



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
METALÜRJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**TERMAL BARIYER KAPLAMALARIN (TBC) MİKROYAPISAL VE
ELEKTROKİMYASAL KOROZYON DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

HAZIRLAYAN

ELİF ALTAN

DANIŞMAN

DOÇ. DR. ABDULLAH CAHİT KARAOĞLANLI

BARTIN-2019



T.C.

**BARTIN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

METALÜRJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**TERMAL BARIYER KAPLAMALARIN (TBC) MİKROYAPISAL VE
ELEKTROKİMYASAL KOROZYON DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZIRLAYAN

Elif ALTAN

JÜRİ ÜYELERİ

Danışman : Doç. Dr. A. Cahit KARAOĞLANLI - Bartın Üniversitesi
Üye : Prof. Dr. Hayrettin AHLATCI - Karabük Üniversitesi
Üye : Prof. Dr. M. Sabri GÖK - Bartın Üniversitesi

BARTIN-2019

KABUL VE ONAY

Elif ALTAN tarafından hazırlanan “TERMAL BARIYER KAPLAMALARIN (TBC) MİKROYAPISAL VE ELEKTROKİMYASAL KOROZYON DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ” başlıklı bu çalışma, 09.09.2019 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak jürimiz tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Abdullah Cahit KARAOĞLANLI
(Danışman)

Üye : Prof. Dr. Hayrettin AHLATCI

Üye : Prof. Dr. M. Sabri GÖK

Bu tezin kabulü Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../20... tarih ve 20...../.....-..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. H. Selma ÇELİKAY
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

BEYANNAME

Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Doç. Dr. Abdullah Cahit KARAOĞLANLI danışmanlığında hazırlamış olduğum “TERMAL BARIYER KAPLAMALARIN (TBC) MİKROYAPISAL VE ELEKTROKİMYASAL KOROZYON DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ” başlıklı yüksek lisans tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

09.09.2019

Elif ALTAN

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında ve yürütülmesinde her türlü konuda beni yalnız bırakmayarak danışmanlığımı üstlenen, araştırma konusunun seçiminden sonuçlandırılmasına kadar katkı ve emeklerini hiçbir zaman esirgemeyen değerli hocam Doç. Dr. Abdullah Cahit KARAOĞLANLI'ya saygıyla ve içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmasının sonuçlandırılmasında Tez İzleme Komitesi üyesi olarak bizlere eşlik etme nezaketinde bulunan değerli hocalarım; Prof. Dr. M. Sabri GÖK ve Prof. Dr. Hayrettin AHLATCI'ya değerli fikir ve önerileri ile sağladıkları katkıları için teşekkürlerimi sunarım.

Grafik ve görüntülerin yorumlanmasında görüş ve önerilerinden faydalandığım değerli arkadaşım Mine ÇELİKER'e minnetle teşekkürlerimi sunarım. Elektrokimyasal korozyon testlerinin uygulanmasında bizlerden yardımlarını esirgemeyen sevgili Dr. Öğr. Üy. Mustafa KOCABAŞ'a teşekkürü borç bilirim.

Yüksek lisans eğitimim boyunca sağladıkları destek için EYS METAL SAN. ve TİC. şirketine teşekkürlerimi sunarım.

Üniversite hayatım boyunca ve yüksek lisans dönemlerinde, çalışmam süresince verdikleri moral ve destek ile beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan ve yol gösteren kıymetli aile büyüklerim ve çok kıymetli yol arkadaşım Hüseyin Mert KÖSEOĞULLARI'na sonsuz sevgi ve şükranlarımı sunarım.

Elif ALTAN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TERMAL BARIYER KAPLAMALARIN (TBC) MİKROYAPISAL VE ELEKTROKİMYASAL KOROZYON DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Elif ALTAN

Bartın Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Abdullah Cahit KARAOĞLANLI

Bartın-2019, sayfa: 60

Bu çalışmada, elektrokimyasal korozyon çalışma koşullarının Inconel 718 süper alaşım altlık malzemeye sahip Termal Bariyer Kaplama (TBC) sistemi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elektrokimyasal korozyonun, yüksek sıcaklık çalışma ortamlarında ve özellikle de çalışmanın amacına uygun olarak asidik ortamlar ve deniz suyu ortamları gibi ortamlarda kullanılan parçaların, kaplama yüzeyleri üzerindeki etkilerinin mikro yapısal olarak incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Kaplama malzemesi olarak CoNiCrAlY metalik bağ kaplama tozları Yüksek Hızlı Oksi Alev Sprey (HVOF) prosesi kullanılarak süper alaşım altlık malzeme yüzeyi üzerine kaplanmıştır. Metalik bağ kaplamanın üretilmesi sonrasında yttria ile stabilize edilmiş zirkonya (YSZ, $ZrO_2+Y_2O_3$) seramik tozları Atmosferik Plazma Sprey (APS) kaplama prosesi kullanılarak TBC sistemi elde edilmiştir. Elektrokimyasal korozyon testlerinde numunelerin daldırılması için 0,1 molar NaCl (Sodyum Klorür) çözeltileri hazırlanmıştır. Deneyler oda sıcaklığında ve 3 elektrotlu klasik sistemde gerçekleştirilmiştir. Açık devre potansiyeli (OCP), elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) ve potansiyodinamik polarizasyon testi (PDP) olmak üzere, numunelere üç farklı korozyon testi uygulanmıştır. Deneyin elektriksel değerleri, OCP testine bağlı olarak 20 kHz-10 mHz ve 10 mV AC frekans aralığında gerçekleştirilmiştir. Potansiyodinamik (PDP) testlerden elde edilen eğrilerin başlangıç potansiyeli ± 250 mV, bitiş potansiyeli +1500 mV olarak belirtilmiştir. Çalışmalar neticesinde altlık malzeme,

metalik bağ kaplama ve seramik üst kaplamaya sahip TBC sisteminin ayrı ayrı elektrokimyasal korozyon davranışları korozyon etkileri ve mikroyapısal olarak incelenerek, ayrıntılı değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Termal bariyer kaplama (TBC); Elektrokimyasal Korozyon; Yüksek Hızda Oksi Alev (HVOF) Sprey Kaplama; Atmosferik Plazma Sprey (APS) Kaplama; Ytriya ile stabilize edilmiş zirkonya (YSZ).

Bilim Kodu: 91510; 91513.

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

INVESTIGATION OF MICROSTRUCTURAL AND ELECTROCHEMICAL CORROSION BEHAVIORS OF THERMAL BARRIER COATINGS (TBC)

Elif ALTAN

Bartın University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Metallurgical and Materials Engineering

Thesis Advisor: Assoc. Prof Abdullah Cahit KARAOĞLANLI

Bartın-2019, pp: 60

The aim of this study is to observe the effects of electrochemical corrosion working environment on the TBC applied to Inconel 718. The effect of electrochemical corrosion was investigated microstructural on coating surfaces of parts such as propellers used in the high temperature working environments and especially in the subject of the study such as acidic-basic environments and seawater environments. Coating processes was applied by using HVOF method on the base material Inconel 718. Then the coating was completed by using APS method produced from YSZ ($ZrO_2 + Y_2O_3$) powders. After that; the effects of electrochemical corrosion were investigated microstructural and elemental on the thermal barrier coating material. 0.1 molar NaCl (Sodium Chloride) solutions were prepared to immerse the samples to be corroded. Experiments were carried out at room temperature and at 3-electrode classical system. Three different corrosion tests were applied to the samples including open circuit potential (OCP), electrochemical impedance spectroscopy (EIS) and potentiodynamic polarization test (PDP). Electrical values of the experiment were realized in the frequency range of 20 kHz-10 mHz and 10 mV AC depending on the OCP test. Gamry Echem Analyst program was used in the analysis of the tests. The starting potential of the curves obtained from the potentiodynamic (PDP) tests is stated as ± 250 mV and the ending potential is +1500 mV.

Keywords: Thermal barrier coating (TBC); Electrochemical Corrosion; High Velocity Oxy Fuel (HVOF) Spray Coating; Atmospheric Plasma Spray (APS) Coating; Yttria Stabilized Zirconia (YSZ).

Science Code: 91510; 91513.

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	ii
BEYANNAME.....	iii
ÖNSÖZ.....	iv
ÖZET	v
ABSTRACT	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
TABLolar DİZİNİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiv
BÖLÜM 1.....	1
GİRİŞ.....	1
1.1 Giriş	1
BÖLÜM 2.....	3
LİTERATÜR ÖZETİ	3
2.1.Termal Sprey Kaplamalara Genel Bakış	3
2.1.1 Plazma Sprey Kaplamalar	6
2.1.1.1 Atmosferik Plazma Sprey (APS) Kaplama Yöntemi	6
2.1.1.2 Vakum Plazma Sprey (VPS) Kaplama Yöntemi	8
2.1.2 Yüksek Hızlı Oksi AlevYakıt (HVOF) Kaplama Yöntemi	8
2.1.3 Soğuk Gaz Dinamik Sprey (CGDS) Kaplama Yöntemi	11
2.2 Termal Bariyer Kaplama (TBC) Sistemi	15
2.2.1 Termal Bariyer Kaplamalarda Hasar Mekanizmaları	18
2.2.1.1 Oksidasyon.....	20
2.2.1.2 Termal Şok.....	21
2.2.1.3 Sıcak Korozyon.....	22
2.2.1.4 Elektrokimyasal Korozyon.....	23
2.2.2 Termal Olarak Büyüyen Oksit (TGO) Tabaka Yapısı	25

BÖLÜM 3.....	28
MATERYAL VE METOT.....	28
3.1 Materyal.....	28
3.2 Toz ve Altık Malzemelerin Karakterizasyonu.....	29
3.2.2 Altık Malzemenin Kimyasal Bileşimi ve Özellikleri.....	30
3.3 Termal Bariyer Kaplama Sisteminin Üretilmesi	31
3.4 Termal Bariyer Kaplamaların Elektrokimyasal Korozyon Testlerinin Gerçekleştirilmesi	32
BÖLÜM 4.....	34
BULGULAR VE TARTIŞMA.....	34
4.1 Termal Bariyer Kaplamaların Elektrokimyasal Korozyon Testi Sonuçları.....	34
4.2 Kaplamasız Inconel 718 Süper Alaşım Numunelerin Elektrokimyasal Korozyon Testi Sonrası Mikroyapısal Olarak İncelenmesi	38
4.3 HVOF Tekniği İle Üretilen CoNiCrAlY Bağ Kaplamaya Sahip Numunelerin Elektrokimyasal Korozyon Testi Sonucu Mikroyapısal İncelenmesi.....	41
4.4 APS Tekniği İle Üretilen YSZ Üst Kaplamaya Sahip TBC Sistemi Numunelerinin Elektrokimyasal Korozyon Testi Sonucu Mikro yapısal İncelenmesi.....	43
4.5 TBC Sistemi Bileşenlerinin Elektrokimyasal Korozyon Testi Sonrasındaki Mikroyapısal Değişimlerin İrdelenmesi	45
BÖLÜM 5.....	51
SONUÇ VE ÖNERİLER	51
5.1 Genel Sonuçlar.....	51
5.2 Öneriler	53
KAYNAKLAR.....	54
ÖZGEÇMİŞ.....	60

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Sayfa No
1.1: Sulu ortamda korozyona uğramış bir parça yüzeyi.....	2
2.1:Altlık malzemesinin yüzey temizliği öncesi ve sonrası şematikgösterimi.....	4
2.2:Termal sprej kaplama yönteminin şematik gösterimi	4
2.3:Termal sprej kaplamaya ait kesit görünümü	5
2.4: Termal sprej kaplamaya ait yüzey görünümü	5
2.5: Plazma sprej kaplama prosesinin şematik gösterimi.....	7
2.6: Bir HVOF tabancasına ait iç görünüm ve prosesin şematik gösterimi	9
2.7: HVOF yöntemi ile hidrolik silindir kaplama işlemi	10
2.8: a. Krom kaplı bir silindirik malzemenin 682 saat çalışma süresi sonundaki hali. b. HVOF kaplama işlemi uygulanmış silindirik bir parçanın 3200 saat sonundaki hali.....	11
2.9: 18 ay boyunca atmosferik ortamda bulundurulan ve haftalık olarak tuzlu su uygulaması yapılan kaplanmış malzemelerdeki yüzeyde korozyon maruziyetinin gösterimi. a. HVOF yöntemi ile kaplı malzeme, b. triballoy-400 süper alaşımı, c. sert krom kaplı malzeme.....	11
2.10: CGDS kaplama yönteminin şematik gösterimi.....	12
2.11: CGDS yönteminde kaplama oluşumu	13
2.12: CGDS yönteminde kaplama oluşumu	13
2.13: Alüminyum bir yüzeye çarpan 20 mikron bakır kürenin deformasyonu	13
2.14: Bir gaz türbin motorunun şematik gösterimi.....	16
2.15: Bir gaz türbininde termal bariyer kaplama uygulanan parçalardan bazıları.	16
2.16: Bir termal bariyer kaplamanın yapısı	18
2.17: Plazma sprej kaplamada görülen hasar tabakası.	20
2.18: Elektrokimyasal korozyon ölçme yöntemleri	23
2.19: Bir korozyon hücresinin şematik görünümü	24
2.20: TBC yapısının enine kesit resmi	26
3.1: XRD cihazından alınan sonuçlara göre kullanılan toz malzemelerin partikül boyutu dağılım grafikleri a.CoNiCrAlY, b. ZrO ₂ +8% Y ₂ O ₃ (YSZ).....	29
3.2: a. CoNiCrAlY, b. ZrO ₂ +8% Y ₂ O ₃ (YSZ) içerikli toz partiküllere ait SEM görüntüleri.....	30

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

Şekil No	Sayfa No
3.3: ZrO ₂ -8% Y ₂ O ₃ tozuna ait XRD pikleri.	30
3.4: Metalik altlık, bağ kaplama ve seramik üst kaplamanın şematik görünümü.	31
3.5: Elektrokimyasal korozyon testi deney düzeneğinin görünümü.	33
4.1: NaCl çözeltisindeki numunelere ait polarizasyon eğrileri.	35
4.2: NaCl çözeltisinde korozyon deneyine tabi tutulan numunelere ait Nyquist eğrileri.	36
4.3: NaCl çözeltisinde korozyon deneyine tabi tutulan numunelere ait Bode eğrileri.	37
4.4: Deney numunelerine ait eşdeğer devre modelinin şematik görünümü.	38
4.5: Kaplamasız Inconel 718'e ait mikro yapı görüntüleri; a. 250 x büyütme, b. 1.00 kx büyütme, c. 2.00 kx büyütme.	39
4.6: Kaplamasız Inconel 718'e ait EDS analizleri.	40
4.7: Kaplamasız Inconel 718'e ait XRD grafiği.	41
4.8: HVOF bağ kaplama ve elektrokimyasal korozyon uygulanmış parçaya ait kesit ve yüzey görünümü.	41
4.9: HVOF bağ kaplama ve elektrokimyasal korozyon testi uygulanmış parçaya ait EDS analizi.	42
4.10: HVOF bağ kaplama uygulanmış parçaya ait XRD grafiği.	42
4.11: Oluşturulan TBC sistemi ve elektrokimyasal korozyon testi uygulanan parçaya ait kesit ve üst görüntüleri.	43
4.12: HVOF bağ kaplama+APS üst kaplama ve elektrokimyasal korozyon uygulanan parçaya ait EDS analizi.	44
4.13: TBC sistemi ve elektrokimyasal korozyon uygulanan parçaya ait XRD grafği.	45

TABLULAR DİZİNİ

Tablo	Sayfa
No	No
3.1: Inconel 718'e ait kimyasal bileşim değerleri.....	32
3.2: HVOF bağ kaplama uygulamasına ait parametreler.....	33
3.3: APS üst kaplama uygulamasına ait parametreler.....	33
4.1: NaCl çözeltisinde gerçekleştirilen elektrokimyasal korozyon testine ait değerler.....	35
4.2: NaCl çözeltisi içerisindeki numunelere ait EIS verileri.....	37
4.3: 25 °C'de ağırlıkça % 3,5 NaCl içine batırılmış, kaplanmış ve kaplanmamış çelik substratın çalışmasına göre elde edilen elektrokimyasal değerleri.....	48
4.4: Kaplanmış ve sıcak korozyona uğratılmış numunelerin polarizasyon sonuçları.....	49

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

APS	: Atmosferik Plazma Sprey
Ar	: Argon
Co	: Kobalt
CoNiCrAlY	: Kobalt Nikel Krom Alüminyum Yttria
EDS	: Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi
H	: Hidrojen
HVAF	: Yüksek Hızda Hava Yakıtı Püskürtme
K	: Kelvin
kW	: Kilowatt
MCrAlY	: Metal Krom Alüminyum Yttria
N	: Azot
NaCl	: Sodyum Klorür
O	: Oksijen
PS	: Plazma Sprey
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
TBC	: Termal Bariyer Kaplama
TGO	: Termal Olarak Büyüyen Oksit Tabaka
VPS	: Vakum Plazma Sprey
W	: Wolfram (Tungsten)
YSZ	: Yttria ile Stabilize edilmiş Zirkonya
XRD	: X-ışını Kırınım yöntemi
m/sn	: metre/saniye
mm	: Milimetre
slpm	: Standart litre/dakika
cm	: Santimetre
µm	: Mikrometre
°C	: Celcius
α	: Alfa
β	: Beta
γ	: Gama
θ	: Teta

ns : Nano saniye
mBar : Milibar
psi : İnç kare başına pounds

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 Giriş

Mühendislik alanlarının vazgeçilmezlerinden olan otomotiv, havacılık, uzay sanayi, makine ve imalat sektörlerinin yıllar içerisinde gelişmesi ile birlikte kullanılan malzemeler de çok çeşitlilik ve gelişim göstermektedir. Bu alanlarda yoğun olarak kullanılan metalik malzemeler, doğası gereği bulunduğu ortam ve durumlardan etkilenmektedir. Gelişen teknoloji ile bu gibi durumlara çözüm olması ve malzeme yüzey ve yapılarının korunması için farklı kaplama yöntemleri kullanılmaktadır (Türkan, 2017).

Kaplamalar kullanım alanları, kaplanacak malzeme ve uygulama yöntemlerine göre farklı malzeme ve prosesler kullanılarak hedef yüzeye uygulanabilmektedir. Kaplamalar malzemelerin erozyon, korozyon, oksidasyon, aşınma ve ısı gibi birçok etkiye karşı korunmasını sağlamaktadır. Belirtilen tüm bu mekanizmalar malzemeye zarar vermekte ve ömrünü kısaltmaktadır (Stiger, 1999).

Termal bariyer kaplama (TBC) sistemleri termal spreycaplama yöntemleri kullanılarak üretilen bir sistem olup, özellikle son yıllarda havacılık ve uzay sanayinde oldukça geniş kullanım alanına sahip olmuştur. Gaz türbin motorları, türbin bıçak ve kanatçıkları yoğun gerilme altında ve yüksek sıcaklık ortamında çalıştığından dolayı TBC sistemleri bu alanda geniş bir kullanıma sahiptir (Clarke ve Phillpot, 2005).

Şekil 1.1'de sulu ortamda kalmak suretiyle korozyona maruz kalmış bir parçaya ait bir yüzey görüntüsü verilmiştir. Tabii sular, deniz suları, yer altı boru hatları, kimyasal çözeltiler, organik sıvılar gibi esas olarak çözünmüş olarak bulunan bir elektrolitin bulunduğu ve korozyonun kontrol altına alınmasında zorluk çekilen geniş hacme sahip sulu ortamlarda çalışan parçalar için alınması gereken tedbirlerin başında yüzeyin kaplama sistemi ile korunması gelmektedir. Örneğin; NaCl tuzu kazanlarda yoğunluğun artmasına ve ince bir tabaka halinde çökelti olarak kalmasına sebep olarak zaman içerisinde korozyon oluşumuna sebebiyet vermekte ve nihai olarak hasar oluşturmaktadır (Perez, 2016).

Tipik bir TBC sistemi genel olarak; metal içeriğe sahip (Ni/Co) süper alaşım bir altlık malzemesi üzerine üst kaplamanın altlık malzemesine yapışmasını sağlayan metalik bir bağ kaplama ve seramik içerikli bir üst kaplama ile birlikte, üst kaplamanın metalik bağa yapışmasını sağlayan ve sıcaklığa bağlı olarak gelişen bir oksidasyon tabakasından oluşur. Bu yapı; parçaları çevredeki özellikle sıcaklığa bağlı olumsuz şartlardan korumakla birlikte, kullanım ömrü ve performansını da olumlu yönde etkilemektedir (Stiger, 1999).

TBC sistemleri özellikle günümüz şartlarında; deniz dibi boruları, içme suyu boruları, pervaneler, içme suyu boruları, tanklar, deniz altı gemileri, valfler pompalar, soğutma suyu sistemleri, radyatörler, kazanlar, gemi gövdeleri, barajlar, buhar üniteleri ve daha birçok tatlı yahut tuzlu sulu ortamlarda kullanılan parçaların elektrokimyasal korozyondan korunmasında tercih edilen bir yöntemdir. Fiyat-performans kıyaslaması yapılarak uygulanacak malzemeye göre tercih edilen kaplamalar, uygulama yöntemine göre çeşitlilik göstermektedir. Alev sprej, ark sprej, detonasyon tabancası, plazma sprej, yüksek hız alev yakıt (HVOF), soğuk gaz dinamik sprej (CGDS) yöntemleri termal sprej kaplama alanında kullanım alanı bulan yöntemlerdir (Zağlı, 2010).



Şekil 1.1:Sulu ortamda korozyona uğramış bir parça yüzeyi (URL-1, 2014).

Bu çalışmada giriş bölümünden itibaren TBC sistemleri hakkında, termal sprej kaplamalar, kaplama teknikleri, kullanım alanları, hasar mekanizmaları ile ilgili genel bilgilendirmeler verilmiştir. Materyal ve yöntem kısmında yapılan elektrokimyasal korozyon testlerinin yapılması, kullanılan araç ve gereçler hakkında bilgiler verilmiştir. Daha sonra deneysel verilerin değerlendirilerek yorumlanması ve diğer çalışmalar ile karşılaştırması yapılarak, genel sonuçlar açıklanmıştır. Deneysel çalışmaların ileride geliştirilebilmesi için öngörülen birtakım öneriler sunulmuştur.

