

**T.C.**  
**BARTIN ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**SOĞUK GAZ DİNAMİK SPREY (CGDS) KAPLAMA YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN**  
**TERMAL BARIYER KAPLAMALARIN (TBC) SICAK KOROZYON**  
**DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**HAZIRLAYAN**  
**Yasin ÖZGÜRLÜK**

**2008**  
**DANIŞMAN**

**Yrd. Doç. Dr. Abdullah Cahit KARAOĞLANLI**

**BARTIN-2016**

## KABUL VE ONAY

Yasin ÖZGÜRLÜK tarafından hazırlanan “SOĞUK GAZ DİNAMİK SPREY (CGDS) YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN TERMAL BARIYER KAPLAMALARIN (TBC) SICAK KOROZYON DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ” başlıklı bu çalışma, 14.01.2016 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak jürimiz tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Yrd. Doç. Dr. A. Cahit KARAOĞLANLI .....  
(Danışman)

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

Üye : Doç. Dr. Khangardash ASGAROV .....

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

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

## **BEYANNAME**

Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Yrd. Doç. Dr. Abdullah Cahit KARAOĞLANLI danışmanlığında hazırlamış olduğum "SOĞUK GAZ DİNAMİK SPREY (CGDS) YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN TERMAL BARIYER KAPLAMALARIN (TBC) SICAK KOROZYON DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ" adlı 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.

14 / 01 / 2016

Yasin ÖZGÜRLÜK

## ÖNSÖZ

Bu tezin hazırlanma ve sonuçlanma aşamasında hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan, çalışma sürecim boyunca bilgi ve tecrübeleriyle bana ışık tutan saygıdeğer danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Abdullah Cahit KARAOĞLANLI' ya, deneysel çalışmalarım sürecinde desteklerini esirgemeyen Arş. Gör. Kadir Mert DÖLEKER, Uzm. Halil EŞGİN ve Arş. Gör. Mecit ÖGE' ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmaları süresince desteklerini hiç eksik etmeyen aileme ve yüksek lisans eğitimim boyunca manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen müstakbel eşim Özge DUMAN' a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca TÜBİTAK 113R049 No' lu projeye, çalışmalarımda sağlamış olduğu deneysel ve finansal destekten dolayı teşekkürü bir borç bilirim.

Yasin ÖZGÜRLÜK

## ÖZET

### Yüksek Lisans Tezi

# SOĞUK GAZ DİNAMİK SPREY (CGDS) YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN TERMAL BARIYER KAPLAMALARIN (TBC) SICAK KOROZYON DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Yasin ÖZGÜRLÜK

Bartın Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Abdullah Cahit KARAOĞLANLI

Bartın-2016, Sayfa: XVII + 87

Termal bariyer kaplamalar (TBCs) genellikle gaz türbin motorlarında, uzay ve uçak endüstrisinde, yüksek sıcaklığa maruz kalmış kritik bölge parçalarında ısı izolasyonu amaçlı olarak kullanılan koruyucu kaplamalardır. TBC'ler yüksek sıcaklık koşullarında oluşan oksidasyon, korozyon ve termal şok gibi agresif çevre koşullarını yapıda minimize etmek adına koruyucu görev üstlenmektedirler. Bu çalışmada, Inconel 718 süper alaşım altlık malzeme üzerine, soğuk gaz dinamik sprej (CGDS) yöntemi kullanılarak CoNiCrAlY metalik bağ kaplamaların üretimleri gerçekleştirilmiştir. CGDS tekniği kullanılarak üretilen bağ kaplamaların üzerine  $ZrO_2+Y_2O_3$  (YSZ) içerikli seramik üst kaplamaların üretimi atmosferik plazma sprej (APS) ve elektron ışını ile fiziksel buhar biriktirme (EB-PVD) yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Üretimleri gerçekleştirilen farklı TBC numuneleri 1000 °C sıcaklıkta 4'er saatlik çevrim süreçlerinde sıcak korozyon testlerine tabi tutulmuştur. TBC'lerin üretimindeki farklı yöntemlerin ve test edildikleri sıcak korozyon etkilerinin ayrıntılı olarak gözlemlenebilmesi için mikroyapısal ve mekanik incelemeler SEM, EDS, elementel haritalama, porozite, XRD analizleri ve sertlik testleri kullanılarak tamamlanmıştır. Elde edilen sonuçlar, literatürde yapılan güncel çalışmalar ile karşılaştırılarak ayrıntılı değerlendirilmeler yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler**

Soğuk Gaz Dinamik Sprey (CGDS); Elektron Demeti Fiziksel Buhar Biriktirme (EB-PVD); Atmosferik Plazma Sprey (APS); Termal Bariyer Kaplama (TBC); Sıcak Korozyon; Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>

**Bilim Kodu**

604.02.01

## **ABSTRACT**

**M.Sc. Thesis**

# **INVESTIGATION OF HOT CORROSION BEHAVIOR OF THERMAL BARRIER COATING (TBC) PRODUCED BY COLD GAS DYNAMIC SPRAY (CGDS) TECHNIQUE**

**Yasin ÖZGÜRLÜK**

**Bartın University**

**Graduate School of Natural and Applied Sciences**

**Department of Metallurgical and Materials Engineering**

**Thesis Advisor: Assistant Prof. Dr. Abdullah Cahit KARAOĞLANLI**

**Bartın-2016, pp: XVII + 87**

Thermal barrier coatings (TBCs) are generally used as a protective coating in gas turbine, aerospace and aircraft industry, critical region parts exposed to high temperatures, for the purpose of thermal insulation. TBCs provide protective to minimize aggressive environmental conditions such as oxidation, corrosion and thermal shock occurring at high temperatures within the structure. In this study, CoNiCrAlY metallic bond coat material was deposited with cold gas dynamic spray (CGDS) on Inconel 718 superalloy substrate material. Production of ceramic top coat, which content  $ZrO_2+Y_2O_3$  (YSZ), were performed with using atmospheric plasma spray (APS) and electron beam physical vapor deposition on the bond coats, which were produced using CGDS technique. Produced different TBC samples were subjected to hot corrosion tests under 1000 °C for 4 hours periods. Microstructural and mechanical examinations using SEM, EDS, elemental mapping, porosity, XRD analysis and hardness testing were completed for different methods of the manufacture of TBC and observing in detail the effects of hot corrosion were tested. Obtained results are evaluated making comparisons with current literature studies.

**Key Words**

Cold Gas Dynamic Spray (CGDS); Electron Beam Physical Vapor Deposition (EB-PVD); Atmospheric Plasma Spray (APS); Thermal barrier coating (TBC); Hot Corrosion; Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>

**Science Code**

604.02.01



# İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL VE ONAY .....	İİ
BEYANNAME.....	İİİ
ÖNSÖZ.....	İV
ÖZET .....	V
ABSTRACT .....	VII
İÇİNDEKİLER.....	İX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XII
TABLolar DİZİNİ.....	XV
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	XV
BÖLÜM 1 GİRİŞ .....	1
1.1 Giriş.....	1
1.2 Çalışmanın Amacı .....	3
BÖLÜM 2 LİTERATÜR ÖZETİ.....	5
2.1 Termal Sprey Kaplamalar.....	5
2.1.1 Plazma Sprey Kaplamalar .....	6
2.1.1.1 Atmosferik Plazma Sprey (APS) Kaplama Yöntemi .....	8
2.1.1.2 Vakum Plazma Sprey Kaplama Yöntemi .....	10
2.1.2 Yüksek Hızlı-Oksi Alev (HVOF) Kaplama Yöntemi .....	12
2.1.3 Soğuk Gaz Dinamik Sprey (CGDS) Kaplama Yöntemi .....	13
2.1.3.1 CGDS Yönteminde Hızı Etkileyen Faktörler.....	15
2.1.3.2 CGDS Prosesinin Avantaj ve Dezavantajları .....	15
2.2 Elektron Demetiyle Fiziksel Buhar Biriktirme (EB-PVD) Yöntemi .....	16
2.3 Termal Bariyer Kaplamalar (TBC).....	18
2.3.1 TBC Yapısının Bileşenleri.....	20
2.3.1.1 Altlık Malzeme .....	20
2.3.1.2 Metalik Bağ Kaplama .....	21
2.3.1.3 Seramik Üst Kaplama.....	23

	<u>Sayfa</u>
2.3.1.4 Termal Olarak Büyüyen Oksit (TGO) Tabakası .....	23
2.3.1.5 Termal Bariyer Kaplamalardaki Yüksek Sıcaklık Ortamı .....	26
2.4 TBC'ler de Hasar Oluşum Mekanizmaları .....	27
2.4.1 Oksidasyon .....	28
2.4.2 Termo-Mekanik Hasar .....	30
2.4.3 Sıcak Korozyon .....	30
2.4.3.1 Sıcak Korozyon Çeşitleri .....	32
<b>BÖLÜM 3 MATERYAL VE YÖNTEM .....</b>	<b>36</b>
3.1 Amaç .....	36
3.2 Toz ve Altlık Malzemelerin Karakterizasyonu .....	36
3.2.1 Toz Malzemelerin Mikroyapısal İncelenmesi .....	36
3.2.2 Altlık Malzemenin Kimyasal Bileşimi ve Özellikleri .....	38
3.3 Bağ Kaplamanın Üretilmesi .....	39
3.4 Altlık Malzemenin ve Bağ Kaplamanın Sertlik Değerlerinin Ölçülmesi .....	40
3.5 Bağ Kaplamaların Porozite Değerlerinin Ölçülmesi .....	41
3.6 Bağ Kaplamanın ve Altlık Malzemenin Yüzey Pürüzlülük Değerlerinin Ölçülmesi .....	41
3.7 Termal Bariyer Kaplamalara Üst Kaplamanın Uygulanması .....	42
3.7.1 EB-PVD Yöntemi İle Seramik Üst Kaplamanın Yapılması .....	42
3.7.2 APS Yöntemi İle Seramik Üst Kaplamanın Yapılması .....	45
3.8 Termal Bariyer Kaplamaların Sıcak Korozyon Testlerinin Yapılması .....	46
3.9 Termal Bariyer Kaplamaların Sıcak Korozyon Testi Öncesi ve Sonrası Karakterizasyonu .....	51
<b>BÖLÜM 4 BULGULAR VE TARTIŞMA .....</b>	<b>54</b>
4.1 TBC Numunelerinin Mikroyapısal İncelenmesi .....	54
4.1.1 CGDS Bağ Kaplamalı APS Üst Kaplamalı TBC Numunesinin Mikroyapısı ....	54
4.1.2 CGDS Bağ Kaplamalı EB-PVD Üst Kaplamalı TBC Numunesinin Mikroyapısı .....	57
4.2 TBC Örnekleri Üzerindeki Sıcak Korozyon Etkisi .....	61

**Sayfa**

4.2.1 CGDS Bağ Kaplamalı Aps Üst Kaplamalı Tbc Numunesinin Sıcak Korozyon Testi Sonrası Mikroyapısal İnceleme .....	61
4.2.2 CGDS Bağ Kaplamalı EB-PVD Üst Kaplamalı TBC Numunesinin Sıcak Korozyon Testi Sonrası Mikroyapısal İncelenmesi .....	67
4.3 Sıcak Korozyon Testi Sonrasında Meydana Gelen Mikroyapısal Değişimlerin İrdelenmesi .....	74
<b>BÖLÜM 5 SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>78</b>
5.1 Genel Sonuçlar .....	78
5.2 Öneriler .....	81
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>82</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>87</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Sayfa No
1. Deneysel çalışmalarda izlenen yöntem ve çalışma planı .....	4
2. Termal sprej kaplamanın şematik görünümü .....	6
3. Plazma sprej sisteminin şematik resmi.....	7
4. Plazma sprej ile kaplanmış bir malzemenin şematik gösterimi .....	8
5. Plazma sprej tabancası iç şeması.....	10
6. Vakum Plazma Sprej işleminin şematik gösterimi; 1) çalışma gazları girişi, 2) anot, 3) vakum çemberi, 4) ark üretici, 5) toz giriş kısmı, 6) plazma üretici .....	11
7. HVOF prosesinin temsili olarak gösterimi .....	13
8. CGDS metodunun temsili şematik gösterimi.....	14
9. EB-PVD sisteminin gösterimi.....	17
10. APS ve EB-PVD kaplama sistemlerinin gösterimi; a) APS tekniği ile üretilmiş kaplamanın mikroyapı görüntüsü b) EB-PVD tekniği ile üretilmiş kaplamanın mikroyapı görüntüsü .....	18
11. Tipik bir TBC sistemi mikroyapı görüntüsü .....	19
12. Sıcaklığın bir fonksiyonu olarak bazı süper alaşımların çekme dayanımı.....	21
13. Türbin kanadı ve TBC boyunca sıcaklık düşünün gösterildiği TBC bileşimlerinin diyagramı.....	22
14. TBC yapısının enine kesit resmi .....	25
15. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ' ün sıcaklığa bağlı polimorfik dönüşümü.....	25
16. Termal bariyer kaplamaların kullanıldığı bir uçak tübinin yanma odası ve türbin kanatçığının enine kesit alınmış SEM görüntüsü.....	27
17. APS-CoNiCrAlY bağ ve APS-YSZ üst seramik kaplamaya ait 900 °C' de oksidasyon testi sonrası 2500x büyütmedeki SEM mikroyapıları; a) 8 saat, b) 24 saat, c) 50 saat ve d) 100 saat .....	29
18. TBC' lerde sıcak korozyon davranışının şematik olarak gösterimi .....	31
19. Plazma sprej kaplama tekniğiyle kaplanmış (a) YSZ seramik tabakanın .....	32
20. Kaplama tozları ve sıcak korozyon testinde kullanılan tozların mikroyapısal görüntüleri (a) CoNiCrAlY, (b) ZrO <sub>2</sub> -%8Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . .....	37

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
<b>No</b>	<b>No</b>
21. Sıcak korozyon testinde kullanılan %50 NaSO <sub>4</sub> + %50 V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> toz karışımı.....	37
22. Bağ kaplamanın porozite ölçümü esnasında kullanılan görüntülerin temsili bir görüntü .....	41
23. Pürüzlülük ölçüm test cihazının şematik gösterimi SJ-310 Mitutoyo marka yüzey pürüzlülük ölçüm cihazının gösterimi.....	42
24. Numunelerin Bağlandığı Düzeneğin Şematik Olarak Gösterilmesi. ....	43
25. Kaplamadan sonra fikstür ile numunelerin görünümü.....	45
26. Deneysel çalışmada kullanılan APS yöntemiyle kaplanmış YSZ üst seramik kaplama tabakasına sahip numunelerin gösterimi. ....	46
27. EB-PVD ve APS yöntemiyle üst kaplaması gerçekleştirilmiş TBC numunelerinin şematik gösterimi (a) EB-PVD, (b) APS (Jones,1997).....	47
28. Sıcak korozyon testinin fırın içerisindeki konumunun şematik gösterilmesi. ....	48
29. Sıcak korozyon testinde kullanılan çalışma çevrimi .....	48
30. Sıcak korozyon testi öncesi fırına verilmek üzere hazır hale getirilmiş TBC numuneleri (a) APS üst kaplamalı, (b) EB-PVD üst kaplamalı .....	49
31. 1000°C’de 4 saatlik çevrim sonucunda fırından çıkan numuneler (a) APS üst kaplamalı, (b) EB-PVD üst kaplamalı .....	49
32. 4 Saatlik çevrimin ardından diğer çevrim için fırına verilmek üzere hazır duruma gelen numuneler (a) APS üst kaplamalı, (b) EB-PVD üst kaplamalı. ....	50
33. 1000°C’de 8 saatlik çevrim sonucunda fırından çıkan numuneler (a) APS üst kaplamalı, (b) EB-PVD üst kaplamalı. ....	50
34. 8 saatlik çevrimin ardından diğer çevrim için fırına verilmek üzere hazır duruma gelen numuneler (a) APS Üst Kaplamalı, (b) EB-PVD Üst Kaplamalı.....	51
35. 1000°C’de 12 saatlik çevrim sonucunda fırından çıkan numuneler (a) APS üst kaplamalı, (b) EB-PVD üst kaplamalı. ....	51
36. APS yöntemiyle üst kaplaması üretilmiş numunenin enine kesit görüntüsü. ....	54
37. APS yöntemiyle üst kaplaması üretilmiş numunenin üst yüzey görüntüsü. ....	55
38. APS yöntemiyle üst kaplaması üretilmiş numunenin sıcak korozyon testi öncesi kesit görüntüsünün elementel haritalama analizi.....	56
39. EB-PVD yöntemiyle üst kaplaması üretilmiş numunenin enine kesit görüntüsü. ....	57
40. EB-PVD yöntemiyle üst kaplaması üretilmiş numunenin üst yüzey görüntüsü.....	58
41. EB-PVD yöntemiyle üst kaplaması üretilmiş numunenin üst yüzey görüntüsü. ....	59

