştir.

Çizelge 2.16. Çift döküm veya kompozit demir merdanelerin çekirdek kimyasal analizi [47].

C	Ni	Mn	Mg
% 3,00-3,50	% 1,50-2,50	%0,45-0,75	%0,04-0,07

Çift döküm veya kompozit demir merdanelerin mekanik özellikleri Çizelge 2.17'de verilmiştir.

Çizelge 2.17. Çift döküm veya kompozit demir merdanelerin mekanik özellikleri [47].

Gerilme Dayanımı N/mm ²	Gövde Sertlik Sh°C	Muylu Sertlik Sh°C	Darbe Dayanımı J/cm ²
200-500	65-85	35-45	Maks. 2,0

Çift döküm veya kompozit demir merdaneler şu alanlarda kullanılır:

- Levha haddelenmesinde,
- Tandem tip soğuk haddehanelerin ilk tezgahlarında,
- Filmaşın haddelemede finiş haddeleme tezgahlarında [47].

2.3.2. Çelik Merdaneler

Çelik merdaneler döküm veya dövme olabilir. Demir merdanelerden çok daha güçlü ve tokurlar. Çelik merdanelerin, dökme demir merdanelere göre yüzey pürüzlülüğü daha fazla olduğundan daha yüksek bir sürtünmeye sahiptir. Bu da haddeleme esnasında merdanelerin haddelenen malzemeye daha iyi bir kapma uygulamasını sağlar. Ateş çatlaklarına karşı direnç, çelik merdane kullanmanın ek bir avantajıdır [47].

2.3.2.1. Dövme Çelik Merdaneler

Merdanelerin ani şok yüklerine maruz kaldığı yerlerde ve daha iyi finiş yüzey kalitesine sahip ürün istendiği yerlerde dövme çelik merdane kullanılır. Dövme çelik

merdaneler, karbon çeliği dövme merdaneler ve alaşımlı çelik dövme merdaneler olarak sınıflandırılır. Dövme merdanedeki karbon içeriği % 0.35-0.80 aralığında değişir [47].

Çizelge 2.18. Dövme çelik merdane tipleri ve özellikleri [47].

Dövme Tipi	Çelik	Sembol	Sertlik Sh°C	Karakteristiği	Kullanım Alanı
Karbon Çeliği		FCS-30	25-35	Yüksek gerilme dayanımı	Blok ve blum haddeleme
Alaşım Çeliği		FCS-50	50-60	Ateş çatlaklarına karşı direnç	Slab haddeleme ve geri destek merdaneleri
		FSC-80	80-90	Kırılma ve kavlamaya karşı direnç	Destek merdaneleri ve soğuk haddeleme iş merdaneleri

2.3.2.2. Dökme Çelik Merdaneler

Dökme çelik merdaneler, genellikle karbon ve alaşım elementlerinin yüzdesine bağlı olan alaşımlı çelik döküm, karbon çeliği temelli döküm ve adamit kalitesinde sınıflandırılır. Alaşım elementlerinin eklenmesi, dökme çelik merdanelerin ateş çatlaklarına ve aşınmaya karşı direncini artırır [47].

Çizelge 2.19. Dökme çelik merdane tipleri ve özellikleri [47].

Dökme Tipi (%C)	Çelik	Sembol	Sertlik Sh°C	Karakteristiği	Kullanım Alanı
Alaşım Çeliği (%0,5-0,8)		CSB-30	25-40	İyi işlenebilme	Blok, slab ve blum haddeleme
Karbon Çeliği (%0,8-1,4)		CSB-40	40-50	-Yüksek gerilme dayanımı ve sünme	Orta ve ağır profil haddelemede kaba grup tezgahlarında
Adamit (%1,4-2,2)		CSB-50	50-80	-Kırılma ve ateş çatlaklarına karşı direnç -Yüksek eğilme dayanımı	Ağır profil haddelemede finiş grubu tezgahlarında

Çizelge 2.20. 75-90° Shore sertlikte dökme çelik merdanelerin kimyasal analizi [47].

C	Mn	Si	Cr	Mo	W	V	Co
% 1,50-3,50	%0,30-1,50	%0,30-3,0	< %5,00	<%9,00	< %20	%3,00-15,00	<%10

Dökme çelik merdaneler şu alanlarda kullanılır:

- Levha haddelenmesinde kaba, orta ve finiş grubu haddeleme tezgahlarında,
- Ray ve yapı çeliklerinin haddelenmesinde finiş grubu haddeleme tezgahlarında,
- Çubuk haddelemede orta grup haddeleme tezgahlarında [47].



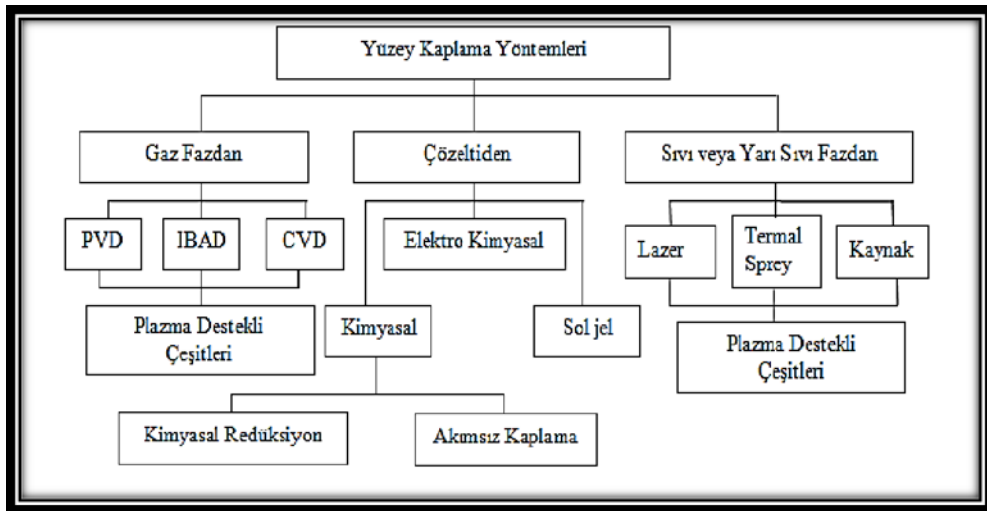
BÖLÜM 3

KAPLAMA YÖNTEMLERİ

Günümüz teknolojisinde, tek yapıya sahip olan malzemelerden karşılanamayan bazı özellikler neticesinde, bu karşılanamayan özelliklerin kombinasyonunu gerçekleştirebilen malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır [48]. Bu amacı gerçekleştirebilmek gayesiyle kaplama tekniklerinden yararlanılmaktadır [48].

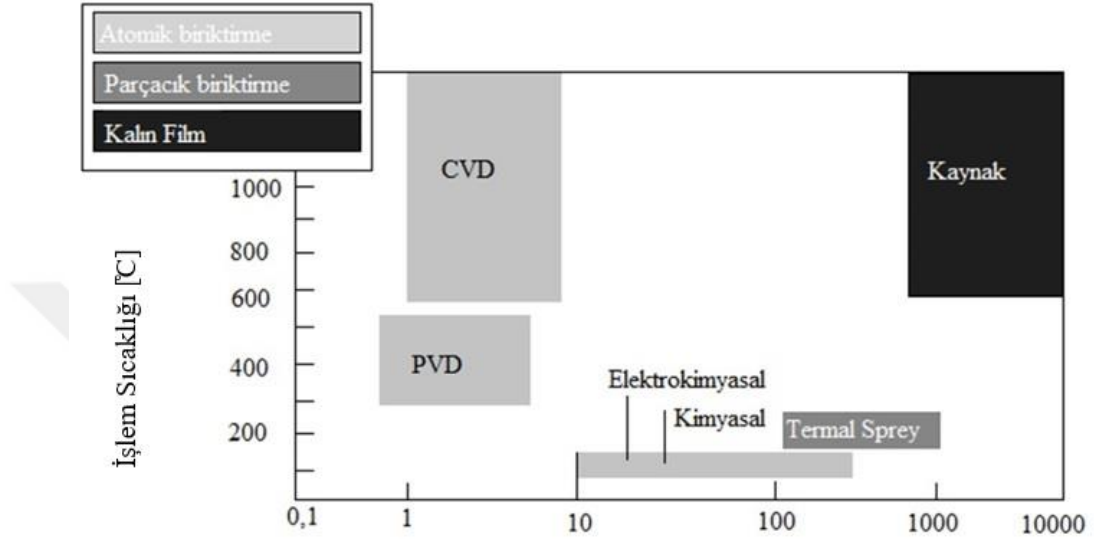
Kaplama süreçlerinin temelde iki maksadı mevcuttur. Bunların ilki malzeme yüzeyinin aşınma direncini arttırmak ve ikincisi ise sürtünme davranışının azalmasını sağlamaktır [49].

Bir kaplama işleminin uygunluğu yani; kaplamanın başarılı ya da başarısız olarak kabul edilmesi, altlık (taban) malzeme ve kaplama arasındaki yapışmaya bağlıdır. Yapışma iyi bir şekilde gerçekleşmiş ise; kaplanmış parçanın, aşınma ve korozyon dayanımı da o kadar iyileşmiş olur [49].



Şekil 3.1. Kaplanacak malzemenin bulunduğu fiziksel duruma bağlı olarak kaplamaların sınıflandırılması [50].

Kaplama metodlarının uygulama alanlarını belirleyen iki parametreden birincisi, kaplama işleminin gerçekleştirildiği sıcaklık, ikincisi kaplama işlemi sonrası elde edilebilecek kaplama kalınlık aralığıdır [51]. Farklı çeşitlerde kaplama teknikleri için işlem sıcaklıkları ve elde edilebilecek kaplama kalınlıkları Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2. Farklı yüzey kaplama yöntemlerinin uygulama kalınlıkları [50].

3.1. PVD (FİZİKSEL BUHAR BİRİKTİRME) YÖNTEMİ

Fiziksel buhar biriktirme (PVD) işlemleri, bir malzemenin atomlarının veya moleküllerinin katı veya sıvı bir kaynaktan buharlaştırıldığı, bir vakum veya düşük basınçlı gazlı ortamda buhar şeklinde taşındığı ve bir substrat üzerinde yoğunlaştığı biriktirme işlemleridir. PVD işlemleri, elemental, alaşım ve bileşik malzemelerin yanı sıra bazı polimerik malzemelerden oluşan filmleri biriktirmek için kullanılabilir. Genellikle, PVD işlemleri, birkaç angstrom ila binlerce angstrom arasında bir kalınlık aralığına sahip filmleri kaplamak için kullanılır. Tipik PVD biriktirme oranları 10-100 Å / sn arasında değişir. PVD süreçleri, hemen hemen herhangi bir inorganik malzemenin ve birçok organik malzemenin, kirlilik içermeyen biriktirme işlemleri kullanılarak biriktirilebilmesi avantajına sahiptir [51].

PVD süreçleri şu şekilde kategorize edilebilir:

Vakumlu buharlaştırma - bir termal buharlaşma kaynağından gelen malzeme, alt tabakaya, kaynak ile alt tabaka arasındaki boşlukta bulunan gaz molekülleri ile çarpışmadan ulaşır.

Püskürtme birikimi. - Buharlaşan malzeme kaynağı, fiziksel püskürtmeye maruz kalan bir yüzeydir (hedef) [51].

PVD metodunun fabrikasyon parametrelerinde yapılacak değişiklikler sonucunda fiziksel özelliklerdeki değişimler incelenebilir. Değişiklik yapılabilir durumda olan fabrikasyon parametreleri, bias voltajı, katot akımı, çalışma basıncı, kaplama sıcaklığı ve kaplama süresi olarak sıralanabilir. Değiştirilen bu parametreler neticesinde sertlik, film oluşumu, adezyon ve kalıcı gerilmeler gibi özellikler incelenebilir [52].

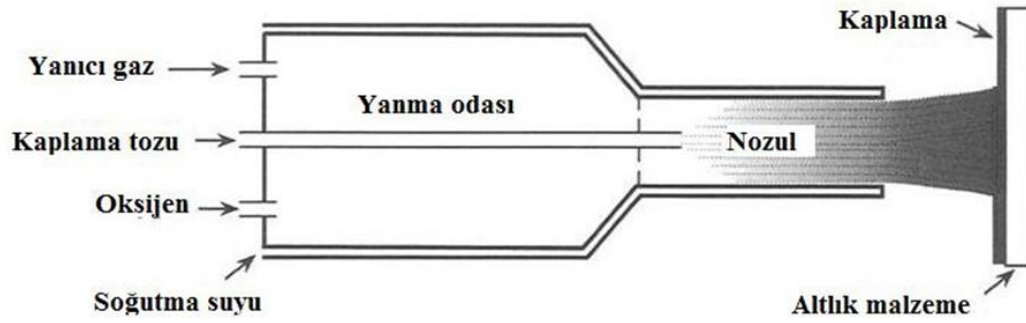
3.2. HVOF (HIGH-VELOCITY OXYFUEL) KAPLAMA

Termal spreyci kaplama ailesinin nispeten yeni bir yöntemi olan yüksek hızlı oksijen termal püskürtme (HVOF) tekniği, ince toz partiküllerini farklı tipteki malzeme substratları üzerinde biriktirmek için kullanılan en güçlü tekniklerden biri olarak büyük ilgi görmüştür. Bu işlemde kullanılan yakıtlar propilen, propan, kerosen (sıvı), asetilen ve hidrojen olabilir. Oksijen, oksidan olarak kullanılırken, yanma odasına basınç vermek için atmosferik hava kullanılır [53].

Diğer termal püskürtme teknikleri gibi (soğuk püskürtme hariç), HVOF işlemi bir katı hal işlemi değildir; çünkü kaplama malzemeleri, istenen kaplamayı uyarlamak için alt tabakanın yüzeyinde erimiş veya yarı erimiş halde biriktirilir. Hammadde malzemesi olarak kullanılan tozların boyutu, başarılı bir kaplama işlemi için kritik faktör olarak kabul edilir. Tozlar, 10 ila 40 µm aralığında partikül boyutlarına sahip olmalıdır. 40 µm'nin üzerindeki büyük partiküllerden oluşan kaba tozlar genellikle biriken tabakanın yapısında erimemiş partiküllere yol açarken, ince partiküller (10 µm'nin üzerinde) substrata ulaşmadan önce tamamen yanar veya bozulur [53].

HVOF, onu geleneksel alevli spreyciden ayıran süpersonik bir jet kullanır; substrat üzerindeki partikül hızının etkisi çok daha yüksektir ve bu da gelişmiş kaplama

özellikleriyle sonuçlanır. Mekanizma, tabancanın çıkışında jetin genişlemesi ile alev püskürtmeden farklıdır. Propan, propilen, asetilen, hidrojen ve doğal gazın yakıt gazlarının yanı sıra gazyağı gibi sıvı yakıtlar da kullanılabilir. Toz kaplama malzemeleri, erimiş hallerine ulaşmak için ısıtılır ve bir alt tabakaya doğru yüksek sıcaklıkta, yüksek hızlı bir gaz akımı kullanılarak hızlandırılır. Bu tür bir erimiş toz akışı, yüksek enerjili gaz akımında bir damlacık akışı şeklinde substrat nesnesini etkiler. Damlacıklar substrat üzerinde düzleşir veya deforme olur ve "sıçramalar" adı verilen lameller oluşturur. Çok katmanlı sıçramaların üst üste yığılması kaplamayı oluşturur. HVOF yönteminin bir avantajı, başlangıç/besleme stoğu tozlarının bozulmasını en aza indirmek için gereken bekleme süreleridir. Ek olarak, kısa işlem süresi, erimiş toz akışı ile çevreleyen atmosfer arasındaki etkileşimin üstesinden gelebilir ya da en aza indirebilir [53].



Şekil 3.3. Yüksek hız oksijen yakıt sistemi (HVOF) yanal kesiti [54].

BÖLÜM 4

AŞINMA

Aşınma, iki yüzey arasındaki nispi hareketin bir sonucu olarak bir katının çalışma yüzeyinden giderek artan malzeme kaybı olarak tanımlanabilir [55,56]. Aşınma, katı bileşen ve çevresindeki ortam arasında, sürtünme ve göreceli hareketle karşılaşması muhtemel uygulamalarda önemli bir tasarım düşüncesini oluşturur [56].

Aşınma çeşitleri arasında adhesive, abrazif, yorulma, erozyon ve korozyon yer alır. Ancak bunların en önemlileri adhesif ve abrazif aşınmadır [56].

4.1. AŞINMA ÇEŞİTLERİ

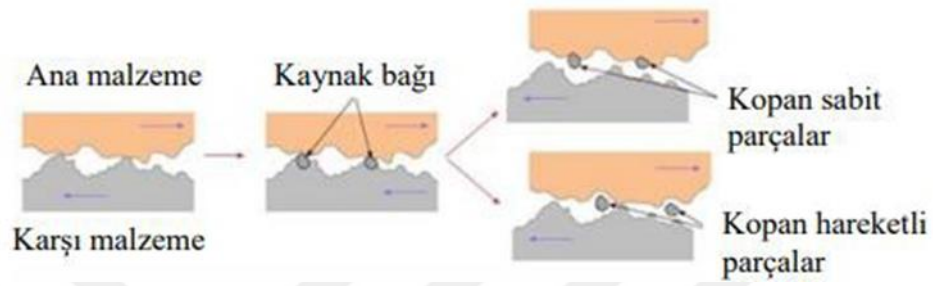
4.1.1. Abrazif Aşınma

Abrazif aşınma, katı bir yüzeye karşı zorlanan ve bu yüzey boyunca hareket eden sert parçacıklardan veya çıkıntılardan kaynaklanır [55,56]. Aşınma ise, genellikle aşamalı malzeme kaybını içeren ve yüzey ile temas eden bir madde arasındaki nispi hareketten kaynaklanan katı bir yüzeye verilen hasar olarak tanımlanır. Yüzeylerin aşınma hızı, her yüzeyin özelliklerine, birinci ve ikinci yüzeyler arasındaki aşındırıcıların varlığına, temas hızına ve diğer çevre koşullarına bağlıdır. Abrazif aşınma direnci özelliği, karşı gövdenin 1-1,2 katı sertlik seviyesine sahip bir sert kaplama uygulamasıyla iyileştirilebilir [56].

4.1.2. Adhezif Aşınma

Adhezif aşınma, bir katı yüzeyin başka bir yüzey boyunca kaydırılmasıyla oluşan bir aşınma tipini ifade eder [55,56]. İki yüzey birbirine karşı yüklendiğinde, temas yükünün tamamı yalnızca çok küçük pürüzlü temas alanı tarafından taşınır. Temas

alanları üzerindeki gerçek temas basıncı çok yüksektir ve aralarında yapışmaya neden olur. Yüzeylerden biri diğerine doğru kayarsa, yapışkan bağlantı kırılabilir. Kayma devam ederken, arka arkaya yeni bağlantılar oluşacak ve kırılacaktır. Adhesif aşınması olasılığı, yağlayıcıların uygulanmasıyla veya düşük sürtünme katsayılı sert kaplamanın uygulanmasıyla en aza indirilebilir [56].



Şekil 4.1. Adhezif aşınmanın şematik gösterimi [57].

