



T.C.

**BARTIN ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**METALÜRJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**CoNiCrAlY BAĞ VE YSZ İÇERİKLİ TERMAL BARIYER**  
**KAPLAMALARIN ELEKTROKİMYASAL KOROZYON**  
**DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

**HAZIRLAYAN**  
**MİNE ÇELİKER**

**DANIŞMAN**  
**DOÇ. DR. ABDULLAH CAHİT KARAOĞLANLI**

**BARTIN-2019**



**T.C.**

**BARTIN ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**METALÜRJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**CoNiCrAlY BAĞ VE YSZ İÇERİKLİ TERMAL BARIYER KAPLAMALARIN  
ELEKTROKİMYASAL KOROZYON DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**HAZIRLAYAN**

**Mine ÇELİKER**

**JÜRİ ÜYELERİ**

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

**BARTIN-2019**

## KABUL VE ONAY

Mine ÇELİKER tarafından hazırlanan “CoNiCrAlY BAĞ VE YSZ İÇERİKLİ TERMAL BARIYER KAPLAMALARIN 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. A. Cahit KARAOĞLANLI .....  
(Danışman)

Üye : Prof. Dr. M. Sabri GÖK .....

Üye : Prof. Dr. Hayrettin AHLATCI .....

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

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

## BEYANNAME

Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Doç. Dr. Abdullah Cahit KARAOĞLANLI ve Dr. Öğr. Üyesi Mustafa KOCABAŞ danışmanlığında hazırlamış olduğum “CoNiCrAlY BAĞ VE YSZ İÇERİKLİ TERMAL BARIYER KAPLAMALARIN 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

Mine ÇELİKER

## ÖNSÖZ

Üniversite hayatım boyunca lisans döneminde olduğu gibi yüksek lisans döneminde de her türlü konuda beni yalnız bırakmayarak danışmanlığımı üstlenen, araştırma konusunun seçiminden sonuçlandırılmasına kadar katkı ve emeklerini hiçbir zaman esirgemeyen, her türlü imkandan faydalanmamı sağlayan, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım değerli hocam Doç. Dr. Abdullah Cahit KARAOĞLANLI' ya saygıyla ve içtenlikle sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmalarım boyunca danışmanlığımı üstlenerek desteğini benden esirgemeyen, çalışma konusunun araştırılmasında, deneylerin uygulanmasında, sonuçlandırılmasında öneri ve eleştirileriyle bana yol gösteren, çalışmaların tamamlanması için gerekli her türlü imkandan faydalanmamı sağlayarak katkı ve emeklerini hiçbir zaman esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Mustafa KOCABAŞ' a saygıyla ve içtenlikle sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bugünlere ulaşmamda büyük emekleri olan, hayatımın her safhasında olduğu gibi tez çalışmam süresince de verdikleri moral ve destek ile maddi ve manevi olarak beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan kıymetli babam Celal ÇELİKER, kıymetli annem Rahime ÇELİKER ve kardeşim Murat ÇELİKER' e, aile büyüklerim ve dostlarıma, özellikle çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen kıymetli arkadaşlarım Kamil Eray TANÇ ve Recep YILMAZ' a sonsuz sevgi, saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Mine ÇELİKER

## ÖZET

### Yüksek Lisans Tezi

## CoNiCrAlY BAĞ VE YSZ İÇERİKLİ TERMAL BARIYER KAPLAMALARIN ELEKTROKİMYASAL KOROZYON DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Mine ÇELİKER

Bartın Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Abdullah Cahit KARAOĞLANLI

İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mustafa KOCABAŞ

Bartın-2019, sayfa: 105

Termal bariyer kaplama (TBC) sistemleri; özellikle savunma, havacılık, uçak ve uzay endüstrisinde katma değeri yüksek birçok bileşen üzerinde yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. TBC' ler türbin bıçak ve kanatçığı gibi gaz türbin motor komponentlerinde yüksek sıcaklığa maruz kalmış kritik bölge parçalarında ısı izolasyonu amaçlı olarak kullanılan koruyucu kaplamalardır. Soğuk gaz dinamik sprey (CGDS) prosesi, son yıllarda ortaya çıkan, yoğun ve oksitsiz metalik kaplamaların üretimine olanak sağlayan inovatif bir kaplama tekniğidir. Bu çalışmada, Inconel 718 süper alaşım altlık malzeme üzerine CGDS prosesi kullanılarak CoNiCrAlY içerikli metalik esaslı bağ kaplamalar yaklaşık olarak 100 µm kalınlığında üretilmiştir. CoNiCrAlY içerikli bağ kaplamaların üzerine yaklaşık olarak 300 µm kalınlığında ZrO<sub>2</sub> + Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (YSZ) içerikli seramik üst kaplamaların üretimi atmosferik plazma sprey (APS) prosesi kullanılarak gerçekleştirilerek TBC sistemi elde edilmiştir. Altlık malzeme, metalik bağ kaplama, seramik üst kaplamaya sahip TBC sistemlerinin elektrokimyasal korozyon testleri gerçekleştirilmiştir. Korozyon deneyleri elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) ve potansiyodinamik polarizasyon (PDP) deneyleri kullanılarak oda sıcaklığında 0,1 M sodyum klorür (NaCl) çözeltisinde yapılmıştır. Kullanılan geleneksel üç elektrotlu elektrokimyasal hücrede karşıt elektrot grafit çubuk,

referans elektrotu (Ag/AgCl) ve çalışma elektrodu olarak ise numuneler kullanılmıştır. Altlık, metalik bağ ve seramik üst kaplamaya sahip TBC sisteminin elektrokimyasal testler öncesi ve sonrasında mikroyapısal ve yüzey analizleri gerçekleştirilerek, elde edilen sonuçlar literatür ile ayrıntılı olarak karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Termal Bariyer Kaplama (TBC); Elektrokimyasal Korozyon; Soğuk Gaz Dinamik Sprey (CGDS); Atmosferik Plazma Sprey (APS); CoNiCrAlY; YSZ

**Bilim Kodu:** 604.02.01.

## **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

### **INVESTIGATION OF ELECTROCHEMICAL CORROSION BEHAVIOR OF CoNiCrAlY BOND COAT AND YTTRIA STABILIZED ZIRCONIA THERMAL BARRIER COATINGS**

**Mine ÇELİKER**

**Bartın University**

**Graduate School of Natural and Applied Sciences**

**Department of Metallurgical and Materials Engineering**

**Thesis Advisor: Assoc. Prof. Abdullah Cahit KARAOĞLANLI**

**Second Advisor: Assist. Prof. Mustafa KOCABAŞ**

**Bartın-2019, pp: 105**

Thermal barrier coating (TBC) systems have been widely employed on a variety of value added components particularly in defence, aviation, aircraft and aerospace industries. TBCs provide thermal insulation on critical engine components of gas turbine engines such as turbine blades that are subjected to high temperatures. Cold gas dynamic spraying (CGDS) technique is a recently developed innovative coating technique that allows deposition of dense and oxide-free metallic coatings. In this study, approximately 100  $\mu\text{m}$  thick metallic based bond coats with CoNiCrAlY content were deposited on Inconel 718 superalloy substrate material using CGDS technique. Afterwards,  $\text{ZrO}_2 + \text{Y}_2\text{O}_3$  (YSZ) ceramic top coatings with approximate thickness of 300  $\mu\text{m}$  were deposited on the CoNiCrAlY bond coats with atmospheric plasma spray (APS) technique to produce the TBC system. Electrochemical corrosion tests of the TBC systems consisting of the substrate material, metallic bond coat and ceramic top coat were performed. Corrosion tests were performed in 0.1 M sodium chloride (NaCl) solution at room temperature using electrochemical impedance spectroscopy (EIS) and potentiodynamic polarization (PDP) experiments. A three electrode electrochemical corrosion test cell consisting of graphite rod as the counter



electrode, Ag/AgCl as the reference electrode, and the samples as the working electrode, was used. Microstructural and surface analyses of the TBC system comprising of the substrate, metallic bond coat and ceramic top coat were performed before and after the electrochemical tests, and an indepth comparison of the obtained results with the related literature.

**Keywords:** Thermal Barrier Coating (TBC); Electrochemical Corrosion; Cold Gas Dynamic Spray (CGDS); Atmospheric Plasma Spray (APS); CoNiCrAlY; YSZ

**Science Code:** 604.02.01.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL VE ONAY .....	ii
BEYANNAME.....	iii
ÖNSÖZ.....	iv
ÖZET .....	v
ABSTRACT .....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvi
BÖLÜM 1 GİRİŞ .....	1
1.1 Giriş .....	1
BÖLÜM 2 LİTERATÜR ÖZETİ.....	5
2.1 Termal Sprey Kaplamalar .....	5
2.2 Termal Sprey Kaplamaların Özellikleri.....	5
2.3 Termal Sprey Kaplama Çeşitleri.....	7
2.3.1 Plazma Sprey Kaplamalar .....	9
2.3.1.1 Atmosferik Plazma Sprey Kaplama Prosesi.....	13
2.3.1.2 Vakum Plazma Sprey Kaplama Prosesi .....	17
2.3.2 Yüksek Hızlı Oksi - Alev Yakıt Püskürtme Prosesi .....	19
2.3.3 Soğuk Gaz Dinamik Sprey Kaplama Prosesi.....	21
2.4 Termal Bariyer Kaplamalar (TBC).....	26
2.4.1 Termal Bariyer Kaplamaların Özellikleri .....	27
2.4.2 TBC' lerin Tarihsel Süreci ve Kullanım Alanları .....	29
2.4.3 TBC' lerin Kaplama Sistemi ve Malzemeleri.....	31
2.4.3.1 Süper Alaşım Altlık Malzeme .....	35
2.4.3.2 Bağ Kaplama .....	36
2.4.3.3 Seramik Üst Kaplama.....	39
2.4.3.4 Termal Olarak Büyüyen Oksit Tabakası (TGO).....	40

2.4.4 Termal Bariyer Kaplamalarda Karşılaşılan Hasar Mekanizmaları .....	42
2.4.4.1 TBC' lerin Oksidasyon Davranışı .....	43
2.4.4.2 Sıcak Korozyon .....	44
2.4.4.3 Termal Şok .....	46
2.4.4.4 CMAS (CaO-MgO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> ) Hasarı.....	48
2.4.4.5 Elektrokimyasal Korozyon.....	50
2.4.4.5.1 Tafel Ekstrapolasyon Yöntemi .....	53
2.4.4.5.2 Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi .....	54
BÖLÜM 3 MATERYAL VE METOT .....	56
3.1 Amaç .....	56
3.2 Toz ve Altlık Malzemelerin Karakterize Edilmesi .....	56
3.2.1 Toz Malzemelerin Mikroyapı Olarak Karakterize Edilmesi.....	57
3.2.2 Altlık Malzemenin Kimyasal Bileşimi ve Özellikleri.....	58
3.3 Bağ Kaplamamın Eldesi .....	59
3.4 TBC Sisteminde Üst Kaplamanın Eldesi.....	60
3.5 TBC Sistem Bileşenlerinin Elektrokimyasal Korozyon Testlerinin Gerçekleştirilmesi .....	60
3.6 TBC Sistem Bileşenlerinin Elektrokimyasal Korozyon Testi Sonrası Karakterize Edilmesi .....	63
BÖLÜM 4 BULGULAR VE TARTIŞMA .....	65
4.1 TBC Sistem Bileşenlerinin Elektrokimyasal Korozyon Etkisi.....	65
4.1.1 Elektrokimyasal Korozyon Testleri .....	65
4.1.1.1 Potansiyodinamik Polarizasyon (PDP) ve Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EIS) Test Sonuçları .....	66
4.1.2 TBC Sistem Bileşenlerinin Elektrokimyasal Korozyon Sonrası Mikroyapısal İncelenmesi .....	71
4.1.2.1 Kaplamasız Inconel 718 Altlık Numunesinin Elektrokimyasal Korozyon Testi Sonrası Mikroyapısının İncelenmesi .....	71
4.1.2.2 CGDS İle Bağ Kaplaması Üretilmiş Inconel 718 Numunesinin Elektrokimyasal Korozyon Testi Sonrası Mikroyapısının İncelenmesi.....	75

4.1.2.3 APS İle Üst Kaplaması Üretilmiş TBC Numunesinin Elektrokimyasal Korozyon Testi Sonrası Mikroyapısının İncelenmesi .....	78
4.2 Elektrokimyasal Korozyon Testi Sonrasında Oluşan Mikroyapısal Değişikliklerin İrdelenmesi.....	85
<b>BÖLÜM 5 SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>91</b>
5.1 Genel Sonuçlar.....	91
5.2 Öneriler .....	94
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>95</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>104</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Sayfa No
1.1: Senelere göre süper alaşımların ve ısıya dayanıklı kaplamaların gelişimi.....	2
1.2: Tipik bir termal bariyer kaplama sisteminde katmanlar.....	3
2.1: Lameli mikroyapı gösterimi .....	6
2.2: Termal sprej kaplama metodunun proses olarak gösterimi.....	6
2.3: Termal sprej kaplamaların proses özelliklerine göre sınıflandırılması .....	8
2.4: Kesiti alınmış plazma tabancasının görünümü.....	10
2.5: PS ile kaplanması yapılmış malzemenin görünümü .....	11
2.6: Termal sprej kaplama sistemlerinde kullanılan toz kompozisyonları .....	13
2.7: Plazma sprej tabancası iç şeması.....	14
2.8: Plazma sprej kaplama sistemi .....	15
2.9: (a) VPS metoduyla püskürtülen CoNiCrAlY bağ kaplama (b) APS prosesiyle püskürtülen CoNiCrAlY bağ kaplama .....	18
2.10: LPPS kaplamanın püskürtme koşulundaki yüzey morfolojisi, 3.00 kx büyütmede SEM görüntüsü .....	18
2.11: Vakum Plazma Sprej prosesinin şema olarak görünümü; 1) çalışma gazları girişi, 2) anot, 3) vakum çemberi, 4) ark üretici, 5) toz giriş kısmı, 6) plazma üretici.....	19
2.12: HVOF CoNiCrAlY içerikli bağ kaplamaya ait SEM görüntüsü.....	21
2.13: CGDS sisteminin şematik olarak görünümü.....	23
2.14: CGDS prosesinde arkadan gelen parçacıkların neden olduğu deformasyon süreci .....	24
2.15: CoNiCrAlY bağ tabakasının mikroyapısı (a) HVOF (b) CGDS sprej .....	25
2.16: Soğuk püskürtme kaplamasının püskürtme koşullarında yüzey şekilleri .....	26
2.17: Çok katmanlı termal bariyer kaplamalar için numune geometrisi .....	26
2.18: Termal bariyer malzemelerinin termal iletkenlik özellikleri.....	28
2.19: Gaz türbin motorunun kesit görüntüsü, türbin kanadı ve enine kesit SEM görüntüsü.....	29
2.20: Roket motor nozullarında kullanılan TBC mikroyapısı.....	30
2.21: Yanma odasına seramik üst kaplamalı TBC uygulamaları .....	30
2.22: MCrAlY bağ ve YSZ üst kaplama uygulanmış türbin bıçağı .....	31

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

Şekil No	Sayfa No
2.23: TBC' lerle ilgili bazı oksitlerin Ellingham diyagramı .....	38
2.24: Sıcak korozyon etkisiyle meydana gelen $ZrO_2$ ve $YVO_4$ kristalleri .....	45
2.25: Termal şok testinde hasar modlarının şematik gösterimi.....	48
2.26: CMAS toz parçacıklarının, türbin kanatlarının ön kenarında ve basınç yüzeylerinde (solda) birikmesini gösteren temsili resim .....	50
2.27: Korozyonun ölçülmesinde tercih edilen elektrokimyasal metotlar.....	52
2.28: Anodik ve katodik polarizasyon eğrileri .....	54
3.1: CoNiCrAlY içerikli metalik bağ kaplama tozlarının mikroyapısal görüntüleri.....	57
3.2: YSZ kaplama tozlarının mikroyapısal görüntüleri.....	57
3.3: Silindirik biçimdeki altlığın tel erozyon yöntemi ile hazır hale getirilmesi.....	59
3.4: Elektrokimyasal korozyon deneylerinde kullanılan deney düzeneği.....	61
3.5: Numunelerin kesilmesinde kullanılan hassas kesme cihazı.....	61
3.6: Elektrokimyasal deneylerde kullanılan hücre .....	62
4.1: 0,1 M NaCl çözeltisinde numunelere ait PDP eğrileri.....	66
4.2: Numunelerin eşdeğer elektrik devre modeli .....	67
4.3: Test numunelerine ait Nyquist ve Fit eğrileri .....	69
4.4: Test numunelerine ait Bode ve Fit eğrileri.....	70
4.5: Inconel 718 süper alaşım altlık malzemesinin NaCl çözeltisinde elektrokimyasal korozyon testinden sonra (a) 250x büyütmede (b) 1.00kx büyütmede (c) 2.00kx büyütmede üst yüzey görüntüsü.....	71
4.6: Inconel 718 süper alaşım altlık malzemesinin NaCl çözeltisinde elektrokimyasal korozyon testinden sonra EDS analizi .....	73
4.7: Inconel 718 süper alaşım altlık malzemesinin NaCl çözeltisinde elektrokimyasal korozyon testinden sonra XRD analizi .....	74
4.8: CGDS prosesi ile bağ kaplaması üretilmiş Inconel 718 numunenin NaCl çözeltisinde elektrokimyasal korozyon testinden sonra (a) altlık ve bağ görüntüsü (b) bağ kaplama ara yüzey görüntüsü .....	75
4.9: CGDS prosesi ile bağ kaplaması üretilmiş kaplamanın NaCl çözeltisinde elektrokimyasal korozyon testi sonrası üst yüzey görüntüsü.....	76

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

Şekil No	Sayfa No
4.10: CGDS prosesi ile bağ kaplaması üretilmiş Inconel 718 numunesinin NaCl çözeltisinde elektrokimyasal korozyon testinden sonra EDS analizi.....	77
4.11: CGDS prosesi ile bağ kaplaması üretilmiş Inconel 718 numunenin NaCl çözeltisinde elektrokimyasal korozyon testinden sonra XRD analizi.....	78
4.12: APS ile üst kaplaması, CGDS ile bağ kaplaması uygulanmış Inconel 718 numunenin NaCl çözeltisinde elektrokimyasal korozyon testinden sonra (a) altlık, bağ ve üst kaplama görüntüsü (b) üst kaplama ara yüzey görüntüsü .....	79
4.13: APS ile üst kaplaması üretilmiş TBC sisteminin NaCl çözeltisinde elektrokimyasal korozyon testi sonrası üst yüzey görüntüsü.....	80
4.14: APS ile üst kaplaması üretilmiş TBC sisteminin NaCl çözeltisinde elektrokimyasal korozyon testinden sonra üst yüzey EDS analizi.....	81
4.15: APS ile üst kaplaması, CGDS ile bağ kaplaması üretilmiş Inconel 718 numunesinin NaCl çözeltisinde elektrokimyasal korozyon testinden sonra enine EDS analizi.....	82
4.16: APS ile üst kaplaması üretilmiş TBC sisteminin NaCl çözeltisinde elektrokimyasal korozyon testinden sonra üst yüzey görüntüsünün elementel analizi .....	84
4.17: APS ile üst kaplaması üretilmiş TBC sisteminin elektrokimyasal korozyon testinden sonra XRD analizi .....	85

## TABLULAR DİZİNİ

<b>Tablo</b>	<b>Sayfa</b>
<b>No</b>	<b>No</b>
2.1: Termal sprej proseslerinin partikül hızı-alev sıcaklığı grafiği .....	9
2.2: Bir plazma sprej prosesini etkileyen değişkenler .....	12
2.3: TBC malzemelerinin avantaj ve dezavantajları .....	33
2.4: Termal bariyer kaplama malzemelerinin mekanik ve fiziksel özellikleri .....	34
2.5: Ni bazlı Inconel 718 malzemesinin mekanik özellikleri .....	36
3.1: Ni bazlı Inconel 718' e ait kimyasal bileşim .....	58
3.2: Ni bazlı Inconel 718 malzemesinin fiziksel özellikleri .....	58
3.3: Bağ üretiminde kullanılan proses parametreleri .....	59
3.4: Üst kaplama üretiminde kullanılan proses parametreleri .....	60
3.5: Zımparalama işlemi esnasında kullanılan parametreler .....	63
3.6: Parlatma işlemi esnasında kullanılan parametreler .....	63
4.1: Elektrokimyasal korozyon değerleri .....	65
4.2: Test numunelerine ait EIS verileri .....	68
4.3: Sadeghimeresht ve arkadaşlarının (2016) yapmış oldukları elektrokimyasal korozyon testleri sonucu .....	89



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	: Azot
AC	: Alternatif Akım
Ar	: Argon
cm	: Santimetre
Co	: Kobalt
CoNiCrAlY	: Kobalt Nikel Krom Alüminyum İttriya
GPa	: Gigapascal
H	: Hidrojen
K	: Kelvin
kHz	: Kilohertz
kW	: Kilowatt
m/s	: Metre/Saniye
MCrAlY	: Metal Krom Alüminyum İttriya
mm	: Milimetre
mBar	: Milibar
mHz	: Milihertz
MPa	: Megapascal
mV	: Milivolt
N	: Azot
NaCl	: Sodyum Klorür
ns	: Nano Saniye
O	: Oksijen
Pa	: Paskal
Psi	: İnç Kare Başına Pound
s	: Saniye
slpm	: Standart litre/Dakika
$\nu$	: Poisson oranı
W	: Wolfram
$\mu\text{m}$	: Mikrometre
$\Omega$	: Ohm
$^{\circ}\text{C}$	: Celcius

$\alpha$	: Alfa
$\beta$	: Beta
$\gamma$	: Gama
$\theta$	: Teta

## **KISALTMALAR**

APS	: Atmosferik Plazma Sprey
CGDS	: Soğuk Gaz Dinamik Sprey
CMAS	: CaO-MgO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub>
D-GUN	: Detonasyon Tabancası
EDS	: Enerji Dağılımı X-Işını Spektroskopisi
EB-PVD	: Elektron Işını-Fiziksel Buhar Biriktirme
EIS	: Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi
E <sub>kor</sub>	: Korozyon Potansiyeli
HVOF	: Yüksek Hızda Oksi Yakıt Püskürtme
HVAF	: Yüksek Hızda Hava Yakıt Püskürtme
i <sub>kor</sub>	: Korozyon Akım Yoğunluğu
LPPS	: Düşük Basıncılı Plazma Sprey
OCP	: Açık Devre Potansiyeli
PS	: Plazma Sprey
RE	: Referans Elektrodu
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
TBC	: Termal Bariyer Kaplama
TGO	: Termal Olarak Büyüyen Oksit Tabaka
VPS	: Vakum Plazma Sprey
YMK	: Yüzey Merkezli Kübik
YSZ	: İttriya ile Stabilize edilmiş Zirkonya
WE	: Çalışma Elektrodu
XRD	: X ışını Kırınım Yöntemi

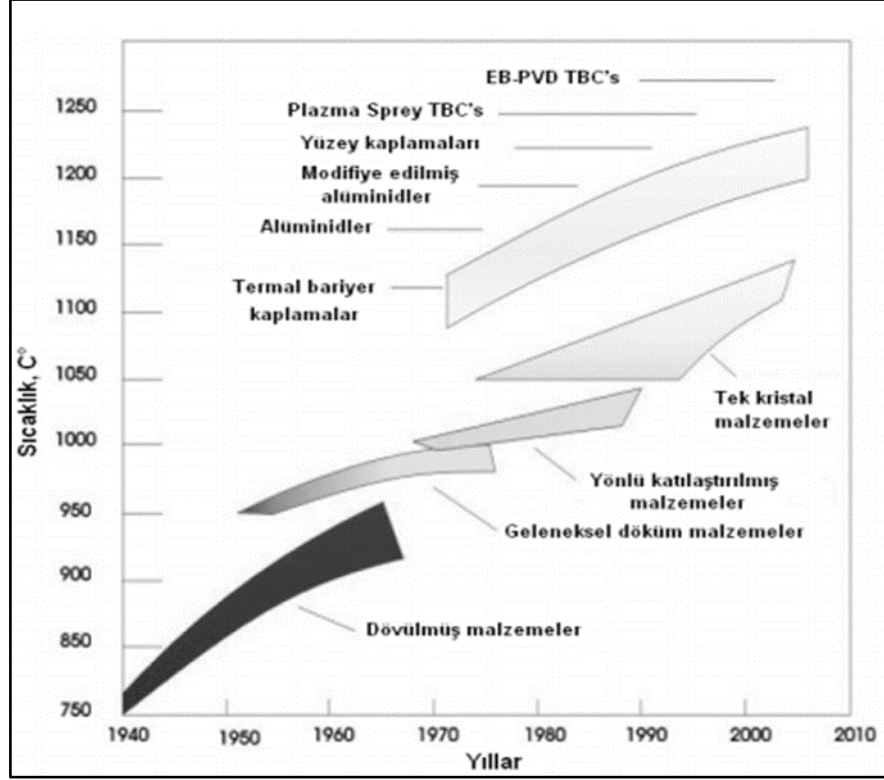
# BÖLÜM 1

## GİRİŞ

### 1.1 Giriş

Teknolojinin ilerlemesiyle çalışma koşulları hız kazanmakta ve kullanılan malzemeler ağır servis koşullarına bağlı olarak ihtiyaçları tam anlamıyla karşılayamamaktadır. Bu sebeple artan ihtiyaçlar yeni malzemelerin ortaya çıkmasını gerekli kılmıştır. Sıcaklık dayanımının istendiği kullanım alanlarında, özellikle havacılık ve enerji üretiminde yakıtların yanmasıyla meydana gelen yüksek sıcaklıklarda kullanılan türbin kanatları ve vanalar hasara uğramakta, istenilen performansı sergileyememektedir. Bu çalışma koşullarında parçaların hasarını en düşük seviyeye indirmek ve çalışma performanslarını artırmak amacıyla gereksinim duyulan süper alaşım malzemelerde gelişmeler sağlanmıştır. Fakat dayanım artırıcı özelliğiyle bilinen bu malzemeler soğutma sistemlerinin kullanılmasına rağmen zamanla korozyon, termal şok, oksidasyon gibi birçok olumsuz servis koşullarına maruz kalmıştır. Süper alaşım türbin bıçaklarının ergime noktalarına çok yakın sıcaklıklarda çalışmasından dolayı, meydana gelebilecek sorunlara karşı gaz türbin elemanlarının yüzeyleri kaplanarak yeni yaklaşımlara gidilmiş, seramik esaslı malzemelerin kaplama yöntemleri kullanımı gün yüzüne çıkmıştır (Döleker, 2015).

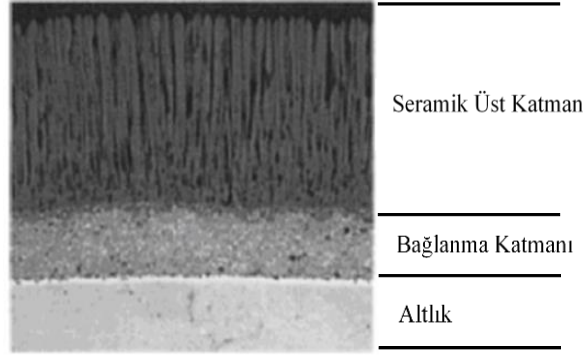
Kaplanan parçaları sıcaklıktan koruyarak sistemin ömrünü, verimliliğini artırmak ve süper alaşım altlıkları hasardan korumak amacıyla termal bariyer kaplamalar (TBC) kullanılmaktadır. TBC' ler gaz türbinlerine uygulanmasıyla türbin giriş sıcaklıklarını iyileştirir, türbin verimliliklerinin artmasında rol oynar ve türbin parçalarını bozulmalardan korur. TBC' ler genel olarak gelişmiş turbo motorların yanma hatları, motor kanatçıkları, güç santralleri ve diğer sıcak hat parçaları gibi birçok yanma uygulamalarında tercih edilmektedir. Şekil 1.1' de senelere göre süper alaşımlarla birlikte ısıya dayanıklı kaplamaların gelişimi verilmektedir (Karaoğlanlı, 2012).



Şekil 1.1: Senelere göre süper alaşımların ve ısıya dayanıklı kaplamaların gelişimi (Karaoğlanlı, 2012).

TBC' ler havacılık ve enerji üretiminde olduğu kadar denizel ortamlarda kullanılan borular, gemi gövdeleri, pervaneler, deniz altı gemileri, soğutma suyu sistemleri, radyatörler, barajlar, asit tankları ve kazanlar gibi endüstri alanlarında da elektrokimyasal korozyondan korunmak için uygulanan bir yöntemdir.

TBC' ler; Ni esaslı süper alaşımdan olan bir altlık malzemenin, altlık malzemenin sıcaklıktan korunmasını sağlayan ve termal uyumsuzluğunu azaltan %6-8 oranında itriya içerikli zirkonya (YSZ) seramik üst kaplamadan, seramik üst kaplamayla metalik altlık arasında uyum sağlayıp yapışmasını kolaylaştıran, altlığı oksidasyon gibi hasarlara karşı koruyarak oksitlenme direncini yükselten ve türbin motorlarının sıcak hatlarında yüksek performansı nedeniyle kullanılan MCrAlY (M=Ni, Co veya ikisi de) içerikli genel forma sahip 'bond coat' denilen metalik bağ kaplamadan ve kaplama işleminin sırasında, servis esnası boyunca bağ kaplamanın oksitlenmesiyle meydana gelip termal olarak büyüyen oksit bir tabakadan (TGO)' dan oluşmaktadır (Karaoğlanlı, 2012). Şekil 1.2' de çok katmanlı yapıya sahip olan TBC sisteminin 3 katmanlı işlevi görülmektedir (Minisker, 2009).



Şekil 1.2: Tipik bir termal bariyer kaplama sisteminde katmanlar (Minisker, 2009).

Üretimde kullanılan farklı termal sprej kaplama yöntemleri, TBC sistemlerinin performans özellikleri ve gelişimiyle alakalıdır. Seramik üst katmanın üretiminde çoğunlukla elektron ışını ile fiziksel buhar biriktirme prosesleri (EB-PVD) ya da plazma sprej (PS) kaplama kullanılırken, bağ kaplama üretiminde de yaygın olarak vakum plazma sprej (VPS), atmosferik plazma sprej (APS), yüksek hızlı oksijen yakıt püskürtme (HVOF) ve düşük basınçlı plazma sprej (LPPS) kaplama prosesleri kullanılmaktadır. Seçilen her ürün için elverişlilik ve uygunluk sağlayan bir proses olan PS kaplama prosesi, endüstriyel uygulama sahalarında oldukça tercih edilmektedir (Karaoğlanlı, 2012; Meşekıran, 2015). VPS metodu bağ kaplamanın metalik altlığa yapışmasında oldukça iyi bir performans sergileyerek, düşük gözenekliliğe sahip kaplama üretimini sağlamaktadır. Ancak bu metot diğer termal sprej kaplama metotlarıyla kıyaslandığında proses ve ekipmanlar açısından daha pahalıdır. Bu sebeple de bağ kaplama üretiminde çoğunlukla APS ve HVOF metotları tercih edilmektedir (Karaoğlanlı, 2012).

Kaplamaların mikro yapılarında görünen değişimler, kaplama sistemlerinin özellikleriyle ilişkilidir. EB-PVD metoduyla gerçekleştirilen kaplamaların mikro yapı analizlerinde ısı akısıyla aynı hızda ilerleyen kolon halinde yapılar gözlenirken, APS prosesiyle gerçekleştirilen kaplamalarda ısı akısına dik ve paralel hızda mikro boyutta çatlaklar ve küresel porlar gözlemlenmektedir. Mikro yapılarda gözlemlenen bu değişiklikler kaplamanın yapışma mukavemetini etkilediği gibi termal iletkenliğini, elastik modülünü, erozyon direncini ve sinterleme oranını da etkilemektedir (Minisker, 2009; Meşekıran, 2015).

Kaplama sisteminin hasara uğramadan devamlılığını sürdürmesi öncelikli olarak kaplama katmanlarının birbirine ve altlık malzemeye iyi yapışmasıyla sağlanmaktadır. Eğer yapışma

mukavemetinde performans düşüklüğü olursa, kaplama sisteminin hasara uğrama ihtimali artar ve bu da servis ömrünün kısılmasına sebebiyet verir. Buna yol açan temel etken, TGO tabakasının büyümesi ve bağ tabaka ile üst tabaka arasındaki yapışma mukavemetinin azalması olarak bilinmektedir. TBC sisteminin hasara uğrama ihtimalini artıran diğeri bir neden ise seramik kaplamanın ömrü boyunca yüksek sıcaklık atmosferine maruz kalarak sinterleşme etkisiyle mikroyapısında meydana gelen değışimleridir (Parlakyiğit, 2013).

## BÖLÜM 2

### LİTERATÜR ÖZETİ

#### 2.1 Termal Sprey Kaplamalar

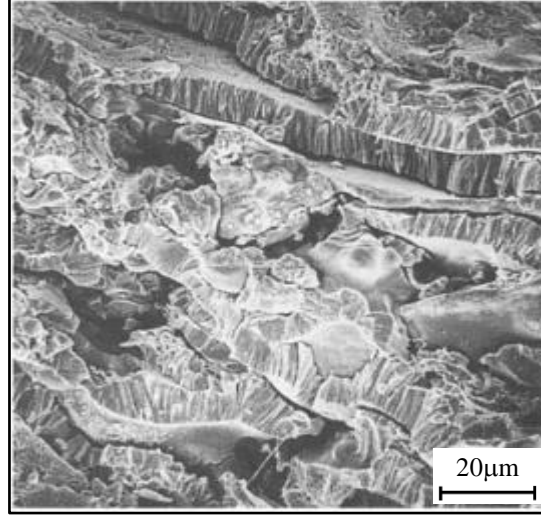
Termal sprej kaplama teknolojisini, ilk olarak sıvı kurşunu oyuncak bir top yüzeyine püskürten ve kurşunun bütün yüzeye yayılarak yapıştığını gören Dr. M. Schoop tarafından keşfedilip, sistemin püskürtme ekipmanları çalışma arkadaşlarıyla birlikte patentli olarak Almanya'ya satılmıştır. Daha sonraları 1920'li yıllarda başta Fransa olmak üzere Avrupa ülkelerine ve Amerika'ya satılmıştır. Şu an alev sprej yöntemi olarak bilinen ilk termal sprejin icadı 1910'de İsviçre'nin üniversitesinde gerçekleşmiştir. HVOF ise 1958'de G. H. Smith, J. E. Pelton, and R. C. Eschenbach taraflarından bulunarak patenti alınmıştır (Zağlı, 2010; Davis, 2014).

Termal sprej kaplama teknolojisi zamanla kaplama tozlarında yeniliklere gidilerek geliştirilmiş ve en hızlı büyüyen kullanım alanlarında yer edinmiştir. 1900'lü yıllardan günümüze kadar aşınma ve korozyon gibi etkilerin, ham maddelerin maliyetlerini artırmasıyla kullanıcıları malzemelerin daha iyi performans göstermelerine ve malzeme performansları için garantili kullanım ömrü talep etmelerine yönlendirmiştir. Bu da üreticileri daha teknolojik çalışmalara sevk etmiş ve kaplama yönteminde mono-multi sistemlere geçiş göstermesini sağlamıştır (Zağlı, 2010).

#### 2.2 Termal Sprej Kaplamaların Özellikleri

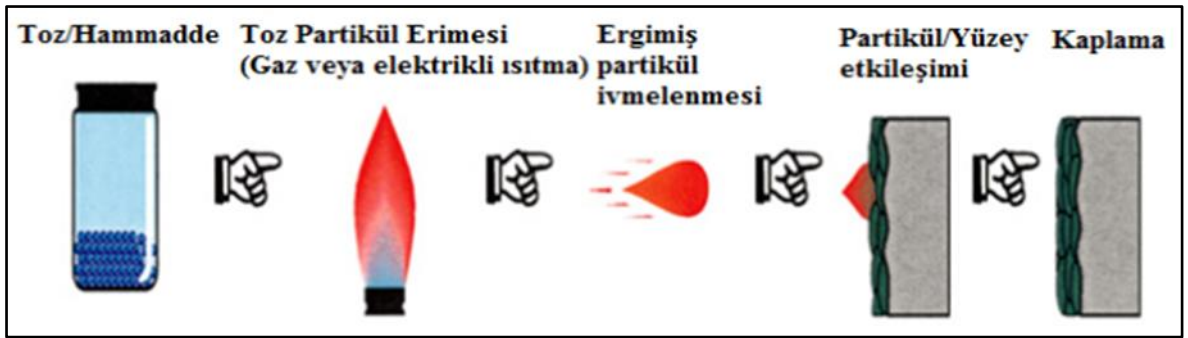
Termal sprej, metalik veya metal dışındaki kaplamaları gerçekleştirmek için uygulanan bir grup kaplama işlemidir. Bu işlemler; alev spreji, elektrik ark spreji ve plazma ark spreji olmak üzere üç temsili gruba ayrılır. Bu enerji kaynakları kaplama malzemesini tel, toz/çubuk biçiminde erimiş veya yarı erimiş bir halde ısıtmak için uygulanır. Elde edilen ısıtılmış parçacıklar alanı, işlem gazları veya atomizasyon jetleri ile önceden hazırlanmış bir yüzeye (altlık malzeme üzerine) doğru hızlı bir şekilde ilerler ve çarpıtılarak yüzey ile bir bağ oluşur. Yüzeyde hızla katılaştıran bu yapılar splat (yassı tanecik) şeklini alırlar. Birbiri üzerinde katılaştıran yapışan splatların sonucunda yüzeyde karakteristik lamelli bir kaplama

yapısı görülmektedir. Şekil 2.1' de yüksek bir katılaşma sonucu daha sonraki parçacıkların kalınlığına neden olduğu ve lamel bir yapı oluştuğu görülmektedir (Davis, 2014).



Şekil 2.1: Lameli mikroyapı gösterimi (Davis, 2014).

Termal sprej kaplamalar, erimiş/yarı erimiş partikülleri hazırlanmış altlığın yüzeyine doğru ilerletmek için proses jetleri kullanarak, kinetik enerjiyi verirken hammadde materyallerini eritmek için konsantre bir ısı kaynağı kullanılarak elde edilmektedir (Davis, 2014). Şekil 2.2' de termal sprej kaplama metodunun proses olarak gösterimi verilmiştir (Meşekıran, 2015).



Şekil 2.2: Termal sprej kaplama metodunun proses olarak gösterimi (Meşekıran, 2015).

Elektrolitik kaplamalardan farklı olarak termal sprej kaplama sistemlerinde üretim malzemenin parçacıklar halinde toplanması esasına dayanır (Karaoğlanlı, 2012). Termal sprej yöntemleri; düşük işletme maliyetleri, hemen hemen birçok endüstri alanında faydalı özelliklere sahip olmaları ve kullanımlarının kolaylık sağlaması nedeniyle çok sık tercih



edilmektedir. Yüksek biriktirme oranına sahip olmaları, bölgesel kaplamalara imkan vermeleri, bazı donanımların hareket edebilir olması, hızlarının, sıcaklıklarının ve atmosferik koşullarının çok geniş bir aralıkta ayarlanabilmesi gibi birçok özelliğe sahiptirler (Parlakyiğit, 2013).

Termal sprey işlemlerinin önemli avantajlarından biri, kaplama üretmek için kullanılacak çok çeşitli malzeme yelpazesine sahip olmasıdır. Neredeyse hiç ayrıştırma yapılmaksızın eriyen her bir malzeme kullanılmaktadır. İkinci önemli avantajı ise, çoğu termal püskürtme işleminin, önemli ısı girdisi olmaksızın alt tabakalara kaplama uygulamasının yapılabilmesidir. Bu sayede tungsten gibi çok yüksek erime noktalarına sahip olan malzemeler, parçanın özelliklerini değiştirmeden ve termal çarpımlara uğratmadan tamamen ısı ile işlenmiş kısımlara uygulanabilir. Diğer önemli avantajı da zarar görmüş veya hasarlı kaplamaları, çoğu durumda parçanın özelliklerini veya boyutlarını değiştirmeden, soyma ve yeniden kaplama yeteneği sağlamasıdır. Bunlara ilaveten bu yöntemin, işlemlerin görüş alanı niteliğinde olması bir dezavantajdır. Sadece, torcun veya tabancanın görebileceği kadar yeri kaplayabilirler ve bununla birlikte bir boyut sınırlamaları vardır. Geniş alanlara hitap etmesinden dolayı tabancanın sığmayacağı derin, çok küçük boşlukları kaplamak mümkün olmayabilir (Davis, 2014).