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
<b>No</b>	<b>No</b>
42. EB-PVD yöntemiyle üst kaplaması üretilmiş numunenin sıcak korozyon testi öncesi kesit görüntüsünün elementel haritalama analizi. ....	60
43. APS yöntemiyle üst kaplaması üretilmiş numunenin sıcak korozyon testinden sonra enine kesit görüntüsü.....	62
44. APS yöntemiyle üst kaplaması üretilmiş numunenin sıcak korozyon testinden sonra 1.00 kx büyütmede üst yüzey görüntüsü.....	63
45. APS yöntemiyle üst kaplaması üretilmiş TBC yapısının sıcak korozyon testi sonrasındaki üst yüzey EDS analizi. ....	64
46. APS Yöntemiyle üst kaplaması üretilmiş TBC numunesinin üretim ve sıcak	
47. APS yöntemiyle üst kaplaması üretilmiş numunenin 12h sıcak korozyon testinden sonraki kesit görüntüsünün elementel haritalama analizi. ....	66
48. EB-PVD yöntemiyle üst kaplaması üretilmiş numunenin sıcak korozyon testinden sonra enine kesit görüntüsü. ....	67
49. EB-PVD yöntemiyle üst kaplaması üretilmiş numunenin sıcak korozyon testinden sonra 1.50 kx büyütmede üst yüzey görüntüsü. ....	68
50. EB-PVD yöntemiyle üst kaplaması üretilmiş numunenin sıcak korozyon testinden sonra 1.00 kx büyütmede üst yüzey görüntüsü. ....	69
51. EB-PVD yöntemiyle üst kaplaması üretilmiş numunenin sıcak korozyon testinden sonra 400 kx büyütmede üst yüzey görüntüsü. ....	70
52. EB-PVD yöntemiyle üst kaplaması üretilmiş TBC yapısının sıcak korozyon testi sonrasındaki üst yüzey EDS analizi. ....	71
53. EB-PVD yöntemiyle üst kaplaması üretilmiş TBC numunesinin üretim ve sıcak korozyon testi sonrasındaki XRD analiz sonuçları. ....	72
54. EB-PVD yöntemiyle üst kaplaması üretilmiş numunenin 20h sıcak korozyon testinden sonraki kesit görüntüsünün elementel haritalama analizi. ....	73

## TABLolar DİZİNİ

<b>Tablo</b>		<b>Sayfa</b>
<b>No</b>		<b>No</b>
1.	Ni esaslı süper alaşım Inconel 718 malzemenin kimyasal kompozisyonu .....	20
2.	Ni esaslı süper alaşım Inconel 718 Malzemenin Fiziksel Özellikleri .....	38
3.	Ni esaslı süper alaşım Inconel 718 Malzemenin Mekanik Özellikleri .....	38
4.	CGDS yöntemiyle bağ kaplama işlemi. ....	40
5.	CGDS yöntemiyle bağ kaplama işlemindeki parametreler. ....	40
6.	Altlık malzemenin ve bağ kaplamanın sertlik değerleri. ....	40
7.	CGDS yöntemiyle üretilmiş olan metalik bağ kaplamanın ve altlık inconel-718'in pürüzlülük değerleri. ....	42
8.	APS üst kaplama üretiminde kullanılan parametreler. ....	46
9.	Zımparalama ve parlatma işlemi esnasında tercih edilen parametreler. ....	52

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	: Almen
Ar	: Argon
cm	: Santimetre
CoNiCrAlY	: Kobalt Nikel Krom Alüminyum Yttria
g/dk	: Gram/Dakika
gf	: Gram Kuvvet
H	: Hidrojen
Hv	: Vickers Sertlik Değeri
K	: Kelvin
kPa	: Kilo Paskal
kN	: Kilo Newton
kW	: Kilo Watt
m/s	: metre/saniye
MCrAlY	: Metal Krom Alüminyum Yttria
mm	: Milimetre
MPa	: Mega Paskal
Pa	: Paskal
Ra	: Pürüzlülük Değeri
s	: Saniye
slpm	: Standart litre/dakika
$\mu\text{m}$	: Mikrometre
$^{\circ}\text{C}$	: Celcius
$\alpha$	: Alfa
$\beta$	: Beta
$\gamma$	: Gama
$\theta$	: Teta

### KISALTMALAR

APS	: Atmosferik Plazma Sprey
CGDS	: Soğuk Gaz Dinamik Sprey
CVD	: Kimyasal Buhar Biriktirme



D-Gun	: Detonasyon Tabancası
EB-PVD	: Elektron Işını-Fiziksel Buhar Biriktirme
EDX	: Elementel Dağılım Analizi
HVOF	: Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt Püskürtme
LPDS	: Düşük Basınçlı Plazma Sprey
PS	: Plazma Sprey
PVD	: Fiziksel Buhar Biriktirme
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
TBC	: Termal Bariyer Kaplama
TGO	: Termal Olarak Büyüyen Oksit Tabaka
VPS	: Vakum Plazma Sprey
YSZ	: Yttria ile Stabilize edilmiş Zirkonya

# BÖLÜM 1

## GİRİŞ

### 1.1 Giriş

Malzemelere dışarıdan gelebilecek etkileri azaltmak için yüzeylerine daha dayanıklı bir malzeme biriktirilmesi işlemine kaplama denilir. Kaplamalar isteğe göre kaplandığı malzemeye çok farklı avantajlar kazandırır. En çok kazandırılması arzu edilen özellik ise yüzeylerin erozyon ve korozyondan korunmasını sağlamaktır (Şeker, 2009). Bu amaçlarla malzeme yüzeylerini kaplamak için çok çeşitli metotlar kullanılmaktadır. Termal sprey kaplama yöntemlerinden birisi olan termal bariyer kaplamalar (TBC) teknolojinin de gelişmesiyle birlikte birçok endüstriyel alanda kullanılmaya başlanmıştır (Tozkoparan, 2010).

Malzemelerin yüzey özelliklerinin geliştirilmesi ve çevresel şartlara daha iyi uyum sağlayabilmesi amacıyla geçmişten günümüze birçok alanda tercih edilen TBC'ler uzay ve havacılık sanayide yaygın olarak kullanılmaktadır (Minisker, 2009). Son zamanlarda termal sprey kaplamalar savunma ve havacılık sanayide kullanılmasının yanında otomotiv, enerji, biyomedikal ve elektronik gibi alanlarda da yerini almıştır (Karaoğlanlı vd., 2013). Toz, tel veya çubuk formdaki malzemelere ergitme metodu uygulanarak malzemenin yüzeyini kaplamaya dayanan bu yöntem özellikle havacılık sanayide oldukça geniş kullanım alanına sahiptir. Uçaklarda ise gaz türbin motorlarında yakıtların yanması sonucunda yüksek sıcaklıklara ulaşıldığından, türbin kanatları ve vanaları zarar görür (Döleker, 2015). Bu zararı en aza indirmek için süper alaşımlı malzemelerin kullanılması gerekmektedir. Ancak süper alaşımlı malzemeler kullanılsa da bu malzemelerin ömürleri istenilen düzeye ulaşamamıştır (Döleker, 2015). Son zamanlarda, plazma sprey ve yüksek hızlı oksit yakıtı (HVOF) alternatif olarak daha üstün özelliklerde oksit içermeyen ve oldukça yoğun kaplama tabakasının oluştuğu Soğuk Gaz Dinamik Sprey (CGDS) kaplamalar kullanılmaya başlanmıştır. Bu sisteme Soğuk Gaz Dinamik Sprey denmesinin nedeni, nozuldan çıkan gaz sıcaklığının diğer yöntemlere göre oldukça düşük olmasıdır (Karaoğlanlı vd., 2013).

TBC sistemleri ise altlık olarak süper alaşım bir malzeme üzerine MCrAlY içeren bağ kaplama ve üzerine ise seramik bir üst kaplamadan meydana gelmektedir (Karaoğlanlı vd., 2014). Sistemdeki seramik kaplama sıcaklık yalıtım görevini üstlenirken, bağ kaplama ise üst kaplamanın yapışmasını ve altlık malzemenin de yüksek sıcaklık koşullarında oluşan oksidasyon ve korozyon gibi hasarlardan korunmasını sağlar (Karaoğlanlı vd., 2014). TBC sistemlerinde ayrıca çalışma koşullarında bağ kaplama ve üst kaplama arasında termal büyüyen oksit denen (TGO) tabakası meydana gelmektedir. Kararlı olduğu durumlarda ara yüzeyde kalması yani bulunması tercih edilen bu tabaka oksidasyonun ve sıcaklığın artışıyla birlikte kararsız hale geleceğinden TBC'ler bulunan seramik kaplamanın yüzeyden ayrılmasına sebebiyet verecektir (Young, 2008).

Gaz türbin motorlarında oldukça yüksek sıcaklıklarda tekrarlı gerilmeler ve sıcaklık değişimlerinde çalışan parçalardır. Kullanım amacına göre bu parçaların çalışma ömürleri kullanım şartlarına bağlı olarak değişmektedir. Uçak ve jet motorları gibi sürekli olarak iniş kalkış ve aniden değişen termal yüklerin etkisinde çalışan parçalarda kullanım ömrü, oksidasyon ve sıcak korozyondan dolayı düşer. Bu sebepten dolayı uçak ve jet motorlarında yüksek sıcaklığa maruz kalan türbin ve kanatçıklar gibi kritik parçalar hasara maruz kalabilir. Özellikle bu tip yüksek sıcaklık etkisinde çalışmak zorunda kalan parçalarda yakıttan ve çevreden dolayı korozif ve agresif ortamlar oluşmaktadır. Özellikle yakıt içerisindeki bazı safsızlıklar yüksek sıcaklığın da etkisiyle malzemede sıcak korozyon oluşmasına neden olmaktadır. Sıcak korozyon olayı yakıtın içindeki Na ve V partiküllerinin üst kaplama üzerinde bulunan YSZ ile reaksiyona girmesi neticesinde kaplamadaki YSZ'nin yapısı tetragonal yapıdan monoklinik yapıya dönüşmesiyle oluşur. Bu faz dönüşümü üst kaplama yapısındaki ayrılmalarla sonuçlanır (Jiang vd., 2010).

Oldukça maliyeti yüksek olan türbin kanatçıklarının yenisi ile değiştirilmesi yerine kullanıldığı ortamlarda daha dayanıklı olmalarını sağlamak gerekmektedir. TBC'lerin bakım maliyetini azaltmasından ve bakım sürecini uzatmasından dolayı tercih edilmektedir. TBC sistemlerinin uçak türbin motorları ve kanatçıklarında kullanılması uçakların manevra kabiliyetini arttırmaktadır. Buna ek olarak uçakların termomekanik ömrünü iyileştirmeyi sağlar (Altuncu, 2011).

Termal bariyer kaplamalar endüstriyel alanda özellikle uzay ve uçak sanayide kullanımı oldukça yaygın ve gelişime açık bir alandır. Bu amaçla termal bariyer kaplama sistemleri için gün geçtikçe yeni ve farklı üretim yöntemleri geliştirilmektedir (Altuncu, 2011).

## **1.2 Çalışmanın Amacı**

TBC yöntemlerinde kullanılmaya başlanan CGDS yöntemi göz önüne alındığında bağ kaplamada daha az ısı etkinin olduğu görülmektedir. Isıl etkinin az olması altlık malzemenin korozyon ve ısı genleşme gibi olumsuzluklara karşı daha dayanıklı olmasını sağlamaktadır. Yenilikçi bir metot olan CGDS yöntemi kullanılarak yapılan bağ kaplama üzerine farklı yöntemler ile aynı seramik üst kaplamalar yapılarak üst kaplamanın CGDS yöntemiyle olan uyumu bu çalışmada incelenerek ortaya çıkan sonuçlar değerlendirmeye alınmıştır. Deneysel çalışmalarda izlenen yöntem ve çalışma planı Şekil 1’de verilmektedir.



Şekil 1: Deneysel çalışmalarda izlenen yöntem ve çalışma planı.

## BÖLÜM 2

### LİTERATÜR ÖZETİ

#### 2.1 Termal Sprey Kaplamalar

Termal sprey kaplamalar 1900'lü yıllarda sıvı kurşunun top yüzeyine kaplanmasıyla keşfedilmiştir. 1920'li yıllarda ilk kez patentli olarak üretilen kaplamalar ilk olarak Almanya'ya daha sonra ise Fransa'ya, Avrupa'nın diğer ülkelerine ve Amerika'ya satılmıştır (Zağlı, 2010). Kaplama pazarının oldukça büyük bir bölümünü oluşturmaya başlayan termal sprey kaplama sistemleri 1900'lü yıllardan günümüze kadar oldukça büyük gelişme göstermiştir (Karaali, 2008; Zağlı, 2010; Şeker, 2009). 1900'lü yıllardan sonra hammadde fiyatlarındaki artıştan dolayı korozyona, oksidasyona ve erozyona karşı daha dayanıklı olan termal sprey kaplama yöntemine gösterilen ilgi beklenen ölçülerden oldukça fazla olmuştur (Karaali, 2008; Şeker, 2009; Zağlı, 2010). Beklentileri karşılması için ise; bu kaplama yönteminde tekli sistemlerden ziyade multi (çoklu) sistemler kullanılmaya başlanmıştır.

Termal sprey kaplama tekniği metal veya metal olmayan toz, tel veya çubuk şeklindeki malzemelerin ergime noktasına yakın sıcaklıklara kadar ısıtılarak ergimiş ya da yarı ergimiş durumda bir altlık malzeme üzerine biriktirilmesi ile oluşturulan kaplama yöntemidir (Güleç, 2006; Zağlı, 2010; Döleker, 2015). Termal sprey kaplama teknolojisi çok sayıda farklı yöntemden oluşan endüstride oldukça fazla kullanım alanı bulmuş kaplama teknolojisi ailesinin genel adıdır (Zağlı, 2010). Termal sprey kaplama teknolojisinde kaplanan malzemelerin yüzey özelliklerinin geliştirilmesinin yanında malzemelerin yüzeyi çevresel koşullara karşı daha dayanıklı olmasını sağlayan koruyucu bir tabakayla kaplanır (Güleç, 2006; Zağlı, 2010; Döleker, 2015). Ergimiş veya yarı ergimiş toz ve metal damlacıkların altlık malzeme yüzeyine çarpmasıyla damlacıklar yayılır ve üst üste birikerek ara yüzeyde mekanik bir bağlanma meydana getirirler. Bu bağlanmalar sonucunda altlık malzeme yüzeyinde bir tabaka oluşur (Zağlı, 2010; Döleker, 2015). Termal sprey kaplamanın en önemli avantajlarından bir tanesi oldukça geniş malzeme yelpazesine uygulanmasının mümkün olmasıdır (Güleç, 2006; Döleker, 2015). Diğer avantajı ise altlık malzemeyi ısıtmaya gerek yoktur. Çünkü yüksek ergime noktasındaki sıcaklıklarda malzemelerde

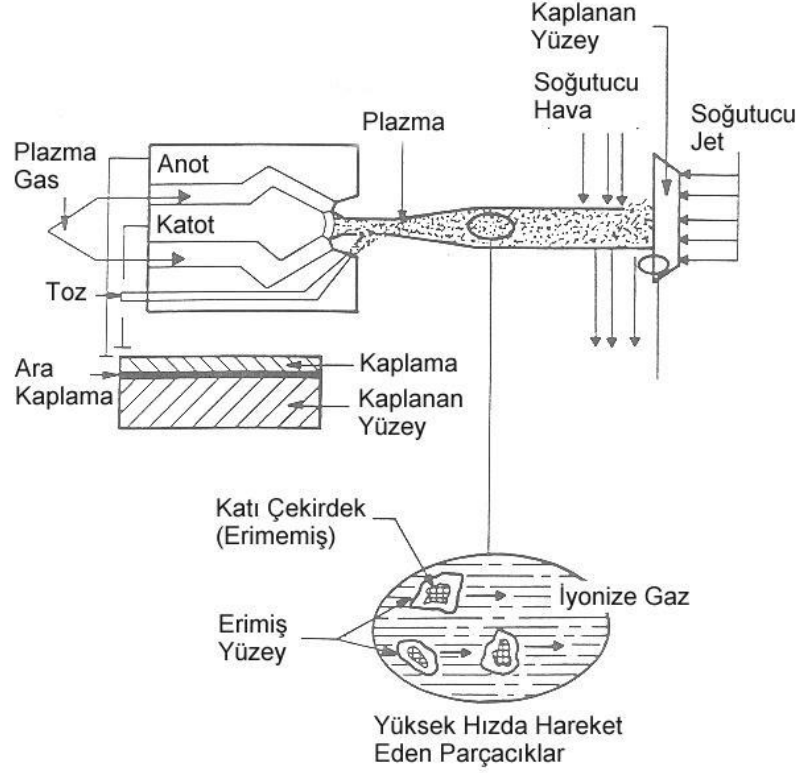
oluşacak çarpılmalar son olarak uygulanan ısı ile giderilebilir. Diğer bir avantajı ise, parçaların boyutlarına bakmaksızın hasar görmüş parçalar temizlenerek tekrar kaplanabilir (Döleker, 2015). TBC yönteminin şematik olarak gösterimi Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2: Termal sprey kaplamasının şematik görünümü (Kahraman, 2000).