4.1.3. Eroziyon Aşınma

Erozyon, keskin partiküllerin katı bir yüzeye çarpması sonucu aşamalı malzeme kaybına neden olan hasardır [55,56]. Olası değişkenler arasında, yüzeye çarpan parçacıkların sayısı, yönü ve hızı, erozyon oranını belirlemek için önemli bir husustur [55,56]. Çoğu durumda erozyon, ortam aşındırıcı olduğunda korozyonla hızlanır. Bu nedenle, erozyon direnci özelliği, iyileştirilmiş korozyon direnci ile birlikte sert bir kaplamanın uygulanmasıyla geliştirilebilir [56].



Şekil 4.2. Kılavuz kanadına ait bir eroziyon aşınma örneği [58].

4.1.4. Korozyon Aşınması

Korozyon, oksitleyici veya indirgeyici türlerin varlığında sulu bir ortamda giderek artan malzeme kaybı olarak tanımlanabilir [56].

Çeşitli korozyon saldırı biçimleri aşağıda listelenmiştir:

- Genel (tek tip) korozyon
- Galvanik korozyon
- Oyuklanma korozyonu
- Çatlak korozyonu
- Taneler arası korozyon
- Gerilme korozyonu çatlama
- Erozyon korozyonu [56].

Yüzeyin korozyona direnç özelliği, asil malzeme kaplaması veya gözden çıkarılabilir kaplamaların uygulamasıyla geliştirilebilir [56].

BÖLÜM 5

LİTERATÜR ÖZETİ

Salim vd. [25], çeşitli ısıtılma işlemlere tabi tutulmuş küresel grafitli dökme demir malzemelerinin aşınma davranışını deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışmada farklı ısıtılma işlemlerin uygulandığı (döküm, östempelenmiş ve normalizasyon işlemi uygulanmış) küresel grafitli dökme demir malzemeleri, farklı yük (10N, 20N, 30N) ve sabit hız (0,063 m/s) parametrelerinde kuru kayma koşullarında ball-on-plate yöntemi ile aşınma deneyine tabi tutulmuştur. Malzemelerin iç yapıları ve sertlik ölçüm değerleri incelenerek, farklı ısıtılma işlemlerin malzeme sertliğine ve faz oluşumlarına etkisi belirlenmiştir. Isıtılma işlemine tabi tutulmuş malzemelerin aşınma davranışının analizi için, yük değişimine bağlı ağırlık kaybı değerleri ölçülmüştür. Teste tabi tutulan numunelerin aşınmış bölgelerinden elde edilen optik mikroskop ve FESEM görüntüleri ile aşınma mekanizmaları incelenmiş, EDX görüntüleri ile elemental olarak analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre östempereleme işlemiyle perlitik/ferritik matrisin üst beyritik matrise dönüştüğü görülmüştür. 10N ve 20N yük koşullarında yüzey morfolojisinde belirgin bir değişiklik görülmezken, 30N yük koşulunda belirgin aşınma mekanizmalarının oluştuğu belirlenmiştir.

Wei vd. [59], küresel grafitli dökme demirin aşınma davranışını karbon çeliğinin aşınma performansı ile kıyaslayarak araştırmışlardır. Çalışmada 1045 karbon çeliği ve 800-2 küresel grafitli dökme demir malzemeleri 50N-200N yük ve 25°C-400°C sıcaklık koşullarında pin-on-disk yöntem ile aşınma deneyine tabi tutulmuştur. Deney sonuçlarına bağlı olarak ortam sıcaklığındaki değişimin ve malzeme yapısının aşınma oranına etkisi incelenmiş, ayrıca yük miktarındaki değişimin sürtünme katsayısı değerlerine etkisi grafiksel olarak analiz edilmiştir. Sıcaklık değişimine bağlı olarak yüzey ve yüzey altında meydana gelen triboksit oluşumunun incelenmesi ve aşınma mekanizmalarının belirlenmesi için XRD ve SEM görüntüleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre küresel grafitli dökme demir

malzemesinin yüzeyinde karbon çeliğine kıyasla daha az oksit tabakası olduğu görülmüş, bu durum grafitlerin triboksitleri indirgemesi ile açıklanmıştır.

Sağlam [21], farklı sıcaklıklarda (770 °C, 790 °C, 810 °C, 830 °C, 850 °C, 870 °C) östemperleme işlemi uygulanmış küresel grafitli dökme demir malzemelerinin tribolojik performansını aşınma deneyleri ile araştırmıştır. Çalışmada ısıl işlem uygulanmamış malzeme ve östemperleme işlemi uygulanmış malzemeler 30N yük ve 112 dev/dk hız koşullarında pin-on-disk yöntemi ile aşınma deneylerine tabi tutularak sıcaklık artışının tribolojik performansa etkisi incelenmiştir. Östemperleme işlemi uygulanmış malzemelerde beyitik mikroyapı elde edilmiştir. Östemperleme sıcaklığı arttıkça malzeme sertliği artmış, aşınma miktarı azalmıştır.

Kaleicheva vd. [60], TiCN ve TiN takviyesinin, östemperlenmiş küresel grafitli dökme demir malzemesinin aşınma davranışına etkisini deneysel ve görsel olarak araştırmışlardır. Nano boyutta TiCN + TiN takviyeli ve takviyesiz küresel grafitli dökme demir malzemeleri thumb-disk yöntemi ile aşınma deneyine tabi tutulmuştur. Aşınma deneyine tabi tutulan numunelerin mikroyapıları SEM ve EDX görüntüleri ile incelenmiş, takviye malzemesinin mikroyapı değişimine etkisinin aşınma direnci, sertlik, kalıntı östenit miktarı parametrelerine etkisi analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre TiCN + TiN takviyesinin östenit fazını martenzit fazına dönüştürdüğü, mikroyapıdaki bu değişime bağlı olarak malzemenin sertlik ve aşınma direncinin arttığı belirlenmiştir.

Gençer [61], farklı bileşimlerde imal edilmiş küresel grafitli dökme demir malzemelerinin talaşlı imalat uygulamalarındaki performanslarını inceleyerek, kimyasal bileşim farklılığının mikroyapı ve yüzey kalitesine etkisini araştırmıştır. Çalışmada üç farklı bileşimlerde üretilmiş küresel grafitli dökme demir malzemelerine farklı seviyelerde kesme hızı ve ilerleme miktarlarında tornalama ve delme işlemi uygulanmıştır. Talaşlı imalat parametrelerinin ve kimyasal bileşimlerin mekanik özelliklere ve yüzey pürüzlülüğüne etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre sertlik miktarı arttıkça çekme mukavemetinin azaldığı belirlenmiştir. Tornalama işleminin düşük kesme hızı ve düşük ilerleme miktarı, delme işleminin yüksek kesme

hızı ve yüksek ilerleme miktarı parametrelerinde gerçekleştirildiğinde yüzey pürüzlülüğü minimizasyonunun sağlandığı sonucuna varılmıştır.

Gül [27], ferritik-perlitik küresel grafitli dökme demir borlama işlemi uygulamış ve borlama işleminin aşınma performansına etkisini aşınma deneyleri ve mikroyapı karakterizasyonu ile araştırmıştır. Çalışmada borlama işlemi uygulanmış ve uygulanmamış küresel grafitli dökme demir numunelerinin mikroyapı görüntüleri incelenmiş, sertlik değerleri ölçülmüştür. Elde edilen numuneler 60N yük, 1 m/s hız ve farklı kayma mesafelerinde (3600 m, 7200 m, 10800 m, 21600 m) pin-on-disk yöntemiyle aşınma deneyine tabi tutulmuş, borlama işleminin aşınma miktarına etkisi ve SEM görüntüleri ile aşınma mekanizması karakterizasyonuna etkisi analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre borlama işleminin, küresel grafitli dökme demirin aşınma direncini 50 kata kadar arttırdığı belirlenmiştir.

Hirasata vd. [62], küresel grafitli dökme demir malzemesinin sürtünme ve aşınma davranışını araştırmışlardır. Çalışmada küresel grafitli dökme demir malzemesi 29,4-98 MPa temas basıncı, 2-15 m/s kayma hızı parametrelerinde kuru ortam koşullarında aşınma deneyine tabi tutulmuştur. Hız ve temas basınç parametrelerinin sürtünme katsayısı, aşınma oranı, sıcaklık değişimine etkisi analiz edilmiştir. Sürtünmeden kaynaklı sıcaklık artışına bağlı olarak sertliğin azaldığı, kayma hızı ve temas basıncındaki artışına bağlı olarak aşınma oranının arttığı belirlenmiştir. Sürtünme katsayısı değerinin kayma hızındaki artışla arttığı, temas basıncına bağlı olarak değişmediği sonucu elde edilmiştir.

Korkut vd. [63], GGG70 küresel grafitli dökme demirin işlenebilirlik performansına kesme parametrelerinin etkisini tornalama deneyleriyle araştırmışlardır. Çalışmada GGG70 küresel grafitli dökme demir malzemesi dört farklı kesme hızı (250 m/dk, 275 m/dk, 300 m/dk, 325 m/dk), üç farklı ilerleme hızı (0,15 mm/dev, 0,25 mm/dev, 0,30 mm/dev), iki farklı kesme derinliği (0,5 mm, 2 mm), farklı takım geometrileri (pozitif, negatif) parametrelerinde tornalama işlemine tabi tutulmuştur. Belirlenen giriş parametrelerinin kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü parametrelerine etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğüne etki eden

en önemli parametre olduğu ve ilerleme hızının arttıkça yüzey pürüzlülüğünün arttığı belirlenmiştir.

Çetin ve Gül [64], farklı matrislerdeki küresel grafitli dökme demirin aşınma davranışını inceleyerek farklı yapıların sürtünme katsayısı ve sıcaklık değişimine etkisini araştırmışlardır. Çalışmada ferritik ve perlitik yapıdaki küresel grafitli dökme demir malzemeleri üç farklı yük (20N, 40N ve 60N), 1m/s kayma hızı parametrelerinde kuru ortam koşullarında pin-on-disk yöntemiyle aşınma deneyine tabi tutulmuştur. Yük değişiminin sürtünme katsayısı, aşınma hızı ve sıcaklık değişimine etkisi incelenmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlara göre perlitik yapıdaki küresel grafitli dökme demirde sürtünme katsayısı ve sıcaklığın ferritik yapıdaki küresel grafitli dökme demire göre daha fazla olduğu belirlenmiştir. Yüke bağlı değişim analiz edildiğinde ise yük arttıkça ferritik yapıdaki küresel grafitli dökme demirin aşınma hızının arttığı, perlitik yapıdaki küresel grafitli dökme demirin aşınma hızının azaldığı sonucuna varılmıştır.

Çetin ve Gül [26], normalizasyon işleminin küresel grafitli dökme demirin aşınma direncine etkisini araştırmışlardır. Çalışmada farklı sıcaklıklarda (850°C, 900 °C, 950 °C) normalizasyon işlemi uygulanmış ferritik yapıdaki küresel grafitli dökme demir malzemesi 0,2 m/s kayma hızı ve farklı yük (10N, 20N, 30N) parametrelerinde kuru ortam koşullarında pin-on-disk yöntemiyle aşınma deneylerine tabi tutulmuştur. Normalizasyon işleminin ve normalizasyon sıcaklıklarının malzemenin aşınma direncine etkisini sertlik ölçümü, aşınma hızı değişimi ve mikroyapı analizi ile incelemiştirlerdir. Elde edilen sonuçlara göre ferritik yapıdaki malzemenin yapısının normalizasyon işlemiyle perlitik yapıya dönüştüğü, normalizasyon sıcaklığı arttıkça sertliğin arttığı belirlenmiştir. Normalizasyon işlemiyle sertliğin artışı ve perlitik yapının oluşumuna bağlı olarak aşınma direnci artmıştır.

Akray [24], farklı yüzey işlemlerinin ferritik yapıdaki GGG40 küresel grafitli dökme demir malzemesinin aşınma direncine etkisini araştırmıştır. GGG40 malzemesine östemperleme, borlama, östemperleme + borlama işlemleri uygulanmış ve yüzey işlemlerinin sertlik, aşınma direnci ve korozyon direncine etkisi analiz edilmiştir. Deneyler ve sertlik ölçümlerinden elde edilen sonuçlara göre östemperleme sıcaklığı

arttıkça sertlik değerinin arttığı belirlenmiştir. En yüksek aşınma ve korozyon direnci östemperleme + borlama işlemi uygulanan malzemede elde edilmiştir.

elik [65], yağlayıcı ortam koşullarında küresel grafitli dökme demir malzemesinin işlenebilirliğini deneysel, istatistiksel (Tukey, Dunnet, ANOVA) ve görsel (elektronik mikroskop, SEM, EDX) olarak araştırmıştır. Çalışmada GGG70 küresel grafitli dökme demir malzemesi kuru, geleneksel yağlama ve farklı konsantrasyonlarda (%0,5, %1, %1,5) hazırlanmış nano MoS₂ takviyeli yağlayıcı ortam koşullarında frezeleme işlemine tabi tutulmuştur. Yağlama işlemi üç farklı basınç (3, 5, 7 bar) ve iki farklı debi (160 ml/dk ve 310 ml/dk) parametrelerinde minimum miktarda yağlama yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Nano MoS₂ konsantrasyon oranı ve yağ püskürtme parametrelerinin, malzemenin yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması ve talaş oluşumuna etkisi analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre yüzey pürüzlülüğüne etki eden en önemli parametrenin soğutucu-yağlayıcı sıvı olduğu belirlenmiştir. En düşük yüzey pürüzlülüğü değeri 5 bar basınç, 160 ml/dk akış hızı ve %0,5 nano MoS₂ takviyeli yağlayıcı ortam koşullarında elde edilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde kuru frezeleme şartlarında malzemedен parça kopmaları ve belirgin yapışma-sıvanma izleri görülürken, nano MoS₂ takviyeli yağlayıcı ortam koşullarında yapışma-sıvanma izlerinde azalma grlmştir.

Prasad [66], basınç, kayma hızı ve ortam koşullarının küresel grafitli dökme demirin aşınma davranışına etkisini araştırmıştır. Küresel grafitli dökme demir malzemesi üç farklı kayma hızı (0,42 m/s, 4,60 m/s, 8,40 m/s), 0-16 MPa basınç parametrelerinde, üç farklı ortam koşulunda (kuru, yağ, yağ + %5 grafit) pin-on-disk aşınma deneylerine tabi tutulmuştur. Belirtilen giriş parametrelerinin aşınma oranı, sıcaklık ve aşınma mekanizması oluşumuna etkisi analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre basınç ve kayma hızı arttıkça aşınma oranı ve sıcaklığın arttığı belirlenmiştir. Ortam koşullarının etkisi incelendiğinde ise aşınma oranının en yüksekten en düşüğe kuru, yağ, yağ + %5 grafit ortamlarında elde edildiği sonucuna varılmıştır.

Zi-run vd. [22], küresel grafitli dökme demirlerin aşınma davranışını deneysel ve görsel (SEM, XRD) olarak araştırmışlardır. Çalışmada farklı sıcaklıklarda temperlenmiş (200°C, 500°C, 570 °C) QT800-2 küresel grafitli dökme demir

malzemesi 50-200N yük, 1 m/s hız ve 25°C-400°C ortam sıcaklığı koşullarında pin-on-disk aşınma deneyine tabi tutulmuştur. Belirtilen giriş parametrelerinin sürtünme katsayısı, aşınma oranı, aşınma morfolojisi ve oksit oluşumuna etkisi analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre yük ve ortam sıcaklığı arttıkça sürtünme katsayısı ve aşınma oranının arttığı belirlenmiştir. Ortam sıcaklığının etkisi incelendiğinde ise 25°C-200°C aralığında yüzeyde triboksit tabakasının oluşmadığı ve adhesiv aşınma mekanizmasının baskın rol oynadığı, sıcaklık 400°C'ye çıktığında triboksit tabakası oluşumunun arttığı sonucu elde edilmiştir.

Mahmoud ve El-Labban [39], TiC kaplamalı küresel grafitli dökme demirin mikroyapı ve aşınma davranışını deneysel ve görsel olarak araştırmışlardır. Çalışmada küresel grafitli dökme demir malzemesi 700W, 1000W, 1500W, 2000W güçte lazer yöntemle TiC malzemesi kaplanmıştır. Kaplama işlemi uygulanan numuneler pin-on-disk yöntemiyle aşınma deneyine tabi tutulmuş ve ağırlık kaybı değerleri analiz edilerek kaplama işleminin tribolojik performansa etkisi incelenmiştir. Analiz sonuçlarına göre 700W güçle yapılan lazer işlemi sonucunda en sağlam kaplama tabakasının elde edildiği, güç miktarı arttıkça kaplama tabakasında çatlakların oluştuğu görülmüştür. Kaplama tabakasının etkisi incelendiğinde ise sertliği 240 HV olan malzemenin 700W güçle TiC malzeme ile kaplandığında 1330 HV değerine ulaşıldığı, aşınma direncinin ciddi oranda arttığı belirlenmiştir.

Jiansheng vd. [40], WC-8Co kaplamalı küresel grafitli dökme demir malzemesinin tribolojik performansını mikroyapı ve aşınma davranışını inceleyerek araştırmışlardır. Çalışmada küresel grafitli dökme demirden imal edilmiş silindirik malzeme elektrik arkı yöntemi ile WC-8Co malzemesi ile kaplanmıştır. Geliştirilen malzeme 50N yük ve 200 dev/dk parametrelerinde ball-disk yöntemiyle aşınma deneyine tabi tutulmuştur. Kaplama malzemesinin sertlik, sürtünme katsayısı, oksit tabakası ve aşınma mekanizmaları oluşumuna etkisi analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre kaplama malzemesiyle sertliğin (17410 MPa) arttığı sürtünme katsayısı değerlerinin (0,18) azaldığı belirlenmiştir. Aşınma direnci analiz edildiğinde ise kaplama tabakasının yüzey altı tabakaya kıyasla aşınma direncini 2,1 kat arttırdığı sonucu elde edilmiştir. En baskın aşınma mekanizmalarının ise abrasiv aşınma, oksidasyon aşınması ve yorulma aşınması olduğu belirlenmiştir.

Wang vd. [38], multimodal ve geleneksel WC-12Co kaplamasının düşük karbonlu çeliğin tribolojik performansına etkisini deneysel ve görsel olarak araştırmışlardır. Çalışmada düşük karbonlu çelik malzemesi multimodal ve geleneksel WC-12Co kaplama malzemesi ile kaplanmış ve hazırlanan numunelerin kaplama karakterizasyonu ve aşınma direnci incelenmiştir. Kaplama karakterizasyonu için XRD görüntüsü ve mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır. Aşınma direncinin incelenmesi için aşınma testine tabi tutulmuş, hacim kaybı değerleri ve aşınmış yüzeylerden elde edilen SEM görüntüleri incelenmiştir. WC-12Co kaplama için yapılan deney ve analizler, sert krom kaplamalı düşük karbonlu çelik ve kaplamasız numune için de gerçekleştirilerek kıyaslama yapılmıştır. Bu sayede kaplama işleminin ve farklı kaplamaların aşınma direncine etkisi analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre WC-12Co kaplama işleminin substrat malzemeye ve sert krom kaplamalı malzemeye kıyasla aşınma direncini arttırdığı ve bu sayede aşınma hacmini ciddi oranda azalttığı belirlenmiştir. WC-12Co kaplamaları kendi arasında kıyaslandığında ise multimodal kaplamanın geleneksel kaplamaya kıyasla daha yüksek sertlik ve aşınma direnci sağladığı sonucu elde edilmiştir.