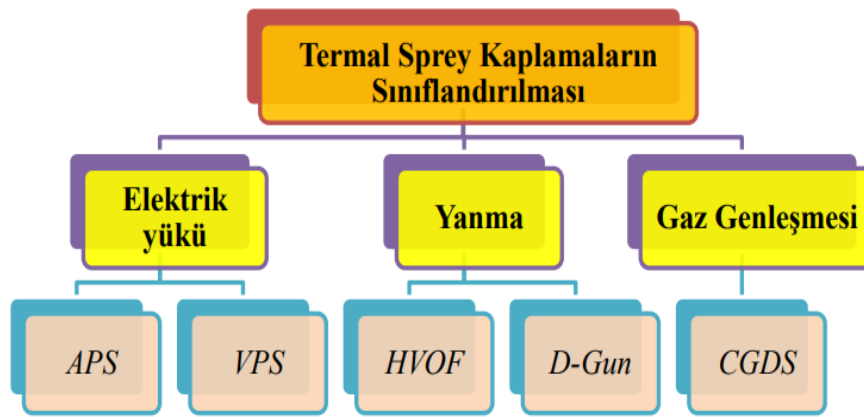
### **2.3 Termal Sprey Kaplama Çeşitleri**

Mühendislik-ekonomiklik açısından göz önünde tutulduğunda, uygulama amaçlarına ve istenilen verimle bağlantılı olarak kaplama üretmek için günümüzde farklı termal püskürtme yöntemlerinden yararlanılmaktadır. Bu püskürtme yöntemleri, işlem için gerekli olan termal ve kinetik enerjileri elde etme yöntemlerine göre sınıflandırılmaktadır. Bunların içinden HVOF, soğuk gaz dinamik sprey (CGDS), alev sprey, ark sprey, detonasyon ve PS prosesleri olarak bilinen altı termal püskürtme sistemi yaygın olarak göze çarpmaktadır (Zağlı, 2010).

Çoğunlukla alev sprey metotunda, kaplama malzemesine verilen kinetik enerji değeri elde edilmektedir. PS metotlarında yüksek sıcaklıklara ulaşılırken, HVOF ve detonasyon tabancası gibi metotlarda kaplama malzemesi ses hızının üzerinde hızlara ulaşmaktadır. Ergime noktası yüksek olan seramik gibi birçok malzemelerin yüzeyinin kaplanması yüksek sıcaklık oluşturmaktadır. Ses hızında yapılan kaplama uygulamaları yapısı karbüre benzeyen

birçok malzeme yüzeylerinin kaplanmasına olanak vermektedir. Kaplama malzemelerinin ergitilmesinde oksit yakıt, plazma veya ark gibi ısı kaynaklarından yararlanılmaktadır (Meşekıran, 2015).

Termal sprej kaplama yöntemlerini enerji kaynağının cinsine, kullanılan malzeme türüne ve prosesin gerçekleştiği atmosfere göre sınıflandırmakta mümkündür (Parlakıyıt, 2013). Şekil 2.3’ de termal sprej kaplamaların proses özelliklerine göre sınıflandırılması verilmiştir (Döleker, 2015).



Şekil 2.3: Termal sprej kaplamaların proses özelliklerine göre sınıflandırılması (Döleker, 2015).

Gerçekleştirilen bu çalışmada, gaz türbin motorlarında kullanılan TBC’ ler üzerinde durulması nedeniyle, çoğunlukla bu alandaki kaplamaların üretiminde kullanılan kaplama yöntemlerine ayrıntılı olarak değinilmiştir. Bu tekniklerin başında APS, HVOF ve CGDS gelmektedir. Tablo 2.1’ de termal sprej kaplama proseslerinin alev sıcaklığı-partikül hızı grafiği karşılaştırılarak verilmiştir. Görüldüğü üzere PS uygulaması en yüksek proses sıcaklığına, CGDS uygulaması da en yüksek partikül hızına sahiptir (Meşekıran, 2015).

Tablo 2.1: Termal sprey proseslerinin partikül hızı-alev sıcaklığı grafiği (Türkan, 2017).

Metot/Özellik	Metot Partikül Hızı (m/s)	Proses Sıcaklığı (°C)
CGDS	800-900	500-900
Alev-toz	30-200	2500-3000
Alev-tel	30-100	2500-3000
HVOF	700-800	2500-3000
Plasma-APS	200-300	15000
Plasma-VPS	200-300	15000
Ark sprey	50-150	3000

### 2.3.1 Plazma Sprey Kaplamalar

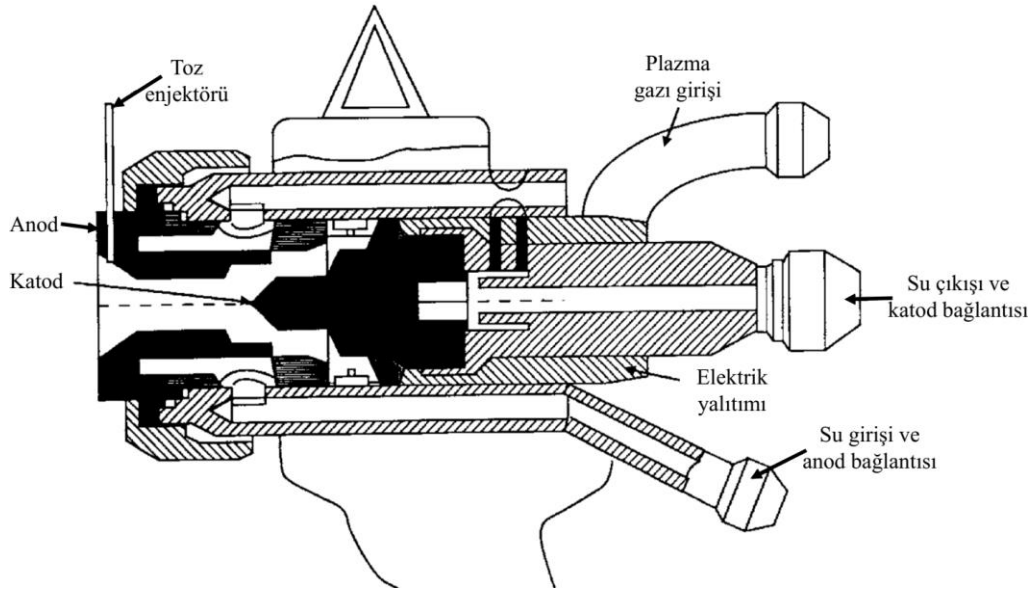
PS prosesi uçak ve uzay endüstrisinde, denizel ortamlarda kullanılan parçalarda, korozyon ve oksitlenme önleyiciliği sağlayan kaplamaların üretilmesinde kullanılmış ve başarılı bulunmuştur. Bu başarıdan sonra termal bariyer amacıyla gaz türbin kanatlarında veya uçaklarda kullanılmaya da başlanmıştır. Bu yöntem hızla kimya, petrol endüstrisi, kağıt, tekstil, enerji, elektrik, çelik üretimi, otomotiv gibi birçok alanda korozyon ve oksitlenme direncinin artırılması, termal bariyer, elektriksel direnç ve yalıtım, radyasyon yalıtımı, biyolojik uyumluluk gibi amaçlar için de kullanılmaya başlanmıştır (Minisker, 2009).

Günümüzde PS kaplamaların en yoğun ve etkili kullanım sahası termal bariyer amacıyla türbin parçaları olmuştur. PS kaplamada amaç ekonomik maliyetteki esas malzeme yüzeyine ince, değeri yüksek olmakla birlikte koruyuculuk sağlayan bir katman oluşturmaktır. Bu yöntem seçilen ürün tozunun erime sıcaklığından daha yüksek noktalarda oluşturulan plazma atmosferinde ergitilerek çok hızlı bir şekilde kaplanacak olan altlık malzeme üzerine püskürtülmesi esasına dayanır. Endüstride kullanılmasına olanak sağlayan bu proses sayesinde, yüksek çalışma sıcaklıklarında çok yaygın bir sahada malzemenin işlenmesiyle daha dayanıklı ve plastik olarak şekillendirilebilir bir malzeme elde edilir (Özgürlük, 2016).

PS kaplamaları gerçekleştirmek için yüksek sıcaklığa sahip plazma jetlerinden faydalanılmaktadır. Genellikle maddenin dördüncü statüsü olarak tanımlanan plazma, gaz konumundaki maddenin ısıtılarak ayrıldığı nötr atomlardan, pozitif iyonlardan ve serbest

elektronlardan oluşur. Ayrılma işlemi için yüksek enerjiye ihtiyaç vardır. Bu enerji elektriksel, ışık orijinli lazer ve termal olarak elde edilmektedir. Plazma, enerji ile gaz iyonize etmek için yeterli olana kadar elektron ve iyonların birbirinden bağımsız olarak hareket etmesini sağlayacak bir hale getirilerek üretilir. Plazma durumunun iletken olmasıyla, bir elektrik alan altında ivmelendirilerek hareketi kontrol edilebilmektedir (Zağlı, 2010; Davis, 2014).

Bir plazma, 40 kW gücünde olan plazma tabancası ile 15000 K sıcaklıkta oluşturulabilmektedir. Bu plazmanın çok yüksek sıcaklıklara erişebilmesiyle bilinen tüm malzemeler kolaylıkla istenilen şartlara göre ergitilebilmektedir. Geriye kalan sadece ergitilen malzemenin altlığa mekanik olarak bağlanması olduğundan, çoğu malzemeyi bu metotla kaplamak oldukça kolaydır. Şekil 2.4’ de kesiti alınmış bir plazma tabancası görülmektedir (Karaoğlanlı, 2012; Döleker, 2015).

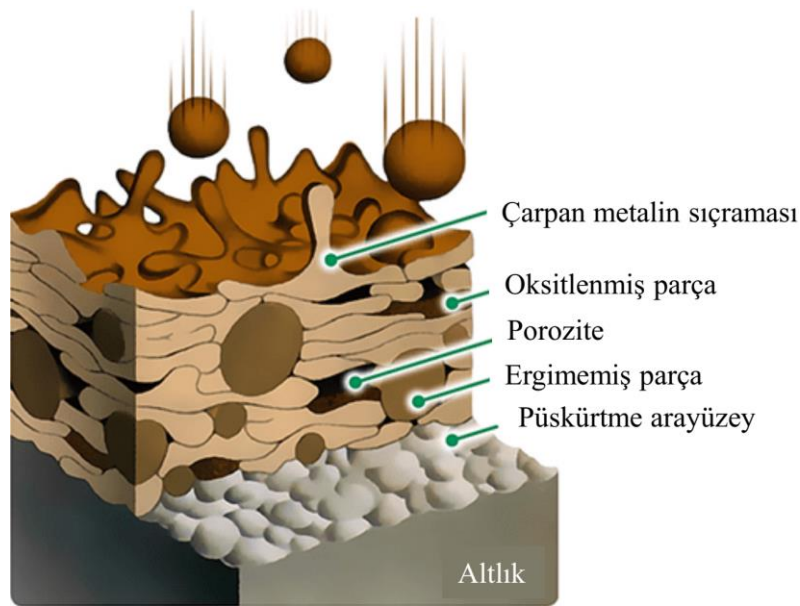


Şekil 2.4: Kesiti alınmış plazma tabancasının görünümü (Karaoğlanlı, 2012).

Plazma jeti şu şekilde oluşturulmaktadır: elektrik arkı üretmek için, tungsten katot ve bakır anot püskürtme nozulundan düz akım geçirilir. Birincil gaz olarak bilinen azot veya argon gibi gazlar, entalpi artışını sağlamak için hidrojen veya ısı iletkenliğini artırmak için helyum gibi ikincil gaz karıştırılır. Azot ve hidrojen gibi çift atomlu gazlar, argon ve helyum gibi tek atomlu gazlardan daha yüksek entalpi ve termal iletkenliğe sahiptirler. Oluşturulan bu karışım elektrik arkından geçirilerek ısıtılır, ayrıştırılır ve iyonize edilir. Böylece plazma

üretimi elde edilir. Plazma jeti istenilen enerjiye sahip olduğunda sıcaklığın en iyi seviyede olduğu püskürtme nozulu çıkışında sıcaklık 25000-28000 °C aralıklarında görülmektedir. Tozun plazmanın en sıcak bölgesine ulaşmasını sağlamak için içerden plazmaya veya dışarıdan nozul çıkışına çok yakın bir yerden toz beslemesi yapılır. Boyutları 20-90 µm civarında olan besleme tozları plazmanın termal enerjisiyle eriyerek yüzeyde biriktirmek üzere altlığa püskürtülür ve çok ani bir şekilde soğuma sağlayarak katılışır. Soğuma hızları Ni bazlı alaşımlarda 107 K/s düzeyinde rakamlara ulaşabilmektedir. Tabancayla altlık arası uzaklık paso esnasında standart olarak 60-130 mm aralığında, spreyci tabancası hareket hızı ise 50-2000 mm/s aralığında değişiklik göstermektedir (Karaoğlanlı, 2012).

PS kaplamalarda, kaplamanın uygulanmasından önce seçilen altlık malzeme yüzeyinin pürüzlendirme işlemi gerçekleştirilerek bağlanma dayanıklılığının artırılması gerekmektedir. Kaplanacak yüzeye hızla püskürtülerek yüzeye çarptırılan ergitilmiş partiküller soğuyarak katılışmaktadır. Bu ergimiş olan parçacıkların katılıştığı an, altlık malzeme yüzeyinde biriken parçacıklarda gerilme oluşmaktadır. Bunun sayesinde de, bu kesimlerde yüzeye çarparak biriken parçacıklar yüzeye yapışma performansı sergilemektedir (Kahraman, 2000). Şekil 2.5’ de PS ile kaplanması yapılan bir malzemenin görünümünü verilmektedir (URL-1, 2019).



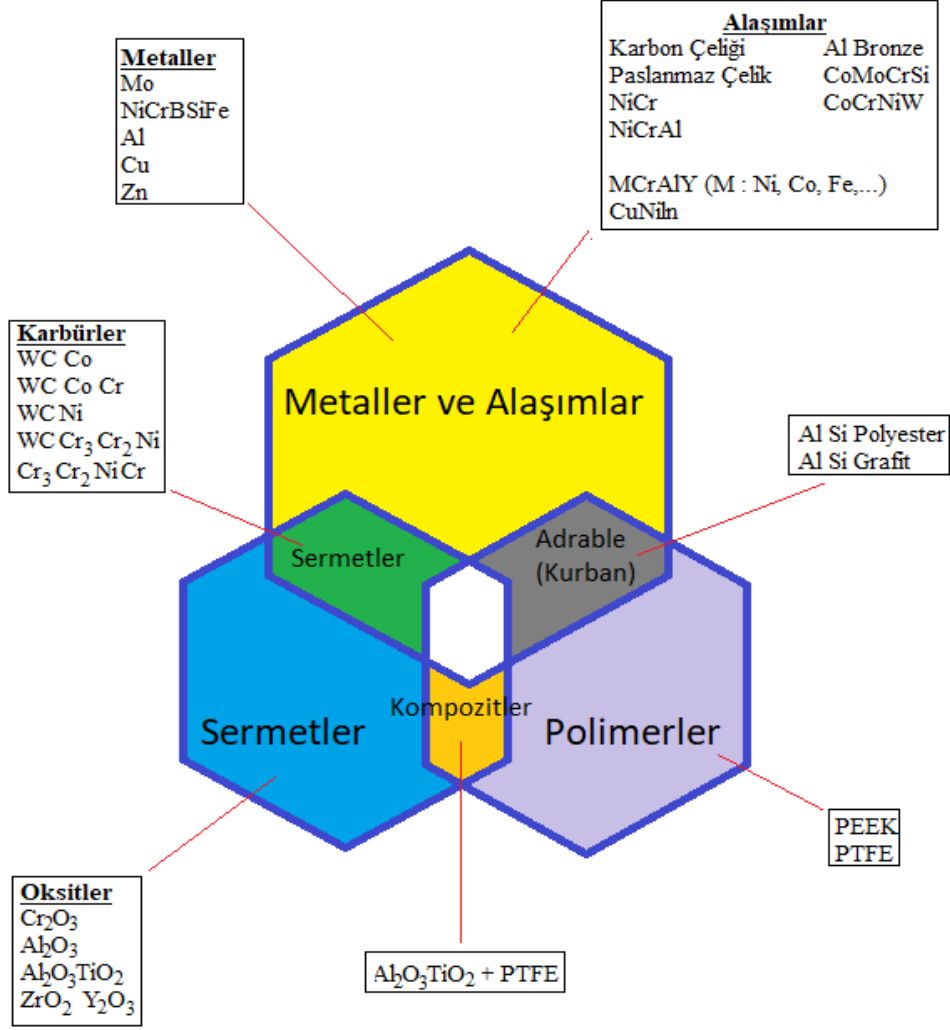
Şekil 2.5: PS ile kaplanması yapılmış malzemenin görünümü (URL-1, 2019).

PS kaplamaların mikro yapısı ve özellikleri birçok değişkenden etkilenmektedir. Bu değişkenler sadece kullanılan malzeme ve onun özellikleriyle sınırlı kalmayıp aynı zamanda prosesin değişkenlerine ve yöntemine bağlıdır. Birbirinden bağımsız olmayan bu değişkenler birbirleriyle etkileşim içerisindedir. Tablo 2.2’ de bir PS prosesini etkileyen değişkenler sınıflandırılmıştır (Parlakıyığıt, 2013).

Tablo 2.2: Bir plazma sprey prosesini etkileyen değişkenler (Parlakıyığıt, 2013).

<b>Plazma Karakteristiği</b>	Güç kaynağı
	Plazma gazı
	Plazma gazı akış hızı
	Soğutma
	Soğutma gazının akış hızı
	Tabanca geometrisi
<b>Toz Besleme</b>	Toz fraksiyonu ve şekli
	Toz malzemenin termal özellikleri
	Taşıyıcı gaz akış hızı
	Besleme geometrisi
<b>Plazma Jeti</b>	Jet hızı ve sıcaklığı
	Parçacık hız ve sıcaklığı
	Parçacık yörüngesi
<b>Parçacık Çarpması</b>	Parçacık çarpma hızı
	Parçacık çarpma açısı
	Çarpma anında parçacığın ergime durumu
	Altlık malzeme tipi
	Altlık malzemenin sıcaklığı ve yüzey

PS yönteminde seramikler (alümina, zirkonya vs.), sermetler, karbürler (tungsten karbür, krom karbür, vs.) ve süper alaşımlar, bronzlar, paslanmaz ve karbon çelikleri gibi toz alaşımları kullanılmaktadır. Bu metot genelde roket nozulları, pistonlar, segmanlar, türbin kanatları, krank milleri, yanma odaları, vb. gibi uygulama alanlarında tercih edilmektedir (Pawlowski, 2008; Meşekıran, 2015). Şekil 2.6’ da PS sisteminde kullanılabilecek tozlar görülmektedir (Türkan, 2017). Endüstride sık kullanılan iki çeşit PS kaplama yöntemi vardır. Bunlar APS ve VPS olarak isimlendirilen yöntemlerdir.



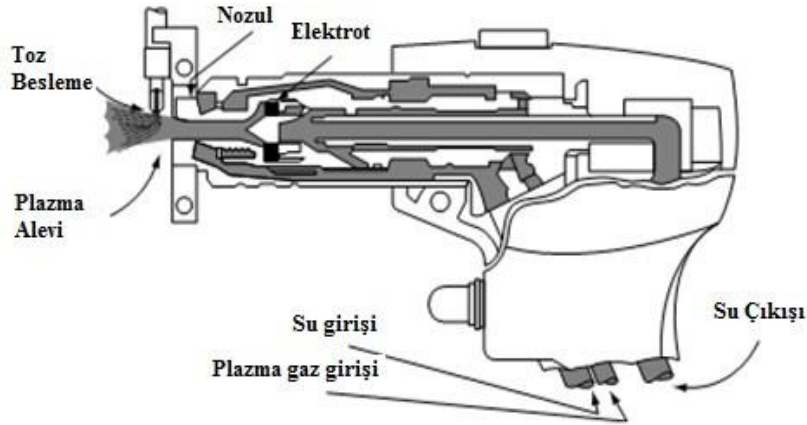
Şekil 2.6: Termal spray kaplama sistemlerinde kullanılan toz kompozisyonları (Türkan, 2017).

### 2.3.1.1 Atmosferik Plazma Sprey Kaplama Prosesi

APS seramiklerin ve metallerin yüzeylerinin kaplanmasında çoğunlukla kullanılan bir yöntemdir. Kaplama prosesi atmosfere açık ortamda gerçekleştirilir. APS olarak adlandırılmasının sebebi işlem esnasında spray tabancasından altlık malzeme üzerine doğru iletim hareketinin havada olmasıdır. Bu yöntem açık hava atmosferinde uygulandığından dolayı diğer plazma proseslerine göre daha ekonomiktir. Açık hava atmosferinde gerçekleştirilmesi sebebiyle üfleçten çıkan spray partikülleri kaplanacak malzemeye ulaşana kadar havayla temas halinde olduğundan çevre ile reaksiyona girer. APS uygulama esnasında, ergimiş parçacıklar püskürtülmesi süresince havaya maruz kaldığından kaplama

malzemesi ciddi boyutta oksitlenir. Oksidasyon sorunu nedeniyle çoğunlukla oksidasyona direniş sergileyen kaplama malzemelerinin ve seramiklerin püskürtülme işleminde değerlendirilmektedir (Özgürlük, 2016).

Başka bir deyişle, bu metotta kullanılan plazma jeti toz halindeki kaplama hammaddesini eritir. Plazma genel olarak birer atıl gaz olan argon ya da helyum ile oluşturulur. PS uygulamasında ısı kaynağı olarak, iyonize atıl gazın gizli ısısı kullanılmaktadır. Bu prosesin plazma oluşumunda atıl gaz olarak en yoğun tercih edilen argon gazıdır. Argon gazı nozul boyunca elektrotlar arası akmaktadır. Argon gazıyla oluşturulan plazma için, 800 ile 1000 amper gibi yüksek miktarda akıma gerek duyulmaktadır. Yüksek ergime noktalı malzemelerin eritilmesi çok yüksek hızlarda mümkün olduğundan, hidrojen ikincil gaz olarak hızlandırma amacıyla kullanılmaktadır. Kullanılan ikincil gaz hidrojen, daha yüksek plazma sıcaklığına ve daha yüksek entalpiye ulaşılır (Döleker, 2015).



Şekil 2.7: Plazma sprej tabancası iç şeması (Bose, 2007).

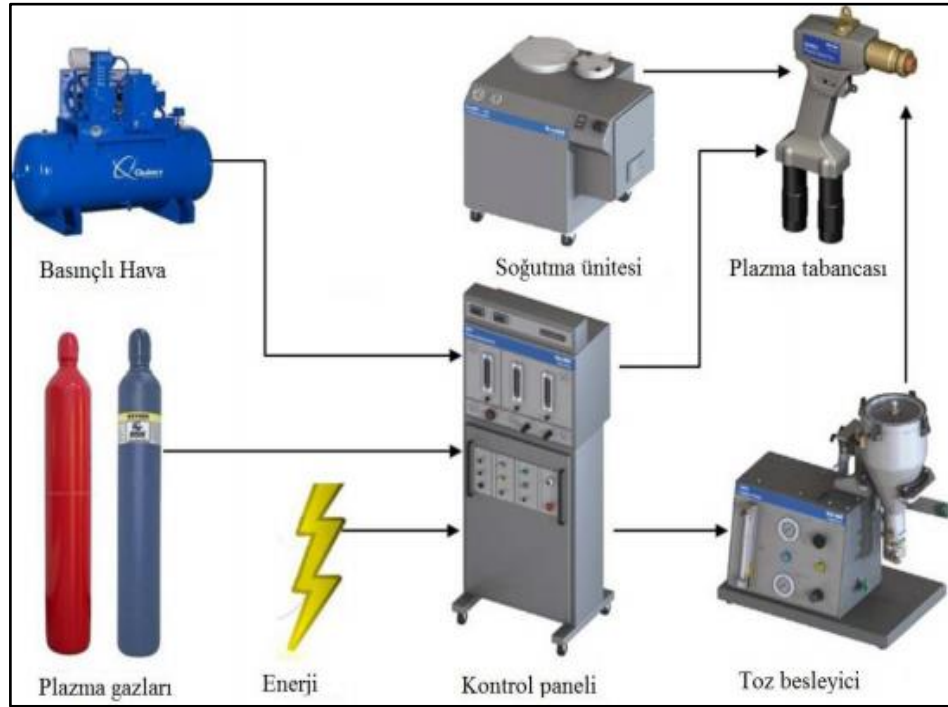
Tipik bir plazma tabancasının iç detayları Şekil 2.7' de verilmiştir. Çubuk tipi bakır katot (negatif kutup) ile tabanca eksenini boyunca konumlandırılmış toryumlu tungsten ucu ve su soğutmalı bakır anot (pozitif kutup) arasında elektriksel ark oluşturulur. Toryumlu tungsten uç kullanımı katodun aşınmasını güçleştirmektedir (Bose, 2007).

Prosesten kaynaklanan kaplamanın oksitlenme meselesi daha fail olarak VPS' de elimine edilebilmektedir. İnert gaz ortamında gerçekleştirilen PS prosesinde; bir koruyucu oluşturabilmek adına plazma alevini saran inert gaz enjekte edilmektedir. Oluşturulan bu koruyucu, havanın ergimiş parçacıklara ulaşmasını engeller. Vakum ortamında PS



metotunda olduğu gibi prosesi havadan izole bir ortamda yürütmek, oksitlenmeyi kaldırmak için daha iyi bir metottur (Parlakıyıt, 2013).

PS kaplama sistemi; gaz ve güç ünitesi, plazma alevinin oluşturulduğu plazma tabancası, tabancaya uygun miktarda tozun sürekli ve sabit bir hızda iletilmesini sağlayan toz besleme ünitesi, tabancanın soğutulmasını gerçekleştiren soğutma ve püskürtme ünitesi, plazma gazları ve akımın ayarlandığı kontrol ünitesi bölümlerinden oluşmaktadır. Ekseriyetle bu proste, püskürtme hızı 0.46 kg/sa ile 13 kg/sa aralığında değişiklik göstermektedir. Kullanılan ekipmanların çeşidi ve değişebilen tozlar sebebiyle bu değer aralıklarında değişim görülmektedir. Şekil 2.8' de plazma sprej kaplama sisteminin ekipmanları gösterilmektedir (Gök, 2015; Meşekıran, 2015).



Şekil 2.8: Plazma sprej kaplama sistemi (Gök, 2015).

İnce kaplama tozlarının, taşıyıcı gaz atmosferinde plazma jetine enjekte edilerek ısıtılıp, hızlandırılmasıyla kaplama işlemi gerçekleştirilmektedir. Yassı halde ve çok hızlı şekilde birbiri üzerinde katılarak, yüksek hızlı ergimiş/yarı ergimiş olan splatlar yarı kararlı ya da camsı fazda altlık yüzeye biriktirmektedir. Üst üste altlık üzerinde birikmesiyle, her biri yassı tabakalı olan milyonlarca partikül kaplama yapısını meydana getirmektedir. Partiküllerin birbirine bağlanıp kalınlaşarak oluşturduğu, ortalama %30 porozite içeren

lamellerden kaplama yapısı meydana gelmektedir. Plazma jetinde sıcaklık oranı ortalama 15000 K ve bu değerin üstüne ulaştığından metal, seramik, sermet gibi malzeme gruplarını kaplama olarak biriktirmek mümkündür (Döleker, 2015).

Plazmanın, ergiyik veya yarı ergiyik biçime getirilen kaplama tozunun taşıyıcı gazlar sayesinde üst kısımdan beslenmesinde oluşan gazın debisi oldukça önemlidir. Eğer gaz debisi fazla ise plazma çok beslenmiş olur ve partiküller ergiyemez. Gaz debisinin az olması halinde de toz plazma içerisine gönderilemez ve plazma beslenemez. Bu da prosesin veriminin azalacağını ve sağlıklı işleyiş olmayacağını gösterir (AWS Committee, 1997; Meşekıran, 2015).

APS prosesinde, altlığa gönderilen parçacıkların büyük bir çoğunluğu altlığa yapışmaktadır. Yapışan parçacık miktarının, altlığa püskürtülen toz miktarına olan oranıyla yüksek verimli kaplama işlemi elde edilmektedir. Bu verim biriktirme mekanizması parçacıkların eritilmesine bağlıdır. APS prosesinde parçacıkların yüzeyden ayrılması ve yapışmadan geri sekmesi gibi problemler oluşmamaktadır. Bunun sebebi altlığa gönderilen parçacıkların erimiş olmasıdır. Örneğin içeriği CoNiCrAlY olan ve üretimi yapılan bir kaplamada HVOF ve APS prosesleri kıyaslandığında, APS' de verim oranının %60, HVOF' ta ise bu oranının %45 olduğu görülmektedir. APS prosesi, açık hava atmosferinde olmasıyla birlikte, işlem sıcaklığının yüksekliği sebebiyle kaplama işlemi sırasında gerçekleşen oksit kalıntılara karşı en duyarlı kaplama işlemidir. Bu yüzden seramik parçacıklardan üretilen kaplamalarda kullanılması daha uygundur. Yüksek poroziteye sahip kaplamaların da üretimine imkan sağlayan APS prosesinde genellikle porozite oranı %1-7 arasındayken yapışma mukavemeti 15 ile 25 MPa arasında değişmektedir (Karaoğlanlı, 2012).

APS, düşük termal iletkenliğe sahip olan seramik malzemelerin kaplanmasında en sık tercih edilen yöntemlerden biridir. Gaz türbinlerinin yanma odaları ve palelerinde kullanılan metalik malzemelere TBC uygulanırken çoğunlukla APS tercih edilir. Kaplamaların kalınlığı ise 300 ile 1500 µm arasında değişmektedir (Dokur, 2014; Gök, 2015).

PS kaplama prosesinin sağladığı en önemli avantajlarından biri, birbirinden bağımsız olan kaplanacak malzeme ile altlık malzeme seçiminin yapılabilmesi bir diğeri de uygulama sırasında su ve koruyucu gaz kullanılmasıdır. Bu soğutma işlemi sayesinde malzeme

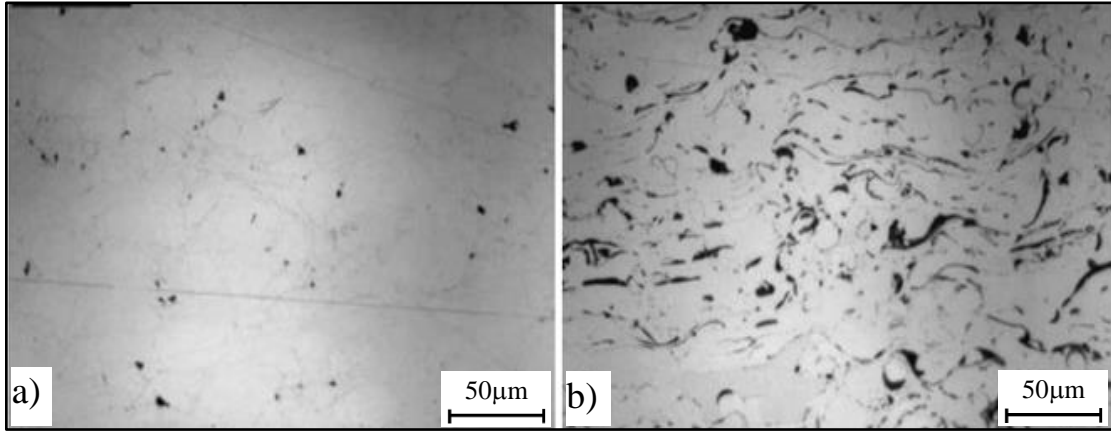
sıcaklığı 200 °C' nin üstüne çıkmamaktadır. Böylece şekil değişimi olmamakta ve kaplanacak malzemelerin mikro yapıları aynı kalmaktadır (AWS Committee, 1997; Meşekıran, 2015). Fakat soğutma işlemi sırasında termal kalıntı gerilmelerden kaynaklanan kaplama yüzeyine dik çatlaklar meydana gelmektedir. TBC' lerde APS prosesiyle yapılan kaplamaların mikroyapıları proses parametrelerine bağlıdır ve kusurlar kaplamanın karakteristik özelliğidir. Yapıdaki gözenekler ve paralel çatlaklar kaplamaya düşük termal iletkenlik avantajı sağlamaktadır. Kaplama yüzeyine dik çatlaklar uygun boşluklar oluşturarak kaplamanın genişmesini sağlayarak termal şok dayanımında bir avantaj oluştururken mekanik dayanım için dezavantaj sergilemektedir (Gök, 2015).

### **2.3.1.2 Vakum Plazma Sprey Kaplama Prosesi**

E. Muehlberger 1970' li yılların başında ilk defa VPS kullanımıyla ilgili çalışmaları başlatmıştır. Bu yöntem aynı zamanda düşük basınçlı plazma sprej olarak da bilinir (Davis, 2014).

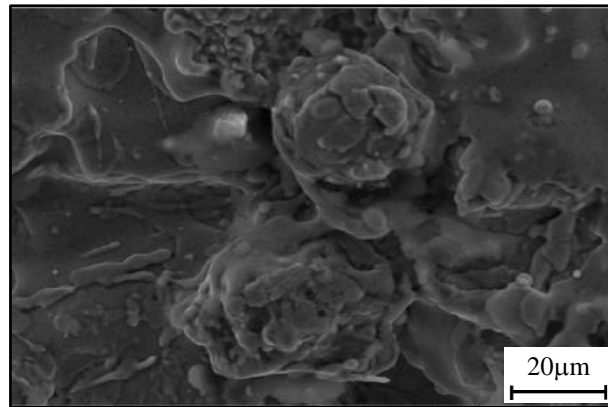
Eğer PS işlemi vakum veya düşük basınç altında gerçekleştiriliyorsa bu LPPS ya da VPS olarak isimlendirilir. VPS etkili bir kaplama yöntemidir. Çünkü genelde diğer kaplama işlemlerine göre daha yüksek bir çökelme oranına sahip olmakla birlikte, geniş bir alanda kalın kaplamalar imkanı sağlamaktadır (Bengi, 2009; Karaoğlanlı, 2012; Yoo, vd., 2016). Türbin kanat profili kaplamalarının ticari başarıya ulaşmasında VPS tekniğinin etkisi olmuştur (Davis, 2004). Bu teknik sayesinde daha yoğun ve yüzeye daha kolay yapışan kaplamaların biriktirilmesi sağlanmaktadır (Adams, vd., 2018). VPS, sıcak korozyona direnç sağlamak amacıyla özellikle gaz türbinlerinde tercih edilmektedir. Buna ilave olarak da daha basit hazırlık prosedürleri gerektirir. Bu yöntemin kazandırdığı en önemli üstünlüklerden birisi oksit içermeyen kaplamaların elde edilmesidir. Bir diğeri ise kapalı ortamda olarak sağlayarak, oluşan zararlı gaz ve malzemelerin kontrol altına alınmasıdır. Uygulama vakum altında yapılmasıyla gözenek oranlarının yüksek miktarda olmamasına olanak sağlamaktadır. Bunun sebebi spreje direnç gösterecek bir gaz bulunmamasıdır. Bunların yanında yöntem ve ekipmanların APS ile karşılaştırılmasıyla daha pahalı olması uygulama için bir dezavantajdır (Bengi, 2009; Karaoğlanlı, 2012; Yoo, vd., 2016).

Şekil 2.9' da APS ve VPS prosesleri ile üretilen CoNiCrAlY içerikli bağ kaplamaların kesit görüntüsü gösterilmektedir. Şekilde de APS prosesinin VPS prosesine göre daha yoğun bir şekilde oksitlenmeye elverişli kaplama olduğu görülmektedir. VPS yönteminde de neredeyse hiç oksit içermeyen ve tamamen yoğun bir kaplama yapısı oluştuğu görülmektedir (Scrivani, vd., 2003; Karaoğlanlı, 2012).



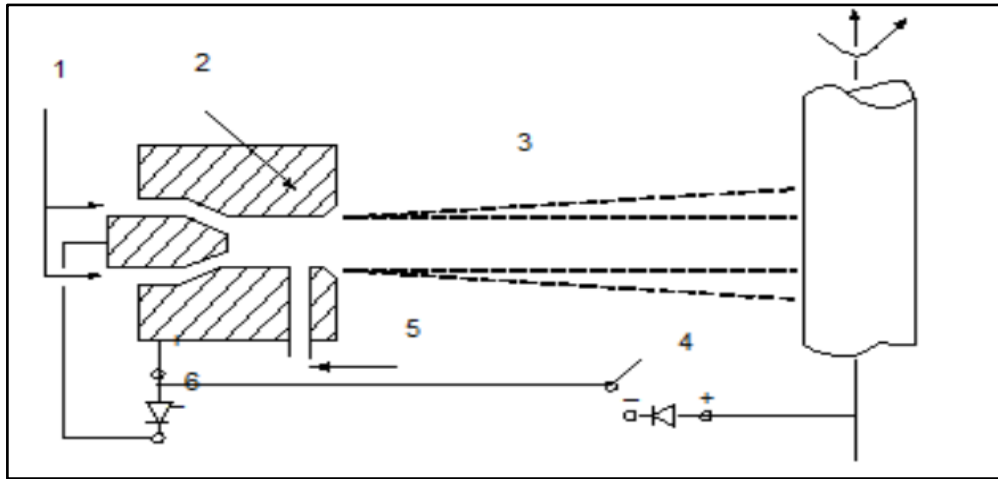
Şekil 2.9: (a) VPS metoduyla püskürtülen CoNiCrAlY bağ kaplama (b) APS prosesiyle püskürtülen CoNiCrAlY bağ kaplama (Scrivani, vd., 2003).

VPS, yaklaşık 10-50 mikron boyutlarda olan seramik veya metal tozunun, bir kaplama oluşturmak için erimiş damlacıkları bir altlık üzerinde yüksek hızda eriten ve aktaran bir sıcak gaz plazmasına enjekte edilmesiyle oluşmaktadır (URL-2, 2019). Şekil 2.10' da LPPS kaplamanın püskürtme koşulundaki yüzey morfolojisi görülmektedir.



Şekil 2.10: LPPS kaplamanın püskürtme koşulundaki yüzey morfolojisi, 3.00 kx büyütmede SEM görüntüsü (Bonadei ve Marrocco, 2014).

Basit bir VPS sistemini oluşturan unsurlar; plazma torcu, nozul, elektrik ark üretici ve çalışma gazları sağlayıcısıdır. Vakum kapsamında tozların sıcak gaz plazma jetine iletilmesiyle uygulanan bu kaplama işlemindeki unsurlardan biri olan ark negatif kutup (-), kaplanması sağlanacak yüzeyin altlık malzemesi de pozitif kutuptur (+). İlk olarak kaplanması sağlanacak yüzeyin altlık malzemesi arkın negatif kutuplanmasıyla ivmelenerek temizlenip ısınırken, altlık malzemenin pozitif kutuplanmasıyla da altlık malzemenin yüzeyinin ısıtılması sağlanır. Kaplama üretiminin gerçekleştirilmesi, tozların vakum ortamında plazma jetine enjekte edilmesiyle sağlanır (Pawloski, 2008; Dorfman, 2012; Döleker, 2015). VPS kaplama sisteminin şematik biçimde gösterimi Şekil 2.11’ de verilmiştir (Pawloski, 2008).



Şekil 2.11: Vakum plazma sprej prosesinin şema olarak görünümü; 1) çalışma gazları girişi, 2) anod, 3) vakum çemberi, 4) ark üretici, 5) toz giriş kısmı, 6) plazma üretici (Pawloski, 2008).

Spreye yapışan parçacıkların en mühim özelliği yüksek kinetik enerjilerinin olmasıdır. Bu yüksek kinetik enerjili partiküller sayesinde kaplanacak olan malzemenin yüzeyi düşük poroziteli olacaktır ve oksitlenmeden de en düşük seviyede etkilenecektir (Dorfman, 2012).

### 2.3.2 Yüksek Hızlı Oksi - Alev Yakıt Püskürtme Prosesi

Termal sprej kaplama yöntemlerinin en önemlilerinden bir tanesi olan HVOF, 1980’ de detonasyon tabancalı sprej kaplama prosesine ilave olarak keşfedilmiş ve günümüze kadar ilerleme sağlamıştır (Meşekıran, 2015). HVOF, termal sprej kaplama çeşitlerinden biri olup,

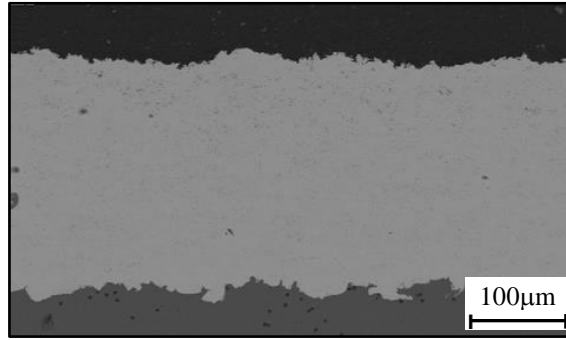
diğer termal püskürtme yöntemlerinin çoğundan daha düşük gözeneklilik, daha yüksek sertlik, üstün bağlanma mukavemetine sahip kaplamalar üretebilmektedir (Manesh, vd., 2010).

Bu kaplama yönteminde gerekli olan enerji seçilen bir yakıtın (hidrojen, propan, asetilen, doğal gaz vs.) yanması yoluyla elde edilmektedir. Oksijen ve yakıt karışımı yanma odasında yüksek basınç altında tutuşturularak genişler ve yüksek hızlarda nozuldan çıkarlar. Bu sayede oluşturulan sürekli alev içerisine gönderilen tozların altlık malzeme üzerine püskürtülmesiyle ergimiş, yarı ergimiş veya yumuşamış biçimde tozların biriktirilmesi sağlanır. Püskürtülen partiküller altlıkla temas esnasında plastik deformasyona uğrarlar. Nozuldan çıkan gaz akışının hızı 1825 m/s gibi yüksek hızlara kadar çıkmaktadır. Gelişimi devam eden dâhili yanma jeti sayesinde de bu hız 2100 m/s' ye ulaşabilmektedir. Yüksek gaz hızları sayesinde partikül hızları 400 ile 800 m/s arasında değişmektedir. Partiküller 3000-5500 K civarındaki yüksek alev sıcaklığının etkisiyle termal enerji kazanırlar. Alevin akış hızının yüksek olması sebebiyle kinetik enerjilerinde de artış sağlanmaktadır. Artan bu yüksek kinetik enerji HVOF tekniğinde çok yoğun kaplama üretiminin gerçekleştirilmesini sağlamaktadır (Karaoğlanlı, 2012; Galedari, vd., 2017; Döleker, 2018).