### 2.1.1 Plazma Sprey Kaplamalar

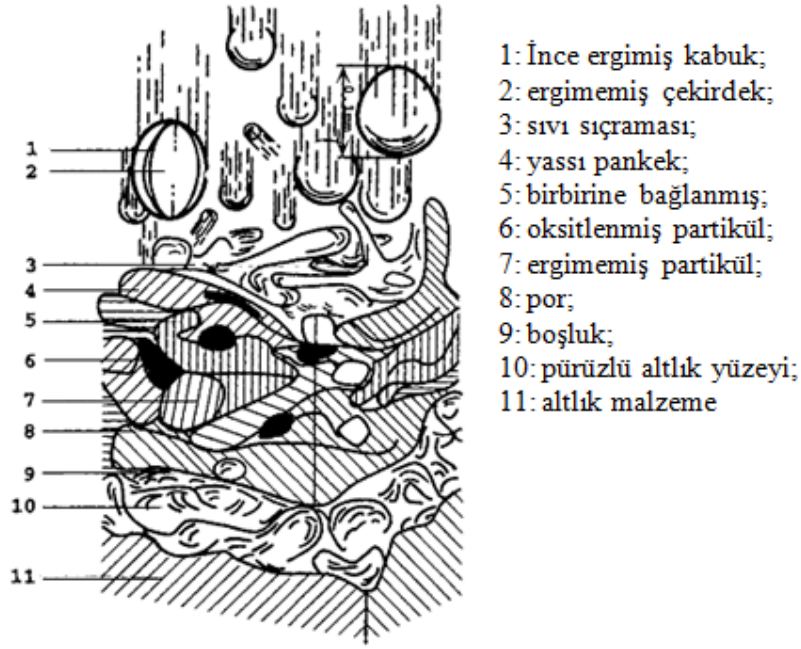
Plazma sprey teknolojisi termal sprey kaplama yöntemlerinden bir tanesidir. Plazma sprey kaplamada esas düşünülen çok pahalı olmayan ana malzeme üzerine ince, koruyucu ve değeri yüksek bir tabaka meydana getirmektir. İşlem; herhangi bir malzeme tozunun ergime sıcaklığının üzerindeki değerlerde olan gaz plazması içerisinde eritilmesi ve çok hızlı bir şekilde kaplanacak olan altlık malzeme üzerine püskürtülerek gerçekleştirilir. Böylece daha dayanıklı ve plastik olarak şekillendirilebilir bir malzeme elde edilir. Bu teknoloji yüksek işlem sıcaklıklarında çok geniş bir alanda malzemenin işlenmesine ve endüstride kullanılmasına olanak sağlar (Tozkoparan, 2010). Şekil 3’de plazma sprey yönteminin şematik olarak gösterimi yer almaktadır.



Şekil 3: Plazma sprey sisteminin şematik resmi (Habibi, 1997).

Maddenin 4. hali olarak nitelendirilen plazma oldukça yüksek enerjilidir ve şekilde de gösterildiği gibi ergimiş toz partiküllerinin altlık malzeme yüzeyine yüksek hızlı bir şekilde yapışmasını sağlar, ancak hava ile de temas ettiği için yüzeyde oksit tabakası da oluşturabilir. Şekil 4'te plazma sprey yöntemiyle kaplanan malzemenin temsili olarak şematik görünümü verilmiştir. Şekilde malzeme yüzeyinin kaplama esnasında oluşan yapılar sayılar ile gösterilmektedir.





Şekil 4: Plazma sprej ile kaplanmış bir malzemenin şematik gösterimi (Tafralı, 2006).

Plazma sprej kaplama gaz ünitesi, güç ünitesi, toz besleme ünitesi, soğutma ünitesi, püskürtme ünitesi ve kontrol ünitesi kısımlarından meydana gelmektedir. Genellikle ısı girdisi düşük olan bu sistemde, püskürtme hızı 0.35-0.50 kg/s ile 12-16 kg/s arasında değişmektedir. Bu değer aralıklarında değişim göstermesinin sebebi; kullanılan ekipmanların çeşidi ve değişebilen tozlardır (Dorfman, 2012). Endüstride en çok kullanılan 2 tip plazma sprej kaplama yöntemi vardır. Bunlar atmosferik plazma sprej (APS) ve vakum plazma sprej (VPS)'dir.

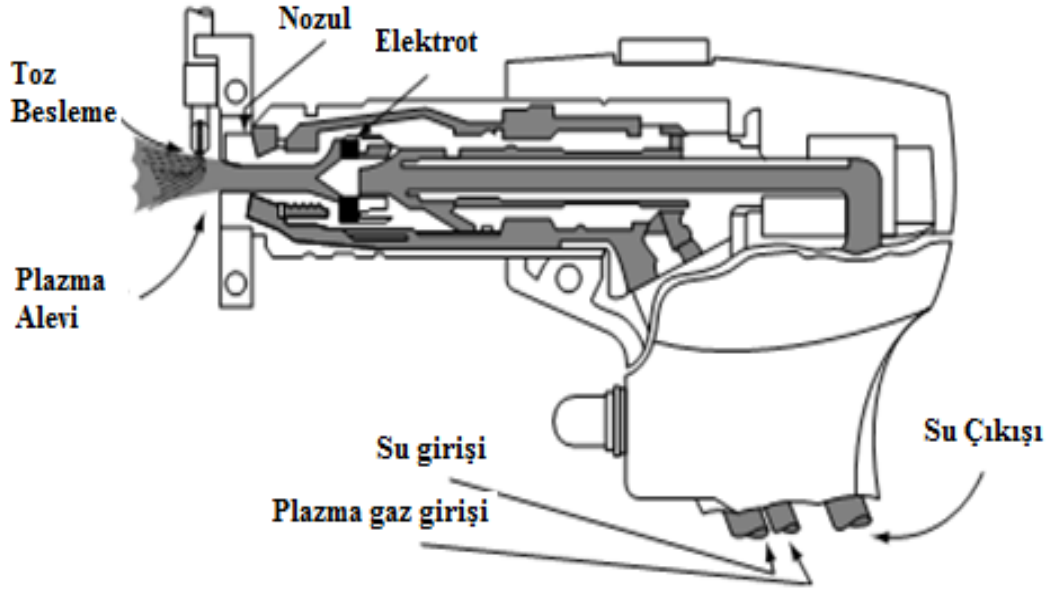
### 2.1.1.1 Atmosferik Plazma Sprej (APS) Kaplama Yöntemi

Endüstriyel olarak metal ve seramik yüzeylerin kaplanmasında en yaygın olarak tercih edilen yöntem APS prosesidir. Bu yöntemde kaplama işlemi atmosfere açık bir şekilde gerçekleşir. Sprej partikülleri üfleçten çıkıp kaplanacak malzemeye ulaşana kadar çevre ile reaksiyona girer. Açık hava atmosferinde uygulanabilmesinden kaynaklı diğer plazma proseslerine göre en ekonomik prosestir. Oksidasyon problemleri nedeniyle genellikle seramik ve oksidasyona dirençli kaplama malzemelerinin püskürtülmesinde kullanılmaktadır (Altuncu, 2011).

Bu proseste, bir plazma jeti toz formdaki kaplama hammaddesini ertirir. Plazma genellikle Argon gazı veya helyum gazı gibi bir inert gaz ile üretilir. Plazma sprej işleminde, iyonize

inert gazın gizli ısı, ısı kaynağı olarak kullanılmaktadır. Plazma üretiminde en çok kullanılan inert gaz ise argon gazıdır. Nozuldan çıkan argon gazı ile üretilen plazma için yüksek miktarda (800-1000 amper) akım gerekmektedir. Bu sebepten dolayı akımı arttırmak için argon gazına ilave olarak hidrojen gazı eklenmektedir. Ark akımının bu denli yüksek olmasından dolayı ergime sıcaklığı yüksek olan malzemelerde ergitilerek rahatlıkla kaplama malzemesi olarak kullanılabilir (Altuncu, 2011; Döleker, 2015). APS; atmosfer koşullarında düşük hızlarda uygulanan bir plazma sprey prosesidir. Açık hava atmosferinde uygulanabilmesinden kaynaklı diğer plazma proseslerine göre en ekonomik prosesdir.

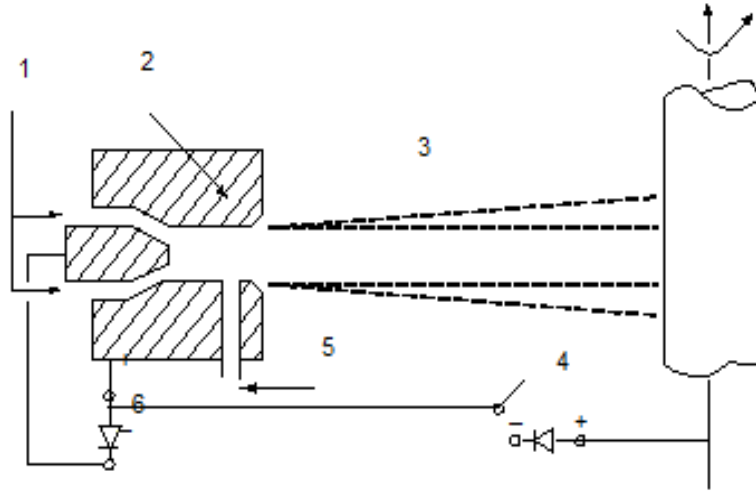
APS ilk olarak 1900'lü yılların ortalarına doğru Almanya'da Reineke tarafından geliştirilerek daha sonra Fransa'da, Avrupa'nın diğer ülkelerinde ve Amerika'da ticari olarak kullanılmaya başlanmıştır. 1960'lı yıllardan sonra plazma sprey tekniği termal bariyer kaplamaların üretimiyle birlikte hızlı bir şekilde gelişmeye başlamıştır. Bu gelişmelerin başlıca nedeni ise plazma tabancalarının tasarımında olan gelişmeleri takiben gelmiştir. Daha güçlü plazma tabancalarının üretimi ile yüzeye püskürtülen parçacık sıcaklıklarının ve hızlarının artırılabilmesine olanak sağlanmıştır (Altuncu, 2011). Tipik atmosferik plazma sprey tabancasının şematik görüntüsü aşağıda Şekil 5'de verilmiştir. Şekilde de ayrıntılı olarak gösterildiği gibi tozlar besleme kanalından sisteme verilerek plazma aleviyle atmosfere açık olarak buluşması sağlanır. Ergimiş olarak ya da yarı ergimiş olarak sistemden altlık yüzeyine iletimi gerçekleştirilir. Sistemde su girişinin ve çıkışını olduğu soğutma kanalları da mevcuttur. Bu kanallar sayesinde plazma tabancasından sürekli olarak plazma alevi çıkışı gerçekleşmektedir.



Şekil 5: Plazma sprej tabancası iç şeması (Bose, 2007).

#### 2.1.1.2 Vakum Plazma Sprej Kaplama Yöntemi

VPS yöntemi 1970'li yıllardan sonra gelişmeye başlamıştır. Bu yöntem düşük basınçlı plazma sprej olarak da isimlendirilebilmektedir. Bu üretim yöntemi malzemelerin sıcak korozyona karşı daha dayanıklı olması için kullanılmaya başlanmıştır. Bu yöntem ile 50  $\mu\text{m}$ ' den düşük kaplama kalınlıkları elde edilmesi ile endüstride PVD ve CVD gibi metotların yerine tercih edilen bir metot olmaya başlamıştır. Vakum plazma sprej yönteminin şematik olarak gösterimi Şekil 6'da gösterilmiştir (Altuncu, 2011; Döleker, 2015).



Şekil 6: Vakum Plazma Sprey işleminin şematik gösterimi; 1) çalışma gazları girişi, 2) noz, 3) vakum çemberi, 4) ark üretici, 5) toz giriş kısmı, 6) plazma üretici (Pawloski, 2008).

APS yönteminden farklı olarak vakum altında yapılan bu yöntemde, kaplama esnasında vakumu meydana getirmek ve sabit tutabilmek oldukça güç bir durum olmakla birlikte yöntemin en büyük sorunları arasındadır. Vakumun sabit şartlarda tutulmasıyla sızdırmazlık sağlanarak proses istenilen seviyede sonuçlanmaktadır (Davis, 2004).

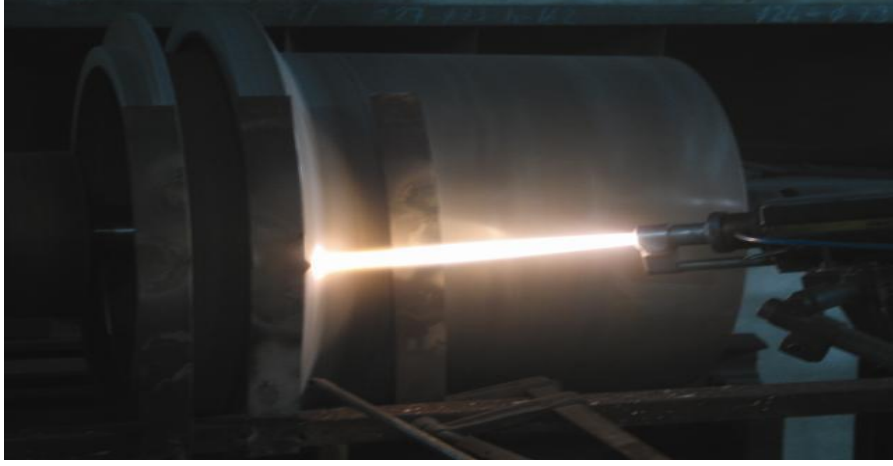
Çalışma argon, hidrojen, helyum ve azot gazlarının karışımından oluşur ve elektrik güç girişi APS'ye göre daha fazladır. Partikül boyutları ise 5 ile 20  $\mu\text{m}$  arasında değişmektedir. Sprey mesafesi 300 ile 400 mm arasında değişmektedir. Sprey atmosferi düşük basınçta yani vakum atmosferinde olmaktadır. Sprey öncesi basınç yaklaşık 1,3 Pa dolaylarında iken dinamik basınç 655 Pa ile 13,3 kPa arasındadır (Pawlowski, 2008).

Alaşımli bağ kaplamalar da çekme dayanımı sıklıkla kaplama kalitesine ve içeriğine göre değişim göstermektedir. Epoksi reçine testi uygulamalarında 80 MPa' dan daha büyük değerlere çıkmaktadır. Kaplamaların porozitesi %1 ya da %2 arasında uygulama parametrelerine bağlı olarak değişim göstermektedir. VPS kaplamalarda genel olarak kaplama kalınlığı değerleri 150 le 500  $\mu\text{m}$  arasındaki kalınlık değerlerinde değişiklik göstermektedir (Pawlowski, 2008).

### 2.1.2 Yüksek hızlı-oksi Alev (HVOF) Kaplama Yöntemi

Yüksek hızlı oksii-yakıt (HVOF) prosesi termal sprey kaplama yöntemlerinin en önemlilerinden bir tanesidir. Bu yöntemde propan ve hidrojen gibi gazlar yüksek basınçta yanma odasına gönderilerek yakılır. Basınç etkisiyle partiküller yüksek hızda (ses ötesi hızda) altlık malzeme yüzeyine gönderilir. Genellikle ergime sıcaklığının 3000 K'ni geçmeyen malzemeler bu yöntemde kaplama malzemesi olarak kullanılabilir. Bu yöntem diğer kaplama yöntemleriyle kıyas edildiğinde oldukça avantaja sahiptir. Alev hızının süpersonik hızlarda olması bu yöntemle kaplanan malzemelerin diğer yöntemlerden üstün olmasını sağlamaktadır. Plazma gazı olarak H<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub> gazlarına ilaveten N<sub>2</sub> gazı da bu yöntemde kullanılmaktadır. Alev hızının çok yüksek olmasından dolayı bu yöntem ile üretilen kaplamalarda çok düşük gözenek oranı ve kaplama yoğunluğunun ise oldukça yüksek olması bu yöntemi diğer yöntemlerden üstün kılmasının yanında oldukça pahalı bir yöntem yapmaktadır (Zağlı, 2010; Döleker, 2015).