BÖLÜM 2

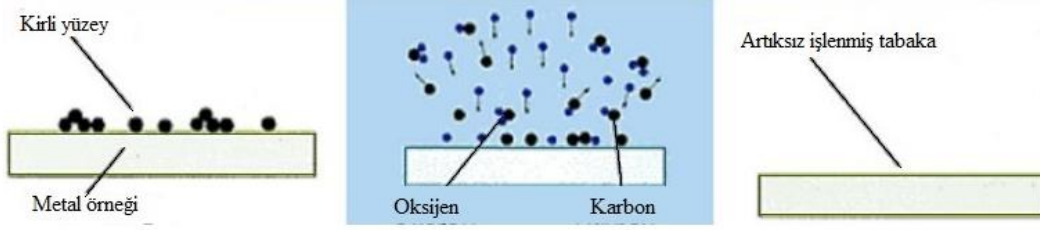
LİTERATÜR ÖZETİ

2.1 Termal Sprey Kaplamalara Genel Bakış

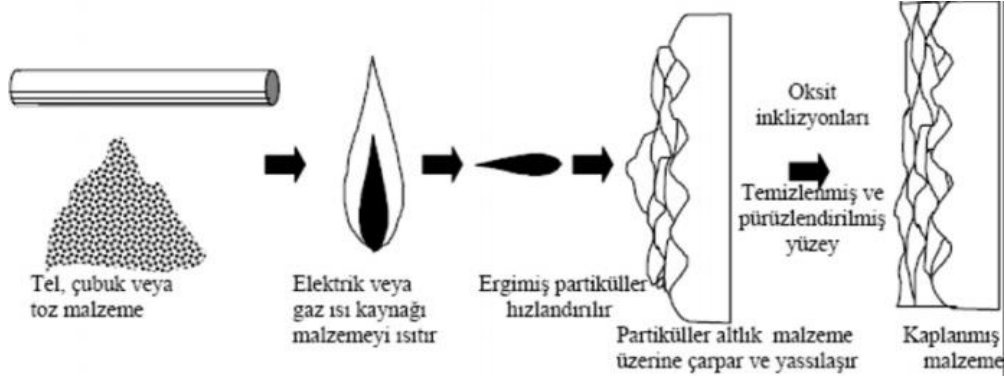
Termal sprey kaplamalar basit olarak anlatacak olursak; toz yahut tel malzemelerin, iyonize halde olan gaz içerisinde ergimiş ya da yarı ergimiş halde iken yüksek hızlarda, bir altlık malzeme yüzeyine püskürtülmesi ile kaplanmasıdır. Maddenin 4. hali kabul edilen plazma, bir plazma oluşturucu jet ile plazma alevi oluşturularak, bu malzemelerin püskürtülmesini sağlamaktadır. Bu kısımda sıcaklık 10.000 K'i bulmaktadır (Davis, 2014).

Yüksek sıcaklık ortamında ya da aşırı saldırgan ortamlarda çalışan makine elemanlarında karşılaşılan, aşınma ve bozunma problemlerinin azaltılması için uygulanabilen yöntemlerdendir. 1900'lü yılların başlarında, Almanya başta olmak üzere zamanla diğer Avrupa ülkelerinde ve Amerika'da kullanılmaya başlanmıştır (Miller, 2009).

Kaplama işleminin öncesinde yüzeyi kaplanacak olan metale bazı ön uygulamalar gerekmektedir. Bu ön uygulamalar sayesinde kaplamanın metal yüzeyine sağlıklı şekilde bağlanması ve yüzeyden kopmaması amaçlanmaktadır. İlk olarak; yüzeyde eğer bulunuyorsa kir, pas, gres ve yağ gibi yabancı maddeler yüzeyden uzaklaştırılır. Şekil 2.1'de yüzey temizleme işlemi uygulanan bir altlık malzemeye ait öncesi ve sonrası görünümü gösterilmektedir. Kaplamanın yüzeye sağlam şekilde yapışmasını sağlamak için yüzey pürüzlendirme işlemi yapılır. Bu işlemlere; yaygın olarak kullanılan kumlama örnek olarak verilebilir. Malzeme yüzeyindeki temizlik ve kumlama işlemlerinin ardından, kaplama kalitesini arttırmak için yüzeyde bulunan, çevre ve temizleme koşullarına bağlı olarak oluşan nemin uzaklaştırılması, ön ısıtma uygulanması bir diğer uygulamalardandır. Yüzeye verilen sıcaklık; altlık malzemenin ısı özelliklerine bağlı olarak genellikle yaklaşık 100-150 °C'dir (Evcin, 2016).

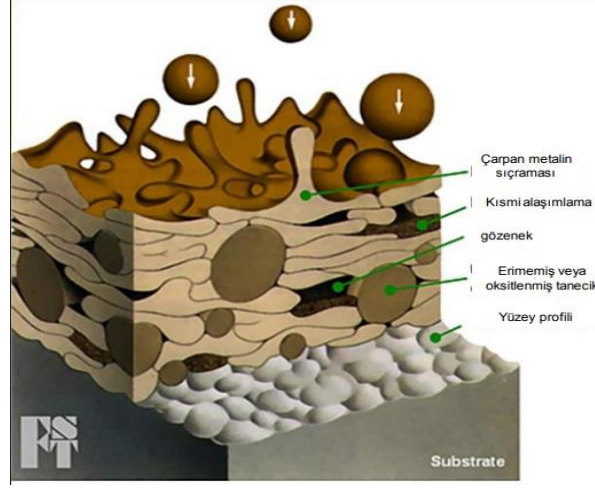


Şekil 2.1: Altlık malzemesinin yüzey temizliği öncesi ve sonrası şematik gösterimi (URL-2, 2016).

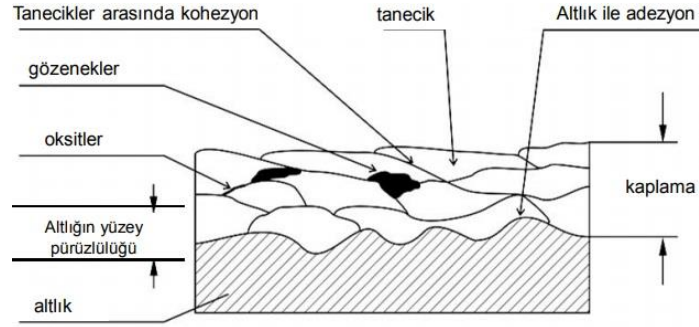


Şekil 2.2: Termal spray kaplama yönteminin şematik gösterimi (URL-2, 2016).

Şekil 2.2’de termal spray kaplama yönteminin uygulama aşamaları şematik olarak gösterilmektedir. Tungsten katot (-) ve bakır nozul anot (+) arasında iyon haline getirilmiş olan gazlar plazma seviyesinde sıcaklıklarda iken; toz partiküller taşıyıcı gazlar vasıtası ile kaplanacak malzeme üzerine hızla püskürtülür. Malzeme yüzeyine oldukça hızla çarpan parçacıklar ergiyik halde olduklarından yüzeye yassı halde yayılarak yapışırlar. Partiküllerin bu haline splat adı verilir. Splatlar yüzeye yapışır yapışmaz hızla soğumaya başlar. Püskürtme etkisiyle her splat bir öncekinin üzerine biner. Böylece kaplama yüzeyi katmanlar halinde tamamlanmış olur. Soğuma hızı yaklaşık 105 K/s civarındadır. Kaplama işleminin tamamlanmış olduğu bir örneğe ait kesit ve yüzey görünümleri Şekil 2.3 ve Şekil 2.4’te gösterilmiştir (Kahraman, 2000).



Şekil 2.3: Termal sprey kaplamaya ait kesit görünümü (URL-2, 2016).



Şekil 2.4: Termal sprey kaplamaya ait yüzey görünümü (URL-2, 2016).

Yukarıdaki şekillerde de görüldüğü gibi kaplamanın yapıldığı çevre koşullarına ve kullanılan malzemeye göre kaplama kalitesi değişebilmektedir. Yüzeyde oluşan porozite, gözeneklilik gibi oluşumlar malzemenin kaplamadan sonraki mekanik ve diğer özelliklerini (iletim, aşınım, dayanım vs.) etkileyecektir.

Termal sprey kaplama işlemlerinde kullanılan yöntemler oldukça çeşitlilik göstermektedir. Bunlar seramik üst katmanın kaplama işlemi için sıklıkla APS, elektron ışını ile fiziksel buhar biriktirme yöntemi (EB-PVD), bağ kaplama üretimi için ise HVOF, VPS, CGDS gibi yöntemler tercih edilmektedir. Bağ kaplama üretimi için VPS tekniği oldukça yüksek performansa sahip olsa da, uygulama açısından yüksek maliyete sebep olduğu için tercih edilmemektedir. Buna alternatif olarak görülebilecek HVOF tekniği ise yine yapısal olarak iyi bir performans sağlayarak, bağ kaplama üretiminde en çok tercih edilen yöntemlerden biri olmuştur (Meşekıran, 2015).

2.1.1 Plazma Sprey Kaplamalar

Plazma genel olarak yoğunlaştırılmış gaz olarak bilinmekle birlikte çok yüksek sıcaklıklara erişmek bununla mümkün olmaktadır. Yapısında eşit miktarda pozitif ve negatif yük bulundurmaktadır. Dolayısıyla ergime noktası yüksek olan malzemeler ile çalışmayı kolaylaştırmaktadır. Ayrıca; ısı transferi sağlamada diğer bir avantajıdır (Heimann, 2008).

Plazma sprej kaplamalar (PS); türbin parçaları başta olmak üzere oldukça gelişmiş teknolojik alanlarda kullanılmaktadır. Ayrıca yukarıda bahsedildiği gibi çalışma ortamının oldukça agresif olduğu ortamlarda, makine elemanlarının aşınma dayanımının artırılması için, kullanım ömrünün artırılması ve bakım maliyetlerinin de düşürülmesi için bu yöntemler sıklıkla tercih edilmektedir. Havacılık, uzay, deniz, otomotiv, savunma, nükleer sanayi sektörlerinde; türbin kanatları, yanma odaları, pistonlar, krank milleri, pervaneler, roket nozulları gibi daha birçok örnek verilebilecek ortamda kullanılan makine elemanlarında tercih edilmektedirler (Özgürlük, 2016).

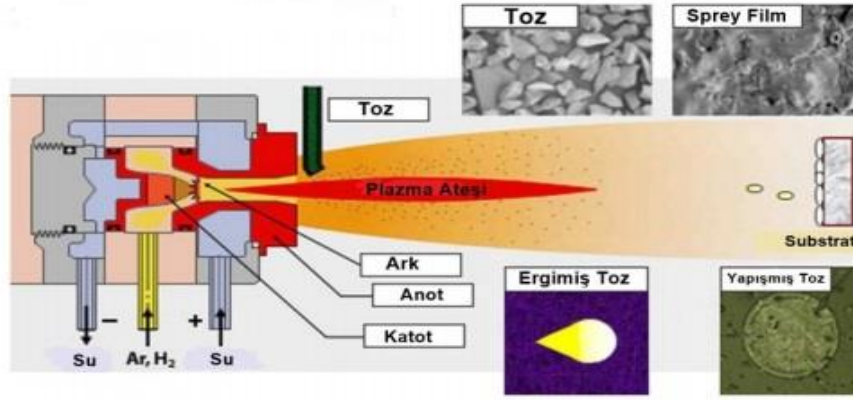
PS kaplamaların mikro yapı ve çeşitli özellikleri üretim aşamasından seçilen malzemeye kadar birçok etken ile değişim gösterebilir. Plazma jetinin hızı, sıcaklığı, parçacıkların altlığa çarpma hızı ve açısı, çarpma esnasında ergime durumu, beslenen tozların şekli, boyutu, termal özellikleri, plazma gazına ait özellikler ve daha birçok etken kaplamaların kalitesinde oldukça önemli rol oynamaktadır (Parlakıyığıt, 2013).

Endüstride yaygın olarak kullanılmakta olan ve uygulama ortamına göre adlandırılmış iki farklı plazma sprej yöntemi bulunmaktadır. Bunlar; Atmosferik Plazma Sprej (APS) Kaplama ve Vakum Plazma Sprej (VPS) Kaplama prosesleridir.

2.1.1.1 Atmosferik Plazma Sprej (APS) Kaplama Yöntemi

Bu yöntem adını plazma sprej kaplama yönteminin yapıldığı çevreden almaktadır. Açık hava ortamında yapılan bu yöntemde gazlar nozuldan çıktığı andan itibaren açık havaya maruz kalır ve etkileşime girerler. Bu yüzden; yüzeyde fazla miktarda porozite görülür. Ayrıca işlem yüksek sıcaklıklarda uygulandığı için de oksidasyon oranı yükselir. Yüzeyde porozite oranının artması ise malzemenin termal iletkenlikte düşüşe sebep olmaktadır. Bu

yöntem açık havada uygulanabildiği için ayrıca maliyet olarak diğer yöntemlere kıyasla oldukça düşüktür (Döleker, 2018).



Şekil 2.5: Plazma sprej kaplama prosesinin şematik gösterimi (URL-3, 2019).

Şekil 2.5'te plazma sprej kaplama prosesinin şematik gösterimi verilmiştir. Plazma sprej kaplama işleminde iki adet elektrot arasında oluşturulan bir ark ile iyon haline getirilmiş olan ve tercihen inert olduğundan Argon temel olmak üzere, tercih edilen gazlar, yüksek basınçta ve hıza ulaşırlar. Bunun nedeni yaklaşık 30.000 °C'yi bulan sıcaklıktır. Böylece tozlar bu hız ile nozuldan çıkışta oldukça yüksek süpersonik hızlara sahiptirler. Parçacıklar nozuldan çıkıp altlığa ulaştığında, geri sekme gibi durumlarla karşılaşmayıp, eriyerek iyi bir yapışma mukavemeti sağlarlar. Yapışma mukavemetleri yaklaşık 25 MPa olarak söylenebilir. Genellikle termal iletkenliklerin düşük olduğu seramik esaslı malzemelerin kaplama işleminin uygulanmasında kolay ve uygun olduğundan sıklıkla tercih edilen bir yöntemdir. Uygulanan kaplamaların kalınlığı 300-1000 µm arasında değişebilir (Karaoğlanlı, 2012; Dokur, 2014; Gök, 2015).

Toz olarak metallerin yanı sıra seramiklerin tercih edilmesi (özellikle Al₂O₃ gibi oksitleri), seramiklerin korozyona ve aşınmaya karşı mükemmel dayanımlarından kaynaklanır (Çakır vd., 2017).

Toz besleme ünitesi içerisinde plazma gazının içerisine beslenen tozlar buradaki sıcaklık ve basınç ile eriyik hale gelirler. Burada tozların şekillerinin küresel olması ve homojen büyüklüklere sahip olmaları kaplamanın kalitesinde etkili olmaktadır. Bunun aksi durumlarda, termal genleşme farkı da ortaya çıkması durumunda kaplamanın çatlamasına sebep olan gerilmeler meydana gelir. Yüksek hızlarda eriyik hale gelmiş olan tozlar

malzeme yüzeyine püskürtülerek, yüzeye yapışması sağlanır. Yüzeye yapışan partiküller lamelli olarak üst üste birikir ve kaplama tamamlanmış olur (Evcin, 2016).

2.1.1.2 Vakum Plazma Sprey (VPS) Kaplama Yöntemi

Bu yöntem yine plazma sprej kaplama tekniklerinden birisi olmakla birlikte APS kaplama yönteminden farklı olarak, düşük basınç (50-200 mbar) uygulanan bir odada kaplama işlemi yapılmaktadır. Adını da buradan almakta olan VPS kaplama yönteminde aynı şekilde nozul boyunca inert gazlar, plazma ile ısıtılarak yoğunlaştırılır. Ancak bu yanma odasına gazlar vakum altında gönderilir. Negatif kutup olan ark ile pozitif kutup olan altlık malzemesinin yüzeyi arasındaki kutuplaşmadan oluşan her iki yüzey ısındığında, plazma jetinden çıkışı ile vakum altında sıcak gaz plazma jetine iletilen 10-15 mikron boyutuna sahip seramik esaslı tozlar ile kaplama işlemi tamamlanmış olur (Pawloski, 2008).

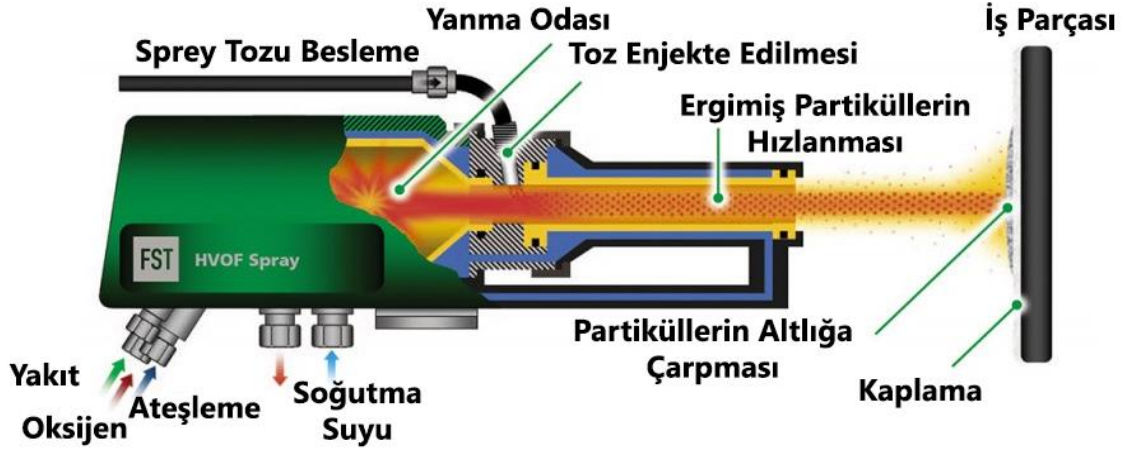
Malzeme yüzeyine yapışma oranı APS kaplama yöntemine göre daha iyi ve yüzeyde görülen porozite oranı da hava ile temas bulunmadığı için daha azdır (%1-2). Ancak bu yöntemde bir dezavantaj olarak vakum odasını istenen orana getirmek ve sabit olarak tutmak oldukça zor bir durum haline gelebilir (Davis, 2004). Vakumun sabit tutulmaması durumunda sızdırmazlık zarar görebilir ve istenen kalitede yüzey kaplama işlemi tamamlanamaz. Bu yüzden APS kaplama yöntemi ile aradaki maliyet açısından oluşan fark buradan kaynaklanmaktadır. Ayrıca bu yöntem ile tercihen metalik tozların kaplama işlemi yapılmaktadır.

2.1.2 Yüksek Hızlı Oksi Alev Yakıt (HVOF) Kaplama Yöntemi

Bu kaplama yöntemi; isminden de anlaşılacağı üzere yüksek hızlarda çalışma ortamına ulaşıldığından yüksek hızlı oksijen alev kaplama adını almıştır. 1950' li yıllarda keşfedilmiş olup ticari alanda kullanımı ise 1980 yıllarını bulmuştur (Döleker, 2018).

Aşağıda Şekil 2.6'da bir HVOF kaplama tabancası ve çalışma prensibine ait görünüm verilmiştir. Kaplama yönteminde kullanılan yanıcı gazlar H_2 , O_2 ve bunun yanında taşıyıcı olarak adlandırılan N_2 'dir. Ayrıca bunların yerine propan, propilen, doğal gazlar ve sıvı formda bulunan kerosen de kullanılabilir (Evcin, 2016). Yaklaşık 2700-3300 °C gibi nispeten düşük sıcaklıklarda, kaplama yüzeyinde kullanılacak metal tozlarının, uzun

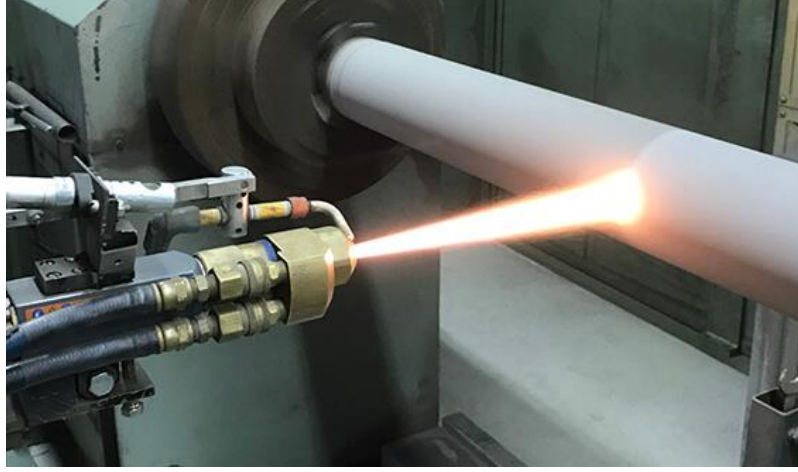
namlulu bir tabanca ile yukarıda bahsedilen yanıcı ve taşıyıcı gazların hareketi ile 1000 m/sn hızlarda kaplanacak yüzeye püskürtülerek uygulanması işlemidir. Uygulanan yüksek basınç ve yüksek hız nedeniyle altlık malzeme ile kaplama arasındaki bağ kuvveti 12.000 psileri aşmaktadır (Karaoğlanlı vd., 2014).



Şekil 2.6: Bir HVOF tabancasına ait iç görünüm ve prosesin şematik gösterimi (URL-4, 2019).

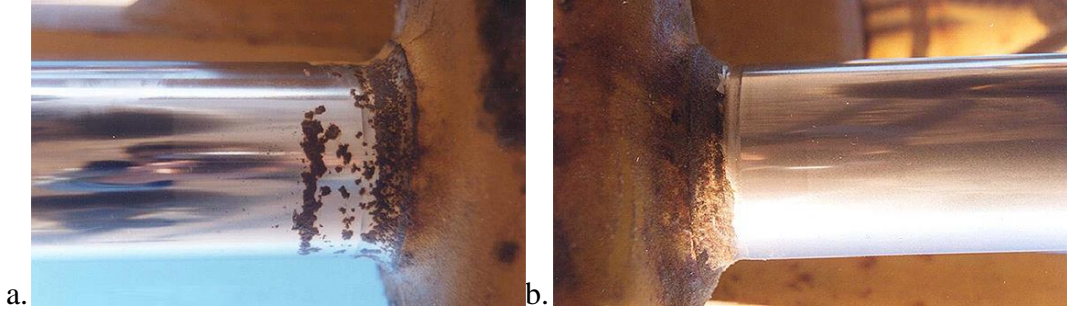
Dünyadaki her şeyde olduğu gibi göz önünde bulundurulması gereken en önemli şeylerden biri prosesin artı ve eksilerinin bulunmasıdır. Bu kaplama yönteminin en büyük avantajı olarak sayılabilecek yüksek alev hızıdır. Bu sayede ses üstü hızlara çıkabilen partiküller yüzeye çok yüksek bir kinetik enerji ile çarparak plastik deformasyona uğrarlar. Partiküllerin açık hava ile etkileşimi minimuma indiği için; yüzey kalitesi yüksek, porozite oranı az, yüksek yoğunluklu ve daha pürüzsüz bir yüzey kalitesi elde edilmiş olur. Diğer yöntemlerle kıyaslandığında HVOF kaplama yöntemi; yüksek bağlanma mukavemeti içeren partiküller ve daha yoğun, sert ve gözeneksiz yapıli kaplamalar elde edilmesini sağlayan bir yöntem olarak görülmektedir (Manesh vd., 2010). Yüzeydeki porozitenin az olması kaplamanın korozyona karşı direncini de arttırmış olur. Ayrıca yine yüksek hızdan kaynaklı karbür fazları daha az bozunduğu için de daha sert ve dolayısıyla aşınma direnci yüksek bir kaplama elde edilmiş olur. Sistemde yüzeye çarpma hızı yüksek olduğu için gerilmeler minimuma inmekte ve bu sayede de kaplama kalınlığı diğer yöntemlere göre daha yüksek olur. Seçilen malzemelerin sınırlı sıcaklığa sahip bir proses olacağından genellikle seramik olmaması tercih edilir. Korozyona dayanıklı bir kaplama malzemesi seçimi ve dikkatli bir kaplama işlemi gerçekleştirildiğinde HVOF kaplama tekniği ile mikro yapıda çatlak ve porozite olmayan, kaliteli ve korozyona oldukça dirençli bir yapı

elde edileceği, yapılan araştırmalarda görülmektedir (Richer vd., 2010). Bunun yanında PS kaplama yöntemi gibi 20.000 K sıcaklık yerine, buradaki sıcaklık yaklaşık 3000 K'dir (Karaoğlanlı vd., 2014).

