

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ELEKTROKİMYASAL BORLAMA İŞLEMİ İLE AISI 316L PASLANMAZ ÇELİK
KAPLAMALARIN YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BÜLENT ERMIŞ

TEZ DANIŞMANI

PROF. DR. HARUN MİNDİVAN

BİLECİK, 2023

10575756

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ELEKTROKİMYASAL BORLAMA İŞLEMİ İLE AISI 316L PASLANMAZ ÇELİK
KAPLAMALARIN YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BÜLENT ERMİŞ

TEZ DANIŞMANI

PROF. DR. HARUN MİNDİVAN

BİLECİK, 2023

10575756

BEYAN

Elektrokimyasal Borlama İşlemi ile AISI 316L Paslanmaz Çelik Kaplamaların YüzeY Özelliklerinin İyileştirilmesi adlı yüksek lisans tezi hazırlık ve yazımı sırasında bilimsel ahlak kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

Bu çalışmanın, Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP), TÜBİTAK veya benzeri kuruluşlarca desteklenmesi durumunda; projenin ve destekleyen kurumun adı proje numarası ile birlikte, ETİK KURUL onayı alınması durumunda ise ETİK KURUL tarih karar ve sayı bilgilerinin beyan edilmesi gerekmektedir.			
DESTEK ALINMIŞTIR		DESTEK ALINMAMIŞTIR	×
Destek alındı ise;			
Destekleyen kurum;			
Desteğın Türü		Proje Numarası	
1- BAP (Bilimsel Araştırma Projesi)			
2- TÜBİTAK			
Diğer;.....			
ETİK KURUL onayı var ise;			
ETİK KURUL karar tarih/sayı:	/.....	

Bülent ERMİŞ

... / ... / 2023

İmza

ÖN SÖZ

Yüksek lisans eğitimimi tamamlamak için her aşamada bana destek olan, bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren değerli danışman hocam Prof. Dr. Harun MİNDİVAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunmak istiyorum.

Deneyisel çalışmalarım süresince yardımlarını esirgemeyen engin bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan Sayın Doç. Dr. Ferda MİNDİVAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak bugünlere gelmemde büyük emek ve fedakârlık göstermiş olan, beni her konuda ve her daim destekleyen anneme, babama ve hayatının ilk dört yılında birlikte geçirmemiz gereken zamanlarımızdan mahrum bırakmak zorunda kaldığım canım kızım ECE'ye teşekkür ederim.

Bülent ERMIŞ

2023

ÖZET

ELEKTROKİMYASAL BORLAMA İŞLEMİ İLE AISI 316L PASLANMAZ ÇELİK KAPLAMALARIN YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

Yüksek hızlı oksijen-yakıt (HVOF) tekniği ile elde edilen ostenitik paslanmaz çelik kaplamalar, kimyasal tesisler, mekanik makineler ve makine parçaları gibi çeşitli ortamlarda normal çeliği korozyondan koruma yöntemi olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. AISI 316L ostenitik paslanmaz çelik kaplamalarının sertliği, AISI 316L çelik levhalarının sertliğinden biraz daha yüksektir. HVOF 316L kaplama yaklaşık olarak 289 ± 36 HV_{0,1} sertliğe sahiptir, ancak AISI 316L çelik levhalar yaklaşık 240 ± 5 HV_{0,1} sertliğindedir. Bununla birlikte, HVOF 316L kaplamalar, yaklaşık 600 HV'nin üzerinde sertlik değerlerine sahip olan püskürtülmüş seramik veya sermet kaplamalar kadar yüksek sertliğe sahip değildir. Aşırı sürtünme koşullarında HVOF 316L kaplamalar aşınmaya karşı etkili değildir. Makine ve kalıp parçalarının yüzeyine onarıcı kaplamalar olarak krom kaplama ve seramik kaplamalara alternatif olarak, daha dayanıklı termal püskürtülmüş 316L kaplamalarının geliştirilmesi, uygulama alanlarını önemli ölçüde genişletecektir.

Bu çalışmanın amacı, HVOF 316L kaplamalarının yüzey özelliklerini iyileştirmek için termal difüzyon esaslı borlama yöntemini uygulayarak kalın tek fazlı Fe₂B tabakası ve iç kısımda Fe₂B ve dış kısımda FeB olmak üzere çift fazlı borür yapılarının oluşturulması ve ardından örneklerin kuru kaymalı aşınma ve tribokorozyon davranışlarının incelenmesidir. İşlem görmemiş ve borlanmış HVOF 316L kaplamaların yapısal karakterizasyonu, optik mikroskop ve yüzey sertliği ölçümleri kullanılarak gerçekleştirildi. Kuru kayma aşınma ve tribokorozyon deneylerine tabi tutulan kaplamaların aşınma yüzeyleri, aşınma mekanizmalarının belirlenmesi amacıyla optik mikroskop altında incelendi. Ayrıca, 2 boyutlu bir profilometre kullanılarak aşınma kaybı ölçüldü. Mikroyapı ve yüzey sertliği analizi sonuçlarına dayanarak, 15 dk elektrokimyasal borlama (EB) ve 45 dk bekleme koşulu sonucunda yüzey sertliği 1419 ± 378 HV_{0,1} olan ~ 14 µm'lık tek tabakalı Fe₂B kalınlığı üretilmiş ve $0,23$ µm/dk.'lık bir büyüme oranı elde edilmiştir. Ancak, 950 °C'de 30 dk ve 60 dk EB ve 45 dk bekletme süresi ile yüzeyde sırasıyla yaklaşık 23 µm ve 30 µm kalınlığında 1839 ± 436 HV_{0,1} ve 2085 ± 356 HV_{0,1} yüzey sertliğine sahip iki katmanlı (FeB+Fe₂B) bir borürlü yapı oluşturulmuştur. Kuru ortam aşınma koşullarında HVOF püskürtülmüş 316L paslanmaz çelik kaplamanın yapısında bulunan ergimiş partikül ile sert oksit tabakaların üst üste istiflenmesi ve poroziteden dolayı daha yüksek aşınma hızı ($96,12\times 10^{-5}$ mm³/Nm) ve daha yüksek sürtünme katsayısı değerleri ($\sim 1,0-1,5$) belirlenmiştir. HVOF 316L paslanmaz çeliğe uygulanan elektrokimyasal borlama işlemi

sayesinde EB süresine bağlı olarak kuru ortam aşınma hızları 75-200 kat arasında azalmaktadır. Açık devre şartlarında (OCP) gerçekleştirilen tribokorozyon deneylerinde elektrokimyasal borlanmış kaplamaların yüzey temas açısı arttıkça sürtünme katsayısı ve aşınma hızı artmaktadır.

Anahtar Kelimeler: AISI 316L, HVOF Kaplama, Paslanmaz Çelik, Elektrokimyasal Borlama, Triboloji, Tribokorozyon.

ABSTRACT

IMPROVEMENT OF SURFACE PROPERTIES OF AISI 316L STAINLESS STEEL COATINGS WITH ELECTROCHEMICAL BORONIZING PROCESS

Austenitic stainless-steel coatings applied using the high-velocity oxy-fuel (HVOF) technique are extensively utilized as a means of safeguarding ordinary steel from corrosion in various settings, including chemical plants, mechanical machinery, and equipment components. The hardness of AISI 316L austenitic stainless-steel coatings is slightly greater than that of AISI 316L steel plates, as indicated by the Vickers hardness values. The HVOF 316L coating exhibits a hardness of approximately 289 ± 36 HV_{0.1}, while the steel plates demonstrate a hardness of approximately 200 HV. Nevertheless, it should be noted that 316L coatings do not possess the same level of hardness as sprayed ceramic or cermet coatings, as the latter exhibit hardness values over 600 HV. Under severe friction conditions, HVOF 316L coatings are ineffective as a wear-resistant coating. As an alternative to chromium plating and ceramic coating, as repair coatings for machine parts and mold tools, etc., the development of more durable sprayed 316L coatings would significantly expand their range of applications.

The purpose of this study is to improve the surface properties of HVOF 316L coatings by applying thermal diffusion-based boriding by forming a thick single-phase Fe₂B layer and dual-phase boride structures composed of Fe₂B (inner) and FeB (outer) on HVOF 316L coatings, and then to examine the dry sliding wear and tribocorrosion behaviors of samples. Structural characterization of borided and unborided HVOF 316L coatings was conducted using an optical microscope and surface hardness measurements. Wear tracks of samples subjected to dry sliding wear and tribocorrosion tests were examined under an optical microscope in order to determine their wear mechanism. A 2-D profilometer was also used to measure the wear loss. On the basis of the microstructure and surface hardness analysis results, it has been determined that a single-layered (Fe₂B) borided structure with a thickness of approximately 14 μm and a surface hardness of 1419 ± 378 HV_{0.1} is formed on the surface of HVOF 316L coating during 15 min of electrochemical boriding (EB) at 950 °C with 45 min of soaking time. At EB in 30 min and 60 min at 950 °C with 45 min of soaking time, however, a two-layered (FeB+Fe₂B) borided structure with approximate thicknesses of 23 μm and 30 μm and surface hardness of 1839 ± 436 HV_{0.1} and 2085 ± 356 HV_{0.1} is formed on the surface of the HVOF 316L coating, respectively. Under dry wear conditions, the structure of the HVOF 316L stainless steel coating consists of stacked molten particles and hard oxide layers along with porosity, leading to a higher wear rate (96.12×10^{-5} mm³/Nm) and higher friction coefficient values (~1.0-1.5). As a result of the

electrochemical boriding process applied to the HVOF 316L coating, dry wear rates decrease between 75 and 200 times, depending on the EB duration. In tribocorrosion experiments conducted under open-circuit conditions (OCP), the friction coefficient and wear rate of electrochemically borided coatings increase as the surface contact angle rises.

Keywords: AISI 316L, HVOF Coating, Stainless Steel, Electrochemical Boriding, Tribology, Tribocorrosion

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖN SÖZ.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT.....	iv
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar LİSTESİ.....	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	ix
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. TERMAL PÜSKÜRTME YÖNTEMLERİ.....	5
2.1. Alevle Püskürtme.....	5
2.1.1. Alevle Tel Püskürtme.....	6
2.1.2. Alevle Toz Püskürtme.....	7
2.2. Detonasyon Püskürtme (D-Gun).....	7
2.3. Elektrik Ark Püskürtme.....	8
2.4. Plazma Püskürtme.....	9
2.5. Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt (HVOF) Püskürtme.....	10
3. PASLANMAZ ÇELİK KAPLAMALAR VE PASLANMAZ ÇELİK KAPLAMALARA UYGULANAN YÜZEY İŞLEMLERİ.....	12
4. BORLAMA.....	17
4.1. Çeliklerin Borlanması.....	19
4.1.1. Paslanmaz Çeliklerin Borlanması.....	20
5. KAYNAK ÖZETLERİ.....	22
6. MATERYAL VE METOT.....	30
6.1. Deney Düzeneği ve Numune Hazırlanması.....	30

6.2. Kaplama Tabakasının Karakterizasyonu	31
6.2.1. Optik Metal Mikroskop (OM) Çalışmaları	31
6.2.2. Temas Açısı Ölçümleri.....	31
6.2.3. Mikrosertlik Ölçümleri.....	32
6.2.4. Aşınma Deneyleri	32
6.2.5. Tribokorozyon Deneyleri	33
7. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	35
7.1. Yapısal Karakterizasyon Sonuçları	35
7.2. Sertlik Ölçüm Sonuçları.....	37
7.3. Kuru Ortam Aşınma Sonuçları.....	37
7.4. Tribokorozyon Deney Sonuçları	41
8. SONUÇLAR.....	48
KAYNAKÇA	49

TABLULAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 6.1. Uygulanan Kaplama İşlemleri.....	31
Tablo 6.2. Kuru Ortam Aşınma Deney Şartları.....	33

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Termal Püskürtme Şematik Gösterimi.....	5
Şekil 2.2. Alevle Tel Püskürtme Prosesi.....	6
Şekil 2.3. Alevle Toz Püskürtme Prosesi.....	7
Şekil 2.4. Detenasyon Püskürtme Prosesi.....	8
Şekil 2.5. Elektrik Ark Püskürtme Prosesi.....	9
Şekil 2.6. Plazma Püskürtme Prosesi.....	10
Şekil 2.7. Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt (HVOF) Püskürtme Prosesi.....	11
Şekil 4.1. (a)-(e) Demir Borürlerin Kristal Kafeslerinin Şematik Görünümleri.....	18
Şekil 6.1. Elektrokimyasal Borlama Deney Düzeneği.....	30
Şekil 6.2. Optik Temas Açısı Ölçüm Cihazı.....	32
Şekil 6.3. Tribokorozyon Deney Düzeneğinin Şematik Gösterimi.....	33
Şekil 7.1. HVOF Püskürtülmüş AISI 316L Paslanmaz Çelik Kaplamanın Kesitinden Alınan (a) Düşük ve (b) Yüksek Büyütme OM Görüntüleri.....	35
Şekil 7.2. (a) 15 dk, (b) 30 dk ve (c) 60 dk EB Ardından 45 dk Bekleme Sonunda Elde Edilen Kaplamaların Düşük ve Yüksek Büyütmeli OM Kesit Görüntüleri.....	36
Şekil 7.3. Kaplamalara Ait Yüzey Sertlik Ölçümleri.....	37
Şekil 7.4. Kuru Ortam Aşınma Deneylerinde İncelenen Kaplamaların ve Karşı Malzeme Olarak Kullanılan Al ₂ O ₃ Bilyelerin Aşınma Yüzey Görüntüleri, Aşınma Profilleri, Aşınma Hızı ve Sürtünme Katsayısı Gafikleri.....	39
Şekil 7.5. Kuru Ortam Aşınma Deneylerinde İncelenen Kaplamaların Aşınma Yüzeylerinin Düşük ve Yüksek Büyütme Görüntüleri.....	40
Şekil 7.6. İşlem görmemiş ve elektrokimyasal borlanmış HVOF 316L paslanmaz çelik kaplamaların aşınma esnasındaki (a) açık devre potansiyeli ve (b) sürtünme katsayısı eğrileri.....	42
Şekil 7.7. İncelenen Kaplamaların ve Karşı Malzeme Olarak Kullanılan Al ₂ O ₃ Bilyelerin Aşınma Yüzey Görüntüleri, Aşınma Profilleri, Aşınma Hızı ve Temas Açısı Görüntüleri.....	44

Şekil 7.8. Temas Açısı ile (a) Sürtünme Katsayısı ve (b) Aşınma Hızı Arasındaki İlişki.....	45
Şekil 7.9. Tribokorozyon Deneyinden Sonra İncelenen Kaplamaların Aşınma Yüzeylerinin Düşük ve Yüksek Büyütme Görüntüleri.....	47

KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

°C : Celsius (Santigrat Derece)

K : Kelvin

µm : Mikrometre

cm² : Santimetre kare

cm³ : Santimetre küp

mm : Mili metre

gr : Gram

kg : Kilo gram

dk : Dakika

sn : Saniye

GPa : Gigapaskal

OM : Optik Mikroskop

HV : Vickers Sertliği

A : Amper

V : Volt

N : Newton

AISI : American Iron and Steel Institute

HVOF : Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt Püskürtme

D-Gun : Detonasyon Püskürtme

EB: Elektrokimyasal Borlama

CRTD-bor : Katodik İndirgeme ve Termal Difüzyon Esaslı Borlama

PVD : Fiziksel Buhar Biriktirme

CVD : Kimyasal Buhar Biriktirme

1. GİRİŞ

Nitelikli malzemelerin (paslanmaz çelik ve süper alaşımlar) yüzeye uygulanması, kaplama teknolojileri ile mümkündür. Lazer kaplama ve termal püskürtme, genellikle kaplama üretimi için tercih edilir (Abdul vd., 2021: 2949; Fauchais & Vardelle, 2012: 3; Kumar ve Kumar, 2021: 1339; Lindner vd., 2020: 1; Löbel vd., 2021: 1). Özellikle, termal püskürtme işlemleriyle besleme malzemesinin özellikleri korunabilir (Lindner vd., 2020: 1). Düşük ısı girişi ile, altlık olarak kullanılacak taban malzeme ile metalurjik bir bağlanma neredeyse engellenir. Bu nedenle, birkaç mikrondan birkaç milimetreye kadar olan kalınlık aralığında fonksiyonel kaplamaların oluşturulması mümkündür. Termal püskürtme işlemlerinin geniş çeşitliliği, farklı kalitede uygulama odaklı özelleştirilmiş çözümlerin sağlanmasını mümkün kılar. Besleme malzemesi, kaplama özelliklerini etkileyen bir faktör olup büyük öneme sahiptir. Yüksek saflık derecesine sahip inert-gaz-atomize olmuş tozların yanı sıra heterojen bir bileşime sahip özlü teller de besleme malzemesi olarak kullanılabilir. Ancak, besleme malzemesi olarak kullanılan özlü bir telin (316L) tel ark püskürtmesi sırasında homojenleştirilmesi mümkün değildir. Ayrıca, özlü telin elektrik ark ocakta daha uzun erime aralıklarında işlem görmesi, bileşenlerin yetersiz karışmasına neden olmaktadır. Yüksek kaliteli kaplama sistemleri için inert-gaz-atomize tozlar önerilmektedir. Termal püskürtme sırasındaki çalışma koşulları, kaplama kalitesinde belirleyici bir faktördür. Proses kinetiği nedeniyle, alev püskürtme ve atmosfer plazma püskürtme kaplamalar nispeten yüksek bir gözeneklilik sergiler. Kaplama malzemesinin ortamla reaksiyonları sonucunda oksit lamelleri oluşur, bu da aşınma direncini artırabilir (Joshi, 2020: 1; Mindivan vd., 2017: 128). Genel olarak, korozyon direnci çözülmüş alaşım bileşenlerinin azalmasıyla etkilenir. Yüksek hızlı oksijen-yakıt (HVOF) termal püskürtme, düşük kontaminasyonlu yoğun yapıları elde etmek için daha uygundur (Kumar ve Kumar, 2021: 1348; Padmavathi vd., 2019: 2152; Shrestha ve Sturgeon, 2004: 237; Vigneshkumar vd., 2022: 020004-1).

Termokimyasal işlemlerle yüzey sertleştirme, aşınma direncini artırmak için uygun bir yöntemdir. Ancak, mevcut araştırmalara göre genellikle büyük hacimli malzemelerde uygulaması sınırlıdır. Sert fazların oluşumuyla aşınma direnci önemli ölçüde artırılabilir. Karbürleme ve nitrürlemeye kıyasla, paslanmaz çeliklerin borlanması, belirgin bir şekilde daha yüksek sertlikte homojen yüzey tabakaları oluşturabilir (Arteaga-Hernandez vd., 2021: 8; Shi vd., 2022: 1). Ayrıca, borür fazları en yüksek termal dirence sahiptir. Kaplama teknikleri arasında kimyasal buhar biriktirme (CVD), fiziksel buhar biriktirme (PVD) ve plazma destekli kimyasal buhar biriktirme (PACVD) yer almaktadır (Al-Asadi ve Al-Tameemi, 2022: 1).

Bununla birlikte uzun kaplama süreleri (genellikle 12 saat) ve yukarıda bahsedilen tekniklerin maliyetinden dolayı, özellikle abrasif veya erozif aşınmaya karşı direnç istenen uygulamalar için nispeten kalın (yani 10 ila 15 μm) ve sert bir kaplama elde etmek nispeten mümkün değildir.

Bu işlemler arasında borlama kalın, yoğun ve homojen bir tabakayla daha yüksek sertlik elde etme potansiyeli sunar (García-Léon vd., 2020: 35). Borlama ile elde edilen kaplamalar aşınmaya, korozyona ve oksidasyona karşı dayanıklıdır (Arteaga-Hernandez vd., 2021: 8; Kheyrodin vd., 2017: 105; Shi vd., 2022: 9). Borür tabaka, difüzyon esaslı bir dönüşüm süreciyle oluşturulduğu için PVD veya CVD ile üretilen bir ek kaplama gibi değildir, bu nedenle tabakanın altlığa yapışması çok güçlü olması ve dolayısıyla delaminasyonun önemli bir endişe kaynağı olmaması beklenir. Borlama, kutu, erimiş tuz, lazer, akışkan yatak, plazma ve elektrokimyasal işlemler de dahil olmak üzere birçok farklı şekilde gerçekleştirilebilir. Bunlar arasında kutu borlama, günümüz endüstrisinde özellikle havacılık uygulamalarında belirli demir esaslı alaşımların borlanması için çekici bulunmuş ve yaygın olarak kullanılmaktadır. Borlama, bor içeren bir ortamdan bor atomlarının numune yüzeyine yayılmasıyla gerçekleşen bir termal difüzyon sürecidir. Daha sonra, bor atomları altlık malzemeye difüze olur ve genellikle altlık olarak kullanılan metaller veya alaşımlardan daha sert ve aşınmaya daha dirençli karışık borür fazlarının oluşumuna neden olur. Demir esaslı alaşımlar ve çeliklere elektrokimyasal borlama uygulandığında çok kısa bir sürede demir borürlerinden oluşan çok kalın ve yoğun bir tabaka oluşturulduğu gözlenmiştir (Arslan vd., 2022: 3284).

Bir kaplama işlemi ve bir termokimyasal yüzey sertleştirme işleminden oluşan birleşik bir yüzey teknolojisinin uygulanması için uygun kaplama ve yüzey işleme kavramlarının seçilmesi ve geliştirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, HVOF püskürtülmüş 316L kaplamaların yüksek hızlı elektrokimyasal borlama işlemi ve özellikle kuru kayma ve korozif koşullarda aşınma gibi tribolojik özellikleri araştırılmıştır. Bildiğimiz kadarıyla, HVOF püskürtülmüş 316L kaplamaların elektrokimyasal borlama işlemi literatürde rapor edilmemiştir. Geleneksel borlama işlemlerinde çok uzun kaplama süreleri, yüksek enerji yoğunluğu, yüksek maliyet, sera gazı ve toksik gaz emisyonlarının fazla olmasından (özellikle florin) dolayı, fırın parçaları, ısı değiştiricileri, jet motoru parçaları, eklem protezi, ortopedik vidaların ve kemik plaklarının imalatında kullanılan paslanmaz çelikler için uygun olmadığı bilinmektedir (Arteaga-Hernandez vd., 2021: 1). Ayrıca, geleneksel borlama işleminde, iki fazlı yapıda termal genişleme katsayılarındaki fark ve çok yüksek kalıntı gerilmeler nedeniyle borür tabakalarının borlama işleminden sonra çatlaması ve ayrılma gibi sorunlar bulunmaktadır

(García-Léon vd., 2020: 39; Shi vd., 2022: 6). Bu çalışmada, HVOF püskürtülen 316L kaplamaların elektrokimyasal borlama işlemi ile mekanik ve tribolojik özellikleri üzerinde yoğunlaşarak, bu işlemin geleneksel borlama uygulamalarına kıyasla yüksek hızlı doğasını göstermeyi amaçladık. Borlama deneylerimizde, 200 mA/cm² akım yoğunluğunda 950 °C'de yaklaşık 15 dakikada ~25 µm kalınlığında tek fazlı borür tabakaları üretebildik. Borür tabakaları, geleneksel kutu borlama işlemiyle 316L çelik yüzeyinde 950 °C'de 6 saatte elde edilen 35 µm kalınlığındaki iki fazlı borür tabakasına kıyasla taban malzemeye mükemmel bir şekilde yapışmaktadır. Ayrıca, aşınma direnci, HVOF püskürtülmüş 316L'ye kıyasla büyük ölçüde artmıştır, bu da zorlu çalışma koşullarında uzun süreli dayanıklılığı sağlamaktadır. İşlemimizin elektrolitik yapısı nedeniyle herhangi bir gaz emisyonu meydana gelmemektedir. Oluşan tek fazlı borür tabakası çok yoğun ve sert olmaktadır. Bu nedenle, HVOF 316L kaplamalarla büyük ölçekli uygulamalar için yüksek umutlar taşımaktadır.