HVOF prosesi termal püskürtme yöntemiyle yapılan kaplamalarda yüksek hızlarda, sert ve çok yoğun kaplama yapıları elde etmek için kullanılan bir prosestir. HVOF yönteminin üstün özelliklerinin yanısıra bu yöntemin bazı dezavantajları da mevcuttur. HVOF yönteminde sıcaklığın yüksek olması altlık malzemenin kimyasal kompozisyonu değişmekte, termal deformasyonlara neden olmakta ve bu sebepten dolayı ince numuneler ve plastik gibi kolay eriyen numunelerin kaplanması mümkün olmamaktadır. Hatta süper alaşım altlık malzemeler dahi kaplama esnasında altlığın soğumasına yardımcı olmak için pasolar şeklinde kaplanmaktadır. Her paso işleminden sonra altlık malzeme kompresör yardımıyla soğumaya tabi tutulmaktadır. Şekil 7'de bir HVOF kaplama prosesi gösterilmektedir. Bu yöntemde tabanca ucu aşırı miktarda ısındığından dolayı malzeme yüzeyine pasolar halinde kademe kademe kaplama malzemesi atılmaktadır. Her kademededen sonra tabancanın uç kısmı kompresör yardımıyla soğutulularak işlemin hızlanması sağlanmaktadır. Her pasodan sonra kaplama kalınlığı ölçüldüğünden dolayı istenilen kaplama boyutuna ulaşıldıktan sonra işleme her pasosunun ardından son verilebilmektedir. Bu özelliğinden dolayı da HVOF yöntemi tercih sebebi sayılmaktadır (Zağlı, 2010; Döleker, 2015).



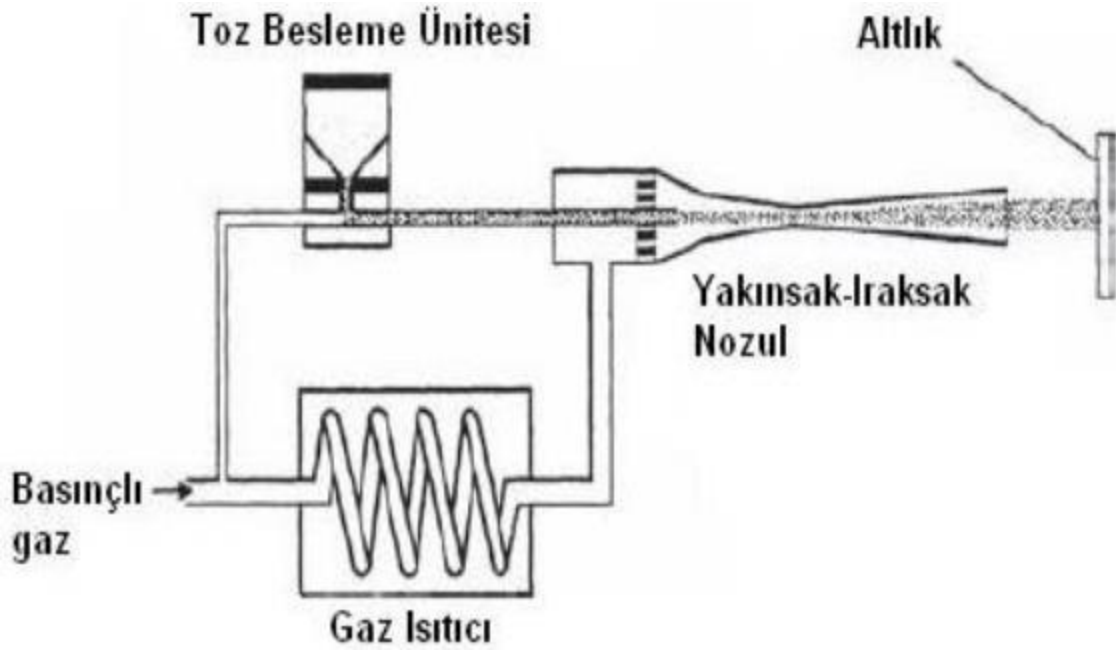
Şekil 7: HVOF prosesinin temsili olarak gösterimi (Zağlı, 2010).

HVOF yönteminin aşınma ve erozyona karşı dayanıklı olmasından dolayı özellikle WC,  $Cr_xC_y$  ve süper alaşım kaplamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca HVOF yöntemi endüstride ise uçak türbin kanatçıkları, uzay ve uçak sanayide de oldukça fazla tercih edilmektedir (Zağlı, 2010).

### **2.1.3 Soğuk Gaz Dinamik Sprey (CGDS) Kaplama Yöntemi**

Soğuk gaz dinamik sprej yöntemi 1980'li yıllarda Rus araştırmacılar tarafından ortaya çıkarılıp kanıtlanmış bir yöntemdir. Bu yöntemde esas amaç parçacıkların termal sprej yönteminin aksine ergitilmeden plastik deformasyonla altlık üzerine çarptırılmasıyla biriktirilmesidir. Soğuk sprej yöntemi iki fazın (gaz+katı) süpersonik yani ses ötesi hızla bir rüzgar tüneli içinde aktığı bir yöntemdir. CGDS metodunda yüksek sıcaklıklara çıkılmadığından toz parçacıklarındaki oksitlenme minimum düzeydedir. Rus bilim adamları saf metalleri, metalik alaşımları, bazı polimeri ve kompozitleri farklı türlerdeki altlık malzemelerin üzerine başarılı bir şekilde biriktirmişlerdir. CGDS yöntemi diğer yöntemlere göre daha yeni bir kaplama yöntemidir. Diğer termal sprej yöntemlerinden altlığın ve partiküllerin çok yüksek sıcaklıklara maruz kalmamasıyla ayrılır. Bu yönü de CGDS yöntemini yüksek sıcaklıklarda reaksiyon oluşturan titanyum gibi malzemelerin kaplamalarda altlık malzeme olarak kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Sistemde oksitlenme gibi olumsuz etkiler görülmez. Ancak yüksek sıcaklıklara çıkılmadığından seramik gibi gevrek malzemelerin kaplanması pek mümkün değildir. Bu yöntem HVOF' a benzer karakteristik özellikler gösterir. Porozite oranının düşük olması ve kaplama tabakasının yoğunluğunun yüksek olmasından dolayı son yıllarda MCrAlY kaplamalarda

oksidasyon, sıcak korozyon ve termal şok gibi hasarlara karşı yaygın olarak kullanılmaktadır. Oksidasyonun yok denecek kadar az olması kaplama yüzeylerinin genellikle temiz olmasını sağlamaktadır. Fakat partiküller yüzeye çarparak yapıştırıldığından dolayı kaplamalarda yüksek gerilmeler meydana gelir. Sıcaklığın düşük olması ise toz partiküllerinin kimyasal yapısında herhangi bir değişiklik oluşturmamaktadır. CGDS yöntemiyle alüminyum, paslanmaz çelik, bakır ve titanyum alaşımları gibi çok fazla sert olmayan malzemeler kullanılmaktadır. Seramikler gibi sert malzemeler ise saf olarak püskürtülmeleri oldukça zordur. Öte yandan bu yöntem için altlık malzeme de oldukça önem arz etmektedir. Bu sebepten dolayı altlık malzeme plastik deformasyona karşı dirençli yani yumuşak malzemelerden seçilmektedir (Zağlı, 2010).



Şekil 8: CGDS metodunun temsili şematik gösterimi (Pawloski, 2008).

Tipik bir CGDS yöntemi Şekil 8’de gösterilmiştir. Sistemde gaz olarak azot ve helyum gazı kullanılmıştır. 700 °C’de ön ısıtmaya tabi tutulan gazlar sayesinde partükülerin termal enerjisi artar. Isıtılan gazlar ıraksak ve yakınsak nozullara aktarılır. Nozula gelen karışık gazlar ani olarak genişlerken, gazların sıcaklıkları ise partiküllere tabanca içinde meydana gelen ani genişmeden dolayı ısı aktarımını tam sağlayamadığından hızlı bir şekilde düşüş gösterir ve gazların termal enerjisinin kinetik enerjiye dönüşümü sayesinde ses üstü hızlara ulaşılır. Ancak gerekli hıza ulaşamayan parçacıklar altlık malzemeye yapışmadan geri sekerler bu da malzeme yüzeyinde erozyona sebep olmaktadır (Karaoğlanlı vd., 2013; Karaoğlanlı vd., 2012). Diğer yöntemlere göre porozite olmamaktadır ancak

yüksek sıcaklıklara çıkılmadığından dolayı üst kaplama malzemesinin kaplanmasında kullanılması olanaksızdır. Al, Cu, çelik, Ti gibi çeşitli malzemeler bu yöntemde altlık olarak kullanıldığı gibi bu malzemeler başarılı bir şekilde kaplama malzemesi olarak da kullanılmaktadır. Genellikle 10-60 µm boyutundaki tozlar kaplama malzemesi olarak kullanılmaktadır. Biriktirme verimi tozun cinsine, tozun çarpma hızına, boyutuna, şekline ve altlık malzemeye göre değişmektedir. Bağlanma mekanizması plastik deformasyon olarak kabul edilmiştir. Partikül ile altlık arasında yüksek hızda çarpma sonucu termal yumuşama bölgeleri oluşur. Bu bölgelerde sıcaklık malzeme ergime sıcaklığına kadar yaklaşır.

### **2.1.3.1 CGDS Yönteminde Hızı Etkileyen Faktörler**

Helyum, azot ve hava uygun gazlar olarak soğuk sprey yönteminde kullanılmaktadır. Fakat helyum gazı yüksek sıkıştırılabilirliği ve sesten daha hızlı olması sebebiyle azot ve havaya göre daha çok tercih edilmektedir. Artan gaz basıncı ve dolayısıyla gaz yoğunluğu ile çeşitli malzemelerde kütle akış hızını arttırmaktadır. Köşeli parçalar küresel parçalara oranla daha yüksek hızlara sahip olduğu belirlenmiştir. Bunun sebebi olarak köşeli partiküllerin daha yüksek sürüklenme katsayısına sahip olması gösterilmektedir. Toz tane boyutu arttıkça ve bunun yanında çok düşük toz boyutlarında hız azalmaktadır. Yani tozların ne küçük boyutlu olması nede büyük boyutlu olması arzu edilmez. Arzu edilen kullanılan toz boyutlarının optimum olması gereklidir.

### **2.1.3.2 CGDS Prosesinin Avantaj ve Dezavantajları**

CGDS prosesin avantajları maddeler halinde aşağıda verilmektedir.

- Düşük proses sıcaklığından dolayı ergimiş yoğun partikül içermez,
- Kompozisyon kaybı sıcaklık değişiminin fazla olmamasından dolayı az olur,
- Oksidasyon oluşumu çok az miktardadır,
- Yüksek sertlik ve soğuk çalışılmış bir mikro yapı oluşur,
- Kaplamalarda porozite miktarı az olacağından düşük kusur oluşur,
- Ekipmanların çalışması için daha düşük ısı girişi girişi
- Yakıt gazı ve yüksek elektriksel ısıya ihtiyaç yok,



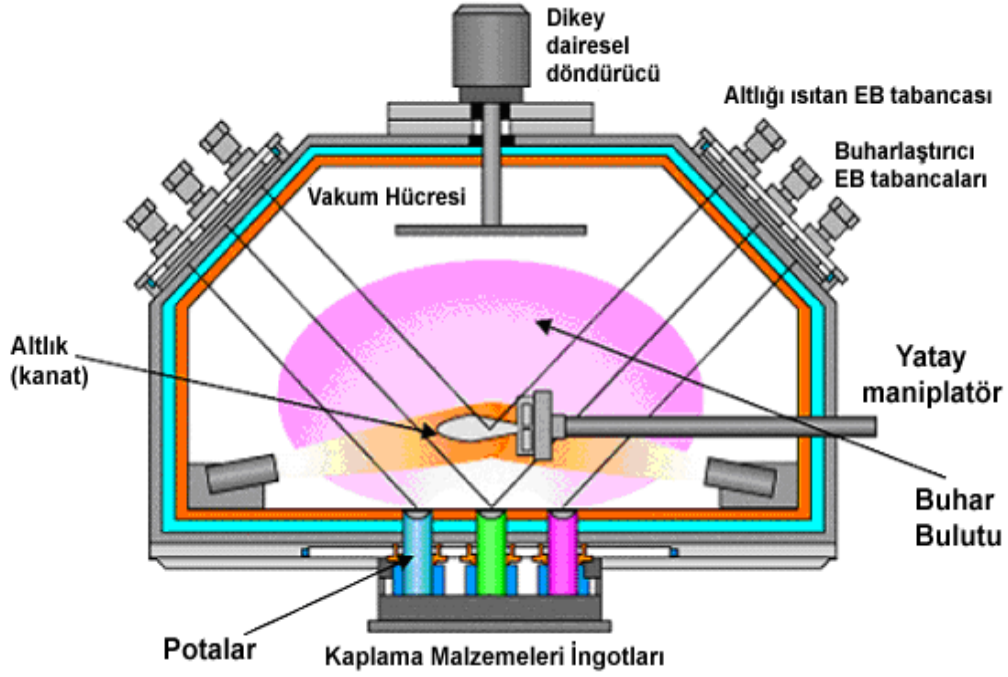
- Koruma gereksinimi az.

CGDS prosesin dezavantajları maddeler halinde aşağıda verilmektedir.

- Seramikler gibi sert ve kırılğan malzemelerin kaplanamaması,
- Kaplanabilecek altlık malzemelerin sınırlı olması
- Yüksek miktarda gaz beslemeye bağılı olarak tüketimin yüksek olması,
- Geri dönüşüm sağlanamadıkça He gazının çok pahalı olması,
- Kaplama performansı ve bilgi birikiminin günümüzde yeterli seviyede olmaması, hala geliştirilmeye çalışılması.

## **2.2 Elektron Demetiyle Fiziksel Buhar Biriktirme (EB-PVD) Yöntemi**

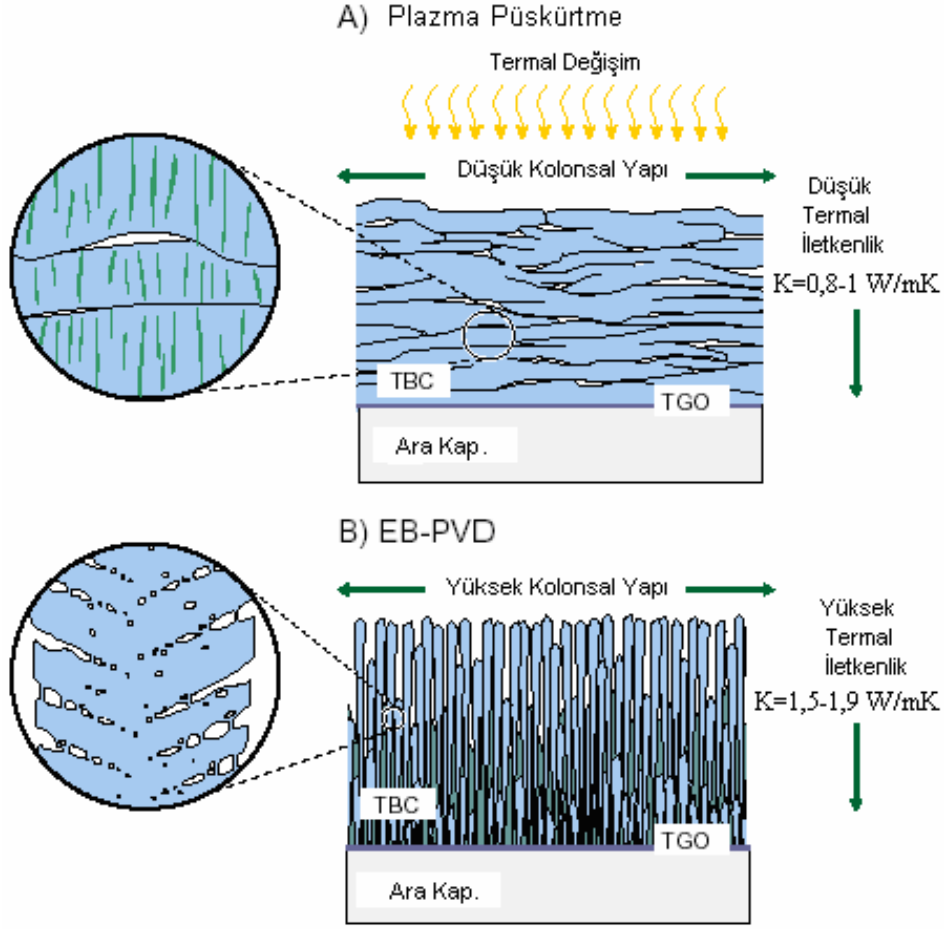
EB-PVD, yüksek sıcaklıklara maruz kalan parçalarda seramik parçacıkların kaplanmasında kullanılır. Bu sistemde kaplanacak olan malzeme ergitilir, vakum altında buharlaştırılır ve altlık malzeme yüzeyine biriktirilir. EB-PVD yöntemi diğer metotlara göre yüksek sıcaklığa dayanıklılığı sebebiyle TBC'ler için çok tercih edilen bir metottur. Bu yöntemde iyi bir biriktirme hızı ile üniform mikroyapıya sahip kaplamalar üretilebilmektedir. Bu yöntemle üretilen kaplamalar termal şoklara ve mekanik etkilere karşı oldukça dayanımı yüksektir. EB-PVD yönteminin tipik bir şeması Şekil 9'da gösterilmiştir (Karaali, 2008).