Rajinikanth ve Venkateswarlu [31], WC kaplamasının düşük karbonlu çelik ve EN32 çeliklerinin tribolojik performansına etkisini sürtünme ve aşınma davranışını inceleyerek araştırmışlardır. Kaplamasız ve WC kaplamalı düşük karbonlu çelik malzeme 1 kg ve 2 kg yük koşullarında pin-on-disk aşınma deneyine tabi tutulmuş, deneylerde kaplamasız ve WC kaplamalı EN32 çeliğinden imal edilmiş diskler kullanılmış ve disklerinde aşınma performansı incelenmiştir. Farklı yük koşullarının ve WC kaplamasının sürtünme katsayısı, aşınma oranı ve aşınma mekanizması oluşumuna etkisi nicel ve nitel olarak analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre WC kaplamasının aşınma direncini arttırdığı belirlenmiştir. Uygulanan yük arttıkça aşınma miktarının ve aşınma bölgesindeki sıcaklığın arttığı sonucuna varılmıştır. Hem düşük karbonlu çelik hem de EN32 çelik için en yüksek aşınma direnci, WC kaplamalı numuneler ve 1 kg yük koşullarında gerçekleştirilen deney koşullarında elde edilmiştir.

Ma vd. [36], TiN kaplamalı GCr15 yatak çeliğinin sürtünme davranışını 200N yük koşullarında ve WC-Co kaplamalı AISI 52100 çeliğinden imal edilen bilya

kullanılarak gerçekleştirilen ball-on-disk aşınma deneyi ile araştırmışlardır. Deneylelerden elde edilen aşınma derinliği, aşınma hacmi ve sürtünme katsayısı değerleri, aşınma bölgelerinin optik mikroskop görüntüleri incelenmiştir. Kaplamalı malzemelerin temasıyla oluşan sürtünme davranışı için deneysel sonuçlar dikkate alınarak sürtünme modeli elde edilmiştir. Oluşturulan sürtünme modeli ile sürtünme katsayısı değerlerinin elde edilmesi için simülasyon geliştirilmiş ve 200N, 300N ve 400N yük koşullarında gerçekleştirilen deneylelerden elde edilen sürtünme katsayısı değerleri ile simülasyon ile elde edilen sürtünme katsayısı değerleri kıyaslanmıştır. Kıyaslama sonucunda geliştirilen sürtünme modeli ile sürtünme katsayısı eğrisinin elde edilebileceği belirlenmiştir.

Hsieh vd. [35], titanyum bazlı kaplamaların M2 çeliğinin aşınma ve oksidasyon davranışına etkisini pin-on-disk aşınma deneyleri, Raman spektroskopisi, SEM görüntüleriyle incelemişlerdir. M2 çeliğinden imal edilmiş disk TiN, TiCN (N yoğun), TiCN (C yoğun), TiAlN, AlTiN, TiSiN ve TiCNO malzemeleri ile kaplanmış ve 2,5 N yük ve 1000 m kayma mesafesinde pin-on-disk aşınma deneyine tabi tutulmuştur. Hazırlanan numunelerin farklı sıcaklıklarda yüzey morfolojisindeki değişim Raman spektroskopisi ve SEM görüntüleri ile incelenerek kaplamaların oksidasyon direnci analiz edilmiştir. Aşınmış numunelerin optik mikroskop görüntüleri ile de aşınma performansları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre en yüksek oksidasyon direncine sahip numunenin AlTiN kaplamalı malzeme olduğu ve AlTiN kaplaması dışındaki yüzeylerde TiO₂ oluşumu görülmüştür.

Wilson ve Alpas [67], nem oranı ve aşındırıcı malzemenin TiN kaplamalı HSS malzemenin aşınma davranışına etkisini deneysel ve görsel olarak araştırmışlardır. Çalışmada TiN kaplamalı HSS malzemesi, farklı aşındırıcı malzemeler (düşük karbonlu çelik ve A356-%15SiC) kullanılarak düşük ve yüksek nem koşullarında (%15 ve %96) pin-on-disk aşınma deneyine tabi tutulmuştur. Deneylelerden elde edilen aşınma oranı değerleri kıyaslanarak nicel analiz gerçekleştirilmiş, SEM ve EDS görüntüleri ile yüzey morfolojisi incelenmiştir. Analiz sonuçlarına göre en yüksek tribokimyasal aşınma, A356-%15SiC aşındırıcı malzemenin kullanıldığı ve %96 nem oranı koşullarında gerçekleştirilen deneylelerde görülmüştür.

Shipway vd. [68], sinterlenmiş, geleneksel WC kaplamalı ve nanoyapılı WC kaplamalı düşük karbonlu çelik malzemelerin aşınma performanslarını 19N ve 35N yük koşullarında gerçekleştirilen ball-on-disk aşınma deneyleriyle araştırmışlardır. Deneyler aşınma oranı değerleri elde edilmiş, XRD ve SEM görüntüleriyle faz değişimi ve yüzey morfolojisi incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre her iki yük koşulunda da en yüksek aşınma oranı nanoyapılı kaplamalı malzemede elde edilmiştir. Bu durum nanoyapılı malzemenin gözenekli yapısı sebebiyle kaplamanın daha yüksek sıcaklık koşullarında gerçekleştirildiği ve yüksek ısının faz ayrışmasına sebebiyet vererek aşınma direncini azaltması ile açıklanmıştır.

Vera vd. [30], TiN, CrN ve WC/C kaplamalarının farklı çelik malzemelerin tribolojik performansına etkisini aşınma deneyleri ile araştırmışlardır. Çalışmada TiN, CrN, WC/C malzemeleri ile kaplanmış 4320, 4140 ve 8620 çelikleri 11,76N ve 7,84N yük, 0,08 m/s kayma hızı parametrelerinde 20°C-23°C sıcaklık, %45-%50 nem ortam koşullarında doğrusal aşınma deneylerine tabi tutulmuştur. Çıkış parametresi olarak sürtünme katsayısı, aşınma izi derinliği, aşınma oranı değerlerinin yanı sıra aşınmış yüzeylerin optik mikroskop, SEM ve EDS görüntüleri analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre aşınma direnci performansının en yüksekten en düşüğe sırasıyla WC/C kaplama, CrN kaplama ve TiN kaplama şeklinde sıralandığı belirlenmiştir.

Serin [45], bor katkılı yağlayıcıların sıcak ortam koşullarında aşınma performansına etkisini araştırmıştır. Çalışmada SAE 10W40 madeni yağa %10 oranında bor takviyesiyle yeni bir yağlayıcı hazırlanmıştır. Geliştirilen yağlayıcının 60N yük, iki farklı hız (2,5 m/s ve 3,5 m/s) ve farklı sıcaklık (oda sıcaklığı, 50°C, 80 °C) koşullarındaki aşınma performansı ball-on-disk aşınma deneyleri ile test edilmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen ağırlık kaybı, sürtünme katsayısı, aşınma oranı, aşınma miktarı değerleri ve aşınmış yüzeylerin SEM görüntüleriyle elde edilen aşınma mekanizmaları, katkısız SAE 10W40 yağından elde edilen sonuçlarla kıyaslanarak değerlendirilmiştir. Deney sonuçlarına göre 50 °C sıcaklık ve bor katkılı yağlayıcı ortam koşullarında diğerlerine kıyasla daha düşük sürtünme katsayısı ve aşınma miktarı değerleri ve daha yüksek yüzey kalitesi elde edilmiştir. Bu durum sıcaklık arttıkça bor yağının yağlama performansının artışıyla açıklanmıştır.

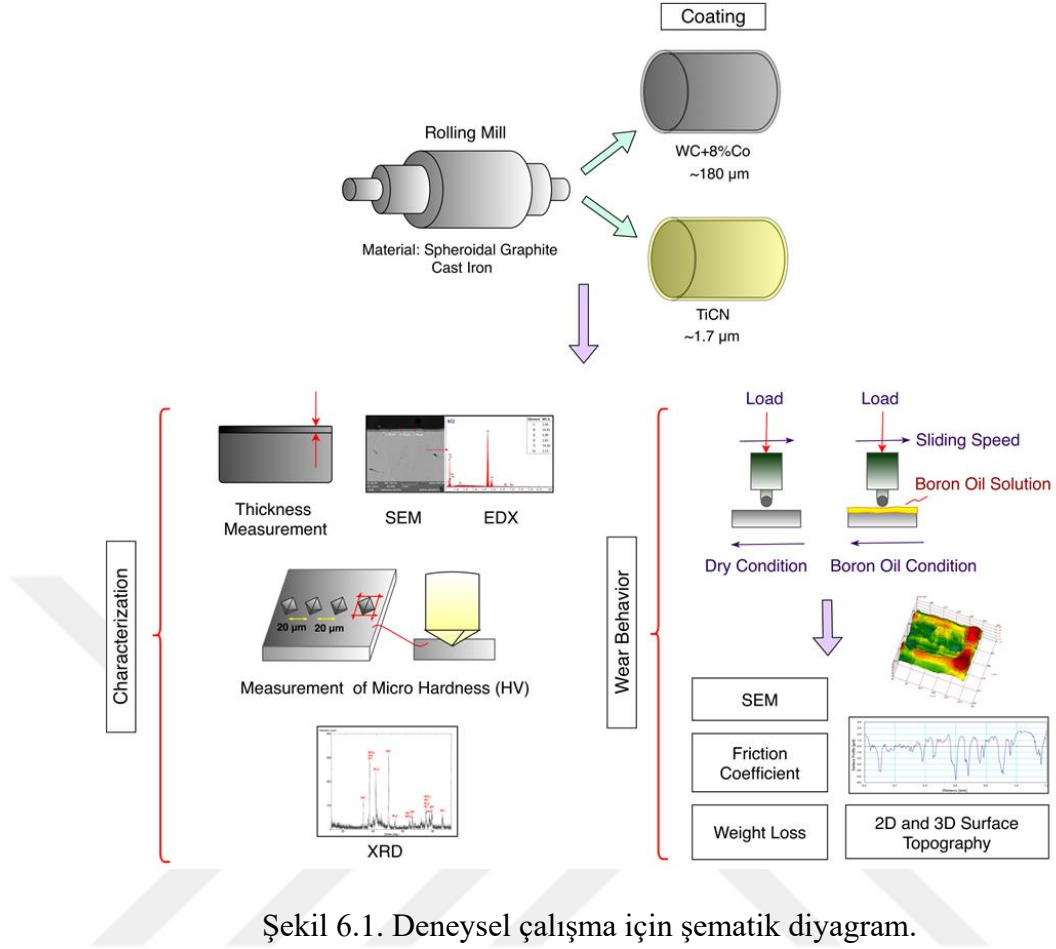
Baş ve Karabacak [41], borik asit ve boron nitrit katkılı yağlayıcıların AISI 52100 malzemesinin aşınma performansına etkisini araştırmışlardır. AISI 52100 malzemesi farklı konsantrasyonlarda (ağırlıkça %2, %4 ve %6) hazırlanmış borik asit ve boron nitrit katkılı yağlayıcı ortam koşullarında farklı yüklerde (142N ve 242N) pin-on-disk aşınma deneylerine tabi tutulmuştur. Geliştirilen yağlayıcıların ve konsantrasyon oranlarının sürtünme katsayısı, aşınma oranı, yüzey pürüzlülüğü ve aşınma mekanizmaları oluşumuna etkisi analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre temas yükü ve hız arttıkça borik asit ve boron nitrit katkılı yağlayıcıların tribolojik performanslarının arttığı, her iki yağlayıcı için de %4 oranının optimum konsantrasyon oranı olduğu belirlenmiştir. Yağlayıcılar arasında kıyaslama yapıldığında ise borik asit katkılı yağlayıcıların boron nitrit katkılı yağlayıcılara kıyasla daha iyi aşınma performansı sağladığı sonucuna varılmıştır.

Ucun vd. [46], bor yağı takviyeli soğutucuların aşınma performansını mermer kesme işleminde kullanılan elmas kesici disklerin aşınma davranışını inceleyerek araştırmışlardır. Saf su, %1 bor yağı + su ve %5 bor yağı + su soğutucu ortam koşullarında gerçekleştirilen mermer kesme işlemi sonucu elmas kesici disklerin aşınma miktarları analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre bor yağı katkılı soğutucuların aynı zamanda yağlayıcı etkisi sebebiyle disk ve mermer arasındaki sürtünme kuvvetinin azaldığı, bu duruma bağlı olarak aşınma miktarının azaldığı belirlenmiştir. %1 konsantrasyondaki yağlayıcının mermer kesme işlemi için yeterli olduğu, %5 konsantrasyonda bor yağının talaş sıvanmasına sebebiyet vererek mermerin yüzey kalitesini azalttığı sonucuna varılmıştır.

BÖLÜM 6

MATERYAL VE METOT

Deney sonuçlarının analizi için belirlenen metodoloji Şekil 6.1.'de verilmiştir. Çalışma kapsamında ilk olarak perlitik yapıdaki küresel grafitli dökme demir malzemeleri WC-Co ve TiCN malzemeleri ile kaplanmıştır. Kaplama karakterizasyonu için SEM görüntüleri ile kaplama kalınlığı ölçülmüş, EDX ve XRD görüntüleri ile elemental analiz yapılmıştır. Kaplama işleminin malzemenin aşınma davranışına etkisinin incelenmesi için kaplamasız, WC-Co kaplamalı ve TiCN kaplamalı numuneler ball-on-plate aşınma deneyine tabi tutulmuştur. Aşınma deneylerinde sürtünme katsayıları ölçülmüş ve aşınan yüzeylerin hacim kayıpları 2D topografya ölçümleri kullanılarak hesaplanmıştır. Aşınmış yüzeylerden elde edilen pürüzlülük değerleri ve SEM, EDX, 3D topoğrafya görüntüleri ile yüzey morfolojisi analizi yapılmıştır.



Şekil 6.1. Deneysel çalışma için şematik diyagram.

6.1. TEST NUMUNELERİ VE KAPLAMA SÜRECİ

Ferritik yapıdaki küresel grafitli dökme demirlere kıyasla mukavemet, aşınma direnci ve işlenebilirlik kabiliyetinin yüksek olması sebebiyle iş parçası olarak 30 mm çapında 7 mm kalınlığında perlitik yapıdaki küresel grafitli dökme demir malzemesi kullanılmıştır [69–73]. Grafitin ısıl iletkenlik ve ısıya dayanıklılık özelliklerinin yanı sıra yağlayıcılık özelliğine de sahip olması malzemenin tribolojik performansını arttırmaktadır [74–77]. Ayrıca malzeme üretimi sırasında ergimiş demire %0,03 – %0,08 oranında Mg takviyesiyle küresel formda grafit oluşumu elde edilmektedir [21,23,78,79]. Grafit geometrisinin küresel formda olması, lamel yapıdaki grafitlerde meydana gelen gerilme artışını önleyerek malzemeye tokluk, yüksek dayanım ve süneklik özellikleri kazandırmaktadır [21,23,24,80,81]. Belirtilen üstün özellikleri sebebiyle küresel grafitli dökme demir endüstriyel alanda ve mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır [17,18,20,22,82,83]. Fakat ağır yük ve yüksek sıcaklık koşullarında aşınma direncinin azalması kullanımını

sınırlandırmaktadır. Bu sebeple mevcut çalışmada küresel grafitli dökme demir malzemesinin aşınma performansı kaplama ve bor yağı kullanımını ile arttırılacaktır.

Küresel grafitli dökme demirin aşınma performansının arttırılması için WC-Co ve TiCN kaplama işlemi uygulanmıştır. WC-Co ve TiCN kaplamaları endüstriyel alanda en çok kullanılan kaplama malzemeleri olmaları sebebiyle tercih edilmiştir [30,31,33,35,36,38,84]. WC-Co kaplaması malzemeye yüksek sertlik, aşınma ve korozyon direnci, yüksek sıcaklıkta oksidasyon direnci özelliklerini kazandırmaktadır [29,33,37,85,86]. WC-Co kaplama işlemi için endüstriyel alanda yaygın kullanıma sahip HVOF yöntemi tercih edilmiştir [28,31,87–90]. HVOF yöntemi ile diğer yöntemlere kıyasla daha düşük sıcaklıklarda yüksek kinetik enerji oluşumu sağlanabilmektedir [89,91]. Bu sayede kaplama işlemi uygulanan malzemenin maruz kalacağı termal gerilme azalmakta ve malzeme özellikleri olumsuz etkilenmemektedir. Ayrıca diğer yöntemlere kıyasla düşük gözeneklilik ve düşük dekarburizasyonlu kaplama yüzeyi elde edilebilmekte ve yüksek bağlanma kabiliyeti sayesinde malzemenin kullanım ömrü arttırılabilmektedir [91–94,100]. Mevcut çalışmada HVOF prosesi için belirlenen parametreler Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Titanyum bazlı kaplamalar yüksek kimyasal ve termal stabilite, yüksek sertlik ve yüksek mekanik dayanım özelliklerine sahip malzemelerdir [95–97]. TiCN kaplamalar, TiC malzemelere kıyasla substrat malzemeye daha kuvvetli yapışma eğilimi göstermesi, TiN kaplamalara kıyasla yapısındaki karbon varlığına bağlı olarak yağlayıcılık özelliği sağlaması sebebiyle endüstriyel alanda üstün tribolojik performans sergilemektedir [97–100]. Titanyum bazlı malzemeler yaygın olarak CVD ve PVD yöntemleriyle kaplanmaktadır [101,102]. Çalışma kapsamında TiCN kaplama işlemi için PVD kaplama yöntemi tercih edilmiştir. PVD yöntemi ile CVD yöntemine kıyasla kaplama işlemi daha düşük sıcaklık değerlerinde matris malzemeye daha kuvvetli yapışma özelliğine sahip ince filmler elde edilmektedir [103,104]. Prosesin düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilmesi sayesinde termal etki sebebiyle matris malzemenin mekanik dayanımını ve kimyasal yapısını olumsuz etkilememektedir. Ayrıca CVD yöntemine kıyasla daha ince film oluşumuyla malzemenin boyutsal özelliklerindeki değişim minimize edilebilmektedir [105]. Bu sayede matris malzemenin fiziksel ve kimyasal özellikleri korunarak mekanik ve tribolojik

performansı arttırılabilmektedir. Mevcut çalışmada PVD prosesi için belirlenen parametreler Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Kaplama parametreleri.