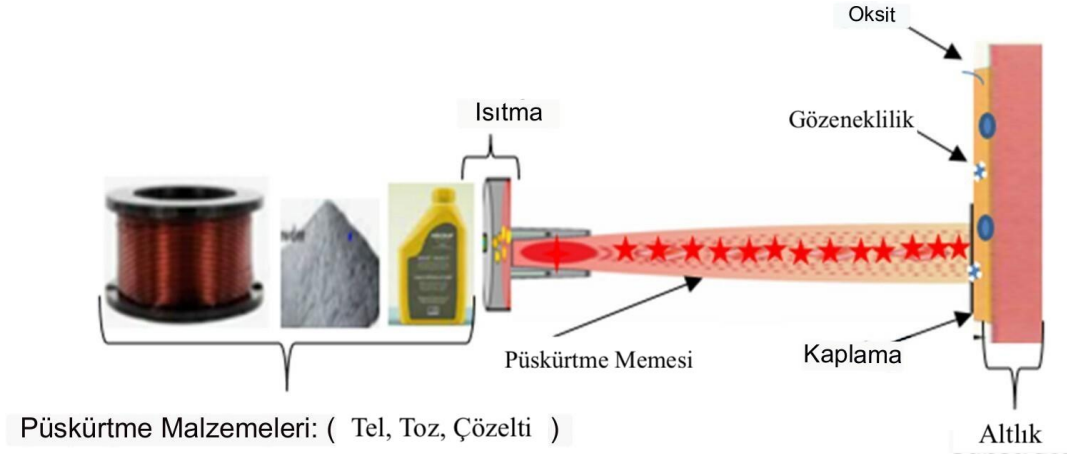
Termal püskürtme yöntemiyle elde edilen ostenitik paslanmaz çelik kaplamalar, kimyasal tesislerde ve mekanik ekipmanlarda çelik malzemelerin korozyona karşı korunması için yaygın olarak tercih edilmektedir. Püskürtülen AISI 316L ostenitik paslanmaz çelik kaplamalar, AISI 316L çelik levhalardan biraz daha serttir, çünkü püskürtülen kaplamaların sertlik değerleri yaklaşık 300 HV iken, çelik levhaların sertlik değerleri ise yaklaşık 200 HV'dir. Bununla birlikte, 316L kaplamalar, püskürtülen seramik veya sermet kaplamalara kıyasla sert bir kaplama değildir, çünkü bu tür kaplamaların sertlik değerleri 600 HV'nin üzerindedir (Adachi ve Ueda, 2013: 818).

Kütlesel ostenitik paslanmaz çeliğin yüzey sertleştirilmesi, yüzey difüzyonunu önleyen pasivasyon tabakasını olumsuz etkileyen bir aktivasyon adımı içermektedir. Sıcaklık-zaman profiline bağlı olarak, karbon veya azot zenginleşmesi için faz oluşumu farklılık göstermektedir. İşlem sıcaklığı ve süresinin artırılması, krom tükenmesine bağlı olarak korozyon direncini azaltan çökelti oluşumuna neden olabilir. Düşük sıcaklıkta termokimyasal işlem, arayer atomları matriste aşırı doymuşluğa izin verebilir. Karbon ve azot, pasivasyon tabakasının çözünmesinden sonra yüzey merkezli kübik (YMK) yapıdaki arayer boşluklara yayılabilir. Bu ısıl işlem prosesi genellikle büyük hacimli kütlesel malzemelerde kullanılır. Kaplama teknolojilerinin ve ilave yüzey sertleştirme yöntemlerinin birleşimini değerlendirerek, yeni uygulamalar için bir seçenek olabilir. Kütlesel ve yüzey özelliklerinin ayrılması, çoklu malzeme tasarımını ve yerel gereksinimlere daha iyi uyum sağlamayı mümkün kılar. Ayrıca, tamir çözümleri de mümkündür. Özellikle, termal püskürtme, ısı girişinin sınırlanmasıyla metastabil S-faz tabakasının bozulmasını önleme olanağı sunar.

Literatürde, termal püskürtme yöntemiyle ostenitik paslanmaz çelik kaplamaların oluşturulması ve termokimyasal işlemin kombinasyonunun temel olarak uygulanabilirliği ile ilgili çalışmalar bulunmaktadır (Adachi ve Ueda, 2012: 11, 2013: 818, 2014: 44; Kutschmann vd., 2019: 1; Lindner vd., 2018: 1; Mindivan ve Mindivan, 2016: 514). Bununla birlikte, termal püskürtülen kaplamalar için tasarlanmış aktivasyon adımıyla birlikte kullanılan özel işlem yönteminin, büyük hacimli kütleli malzeme için tasarlanan termokimyasal işlem için gerekliliği henüz kanıtlanmamıştır. Ostenitik yapıdaki besleme malzemesinin işlenmesi sırasında meydana gelen reaksiyonlar ve termal püskürtülmüş kaplamaların mikroyapısı, termokimyasal işlem için parametre ayarlarının yararlılığı konusunda şüpheler doğurmaktadır.

2. TERMAL PÜSKÜRTME YÖNTEMLERİ

Termal sprej kaplamalar, yüzeylere işlevsellik ekleyerek parçaların performansını artıran bir kaplama işlemidir. Son on yılda, termal sprej kaplama teknolojisi aşınmaya, erozyona, korozyona ve kavitasyona karşı direnç sağlamak ayrıca parçaların onarımı ve boyutsal doğruluğunu korumak için tercih edilmektedir. Ancak, istenen kaplama uygulamaları için yüksek mekanik ve morfolojik özelliklere sahip güvenilir bir kaplama elde etmek için kaplama parametreleri dikkate alınmalıdır. Termal püskürtme prosesleri sırasında, çubuk, toz veya tel şeklindeki başlangıç malzemeler, erime sıcaklıklarına yakın veya daha yüksek bir sıcaklığa kadar ısıtılacağı bir ısı kaynağına (elektrik ark/plazma) doğru gönderilir. Ardından, ergimiş/yarı erimiş formdaki malzeme bir gaz akışı ile hızlandırılır ve sprej akımı, Şekil 2.1’de gösterildiği gibi kaplanacak taban malzemenin yüzeyine doğru yönlendirilir (Kumar ve Kumar, 2021: 1340).



Şekil 2.1. Termal Püskürtme Şematik Gösterimi.

Kaynak: (Kumar & Kumar, 2021: 1340).

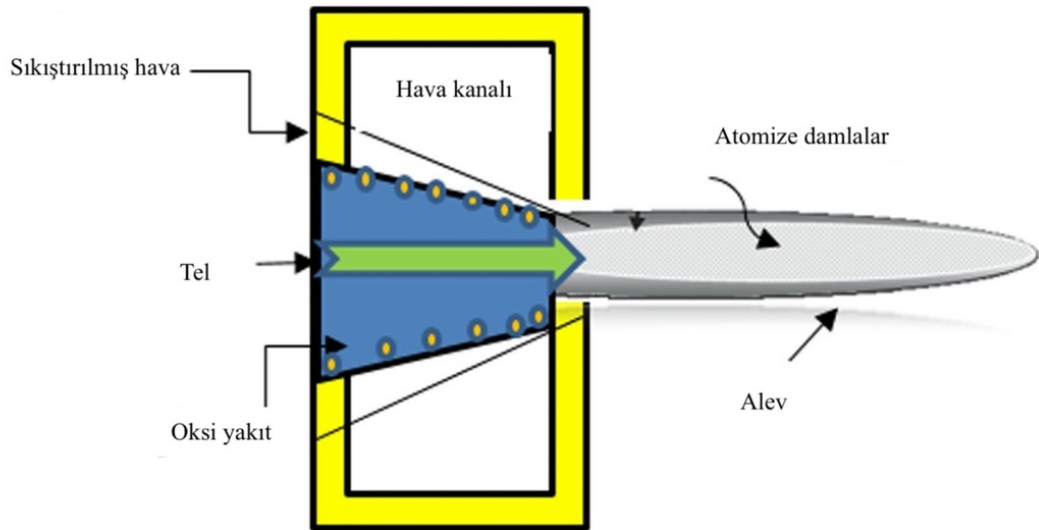
2.1. Alevle Püskürtme

Alevle püskürtme, mühendislik parçalarının performansını artırmak için birçok endüstriyel uygulamada kullanılan bir termal püskürtme yöntemidir. Bu yöntem Guenther ve Schoop tarafından 1917 yılında icat edilmiş olup, ilk püskürtme tekniği olarak kabul edilir. Bu teknik maliyet bakımından uygun kabul edilir ve yapıları korozyondan korunurken, başlangıç malzemeleri çubuk, tel veya toz şeklinde eritmek için oksijen-yanıcı gaz kullanır. Yüksek darbe direnci ve aşınma direncine sahip kaplamalar oluşturulabilmek mümkündür. Alevle püskürtmede kaplama malzemesinin ergimesi için yüksek alev sıcaklığı gerekmektedir ve oksijen-yanıcı (hidrojen, asetilen, propan gibi) gaz karışımının yakılmasıyla bir alev

(maksimum sıcaklık 3300 °C) oluşturan bir tabanca memesi ile sağlanabilmektedir. Bu püskürtme yöntemi, kimyasal reaksiyonla oluşan ısı kaynağı tarafından desteklenen bir gaz akışı geliştirir ve daha sonra malzeme tel formunda alevin içine gönderilir. Metal partikülleri püskürtme yapılacak yüzeye yönlendirmeden önce hava sıkıştırması kullanılarak atomize edilir (Kumar ve Kumar, 2021: 1343). Alevle püskürtme yöntemi havacılık ve makine ekipmanlarının tamiri gibi birçok alanda tercih edilmektedir. Alevle püskürtme yöntemleri, püskürtülen ilave metalin biçimi ve tabancanın özelliğine göre sınıflandırılmaktadır (Özel, 2013: 90). Bunlar sırasıyla alevle tel püskürtme ve alevle toz püskürtmedir.

2.1.1. Alevle Tel Püskürtme

Alevle tel püskürtmede; kaplama malzesi olarak kullanılan metal tel, sürekli bir şekilde makara ya da halkadan püskürtme tabancasına sürülerek kaplama gerçekleştirilir. Farklı bir çeşit olarak kesilmiş metal çubuklar da kullanılmaktadır (Özel, 2013: 90). Alevle tel püskürtme işleminde, düşük ergime noktasına sahip malzemeler (Zn, Al, vb.) kullanılır. Bu işlemin ana özellikleri ise oldukça kalın bir kaplama oluşturabilmesi ve boyutsal kararlılığa sahip olmasıdır. Bu püskürtme işlemi şematik olarak Şekil 2.2’de verilmiştir. Tel alev püskürtme kaplamaları ekonomik olmalarına rağmen yüksek porozite, iri tane boyutu ve düşük sertlik değeri nedeniyle yaygın olarak kullanılmamaktadır. Bununla birlikte, kaplamaların mekanik ve tribolojik özellikleri, optimum işlem parametrelerinin seçilmesi ve çeşitli elementlerin dağılımının belirlenmesiyle iyileştirilebilir (Kumar ve Kumar, 2021: 1344).



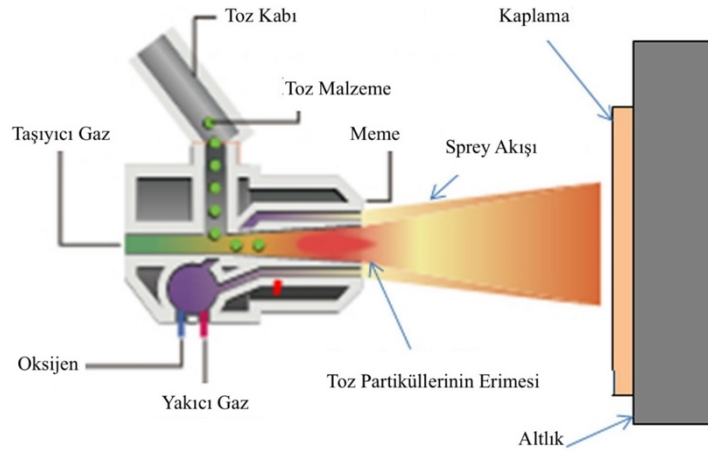
Şekil 2.2. Alevle Tel Püskürtme Prosesi.

Kaynak: (Kumar & Kumar, 2021: 1345).

2.1.2. Alevle Toz Püskürtme

Bu püskürtme yönteminde, tel yerine kaplanılacak olan tozlar, toz haznesinden oksijen-yanıcı gaz alevinin içerisine hava ile altlık taban malzeme yüzeyine püskürtülür ve kaplama tabakası oluşturulur (Özel, 2013: 90). Alevle toz püskürtme yöntemi şematik olarak Şekil 2.3'de görülmektedir.

Alevle toz püskürtme yöntemiyle metal tozları, seramik tozları ve seramik-metal toz karışımları püskürtülebilir. Aşınma veya korozyona dirençli kaplamalar oluşturmak için sert metal alaşım tozları kullanılabilir. Aşınmaya dirençli karbür ve borür gibi sert metalik bileşikler metal tozlarıyla harmanlanarak kompozit kaplamalar oluşturmak mümkündür (Özel, 2013: 91).



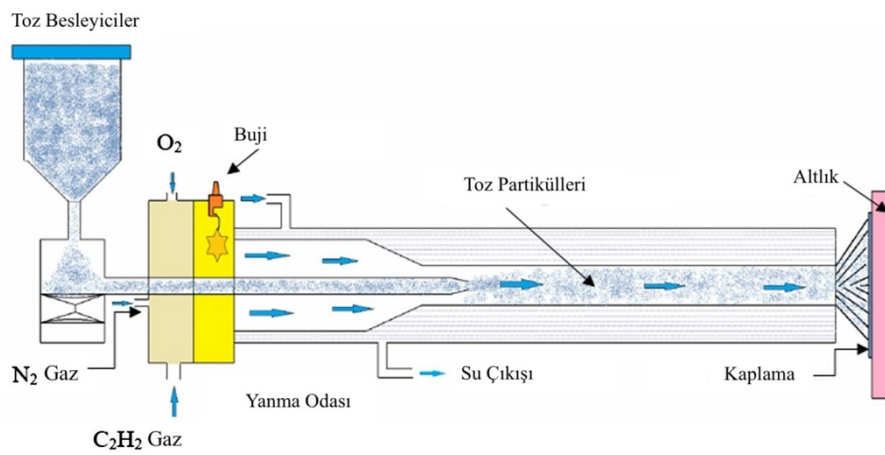
Şekil 2.3. Alevle Toz Püskürtme Prosesi.

Kaynak: (Kumar & Kumar, 2021: 1345).

2.2. Detonasyon Püskürtme (D-Gun)

Ticari olarak bu işlem ilk kez 1955 yılında H.B. Sargent tarafından tanıtılmıştır. Püskürtme tabancası özel olarak tasarlanmıştır. Bu işlem, tabanca, oksijen, asetilen ve azot içinde asılı olan toz kaplama malzemesinin enjekte edilecek miktarını ölçebilen bir hücreyi içermektedir. Sıcaklık ve yüksek hızlı gaz akışı sağlamak için oksijen-asetilen gaz karışımı elektrik kıvılcımı ile saniyede birkaç kez patlatılır. Plastik durumuna ısıtılan tozlar, püskürtme tabancasından yaklaşık 2500 ft/sn (1ft = 30,48 cm) hızla ayrılarak iş parçası yüzeyine çarparlar. İstenilen kaplama için gerekli olan biriktirme işlemi, tabanca içindeki başarılı detonasyonlara bağlıdır. Detonasyon yöntemiyle püskürtme işleminde oluşan patlama kinetik enerji kontrollüdür. Yüksek kinetik enerjinin bir kısmı toz parçacıklarının kaplama yüzeyine çarpmasıyla ısıya dönüşür, kaplama tozu ve yüzey arasında mikro-kaynaklaşma meydana gelir (Özel, 2013: 91). D-Gun püskürtme yöntemi yüksek hızlı bir püskürtme işlemidir ve üstün

yapışma gücü, yüksek kaliteli kaplama yüzeyi, kalıntı gerilmeleri azaltma, aşınma direnci, korozyon direnci, az porozite ve yoğun mikroyapılı kaplamalar gibi özellikler sunar. Ayrıca, D-Gun püskürtme, aşınmaya karşı etkili olan çok yoğun ve yüzey sertliği 50-60 HRC'den yüksek olan sert yüzey kaplamalarının kullanımına izin verir. Bu işlem, uçak motorlarında koruyucu kaplamalar, halka ve tıpa ölçme aletleri, tüp matkaplar, stator ve rotor bıçakları, kılavuz ray vb. alanlarda yaygın olarak kullanılır. Bu proses, metalik olmayan malzemeler için uygun değildir (Kumar ve Kumar, 2021: 1356). Çünkü gaz akış hızı çok yüksek olduğundan malzeme yüzeyinde erozyona sebep olmaktadır (Özel, 2013: 91). Detonasyon püskürtme yöntemi şematik olarak Şekil 2.4'de verilmektedir.

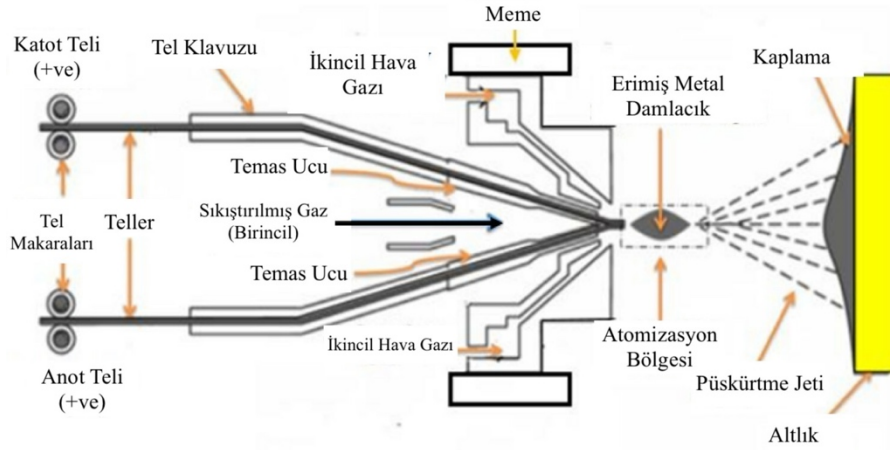


Şekil 2.4. Detonasyon Püskürtme Prosesi.

Kaynak: (Kumar & Kumar, 2021: 1358).

2.3. Elektrik Ark Püskürtme

Elektrik ark püskürtme, ekonomik, korozyona dayanıklı, esnek ve çok yönlü bir yöntemdir. Bu yöntemde, iki iletken tel arasında sürekli ark meydana getirilmektedir. Elektrik arkı sırasında oluşan ısı telleri eriyerek püskürtme tabancası aracılığıyla beslenir ve bu eriyen teller soğuk hava jeti ile atomize edilerek hızlı bir şekilde altlık taban malzeme yüzeyine püskürtülerek kaplama oluşturulur (Özel, 2013: 92). Bu yöntemde kullanılan tel, alevle püskürtme yönteminde kullanılan tellere benzerdir. Ancak her iki yöntem ile yapılan kaplama tabakaları kıyaslandığında elektrik ark püskürtme yöntemi ile oluşturulan kaplama, alevle püskürtme ile elde edilen kaplamalara nazaran daha iyi özelliklere (yüksek yapışma mukavemeti, yoğun kaplama, püskürtme verimliliği ve yüksek kaplama hızı vb.) sahiptir (Kumar ve Kumar, 2021: 1358). Elektrik ark püskürtme kaplama yöntemi şematik olarak Şekil 2.5'de gösterilmektedir.



Şekil 2.5. Elektrik Ark Püskürtme Prosesi.

Kaynak: (Kumar & Kumar, 2021: 1360).

Genellikle otomotiv, havacılık, savunma, altyapı ve hatta sanat endüstrisinde kullanılır. Korozyona ve aşınmaya dayanıklı kaplamalar oluşturulmasının yanı sıra dekoratif amaçlı da tercih edilir. Alüminyum ve çinko kaplamalar korozyon direncini, karbür kaplamalar ise aşınma direncini artırılabilir. Sanatsal heykellerin kaplanmasında da kullanılmaktadır (Özel, 2013: 92).

2.4. Plazma Püskürtme

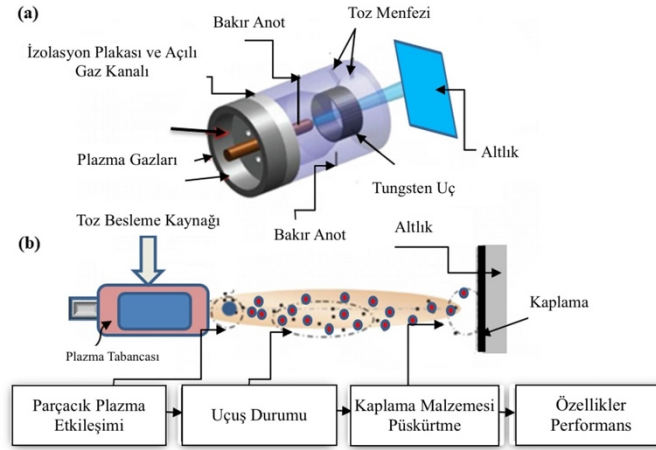
Plazma püskürtme yöntemi, endüstride 1960'lı yılların ortalarından bu yana yüksek performanslı yüzeylerin üretiminde kullanılan en önemli teknolojilerden birisidir. Çok yönlü bir yöntem olmasından dolayı endüstriyel alanlarda geniş kullanım alanına sahiptir. Plazma püskürtme kaplamalar havacılık, otomotiv, tıbbi cihazlar, tarım iletişim vb uygulamalar için yaygın olarak kullanılır (Özel, 2013: 93).