Şekil 9: EB-PVD sisteminin gösterimi (Bernier, 2001).

EB-PVD yönteminde kaplamalar gerilmelere karşı dayanıklı olmasının yanında dış yüzeyi oldukça düzdür. Bu tür kaplamalar yüksek sıcaklığa, oksidasyona ve gerilmelere karşı olan toleranslarından dolayı uçak ve uzay sanayinde oldukça fazla tercih edilmektedirler. EB-PVD'li kaplamalar kolonsal bir mikroyapıya sahiptirler. Kolonsal yapı ise malzemelerde termal şoklara ve mekanik gerilmelere karşı oldukça fazla direnç sağlarlar. Plazma sprej kaplamalar ise laminar yapıya sahiptir (Herman ve Shankar, 1987).

EB-PVD ile plazma sprej arasındaki bu mikro yapı farkı uçak türbin ve kanatçıklarında yüksek sıcaklık ve yakıt içerisindeki emprütelerin varlığından ileri gelen sıcak korozyon olayında meydana gelen faz dönüşümlerine karşı daha dayanıklı olmasını sağlamaktadır. Bu iki yapının kullanımı sonucu oluşan mikro yapıların şematik görüntüsü Şekil 9' da gösterilmiştir. Şekil 10 a'da gösterilen enlemesine kolonsal olan yapı APS ile üretilmiş olan kaplamaya ait iken Şekil 10 b'de gösterilen düşey olarak oluşmuş kolonsal yapı ise EB-PVD yöntemiyle üretilmiş olan kaplamaların enine kesitini temsili olarak belirtmektedir. Bu yöntemlerin termal iletkenlik değerleri gösterilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi APS ve EB-PVD yöntemi arasında kayda değer bir fark söz konusudur.



Şekil 10: APS ve EB-PVD kaplama sistemlerinin gösterimi; a) APS tekniği ile üretilmiş kaplamanın mikroyapı görüntüsü b) EB-PVD tekniği ile üretilmiş kaplamanın mikroyapı görüntüsü (Habibi, 2014).

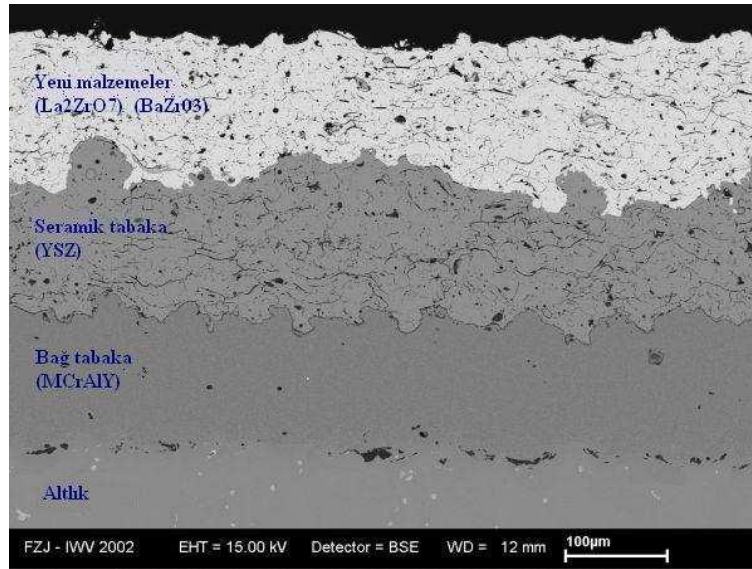
### 2.3 Termal Bariyer Kaplamalar (TBC)

Termal bariyer kaplamalar, yüksek sıcaklıklarda özellikle uçak sanayisinde süper alaşım olan altlık malzemeyi bağ kaplama ve üst kaplama sayesinde oksidasyondan, korozyondan ve erozyondan korumayı sağlayan sistem olarak nitelendirilebilir (Hass, 2000).

Günümüzde, termal bariyer kaplamalar genellikle motorların metalik parçalarında yüksek sıcaklık ortamlarına karşı koymak için kullanılır. Seramik termal bariyer kaplamalar genellikle gaz türbinlerinin sıcak bölgelerinde çalışma sıcaklığını ve motor verimini arttırmak için termal izolasyonu sağlamak için kullanılır (Habibi, 2014). TBC (100µm' den 1mm' ye kadar) arzu edilen düşük termal iletkenlik ve yüksek dayanım toleransını veren oldukça hatalı, poroziteli mikroyapılara sahiptir (Habibi, 2014). TBC'nin esas fonksiyonu

motorlarda ve türbinlerde sıcak gazlara karşı termal izolasyon sağlamak ve böylece alaşım bileşenlerinin altındaki yüzey sıcaklığını düşürmektir (Saowanee vd., 2011).

Şekil 11’ de bir TBC sisteminin türbin kanadı üzerine uygulandığı ve TBC kalınlığı boyunca sıcaklığının düştüğünü gösteriyor (Habibi, 2014). Yüzey sıcaklığını düşürmede TBC’lerin etkili olabilmesinde kaplanan parçaların TBC boyunca üretilen ısıdan kurtulması için aktif bir şekilde soğutulmaya ihtiyacı vardır (Habibi, 2014). TBC ile kaplanan kanatçıklar gaz türbin motorlarının kompresörlerinden gelen soğuk hava ile aktif bir şekilde soğutulur (Habibi, 2014). Soğuk hava, kaplamalar ve kanatçık duvarları boyunca oluşan ısıyı uzaklaştırmak için kanatçığın iç oyucu boyunca dolaştırılır (Habibi, 2014).



Şekil 11: Tipik bir TBC sistemi mikroyapı görüntüsü (Karaali, 2008).

Termal bariyer kaplama bileşenleri yüksek sıcaklığa, büyük sıcaklık değişimine, gerilme şartlarına ve korozif atmosferlere karşı direnç göstermelidirler. Tek katmana sahip kaplama sistemlerinde ise bu olumsuzluklara karşı dayanabilmesi oldukça zordur. Bu sebepten dolayı karmaşık yapılı termal bariyer kaplamalar geliştirilmiştir. Bu sebepten dolayı termal bariyer kaplamalar uçak motorlarının vazgeçilemez bir parçası konumuna gelmiştir. (Xu ve Guo, 2011).

## 2.3.1 TBC Yapısının Bileşenleri

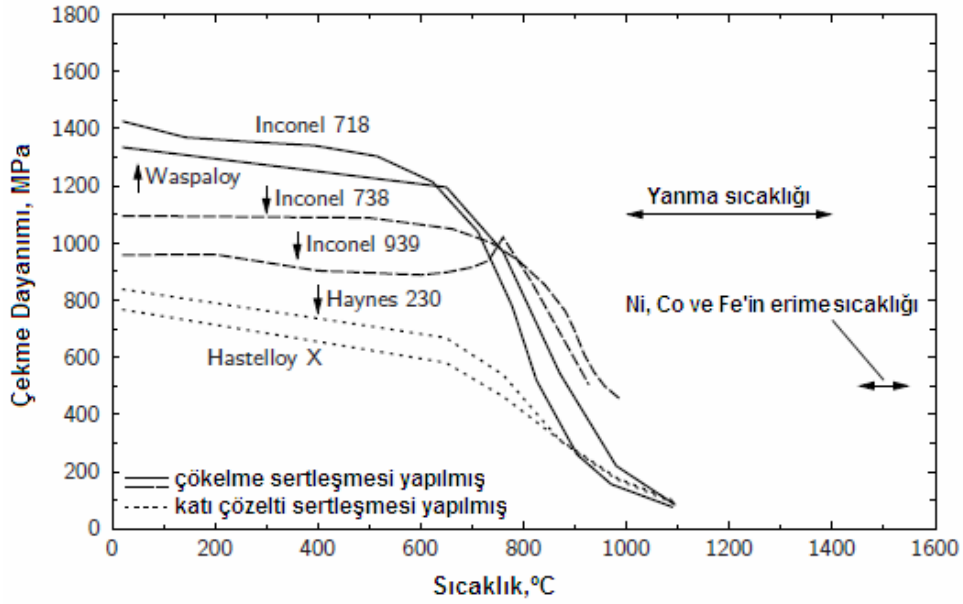
### 2.3.1.1 Altlık Malzeme

Gaz türbin motorlarında agresif çevresel etkilerden metalik parçaları termal olarak korumak için kullanılan sistemler TBC sistemleridir. Bu sistemler oksidasyon direnci için bir metalik bağ kaplama, termal izolasyon için %6-8 arasında  $Y_2O_3$  ile stabilize edilmiş  $ZrO_2$  seramik üst kaplama, üst kaplama ile bağ kaplama arasında oluşan termal olarak büyüyen oksit tabakasından ve son olarak ise nikel kobalt esaslı yüksek sıcaklık, oksidasyon, korozyon, erozyon ve termo-mekanik hasarlara karşı dayanıklı olan süper alaşım altlık malzemelerden oluşur (Karaoğlanlı vd., 2014). Altlık malzeme kaplama sisteminde bulunan en temel malzemedir. Yani altlık malzeme korunması gereken esas malzemedir. Altlık malzeme olarak gaz türbinlerinde genellikle nikel bazlı süper alaşım malzemeler kullanılır. Bu malzemelerin kullanılmasının esas nedeni ise yaklaşık 1100 °C sıcaklıklara kadar sertliğini muhafaza edebilmesidir. Yüksek sıcaklıklarda sürünme direncini arttırmak için altlık malzemeler yönlendirilmiş tanelerle veya tek kristalli yapılarla üretilirler. Geleneksel olarak kullanılan Inconel 718 süper alaşım malzemenin kompozisyonu Tablo 1’de verilmiştir (Karaoğlanlı vd., 2014).

Tablo 1: Ni esaslı süper alaşım Inconel 718 malzemenin kimyasal kompozisyonu (Karaoğlanlı vd., 2014).

Inconel 718, % Kimyasal Kompozisyonu							
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	Kalan

Süper alaşımların çalışma sıcaklıkları oldukça yüksek olmasına karşın, kaplamalar türbinlerin çalışma sıcaklıklarını daha da arttırmak ve parçaların ömürlerini daha da uzatmak için günümüzde oldukça yaygın bir biçimde kullanılmaya devam edilmektedir. Şekil 12’te görüldüğü gibi gaz türbinlerinin çalışma sıcaklıkları süper alaşım malzemelerle karşılaştırıldığında neredeyse elementlerin ergime noktalarına çok yakındır. (Karaoğlanlı vd., 2014).



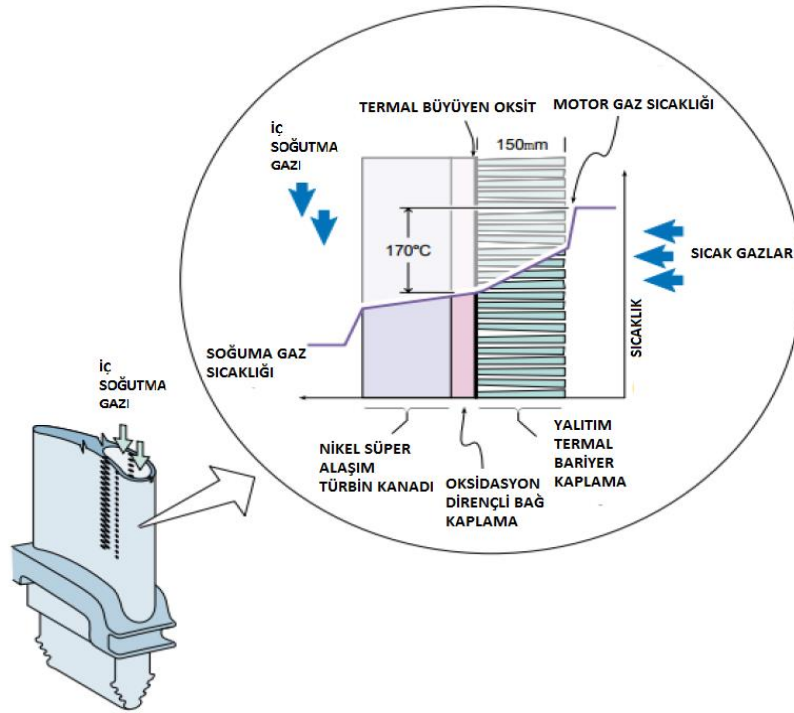
Şekil 12: Sıcaklığın bir fonksiyonu olarak bazı süper alaşımların çekme dayanımı (Karaoğlanlı vd., 2014).

1940'dan beri türbin kanatlarının iç sıcaklıkları değişen çevre koşullarından dolayı sürekli olarak arttırılmıştır. Bugünün ticari ve askeri uçakları sırasıyla 1500 °C ve 1600 °C üzerindedir ve 2015'in sonlarında 1760 °C'ye ulaşması beklenmektedir. Bu nedenden dolayı türbin kanatçıklarında TBC'lere ihtiyaç duyulmaktadır. Türbin kanatçıkları uçaklardaki diğer parçalara göre yüksek sıcaklık ve hızlı sıcaklık değişiminden kaynaklanan gerilmelere maruz kaldığı için daha ağır koşullarda çalışmaktadır. Dahası türbin kanatçıkları çalışma esnasında sıcak gazlardan ve kimyasallardan dolayı oksidasyon ve korozyonla karşılaşmaktadır. Bütün bu sebeplerden dolayı, türbin kanatçık parçaları çalışma esnasında yüksek sıcaklık direnci, sürünme direnci ve yorulma dayanımı gibi özelliklere sahip olmalıdır. Bu özellikleri karşılamak için, bugün yapılan modern uçakların gaz türbin motorlarında süper alaşım malzemelerinin geniş bir yelpazesi kullanılmaktadır (Karaoğlanlı vd., 2014).

### 2.3.1.2 Metalik Bağ Kplama

Metalik tabaka, bağ kplama olarak adlandırılır ve içeriği MCrAlY (M: Co, Fe, Ni) olan süper alaşım malzemedir. Bu tabakanın TBC'deki görevi altlığı oksidasyondan korumak seramik tabakanın altlık yüzeyine adhezyonunu (yapışmasını) sağlamaktır (Yılmaz, 1997).

Bağ kaplama terimi alümina veya MCrAlY kaplamalarının difüzyonunu isimlendirmek için kullanılır. Metalik bağ kaplamalar seramik üst kaplamanın altlık alaşıma yapışmasını arttırmak için metalik altlık ve seramik üst kaplama arasında biriktirilir (Ahmadi-Pidanin vd., 2013). Bağ kaplama ve altlık arasındaki bağlanma fizikseldir (Feuerstein vd., 2007). Genellikle bağ kaplama metalik altlık ve seramik üst kaplamanın arasındaki kademeli geçişi sağlaması için kullanılır (Habibi, 2014). Alaşım ve TBC arasındaki bağlanmanın artmasına rağmen kaplamanın öncelikli fonksiyonu alttaki yapısal alaşımın yüksek sıcaklık, oksidasyon ve korozyon direncini arttırmaktır (Feuerstein vd., 2007).



Şekil 13: Türbin kanadı ve TBC boyunca sıcaklık düşününün gösterildiği TBC bileşimlerinin diyagramı (Karaoğlanlı vd., 2014).

Şekil 13’ de gösterildiği gibi metalik bağ kaplama altlık üzerine ve seramik üst kaplamanın ise alt kısmına uygulanmaktadır. Bu sayede metalik olan bağ kaplama oksidasyona karşı direnç gösterirken, üst yüzeyde bulunan seramik kaplama ise ısı izolasyonu sağlamaktadır. Termal olarak büyüyen oksit tabakası ise seramik üst kaplama ile bağ kaplamanın arasında ince bir film şeklinde oluşmuştur.