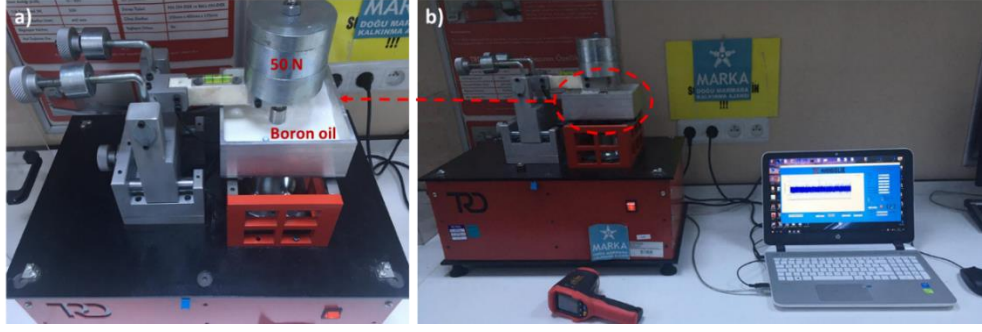
WC-Co Kaplama		TiCN Kaplama	
Parametre	Parametre Değerleri	Parametre	Parametre Değerleri
Oksijen akış hızı (1 min ⁻¹)	265	Ark akımı	80 A
Taşıyıcı gaz (nitrojen) akış hızı (1 min ⁻¹)	15.5	Vakum atmosferi	1.33 Pa
Yanıcı gaz (hidrojen) akış hızı (1 min ⁻¹)	650	Reaktif püskürtme gazları	CH ₄ , N ₂
Tabanca hareket hızı (mm s ⁻¹)	5	Püskürtme gazı	Ar
Sprey mesafesi (mm)	310	Biriktirme süresi	60 min
Paso sayısı	20	Sıcaklık	450 °C

6.2. AŞINMA TESTLERİ

Bu çalışmanın amacı WC-Co ve TiCN kaplamalı küresel grafitli dökme demir malzemesinin aşınma performansının kuru ve bor yağı ortamında analiz edilmesidir. Tasarlanan deney sistemine ait veriler Çizelge 6.2’de, aşınma testlerinin yapıldığı ball-on-plate deney düzeneğine ait fotoğraflar Şekil 6.2.a ve Şekil 6.2.b’de verilmiştir.

Çizelge 6.2. Deney tasarımı verileri.

Parametre	Açıklama
Aşınan malzeme	Kaplamasız, WC-Co ve TiCN kaplamalı küresel grafitli dökme demir
Aşındırıcı malzeme	AISI 52100 (100Cr6) (Sertlik:700 HV)
Aşındırıcı malzeme yüzey pürüzlülüğü	0,2 µm
Aşınma testi türü	Ball-on-plate
Yük	50 N
Hız	60 dev/dk.
Toplam alınan aşınma mesafesi	1000 m
Aşınma tezgâhı gücü	2 kW
Sürtünme katsayısı için kullanılan dinamometre	Tek eksen (0-1000 N ölçüm aralığı, 0,1 N ölçüm hassasiyeti)
Numune boyutları	100Cr6 için 6 mm çapında küresel bilye, Küresel grafitli dökme demir için 30 mm çapında ve 7 mm kalınlığında malzeme
Deney ortamı	Kuru ve bor yağı emülsiyonu
Aşınma deneylerinin yapıldığı ortam sıcaklığı	21 °C
Aşınma deneylerinin yapıldığı ortamdaki nem miktarı	%20



Şekil 6.2. Aşınma deney düzeneği fotoğrafı.

Aşınma numunesi olarak WC-Co ve TiCN kaplanmış perlitik yapılu küresel grafitli dökme demir malzemesi, aşındırıcı malzeme olarak 6 mm çapında 62 HRC sertliğe sahip AISI 52100 (100Cr6) kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimleri Çizelge 6.3. ve 6.4'te verilmiştir. Deneyler kuru ve bor yağı ortam koşullarında, sabit yük ve hız parametrelerinde gerçekleştirilmiştir. Deney parametreleri, ön testler ve literatür çalışmaları referans alınarak belirlenmiştir [16,22,59]. Kaplama işleminin ve bor yağı emülsiyonunun sürtünme davranışına etkisi, deneyler sırasında dinamometre aracılığıyla elde edilen sürtünme katsayısı değerleriyle analiz edilmiştir.

Çizelge 6.3. Perlitik küresel grafitli dökme demirin kimyasal bileşimi.

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	Mg
3.80	2.0	0.40	0.5	2.20	0.50	0.15	0.04

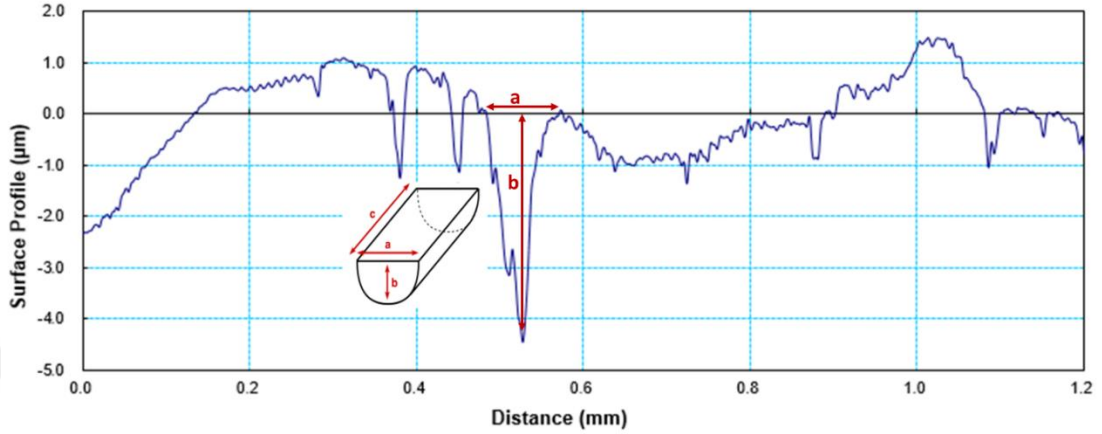
Çizelge 6.4. AISI 52100 (100Cr6) kimyasal bileşimi.

Element	C	Si	Mn	P _{max}	S _{max}	Cr	Mo
Ağırlık%	1.02	0.25	0.33	0.025	0.015	1.53	≤ 0.1

6.3. HACİM KAYBI VE YÜZEY MORFOLOJİSİ ANALİZİ

Aşınma sebebiyle meydana gelen deformasyon miktarının nicel analizi için 2D profilometre yardımıyla hacim kaybı ve yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. 2D profilometre cihazı ile aşınma izinin derinliği ve eni, 1/10'luk kumpas ile de aşınma izinin boyu ölçülmüştür. 2D profilometreden elde edilen boyut grafiği örneği ve aşınma izinin şematik resmi Şekil 6.3'de verilmiştir. Aşınma bölgesi boyutlarına bağlı

olarak belirlenen hacim kaybı değerleri Denklem 6.1’de verilen bağıntıya göre hesaplanmıştır. Denklem 6.1’de verilen a değeri aşınma izinin enini, b değeri aşınma derinliğini, c değeri ise strok mesafesini (aşınma izi boyu) ifade etmektedir (Şekil 6.3.).



Şekil 6.3. 2D profilometreden elde edilen boyut grafiği örneği.

$$V = \frac{2}{3} \cdot a \cdot b \cdot c \quad (6.1)$$

WC-Co ve TiCN kaplamalı malzemelerin yüzey morfolojisi, kaplama karakterizasyonu ve aşınma mekanizması karakterizasyonu olmak üzere iki aşamalı olarak analiz edilmiştir. Kaplama karakterizasyonu için WC-Co ve TiCN kaplamalı numune yüzeylerinden belirli aralıklarla sertlik ölçümleri yapılmıştır. Kaplama kalınlıklarının belirlenmesi, elemental analiz ve bileşik analizi için SEM, EDX ve XRD görüntüleri elde edilmiştir. Kaplamalı numunelerden elde edilen sertlik değerleri ve görüntü analizleri kaplamasız numune ile kıyaslanmıştır. Ayrıca, yüzey kalitesinin incelenmesi ve deformasyon bölgelerinde meydana gelen aşınma mekanizmalarının belirlenebilmesi için SEM, 2D profilometre ve 3D profilometre görüntüleri analiz edilmiştir. Sertlik ölçümü ve görüntü analizleri için kullanılan cihazlar Çizelge 6.5’te verilmiştir.

Çizelge 6.5. Sertlik ölçümü ve görsel analiz için kullanılan cihazlar.

Ölçüm ve Görüntüleme Yöntemi	Cihaz
Vickers Mikro Sertlik Ölçümü	Bruker UMT Universal Test Cihazı
2D Profilometre	Taşınabilir Yüzey Pürüzlülüğü Test Cihazı (Sj-410 Serisi)
SEM, EDX	Carl Zeiss Ultra Plus Gemini Fesem
3D Profilometre	Phase View Optik Profilometre
XRD	AEP-Nanomap-500LS Atomic Force Microscope

BÖLÜM 7

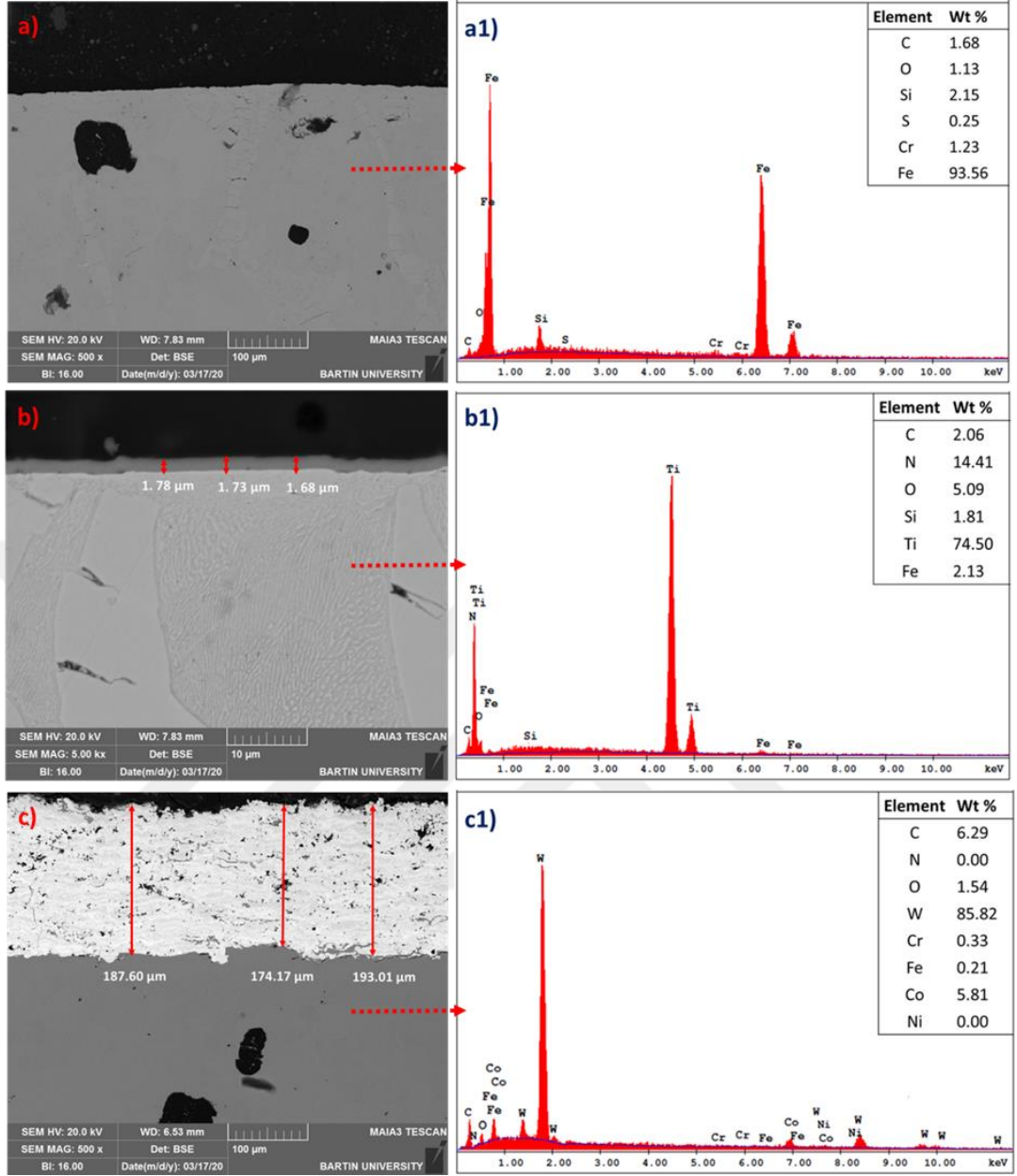
BULGULAR VE TARTIŞMA

İlk olarak baz malzemenin ve kaplama tabakalarının metalografik karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. İkinci adımda kuru ve bor yağı ortamında gerçekleştirilen aşınma deneylerinin sonuçları analiz edilmiştir.

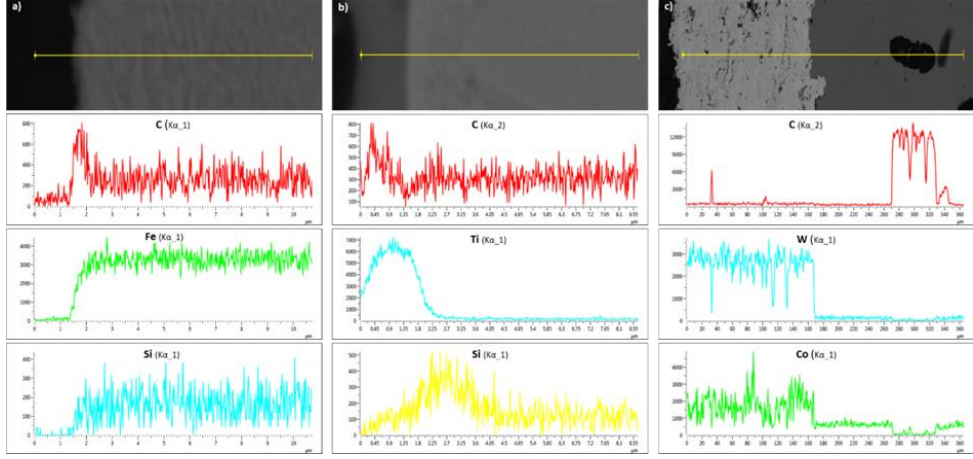
7.1. KAPLAMANIN KARAKTERİZASYONU

Baz malzeme ve kaplanmış malzemelerin karakterizasyonu için bakalite alınan numunelerin kesitlerinden SEM görüntüleri alınmış ve görüntüler EDX ile elemental olarak analiz edilmiştir (Şekil 7.1.). Kaplama tabakalarının ve baz malzemenin içerisindeki elemental değişimler için ayrıca çizgi boyunca EDX analizi yapılmıştır (Şekil 7.2.). Şekil 7.1.a'da görülen küresel yapıdaki siyah bölgelerin grafit olduğu Şekil 7.1.c'deki EDX grafiğinde (C) anlaşılmaktadır. Şekil 7.1.b'de ortalama 1.70 µm kalınlığında TiCN ince film kaplama tabakası görülmektedir. Literatürde Ti kaplama için genellikle 1-5 µm aralığında çalışma yapılmıştır [35,36,83,96,97,106]. TiCN kaplama yüzey boyunca homojen bir kalınlıkta malzeme yüzeyine tutunmuş ve çatlak, boşluk oluşumu kusurları gözlenmemiştir. Şekil 7.1.c'de, WC kaplama tabakasının ortalama 180 µm kalınlığında, homojen bir yapıda, kusursuz ve yüzey pürüzlülük noktalarına kadar penetre olduğu görülmektedir. Şekil 7.2.c'de hem kaplama tabakasında hem de dökme demir malzeme içinde homojen dağılmış C elementinin grafiği görülmektedir. C elementinin her iki malzemede de benzer dağılım davranışı göstermesi kaplama ile baz malzemenin karakteristik uyumu açısından önem taşımaktadır. Sadece küresel morfolojideki grafitin bulunduğu düzlemde bölgesel bir C piki oluşmuştur. İlaveten Şekil 7.2.c'deki Co elementi, ana malzemeyle kaplama malzemesi arasında bağlayıcı işlevi görmektedir.

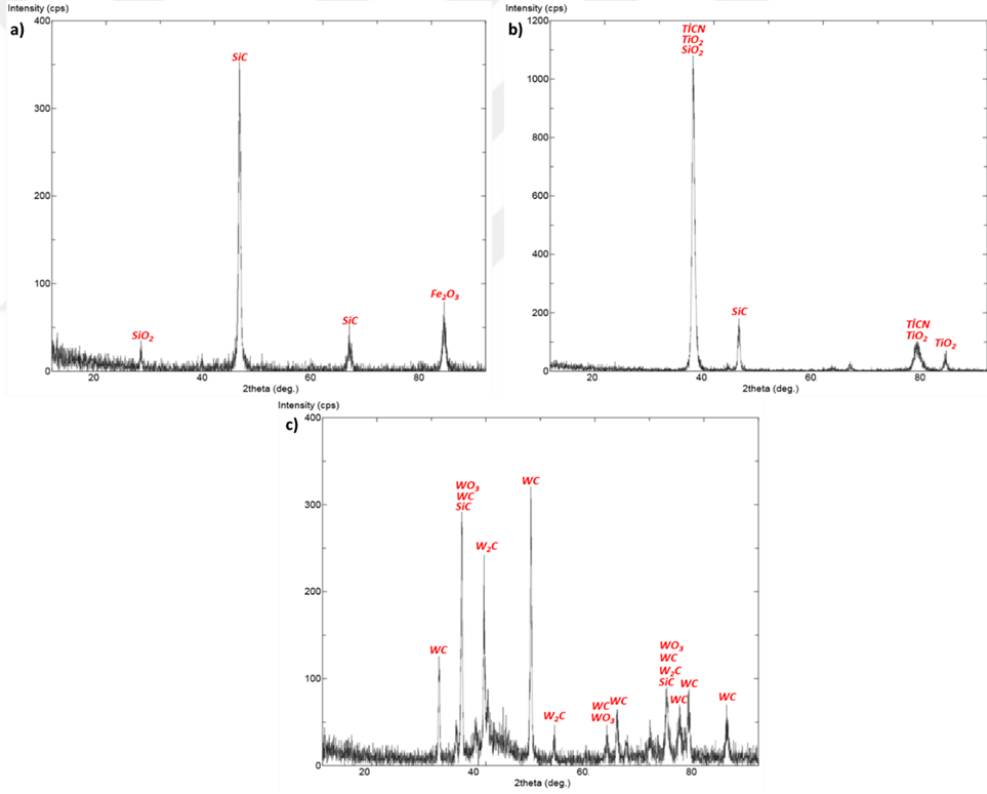
Şekil 7.3.a'daki XRD grafiğinde dökme demir malzemede SiC ve Fe₂O₃ bileşiklerinin oluştuğu görülmektedir. Demir matris içerisinde SiC alaşımının bulunduğu bölgelerde malzeme sertliğinin arttığı belirlenmiştir (Şekil 7.4.). Şekil 7.4'teki mikro sertlik grafiğinde kaplanmamış dökme demir malzemenin sertlik değerinin ortalama 290 HV değerinde olduğu, SiC bileşiğinin olduğu noktalarda ise bu değer \sim 1000 HV değerine yükseldiği görülmektedir. Şekil 7.3.b'ye göre TiCN kaplamasında alaşım farklılaşması oluşmadığı belirlenmiştir. Sertlik grafiğine göre TiCN kaplamanın sertliği 1559 HV'den 308 HV değerine düşmüştür. Sertlik grafiğindeki ani azalış TiCN kaplama kalınlığının \sim 2 μ m olması sebebiyle geçiş bölgesinin oluşmaması veya ölçülemeyecek seviyede bir geçiş bölgesinin varlığı ile açıklanabilir. Şekil 7.3.c'de WC kaplamalı malzemede WC ve W₂C bileşiklerinin yoğun olarak oluştuğu görülmektedir. W₂C bileşiğinin varlığı dekarbürizasyon oluşumu ve WC'nin oksidasyonu ile açıklanmaktadır [34,107]. Şekil 7.3.c'de WC ve W₂C bileşiklerinin bulunduğu bölgeler arasında belirgin ton farkı bulunmamaktadır. Fakat mikro sertlik grafiği incelendiğinde WC bileşiğinin bulunduğu bölgelerde sertlik değerinin ortalama 600 HV olduğu, W₂C bileşiğinin bulunduğu bölgelerde bu değer \sim 1400 HV değerine yükseldiği görülmektedir (Şekil 7.4.) [31].