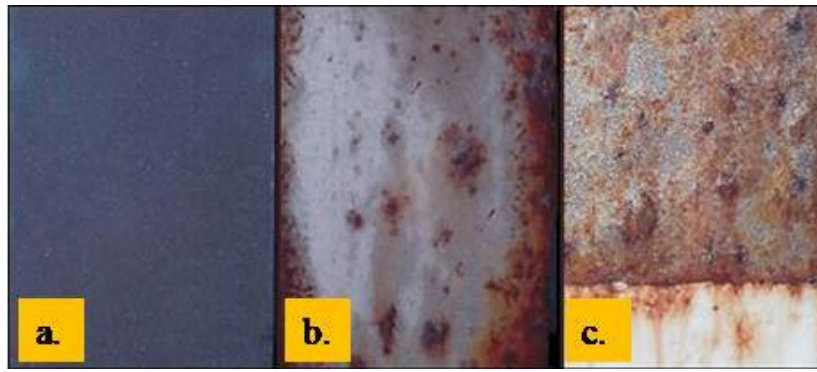


Şekil 2.7: HVOF yöntemi ile hidrolik silindir kaplama işlemi (URL-4, 2019).

Yöntemin yüksek basınç, yüksek sıcaklıklar altında yapılması ve sistemin bir soğutucu ekipmana ihtiyaç duyması sebebiyle, sistemin bakım maliyetleri nispeten yüksektir. Ayrıca alevin hareket uzunluğu ve yüksek sıcaklığı altlık malzemesinin kimyasal kompozisyonunda değişiklik gösterebilir. Sıcaklıkların oldukça yüksek seviyelere çıkması sonucu; bağ katmanda sıcaklığa bağlı olarak bir oksit tabakasının büyümesine imkan vermektedir (Myoung vd., 2014). Bu sebeple ince yapılı ve polimer benzeri malzemelerin kaplanmasında pek uygun değildir. Bu yöntemde sistemin manuel olarak kullanımı uygun değildir. Otomatik olarak manipüle edilmeyi gerektirir. Ayrıca ekipmanların kullanımı için özel eğitimi personellere ihtiyaç duyulur. Bunun yanı sıra; kullanım alanı kısıtlaması ile karŐılaŐılır. Örneğin; silindir bir malzemenin iç kısımlarının kaplanmasında kullanışlı olmamaktadır (Myoung vd., 2014). Şekil 2.7'de bir hidrolik silindirin dış yüzeyine uygulanan HVOF kaplama prosesi görülebilir. Yine Şekil 2.8 ve 2.9'da HVOF kaplama prosesi, farklı yöntemlerle kaplanmış ve korozyon direnci ile bilinen malzemelerin, korozyon ortamlarında maruz kaldıkları yüzey durumları görülebilir.



Şekil 2.8: a. Krom kaplı bir silindirik malzemenin 682 saat çalışma süresi sonundaki hali, b. HVOF kaplama işlemi uygulanmış silindirik bir parçanın 3200 saat sonundaki hali (URL-4, 2019).



Şekil 2.9: 18 ay boyunca atmosferik ortamda bulundurulan ve haftalık olarak tuzlu su uygulaması yapılan kaplanmış malzemelerdeki yüzeyde korozyon maruziyetinin gösterimi. a. HVOF yöntemi ile kaplı malzeme, b. triballoy-400 süper alaşımı, c. sert krom kaplı malzeme (URL-4, 2019).

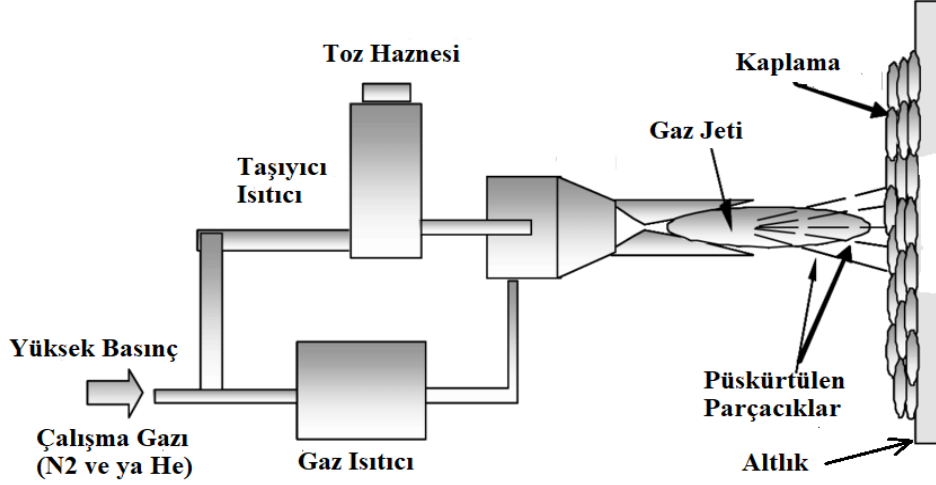
Kullanım alanlarını sıralayacak olursak; hidrolik silindir piston çubukları, ağır vasıtalar ve madencilik ekipmanları, çelik, plastik ve kâğıt işleme sanayinde kullanılan silindirlerde, uçak iniş takımları, konveyörler, ekstrüderler, pompa milleri, su ve atık arıtma tesislerinde, deniz, savunma, tarım ve daha birçok alanda kullanıma uygundur.

2.1.3 Soğuk Gaz Dinamik Sprey (CGDS) Kaplama Yöntemi

Bu yöntem; 1980'lerin başında Rus asıllı Dr. Antolli Papyrin tarafından; dönemin düşük sıcaklık yüksek parçacık hızı trendine uygun olarak geliştirilmiştir (Terkeşli, 2017). CGDS kaplama yönteminin temel mantığı; parçacıkların ergimeden, katı halde altlık malzemeye püskürtülmesi ve kaplamanın biriktirilmesidir. Diğer yöntemlerden farkı da budur.

Taşıyıcı gaz olarak genellikle Azot veya Helyum gazları kullanılır. Yaklaşık 700 °C'de bir ön ısıtmaya tabi tutulan gazların termal enerjilerinde bir artış gözlemlenir. Bu gazları ileri itmek için bir yüksek basınç (yaklaşık 500 psi) gaz sistemi kullanılır. Daha sonra gazlar

uygulanan basıncın seviyesine göre; laval denilen yapıdaki ya da süpersonik yapıdaki nozullarda genişleşerek ısınır. Ancak sıcaklıklarını, ani genişmeden kaynaklı partiküllere iletmeden düşüş gerçekleşir. Böylece termal enerjilerini kinetik enerjiye çevirmiş olan partiküller yüzeye yaklaşık 1000-1200 m/sn hızlarda püskürtülür (Karaoğlanlı vd., 2014). Şekil 2.10'da CGDS kaplama yönteminin şematik olarak gösterimi mevcuttur.

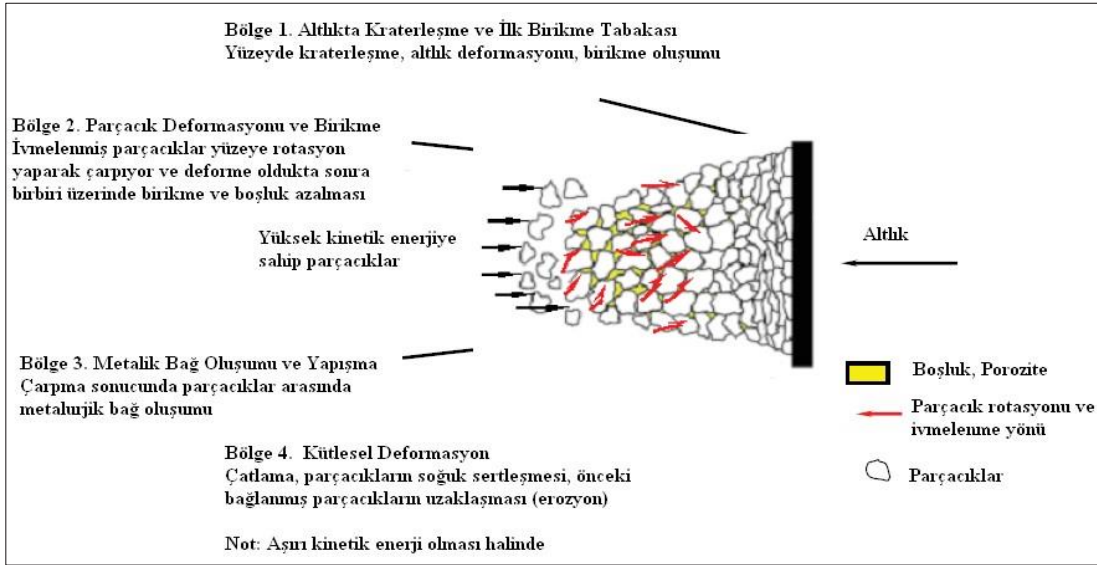


Şekil 2.10: CGDS kaplama yönteminin şematik gösterimi (URL-5, 2018).

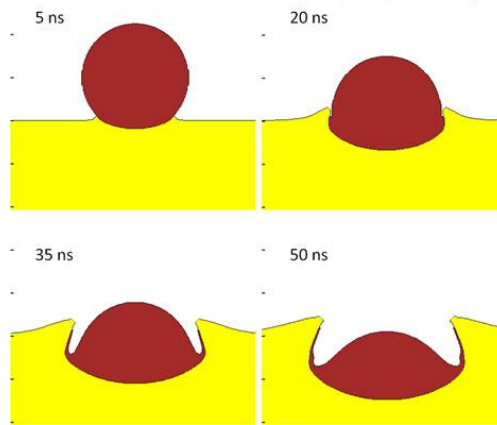
Şekil 2.13'te alüminyum bir yüzeye çarpan bakır partikülün deformasyona uğrama aşamaları görülmektedir. Yüzeye yüksek hızlarda çarpan ilk parçalar, altlık malzemesinin yüzeyini temizlemiş ve yüzeyde deformasyon oluşturmuş olur. Bu sayede arkadan gelen partiküllerin yapışma mukavemeti de yüzeydeki kesme kuvvetlerinin etkisiyle artmış olur. Bu esnada 50 ns gibi çok kısa bir süre içerisinde sahip oldukları kinetik enerji termal enerjiye dönüşerek, parçacığın yumuşayarak viskoz etkisi ile yüzeyde gerilim oluşumunu engellemiş olur. CGDS kaplama tekniğinin temel mantığı için adyabatik kayma kararlılığı denilen partikül etkisinden söz edilebilir. Bu etki aslında katı halde bulunan parçacıkların bir sıvı gibi yüzeyden akması etkisidir. Böylece parçacıklar bir arada kalma yeteneklerini kaybederler. Bu yüzden parçacıklarda yapışmanın gözlenmesi için kritik bir V hızına ulaşılması ve bu hızın aşılması gerekmektedir (Raoelisona vd., 2018).



Şekil 2.11: CGDS kaplama yönteminde kaplama oluşumu (URL-6, 2015).



Şekil 2.12: CGDS kaplama yönteminde kaplama oluşumu (URL-6, 2015).



Şekil 2.13: Alüminyum bir yüzeye çarpan 20 mikron bakır kürenin deformasyonu (URL-7, 2000).

Şekil 2.11 ve 2.12’de CGDS prosesi ile kaplama katmanının oluşum aşamaları detaylı olarak görülmektedir. Her parçacık kendisinden sonra gelen parçacığın kendisini deformasyona uğratmasıyla birbirine bağlanır, böylece kaplama tamamlanmış olur. Partikül boyutları 1-50 µm civarındadır. Her ne kadar soğuk bir yöntem olsa da partiküller etki anında oldukça sıcaktır. Bu da parçaların deformasyonuna yardımcı olan bir diğer etkidir. Kritik bir hızı aşan partiküller; belirlenmiş olan sıcaklıklarda püskürtme işleminin yapılması ile altlık malzeme üzerinde birbirlerine çarparak plastik deformasyona uğrar, böylelikle birikme işlemi tamamlanarak malzeme kaplanmış olur. Partiküller belirli bir kritik hızı aşamazlarsa altlık malzeme üzerine yeterince hızlı çarpmadığı için, sekerek yapışma işlemi görülmeden saçılır. Bu olay altlık malzemesinde deformasyona da sebep olmaktadır (Ajdelsztajn vd., 2005).

Kaplama için kullanılacak malzemeler metaller seramikler, sermetler ve polimer esaslı malzemeler olabileceği gibi; altlık malzemelerinde kullanılan malzemelerde parçacık hızlarından ve özellikle seramiklerin kırılma yapısından dolayı tercih edilememekle birlikte kullanılabilir. Bunun yanı sıra; parçaların restorasyonu ve onarımı için paslanmaz çelik ve bakır esaslı olanlar tercih edilir. Yüzeyde iletkenlik istenen alanlarda; çinko, kalay, bakır, W-Cu alaşımları tercih edilir. Temel olarak rotor, bıçak, gemi pervanesi ve dişli kutusu gibi endüstriyel ve uçak parçaları için yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Özellikle sıcak-elektrokimyasal korozyon ve oksidasyon direnci aranan gaz türbin motorları gibi yüzeylerde NiCr, MCrAlY alaşımları tercih edilir (Kalsi vd., 2012).

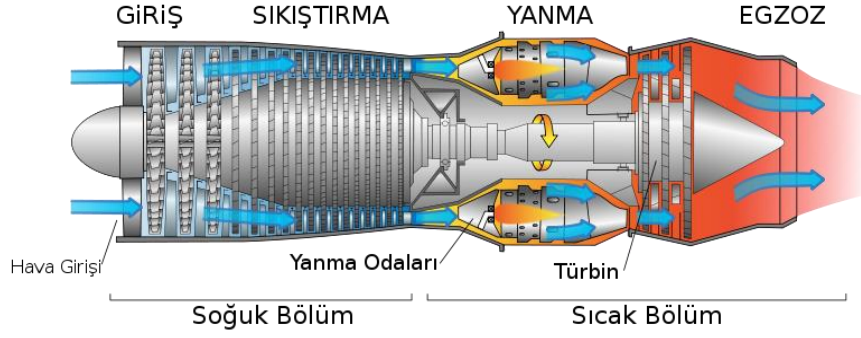
Avantajlarından bahsedecek olursak; özellikle ısı kullanılarak parçacıklar ergitilmediğinden, hasar görmüş bir bileşen, neredeyse orijinal olarak eski haline döndürülebilir. Yine ısı kullanılmamasının bir sonucu olarak toz partiküllerde ve yüzeyde herhangi bir kimyasal değişim, kayıplar, faz dönüşümleri, çözünme gibi problemler görülmez. Isı kullanımı olmadığı için bir soğutma sistemine ve maliyetine gerek olmayacağı gibi güvenlik açısından da pratiklik sağlamış olur. Etrafa zehirli bir gaz çıkışı olmadığı için çevre dostu bir yöntem olarak görülür. Ayrıca; süreç başlangıcında parçaların yüzey deformasyonu ile ayrıca bir yüzey hazırlığı işlemi gerektirmeyeceğinden zamandan tasarruf edilmiş olur. Yüksek hızlarda yapılan işlemde dolayı elementlerin oksijen ilgisi azalacağı için daha az oksit içeren, daha homojen yapıda ve daha yoğun bir kaplama elde edilmiş olur.

Dezavantajlarına gelecek olursak; yukarıda bahsedildiği gibi, seramikler gibi sert ve kırılğan altlık malzemelerde mutlaka bir bağlayıcı gerektirir. Sünek malzemelerin yapısından dolayı yapışma kabiliyeti zayıftır. Gaz sarfıyatı yüksektir.

2.2 Termal Bariyer Kaplama (TBC) Sistemi

Özellikle uzay ve uçak sanayinde kullanılan; gaz türbin motorları, pervane kanatları gibi önemli ve agresif koşullarda çalışan parça malzemelerinde karşılaşılan yetersizlikleri karşılamak amacıyla; 1960 ve 1980 yılları arasında, süper alaşımlar geliştirilmiş, dövme metalik malzemeler kullanılmış ve bu malzemelere mekanik ısı işlemler uygulanmış, yönlü alaşımlar kullanılmış ve daha benzer birçok uygulama ile mekanik özellikleri, ısı özellikleri kullanım ömürleri geliştirilmek amaçlanmıştır. Ancak bu gelişmeler yeni nesil çalışmalar için de yetersiz kalmış ve 1980'lerde termal bariyer kaplamalar adıyla bir kaplama sistemi geliştirilmiştir. Bu gelişmeler sayesinde 20 yıllık süreç içerisinde yalnızca malzeme iyileştirmesi gibi işlemlerle 20 °C arttırılabilen kullanım sıcaklığı, termal bariyer kaplamaların gelişimi ile 100-300 °C'ye kadar arttırılabilmektedir (Karabaş ve Bal, 2015; Reed, 2006). Öncelikle bu türbinlerin çalışma prensibini basitçe anlatmak kaplamaların kullanım amacını ve önemini anlamak açısından yarar sağlayacaktır.

Bir gaz türbini hava araçlarının çalışması gereken itme kuvvetine ulaşması ve hızının kontrol edilmesinde kullanılır. Şekil 2.14'te bir gaz türbin motorunun şematik gösterimi Şekil 2.15'te ise gaz türbin motorlarında kaplama işlemine tabi tutulabilen parçalar gösterilmektedir. Kompresör, yanma odası, türbin kanatlarından oluşan sistemde; gaz türbininden giren havanın basıncı kompresör ile arttırılarak yanma odasına itilir. Yanma odasında yanan gazlar ısının etkisi ile genişler ve türbin kanatlarına çarparak hareketi sağlar. Dolayısıyla motor sisteminde sıcaklığın yüksek olması, motorun verimini arttıran bir etki olmaktadır. Sıcaklığın yüksek olduğu ortamlarda çalışan parçaların ise; ortam koşullarına oldukça dayanıklı olması istenir (Karabaş ve Bal, 2015).



Şekil 2.14: Bir gaz türbin motorunun şematik gösterimi (URL-8, 2016).



Şekil 2.15: Bir gaz türbininde termal bariyer kaplama uygulanan parçalardan bazıları (URL-8, 2016).

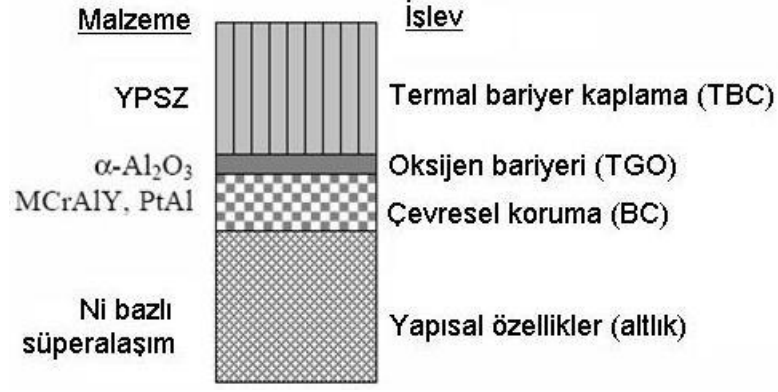
İşte burada; bir metal malzeme üzerine, yapışmayı iyileştirmek için bağ kaplama ve onun üzerine de ısı dayanımı ve termal genişleme katsayısı oldukça yüksek, termal iletkenliği oldukça düşük seramik üst kaplama şeklinde tamamlanan TBC sistemleri devreye girmektedir (Vaßen vd., 2010). Gaz türbin motorlarında yoğun olarak kullanımı tercih edilen bu sistemin temel amacı; yüksek sıcaklı ortamlarının olumsuz şartlarına karşı parçaların korunmasını ve yalıtımını sağlayarak çalışma ömrünün arttırılmasıdır (Habibi, 2014).

TBC sistemlerinin ana malzemesi ve korozyon ortamına karşı korunacak olan malzeme; altlık malzemesidir. Her ne kadar kaplama işlemine tabi tutulsa da çalışma ortamlarının değişimine ve şartlarına göre altlık malzemesinin sahip olması gereken bazı temel özellikler vardır. Çalışma ömrünün uzun olması için korozif, aşındırıcı ve yoran ortamlara karşı altlık malzemesinin; yüksek mukavemet, yüksek yorulma ve sürünme dayanımı, erozyon ve korozyon direncine sahip olması beklenmektedir. Bu zorlu koşullara karşı en

iyi performansı gösterebilecek malzeme seçimi de hasara az uğrayabilecek tane yapısına sahip süper alaşımlar olarak tercih edilir. 1100 °C sıcaklıklarda dahi sertliğini kaybetmeyen, YMK yapıya sahip, korozyon direnci ve diğer özellikleri iyileştirilmiş tek kristalli süper alaşım malzemelerin kullanımı yapılan çalışmalar neticesinde uzun yıllardır sürmektedir (Karaoğlanlı, 2012; Wang vd., 2015; Özgürlük, 2016).

TBC sisteminde metalik bağ kaplama genel olarak MCrAlY alaşımı ve seramik üst kaplama da YSZ en verimli kaplama sonucunu verdiği belirlendiğinden tercih edilmektedir. Bu alaşımın özellikle sıcak korozyon ortamlarında oksidasyon ve sıcak korozyon etkilerine karşı yüksek bir performans sağladığı gözlemlenmiştir (Gurrappa ve Rao, 2006). Altta bulunan metal içerikli bağ kaplama tabakası, seramik kaplama ile altlık malzemesi olan metal yüzey arasındaki yapışma sırasında meydana gelen uyumsuzluğu gidermek için uygulanırken, termal iletkenliği nispeten düşük olan seramik üst kaplama sayesinde altta kalan metalik bağ kaplama malzemesi türbinde oluşan yüksek sıcaklıktan etkilenmemiş olur. Seçilen altlık malzemenin; kaplama içerisindeki iç gerilmelerin en aza inmesini sağlamak için düşük elastik modüle ve düşük termal genişleme katsayısına sahip olması tercih edilir. Termal genişleme katsayılarının iki kaplama arasında uyumsuzluk yaratacak oranda birbirinden uzak olması kaplamada gerilmelere yol açarak olumsuz etkileyecektir. Termal genişleme katsayıları birbirine yakın olarak tercih edilen kaplama malzemeleri sayesinde; üretilen kaplamanın kalitesi, yoğunluk ve korozif ortamlara karşı dayanımının artmasını sağlar (Avcı, 2015).

Bunun yanı sıra TBC sistemlerinin en önemli özelliklerinden biri olan ısı iletimi özelliğinin, taneciklerin şekli ile doğrudan ilgisi vardır. Taneciklerin boşluklu yapıda olması kaplama içerisinde ısı iletiminin daha sağlıklı olmasına yardımcı olacaktır. Aynı şekilde üst kaplamada yüksek performansından ötürü seçilen farklı kullanım alanları için farklı oranlarda Ytriya ile stabilize edilmiş zirkonyum; kafes yapısındaki boşluklar sayesinde titreşimlerin azaltılması sağlanmıştır. YSZ yapısının elde edilmesi ile yapıdaki termal iletkenlik düşürülmüş olur (Kaßner vd., 2008; Avcı, 2015; Sokołowski vd., 2017). Şekil 2.16 bir TBC sisteminin yapısını göstermektedir.



Şekil 2.16: Bir TBC yapısı (Dalkılıç ve Tanatmış, 2009).