### 2.3.1.3 Seramik Üst Kaplama

Tipik olarak TBC' ler termal izolasyon için bir seramik üst kaplama, termal bir şekilde büyüyen oksit skalası, korozyon direncini arttıran bir MCrAlY metalik bağ kaplama ve bir süper alaşım alt tabakadan oluşan çok tabakalı termal koruma sistemleridir. Şekil 13'de bu sistem şematik olarak gösterilmiştir (Habibi, 2014). Seramik üst kaplama aynı veya farklı seramik malzemelerin çok katmanlısı olabilir (Clarke ve Levi, 2003). Seramik üst tabaka çoğunlukla ısı iletkenliği düşük, termal genleşme katsayısı yüksek, katkı malzemeleriyle kimyasal olarak kararlı hale gelmiş  $ZrO_2$  (zirkonyum oksit)'tir (Saral, 2007). Seramik üst tabakaya zirkonyum oksit yerine alüminyum oksit ( $Al_2O_3$ ), seryum oksit ( $CeO_2$ ), lantanyum zirkonat ( $La_2ZrO_7$ ) ve gadminyum zirkonat ( $Gd_2ZrO_7$ ) gibi daha farklı seramiklerde tercih edilebilir (Szulc, 2004). Şekil 11'de tipik bir termal bariyer kaplamanın mikroyapısı verilmiştir. Bu yapıda da görüldüğü gibi seramik kaplama malzemenin en üst yüzeyinde dışarı ile ilk temasta olan bölge konumundadır. Bu sebepten dolayı bu tabakanın mümkün olduğunca malzemeye zararı dokunabilecek ortamlara (erozyon, korozyon vb.) karşı dayanıklı olmasına dikkat edilir. Üst tabakanın görevi metal altlığı aşırı yüksek sıcaklığın etkileri olan korozyon, oksidasyon ve erozyondan korumaktır (Erdoğan, 2009). Bunun yanında ısınma ve soğumalarda herhangi termal genleşmeye karşı kaplamaya zararı dokunmaması için üst tabaka termal genleşme sayısının altlık ile uyumuna göre mekanik yüklere maruz bırakılmamalıdır (Erdoğan, 2009). Kaplama tabakasının kullanılacağı sıcaklıklarda kimyasal etkilere karşı da dayanıklı olması beklenir ve kullanıldığı sıcaklıklarda her hangi bir kimyasal veya fiziksel bir dönüşüm olmaması arzu edilir (Erdoğan, 2009).

Seramik kaplamanın termal çevrimlerde genişlemesinin altlık malzemenin genişlemesine yakın olması gerektiğinden genellikle yitriya ( $Y_2O_3$ ) ilavesi ile kararlı hale getirilmiş zirkonya'ya katılması  $ZrO_2$  allotropik dönüşümlerinin yüksek sıcaklıklarda kararlı olmasını sağlar ve kullanım sıcaklığı esnasında faz değişiminden kaçınılmış olunur (Erdoğan, 2009).

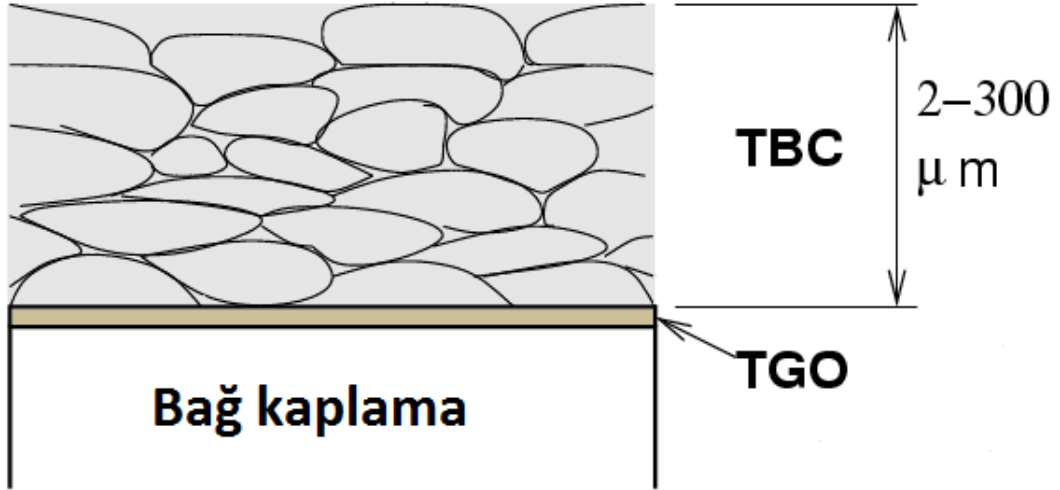
### 2.3.1.4 Termal Olarak Büyüyen Oksit (TGO) Tabakası

Termal bariyer kaplama sisteminde termal olarak büyüyen oksit tabakası bağ kaplama ve üst kaplama arasında Şekil 13 ve 14'te gösterildiği gibi yer almaktadır. TGO tabakasının oluşum şekli ve sebebi bağ kaplama malzemesi olan MCrAlY alaşımının da içerdiği elementlerin



oksijene karşı olan yüksek ilgisinden kaynaklanmaktadır. Bu elementler arasında ise en yüksek ilgiye sahip element alüminyum olduğundan oksit film tabakasının içeriğini  $Al_2O_3$  oluşturmaktadır (Habibi, 2014).

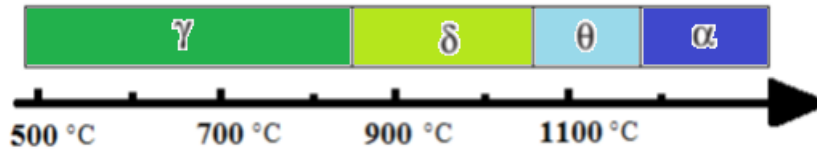
Altlık malzeme kaplama esnasında yüksek sıcaklık ve oksijene maruz kaldığında bağ kaplama yüzeyinde çok yavaş bir şekilde oluşan TGO tabakası daha sonra oluşacak olan oksidasyonlara engel olmaktadır. TGO tabakası bağ kaplama yüzeyinde seramik üst kaplama uygulanmadan önce uygun sıcaklık ve koşullarda 2-3  $\mu m$  olarak büyür. Bu oluşan tabaka ise daha sonra yapılacak olan üst kaplamanın adhezyonuna yardımcı olur. TGO tabakası bazı durumlarda seramik üst kaplama üzerinde de kaplama esnasında oluşabilir. Seramik kaplama üzerinde 8-10  $\mu m$  kalınlığında biriken TGO tabakası termal bariyer kaplamaların kullanımı esnasında dökülmelere sebep olmaktadır. TGO tabakasının büyüklüğü esasen içeri giren oksijen anyonlarından ziyade dışarı çıkan katyonların difüzyonu ile kontrol edilebilir (Habibi, 2014). Şekil 14' de gaz türbin bıçaklarında kullanılan TBC' lerin enine kesit temsili resmi verilmiştir (Liu, 2004). Bu şekilde görüldüğü gibi en üst yüzeyde enine dalgalı çizgilerle belirtilmiş olan yapı termal bariyer kaplamaların üst seramik kaplamasını temsil etmektedir. Onun altındaki koyu renkli TGO yazan kısım ise isminden de anlaşılacağı gibi termal olarak büyüyen oksit tabakası onun altındaki kısım ise metalik bağ kaplamadır. Metalik bağ kaplamanın alt kısmında bulunan yapı da türbin parçalarında kullanılan yüksek sıcaklığa dayanıklı nikel ve kobalt esaslı süper alaşım olan altlık malzemedir. Yapıdaki TGO genelde 2-3  $\mu m$  büyüklüğü aşmadığı sürece istenen bir olgudur. Ancak yapıda boyuttu arttığı durumlarda üst kaplamada çatlamalara sebep olabileceğinden boyutunun kontrolünün iyi yapılması gerekmektedir.



Şekil 14: TBC yapısının enine kesit resmi (DeMasi-Martin, 1994).

Seramik üst kaplamalar üretildiğinde yapıda çatlak ve poroziteler mevcut olur. Bu çatlak ve poroziteler oksijen geçişine olanak sağlamaktadırlar. Seramik üst kaplama yoğun olduğunda ise YSZ'nin iyonik geçirgenliğinden dolayı TGO tabakasının oluşması kaçınılmazdır (Young, 2008).

TGO tabakasının oluşumu esnasında ise  $Al_2O_3$ 'ün polimorfik dönüşümleri söz konusudur. Sıcaklığa bağlı olarak oluşan bu dönüşümler Şekil 15'de verilmiştir. Sıcaklıkla değişen bu polimorfik dönüşümler termal bariyer kaplamalarda hacim genişmesi oluşturacağından yapıda kırılma ve çatlamlar meydana gelir ve kaplama yapısı bozulur (Young, 2008).



Şekil 15:  $Al_2O_3$ 'ün sıcaklığa bağlı polimorfik dönüşümü (Young, 2008).

Şekil 15' te de gösterildiği gibi alüminyum oksit yapısı direkt olarak  $\alpha-Al_2O_3$  değildir. Bu yapı artan sıcaklık ve zaman neticesinde yarı kararlı veya kararsız yapıdan kararlı olduğu

yapıya dönüşmektedir. Bu polimorfik dönüşüm esnasında ise hacim değişimleri söz konusu olduğundan yapıda çatlamlar meydana gelmektedir.

### **2.3.1.5 Termal Bariyer Kaplamalardaki Yüksek Sıcaklık Ortamı**

Çoğu endüstriyel prosesler artan sıcaklık değişimleri, yüksek basınç ve büyük gerilmelerin yanında oksitleyici ve korozif atmosferin varlığı olarak karakterize edilmiş agresif ortamlarda gerçekleştirilir. Bu işlemlerin hepsinin temelinde ısının çok fazla üretilmesi ve parçaların yüksek sıcaklıkla temas içinde olması yatar. Örneğin gaz türbin motorlarında, yakıt yüksek basınçlı hava ile karıştırılır ve bu karışım ateşlenir. Isının üretilmesinin bir sonucu olarak hava genişler ve türbin içerisinde dönerek türbin motorunu çalıştırır. Motorun çalışmasından sonra egzozdan dışarı gaz çıkışı oluşur ve bu gaz ileriye doğru bir itme gücü oluşturur. En iyi performans için yanma odasında bulunan oksijen ve yakıt karışımının tamamının yanması ve maksimum sıcaklıkta olması gerekir. Fakat türbinin iç kısmı malzemelerin kullanım limitlerinden dolayı devamlı olarak 1100 °C'yi aşamaz (Habibi, 2014).

Bu proseslerin hepsi performans ve durağanlığı sağlayabilmek için yük altında yüksek sıcaklık kapasitesine sahip yapı malzemeleri gerektirir. Çalışma esnasında, bireysel parçaların yapısal malzemeleri çözünür. Yapısal olarak yüklenmiş parçaların yorulma ve sürenme hasarlarına ek olarak malzemeler oksidasyona, korozyona ve erozyona uğrar (Habibi, 2014).

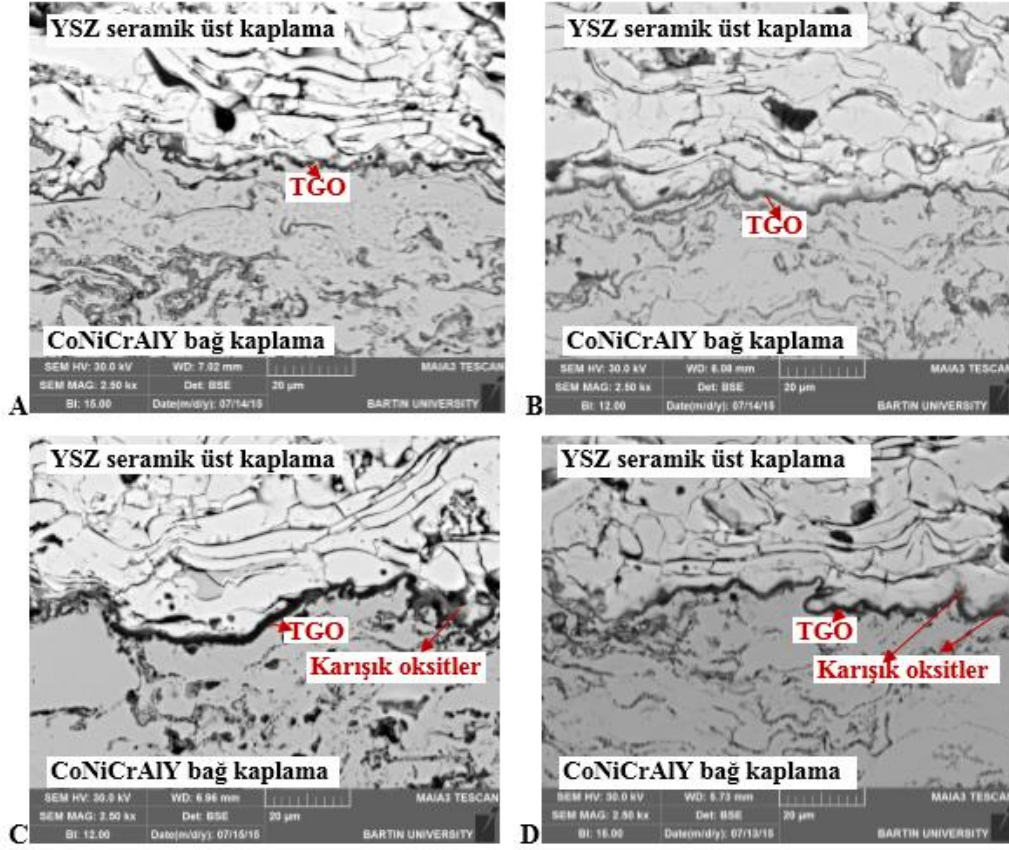
Gaz türbinlerinin sıcak bölgeleri gibi yüksek basınç ve sıcaklık ortamlarında kullanılan en gelişmiş metalik alaşımlar süper nikel alaşımlarıdır. Mükemmel yorulma ve sürenme özelliklerine rağmen süper nikel alaşımları eğer türbin ortamında yüksek sıcaklığa maruz kalırlarsa, hızlı bir şekilde oksidasyon ve yüksek sıcaklık korozyonu tarafından bozulurlar (Habibi, 2014).

Kaplama malzeme bileşenlerini efektifli bir şekilde abrazyon, erozyon, aşınma, oksidasyon ve korozyon gibi çeşitli hasar mekanizmalarından korur. Gaz türbinlerinin içindeki ciddi yüksek sıcaklık ortamına karşı metalik altlık malzemeyi korumanın tek yolu seramik kaplama kullanmaktır. Kaplamalar metalik alaşımlar ve ortam arasında bariyer sağlar (Habibi, 2014).



### 2.4.1 Oksidasyon

Termal bariyer kaplamalarda TGO tabakası, bağ ve üst kaplama tabakaları arasındaki katmanda meydana gelir (Xu ve GuO, 2011). TGO oluşumu, TBC'lerin gözenekli olmasından meydana gelen kaçılması mümkün olmayan bir durumdur. Bu durum kaplama işlemi esnasında oluşmaktadır. Yüksek gözenekli olan bir bağ kaplama ise TGO oluşumunun yanında oksidasyonu da beraberinde getirecektir. Oksijenin yapıya bol miktarda giriş yapması oksidasyonun oluşumuna neden olacaktır (Saremi vd., 2007), Yapının oksijene maruz kalmasından dolayı yapı içerisinde bulunan alüminyum difüzyona uğrayacaktır (Young, 2008). Difüzyona uğrayan alüminyum ara yüzeyde birikerek TGO tabakasının kalınlaşmasına ve daha kararlı olmasına neden olacaktır. Zamanın ilerlemesiyle yapıdaki alüminyumun tamamı bitecek ve  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yapısı bozulacaktır. Bundan dolayı yapıda karışık oksitler bulunacaktır (Young, 2008). Yapıda ise arzu edilen şey TGO yapısının kalınlaşmaması  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yapısında oldukça fazla bulunmasıdır. Çünkü bu yapının bozulması yapıda gerilmeler meydana getirir. Bu gerilmeler ise çatlak oluşumu ve ilerlemesini meydana getirir (Saremi vd., 2007).



Şekil 17: APS-CoNiCrAlY bağ ve APS-YSZ üst seramik kaplamaya ait 900 °C' de oksidasyon testi sonrası 2500x büyütmedeki SEM mikroyapıları; a) 8 saat, b) 24 saat, c) 50 saat ve d) 100 saat (Meşekıran, 2015).

Şekil 17' de gösterildiği gibi oksidasyon testlerinden sonra TBC numunelerinin SEM görüntüleri verilmiştir. Oksidasyon testleri 900 °C' de 8, 24, 50 ve 100 saat boyunca yapılmıştır. Oksidasyon testleri sonrasında bağ tabaka üst kaplama gösterilmiştir. Testin ardından ise oksitlenmiş olan bölgeler belirgin bir biçimde gözükmemektedir.

Bağ kaplamaların oksitlenmesi sadece bu sebepten meydana gelmez. Diğer bir sebebi de seramik üst kaplamadır. Bu tabakanın seramik seçilmesinin nedeni diğer malzemelere göre korozif ve ısıl şartlara dayanımının yüksek olmasıdır (Schulz vd., 2004). Seramik malzemelerin diğer malzemelere göre daha üstün olan bu özelliklerinin aksine çalışma şartlarında çatlaklar meydana gelir. Oluşan bu çatlakların arasından oksijen geçişi sağlandığından dolayı TGO tabakasının oluştuğu görülmektedir (Bose, 2007).