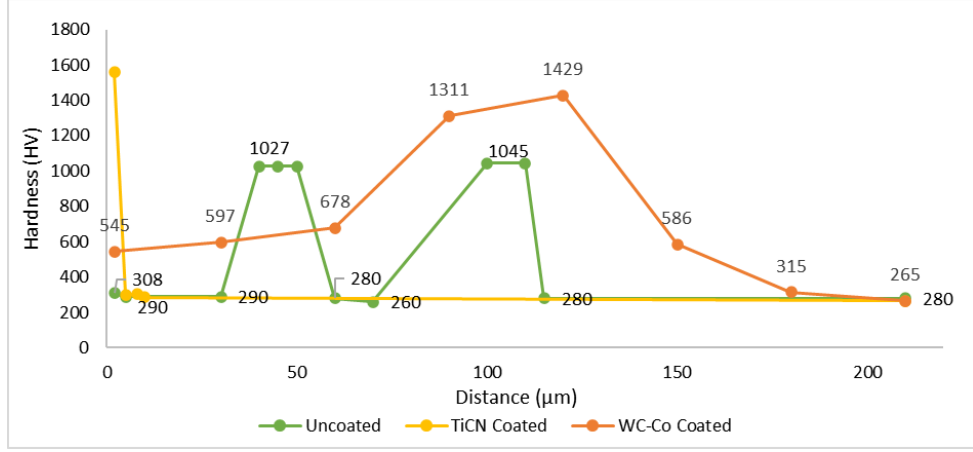
Şekil 7.1. (a) Temel malzeme, (b) TiCN kaplanmış malzeme ve (c) WC-8%Co kaplanmış malzeme SEM görüntüleri ve EDX ölçüm sonuçları.



Şekil 7.2. (a) Temel malzeme, (b) TiCN kaplanmış malzeme ve (c) WC-8%Co kaplanmış malzemenin çizgi boyu EDX ölçüm sonuçları.



Şekil 7.3. (a) Temel malzeme, (b) TiCN kaplanmış malzeme ve (c) WC-8%Co kaplanmış malzemenin XRD ölçüm sonuçları.



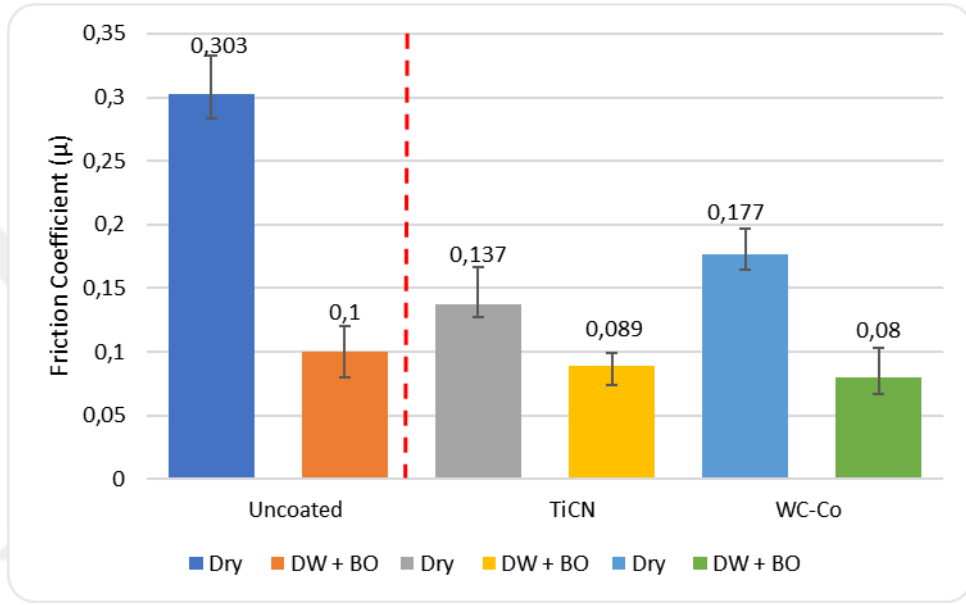
Şekil 7.4. Temel malzeme, (b) TiCN kaplanmış malzeme ve (c) WC-8%Co kaplanmış malzemenin mikro sertlik ölçüm sonuçları.

7.2. SÜRTÜNME VE AŞINMA DAVRANIŞI

Aşınmaya maruz yüzeylerde malzemelerin mekanik özellikleri, yüzey kaliteleri ve ortam koşullarına bağlı olarak değişen sürtünme katsayısı değerinin etkisi ile oluşan teğetsel kuvvetler sonucu sürtünme kuvvetleri oluşmaktadır [108]. Özellikle ağır yük koşullarında çalışan sistemlerde yüksek sürtünme katsayısına bağlı olarak oluşan sürtünme kuvvetleri sebebiyle enerji tüketimi artmakta ve verim azalmaktadır. Sistem performansı ve malzemelerin kullanım ömrü açısından sürtünme katsayısının değerlendirilmesi önem taşımaktadır. Bu sebeple çalışma kapsamında sürtünme katsayısı değerleri elde edilmiş ve Şekil 7.5'te verilmiştir. Şekil 7.5'e göre kuru ortam koşullarında TiCN ve WC-Co kaplamanın kaplamasız yüzeye kıyasla sürtünme katsayısını sırasıyla %54.78 ve %41.58 oranında azalttığı görülmektedir. Yüzeye entegre edilen TiCN ve WC-Co kaplamaları sayesinde yüzeydeki karbür miktarı artmış ve bu durum malzeme sertliğinin artmasını sağlamıştır. Ayrıca TiCN kaplamasının amorf yapıda olması ve WC-Co kaplaması sırasında W_2C bileşik oluşumu da sertliği arttıran diğer etkenlerdir [109,110]. Yüzey sertliğindeki artış ve kaplama yüzeylerinde oluşan homojen morfoloji sayesinde kaplamasız yüzeye kıyasla daha düşük sürtünme katsayısı değerleri elde edilmiştir.

Ortam koşullarının sürtünme katsayısına etkisi incelendiğinde ise, yağlayıcı ortam koşullarında kuru ortam koşullarına kıyasla sürtünme katsayısının azaldığı görülmektedir. Şekil 7.5'e göre bor yağı emülsiyonunun kaplamasız, TiCN ve WC-Co

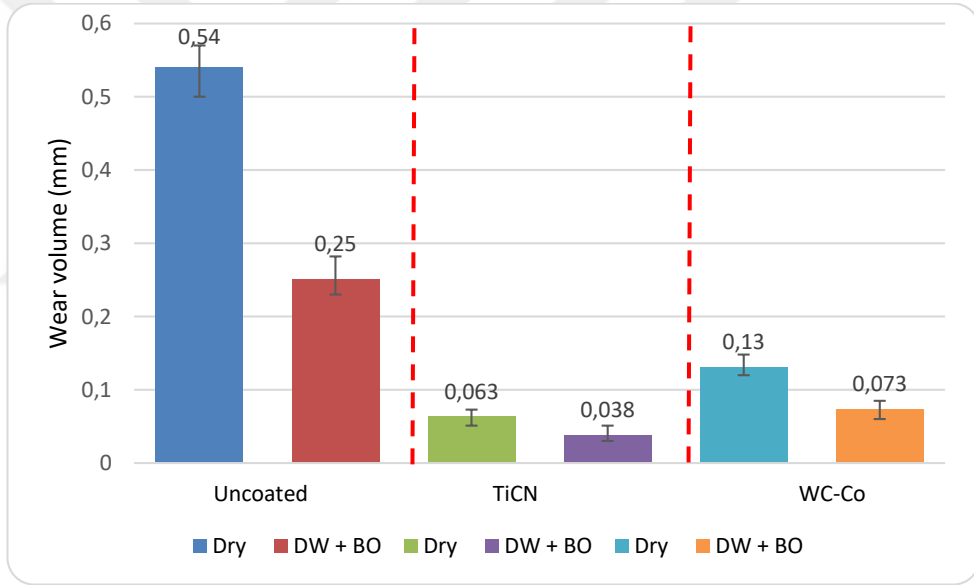
kaplamalı malzemelerin sürtünme katsayısını sırasıyla %66.99, %35.03 ve %54.80 oranında azalttığı belirlenmiştir. Bor yağı kullanımıyla malzemeler arasında sınır yağlama tabakası oluşumu sağlanmış, bu sayede malzemeler arasındaki direnç ve adhezyon oluşumu azalmıştır. Bu durum aşındırıcı malzemenin hareketini kolaylaştırarak sürtünme katsayısı değerlerinin azalmasını sağlamıştır. Literatür çalışmaları da bu durumu destekler niteliktedir [41–43].



Şekil 7.5. Kuru ve yağlanmış koşullarda kaplanmamış ve kaplanmış malzemelerin sürtünme katsayıları.

Temas halindeki malzemelerde, yüzeyler arasında oluşan sürtünme katsayısının artışıyla orantılı olarak aşınma miktarı artar [111]. Özellikle düşük mukavemetli malzemede daha fazla miktarda aşınma oluşması ve malzemeden makro boyutta parçaların kopması beklenir. Belirtilen durumlara bağlı olarak, aşınmaya maruz malzemelerde hacim azalmasının yanı sıra yüzey kalitesi de düşmektedir. Sıvı ortamında gerçekleşen aşınma koşullarında ise sınır yağlama tabakası oluşumu ve aşınma direncinin artmasına bağlı olarak, kuru ortam koşullarına nazaran sürtünme katsayısı ve hacim kaybı değerlerinin azalması beklenir. Çalışma kapsamında iki boyutlu yüzey analizinden elde edilen hacim kaybı değerleri Şekil 7.6’da verilmiştir. Şekil 7.6’ya göre kuru ortam koşullarında TiCN kaplama ve WC-Co kaplamanın kaplamasız yüzeye kıyasla aşınma hacmini sırasıyla 88.33% ve 75.92% oranında azalttığı görülmektedir. Kaplama işlemiyle aşınma hacmindeki önemli oranda azalış

TiCN ve WC-Co kaplamalarındaki yüzey sertliği artışıyla açıklanabilir. Bu durum, TiCN ve WC-Co kaplamaları sayesinde küresel grafitli dökme demir malzemesinin aşınma direncinin ciddi oranda artırılabilirdiğini göstermektedir. Şekil 7.6'ya göre bor yağı emülsiyonu koşullarında kuru ortam koşullarına kıyasla kaplamasız, TiCN ve WC-Co kaplamalı malzemelerin aşınma hacmini sırasıyla %53.70, %39.68 ve %43.84 oranında azalttığı belirlenmiştir. Bu durum borik asit tabakalı yapısıyla açıklanabilir. Borik asit (H_3BO_3), tabakalı bir yapıya sahip olup tabakalar birbirine Van der Waals bağlarıyla bağlıdır [41–43,45,112]. Aşındırıcı malzemenin hareketiyle tabakalar arasındaki zayıf bağlar koparak tabakaların hareketini kolaylaştırmaktadır. Bu durum borik asite yağlayıcılık özelliği kazandırmakta ve aşınma miktarının azaltılmasını sağlamaktadır.



Şekil 7.6. Kuru ve yağlanmış koşullar altında kaplanmamış ve kaplanmış malzemelerin aşınma hacimleri.

7.3. YÜZEY MORFOLOJİSİ ANALİZİ

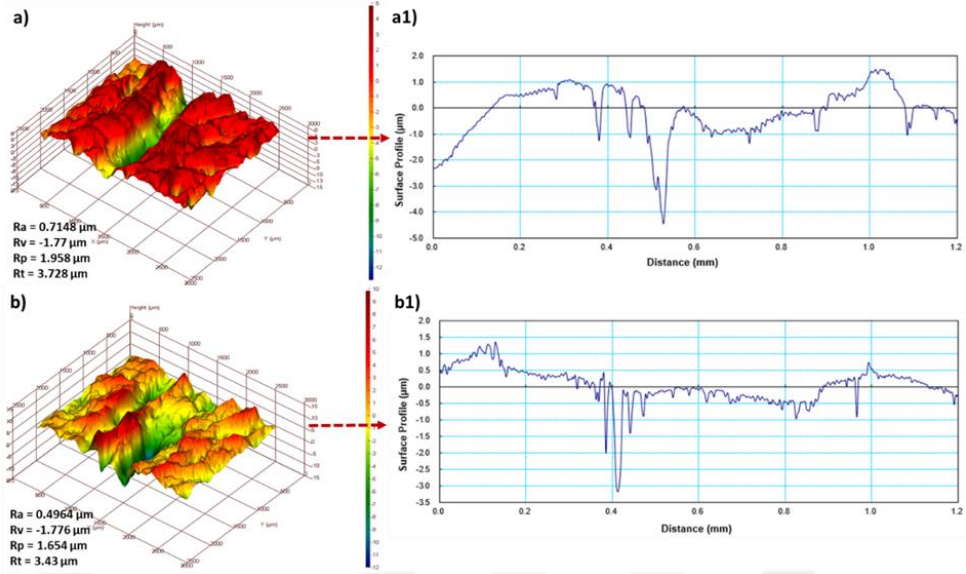
Malzemelerin temas bölgesinde sürtünmenin etkisiyle oluşan yüksek ısının (termal enerji), yüzey pürüzlülüklerinin düzensizliğine bağlı olarak yüzeyde homojen bir sıcaklık dağılımı oluşturamayacağı literatürde belirtilmiştir [113]. Özellikle yüksek pürüzlülük noktalarında, kanatçık etkisi nedeniyle ısı transferi artışı ve sıcaklık değerinin düşmesi beklenir. Bu duruma bağlı olarak, pürüzlü yüzeylerde termal

enerjinin bölgeye homojen yayılmamasıyla oluşan mikro boyuttaki genleşme ve büzüşmelere bağlı olarak form bozukluğu meydana gelmektedir. Form bozuklukları, yüzey morfolojisini olumsuz yönde etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Bu sebeple aşınmış bölgelerin yüzey morfolojisinin analizi için 2D - 3D profilometre görüntüleri ve yüzey pürüzlülük değerleri incelenmiştir. Analizlerde güvenilirliği arttırmak için, incelenen yüzeylerin hem 3D hem de 2D görüntüleri farklı ölçüm cihazları kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen 2D -3D profilometre görüntüleri ve pürüzlülük değerleri kaplamasız, TiCN kaplamalı ve WC-Co kaplamalı numuneler için sırasıyla Şekil 7.7, Şekil 7.8 ve Şekil 7.9'da verilmiştir.

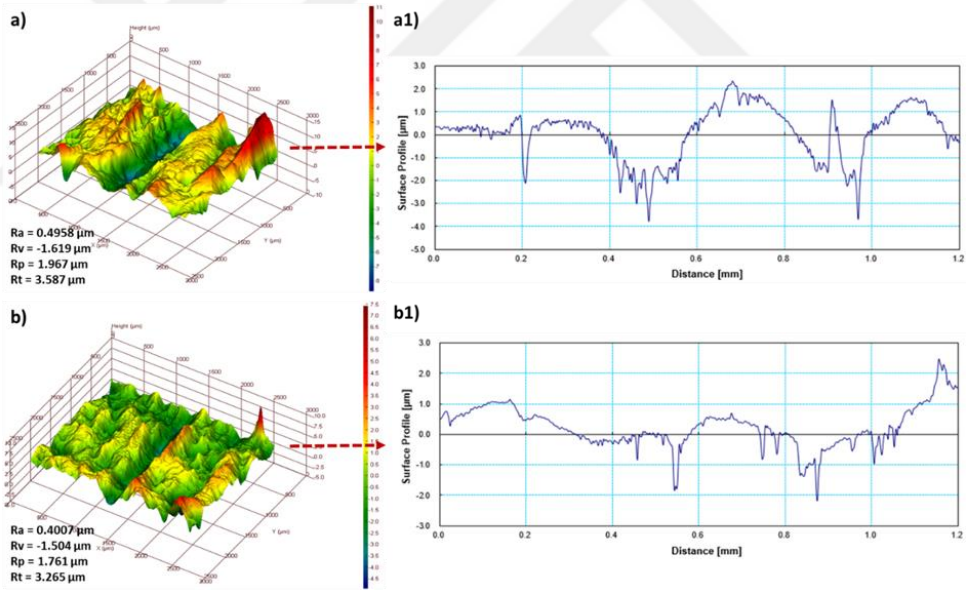
Şekil 7.7, 7.8 ve 7.9'da verilen topoğrafya görüntülerinde sarı ve yeşil renkler düzlemsel ve düzlemsele yakın bölgeleri, kırmızı renk yükselti noktalarını, mavi renk ise derinlik noktalarını temsil etmektedir. Sarı ve yeşil renklerin yoğun olduğu koşullar ideal-düzlemsel yüzey formunu ifade etmektedir. Şekil 7.7.a ve 7.7.(a1)'de kuru koşullarda aşınmış kaplamasız numunenin 3D topoğrafya ve 2D profilometre görüntüleri verilmiştir. Şekil 7.7.a'da kırmızı renkli bölgelerin diğer koşullara nazaran daha fazla miktarda olduğu ve dalgalı bir yüzey formu olduğu görülmektedir. TiCN kaplamalı (Şekil 7.8.a ve Şekil 7.8.(a1)) numunenin yüzey görüntülerinde kırmızı renklerin minimum miktarda olduğu, sarı-yeşil renkli bölgelerin yoğun olduğu, aşınma izi genişliğinin ve derinliğinin azaldığı görülmektedir. WC-Co kaplamalı (Şekil 7.9.a ve Şekil 7.9.(a1)) numunenin yüzey görüntülerine göre deformasyon bölgesinde oluşan yüksek ısı mikro kaynak oluşumuna sebebiyet vererek pürüzlülük tepelerinin oluşmasına neden olmuştur. Pürüzlülük tepelerinin yoğunluğu, bölgede oluşan termal enerjinin homojen yayılmasını engellediği için düzensiz yüzey formu oluşumu gerçekleşmiştir. WC kaplanmış malzemenin sürtünme katsayısı ve aşınma hacmi değerleri kaplanmamış numuneden düşük olmasına rağmen, topoğrafya görüntülerinin bu durumu doğrular nitelikte olmadığı görülmektedir. Bu durum aşınma mekanizmalarının farklı olmasıyla açıklanabilir. Kaplanmamış numune ve TiCN kaplı numunenin topoğrafya görüntüleri düzenli abrazyon aşınması oluşumunu, WC kaplanmış numunenin topoğrafya görüntüsü ise sürülme aşınması ile birlikte adhezyon aşınması oluşumunu düşündürmektedir. WC kaplanmış numunede farklı aşınma mekanizmalarının oluşumunda WC ve W₂C fazlarının etkili olduğu iddia edilebilir. WC'nin ~500 HV sertlikte, W₂C'nin ise ~1400 HV sertlik değerlerinde olması aşınma

karakterinin değişimini etkilemiştir. Aşındırıcı malzeme (~700 HV) ile sert W₂C arasında kalan WC tabakası yüzeye yayılarak adhesif mekanizmanın oluşumuna neden olmuştur. Sürtünmenin devam etmesine bağlı olarak da WC malzeme zamanla aşınma bölgesinin kenarlarında birikme yaparak sürülme aşınması karakterinin gözlenmesine sebep olmuştur.