1960'lı yıllarda Ca ve Mg ile stabilizasyonu sağlanmaya çalışılan zirkonyum ile yapılan kaplamaların çalışma sıcaklıklarının 1000 °C'lere çıktığı gözlenmiş olsa da uzun çalışma süreleri karşısında dayanıksız olduğu ve kafes yapısının bozunduğu belirlenmiştir. 1970'li yıllara gelindiğinde; stabilizasyon için kullanılan farklı oranlarda Y₂O₃ ilaveli kaplama çalışmalarında, verimin ve termal dögünün, %7-8 oranında Y₂O₃ ilavesi ile stabile edilen zirkonyuma ait olduğu görülmüştür. Yapılan çalışmalar devam etmekte olup bunun bir sonucu olarak 1300 °C sıcaklıklarda bulunan çalışma ortamları için YSZ'ye perovskitler, hekzaalüminalar, piroklar ve farklı fazlarda bulunan seramik esaslı malzemeler alternatif olarak gösterilmektedir (Reed, 2006; Çiftyürek, 2009; Döleker, 2015).

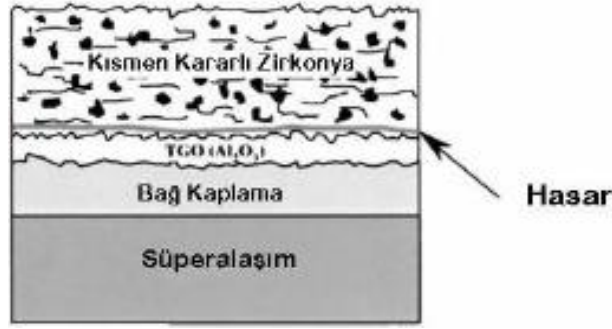
2.2.1 Termal Bariyer Kaplamalarda Hasar Mekanizmaları

Bir TBC sisteminde hasarın oluşumu; altlık malzemesi, kaplamanın maruz kaldığı çevre koşulları ve uygulanan yükler, kaplama yöntemi, hazırlama teknikleri gibi birçok etkene bağlı olabilmektedir. Hasara yol açan nedenler çevresel ve yapısal birçok faktöre bağlı olabilmektedir. Bu hasar mekanizmalarını genel olarak sıralarsak;

- Oksidasyon
- Korozyon (Sıcak-Elektrokimyasal)
- Erozyon
- Termal şok
- CMAS (Ca-Mg-Al-Si) atağı
- Kimyasal ve termomekanik hasarlar
- Sürünme, aşınma, yorulma

TBC sistemlerinin çalıştığı ortamın koşullarına sağladığı uyum ve dayanıklılığın gözlemlenebilmesi açısından öncelikle meydana gelebilecek hasar mekanizmalarının anlaşılması ve öngörülmesi gerekmektedir. Bu hasar mekanizmalarının oluşum ve gelişim şartları ve süreçleri iyi anlaşıldığında, yapılan kaplamaların bu hasar mekanizmalarından etkilenip etkilenmeyeceği ve ne şekilde tepki göstereceği incelenebilir (Kaplan, 2017).

TBC sistemlerinde bulunan ve seramik üst kaplama ile bağ kaplama arasında, yapışma etkisini arttırdığı gözlemlenen TGO ara katmanı bulunmaktadır. Kaplama sistemlerinde görülen hasar mekanizmaları genellikle bu yapı odaklıdır. Şekil 2.17’de TBC sisteminde görülen TGO katmanı kaynaklı bir hasar mekanizması görülmektedir. Yüksek çalışma sıcaklıklarının da yapıya etki etmesi ile yapıda ısıl genleşme uyumsuzluğuna, çatlaklara ve dolayısıyla hızlı bir hasara yol açmaktadır (Karaoğlanlı vd., 2014). Genellikle; seramik üst kaplamanın oksijen difüzitesine uygunluğu ile kaplama içerisine nüfuz eden element; bu ara tabaka ya da seramik katmanda çatlak oluşumuna sebebiyet verir. TBC sistemlerinde sıkça görülen bir hasara örnek olarak seramik üst tabakanın kabuk halinde dökülmesi verilebilir. Bunun sebebi; yukarıda anlatılan sebepten, iç kısımda başlayan çatlakların yüzeye paralel şekilde ilerlemesi ve kaplama parçasının çalışma ortamında maruz kaldığı yükler ile de birleşerek büyümesidir. Bu mekanizma APS kaplama yönteminde daha belirgin olarak görülebilmekteyken, CGDS tekniği ile üretilen kaplamalarda, işlem sırasında herhangi bir ısı uygulaması olmadığından bu hasar mekanizması daha az görülür. Çünkü yüzeyde ısıya maruz kalmamış ve yaklaşık tamamen oksitten arındırılmış bir yüzey elde edilir. Dolayısıyla daha yüksek sıcaklıktaki çalışma ortamlarında kullanıldığında daha fazla serbest TGO tabakasının oluşumu sağlanmış olur (Tzimas vd., 2000; Bi vd., 2001; Hongye vd., 2018). Ayrıca çalışma ortamında ve özellikle türbin kanatlarının çalışma ortamındaki termal şok mikro çatlak oluşumunun başlangıcına sebebiyet vermektedir. TBC sistemlerinde görülen bazı hasar mekanizmaları, oluşumları ve gelişimleri aşağıda gösterilmektedir.



Şekil 2.17: Plazma sprey kaplamada görülen hasar tabakası (Kaplan, 2017).

2.2.1.1 Oksidasyon

Oksidasyon reaksiyonu temel olarak bir molekülün atom yahut iyonla reaksiyonu sonucunda elektron kaybetmesi olayı olarak açıklanır. TBC sistemlerinde bu mekanizma; yüksek sıcaklığa bağlı olarak, kalınlığı artan, TGO adı verilen oksit yapısının, bağ kaplamaya verdiği hasar mekanizması olarak görülebilir. Yüksek sıcaklıktaki oksijen ile etkileşimi sonucu oksitlenen metalik malzemelerin TGO katmanı ile birlikte kalınlığı artacaktır. Seramik üst kaplamanın, kaplama yöntemine bağlı olarak, kaplamanın iç kısımlarına oksijen difüzyonunun yoğunluğuna bağlı olarak bağ kaplama ve üst kaplama arasında oluşan TGO yapısı, kalınlığın yoğun olarak artması sonucu kaplamada ayrılmaya ve hasara yol açmaktadır (Eliaz vd., 2002; Karaoğlanlı, 2012).

TBC sistemlerinin kullanım alanlarının yüksek sıcaklık ortamları olan gaz türbin motorları olduğu varsayılırsa, söz konusu hasar mekanizmasının etkisi büyüktür. Öyle ki TBC sistemlerinin servis ömrünün belirlenmesinde en önemli faktörlerden biri sayılabilir. Ayrıca kullanılan altlık malzemelerin de oksitlenmeye karşı dirençli olması yine kaplama yapılan parçaların kullanım ömrüne pozitif etki yapacaktır. Özellikle Cr ve Al gibi elementlerin Inconel 718 gibi süper alaşımlarda alaşım elementi olarak kullanımı, yavaş büyüyen bir oksit tabakası üretilebilmesi ve sistemin ani hasarlara karşı direncini artırır (Sheng vd., 2019). Bununla birlikte sistemin oksidasyona karşı direncinin olmaması, yüzeyde başlayan bir ani çatlağında etkisi ile kaplama sistemine oksit difüzyonunun hızlanarak yayılmasıyla iç çatlaklara yol açması da muhtemeldir.

2.2.1.2 Termal Şok

TBC sistemleri bilindiği üzere yüksek sıcaklık ortamlarında tercih edilmektedir. Özellikle gaz türbin motorlarının yanma odasında kullanılan elemanların yanmış ve yüksek sıcaklık gazlarının olumsuz olarak parça yüzeylerini etkilemesi söz konusu olduğu için bu kaplamalar tercih edilir. Malzemelerin bu yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra ani olarak ısı değişimine uğrayarak soğuması halinde tersinir ya da tersinmez olarak verdiği tepki, dayanma kapasitesi; termal şok olarak nitelendirilebilir. Sonuç olarak malzeme hasara uğrar, kırılır (BI vd., 2001).

Bir malzemenin termal şok direncini; malzemenin ısı iletim katsayısı, varsa iç çatlaklar, porozite termal ve termal gerilmelerin oranı ve sürekliliğidir. Malzemeler içerisinde en kırılğan olarak görülebilecek seramiklerin ısı iletim katsayılarının oldukça düşük olması termal şok dirençlerinin ise oldukça düşük olmasına sebep olan bir faktördür (BI vd., 2001).

TBC sistemlerinde üst kaplamanın seramik olarak seçilme nedeni olarak; seramik malzemelerin ısı izolasyonu sağlaması ve ısı iletim katsayısının oldukça düşük olması gösterilmektedir. Bu sayede yüksek sıcaklık ortamlarında çalışan parçalara uygulanan kaplamaların yüzeyi sıcaklık sebebiyle oluşabilecek hasarlara daha dayanıklı hale gelmektedir.

Malzemelerdeki termal şok davranışı, yine malzemenin termal iletkenliği, termal genleşme katsayısı, elastik modülü ve faz dönüşümü gibi bazı faktörler ile ilişkilendirilir. Örneğin; bir malzemedeki termal iletkenlik ne kadar yüksek olursa, ısının malzemenin her tarafa dağılımı hızlı bir şekilde olacak, sıcaklık farkları azalacaktır. Dolayısıyla sıcaklık farkları hızlı kapanacağından termal şok direnci de artacaktır (Kaplan, 2017).

Kaplamanın türüne göre içerisinde bulundurduğu gözenekler ve oksidasyon oranı da termal şok davranışı için oldukça önemlidir. Yüksek sıcaklık maruziyeti sırasında oluşan ısıl gerilmelerin varlığı bu gözenekler sayesinde ortadan kalkar ve tekrar soğuma sırasında giderilen çekme gerilmelerinin yerini basma gerilmeleri almış olur. Bu da parçada zaman içerisinde hasara sebebiyet verir. Ayrıca metalik bağ kaplama ile seramik üst kaplama arasındaki termal genleşme uyumsuzluğu da ısıya maruz kalma esnasında yukarıda

bahsedilen iç gerilmelerin bir sebebidir. Bu sebeple iki kaplama arasındaki termal genişleme uyumsuzluğunun giderilmesi oldukça önemlidir (Hongye vd., 2019).

Termal şoka maruz kalmış bir parçada görülebilecek hasarlar üst kaplamanın atması, merkezde meydana gelen çatlaklardan kaynaklı olarak parçalanma ve yüzey çatlakları şeklinde olabilmektedir. Üst kaplamaların seramik malzemelerden seçimi yapıldığı varsayılırsa; kaplamanın ömrünün uzun olması için termal şok dirençlerinin yüksek olması gerektiğine dikkat edilmelidir (Kaplan, 2017).

2.2.1.3 Sıcak Korozyon

Çalışma ortamlarının etkisi ile oluşan hasar mekanizmalarından biri olan sıcak korozyon; ortamda bulunan tuzların kaplama yüzeyinde bulunan mikro çapta çatlaklardan ve ya gözeneklerden malzemeye doğru sızması ile hasara neden olmaktadır. Özellikle gaz türbin motorlarının çalışma ortamlarının sahip olduğu sıcaklık göz önüne alındığında sıkça rastlanabilecek bir hasar mekanizmasıdır (Liu vd., 2012; Pulci vd., 2015).

Sıcak korozyon; yüksek sıcaklıklarda görülebileceği gibi nispeten daha az yüksek sıcaklıklarda da etki göstermektedir. Bu durumda meydana gelen hasarın etkisi 1000 °C'lerde görülen etkilere nazaran daha tespiti zor bir halde oluşmaktadır. Meydana gelen çatlaklar daha az ve belirlenmesi daha güç olduğu halde meydana gelir (Injeti vd., 2015).

Sıcak korozyon ortamının kaplamalara etkisini gözlemlemek için Na₂SO₄ benzeri tuzlar manuel olarak oluşturulan ortamlarda kullanılabilir. Bu ortamlarda genellikle %60 Na₂SO₄ ve %40 V₂O₅ bileşikleri kullanılır. Parçaların kullanım ortamına göre; V ve Na gibi elementlerin YSZ içeriğine sahip üst kaplama tabakasının yapısına etki etmesi ile sıcak korozyon etkileri gözlenir. Çalışma ortamlarının benzeri olarak oluşturulan bu tuz ortamları, malzeme yüzeyinde bulunan mikro çatlaklar ve porozitelerden süzülerek hasara yol açmaktadır. Ortam ile etkileşime giren üst tabaka; YVO₄ bileşiğinin oluşmasına yol açar (Parlakyiğit, 2013; Gök, 2015).

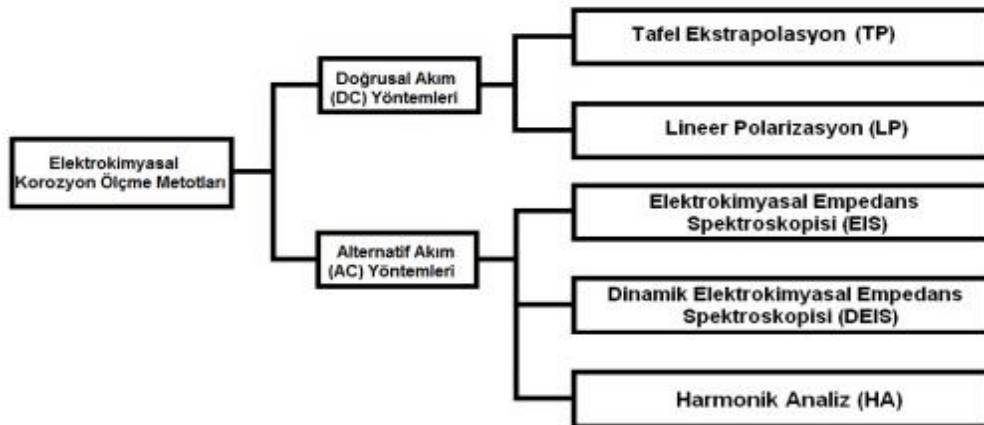


Yapıda tetragonal ZrO_2 fazının kararlı olarak kalmasını sağlayan Y_2O_3 'in bulunmaması üst tabakanın hasara uğrayarak bozunmasına sebep olur. Y_2O_3 bileşiğinin yüksek sıcaklık ortamlarında açığa çıkan yüksek sıcaklık gazlarının içeriğinde bulunan vanadyum, sodyum, sülfür gibi atık gazlar ile reaksiyona girmesi bu duruma yol açar. Tuz kristalleri yapısal olarak iyonik özellikte olduğu için üst yapıda bulunan mikro boyuttaki çatlaklardan alt tabakalara sızdığına TGO yapısında ve altlık malzemede sıcaklığında etkisi ile bozunmaya sebebiyet verir. Altlık malzeme, bağ kaplama ve üst kaplama arasındaki bütünlüğün bozulması da kaplamaların hasarına yol açmaktadır (Döleker, 2015).

Benzer bir durum ZrO_2 için de geçerlidir. Zirkonya ise farklı bir yakıt kullanımında içeriğinde fosfor ve sodyum bulunan gazlar ile etkileşime girer. Aynı şekilde üst tabakanın bütünlüğünün bozulması hasara yol açmaktadır (Karaoğlanlı, 2012).

2.2.1.4 Elektrokimyasal Korozyon

Birbirleri arasında galvanik serilerden görülebilecek potansiyel farka sahip metallerin/alaşımların ve elektron akışını sağlamaya yardımcı olacak bir elektrolitin bulunması ile metallerde ya da alaşımlarında bozulma meydana gelmesi olayı olarak açıklanabilir. Sulu ortamlarda görülen aşınma mekanizması elektrokimyasal bir nitelikte olduğundan, elektrokimyasal korozyon testlerinin yapılması, bu alanda çalışan parça ve malzemelerin araştırılmasında büyük önem taşır (Gerengi vd., 2013). Elektrokimyasal korozyon testlerinin ölçümü için birçok farklı yöntem bulunmaktadır. Şekil 2.18'de bu yöntemler görülebilir.

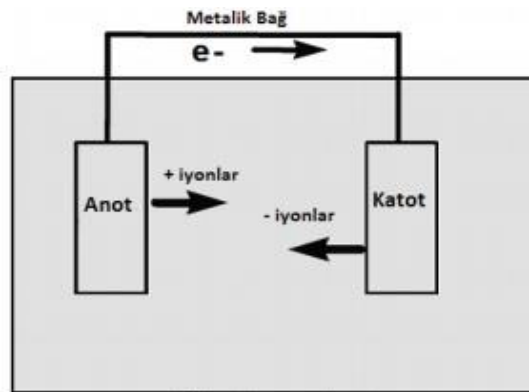


Şekil 2.18: Elektrokimyasal korozyon ölçme yöntemleri (Uzunsoy ve Küçükelyas, 2017).

Sulu ortamlarda görülen bu tip korozyonda iki farklı metalden birisi anot diğeri katot olarak davranır. Katot için indirgenme reaksiyonu gerçekleşirken, anot için yükseltgenme reaksiyonu gerçekleşir ki bu da; anot olan metalin korozyona uğradığını göstermektedir. Bu tip hasar mekanizmalarının incelenmesinde kullanılan anot ve katot madde arasındaki elektriksel potansiyel farkın belirlenmesi için galvanik seriye dikkat edilmelidir (Duana vd., 2018).

Yapay bir deniz suyu ortamının oluşturulması ile TBC sistemlerinin hasar mekanizmasının anlaşılmasını sağlamak için elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) adı verilen yöntemin kullanılması güvenilirdir. Bununla birlikte tafel ekstrapolasyon yöntemi ve lineer polarizasyon yöntemleri korozyon hızının belirlenmesinde yardımcı olmaktadır.

Oda sıcaklığı koşullarında yapılan deneyler için bir en az iki elektrot içeren bir elektrokimyasal hücre düzeneği içermelidir. Şekil 2.19'da bir elektrokimyasal korozyon hücresine ait şematik görünüm verilmiştir. Elektrot sayısı belirlenmek istenen deney koşulu ve tercihe göre; çalışma referans ve karşıt elektrot olmak üzere 3 elektrotlu olabilir. Üst kaplamada bulunan mikro çatlaklardan elektrolitlerin ve dolayısıyla tuzların sızması ile kaplamanın kalitesini ve ortama karşı dayanıklılığının anlaşılmasını sağlar. Anot ve katot arasındaki etkileşim sonucunda elektrotun potansiyelinde meydana gelen değişimlerden korozyon potansiyelleri ve korozyon akım yoğunlukları belirlenebilir. Belirlenen bu özellikler sayesinde ölçülen deney materyallerinin koşullara karşı gösterdiği direnç hakkında yorumlamalar ve kıyaslamalar yapılabilir (Öztekin, 2008; Farooq vd., 2012).



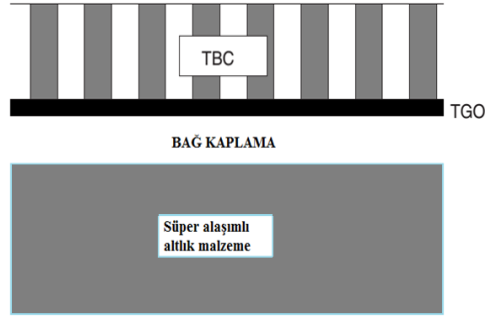
Şekil 2.19: Bir korozyon hücresinin şematik görünümü (Uzunsoy ve Küçükelyas, 2017).

Korozyon oluşumunun gözlemlenmesi için anot, katot, metalik bağ (elektriksel yol) ve iyon akışının sağlanacağı elektrolit sıvısı bulunmalıdır. Anot metalde iyon üretimi ile var olan elektronlar, katoda hareket etmek için elektriksel bir yolu yani metalik bağı takip eder. Bu sırada elektrolit sıvısı olan su içerisinde (H^+) ve (OH^-) içerisinde iyonları bulunur. Hareket eden elektronlar; elektriksel dengeyi sağlayabilmek için, elektrolit içerisindeki pozitif iyonlar ile reaksiyona girerler. Katot hücrelerinde bir H iyonu, bir elektron kabul ederek; atoma dönüşürken, metal iyonları elektrolit içerisindeki (OH^-) iyonları ile tepkimeye girerek korozyon tabakasının oluşumunu gerçekleştirir. Katotta meydana gelen hidrojen atomu oluşumu bazı durumlarda hidrojen molekülünün salınımı ile metalik kafesler içerisine girerek hidrojen gevrekliği adı verilen kırılmaya yol açabilmektedir.

Elektrokimyasal korozyon ortamlarından kaplamaların etkilenme oranları ve davranışlarının incelenmesinde EIS yöntemi oldukça etkili bir yöntemdir. TBC sistemlerinde elektrokimyasal korozyona bağlı olarak TGO ve kaplama kalınlıklarının değişimi, çatlak ve gözenekliliğin başlama ve ilerlemesi gibi incelemelerin kaplamalara herhangi bir hasar uygulamadan incelenmesi için oldukça sık tercih edilen, kullanışlı bir yöntemdir. Bu yöntemde temel olarak deney numunesine uygulanan bir doğru akıma malzemenin verdiği akım tepkilerinin toplanarak elde edilen polarizasyon eğrileri, Bode ve Nyquist eğrileri gibi grafiklerin yorumlanması esasına dayanmaktadır. (Byeon vd., 2005; Baskaran ve Arya, 2018).

2.2.2 Termal Olarak Büyüyen Oksit (TGO) Tabaka Yapısı

TGO yapısının genel olarak bağ kaplama ile seramik üst kaplama arasında oksijen difüzyonuna bağlı olarak ve yüksek sıcaklık etkisiyle yavaşça gelişen bir ara katman formudur ve oluşması sıcaklık olduğu sürece kaçınılmaz olan bir alümina kaynaklı oksit tabakasıdır. Bu yapı TBC sistemlerinin aşınması ve oksidasyona karşı gösterdiği dirençte önemli bir yere sahiptir (Tzimas vd., 2000). Bağ kaplama yapısında bulunan Al elementinin oksijen ile yüksek etkileşimi sonucu oluşan Al_2O_3 oksit yapısının zamanla büyümesi görülür. Şekil 2.20'de TBC sisteminin enine kesit görünümünde bir TGO tabakası gösterilmektedir.



Şekil 2.20: TBC yapısının enine kesit resmi.

TGO kalınlığı; kullanım alanındaki sıcaklığın değişimine bağlı olarak değişir. Bu sebeple yüksek sıcaklık ortamına maruz kalma süresi TGO yapısının gelişiminde önemli bir faktördür. Bunun yanı sıra uygulanan TBC yöntemi, yöntem uygulanırken kullanılan kimyasallar gibi birçok faktör de TGO yapısını etkilemektedir. Kaplamaların sahip olduğu katman yüzey durumlarında, TGO yapısının kalınlıklarının farklılık gösterdiği, farklı literatür araştırmalarında gözlemlenmiş olup; tepe noktalarda, çukur noktalardan daha kalın olduğu (bazı örneklerde 2,5 µm kadar) görülmüştür. Bu da araştırmalarda daha kalın olan TGO katmanının olduğu bölgelerde daha fazla gerilim olduğunu dolayısıyla, kalın bir TGO katmanına sahip olan TBC sisteminin daha erken hasara uğramasına sebep olur. Bunun yanı sıra; bu oksit tabakası, kontrollü olarak gelişimi sağlandığında, yapışma mukavemetinin iyi olmasını ve oksijen difüzyonunun azalmasını kendi özellikleri nedeni ile sağlayarak, kaplama tabakasının zararlı gazlardan korunarak bütünlüğünün korunmasında da önemli bir rol oynamaktadır (Clarke vd., 2012; Khajezadeh vd., 2018).