Sıcaklığın artması yapıdaki TGO tabakasının ayrılmasına neden olur. TGO tabakasında meydana gelen ayrılma ise  $\gamma$ - $\delta$ - $\theta$ - $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> polimorfik dönüşümlerinden meydana gelir. Bu

polimorfik dönüşümlerden ise  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> daha kararlı bir yapıya sahip olduğundan dolayı en çok arzu edilen yapı konumundadır (Arikawa vd., 2007).

#### **2.4.2 Termo-Mekanik Hasar**

Termo-mekanik gerilmelerin oluşum mekanizması, TBC'nin maruz kaldığı ısı duruma bağlı olarak değişim gösterir. Isıl durumlar izotermal ise mekanizma daha ziyade TGO'nun büyümesi ile alakalı olurken, termal çevrimlere maruz kalan TBC'lerde mekanizma TGO'nun soğuması esnasında büzüşmesi ile ilgilidir. Bu iki durumun da etkili olabileceği, fakat birinin daha baskın olabileceği de ihmal edilmemelidir. Örneğin enerji üretimi amaçlı olarak karada kullanılan gaz türbinlerinde, uzun çalışma süreleri boyunca yüksek sıcaklıkta çalışan TBC'ler kullanılmaktadır. Bu durumda izotermal mekanizmalar etkili olmakta ve türbinler durduğunda soğumadan kaynaklı genleşme veya büzüşme olayları devreye girmektedir. Sonuç olarak bu tip türbinlerde düşük sayıda ısı çevrim ve uzun süreli izotermal ısıtma olmakta bunun sonucunda da, TGO ortalama 5-15 µm kalınlığına ulaştığında hasar oluşumu görülmektedir. Türbin parçalarında TGO kaynaklı ısı genleşme uyumsuzluğu ve TGO büyümesi kaynaklı hasarlar etkilidir. Fakat ısı çevrim sayısının baskın olduğu havacılıkta kullanılan türbinlerde ise izotermal ısıtma baskın değildir ve TGO ortalama 1-5 µm civarındayken hasar oluşmakta ve bu hasarın temel nedeni ısı çevrimlerden kaynaklanmaktadır (Wright ve Evans, 1999; Evans vd., 2001).

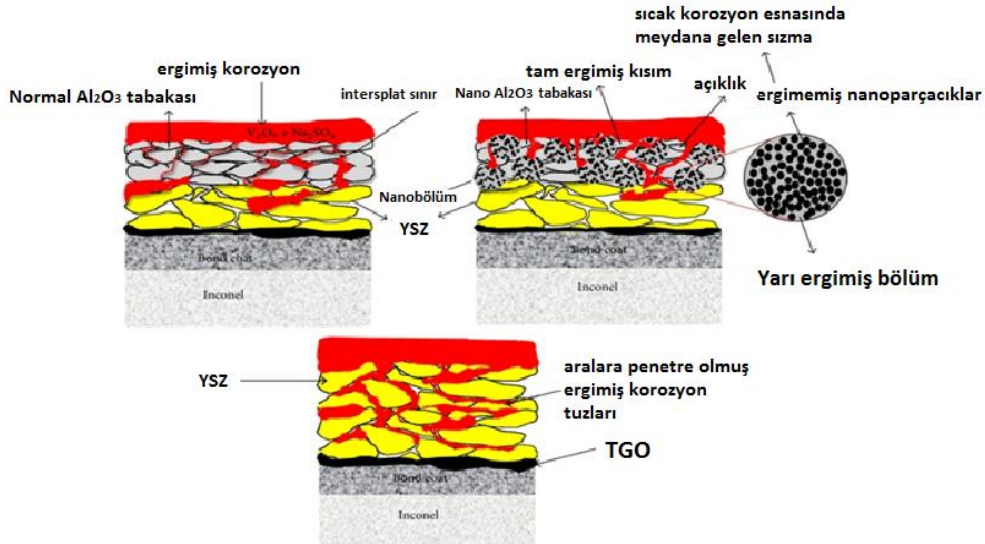
#### **2.4.3 Sıcak Korozyon**

Uzay ve havacılık endüstrisinde türbin kanatçıklarının ve motorlarının yüksek sıcaklığa dayanımı ve verimini arttırmak için TBC'ler uygulanmaktadır. Uygulanan bu TBC'ler genellikle yitriya ile stabilize edilmiş zirkonyadır (YSZ). Kullanılan yakıtlarda ise, istenmeyen kirlilikler söz konusudur. İstenmeyen bu kirlilikler yüksek sıcaklıklarda kaplama ile reaksiyona girerek yapının bozulmasına, çatlama veya dökülmelere sebep olmaktadır. Üst kaplamadan kaynaklanan bu hasar oluşum mekanizması ise sıcak korozyon olarak isimlendirilmektedir. Bu tip hasar erimiş tuzların üst tabakadaki mikro çatlaklar ve porozitelerden sızması sonucu gerçekleşir.

Servis koşullarında sodyum, vanadyum, kurşun gibi elementlerin YSZ üst kaplama tabakasının yapısını değiştirmesi ile oluşur (Saremi vd., 2007).

Yakıt kirliliğinden kaynaklanan sodyum, sülfür, fosfor, vanadyum gibi elementler yapıda var olduğunda  $Y_2O_3$  fazı ile reaksiyona girer.  $Y_2O_3$  fazının yokluğunda ise, tetragonal  $ZrO_2$  fazının stabilizasyonu mümkün olmadığı için tetragonal-monoklinik faz dönüşümü gerçekleşir. Bu dönüşüm hacim değişikliğine sebep olarak üst tabakanın bütünlüğünü bozabilir (Saremi vd., 2007). İkinci durumda ise fosfor ve sodyumun yakıt kirliliğinden dolayı ortamda bulunması ve zirkonyayla reaksiyona girmesi sonucunda gerçekleşir.

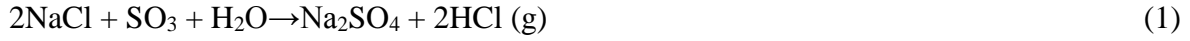
Kalitesiz yakıt kullanımı veya servis koşullarından kaynaklanan durumlar nedeniyle yukarıda verilen korozyon mekanizmalarının gerçekleşmesi, üst tabakanın bütünlüğünü bozarak hasara neden olmaktadır (Jones, 1997).



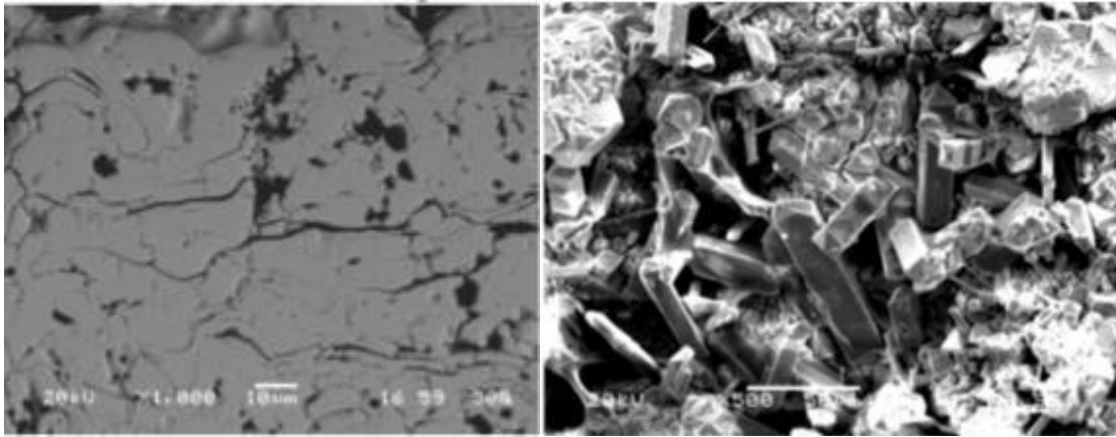
Şekil 18: TBC'lerde sıcak korozyon davranışının şematik olarak gösterimi (Jones, 1997).

Şekil 18' de gösterildiği gibi yüksek sıcaklıklarda meydana gelen sıcak korozyon olayı gaz türbinlerindeki türbin bıçakları ve vanalarının çalışma koşulları altında farklı türlerde sıcak korozyonlara uğramasına neden olur (Mouritz, 2012). Sıcak korozyonun oluşması metal yüzeyinde yüksek sıcaklıkta ergimiş olan tuzların birikmesiyle başlar. Çoğunlukla,  $SO_3$  ve  $NaCl$  reaksiyonunun ardından kaplama yüzeyinde  $Na_2SO_4$  tuzu birikmesi ile sıcak korozyon olayı meydana gelmektedir (Landolt, 2007). Eşitlik 1 ve 2 denklemlerine göre reaksiyonlar yüksek sıcaklıklarda ilerlemektedir.





Denklemlerde sodyum klorür tuzu ile kükürt oksitlerin reaksiyona girmesi sonucu sodyum sülfat oluşumunun ardından kaplanan malzeme yüzeyine birikmesine neden olur. Sodyum sülfatın ergime sıcaklığı ise yaklaşık 884 °C'dir (Jones, 1997). Yani sıcaklığın artmaya devam etmesiyle birlikte sodyum sülfatında ergiyerek kaplama yüzeyindeki porozitelerden iç kısımlara inmesine neden olur. Sıvı haldeki tuzların iyonik ergiyik olmasından dolayı iç kısımlara inen ergiyikler ile metal arasında elektro-kimyasal reaksiyonlar meydana gelmektedir. Nikel içerikli altlık metalin oksidasyonu anodik olduğu için ve yaklaşık 700 °C'lerde meydana geldiğinden altlık ve bağ kaplama açısından ciddi hasarlar oluşabilmektedir (Bose, 2007).



Şekil 19: Plazma sprey kaplama tekniğiyle kaplanmış (a) YSZ seramik tabakanın mikroyapı görüntüsü, (b) 75 saat 900 °C sıcak korozyon testi sonrası YSZ kaplamaların üst yüzey SEM görüntüsü (Altuncu vd., 2008).

#### 2.4.3.1 Sıcak Korozyon Çeşitleri

Sıcak korozyon  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NaCl}$  ve  $\text{V}_2\text{O}_5$  tuzlarının varlığından kaynaklanan korozyon türü olarak da tanımlanabilir. Bu tuzların ayrı ayrı varlığı veya kompozisyon olarak ortamda bulunması da yüksek sıcaklıklarda korozyona sebep olabilir. Sıcak korozyon hasar mekanizması oluşma sıcaklığına ve türüne göre 2'ye ayrılır. Tip I yüksek sıcaklıkta olan sıcak korozyon, Tip II düşük sıcaklıkta olan sıcak korozyondur. Bu iki tip sıcak korozyonun gelişimini alaşım kompozisyonu ve termo-mekaniksel durum, kirletici kompozisyonu, akı

hızı, sıcaklık ve sıcaklık çevrimi, gaz kompozisyonu ve hızı ve erozyon gibi çeşitli parametreler etkileyebilir (Eliaz vd., 2002).

### ***Tip I Sıcak Korozyon (Yüksek Sıcaklık Sıcak Korozyonu)***

Bu tip sıcak korozyon esasen 850-950 °C sıcaklıklar arasında gözlemlenir. Yüksek sıcaklık sıcak korozyonu parçaların üst yüzeyinde alkali metallerin ergimesiyle başlar. Bir dizi kimyasal reaksiyonlar meydana gelir, ilk olarak reaksiyonlar koruyucu oksit film tabakası olan altlık malzeme elementlerinden kromda meydana gelir. Kromun tükenmesiyle birlikte esas malzemenin oksidasyonu başlar ve poroziteli skala şekil almaya başlar. Yüksek sıcaklık korozyonunda baskın tuz yüksek termo dinamik stabilitesinden dolayı  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 'tür. Sodyumun en önemli kaynağı deniz atmosferidir (deniz tuzları  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NaCl}$  içerir), fakat sodyum endüstriyel atmosferik kirlilikte ve volkanik dış atımlarda da tıpkı yakıtlarda bulunabileceği gibi bulunur. Yanma esnasında, sodyum sülfat sodyum ve sülfürün reaksiyonu sonucu oluşur daha sonra ise yakıtı karıştırır. Havadaki veya yakıtlardaki diğer emrüteler vanadyum, fosfor, kurşun ve kloridler sodyum sülfatla birleşerek daha düşük sıcaklıklarda eriyen tuz karışımlarını oluştururlar. Yani  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  gibi yüksek sıcaklıkta eriyen tuz  $\text{NaCl}$ 'ye dönüşürse erime sıcaklığı 620 °C'ye kadar düşer. Dahası yanma odasında  $\text{NaCl}$  sülfür dioksitle ve oksijenle kendiliğinden reaksiyona girer. Sodyum kloridin varlığının uzaklaştırılması tipik bir sıcak korozyonun kuluçkaya devresidir. Potasyum sülfat ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ ) sodyum sülfata benzer bir şekilde davranabilir. Bu sebepten dolayı sıcak korozyon hasarını tahin edebilmek için ya da belirleyebilmek için yakıtlardaki sodyum ve potasyum içeriğinin tamamının bilinmesi gerekmektedir (Miller, 1997).

Bazı sıvı yakıtlarda ise vanadyum kaçınılmaz bir şekilde mevcuttur. Vanadyum katkılı yakıtlar kullanıldığında parçaların üzeri vanadyumla temas edeceğinden parça yüzeyleri vanadyumla kaplanırlar ve yüksek sıcaklığa maruz kalındığında ise sıcak korozyon olayı meydana gelir. Aşırı derecede agresif vanadyum sıvı fazları hemen hemen yaklaşık 535 °C içerisindeki sodyum ve vanadyum oranına bağlı olarak meydana gelebilir. Vanadyumun göreceli olarak düşük erime sıcaklığına sahip olması karışım içerisindeki sodyum sülfat miktarına da bağlıdır (Eliaz vd., 2002).

Yüksek sıcaklık sıcak korozyonu başlamasının ardından devam eden süreç içerisinde dört bölüme ayrılabilir:

Bölüm 1: Yüzey pürüzlülüğünün az olması oksit tabakasında bazı büyümelere ve lokal olarak kırılmalara sebep olur. Bu bölümde ne krom tükenmesi nede mekanik bütünlüğün bozulması gözlenmez.

Bölüm 2: Oksit tabakası bölgesel kırılmalar devam ederken yüzey pürüzlülüğü daha belirgin olmaya başlar. Krom tükenmeye başlarken aksine mekanik bütünlükte herhangi bir değişim gözlenmez.

Bölüm 3: Esas malzemelerin oksidasyonu ciddi kritik derinliğe iner. Bu durum türbin bıçaklarında tehlike arz ettiğinden parçalar kullanımdan kaldırılmalıdır.

Bölüm 4: Oldukça büyük hasar bu kısımda meydana gelebilir. Yüksek derecede korozyona maruz kalmış geri dönüşü bu bölümden sonra artık mümkün değildir. Daha fazla hasara maruz kalmamak için parçaların kesinlikle bu kademedden sonra kullanılmaması gerekmektedir.

Yüksek sıcaklık sıcak korozyonunda genellikle makroskobik olarak hasarı belirlemek mümkün olabilmektedir. Sıcak korozyon oluştuğunda metalde soyulmalar ve nikel oksit oluşumundan dolayı metalde gri renk tonunun değişmesi söz konusudur (Eliaz vd., 2002).

### ***Tip II Sıcak Korozyon (Düşük Sıcaklık Sıcak Korozyonu)***

Sıcak korozyonun bu şekli çoğunlukla 650 °C ile 800 °C arasında gözlemlenir. Düşük sıcaklık sıcak korozyonu  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ve  $\text{CoSO}_4$  karışımının ötektik ergime sıcaklığı olan 540 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda tipik bir karıncalanma (pitting) korozyonu şeklinde meydana gelir.  $\text{CoSO}_4$  ise, kendiliğinden kobalt bazlı alaşımlardan yapılmış olan kanatçıkların yüzeyi yanma gazlarından gelen  $\text{SO}_3$  arasında oluşmuş olan reaksiyonun korozyon ürünüdür. Benzer bir şekilde  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ - $\text{NiSO}_4$  ötektiklerinin dönüşümü nikel bazlı süper alaşımlarda meydana gelir. Bu yüzden gaz fazı içerisindeki  $\text{SO}_3$ 'ün kısmi gaz basıncı, meydana gelecek olan düşük sıcaklık sıcak korozyonu ile yüksek sıcaklık sıcak korozyonunu kıyaslamak için dikkate alınmalıdır. Lokalleştirilmiş atakların doğası, lokal klorid atağı, termal çevrim veya erozyonların bir sonucu olarak lokalleşmiş skalaların hasarları ile ilişkilendirilir. Örneğin, tuz lokal bir şekilde oyuk içerisinde hapsolarak lokal bir çatlak oluşturabilir. Bazı kaplamalarda tuz kompozisyonunda lokal değişimler söz konusudur. Tip I sıcak

korozyonunun aksine Tip II sıcak korozyonunda ne kuluçkaya evresinde nede mikroskobik sülfidasyonun ve kromun tükenmesi genellikle görülmez (Eliaz vd., 2002).