HVOF püskürtme, yoğun bir mikro yapıya ve nispeten düşük oksijen içeriğine sahip oksidasyona dirençli alaşımların kaplamasına olanak sağlamıştır (Gavendová, vd., 2016). HVOF kaplamalar, APS kaplamalara göre daha iyi bir korozyon direnci göstermektedir. Ayrıca işletme maliyeti olarak da APS işlemine kıyasla nispeten düşüktür. Düşük gözenekliliğe sahip metalik bağ kaplamaların üretilmesinde HVOF kaplama yöntemi tercih edilir. Çünkü bu işlemde oluşturulan yüksek hız sayesinde parçacıklardan yoğun ve yapışkan kaplamalar elde edilir. Fakat HVOF tekniği yüksek sıcaklıklar gerektirdiği için püskürtme işlemi esnasında oksitleyici bir ortamın oluşmasına imkan verir. Bağ kaplamalarda genellikle tercih edilen bu teknikte bağ katının oksidasyonu, TGO oluşması ile sonuçlanmaktadır (Planche, vd., 2002; Karaoğlanlı, vd., 2013; Myoung, vd., 2014).

HVOF yönteminde, altlık malzemedede yoğun bir kaplama mikroyapısı elde edilmesindeki bir diğer etken de, parçacıkların ses hızına yakın hızlarda püskürtülmesiyle hava ile temasının daha kısa süreli olmasıdır (Parlakyiğit, vd., 2014). Bu yöntem porozite ve oksit miktarı az olan yoğun kaplama üretimine imkan sağlaması sebebiyle TBC sistemlerinde bağ kaplama üretiminde genellikle tercih edilen tekniklerden biridir (Döleker, 2018). HVOF tekniği ile

hemen hemen tüm metalik malzemelerin, sermetlerin ve düşük ergime sıcaklığına sahip seramik malzemelerin kaplanması mümkündür fakat prosesin sıcaklığını sınırlayacağından dolayı seramik malzemelerin kaplanması pek önerilmemektedir (Ghadami ve Aghdam, 2019). Şekil 2.12’ de HVOF tekniği ile üretilmiş CoNiCrAlY içerikli bağ kaplamaya ait SEM görüntüsü bulunmaktadır. Richer ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmalarda, mikroyapıda çatlak olmayan ve minimum gözenekliliğe sahip kaplamalar üretilmiştir (Richer vd., 2010).



Şekil 2.12: HVOF CoNiCrAlY içerikli bağ kaplamaya ait SEM görüntüsü (Richer vd., 2010).

HVOF prosesinin sağladığı üstün performanslara rağmen bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bu yöntemde yüksek sıcaklıklar sebebiyle bazı durumlarda ana malzemenin kimyasal olarak kompozisyonunda değişim olmakta, termal biçim bozukluklarına neden olmakta ve bu sebeple kaplanacak olan ince malzemeler ve plastik gibi çabuk eriyen malzemelerin kaplama işlemi olanaksızlaşmaktadır (Özgürlük, 2016).

### 2.3.3 Soğuk Gaz Dinamik Sprey Kaplama Prosesi

1980’ li senelerde Rusya Akademi Bilimlerinden Dr. Antolli Papyrin ve meslektaşları tarafından ortaya çıkarılıp kanıtlanmış, termal sprej kaplama ailesinin son üyesi olan soğuk gaz dinamik sprej (CGDS) prosesinin 1994 senesinde Alkhimov tarafından ilk kez patenti alınmıştır. CGDS prensip olarak diğer termal sprej metotlarla aynı olmasına rağmen, partikül hızlarının artması ve partikül sıcaklıklarının azalmasıyla farklılık göstermektedir (Champagne, 2007; Zağlı, 2010).

Katı parçacıkların düşük sıcaklıklarda ve ses üstü hıza sahip "inert" gaz akımı ile 300-1200 m/s aralığında yüksek hızlara ivmelendirilerek uygun bir altlık malzemeye püskürtülmesiyle kaplama yöntemi uygulanır (Karaoğlanlı, 2012). Sistem, metalik tozların çok yüksek hızlarda inert gaz etkisiyle ergime olmaksızın ivmelendirilip püskürtülmesinden oluşmaktadır (Altuncu ve Üstel, 2017). Böylece CGDS prosesinde bağ kaplamanın üretiminde kullanılan enerji termal enerjiden ziyade kinetik enerjidir. Yani katı parçacıkların hareket özelliklerini, itici gaz akışı içindeki kinetik enerji ve parçacıkların kinematik davranışları belirlemektedir (Khanna ve Rathod, 2015; Raoelisona vd., 2018).

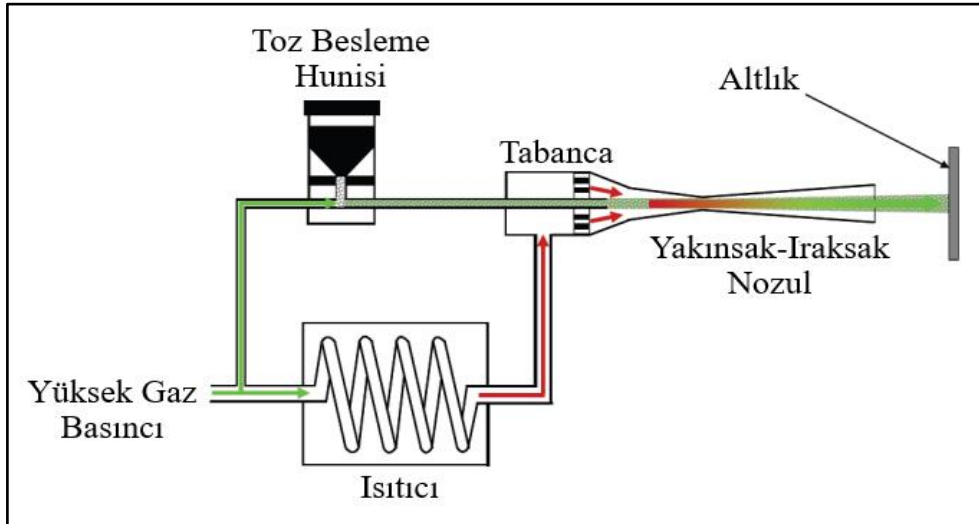
Plastik deformasyonun verdiği etki ile partiküller ergitilmeden yüksek hızlarda altlık üzerine çarparak birikme yapar ve böylelikle yoğun kaplama tabakası oluşur (Döleker, 2015). Altlık üzerine çarpan partiküller (5-42 µm çap), süpersonik bir akışla itilir ve alt tabakayı etkilemesiyle ağır plastik deformasyona uğrarlar. Plastik deformasyona uğrayan bu partiküller alt katman üzerine çökelerler (Khanna ve Rathod, 2015). Daha düşük sıcaklıklarda çalışan CGDS kaplamada helyum veya azot gibi inert gazlar kullanır ve bu taşıyıcı gazlar 700 °C gibi sıcaklıklara kadar bir ön ısıtmadan geçirilir. Böylelikle ön ısıtma sayesinde yüksek hızlara çıkan gazlar dolaylı olarak parçacıkların kinetik enerjisini artırmaktadır. Bu da çökme sırasında oksidasyon ve tanecik büyümesini engeller (Karaoğlanlı 2012; Khanna ve Rathod, 2015).

Temel olarak CGDS prosesinde toz partikülleri ve enerji depolarını ileriye sürüklemek için yüksek basınçlı gaz (yaklaşık 500 psi [3.5 MPa]) sistemleri kullanılmaktadır. Şekil 2.13' de görüldüğü gibi ısıtılan gaz yakınsak ve ıraksak nozula gönderilir. Özel larva tipinde tasarlanmış nozullardan gazla karışık parçacıklar ısısız bir gaz sistemi yoluyla ses üstü hızlara çıkmaktadır. Bu sayede toz partikülleri, çok yüksek (500-1500 m/s) hızlarda hareket edebilmekte ve HVOF prosesinde olduğu gibi şok dalgaları oluşmamaktadır. Genel olarak sprej mesafesi 5-25 mm aralığında değişkenlik göstermektedir. Nozula yatay ya da dikey olarak enjekte edilen taşıyıcı gaz ve partikülleri, nozul içinde karışarak aniden genişmekte ve ivmelenmektedir. Tabanca içinde meydana gelen ani genişmeden dolayı gazların sıcaklıkları, partiküllere ısı aktarımını tam sağlayamadığından hızla düşmekte ve böylece gazın termal enerjisinin kinetik enerjiye çevrilmesi sayesinde ses üstü hızlara ulaşılmaktadır. Hızları da artırılan toz partikülleri belirlenmiş sıcaklık ve kritik hızı aştığında altlık üzerine çarpmasıyla deforme olup birbirlerine bağlanmasıyla birikme oranlarında artış gözlemlenir



ve kaplamalar oluşur. Eğer toz partikülleri kritik hız değerlerinin altında kalırsa altlık malzemeye yapışmadan geri sekme yaparlar ve altlıkta erozyon oluşumuna sebep olurlar. CGDS kaplamalarda, atomik difüzyonla karşılaşılmasına sebep partikül sıcaklığının ve zamanın yetersiz olmasıdır (Ajdelstajn, vd., 2005; Zağlı, 2010; Karaoğlanlı, 2012).

Ayrıca yüksek hızlarla altlığa çarpan partiküllerin çarptıkları bölgelerdeki yüksek kinetik enerjiyi, lokal ısı enerjisi olarak temas ettiği bölgelere aktarmasıyla yapışmanın daha kuvvetli olması sağlanmaktadır (Döleker, 2015). Bu nedenle, parçacıkların hem sıcaklığı hem de hızı, çarpışmayı ve yapışmayı önemli ölçüde etkileyen bir parametrelerdir. *'Ayrıca nozulun boyutları, gaz basıncı, sıcaklığı, tipi parçacıkların hareketi esnasında davranışını düzenleyen gaz akışını belirlemektedir'* (Raolison vd., 2018).



Şekil 2.13: CGDS sisteminin şematik olarak görünümü (Hussain, 2012).

Termal spreynin kaplamalar yüksek sıcaklık oksidasyonuna maruz kaldıklarından dolayı, oksitlerde yüksek büyüme oranları ve korozif ortamların alt tabakaya nüfuz etmesi durumları kaçınılmazdır. Bunu azaltmak amacıyla CGDS teknolojisini geliştirenler, neredeyse gözeneksiz ve düşük oksitli kaplamaların biriktirilmesini mümkün kılmıştır. Bu anlamda soğuk gaz dinamik spreynin oksidasyon direnci olan kaplamaların üretimi için alternatif olarak seçilebilir (Bonadei ve Marrocco, 2014).

Şekil 2.14' e bakıldığında CGDS kaplamalarda yukarı tabakalara çıkıldıkça lameller arası boşluklarda artış gözlemlenmektedir (Van Steenkiste, vd., 2002). Plastik deformasyonun

etkilediği bu durumun nedeni alt tabakalardaki parçacıkların kendi enerjileriyle birlikte peşlerinden gelen parçacıklar tarafından ezilmeleri ve daha çok deformasyona uğramalarıdır (Fauchais ve Montavon, 2008).

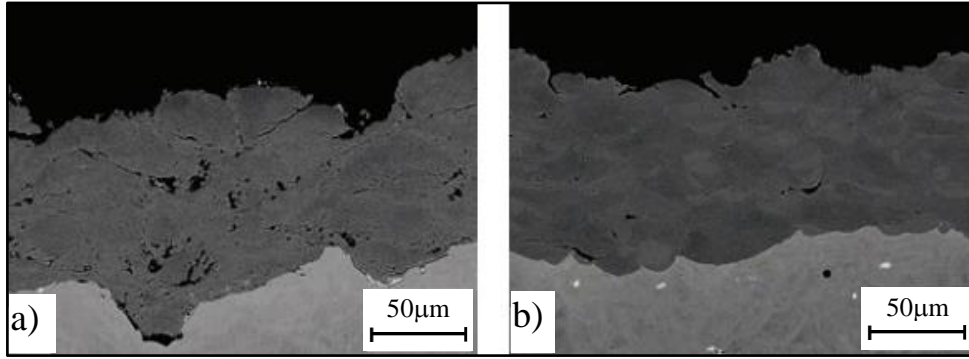


Şekil 2.14: CGDS prosesinde arkadan gelen parçacıkların neden olduğu deformasyon süreci (Van Steenkiste, vd., 2002).

CGDS prosesinin birikme mekanizması parçacıkların plastik deformasyonuna bağlı olduğundan ve yüksek sıcaklıklara çıkılmadığından seramik gibi gevrek malzemelerin kaplanması pek mümkün değildir. Kaplama malzemesi olarak metaller ve alaşımlar gibi sünek malzemeler seçilmektedir. Her ne kadar seramik gibi gevrek malzemeler tek başlarına biriktirilemese de sünek bir metal matris içinde olduklarında CGDS kaplamada kullanılabilirler (Karaoğlanlı, 2012). CGDS prosesi titanyum gibi yüksek sıcaklıklarda reaksiyona giren malzemelerin altlık malzeme olarak seçilmesine ve kaplanmasına imkan vermektedir. Bunun sebebi bu yöntemde altlığın ve parçacıkların çok yüksek sıcaklıklarla karşılaşmamasıdır. Fakat yüksek sıcaklıklara çıkılmaması nedeniyle üst kaplama malzemesinin kaplanmasında kullanılması mümkün değildir (Özgürlük, 2016).

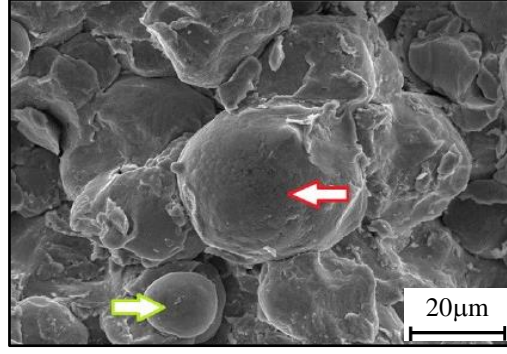
Bu yöntemin en büyük avantajı, HVOF yöntemi de dahil olmak üzere CGDS' nin diğer termal kaplama işlemlerine göre daha düşük sıcaklıkta çalışıyor olması ve gaz sıcaklığının parçacıkların erimesine müsaade etmeyecek kadar düşük olmasıdır (Karaoğlanlı, vd., 2014). Ichikawa ve arkadaşlarının (2007) yapmış olduğu çalışmalarda da görüldüğü gibi CGDS düşük gözeneklilik ve düşük oksit içerikli kaplamalar sağlayan yüksek oranlı bir birikim işlemidir. Ayrıca faz değişiminin, dekompozisyonun, tane büyümesinin ve kaplama sonrası distorsiyonlarının olmaması da yöntemin diğer avantajlarından biridir (Ichikawa, vd., 2007; Parlakyiğit, 2013; Gavendová, vd., 2016).

CGDS ile HVOF karakteristik olarak birbirine benzer özellikler göstermektedir. Bu yöntemde düşük porozite oranı ve yoğun kaplama tabakası elde edilmektedir. Bu da MCrAlY bağ kaplamanın sıcak korozyon, oksidasyon ve termal şok gibi hasar mekanizmalarına karşı daha da direnç kazandırır (Özgürlük, 2016). Şekil 2.15’ de Petra Gavendová ve arkadaşlarının HVOF ile CGDS püskürtme tekniklerini kullanılarak Inconel 718 üzerine çökeltilen CoNiCrAlY kaplamalarının enine kesit SEM görüntüleri görülmektedir. Baktığımızda CGDS mikro yapı için daha düşük gözeneklilikte olduğu ve CGDS’ nin HVOF ile karşılaştırılmasında daha düşük pürüzlülükte olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca HVOF’ un CGDS prosesine kıyasla çok zayıf bağlara sahip olduğu görülmektedir (Gavendová, vd., 2016).



Şekil 2.15: CoNiCrAlY bağ tabakasının mikroyapısı (a) HVOF (b) CGDS sprej (Gavendová, vd., 2016).

Şekil 2.16’ da CGDS prosesiyle püskürtülmüş yüzey görüntüsü verilmiştir. Soğuk püskürtülen katman bağlanmış parçacıkların yüzeyinde, sonunda bağlanmayan diğer parçacıklarla çarpışması nedeniyle oluşan oyukların varlığına rağmen LPPS yöntemiyle yapılan kaplamaya göre daha pürüzsüz ve düzgün görünmektedir. Yeşil ok ile deforme olmamış parçacıklar, kırmızı ok ile deforme olmuş parçacıklar kaplamanın üst katında görülmektedir (Bonadei ve Marrocco, 2014).

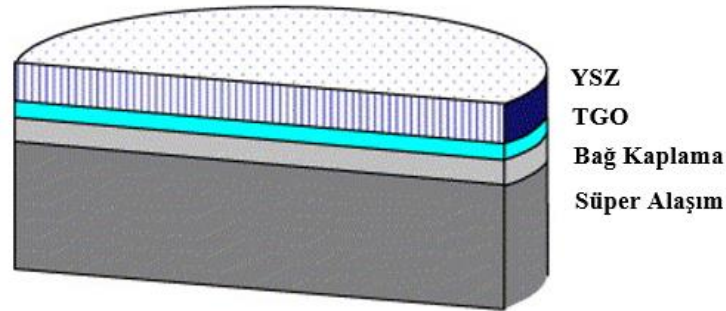


Şekil 2.16: Soğuk püskürtme kaplamasının püskürtme koşullarında yüzey şekilleri (Bonadei ve Marrocco, 2014).

#### 2.4 Termal Bariyer Kaplamalar (TBC)

Günümüzde uçak sanayisinde tercih edilen TBC' ler, süper alaşım olan altlık malzemeye yüksek sıcaklıklarda ısıl koruma sağlamak amacıyla yapılan metalik bir bağ kaplama ve %6-8  $Y_2O_3$  ile stabilize edilmiş  $ZrO_2$  içerikli seramik üst kaplamadan oluşan bir sistemdir (Özgürlük, 2016). Üç ayrı tabakadan oluşan bu kaplama sisteminde bağ kaplama alt tabakaları oksidatif ve aşındırıcı saldırılara karşı korumaktadır. Daha iyi termal yalıtıklık ve düşük termal iletkenlik katsayısına sahip seramik üst kaplama da alt tabaka arasındaki bağı iyileştirmektedir (Vaßen, vd. 2010).

Şekil 2.17' de yapılan bu çalışmada kullanılan çok katmanlı TBC' lerin numune geometrisi verilmiştir (Byeon, vd., 2005). Yüksek sıcaklıktaki ortamlara karşı koruma sağlamak için gaz türbin motorların metal kısımlarında kullanılan TBC kaplamaların esas görevi, türbin motorlarının sıcak gazlara maruz olmasına karşın ısı yalıtımı sağlayarak alttaki alaşım bileşenlerinin yüzeyinde oluşan sıcaklığı azaltmaktır (Habibi, 2014).



Şekil 2.17: Çok katmanlı termal bariyer kaplamalar için numune geometrisi (Byeon, vd., 2005).

#### 2.4.1 Termal Bariyer Kaplamaların Özellikleri

TBC' ler, uçak sanayisi gibi yüksek sıcaklıklarda kullanılan Ni esaslı süper alaşımdan olan bir altlık malzemeyi oksidasyondan, korozyondan, erozyondan korumayı sağlamak için uygulanan bir bağ kaplama ve üst kaplama olarak nitelendirilmekte ve yaygın olarak kullanılmaktadır (Özgürlük, 2016). Bu sayede TBC' ler daha yüksek çalışma sıcaklıklarına çıkılmasına ve parçaların yüzey sıcaklığını düşürerek daha uzun ömürlü olmasına imkan sağlamaktadır. Ayrıca metalik parça içinde daha az soğutucu akış sağlaması TBC' ler için avantajdır (Diltemiz, 2010).

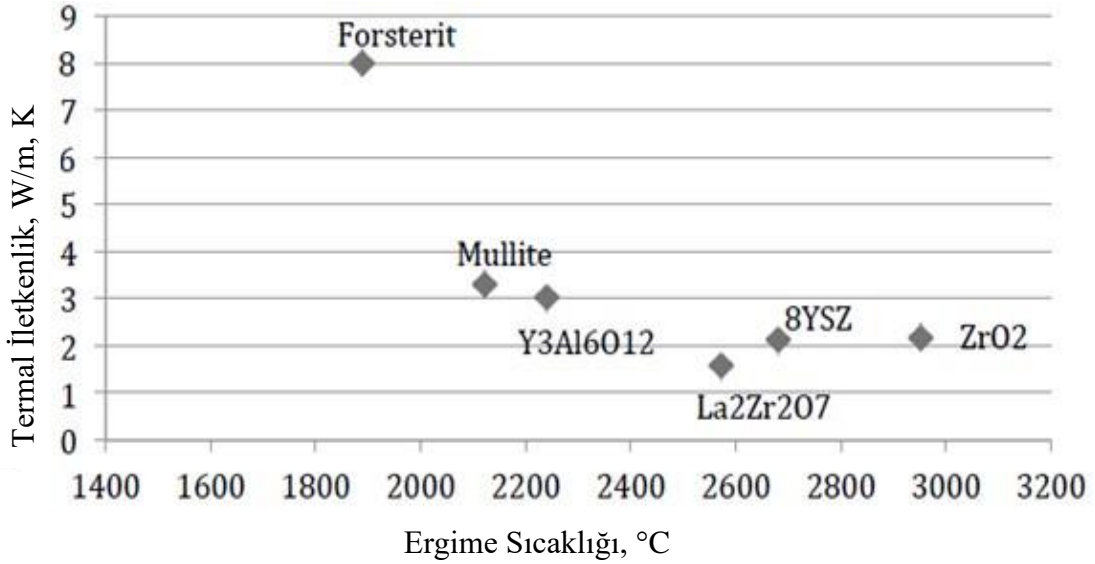
Gurrappa ve Sambasiva Rao (2006)' nın çalışmalarında, performansı arttırmak için yapılan koruyucu kaplama sisteminin süper alaşımın ömrünü yaklaşık altı yüz kat artırdığına değinilmektedir. Ayrıca NiCoCrAlY içerikli kalın TBC' lerin uygulanmasının, gaz türbini motor bıçağı malzemelerini hem oksidasyon hem de sıcak korozyon koşullarına karşı önemli ölçüde koruma sağlamak için gerekli olduğu görünmektedir (Gurrappa ve Sambasiva Rao, 2006).

Altlık malzemeler tercih edilirken dayanıklı olmasına ve gerilmelerin az olduğu bir kaplama elde etmek için düşük elastiklik modülüne sahip olmasına dikkat edilir. Çünkü seramik üst kaplama malzemeleri, metalik altlık malzemelere kıyasla daha yüksek termal genleşme katsayılarına sahiptir (Avcı, 2015).

TBC sisteminin en önemli özelliklerinden birisi termal iletim özellikleridir. Kaplamalarda ki çatlaklar, tanecik oranındaki artışlar veya boşluklar gibi iç kusurlar, kaplama içerisindeki ısı akışını önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu yüzden TBC' lerde malzeme seçimi yapılırken boşluk oranı fazla ve taneli yapıda olmasına dikkat edilmektedir (Kaßner, vd., 2008; Sokołowski, vd., 2017).

*'Termal bariyer kaplama sisteminde termal iletkenlik kafes titreşimler ve ısıyı iki kontrol elemanının birleşimi ile gerçekleşir. Metallerde ısı iletimi büyük oranda serbest elektronlarla sağlanır. Ancak, kafes titreşimleri olarak da adlandırılan fononlar da iletme düşük de olsa katkıda bulunur.'* Zirkonun kafes yapısına ilave edilen itriya, yapı içerisinde kusurlar oluşturarak kafes titreşimlerini engellemekte, fonon-fonon saçılmalarının

artmasıyla ortalama serbest yol düşmektedir. İlavenin artmasıyla kafes içerisinde ki oksijen boşluk oranı da artmaya başlar. Böylece %1,9 oksijen gözenek oranına sahip olan YSZ' nin elde edilen yeni oranı %3,8 olarak belirlenmektedir. Bunun sonucunda zirkonun itriya ile stabilize edilmesiyle termal iletkenlik azalmış olur (Avcı, 2015). Ayrıca en yüksek termal iletkenlik değerlerine yoğun kütle halindeki zirkonya sahipken, en düşük değerler de APS kaplamalarda olduğu görülmüştür (Parlakyiğit, 2013). Artışı sağlanarak elde edilen gözenekli yapıda olan malzemeler daha az yoğunluğa sahip olurlar. Termal iletkenliği de azalan bu malzemelerde oksijenin varlığı daha kolay bir hale gelir. Ayrıca artan gözenekli yapılar termal genleşme uyumsuzluklarını gidererek yapışma dayanımlarını yükseltir. Şekil 2.18' de termal bariyer kaplama olarak kullanılan malzemelerin termal iletkenlik özellikleri verilmiştir (Avcı, 2015).

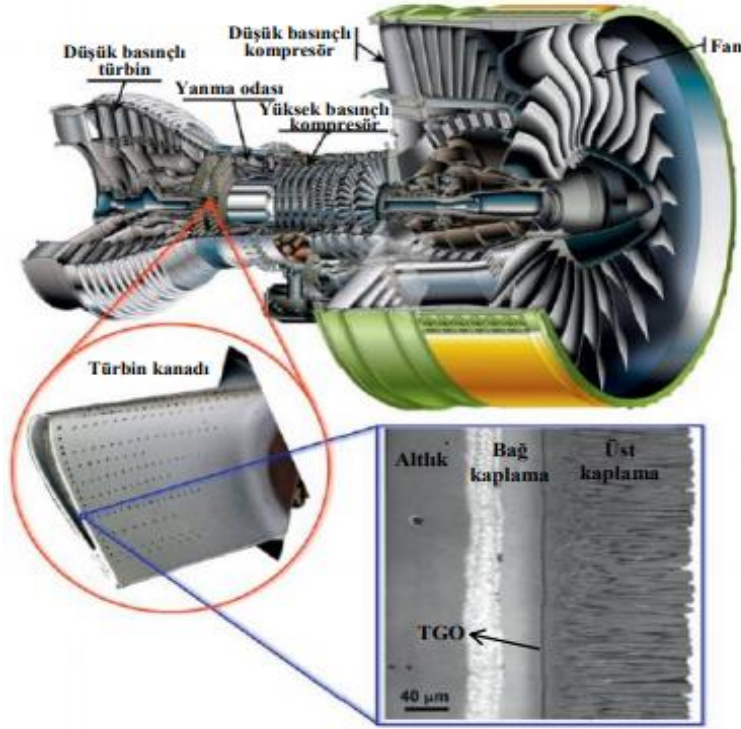


Şekil 2.18: Termal bariyer malzemelerinin termal iletkenlik özellikleri (Avcı, 2015).

TBC sisteminde ki bir diğer özellik ise termal genleşme katsayılarıdır. TBC malzemesi seçerken bağ katman ile seramik üst katman arasındaki termal genleşme katsayılarının birbirine yakın olması gerekmektedir. Çünkü termal genleşme katsayılarının birbirine yakın olması dayanıklı, uzun ömürlü ve termal çevrimler boyunca daha az gerilmeler oluşan bir TBC elde edilmesini sağlar. Eğer termal genleşme katsayılarının arasındaki fark artarsa gerilmeler oluşur ve bununla birlikte hatalar meydana gelir (Avcı, 2015).

## 2.4.2 TBC' lerin Tarihsel Süreci ve Kullanım Alanları

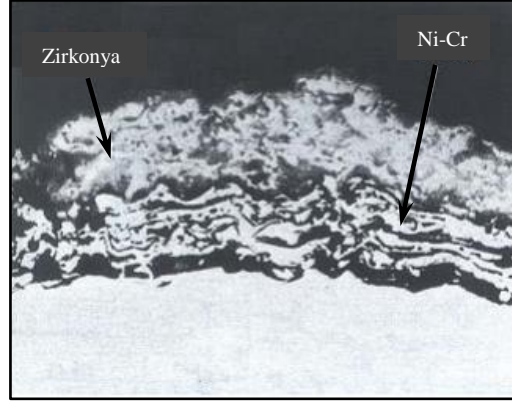
TBC' ler deniz, enerji, uçak, otomotiv ve uzay sanayisinde yapılan çalışmalarda geniş uygulama alanına sahiptir. Özellikle uçak sanayisinde, gaz türbin motorlarındaki türbin bıçak ve kanatçıkları gibi parçaları yüksek sıcaklığa ve bu sıcaklığın oluşturduğu oksidasyon, korozyon gibi hasarlara karşı koruma mekanizması sağlar. Bu sayede yüksek performans ve verimlilik sağlayarak kullanımı tercih edilir (Karaoğlanlı, vd., 2014). Şekil 2.19' da bir uçak motoru olan Alliance GP7200' nin daha verimli gaz türbin motorları için TBC' lerin şematik kesit görüntüsü, kaplanmış türbin kanadı ve kesit SEM görüntüsü verilmiştir (Clarke, vd., 2012).



Şekil 2.19: Gaz türbin motorunun kesit görüntüsü, türbin kanadı ve enine kesit SEM görüntüsü (Clarke, vd., 2012).

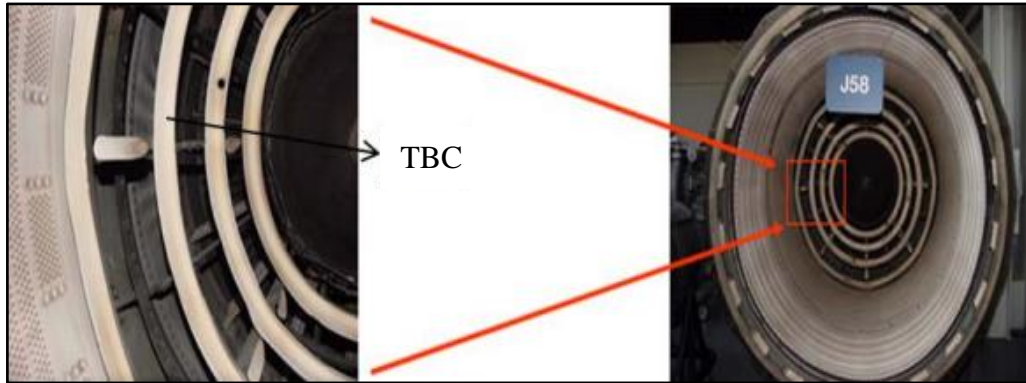
Yaygın olarak uçak endüstrisinde gaz türbin bıçaklarında, vanalarda ve motorların yanma odalarında kullanılan TBC' leri ilk olarak 1960 yılında PS kaplama yöntemiyle uygulanan kalsiyum veya magnezyum ile kararlı hale getirilmiş zirkonya alaşımları oluşturmaktadır. Fakat bu kaplamalar 1000 °C sıcaklığın altına kadar iyi çalışsa da, uzun süreli uygulamalar sonucunda 1000 °C sıcaklığın üzerindeki sıcaklıklarda monoklinik zirkonya oluşumu bozunmuştur. Oda sıcaklığında monoklinik fazda bulunan zirkonya ısı arttıkça kübik fazlara

geçmiştir. Dolayısıyla yapılan bu zirkonya kaplamalarda ayrılmalar olmuştur (Reed, 2006; Döleker, 2015). Şekil 2.20’ de roket motor nozullarında kullanılan TBC mikro yapısı görünmektedir (Miller, 2009).



Şekil 2.20: Roket motor nozullarında kullanılan TBC mikroyapısı (Miller, 2009).

%7  $Y_2O_3$  ilavesiyle kısmen stabilize edilmiş zirkonyanın TBC uygulamaları için standart olarak ortaya çıkması, NASA tarafından yürütülen kapsamlı çalışmalar sonucunda %6-8  $Y_2O_3$  ile alaşımlandırılmış zirkonyanın en iyi termal döngü ömrüne sahip olduğunun bulunmasıyla 1970’ li yıllarda gerçekleşmiştir. Bu sayede seramik üst kaplamalı TBC’ ler üretilmiştir (Reed, 2006). Şekil 2.21’ de seramik üst kaplaması gerçekleştirilmiş olan TBC’ lere ait fotoğraflar verilmiştir.

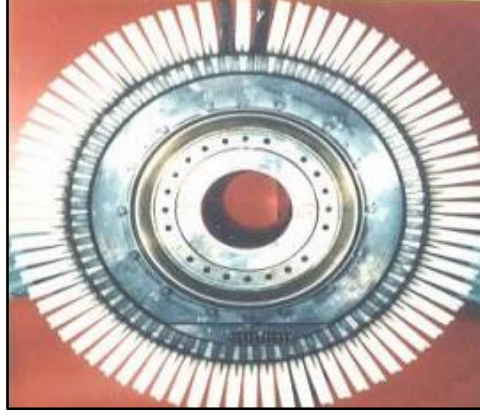


Şekil 2.21: Yanma odasına seramik üst kaplamalı TBC uygulamaları (Döleker, 2015).

1970’ li yıllarda devam eden çalışmalarda %12 itriya ile stabilize edilmiş  $ZrO_2$ ’ nin, NiCrAlY bağlayıcı katmanı üzerine üst kaplama olarak uygulanmasının sonucunda uçak türbinleri için yararlı olduğu tespit edilmiştir. Şekil 2.22’ de MCrAlY bağ ve YSZ üst



kaplama uygulanmış türbin bıçağı görülmektedir (Döleker, 2015).



Şekil 2.22: MCrAlY bağ ve YSZ üst kaplama uygulanmış türbin bıçağı (Döleker, 2015).

1980' li yıllara kadar TBC' ler, APS ile üretilmiş kalsiyum oksit, magnezyum oksit ile dengelenmiş zirkonyum oksit kullanılması olarak sağladı. Uzun süre kullanılan bu malzemeler 2000' li yıllarda yerini daha üstün özelliklere sahip olan YSZ' ye bırakmıştır (Çiftyürek, 2009).

TBC' ler geçmişte kullanılmaya başlanıp günümüze kadar geliştirilmeye, iyileştirilmeye devam etmiştir. Endüstriyel alanda oldukça avantaj sağlayan ve uygulaması devam eden TBC' ler hala ilerlemeye elverişli ve geniş alana sahip bir yöntemdir.

#### 2.4.3 TBC' lerin Kaplama Sistemi ve Malzemeleri

Kullanılabilecek malzeme çeşitliliği fazla olan TBC' ler de metaller, seramikler ve hatta bazı polimerler kaplama malzemesi olarak değerlendirilmektedir. Ancak tasarımı ve çalıştığı koşullar dikkate alındığında uygun malzeme seçimi konusunda oldukça hassas olunması gerekmektedir. Faz kararlılığı, yüksek ergime noktası, yüksek oksitlenme direnci, yüksek aşınma ve erozyon direnci, porlu yapının düşük sinterlenme oranı, mekanik dayanım ve yüksek ısı şok direnci gibi özellikler optimum değerlere ulaşmak için malzemelerin başlıca sahip olması gereken özelliklerden birkaçıdır (Bengi 2009; Minikser, 2009). TBC sistemlerinden yararlanmaya başlanılan ilk uygulamalarda emaye ve kalsiya stabilize zirkonya kullanılmıştır. Fakat olumsuz çalışma şartlarında mekanik, termal ve kimyasal gerilmeler oluşmuş böylece yeni malzemelerin gelişimine ihtiyaç duyulmuştur. Bu nedenle YSZ,  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$ , Müllit,  $CaO/MgO + ZrO_2$ ,  $CeO_2 + YSZ$  ve  $La_2Zr_2O_7$  gibi çeşitli

malzemeler kullanılmaya başlanmıştır. Bu malzemelere ait bazı avantaj ve dezavantajlar Tablo 2.3' de verilmiştir (Cao, vd., 2004; Avcı, 2015). Oluşturulan katmanlardaki malzeme seçimi ve yapılarının incelenmesi, TBC' lerin bahsedilen işlevleri nasıl sağladığını daha iyi anlaşılır hale getirmektedir. TBC' ler de ki sıcaklık düşüşünün olması, en üstteki seramik katmandan geçen düşük ısı sayesinde gerçekleşmektedir. Soğutma işleminin etkili gerçekleşmesiyle malzemenin yüzey sıcaklığında düşüş sağlanmaktadır. Bahsedilen amaca ulaşmak için de malzemeler içerisinde düşük ısı iletkenliğe sahip üst katman seçilmelidir (Karaoğlanlı, 2012). Tablo 2.4' de de istenilen durumlara göre uyarlanan TBC malzemeleri, en yaygın bağlanma katmanı ve kullanılan taban malzemeye ait çeşitli fiziksel ve mekanik özellikler görölmektedir (Cao, vd., 2004).

Tablo 2.3: TBC malzemelerinin avantaj ve dezavantajları (Cao, vd., 2004; Avcı, 2015).

Malzemeler	Avantajları	Dezavantajları
<b>7-8 YSZ</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Yüksek termal genleşme katsayısı</li> <li>• Düşük termal iletkenlik</li> <li>• Yüksek termal şok direnci</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1200 °C üzeri sinterlenme</li> <li>• 1170 °C’de faz dönüşümü</li> <li>• Korozyon ve oksijen difüzyonu</li> </ul>
<b>Müllit</b> <b>3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>2SiO<sub>2</sub></b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Yüksek korozyon direnci</li> <li>• Düşük termal iletkenlik</li> <li>• İyi termal şok direnci</li> <li>• Düşük oksijen geçirgenliği</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kristalizasyon (700-1000 °C)</li> <li>• Çok düşük termal genleşme katsayısı</li> </ul>
<b>Alümina</b> <b>(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Yüksek korozyon direnci</li> <li>• Yüksek sertlik</li> <li>• Düşük oksijen geçirgenliği</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1000 °C ve üzeri faz dönüşümü</li> <li>• Yüksek termal iletkenlik</li> <li>• Çok düşük termal genleşme katsayısı</li> </ul>
<b>CeO<sub>2</sub> + YSZ</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Yüksek termal genleşme katsayısı</li> <li>• Düşük termal iletkenlik</li> <li>• Yüksek korozyon direnci</li> <li>• YSZ’ ye göre monoklinik fazdan tetragonal faza dönüşüm daha az</li> <li>• Yüksek termal şok direnci</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Yüksek sinterlenme oranı</li> <li>• CeO<sub>2</sub>’ nin çökelme sıcaklığı 1100 °C üzeri</li> <li>• Kaplama esnasında CeO<sub>2</sub> azalması</li> </ul>
<b>La<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub></b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Çok yüksek termal kararlılık</li> <li>• Düşük termal iletkenlik</li> <li>• Düşük sinterlenme oranı ve O<sub>2</sub> geçişi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nispeten düşük termal genleşme katsayısı</li> </ul>
<b>La<sub>2</sub>Ce<sub>2</sub>O<sub>7</sub></b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Çok yüksek termal kararlılık</li> <li>• Yüksek termal genleşme katsayısı</li> <li>• Düşük termal iletkenlik</li> <li>• Yüksek korozyon dayanımı</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kaplama esnasında CeO<sub>2</sub> azalması</li> <li>• 1250 °C üzeri nispeten yüksek sinterlenme oranı</li> </ul>
<b>Silikatlar</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ucuz ve kolay ulaşılabilir</li> <li>• Yüksek korozyon direnci</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Çok düşük termal genleşme katsayısı</li> </ul>
<b>SrZrO<sub>3</sub></b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Yüksek termal genleşme katsayısı</li> <li>• Düşük termal iletkenlik</li> <li>• Düşük sinterlenme oranı</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Faz dönüşümü</li> <li>• Termal sprey kaplama esnasında SrO azalması</li> </ul>

Tablo 2.4: Termal bariyer kaplama malzemelerinin mekanik ve fiziksel özellikleri (Cao, vd., 2004; Avcı, 2015).