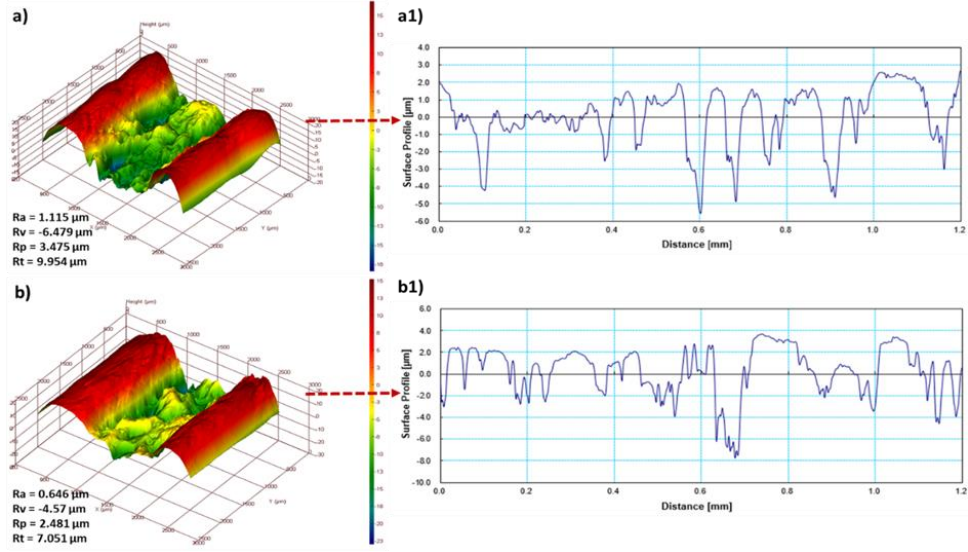
Bor yağı emülsiyonu ortamında aşındırılan numunelerde kuru ortam koşullarına kıyasla kırmızı renkli bölgelerin azaldığı, düzlemselliği ifade eden sarı ve yeşil renkli bölgelerin arttığı görülmektedir (Şekil 7.7.b, Şekil 7.8.b ve Şekil 7.9.b). Bor yağı emülsiyonunun iki malzeme arasında ince film tabakası oluşturması sebebiyle termal enerjinin yüzeye homojen yayılması kolaylaşmış ve kuru koşullara kıyasla daha az dalgalı bir yüzey formu oluşmuştur. Borik asit bileşimini oluşturan bor, hidrojen ve oksijen atomlarının birbirlerine güçlü bağlarla (kovalent, iyonik ve hidrojen) bağlanması sebebiyle aşınma arayüzeyinde oluşan her bir tabaka güçlü bir yapıya sahip olup, bu durum bor yağı emülsiyonunun oluşturduğu filmin yük taşıma kapasitesini arttırmaktadır [41,42,112]. Ayrıca bor yağının düşük yoğunluğu (0.085 g/ml) saf su içerisinde homojen dağılımını kolaylaştırmakta olup bu durum bor yağının aşınma bölgesindeki penetrasyonunu arttırmaktadır. Bor emülsiyonu, yüksek yük taşıma kapasitesi ve penetrasyon kabiliyeti sayesinde pürüzlülük miktarını minimize ederek yüzey kalitesini arttırmıştır. 3D Topoğrafya görüntülerinden elde edilen sonuçlarla 2D profilometre görüntüleri ve pürüzlülük ölçümlerinden elde edilen sonuçlar birbirini doğrular niteliktedir.



Şekil 7.7. Kaplamasız yüzeye ait (a, a1) kuru ve (b, b1) bor yağı ortamında oluşan aşınma yüzey topografya görüntüleri.



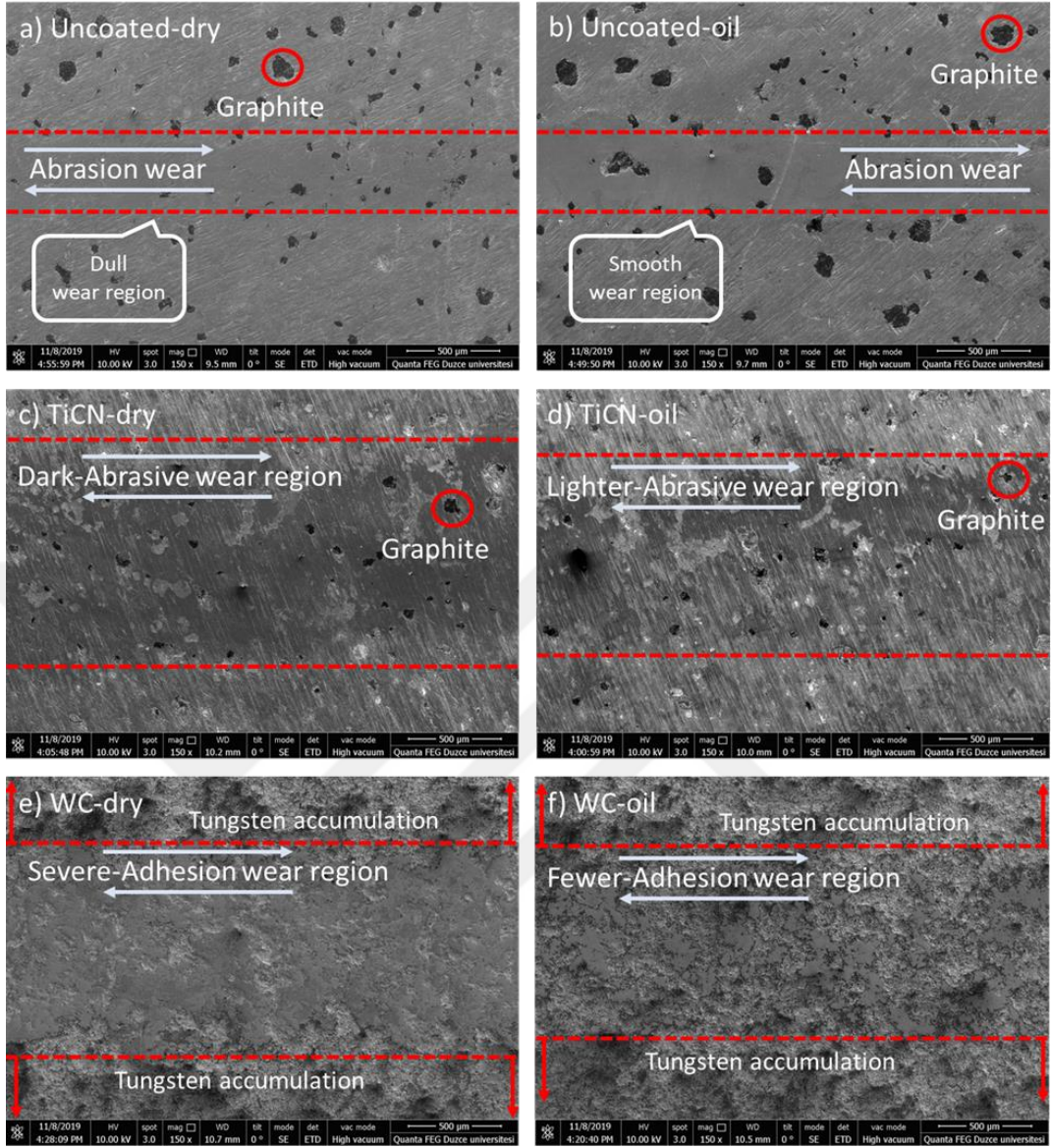
Şekil 7.8. TiCN kaplamalı yüzeye ait (a, a1) kuru ve (b, b1) bor yağı ortamında oluşan aşınma yüzey topografya görüntüleri.



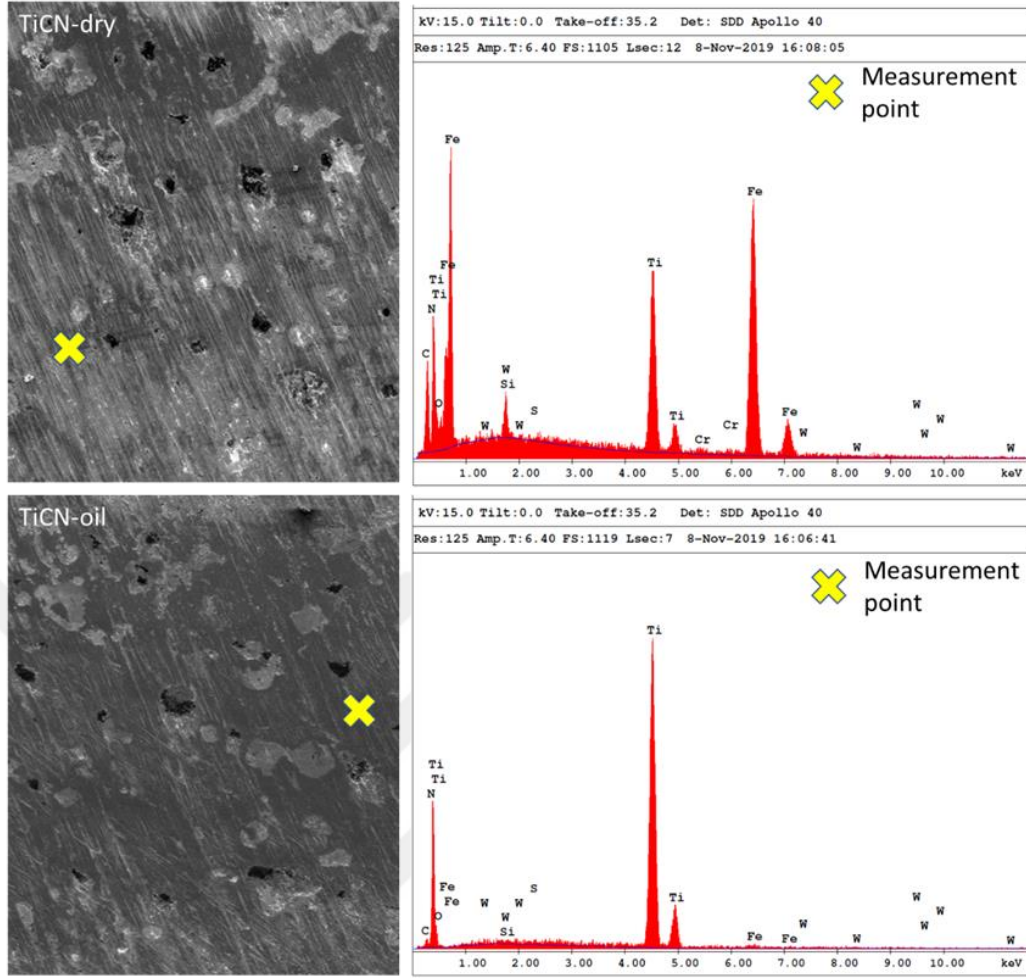
Şekil 7.9. WC-Co kaplamalı yüzeye ait (a, a1) kuru ve (b, b1) bor yağı ortamında oluşan aşınma yüzey topografya görüntüleri.

Aşınma mekanizmalarının daha iyi anlaşılabilmesi için SEM analizlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebeple aşınmış yüzeylerden elde edilen SEM görüntüleri EDX sonuçları ile birlikte analiz edilmiştir. SEM görüntülerinde her bir numune üzerinde aşınmanın gerçekleştiği bölge kesikli çizgi ile sınırlandırılmıştır. SEM fotoğraflarında genel olarak abrazyon ve adhezyon mekanizmalarının olduğu görülmektedir. Ayrıca kaplanmamış ve TiCN kaplanmış numunede küresel formdaki grafit dikkat çekmektedir (Şekil 7.10.a, Şekil 7.10.b, Şekil 7.10.c ve Şekil 7.10.d). Aşınma derinliği maksimum 10 μm civarında gerçekleştiği için WC kaplanmış numunenin kalınlığına bağlı olarak ($\sim 180 \mu\text{m}$) grafit tabakaları görülmemiştir (Şekil 7.10.e ve Şekil 7.10.f). Kaplanmamış numunede abrasif aşınma mekanizması olduğu görülmüş, mikro kaynak oluşumu ve yüzeye gömülmüş partiküller gözlenmemiştir (Şekil 7.10.a ve 7.10.b). Kaplanmamış numunede kuru ortam koşullarında aşınma çizgileri göze çarparken (Şekil 7.10.a), bor yağı ortamında (Şekil 7.10.b) aşınma çizgilerinin oluşmadığı görülmektedir. Bu duruma bağlı olarak iki yüzey arasında kontrast farkı oluşmuştur. Kaplanmamış numunelerde malzeme birikmesi, kaynak oluşumu, serbest dolaşan partikül varlığı gözlenmemesi ve sadece aşınma çizgilerinin var olması, abrazyon mekanizmasının oluştuğunu göstermektedir. Kaplanmamış numunedeki SiC parçacıklarının yüzeydeki aşınma direncini artırması ve grafitin yağlayıcı etkisi sayesinde yüzey korunmuştur. Bor yağı ortamında yüzeyin daha düzlemsel formda olması yağlama işleminin etkinliğini göstermektedir. Yüzey kalitesinin artmasına

bağlı olarak yorulma ve aşınma dirençlerinin artması beklenmektedir. TiCN kaplanmış numunelerde yüzey sertliği artışına bağlı olarak aşınma direnci artmış, bu durum yüzeydeki aşınma çizgilerinin artışına yol açmıştır. Fakat bu aşınma çizgileri TiCN kaplama tabakasını deforme edebilecek seviyede gerçekleşmemiştir. TiCN kaplama için kuru ve yağlayıcı ortam koşullarındaki yüzeylerden elde edilen EDX sonuçları Şekil 7.11’de verilmiştir. EDX sonuçlarına göre her iki aşınma yüzeyinde Ti elementi yoğun konsantrasyonda bulunmaktadır. Bu duruma bağlı olarak TiCN kaplama ile aşınma direncinin arttığı fakat yüzey kalitesinin çizikler nedeniyle olumsuz etkilendiği belirlenmiştir. TiCN kaplamada, kaplamasız koşula benzer şekilde kuru ve bor yağı ortamındaki yüzeylerde kontrast farkı oluşmuştur. Bor yağı TiCN kaplanmış numunede de etkililik göstermiş ve kuru ortam koşullarına kıyasla yüzey formunu koruyabilmiştir. Bor yağının koruyucu etkisi WC kaplama tabakasında da görülmektedir. SEM fotoğrafına göre bor yağı koşulunda aşınan WC kaplı yüzeyde daha az miktarda adhesif aşınma mevcuttur.



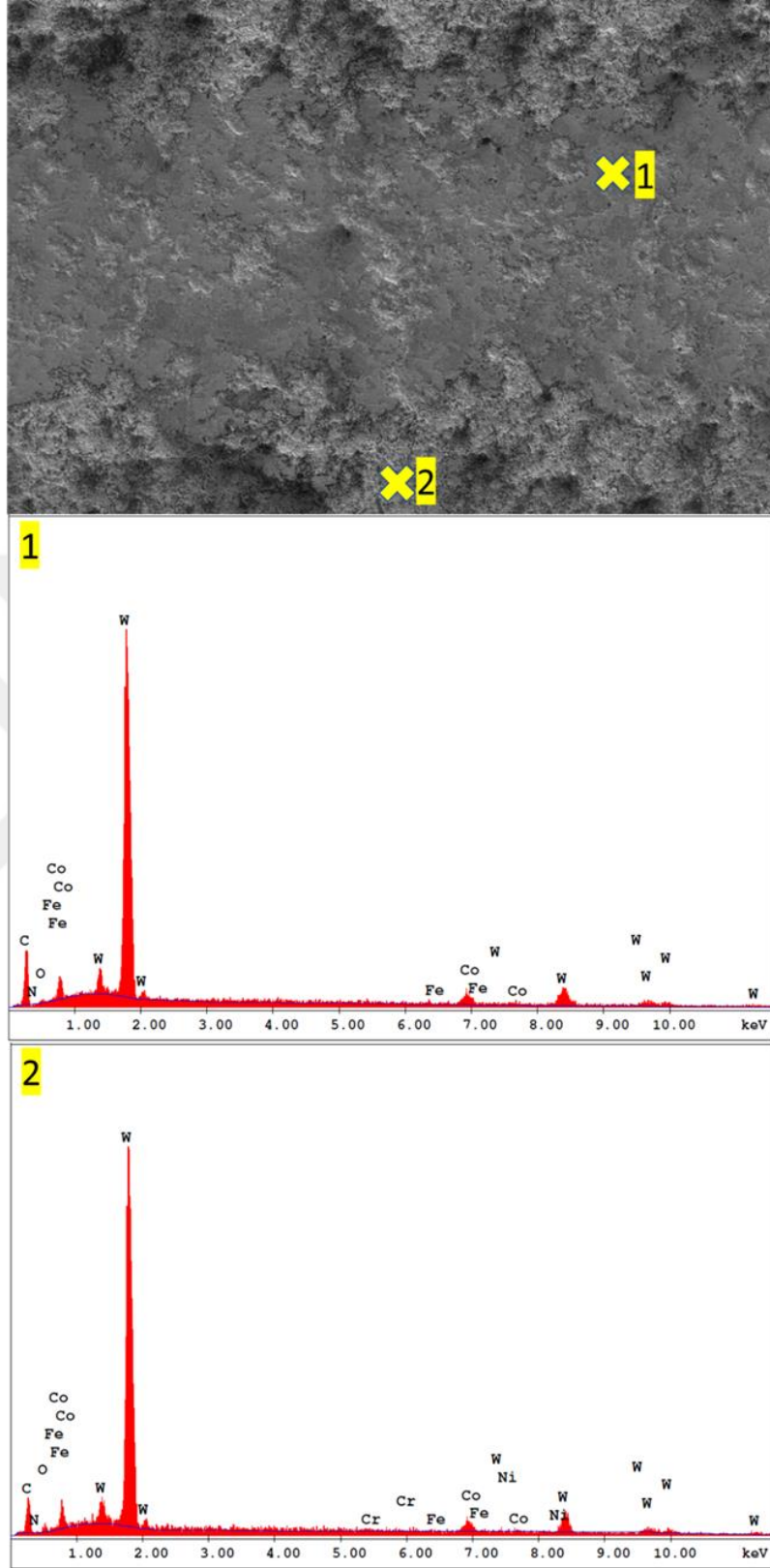
Şekil 7.10. Kaplamasız, TiCN kaplı ve WC-% 8 Co kaplı yüzeylerin SEM görüntüleri.