Yapıda asıl hasara sebep olan şeylerden biri de hızlı oksijen difüzyonu ve TGO katmanının büyürken meydana getirdiği iç gerilimlerdir. Bu sebeple TGO yapısının, yapıda oksijen difüzyonunun en yavaş olduğu alüminadan oluşması istenir. Çünkü Al_2O_3 yapısından oluşan TGO katmanında oksijen difüzyonu en yavaştır ve kontrol edilebilir şekilde büyüme sağlanabilir. Bunun dışındaki yapılarda kırılma toklukları çok düşük olacağından çabuk kırılma meydana gelir (Li vd., 2012).

TGO yapısının büyümesinde bir diğer etken de bağ kaplama ve seramik üst kaplama yüzeylerinin pürüzlülüğüdür. TGO ile bağ kaplama ve üst kaplama arasında TGO kalınlığı arttıkça artan basma gerilmelerinin en yüksek olduğu bölgeler bağ kaplama için; en tepe noktası ve üst kaplama için de en girinti noktası olarak verilebilir. Böylece ara yüzler ne

kadar pürüzlü olursa, TGO kalınlığı o kadar artacağı için, basma gerilmeleri de artacak ve mikro çatlak oluşumu o kadar hızlı olacaktır (Shen vd., 2017).

BÖLÜM 3

MATERYAL VE METOT

3.1 Materyal

Bu çalışmanın genel amacını Inconel 718 nikel esaslı süper alaşım metalik malzeme, CoNiCrAlY esaslı metalik bağ kaplama ve YSZ içerikli seramik üst kaplama sistemine sahip TBC sisteminin ve bileşenlerinin bütün ve her birinin ayrı ayrı elektrokimyasal korozyon davranışlarının incelenmesi oluşturmaktadır. Yüksek sıcaklık yanında özellikle çalışmanın konusu itibariyle; asidik-bazik ortamlar deniz suyu ortamları gibi çalışma ortamlarında kullanılan pervane vb. parçaların, elektrokimyasal korozyon ortamından kaplama yüzeyinin ne şekilde etkilendiğini görmek amacıyla mikro yapısal incelemeler gerçekleştirilmiştir. Altlık malzeme üzerine HVOF kaplama yöntemi kullanılarak CoNiCrAlY metalik bağ kaplama ve APS yöntemi kullanılarak YSZ ($ZrO_2 + 8\% Y_2O_3$) seramik kaplama malzemeleri üretilmiştir. Kaplama işleminden sonra elektrokimyasal korozyon ortamının NaCl sıvısı içerisinde, malzemeye ve kaplamaya etkileri gözlemlenmiş, TGO yapısının gelişimi ve incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bu davranışlar karşısında parçaların mikro yapıları incelenerek farklı ortamlardaki etkileri karşılaştırmalı olarak yorumlanmıştır.

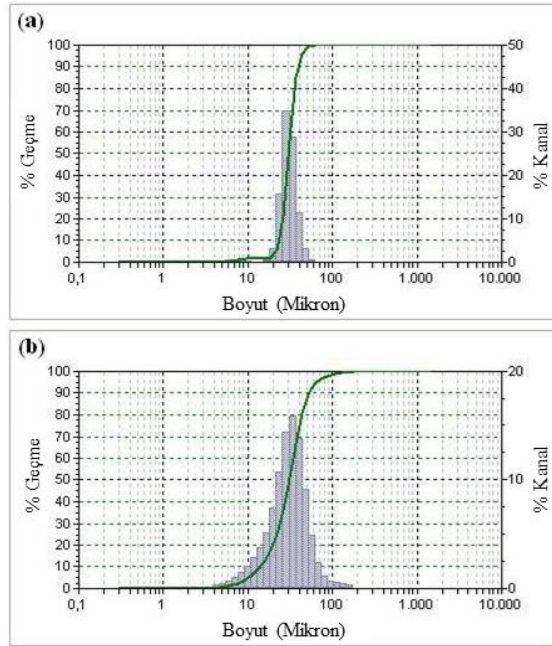
Yapılan çalışmalar için birçok farklı eğitim kurumu ve bölümden faydalanılmıştır. Kaplama işlemlerinin elektrokimyasal korozyon testleri için Konya Selçuk Teknik Üniversitesi Laboratuvarı, SEM görüntüleri için Bartın Üniversitesi Araştırma Laboratuvarında çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Bu kısımda kaplamaların kimyasal kompozisyonları, partikül boyutları, korozyon testleri, porozite ölçümleri, mikro yapı analizleri adım adım anlatılacaktır.

3.2 Toz ve Altık Malzemelerin Karakterizasyonu

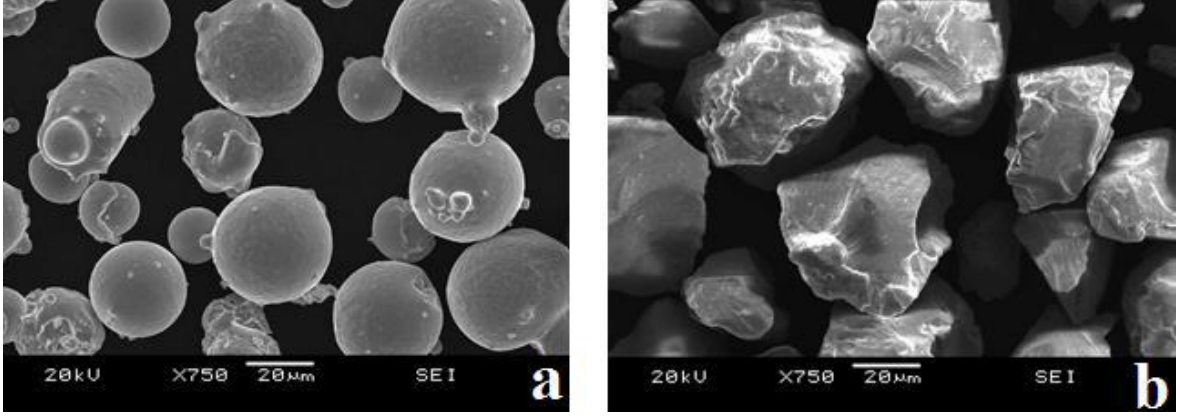
Çalışmada, kaplama yapılacak altık malzeme olarak nikel esaslı Inconel 718 süper alaşım metali tercih edilmiştir. Metalik altık malzemeye; ilk olarak CoNiCrAlY (SulzerMetco, Amdry 9951, 5-37 µm) alaşımından oluşan tozların, bağ kaplama için püskürtülmesi işlemi gerçekleştirilir. Bu çalışmada bağ kaplama işlemi için literatürde anlatılan şekilde HVOF kaplama tekniği seçilmiştir.

Seramik esaslı üst kaplama için ise YSZ içerikli, 20-45 µm partikül boyutlarına sahip tozlar kullanılarak, yine literatürde anlatılan şekilde APS yöntemi ile kaplama işlemi tamamlanmıştır. Toz malzemelerin partikül boyut dağılımının incelenmesinde Microtrack S3500 (ISO 13320- 1) cihazı kullanılmıştır. Şekil 3.1'de toz partiküllerine ait boyut dağılım grafikleri gösterilmektedir.



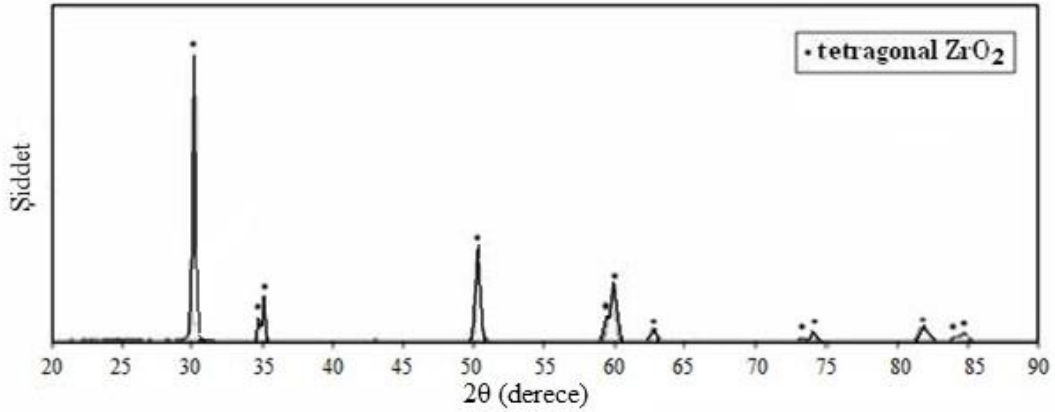
Şekil 3.1: XRD cihazından alınan sonuçlara göre kullanılan toz malzemelerin partikül boyutu dağılım grafikleri a. CoNiCrAlY, b. ZrO₂+8% Y₂O₃ (YSZ).

Toz partiküllerin karakterizasyonlarının belirlenmesinde LEO 1455VP SEM cihazından, faydalanılmıştır. Şekil 3.2'de belirtildiği üzere; iki farklı kaplama tozunun da karakteristik özellikleri için yüzey özelliklerinin küresel formda olduğu ve YSZ içerikli tozların, CoNiCrAlY içerikli tozlara oranla daha düzlemsel yapıda oldukları görülmektedir.



Şekil 3.2: a. CoNiCrAlY, b. $ZrO_2+8\%Y_2O_3$ (YSZ) içerikli toz partiküllere ait SEM görüntüleri.

Yine toz partiküllerin karakterizasyonu için Siemens D5000 marka XRD cihazından faydalanılmıştır. Aşağıda Şekil 3.3' te gösterildiği üzere; CoNiCrAlY tozlarının, Ni-Co γ -matriks ve NiAl β -çökeltisi olmak üzere farklı 2 fazdan oluştuğu; YSZ içerikli seramik üst kaplama tozlarının ise tamamen tetragonal fazdan oluştuğu gözlemlenmiştir.



Şekil 3.3: $ZrO_2-8\%Y_2O_3$ tozuna ait XRD pikleri.

3.2.1 Altlık Malzemenin Kimyasal Bileşimi ve Özellikleri

Altlık malzemesi olarak kullanılan Inconel 718 parçasının, Tablo 3.1'de görülebileceği üzere Ni ve Cr elementlerince zengin olması; korozyon direncinin yüksek olduğunu göstermektedir. Bu sebeple parçanın korozif ortamlarda kullanım için uygun bir malzeme seçimidir. Ayrıca Inconel 718 malzemesi yapısal olarak ortam koşullarında yüksek mukavemet ve sertliğe sahip, yorulma ve sürünme dayanımları yüksek bir malzemedir. Erime noktası 1330 °C'lere kadar çıkabilir.

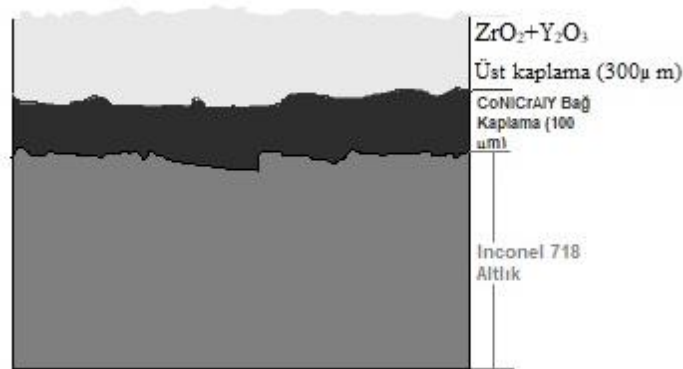
Tablo 3.1: Inconel 718'e ait kimyasal bileşim değerleri (Karaoğlanlı vd., 2014).

Inconel 718 Kimyasal Bileşim (%ađ.)								
Element	Ni	Fe	Cr	Nb	Mo	Ti	Al	Co
Ağırlıkça (%)	53,5	18	18	5,3	3	0,9	0,5	0,2
Element	Si	Cu	Mn	C	Ta	P	B	S
Ağırlıkça (%)	0,09	0,06	0,06	0,03	0,01	0,007	0,004	0,001

3.3 Termal Bariyer Kaplama Sisteminin Üretilmesi

Altlık malzemesi olarak kullanılan parçalar; 25 mm çapında ve 5 mm kalınlıkta, tel erozyon yöntemi ile temin edilmiştir. Kaplama işleminin temiz ve homojen olabilmesi için numune yüzeyi Al₂O₃ tozları ile yaklaşık 75° açıda ve 10-15 cm uzaklıktan püskürtülerek kumlama işlemine tabi tutulmuş ve numune yüzeyinin yağ, kir gibi olumsuzluklardan temizlenmesi ve bağ kaplamanın yüzeye daha iyi tutunması sağlanmıştır.

Şekil 3.4'te TBC sistemine ait bir şematik görünüm verilmiştir. Bağ kaplama olan CoNiCrAlY alaşımının, metalik altlık malzemesi üzerine uygulanmasında HVOF (K2-GTV Germany) püskürtme yöntemi, seramik üst kaplama olan YSZ içeriğinin uygulanmasında ise APS (F6-GTV) kaplama yöntemi tercih edilmiştir. Toz partikül boyutları bağ kaplama için 5 ila 37 µm, üst kaplama için yaklaşık 20 µm civarındadır. Yöntemin uygulanmasında literatür bilgilerinde anlatılan esaslar ve üretici firmanın standartları esas alınmış olup, bağ kaplamanın kalınlığı yaklaşık 100 µm, üst kaplamanın kalınlığı ise yaklaşık 300 µm olarak ölçülmüştür. Kaplama işlemlerinin uygulama parametrelerine ait bilgiler aşağıda Tablo 3.2 ve 3.3'te detaylı olarak verilmiştir.



Şekil 3.4: Oluşturulan TBC sisteminin şematik görünümü.

Tablo 3.1: HVOF bağ kaplama uygulamasına ait parametreler.

Kaplama Yöntemi	Yanıcı Gaz	Taşıyıcı Gaz	Toz Besleme Oranı	Kaplama Mesafesi
HVOF Bağ Kaplama	O ₂ (880 slpm)	Argon (15 slpm)	50 gr/dk (12 slpm)	330 mm

Tablo 3.3: APS üst kaplama uygulamasına ait parametreler.

Kaplama Yöntemi	Ark Akımı/Voltajı	Ar/H₂ Akış Oranları	Toz Besleme Oranı	Kaplama Mesafesi
APS Üst Kaplama	630 A/ 65 V	Argon (44 slpm) H ₂ (13 slpm)	25 gr/dk (12 slpm)	90 mm

3.4 Termal Bariyer Kaplamaların Elektrokimyasal Korozyon Testlerinin Gerçekleştirilmesi

Inconel 718'in altlık olarak kullanıldığı, termal bariyer kaplama uygulamalarında, numunelerin belirli ortamlardan nasıl etkilendiğinin anlaşılabilmesi için oluşturulan elektrokimyasal korozyon deney düzeneği aşağıdaki Şekil 3.5'te verilmiş olup, numunelerin karakterize edilmesi ve elektriksel akım potansiyel eğrilerinin oluşturulması için Gamry Instrument Model 600 (Gamry Interface 1010B) cihazı kullanılmıştır.



Şekil 3.5: Elektrokimyasal korozyon testi deney düzeneğinin görünümü.

İlk işlem olarak; kaplama işlemleri tamamlanmış olan numuneler korozyon testine tabi tutulmak amacıyla Metkan, Micracut 201 cihazında 100 m/sn hızda daha küçük boyutlarda kesilmiştir. Malzeme yüzeylerinde kesim işleminden sonra oluşabilecek kirli yüzeyler etanol sıvısı ile temizlendikten sonra, yüzeyde 1cm²'lik inceleme alanı kalacak şekilde sıcak silikon ile kaplanmıştır. Daha sonra korozyona uğrıtılacak numunelerin daldırılacağı, 0,1 molar NaCl çözeltisi hazırlanmıştır. Deneyle oda sıcaklığı seviyesinde ve 3 elektrotlu klasik sistemde yapılmıştır. Elektrokimyasal korozyon hücresinin tamamlayıcısı referans elektrot (RE) olarak Ag/AgCl, karşıt elektrot (CE) olarak grafit, çalışma elektrotu (WE) olarak da deney numuneleri tanımlanmıştır.

Numunelere sırasıyla açık devre potansiyeli (OCP), elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) ve potansiyodinamik polarizasyon testi (PDP) olmak üzere 3 farklı korozyon testi uygulanmıştır. Deneye ait değerler; OCP testine başta olarak 300'er sn tutma süresiyle; 20 kHz-10 mHz frekans aralığında ve 10 mV AC olacak şekilde EIS verileri uygulanmıştır. Testlere ait analizlerin yapılmasında Gamry Echem Analyst programından faydalanılmıştır. PDP testlerinden elde edilen eğrilerin başlama potansiyeli ± 250 mV bitme potansiyeli +1500 mV olarak belirtilmiştir. Tarama hızı 1 mV/sn olarak uygulanmıştır.

BÖLÜM 4

BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Termal Bariyer Kaplamaların Elektrokimyasal Korozyon Testi Sonuçları

Altlık malzemesi olan Inconel 718, bağ kaplamalı (HVOF yöntemi ile) Inconel 718 ve bağ kaplama üzerine seramik üst kaplama yapılan Inconel 718 numunelerinin her birinin 0,1 M NaCl çözeltisi içerisinde elektrokimyasal korozyona uğratılması sonucu elde edilen korozyon karakteristikleri, korozyon reaksiyonlarının yorumlanması için Tablo 4.1’de gösterilmektedir. Elde edilen PDP testi sonuçlarına göre numunelerin elektrokimyasal korozyon testi sonrası korozyon akım yoğunluk değerleri (i_{kor}) ve korozyon potansiyel (E_{kor}) değerleri belirtilmiştir.

Tablo 4.1: NaCl çözeltisinde gerçekleştirilen elektrokimyasal korozyon testine ait değerler.

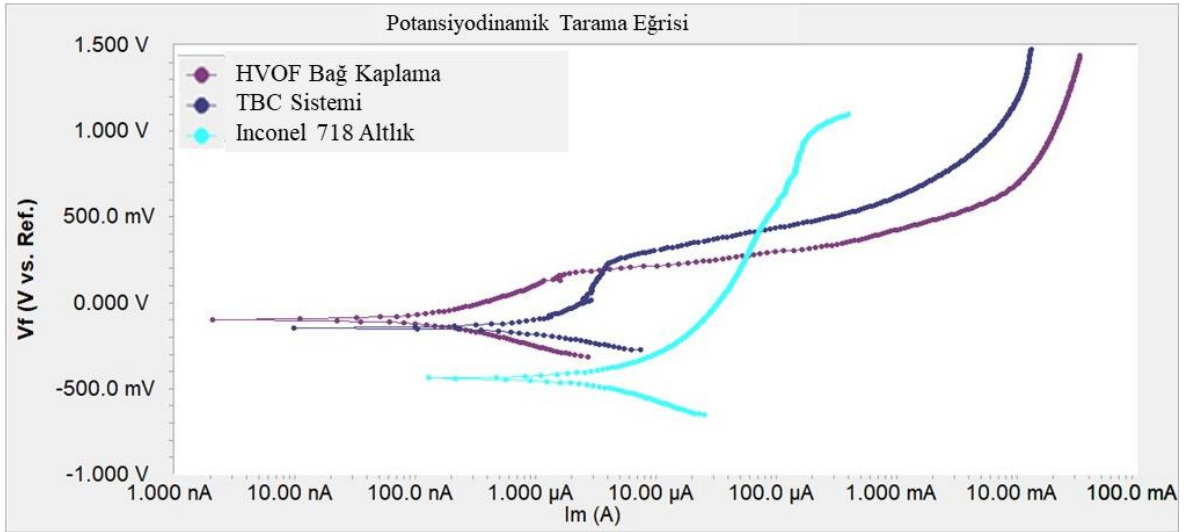
Deney Numuneleri	OCP (mV)	E_{kor} (mV)	i_{kor} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
Inconel 718 Altlık Malzeme	-403	-435	4
CoNiCrAlYHVOF Bağ Kaplama	-64	-102	0.1
HVOF + APS (TBC sistemi)	-26	-146	0.7

Çizelgelerden yola çıkarak, 3 numune için yapılan elektrokimyasal korozyon testlerinden ilki olan NaCl çözeltisinden elde edilen sonuçlar için; kaplama yapılmamış Inconel 718 numunesine ait i_{kor} değeri ($4 \mu\text{A}/\text{cm}^2$), bağ kaplamalı ($0,1\mu\text{A}/\text{cm}^2$) ve TBC sistemi ($0,7\mu\text{A}/\text{cm}^2$) olarak ayrı ayrı teste tabi tutulan numunelerin akım yoğunluk değerlerinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu veriler NaCl çözeltisinde yapılan korozyon testinde Inconel 718 malzemesinin kaplanmasıyla, korozyon akım yoğunluğunun düştüğü gözlemlenmiştir.

Elde edilen verilere göre; kaplama işleminin yapılması ile beraber, i_{kor} değerlerinde görülen azalma ile korozyon direncinin kaplamasız numuneye göre artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Aynı şekilde E_{kor} değeri de buna ters olarak kaplamalı numunelerde artış göstererek, kaplama işleminin numuneler üzerinde korozyon direncine olumlu yönde

etkilediği gözlenmiştir. Bağ kaplama ve bağ kaplama ile birlikte üst kaplama işlemi uygulanan numuneler kendi arasında kıyaslandığında ise E_{kor} ve i_{kor} değerleri arasında fazla bir uzaklık olmamakla birlikte, bağ kaplamaya ait değerler APS yöntemi ile üst kaplama işlemi uygulanan numuneye kıyasla korozyona karşı daha dirençli olduğunu göstermektedir.

Elektrokimyasal korozyon deneylerinde korozyona uğrayan elektroda anodik yönde bir dış akım uygulanması sonucu potansiyelinde meydana gelen lineer bir artış gözlenir. Aynı şekilde katodik yönde bir akım uygulandığında ise negatif yönlenme gözlenir. Bu değişimlerin logaritmasının lineer olarak gözlemlendiği bölgeye tafel bölgesi, oluşan eğrilere de tafel eğrileri adı verilir. Bu bölgede tafel doğrusunun eğimi korozyon hızının hesaplanmasında yardımcı olmaktadır. Deney sonuçlarından elde edilen tafel ve polarizasyon eğrileri aşağıdaki grafiklerde belirtilmiştir.



Şekil 4.1: NaCl çözeltisindeki numunelere ait potansiyodinamik polarizasyon eğrileri.