<b>Termal Bariyer Kaplama Olarak Kullanılan Malzemeler ve Fiziksel Özellikleri</b>							
Malzemeler	$T_m(K)$	$D_{th}(m^2s^{-1}) \times 10^{-6}$	$\lambda (Wm^{-1}K^{-1})$	$\alpha(K^{-1}) \times 10^{-6}$	E(GPa)	$C_p (J_g^{-1}K^{-1})$	$\nu$
	Ergime Noktası	Termal Difüzyon	Termal İletkenlik	Termal Genleşme	Elastisite Modülü	Isı Kapasitesi	Poisson Oranı
ZrO <sub>2</sub>	2953	0,43	2,17 (1273K)	15,3 (1273K)	21		0,25
8YSZ				10,7 (293-1273K)	40		0,22
3YSZ	2973	0,58	2,12 (1273K)	11,5 (293-1273K)		0,64	
CeO <sub>2</sub>	2873	0,86	2,77 (1273K)	13 (293-1500K)	172	0,47	0,27-0,31
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2323	0,47	5,8 (1400K)	9,6 (1273K)	30		0,26
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (TGO)				8 (293-1273 K)	360		0,22
3Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·2SiO <sub>2</sub> (Müllit)	2123		3,3 (1400K)	5,3 (293-1273 K)	30		0,25
La <sub>2</sub> Zr <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	2573	0,54	1,56 (1273K)	9,1 (293-1273K)	175	0,49	
SrZrO <sub>3</sub>	2883	1,4	2,08 (1273K)	10,9 (473-1373K)	170	0,46	0,25
Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	2243		3	9,1 (293-1273K)			
YBa <sub>2</sub> ZrO <sub>6</sub>	1973		0,37 (543 K)		120	2,8	
NiCoCrAlY (bağ tabaka)				17,5 (293-1273 K)	86		0,3
IN737 (althk malzemesi)				16 (293-1273 K)	197		0,3

### 2.4.3.1 Süper Alaşım Altlık Malzeme

Altlık tabakası kaplama sisteminde hazır halde bulunan ve kaplamanın üzerine uygulandığı alt malzemedir. Yani koruması amaçlanan ana malzemelerdir (Karaoğlanlı, 2012). Nikel bazlı süper alaşım olan Inconel 718 altlıklar, yüksek sıcaklık uygulamalarında mükemmel mekanik özelliklere sahiptir. Bilhassa gaz türbinlerinde uzun süre boyunca gelişmiş mikro yapı ve termo mekanik özellikler kazandıran bu Inconel 718 alaşımı mükemmel sürünmeye, iyi korozyon direncine, erozyon direncine, ortam sıcaklığında yüksek dayanıma ve yüksek sıcaklıktaki yorulma dayanımına sahiptir (Myoung, vd., 2014; Ma, vd., 2019). En önemli özelliklerinden birisi yaklaşık 1100 °C sıcaklıklara kadar sertliğini kaybetmemesidir (Karaoğlanlı, 2012). Bu sebeple, Inconel 718 alaşımı gaz türbini kanatları, yanıcılar, nükleer reaktör ve havacılık bölümleri gibi zorlu ortamlarda, parçaların uzun ömürlü olması için yaygın bir biçimde kullanılmaya devam edilmektedir (Ma, vd., 2019). Sıcaklık yükseldiğinde sürünme dayanımını artırabilmek ve tane sınırlarından kaynaklanan hasarları minimuma indirmek için süper alaşımlar yönlenmiş taneler halinde veya tek kristalin biçiminde üretilmektedir (Özgürlük, 2016). Özellikle türbin bıçaklarında ve kanatlarda yüzey merkezli kübik (YMK) yapıya sahip  $\gamma$  fazından oluşan Ni esaslı tek kristal süper alaşımlar uzun süredir kullanılmaktadır (Wang, vd., 2015).

Tablo 2.5' de Ni bazlı Inconel 718 malzemesine ait mekanik özellikler verilmiştir (Özgürlük, 2016). Ni esaslı alaşımların dışında yanma odalarında ve nozüllerde Co esaslı süper alaşımlar da kullanılmaktadır. Kimyasal kompozisyonu ağırlıklı olarak Ni, Co esaslı olan alaşımlarına Cr, Al ilavesi yapılmasıyla çalışma koşullarında  $Cr_2O_3$  ve  $Al_2O_3$  bileşiklerinin oluşması, korozyona ve oksidasyona olan direnci artırmaktadır (Altuncu, 2011).

Tablo 2.5: Ni bazlı Inconel 718 malzemesinin mekanik özellikleri (Özgürlük, 2016).

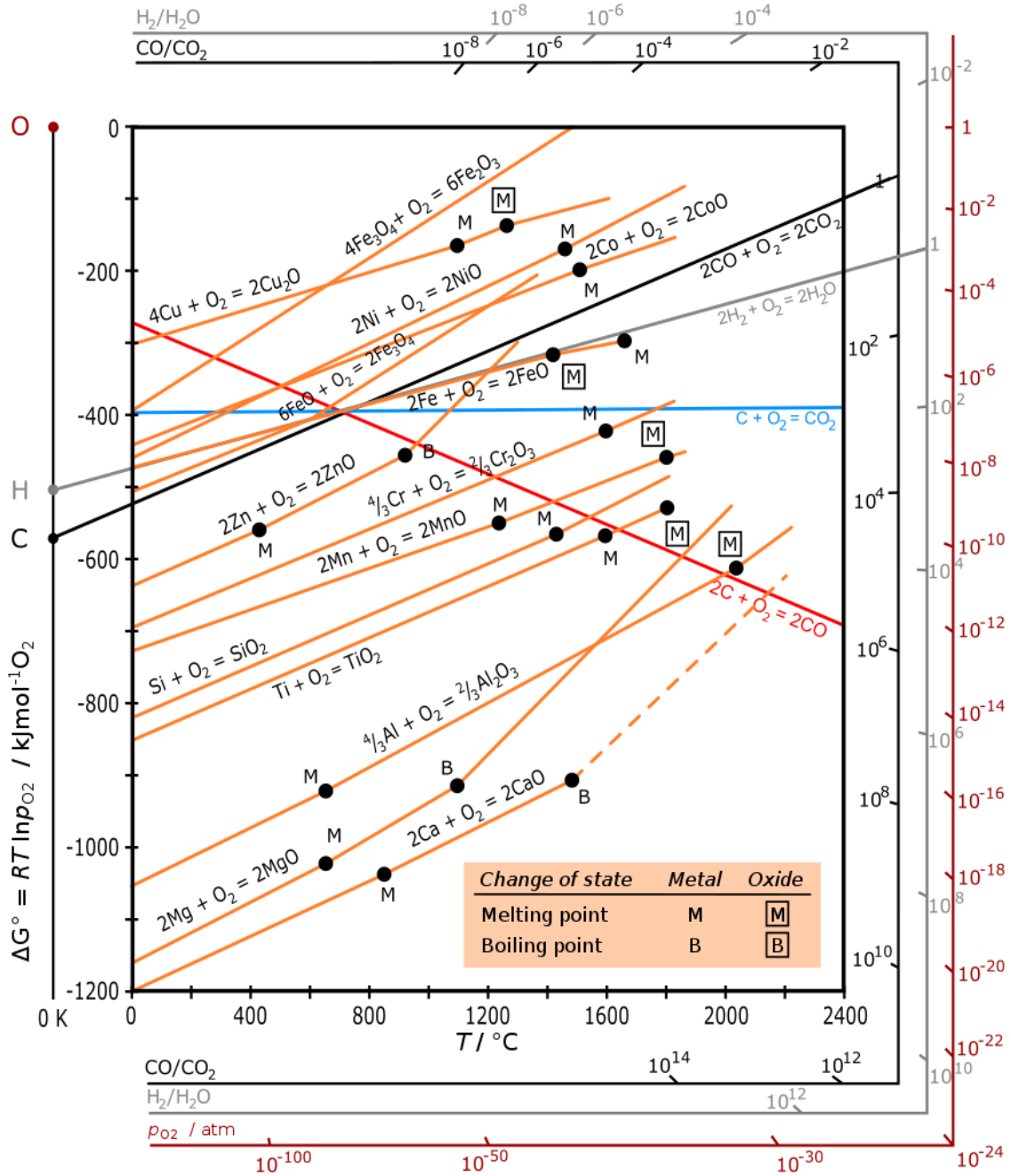
Test Sıcaklığı		%0.2 Akma Dayanımı		Çekme Dayanımı		%Uzama
°F	°C	ksi	MPa	ksi	MPa	
200	93	170	1172	204	1407	21
400	204	163	1124	198	1365	20
600	316	159	1096	195	1344	20
800	427	156	1076	191	1317	19
1000	538	155	1069	185	1276	18
1200	649	149	1027	168	1158	19
1400	760	110	758	110	758	27

#### 2.4.3.2 Bağ Kaplama

TBC' ler de seramik üst kaplamanın ana malzeme olan altlığa yapışmasını arttırmak amacıyla, seramik üst kaplama ve metalik altlık arasında yapıştırıcı kat olarak bilinen metalik bağ katmanı biriktirilir. Yüksek sıcaklık korozyonuna karşı korunma sağlama özelliği ile bilinen bağ katmanının iki temel görevi vardır; koruyucu bir oksit skalası oluşturup ana metalin (altlığın) oksidasyon direncini artırmasıyla TBC' nin ömrünü uzatmak ve altlık malzeme ile seramik katman arasında var olan ısıl genleşme farkını dengelemektir. Ayrıca oksit tabakasının tutunması için gereken yüzey pürüzlülüğü de bağ kaplama sayesinde elde edilir (Matsumoto, 2007; Diltemiz 2010; Ahmadi-Pidani, vd., 2013). Oksidasyon direnç katmanı olarak bilinen tipik metalik bağ kaplama, bir MCrAlY kompozitinden (M: Co ve/veya Ni) oluşur. Bu kaplama APS, VPS gibi birkaç püskürtme uygulamasıyla elde edilmektedir (Karaoğlanlı, vd., 2013). Burada Co ilavesi korozyon direncini, Ni ilavesi de oksitlenme direncini artırmaktadır. Al ise oksidasyon direncini artıran başlıca elementtir. Cr, sıcak korozyon dayanımını artırıcı özelliği ile bilinmekte buna ilaveten Al' nin de aktivitesini artırmaktadır. Azalan Co miktarı ise oksidasyon direncini artırmaktadır. Y, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>' de Al tutucu görevini sağlarken Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>' ün de alaşıma bağlanmasını sağlamaktadır (Kaplan, 2017; Döleker, 2018).

TBC' ler için son derece önemli olan kompozit olarak optimize edilmiş NiCoCrAlY bağ kaplamalar, çevresel koşullara bağlı olarak oksit tabakası oluşumuna olanak sağlamaktadır (Gurrappa ve Sambasiva Rao, 2006). Böylece bağ kaplama, gözenekli yapılara sahip üst katmanlardan alt tabakaya ulaşan oksidasyon gibi kimyasal ataklara karşı altlığı korumaktadır. TGO adı verilen bu oksit tabakanın koruyuculuk sağlayabilmesi için 10  $\mu\text{m}$ ' dan daha ince olması gerekmektedir. Bağ katmanının oksidasyon direnci, alaşımın yüzeyinde sürekli, yavaş büyüyen ve yapışkan bir TGO üretme kabiliyetine dayanmaktadır (Matsumoto, 2007; Karaoğlanlı 2012). TGO tabakasından beklenen temel özellik yüzeyde homojen dağılmış yoğun bir  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  tabakasından oluşmasıdır. Bu yüzden diğer oksitlerden ziyade  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  oluşumu için bağ tabaka alüminyum içeren kaplamalardan yapılır. Bu oluşum, tabakanın oksijen geçirgenliğini düşürmekte, seramik ile iyi yapışma özelliği sağlamak ve kararlı faz yapısı özelliği sergilemektedir.  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  oluşumu için kaplamada ađ% 6.5' den büyük oranda alüminyum içeriği olması gerekmektedir (Çiftiyürek, 2009; Karaoğlanlı, 2012). Metalik bağ kaplama,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ' ten meydana gelen koruyucu TGO tabakasının oluşumu sırasında bir Al haznesi görevi görür (Jayaraj, vd., 2004). Düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilen korozyon çalışmalarında anodik koruma veya elektrolitten koruyacak ince kaplama uygulamaları ihtiyacı karşıliırken yüksek sıcaklık kaplamalarında durum daha farklıdır. Yani artan sıcaklıklarda metaller termodinamik olarak kararlı oksitlerine dönmeye meyillidirler ya da gaz bileşenleri ile reaksiyona girmeye meyillidirler. Bu yüzden bağ tabakadaki elementlerin, süper alaşımın ana elementleri olan Ni ve Co' nun oluşturacağı korozyon ürünlerinden daha kararlı korozyon ürünleri oluşturması gerekmektedir (Oskay, 2019). Termodinamik olarak Al' un oksitlenmesini gerçekleştirebilmek için alaşımdaki Al' un oksijen ile istenilen tepkimesinin gerçekleşmesi durumunda gereken aktivasyon enerjisinin diğer elementlerden daha yüksek olması sağlanmalıdır. Şekil 2.23' de TBC' lerle ilgili bazı oksitlerin Ellingham diyagramı görülmektedir (URL-3, 2019). Diyagramda aşağı doğru inildikçe hangi elementin daha önce oksitleneceğini ve yukarı doğru çıktıkça da hangi oksitin daha kararlı olduğu anlaşılmaktadır. Bu diyagramda görüldüğu üzere bağ kaplamada kullanılan alaşım elementlerinden Ni, Cr ve Al' un koruyucu katman oluşumunda oksijene afinitesinin en yüksek Al' de olduğu görülmektedir. Yani bu durum bize Al' un oksitlenmesinde Gibbs serbest enerjisinin Ni ve Cr' a oranla çok daha düşük olduğunu ve alüminanın ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) daha kararlı bir faz olarak kalacağını ifade etmektedir (Karaoğlanlı, 2012).

Sonuç olarak MCrAlY bağ kaplamalarda temel amaç bileşimlerinde seçici olarak alüminyumun oksitlenmesiyle kararlı ve düşük oksijen geçirgenliğine sahip  $Al_2O_3$  oluşturmak bu sayede de altlık malzemeyi oksidasyon ve korozyon hasarlarına karşı daha iyi korumaktır (Döleker, 2018).



Şekil 2.23: TBC' lerle ilgili bazı oksitlerin Ellingham diyagramı (URL-3, 2019).



### 2.4.3.3 Seramik Üst Kaplama

Üst kaplama, gaz türbinindeki sıcak gazlarla direkt temas içinde olan TBC sisteminin en üst en üstteki kaplama tabakasıdır. Bu yüzden TBC sisteminde ısı yalıtım görevi sağlayacak olan bu üst kaplama malzemesinin seçimi oldukça önemlidir (Dalkılıç, 2007). Bu seçim yapılırken kullanılacak malzemenin bazı temel özelliklere sahip olması gerekmektedir. Bu temel özellikleri şu şekilde sıralayabiliriz:

- Ergime sıcaklığının yüksek olması
- İyi bir kimyasal kararlılık
- Düşük termal iletkenlik
- Süper alaşım altlık ile termal genleşme uyumu
- Oksidasyon ve korozyon direncine sahip olması
- Çalışma sıcaklığı ile oda sıcaklığı arasında faz dönüşümü olmaması
- Kimyasal olarak inert
- Metalik altlığa iyi tutunma sağlaması (Ahmadi-Pidani, vd., 2013; Dokur, 2014).

Üstün özelliklerinden dolayı ağırlıkça %7-8 itriya ( $Y_2O_3$ ) stabilize zirkonya (YSZ), türbin kanatları için üst kaplama olarak kullanılmaktadır (Xia J, vd., 2019). Bugünlerde 7-8 YSZ, en çok tercih edilen ve kullanılan kapsamlı TBC malzemesidir. Bunun sebebi dizel motorlar ve gaz türbinleri gibi yüksek sıcaklık uygulamalarında en iyi performansı sağlamasıdır (Cao, vd., 2004). Zirkonyanın ağırlıkça %6-7 itriya ( $Y_2O_3$ ) ile stabilize edilmesinin sebebi yüksek sıcaklık faz geçişlerini önleyici olmasıdır. Kısmen YSZ' den oluşan seramik katmanın uygulanması, EB-PVD veya APS ile gerçekleştirilmektedir (Zhao, vd., 2006). YSZ' ler mikro çatlaklar ve indüklenmiş gerilmelerden dolayı yüksek tokluk değerlerine sahiptirler. Mikro çatlakların etkisi, kübik ve monoklinik fazlar arasındaki termal genleşme katsayısı farklılığıyla açıklığa kavuşmaktadır. Bu farklılık yeni mikro çatlakların oluşumuna sebebiyet verirken, mevcut ilerleyen çatlakların enerjilerini de düşürmektedir (Minikser, 2009).

Değişen sıcaklıkla ilişkili olarak saf zirkonya üç farklı kristalografik faz yapısına sahiptir. 1170 °C' ye kadar monoklinik, 1170-2370 °C aralığında tetragonal, 2370 °C' den erime noktasına kadar ise kübik yapıda olan zirkonya soğutma sırasında tetragonal fazdan monoklinik faz yapısına geçerken hacimce %4 ve %5 arasında değişime uğrar. Sonuç olarak

hacim değişimi malzemede istenmeyen atlmalara ve bozulmalara neden olarak çalışma ömrünü azaltmaktadır. Bu faz dönüşümünü durdurmak için  $Y_2O_3$ ,  $MgO$ ,  $CaO$ ,  $CeO_2$ ,  $In_2O_3$ ,  $Sc_2O_3$  gibi farklı oksitlerle zirkonya stabilize edilmektedir. Tüm bu oksitler zirkonyayı bir dereceye kadar stabilize etse de, yapılan birçok çalışmada %7 itriya katkılı zirkonyanın en uzun termal döngü ömrünü gösterdiği belirlenmiştir (Chen, 2015). Bu anlamda itriya ile stabilize zirkonya yüksek dayanım, kırılma tokluğu, düşük termal iletkenlik ve yüksek termal genleşme katsayısına sahip olması ile en çok bilinen malzemelerden biridir (Karabaş, 2016). Termal genleşme katsayısına sahip seramik YSZ' ler, üst kaplama ile süper alaşım altlık arasındaki termal genleşme uyumsuzluğunun neden olduğu gerilimleri gidermeye çalışır (Chen, 2015). Böylece altlık malzemesini sıcaklıktan korumak, termal iletkenliği azaltmak amacıyla YSZ' nin TBC' lerde kullanıma en uygun olduğu görülmüştür.

Termal iletkenliğin azalmasını sağlayan diğer bir faktör de üst katmanın kalınlığının artmasıdır. Fakat kalınlığın artması, artık gerilmelerin artmasına ve kaplama işlemi sırasında bağ katmanın oksitlenmesine sebebiyet verir. Bunun sonucunda da termal büyüyen oksit (TGO) tabakası açığa çıkar (Avcı, 2015).

#### **2.4.3.4 Termal Olarak Büyüyen Oksit Tabakası (TGO)**

TBC' lerin yüksek sıcaklıkta kullanımında seramik kaplamadan sızan oksijen MCrAlY bağ kaplamaya ulaşmaktadır. Bağ kaplamaya ulaşan bu oksijenin alüminyum ile reaksiyonu sonucunda YSZ ve MCrAlY metalik bağ arasındaki arayüzde yavaş büyüyen, termodinamik olarak stabil ve sürekli bir alümina skalası meydana gelmektedir. MCrAlY metalik bağ kaplama üzerinde meydana gelen bu oksit skalası 'termal olarak büyüyen oksit' (TGO) olarak isimlendirilmektedir (Diltemiz, 2010; Khajezadeh, vd., 2018). TGO, MCrAlY metalik bağ kaplama malzemesinin içeriğinde olan elementlerin oksijene karşı yüksek ilgisinden dolayı kaynaklanmaktadır. Elementlerin içinden en yüksek ilgiye sahip olan element de alüminyumdur ve oksitlenmesiyle  $Al_2O_3$  tabakası oluşmaktadır. Yine seramik üst kaplamaların üretiminde yapıda mevcut olan çatlaklar ve poroziteler oksijen geçişine imkan sağlar ve YSZ' nin iyonik geçirgenliğinden dolayı TGO tabakasının oluştuğu görülr. Üst kaplamada açık atmosfer ve yüksek sıcaklıklar da söz konusu olunca TGO oluşumu kaçınılmaz olmaktadır (Özgürlük, 2016).

TBC sisteminin verimliliğini anlamak için kritik olan noktalardan bir tanesi, TGO' nun oluşumu, büyümesi ve özellikleridir. Çünkü bu TGO yapısı belirli bir kritik kalınlığı aştığında TGO' nun iç stresini arttırmaktadır. Bu durum TBC' lerde hasar oluşmasına (erken dökülmesine) sebep olur. Bağ kaplama bileşimlerinde, yapıda TGO oluşturmak için genellikle  $Al_2O_3$  seçilmektedir, çünkü bu oksit yapısı yüksek sıcaklıklarda en yavaş büyüyen ve mükemmel mekanik bütünlüğe sahiptir. Bu da geçirimsiz, yapışkan bir tabaka oluşturulmasını sağlamaktadır (Zhang ve Desai, 2005; Clarke, vd., 2012).  $Al_2O_3$  düşük oksijen difüzyon hızı ve üstün yapışma özelliği sergilemektedir. Bu oksit ölçeği, alt tabaka ile zararlı gazların olduğu ortam arasında bir bariyer görevi sağlayarak bileşenlerin oksitlenme (oksidasyon) oranını azaltır (Evans, vd., 2001; Khajezadeh, vd. 2018).

Seramik üst kaplama uygulanmadan önce TGO bağ kaplama yüzeyinde makul koşullarda 2-3  $\mu m$  olarak büyümektedir. Bu kalınlık aralığında oluşan oksit tabakası istenilen bir durumdur ve üst kaplamanın yapışmasına yardımcı olur (Özgürlük, 2016). Yüksek sıcaklıkta oksidasyon sırasında YSZ ve metalik bağ arasındaki arayüzde TGO tabakası arttığı zaman iç gerilmeler meydana gelir (Jayaraj, vd., 2004). TBC sisteminde hasar mekanizmalarını incelediğimizde çoğu zaman hasarların termal olarak büyüyen oksit tabakasından kaynaklandığı görülmektedir. Yapılan bazı araştırmalarda TBC' deki başarısızlığın, TGO katmanının kalınlığının kritik bir kalınlık aralığı olan 3-10  $\mu m$ ' ye ulaştığında ortaya çıktığı varsayılmıştır (Li, vd., 2012). Üst tabakada yüksek sıcaklık sonucunda oluşan mekanik özellik değişimleri, ısıl genleşme uyumsuzlukları, ısıl iletim katsayısı değişiklikleri ve motorun içindeki kimyasal etkileşimler ile birleşerek TBC' lerin hasara uğramasını daha da kaçınılmaz yapar (Karaoğlanlı, vd., 2014).

TGO katmanı ve üst kat arasındaki arayüz bölgesindeki oksitler parçalamaya ve ayrılma işleminde çok önemli bir role sahiptir. TGO katmanının istenilen boyutu aşması arayüz bölgesinde gerilmelerin oluşmasına neden olmaktadır. Bu gerilmelerin oluşumunda ise iki ana etken bulunmaktadır. Bunlardan ilki soğuma esnasında metalik bağ kaplama ile seramik üst kaplama arasındaki termo-mekanik uyumsuzluktan dolayı meydana gelmektedir. Bu uyumsuzluk sonucunda TGO tabakasında kalıntı basma gerilmeleri oluşmaktadır. Gerilmelerin artmasıyla da TGO tabakasının bulunduğu bölgelerde üst tabakadan ayrılmalar gerçekleşmektedir. İkincisi ise çalışma esnasında meydana gelen ısınma ile TGO katmanının büyümesi sonucu, arayüzde oluşan hacimsel genleşmeden dolayı meydana gelmektedir.

Arayüz gerilimi kritik bir değere ulaştığında ise çatlak oluşur ve yayılmaya başlar (Ajdelsztajn, vd., 2002; Döleker, 2015).

#### **2.4.4 Termal Bariyer Kaplamalarda Karşılaşılan Hasar Mekanizmaları**

TBC' ler birçok çevresel etkiye maruz kalmaktadır. Dolayısıyla çalışma şartları altında hasar oluşmasına neden olan birçok etken bulunmaktadır. Bunlardan bir veya birkaçının kombinasyonları sonucu hasar oluşumları meydana gelmektedir. Kullanım esnasında oluşan çevresel etkilerin bazılarını şu şekilde sıralayabiliriz:

- Termal şok
- CMAS (CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>) atağı
- Oksidasyon
- Sıcak korozyon
- Elektrokimyasal korozyon
- Termo-mekanik hasarlar
- Sürtünme ve aşınma
- Erozyon
- Kimyasal hasar
- Üst kaplamanın sinterlenmesi (URL-4, 2019).

TBC' lerin, türbin hava kanatlarında uygulanabilir olması için çevresel ve mekanik hasarlara karşı koyarak kalkan görevi sağlamaları gerekir. Meydana gelebilecek hasarlar hakkında bir tahmin yürütebilmek için hasar mekanizmalarının anlaşılması, TBC' lerin ömürleri hakkında kesin bir bilgi vermese de tahmin edilebilir kılmak için önemlidir (Strangman, vd., 2007; Kaplan, 2017). TBC sisteminde gerçekleşen hasar mekanizmaları içerisinde en etkin rolü TGO odaklı hasarlar oluşturmaktadır. Bu mekanizmalar yüksek sıcaklığın oluşturduğu etki ile üst kaplama tabakasında vuku bulan mekanik özellik değişimlerine, ısıl genleşme uyumsuzluklarına, ısıl iletim katsayısı değişikliklerine ve motorun içindeki kimyasal etkileşimlerine neden olarak TBC' leri daha hızlı bir şekilde hasara uğratmaktadır (Karaoğlanlı, vd., 2014).

Tez çalışmasının bu bölümünde; oksidasyon, sıcak korozyon, termal şok, CMAS, elektrokimyasal korozyon odaklı hasarlar ayrıntılı olarak açıklanacaktır.

#### 2.4.4.1 TBC' lerin Oksidasyon Davranışı

Gaz türbinli motorların sıcak bölüm bileşenleri üzerinde ısıya dayanıklı ve koruyucu tabakalar olarak yaygın olarak kullanılan TBC' lerde, bağ katman ve üst katman arasında TGO katmanı oluşur. TBC' lerin gözenekli olması oksijen geçirgenliğine izin verdiğinden, TGO oluşumu kaçınılmazdır. Bağ kaplamasındaki yüksek gözenekler TGO oluşumuna müsaade ederken tabakanın artmasıyla da TBC' leri hasara uğratan oksidasyonu da beraberinde getirecektir. Metalik malzemelerin yüksek sıcaklıklarda oksijene maruz kalmasıyla oluşan oksidasyon sonucunda metalik elementler oksitlenmektedir. Oksidasyonda zamanla artış olacağından yapı içerisinde bulunan alüminyum difüzyona uğrayacak ve büyümesi artarak alüminadan oluşan TGO oluşmasına sebebiyet vererek kalınlığı artıracaktır. Kalınlaşmayla daha kararlı hale gelen TGO' da  $\alpha$ - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tabakası bağ kaplamadaki alüminyum içeriğinin tükenmesiyle bozulacak ve TGO yapısında Cr ve Co gibi farklı metallerin de oksitlenmesiyle karışık oksitler oluşmaya başlayacaktır. Yapının bu şekilde bozulması nedeniyle kaplama ara yüzeyinde gerilmeler meydana gelecek, bağ ile üst kaplama ara yüzeylerinde ayrılmalar oluşmaya başlayacaktır (Eliaz, vd., 2002; Döleker 2015; Özgürlük, 2016; Kaplan, 2017).

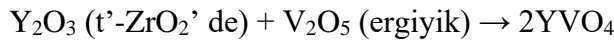
Bir metalin oksitlenmesi için gereken termodinamik açıklamada Gibbs serbest enerjisinden yararlanılmaktadır. Ellingham diyagramına bakıldığında sıcaklığın oksidasyonda büyük etkiye sahip olduğu görülmektedir. Sıcaklığın artmasıyla oksitlenme kolaylaşırken, oksitlerin kararlılıklarının da azaldığı görülmektedir (Döleker, 2018).

TBC sistemlerinin başarısızlığının nedenlerinden biri olan MCrAlY esaslı termal püskürtmeli bağ kaplamaların yüksek sıcaklık oksidasyonunun oluşum nedeni, oksit büyümesiyle indüklenen stresler, TGO - bağ kaplama/üst kaplama arasındaki termal genleşme hatası ve Al kritik seviyenin altına düştüğü anda hızla büyüyen Ni-Co-Cr oksitlerin oluşumudur (Pulci, vd., 2015).

#### 2.4.4.2 Sıcak Korozyon

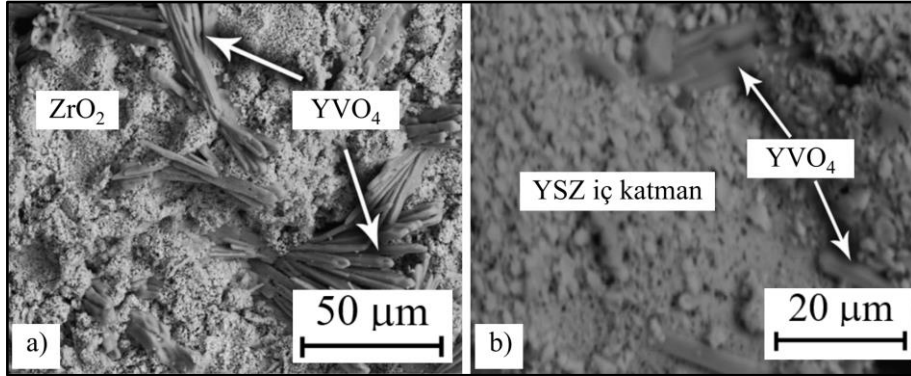
Gaz türbinlerinde istenilen verimi elde etmek için gaz giriş sıcaklıklarını ciddi derecede artırmak gerekmektedir. Bu yüzden modern aero, denizcilik ve endüstriyel gaz türbinlerinde kullanılan kanatlar çalışma ortamında oldukça yüksek sıcaklığa ve stres koşullarına maruz kalmakta ve korozyona uğramaktadır. Özellikle denizcilik uygulamalarında yakıttan gelen kükürt ve sodyum, deniz suyunda çevrenin agresifliği ile önemli hasarlara sebep olmaktadır. Bundan dolayı gaz türbini motorunun verimliliği için, süper alaşımların sıcak korozyon direnci oldukça önemli bir konudur (Gurrappa ve Sambasiva Rao, 2006).

Türbinlerde kullanılan yakıtların kirliliği nedeniyle yüksek sıcaklıklarda kaplamalarda oluşan reaksiyonlar yapının çatlamasına, bozulmasına ve dökülmesine yol açar. Kaplamaların seramik üst katmanından dolayı oluşan bu hasar mekanizmasına sıcak korozyon denilmektedir. Özellikle kullanılan yakıtın istenilen kaliteden daha düşük olup sodyum (Na), fosfor (P), vanadyum (V), kurşun (Pb) gibi empüriteler içermesi ve bunların oksitli ergimiş  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ve  $\text{V}_2\text{O}_5$  tuzlarının kaplamanın üst katmanındaki porozite ve mikroçatlaklardan sızması bu hasar türünü açığa çıkartmaktadır. Böylece servis koşullarında bu elementler itriya ile stabilize edilerek kararlı hale getirilmiş zirkonya üst kaplama tabakasının yapısını değiştirerek tetragonal veya kübik fazın monoklinik faza dönüşmesine sebebiyet vermektedir. Bu oluşumu gösteren reaksiyon Eşitlik 1 ve 2 de verilmiştir (Nejati, vd., 2014; Gök, 2015). Ayrıca itriya ile stabilize edilerek kararlı hale getirilmiş zirkonya üst kaplama tabakasında korozyon etkisi ile meydana gelen monoklinik  $\text{ZrO}_2$  ve  $\text{YVO}_4$  kristalleri elastik modülün ve sertliğin artmasına sebebiyet vererek hacim artışına yol açmaktadır (Parlakıyığıt, 2013).



YSZ' den ayrılan  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ' ün tuzlarla verdiği bu reaksiyon sonucunda yapıda oluşan hacimsel değişiklikler üst kaplamada ayrılmalara neden olmaktadır. Üst katmanındaki porozite ve mikroçatlaklardan sızan  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ve  $\text{V}_2\text{O}_5$  tuzları bağ kaplamaya kadar ilerleyerek bağ kaplamanın oksidasyonunu hızlandırmakta, TGO yapısını olumsuz yönde etkilemektedir.

Ayrıca ergimiş halde olan bu tuzlar iyonik olmasından dolayı metal ile iç kısımlara ilerleyen ergiyikler arasında elektro-kimyasal reaksiyonlar oluşturmaktadır. 700 °C’ lerde meydana gelen altlık metalin oksidasyonu, anodik olması nedeniyle bağ kaplama ve altlıkta ileri boyutlarda hasar oluşumuna sebebiyet vermektedir (Döleker, 2015; Özgürlük, 2016). Şekil 2.24’ de sıcak korozyon etkisiyle üst kaplamada meydana gelen  $ZrO_2$  ve  $YVO_4$  kristalleri görülmektedir (Afrasiabi ve Kobayashi, 2013).



Şekil 2.24: Sıcak korozyon etkisiyle meydana gelen  $ZrO_2$  ve  $YVO_4$  kristalleri (Afrasiabi ve Kobayashi, 2013).

TBC’ lerde yapılan bazı çalışmalarda sıcak korozyon direncini artırmak için farklı yöntemlerin de kullanılabileceği vurgulanmıştır. Bunları sıralayacak olursak;

- Kaplama içine sızan tuzları azaltmak için lazer yöntemiyle yeniden ergitme yapılarak porozitesiz ve yoğun tabaka sağlamak
- YSZ katmanının yüzeyinde yoğun bir  $Al_2O_3$  tabakasının uygun tekniklerle biriktirilmesi
- Daha dirençli özelliğe sahip  $Sc_2O_3$ ,  $In_2O_3$  ve  $CeO_2$  gibi stabilizörlerin kullanılması (Afrasiabi, vd., 2008).

Sıcak korozyon hasar mekanizması günümüzde “yüksek sıcaklık sıcak korozyonu” (Tip-1) ve “düşük sıcaklık sıcak korozyonu” (Tip-2) olmak üzere korozyonun tipine ve oluşum sıcaklığına göre iki farklı kısımda ele alınmaktadır (Özgürlük vd., 2018). Tip-1 sıcak korozyonu 800-950 °C sıcaklıklar arasında gerçekleşmektedir. Tip-2 sıcak korozyonu ise 600 °C ile 750 °C sıcaklıkları arasında gerçekleşmektedir. Tip-2 sıcak korozyonunu ayırt etmek diğer korozyon tipine göre daha zordur. Bu korozyon tipi daha düşük sıcaklıklarda

oluşmasından dolayı fark edilmesi noktasında oldukça hassastır ve çok az çatlaklı ya da dahili çatlaksız oyuklanma şeklinde tanınmaktadır (Injeti, 2015; Döleker, 2015).

Kullanılan çalışma parçasının yüzeyinde metallerin ergimesi yüksek sıcaklık korozyonunun (Tip-1) oluşumunu başlatmaktadır. Bu olgu ile gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar sonucunda koruyucu oksit filmi oluşuyorken kromun azalmaya başladığı görülmektedir. Bu azalmadan sonra oksit tabakasında bozunma gerçekleşmektedir. Yanmanın gerçekleştiği anda termodinamik olarak yüksek kararlılığa sahip sodyum sülfat oluşarak yakıtı karışmaktadır ve böylece hasarın oluşma aşamaları başlamaktadır. Dört aşamada gerçekleşen sıcak korozyon hasarı aşamalarının tamamlanmasıyla parçanın yüzeyinden derinliklere kadar ilerlemektedir. Bu hasar mekanizması metal soyulmaları ve metal renginin grimsi tona dönüşmesiyle de karakterize edilebilmektedir (Li, vd., 2018; Özgürlük, 2016).

Daha düşük sıcaklıklarda meydana gelen düşük sıcaklık sıcak korozyonuna (Tip-2) genellikle deniz endüstrisinde ve endüstriyel gaz türbinlerinde karşılaşılmaktadır. Bu korozyon tipinde  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  tam erimeyerek yüzeyde katı halde kalmaktadır. Bununla beraber  $\text{NiSO}_4$  veya  $\text{CoSO}_4$ ' ün oluşması, alaşımlardan yapılmış olan kanatçıkların yüzeyindeki  $\text{NiO}$  veya  $\text{CoO}$ ' in gazdaki  $\text{SO}_3$  ile reaksiyona girmesiyle meydana gelmektedir. Bu reaksiyon sonucunda  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ - $\text{CoSO}_4$  ötektiklerinin dönüşümü oluşmakta ve çukurlar şeklinde lokalize saldırılara (pitting korozyonu) neden olmaktadır (Nesbitt ve Draper, 2016).

Süper alaşımların sıcak korozyon direncini belirli oranlardaki Co ve Cr etkilemektedir. Özellikle Cr istenilen miktarın dışına çıkılmadığı sürece, düşük sıcak korozyon direncini oldukça arttırmaktadır (Injeti, 2015).

#### **2.4.4.3 Termal Şok**

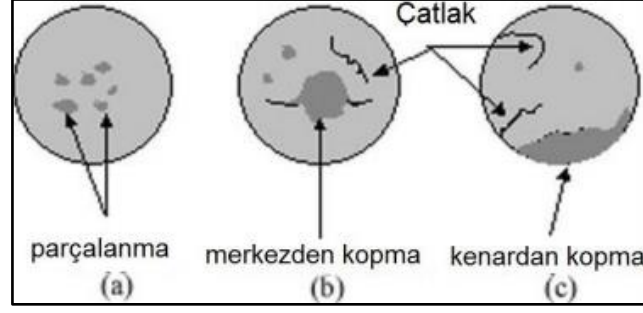
Belirli bir sıcaklığa maruz kalmış malzemelerin aniden soğutulmasıyla yapıda gerilmeler oluşmaktadır. Sıcaklık farklılığından dolayı oluşan bu gerilmeler malzemelerde çatlak oluşumu gibi hasarlara neden olmaktadır. Bu olaya termal şok denilmektedir. Termal şok direnci malzemenin termal genleşme katsayısı, termal iletkenlik katsayısı, elastik modülü, kırılma, mukavemet, iç yapıda meydana gelen faz dönüşümleri gibi bir takım niceliklere bağlıdır. Bu anlamda termal şoka karşı en az direnç gösteren malzeme grubu seramikler



olarak bilinmektedir (Meşekıran, 2015). Servis esnasında, motorun çalıştırılması ve durdurulması da termal şok oluşumuna sebebiyet vererek türbin kanatlarının arızalanmasına neden olmaktadır (Zhang, vd., 2019).

PS yöntemi kullanılarak üretilen seramik üst kaplamalar çoğunlukla %3-20 oranında poroziteye sahiptir. Bu durumda porozite oranının yüksek olması termal iletkenliği azaltarak bir avantaj haline gelir. Kaplamada ki porozite miktarının artması kalıntı gerilmeyi azaltmaktadır. Hasar mekanizmalarının hepsi kaplamaların mikro yapısal özelliklerinden etkilenmektedir. PS yönteminin karakteristik özelliği gereği mikro yapılarda bulunan splatlar, çatlaklar, poroziteler, lameller arası gözenekler TBC sistemlerinin termal çevrim/şok davranışı ve performansına direkt olarak etki etmektedir (Kaplan, 2017). Yüksek sıcaklıklara çıkıldığında seramik tabakada splat lamelleri arasında dökülmeler olur. PS yönteminin uygulanma anında splatlar hızlı katılaşma sergileyerek splat lamelleri arasında çekme gerilmelerine neden olur. Oluşan bu gerilmeler belirli bir düzeyin üzerine çıktıktan sonra kaplamanın dikey kesiti boyunca uzanan lameller arası ve lameller içi çatlaklar oluşturmaktadır. Altlıkta artan sıcaklıklar yatay çatlak oluşumlarını kısıtlayarak dikey çatlak oluşumunu artırmaktadır. Oluşan dikey çatlaklar segmentasyon çatlağı olarak adlandırılır ve kaplamaların termal şok performansını iyileştirir. Fakat yatay çatlak kaplamaların termal şok ömrünü kısaltmaktadır (Altuncu, 2011).

TBC' lerde termal şok esnasında üç farklı hasar mekanizmasına rastlanmaktadır. Bu hasarlardan ilki parçalanma olarak bilinir ve kaplamanın orta kısımlarından küçük parçalar şeklinde ayrılmalara sebebiyet verir. İkincisi merkezden kopma olarak bilinir ve yüzey çatlaklarına, büyük parçaların merkezden ayrılmasına sebebiyet verir. Sonuncusu ise kenardan ayrılmadır ve seramik üst katmanın kenar bölgelerinden büyük parçaların ayrılmasına sebebiyet vererek hasarı iç kısımlara doğru iletir. En çok karşılaşılan hasarlar mekanizması kenardan kopma olarak belirtilmektedir. Şekil 2.25' de Termal şok testinde hasar modlarının şematik gösterimi verilmiştir (Gök, 2015).



Şekil 2.25: Termal şok testinde hasar modlarının şematik gösterimi (Gök, 2015).

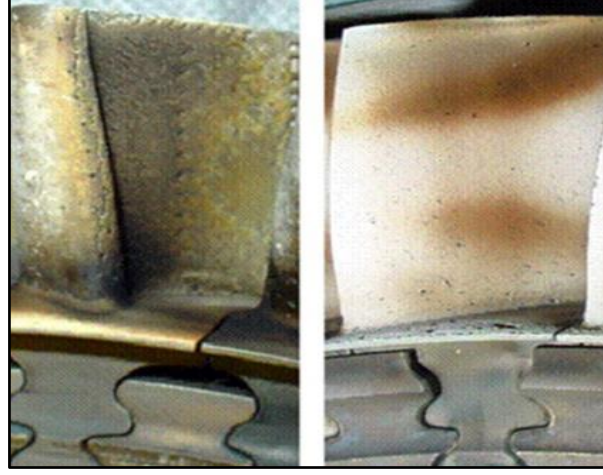
Sonuç olarak türbin bıçakları ve kanatçıklarında APS prosesi kullanılarak seramik üst kaplamalar üretilmektedir. Çalışma şartlarından dolayı TBC' ler termal şoka maruz kalmaktadır. APS prosesi ile üretilen parçaların, kullanıldığı yüksek termal yükleme koşullarında yüksek termal şok direncine sahip olması istenilmektedir. Çünkü APS kaplamalar, termal şok çevrimleri anında meydana gelen gerilmelerin etkisi ile üst kaplamanın yüzeyden ayrılması sonucunda hasara uğramaktadır (Kaplan, 2017).