Isıl bariyer, oksidasyon, aşınma ve korozyona dirençli farklı özellikteki kaplamaların oluşturulmasında kullanılan çok yönlü bir kaplama tekniğidir. Bu teknikte, değişik altlık malzemeler üzerinde düşük maliyette seramik veya yüksek ergime sıcaklığına sahip metal ya da alaşımlarının hızlı bir şekilde oluşturulması ve şekillendirilmesi sağlanmaktadır (Özel, 2013: 93).

Plazma püskürtme sisteminde plazma ışınının kaynağı, plazma torcu içerisinde üretilen katot ve anot arasındaki elektrik arkıdır. Üretcin (+) kutbuna bağlanan iletken anot, (-) kutbuna bağlanan iletken ise katot adı verilir. Elektrik arkı tungsten katot ve su soğutmalı bakır (Cu) anot arasında meydana gelir. Plazma gazının iyonize olması için gerekli olan enerji bu ark

sayesinde sağlanmaktadır. Elektrik arkı sayesinde plazma gazının iyonize olması ile “plazma” elde edilir (Özel, 2013: 93).

Plazma arkının merkezinde sıcaklık 15000 °K değerine kadar çıkar ve plazma ışınının çıkış hızı ses hızından yüksektir. Kaplama sırasında malzeme yüzeyine püskürtülen tozlar toz besleme ünitesi ile plazmanın içerisine taşınır. Farklı şekil ve boyutlarda bulunan tozların istenilen oran ve hızda, plazma püskürtme tabancasına taşınmasını sağlamaktadır (Özel, 2013: 93).



Şekil 2.6. Plazma Püskürtme Prosesi.

Kaynak: (Kumar & Kumar, 2021: 1348).

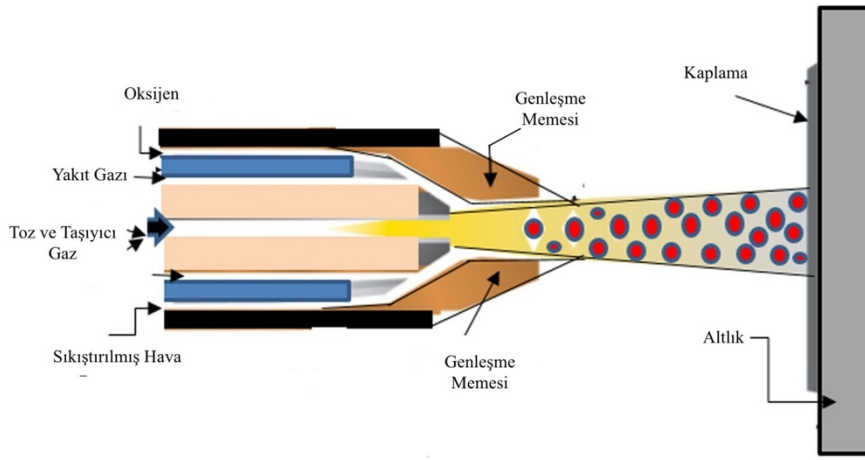
Plazma oluşumunda başlıca Ar, He, H₂ ve N₂ gazları ile az miktarda da hava kullanılmaktadır. Plazma gazları tek atomlu (Ar, He) ve çift atomlu (N₂, H₂) olarak iki temel grupta incelenir. Farklı oranlarda gaz karışımları kullanılarak, plazma gazının hızı ve entalpisi ayarlanabilmektedir. Örneğin, argon ve azot gaz karışımı püskürtülen tozun ve ışının kinetik enerjisini artırmak için kullanılmaktadır (Özel, 2013: 93).

Püskürtme esnasında taneciklerin ulaştığı yüksek hız (300-550 m/s) ve sıcaklık sayesinde, yüksek yoğunlukta altlık malzemeye tutunma dolayısıyla da yüksek dayanımlı kaplamalar elde edilebilmektedir (Özel, 2013: 94).

2.5. Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt (HVOF) Püskürtme

Yüksek hızlı oksijen-yakıt (HVOF), korozyona ve aşınmaya dayanıklı kaplamalar elde etmek için oldukça verimli bir termal püskürtme tekniğidir. Diğer püskürtme işlemleri arasında HVOF tekniği, nispeten düşük sıcaklıkta çalışır ve toz partiküllerinin yüksek hızda püskürtülmesi sayesinde diğer termal püskürtme işlemlerine ve kaplamalara kıyasla belirgin bir iyileşmeye yol açar. Kaplama, her bir partikülün taban malzemenin yüzeyine tamamen/kısmen

ergimiş veya katı bir formda çarpmasıyla üst üste gelmesiyle elde edilir. Katı partiküller kaplamanın geri kalanına yeniden veya zayıf bağlanabilir bu da kaplamanın tokluğunu azaltır. Bu nedenle, bu partiküllerin bu olumsuz özelliklerini en aza indirmek veya ortadan kaldırmak için püskürtme parametrelerinin dikkatli bir şekilde optimize edilmesi gerekmektedir. Bu durum, kaplamanın taban malzemeye yapışma gücünü etkiler (Suegama vd., 2005: 606). Korozyon ve aşınmaya maruz kalan ortamlarda yüzeyleri korumak için bu kaplama yöntemi tercih edilir. HVOF yöntemi, yüksek basınç odasında oksijenin ve farklı yanıcı gazların yanarak nozuldan yüksek hızda altlık taban malzeme üzerine püskürtülmesi ile gerçekleşmektedir (Özel, 2013: 95).



Şekil 2.7. Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt (HVOF) Püskürtme Prosesi.

Kaynak: (Kumar & Kumar, 2021: 1351).

Diğer termal püskürtme yöntemlerine göre HVOF ile yapılan kaplamaların korozyon direnci daha iyidir. Termal püskürtme; hız, sıcaklık, katılaşmanın derecesi, altlık malzeme ve altlık malzemenin ergime derecesi gibi oldukça fazla parametrelere sahiptir. Bu parametreler kullanılmaya başlandığı tarihten bugüne, birçok deneysel uygulama ve bağlantılarla optimize edilmiştir (Dobler K. Kreyc H. ve Schwetzke R., 2000: 407). HVOF yöntemi ile elde edilen paslanmaz çelik kaplamalar mükemmel erozyon direnci nedeniyle tercih edilebilir, ancak, üretim sürecinden dolayı orijinal döküm paslanmaz çeliğe göre korozyon direncinde bir azalmaya neden olabilir (Gateman vd., 2019: 1). Molibdenin HVOF püskürtme ile paslanmaz çelik kaplamaların korozyon direncini artırmada son derece etkili olduğu görülmüştür (Kawakita vd., 2005: 224).

3. PASLANMAZ ÇELİK KAPLAMALAR VE PASLANMAZ ÇELİK KAPLAMALARA UYGULANAN YÜZEY İŞLEMLERİ

Abdul vd. (2021), yüksek yapısal dayanıklılık ve üstün korozyon direnci istenen birçok endüstriyel uygulamada (petrol ve gaz, kimya, savunma, tıp ve gıda) yaygın olarak kullanılan lazer kaplama tekniği ile yumuşak çeliğin yüzeyinde oluşturulan tek katmanlı (1-K) ve çok katmanlı (3-K) 316L paslanmaz çelik kaplamaların yapısal, mekanik ve korozyon özelliklerini inceledi. Her iki kaplamanın da çekme mukavemetleri benzerlik gösterse de üç katmanlı kaplamanın sünekliği tek katmanlı kaplamaya kıyasla daha düşüktür ve sertliği daha yüksektir. Bunun nedeni ise çok katmanlı yapı oluşturulurken meydana gelen ilave ısı girdisiyle sertleşmesidir. Ayrıca üç katmanlı kaplama korozyona daha duyarlıdır.(Abdul vd., 2021: 2956).

Termokimyasal işlem, paslanmaz çeliklerin yüzeyini işlevselleştirmek ve aşınma özelliklerini iyileştirmek için kullanılan yaygın bir yöntemdir. İşlem sırasındaki sıcaklık-zaman rejimine bağlı olarak azot zenginleşmesi, 500 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda çökeltilerin oluşmasına veya 450 °C'nin altındaki sıcaklıklarda arayer katı çözelti oluşumuna yol açar. Ostenit matrisin aşırı doyunluğu kafes parametrelerini belirgin şekilde genişletir. Bu faz durumu S-fazı veya genişlemiş ostenit olarak adlandırılır. Ostenitik paslanmaz çeliklerin sertleştirilmesi sırasında pasif tabakayı uzaklaştırmak amacıyla başlangıçta bir yüzey aktivasyon adımını içerir. Difüzyon zenginleşmesi sırasında yeniden pasifleşmenin önlenmesini sağlamak için özel ekipman gereklidir. Bu durum kullanılan yöntemin karmaşıklığını önemli ölçüde artırır ve genellikle yüksek maliyetlere neden olur. Buna karşılık, klasik termokimyasal işlemler belirgin ekonomik avantajlara sahiptir; özellikle yüksek esneklik ve nispeten düşük proses maliyetleri, gaz nitrürleme işleminin daha büyük ölçekli endüstriyel uygulamasını mümkün kılar. Çelik parçaların aşınma direncini artırmak için gaz nitrürleme uygun bir işlem olarak bilinmektedir. Düşük sıcaklıkta yapılan çökeltisiz sertleştirme işlemi, paslanmaz çeliklerin korozyon direncini korumak için tercih edilmektedir. Termal püskürtme kaplamalarda bulunan gözeneklilik penetrasyona izin verir ve yapısal difüzyona yol açar. Tek bir püskürtme taneciğinin kenarlarında, kaplama mikroyapısının içinde, homojen olmayan bir difüzyon zenginleşmesi meydana gelir. Difüzyon derinliği yüzeyden uzaklaştıkça azalır.

Kutschmann vd. (2019), HVOF yöntemiyle elde edilen AISI 316L kaplamaların yüzeyine düşük sıcaklıkta gazlı nitrürleme işlemi uyguladı. Kaplamada homojen bir difüzyon derinliğini korumak için, işlem sırasında gaz basınç modülasyonu kullanılmıştır. HVOF püskürtme ile elde edilen AISI 316L kaplamalarının gaz nitrürlenmesi, önemli ölçüde aşınma

direncini artırdı. Abrasif aşınma, ostenitik faz içinde oluşan oluklar olarak gözlemlendi. Homojen sertleşmiş bir yüzey durumunda ise adhesif aşınma meydana geldi (Kutschmann vd., 2019: 8).

Zouari vd. (2019), birçok uygulamada tercih edilen pirinç alaşımlarının yüzey özelliklerini iyileştirmek ve servis ömrünü artırmak amacıyla HVOF yöntemi ile pirinç alaşımının yüzeyine nikel-krom-bor-silikon (NiCrBSi) alaşımı ve 316L paslanmaz çelik kaplamalar oluşturdu ve elde edilen kaplamaların mekanik özelliklerini ve korozyon direncini inceledi. Bu çalışma sonucunda, mikroyapısında daha fazla gözenek, tamamen erimemiş tanecik ve oksit gibi kusurlar sergileyen 316L kaplamaların, NiCrBSi kaplamalara göre daha düşük mikrosertliğe, daha düşük korozyon direncine ve daha yüksek yapışma dayanımına sahip olduğu gözlemlenmiştir (Zouari vd., 2019: 1284).

Mükemmel bir korozyon davranışı sergileyen ostenitik paslanmaz çeliklerin düşük aşınma direncini, termokimyasal yüzey sertleştirme işlemi ile artırmak mümkündür. Döküm yöntemi ile elde edilen büyük hacimli malzemelerde başarılı difüzyon zenginleşmesi için pasif tabakanın uzaklaştırılması gerekmektedir. HVOF ile püskürtülen AISI 316L kaplamaların yüzeyine ilave bir aktivasyon adımı olmadan gaz nitrülenmesi sırasında başlangıçta püskürtülen durumda başarılı bir azot zenginleşmesi bulunurken, çözelti ısı işlemi sonrası pasifleşme difüzyonu engellemektedir. Azotun arayer katı çözeltisi ile S-fazının oluşumu 420 °C işlem sıcaklığı ile elde edilirken, çökelme işlemi ise 520 °C'deki ısı işlem sırasında gerçekleşmektedir. Her iki durumda da önemli ölçüde aşınma direncinde artış tespit edilmiştir (Lindner vd., 2018: 1).

Mindivan vd. (2017), düşük karbonlu çelik üzerine NiCr bağlayıcı tabaka uygulandıktan sonra alevle tel püskürtme ve HVOF gibi iki farklı termal püskürtme işlemi ile 316L paslanmaz çelik kaplamalar oluşturduktan sonra optik mikroskop ve mikrosertlik ölçümleri ile yüzey özellikleri ve performansları karşılaştırmıştır. HVOF püskürtme ile elde edilen 316L paslanmaz çelik kaplama, alevle tel püskürtme yöntemi ile elde edilen 316L paslanmaz çelik kaplamaya göre daha yüksek sertlik ve aşınma direnci sergilemiştir. Ancak, korozyona karşı alevle tel püskürtme yöntemi ile elde edilen 316L paslanmaz çelik kaplamanın daha koruyucu olabileceği görülmüştür (Mindivan vd., 2017: 133).

Mindivan ve Mindivan (2016), düşük karbonlu çeliğin yüzeyine HVOF yöntemiyle püskürtülen AISI 420 paslanmaz çelik kaplama ve pulse plazma nitrasyon işlemine maruz bırakılmış HVOF 420 paslanmaz çelik kaplamanın (dubleks kaplama) sertlik, aşınma ve korozyon davranışını karşılaştırdı. Bu çalışmada, dubleks yüzey işleminin aşınma direncini

iyileştirdiği gözlenmiştir. Bununla birlikte, pulse plazma ile nitrürasyon işlemi çeliğin korozyon davranışını olumsuz etkilemiştir (Mindivan ve Mindivan, 2016: 514).

Adachi ve Ueda, (2014), plazma püskürtme ile elde edilen AISI 316L paslanmaz çelik kaplamaların yüzey sertliğini 1000 HV'nin üzerine çıkarmak ve korozyon direncini muhafaza etmek amacıyla, düşük sıcaklıkta plazma nitrüleme ve 450 °C'nin altındaki sıcaklıklarda karbürleme işlemleri ile S-fazı olarak bilinen genişlemiş ostenit fazının aşırı doymuş katı çözeltili fazını oluşturdular. Karbürlemenin ilk olarak uygulandığı ardından hemen nitrülemenin yapıldığı sıralı işlem, yalnızca plazma nitrüleme kullanılarak üretilen S-fazından önemli ölçüde daha kalın bir S-fazı üretmedi. Buna karşılık, karbürleme ve nitrülemenin aynı anda gerçekleştiği eşzamanlı işlem ile 450 °C'de kalın bir S-fazı elde edildiği gözlemlendi. İncelenen kaplamanın sertliği ve aşınma direnci her iki birleştirilmiş plazma işlemiyle de önemli ölçüde iyileştirildi. Ayrıca, plazma püskürtme ile edilen 316L kaplamalar üzerinde oluşan difüzyon tabakasının kalınlığı, AISI 316L çelik levha yüzeyinde oluşan difüzyon tabakasının kalınlığının altındadır. Bunun nedeni ise püskürtülmüş 316L kaplamaların yapısında bulunan oksit tabakaların difüzyonu engellemesidir (Adachi ve Ueda, 2014: 44).

Ostenitik paslanmaz çeliklerin 500 °C'nin altındaki düşük sıcaklıklarda karbürasyon işlemi sayesinde yüzey sertliği artırılırken ve korozyon direncini koruyarak genişlemiş ostenit, yani S-fazı üretebilir. Adachi ve Ueda (2013), aşınma direncini artırmak için plazma püskürtme yöntemiyle elde edilen AISI 316L ostenitik paslanmaz çelik kaplamaları düşük sıcaklıklarda karbürleme işlemine tabi tutmuştur. Püskürtülen AISI 316L kaplamalar, plazma püskürtme işlemi sırasında havada sentezlenen oksit tabakalarını içerdiğinden, oksit tabakaları karbon difüzyonunu kısıtlayabilir. Düşük sıcaklıkta karbürleme ile elde edilen AISI 316L kaplamaların karbon içeriği, AISI 316L çelik levhalarından daha düşük olduğu belirlenmiş; ancak karbürleşmiş tabakaların kalınlığında küçük bir fark gerçekleşmiştir. Karbürleme işlemine tabi tutulan AISI 316L püskürtme kaplamasının Vickers sertliği 1000 HV'nin üzerinde olup, kuru kayma aşınma koşullarında aşınma direnci iki kat iyileştirilmiştir. Sonuç olarak, düşük sıcaklıkta plazma karbürasyon işlemi sayesinde püskürtülen kaplamaların aşınma direnci, karbürasyon işlemine tabi tutulan AISI 316L paslanmaz çelik levhanın seviyesine çıkmaktadır. Ağırlıkça %3,5 NaCl çözeltisinde korozyon direnci açısından, karbürasyon işlemine tabi tutulan AISI 316L püskürtme kaplaması, işlem görmemiş plazma püskürtme yöntemiyle elde edilen AISI 316L kaplamasına göre hafifçe daha düşük olduğu tespit edilmiştir (Adachi ve Ueda, 2013: 818).

Adachi ve Ueda, (2012), plazma püskürtmeyle elde edilen AISI 316L paslanmaz çelik kaplamaların yüzeylerinde S-fazı oluşturmak için düşük sıcaklıkta plazma nitrürleme işlemini uyguladı. Bu çalışmada, AISI 316L çelik levhalar için 400 ve 450 °C nitrürleme sıcaklıklarında S-fazı oluşurken, püskürtülen kaplamalar oksit tabakaları içerdiğinden nitrür tabakalarının kalınlığı AISI 316L çelik levhalardakilerden biraz daha kalın olduğu tespit edilmiştir. Püskürtülen kaplamalardaki bu kalın nitrür tabakalarının oluşmasının sebebi ise azotun tuzaklanmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Çelik levha için azot derinlik dağılım profilleri incelendiğinde, Cr bölgelerinde azot bağlandığından (tuzak) azotun difüzyonu azalmaktadır. Ancak püskürtülen kaplamalarda ise Cr tuzaklama bölgelerini oksijen işgal ettiği için azot tuzaklamasını zayıflattı, böylece azot kesit boyunca kolayca yayınabilmiştir. Sonuç olarak, düşük sıcaklıkta plazma nitrürleme püskürtülen AISI 316L kaplamaların yüzeyinde kalın nitrür tabakaları oluşturmada etkili olduğu sonucuna varılmıştır (Adachi ve Ueda, 2012: 14).

Guilemany vd. (2006), düşük karbonlu çeliğin yüzeyinde HVOF tekniği kullanılarak elde edilen AISI 316L paslanmaz çelik kaplamaların tabanca ve altlık taban malzeme mesafesine bağlı olarak korozyon davranışını inceledi. Yakıt olarak propilen yerine hidrojen kullanıldığında, daha az oksidasyon meydana gelmektedir ve püskürtme parametreleri iyileştirildiğinde daha yoğun kaplamalar elde etmek mümkündür. Kaplama tozu partiküllerinin alev içinde kalma süresi püskürtme mesafesine bağlıdır ve mesafenin uzak olması daha iyi ergimiş partiküllerin elde edilmesine imkân sağlar ve böylece daha az geçirgen ve kompakt kaplamalar elde edilebilir. Püskürtme mesafesi 310 mm olması durumunda incelenen kaplama daha yüksek açık devre potansiyeli ile daha yüksek empedans değerleri göstermiştir. Altlık olarak kullanılan taban malzemeye korozyon koruması sağlamak için partiküllerin alev içerisinde kalma süresi önemlidir. Ağırlıkça %3,4 NaCl çözeltisinde yapılan korozyon testlerinde, yüksek püskürtme mesafesi ile elde edilen kaplamaların daha koruyucu olduğu tespit edilmiştir (Guilemany vd., 2006: 3072).

Suegama vd. (2005), HVOF tekniği kullanarak SAE 4140 çeliğin yüzeyine oluşturulan AISI 316L paslanmaz çelik kaplamaların %3,4 NaCl çözeltisinde korozyon davranışına püskürtme parametrelerinin etkisini inceledi. Kaplamalar, başlangıçta korozyona karşı dirençli olup çözeltide daldırma süresi arttıkça galvanik korozyon mekanizması ile kaplama ve taban malzeme arasında oksidasyon meydana gelmektedir. Yüksek alev enerjisi ile elde edilen kaplamalar daha homojen ve kompakt yapı sergilediklerinden dolayı korozyona karşı daha

dirençli oldukları tespit edilmiştir. Püskürtme mesafesinin kaplama yapısına etkisi, yüksek enerjili alev kullanıldığında ön plana çıkmaktadır (Suegama vd., 2005: 618).

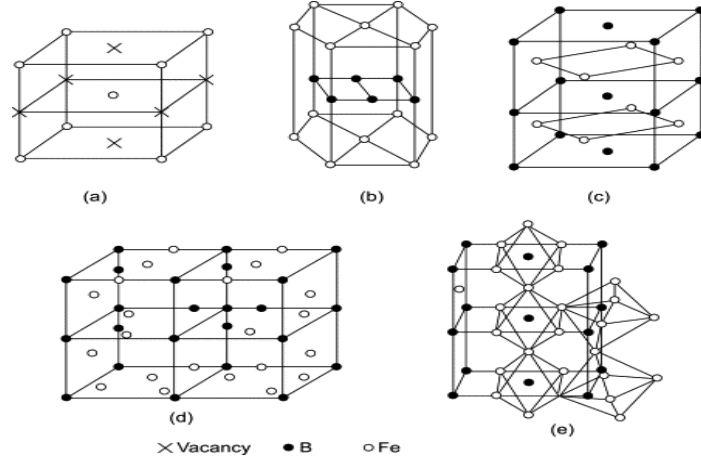
Kawakita vd. (2005), HastelloyC276 taban malzemenin yüzeyinde koruyucu gaz aparatlı HVOF tekniğiyle oluşturulan 316L paslanmaz çelik kaplamaların korozyon davranışına molibdenin (Mo) etkisini inceledi. Bu çalışmada, püskürtme sırasında koruyucu gaz aparatı sayesinde partiküllerin oksitlenmesi engellendiğinden elde edilen kaplamalarda Mo içeriği arttıkça korozyon performansı artmıştır (Kawakita vd., 2005: 224).