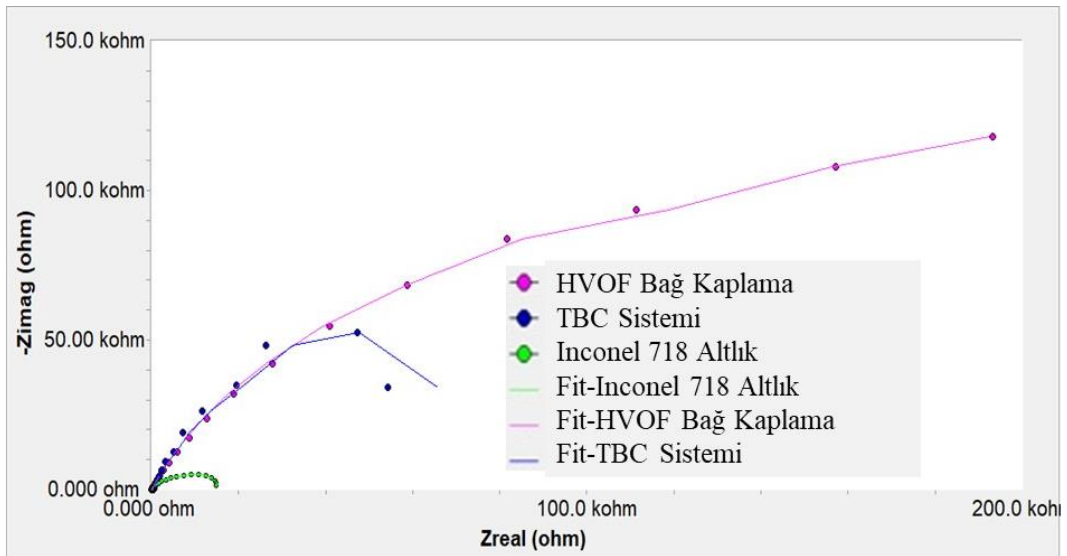
Şekil 4.1'de elektrokimyasal korozyon testleri uygulanan kaplamasız ve termal bariyer kaplama uygulanan numunelere ait potansiyodinamik eğrileri verilmiştir. Bu verileri ve Tablo4.1'de bulunan incelediğimizde; kaplamasız Inconel parçasının E_{kor} değerinin, HVOF bağ kaplamalı ve TBC sistemi uygulanan parçalara göre oldukça düşük olduğu görülmektedir. Korozyon potansiyelinin düşük olması elektrokimyasal korozyon deneyi uygulanan metalin korozyona uğrama yatkınlığının daha yüksek olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla termal bariyer kaplı numunelerin korozyona uğrama yatkınlığı kaplamasız numuneye göre daha düşüktür denilebilir.

EIS genel anlamda; elektron akışının olduğu yerde, bu akışa karşı gösterilen direncin ölçülmesi anlamına gelir. Elde edilen bir eşdeğer devre modelinden yola çıkılarak ve aşağıda deney numunelerinin de sahip olduğu nyquist ve bode grafikleri yardımı ile yorumlanabilir. Tablo 4.2’de deney numunelerine ait EIS verileri görülmektedir. R_p ; polarizasyon direnci değerlerini, R_u (R_{sol}); çözelti direnci değerlerini, Y_0 ; sabit faz elemanını tanımlamaktadır. Bu değerler sonucu elde edilen eş değer devre modeli Şekil 4.4’te verilmiştir.

Tablo 4.2: NaCl çözeltisi içerisindeki numunelere ait EIS verileri.

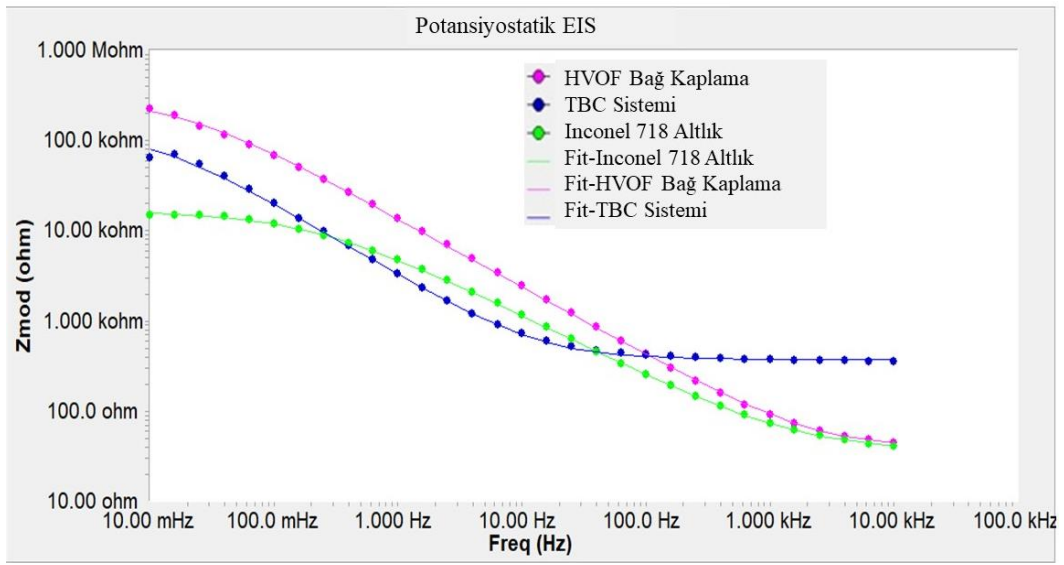
Çözelti İçeriği	Koşul	R_p (ohms)	R_u (R_{sol})(ohms)	Y_0	Alpha
0,1 M NaCl Çözeltisi	Inconel 718	16.10^3	35	50.10^{-6}	685.10^{-3}
	Inc. 718 + HVOF	296.10^3	38	18.10^{-6}	759.10^{-3}
	Inc. 718 + HVOF + APS	128.10^3	373	71.10^{-6}	806.10^{-3}

Şekil 4.2’ de NaCl çözeltisi içerisinde elektrokimyasal korozyona tabi tutulan kaplamasız, HVOF bağ kaplama ve TBC sisteminden oluşan numunelere ait Nyquist eğrileri gösterilmektedir.



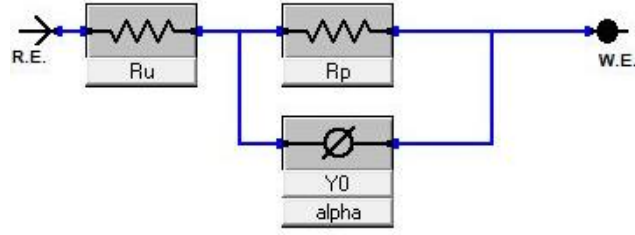
Şekil 4.1: NaCl çözeltisinde korozyon deneyine tabi tutulan numunelere ait Nyquist eğrileri.

Şekil 4.2’de verilen nyquist eğrilerinden yola çıkılarak elde edilen verilerden belirlenen R_p değerinin azalması, korozyona uğramada artış olduğunu göstermektedir. Bu yorumdan, grafik ve tablolardan yola çıkarak; kaplamasız Inconel 718 malzemesine ait R_p değeri: 16.10^3 iken; HVOF kaplama yöntemi ile bağ kaplaması ve APS yöntemi ile üst kaplaması yapılan numunelerin R_p değerlerinin sırasıyla: 296.10^3 ve 128.10^3 olduğu görülmektedir. Bu da kaplama yapılan parçaların kendi arasında korozyona uğrama durumlarının birbirine yakın olduğunu gösterirken, kaplamasız Inconel 718 numunesinin korozyon hızının bu numunelere göre oldukça yüksek olduğunu gösterir. Kısaca R_p değerinin azalması ile kaplama yapılan numunelerde korozyona uğrama miktarı gözle görülür oranda azalmıştır.



Şekil 4.2: NaCl çözeltisinde korozyon deneyine tabi tutulan numunelere ait Bode eğrileri.

Şekil 4.3’te verilen bode eğrilerinden yola çıkılarak yapılabilecek yorum; artan frekansa bağlı olarak en yüksek direnci gösteren numune nispeten düşük korozyon direncine sahiptir şeklinde olacaktır. Buna göre; HVOF kaplama yöntemi ile bağ kaplama işlemi yapılan Inconel 718 numunesinin korozyon direnci en yüksek iken, kaplama uygulanmamış Inconel 718 numunesinin korozyon direnci düşük olarak belirlenmiştir.

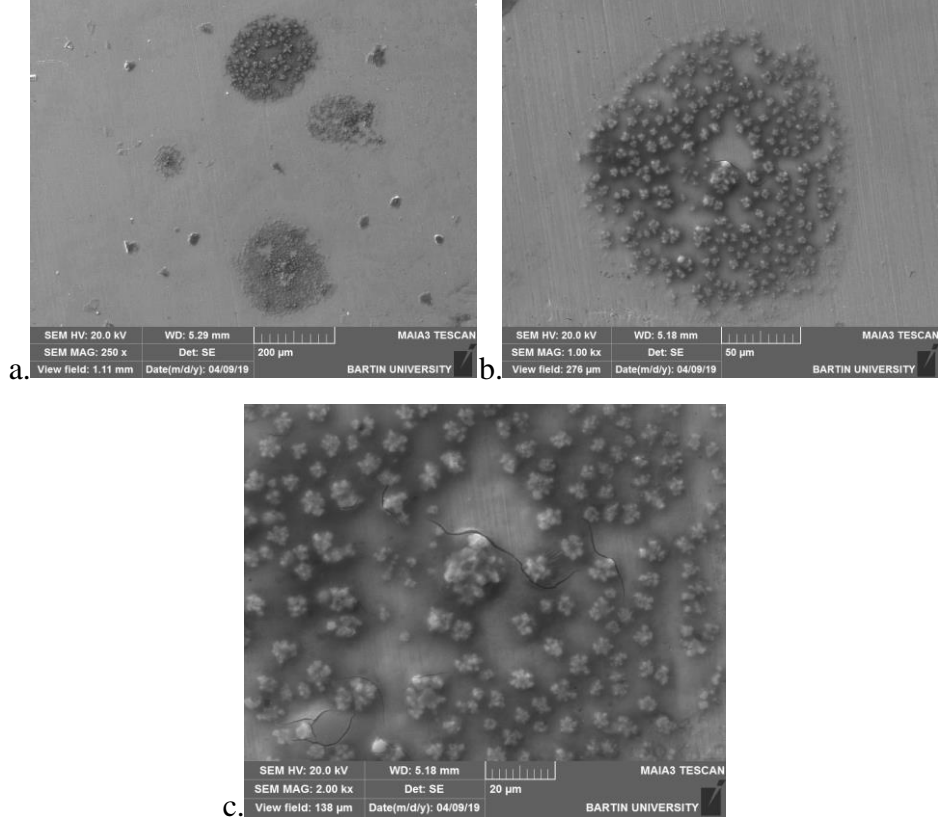


Şekil 4.3: Deney numunelerine ait eşdeğer devre modelinin şematik görünümü.

Şekil 4.4'te verilen eşdeğer devre modeli Nyquist ve EIS verilerinden yola çıkılarak oluşturulmuş bir devre modelidir. Farklı koşullardaki elektrokimyasal korozyon davranışının tanımlanmasında kullanılır.

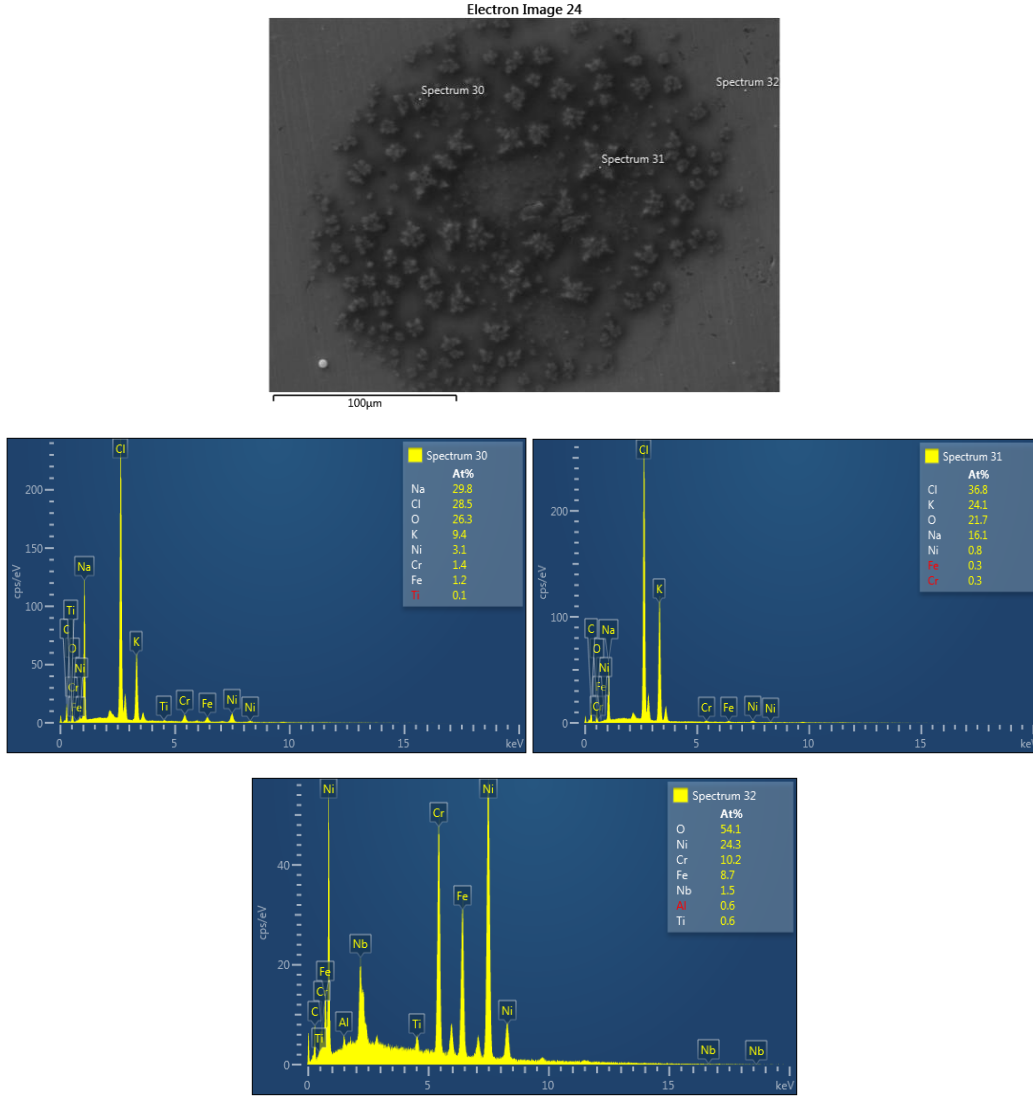
4.2 Kaplamasız Inconel 718 Süper Alaşım Numunelerin Elektrokimyasal Korozyon Testi Sonrası Mikroyapısal Olarak İncelenmesi

Altlık malzemesi olarak seçilen Inconel 718 yüksek sıcaklık, korozyon ve sürünme dayanımına sahip olan, yüksek oranda Ni, Cr, Fe, Mo içeren bir süper alaşımdır. Aşağıda Inconel 718'e ait elementel analiz sonuçları, XRD sonuçları ve SEM'den alınan mikro yapı görüntüleri verilmiştir.



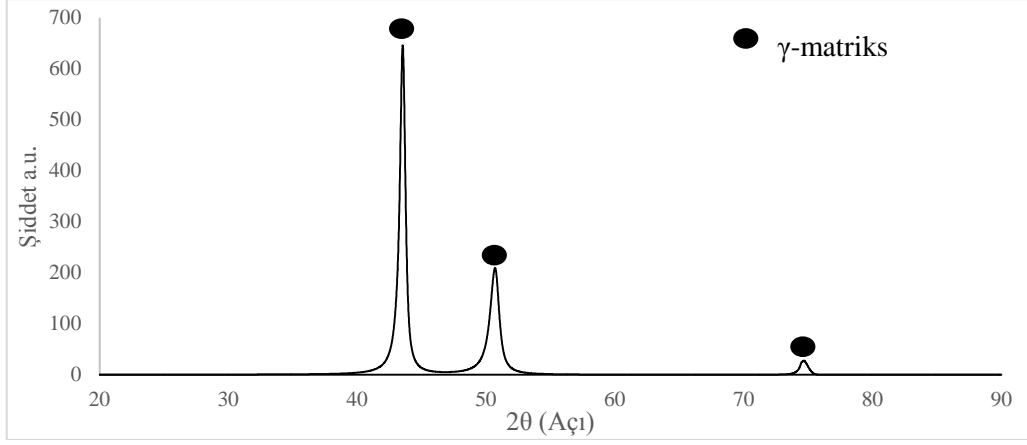
Şekil 4.4: Kaplamasız Inconel 718'e ait mikro yapı görüntüleri; a. 250 x büyütme, b. 1.00 kx büyütme, c. 2.00 kx büyütme.

Yukarıda Şekil 4.5'te elektrokimyasal korozyon testlerine tabi tutulmuş, kaplamasız Inconel 718 numunesine ait SEM görüntüleri verilmiştir. Bu görüntülerden yola çıkarak; ortamda elektrolit olarak kullanılan NaCl tuzlarının kristal yapıda, yüzeyde bazı kısımlarda birikmelere yol açtığı görülebilir. Yüzeyde bazı kısımlarda, özellikle NaCl birikmeleri görülen yerlerde mikro çatlak oluşumu gözlemlenmiştir. Bunlar; tuzlu su ortamlarında oluşan gerilim korozyonu çatlakları olarak adlandırılır. Bu mikro çatlaklar; benzeri deneylerde NaCl'nin yüzeyden iyi temizlenmemesi sonucunda görülebilmektedir. Buradan yola çıkarak kaplamasız parçaların tuzlu su ortamına uzun sürelerde maruz kalması sonucu çatlakların ilerleyerek hasara yol açtığı söylenebilir.



Şekil 4.5: Kaplamasız Inconel 718'e ait EDS analizleri.

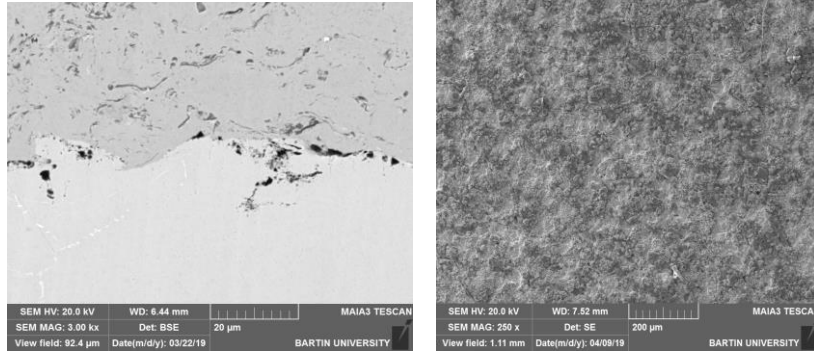
Şekil 4.6'da kaplamasız Inconel 718 parçasının elektrokimyasal korozyon testi sonucu EDS analizi verilmiştir. EDS analizlerinden anlaşılacağı üzere; 30 ve 31. noktalarda yani; tuz kristallerinin yoğun olduğu bölgelerde, 32. nokta olan ve tuz kristali olmayan bölgeden alınan spektruma göre Ni, Cr ve Fe gibi metallerin oransal olarak daha az bulunduğu gözlemlenebilir. Bu bölgelerde tuz kristallerinin yoğunluğundan dolayı bu elementlerin az bulunduğu söylenebilir. Yine aynı şekilde 32. bölgeden alınan spektrumda da NaCl bileşiğine ait elementlerin yerine metal içerikli elementlerin yoğun olarak bulunduğu görülebilir.



Şekil 4.6: Kaplamasız Inconel 718'e ait XRD grafiği.

Yukarıda Şekil 4.7'de verilen kaplamasız Inconel 718 parçasına ait XRD analizlerinden anlaşılacağı üzere; elektrokimyasal korozyon testinden önce γ -matriks fazına sahip olan parçanın, elektrokimyasal korozyon testinden sonra değişmediği ve aynı fazda kaldığı görülmektedir. Böylece faz değişimine yol açacak sıcaklıklara çıkılmadığı belirlenmiştir.

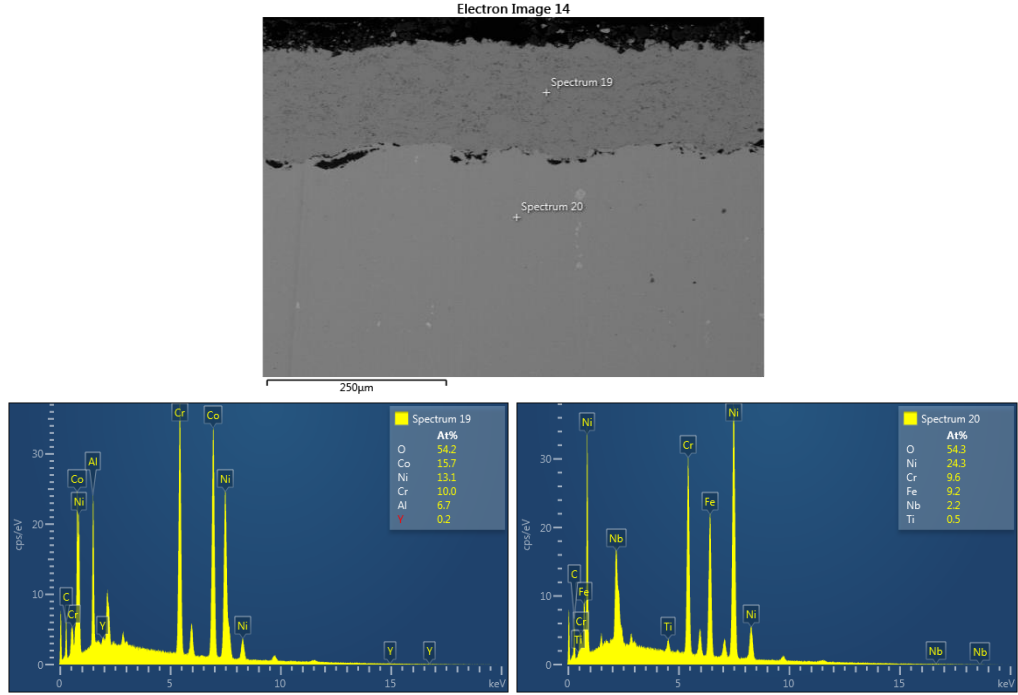
4.3 HVOF Tekniği İle Üretilen CoNiCrAlY Bağ Kaplamaya sahip Numunelerin Elektrokimyasal Korozyon Testi Sonucu Mikroyapısal İncelenmesi



Şekil 4.7: HVOF bağ kaplama ve elektrokimyasal korozyon uygulanmış parçaya ait kesit ve yüzey görünümü.

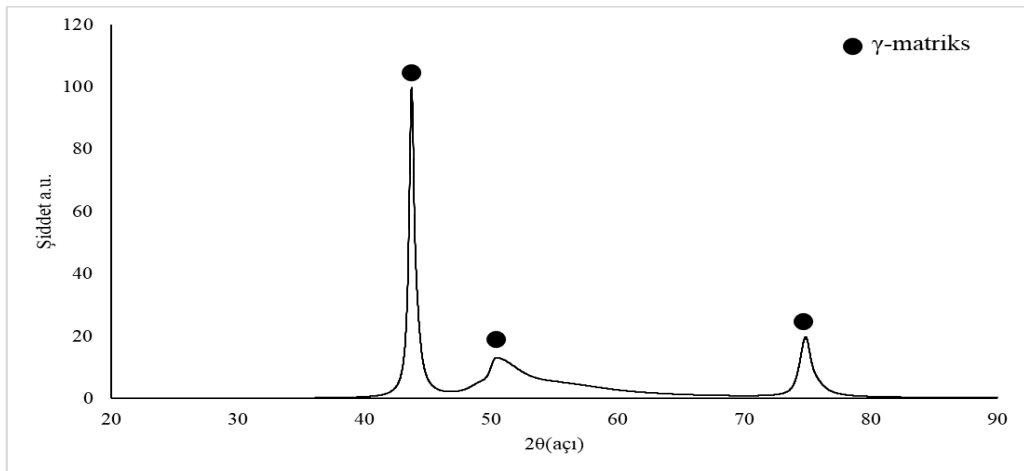
Şekil 4.8'de verilen ilk görüntü; 3.0 kx büyütmede HVOF tekniği ile kaplanmış Inconel 718'e ait enine kesitten alınmış, ikincisi ise yüzeyden 250x büyütmede alınmıştır. Yüzeydeki pürüzlü görüntünün nedeni; HVOF kaplama tekniğinden ileri gelen partikül ergimemesinden dolayı ve tam bir birleşme sağlamamış olan partiküllerin kaplama işleminin sonuna doğru bu şekilde soğumuş olmasından kaynaklanmaktadır. Kesit görüntüsünden yola çıkarak; kaplama içerisindeki oksit ve porozite yapılarının az miktarda

olduğu söylenebilir. Kaplama ara yüzeyinde belirgin bir çatlak ve yoğun porozite görülmektedir.