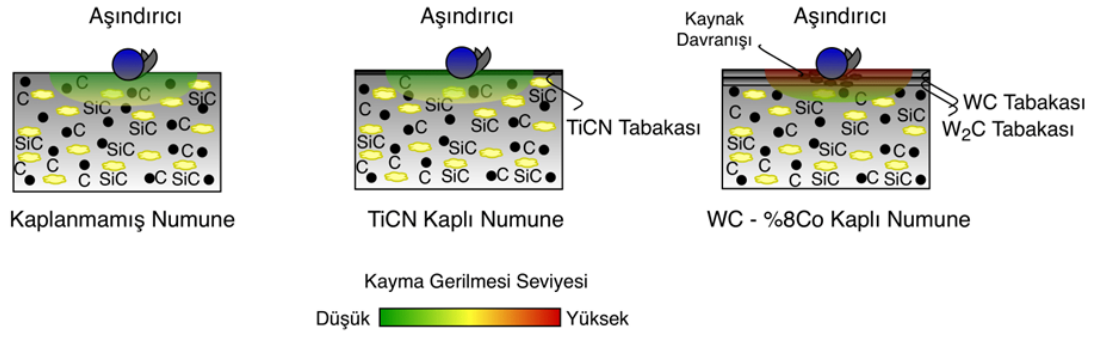
Şekil 7.11. Kuru ve bor yağı koşulları altında TiCN kaplanmış numune için EDX ölçüm sonuçları.

WC kaplamanın WC ve W_2C fazlarından oluştuğu ve bu fazlara bağlı olarak sertlik değerlerinin farklılaştığı Şekil 7.4'te belirtilmişti. WC fazının sertliği ~ 500 HV, aşındırıcı malzemenin sertliği ~ 700 HV değerinde olduğu için kaplamanın aşınmaya maruz bölümü ciddi anlamda deforme olmuş ve adezyon aşınması gerçekleşmiştir. Dökme demir malzemenin sertlik değerinin (~ 290 HV) aşındırıcı malzemedan düşük olmasına rağmen, dökme demir malzemede sadece abrasif aşınma görülmesi malzemenin yapısında bulunan serbest karbon ve SiC partiküllerinin varlığı ile açıklanabilir. Bu yapılarla bağlı olarak temas eden yüzeyler arasında adhesif aşınma mekanizması oluşmamıştır. WC kaplamada ise düşük sertlikteki WC tabakası deforme olmuş, W_2C (~ 1400 HV) tabakasına doğru ise aşınma direnci artmıştır. Bu duruma bağlı olarak WC tabakası, aşındırıcı malzeme ile W_2C tabakası arasında yüzeye yayılarak adhesif aşınma mekanizmasının oluşmasına sebep olmuştur. Bu davranış

itibariyle WC kaplamanın tribolojik davranışı kaplanmamış numuneden ve TiCN kaplamadan negatif olarak ayrılmaktadır. Aşınmanın devam etmesi durumunda ise W₂C fazında sertliğin fazla olmasına bağlı olarak abrasif aşınma oluşması beklenmektedir. Topografya görüntüleri bu yaklaşımı doğrular niteliktedir. Şekil 7.9.a ve 7.9.b'de aşınma ~9 µm derinlikten sonra yani W₂C tabakası etkisini göstermeye başladıktan sonra düzlemsel yapılar oluşmaya başlamıştır (sarı renkli tabaka). Bu durum adhesif aşınma mekanizmasından abrasif aşınmaya geçiş olarak tanımlanabilir. WC aşınması esnasında yüzeyden kopmuş partikül oluşumu gözlenmemiş, aşınma sebebiyle oluşan parçacıklar atomların bağ enerjisi sebebiyle yüzeye yapışarak aşınma çizgisinin kenarında yığılmıştır (Şekil 7.10.e ve 7.10.f). Şekil 7.12'deki EDX sonuçları da WC malzemenin aşınma çizgisi boyunca adhesyon aşınmasına bağlı olarak yüzeye sıvandığını ve yine tungsten malzemenin yüzeyden kopmadan yan kenarlara doğru birikme yaptığını doğrulamaktadır. EDX sonuçlarındaki 1. ve 2. ölçüm noktalarının aynı elemental içeriğe sahip olmasına rağmen farklı renk kontrastında olması farklı aşınma mekanizmalarının aktivasyonu ile açıklanabilir. Adhesif aşınmada karbon elementinin varlığına bağlı olarak koyulaşma oluşurken, abrasif aşınmada yüzey daha açık tonda oluşmuştur. Bu sonuçlara bağlı olarak hadde silindirlerinin WC ile kaplanmasının sürtünme katsayısının ve hacim kaybının azaltılması açısından anlamlı olduğu fakat aşınma mekanizmalarının karmaşıklığı nedeniyle yüzey kalitesi açısından belirsizlikler içerdiği söylenebilir. Şekil 7.13'de, kaplanmamış ve kaplanmış numunelerin aşınma davranışları şematik olarak gösterilmiştir. Deney sonuçlarına göre kaplanmamış numune ve TiCN kaplanmış numunenin yüzey formu açısından benzer karakteristik özelliklere sahip olduğu, fakat TiCN kaplanmış numunenin sürtünme katsayısı ve hacim kaybı avantajları nedeniyle daha uzun süre kullanılabilmesi belirlenmiştir. TiCN kaplanmış numunenin dezavantajı ise yüksek sertliği nedeniyle, aşınma yüzeyinde abrasiv karakterli çizikler oluşumudur. WC-Co8% kaplama ise aşınma karakteri bakımından sfero dökme demir ve TiCN kaplamadan farklı özellikler göstermektedir. Her ne kadar sürtünme katsayısı ve hacim kaybı açısından baz malzemeye oranla yüksek performans gösterse, aşınma karakteristiğinin değişkenliği yüzey pürüzlülüğü açısından kararlı değerler elde edilmesini güçleştirmektedir.



Şekil 7.12. Kuru koşul altında WC kaplanmış numune için EDX ölçüm sonucu.



Şekil 7.13. Kaplanmamış ve kaplanmış numunelerin aşınma davranışının şematik gösterimi.

BÖLÜM 8

SONUÇLAR

Bu çalışmada TiCN ve WC-Co kaplamalı perlitik yapıdaki küresel grafitli dökme demir malzemesinin tribolojik performansı 50 N yük ve 60 dev/dk kayma hızı parametrelerinde, farklı ortam koşullarında (kuru ve bor yağı emülsiyonu) gerçekleştirilen ball-on-plate aşınma deneyleriyle incelenmiştir. Kaplama karakterizasyonu için yüzeylerin mikro sertlik ölçümü yapılmış, SEM görüntüleri ile kaplama kalınlıkları belirlenmiş, EDX ve XRD görüntüleri ile elemental ve bileşik analizi yapılmıştır. Kaplama işleminin ve bor yağı emülsiyonunun aşınma performansına etkisinin incelenmesi için sürtünme katsayısı ve aşınma hacmi değerleri analiz edilmiştir. Aşınmış numunelerin yüzey morfolojisi analizi için aşınma bölgelerinin SEM görüntüleri elde edilerek aşınma mekanizmaları belirlenmiştir. Ayrıca aşınmış yüzeylerden elde edilen 2D profilometre ve 3D topoğrafya görüntüleri ile yüzey formu incelenmiş, pürüzlülük ölçüm değerleri ile yüzey formundaki değişiklik nicel olarak analiz edilmiştir. Kaplamalı numuneler için elde edilen analiz sonuçları, kaplamasız numuneden elde edilen sonuçlarla kıyaslanarak değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekildedir:

- Kaplanmış yüzeylerin SEM görüntüleri incelendiğinde TiCN kaplama kalınlığının $\sim 1.70 \mu\text{m}$, WC-Co kaplama kalınlığının $\sim 180 \mu\text{m}$ olduğu belirlenmiştir. Kaplama işleminin mikrosertlik değerlerine etkisi incelendiğinde, 290 HV sertliğindeki kaplamasız numunenin TiCN ve WC-Co kaplamalarıyla sırasıyla 1559 HV ve 1400 HV sertlik değerlerine ulaştığı görülmüştür.
- Yüzeylerden elde edilen XRD görüntülerine göre TiCN kaplamalı yüzeylerde alaşım farklılaşması olmadığı, WC-Co kaplamalı yüzeylerde WC ve W_2C

- bileşiklerinin oluştuğu belirlenmiştir. WC-Co kaplama yüzeyinde sertlik artışı, WC bileşiğinin W_2C bileşiğine dönüşümü ile ilişkilendirilmiştir.
- Kaplama işleminin sürtünme katsayısına etkisi incelendiğinde, kuru ortam koşullarında TiCN kaplama ve WC-Co kaplamanın kaplamasız yüzeye kıyasla sürtünme katsayısını sırasıyla %54.78 ve %41.58 oranında azalttığı belirlenmiştir. Kuru ve bor yağı emülsiyonu koşullarında elde edilen sürtünme katsayısı değerleri kıyaslandığında, bor yağı emülsiyonunun yüzeyde sınır yağlama tabakası oluşturarak kaplamasız, TiCN ve WC-Co kaplamalı malzemelerin sürtünme katsayısını sırasıyla %66.99, %35.03 ve %54.80 oranında azalttığı belirlenmiştir.
- Kaplama işleminin ve bor yağı emülsiyonunun aşınma davranışına etkisi 2D profilometre ölçümleri ile elde edilen aşınma hacmi değerleri incelenerek analiz edilmiştir. Kuru ortam koşullarında TiCN ve WC-Co kaplamalarının kaplamasız yüzeye kıyasla aşınma hacmini sırasıyla 88.33% ve 75.92% oranında azalttığı belirlenmiştir. Bor yağı emülsiyonu koşullarında kuru ortam koşullarına kıyasla kaplamasız, TiCN ve WC-Co kaplamalı malzemelerin aşınma hacmini sırasıyla %53.70, %39.68 ve %43.84 oranında azalttığı belirlenmiştir.
- 3D Topografya analizine göre kaplamasız numune yüzeyinde kırmızı renkli bölgelerin kaplamalı numunelere nazaran daha fazla miktarda olduğu ve dalgalı bir form yüzeyi oluştuğu görülmektedir. TiCN ve WC-Co kaplamalı yüzeylerde ise sarı ve yeşil renklerin yoğunlukta olduğu ve aşınma derinliğinin kaplamasız numuneye kıyasla ciddi oranda azaldığı belirlenmiştir.
- 3D Topografya analizine göre bor yağı emülsiyonu ortamında aşındırılan numunelerde kuru ortam koşullarına kıyasla kırmızı renkli bölgelerin azaldığı, düzlemselliği ifade eden sarı ve yeşil renkli bölgelerin arttığı görülmektedir. Bor yağı emülsiyonu yüksek yük taşıma kapasitesi ve penetrasyon kabiliyeti sayesinde yüzey kalitesini arttırmıştır. Topografya görüntülerinden elde edilen sonuçlarla 2D profilometre görüntüleri ve pürüzlülük ölçümlerinden elde edilen sonuçlar birbirini doğrular niteliktedir.

- Aşınmış yüzeylerden elde edilen SEM görüntülerine göre; kaplamasız ve TiCN kaplamalı numunelerde abrasiv, WC-Co kaplamalı numunede adhesiv aşınma mekanizmasının oluştuğu görülmüştür. Bor yağı koşullarında, kuru aşınma koşullarına kıyasla yüzey kalitesinin arttığı belirlenmiştir. EDX görüntülerinden elde edilen sonuçlar da SEM görüntülerini destekler niteliktedir.



KAYNAKLAR

1. Garza-Montes-de-Oca, N. F. and Rainforth, W. M., "Wear mechanisms experienced by a work roll grade high speed steel under different environmental conditions", *Wear*, 267 (1–4): 441–448 (2009).
2. Tremea, A., Biggi, A., Corbo, G., Cescato, D., Pellizzari, M., and Molinari, A., "Performances evaluation of high speed steels for hot rolling by wear and thermal fatigue tests", *AISTech - Iron And Steel Technology Conference Proceedings*, 2: 307–315 (2006).
3. Xu, L., Fan, X., Wei, S., Liu, D., Zhou, H., Zhang, G., and Zhou, Y., "Microstructure and wear properties of high-speed steel with high molybdenum content under rolling-sliding wear", *Tribology International*, 116: 39–46 (2017).
4. Vergne, C., Boher, C., Gras, R., and Levaillant, C., "Influence of oxides on friction in hot rolling: Experimental investigations and tribological modelling", *Wear*, 260 (9–10): 957–975 (2006).
5. Torres, H., Varga, M., Widder, F., Cihak-Bayr, U., Viskovic, O., and Rodríguez Ripoll, M., "Experimental simulation of high temperature sliding contact of hot rolled steel", *Tribology International*, 93: 745–754 (2016).
6. Cheng, X., Jiang, Z., Wei, D., Hao, L., Wu, H., Xia, W., Zhang, X., Luo, S., and Jiang, L., "Effects of surface preparation on tribological behaviour of a ferritic stainless steel in hot rolling", *Wear*, 376–377: 1804–1813 (2017).
7. Tieu, A. K., Zhu, Q., Zhu, H., and Lu, C., "An investigation into the tribological behaviour of a work roll material at high temperature", *Wear*, 273 (1): 43–48 (2011).
8. Phan, H. T., Tieu, A. K., Zhu, H., Kosasih, B., Zhu, Q., Grima, A., and Ta, T. D., "A study of abrasive wear on high speed steel surface in hot rolling by Discrete Element Method", *Tribology International*, 110 (November 2016): 66–76 (2017).
9. Zhu, H., Zhu, Q., Tieu, A. K., Kosasih, B., and Kong, C., "A simulation of wear behaviour of high-speed steel hot rolls by means of high temperature pin-on-disc tests", *Wear*, 302 (1–2): 1310–1318 (2013).
10. Delaunois, F., Stanciu, V. I., and Sinnaeve, M., "Resistance to high-temperature oxidation and wear of various ferrous alloys used in rolling mills", *Metallurgical And Materials Transactions A: Physical Metallurgy And Materials Science*, 49 (3): 822–835 (2018).

11. Jr, M. B. and Sinatora, a, "Microstructure and wear resistance of high speed steels for rollingmill rolls", *Of 6th International Tooling Conference (TOOL)*, 509–524 (2002).
12. Ha, D. J., Sung, H. K., Park, J. W., and Lee, S., "Effects of alloying elements on microstructure, hardness, wear resistance, and surface roughness of centrifugally cast high-speed steel rolls", *Metallurgical And Materials Transactions A: Physical Metallurgy And Materials Science*, 40 (11): 2568–2577 (2009).
13. Pellizzari, M., Cescato, D., and De Flora, M. G., "Hot friction and wear behaviour of high speed steel and high chromium iron for rolls", *Wear*, 267 (1–4): 467–475 (2009).
14. Li, X., Du, Z., Fu, H., Feng, Z., and Zhao, H., "Experimental investigation on heat treatment of a high-speed steel for hot rolling roll mill", *Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik*, 41 (3): 170–176 (2010).
15. Joos, O., Boher, C., Vergne, C., Gaspard, C., Nylén, T., and Rezaï-Aria, F., "Assessment of oxide scales influence on wear damage of HSM work rolls", *Wear*, 263 (1-6 SPEC. ISS.): 198–206 (2007).
16. Milan, J. C. G., Carvalho, M. A., Xavier, R. R., Franco, S. D., and De Mello, J. D. B., "Effect of temperature, normal load and pre-oxidation on the sliding wear of multi-component ferrous alloys", *Wear*, 259 (1–6): 412–423 (2005).
17. Faisal, M., El-Shenawy, E., and Taha, M. A., "Effect of deformation parameters on microstructural evolution of GGG40 spheroidal graphite cast iron alloy", *Materials Sciences And Applications*, 10 (06): 433–450 (2019).
18. Madtha, L. S. and Babu, N., "Experimental behavioural study of ductile cast iron microstructure and its mechanical properties", *International Journal Of Engineering Research*, 3 (3): 1470–1475 (2013).
19. Avdusinovic, H. and Gigović-Gekić, A., "Heat treatment of nodular cast iron", *Trends In The Development Of Machinery And Associated Technology*, (October): 669–672 (2009).
20. Foglio, E., Gelfi, M., Pola, A., Goffelli, S., and Lusuardi, D., "Fatigue characterization and optimization of the production process of heavy section ductile iron castings", *International Journal Of Metalcasting*, 11 (1): 33–43 (2017).
21. Sağlam, D., "Dökme Demirlerin Aşınma Özellikleri", *Marmara Üniversitesi*, (2009).
22. Yang, Z. run, Li, D. sheng, Wang, L., Wang, S. qi, and Wei, M. xian, "Wear behavior and mechanism of spheroidal graphite cast iron", *Journal Of Iron And Steel Research International*, 20 (10): 81–86 (2013).

23. Tan, E., "Dökme Demirden İmal Edilen Hadde Merdanelerinin Aşınma Davranışına Bakır Katkı Oranının Etkisi", *Pamukkale Üniversitesi*, (2005).
24. Akray, İ., "Küresel Grafitli Dökme Demirlere Uygulanan Yüzey İşlemlerinin Aşınma Direncine Etkisinin İncelenmesi", *İstanbul Teknik Üniversitesi*, (2007).
25. Salim, M., Shama, S., Mozumder, Y. H., Behera, R. K., Sindhoora, L. P., Pattanaik, A., Mishra, S. C., and Sen, S., "Adhesive wear behavior of heat treated spheroidal graphite cast iron", *IOP Conference Series: Materials Science And Engineering*, 75 (1): 1–8 (2015).
26. Çetin, M. and Gül, F., "Küresel Grafitli Dökme Demirin Abrasif Aşınma Davranışına Normalizasyon Isıl İşleminin Etkisi", *IV. Demir Çelik Kongresi*, 285–288 .
27. Gül, F., "Ferritik-perlitik küresel grafitli dökme demirin adhesif aşınma dayanımı üzerinde borlama yüzey işleminin etkisi", *Journal Of The Faculty Of Engineering And Architecture Of Gazi University*, 25 (2): 389–395 (2010).
28. Fotovvati, B., Namdari, N., and Dehghanhadikolaei, A., "On coating techniques for surface protection: A review", *Journal Of Manufacturing And Materials Processing*, 3 (28): 1–22 (2019).
29. Yang, Q., Senda, T., and Hirose, A., "Sliding wear behavior of WC-12% Co coatings at elevated temperatures", *Surface And Coatings Technology*, 200 (14–15): 4208–4212 (2006).
30. Vera, E. E., Vite, M., Lewis, R., Gallardo, E. A., and Laguna-Camacho, J. R., "A study of the wear performance of TiN, CrN and WC/C coatings on different steel substrates", *Wear*, 271 (9–10): 2116–2124 (2011).
31. Rajinikanth, V. and Venkateswarlu, K., "An investigation of sliding wear behaviour of WC-Co coating", *Tribology International*, 44 (12): 1711–1719 (2011).
32. Sahraoui, T., Guessasma, S., Ali Jeridane, M., and Hadji, M., "HVOF sprayed WC-Co coatings: Microstructure, mechanical properties and friction moment prediction", *Materials And Design*, 31 (3): 1431–1437 (2010).
33. Basak, A. K., Celis, J. P., Vardavoulis, M., and Matteazzi, P., "Effect of nanostructuring and Al alloying on friction and wear behaviour of thermal sprayed WC-Co coatings", *Surface And Coatings Technology*, 206 (16): 3508–3516 (2012).
34. Mateen, A., Saha, G. C., Khan, T. I., and Khalid, F. A., "Tribological behaviour of HVOF sprayed near-nanostructured and microstructured WC-17wt.%Co coatings", *Surface And Coatings Technology*, 206 (6): 1077–1084 (2011).