4. BORLAMA

Aşınma ve korozyona karşı koruma, geniş bir malzeme yelpazesinde giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bu talepleri karşılayan yapı malzemelerinin yanı sıra, bir makine elemanının yüzeyinin aşınma ve korozyon direncini olumlu yönde etkileyen işlemler geliştirilmiştir. Geçtiğimiz yüzyılın başına gelindiğinde, çeliğin yüzeyine bor difüzyonuyla son derece sert ve aşınmaya karşı dirençli yüzeyler elde edilebileceği görülmüştür (Shi vd., 2022: 1).

Borlama terimi, termokimyasal işlem yoluyla bir malzemenin yüzeyinin borla zenginleştirilmesini ifade eder. Bor atomları, termal difüzyon prosesiyle taban malzemenin kafes yapısına transfer edilir ve daha sonra taban malzeme içindeki atomlarla birlikte ilgili borürlü yapılar oluşmaktadır (Arslan vd., 2022: 3274). Borlama işlemi, 850 ila 1000 °C arasındaki sıcaklıklarda 1 ila 10 saat süresince gerçekleşmektedir. Bu yöntemin en önemli avantajlarından biri yüzey sertliğini 20 GPa'a kadar artırmasıdır. Karbürleme ve nitrürleme gibi diğer termokimyasal işlemlere kıyasla borlama yöntemi ile elde edilen kaplamalar daha iyi aşınma direncine sahiptir. Sıvı, gaz ve katı ortamlar bor kaynağı olarak kullanılabilir. Ancak, teknolojisi ile ilgili zorluklar nedeniyle tuz banyosunda ve gaz fazında borlama henüz yaygın değildir. Ayrıca, plazma borlama hala test aşamasındadır. Şu anda, pratikte uygulanabilir olan tek işlem katı ortamda (ve varyasyonlarıyla birlikte) borlamadır (Campos-Silva ve Rodríguez-Castro, 2015: 651).

Fe-B faz diyagramına göre, denge borür fazları rombik borür FeB, tetragonal borür Fe₂B, rombik borür Fe₃B ve altıgen borür FeB₂'dir. Borür fazlarının kristal yapıları Şekil 4.1'de verilmiştir. Fe₃B fazı yalnızca 1000 °C'ye yakın dar bir sıcaklık aralığında kararlıdır. Deneysel çalışmalar, geleneksel yaklaşımlar (örneğin optik mikroskop) aracılığıyla Fe₃B ve FeB₂ fazlarını ayırt etme zorluğundan dolayı, borür tabakasında görünen temel fazların FeB ve Fe₂B fazları olduğunu göstermektedir. Fe₃B ve FeB₂ fazları durumunda, borür miktarı nükleer gama rezonans (NGR) spektroskopisi ile belirlenebilir ve NGR spektrumunun birinci ve altıncı bileşenlerinin göreceli yoğunlukları dikkate alınmaktadır (Campos-Silva ve Rodríguez-Castro, 2015: 651).



Şekil 4.1. (a)-(e) Demir Borürlerin Kristal Kafeslerinin Şematik Görüntüleri.

Kaynak: (Campos-Silva ve Rodríguez-Castro, 2015: 652).

FeB ve Fe₂B tabakalarının (sırasıyla %16 ve % 9 bor içeren) oluşumu, çeliğin dış yüzeyindeki bor potansiyeline bağlıdır. Düşük veya ara düzeyde bor potansiyeline sahip ortamların (daha yüksek potansiyele sahip ortamlarla karşılaştırıldığında) tek tabakalı Fe₂B oluşmasına izin verdiği bilinmektedir. Difüzyon kanalı teorisine göre, borür tabakalarının oluşumu farklı aşamalarda gerçekleşir. İlk olarak, bor çeliğe difüzyon yapar ve bu difüzyon hızı kafes yapısına (yüz merkezli veya hacim merkezli) bağlıdır. Çeliğin yüzeyinin bazı noktalarında uygun bir bor içeriğine ulaşıldığında, Fe₂B kristalleri çekirdeklenmeye başlar ve Fe₂B'den oluşan bir yüzey tabakası elde edilir, bu tabakanın altında geniş bir bor difüzyon bölgesi bulunur. Her bir Fe₂B kristal tanesi üzerinden bor difüzyonu, z ekseninin ve numune yüzeyine dik olan yöndeki açı azaldıkça daha kolay gerçekleşir. Bu nedenle bazı kristaller hızla büyürken, diğerleri daha yavaş büyür ve yüksek sıcaklıklarda hızla büyüyen çekirdeklerle birleşir. Çeliğin en dış kısmında FeB fazının çekirdeklenmesi ve büyümesi, daha yüksek borlama sıcaklıklarında yüksek bor içeriğinde gerçekleşmektedir. FeB fazının bor difüzyonu da Fe₂B için olduğu gibi yönlendirilmeden etkilenir. Borlama süresi ve sıcaklığı arttığında, FeB bölgeleri yüzeyden başlayarak daha büyük bir derinlik aralığını kaplamaktadır (Campos-Silva ve Rodríguez-Castro, 2015: 652).

200-600 °C aralığında (FeB = $23 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ve Fe₂B = $7,85 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) borür tabakalarının yüzeye paralel genişleme katsayılarındaki fark nedeniyle, borlamadan sonra soğutma sırasında FeB tabakasında çekme gerilmesi, Fe₂B tabakasında ise bası oluşmaktadır (her iki gerilim de borürlü yüzeye paraleldir). Kaplamada kesit boyunca FeB yüzdesi büyük olduğunda, deformasyondaki fark, iki borür tabaka arasındaki sınırlarda çatlaklara neden olabilir. Ayrıca, yoğun demir borürlerin birleşme olmaksızın çökmesi nedeniyle bu tabakaların

altında bir difüzyon bölgesi bulunur; bu bölge esasen, çeliğin iç kısmı ile koyu renkli bir arayüz oluşturan Fe₂B fazının küçük çökeltileridir (Campos-Silva ve Rodríguez-Castro, 2015: 653).

Borür tabakasının kalınlığı, borlu çeliklerin mekanik ve kimyasal davranışını etkiler ve borlama sıcaklığı, borlama süresi, numune yüzeyini çevreleyen ortamın bor içeriği ve çeliğin kimyasal bileşimi ile ilgilidir. Genellikle, borür tabakası kalınlığının hedeflenen endüstriyel uygulama ve taban malzeme ile uyumlu olması gerekir. İnce tabakalar (örneğin, 15-20 µm), talaşsız şekillendirme ve metal zımba kalıpları için adhesif aşınmaya karşı koruma sağlamak için tercih edilirken, kalın tabakalar ise, aşındırıcı dolgu maddeleri içeren plastiklerin ekstrüzyon kalıplarında ve seramik endüstrisinde presleme takımları gibi abrasif aşınmaya karşı önerilir. Düşük karbonlu çelikler ve düşük alaşımlı çelikler için optimum borür tabakası kalınlığı 50 µm ile 250 µm arasında değişirken, yüksek alaşımlı çelikler için optimum borür tabakası kalınlığı 25 µm ile 76 µm arasında değişmektedir. Ayrıca, borür tabakasının kalınlığı, borlama işlemine tabi tutulan malzemelerin boyutlarını ve yüzey pürüzlülüğünü etkilemektedir (Campos-Silva ve Rodríguez-Castro, 2015: 653).

4.1. Çeliklerin Borlanması

Sertleştirilmiş, temperlenmiş, kalıp ve kimya sektöründe kullanılan çelik türleri borlamaya uygundur. Diğer uygun malzemeler arasında dökme demir ve sinterlenmiş demir bulunmaktadır. Üstün kaliteli çelikleri daha düşük kaliteli çeliklerle değiştirme ve ardından bu çeliklere istenen özellikleri borlama yoluyla kazandırma eğiliminin geçmişte yaygınlaşmadığını belirtmek gerekir. Şu an, diğer yüzey kaplama teknolojileri gibi, uygulama olarak ucuz ve kolay bulunabilir çelik seçilir ve ardından ekstra koruma sağlamak için borlama gerçekleştirilebilir. Karbürleme işlemine maruz kalan çelikler de borlanabilir ve ardından borlama sonrası sertleştirme işlemiyle yeniden sertleştirilebilir. Ancak, alüminyum içeren çelikler borlanmamalıdır çünkü bu element normal borür tabakasının aşınma direncini azaltmaktadır ve tabakanın altında oldukça daha yumuşak bir ferrit bölgesi oluşturmaktadır. Daha yüksek temas basıncında, yumurta kabuğu etkisi olarak adlandırılan bu tür tabaka oluşumu, aşırı kalınlıklarda son derece sert ve kırılabilir borür tabakasının daha yumuşak ara tabakaya nüfuz etmesine ve dolayısıyla sıyrılmasına neden olur. Ayrıca, suyla sertleştirilmiş çelik borlanmamalıdır çünkü borür tabakasının termal şoka duyarlılığı bulunmaktadır. Sülfür katkılı ve kurşunlu çelikler, yüzey kabuğu oluşumuna ve yüzey çatlamasına eğilimleri nedeniyle borlama işleminde kullanılmamalıdır. Demir alaşımlarının yüzeyinde 30-200 µm kalınlığında bir borür tabakası oluşturmak için 700-1000 °C sıcaklık aralığında ticari borlama yapılmaktadır. Borun demir içindeki çözünürlüğü çok düşük olsa da, uygun bir bor

konsantrasyonuna ulaşıldığında yüzeyde bir borür tabakası oluşmaya başlamaktadır. Bundan sonra, borür tabakasının büyümesi öncelikle bor difüzyonu tarafından kontrol edilir. Borür tabakasının kalınlığı, faz yapısı ve morfolojisi borlama sıcaklığı ve süresi, ortamın bor potansiyeli ve taban malzemenin kimyasal bileşimine bağlıdır. Bu bağlamda, testere dişi morfolojisiyle tek fazlı Fe₂B tabakasının oluşumu, demir alaşımlarının aşınma direncini artırmak için istenmektedir (Campos-Silva ve Rodríguez-Castro, 2015: 658).

4.1.1. Paslanmaz Çeliklerin Borlanması

Paslanmaz çelikler, korozif koşullarda ve yüksek yükler altında çalışan takım, üretim ekipmanları ve hidromakine uygulamaları için yaygın olarak tercih edilir. Bu tür parçaların aşındırıcı partiküllerin varlığında sürtünme koşullarında çalışmasına örnek olarak petrokimya ekipmanları, madencilik ve yol ekipmanları ile çeşitli hidrolik üniteler verilebilir. Paslanmaz çelikler, düşük yüzey sertliği ve düşük yük taşıma kapasitesi nedeniyle tribolojik uygulamalar için nadiren kullanılmaktadır. Bu parçaların maruz kaldığı çalışma koşulları göz önüne alındığında, borlama işleminin bu soruna bir ana çözüm sunabileceği düşünülmektedir (Saenz-Betancourt vd., 2022: 1). Parçanın yüzey tabakasını karakterize eden yüksek korozyon direnci, fiziksel ve mekanik özelliklerin korunması önemlidir. Ayrıca, borür tabakalar sülfürik, fosforik ve hidroklorik asitler de dahil olmak üzere asitlere karşı mükemmel bir korozyon direncine sahiptir. Borlama sıcaklığı yükseldikçe borür tabaka kalınlığı ve kaplama yapısında boşluk içeriğinin artacağı tespit edilmiştir (Shi vd., 2022: 9).

Borlanmış paslanmaz çeliklerin yapısal analiz çalışmalarında büyüme arayüzlerinde düz bir yüzey morfolojisine sahip FeB/Fe₂B tabakaların varlığı gözlenmiştir (Reséndiz-Calderon vd., 2017: 5603). Bu morfolojinin gelişimi, alaşım elementlerinin yüksek konsantrasyonundan kaynaklanmaktadır (García-León vd., 2021: 5). Özellikle, Cr çelikten borürlü yapıya doğru kolayca yayınır ve (Fe,Cr)B ve (Fe,Cr)₂B gibi borlu bileşikler oluşturma eğilimindedir. Ni daha az yayınır, kaplamanın altında yoğunlaşır ve bazı durumlarda yüzey tabakalarının dışında Ni₃B olarak çökler. Difüzyon bölgesi Cr'ca zengin bir tabaka (taneler arası çökelen Cr₃C₂ ve Cr₇C₃ türünden krom karbürler) ve çok ince bir Ni'ce zengin bölgeden oluşmaktadır. Ayrıca, artan Cr ve Ni gibi alaşım elementleri, FeB tabakasının ve difüzyon bölgesinin genişlemesine yol açar (Campos-Silva & Rodríguez-Castro, 2015: 664).

Paslanmaz çeliklerde FeB tabakası çok sert olmasına rağmen oldukça kırılmandır. Termal genleşme katsayısı Fe₂B fazı ve paslanmaz çelikten önemli ölçüde farklı olduğu için istenmez. Bu nedenle, geleneksel kutu veya macun borlama işlemlerinde karşılaşılan çevresel sorunları yaşamadan kısa bir süre içinde paslanmaz çeliklerin yüzeyinde yoğun ve sürekli kalın

bir borür tabakası oluşturmak için katodik redüksiyon ve termal difüzyon esaslı borlama (CRTD-Bor) yöntemi önerilmiştir (Kartal Sireli vd., 2015: 25).

5. KAYNAK ÖZETLERİ

García-León vd. (2023) yaptıkları çalışmada, sert kaplamalarda tribokorozyon üzerine yapılan araştırmaların bibliyometrik analizini sunmaktadır. Tribokorozyon, kayma sırasında aşınma ve korozyon arasındaki etkileşimi ifade etmektedir ve çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılan mekanik bileşenlerin ömrü açısından önemli bir faktördür. Bu çalışmada 1974 ile 2022 yılları arasında yayınlanan 418 makale incelendi ve sert kaplamalarda tribokorozyon araştırmalarında yıllık %13,83'lük bir büyüme oranı olduğunu ve 2015'ten bu yana yayınlarda önemli bir artış olduğunu göstermektedir. Tribokorozyonla ilişkilendirilen en yaygın anahtar kelimeler korozyon, aşınma, sürtünme, yağlama ve seramik katmanlardır. Bu çalışma aynı zamanda bu alandaki en etkili yazarları, dergileri, kurumları ve ülkeleri de belirledi. Araştırma ağırlıklı olarak Çin ve ABD'den yazarlar tarafından yürütüldü ve en ilgili dergiler ise "Wear" ve "Surface and Coatings Technology" idi. Bu dergilerde yapılan yayınlar, endüstriyel ve tıbbi uygulamalar için daha dayanıklı ve korozyona dayanıklı malzemelerin geliştirilmesine katkıda bulunabilecek tribokorozyon araştırmalarındaki eğilimler ve ilerlemeler hakkında fikir vermektedir.

Korkmaz vd. (2023), makine öğrenimi modellerini kullanarak yağlama koşulları altında 316L paslanmaz çeliğin aşınma ve sürtünme özelliklerinin çevrimiçi tespitine odaklandılar. Aşınma hızı ve sürtünme kuvvetlerini tahmin etmek için bir karar ağacı sınıflandırıcısı olan J48 yöntemi kullanıldığında düşük aşınma koşullarında %100, ağır aşınma koşullarında ise %99,27 doğruluğa sahip olduğu tespit edilmiştir.

Li vd. (2023), ark deşarjlı plazma nitrürleme (ADPN) adı verilen bir teknik ile 100 ila 130 A arasında değişen ark akımları kullanılarak 440 °C gibi düşük bir sıcaklıkta AISI 420 martenzitik paslanmaz çeliğin yüzeyinde nitrürleme gerçekleştirdi. Nitrürlenmiş tabaka genişletilmiş martenzit (α_N), Fe_4N ve $Fe_{2-3}N$ fazlarından oluşmaktadır. Daha yüksek bir ark akımı, $Fe_{2-3}N$ ve Fe_4N 'den oluşan bir bileşik tabakanın oluşmasına yol açmaktadır. Nitrürlenmiş tabakalar, geleneksel plazma nitrürlemeye kıyasla yüksek sertliğe ve aşınma direncine sahiptir ve daha yüksek ark akımlarına maruz kalan numuneler, daha kalın nitrürlenmiş tabakalara ve daha yüksek bir $Fe_{2-3}N$ içeriğine sahiptir, bu da en iyi aşınma ve korozyon performansıyla sonuçlanmıştır.

Farfan-Cabrera vd. (2023), tel ve ark katkılı imalat (WAAM) yöntemi ile onarılan düşük karbonlu bir çelik üzerinde borlama işleminin tribolojik etkilerini incelediler. Borlama işleminin WAAM ile onarılmış düşük karbonlu çeliğin tribolojik özelliklerini iyileştirdiği ve

bu çeliğin aşırı aşınma koşullarına maruz kalan uygulamalar için uygun hale geldiğini göstermektedir.

Başman vd. (2023), kutu borlama yöntemiyle Ekabor-2 toz içerisinde AISI 316L paslanmaz çeliğin yüzeyinde borür tabakasının oluşum mekanizması ve özelliklerine etkisi üzerinde çalıştı. Borür tabakasının kalınlığı sıcaklık ve sürenin artmasıyla artmaktadır. Borür tabakasında oluşan ana faz Fe_2B olup, bir miktar FeB fazı da mevcuttur. Borlanan paslanmaz çeliğin yüzey sertliği işlem görmemiş AISI 316L paslanmaz çeliğe göre yaklaşık 10 kat daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Borür tabakasının oluşumu için aktivasyon enerjisi 149,3 kJ/mol olarak belirlendi. Bu çalışmada aynı zamanda borür tabakasının büyüme kinetiğini, borlama süresi ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak katmanların derinliğini ölçerek inceledi. Borür tabakasının artan borlama süresiyle doğrusal olarak büyüdüğü ve bu durumun difüzyon kontrollü bir prosese işaret ettiği bulunmuştur.

Saenz-Betancourt vd. (2022), enerji endüstrisinde, özellikle hidroelektrik santrallerde kullanılan hidromakinelerde kavitasyon erozyon direncinin önemini vurgulamaktadır. Kavitasyon erozyonu malzeme kaybına, verimliliğin azalmasına ve bakım maliyetlerinin artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, erozyonu en aza indirmek için dirençli alaşımların ve kaplamaların veya yüzey işlemlerinin geliştirilmesi de dahil olmak üzere çeşitli mühendislik yaklaşımları araştırılmaktadır. Bu çalışmada, hidromakinelerde yaygın olarak kullanılan ASTM A743 CA6NM çeliğine 950 °C'de 2, 6 ve 8 saatlik sürelerle kutu borlama yöntemi kullanılarak yüzeyde, taban malzemedan 5,22 kat daha yüksek sertliğe sahip FeB fazı oluşmuştur. ASTM G32 standardına göre gerçekleştirilen kavitasyon erozyon testlerinde işlem görmemiş çeliğe kıyasla 2, 6 ve 8 saat borlanmış çeliklerin erozyon oranları sırasıyla %72, %57 ve %55 oranında azalmıştır.

Fernández-Valdés vd. (2021a), borlanmış AISI 316L çeliklerin aşınma direncini araştırdı. İşlem görmemiş ve borlanmış AISI 316L çelikler üzerinde pin-on-disk aşınma testleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar borlamanın işlem görmemiş paslanmaz çeliğe kıyasla aşınma direncini önemli ölçüde arttırdığını göstermiştir. Ayrıca daha ince borür tabakasının daha şiddetli aşınma mekanizmaları sergilediği de tespit edilmiştir. Bu çalışmada aynı zamanda sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak aşınma testi sırasında tabaka/altlık sistemlerinde oluşan gerilmeleri de değerlendirdi. Sonuçlar, Hertz temasının neden olduğu gerilim alanının aşınma nedeniyle bozulduğunu ve çekme gerilmelerinin yüzeyde ve temas bölgesi içinde bulunduğunu gösterdi. Borür tabakaları uygulanan yük altında elastik davranış sergileyerek altlık taban üzerinde plastik deformasyona neden olmuştur. Daha ince borür tabaka kalınlığı, daha yüksek

basma gerilimine ve daha şiddetli aşınmaya neden olmaktadır. Aşınma yüzeyi analizi, borlanmış AISI 316L çeliklerinin, maruz kalma süresine göre değişen toplam demir borür tabaka kalınlıkları ile düz bir morfolojiye sahip olduğunu gösterdi. Borlanmış palanmaz çeliğin aşınma yüzeyleri incelendiğinde yüzeyde aşınma ürünlerinin toplandığı, kayma yönünde paralel yivler ve lekeler gözlemlendi. Daha kalın borür tabakası kalınlığında aşınma hızı daha da düşmektedir. Sonuç olarak, borlama işlemi AISI 316L çeliklerin aşınma direncini önemli ölçüde iyileştirmiştir.

Fernández-Valdés, Vasquez-De la Rosa, vd. (2021b), borlanmış AISI 316L çeliklerin çevrimsel temas yüklemesi altındaki mekanik davranışını araştırdı. Borlama işlemleri, 900 °C sıcaklıkta sürekli ve kesintili yöntemler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sürekli borlama işlemi sonucunda $13,08 \pm 0,39$ µm kalınlığa ve $26,3 \pm 2,1$ GPa yüzey sertliğine sahip bir FeB-Fe₂B çift tabakalı yapı, kesintili borlama işlemi sonucunda ise $6,09 \pm 0,31$ µm kalınlığında ve $22,3 \pm 1,4$ GPa yüzey sertliğinde Fe₂B tek tabakalı yapı elde edildi. Yapışma testleri, tek tabakanın çift tabakaya kıyasla daha iyi yapışmaya sahip olduğunu gösterdi. Özellikle çift tabakalı sistemde uygulanan kritik yük nedeniyle borür tabakası yüzeyinde dairesel çatlaklar gözlemlenmiştir. Kritik altı yükler Fe₂B tek katmanında kohezyon hasarına neden olmuş, ancak düşük kritik altı yüklerde herhangi bir hasar gözlemlenmemiştir. Yüksek kritik altı yüklerde her iki borlama işleminde de dairesel çatlaklar gözlemlendi. FeB fazı çift tabakalı sistemde daha ciddi hasara neden olurken, Fe₂B tek tabakalıda daha ince kalınlık ve bası kalıntı gerilmelerinin varlığı, temas yüklemesinin neden olduğu maksimum ana gerilimde bir azalmaya yol açtı. Kesintili borlama işlemi, sürekli borlama işlemine kıyasla daha iyi mekanik özelliklere ve çevrimsel temas yüklere karşı dirençli olduğu tespit edilmiştir.