Sıcaklığın yüksek olduğu durumlarda üst kaplama ile altlık malzeme arasında oluşan termal genleşme farkından dolayı çekme gerilmeleri meydana gelmektedir. Bu gerilmelerin minimum seviyelere indirilmesi için poroziteli kaplama kullanımı tercih edilen yaklaşımlardan biridir. Önceden olan gerilmeler ısıtma esnasında giderilirken, hızlı soğuma anında meydana gelen basma gerilmeleri çatlakların daha da büyümesine sebep olacağından kaplamada hasar mevcut olacaktır (Döleker, 2018).

#### 2.4.4.4 CMAS (CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>) Hasarı

Çalışma sıcaklıklarının artmasıyla, CMAS (kalsiyum-magnezyum-alümina-silikat) TBC' lerin bozulmasında bir etken olup, yeni bir sorun haline gelmiştir. Bu yüzden TBC' lerde dirençli kaplamalar elde edebilmek için kaplama malzemeleri ve CMAS arasındaki yüksek sıcaklık etkileşimlerini dikkate almak gerekmektedir (Ahlborg ve Zhu, 2013; Xia, vd., 2019). Motorların çalışma sıcaklığındaki bu artış, çevreden alınan ince taneciklerin adsorpsiyonundan (yüzeye tutunmasından) kaynaklanan silikat birikintilerini eriterek TBC' lerin parçalanmasına sebep olmaktadır. Biriken silikat camındaki ana bileşenlerden dolayı, bu olgu genel olarak CMAS saldırısı olarak adlandırılır. Bundan dolayı CMAS saldırısının azaltılması TBC' ler için önemli bir ihtiyaçtır (Clarke, vd., 2012; Lakiza, vd., 2018).

CMAS, çevresel birikimin oluşturduğu havada asılı olan kum, toz, kaya, volkanik kül gibi küçük partiküllerdir. Bu küçük CMAS partikülleri yüksek yanma sıcaklıklarında çalışma esnasında motora erişerek türbin bölümünde kademeli olarak birikme yapmaktadır. Biriken ve yüzeye yapışan bu CMAS' ların içerisindeki elementler; boşluklar, çatlaklar ve gözeneklerden yavaşça TBC' ye nüfuz ederler. CMAS' ın YSZ ile etkileşimiyle camsı soda-silikat fazı oluşur. Sızan bu elementler daha sonra soğuyarak kaplamayı sertleştirir ve üst katmanın gerilme toleransını büyük ölçüde azaltır. Termal çevrimler sırasında camsı soda-silikat fazı ile YSZ arasında oluşan ısıl genişleme farkıyla birlikte uzama toleransının azalmasıyla da çatlaklar oluşarak hasar gerçekleşmektedir. Bu durum TBC' nin kimyasal olarak ve mekanik olarak bütünlüğünü bozmaktadır (Karaoğlanlı, 2012; Xia, vd., 2019). Yüksek sıcaklıklarda YSZ' nin, CMAS tarafından kısmen çözülmesi mikroyapının bozulmasına ve faz dönüşümüne neden olmaktadır (Mack, vd., 2017). Eğer CMAS partikülleri TBC' lere düşük sıcaklıkta ve partiküllerin erime noktasının altındaki sıcaklıklarda temas ederse de aşınmaya, erozyona, soğutma deliklerinin bloke edilmesine veya bölgesel ayrılmalara neden olmaktadır. YSZ TBC' lerde, TBC' ye katı bir solüsyon şeklinde  $Al_2O_3$  ve/veya  $TiO_2$ ' nin ilave edilmesi CMAS' ın nüfuz etmesini etkili bir şekilde durdurmaktadır. Yine son zamanlardan yapılan çalışmalarda  $Gd_2Zr_2O_7$  TBC' lerde, yüksek sıcaklıkta GZ ile ergimiş CMAS' ın kimyasal etkileşime girmesi ile kristalin  $Ca_2Gd_8(SiO_4)_6O_2$  fazından bir sızdırmazlık katmanı oluşturduğu görülmüştür. Böylece kaplama boyunca bir termal gradyan olmasa bile CMAS sızmasını büyük ölçüde engellemektedir (Steinke, vd., 2010; Gao, vd., 2014). Şekil 2.26' da yanma gazlarının içindeki CMAS toz partiküllerinin uçak kanadı yüzeylerinde birikme oluşturarak hasara sebep olduğu görülmektedir (Strangman, vd., 2007).



Şekil 2.26: CMAS toz parçacıklarının, türbin kanatlarının ön kenarında ve basınç yüzeylerinde (solda) birikmesini gösteren temsili resim (Strangman, vd., 2007).

#### 2.4.4.5 Elektrokimyasal Korozyon

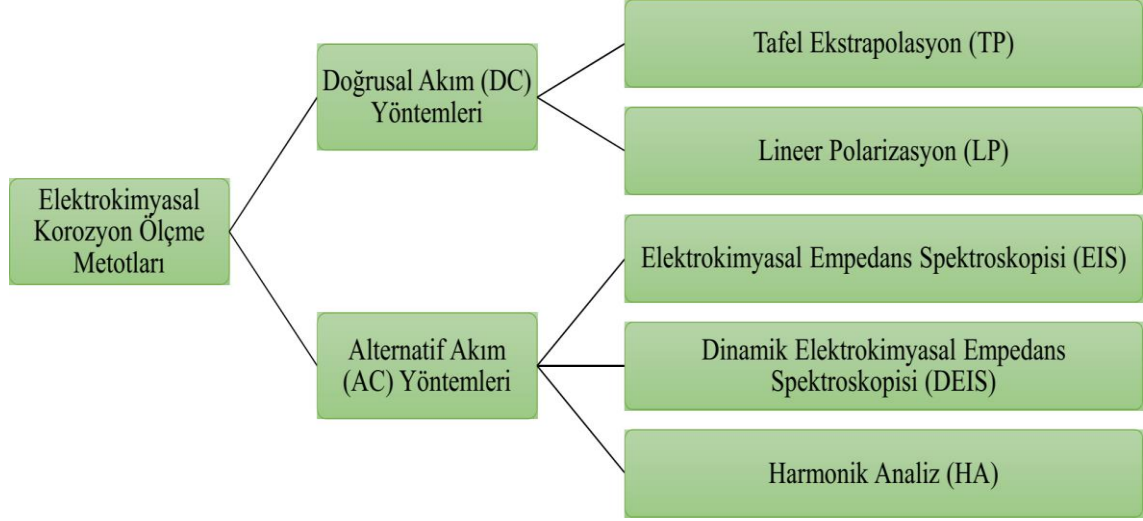
Kuru korozyon metallerin yüksek sıcaklıklarda ortamda bulunan oksijen, halojenler ve kükürt dioksitle reaksiyona girerek oksitlenmesiyle oluşmaktadır. Elektrokimyasal korozyon ise metal/çözelti ara yüzünde atmosfer, toprak vb. sulu ortamlarda oluşmaktadır. Fakat her iki korozyon türünde de mekanizma elektrokimyasaldır (Küyükoğlu, 2010). Gaz türbini motorları şu anda okyanusun yakınlarında, denizel ortamlarda da çalışmaktadır ve burada NaCl, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> gibi tuz buharı türbin kanatlarının yüzeyine birikmeler yapmaktadır. Sulu ortamlarda karşılaşılan hasar mekanizması elektrokimyasal olduğundan, elektrokimyasal korozyon testlerinin yapılması böyle korozif ortamda çalışan bir malzemenin incelenmesi için büyük bir alternatiftir (Chao, v.d., 2011).

Sulu ortamda oluşan metallerin korozyonu elektrokimyasal olarak bulunmuş ve bundan itibaren korozyon izlenmesinde ve korozyon mekanizmasının açıklığa kavuşmasında elektrokimyasal yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemin uygulanması son 70 yılda araştırma konusu olmuş ve birçok korozyon ölçüm yöntemlerinin uygulanmış olmasına rağmen tam anlamıyla yeterlilik sağlanamamıştır. Bu anlamda yapılan çalışmalar hala devam etmekte ve metalik parçaların korozyonunun en kolay, en hızlı ve en hassas metotla doğru bir şekilde hesaplanması araştırılmaktadır. Bu araştırmaların sağlayacağı en önemli avantaj ise korozyona maruz kalan malzemenin an ve an korozyon hızının saptanması ve bu sayede oluşabilecek önemli aksaklıkların önüne geçmektir (Bereket ve Gerengi, 2015).

Elektrokimya, bir elektrik iletken olan elektrot ile bir iyon iletken olan elektrolit arasındaki arayüzde elektron ( $e^-$ ) aktarımını içeren kimyasal reaksiyonların incelenmesidir. Elektrokimya, bir arayüz bilimi olarak değerlendirilmektedir. Metal bir yüzeyde bir elektrokimyasal reaksiyon meydana gelirse, bu metal bozulmasına veya kaybına yol açarak onları kullanılmaz hale getirmektedir. Bir oksidasyon reaksiyonu  $M \rightarrow Mz^+ + ze^-$  ile temsil edilen bu elektrokimyasal işleme korozyon denir. Bu oksidasyon reaksiyonu, M' nin  $ze^-$  elektronlarını ara yüze kaybettiği anlamına gelmektedir. Sonuç olarak, M, pozitif bir elektrik yüküne sahip olan bir katyon olarak bilinen metalik bir iyon  $Mz^+$  olur.

Korozyon, agresif bir ortamda malzeme veya metal bozulması veya yüzey hasarı anlamına gelmektedir. Metalik korozyon, metalin çevreye elektron transfer ettiği bir elektrokimyasal oksidasyon işlemidir. Ortam bir sıvı, gaz veya hibrit toprak sıvısından oluşmaktadır. Bu ortamlara, iyonik transfer için kendi iletkenliklerine sahip olduklarından dolayı elektrolitler denilmektedir. Bir elektrolit, sırasıyla katyonlar ve anyonlar olarak adlandırılan pozitif ve negatif yüklü iyonları içeren iletken bir çözeltiye benzerdir. Bir veya daha fazla dış elektronu kaybetmiş veya kazanmış ve elektrik yükü taşıyan bir atoma da iyon denilmektedir. Kısmi olan bu reaksiyonlar anodik ve katodik reaksiyonlar olarak sınıflandırılmaktadır (Perez, 2016).

Korozyon hızı metalin ne kadar sürede ve ne kadar çözündüğü ile alakalıdır ve doğrudan belirlenmesi mümkün değildir. Bu yüzden korozyon hızı farklı ve dolaylı yollardan belirlenmeye çalışılır. Korozyonun nasıl bir biçimde olduğu, ne kadar sürede korozyonun gerçekleştiği gibi etmenler çevre şartlarına ve birçok faktöre göre değişmektedir (Barut, 2018). Malzemelerin korozyon özelliklerinin belirlenmesinde birden fazla metot kullanılmaktadır. Bunların içerisinde en çok kullanılan ve tercih edilen metot ise elektrokimyasal deneylerdir. Yine ağırlık kaybı yöntemi, tuz püskürtme testi gibi metotlarda korozyon özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan diğer metotlar arasındadır (Topal, 2007; Kocabaş, 2017; Barut, 2018). Şekil 2.27' de korozyonun ölçülmesinde tercih edilen elektrokimyasal metotlar görülmektedir (Bereket ve Gerengi, 2015).



Şekil 2.27: Korozyonun ölçülmesinde tercih edilen elektrokimyasal metotlar (Bereket ve Gerengi, 2015).

Korozyon elektrokimyasal bir olaydır. Bu yüzden korozyon hızının belirlenmesinde elektrokimyasal yöntem kısa sürede gerçekleşen bir alternatiftir. Korozyon hızının bilinmesi, korozif ortamda çalışan bir malzeme için korozyona karşı alınması gereken tedbirler açısından oldukça önemlidir. Korozyon hızı maddenin birim zamandaki çözünme hızı olarak tanımlanmaktadır. Yerel korozyon durumlarında ise bu hız çukurun derinliği olarak tanımlanmaktadır. Tafel ekstrapolasyon, lineer polarizasyon ve elektrokimyasal empedans yöntemleri korozyon hızının belirlenmesinde çoğunlukla tercih edilmektedir. Bu tez çalışmasında, bahsedilen metotlar arasından elektrokimyasal deneyler yapılmak üzere seçilmiştir. Referans ve karşıt elektrotların cinsi, uygulanan akım, deney çözelti bileşimi, çözelti pH'ı, çözeltinin karıştırma hızı ve sıcaklığı gibi değişkenler deneylerin sonuçlanmasında belirleyici etkenlerdir (Topal, 2007; Kocabaş, 2017; Barut, 2018).

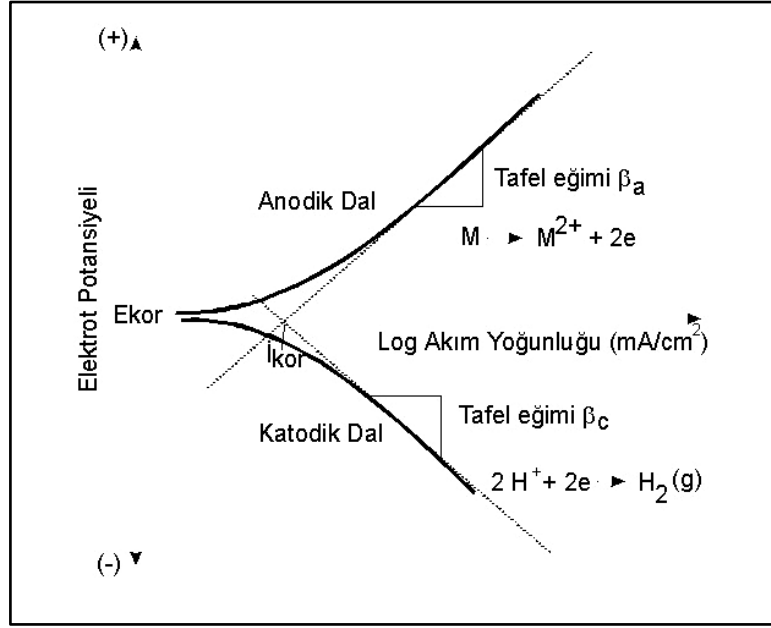
Elektrokimyasal empedans spektroskopisi ve potansiyodinamik polarizasyon yöntemleri korozyon davranışlarının belirlenmesinde kullanılmaktadır. Bir metalin (M) elektrokimyasal davranışını incelerken, bir elektrik devresini tamamlamak için kabloya bağlı en az iki elektrot bulunan bir elektrokimyasal hücreye ihtiyaç gerekmektedir. Elektrokimyasal hücreler iki elektrotlu, üç elektrotlu ve dört elektrotlu olmak üzere üç farklı şekilde sınıflandırılmaktadır. İki elektrotlu sistemin düzeneği bir çalışma elektrotu ile referans elektrottan oluşmaktadır. Eğer referans elektrot uygun seçilirse, elektrotun potansiyeli çözülden akım geçmesiyle değişim sergilemez. Fakat bazı durumlarda çalışma

elektrotunun potansiyeli özellikle çözelti direncinden dolayı değişim sergilemektedir. Bu değişimin olmaması için direnci düşük çözeltinin kullanılmaması veya elektrotun birbirine çok yakın yerleştirilmesi gerekmektedir. Bu tarz sorunlara karşı elektrokimyasal hücrelerde üç elektrotlu sistemler geliştirilmiştir. Üç elektrotlu sistemin düzeneği çalışma elektrotu, referans elektrot ve karşıt elektrottan oluşmaktadır. Üç elektrotlu hücreler, çalışma elektrotu ve referans elektrotun yerleştirilmesinde oldukça esnek imkan sağlamaktadır. Akımın referans elektrot üzerinden geçmemesi bu sistem için bir avantaj sağlamaktadır (Öztekin, 2008). Akımın anot ve katot arasında ilerlemesiyle elektrot potansiyelinde bir değişiklik oluşur. Bu değişim sayesinde denge potansiyeli, yani korozyon potansiyeli ve korozyon akım yoğunluğu ölçülebilmektedir. Akım-potansiyel eğrilerinin ve korozyon potansiyelinin bilinmesi korozyon akımının belirlenmesinde rol oynar. Grafik yardımıyla yarı logaritmik ölçekte çizilen akım-potansiyel eğrilerinde, akım veya potansiyelden birinin kontrollü olarak değiştirilmesine bağlı olarak diğerinin değerleri elde edilir. Bu eğriler yardımıyla da korozyon hızı uygun metotlarla belirlenmektedir. Elektrokimyasal yöntem korozyon potansiyelini ( $E_{kor}$ ) ölçmek için uygulanması en kolay yöntemdir.  $E_{kor}$ ' u belirlemek için lazım olanlar kararlı referans elektrot ve multimetredir (Topal, 2007). Ayrıca birçok küçük korozyon hızları elektrokimyasal yöntemlerle belirlenerek uygulamaya bir avantaj sağlamaktadır.

#### **2.4.4.5.1 Tafel Ekstrapolasyon Yöntemi**

Çözelti ve metal arasında iki elektrokimyasal reaksiyonun denge haline ulaşması sonucu korozyon oluşmaktadır. Korozyona maruz kalmış metaller için anodik ve katodik polarizasyon eğrileri deneysel olarak belirlenmektedir. Anodik reaksiyon metalin çözünmesiyle oluşurken, katodik reaksiyon da çözeltinin bulunduğu yerde olan  $O_2$  veya  $H^+$  'ın indirgenmesiyle oluşmaktadır. Böylece anodik ve katodik olmak üzere farklı yönlerde elde edilen yarı logaritmik olan akım-potansiyel eğrilerinin, lineer bölgelerinden uzatılarak oluşturulan kesişim noktasının korozyon potansiyeline ekstrapole edilmesiyle korozyon akımı ve korozyon potansiyeli bulunmaktadır. Korozyon akımının bulunduğu bölgede, dış akımın logaritması aşırı gerilim uygulanmasıyla lineer olarak değişmektedir. Bu bölge Tafel bölgesi olarak isimlendirilmektedir. Korozyonun olduğu bir elektrotta anodik ve katodik reaksiyonlar elektrot yüzeyinde aynı anda ilerlemektedir. Böylece elektrot potansiyeli karma potansiyel değerleri olarak tanımlanan  $E_{kor}$  değerine ulaşmaktadır. Korozyon akım

yoğunluğu ( $i_{kor}$ ) da bu potansiyele karşı gelen akım olarak tanımlanmaktadır. Eğer indirgenme reaksiyonu birkaç tane ise bu yöntem uygulanmaz. Ayrıca anodik ve katodik polarizasyon eğrileri birlikte oluşmadığında sadece birinin korozyon potansiyeline ekstrapole edilmesiyle korozyon akımı ve korozyon hızı bulunmamaktadır. Şekil 2.28’de  $i_{kor}$  un bulunmasını sağlayan anodik ve katodik polarizasyon eğrileri görülmektedir (Arı, 2008; Küstü, 2008; Barut, 2018).



Şekil 2.28: Anodik ve katodik polarizasyon eğrileri (Barut, 2018).

#### 2.4.4.5.2 Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi

Empedans spektroskopisi gaz türbin motorlarında sıcak ortamda çalışan parçalarda kullanılan TBC’lerin bozulmasını inceleyen bir yöntemdir. Bu yöntem TBC’lerin elektriksel özelliklerini, mikroyapı özellikleriyle ilişkilendirerek, kaplama başarısızlığının tahminine katkıda bulunmaktadır (Wang, vd., 2016). Elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS), bilhassa kaplaması uygulanmış elektrokimyasal korozyon sistemlerinin kinetiğini aydınlatmak ve metallerin korozyon davranışını karakterize etmek için etkili bir tekniktir. Anlık korozyon hızı ölçümleriyle korozyondaki ilerlemenin sürekli izlenmesiyle, elektrokimyasal bozulma reaksiyonları ve mekanizmaları hakkında bilgi vermesiyle büyük avantaj sağlamaktadır (Barranco, vd., 2004).



EIS, TBC' ler için kalınlık azalması, gözeneklilik oluşumu, TGO büyümesi, kusurların başlatılması ve iletkenlik olarak kaplama delaminasyonu gibi yapısal değişimlerinin tahribatsız olarak değerlendirilmesinde kullanılmaya başlanmıştır. Oda sıcaklığı EIS, gözenekli bir seramik üst katman, TGO, bağ katman ve süper alaşım altlıktan oluşan multi katmanlı TBC' lerde hasarı gözlemlenmede tercih edilmektedir (Byeon, vd., 2005; Baskaran ve Arya, 2018). Son zamanlarda özellikle TBC' lerde YSZ katındaki çatlakların etkisini, oksidasyon sırasında TGO' nun kalınlaşmasını ve kompozisyon değişikliklerini değerlendirmek için empedans spektroskopisi uygulanmıştır (Huang, vd., 2011).

Empedans spektroskopisi elektrokimyasal yöntemleri araştırmak için kullanılan tekniklerden biri olup, diğerlerinden farkı hem hacim araştırmalarında hem de dakikalardan ve mikro saniyelerden olan zaman sabitleriyle bağlantılı ara yüzey işlemlerinde kullanılabilir. Alternatif akım devrelerindeki toplam dirence empedans adı verilir. EIS metodunda ölçüm, uygulanan alternatif akım (AC) voltajını, bir malzemenin tepki akımına oranlayarak yapılmaktadır. Elektriksel tepki, çalışılan malzemenin fiziksel özelliklerinden dolayı AC voltajının sıklığına göre değişim sergilemektedir. Buna örnek olarak TBC' lerin YSZ kaplaması, TGO tabakası ve kusurlar gibi farklı bileşenlerine karşılık gelen empedans spektroskopisi verilebilir. Çünkü farklı frekans alanlarına sahiptirler. Bundan dolayı mikroyapı özellikleri empedans parametreleriyle alakalıdır ve TBC' lerin mikroyapı gelişimi empedans spektroskopisi ölçümü ile izlenmektedir. EIS metodu elektrokimyasal hücredeki uygulanan potansiyel, uygulanan akım veya hidrodinamik elektrotlarda konveksiyon hızı gibi parametrelere dayanmaktadır. Bu parametrelerdeki değişim küçük olduğu müddetçe sonuç doğrusal olmaktadır (Öztekın, 2008; Wang, vd., 2016).

Empedansın tepkisi sonucunda Bode ve Nyquist grafikleri oluşur ve değerleri, elektrokimyasal süreci etkileyen fiziksel özellikler ve mikro yapıyla ilgili olabilecek yapısal elemanlardan oluşan denk olabileceği düşünülen AC eşdeğer devresi ile özdeşleştirilmektedir (Byeon vd., 2005). Devrelerde genellikle bulunan devre elemanları dirençler, kapasitörler ve indüktörlerdir (Öztekın, 2008).

## BÖLÜM 3

### MATERYAL VE METOT

#### 3.1 Amaç

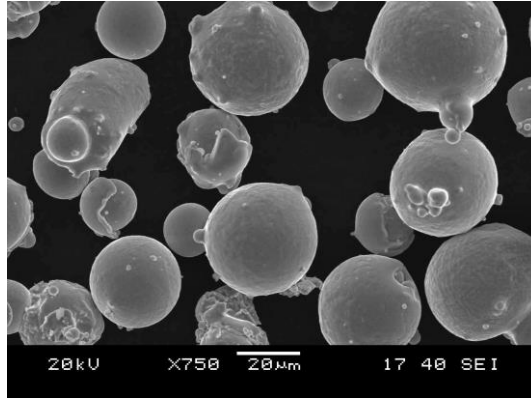
TBC'lerin elektrokimyasal korozyon davranışlarını gözlemlediğimiz bu çalışmada, kullanılan nikel bazlı Inconel 718 altlık malzemenin agresif çalışma ortamlarında kullanım ömrünün artırılması için uygulanan TBC'lerin etkisi gözlemlenmektedir. Nikel bazlı süper alaşım altlık malzeme olan Inconel 718'in yüzeyine 5 – 37 µm boyutlarında CoNiCrAlY (Amdry 9951, Sulzer Metco) içerikli metal tozları ile termal spreycaplama yöntemlerinden CGDS prosesi tercih edilerek metalik bağ üretimi gerçekleştirilmiştir. Numunelere uygulanmış olan metalik bağ kaplama tabakasının kalınlığı ortalama 100 µm değerindedir. Bağ kaplama işlemlerinin uygulanmasıyla numunenin üst yüzeyine -45 +20 µm boyutlarında ZrO<sub>2</sub> + %8 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (YSZ) (92/8, GTV) içerikli seramik bazlı tozlar ile ortalama 300 µm kalınlığında termal spreycaplama yöntemlerinden biri olan APS prosesiyle üst kaplama üretimi gerçekleştirilmiştir. Üst kaplama işlemi ardından üretimi gerçekleştirilen TBC numunesi, CoNiCrAlY bağlamaya sahip CGDS kaplama numunesi ve Inconel 718 süper alaşım altlık malzeme, NaCl çözeltisinde elektrokimyasal korozyon testlerine tabi tutulmuştur. Inconel 718 süper alaşım altlığın, CoNiCrAlY bağlamaya sahip CGDS kaplamanın ve YSZ üst kaplamaya sahip TBC sisteminin elektrokimyasal korozyon davranışının etkileri incelenerek, literatürdeki bilgilerle kıyaslanmıştır.

#### 3.2 Toz ve Altlık Malzemelerin Karakterize Edilmesi

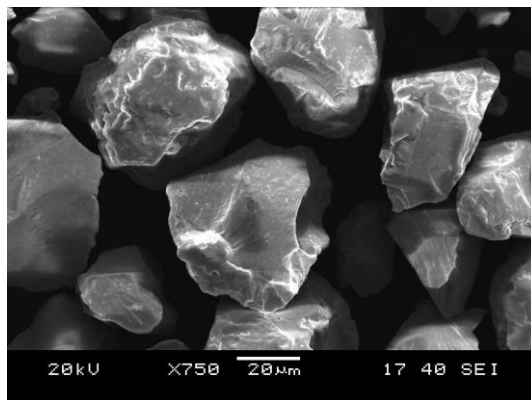
Deneysel çalışmalarda altlık malzeme olarak yüksek sıcaklık uygulamalarında mükemmel mekanik özelliklere sahip Ni esaslı bir süper alaşım olan Inconel 718 kullanılmıştır. TBC prosesinde üretimleri gerçekleştirilen kaplamalarda iki değişik toz kullanılmıştır. Bunlardan biri bağ kaplamaların üretilmesinde kullanılan tozlar CoNiCrAlY olup, Sulzer Metco firması tarafından sağlanarak partikül boyutları 5 ile 37 µm aralığında değişmektedir. Bir diğeri ise üst kaplamaların üretilmesinde kullanılan YSZ içerikli tozlar olup, GTV firması tarafından sağlanarak partikül boyutları +20 ile -45 µm aralığında değişmektedir.

### 3.2.1 Toz Malzemelerin Mikroyapı Olarak Karakterize Edilmesi

Deneysel çalışmada seçilen tozların mikroyapısal olarak karakterize edilmesi LEO 1455VP marka SEM cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Altlık Inconel 718 yüzeyine kaplanan CoNiCrAlY metalik bağ kaplama tozlarının ve seramik üst kaplama YSZ tozlarının mikroyapısı x750 büyütmeyle görüntülenmiş, tozların boyutlarının üretici firmanın verdiği aralık değerlerinde olduğu tespit edilmiştir. Şekil 3.1’ de metalik bağ kaplama tozlarının ve Şekil 3.2’ de YSZ tozlarının mikroyapı morfolojisi görülmektedir. Bu görüntülerden anlaşılacağı üzere CoNiCrAlY metalik bağ kaplama tozlarının sık aralıklarda ve küresel formda olduğu görülmektedir. YSZ kaplama tozlarının ise metalik bağ kaplama tozlarına nazaran daha düzlemsel formda olduğu görülmektedir.



Şekil 3.1: CoNiCrAlY içerikli metalik bağ kaplama tozlarının mikroyapısal görüntüleri



Şekil 3.2: YSZ kaplama tozlarının mikroyapısal görüntüleri

### 3.2.2 Altlık Malzemenin Kimyasal Bileşimi ve Özellikleri

Bu çalışmada seçilen nikel bazlı bir süper alaşım olan Inconel 718, iyi korozyon direncine, ortam sıcaklığında yüksek mukavemete, mükemmel sürünme ve yorulma dayanımına sahip, havacılık ve uzay sanayisinde yüksek sıcaklık uygulama alanlarında kullanılan bir malzemedir. Bu yüzden deneysel çalışmada altlık malzeme olarak Inconel 718 seçilmiştir. Tablo 3.1’ de bu çalışmada kullanılan Ni esaslı Inconel 718 alaşımına ait malzeme kompozisyonu verilmiştir. Tablo 3.1’ de ki verilerde Ni ve Cr miktarının malzemenin bünyesinde yüksek içeriğe sahip olduğu görülmektedir. Bundan dolayı Inconel 718 korozyona karşı dirençli bir malzemedir. Tablo 3.2’ de de Ni bazlı Inconel 718 malzemesine ait fiziksel verilmiştir (Özgürlük, 2016).

Tablo 3.1: Ni bazlı Inconel 718’ e ait kimyasal bileşim

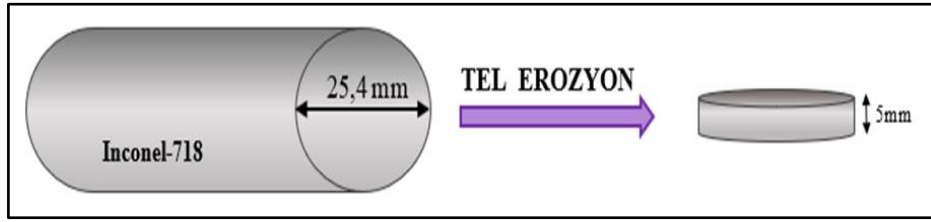
Inconel 718 Kimyasal Bileşim (% ağı.)							
Ni	Cr	Nb	Mo	Ti	Al	Co	Si
53,55	18,0	5,31	3,03	0,96	0,56	0,27	0,09
Cu	Mn	C	Ta	P	B	S	Fe
0,06	0,06	0,03	0,01	0,007	0,004	0,001	18,058

Tablo 3.2: Ni bazlı Inconel 718 malzemesinin fiziksel özellikleri (Özgürlük, 2016).

Fiziksel Özellikler	Değerler
Elektriksel Direnç	1250 n · m
Erime Noktası °F	1260-1336 °C
Öz ısı J/kg · K - Btu/lb · °F	435-0,104
Isıl İletkenlik w/m.k	11,4
Curie Sıcaklığı	-112 °C (-170 °F)
Ortalama Isısal Genleşme Sabiti $\mu\text{in./in.} \cdot ^\circ\text{F}$ - $\mu\text{m/m} \cdot \text{K}$	7,2-13,0
Yoğunluk $\text{gr/cm}^3$	8,5

Silindirik ve uzun çubuk formunda temin edilen altlık malzemelerin çapı 1 inç (25,4 mm)’ dir. Altlık malzeme farklı koşullarda elektrokimyasal korozyon testlerine tabi tutulacağından dolayı yaklaşık 5 mm kalınlıkta tel erozyon ile kesme metodu tercih edilerek disk şekline

getirilmiştir. Şekil 3.3’ de Inconel 718’ in tel erozyonda kesildikten sonraki temsili resmi verilmiştir.



Şekil 3.3: Silindirik biçimdeki altlığın tel erozyon yöntemi ile hazır hale getirilmesi

### 3.3 Bağ Kaplamanın Eldesi

Kaplama prosesleri öncesi deneysel altlık malzeme üzerindeki kir, kalıntı, yağ ve oksit gibi istenmeyen, kaplamanın adezyonunu negatif etkileyecek safsızlıkların giderilmesi amacıyla numunelere kumlama işlemi uygulanmıştır. Ortalama 9-12 cm aralığındaki bir mesafeden yüzey ile 75 ° lik açı oluşturacak şekilde 2,5 bar değerindeki basınçlı hava yardımıyla 60 mesh ebatlarındaki Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozlarının püskürtülmesiyle kumlama işlemi tamamlanmıştır. Kaplama işlemine geçilmeden kaplama proseslerinin sağlıklı bir şekilde uygulanabilmesi için, numunelerin yüzeyine etil alkol ile ultrasonik temizleme yapılmıştır. Bu işlemlerin tamamlanmasıyla kaplanması için hazır vaziyete getirilen numunelerin bağ kaplama üretimine geçilmiştir. Literatürde yayınlanan bu alanda yapılan çalışmaların incelenmesiyle uygun sprej koşullarında, toz üreticisi firma tarafından sağlanan standart koşullar olarak belirtilen referanslar dikkate alınarak bağ kaplama üretiminde kullanılan parametreler Tablo 3.3’ de verilmiştir.

Tablo 3.3: Bağ üretiminde kullanılan proses parametreleri

<b>CGDS Bağ Kaplama</b>		
<b>Sprej Basıncı</b> 3 Mpa/30 bar	<b>Gaz Sıcaklığı</b> 600 °C	<b>Çalışma Gazı</b> Helyum (1000 slpm)
<b>Kaplama Mesafesi</b> 15 mm	<b>Tabanca Hızı</b> 20 mm/sn	

Kaplama sprej proseslerinde kullanılan numunelerin bağ kaplamaları üretimindeki bağ tozu 5-37  $\mu\text{m}$  boyutlarında CoNiCrAlY içerikli olup yaklaşık olarak 100  $\mu\text{m}$  kalınlıktan oluşmaktadır. Bağ kaplamaların üretiminde (Amdry 9951, Sulzer Metco) Plasma Giken PCS marka CGDS cihazı kullanılmıştır.

### 3.4 TBC Sisteminde Üst Kaplamanın Eldesi

Nikel bazlı süper alaşım olan Inconel 718 altlık malzeme üzerine CGDS prosesiyle ortalama 100  $\mu\text{m}$  kalınlığında olan metalik bağ kaplaması uygulandıktan sonra seramik üst kaplamanın üretimine geçilmiştir. Kaplama sprej proseslerinde kullanılan numunelerin üst kaplamaları üretimindeki toz -45 +20  $\mu\text{m}$  boyutlarında  $\text{ZrO}_2 + \text{Y}_2\text{O}_3$  (YSZ) içerikli olup yaklaşık olarak 300  $\mu\text{m}$  kalınlıktan oluşmaktadır. Bağ kaplamaların üretiminde (92/8, GTV) F6-GTV marka APS cihazı kullanılmıştır. Böylelikle TBC'lerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Tablo 3.4' de üst kaplama üretiminde kullanılan parametreler verilmiştir. YSZ' nin metalik kaplamaya kıyasla yapışma performansının daha düşük olması ve yüksek ergime sıcaklığına sahip olmasından dolayı toz besleme niceliği, gaz akış niceliği ve tabanca mesafesi daha yüksek değerler seçilerek uygulanmıştır.

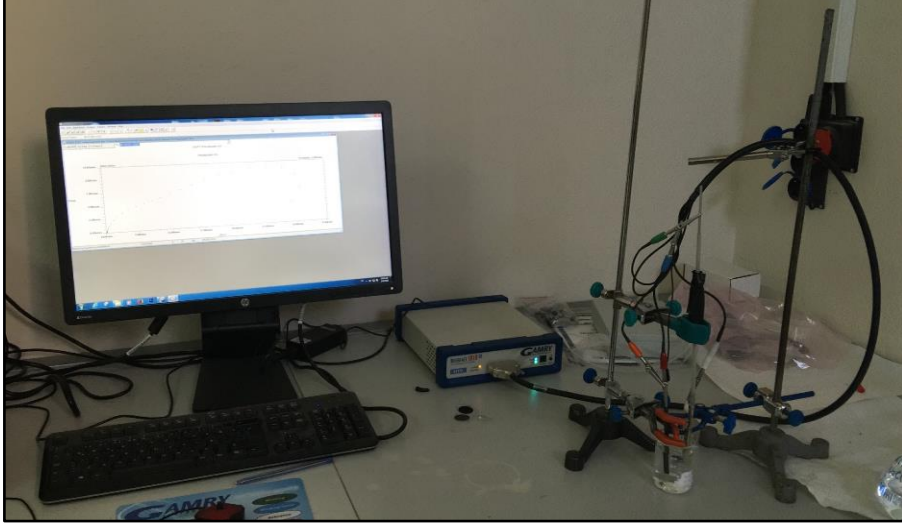
Tablo 3.4: Üst kaplama üretiminde kullanılan proses parametreleri

<b>APS İle YSZ Üst Kaplama</b>		
<b>Ark Akımı</b> 630 A	<b>Elektrik Gücü</b> 40 kW	<b>Argon Akış Oranı</b> 44 slpm
<b>Hidrojen Akış Oranı</b> 13 slpm	<b>Toz Besleme Oranı</b> 25 g/dk	<b>Tabanca Mesafesi</b> 90 mm

### 3.5 TBC Sistem Bileşenlerinin Elektrokimyasal Korozyon Testlerinin Gerçekleştirilmesi

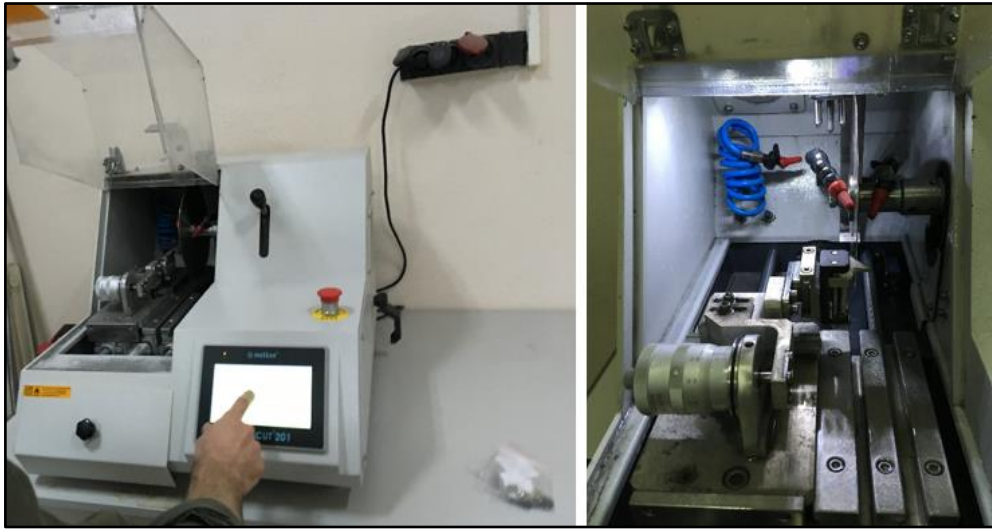
Altlık malzeme olan Inconel 718 üzerine CoNiCrAlY içeriğine sahip CGDS prosesiyle ortalama 100  $\mu\text{m}$  kalınlıkta olan metalik bağ katmanı üretilmiş numuneler, YSZ içeriğe sahip APS prosesiyle yaklaşık 300  $\mu\text{m}$  kalınlığında seramik üst kaplama ile kaplanmıştır. Bu çalışmada Inconel 718 süper alaşım, CGDS prosesiyle üretilmiş CoNiCrAlY bağ kaplama ve APS prosesiyle üretilmiş YSZ üst kaplamaya sahip TBC numuneleri, elektrokimyasal

korozyon testine tabi tutulmuştur. Bütün elektrokimyasal testler, Gamry Instrument (Gamry Interface 1010B Potansiyostat-Galvanostat) cihazında gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.4’ de Elektrokimyasal deneylerin yapıldığı deney düzeneği gösterilmiştir.



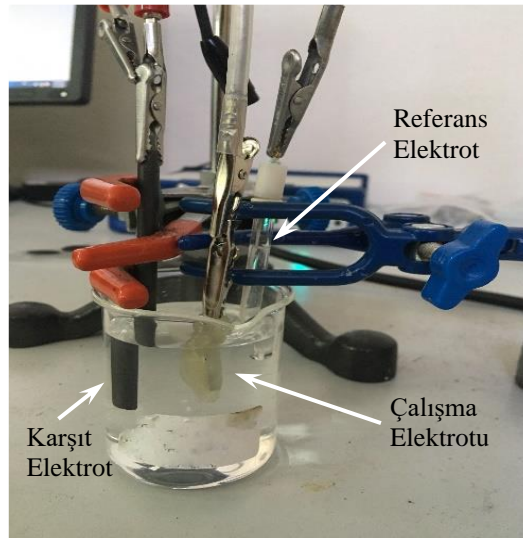
Şekil 3.4: Elektrokimyasal korozyon deneylerinde kullanılan deney düzeneği

Korozyon testi için öncelikle numuneler hassas kesme cihazıyla (Metkon, Micracut 201) 100 mm/s hızında istenilen boyutlarda kesilmiştir. Kesilen parçaların etanol ile yüzey temizlemeleri gerçekleştirilerek kesme sıvısı ve kirlilikler yüzeyden uzaklaştırılmıştır. Şekil 3.5’ de numunelerin uygun boyuta getirilmesinde kullanılan kesme cihazı gösterilmiştir.