35. Hsieh, J. H., Tan, A. L. K., and Zeng, X. T., "Oxidation and wear behaviors of Ti-based thin films", *Surface And Coatings Technology*, 201: 4094–4098 (2006).
36. Ma, G., Wang, L., Gao, H., Zhang, J., and Reddyhoff, T., "The friction coefficient evolution of a TiN coated contact during sliding wear", *Applied Surface Science*, 345: 109–115 (2015).
37. Shipway, P. H. and Howell, L., "Microscale abrasion - corrosion behaviour of WC-Co hardmetals and HVOF sprayed coatings", *Wear*, 258: 303–312 (2005).
38. Wang, Q., Chen, Z. H., and Ding, Z. X., "Performance of abrasive wear of WC-12Co coatings sprayed by HVOF", *Tribology International*, 42 (7): 1046–1051 (2009).
39. Mahmoud, E. R. I. and El-Labban, H. F., "Microstructure and wear behavior of TiC coating deposited on spheroidized graphite cast iron using laser surfacing", *Technology & Applied Science Research*, 4 (5): 696–701 (2014).
40. Wang, J., Meng, H., Yu, H., Fan, Z., and Sun, D., "Wear characteristics of spheroidal graphite roll WC-8Co coating produced by electro-spark deposition", *Rare Metals*, 29 (2): 174–179 (2010).
41. Bas, H. and Karabacak, Y. E., "Investigation of the effects of boron additives on the performance of engine oil", *Tribology Transactions*, 57 (4): 740–748 (2014).
42. Deshmukh, P., Lovell, M., Sawyer, W. G., and Mobley, A., "On the friction and wear performance of boric acid lubricant combinations in extended duration operations", *Wear*, 260 (11–12): 1295–1304 (2006).
43. Duzcukoglu, H. and Acaroglu, M., "Lubrication properties of vegetable oils combined with boric acid and determination of their effects on wear", *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization And Environmental Effects*, 32 (3): 275–285 (2010).
44. Kilickap, E., Huseyinoglu, M., and Ozel, C., "Empirical study regarding the effects of minimum quantity lubricant utilization on performance characteristics in the drilling of Al 7075", *Journal Of The Brazilian Society Of Mechanical Sciences And Engineering*, 33 (1): 52–57 (2010).
45. Serin, F., "Sıvılaştırılmış Bor Katkılı Yağların Aşınma Karakteristiklerinin Belirlenmesi", *Selçuk Üniversitesi*, (2015).
46. Uzun, I., Buyuksagis, I. S., and Aslantas, K., "Investigation of the effect on disc performance of coolant containing boron oil in marble sawing process", *Journal Of The Faculty Of Engineering And Architecture Of Gazi University*, 24 (3): 435–441 (2009).
47. Gupta N.K., "Steel Rolling: Principle, Process & Application", *Manakin Press*, New Delhi, 93-103 (2015).

48. Türküz, M. C. (2006). Fiziksel buhar biriktirme yöntemi ile yapılan zirkonyum nitrür ince film kaplamanın kaplama parametrelerinin incelenmesi ve optimizasyonu. (Yayımlanmış Doktora Tezi), **İstanbul Teknik Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 290 s.
49. Alsarar, A. ve Çelik, A., Karakan M. ve Yetim F. (2002). Yüzey mühendisliğinde yeni bir yaklaşım; dubleks yüzey işlemi. **Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi**, 9 (1), 1-7.
50. Şafak, H. E. (2008). Yüzeyi PVD yöntemiyle kaplanmış metallerde tribolojik özelliklerin belirlenmesi. (Yayımlanmış yüksek lisans tezi), **Ege Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü**, İzmir, 135 s.
51. Mattox, D. M., "Physical vapor deposition (PVD) processes", **Metal Finishing**, 99, 409-423 (2001).
52. Kaya, A. U. (1998). PVD kaplama tekniğiyle hazırlanan TiN ince filmlerin temel karakteristiklerinin incelenmesi. (Yayımlanmış yüksek lisans tezi), **Kocaeli Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kocaeli, 70s.
53. El-Eskandarany, M. S., "Mechanical Alloying 2nd ed.", **William Andrew**, New York, 306-321 (2015).
54. Tucker, Jr., R.C., **ASM Handbook Volume 5**. Surface Engineering, Eds.; Cotell, C.M., Sprague, J.A. ve Smidt, F.A., Ohio, United States of America, 497-509, (1994).
55. Budinski, K.G., "Surface Engineering for Wear Resistance", **Prentice Hall**, New Jersey (1988).
56. Majumdar, J. D. and Manna, I., "Laser surface engineering of titanium and its alloys for improved wear, corrosion and high-temperature oxidation resistance", **Laser Surface Engineering**, **Woodhead Publishing**, Cambridge, 483-521 (2015).
57. R. Demirsöz, "Granül Cüruf Taşımada Kullanılan Boruların İç Yüzeyinin Aşınma Özelliklerinin İyileştirilmesi", **Karabük Üniversitesi**, 2018.
58. M. Haoliang Tian, Changliang Wang, "Phase composition and formation mechanisms of a high-velocity electric arc-sprayed FeNiCrAl coating", **J. Alloys Compd.**, c. 769, ss. 998–1006, 2018.
59. Wei, M. X., Wang, S. Q., and Cui, X. H., "Comparative research on wear characteristics of spheroidal graphite cast iron and carbon steel", **Wear**, 274–275: 84–93 (2012).
60. Kaleicheva, J., Mishev, V., Karaguiozova, Z., Nikolcheva, G., and Miteva, A., "Effect of nanoadditives on the wear behavior of spheroidal graphite cast irons", **Tribology In Industry**, 39 (3): 294–301 (2017).

61. Gençer, M., "Farklı Bileşimlerdeki Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Mikroyapı ve İşlenmiş Yüzey Kalitelerinin İncelenmesi", *Gazi Üniversitesi*, (2012).
62. Hirasata, K., Hayashi, K., and Matsunami, H., "Friction and wear of spheroidal graphite cast iron under severe sliding conditions", *Tribological Research And Design For Engineering Systems*, (1): 643–652 (2003).
63. Korkut, I., Yavuz, K., and Turgut, Y., "An experimental investigation into the machinability of GGG-70 grade spheroidal graphite cast iron", *Indian Journal Of Engineering And Materials Sciences*, 16 (2): 116–122 (2009).
64. Çetin, M. and Gül, F., "Kuru Kayma Şartlarında Matris Yapısının Küresel Grafitli Dökme Demirin Sürtünme Katsayısına ve Pim Sıcaklığına Etkisi", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22 (3): 273–280 (2007).
65. Çelik, B., "Küresel Grafitli GGG70 Dökme Demirin Minimum Miktarda Yağlama Tekniği Kullanılarak Frezelenmesinde İşlenebilirliğinin Deneysel Olarak İncelenmesi", *Kütahya Dumlupınar Üniversitesi*, (2018).
66. Prasad, B. K., "Sliding wear response of spheroidal graphite cast iron as influenced by applied pressure, sliding speed and test environment", *Canadian Metallurgical Quarterly*, 47 (4): 495–508 (2008).
67. Wilson, S. and Alpas, A. T., "Tribo-layer formation during sliding wear of TiN coatings", *Wear*, 245 (1–2): 223–229 (2000).
68. Shipway, P. H., McCartney, D. G., and Sudaprasert, T., "Sliding wear behaviour of conventional and nanostructured HVOF sprayed WC-Co coatings", *Wear*, 259 (7–12): 820–827 (2005).
69. İnternet: Denizli Döküm Makine Sanayi, "Merdane", <http://denzlidokum.com/merdane> (2020).
70. Tsujikawa, M., Matsumoto, N., Nakamoto, K., and Michiura, Y., "Pearlite stabilisation by copper on ductile cast iron", *Key Engineering Materials*, 457: 151–156 (2011).
71. Gonzaga, R. A., "Influence of ferrite and pearlite content on mechanical properties of ductile cast irons", *Materials Science And Engineering A*, 567: 1–8 (2013).
72. Fernandino, D. O. and Boeri, R., "Fracture of pearlitic ductile cast iron under different loading conditions", *Fatigue And Fracture Of Engineering Materials And Structures*, 38 (1): 80–90 (2015).
73. Iacoviello, F., Di Cocco, V., Rossi, A., and Cavallini, M., "Fatigue crack tip damaging micromechanisms in pearlitic ductile cast irons", *Fatigue And Fracture Of Engineering Materials And Structures*, 38 (2): 238–245 (2015).

74. Cuhadaroglu, A. D. and Kara, E., "Graphite: A Review", *SDU Journal Of Technical Sciences*, 8 (1): 15–33 (2018).
75. Azman, N. F., Syahrullail, S., and Rahim, E. A., "Preparation and dispersion stability of graphite nanoparticles in palm oil", *Jurnal Tribologi*, 19 (July): 132–141 (2018).
76. Wang, B., Wang, X., Lou, W., and Hao, J., "Thermal conductivity and rheological properties of graphite/oil nanofluids", *Colloids And Surfaces A: Physicochemical And Engineering Aspects*, 414: 125–131 (2012).
77. Podgornik, B., Kosec, T., Kocijan, A., and Donik, C., "Tribological behaviour and lubrication performance of hexagonal boron nitride (h-BN) as a replacement for graphite in aluminium forming", *Tribology International*, 81: 267–275 (2015).
78. Biraje, G. S., Jadhav, D. M., and Shaikh, A. M., "Study and observation of process parameters for spheroidal graphite (SG) iron casting", *International Journal Of Science Technology & Engineering*, 3 (01): 382–385 (2016).
79. Tanrıverdi, A., "Küresel Grafitli Dökme Demirin Delme İşleminde Yüzey Kalitesi, Takım Aşınması ve Daireselliğin Araştırılması", *Karabük Üniversitesi*, (2015).
80. Fragassa, C., Radovic, N., Pavlovic, A., and Minak, G., "Comparison of mechanical properties in compacted and spheroidal graphite irons", *Tribology In Industry*, 38 (1): 49–59 (2016).
81. Bilici, M. K., "Alaşımız Dökme Demirlerin Aşınma Özelliği", *Marmara Üniversitesi*, (2004).
82. De Santis, A., Di Bartolomeo, O., Iacoviello, D., and Iacoviello, F., "Quantitative shape evaluation of graphite particles in ductile iron", *Journal Of Materials Processing Technology*, 196 (1–3): 292–302 (2008).
83. Asi, O., "Failure analysis of a crankshaft made from ductile cast iron", *Engineering Failure Analysis*, 13 (8): 1260–1267 (2006).
84. Shipway, P. H., McCartney, D. G., and Sudaprasert, T., "Sliding wear behaviour of conventional and nanostructured HVOF sprayed WC-Co coatings", *Wear*, 259 (7–12): 820–827 (2005).
85. Liao, H., Normand, B., and Coddet, C., "Influence of coating microstructure on the abrasive wear resistance of WC/Co cermet coatings", *Surface And Coatings Technology*, 124 (2–3): 235–242 (2000).
86. Berger, L. M., Saaro, S., Naumann, T., Wiener, M., Weihnacht, V., Thiele, S., and Suchánek, J., "Microstructure and properties of HVOF-sprayed chromium alloyed WC-Co and WC-Ni coatings", *Surface And Coatings Technology*, 202 (18): 4417–4421 (2008).

87. Li, M. and Christofides, P. D., "Modeling and control of high-velocity oxygen-fuel (HVOF) thermal spray: A tutorial review", *Journal Of Thermal Spray Technology*, 18 (5–6): 753–768 (2009).
88. Maranhão, O., Rodrigues, D., Boccalini, M., and Sinatorá, A., "Influence of parameters of the HVOF thermal spray process on the properties of multicomponent white cast iron coatings", *Surface And Coatings Technology*, 202 (15): 3494–3500 (2008).
89. Amin, S. and Panchal, H., "A review on thermal spray coating processes", *International Journal Of Current Trends In Engineering & Research*, 2 (4): 556–563 (2016).
90. Berger, L. M., "Application of hardmetals as thermal spray coatings", *International Journal Of Refractory Metals And Hard Materials*, 49 (1): 350–364 (2015).
91. Vashishtha, N., Khatirkar, R. K., and Sapate, S. G., "Tribological behaviour of HVOF sprayed WC-12Co, WC-10Co-4Cr and Cr₃C₂-25NiCr coatings", *Tribology International*, 105 (June 2016): 55–68 (2017).
92. Sidhu, T. S., Prakash, S., and Agrawal, R. D., "Studies on the properties of high-velocity oxy-fuel thermal spray coatings for higher temperature applications", *Materials Science*, 41 (6): 805–823 (2005).
93. Wang, Q., Chen, Z. H., Ding, Z. X., and Liu, Z. L., "Performance study of abrasive wear and erosive wear of WC-12Co coatings sprayed by HVOF", *2nd IEEE International Nanoelectronics Conference (INEC)*, 340–344 (2008).
94. Ibrahim, A. and Berndt, C. C., "Fatigue and deformation of HVOF sprayed WC-Co coatings and hard chrome plating", *Materials Science And Engineering A*, 456 (1–2): 114–119 (2007).
95. Siow, P. C., A. Ghani, J., Ghazali, M. J., Jaafar, T. R., Selamat, M. A., and Che Haron, C. H., "Characterization of TiCN and TiCN/ZrN coatings for cutting tool application", *Ceramics International*, 39 (2): 1293–1298 (2013).
96. Bull, S. J., Bhat, D. G., and Staia, M. H., "Properties and performance of commercial TiCN coatings. Part 2: Tribological performance", *Surface And Coatings Technology*, 163–164: 507–514 (2003).
97. Polcar, T., Novák, R., and Široký, P., "The tribological characteristics of TiCN coating at elevated temperatures", *Wear*, 260 (1–2): 40–49 (2006).
98. Yang, Y., Yao, W., and Zhang, H., "Phase constituents and mechanical properties of laser in-situ synthesized TiCN/TiN composite coating on Ti-6Al-4V", *Surface And Coatings Technology*, 205 (2): 620–624 (2010).

99. Yang, Y. L., Zhang, D., Kou, H. S., and Liu, C. S., "Laser cladded TiCN coatings on the surface of titanium", *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 20 (3): 210–216 (2007).
100. Chung-Chen, T. and Hong, H., "Comparison of the tool life of tungsten carbides coated by multi-layer TiCN and TiAlCN for end mills using the Taguchi method", *Journal Of Materials Processing Technology*, 123 (1): 1–4 (2002).
101. Khadem, M., Penkov, O. V., Yang, H. K., and Kim, D. E., "Tribology of multilayer coatings for wear reduction: A review", *Friction*, 5 (3): 248–262 (2017).
102. Chuan, S. P., Ghani, J. A., Tomadi, S. H., and Hassan, C. H. C., "Analysis of Ti-base hard coating performance in machining process: A review", *Journal Of Applied Sciences*, 12 (18): 1882–1890 (2012).
103. Fukui, H., "Evolutional history of coating technologies for cemented carbide inserts - Chemical vapor deposition and physical vapor deposition", *SEI Technical Review*, (82): 39–45 (2016).
104. Baptista, A., Silva, F., Porteiro, J., Míguez, J., and Pinto, G., "Sputtering physical vapour deposition (PVD) coatings: A critical review on process improvement and market trend demands", *Coatings*, 8 (11): 2–22 (2018).
105. Zhu, B., Mardel, J., and Kelly, G. L., "An investigation of tribological properties of CN and TiCN coatings", *Journal Of Materials Engineering And Performance*, 13 (4): 481–487 (2004).
106. Liu, A., Deng, J., Cui, H., Chen, Y., and Zhao, J., "Friction and wear properties of TiN, TiAlN, AlTiN and CrAlN PVD nitride coatings", *International Journal Of Refractory Metals And Hard Materials*, 31: 82–88 (2012).
107. Celik, E., Culha, O., Uyulgan, B., Azem, N. F. A., Ozdemir, I., and Turk, A., "Assessment of microstructural and mechanical properties of HVOF sprayed WC-based cermet coatings for a roller cylinder", *Surface And Coatings Technology*, 200: 4320–4328 (2006).
108. Korkmaz, Ş., "Nanogümüş Katkılı Kolloidal Süspansiyonların Tribolojik Performanslarının Araştırılması", *Karabük Üniversitesi*, (2019).
109. Chen, R., Tu, J. P., Liu, D. G., Mai, Y. J., and Gu, C. D., "Microstructure, mechanical and tribological properties of TiCN nanocomposite films deposited by DC magnetron sputtering", *Surface And Coatings Technology*, 205 (21–22): 5228–5234 (2011).
110. Çavlan, S., "TiCN Kaplamaların Adezyon ve Tribolojik Özelliklerine Ta'nın Etkisinin Araştırılması", *Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi*, (2020).

111. Amrita, M., Srikant, R. R., and Sitaramaraju, A. V., "Performance evaluation of nanographite-based cutting fluid in machining process", *Materials And Manufacturing Processes*, 29 (5): 600–605 (2014).
112. Choudhary, R. B. and Pande, P. P., "Lubrication potential of boron compounds: An overview", *Lubrication Science*, 14 (2): 211–222 (2002).
113. Stachowiak, G. and Batchelor, A. W., "*Engineering Tribology*", (2001).



ÖZGEÇMİŞ

Mert PEHLİVANOĞLU 1992 yılında Kırklareli iline bağlı Lüleburgaz'da doğdu; ilk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladı. Lüleburgaz Anadolu Lisesi Fen-Matematik bölümünden mezun oldu. 2011 yılında Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliğinde Bölümü'nde öğrenime başlayıp 2016 yılında iyi derece ile mezun oldu. 2016 yılında Baylan Grubu'na bağlı Işık Çelik San. Ve Tic. A.Ş.'de İşletme Mühendisi olarak göreve başladı ve şu an aynı yerde Üretim Müdürü olarak çalışmaya devam etmektedir.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : 5000 Evler Cumhuriyet Mah. 48.Sk.
Reyhan Konakları A Blok No:11 Daire:14
Merkez / KARABÜK

Tel : (535) 655 0406

E-posta : mert.pehlivanoglu@outlook.com