Alwan ve Jaddoa (2020), termokimyasal (nitro-karbürleme) ve mekanik (ultrasonik bilyalı dövme) yüzey işlemlerinin, 316L paslanmaz çeliğin özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Bu çalışmada, nitro-karbürleme işlemi 580 °C'de 90 dakika boyunca gerçekleştirdiler, ardından 0,4 mm çapında sert çelik bilyeler kullanılarak 30 ve 60 dakika gibi farklı sürelerde ultrasonik olarak bilyelerle dövme işlemi uyguladılar. Termokimyasal proses, yüzeyde difüzyon yoluyla 10 µm kalınlığında bir nitro-karbürleme tabakası oluşturdu. Ultrasonik bilyalı dövme işlemi, yüzeyde bası kalıntı gerilmelerinin oluşmasına neden olarak paslanmaz çelik yüzeyin sertliğini arttırdı. Hem termokimyasal hem de mekanik işlemler, yüzey tabakasının sertliğini artıran NiCrMo ve NiCr karbürlerinin oluşumuyla sonuçlandı. Ayrıca ultrasonik bilyalı dövme süresinin artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün ve sertliğin arttığı

görülmüştür. Ancak korozyon sonuçları hem nitrokarbürleme hem de ultrasonik bilyalı dövme işlemlerinin, numunelerin çukurlaşma korozyon direncini azalttığını göstermiştir.

Abdullah vd. (2019), cam boncuklar kullanarak 316L paslanmaz çeliğe kumlama işleminin ardından macun borlama uyguladılar. Sonuçlar, kumlamanın bor difüzyonunu arttırarak borlama sonrasında oluşan borür tabakasının kalınlığını iyileştirdiğini gösterdi. Bilyeli kumlama ve macun borlama kombinasyonu, yüksek bor içeriğine sahip pürüzsüz ve kompakt borür tabakası ile sonuçlandı. Paslanmaz çeliğin sertliği %624 oranında artarak aşınma direncini önemli ölçüde iyileştirdi.

Zouari vd. (2019), HVOF tekniği kullanarak nikel-krom-bor-silikon (NiCrBSi) alaşımı ve 316L paslanmaz çelik (SS) kaplamaların oluşturulmasıyla pirinç alaşımlarının yüzey özelliklerinin iyileştirilmesini araştırmıştır. Kaplamaların mekanik özellikleri ve korozyon direnci analiz edildi ve sonuçlar, 316L SS kaplamaların NiCrBSi kaplamalara kıyasla daha düşük mikrosertliğe ancak daha yüksek yapışma mukavemetine sahip olduğunu gösterdi. Ancak 316L SS kaplamalar gözenekler, erimemiş partiküller ve oksitler gibi kusurların varlığı nedeniyle daha düşük korozyon direncine sahiptir.

Bobzin vd. (2019), FeCrMnBC alaşımına dayalı, ekonomik, aşınmaya ve korozyona dirençli bir kaplamanın geliştirilmesini tartışmaktadır. Kaplama -90 + 45 µm boyut dağılımına sahip sprey tozu kullanılarak üretilmiş ve mikroyapı, sertlik, aşınma direnci ve korozyon direnci açısından değerlendirilmiştir. Sonuçlar, kaplamanın yoğun bir katmanlı mikroyapıya ve 600 HV'den daha yüksek bir mikrosertlik değerine sahip olduğunu gösterdi. Plazma sprey yöntemiyle üretilen paslanmaz çelik kaplamayla karşılaştırıldığında önemli ölçüde daha yüksek aşınma direnci elde edildi. FeCrMnBC kaplamanın korozyon davranışının plazma püskürtmeli 316L kaplamayla karşılaştırılabilir olduğu görülmüştür. Bu çalışmada, önerilen FeCrMnBC kaplama sisteminin, karbon çeliği ve dökme demir parçaları aşınma ve korozyona karşı korumak için geleneksel paslanmaz çelik kaplamalara daha ekonomik bir alternatif olarak kullanılabilceği sonucuna varıldı.

Nascimento vd. (2019), özellikle ferritik paslanmaz çelik kaplamalara (SS444) odaklanarak, termal olarak püskürtülmüş paslanmaz çelik kaplamaların korozyon davranışını araştırdı. Kaplamalar, iki farklı teknik HVOF ve yüksek hızlı hava yakıtı (HVOF) kullanılarak üretildi. Bu çalışmada, kaplamaların elektrokimyasal davranışı ağırlıkça %3,5 NaCl sulu çözeltisinde 3 hafta boyunca izlendi ve döküm yöntemi ile üretilmiş paslanmaz çelik ile karşılaştırıldı. Kaplamaları üretmek için kullanılan püskürtme parametrelerinin, kaplamaların mikroyapıları üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğu görüldü. Ancak kaplamaların polarizasyon

davranışındaki küçük farklılıklar çoğunlukla 1 haftalık testten sonra ortadan kalktı. Ayrıca, kaplama öncesinde erimeye maruz kalan splotlerde tercihli korozyonun yanı sıra, splot sınırları arasında çukurların ve korozyon ürünlerinin oluşumu da gözlemlendi. Püskürtülen SS444 kaplamalar, döküm yöntemi ile üretilen paslanmaz çelikler gibi kendiliğinden pasivasyona ve korumaya maruz kalmamasına rağmen, taban malzemedan daha aktif olan bu tür kaplamalar, çinkonun galvanizli çelikleri koruduğu gibi katodik koruma sağlama açısından hala endüstriyel değere sahip olduğu ileri sürülmüştür.

Lindner vd. (2018), HVOF püskürtmeli AISI 316L kaplamalarına ek bir aktivasyon adımına ihtiyaç duymadan gaz nitrülemesini incelediler. Bu çalışmada kaplamanın püskürtüldüğü durumda başarılı azot zenginleşmesinin meydana geldiğini, ancak pasifleştirmenin çözelti ısı işleminden sonra difüzyonu engellediği tespit edildi. Azotun arayer çözünmesini içeren S fazı oluşumu 420 °C işlem sıcaklığında elde edilirken, 520 °C'de ise çökeltme gerçekleşir. Her iki durumda aşınma direncinde önemli bir artış tespit edildi. Paslanmaz çelik kaplamaların özelliklerini iyileştirmek için termal püskürtme ve termokimyasal yüzey işlemlerinin uygulanabilirliği görülmüştür.

Zhang ve Fujii (2016), özellikle WC, WB ve Ni kaplamalara odaklanarak, sulu yağlama koşulları altında termal olarak püskürtülen kaplamaların tribolojik performansını değerlendirdiler. 0,02 m/s kayma hızında ve 10 MPa ortalama basınçta bu kaplamaların sürtünme katsayısını ve aşınma direncini karşılaştırdılar. Sonuçlar, termal olarak püskürtülen kaplamaların, sulu yağlama koşulları altında yüksek sürtünme katsayısı ve iyi aşınma direnci sergilediğini gösterdi. WC kaplamalar, WB ve Ni kaplamalara kıyasla daha iyi aşınma direnci sergiledi. Bu çalışmada ayrıca sulu yağlama koşulları altında bu kaplamaların ıslanabilirlik ve sertliğin tribolojik özellikleri üzerindeki etkisi de araştırılmıştır. Kaplamaların yüzey temas açısı arttıkça sürtünme katsayısının arttığı, yüzey sertliği arttıkça aşınma hızının azaldığı belirlenmiştir. Islanabilirlik ve sertlik gibi yüzey özelliklerinin, sulu yağlama koşulları altında termal olarak püskürtülmüş kaplamaların tribolojik davranışını önemli ölçüde etkilediği bulunmuştur. Genel olarak, termal olarak püskürtülen kaplamalar, sulu yağlama koşulları altında mükemmel aşınma direnci gösterdi ve odunsu biyokütle üretim süreçlerinde kullanılan ekipmanın yüzey aşınma direncini geliştirmek için uygun bir seçenek olabilir.

Limpichaipanit vd. (2015), termal püskürtmeli paslanmaz çelik esaslı nanokompozit kaplamaların elde edilmesi ve özelliklerini araştırmaktadır. Kaplamalar için nano-demir oksit partiküller içeren paslanmaz çelik esaslı hammadde tozlarının kullanımına odaklanıyor. Tozlar bilyalı öğütme ve oksidasyon işlemleri kullanılarak hazırlanmıştır. Sonuçlar, paslanmaz çelik

tozlarının yüzeyinde demir oksit nanopartiküllerin partikül veya nanoplaka formunda mevcut olduğunu gösterdi. Daha sonra tozlar HVOF tekniği kullanılarak termal olarak püskürtüldü. Kaplamaların mikroyapısı; splot, oksit katmanlar, erimemiş partikül ve gözeneklerden oluşmaktadır. Alev püskürtme sıcaklığında oksitin tamamen erimesi nedeniyle mikroyapıda nanopartikül gözlenmedi. Kaplamalardaki demir oksidin hematit formunda olduğu tespit edilmiştir. Demir oksit nanopartiküllerin eklenmesi, kaplamaların sertliğini biraz arttırdı ve saf paslanmaz çeliğe kıyasla aşınma hızını ve sürtünme katsayısını azalttı. Özelliklerdeki bu iyileşme, kaplamalardaki artan demir oksit miktarına bağlanabilir. Sonuç olarak demir oksit nanopartiküllerin eklenmesi, termal püskürtmeli paslanmaz çelik esaslı kaplamaların özelliklerini iyileştirdiğini göstermektedir. Kaplamalar, saf paslanmaz çeliğe kıyasla daha yüksek sertlik, daha düşük aşınma hızı ve sürtünme katsayısı sergiledi.

Kartal Sireli vd. (2015), “Katodik İndirgeme ve Termal Difüzyona Dayalı Borlama” (CRTD-Bor) adı verilen yeni bir borlama yöntemini ve bu yöntemin 400 serisi paslanmaz çeliklerin yüzey sertliğini arttırmaya yönelik uygulamasını tartışmaktadır. Borlama işlemi, anot olarak erimiş elektrolit ve grafit plakaların kullanıldığı elektrolizi içerirken, çelik numune ise katot görevi üstlenmektedir. Yüzeyde oluşan borür tabakası tek fazlı Fe_2B 'den oluşmaktadır. 20 dakikalık CRTD-Bor işleminden sonra yoğun ve sürekli kalın bir borür tabakası ($25\mu m$) elde edilebildi. Borür tabakasının sertliği yüzeyde 1500 ± 200 HV olarak ölçülmüştür ve çelik matrise doğru giderek azalmaktadır. Bu çalışmada ayrıca sıcaklık ve işlem süresinin borür tabakasının kalınlığı üzerindeki etkisi de araştırıldı. Sıcaklığın artırılması, borür tabakasının kalınlığında daha büyük bir artışa yol açtığı, işlem süresinin artırılmasının ise daha küçük bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Borlanan paslanmaz çeliğin kesit incelemesi, borür tabakasının altında borca zengin karışık Fe ve Cr mono borür fazının yanı sıra stokiyometrik olmayan bor içerikli bölgelerin varlığını ortaya çıkardı. Genel olarak bu çalışma, CRTD-Bor'un tek fazlı bir Fe_2B borür tabakası büyüterek 400 serisi paslanmaz çeliklerin yüzey sertliğini etkili bir şekilde arttırmak için kullanılabileceğini göstermektedir. Bu borlama tekniği, mühendislik uygulamalarında kullanılan çelik bileşenlerin yüzey metalurjik özelliklerini geliştirmek için çevre dostu ve verimli bir yöntem olarak önerilmektedir.

Al-Mangour vd. (2013), 316L paslanmaz çeliğin mukavemetini ve korozyon direncini arttırmak için soğuk sprey yöntemini kullandılar. Bu çalışmada, paslanmaz çelik tozlar kobalt krom (Co-Cr) alaşımı olan L605 tozlarıyla hacimce %25, %33,3 ve %50 Co-Cr olacak şekilde karıştırıldı ve bu karışımlar yumuşak çeliğin yüzeyine soğuk şekilde püskürtüldü. Soğuk püskürtme işleminin ince taneli yapılara sahip kaplamalar üretmek için etkili bir teknik olduğu

sonucuna varılmıştır. Soğuk spreyle üretilen kaplamalar, saf paslanmaz çeliğe kıyasla gelişmiş yoğunluğa ve azaltılmış gözenekliliğe sahiptir. Karışım kaplamalar ayrıca daha yüksek süneklik ve korozyon direnci sergiledi.

Park vd. (2013), plazma nitrürlemenin (PN) ve nitrokarbürlemenin HVOF püskürtmeli 316 (östenitik), 17-4PH (çökeltme sertleştirmeli) ve 410 (martenzitik) paslanmaz çelik kaplamalar üzerindeki etkilerini araştırdılar. PN ve nitrokarbürleme işlemleri sonucunda kaplamalar üzerinde bir bileşik tabaka ve bir difüzyon tabakasından oluşan kalın bir nitrür tabakası oluşmuştur. Plazma nitrokarbürleme işleminde az miktarda C_2H_2 'nin eklenmesi azot difüzyonunun derinliğini artırmaktadır. Difüzyon esaslı işlemler sonrasında CrN, Fe_3N , Fe_4N ve 410 paslanmaz çelik durumunda $Cr_{23}C_6$ gibi çeşitli fazların oluşması nedeniyle yüzey sertliğinde artış ve yük taşıma kapasitesinde iyileşme elde edilmiştir.

Adachi ve Ueda (2013), düşük sıcaklıkta plazma karbürleme yoluyla plazma püskürtmeli AISI 316L paslanmaz çelik kaplamaların yüzey sertliğinin ve aşınma direncinin iyileştirilmesini araştırdı. Karbürlenmiş kaplamaların karbon içeriğinin çelik plakalara göre daha düşük olduğu ancak karbürlenmiş katmanların kalınlığında çok az fark olduğu tespit edilmiştir. Karbürlenmiş kaplamaların sertliği 1000 HV'nin üzerinde olup, spesifik aşınma da iki kat azalmıştır. Düşük sıcaklıkta plazma karbürlemenin, püskürtülmüş kaplamaların aşınma direncini karbürlenmiş çelik plakaların seviyesine kadar artırabileceğini göstermiştir. Bununla birlikte karbürlenmiş kaplamalar, püskürtmeli kaplamalara kıyasla biraz daha düşük korozyon direnci göstermiştir. Kesit incelemelerinde, karbürlenmiş kaplamalar çelik plakalarla karşılaştırıldığında daha ince bir karbürlenmiş tabakaya sahip olduğunu gösterdi; bu durum, muhtemelen püskürtülmüş kaplamalarda karbon difüzyonunu kısıtlayan splotler arasındaki oksit tabakalarının varlığından kaynaklanmaktadır. Karbürlenmiş kaplamaların ve çelik plakaların sertlik-derinlik profilleri benzer sertlik değerleri gösterdi; bu da S-fazındaki karbon içeriğinin sertlik üzerinde minimum etkiye sahip olduğunu gösterdi.

Adachi ve Ueda (2012), nitrürleme sıcaklığı ve püskürtme koşullarının S-fazı tabakası oluşumu üzerindeki etkilerini araştırdı. 400 °C ila 450 °C arasındaki nitrürleme sıcaklıklarında püskürtme kaplama üzerinde S-fazının oluşabileceğini göstermektedir. Nitrür tabakasının kalınlığı nitrürleme sıcaklığının yanı sıra giriş elektrik gücünden ve sprej tozunun partikül boyutundan etkilenmektedir. Daha büyük partiküllerle püskürtülen kaplamaların, etkili azot difüzyonu nedeniyle daha kalın nitrür tabakalarına sahip olma eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. Aynı zamanda bu çalışmada, püskürtme kaplamalardaki azot difüzyon sürecini AISI 316L çelik levhalarla karşılaştırdı. Azot derinlik dağılım profilleri, çözünmüş Cr

tarafından azot tutulmasının her iki durumda da meydana gelebileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, bazı Cr tutma bölgelerini işgal eden ve azot difüzyonunu teşvik eden oksijenin varlığından dolayı püskürtme kaplamalarda tutulma daha az belirgindir. Sonuç olarak bazı püskürtme kaplamalar çelik plakalardan daha kalın nitrür tabakalarına sahiptir.

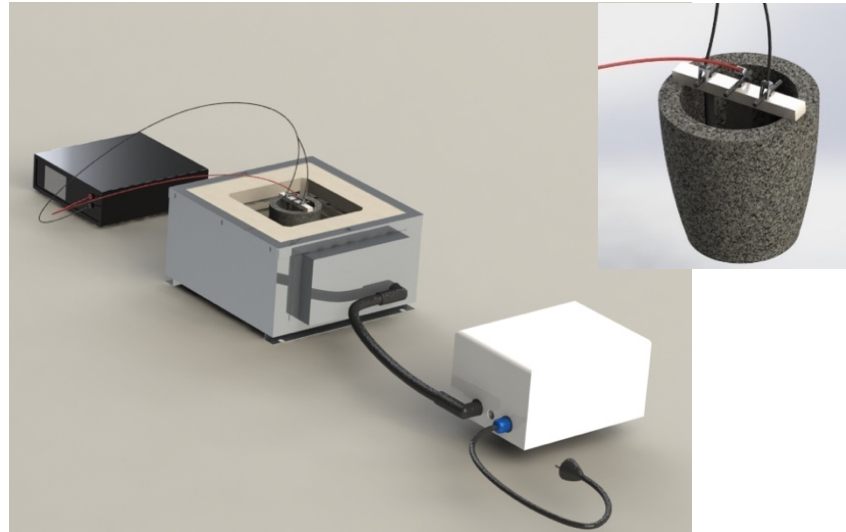
Kawakita vd. (2005), HVOF püskürtmeyle Fe-ağırlıkça %18 Cr-ağırlıkça % 22Ni-ağırlıkça % 2~8 Mo bileşimine sahip kaplamalar oluşturmak için paslanmaz çeliğin molibden (Mo) içeriğini artırdılar. Elde edilen kaplamalar oldukça yoğun, gözeneklilik oranı hacim olarak %0,1'in altında ve ağırlıkça en fazla %0,5 oksijen içeriğiyle daha az oksitlenmiştir. Sülfürik asitte kaplamaların genel korozyon direnci Mo içeriğinin artmasıyla artarken, ağırlıkça %8 Mo içeren kaplamanın korozyon hızı saatte $8,8 \times 10^{-2}$ mg/cm²'ye (~1 mm/yıl) düştü. Yapay deniz suyundaki oyuklanma korozyon direnci de Mo içeriğinin artmasıyla iyileşti ve 316L paslanmaz çelik kaplamaya göre daha üstündür. Yapay deniz suyundaki kaplamaların aralık korozyon direnci iyileştirildi ve ağırlıkça %4 Mo içeren kaplamanın pas lekelerinin miktarı 316L kaplamaya göre %38'e düştü. Sonuç olarak, Mo ilavesi korozyonun iyileştirilmesinde oldukça etkili olduğu görülmüştür.

Suegama vd. (2005), HVOF sistemi kullanılarak hazırlanan paslanmaz çelik kaplamaların püskürtme parametrelerinin korozyona karşı davranışı üzerindeki etkisini araştırdı. Kaplamaların elektrokimyasal davranışının gözeneklilik, çatlakların varlığı ve erimemiş parçtiküller gibi faktörlerden etkilendiği görülmüştür. Bu faktörler kaplamanın tükenmesine ve korozyonun hızlanmasına neden olabilir. Alev enerjisi ve püskürtme mesafesi gibi püskürtme parametreleri kullanılarak çeşitli paslanmaz çelik kaplamalar hazırlanmış ve elektrokimyasal ölçümlerle korozyon dirençleri değerlendirilmiştir. Sonuçlar, püskürtme parametrelerinin kaplamaların korozyon direncini önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Daha yüksek alev enerjisi ve daha uzun püskürtme mesafesi ile püskürtülen kaplamalar daha iyi korozyon direnci sergilemiştir.

6. MATERYAL VE METOT

6.1. Deney Düzeneği ve Numune Hazırlanması

Bu çalışmada altlık malzeme olarak düşük karbonlu çelik kullanılmıştır. Altlık malzeme olarak kullanılan çelik numuneler 20 mm x 20 mm x 4 mm boyutlarında kesildi ve yüzeyleri 1200 grite kadar zımparalanarak hazırlanmıştır. Daha sonra, HVOF termal püskürtme tekniği kullanılarak düşük karbonlu çeliğin yüzeyi ara bağlayıcı (80/20 NiCr) ile kaplanmıştır. Ara bağlayıcı kaplama yapmanın amacı, ara yüzeyde tutunma miktarını artırmanın yanı sıra kırılma tokluğunu ve korozyon direncini iyileştirmektir (Mindivan vd., 2017: 128). Ara bağlayıcı ile kaplanan çelik numuneler daha sonra AISI 316L ostenitik paslanmaz çelik ile kaplanmıştır. Ostenitik paslanmaz çelik kaplamaların yüzeyleri tekrar zımparalanıp, kalınlığı her yerde aynı seviyeye getirildikten sonra 1 mikron Al_2O_3 pasta yardımıyla parlatılmıştır. Düşük karbonlu çelik altlık malzeme yüzeyinde oluşturulan AISI 316L paslanmaz çelik kaplamanın yüzeyi asetonla ultrasonik temizlendi ve alkolle durulandı. Elektroliz deneyleri, elektrik direnç fırınında anot olarak hizmet veren bir grafit pota içinde gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğimiz Şekil 6.1’de verilmiştir. Elektrolit olarak çevresel ve geri dönüşüm olanakları dikkate alınarak %90 $Na_2B_4O_7$ ve %10 Na_2CO_3 bileşimi kullanılmıştır. HVOF püskürtülmüş AISI 316L paslanmaz çelik ise katot olarak polarize edilmiştir. Elektrokimyasal borlama (EB) işlemi 15, 30 ve 60 dk, 200 mA/cm^2 akım yoğunluğunda ve $950 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Bu sayede yüzeyde $FeB + Fe_2B$ tabakalı borür tabakası oluşturulmuştur. Ardından akım kesilerek ve borlanmış AISI 316L çelik aynı elektrolitte $950 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta 45 dk bekletilmiştir (Tablo 6.1).



Şekil 6.1. Elektrokimyasal Borlama Deney Düzeneği.

Tablo 6.1. Uygulanan Kaplama İşlemleri.