Şekil 3.5: Numunelerin kesilmesinde kullanılan hassas kesme cihazı

Kesilen ve temizleme işlemleri tamamlanarak çözeltilere daldırılacak olan test numuneleri, deneye tabii tutulacak yüzeylerinde  $1 \text{ cm}^2$ ' lik bir alan açık kalacak şekilde sıcak silikon ile kaplanmıştır. Böylece sadece  $1 \text{ cm}^2$ ' lik alan elektrokimyasal deneylere tabii tutulmuştur. Deneysel çalışmalarda kullanılan numunelerin daldırılacağı ortam olarak  $0,1 \text{ M}$ ' lik sodyum klorür ( $\text{NaCl}$ ) çözeltisi hazırlanmıştır. Bu işlemlerin tamamlanmasıyla elektrokimyasal korozyon testine geçilmiştir. Elektrokimyasal testlerin tamamı oda sıcaklığında klasik üç elektrotlu sistem ile yapılmıştır. Bu çalışmada kullanılan referans elektrotu (RE)  $\text{Ag}/\text{AgCl}$ , karşıt elektrot (CE) grafit çubuk ve çalışma elektrotu (WE) ise numunelerdir.  $1 \text{ cm}^2$ ' lik yüzeyleri açıkta bırakılarak çözeltilere daldırılan numunelere sırasıyla üç farklı elektrokimyasal test uygulanmıştır. Bunlar; açık devre potansiyeli (OCP), elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) ve potansiyodinamik polarizasyon testleri (PDP)' dir. Şekil 3.6' da elektrokimyasal deneylerde kullanılan hücre gösterilmektedir.



Şekil 3.6: Elektrokimyasal deneylerde kullanılan hücre

İlk olarak 300 saniye OCP testi yapılmış ve tüm numunelere aynı süreyle uygulanmıştır. OCP testleri tamamlandıktan sonra EIS ölçümlerine geçilmiştir. Bu testler  $20 \text{ kHz}$ - $10 \text{ mHz}$  frekans aralığında, voltajı  $10 \text{ mV AC}$  olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. EIS ölçümlerinin tamamlanmasıyla PDP testi yapılmıştır. Potansiyodinamik eğriler OCP' ye göre başlangıç potansiyel değeri  $-250 \text{ mV}$  ve bitiş potansiyel değeri  $+1500 \text{ mV}$  olarak belirlenmiş ve  $1 \text{ mV/s}$  tarama hızında deneyler gerçekleştirilmiştir. Tutarlılık için her bir test  $0,1 \text{ M NaCl}$  çözeltisinde en az üç kez tekrarlanmıştır. Bu ölçümler sonunda elde edilen verilerin incelenmesi Gamry Echem Analyst programı ile yapılmıştır.



### 3.6 TBC Sistem Bileşenlerinin Elektrokimyasal Korozyon Testi Sonrası Karakterize Edilmesi

Elektrokimyasal korozyon testleri tamamlanan numunelerin yüzey görüntülerinin yanında enine kesit görüntüleri de incelenmiştir. Bu amaçla numuneler metalografik olarak hazırlanmıştır. Elektrokimyasal korozyon testleri için hassas kesme cihazıyla belirli ebatlarda kesilen disk halindeki numuneler bakalit kalıbına tam yerleşebilmesi uygun hale getirilmiştir. Elektrokimyasal korozyon testlerine tabi tutulan numuneler, etanol ile yüzey temizlemeleri gerçekleştirilerek epoksi ve sertleştiricinin karıştırılmasıyla oluşturulan reçinenin farklı kalıplarda kullanılmasıyla soğuk bakalite alınmıştır. Soğuk bakalite alınmış her bir numune ortalama 30 dakikalık sürenin ardından bakalitin sertleşmesiyle kalıplardan çıkartılıp, sırasıyla 120, 240, 320, 400, 800, 1000 ve 2000' lik mesh ebatlarına sahip SiC' den olan zımpara diskleriyle zımparalama işlemine tabi tutulmuştur. İşlem esnasında her bir zımpara diski ile numune yüzeyi sulu ortamda zımparalanmıştır. Zımparalama işleminin tamamlanmasından sonra numunelerin parlatma işlemine geçilmiştir. Bu aşamada numunelere 1 µm' lik elmas aşındırıcı bulunduran solüsyon uygulanarak parlatma işlemi gerçekleştirilmiştir. Tablo 3.5' de zımparalama ve 3.6' da parlatma işlemi sırasında kullanılan değişkenler verilmiştir.

Tablo 3.5: Zımparalama işlemi esnasında kullanılan parametreler

<b>Zımparalama İşlemi</b>			
<b>Zımpara (mesh)</b>	<b>Hız (rpm)</b>	<b>Basınç (bar)</b>	<b>Süre (saniye)</b>
120, 240, 320, 400, 800, 1000, 2000	300	10	240 ± 60

Tablo 3.6: Parlatma işlemi esnasında kullanılan parametreler

<b>Parlatma İşlemi</b>			
<b>Elmas Boyutu</b>	<b>Hız (rpm)</b>	<b>Basınç (bar)</b>	<b>Süre (saniye)</b>
1 µm	300	10	120

Bakalite alınmasıyla zımparalanması ve parlatılması tamamlanmış olan numunelerin SEM cihazında görüntülerinin elde edilmesi için yüzey temizlemesi yapılmıştır. İncelenecek olan

numunelerin üst tabakaları iletkenliğin düşük olması sebebiyle altınla kaplanması sağlanarak iletkenlik performansı arttırılmıştır. Bu işlemlerden sonra numuneler SEM cihazında incelenmek üzere uygun vaziyete getirilmiştir. Elektrokimyasal korozyon testleri uygulanmış ve metalografik incelemesi bitmiş numunelerin incelemeleri TESCAN ve FEI Model Quanta 450 FEG-EDS SEM cihazında yapılmıştır. SEM cihazından görüntü alma işlemi tamamlandıktan sonra, faz incelemesi için EDS analizi gerçekleştirildi. EDS analizi gerçekleştirilerek oluşan fazlar tespit edilmiştir ve son olarak XRD cihazı ile meydana gelen bu fazların açıları ve şiddetleri belirlenmiştir.

## BÖLÜM 4

### BULGULAR VE TARTIŞMA

#### 4.1 TBC Sistem Bileşenlerinin Elektrokimyasal Korozyon Etkisi

##### 4.1.1 Elektrokimyasal Korozyon Testleri

Inconel 718 süper alaşım altlık malzeme, CoNiCrAlY bağlamaya sahip CGDS kaplama ve YSZ üst kaplamaya sahip TBC sistemine ait yapılan PDP ve OCP sonuçları Tablo 4.1’ de gösterilmiştir.  $i_{kor}$  korozyon reaksiyonlarının kinetiğini değerlendirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır.

Tablo 4.1: Elektrokimyasal korozyon değerleri

Çözelti	Deney Koşulları	OCP (mV)	$E_{kor}$ (mV)	$i_{kor}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )
0,1 M NaCl Çözeltisi	Inconel 718	-403	-435	4,8
	Inconel 718 + Bağ Kaplama	-230	-270	0,9
	TBC Sistemi	-54	-182	0,18

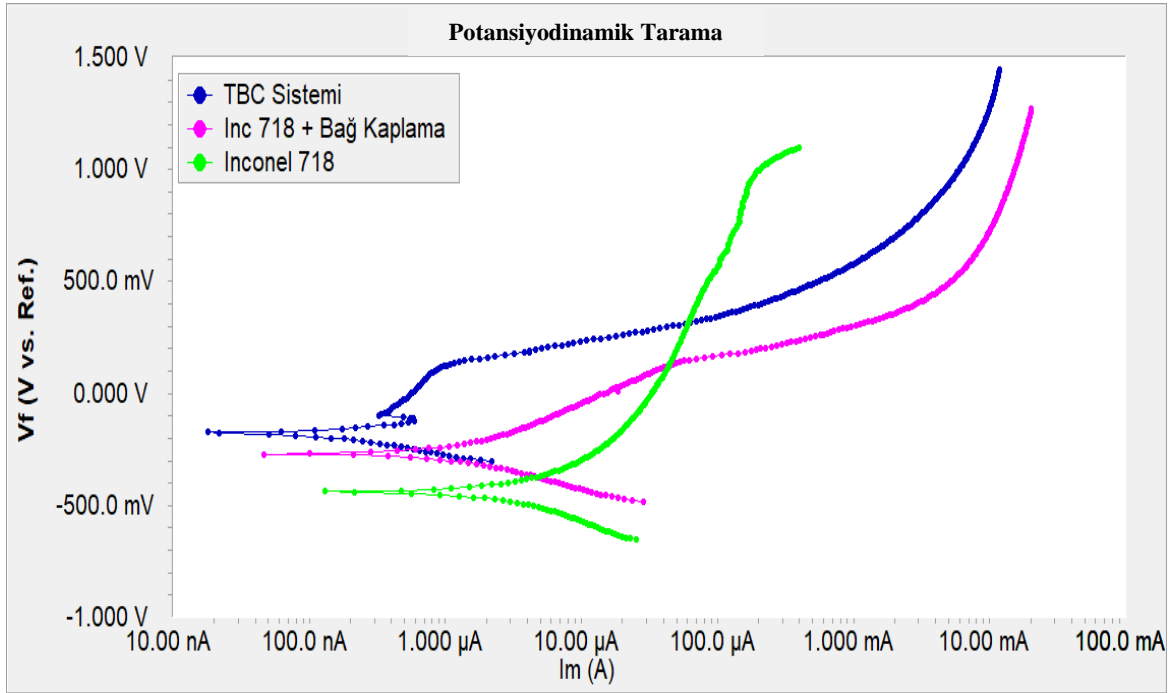
Tablo 4.1’ de ilk koşula bakıldığında, Inconel 718 süper alaşım altlık malzemenin  $i_{kor}$  değeri  $4,8 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  iken, ikinci koşul olan CoNiCrAlY bağlamaya sahip CGDS kaplama numunesinin  $i_{kor}$  değeri  $0,9 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  ve son koşul olan YSZ üst kaplamaya sahip TBC sisteminin  $i_{kor}$  değeri  $0,18 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  olarak elde edilmiştir. CoNiCrAlY bağlamaya sahip CGDS kaplama ve YSZ üst kaplamaya sahip TBC sistemine ait numunelerin, altlığa göre  $i_{kor}$  değerlerinin azaldığı görülmektedir.

Tablo 4.1’ de veriler incelendiğinde NaCl çözeltisinde en yüksek  $i_{kor}$  değerinin Inconel 718 süper alaşım altlık malzemedede elde edildiği görülmektedir. Inconel 718 altlık malzemesine, termal spreycaplama yöntemi olan CGDS prosesi kullanılarak CoNiCrAlY metal tozlarıyla bağ kaplama gerçekleştirilmesiyle,  $i_{kor}$  değeri azalmış korozyon direncinde iyileşme sağlanmıştır. CGDS prosesiyle bağ kaplaması yapılmış Inconel 718 numunesine, APS

prosesi kullanılarak YSZ seramik esaslı tozlar ile seramik üst kaplamasının yapılmasıyla elde edilen TBC sisteminin  $i_{kor}$ 'unda azalma tespit edilmiş ve korozyon direnci daha iyi hale gelmiştir.

#### 4.1.1.1 Potansiyodinamik Polarizasyon (PDP) ve Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EIS) Test Sonuçları

Inconel 718 süper alaşım altlık malzeme, CoNiCrAlY bağlamaya sahip CGDS kaplama ve YSZ üst kaplamaya sahip TBC sistemine ait numunelerin 0,1 M NaCl çözeltisinde yapılan PDP testinde elde edilen PDP eğrileri Şekil 4.1' de verilmiştir. Eğrilerden elde edilen veriler ve  $i_{kor}$  değerleri Tablo 4.1' de verilmektedir. Potansiyodinamik eğriler açık devre potansiyeline (OCP) göre başlangıç potansiyel değeri -250 mV ve bitiş potansiyel değeri +1500 mV olarak belirlenmiş ve 1 mV/s tarama hızında gerçekleştirilmiştir.



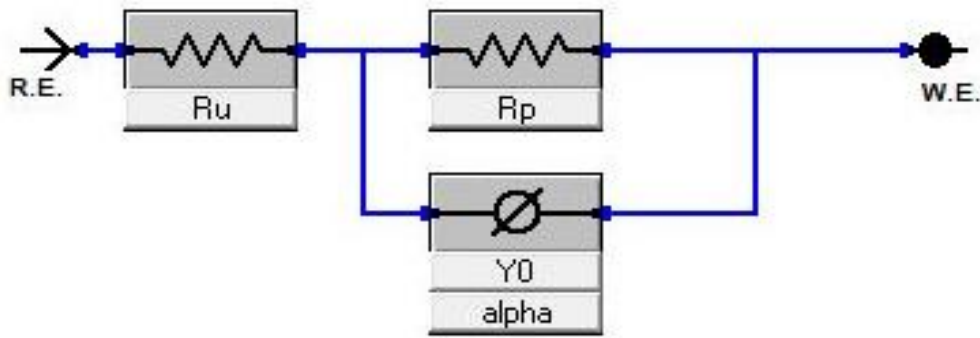
Şekil 4.1: 0,1 M NaCl çözeltisinde numunelere ait PDP eğrileri

Tablo 4.1' e bakıldığında ve Şekil 4.1' deki eğriler incelendiğinde NaCl çözeltisinde Inconel 718 süper alaşım altlık malzemesinin, CoNiCrAlY bağlamaya sahip CGDS kaplama ve YSZ üst kaplamaya sahip TBC sistemine ait numunelere nazaran daha düşük bir  $E_{kor}$  değerine sahip olduğu görülmüştür. Bu Inconel 718 süper alaşım altlık malzemesi, diğer test numunelerine göre daha az soy davranış sergilemektedir. Inconel 718 süper alaşım altlık

malzemesinin polarizasyon eğrisine bakıldığında, mevcut akım yoğunluğun keskin bir şekilde arttığı görülmektedir. Bu yüzeyde hasar oluşumunun başladığını gösteren  $E_{kor}$  üzerinde belirgin bir aktivasyon platformu ortaya koymaktadır.

CoNiCrAlY bağlamaya sahip CGDS kaplama numunesi ise YSZ üst kaplamaya sahip TBC sistemine ait numuneye göre biraz daha düşük  $E_{kor}$  değerine sahip olmuştur ve daha az soy davranış sergilemektedir. Sonuç olarak CGDS ile bağ kaplaması APS ile seramik üst kaplaması yapılmış TBC numunesi diğer numunelere göre daha soy davranış sergilemiştir. Böylece CGDS bağ kaplama ve APS seramik üst kaplama, malzemenin korozyon davranışını etkilemiştir ve Inconel 718, TBC sayesinde korozyona karşı daha kararlı bir hale gelmiştir. TBC'nin NaCl çözeltisinde yüksek korozyon direncine sahip olması ve korozyona daha az meyilli olmasının nedeni bu kaplamaların daha yüksek  $i_{kor}$ 'a sahip olmaları ve altlık malzemesine göre daha soy davranış sergilemeleridir.

Şekil 4.2' de EIS eğrisi için eşdeğer elektrik devreleri modeli verilmektedir. Burada RE referans elektrotuna, WE çalışma elektrotuna karşılık gelmektedir. Önerilen bu devre modeli numunelerin farklı koşullardaki elektrokimyasal davranışını daha fazla tanımlamak amacıyla EIS verilerine eşitlemek için kullanılmıştır. AC empedansı, EIS verilerine göre grafiksel olarak kaplama kapasitansı ile metalik altlık Inconel 718 için kaplama direnci arasındaki ilişkiyi göstermektedir.



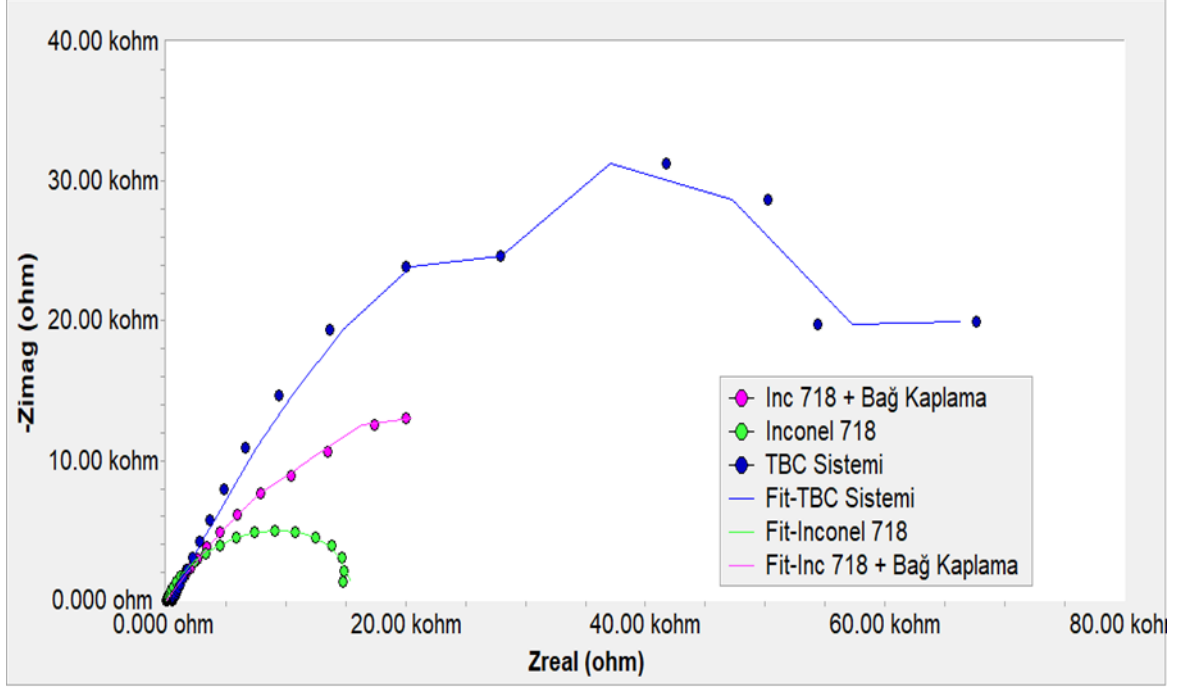
Şekil 4.2: Numunelerin eşdeğer elektrik devre modeli

Tablo 4.2' ye bakıldığında numunelere ait EIS verileri görülmektedir. Burada  $R_p$  polarizasyon direncine,  $R_u$  çözelti direncine, CPE sabit faz elemanına karşılık gelmektedir. CPE' nin,  $Y_0$  ve  $\alpha$  olmak üzere iki tane parametresi bulunmaktadır. Buradaki “ $\alpha$ ” değeri gerçek kapasitansın ideal kapasitansdan sapmasını göstermektedir ve 0,5 ile 1 arası bir değer alır (Kocabaş, 2017).

Tablo 4.2: Test numunelerine ait EIS verileri

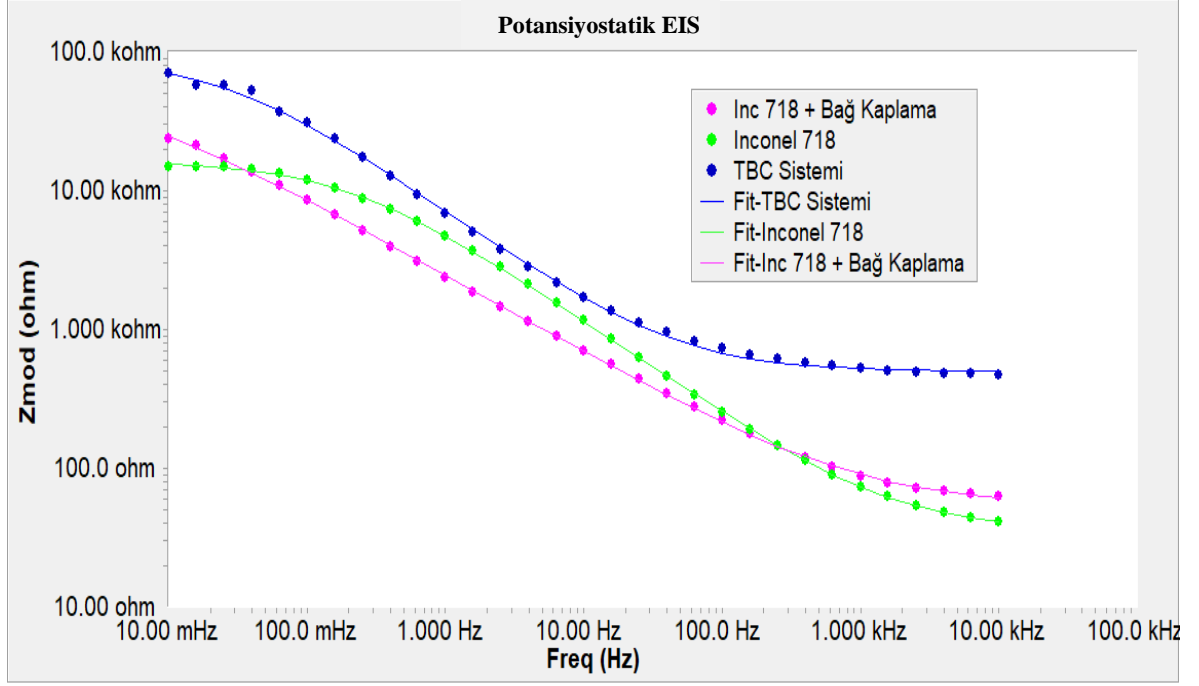
Çözelti	Koşul	$R_p$ ( $\Omega$ )	$R_u$ ( $\Omega$ )	$Y_0$ ( $S*s^a$ )	$\alpha$
0,1 M NaCl Çözeltisi	Inconel 718	$16,51 \times 10^3$	35,71	$50,35 \times 10^{-6}$	0,68
	Inconel 718 + Bağ Kaplama	$62,83 \times 10^3$	52,81	$140,2 \times 10^{-6}$	0,57
	TBC Sistemi	$92,91 \times 10^3$	496,6	$38,79 \times 10^{-6}$	0,69

Tablo 4.1' de elde edilen verilerde Inconel 718 süper alaşım altlık malzemesinin, CoNiCrAlY bağlamaya sahip CGDS kaplama ve YSZ üst kaplamaya sahip TBC sistemine göre daha yüksek bir  $i_{kor}$  değerine sahip olduğuna değinildi. Tablo 4.2' de verilen değerlere bakıldığında en yüksek  $R_p$  değerine YSZ üst kaplamaya sahip TBC sisteminin sahip olduğu görülmektedir. CoNiCrAlY bağlamaya sahip CGDS kaplamanın  $R_p$  değerinin ise Inconel 718 süper alaşım altlık malzemesinin  $R_p$  değerinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Böylece üç farklı koşulda değerlendirilen numunelerin  $i_{kor}$  değeri azalırken  $R_p$  değeri artmaktadır. Elde edilen veriler doğrultusunda  $R_p$  değerinin artmasıyla korozyon direncinin arttığı görülmektedir. Bu,  $R_p$  değerlerinin  $i_{kor}$  değerleri ile uyumlu olduğunu göstermektedir.  $i_{kor}$  değerinin düşük olması TBC' lerin daha iyi korozyon direncini açıkça doğrulamaktadır. Ayrıca artan  $R_p$  değerlerinin sonucunda Nyquist diyagramında elde edilen yarımların çapında büyümeler gözlemlenmektedir. Dairelerin çapındaki büyüklükler kıyaslanarak, uygulanan kaplamanın korozyona karşı direnç gösterip göstermediği hakkında değerlendirme yapılabilmektedir. Şekil 4.3' de 0,1 M NaCl çözeltisinde gerçekleştirilen test numunelerine ait Nyquist ve Fit eğrileri verilmektedir.



Şekil 4.3: Test numunelerine ait Nyquist ve Fit eğrileri

Nyquist düzlemindeki grafiksel yarım dairelerin çapı, test numunelerinin polarizasyon direncini temsil etmekte ve daha büyük döngü, daha düşük korozyon oranı anlamına gelmektedir. Şekil 4.3' e bakıldığında Nyquist düzlemindeki grafiksel yarım daireler görülmektedir. Bu dairelerin çapındaki büyümeler kıyaslandığında en düşük  $R_p$  değerine ve daire çapına Inconel 718 süper alaşım altlık malzemesinin sahip olduğu tespit edilmiştir. En yüksek  $R_p$  değerine sahip olan YSZ üst kaplamaya sahip TBC sisteminin ise, grafiksel yarım daire çapında büyümeler olduğu görülmekte ve yüzey tabakasının iletkenliğinin azalarak korozyona karşı daha dirençli olduğu anlaşılmaktadır. Sonuç olarak nikel bazlı süper alaşım Inconel 718' e TBC' lerin uygulanmasıyla korozyon direncinde artış sağlanmıştır.



Şekil 4.4: Test numunelerine ait Bode ve Fit eğrileri

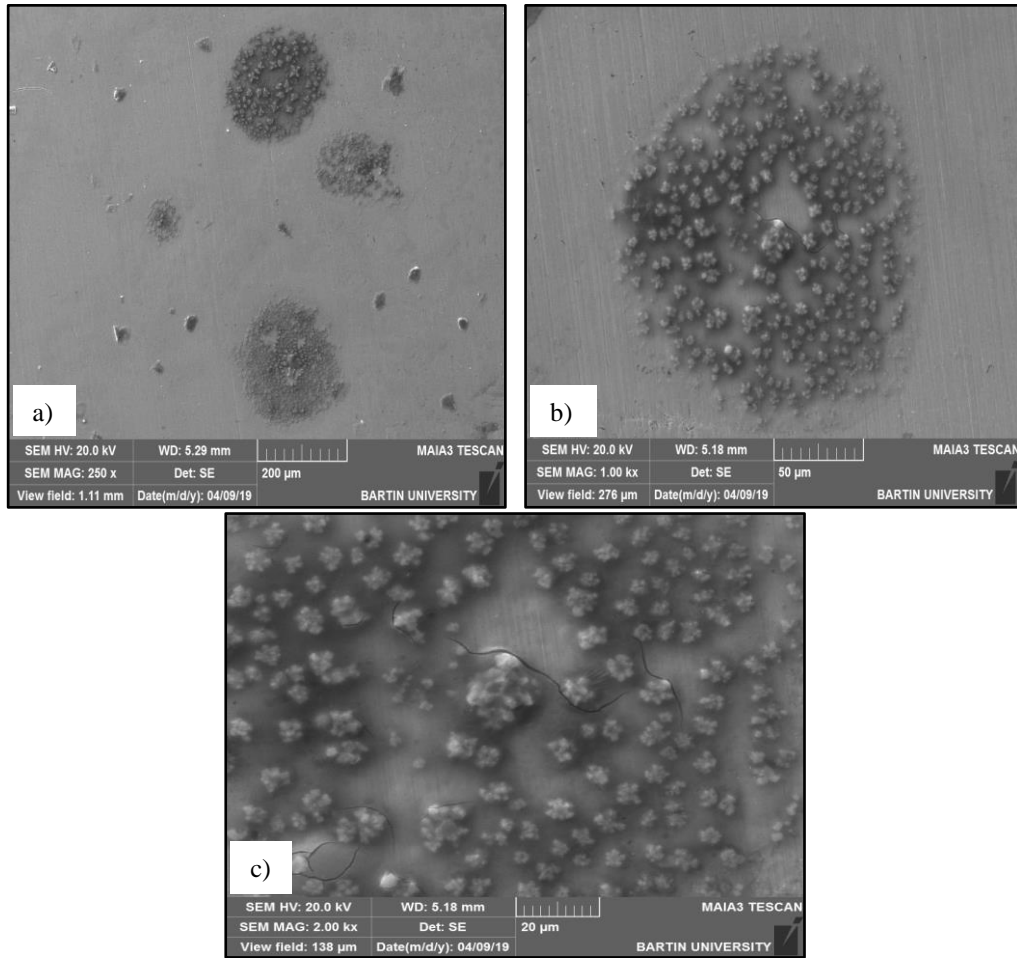
Şekil 4.4' de 0,1 M NaCl çözeltisine batırılmış numunelerin EIS diyagramının uyumlu modül Bode sonucu verilmektedir. Modül Bode çiziminde  $|Z| f \rightarrow 0$  değeri korozyon oranını tahmin etmek için kullanılmaktadır.  $|Z| f \rightarrow 0$  değerinin daha yüksek olması malzemelerin korozyon oranının düşük olduğu anlamına gelmektedir. Şekil 4.4' e bakıldığında YSZ üst kaplamaya sahip TBC sisteminin en yüksek  $|Z| f \rightarrow 0$  değerine sahip olduğu gözlemlenmektedir. Böylece YSZ üst kaplamaya sahip TBC sisteminin korozyon oranının, Inconel 718 süper alaşım altlık malzemesinin ve CoNiCrAlY bağlamaya sahip CGDS kaplamasının korozyon oranından daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durumda elde edilen veriler  $i_{kor}$  değerleri ile uyumlu olmakta ve uygulanan TBC sayesinde korozyona karşı daha kararlı bir durum tespit edilmiştir.



## 4.1.2 TBC Sistem Bileşenlerinin Elektrokimyasal Korozyon Sonrası Mikroyapısal İncelenmesi

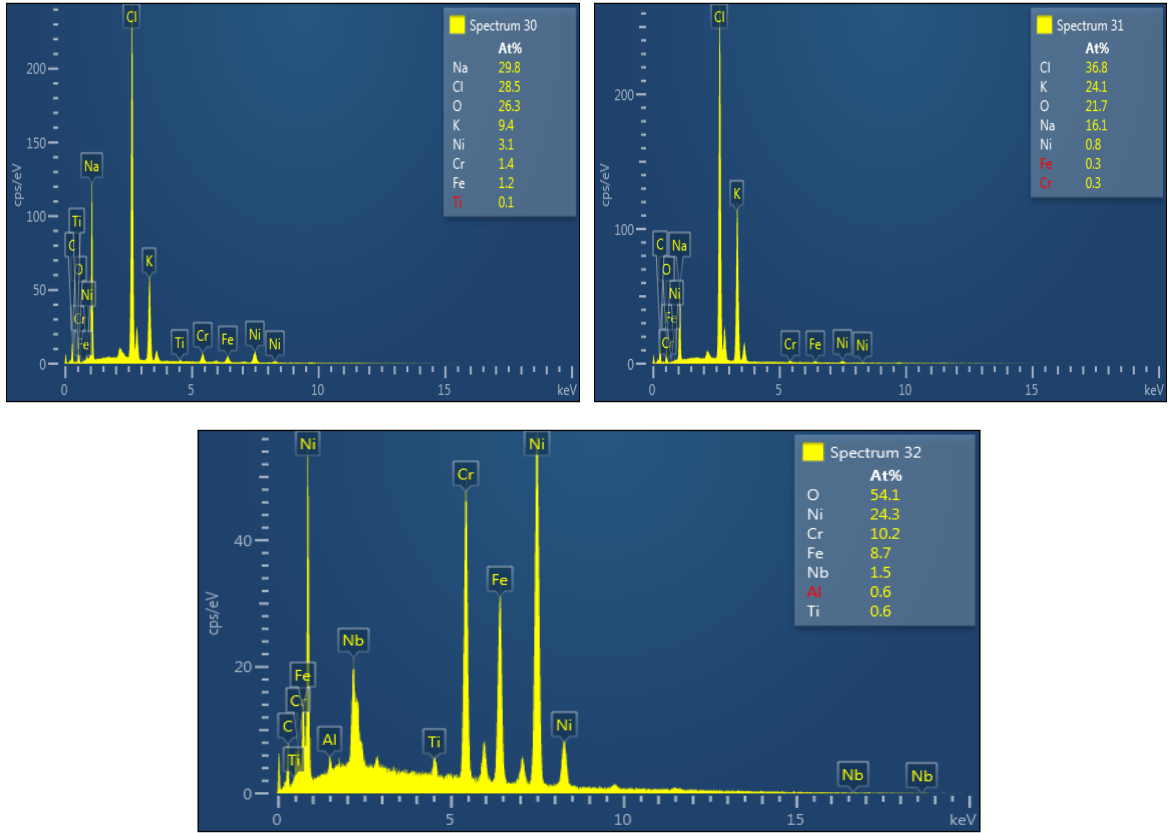
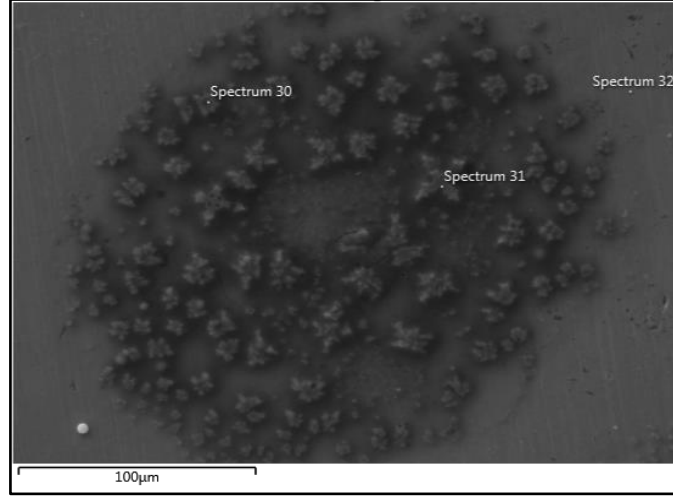
### 4.1.2.1 Kaplamasız Inconel 718 Altlık Numunesinin Elektrokimyasal Korozyon Testi Sonrası Mikroyapısının İncelenmesi

Elektrokimyasal korozyon testleri sonrası Inconel 718' in ve kaplamaların yüzey ve enine kesit morfolojilerini belirlemek amacıyla SEM ve EDX elementel incelemeleri yapılmıştır. Yapılan bu çalışmada altlık malzemesi olarak yüksek sürünme direncine sahip ağırlıkça Ni, Fe, Cr, Nb ve Mo içeren nikel esaslı süper alaşım malzemesi olan Inconel 718 seçilmiştir. Şekil 4.5' de kaplamasız Inconel 718 numunesinin NaCl çözeltisinde elektrokimyasal korozyon testinden sonra farklı büyütme oranlarında yüzey görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.5: Inconel 718 süper alaşım altlık malzemesinin NaCl çözeltisinde elektrokimyasal korozyon testinden sonra (a) 250x büyütmede (b) 1.00kx büyütmede (c) 2.00kx büyütmede üst yüzey görüntüsü

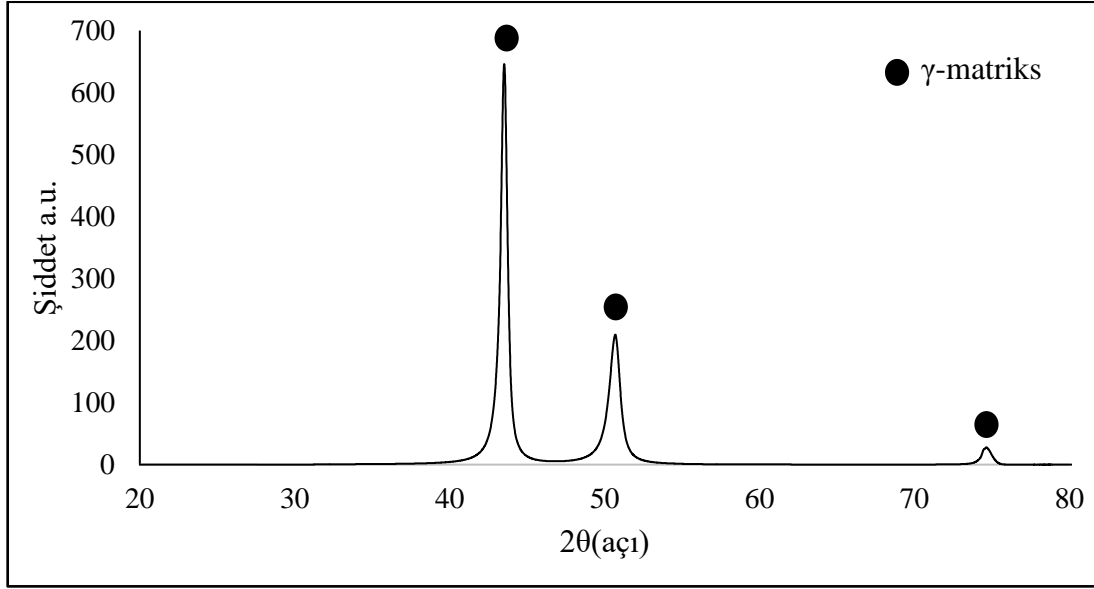
Şekil 4.5 b' ye bakıldığında Inconel 718 süper alaşım altlık malzemesinin elektrokimyasal korozyona uğratılmasından sonra elektrolit olan NaCl' nin yüzeyde kısım kısım birikerek kristalize olduğu görülmektedir. Inconel 718 süper alaşım altlık malzemesi dayanımı yüksek bir malzeme olsa da deney düzeneğinde kullanılan agresif çözeltide, TBC yapılmış numuneye göre daha zayıf bir direnç göstermiştir ve  $i_{kor}$  ile tutarlı olarak yüzeyde hasar oluşumu meydana gelmiştir. Şekil 4.5 a' da numunenin üst yüzey görüntüsüne baktığımızda oluşan NaCl kristalleriyle birlikte lekeler de rastlanmaktadır. Bu yüzey bütünlüğünü bozan hasar oluşumları belirli aralıklarda görülmektedir. Şekil 4.5 c' de 2.00kx büyütmede yüzeye bakıldığında özellikle NaCl kristallerinin yoğun olduğu kısımlarda mikro boyutlarda çatlaklara rastlanmaktadır. Bu kaplamasız Inconel 718 altlık malzemenin daha dayanıksız olduğunu göstermektedir. Daha yoğun agresif ortamlarda çalışıldığında oluşan bu hasarların daha da artacağı ve ilerleyerek çukurcuk korozyonunu oluşturabileceği söylenebilir. Oksijen ve sodyum klorür bakımından zengin olan deniz suyu çukurcuk korozyonu için en elverişli ortamı oluşturur (Palmanak, 2009).



Şekil 4.6: Inconel 718 süper alaşım altlık malzemesinin NaCl çözeltisinde elektrokimyasal korozyon testinden sonra EDS analizi

Şekil 4.6' da ağırlıkça Ni, Fe, Cr, Nb ve Mo içeren nikel esaslı süper alaşım malzemesi olan Inconel 718 altlık malzemesinin NaCl çözeltisinde elektrokimyasal korozyon testinden sonra EDS analizi verilmiştir. Elektrokimyasal korozyon sonrasında üst yüzeyinden elde edilmiş SEM görüntüsünde de net bir şekilde görünen NaCl kristallerinin EDS analizi yapılırken; NaCl kristallerinin yoğun olduğu noktadan alınan spektrum 30 ve spektrum 31 neticesinde içeriğinde sodyum, klor ve oksijen miktarının oldukça fazla çıktığı

görülmektedir. Yine üst yüzeyden EDS analizi yapılırken, NaCl kristallerinin olmadığı spektrum 32 neticesinde ise sodyum ve klorün olmadığı, nikel krom gibi diğer elementlerin normal bir oranda kaldığı ve malzemede bir değişim olmadığı görülmektedir.

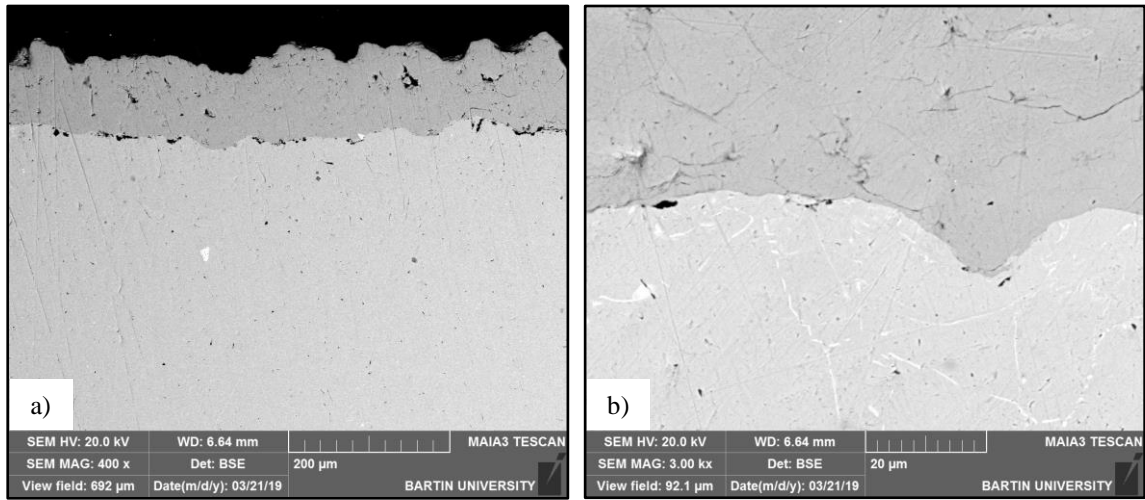


Şekil 4.7: Inconel 718 süper alaşım altlık malzemesinin NaCl çözeltisinde elektrokimyasal korozyon testinden sonra XRD analizi

Yapılan bu çalışmada altlık malzemesi olarak seçilen Ni esaslı süper alaşım Inconel 718 YMK yapıya sahip  $\gamma$  fazından oluşmaktadır. Şekil 4.7' deki grafik elektrokimyasal korozyon testinden sonra XRD analizleri yapılmış olan Inconel 718 altlık malzemesinin fazlarını göstermektedir. Grafik üzerindeki pikler incelendiğinde elektrokimyasal korozyon testi sonrası herhangi bir değişim olmadığı tespit edilmiştir. Elektrokimyasal korozyon testinden önce  $\gamma$ -matriks fazından oluşan kaplamasız Inconel 718, elektrokimyasal korozyon testinden sonra da aynı faza sahip olmuş ve testlerin oda sıcaklığında gerçekleştirilmesi sebebiyle faz yapısının bozulmadığı görülmüştür. YMK yapıya sahip  $\gamma$  fazını kararlı kılan ana alaşım elementleri en az %25 nikel ve %18-55 demirden oluşmaktadır.