Şekil 4.8: HVOF bağ kaplama ve elektrokimyasal korozyon testi uygulanmış parçaya ait EDS analizi.

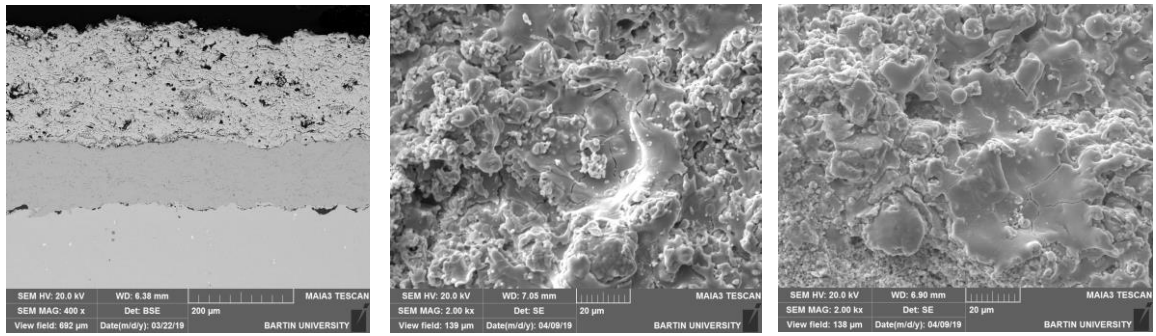
Şekil 4.9 incelendiğinde görülen spektrumlardan anlaşılacağı üzere; kaplamasız Inconel 718 parçasının yüzeyinde rastlanan NaCl kristallerine, kaplama yüzeyinde belirgin bir rastlama görülmemiştir. Ayrıca altlık malzemesine geçişi de olmamıştır. Bu sayede bağ kaplamanın korozyon ortamının olumsuz etkilerinden minimum düzeyde etkilendiği ve korozyon direnci gösterdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.9: HVOF bağ kaplama uygulanmış parçaya ait XRD grafiği.

Şekil 4.10’da HVOF kaplama tekniği ile bağ kaplaması yapılan Inconel 718 parçasına ait XRD grafiği verilmiştir. Meydana çıkan γ -matriks fazı; deney numunesinin bağ kaplama ve bağ kaplamaya uygulanan elektrokimyasal korozyon testi ile de faz değişimine uğramadığını göstermektedir. Korozyon ortamı, faz değişimine yol açacak bir hasara sebebiyet vermemekle birlikte, bağ kaplamanın faz değişimine sebep olmayacak şekilde korozyon direncine sahip olduğu söylenebilir.

4.4 APS Tekniği ile Üretilen YSZ Üst Kaplamaya Sahip TBC Sistemi Numunelerinin Elektrokimyasal Korozyon Testi Sonucu Mikro yapısal İncelenmesi



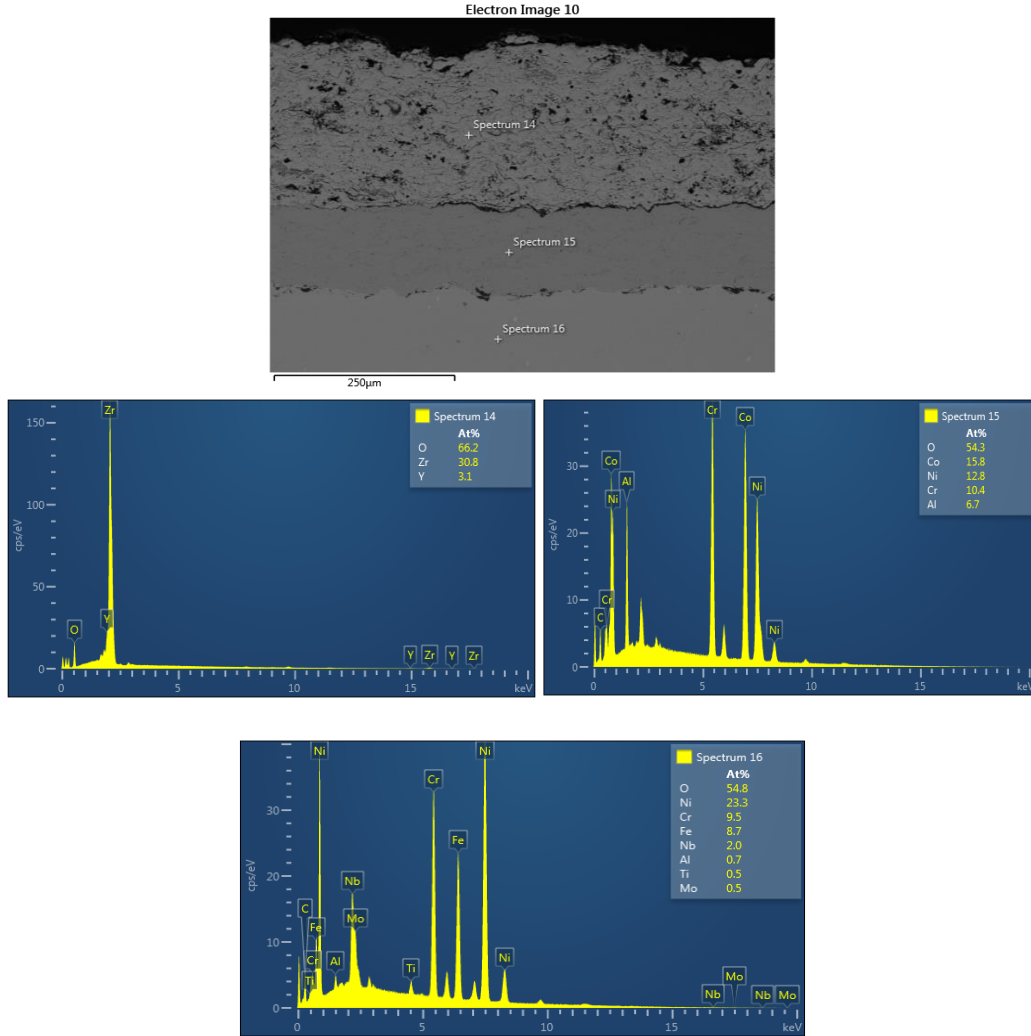
Şekil 4.10: Oluşturulan TBC sistemi ve elektrokimyasal korozyon testi uygulanan parçaya ait kesit ve üst görüntüleri.

Yukarıda Şekil 4.11’de HVOF yöntemi ile yapılan bağ kaplama üzerine APS yöntemi ile yapılan seramik üst yüzeye ait SEM görüntüleri verilmiştir. Görüntülerden açıkça anlaşılacağı üzere; APS tekniği ile üretilen üst kaplamada görülen oksit ve poroziteler, HVOF tekniği kullanılarak üretilen bağ kaplamalara oranla daha fazladır. Bunun nedeni olarak HVOF tekniğinde partikül püskürtme esnasında ses üstü seviyelere çıkılarak biriktirme işlemi tamamlandığından, partiküllerin birbirine yapışmasının daha iyi olması gösterilebilir.

APS yöntemi ile kaplanmış numunelere ait yüzey görüntüleri incelendiğinde; yüzeysel çatlakların yoğunluğu dikkat çekmektedir. APS tekniği kullanılarak, seramik esaslı tozlar ile yapılan kaplamaların, termal iletkenliğinin düşük olması ve bu yöntemin açık hava ortamında uygulanmasından kaynaklı yüzeysel çatlaklara ve yoğun porozite oluşumuna daha yatkın olduğu söylenebilir. Elektrokimyasal korozyon deneyinin, seramik esaslı malzemeler kullanılarak üretilen üst kaplamada yüzeysel çatlak oluşumuna sebebiyet

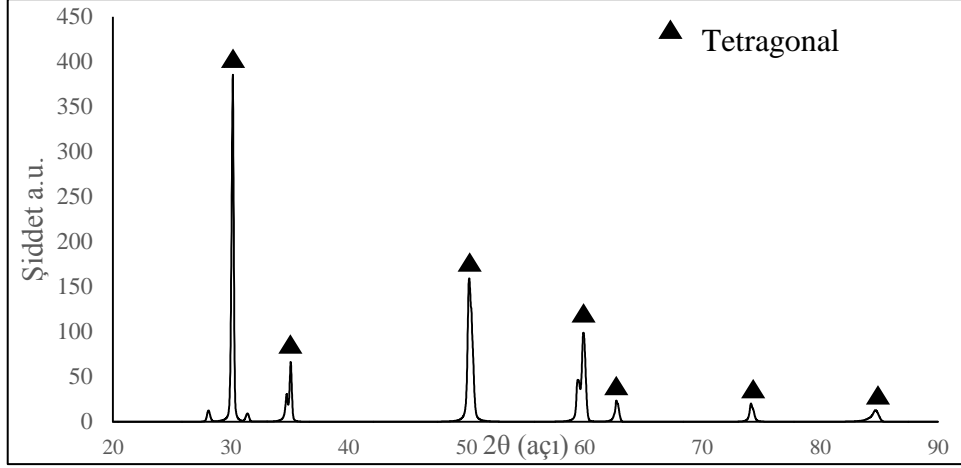
verdiği söylenemez. Bunun sebebi olarak; yüksek sıcaklıklara çıkılmamasından kaynaklı termal şok oluşturacak bir ortam sıcaklığına sahip olmaması gösterilebilir.

Ayrıca yüksek sıcaklıklarda gözlemlenen TGO katmanının oluşumu; elektrokimyasal korozyon ortamının yüksek sıcaklıklara çıkılmadan yapılmasından dolayı görülmemektedir.



Şekil 4.11: HVOF bağ kaplama+APS üst kaplama ve elektrokimyasal korozyon uygulanan parçaya ait EDS analizi.

Şekil 4.12’de görülen APS tekniği kullanılarak uygulanan seramik üst kaplamadan alınan spektruma göre; NaCl kristallerinin kaplama içerisine sızma yapmadığı görülebilir. Dolayısıyla; APS tekniği ile yapılan seramik üst kaplamanın elektrokimyasal korozyon ortamına iyi bir direnç gösterdiği söylenebilir.



Şekil 4.12: TBC sistemi ve elektrokimyasal korozyon uygulanan parçaya ait XRD grafiği.

Elektrokimyasal korozyon deneyi sonrası, seramik esaslı üst kaplamaya ait XRD analizi Şekil 4.13'te verilmiştir. Bu grafiğe göre; korozyon deneyi sonrasında tetragonal yapıda ZrO_2 fazının sabit kaldığı görülmekte olup, elektrokimyasal korozyona karşı direnç göstererek, ikinci bir faz oluşumuna sebep verecek deformasyon görülmemiştir.

4.5 TBC Sistemi Bileşenlerinin Elektrokimyasal Korozyon Testi Sonrasındaki Mikroyapısal Değişimlerin İrdelenmesi

Galedari vd. (2017), incelemelerinde %3,5 NaCl ve 250 °C sıcaklıkta karbon çelik üzerine Inconel 718 tozlarının HVOF yöntemi ile biriktirilmesi ile elde edilen kaplamanın elektrokimyasal empedans spektroskopisi sonuçlarında; Inconel 718'in E_{kor} değeri; -199 mV ve i_{kor} değeri 0,069 mA/cm² olarak tespit edildiği belirtilmiştir. Yapılan korozyon ortamında numuneler 30 dakika süre ile tutulmuştur.

TBC sistemine ait numuneye yapmış olduğumuz elektrokimyasal korozyon testi sonuçlarına göre; E_{kor} değeri, -435 mV, i_{kor} değeri; 4.8 µA (0,048 mA) değerleri görülmüştür. Bu verilerden yola çıkılarak; yapmış olduğumuz çalışmalarda korozyon akım yoğunluklarının neredeyse birbirine yakın değerlerde olması, korozyon dirençlerinin birbirine yakın olduğunu gösterebilir. Buna karşılık E_{kor} değerleri arasındaki yüksek farkın nedeni; malzemenin toz yapıda olmasından kaynaklı ya da verilen akım yoğunluğundan kaynaklı olabilir. Bu fark için; yapmış olduğumuz çalışmadaki Inconel yüzeyinin, hasar oluşumuna daha çabuk neden olduğu söylenebilir (Galedari vd., 2017).

Duana vd. (2018), çalışmalarında yapılan termal sprej prosesi; ticari bir Zircalloy-2 alaşımlı boru üzerine, ayrı ayrı Al_2O_3 ve ZrO_2 katmanlarının oluşturulması için kullanılmıştır. Daha sonra bu TBC sistemleri üzerine yapılan otoklav korozyon ve elektrokimyasal korozyon testleri uygulanarak değerlendirilmiştir. Elektrokimyasal korozyon ölçümleri %3,5 NaCl ve 30 °C’de klasik 3 elektrotlu sistemde yapılmıştır.

Elde edilen sonuçlarda; pürüzlü yüzeye sahip olan malzemelerin E_{kor} değerlerinin daha düşük olacağı söylenmiştir. Buna bağlı olarak ZrO_2 kaplamaya sahip malzemenin E_{kor} değeri; -415 mV, Al_2O_3 kaplı malzemenin E_{kor} değeri; -243 mV ve kaplanmamış numunenin E_{kor} değeri; -246 mV olarak belirtilmiştir. Bu sonuçlara göre ZrO_2 kaplı numuneye ait E_{kor} değeri oldukça düşük olarak gözlenmiştir. Buna bağlı olarak da altlık malzemeye elektrolit geçişi olması nedeniyle yüzey pürüzlülüğüne, kaplama ve altlık arasında yapışmanın zayıf olmasına sebep olmaktadır yorumu yapılmıştır.

Bizim çalışmamızda; APS yöntemi ile ZrO_2 üst kaplaması yapılan Inconel 718 malzemesinin E_{kor} değeri -146mV olarak görülmektedir. HVOF bağ kaplama tabakası, üst kaplama tabakası ile bağ katman arasında yapışma uyumsuzluğunun giderilmesi açısından termal genleşme uyumunu sağlayarak altlık malzeme içerisine herhangi bir elektrolit geçişi olmamasını sağlamakta ve E_{kor} değerleri karşılaştırıldığında daha iyi bir korozyon direnci sağlamakta olduğu söylenebilir (Duana vd., 2018).

Sadeghimeresht vd. (2016), çalışmasında 304 L kalite paslanmaz çelik üzerine çeşitli alaşımlar içeren bağ kaplamalar olmak üzere TBC sistemi üretilmiştir. Bu kaplamalarda kullanılan bağ kaplama malzemeleri olarak sırayla Ni, NiCr, NiCoCrAlY ve CoNiCrAlY alaşımları HVOF yöntemi ile biriktirilmiştir. Üst kaplama işlemi için her bir bağ kaplama üzerine Cr_3C_2 -NiCr alaşımı seçilmiştir.

Bu kaplamalara; bağ kaplama ve TBC sistemi için sırayla; her birine 200 ml, 0,1 M HCl içeriğine 25 °C’de, 240 saat daldırma testi ve devamında 25 °C’de %3,5 NaCl içeren bir elektrolitte, standart 3 elektrotlu elektrokimyasal korozyon testleri uygulandığı bildirilmiştir (Sadeghimeresht vd., 2016).

Testler sonucunda elde edilen potansiyodinamik eğrileri, EIS, OCP, SEM görüntülerinden yola çıkarak yalnızca CoNiCrAlY bağ kaplamaya ve bağ kaplama+ Cr_3C_2 -NiCr üst

kaplamaya sahip numunelerin sonuçlarını incelediğimizde; CoNiCrAlYbağ kaplamaya sahip numunelerin i_{kor} değerleri düşerken, E_{kor} değerlerinde bir artış gözlemlendiği bildirilmiştir. Bu da bağ kaplama katmanına sahip TBC sistemi numunelerin korozyon davranışlarında kendi arasında daha iyi bir direnç gösterdiğini bildirir.

Tablo 4.3: 25 °C'de ağırlıkça % 3,5 NaCl içine batırılmış, kaplanmış ve kaplanmamış çelik substratın çalışmasına göre elde edilen elektrokimyasal değerleri (Sadeghimeresht vd., 2016).

Deney Numuneleri	R_p ($k\Omega \cdot cm^2$)	E_{kor} (mV)	i_{kor} (μA)
304 L Paslanmaz Çelik	29	-270	0,95
CoNiCrAlY Bağ Kaplama	26	-210	1,21
CoNiCrAlY Bağ Kaplama + Cr_3C_2 -NiCr Üst Kaplama	74	-180	0,45

Tablo 4.3'te verilen değerler ışığında; yalnızca bağ kaplamalı numunenin i_{kor} değerlerinin, kaplanmamış numuneye göre dahi daha yüksek çıkması bu numunenin korozyon hızının diğerlerine göre daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bunun sebebi bağ kaplamada kullanılan alaşımın, deneyde kullanılan diğer bağ kaplama alaşımlarından daha yüksek (%1,5) bir poroziteye sahip olması olarak açıklanabilir. Aynı şekilde her bir bağ kaplamalı numuneye üst kaplama olarak uygulanan Cr_3C_2 -NiCr alaşımının ortalama porozite oranı % 0,5 olarak verilmiştir. Bu da i_{kor} değeri incelendiğinde, en düşük değere sahip olmasıyla, kendi aralarında en düşük korozyon hızına sahip olmasını açıklamaktadır.

E_{kor} değerleri karşılaştırıldığında; en düşük korozyona uğrama oranı;TBC sistemine ait numune olarak görünürken, kaplanmamış numune ile yalnızca bağ kaplamaya sahip numuneler arasında yüksek bir fark görülmemiştir. Aynı yorum R_p değerleri için de yapılabilmektedir (Sadeghimeresht vd., 2016).

Bizim çalışmamız için; Tablo 4.1 ve Tablo 4.3 incelendiğinde; kaplanmamış numuneler arasındaki E_{kor} oranları, Inconel 718 malzemesinde 304 kalite paslanmaz çeliğe göre daha düşük çıkmış yani; korozi ortamdan daha hızlı etkilenmiştir. Sahip olduğumuz çalışma ile incelenen çalışmada bulunan CoNiCrAlY ile bağ kaplama işlemi yapılmış olan

numunelerin E_{kor} değerlerine göre; sırayla -102 mV ve -210 mV olduğu görülmektedir. Buna göre; her iki CoNiCrAlY kullanılarak yapılan bağ kaplama işlemi arasındaki fark HVOF kaplama yönteminin kaplama işlemi için daha iyi bir seçim olmasından kaynaklanabilir.

Üst kaplama malzemeleri olan Cr_3C_2 -NiCr ve YSZ arasında bulunan i_{kor} değerlerinin; incelenen çalışmada daha düşük olması, korozyona daha yavaş uğradığını göstermektedir. Bunun sebebi; alaşım elementlerinin korozyona dirençli elementler olan Ni ve Cr elementlerinin oranlarının daha fazla olmasından kaynaklıdır denilebilir.

Khajezadeh vd. (2018), çalışmasında kullanılan numuneler, bir nikel bazlı Inconel 738 altlık numune üzerine HVOF kaplama yöntemi ile CoNiCrAlY alaşımına ait metalik tozlarının biriktirilmesi, üzerine APS kaplama yöntemi kullanılarak da ilk katmanı ağırlıkça %10 La_2O_3 -%90 YSZ ve son katmanı %100 YSZ içeren çift katmanlı bir seramik üst kaplama içeren TBC sisteminden oluşmaktadır.

Kaplama işleminden sonra numuneler; Na_2SO_4 - %20 V_2O_5 tuz içerikli ortamda, 880 °C'de 400 saat tutularak sıcak korozyona maruz bırakılmıştır. Buradan elde edilen TGO kalınlıkları belirli aralıklar ile ölçülerek kaydedilmiştir. Daha sonra sıcak korozyona uğramış olan numuneler, oda sıcaklığında, 2 saat boyunca Na_2SO_4 +%20 V_2O_5 içerikli tuz ortamına daldırılarak klasik 3 elektrotlu elektrokimyasal korozyon deneyleri yapılmıştır. Polarizasyon ölçümündeki potansiyel tarama hızı 1 mV/s'ye ayarlanmıştır.

Uygulanan sıcak korozyon deneyinden sonra yapılan elektrokimyasal korozyon testlerinin sonucunda; TGO oluşumunun gözlenmesine bağlı olarak i_{kor} değerlerinde azalma ve buna bağlı olarak da korozyon direncinin arttığının görüldüğü belirtilmiştir.

Tablo 4.4: Kaplanmış ve sıcak korozyona uğratılmış numunelerin polarizasyon sonuçları
(Khajezadeh vd., 2018).

Sıcak Korozyon Ortamında Tutma Süresi	E_{kor} (mV)	i_{kor} (μA)
Kaplanmış Numune	-343	0,88
60 Saat	-275	0,73
120 Saat	-0,3	0,20
400 Saat	-201	0,32

Verilen değerlere göre numunelerin korozyon dirençlerini kendi aralarında değerlendirdiğimizde; 120 saat tutma süresinde TBC sistemine ait numunelerin TGO katmanının optimum kalınlıkta olmasına bağlı olarak, E_{kor} değeri en yüksek, i_{kor} değeri en düşük olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla elektrokimyasal korozyon hızının en düşük 120 saat sıcak korozyona uğratılmış numunede olduğu söylenebilir. Bu süreden sonra tutma süresi uzadıkça, TGO katmanının boyutundaki uzamaya bağlı olarak, çatlak oluşumunun gözlemlendiği ve buna bağlı olarak da elektrokimyasal korozyon direncinin düştüğü gözlemlenmiştir (Khajezadeh vd., 2018).Yapmış olduğumuz çalışmalar ile yukarıdaki verileri karşılaştıracak olursak; çift katmanlı üst kaplamaya sahip, sıcak korozyona uğratılmış Inconel 718 numunesinin elektrokimyasal korozyon direncinin en yüksek olduğu 120 saat tutma süresinde, E_{kor} değerinin; -0,3mV ve i_{kor} değerinin; 0,2 μ A olduğu görülmektedir (Khajezadeh vd., 2018). HVOF kaplama yöntemi ile bağ kaplama işlemi uygulanmış Inconel 718 numunesinde E_{kor} değeri; -102mV, i_{kor} değeri; 0.123 μ A olarak belirlenmiştir. Burada E_{kor} değerleri arasındaki yüksek farkın kaynağı olabilecek, kontrollü olarak geliştirilen TGO tabakasının olumlu etkisi açıkça gözlemlenmiştir.