Kaplama Kodları	Uygulanan Kaplama İşlemleri
HVOF 316L	Düşük karbonlu çelik yüzeyine HVOF yöntemi ile AISI 316L paslanmaz çelik kaplama
15 dk EB+45 dk B	HVOF püskürtülmüş AISI 316L paslanmaz çelik kaplama yüzeyine %90 Na ₂ B ₄ O ₇ ve %10 Na ₂ CO ₃ çözeltisi içerisinde 950 °C'de 200 mA/cm ² akım yoğunluğunda 15 dk elektrokimyasal borlama (EB) işlemi ve aynı çözeltide 45 dk bekleme
30 dk EB+45 dk B	HVOF püskürtülmüş AISI 316L paslanmaz çelik kaplama yüzeyine %90 Na ₂ B ₄ O ₇ ve %10 Na ₂ CO ₃ çözeltisi içerisinde 950 °C'de 200 mA/cm ² akım yoğunluğunda 30 dk elektrokimyasal borlama (EB) işlemi ve aynı çözeltide 45 dk bekleme
60 dk EB+45 dk B	HVOF püskürtülmüş AISI 316L paslanmaz çelik kaplama yüzeyine %90 Na ₂ B ₄ O ₇ ve %10 Na ₂ CO ₃ çözeltisi içerisinde 950 °C'de 200 mA/cm ² akım yoğunluğunda 60 dk elektrokimyasal borlama (EB) işlemi ve aynı çözeltide 45 dk bekleme

6.2. Kaplama Tabakasının Karakterizasyonu

6.2.1. Optik Metal Mikroskop (OM) Çalışmaları

Mikroyapı incelemeleri için kaplamanın kesiti standart metalografik yöntemle hazırlanmıştır. Kaplamaya ait mikroyapısal görünümler Nikon marka Eclipse LV150 model optik metal mikroskobundan (OM) elde edilmiştir.

6.2.2. Temas Açısı Ölçümleri

Bu tez kapsamında yüzey temas açısı ölçümleri Biolin Scientific Attension marka Theta Lite model cihazda gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.2). Elde edilen kaplamaların yüzeyi saf su ve

etanol ile yıkanmış ardından üzerlerine 5 mikrolitre hacminde saf su damlası birkaç farklı noktaya damlatılmış 2'şer fotoğraf alınarak ortalama temas açısı değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 6.2. Optik Temas Açısı Ölçüm Cihazı.

6.2.3. Mikrosertlik Ölçümleri

Sertlik ölçümleri için Shimadzu HVM mikrosertlik cihazı kullanılmış olup, 0,1 kg maksimum yükte 15 sn bekleme süresinde yüzeyden, 10 farklı bölgeden sertlik ölçülmüştür. Bu çalışmada sertlik ölçüm sonuçlarının istatistiksel ortalaması kullanılmıştır ve standart sapması hesaplanmıştır.

6.2.4. Aşınma Deneyleri

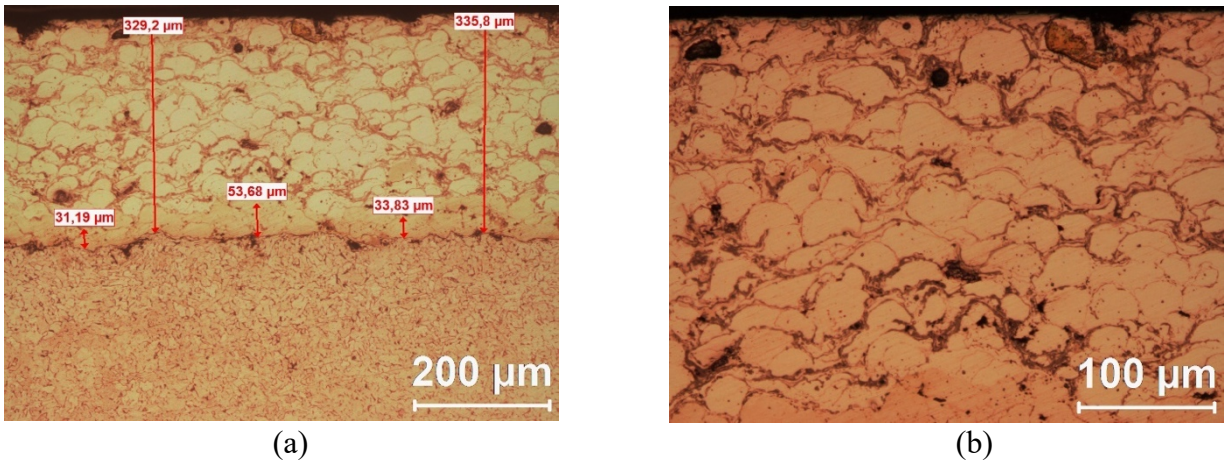
Aşınma testleri, ASTM G133-05 standardına göre 10 mm çaplı Al_2O_3 bilye kullanılarak ileri-geri aşınma deney cihazında gerçekleştirildi. Deney koşulları kuru kayma koşullarında oda sıcaklığında yapıldı. Deneylerde normal yük 20 N, strok uzunluğu 11,5 mm, kayma mesafesi 57,5 m ve kayma hızı 1,9 cm/s olarak kullanıldı. Kuru ortam aşınma deneylerine ait diğer şartlar Tablo 6.2'de verilmiştir.

Kuru ve tribokorozyon şartları altında aşınma deneyleri sonrası numuneler üzerinde oluşan aşınma izleri Mitutoyo Surtest SJ-400 profilometre cihazı ile incelenip aşınma izlerinin 2 boyutlu profilleri elde edildikten sonra numunelerin aşınma kayıpları hesaplanmıştır. Numuneler üzerinde oluşan aşınma izleri ve karşı malzemenin temas yüzeyi OM yardımıyla incelenip yüzeylerde meydana gelen aşınma karakterize edilmiştir.

7. BULGULAR VE TARTIŞMA

7.1. Yapısal Karakterizasyon Sonuçları

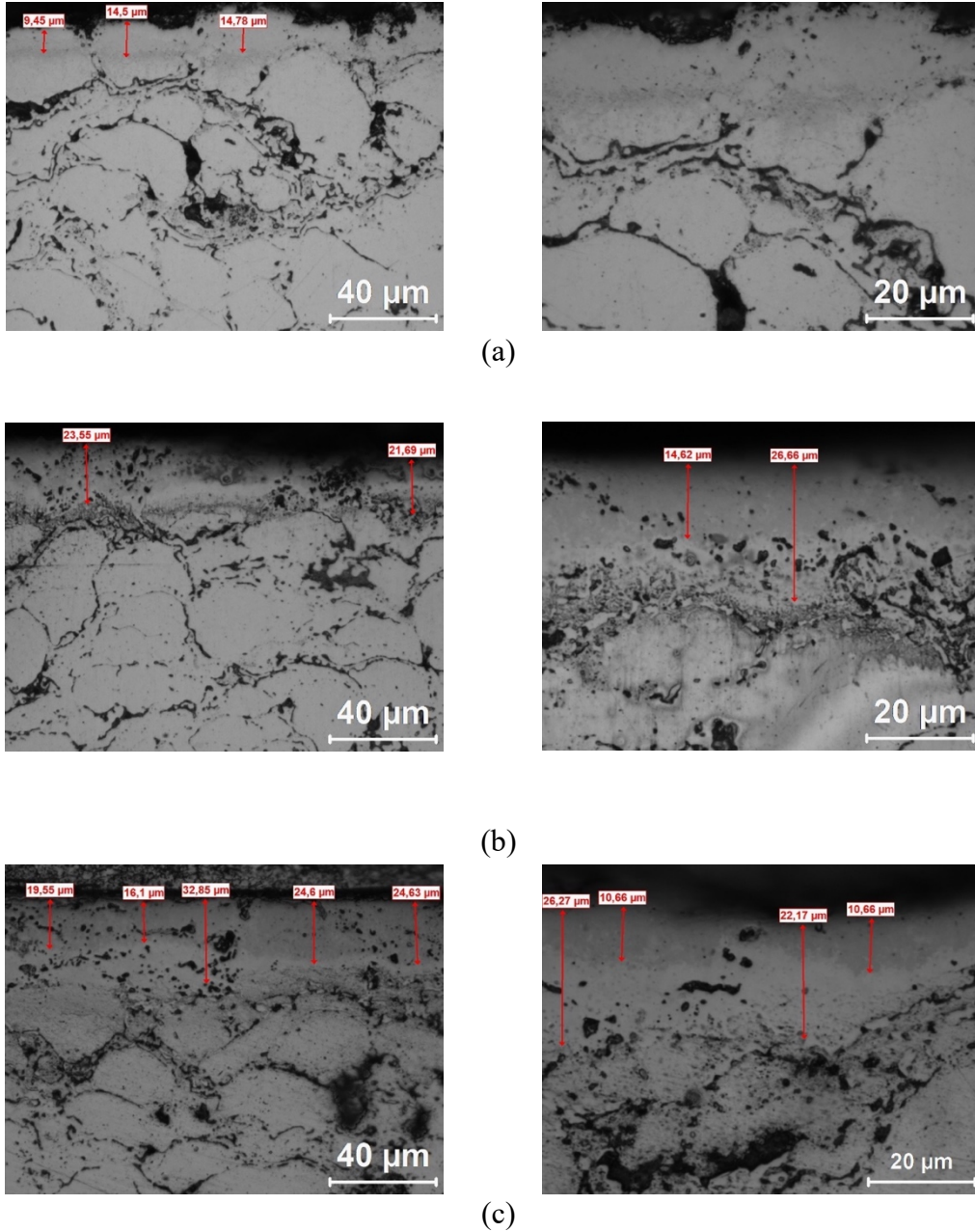
HVOF püskürtme ile elde edilen AISI 316L paslanmaz çelik kaplamaların kesit görüntüleri Şekil 7.1’de verilmiştir. HVOF püskürtülmüş AISI 316L paslanmaz çelik kaplamanın kalınlığı yaklaşık 330 μm olup, kesitte dağılmış gözeneklerin bulunduğu yerlerde siyah noktalar gözlemlendi ve çelik altlığı ara yüzeyde herhangi bir süreksizlik oluşturmayacak şekilde iyi bağlandığını ortaya çıkarmıştır. Şekil 7.1 b’deki yüksek büyütme görüntüsü, kaplama yapısının ergimemiş, yeniden katılmış siletler ve oksitlerden oluştuğunu göstermektedir.



Şekil 7.1. HVOF Püskürtülmüş AISI 316L Paslanmaz Çelik Kaplamanın Kesitinden Alınan (a) Düşük ve (b) Yüksek Büyütme OM Görüntüleri.

Elektrokimyasal borlama yöntemi (15, 30 ve 60 dk EB ve 45 dk bekleme) sonunda elde edilen borürlü yapıların kesit görüntüleri Şekil 7.2’de verilmiştir. Elde edilen bor kaplamanın kesit mikroyapıları incelemelerinde, borürlü yapının oldukça homojen, yoğun ve yüzeyden ayrılmadığı görülmüştür. 950 $^{\circ}\text{C}$ ’de 15 dk EB ve 45 dk bekleme koşulu sonucunda $\sim 14 \mu\text{m}$ ’luk tek tabakalı Fe_2B kalınlığı üretilmiş ve 0,23 $\mu\text{m}/\text{dk}$.’lık bir büyüme oranı elde edilmiştir. Kartal Sireli vd.’nin yapmış oldukları çalışmada, yüzey sertliğini artırmak amacıyla döküm yöntemi ile üretilmiş 400 serisi martenzitik paslanmaz çeliğin yüzeyinde 25 μm kalınlığında tek (Fe_2B) tabakalı borürlü yapı elde etmek için 20 dakika EB’nin yeterli olduğu ve elde edilen borürlü tabakanın sertliğinin $1500 \pm 200 \text{ HV}$ olduğu tespit edilmiştir (Kartal Sireli vd., 2015: 25). EB süresi 30 ve 60 dk olması durumunda kesit görüntülerinde koyu renkli (FeB) ve açık renkli (Fe_2B) bölgelerin oluştuğu gözlenmiştir. 950 $^{\circ}\text{C}$ ’de 30 dk EB ve 45 dk bekleme koşulu sonucunda $\sim 23 \mu\text{m}$ ’lik iki tabakalı $\text{FeB} + \text{Fe}_2\text{B}$ kalınlığı üretilmiş ve 0,3 $\mu\text{m}/\text{dk}$.’lık bir büyüme

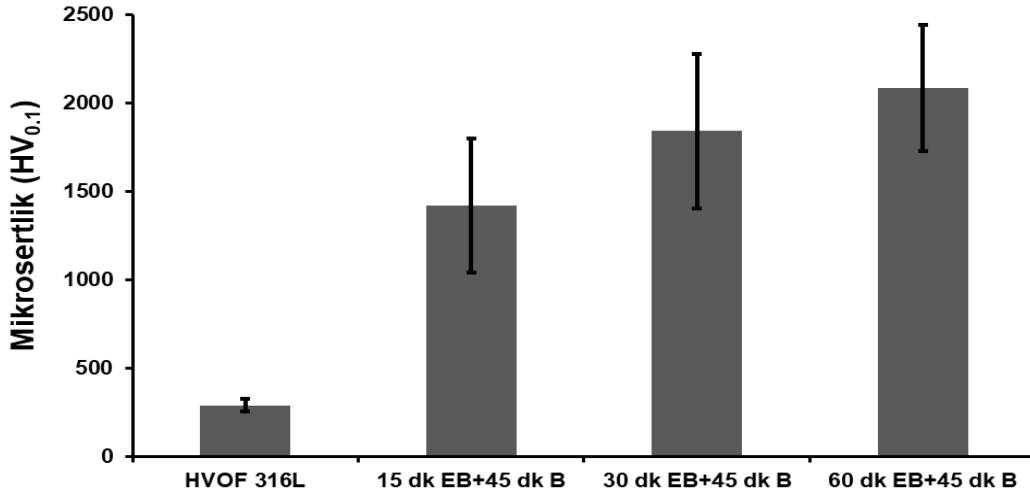
oranı elde edilmiştir. 950 °C’de 60 dk EB ve 45 dk bekleme koşulu sonucunda ~30 µm’lik iki tabakalı FeB+Fe₂B kalınlığı üretilmiş ve 0,285 µm/dk.’lık bir büyüme oranı elde edilmiştir. Döküm yöntemi ile üretilmiş martenzitik paslanmaz çeliğin 950 °C’de 7 saatte pasta borlama ile 86 µm’lik iki tabakalı FeB+Fe₂B yapının elde edildiği bir çalışmada 0,2 µm/dk.’lık bir büyüme hızı elde edilmiştir (Shi vd., 2022: 4). Bu sonuçlar karşılaştırıldığında, bu çalışmada HVOF püskürtülmüş 316L kaplamaların yapısında bulunan oksit tabakalarının difüzyonu engellemesi ihtimaline karşın döküm yöntemi ile üretilen paslanmaz çelik ile hemen hemen benzer büyüme hızı elde edilmiştir (Adachi ve Ueda, 2014: 46).



Şekil 7.2. (a) 15 dk, (b) 30 dk ve (c) 60 dk EB Ardından 45 dk Bekleme Sonunda Elde Edilen Kaplamaların Düşük ve Yüksek Büyütmeli OM Kesit Görüntüleri.

7.2. Sertlik Ölçüm Sonuçları

Sertlik, tribolojik davranışı etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Şekil 7.3'de HVOF püskürtülmüş AISI 316L paslanmaz çelik kaplama ve borlama işlemine tabi tutulmuş numunelerin sertlik ölçüm sonuçları verilmiştir. HVOF püskürtülmüş AISI 316L paslanmaz çelik kaplamada gerçekleştirilen mikrosertlik ölçümleri sonucunda yüzey sertliği 289 ± 36 $HV_{0,1}$ 'dir. Ancak HVOF püskürtülmüş AISI 316L paslanmaz çelik kaplamanın 15, 30 ve 60 dk EB ve 45 dk bekleme koşulu sonucunda yüzey sertlikleri sırasıyla 1419 ± 378 $HV_{0,1}$, 1839 ± 436 $HV_{0,1}$ ve 2085 ± 356 $HV_{0,1}$ olarak ölçülmüştür.



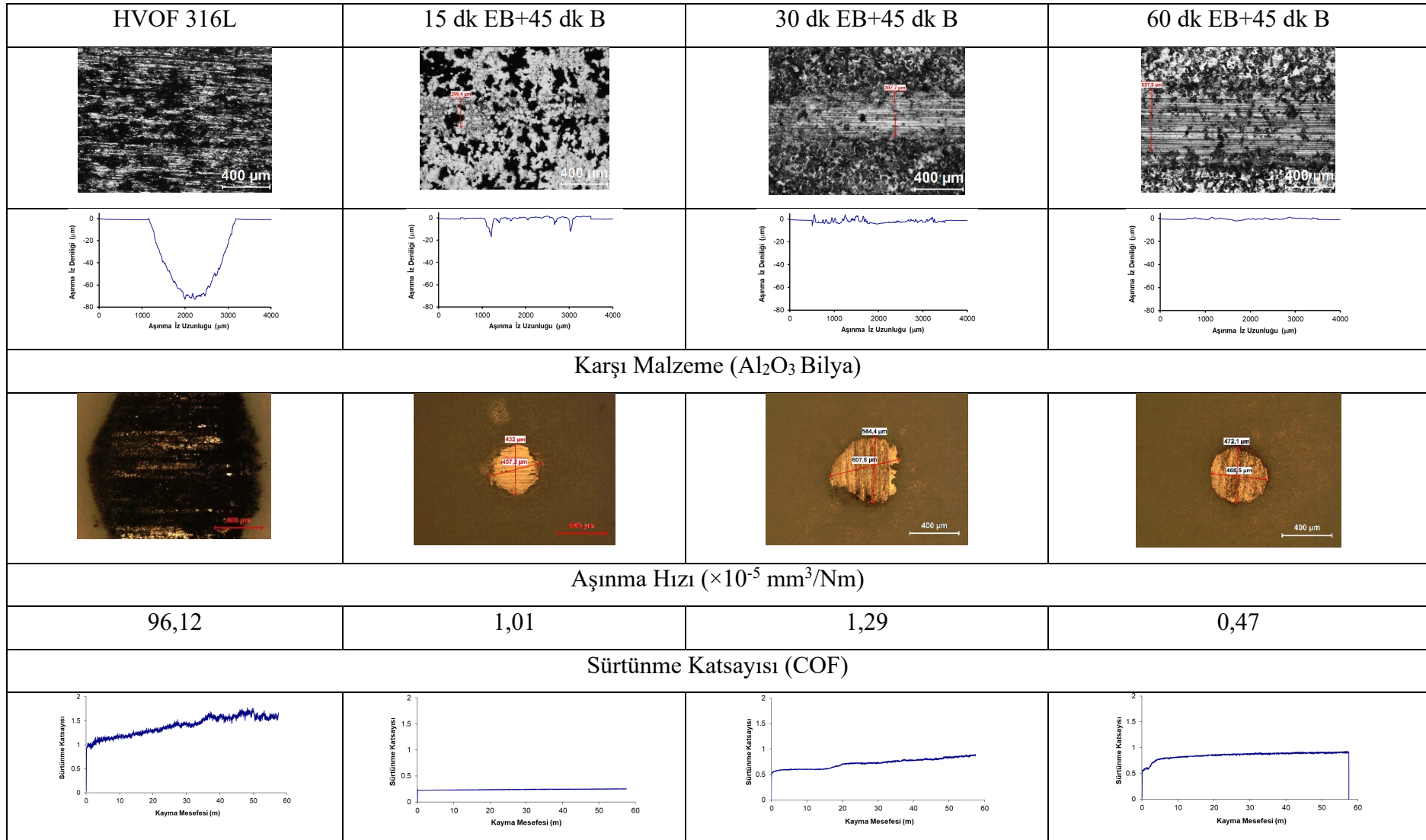
Şekil 7.3. Kaplamalara Ait Yüzey Sertlik Ölçümleri.