#### 4.1.2.2 CGDS İle Bağ Kaplaması Üretilmiş Inconel 718 Numunesinin Elektrokimyasal Korozyon Testi Sonrası Mikroyapısının İncelenmesi

Elektrokimyasal korozyon testleri sonrası CGDS prosesi ile üretilmiş bağ kaplamaya ait yüzey ve enine kesit morfolojilerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen SEM ve EDX elementel incelemeleri şekillerde verilmiştir. Şekil 4.8' e bakıldığında CGDS prosesiyle üretilmiş CoNiCrAlY bağ kaplamasının NaCl çözeltisinde elektrokimyasal korozyon testinden sonra farklı büyütme oranlarında enine kesit görüntüleri verilmiştir.

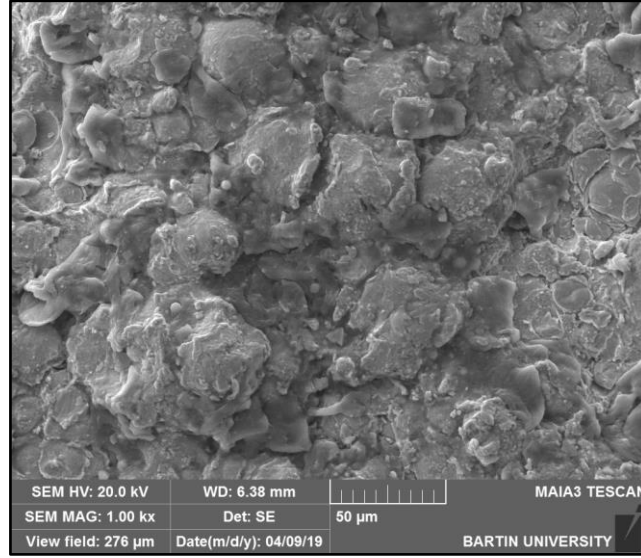


Şekil 4.8: CGDS prosesi ile bağ kaplaması üretilmiş Inconel 718 numunenin NaCl çözeltisinde elektrokimyasal korozyon testinden sonra (a) altlık ve bağ görüntüsü (b) bağ kaplama ara yüzey görüntüsü

Şekil 4.8' de enine kesit görüntülere bakıldığında bağ kaplama yapısında oksit içeriğinin neredeyse hiç olmadığı ve yoğun bir yapıda olduğu anlaşılmaktadır. Daha düşük sıcaklıklarda çalışan CGDS kaplamada biriktirme işleminde taşıyıcı gaz olarak 700 °C gibi sıcaklıklara kadar bir ön ısıtmadan geçirilen helyum inert gazının kullanılmasından ve çok yüksek hızda yapılmasından dolayı yapıda oksitin neredeyse hiç olmadığı anlaşılmaktadır. Böylelikle ön ısıtma sayesinde yüksek hızlara çıkan gazlar dolaylı olarak parçacıkların kinetik enerjisini artırmaktadır. Bu da çökeltme sırasında oksidasyonu engellemiştir (Karaoğlanlı, 2012; Bonadei ve Marrocco, 2014; Khanna ve Rathod, 2015).

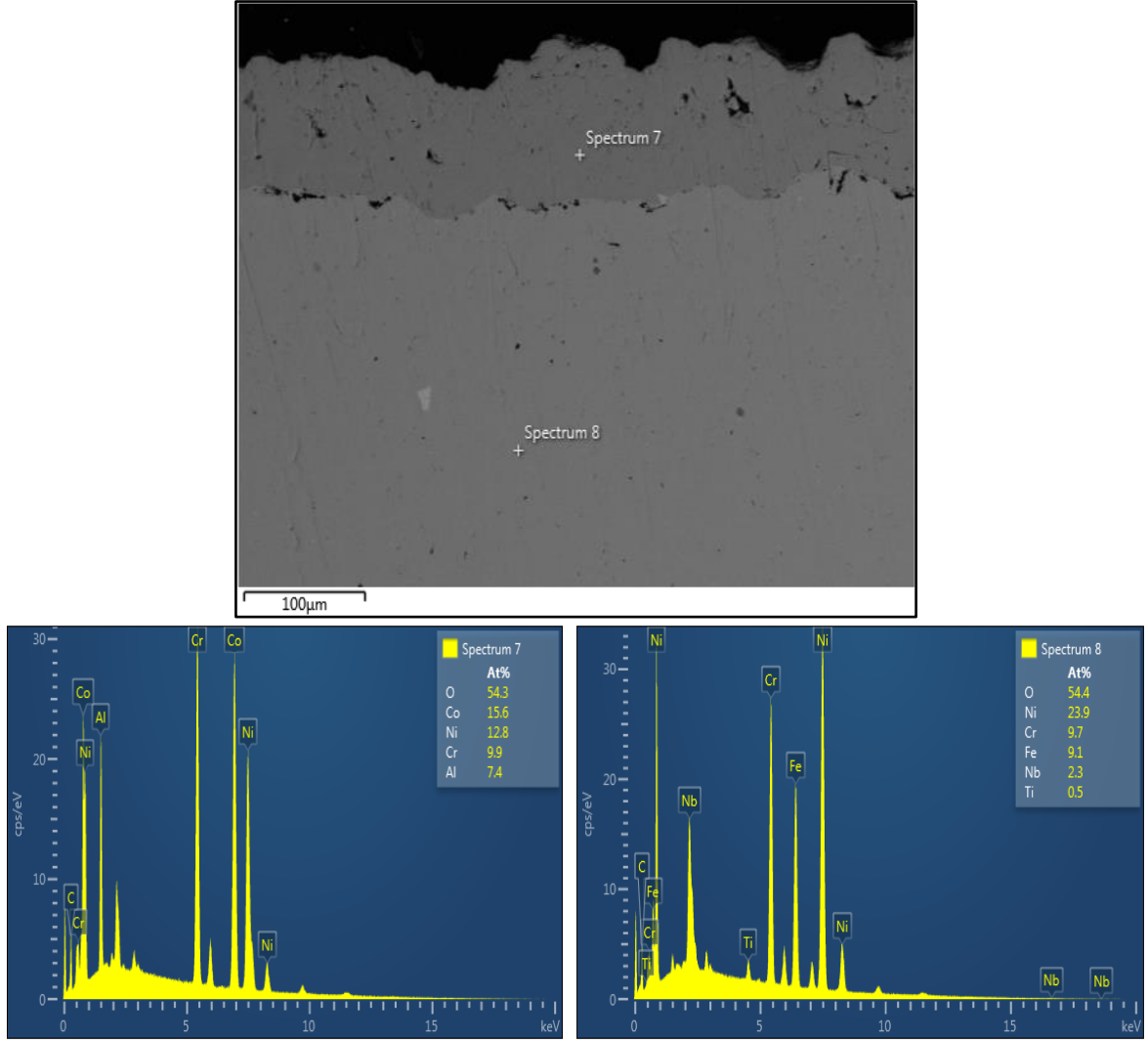
CGDS prosesiyle üretilen bağ kaplama yapısında düşük oranda porozite ve boşluklar bulunmaktadır. Bağ kaplamada gözlemlenen bu düşük miktardaki porozite ve boşlukların oluşumunun biriktirme esnasında birbirine çarpan partiküllerin yeterli bölgesel plastik

deformasyona uğramadığını bundan dolayı da iki bitişik partikül arasında küçük boşlukların oluşumuna neden olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Benzer kaplama özelliklerine sahip yapı daha önce yapılan birkaç çalışmada da gözlemlenmiştir (Karaoğlanlı, 2012). Ichikawa ve arkadaşlarının (2007) yapmış olduğu çalışmalarda CGDS' nin düşük porozite ve düşük oksit içeriğine sahip kaplamaların üretilmesine olanak sağladığı rapor edilmiştir.



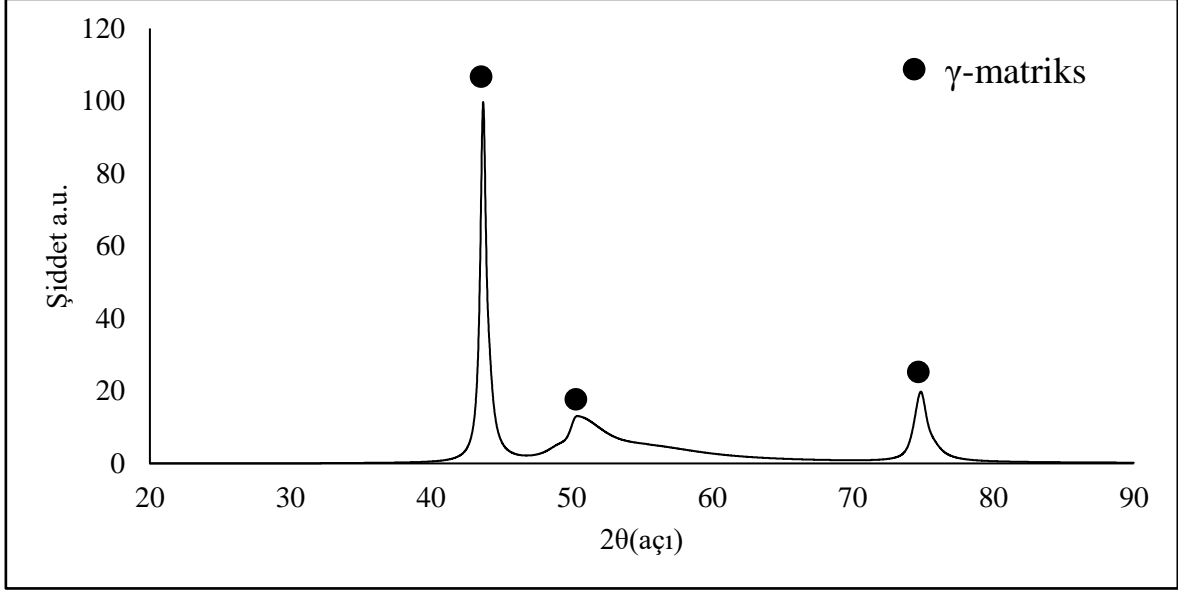
Şekil 4.9: CGDS prosesi ile bağ kaplaması üretilmiş kaplamanın NaCl çözeltisinde elektrokimyasal korozyon testi sonrası üst yüzey görüntüsü

Elektrokimyasal korozyon testinden sonra Şekil 4.8' de ki enine kesit görüntüleri ve Şekil 4.9'da ki üst yüzey görüntüsü incelendiğinde yüzeyde pürüzlerin olduğu görülmektedir. Bunlar elektrokimyasal korozyon öncesinde kaplamanın biriktirme esnasında son partiküllerin neden olduğu pürüzlük olarak bilinmektedir. CGDS ile bağ kaplaması üretilmiş Inconel 718 numunesinin elektrokimyasal korozyona uğratılmasından sonra elektrolit olan NaCl' nin sadece yüzeyde kısım kısım biriktiği üst yüzey görüntüsünde koyu renklerin olduğu yerlerde görülmektedir. Açık gri renkli olan yerlerde sodyum ve klorün olmadığı, CoNiCrAlY bağ kaplamanın normal bir oranda kaldığı ve malzemede bir değişim olmadığı görülmektedir. Deney düzeneğinde kullanılan agresif çözeltide, CoNiCrAlY bağlamaya sahip CGDS kaplama, Inconel 718 süper alaşım altlık malzemesine göre daha iyi bir direnç göstermiştir ve  $i_{kor}$  ile tutarlı olarak yüzeyde herhangi bir hasar oluşumu meydana gelmemiştir.



Şekil 4.10: CGDS prosesi ile bağ kaplaması üretilmiş Inconel 718 numunesinin NaCl çözeltisinde elektrokimyasal korozyon testinden sonra EDS analizi

Şekil 4.10' da CGDS ile bağ kaplaması üretilmiş Inconel 718 numunesinin NaCl çözeltisinde elektrokimyasal korozyon testinden sonra enine kesit EDS analizi verilmiştir. Elektrokimyasal korozyon sonrasında üst yüzeyinden elde edilmiş Şekil 4.9' da ki SEM görüntüsünde koyu renklerin olduğu yerlerde görünen NaCl kristallerinin sadece yüzeyde kaldığı, ara kesitlerden alınan spektrum 7 ve spektrum 8' de sodyum ve klora rastlanmadığı, malzemenin normal bir oranda kaldığı, malzemede bir değişim olmadığı ve korozif ortamların alt tabakaya nüfuz etmediği tespit edilmiştir. Yapılan CoNiCrAlY bağlamaya sahip CGDS kaplama, Inconel 718 süper alaşım altlık malzemesine göre iyi bir direnç göstermiş ve  $E_{kor}$  ile tutarlı olarak yüzeyde ve alt tabakada herhangi bir hasar oluşumu meydana gelmemiştir.



Şekil 4.11: CGDS prosesi ile bağ kaplaması üretilmiş Inconel 718 numunenin NaCl çözeltisinde elektrokimyasal korozyon testinden sonra XRD analizi

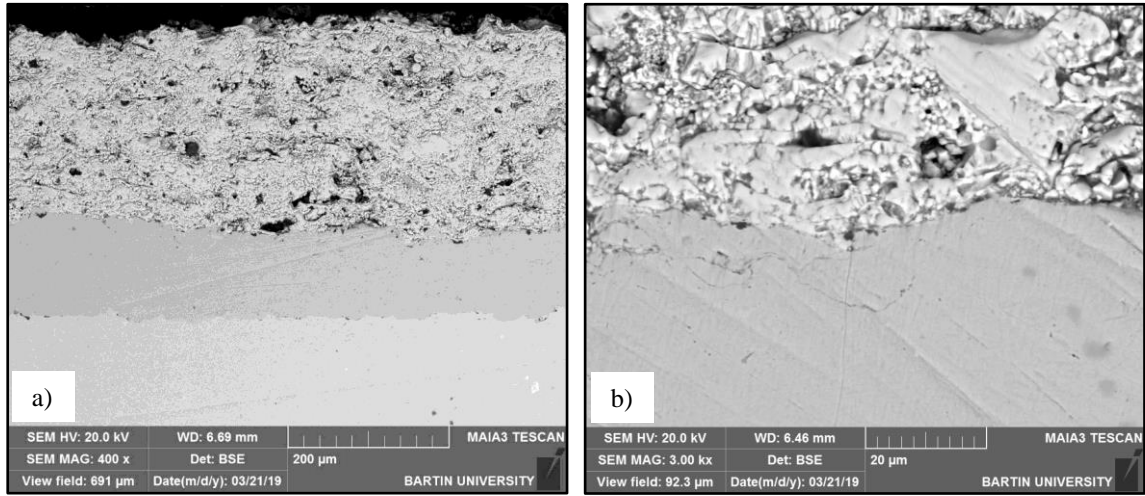
Elektrokimyasal korozyon öncesi Inconel 718 üzerine biriktirilen CGDS bağ kaplama sadece  $\gamma$  fazından oluşmaktadır. Kaplama sonrasında  $\beta$  çökeltilerinin olmamasının sebebi olarak PS yönteminin düşük sıcaklıklarda ve yüksek hızlarda altlığa püskürtülerek yüksek plastik deformasyon etkisi oluşturmasından dolayı bu fazların  $\gamma$  fazı içerisinde çözülmüş olabileceği düşünülmektedir. Şekil 4.11’ deki grafik elektrokimyasal korozyon testinden sonra XRD analizleri yapılmış olan CGDS prosesi ile bağ kaplaması üretilmiş Inconel 718 numunesinin fazlarını göstermektedir. Grafik üzerindeki pikler incelendiğinde korozyon testi sonrası herhangi bir değişim olmadığı anlaşılmaktadır. Elektrokimyasal korozyon testinden önce  $\gamma$ -matriks fazından oluşan CGDS prosesi ile üretilmiş bağ kaplamanın, elektrokimyasal korozyon testinden sonra da aynı faza sahip olduğu ve testlerin oda sıcaklığında gerçekleştirilmesi sebebiyle faz stabilitesini koruyarak yapısında herhangi bir faz dönüşümünün meydana gelmediği tespit edilmiştir.

#### 4.1.2.3 APS İle Üst Kaplaması Üretilmiş TBC Numunesinin Elektrokimyasal Korozyon Testi Sonrası Mikroyapısının İncelenmesi

Elektrokimyasal korozyon testleri sonrası CGDS prosesiyle bağ kaplaması APS prosesiyle YSZ içerikli üst kaplaması üretilmiş Inconel 718 numunesine ait yüzey ve enine kesit morfolojilerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen SEM ve EDX elementel incelemeleri şekillerde verilmiştir. Şekil 4.12’ ye bakıldığında YSZ üst kaplamaya sahip TBC sisteminin

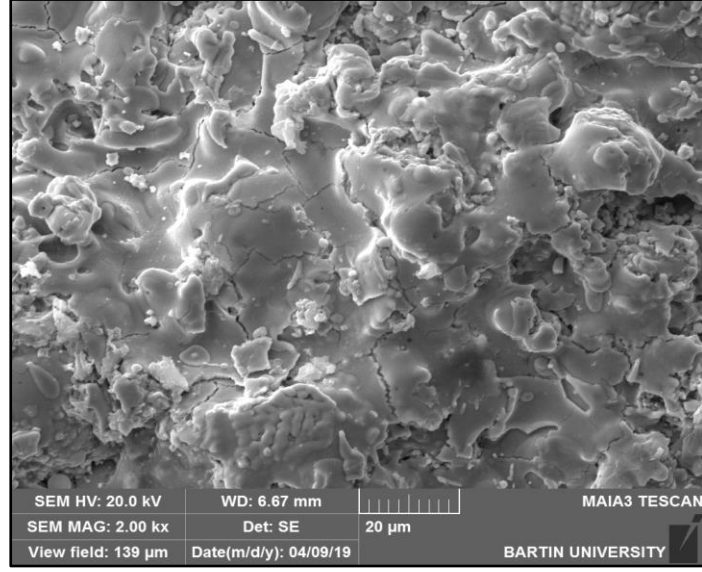


NaCl çözeltisinde elektrokimyasal korozyon testinden sonra farklı büyütme oranlarında enine kesit görüntüleri verilmiştir.



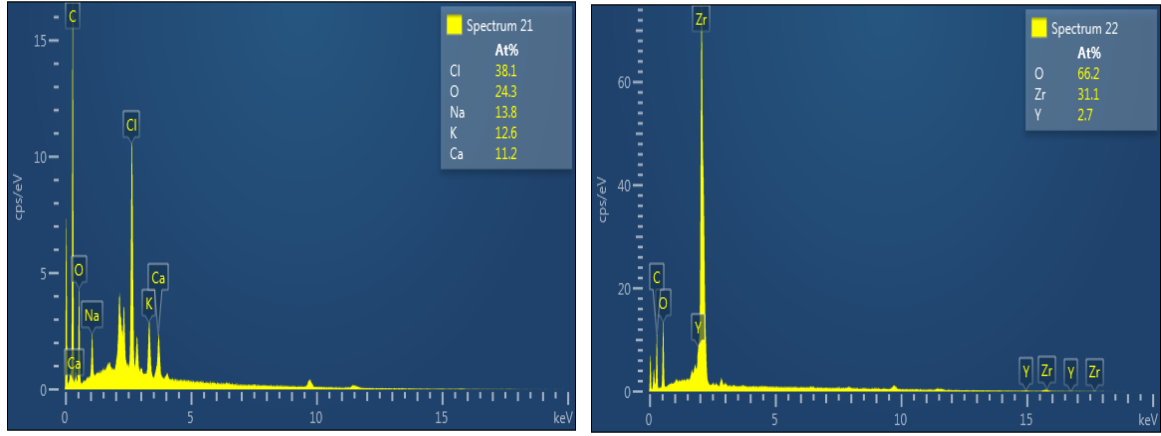
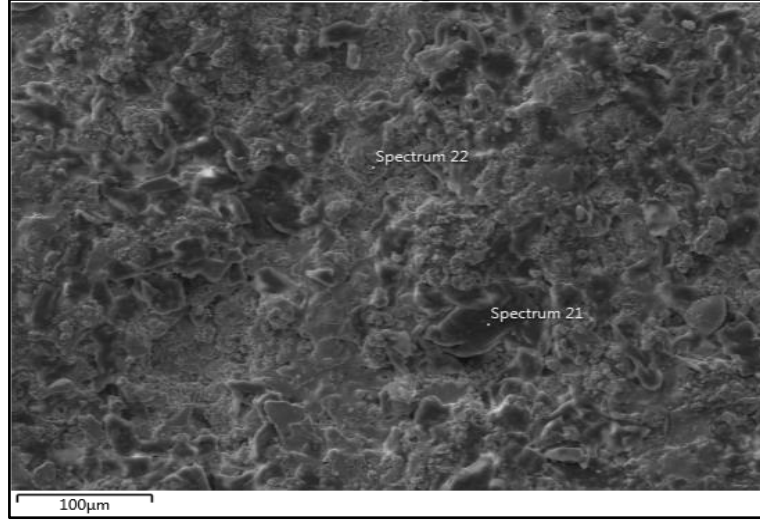
Şekil 4.12: APS ile üst kaplaması, CGDS ile bağ kaplaması uygulanmış Inconel 718 numunenin NaCl çözeltisinde elektrokimyasal korozyon testinden sonra (a) altlık, bağ ve üst kaplama görüntüsü (b) üst kaplama ara yüzey görüntüsü

Şekil 4.12’ de enine kesit görüntülere bakıldığında APS prosesiyle üretilen üst kaplama üretim prosesinin şartlarından dolayı yüksek porozite içeriğine sahip olup yapısında oksit, süreksizlik ve çatlak gibi birçok kusur içermektedir. Yüksek miktarda porozite ve oksit içermesi APS prosesinde biriktirme işleminin atmosfere açık olarak yapılmasından dolayıdır. Kaplamanın çok yüksek sıcaklıklarda yapılması nedeniyle oksitlenmeler oluşmuş, yavaş hızlarda püskürtülmesinden dolayı da porozite içermektedir. Enine kesit görüntüsü incelendiğinde bağ/seramik kaplama ara yüzeyinde yüksek sıcaklıklarda oluşan TGO yapısının elektrokimyasal korozyon testinden sonra oluşmadığı görülmektedir. Bunun sebebi elektrokimyasal korozyon testinin oda sıcaklığında gerçekleştirilmesi ve bundan dolayı bağ kaplamanın oksitlenmesini sağlayacak gerekli reaksiyon sıcaklığına çıkılmamış olmasıdır.



Şekil 4.13: APS ile üst kaplaması üretilmiş TBC sisteminin NaCl çözeltisinde elektrokimyasal korozyon testi sonrası üst yüzey görüntüsü

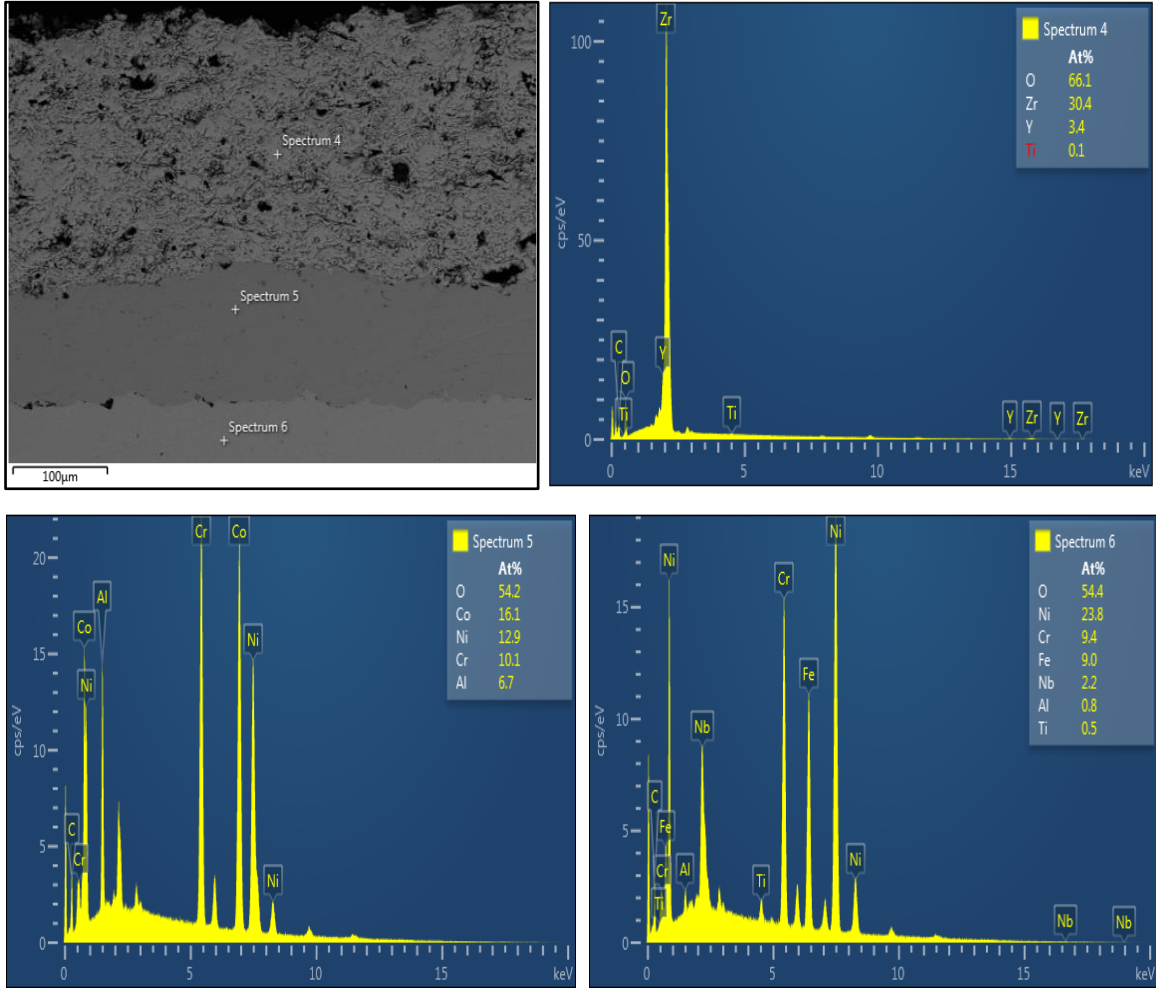
Elektrokimyasal korozyon testinden sonra Şekil 4.13' deki üst yüzey görüntüsü incelendiğinde yüzeyde mevcut mikro çatlaklar görülmektedir. Bunlar elektrokimyasal korozyon testi öncesinde üst kaplamanın APS prosesiyle üretilmesinden kaynaklanmıştır. APS prosesi kullanılarak seramik esaslı tozlarla yapılan kaplama yöntemi açık hava atmosferinde uygulanmasından dolayı yüzeysel çatlakları ve poroziteleri daha yüksek oranda içermekte ve kaplamanın karakteristik özelliğini oluşturmaktadır.



Şekil 4.14: APS ile üst kaplaması üretilmiş TBC sisteminin NaCl çözeltisinde elektrokimyasal korozyon testinden sonra üst yüzey EDS analizi

Şekil 4.14’ de CGDS ile bağ kaplaması APS ile üst kaplaması üretilmiş Inconel 718 numunesinin NaCl çözeltisinde elektrokimyasal korozyon testinden sonra yüzeyden alınan EDS analizi verilmiştir. TBC numunenin elektrokimyasal korozyona uğratılmasından sonra YSZ kaplamalı üst yüzeyinden elde edilmiş Şekil 4.13’ deki SEM görüntüsü ve Şekil 4.14’ deki EDS analizi incelendiğinde elektrolit olan NaCl’ nin yüzeyde kısım kısım biriktiği üst yüzey görüntüsünde koyu renklerin olduğu yerlerde ve Spektrum 21’ den alınan analizde görülmektedir. Spektrum 22’ de açık gri renkli olan yerlerde sodyum ve klorün olmadığı, YSZ üst kaplamanın normal bir oranda kaldığı ve malzemede bir değişim olmadığı görülmektedir. Oksijen element yoğunluğu EDS tarafından tespit edilmiştir. Bu oksijen mevcudiyeti APS prosesinde kaplama malzemesinin üretimi esnasında havadan az miktarda oksit kapmış olmasına bağlanmıştır. Deney düzeneğinde kullanılan agresif çözeltide, YSZ üst kaplamaya sahip TBC sistemi, kaplamasız Inconel 718 süper alaşım altlık malzemesine

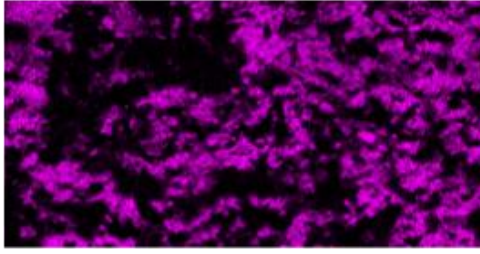
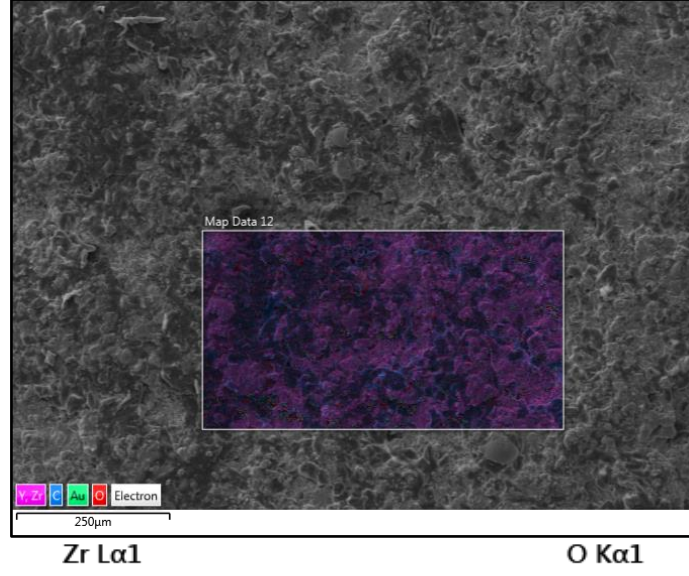
göre daha iyi bir direnç göstermiş ve  $i_{kor}$  ile tutarlı olarak yüzeyde herhangi bir hasar oluşumu meydana gelmemiştir.



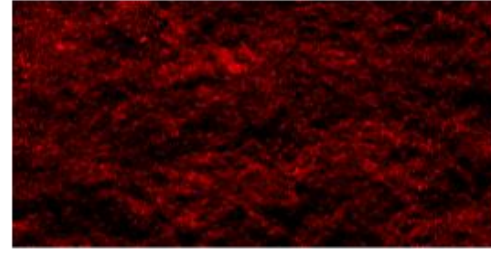
Şekil 4.15: APS ile üst kaplaması, CGDS ile bağ kaplaması üretilmiş Inconel 718 numunesinin NaCl çözeltisinde elektrokimyasal korozyon testinden sonra enine EDS analizi

Şekil 4.15' de CGDS prosesiyle bağ kaplaması APS prosesiyle üst kaplaması üretilmiş Inconel 718 numunesinin NaCl çözeltisinde elektrokimyasal korozyon testinden sonra enine kesit EDS analizi verilmiştir. Elektrokimyasal korozyon sonrasında üst yüzeyinden elde edilmiş Şekil 4.13 ve 4.14' deki görüntülerde koyu renklerin olduğu yerlerde görünen NaCl kristallerinin sadece yüzeyde kaldığı, Şekil 4.15' de ara kesitlerden alınan Spektrum 4, Spektrum 5 ve Spektrum 6' da sodyum ve kloru rastlanmadığı, malzemenin normal bir oranda kaldığı, malzemede bir değişim olmadığı ve korozif ortamların alt tabakalara nüfuz etmediği görülmektedir. Yapılan TBC, Inconel 718 süper alaşım altlık malzemesine göre daha iyi bir korozyon direnci göstermiş ve  $E_{kor}$  ile tutarlı olarak yüzeyde ve alt tabakalarda

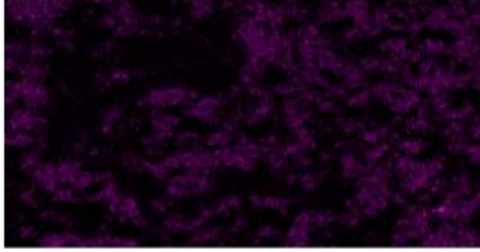
herhangi bir hasar oluşumu meydana gelmemiştir. Şekil 4.16' da elektrokimyasal korozyon testinden sonra APS prosesiyle üst kaplaması üretilmiş numunenin üst yüzeyinden alınan elementel analizi verilmiştir. Analizler incelendiğinde kaplama yapısında yeni elementlerin olmadığı görülmektedir.



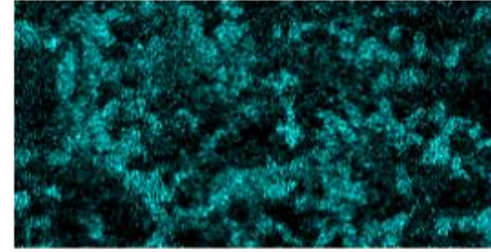
Y Lα1



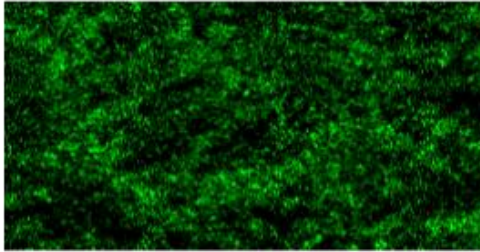
Cl Kα1



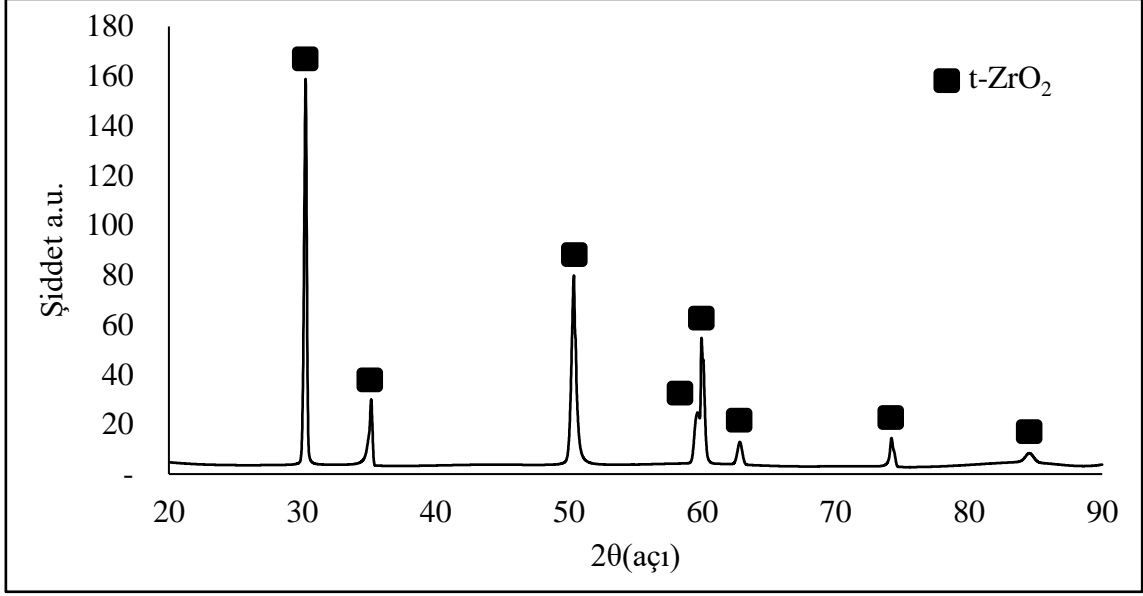
Na Kα1\_2



Al Kα1



Şekil 4.16: APS ile üst kaplaması üretilmiş TBC sisteminin NaCl çözeltisinde elektrokimyasal korozyon testinden sonra üst yüzey görüntüsünün elemental analizi



Şekil 4.17: APS ile üst kaplaması üretilmiş TBC sisteminin elektrokimyasal korozyon testinden sonra XRD analizi

Elektrokimyasal korozyon öncesi CoNiCrAlY bağ kaplamalı Inconel 718 üzerine biriktirilen YSZ içerikli APS üst kaplama tetragonal kafes yapısından oluşmaktadır (Karaoğlanlı, 2012). Şekil 4.17’deki grafik elektrokimyasal korozyon testinden sonra XRD analizleri yapılmış olan YSZ üst kaplamaya sahip TBC sisteminin fazlarını göstermektedir. Grafik üzerindeki pikler incelendiğinde korozyon testi sonrası herhangi bir değişim olmadığı tespit edilmiştir. Elektrokimyasal korozyon testinden önce t-ZrO<sub>2</sub> fazından oluşan YSZ üst kaplamaya sahip TBC, elektrokimyasal korozyon testinden sonra da aynı faza sahip olmuş ve testlerin oda sıcaklığında gerçekleştirilmesi sebebiyle faz stabilitesini koruyarak yapısında herhangi bir faz dönüşümünün meydana gelmediği görülmektedir.

#### 4.2 Elektrokimyasal Korozyon Testi Sonrasında Oluşan Mikroyapısal Değişikliklerin İrdelenmesi

Khajezadeh, vd., (2018)’nin yapmış oldukları çalışmada, HVOF yöntemi kullanılarak CoNiCrAlY bağ kaplama, APS prosesi kullanılarak YSZ, YSZ-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>’ten oluşan farklı bileşime sahip çok katmanlı TBC sistemleri üretilmiş ve 880 °C’de sıcak korozyon testlerine tabi tutulmuştur. Yapılan XRD ve SEM karakterizasyonları sonucunda; YSZ kaplamalarında, sıcak korozyondan sonra YVO<sub>4</sub>, m-ZrO<sub>2</sub>, LaVO<sub>4</sub> fazı oluştuğu tespit edilmiştir. Oda sıcaklığında ağırlıkça Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + %20 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> çözeltisinde 1 mV/s tarama hızında gerçekleştirilen elektrokimyasal polarizasyon sonucunda, sıcak korozyon

numunelerinde korozyon çevrimlerini artırarak sıcak korozyon süresi arttıkça TGO kalınlığının artmasından dolayı  $i_{kor}$ ' un azaldığı belirlenmiştir. Khajezadeh ve arkadaşları (2018) buradan elde edilen veriler doğrultusunda daha kalın bir oksit tabakasının daha yüksek korozyon direnci ve daha az korozyon oranı sağladığını, koruyucu oksit katmanının kalınlığının oluşan korozyon oranlarını kontrol ettiğini söylemiştir. Yapmış olduğumuz bu deneysel çalışmada ise numuneler sıcak korozyon işlemine tabii tutulmadığından ve elektrokimyasal korozyon testlerinin oda sıcaklığında gerçekleştirilmesinden dolayı ara yüzeyde oluşan bir TGO yapısı gözlenmemiştir. Elektrokimyasal korozyon testlerinden sonra yapılan XRD ve SEM karakterizasyonları sonucunda; YSZ kaplamaların t-ZrO<sub>2</sub> fazından oluştuğu faz stabilitesini koruyarak yapısında herhangi bir faz dönüşümünün meydana gelmediği tespit edilmiştir. Khajezadeh ve arkadaşlarının (2018) yapmış olduğu çalışmalarla tutarlı olarak sıcak korozyon işleminden sonra elektrokimyasal korozyon uygulanmasıyla ara yüzeyde oluşan TGO yapısının gözlemlenebileceği ve kaplamalar sayesinde azalan  $i_{kor}$  değerinde belirli noktaya kadar artan TGO kalınlığı ile daha fazla azalma sağlanabileceği söylenebilir. Khajezadeh ve arkadaşlarının (2018) çalışmasında kaplamalar sayesinde azalan  $i_{kor}$  değeri gerçekleştirdiğimiz bu çalışmada da benzer şekilde azalmıştır ve bölüm 4' te verilen tablo 4.1' de  $i_{kor}$  değerleri gösterilmiştir. Seramik üst kaplama, koruyucu oksit tabaka tipi, TGO' da ki boşluklar ve çatlaklar, oksit yayılması gibi etkenlerin, uzun süreli sıcak korozyondan sonra  $i_{kor}$ ' da değişmeye neden olacağı tespit edilmiştir (Khajezadeh, vd., 2018).