Chen vd. (2013), çalışmasında; Inconel 718 süper alaşımının bilyalı dövme yüzey işleminin 1, 6, 12, 24 ve 48 saat süreyle, ağırlıkça %3,5'lik bir NaCl çözeltisi içindeki çukur korozyonuna etkileri incelenmiştir. Elektrokimyasal korozyon testi sonuçlarına göre; dövme işleminin, düşük i_{kor} değeri ve daha yüksek R_p değerinin yanı sıra kritik oyuklama potansiyelinin (+134 mV) önemli bir artışıyla belirtilen korozyon direnci üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Bilyalı dövme işlemine tabi tutulmuş olan ilk numuneye ait E_{kor} değeri -269 mV, bizim yapmış olduğumuz çalışmadaki Inconel 718'e ait E_{kor} değeri; -435.1 mV gelmektedir. Bu karşılaştırmaya göre; bilyalı dövme işleminin elektrokimyasal korozyon direncinde yarı yarıya artış olduğu söylenebilir. Bunun sebebi olarak; bilyalı dövme işleminin yüzey üzerindeki kalıntı gerilimi azaltması, yüzeye yakın bölgelerde sert bir katman oluşumunu ve yüzey pürüzlülüğünün güçlü şekilde azalmasını sağlamasıdır denilebilir (Chen vd., 2013).

BÖLÜM 5

SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1 Genel Sonuçlar

Tez çalışmasında Ni esaslı altlık malzemesi olan Inconel 718 üzerine HVOF kaplama yöntemi kullanılarak metalik bağ kaplama ve APS kaplama yöntemi kullanılarak ZrO_2 -8% Y_2O_3 seramik esaslı toz malzemenin kaplama işlemleri yapılarak TBC sistemi elde edilmiştir.

Malzemelere ve kaplama işlemi uygulanan numunelerin her birine sırayla elektrokimyasal korozyon testi uygulanmıştır. Çalışmada temel olarak benzer şekilde kullanılan TBC sisteminin kullanıldığı ve servis sürecinde çalıştığı elektrokimyasal korozyon ortamlarından ne şekilde etkileneceği ve ne şekilde tepki vereceği araştırılarak yorumlanmıştır. Elde edilen veriler ışığında bulunan genel sonuçlar aşağıda sırasıyla belirtilmiştir.

1. Inconel 718 süper alaşım altlık malzemesi üzerine HVOF prosesi kullanılarak MCrAlY içerikli metalik bağ kaplamanın ve YSZ içerikli seramik üst kaplamanın üretimleri başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.
2. Altlık, metalik bağ kaplama ve seramik esaslı TBC sistemi olmak üzere 3 ayrı kaplama sisteminin ayrı ayrı oda sıcaklığı koşullarında elektrokimyasal korozyon testleri başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiş, gerekli cihazlar ve programlar yardımı ile yorumlanmak üzere grafiksel veriler elde edilmiştir.
3. XRD analizlerinden elde edilen verilere göre; bağ kaplamaya sahip Inconel 718 ve kaplamasız Inconel 718 numunelerinin γ -matriks fazına sahip olduğu ve seramik üst kaplamalı numunenin de tetragonal ZrO_2 fazında olduğu görülmüştür. Bu sonuç ile de faz değişimine sebebiyet verecek bir etkileşimin oluşmadığı ve korozyon ortamına karşı dirençli bir malzemenin ve kaplamanın seçildiği söylenebilir.

4. SEM görüntüleri ve EDS analizlerinin verdiği sonuçlar ışığında TBC sistemlerinin yüksek sıcaklık ortamında oluşumu gözlemlenen TGO katmanının elektrokimyasal korozyon ortamından etkilenecek oluşmadığı görülmüştür.
5. Kaplama işlemine tabi tutulmamış olan Inconel 718 malzemesine uygulanan elektrokimyasal korozyon testi sonucunda; elektrolit olarak kullanılan NaCl'nin, SEM görüntülerinden yola çıkılarak yüzeyde tuz kristalleri olarak biriktiği ve mikro çatlak oluşumuna sebebiyet verdiği anlaşılmıştır.
6. HVOF yöntemi ile bağ kaplaması yapılmış ve APS yöntemi ile de seramik üst kaplaması üretilmiş olan TBC sistemine uygulanan elektrokimyasal korozyon testleri sonucunda altlık yapısına göre korozyon direncinde artış olduğu ve üst kaplamanın korozyon ortamından ana malzemeyi koruduğu belirlenmiştir.
7. APS kaplama yöntemi uygulanan TBC numunelerinden elde edilen SEM görüntülerinin analizleri neticesinde HVOF kaplama yöntemine göre; yöntemin proses koşullarına bağlı olarak daha fazla porozite ve gözenek yapısına sahip olduğu görülmüştür. Üst kaplama işlemi uygulanan numunede, kaplama yönteminin sahip olduğu özelliklere ve elektrokimyasal korozyon ortamı ile etkileşimin etkisine bağlı olarak yüzeysel mikro boyutta çatlaklar tespit edilmiştir. Kaplamanın altlık malzemeyi koruduğu ve korozyon ortamından öncelikli olarak negatif yönde etkilendiği gözlemlenmiştir. Bu durum; elde edilen potansiyel eğrilerinden de gözlemlenmiştir. Korozyon akım yoğunluğunun keskin değişiminden anlaşılacağı üzere kaplamalı numunelere oranla korozyon direncinin değişimine yol açmakta ve çatlak oluşumunun mevcudiyetinin de bununla birlikte doğru olduğunu göstermektedir.
8. Elektrokimyasal korozyon testleri sonucunda elde edilen potansiyodinamik, nyquist ve bode grafiklerinden kaplama uygulanan ve kaplamasız numunelerin eğrileri ve elde edilen yüksek E_{kor} değeri, düşük i_{kor} değerlerine sahip olan numuneler birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuca göre kaplama işlemi uygulanan numunelerden kaplamasız altlık numuneye göre korozyon ortamına karşı daha fazla direnç gösterdiği tespit edilmiştir. Böylelikle TBC sisteminin Inconel 718 numunesi

için NaCl ortamında kararlılık sağladığı ve korozyona karşı direnç göstermede pozitif etkilediği belirlenmiştir.

5.2 Öneriler

Yapılan tez çalışmasının ışığında, ileride yapılacak olan çalışmalara yönelik verilebilecek olan bazı önerileri şu şekilde sıralayabiliriz:

1. Yapılan elektrokimyasal korozyon deneyleri için kullanılan çözelti derişimi artırılarak benzeri korozif ortamların yoğunluğunun arttırılması ile parçalara ve kaplamaya etkileri ve hasar oluşumları incelenebilir. Bu da iletkenliği sağlayan Cl miktarının arttırılması ya da sıcaklığın arttırılması ile sağlanabilir.
2. Elektrokimyasal korozyon testinin tutma süresi uzatılarak, bu çalışmada görülen mikro çatlakların uzun sürelerde artacağı öngörülen hasar oluşumu gözlemlenebilir.
3. Elektrokimyasal korozyon testi önce ve sonrasında elde edilen SEM görüntülerinden yola çıkılarak kaplama kalınlığındaki değişim miktarının belirlenmesi veya kütle kaybı ile korozif ortamın etkileri detaylı olarak incelenebilir.
4. Deney çözeltisi değiştirilerek; farklı ortamların kaplamalar üzerindeki etkisinin araştırılması sağlanabilir.
5. Sıcak korozyon ve oksidasyon gibi hasar oluşumuna sebebiyet verecek mekanizmaların oluşumları gerçekleştirilerek sonrasında elektrokimyasal korozyon testleri gerçekleştirilebilir. Bunun neticesinde TGO tabaka yapısındaki değişimler ayrıntılı olarak incelenebilir.

KAYNAKLAR

- Ajdelsztajn, L., Jodoin, B., Kim, G.E. ve Schoenung, J.M. (2005). Cold spray deposition of nanocrystalline aluminum alloys. *Metallurgical and materials transactions*, 36; 657-666.
- Avcı, A. (2015). Termal Bariyer Kaplamaların Oksidasyon ve Sıcaklık Korozyonu Davranışlarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 89 s.
- Baskaran, T. ve Arya, S.B. (2018). Influence of ceramic top coat and thermally grown oxide microstructures of air plasma sprayed $\text{Sm}_2\text{SrAl}_2\text{O}_7$ thermal barrier coatings on the electrochemical impedance behavior. *Surface and Coatings Technology*. 344; 601-613.
- BI, X., Xu, H. ve Gong, S. (2001). Investigation of the failure mechanism of thermal barrier coatings prepared by electron beam physical vapor deposition, *Surface and Coatings Technology*. 130; 122-127.
- Byeon, J.W., Jayaraj, B., Vishweswaraiyah, S., Rhee, S., Desai, V.H. ve Sohn, Y.H. (2005). Non-destructive evaluation of degradation in multi-layered thermal barrier coatings by electrochemical impedance spectroscopy. *Materials Science and Engineering*. 407; 213-225.
- Chen, T., Hendrik, T., Xu, J., QiuHong, L., Jeffrey, H. ve Xingbo, L. (2013). Influence of surface modifications on pitting corrosion behavior of nickel-base alloy 718. Part1: Machine HammerPeening. *Corrosion Science*. 77; 230-45.
- Clarke, D.R. ve Phillpot, S.R. (2005). Thermal barrier coating materials. *Materials today*. 8 (6); 22-29.
- Çiftyürek, E. (2009). %8 YSZ (İtriyum İle Stabilize Edilmiş ZrO_2) Termal Bariyer Kaplamaların (TBK) Üretilmesi Ve Proses Parametreleri Optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İleri Teknolojiler Anabilim Dalı, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, İstanbul, 119 s.
- Dalkılıç, S. ve Tanatmış, A. (2009). Termal bariyer kaplama sistemlerinde yüksek sıcaklıkta düşük çevrimli yorulma şartları altında oluşan hasarların incelenmesi. *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*. 4;15-27.
- Davis, J.R. (2004). *Handbook of Thermal SprayTechnology*. ASM International: Ohio.
- Dokur, M.M. (2014). Çok Katmanlı CYSZ/ Al_2O_3 Ve CYSZ/ Al_2O_3 +YSZ Termal Bariyer Kaplamaların Üretimi ve Isıl-Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 122 s.
- Döleker, K.M. (2009). Bilyalı dövme işleminin termal bariyer kaplamaların oksidasyon davranışı üzerine etkisi. Yüksek lisans tezi. Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Bartın. 94 s.

- Döleker, K.M. (2015). Bilyalı Dövme İşleminin Termal Bariyer Kaplamaların Oksidasyon Davranışı Üzerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Bartın, 94 s.
- Duana, Z., Yangb, H., Kanob, S., Murakamib, K., Satohd, Y., Takedae, Y. ve Abeb, H. (2018). Oxidation and electrochemical behaviors of Al₂O₃ and ZrO₂ coatings on Zircaloy-2 cladding by thermal spraying. *Surface and Coatings Technology*. 334; 319-327.
- Eliaz N., Shemesh G. ve Latanision R.M. (2002). Hot corrosion in gas turbine components. *Engineering Failure Analysis*. 9; 31-43.
- Evcin, A. (2016). İnce film teknolojisi. Ders notları. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Seramik Mühendisliği Bölümü Anabilim Dalı, Afyon, 28.
- Farooq, M., Deen, K.M., Naseem, S., Alam, S., Ahmad, R. ve Imran, A. (2012). Electrochemical behavior of yttria stabilized thermal barrier coating on mildsteel in artificiaalsea water. *Proceedings of the Pakistan Academy of Sciences*. 49 (4); 235–240.
- Galedari, S. A., Jazi, M.S., Azarmi, F. ve Wang, Y.C. (2017). High temperature corrosion and electrochemical behavior of HVOF sprayed Inconel 718 coating using an innovative device: HTCMD. *Materials and Corrosion*. 68; 731–739.
- Gerengi, H., Kocak, Y., Jazdzewska, A., Kurtay, M. ve Durgun, H., (2013). Electrochemical investigations on the corrosion behaviour of reinforcing steel in diatomite-and zeolite-containing concrete exposed to sulphuric acid. *Construction and Building Materials*. 49; 471-477.
- Gök, M.G. (2015). Çok Katmanlı ve Fonksiyonel Derecelendirilmiş CYSZ/Gd₂Zr₂O₇ Esaslı Yeni Nesil Termal Bariyer Kaplamaların Üretimi ve Karakterizasyonu. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul 156 s.
- Gurrappa, I. ve Sambasiva R, A. (2006). Thermal barrier coatings for enhanced efficiency of gas turbine engines. *Surface and Coatings Technology*. 201; 3016-3029.
- Habibi, M.H. (2014). Hot Corrosion Behaviour of New Candidates For Thermal Barrier Coatings Application In Turbine Simulated Environments. Submitted to the Graduate Faculty of the Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in The Department of Mechanical and Industrial Engineering, 127.
- Heimann, R.B. (2008). Plasma-spraycoating: principles and applications. *Weinheim;New York;Basel;Cambridge;VCH*.
- Hongye, Z, Zhanwei, L., Xiaobo, Y. ve Huimin, X. (2019). Interface failure behavior of YSZ thermal barrier coatings during thermal shock, *Journal of Alloys and Compounds*. 779; 686-697.

- Injeti, S.K., Thunuguntla, V.K. ve Shareef M. (2015). Optimal allocation of capacitor banks in radial distribution systems for minimization of real power loss and maximization of network savings using bio-inspired optimization algorithms, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 69;441-455.
- Kaßner H., Stuke A., Rödiger M., Vaßen R. ve Stöver D. (2008). Progress in thermal barrier coatings: Influence of porosity on thermal conductivity and sintering in suspension plasma sprayed thermal barrier coatings. *John Wiley and Sons*. CESP, 29; 147-158.
- Kahraman, N. (2000). Toz Alev Spreyleme Yöntemiyle Kaplanan Numunelerde Kaplama Parametrelerinin Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi (yayınlanmış), Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Anabilim Dalı, Ankara, 86 s.
- Kaplan, M. (2017). Termal Bariyer Kaplamaların (TBC) Katı Partikül Erozyonu, Sıcak Korozyon ve Termal Çevrim Davranışlarının İncelenmesi. Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya, 144 s.
- Karabaş, M. ve Bal, E. (2015). Yeni nesil termal bariyer kaplama malzemeleri. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*. 12;57-64.
- Karaoğlanlı, A.C., Çalışkan, H., Gök, M.S., Erdoğan, A. ve Türk, A. (2014). A comparative study of the micro abrasion wear behavior of CoNiCrAlY coatings fabricated by APS, HVOF, and CGDS techniques. *Tribology Transaction*. 57(1); 11-17.
- Karaoğlanlı, A.C., Altuncu, E., Özdemir, İ., Türk, A., ve Üstel, F. (2011). Structure and durability evaluation of YSZ+Al₂O₃ composite TBCs with APS and HVOF bond coats under thermal cycling conditions. *Surface and Coatings Technology*. 205(2); 369-373.
- Karaoğlanlı, A.C. (2012). Termal Bariyer Kaplamalarda Bağ Tabakasının Farklı Yöntemlerle Üretilmesi ve Özelliklere Etkisi. (Yayınlanmamış doktora tezi), Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya, 225.
- Karaoğlanlı, A.C., Dikici, H. ve Küçük, Y. (2013). Effects of heat treatment on adhesion strength of thermal barrier coating systems. *Engineering Failure Analysis*. 32; 16-22.
- Khajezadeh, M.H., Mohammadi, M. ve Ghatee, M. (2018). Hot corrosion performance and electrochemical study of CoNiCrAlY/YSZ/YSZ-La₂O₃ multilayer thermal barrier coatings in the presence of molten salt. *Materials Chemistry and Physics*. 23-34.
- Li, Y., Xie, Y., Huang, L., Liu, X. ve Zheng, X. (2012). Effect of physical vapor deposited Al₂O₃ film on TGO growth in YSZ/CoNiCrAlY coatings. *Ceramics International*. 38; 5113-5121.

- Liu, Y., Fan, X., Zeng, S., Wang, Y., Zou, B., Gu, L., Chen, X., Khan, Z. S., Yang, D. Ve Cao, X. (2012). Corrosionbehavior of coatingwithplasmasprayed 8YSZ on thesurface of carbonsteel. *Journal Of RareEarths*. 30; 592.
- Mahesh, R. A., Jayaganthan, R. ve Prakash, S. (2010). A study on the oxidation behavior of HVOF sprayed NiCrAlY – 0.4 wt. % CeO₂ coatings on superalloys at elevated temperature. *Materials Chemistry and Physics*. 119; 449-457.
- Meşekıran, N. (2015). Farklı Üst Kaplama İçeriğine Sahip Termal Bariyer Kaplamaların (TBC) Oksidasyon Davranışlarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Bartın, 115 s.
- McLean, M. (1995). Nickel-base superalloys: current status and potential. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 351 (1697); 419-433.
- Miller, R.A. (2009). History of Thermal Barrier Coatings for Gas Turbine Engines. National Aeronautics and Space Administration Glenn Research Center, Cleveland.
- Myoung, S.W., Lu, Z., Jung, Y.G., Jang, B.K. ve Paik, U. (2014). Control of bond coat microstructure in HVOF process for thermal barrier coatings. *Surface and Coatings Technology*. 260; 63-67.
- Özgürlük, Y. (2016). Soğuk Gaz Dinamik Sprey (CGDS) Kaplama Yöntemiyle Üretilen Termal Bariyer Kaplamaların (TBC) Sıcak Korozyon Davranışlarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Bartın, 87 s.
- Özgürlük, Y., Döleker, K.M., Ahlatçı, H. ve Karaoğlanlı, A.C. (2018). Investigation of hot corrosion behavior of thermal barrier coating (TBC) systems with rare earth contents. *Arabian Journal of Geosciences*. 11 (11); 267.
- Öztekin, Y. (2008). Camsı Karbon Elektrot Yüzeyine Çeşitli Fenantrolin Türevlerinin Modifikasyonu, Yüzey Karakterizasyonu Elektrokimyasal ve Spektroskopik Özelliklerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalı, Konya, 164 s.
- Parlakıyığıt, A.S. (2013). Termal Bariyer Kaplamaların İzotermal Oksidasyon Davranışlarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 79 s.
- Pawlowski, L. (2008). *The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings: Second Edition*. John Wiley and Sons: Chichester, 626.
- Perez, N. (2016). *Electrochemistry and Corrosion Science*. Second Edition, Switzerland,455.

- Pulci, G., Tirillò, J., Marra, F., Sarasini, F., Bellucci, A., Valente, T. ve Bartuli, C. (2015). High temperature oxidation of MCrAlY coatings modified by Al₂O₃ PVD overlay. *Surface and Coatings Technology*. 268; 198-204.
- Raelisona, R.N., Xie, Y., Sapanathan, T., Planche, M.P., Kromer, R., Costil, S. Ve Langlade C. (2018). Cold gas dynamic spray technology: A comprehensive review of processing conditions for various technological developments till to date. *Additive Manufacturing*. 19; 134-159.
- Reed, R.C. (2006). *The superalloys fundamentals and applications*. Cambridge University Press, 372.
- Richer, P., Yandouzi, M., Beauvais, L. ve Jodoin, B. (2010). Oxidation behaviour of CoNiCrAlY bond coats produced by plasma, HVOF and cold gas dynamic spraying. *Surface and Coatings Technology*. 204; 3962-3974.
- Sadeghimeresht, E., Marcoksan, N. Ve Nylén, P. (2016). Microstructural and electrochemical characterization of Ni-based bi-layer coatings produced by the HVOF process. *Surface and Coatings Technology*. 304;606-619.
- Shen, Q., Yang, L., Zhoua, Y.C., Wei, Y.G., Wang N.G. (2017). Models for predicting TGO growth to rough interface in TBCs. *Surface and Coatings Technology*. 325;219-228.
- Singh, H., Sidhu, T.S ve Kalsi, S.B.S. (2012). An overview of the effect of hot corrosion in waste-to-energy (WTE) plant environment. *Asian Journal of Engineering and Applied Technology*. ISSN. 2249-068: 50-52.
- Stiger, M. J. (1999). Thermal barrier coatings for the 21st century. *Zeitschriftfur Metallkunde*. 90 (12); 1069-1078.
- Terkeşli, M.H. (2017). APS yöntemi ile üretilen WC ve Mo kaplamaların aşınma davranışlarının incelenmesi. Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Bartın, 92 s.
- Türkan, S. (2017). Düşük Basınçlı Döküm Kalıpları İçin Poteyaj Uygulamasına Alternatif Termal Sprey Yöntemleri ile Termal Bariyer Kaplama Uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya, 110 s.
- Tzimas, E., Müllejans, H., Peteves, S.D., Bressers, J. ve Stamm, W. (2000). Failure of thermal barrier coating systems under cyclic thermomechanical loading. *Acta Materialia*. 48;4699-4707.
- Uzunsoy, D. ve Küçükelyas, B. (2017). Elektrokimyasal korozyon deneyi. Bursa Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü. Deney Föyü.
- URL-1 (2014). [https://www.slideshare.net/bugraakgun5/su-korozyonu\(03.05.2019\)](https://www.slideshare.net/bugraakgun5/su-korozyonu(03.05.2019)).
- URL-2 (2016). <http://blog.aku.edu.tr/evcin/files/2019/03/thermal.pdf> (03.05.2019)

- URL-3(2019).<http://teslab.sakarya.edu.tr/tr/icerik/10714/42047/plazma-sprey> (03.05.2019)
- URL-4(2019).<https://www.fst.nl/systems/hvof-high-velocity-oxygen-fuel-thermal-spray> (17.05.2019)
- URL-5 (2019). <https://slideplayer.biz.tr/slide/11846940/>(21.05.2019)
- URL-6(2019). https://www.metalurji.org.tr/dergi/dergi157/d157_2940.pdf/ (21.05.2019)
- URL-7 (2000).<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359645400002603> (21.05.2019)
- URL-8(2016)<https://www.muhendisbeyinler.net/gaz-turbinli-motorlar-jet-motorlar/>(23.05.2019)
- Vaßen, R., Jarligo, M. O., Steinke, T., Mack, D. E., ve Stöver, D. (2010). Over view on advanced thermal barrier coatings. *Surface and Coatings Technology*. 205: 938-942.
- Vassen, R., Cao, X., Tietz, F., Basu, D., Stover, D., Smialek, J. L. (2000). Zirconates as new materials for thermal barrier coatings. *Journal of the American Ceramic Society*. 83.8: 2023-2028.
- Zağlı, M. (2010). Alev Sprey Yöntemiyle Polimer Kaplamaların Üretimi ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya, 72 s.
- Wang, X. G., Liu, J.L., Jin, T., Sun, X.F., Zhou, Y.Z., Hu, Z. Q., Do, J.H., Choi, B.G., Kim, I.S. ve Jo, C.Y. (2015). Creep deformation related to dislocations cutting the γ' phase of a Ni-base single crystal superalloy. *Materials Science and Engineering*. 626: 406-414.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Elif Altan
Doğum Yeri ve Tarihi : Nazilli / 10.09.1994

Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi : Bartın Üniversitesi-Metalürji ve Malzeme Müh. Ana
Bilim Dalı
Yüksek Lisans Öğrenimi : Bartın Üniversitesi-Metalürji ve Malzeme Müh. Ana
Bilim Dalı
Bildiği Yabancı Diller : İngilizce
Bilimsel Faaliyet/Yayımlar :
Aldığı Ödüller :

İş Deneyimi

Stajlar : Ege Vitrifiye (2015) - Kibaroğlu Döküm (2014)
Projeler ve Kurs Belgeleri :
Çalıştığı Kurumlar : EYS Metal San. Ltd. Şti. (Aydın) -Ultron Savunma
Sanayi (Konya)

İletişim

E-Posta Adresi : elifaaltan1101@gmail.com

Tarih : 09/09/2019 (Tez Savunma Tarihi)