7.3. Kuru Ortam Aşınma Sonuçları

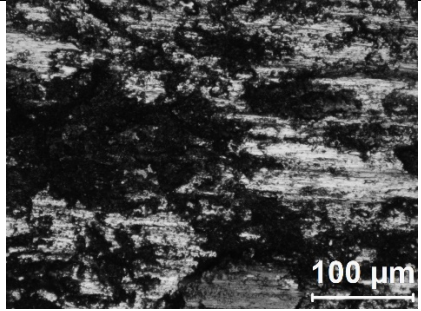
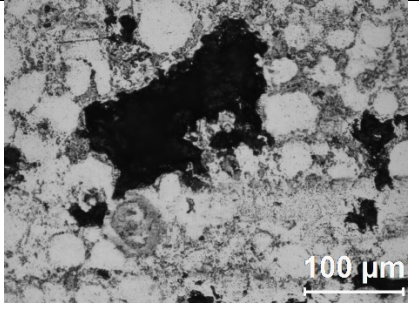
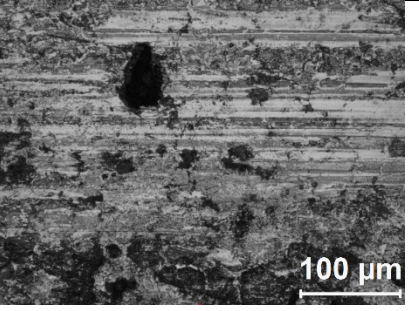
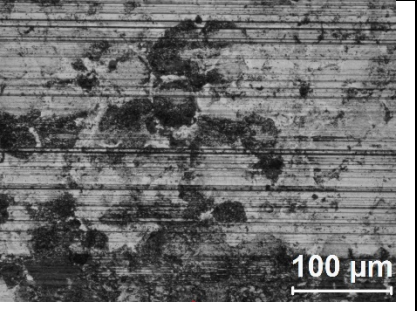
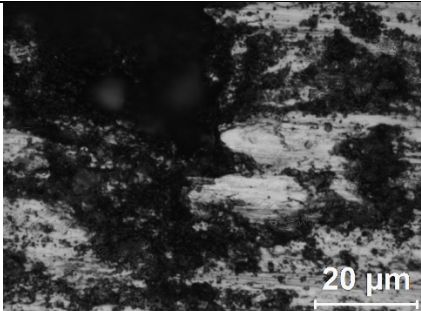
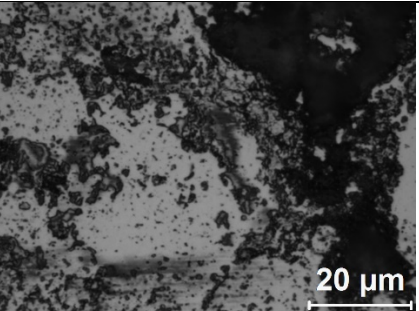
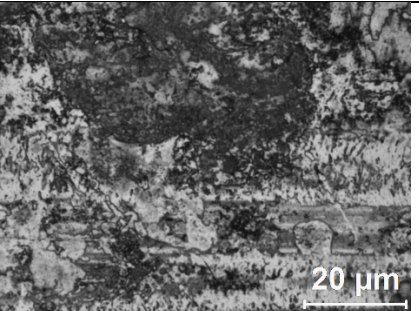
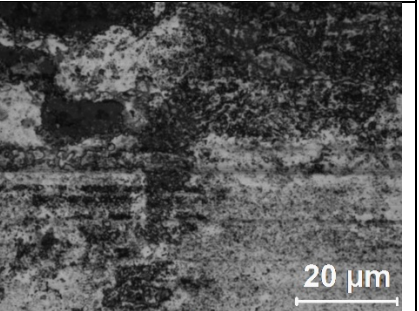
Şekil 7.4'de kuru ortam aşınma deneylerinde kaplamaların ve karşı malzeme olarak kullanılan Al_2O_3 bilyelerin aşınma yüzey görüntüleri, aşınma izlerinin profil görüntüleri, aşınma hızı ve sürtünme katsayısı grafikleri karşılaştırmalı olarak verildiğinde, Al_2O_3 bilye ile oluşturulan aşınma iz derinliği ve geniş yüzey hasarından dolayı borlanmamış HVOF 316L paslanmaz çelik kaplama daha yüksek aşınma hızı ($96,12 \times 10^{-5}$ mm^3/Nm) sergilemektedir ve Al_2O_3 bilyede oluşan aşınma izinin boyutu da büyüktür. İşlem görmemiş HVOF 316L paslanmaz çelik üzerinde kayan Al_2O_3 bilyede oluşan iz büyüklüğü daha geniş bir aşınma izi ile ilişkilendirilen daha büyük bir temas alanını yansıtmaktadır. Temas alanının koyu görünümü, aşınma ürünlerinin Al_2O_3 bilyeye yapıştığını göstermektedir. HVOF püskürtülmüş 316L paslanmaz çelik kaplamada, ergimiş partikül ile sert oksit tabakaların üst üste istiflenmesi ve poroziteden dolayı, HVOF ile elde edilen 316L paslanmaz çelik kaplama, döküm yöntemi ile üretilmiş AISI316L paslanmaz çeliklere ($0,7 \times 10^{-5}$ mm^3/Nm) göre daha yüksek aşınma hızı göstermiştir (García-León vd., 2021a: 5). Düşük aşınma hızı sergileyen borlanmış HVOF 316L

paslanmaz çelik kaplamaların aşınma yüzeyi, HVOF 316L paslanmaz çelik kaplamanın aşınma yüzeyine göre düz ve aşınma izi oluşmamıştır ve Al_2O_3 bilyelerde oluşan aşınma iz büyüklüğünde küçülmüştür. Elektrokimyasal borlanmış HVOF 316L paslanmaz çelik kaplamalarda kullanılan Al_2O_3 bilyelerin aşınma yüzeyleri daha dar olup, borlama sonucu daha az aşınma ile ilişkilendirilebilir. Elektrokimyasal borlanmış paslanmaz çelik kaplamaların aşınma izi derinliği ortalama 2 ila 4 μm arasında değişirken, işlem görmemiş HVOF 316L paslanmaz çelik kaplamada ise ortalama 70 μm 'dur. HVOF 316L paslanmaz çelik kaplamada daha yüksek sürtünme katsayısı değerleri ($\sim 1,0-1,5$ civarında) gözlemlendi ve bu, aşınma izinde oluşan aşınma ürünlerinin ciddi şekilde plastik deformasyonu ve şiddetli ayrılmasının bir sonucu olarak sürtünme katsayısı yüksek bir salınımla değişmektedir. 15 dk, 30 dk ve 60 dk EB ardından 45 dk bekleme sonunda elde edilen HVOF 316L paslanmaz çelik kaplamaların sürtünme katsayıları düşük salınımla sırasıyla 0,25, 0,86 ve 0,90 seviyelerinde kaymanın kararlı olduğu görülmüştür. Elektrokimyasal borlama işlemi, HVOF 316L paslanmaz çelik kaplamanın aşınma hızı ve sürtünme katsayısı değerlerinde belirgin bir değişim yapmıştır. Elektrokimyasal borlama işlemine tabi tutulan HVOF 316L paslanmaz çelik kaplama, benzer kuru ortam aşınma koşullarında kutu borlamaya maruz kalan döküm yöntemi ile üretilmiş AISI316L paslanmaz çeliğe ($0,84 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$) göre hemen hemen benzer aşınma hızı göstermiştir (García-León vd., 2021b: 3).

Şekil 7.5'de işlem görmemiş ve elektrokimyasal borlanmış HVOF 316L paslanmaz çelik kaplamaların aşınma yüzeylerine ait düşük ve yüksek büyütme OM görüntüleri verilmektedir. Aşınma yüzey görüntülerinden, işlem görmemiş HVOF 316L paslanmaz çelik kaplamanın yüzeyinde aşınma ürünleri ve derin yivlerin yanı sıra aşınma sırasındaki plastik deformasyonun sonucu olarak splotlerin düzleştiği görülmektedir. Ayrıca bu yüzey görüntüsü temas yüzeyinde Al_2O_3 bilye tarafından bazı splotlerin dövme işlemine maruz kaldığını göstermektedir. Elektrokimyasal borlanmış HVOF 316L paslanmaz çelik kaplamanın düzgün olmayan yüzeyinde herhangi bir plastik deformasyon, çatlaklar, delaminasyon ve splot kaybı gibi oluşumlar gözlenmemiştir. Bu durum, HVOF 316L üzerinde oluşturulan borürlü yapıların plastik deformasyona karşı dirençli olduğunu ve ayrıca temas yüzeyleri arasındaki yapışmayı ortadan kaldırdığını göstermektedir. Şekil 7.3'deki sertlik sonuçları ile Şekil 7.4'deki aşınma sonuçları birbiri ile uyumlu olup, en yüksek yüzey sertliğine sahip olan 60 dk EB ve ardından 45 dk bekleme sonunda HVOF 316L paslanmaz çelik kaplama daha yüksek aşınma direnci sergilemiştir.



Şekil 7.4. Kuru Ortam Aşınma Deneylerinde İncelenen Kaplamaların ve Karşı Malzeme Olarak Kullanılan Al₂O₃ Bilyelerin Aşınma Yüzey Görüntüleri, Aşınma Profilleri, Aşınma Hızı ve Sürtünme Katsayısı Grafikleri.

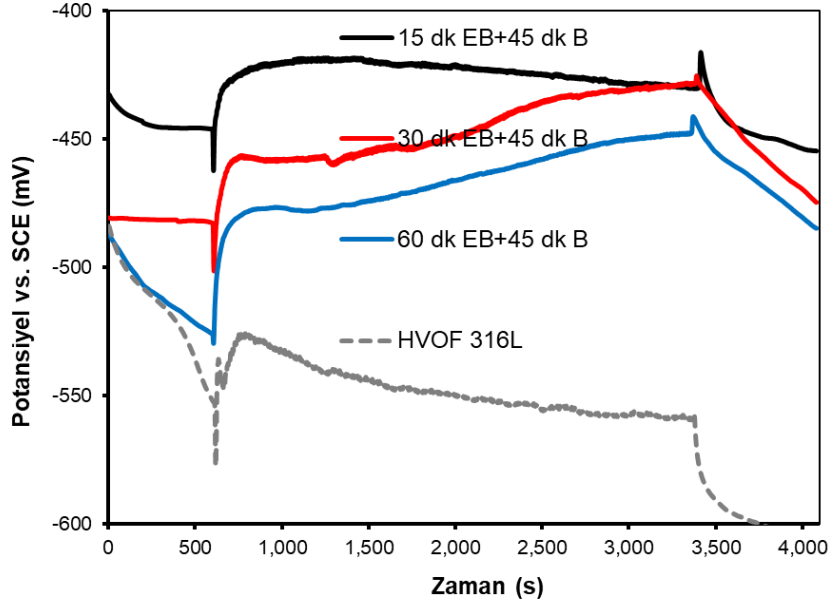
Büyütme	HVOF 316L	15 dk EB+45 dk B	30 dk EB+45 dk B	60 dk EB+45 dk B
x200				
x1000				

Şekil 7.5. Kuru Ortam Aşınma Deneylerinde İncelenen Kaplamaların Aşınma Yüzeylerinin Düşük ve Yüksek Büyütme Görüntüleri.

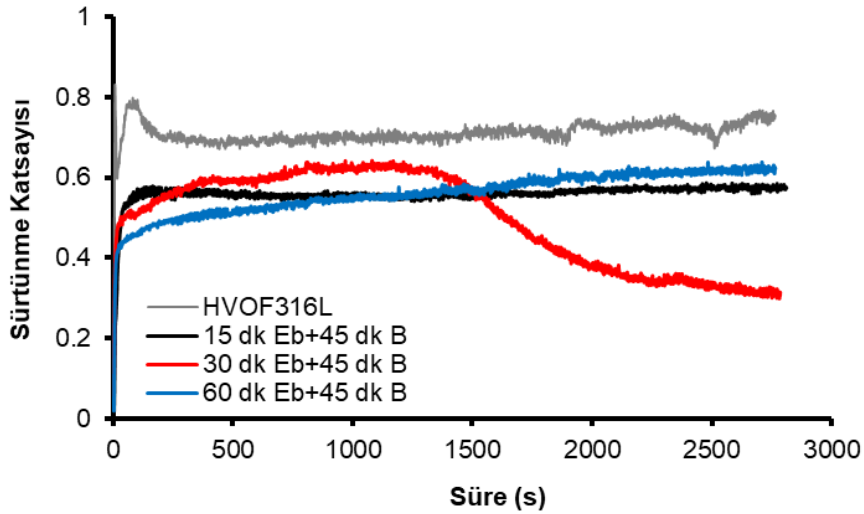
7.4. Tribokorozyon Deney Sonuçları

İşlem görmemiş ve elektrokimyasal borlanmış HVOF 316L paslanmaz çelik kaplamalara ait açık devre potansiyeli ölçümü ile aynı anda yapılan aşınma deneylerinden elde edilen potansiyel değişimleri ve sürtünme katsayıları Şekil 7.6’da verilmiştir. İşlem görmemiş kaplamada aşınma başladığı anda açık devre potansiyelinde hızlı bir azalma meydana gelir. Bunun sebebi, denge halindeki yüzeyin aşınmadan dolayı pasif tabakanın Al_2O_3 bilye ile ayrılması ve yüzeyin aktif hale gelmesidir (García-León vd., 2021b: 2). Aşınma devam ettikçe aktif alan daha da artacak ve açık devre potansiyel değeri daha negatif değer yönünde zamanla azalacaktır. Aşınma sona erdiği zaman açık devre potansiyeli düşük bir hızla azalmaya başlamıştır. Bu durum aşınma izinde yüzeyin tekrar pasif duruma geçtiğini göstermektedir. Ancak elektrokimyasal borlanmış HVOF 316L paslanmaz çelik kaplamalar için farklı bir davranış gözlenmiştir. 15 dk EB ve ardından 45 dk bekleme sonunda HVOF 316L paslanmaz çelik kaplama, aşınma başladığı zaman önce ani azalma ardından açık devre potansiyelinde hızlı bir artış ve aşınma testinin sonuna kadar yaklaşık -420 V gibi kararlı bir şekilde devam etmiştir. Aşınma sona erdiğinde ise OCP değeri ani bir hızla artmaya başlar ve başlangıç potansiyel değere zamanla azalarak yaklaşmıştır. 30 dk ve 60 dk EB ve ardından 45 dk bekleme sonunda HVOF 316L paslanmaz çelik kaplamalar ise aşınma başladığı zaman OCP değerindeki ani azalma miktarı azalmıştır ve ardından aşınma testinin sonuna kadar kararlı bir şekilde artış sergilemiştir. Aşınma sona erdiği zaman OCP ani bir hızla artmaya başlar ve belli bir süre sonra açık devre potansiyel başlangıç değere ulaşır. İşlem görmemiş HVOF 316L paslanmaz çelik kaplamaya göre elektrokimyasal borlanmış HVOF 316L paslanmaz çelik kaplamaların aşınma başlamadan önceki, aşınma sırasında ve sonrasında açık devre potansiyel değerleri daha pozitif değerde olup, EB süresinin 15 dk’dan 60 dk’ya artması durumunda aşınma başlamadan önceki, aşınma sırasında ve sonrasında OCP değerleri kademeli olarak azalmaktadır. Mindivan (2021) tarafından %3,5 NaCl çözeltisi içinde Al-B₄C kompozitlerin açık devre potansiyel değerindeki artışın sebebi olarak koruyucu tabaka olarak hareket eden topaklanmış aşınma ürünleri veya tribo tabakadan dolayı olduğu ileri sürülmüştür (Mindivan, 2021: 9147). Diğer yandan, sürtünme katsayıları işlem görmemiş HVOF 316L paslanmaz çelik kaplamada test boyunca sabit ve değerce yüksektir ($0,73 \pm 0,05$). Test süresince elektrokimyasal borlanmış HVOF 316L paslanmaz çelik kaplamaların süreye bağlı olarak değişen sürtünme katsayısı, işlem görmemiş HVOF 316L paslanmaz çelik kaplamadan düşüktür. 15 dk ve 60 dk EB ve ardından 45 dk bekleme sonunda elde edilen HVOF 316L paslanmaz çelik kaplamalar hemen hemen benzer sürtünme katsayısı grafikleri sergilerken aşınma sırasında 1500 s’den sonra yüksek sürtünme

katsayına sahip olan 30 dk EB+45 B kaplamanın sürtünme katsayısı zamana bağlı olarak azalmaktadır. Sürtünme katsayısındaki bu fark, incelenen şartlar altında temas alanı ve kaplamaların mekanik özelliklerdeki farklılıklardan kaynaklanmaktadır.



(a)

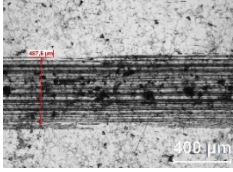
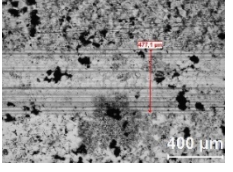
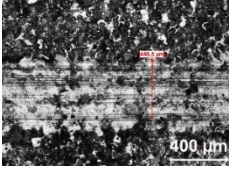
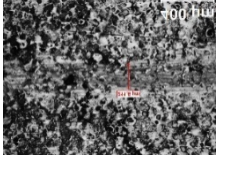
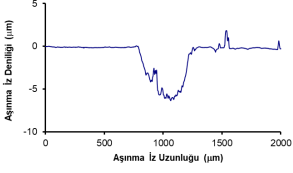
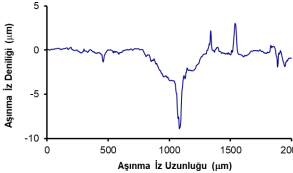
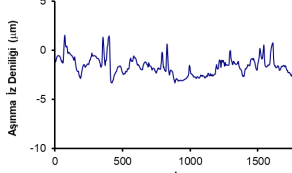
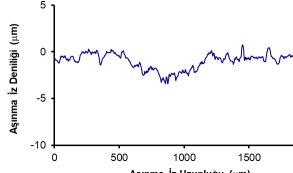

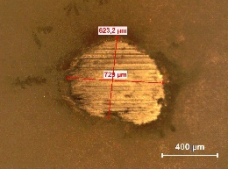
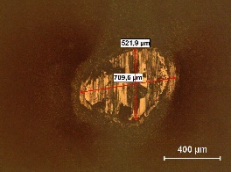
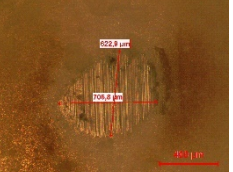
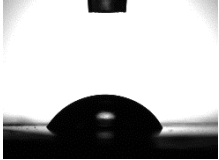





(b)

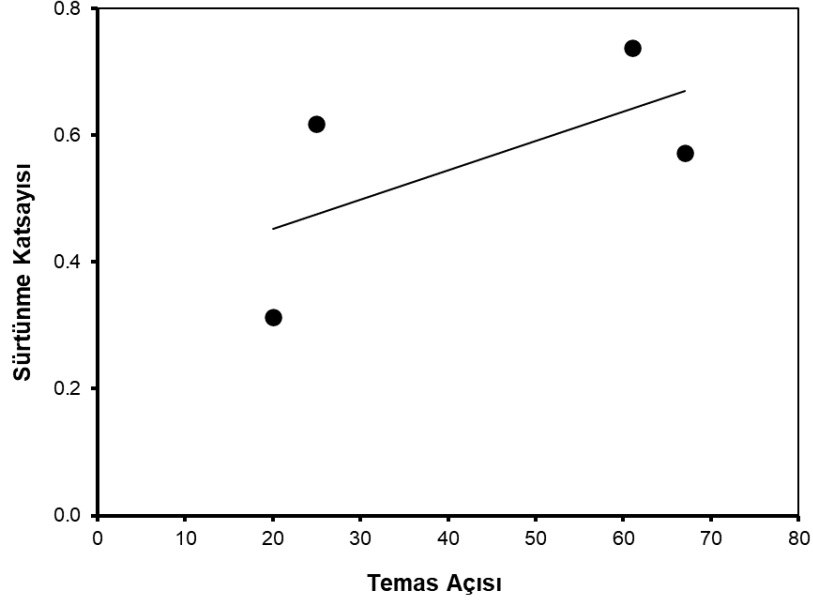
Şekil 7. 6. İşlem görmemiş ve elektrokimyasal borlanmış HVOF 316L paslanmaz çelik kaplamaların aşınma esnasındaki (a) açık devre potansiyeli ve (b) sürtünme katsayısı eğrileri.

Şekil 7.7’de açık devre şartlarında gerçekleştirilen tribokorozyon deneylerinde kaplamaların ve karşı malzeme olarak kullanılan Al_2O_3 bilyelerin aşınma yüzey görüntüleri, aşınma profilleri, aşınma hızı ve temas açısı görüntüleri karşılaştırmalı olarak verildiğinde,

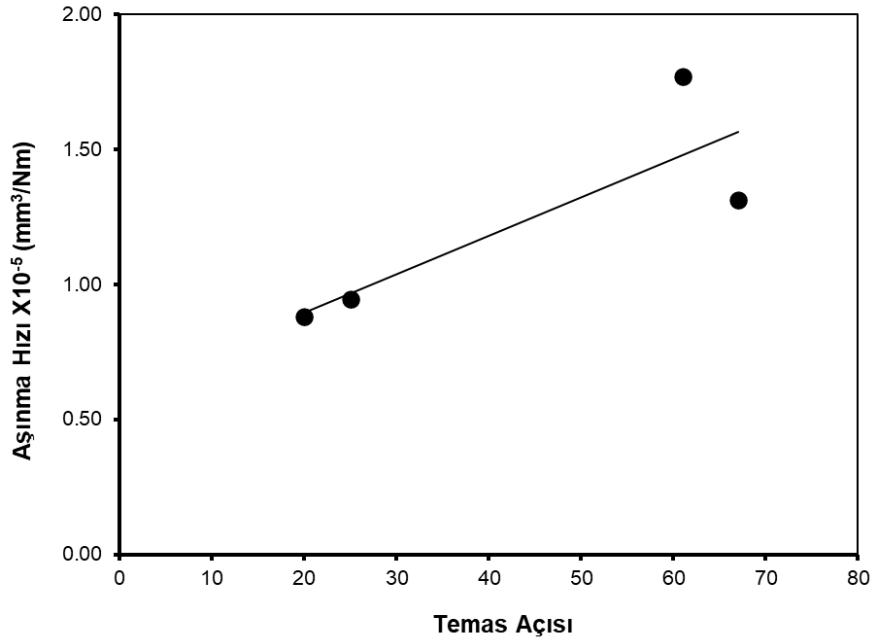
elektrokimyasal borlanmış kaplamalarda EB süresi 15 dk'dan 60 dk'ya arttıkça daha düşük aşınma hızı ve daha düşük temas açısı elde edilmektedir. Özellikle sulu yağlama koşullarında, suyun düşük viskozitesi nedeniyle suya dayalı yağlama film kalınlığı çok incedir, ıslatabilirlik ise kaplamalar için suya dayalı yağlama altında son derece önemli olacaktır. Bu nedenle, kaplamaların ıslatabilirlik ile tribolojik davranışı arasındaki ilişkisi incelendi. Katı yüzeyin ıslatabilirliği genellikle temas açısı (θ) ile ifade edilir. Şekil 7.8, temas açısı ile sürtünme katsayısı ve aşınma hızı arasındaki ilişkiyi göstermektedir. En düşük temas açısına sahip olan 30 dk EB ve ardından 45 dk bekleme sonunda elde edilen HVOF 316L paslanmaz çelik kaplama en düşük sürtünme katsayısını gösterdi (Şekil 7.6), ve benzer temas açısına sahip olan 60 dk EB ve ardından 45 dk bekleme sonunda elde edilen HVOF 316L paslanmaz çelik kaplama ise aşınmanın başlangıç bölgesinde (0 ile 1150 s içerisinde) incelenen kaplamalar içerisinde en düşük sürtünme katsayısı gösterdi. Sürtünme katsayısı, temas açısının artmasıyla artma eğilimi göstermektedir. Bu nedenle, elektrokimyasal borlanmış kaplamalar içerisinde EB süresi 15 dk'dan 60 dk'ya arttıkça oldukça düşük temas açısına neden olduğu ve sulu yağlama altında sürtünme katsayısını azaltmada önemli bir rol oynayacağı ileri sürülebilir. Karşılaştırmalı olarak düşük temas açısına sahip olan 30 dk ve 60 dk EB ve ardından 45 dk bekleme sonunda elde edilen HVOF 316L paslanmaz çelik kaplamalar düşük aşınma hızı gösterdi (Şekil 7.8 b).

HVOF 316L	15 dk EB+45 dk B	30 dk EB+45 dk B	60 dk EB+45 dk B
			
			
Karşı Malzeme (Al₂O₃ Bilya)			
			
Aşınma Hızı ($\times 10^{-5}$ mm³/Nm)			
1,77	1,31	0,88	0,94
Temas Açısı			
			

Şekil 7.7. İncelenen Kaplamaların ve Karşı Malzeme Olarak Kullanılan Al₂O₃ Bilyelerin Aşınma Yüzey Görüntüleri, Aşınma Profilleri, Aşınma Hızı ve Temas Açısı Görüntüleri.