Chao ve arkadaşlarının (2011) yapmış oldukları çalışmada NiCoCrAlY bağ kat ve YSZ üst kaplamadan oluşan TBC 1173 K' da %25 NaCl ve %75 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> karışımına maruz bırakıldıktan sonra 70 çevrim sonrası TBC' lerin enine kesit görüntülerinde YSZ kat ve bağ kat arasında sürekli bir TGO katmanının oluştuğu rapor edilmiş ve YSZ katmanında bazı küçük çatlakların meydana geldiği görülmüştür. Empedans spektroskopisi testinde 0,1 V genlikte AC uygulanmış ve hız frekansı 0,01 Hz ile  $1 \times 10^7$  Hz aralığındadır. Oluşan Nyquist eğrilerinde TBC sistemindeki iki katmana karşılık gelen TGO ve YSZ iki yarım daire şeklinde verilmiştir. Elde edilen verilerde 110 çevrime kadar TGO katmanının korozyon direncinin zamanla arttığı 110 çevrimden sonra artan TGO kalınlığı ile korozyon direncinin azalmaya başladığı rapor edilmiştir. Bunun sebebi TGO' da kalınlaşma olmasına rağmen 110 çevrimden sonra bazı mikro gözeneklerin oluşması olarak düşünülmüştür. Buradan elde edilen veriler doğrultusunda TGO katmanının direncinin, TGO katmanının kalınlığı ve



gözenekliliği ile alakalı olduğudur (Chao, vd., 2011). Yapılan bu çalışmada CoNiCrAlY bağ kat ve YSZ üst kaplamadan oluşan TBC, üretimlerinin gerçekleştirilmesinden sonra sıcak korozyon gibi herhangi bir işleme maruz bırakılmadan oda sıcaklığında 0,1 M NaCl çözeltisinde elektrokimyasal korozyon testlerine tabii tutulmuştur. Empedans spektroskopisi testinde 10 mV genlikte AC uygulanmıştır ve hız frekansı 20 kHz ile 10 mHz aralığındadır. Bu çalışma oda sıcaklığında gerçekleştirildiği için TGO yapısı tespit edilmemiştir ve bu yapının olmaması TBC sisteminin korozyon direncinde azalma sağlamamıştır. Bu çalışmanın oda sıcaklığında yapılması ve sıcak korozyon uygulanmaması, TGO yapısının detaylı bir şekilde gözlemlenebilmesi için yetersizdir.

Duan ve arkadaşlarının (2018) yapmış oldukları çalışmada ticari Zry-2 (zircalloy) malzemesi altlık olarak kullanılmıştır. Altlık üzerine plazma püskürtme sistemi kullanılarak  $Al_2O_3$  ve  $ZrO_2$  ile termal püskürtme kaplamaları uygulanmıştır. Kaplaması tamamlanan TBC sistemi elektrokimyasal korozyon testlerine tabii tutulmuştur. Elektrokimyasal korozyon üç elektrotlu sistemde %3.5 NaCl çözeltisinde 30 °C sıcaklıkta yapılmıştır. EIS testinde, 10 mV genlikte AC uygulanmıştır ve hız frekansı 10 kHz ile 10 mHz frekans aralığındadır. Elde edilen deney sonuçlarında  $ZrO_2$ ' nin  $E_{kor}$  değeri -415 mV,  $Al_2O_3$ ' ün  $E_{kor}$  değeri -243 mV ve kaplanmamış Zry-2 numunesinin  $E_{kor}$  değeri ise -246 mV olarak rapor edilmiştir. Bununla birlikte  $ZrO_2$  kaplı numunedeki  $i_{kor}$ ' un diğer numunelerden iki kat daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Aynı zamanda  $E_{kor}$  değerinin ise diğer numunelerden daha küçük olduğu tespit edilmiştir. Duan ve arkadaşları (2018) pürüzlü bir yüzeyin yüksek elektrokimyasal aktiviteye sahip olduğunu buna bağlı olarak da pürüzlü bir yüzey için  $E_{kor}$  değerinin, pürüzsüz bir yüzeye sahip aynı malzemedan daha düşük olduğunu söylemiş ve  $E_{kor}$  değerinin  $ZrO_2$ ' de düşük olmasını buna bağlamıştır. Bununla birlikte  $ZrO_2$  kaplı numune için çok daha düşük  $E_{kor}$  değeri, altlık ile kaplama arasındaki zayıf yapışma nedeniyle elektrolite maruz kalan altlığın pürüzlülüğüne bağlanmıştır. Yani uygulanan kaplama elektrolitin alt tabakaya yayılmasını engelleyememiştir. Altlık ile kaplama yapılan iki numune karşılaştırıldığında, iki kaplamanın da çatlak ve gözeneklere sahip olmasından dolayı elektrokimyasal saldırılara karşı direnci arttırmada yetkin olmadığı rapor edilmiştir. Yapmış olduğumuz bu deneysel çalışmada APS prosesi kullanılarak yapılan  $ZrO_2$  kaplamalı TBC' de elde edilen  $ZrO_2$  (YSZ)  $E_{kor}$  değeri -182 mV iken altlık olan Inconel 718' in  $E_{kor}$  değerinin -435 mV bulunduğu Tablo 4.1 de gösterilmiştir. Bu değerlere bakıldığında YSZ kaplamanın altlık malzemeye göre daha iyi bir  $E_{kor}$  ve  $i_{kor}$  değeri verdiği dolayısıyla daha iyi korozyon

direnci sergilediği tespit edilmiştir. Bunun sebebi olarak üretilen bağ kaplamasının süper alaşım altlık ile termal genleşme uyumu sağlayarak yapışma uyumsuzluğunu giderdiği, TBC' nin metalik altlığa iyi tutunmasını sağladığı ve bu sayede de altlık malzemeye elektrolitin geçişine imkan vermediği düşünülmektedir (Duan, vd., 2018).

Sadeghimeresht ve arkadaşları (2016) yapmış oldukları çalışmada HVOF tekniğini kullanarak 304L paslanmaz çelik altlıklar üzerine sırasıyla Ni, NiCr, NiCoCrAlY ve CoNiCrAlY biriktirerek bağ kaplamalarını gerçekleştirmiş ardından her birinin üzerine sırasıyla Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr üst kaplama biriktirerek TBC' ler sistemini üretmiştir. Püskürtülen kaplamaların korozyon davranışı, 0,1 M HCl çözeltisinde 250 °C' de 240 saat daldırma testinden sonra elektrokimyasal korozyon testleriyle incelenmiştir. Elektrokimyasal testlerin tamamı klasik üç elektrotlu sistem ile yapılmıştır. Elektrokimyasal korozyon testleri ağırlıkça %3,5 NaCl çözeltisinde, çözeltiyi çevreleyen atmosfer ile denge durumundayken, termostatik koşullar altında (24 ± 0,1 °C) yapılmıştır. Potansiyodinamik eğrileri, OCP' ye göre başlangıç potansiyel değeri -250 mV ve bitiş potansiyel değeri 2000 mV olarak belirlenmiş ve 0,2 mV.s<sup>-1</sup> tarama hızında gerçekleştirilmiştir. Püskürtme işlemi tamamlanan kaplamaların yapılan SEM karakterizasyonları sonucunda NiCoCrAlY ve CoNiCrAlY kaplamaların, Ni ve NiCr kaplamalardan daha yüksek gözeneklilik seviyelerine sahip olduğu, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr kaplamasının gözenekliliğinin ise NiCoCrAlY ve CoNiCrAlY kaplamalardan daha düşük olduğu rapor edilmiştir. Sadeghimeresht ve arkadaşları (2016) çalışmalarında birbirine bağlı porozitenin, korozyon koruyucu kaplamalar için ana sorun olduğunu ve elektrolitin, kılcallık nedeniyle kaplama boyunca emileceğini söylemiştir. Birbirine bağlı gözeneklerin; aşındırıcı iyonların kaplamadan geçmesini ve alt tabakaya ulaşmasını kolaylaştıracağını, gözenekliliğin kaplama yüzeylerinde yerel korozyon oluşumuna yol açacağını söylemişlerdir. Tablo 4.3' de Sadeghimeresht ve arkadaşlarının (2016) yapmış olduğu çalışmada rapor edilen elektrokimyasal testlerinin sonuçları verilmiştir (Sadeghimeresht, vd., 2016).

Tablo 4.3: Sadeghimeresht ve arkadaşlarının (2016) yapmış oldukları elektrokimyasal korozyon testleri sonucu

Çözelti	Deney Koşulları	R <sub>p</sub> (kΩ·cm <sup>2</sup> )	E <sub>kor</sub> (mV)	i <sub>kor</sub> (μA/cm <sup>2</sup> )
%3,5 NaCl Çözeltisi	304 L Paslanmaz Çelik	29,8	-270	0,95
	CoNiCrAlY Bağ Kaplama	26,8	-210	1,21
	CoNiCrAlY Bağ Kaplama + Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> + NiCr Üst Kaplama	74,1	-180	0,45

Verilen değerler incelendiğinde Sadeghimeresht ve arkadaşları (2016) CoNiCrAlY içerikli bağ kaplama numunesinin  $i_{kor}$  değerini  $1,21 \mu A/cm^2$ , CoNiCrAlY içerikli bağ kaplaması Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> + NiCr içerikli üst kaplaması yapılmış numunenin  $i_{kor}$  değerini  $0,45 \mu A/cm^2$  bulmuşlardır. Bu iki numune arasında en yüksek  $i_{kor}$  değerine CoNiCrAlY içerikli bağ kaplaması Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> + NiCr içerikli üst kaplaması yapılmış numune sahipken, en düşük E<sub>kor</sub> değerine CoNiCrAlY bağ kaplama numunesinin sahip olduğu görülmüştür. Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr kaplama ve altlık arasında bir bağ katın eklenmesinin,  $i_{kor}$ ' u düşürdüğü ve E<sub>kor</sub>' u daha soy değerlere kaydırıldığı rapor edilmiştir. Bunun sebebi olarak Sadeghimeresht ve arkadaşları (2016) yapmış oldukları çalışmada CoNiCrAlY bağ kaplamanın yüksek gözeneklilik içermesinden dolayı, en kötü tabaka içi yapılaşmaya sahip olduğunu belirtmiştir. Bu durumun, tabaka sınırlarının aşırı derecede bozulmasına ve sonunda altlığın ara yüzünün aşınmasına neden olduğu söylenilmiştir. HVAF bağ kaplamanın biriktirme sırasında yetersiz erimesinin ya da parçacık hızının, kaplamada kusurlara ve gözeneklere neden olduğu ve ortamdaki korozif maddelerin bu kusurlardan geçebildiği, tabaka sınırlarını kolayca aşındırdığı ve alt tabakaya kısa sürede ulaştığı belirtilmiştir. CoNiCrAlY kaplamanın zayıf korozyon performansının, malzemenin kendine özgü özelliklerinden değil, uygun olmayan kaplama biriktirme parametrelerinden kaynaklandığı rapor edilmiştir (Sadeghimeresht, vd., 2016). Yapmış olduğumuz bu deneysel çalışmada ise Inconel 718 yüzeyine biriktirilen CoNiCrAlY içerikli bağ kaplama CGDS prosesi ile üretilmiştir. Bu çalışmada gerçekleştirilen elektrokimyasal korozyon testlerinde altlık olarak kullanılan Inconel 718' in  $i_{kor}$  değeri  $4,8 \mu A/cm^2$  iken CGDS prosesi ile uygulanan CoNiCrAlY içerikli bağ kaplamanın  $i_{kor}$  değeri  $0,9 \mu A/cm^2$  olarak tespit edilmiştir ve bu değerler Tablo 4.1' de verilmiştir. CoNiCrAlY içerikli bağ kaplama malzemesinin CGDS prosesi ile üretilmesiyle neredeyse gözeneksiz ve yoğun bir kaplama tabakası elde edilmiştir. Bu sayede ortamdaki korozif maddelerin alt

tabakaya kısa sürede ulaşmasını sağlayacak kusurlar oluşmamış tabaka sınırları aşınmamıştır. CoNiCrAlY bağ kaplamanın, altlık malzeme için uygun kaplama biriktirme parametrelerinde olduğu tespit edilmiş ve bağ kaplama sayesinde iyi korozyon performansı sağlanmıştır.

## BÖLÜM 5

### SONUÇ VE ÖNERİLER

#### 5.1 Genel Sonuçlar

Gerçekleştirilen çalışmada, Inconel 718 süper alaşım altlık malzeme üzerine CGDS prosesi kullanılarak CoNiCrAlY metalik bağ kaplama ve APS prosesi kullanılarak YSZ içerikli seramik üst kaplama üretilmiş ve TBC sistemi elde edilmiştir. TBC sisteminin olası hava ve deniz gibi ortam ve çalışma şartlarında değişimlerinin ve performansının görülebilmesi amacıyla; altlık, metalik bağ kaplama ve TBC sistemi ayrı ayrı olmak üzere elektrokimyasal korozyon testlerine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar literatürde elde edilen bulgular ile karşılaştırmalı olarak incelenerek, açıklanmaya çalışılmıştır.

Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen genel sonuçlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır:

1. CGDS prosesi kullanılarak, Inconel 718 süper alaşım altlık malzeme üzerine MCrAlY metalik bağ kaplamaların üretimleri ve APS prosesi kullanılarak YSZ seramik üst kaplamaların üretimi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiş ve TBC sistemi elde edilmiştir.
2. CGDS prosesi ile üretimi gerçekleştirilen metalik bağ kaplama yapısının yoğun yapıda, düşük porozite ve oksit içeriğine sahip olduğu görülmüştür. APS prosesi ile üretimi gerçekleştirilen üst kaplama yapısının ise, prosesin üretim koşullarına bağlı olarak poroziteli ve oksit içeriğine sahip olduğu görülmüştür.
3. Üretimleri gerçekleştirilen altlık malzeme, metalik bağ kaplama ve seramik üst kaplamaya sahip TBC sistemi oda sıcaklığında 0,1 M'lık saf sodyum klorür (NaCl) çözeltisine sırasıyla daldırılarak OCP, EIS ve PDP testi olmak üzere üç ayrı elektrokimyasal korozyon testlerine tabi tutulmuştur. Kaplama yapılmamış Inconel 718 malzemesinin NaCl çözeltisinde elektrokimyasal korozyon testine tabi tutulması sonucunda diğer kaplamalı numunelere göre en yüksek korozyon akım yoğunluğuna

( $i_{kor}$ ) sahip olduğu ve düşük bir korozyon potansiyeli ( $E_{kor}$ ) değeri ile tutarlı olarak daha az soy davranış sergilediği belirlenmiştir. Polarizasyon eğrisine bakıldığında, mevcut akım yoğunluğun keskin bir şekilde arttığı görülmektedir. Bu yüzeyde hasar oluşumunun başladığını gösteren  $E_{kor}$  üzerinde belirgin bir aktivasyon platformu ortaya koymaktadır. Kaplamasız Inconel 718 malzemesinin NaCl çözeltisinde bağ kaplamalı ve seramik üst kaplamalı numunelere göre düşük korozyon direncine sahip olduğu belirlenmiştir. CGDS prosesi kullanılarak üzerine metalik bağ kaplaması yapılmış Inconel 718 malzemesinin NaCl çözeltisinde elektrokimyasal korozyon testine tabi tutulması sonucunda, kaplamasız Inconel 718' e göre daha düşük  $i_{kor}$ ' a sahip olduğu ve daha yüksek bir  $E_{kor}$  değeri ile tutarlı olarak daha fazla soy davranış sergilediği belirlenmiştir. Böylece Inconel 718 malzemesine CGDS prosesi kullanılarak CoNiCrAlY bağ kaplama yapılmasıyla korozyon direncinde iyileşme sağlandığı görülmüştür. CGDS prosesi kullanılarak CoNiCrAlY bağ kaplama ve APS prosesi kullanılarak YSZ seramik üst kaplamaya sahip Inconel 718 malzemesinin NaCl çözeltisinde elektrokimyasal korozyon testine tabi tutulması sonucunda diğer numunelere göre en düşük  $i_{kor}$ ' a sahip olduğu ve yüksek bir  $E_{kor}$  değeri ile tutarlı olarak soy davranış sergilediği belirlenmiştir. Inconel 718 malzemesine metalik bağ ve seramik üst kaplama üretiminin yapılmasıyla korozyon direncinin çok daha iyi seviyede olduğu görülmüştür. Sonuç olarak süper alaşım Inconel 718 altlık malzemeye uygulanan TBC sistemi, NaCl içeren ortamda daha kararlı bir hale gelerek, daha iyi korozyon direnci sergilemiştir.

4. EIS verileri incelendiğinde; Nyquist eğrilerinin, Rp değerlerinin ve Bode eğrilerinin  $i_{kor}$  değerleri ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Bu durum deneysel çalışmada kullanılan çözelti ve ortam koşullarının doğru olduğunu göstermektedir.
5. Elektrokimyasal korozyon testleri sonucunda gerçekleştirilen XRD analizleri neticesinde:  $\gamma$ -matriks fazına sahip olan kaplamasız Inconel 718 ve bağ kaplamalı Inconel 718 numunelerinin faz kararlılığını koruyarak yapılarında herhangi bir faz dönüşümünün meydana gelmediği görülmüştür. t-ZrO<sub>2</sub> fazına sahip olan seramik üst kaplamalı Inconel 718 numunesinin de aynı şekilde faz kararlılığını koruyarak yapısında herhangi bir faz dönüşümünün meydana gelmediği görülmüştür.

6. Elektrokimyasal korozyon testleri sonrasında yüzey morfolojilerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen SEM ve EDS incelemelerinde; kaplamasız Inconel 718 numunesinin deney düzeneğinde kullanılan çözelti (NaCl çözeltisi) ile etkileşimi neticesinde malzeme yüzeyinde mikro boyutta çatlakların ve hasar oluşumunun başladığı gözlemlenmiştir. Polarizasyon eğrisine bakıldığında ise, mevcut akım yoğunluğun keskin bir şekilde artışı oluşan bu hasar oluşumunu doğrulamıştır. Metalik bağ kaplamalı ve TBC sistemine sahip Inconel 718 süper alaşım malzemedan alınan SEM ve EDS incelemelerinde malzeme yapısında ciddi ölçüde bir değişim olmadığı, çözelti ortamlarının yüzeyde bir etki oluşturmadığı ve alt tabakaya nüfuz etmediği görülmüştür. Üretilen TBC sistemi, kaplamasız Inconel 718 süper alaşım altlık malzemesine göre daha iyi bir korozyon direnci göstermiş ve  $i_{kor}$  ile tutarlı olarak yüzeyde ve alt tabakalarda herhangi bir hasar oluşumu meydana gelmemiştir.
7. SEM görüntüleri ve EDS analizleri neticesinde TBC sistemlerinde yüksek sıcaklık uygulama koşullarında, uygulanan sıcaklık ve süreç zamanına bağlı olarak oluşan TGO yapısının metalik bağ/seramik üst kaplama ara yüzeyinde elektrokimyasal korozyon koşulları neticesinde oluşmadığı görülmüştür. Bu durum çalışmada kullanılan elektrokimyasal korozyon test koşullarının (çözelti, sıcaklık ve diğer parametreler) TGO oluşumuna ortam sağlayacak düzeyde etkin olmamasından kaynaklanmaktadır.

## 5.2 Öneriler

Bu tez kapsamında elde edilen veriler doğrultusunda gelecekte yapılacak olan çalışmalar için öneriler aşağıda maddeler halinde sunulmaktadır:

1. Çözeltide elektrik iletkenliği sağlamak için kullanılan Cl<sup>-</sup> ün konsantrasyonu ve bunun yanında testlerde uygulanan akım miktarı artırılarak malzemede oluşturacağı etki (hasar) gözlemlenebilir.
2. Deneysel çalışmalarda kullanılan çözeltiler değiştirilerek farklı ortamlardaki korozyon etkileri karşılaştırmalı olarak incelenebilir.
3. Elektrokimyasal korozyon testlerinde, sıcaklığın artması çoğunlukla çözünürlüğün ve dolayısıyla çözeltideki iyon derişiminin artması anlamına gelir. Buna bağılı olarak çözeltiler ısıtılarak iletkenliği artırılabilir ve deneysel çalışmalar bu şekilde gerçekleştirilerek etkilerin gözlemlenmesi sağlanabilir.
4. Bu çalışmada gerçekleştirilen elektrokimyasal testler kısa çevrim süreli zaman aralığında gerçekleştirilmiştir. Bu zaman aralığında yüzeyde görülen mikro çatlaklardan yola çıkılarak, çatlakların uzun süreli aralıklarda daha da artacağı öngörülmüştür. Bu yüzden elektrokimyasal korozyon testlerinin uzun zaman aralığında gerçekleştirilerek, sonucunda yüzeyde oluşturacağı hasarlar incelenebilir.
5. Elektrokimyasal korozyon testinden önce ve sonra alınan ölçümler doğrultusunda kütle kaybı deneyi yapılarak çözeltiler ortamının yüzeyde oluşturduğu korozyon etkileri detaylı analiz ile incelenebilir.
6. Elektrokimyasal korozyon testlerinin, sıcak korozyon testlerine müteakip olarak gerçekleştirilmesi sağlanarak TBC sistemi metalik bağ ve seramik üst kaplama ara yüzeyindeki TGO tabaka yapısının değişimi daha ayrıntılı olarak gözlemlenebilir.



## KAYNAKLAR

- Adams, S., Crannell, G., Bolcavage, Ann., McIntyre, R. ve Beling P. A. (2018). A condition monitoring system for low vacuum plasma spray using computer vision. *2018 IEEE International Conference on Prognostics and Health Management (ICPHM)*, 2018
- Afrasiabi, A. ve Kobayashi, A. (2013). Hot corrosion control in plasma sprayed YSZ coating by alumina layer with evaluation of microstructure and nanoindentation data (H, E). *Vacuum*, 88: 103-107.
- Afrasiabi, A., Saremi, M. ve Kobayashi, A. (2008). A comparative study on hot corrosion resistance of three types of thermal barrier coatings: YSZ, YSZ+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and YSZ/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Materials Science and Engineering*, 478: 264-269.
- Ahlborg, N. L. ve Zhu, D. (2013). Calcium–magnesium aluminosilicate (CMAS) reactions and degradation mechanisms of advanced environmental barrier coatings. *Surface and Coatings Technology*, 237: 79-87.
- Ahmadi-Pidani, R., Shoja-Razavi, R., Mozafarinia, R. ve Jamali, H. (2013). Laser surface modification of plasma sprayed CYSZ thermal barrier coatings. *Ceramics International*, 39: 2473–2480.
- Ajdelsztajn, L., Jodom, B., Kim, G.E. ve Schoenung, J.M. (2005). Cold spray deposition of nanocrystalline aluminum alloys. *Metallurgical and materials transactions*, 36: 657-666.
- Ajdelsztajn, L., Picas, J. A., Kim, G. E., Bastian, F. L., Schoenung, J. ve Provenzano, V. (2002). Oxidation behavior of HVOF sprayed nanocrystalline NiCrAlY powder. *Materials Science & Engineering*, 338: 33-43.
- Altuncu, E. (2011). YSZ-CSZ Esaslı Termal Bariyer Kaplamaların Üretimi, Karakterizasyonu Ve Termal Çevrim Performanslarının Karşılaştırılması. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya, 258 s.
- Altuncu, E., Üstel, F. ve Erdoğan, G. (2008). Sıcak korozyon ortamının plazma sprej tekniği ile üretilmiş termal bariyer kaplamalar üzerine etkileri. *11. Uluslararası Korozyon Sempozyumu*, İzmir-KORSEM, 429-437.
- Arı, N., (2008). Elektrokimyasal Polarizasyon Yoluyla Yumuşak Çelik Yüzeyinde Biriktirilen Polianilin Korozyon Özelliklerinin Farklı Kaplama Parametrelerine Göre İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalı, Ankara, 97 s.
- 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.

- AWS Committee on Thermal Spraying, (1997). *Thermal Spraying Practice, Theory and Application*. American Welding Society, INC, Florida, 184 s.
- Barranco, V., Feliu, S. ve Feliu, S. (2004). EIS study of the corrosion behaviour of zinc-based coatings on steel in quiescent 3% NaCl solution. Part 1: directly exposed coatings. *Corrosion Science*, 46: 2203-2220.
- Barut, N. (2018). Mikro Dalga Fırınında Borlanmış P20 Çeliğinin Elektrokimyasal Korozyon Davranışının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Metalurji Fen Bilimleri Enstitüsü, Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Afyon, 58 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.
- Bengi, T. (2009). Termal Bariyer Kaplamaların Isıl Özelliklerinin İncelenmesi Ve Düşük Termal İletkenlik İçin Parametre Optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İleri Teknolojiler Anabilim Dalı, İstanbul, 59 s.
- Byeon, J. W., Jayaraj, B., Vishweswaraiah, 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.
- Bonadei, A. ve Marrocco, T. (2014). Cold sprayed MCrAlY + X coating for gas turbine blades and vanes. *Surface & Coatings Technology*, 242: 200-206.
- Bose, S. (2007). *High Temperature Coatings*. Butterworth-Heinemann: Elsevier Burlington, 300 s.
- Cao, X. Q., Vassen, R. ve Stoeber, D. (2004). Ceramic materials for thermal barrier coatings. *Journal of the European Ceramic Society*, 24: 1-10.
- Champagne, V. K. (2007). *The Cold Spray Materials Deposition Process*. Woodhead Publishing, 376 s.
- Chao, L., Hui, H., Liyong, N. ve Chungen, Z. (2011). Evaluation of thermal barrier coatings exposed to hot corrosion environment by impedance spectroscopy. *Chinese Journal of Aeronautics*, 24: 514-519.
- Chen, Y. (2015). Study Of Bond Coats For Thermal Barrier Coating Applications. Doctor's Degree, The University Of Manchester Philosophy In The Faculty of Engineering and Physical Sciences, 168 s.
- Çiftiyürek, E. (2009). %8 YSZ (İtriyum İle Stabilize Edilmiş  $\text{ZrO}_2$ ) 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.
- Clarke, D. R., Oechsner, M. ve Padture, N. P. (2012). Thermal-barrier coatings for more efficient gas-turbine engines. *MRS Bulletin*, 37: 891-898.
- Dalkılıç, S. (2007). Bir Termal Bariyer Kaplama Sisteminin Yorulma Davranışının İncelenmesi. Doktora Tezi. Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivil Havacılık Anabilim Dalı, Eskişehir, 149 s.
- Davis, J. R. (2004). *Handbook of Thermal Spray Technology*. ASM International: Ohio
- Diltemiz, A. F. (2010). Plazma Sprey Termal Bariyer Kaplamaların Isıl ve Mekanik Özelliklerinin Optimizasyonu. Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalı, Eskişehir, 106 s.
- Dokur, M. M. (2014). Çok Katmanlı CYSZ / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Ve CYSZ / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+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.
- Dorfman, M. R. (2012). *Handbook of Environmental Degradation of Materials*. Elsevier: New York.
- 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.
- Döleker, K. M. (2018). YSZ, Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> Ve YSZ/Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> İçerikli Termal Bariyer Kaplama Sistemlerinin İzotermal Oksidasyon Ve Termal Çevrim Davranışlarının İncelenmesi. Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Karabük, 208 s.
- Duan, Z., Yang, H., Kano, S., Murakami, K., Satoh, Y., Takeda, Y., ve Abe, H. (2018). Oxidation and electrochemical behaviors of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and ZrO<sub>2</sub> 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.
- Evans, A.G., Mumm, D.R., Hutchinson, J.W., Meier, G. H. ve Pettit, F. S. (2001). Mechanisms controlling the durability of thermal barrier coatings. *Progress in Materials Science*, 46: 505-553.
- Fauchais, P. ve Montavon, G. (2008). Thermal and cold spray recent developments. *Key Engineering Materials*, 384: 1-59.
- 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.

- Gavendová, P., Čížek, J., Čupera, J., Hasegawa, M. ve Dlouhá, I. (2016). Microstructure modification of CGDS and HVOF sprayed CoNiCrAlY bond coat remelted by electron beam. *Procedia Materials Science*, 12: 89-94.
- Ghadami, F. ve Aghdam, A. S. R. (2019). Improvement of high velocity oxy-fuel spray coatings by thermal post-treatments: A critical review. *Thin Solid Films*, 678: 42-52.
- Gök, M. G. (2015). Çok Katmanlı Ve Fonksiyonel Derecelendirilmiş CYSZ/Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 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 Rao, A. (2006). Thermal barrier coatings for enhanced efficiency of gas turbine engines. *Surface and Coatings Technology*, 201: 3016-3029.
- Gurrappa, I., Yashwanth, I. V. S., Mounika, I. Murakami, H. ve Kuroda, S. (2015). The Importance of Hot Corrosion and Its Effective Prevention for Enhanced Efficiency of Gas Turbines. Chapter 3.
- 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 s.
- Huang, H., Liu, C., Ni, L. ve Zhou, C. (2011). Evaluation of microstructural evolution of thermal barrier coatings exposed to Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> using impedance spectroscopy. *Corrosion Science*, 53: 1369-1374.
- Hussain, T. (2012). Cold spraying of titanium: A review of bonding mechanisms, microstructure and properties. *Key Engineering Materials*, 533: 53-90.
- Ichikawa, Y., Ogawa, K., Nivard, M., Berthe, L., Boustie, M., Ducos, M., Barradas, S. Ve Jeandin, M. (2007). Adhesion study of cold-sprayed CoNiCrAlY-Mo coating of Inconel 625 using the laser shock adhesion test (LASAT). *Materials Science Forum*, 539-543: 1086-1091.
- Jayaraj, B., Vishweswaraiyah, S., Desai, V. H. ve Sohn, Y. H. (2004). Electrochemical impedance spectroscopy of thermal barrier coatings as a function of isothermal and cyclic thermal exposure. *Surface and Coatings Technology*, 177-178: 140-151.
- 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&Sons: CESP*, 29: 147-158.
- Kahraman, N. (2000). Toz Alev Spreyleme Yöntemiyle Kaplanan Numunelerde Kaplama Parametrelerinin Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi (yayınlanmamış), 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. (2016). Lantan Zirkonat Esaslı Termal Bariyer Kaplamaların Üretimi Ve Karakterizasyonu. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Doktora Programı, İstanbul, 97 s.
- Karaoğlanlı, A. C. (2012). Termal Bariyer Kaplamalarda Bağ Tabakasının Farklı Yöntemlerle Üretilmesi ve Özelliklere Etkisi. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya, 225 s.
- 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.
- Karaoğlanlı, A. C., Türk, A. Ve Ustel F. (2013). Soğuk gaz dinamik sprey (CGDS) kaplama teknolojisi ve uygulamaları. *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 20-27.
- Karaoğlanlı, A. C., Türk, A. ve Özdemir, İ. (2014). Seramik esaslı plazma sprey kaplamaların oksidasyon davranışlarının incelenmesi. *Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering*, 14: 401-405.
- Khajezadeh, M.H., Mohammadi, M. ve Ghatee, M. (2018). Hot corrosion performance and electrochemical study of CoNiCrAlY/YSZ/YSZ-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> multilayer thermal barrier coatings in the presence of molten salt. *Materials Chemistry And Physics*, 220: 23-34.
- Khanna, A. S. ve Rathod W. S. (2015). Development of CoNiCrAlY oxidation resistant hard coatings using high velocity oxy fuel and cold spray techniques. *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 49: 374-382.
- Kocabaş, M. (2017). Ön İşlemlili Akımsız Nikel Ve Bor Nitrür Takviyeli Akımsız Nikel Kaplanmış Anodize Alüminyum Yüzeylerin Özellikleri. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Malzeme Programı, İstanbul, 158 s.
- Küstü, Canan. (2008). Asitli Ortamdaki Korozyona Karşı Schiff Bazı Temelli Bazı Yeni İnhibitörlerin Geliştirilmesi. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalı, Ankara, 112 s.
- Küyükoğlu, M. (2010). Ogzalit, Tungstat, Molibdat Ve Fosfatın Saf Çinkonun Sulu Ortamdaki Korozyonuna Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalı, Ankara, 81 s.

- Lakiza, S. M., Grechanyuk, M. I., Ruban, O. K., Redko, V. P., Glabay, M. S., Myloserdov, O. B., Dudnik, O. V. ve Prokhorenko, S. V. (2018). Thermal Barrier Coatings: Current Status, Search, and Analysis. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 57: 82-113.
- Li, S., Yang, X., Qi, H., Song, J. ve Shi, D. (2018). Low-temperature hot corrosion effects on the low-cycle fatigue lifetime and cracking behaviors of a powder metallurgy Ni-based superalloy. *International Journal of Fatigue*, 116: 334-343.
- Li, Y., Xie, Y., Huang, L., Liu, X. ve Zheng, X. (2012). Effect of physical vapor deposited Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> film on TGO growth in YSZ/CoNiCrAlY coatings. *Ceramics International*, 38: 5113-5121.
- Ma, W., Xie, Y., Chen, C., Fukanuma, H., Wang, J., Ren, Z. ve Huang, R. (2019). Microstructural and mechanical properties of high-performance Inconel 718 alloy by cold spraying. *Journal of Alloys and Compounds*, 792: 456-467.
- Mack, D. E., Wobst, T., Jarligo, M. O. D., Sebold, D. ve Vaßen, R. (2017). Lifetime and failure modes of plasma sprayed thermal barrier coatings in thermal gradient rig tests with simultaneous CMAS injection. *Surface and Coatings Technology*, 324: 36-47.
- Mahesh, R. A., Jayaganthan, R. ve Prakash, S. (2010). A study on the oxidation behavior of HVOF sprayed NiCrAlY – 0.4 wt.% CeO<sub>2</sub> coatings on superalloys at elevated temperature. *Materials Chemistry and Physics*, 119: 449-457.
- Matsumoto, M. (2007). Development of plasma-sprayed thermal barrier coatings with low thermal conductivity and high oxidation resistance (Review). *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 115: 118-123.
- 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.
- Minisker, M. A. (2009). Termal Sprey Yöntemiyle Oluşturulan Kaplamaların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İleri Teknolojiler Anabilim Dalı, İstanbul, 73 s.
- 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 & Coatings Technology*, 260: 63-67.
- Nejati, M., Rahimipour, M. R. ve Mobasherpour, I. (2014). Evaluation of hot corrosion behavior of CSZ, CSZ/micro Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and CSZ/nano Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> plasma sprayed thermal barrier coatings. *Ceramics International*, 40: 4579-4590.

- Nesbitt, J. ve Draper, S. (2016). Pit morphology and depth after low-temperature hot corrosion of a disc alloy. *Materials at High Temperatures*, 33: 501-516.
- Oskay, K. O. (2019). Termal Bariyer Kaplamaların Elektro Biriktirme Yöntemleriyle Üretimi Ve Karakterizasyonu. Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malzeme Bilimi Ve Mühendisliği Anabilim Dalı, Kayseri, 99 s.
- 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, 87s.
- 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: 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.
- Palmanak, E. (2009). 6-Amino-m-Kresol Polimerinin Bakır Ve Paslanmaz Çelik Üzerine Sentezi Ve Korozyon Performansının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalı, Adana, 79 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.
- Parlakıyığıt, A.S., Karaoğlanlı, A. C., Gülmez, T. ve Türk A. (2014). YSZ içerikli seramik üst ve NiCrAlY içerikli metalik bağ kaplamaya sahip termal bariyer kaplama (TBC) sisteminin mikroyapısal özelliklerinin incelenmesi. *Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering*, 14: 331-334.
- Pawlawski, L. (2008). *The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings: Second Edition*. John Wiley&Sons: Chichester, 626 s.
- Planche, M. P., Normand, B., Liao, H., Rannou, G. ve Coddet, C. (2002). Influence of HVOF Spraying parameters on in-flight characteristics of Inconel 718 particles and correlation with the electrochemical behaviour of the coating. *Surface and Coatings Technology*, 157: 247-256.
- Perez, N. (2016). *Electrochemistry and Corrosion Science*. Second Edition, Switzerland, 455 s.
- Pulci, G., Tirillò, J., Marra, F., Sarasini, F., Bellucci, A., Valente, T. ve Bartuli, C. (2015). High temperature oxidation of MCrAlY coatings modified by Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> PVD overlay. *Surface and Coatings Technology*, 268: 198-204.

- Raoelisona, 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 & applications*. Cambridge University Press, 372 s.
- 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 & Coatings Technology*, 204: 3962-3974.
- Sadeghimeresht, E., Markocsan, 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.
- Scrivani, A., Bardi, U., Carrafiello, L., Lavacchi, A., Niccolai, F. ve Rizzi G. (2003). A comparative study of high velocity oxygen fuel, vacuum plasma spray, and axial plasma spray for the deposition of CoNiCrAlY bond coat alloy. *Journal Of Thermal Spray Technology*, 12: 504-507.
- Sokołowski, P., Björklund, S., Musalek, R., Candidato, R. T., Pawłowski, L., Nait-Ali, B., ve Smith, D. (2017). Thermophysical properties of YSZ and YCeSZ suspension plasma sprayed coatings having different microstructures. *Surface and Coatings Technology*, 318: 28-38.
- Steinke, T., Sebold, D., Mack, D. E., Vaßen, R. ve Stöver, D. (2010). A novel test approach for plasma-sprayed coatings tested simultaneously under CMAS and thermal gradient cycling conditions. *Surface and Coatings Technology*, 205: 2287-2295.
- Strangman, T., Raybould, D., Jameel, A. ve Baker, W. (2007). Damage mechanisms, life prediction, and development of EB-PVD thermal barrier coatings for turbine airfoils. *Surface and Coatings Technology*, 202: 658-664.
- Topal, E. (2007). Bazı Aminoasitlerin Sulu Çözeltilerde Paslanmaz Çeliğin Korozyonu Üzerine İnhibitör Etkilerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 93 s.
- Türkan, S. (2017). Düşük Basıncılı Döküm Kalıpları İçin Poteyaj Uygulamasına Alternatif Termal Sprey Yöntemleri İle Termal Bariyer Kaplama Uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya, 110 s.
- URL-1 (2019). <https://griekspoorthermalcoatings.com/techniques>, Thermal Coatings, (10.06.2019).
- URL-2 (2019). <http://users.ox.ac.uk/~pgrant/vps.html>, Vacuum Plasma Spraying Of Coatings, (07.03.2019).



- URL-3 (2019). [https://en.wikipedia.org/wiki/Ellingham\\_diagram](https://en.wikipedia.org/wiki/Ellingham_diagram), Ellingham Diyagramı, (06.04.2019).
- URL-4 (2019). <https://slideplayer.biz.tr/slide/11846940/>, Plazma Sprey Kaplama, HVOF Ve CGDS, (19.06.2019).
- Van Steenkiste, T. H., Smith, J. R. ve Teets, R. E. (2002). Aluminum coatings via kinetic spray with relatively large powder particles. *Surface and Coatings Technology*, 154(2-3): 237-252.
- Vaßen, R., Jarligo, M. O., Steinke, T., Mack, D. E. ve Stöver, D. (2010). Overview on advanced thermal barrier coatings. *Surface and Coatings Technology*, 205: 938-942.
- Yoo, H. I., Kim, H. S., Hong, B. G., Sihm, I. C., Lim, K. H., Lim, B. J. ve Moon, S. Y. (2016). Hafnium carbide protective layer coatings on carbon/carbon composites deposited with a vacuum plasma spray coating method. *Journal of the European Ceramic Society*, 36(7): 1581-1587.
- 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.
- Zhang, H., Liu, Z., Yang, X., & Xie, H. (2018). Interface failure behavior of YSZ thermal barrier coatings during thermal shock. *Journal of Alloys and Compounds*, 779: 686-697.
- Zhang, J. ve Desai, V. (2005). Evaluation of thickness, porosity and pore shape of plasma sprayed TBC by electrochemical impedance spectroscopy. *Surface and Coatings Technology*, 190: 98-109.
- Zhao, H., Yu, F., Bennett, T. D. ve Wadley, H. N. G. (2006). Morphology and thermal conductivity of yttria-stabilized zirconia coatings. *Acta Materialia*, 54: 5195-5207.
- Wang, N., Li, C., Yang, L., Zhou, Y., Zhu, W. ve Cai, C. (2016). Experimental testing and FEM calculation of impedance spectra of thermal barrier coatings: Effect of measuring conditions. *Corrosion Science*, 107: 155-171.
- 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., Jo, C. Y. (2015). Creep deformation related to dislocations cutting the  $\gamma'$  phase of a Ni-base single crystal superalloy. *Materials Science and Engineering*, 626: 406-414.
- Xia, J., Yang, L., Wu, R., Zhou, Y. C., Zhang, L., Huo, K. L. ve Gan, M. (2019). Degradation mechanisms of air plasma sprayed yttria-stabilized zirconia thermal barrier coatings exposed to volcanic ash. *Applied Surface Science*, 481: 860-871.

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Mine Çeliker  
Doğum Yeri ve Tarihi : Ankara, 28/05/1993

### Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi : Bartın Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği  
Yüksek Lisans Öğrenimi : Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı  
Bildiği Yabancı Diller : İngilizce, Arapça  
Bilimsel Faaliyet/Yayımlar : Celiker Mine, Kocabas Mustafa, Karaoglanli Abdullah Cahit (2019). Electrochemical Corrosion Behavior Of Yttria Stabilized Zirconia Thermal Barrier Coatings. *International Natural Science, Engineering and Materials Technology Conference, İstanbul.*  
Altan Elif, Celiker Mine, Kocabas Mustafa, Karaoglanli Abdullah Cahit (2019). Investigation Of Microstructural And Electrochemical Corrosion Behavior Of Thermal Barrier Coatings. *International Natural Science, Engineering and Materials Technology Conference, İstanbul.*  
Aldığı Ödüller : Erasmus Değişim Programı

### İş Deneyimi

Stajlar : Makina ve Kimya Endüstrisi Kurumu  
Ay Döküm Makine Sanayi ve Ticaret A.Ş

Projeler ve Kurs Belgeleri : Orta Doğu Teknik Üniversitesi Yabancı Diller Yüksek Okulu, İngilizce Dil Eğitim Programı, Yabancı Dil Sertifikası  
Jan Evangelista Purkyně University in Ústí nad Labem, Çekçe Dil Eğitim Programı, Yabancı Dil Sertifikası

### **İletişim**

E-Posta Adresi : mineceliker93@gmail.com

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