(a)

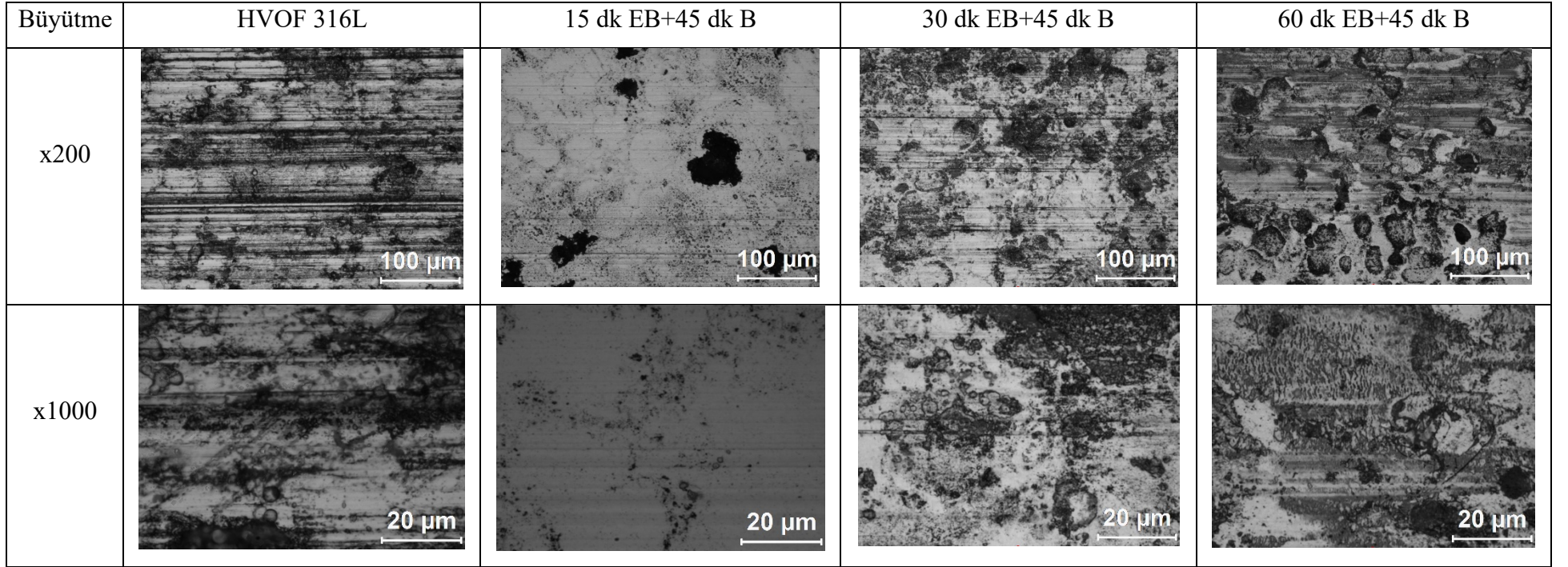


(b)

Şekil 7. 8. Temas Açısı ile (a) Sürtünme Katsayısı ve (b) Aşınma Hızı Arasındaki İlişki.

Açık devre şartlarında tribokorozyon deneylerinden sonra incelenen kaplamaların aşınma yüzeyleri OM ile incelenmiştir (Şekil 7.9). İşlem görmemiş HVOF 316L paslanmaz çelik kaplamanın kayma yönünde abrasif çizikler içeren plastik deformasyon ve sürüklenme izleri gözlenmiştir (Şekil 7.9). Bunun sebebi olarak Al_2O_3 bilyenin abrasif etkisiyle oksit yüzey filmin kaldırılmasından dolayı kaplamanın çözünmesi olarak düşünülmektedir. Paslanmaz çeliklerin tribokorozyon davranışını inceleyen Mindivan ve Mindivan, (2016), aşınmadan dolayı oluşan

plastik deformasyonun yüzey filminin yeniden oluşmasını engellediğini ve paslanmaz çeliğin çözünmesini hızlandırdığını ileri sürmüştür (Mindivan ve Mindivan, 2016: 523). Elektrokimyasal borlama prosesi ile aşınma yüzeyindeki hasar önemli oranda azalmaktadır (Şekil 7.9). Elektrokimyasal borlanmış HVOF 316L paslanmaz çelik kaplamaların aşınma izi borür tabakasının yüksek sertliğinden dolayı nispeten düz yüzey karakteristiği sergilediği için aşınma izinde daha az plastik akış ve çok az ince çizikler mevcuttur.



Şekil 7. 9. Tribokorozyon Deneyinden Sonra İncelenen Kaplamaların Aşınma Yüzeylerinin Düşük ve Yüksek Büyütme Görüntüleri.

8. SONUÇLAR

Bu çalışmada ticari kalitede düşük karbonlu çeliğin yüzeyine HVOF püskürtme işlemi ile AISI 316L paslanmaz çelik kaplama ve HVOF 316L kaplama + elektrokimyasal borlama ile kaplamanın birleşimi olan dubleks yüzey işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu kaplamalarda yapılan mikroyapı incelemeleri, yüzey sertlik ölçümleri, kuru ortam aşınma ve tribokorozyon deneylerinden elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir;

1. HVOF püskürtülmüş AISI 316L paslanmaz çelik kaplama ($\sim 330 \mu\text{m}$) çelik altlığa ara yüzeyde herhangi bir süreksizlik oluşturmayacak şekilde iyi bağlanmış olup, yüzey sertliği $289 \pm 36 \text{ HV}_{0,1}$ 'dir. Kaplama yapısı ergimemiş, yeniden katılmış splotler ve oksitlerden oluşmaktadır.
2. Elektrokimyasal borlama yöntemi (15, 30 ve 60 dk EB ve 45 dk bekleme) sonunda elde edilen borürlü yapıların oldukça homojen, yoğun ve yüzeyden ayrılmadığı tespit edilmiştir. 15 dk EB ve 45 dk bekleme koşulu sonucunda yüzey sertliği $1419 \pm 378 \text{ HV}_{0,1}$ olan $\sim 14 \mu\text{m}$ 'luk tek tabakalı Fe_2B kalınlığı üretilmiş ve $0,23 \mu\text{m}/\text{dk.}$ 'lık bir büyüme oranı elde edilmiştir. 30 dk EB ve 45 dk bekleme koşulu sonucunda yüzey sertliği $1839 \pm 436 \text{ HV}_{0,1}$ olan $\sim 23 \mu\text{m}$ 'lik iki tabakalı $\text{FeB} + \text{Fe}_2\text{B}$ yapı üretilmiş ve $0,3 \mu\text{m}/\text{dk.}$ 'lık bir büyüme oranı belirlenmiştir. 60 dk EB ve 45 dk bekleme koşulu sonucunda yüzey sertliği $2085 \pm 356 \text{ HV}_{0,1}$ olan $\sim 30 \mu\text{m}$ 'lik iki tabakalı $\text{FeB} + \text{Fe}_2\text{B}$ kalınlığı üretilmiş ve $0,285 \mu\text{m}/\text{dk.}$ 'lık bir büyüme oranı elde edilmiştir.
3. Kuru ortam aşınma koşullarında HVOF püskürtülmüş 316L paslanmaz çelik kaplamanın yapısında bulunan ergimemiş partikül ile sert oksit tabakaların üst üste istiflenmesi ve poroziteden dolayı daha yüksek aşınma hızı ($96,12 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$) ve daha yüksek sürtünme katsayısı değerleri ($\sim 1,0-1,5$) belirlenmiştir.
4. HVOF 316L paslanmaz çeliğe uygulanan elektrokimyasal borlama işlemi sayesinde EB süresine bağlı olarak kuru ortam aşınma hızları 75-200 kat arasında azalmaktadır.
5. Açık devre şartlarında (OCP) gerçekleştirilen tribokorozyon deneylerinde elektrokimyasal borlanmış kaplamaların yüzey temas açısı arttıkça sürtünme katsayısı ve aşınma hızı artmaktadır.

KAYNAKÇA

Abdul, R., Rashid, R., Muhammed, &, Javed, A., Barr, C., Palanisamy, S., Matthews, N., & Simon Dargusch, M. (2021). Effect of In Situ Tempering on the Mechanical, Microstructural and Corrosion Properties of 316L Stainless Steel Laser-Cladded Coating on Mild Steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 117, 2949-2958. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07886-7>/Published.

Abdullah, B., Basir, M. H., Yusof, K., Alias, S. K., & Idham, M. F. (2019). The Improvement of Wear Characteristics on 316L Stainless Steel by Dual Surface Treatment Method. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 9(1), 5826-5831. <https://doi.org/10.35940/ijeat.A3012.109119>.

Adachi, S., & Ueda, N. (2012). Formation of S-Phase Layer on Plasma Sprayed AISI 316L Stainless Steel Coating by Plasma Nitriding at Low Temperature. *Thin Solid Films*, 523, 11-14. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2012.05.062>.

Adachi, S., & Ueda, N. (2013). Surface Hardness Improvement of Plasma-Sprayed AISI 316L Stainless Steel Coating by Low-Temperature Plasma Carburizing. *Advanced Powder Technology*, 24(5), 818-823. <https://doi.org/10.1016/J.APT.2012.12.011>.

Adachi, S., & Ueda, N. (2014). Combined Plasma Carburizing and Nitriding of Sprayed AISI 316L Steel Coating for Improved Wear Resistance. *Surface and Coatings Technology*, 259(PA), 44-49. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.07.010>.

Al-Asadi, M. M., & Al-Tameemi, H. A. (2022). A Review of Tribological Properties and Deposition Methods for Selected Hard Protective Coatings. *Tribology International*, 176. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107919>.

Al-Mangour, B., Mongrain, R., Irissou, E., & Yue, S. (2013). Improving the Strength and Corrosion Resistance of 316L Stainless Steel for Biomedical Applications Using Cold Spray. *Surface and Coatings Technology*, 216, 297-307. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.11.061>.

Alwan, A. S., & Jaddoa, A. A. (2020). Effect of Thermochemical and Mechanical Surface Treatments on Metallographic of Biomaterial Stainless Steel Grad 316L. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, 43(3), 324-332. <https://www.researchgate.net/publication/340104950>.

- Arslan, M., Karimzadehkhoei, M., Sireli, G. K., Coskun, O. K., Sert, M., & Timur, S.** (2022). Investigating Growth of Iron Borides with the Formation of Monolithic Fe₂B Layer on AISI 304 Stainless Steel via Cathodic Reduction and Thermal Diffusion-Based Boriding. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 31(4), 3274-3286. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-06417-5>.
- Arteaga-Hernandez, L. A., Cuaa-Moreu, C. A., Gonzalez-Rivera, C. E., Alvarez-Vera, M., Ortega-Saenz, J. A., & Hernandez-Rodriguez, M. A. L.** (2021). Study of Boriding Surface Treatment in the Tribological Behavior of an AISI 316L Stainless Steel. *Wear*, 477. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203825>.
- Başman, G., Merih ARIKAN, M., Fahir ARISOY, C., Kelami ŞEŞEN, M.** (2023). A Kinetic Study of Thermochemically Borided AISI 316L Stainless Steel. *Journal of Scientific Reports*, 279-296.
- Bobzin, K., Zhao, L., Öte, M., & Königstein, T.** (2019). Development of a FeCrMnBC-based Economical Wear and Corrosion Resistant Coating. *Surface and Coatings Technology*, 362, 12-20. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.01.074>.
- Campos-Silva, I. E., & Rodríguez-Castro, G. A.** (2015). Boriding to Improve the Mechanical Properties and Corrosion Resistance of Steels. İçinde *Thermochemical Surface Engineering of Steels: Improving Materials Performance* (ss. 651-702). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857096524.5.651>.
- Dobler K. Kreye H. & Schwetzke R.** (2000). Oxidation of Stainless Steel in the High Velocity Oxy-Fuel Process. *Journal of Thermal Spray Technology*, 9(3), 407-413.
- Farfan-Cabrera, L. I., Reséndiz-Calderón, C. D., Hernandez-Peña, A., Campos-Silva, I., Gallardo-Hernández, E. A., & Contla-Pacheco, A. D.** (2023). Tribological Effects of Boriding Treatment on a Low Carbon Steel Repaired by Wire and Arc Additive Manufacturing. *Surface and Coatings Technology*, 465. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129574>.
- Fauchais, P., & Vardelle, A.** (2012). Thermal Sprayed Coatings Used Against Corrosion and Corrosive Wear. *Advanced Plasma Spray Applications* (ss. 3-32). InTech. <https://doi.org/10.5772/34448>.
- Fernández-Valdés, D., Meneses-Amador, A., López-Liévano, A., & Ocampo-Ramírez, A.** (2021a). Sliding Wear Analysis in Borided AISI 316L Steels. *Materials Letters*, 285. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.129138>.

- Fernández-Valdés, D., Vasquez-De la Rosa, O., Rodríguez-Castro, G. A., Meneses-Amador, A., López-Liévano, A., & Ocampo-Ramírez, A.** (2021b). A numerical-Experimental Study of AISI 316L Borided Steels Under Cyclic Contact Loading. *Surface and Coatings Technology*, 423. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127556>.
- García-León, R. A., Afanador-García, N., & Guerrero-Gómez, G.** (2023). A Scientometric Review on Tribocorrosion in Hard Coatings. *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*, 9(2). <https://doi.org/10.1007/s40735-023-00759-4>.
- García-León, R. A., Martínez-Trinidad, J., Campos-Silva, I., Figueroa-López, U., & Guevara-Morales, A.** (2021a). Development of Tribological Maps on Borided AISI 316L Stainless Steel Under Ball-On-Flat Wet Sliding Conditions. *Tribology International*, 163. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107161>.
- García-León, R. A., Martínez-Trinidad, J., Campos-Silva, I., Figueroa-López, U., & Guevara-Morales, A.** (2021b). Wear Maps of Borided AISI 316L Steel Under Ball-On-Flat Dry Sliding Conditions. *Materials Letters*, 282. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128842>.
- García-Léon, R. A., Martínez-Trinidad, J., Campos-Silva, I., & Wong-Angel, W.** (2020). Mechanical Characterization of the AISI 316L Alloy Exposed to Boriding Process. *DYNA (Colombia)*, 87(213), 34-41. <https://doi.org/10.15446/dyna.v87n213.82924>.
- García-León, R. A., Martínez-Trinidad, J., Zepeda-Bautista, R., Campos-Silva, I., Guevara-Morales, A., Martínez-Londoño, J., & Barbosa-Saldaña, J.** (2021). Dry Sliding Wear Test on Borided AISI 316L Stainless Steel Under Ball-On-Flat Configuration: A Statistical Analysis. *Tribology International*, 157. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.106885>.
- Gateman, S. M., Halimi, I., Costa Nascimento, A. R., Lacasse, R., Schulz, R., Moreau, C., Chromik, R., & Mauzeroll, J.** (2019). Using Macro and Micro Electrochemical Methods to Understand the Corrosion Behavior of Stainless Steel Thermal Spray Coatings. *npj Materials Degradation*, 3(1). <https://doi.org/10.1038/s41529-019-0087-0>.
- Guilemany, J. M., Fernández, J., Espallargas, N., Suegama, P. H., & Benedetti, A. V.** (2006). Influence of Spraying Parameters on the Electrochemical Behaviour of HVOF Thermally Sprayed Stainless Steel Coatings in 3.4% NaCl. *Surface and Coatings Technology*, 200(9), 3064-3072. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.02.116>.
- Joshi, S.** (2020). Advances in Thermal Spray Technology. *Materials*, 13(16). <https://doi.org/10.3390/MA13163521>.

- Kartal Sireli, G., Yelkarasi, C., Ozkalafat, P., Timur, S., & Urgan, M.** (2015). Enhanced Surface Hardness by Boron Diffusion in Martensitic Stainless Steel via Cathodic Reduction and Thermal Diffusion Based Boriding (CRTD-Bor). *Applied Mechanics and Materials*, 719-720, 25-28. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.719-720.25>.
- Kawakita, J., Kuroda, S., Fukushima, T., & Kodama, T.** (2005). Improvement of Corrosion Resistance of High-Velocity Oxyfuel-Sprayed Stainless Steel Coatings by Addition of Molybdenum. *Journal of Thermal Spray Technology*, 14(2), 224-230. <https://doi.org/10.1361/10599630523782>.
- Kheyroodin, M., Habibolahzadeh, A., & Mousavi, S. B.** (2017). Wear and Corrosion Behaviors of Duplex Surface Treated 316L Austenitic Stainless Steel via Combination of Boriding and Chromizing. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 53(1), 105-111. <https://doi.org/10.1134/S2070205117010117>.
- Korkmaz, M. E., Gupta, M. K., Singh, G., Kuntoğlu, M., Patange, A., Demirsoz, R., Ross, N. S., & Prasad, B.** (2023). Machine Learning Models for Online Detection of Wear and Friction Behaviour of Biomedical Graded Stainless Steel 316L Under Lubricating Conditions. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12108-3>.
- Kumar, S., & Kumar, R.** (2021). Influence of Processing Conditions on the Properties of Thermal Sprayed Coating: A Review. *Surface Engineering*, 37(11), 1339-1372. <https://doi.org/10.1080/02670844.2021.1967024>.
- Kutschmann, P., Lindner, T., Börner, K., Reese, U., & Lampke, T.** (2019). Effect of Adjusted Gas Nitriding Parameters on Microstructure and Wear Resistance of HVOF-Sprayed AISI 316L Coatings. *Materials*, 12(11). <https://doi.org/10.3390/ma12111760>.
- Li, J., Tao, X., Wu, W., Xie, G., Yang, Y., Zhou, X., & Zhang, S.** (2023). Effect of Arc Current on the Microstructure, Tribological and Corrosion Performances of AISI 420 Martensitic Stainless Steel Treated by Arc Discharge Plasma Nitriding. *Journal of Materials Science*, 58(5), 2294-2309. <https://doi.org/10.1007/s10853-023-08161-8>.
- Limpichaipanit, A., Wirojanupatump, S., & Jiansirisomboon, S.** (2015). Fabrication and Properties of Thermal Sprayed Stainless Steel-Based Nanocomposite Coatings. *Surface and Coatings Technology*, 272, 96-101. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.04.018>.

- Lindner, T., Kutschmann, P., Löbel, M., & Lampke, T.** (2018). Hardening of HVOF-Sprayed Austenitic Stainless-Steel Coatings by Gas Nitriding. *Coatings*, 8(10), 8 348. <https://doi.org/10.3390/coatings8100348>.
- Lindner, T., Löbel, M., Hunger, R., Berger, R., & Lampke, T.** (2020). Boriding of HVOF-Sprayed Inconel 625 Coatings. *Surface and Coatings Technology*, 404. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126456>.
- Löbel, M., Lindner, T., Hanisch, N., & Lampke, T.** (2021). High-Temperature Wear Behaviour of Borided Inconel 718 HVOF Coatings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1147(1), 012032. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1147/1/012032>.
- Mindivan, F., & Mindivan, H.** (2016). Surface Properties and Tribocorrosion Behaviour of a Thermal Sprayed Martensitic Stainless Steel Coating After Pulsed Plasma Nitriding Process. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 2(4), 514-526. <https://doi.org/10.1080/2374068X.2016.1247232>.
- Mindivan, H.** (2021). A Study on the Corrosion and Tribocorrosion Behavior of Al-30 Vol.% B4C Composite Produced by Mechanical Milling and Hot Pressing. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30(12), 9140-9148. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-06127-y>.
- Mindivan, H., Kale, A., Berse, U., & Samur, R.** (2017). A Comparative Study of Thermal Sprayed AISI 316L Stainless Steel Coatings. *El-Cezerî Journal of Science and Engineering*, 4(1), 127-134. www.tubiad.org.
- Nascimento, A. R. C., Gateman, S. M., Mauzeroll, J., Savoie, S., Schulz, R., & Moreau, C.** (2019). Electrochemical Behavior, microstructure, and surface chemistry of Thermal-Sprayed Stainless-Steel Coatings. *Coatings*, 9(12). <https://doi.org/10.3390/coatings9120835>.
- Özel, S.** (2013). Thermal Spray Methods Used on the Surface Coating Processes. *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi BEU Journal of Science*, 2(1), 88-97.
- Padmavathi, G., Sarada, B. N., Shanmuganathan, S. P., Padmini, B. V., & Mohan, N.** (2019). Effects of High Velocity Oxy Fuel Thermal Spray Coating on Mechanical and Tribological Properties of Materials-A Review. *Materials Today: Proceedings*, 27, 2152-2157. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.085>.

- Park, G., Bae, G., Moon, K., & Lee, C.** (2013). Effect of Plasma Nitriding and Nitrocarburizing on HVOF-Sprayed Stainless Steel Coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 22(8), 1366-1373. <https://doi.org/10.1007/s11666-013-0035-4>.
- Reséndiz-Calderon, C. D., Rodríguez-Castro, G. A., Meneses-Amador, A., Campos-Silva, I. E., Andraca-Adame, J., Palomar-Pardavé, M. E., & Gallardo-Hernández, E. A.** (2017). Micro-Abrasion Wear Resistance of Borided 316L Stainless Steel and AISI 1018 Steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26(11), 5599-5609. <https://doi.org/10.1007/s11665-017-3004-0>.
- Saenz-Betancourt, C. C., Rodríguez, S. A., & Coronado, J. J.** (2022). Effect of Boronising on the Cavitation Erosion Resistance of Stainless Steel Used for Hydromachinery Applications. *Wear*, 498-499. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204330>.
- Shi, M., Li, J., Mao, W., Li, S., Yang, Z., & Ma, X.** (2022). Improving The Wear and Corrosion Resistance of Martensitic Stainless Steel by Paste Boriding Treatment. *Materials Science and Technology (United Kingdom)*, 39(3), 300-309. <https://doi.org/10.1080/02670836.2022.2110392>.
- Shrestha, S., & Sturgeon, A. J.** (2004). Use of Advanced Thermal Spray Processes for Corrosion Protection in Marine Environments. *Surface Engineering*, 20(4), 237-243. <https://doi.org/10.1179/026708404225016337>.
- Suegama, P. H., Fugivara, C. S., Benedetti, A. V., Fernández, J., Delgado, J., & Guilemany, J. M.** (2005). Electrochemical Behavior of Thermally Sprayed Stainless Steel Coatings in 3.4% NaCl Solution. *Corrosion Science*, 47(3 SPEC. ISS.), 605-620. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2004.07.003>.
- Vigneshkumar, M., Murugan, S. S., Varthanan, P. A., Gokilakrishnan, G., Gobikrishnan, N., & Pagutharivu, A. P.** (2022). High Velocity Oxygen Fuel Coating for Enhancing Tribological Behaviour of Engineering Metals. *AIP Conference Proceedings*, 2527. <https://doi.org/10.1063/5.0108133>.
- Zhang, C., & Fujii, M.** (2016). Tribological Behavior of Thermally Sprayed WC Coatings Under Water Lubrication. *Materials Sciences and Applications*, 07(09), 527-541. <https://doi.org/10.4236/msa.2016.79045>.

Zouari, S., Ghorbel, H., Danlos, Y., Liao, H., & Elleuch, R. (2019). Comparative Study of HVOF-Sprayed NiCrBSi Alloy and 316L Stainless Steel Coatings on a Brass Substrate. *Journal of Thermal Spray Technology*, 28(6), 1284-1294. <https://doi.org/10.1007/s11666-019-00896-8>.