## BÖLÜM 3

### MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1 Amaç

Yapılan deneysel çalışmada, Inconel-718 nikel esaslı süper alaşım altlık malzeme üzerine CoNiCrAlY (Sulzer Metco, Amdry 9951, 5-37  $\mu\text{m}$ ) metal tozları ile CGDS yöntemi kullanılarak metalik bağ üretimi gerçekleştirilmiştir. Uygulanan metalik bağ yaklaşık 100  $\mu\text{m}$  kalınlığındadır. Bağ kaplama işleminin ardından numunelerin üst yüzeyi  $\text{ZrO}_2 + 8\% \text{Y}_2\text{O}_3$  (YSZ) (GTV, -45+20  $\mu\text{m}$ ) seramik esaslı tozlar ile yaklaşık 300  $\mu\text{m}$  kalınlığında iki numuneden biri APS diğeri ise EB-BVD yöntemleriyle kaplanmıştır. Üst kaplama işleminin ardından üretilmiş olan bu TBC numuneleri 1000  $^\circ\text{C}$ 'de 4'er saatlik çevrimler ile her çevrimin ardından  $\text{NaSO}_4 + \text{V}_2\text{O}_5$  toz karışımları numune yüzeyine serpilerek sıcak korozyon testine tabi tutulmuştur. Test öncesinde, sonrasında ve test sırasında yapılan karakterizasyon çalışmaları neticesinde numunelerde değişen faz yapıları incelenerek literatür ile karşılaştırılıp değişen fazların neden oluştuğuna dair yorumlar yapılmış ve XRD, EDS, elementel haritalama analizleri ile desteklenmiştir.

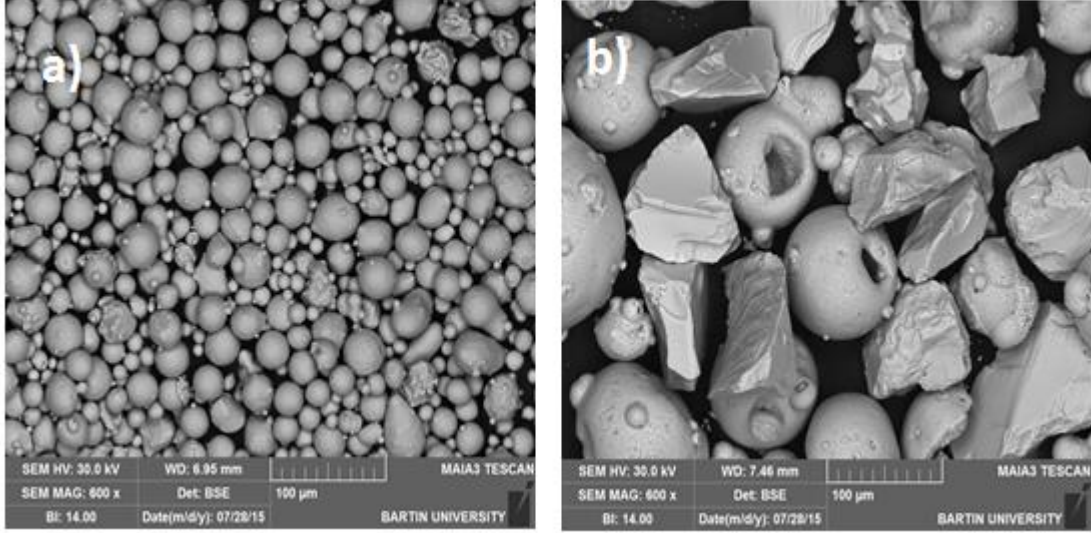
#### 3.2 Toz ve Altlık Malzemelerin Karakterizasyonu

Altlık malzeme olarak süper alaşım malzeme olan Ni esaslı Inconel-718 seçilmiştir. Bağ kaplama tabakası olarak Sulzer Metco firması tarafından üretilmiş CoNiCrAlY tozları kullanılmıştır. Üst kaplamada ise YSZ ( $\text{ZrO}_2 + 8\% \text{Y}_2\text{O}_3$ ) tozları kullanılmıştır. Bağ kaplama toz boyutları 5-37  $\mu\text{m}$ , üst kaplama toz boyutları ise 20-45  $\mu\text{m}$  arasında değişmektedir.

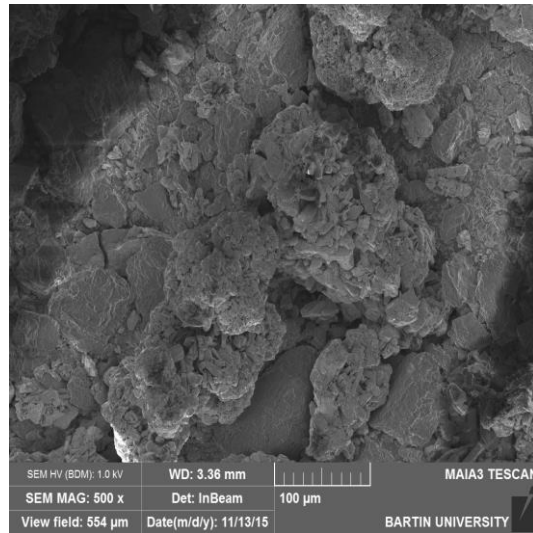
##### 3.2.1 Toz Malzemelerin Mikroyapısal İncelenmesi

Deneysel çalışmada kullanılan tozların mikroyapısal karakterizasyonu MAIA3 TESCAN SEM cihazı kullanılarak görüntüler elde edilmiştir. Inconel-718 altlık üzerine kaplanan bağ kaplama tozlarının mikroyapısı şekil 20a 600x olarak verilmiştir. Tozların küresel boyutta olduğu ve aralıklarının çok sık olduğu yapılan inceleme sonucu görülmüştür. Bağ kaplamanın üstüne kaplanan YSZ tozunun da SEM görüntüleri aynı şekilde 600x olarak

Şekil 20b verilmiştir. Şekilden de anlaşıldığı gibi üst kaplama tozları bağ kaplama tozlarına göre daha düzlemsel olduğu ancak küreselliğini ise tam olarak kaybetmediği görülmektedir. Şekil 21’de ise sıcak korozyon testi esnasında numune yüzeyine serpilmiş olan %50 NaSO<sub>4</sub>, %50 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> toz karışımının görüntüsüdür. 500x’lik büyütmede verilen toz karışımları kaplama tozlarının aksine belirgin bir boyut özelliğine mevcut değildir. Ancak küresel şekilden ziyade sıcak korozyon testi toz karışımı genellikle düzlemsel şekillere sahiptir.



Şekil 20: Kaplama tozları ve sıcak korozyon testinde kullanılan tozların mikroyapısal görüntüleri (a) CoNiCrAlY, (b) ZrO<sub>2</sub>-%8Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.



Şekil 21: Sıcak korozyon testinde kullanılan %50 NaSO<sub>4</sub>+ %50 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> toz karışımı.

### 3.2.2 Altlık Malzemenin Kimyasal Bileşimi ve Özellikleri

Deneyler için kullanılan Inconel-718 korozyona karşı dirençli oldukça yüksek sertlik ile çok iyi kaynak yapılabilme özelliğine sahiptir. Aynı zamanda Inconel-718 alaşımı çatlamalara karşı da dayanıklı bir malzemedir. Bu alaşım çökeltme sertleşmesi sonucu sertleşebilen nikel-krom alaşımlarındandır. Tablo 1 'de gösterildiği gibi Inconel-718'in içeriğinde önemli miktarlarda niyobyum ve molibden ile birlikte az miktarlarda alüminyum ve titanyum yer almaktadır. Inconel-718 1100 °C'ye kadar mükemmel sürünme mukavemetine sahip olduğundan dolayı gaz türbinleri, roket motorları, nükleer reaktörler ve uzay araçlarında kullanım için tercih edildiğinden deneyler için test numunelerinde altlık malzeme olarak tercih edilmiştir.

Tablo 2: Ni esaslı süper alaşım Inconel 718 Malzemenin Fiziksel Özellikleri (Çay ve Ozan, 2005).

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

Tablo 3: Ni esaslı süper alaşım Inconel 718 Malzemenin Mekanik Özellikleri (Çay ve Ozan, 2005).

Test Sıcaklığı		0.2 % Akma Dayanımı		Çekme Dayanımı		Uzama %
°F	°C	ksi	MPa	ksi	MPa	
200	93	170	1172	204	1407	21,0
400	204	163	1124	198	1365	20,0
600	316	159	1096	195	1344	20,0
800	427	156	1076	191	1317	19,0
1000	538	155	1069	185	1276	18,0
1200	649	149	1027	168	1158	19,0
1400	760	110	758	110	758	27,0

Inconel-718 alaşımı oldukça yumuşak bir yapıya sahiptir ve birçok şekillendirme türleriyle oldukça rahat bir şekilde şekillendirilebilir. Bu alaşım türü tipik çeliklerle kıyaslandığında daha mukavemetli olmasından dolayı çeliklere göre daha güçlü şekillendirme araçlarının olması gereklidir. Fiziksel ve mekaniksel zellikleri Tablo 2 ve 3'te gösterildiği gibidir. Alaşımın soğuk şekillendirilmesinde ağır yağlar kullanılır. Genellikle birçok kaynak türü bu alaşım için uygundur. Fakat kaynak sırasında elektrot kullanımı gereklidir. Eğer elektrot temin edilemiyorsa alaşım elementi olan Ni, Co, Cr veya Mo kullanımı uygundur. Kaynak yzelerinin n ısıtılmasına gerek yoktur ancak yüzeyin temiz olmasına dikkat edilmelidir. Piyasada roll bar şeklinde bulunmaktadır. Roll bar şeklindeki numuneler tel erozyonla kesilerek deney düzeneği için hazır hale getirilmeye çalışılmaktadır. Silindirik haldeki Inconel-718 numunesi yaklaşık 25,4 mm çapa sahip deney düzeneği için yaklaşık 5'er mm'lik kalınlıklar halinde disk şeklinde fazla miktarda ısıl işleme maruz kalmaması için klasik kesme yöntemlerinden ziyade tel erozyonla kesilerek kullanıma hazır hale getirilir.

### **3.3 Bağ Kaplamanın retilmesi**

Bağ kaplama işlemine geçilmeden önce altlık malzeme yüzeyinde olması istenmeyen oksit, yağ, kir ve kalıntılar kaplama yapışmasını olumsuz yönde etkileyeceğinden dolayı bu safsızlıkların uzaklaştırılması için numuneler kumlama işlemine tabi tutulur. Yaklaşık 8-12 cm arasındaki bir mesafeden 75°'lik açı yapılarak 2,5 bar basınç altında 60 mesh boyutlarındaki Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozları püskürtülerek kumlama işlemi yapılmıştır. Bu işlemin ardından ve kaplama işleminin hemen öncesinde ise altlıklar etil alkol içerisine koyularak ultrasonik temizleme işlemine tabi tutulmaktadır. Kumlama ve temizleme işlemlerinin ardından kaplanmaya hazır hale gelen numuneler CGDS yöntemiyle bağ kaplama için kullanılacak olan, 5-37 m boyutlarındaki CoNiCrAlY, Amdry 9951, (Sulzer Metco) tozu Plazma Giken firması tarafından altlık malzeme yüzeyine kaplanmıştır. Bağ kaplama işlemi zellikleri Tablo 4'te ayrıntılı olarak verilmiştir.



Tablo 4: CGDS yöntemiyle bağ kaplama işlemi.

Kaplama türü	Sprey tabancası		Toz Malzeme Özellikleri	
	Yöntem	Firma	Toz firması	Nominal parçacık boyutu
Bağ kaplama	CGDS	Plasma Giken	CoNiCrAlY, Amdry 9951, (Sulzer Metco)	5-37 µm

CGDS yöntemiyle bağ kaplama işleminde sprej basıncı yaklaşık olarak 3 Mpa / 30 bar işlem esnasında kullanılan gazın sıcaklığı yaklaşık olarak 600 °C, kullanılan gaz ise helyum gazıdır. İşlem sürecinde kullanılan tabancadan püskürtülen tozun hızı 20 mm/sn ve sprejin uzaklığı ise 15 mm'dir. Tablo 5'te CGDS yöntemiyle bağ kaplama parametreleri ayrıntılı olarak verilmiştir.

Tablo 5: CGDS yöntemiyle bağ kaplama işlemindeki parametreler.

CGDS Çalışma Parametreleri				
Sprey Basıncı	Gaz Sıcaklığı	Çalışma Gazı	Sprey Uzaklığı	Tabanca Hızı
3 Mpa / 30 bar	600 °C	Helyum (1000 slpm)	15 mm	20 mm/sn

### 3.4 Altlık Malzemenin ve Bağ Kaplamanın Sertlik Değerlerinin Ölçülmesi

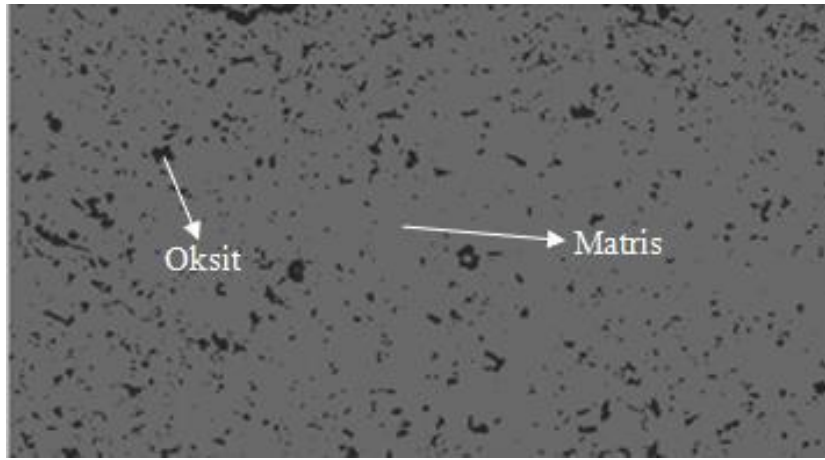
Micro-Duromat 400E PolivarMet optik mikroskobu kullanılarak Vickers standart ucuyla 50N'luk yükte sabit yükleme hızında numunelerin sertlik değerleri ölçülmüştür. Tablo 6'da bu değerler ayrıntılı olarak verilmiştir. Sertlik değerleri ölçümleri ilk olarak kaplama işlemine başlanmadan önce altlık malzeme yüzeyinden farklı noktalardan alınan değerlerin ortalaması alınarak belirlenmesinin ardından sırasıyla bağ kaplama ve üst kaplama işlem kademelerinden sonra ölçülerek belirlenmiştir.

Tablo 6: Altlık malzemenin ve bağ kaplamanın sertlik değerleri.

Malzeme	Sertlik Değeri (Hv)
Inconel-718	203,9
CoNiCrAlY Bağ Kaplama (CGDS yöntemiyle)	407,9

### 3.5 Bağ Kiplamaların Porozite Değerlerinin Öluğmesi

Bağ kaplama işleminin ardından yaklaşık olarak 100 µm olarak kaplanan metalik bağ kaplamaların porozite ölçümleri Image J bilgisayar programı yardımıyla matris ve porozite renklerindeki farkların tanıtılması sonucunda hesaplanmıştır. Numunelerin bağ kaplamalarının farklı bölgelerinden beş adet görüntü alınarak, her bir görüntünün porozite değerleri elde edilmiştir. Tüm değerlerin ortalaması alınarak verilere eklenmiştir. Temsili olarak oksit ve matrisi gösteren bir görüntü Şekil 22’de verilmiştir. Öluğlen bu değerlere göre porozite yüzdesi yaklaşık olarak 1,3 (± 1,0) değerindedir.



Şekil 22: Bağ kaplamanın porozite ölçümü esnasında kullanılan görüntülerin temsili bir görüntü (Döleker, 2015).

### 3.6 Bağ Kiplamanın ve Altlık Malzemenin Yüzey Pürüzlülük Değerlerinin Öluğmesi

Metalik bağ kaplamanın ve altlık malzeme Inconel-718’in yüzey pürüzlülüğü DIN EN ISO 3274 standartlarına göre, SJ-310 Mitutoyo marka test cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Öluğüm esnasında numune yüzeyinden her bir değer için en az 5 farklı ölçüm yapılmış ve bu ölçümlerin aritmetik olarak ortalaması alındıktan sonra pürüzlülük değerleri tesbit edilmiştir. Şekil 23’te test cihazının çalıştığı andaki görüntüsü verilmiştir. CGDS yöntemiyle üretilmiş olan metalik bağ kaplama ve altlık Inconel-718 malzemenin ölçülmüş olan ortalama pürüzlülük değerleri Tablo 7’de ayrıntılı olarak gösterilmiştir.



Şekil 23: Pürüzlülük ölçüm test cihazının şematik gösterimi SJ-310 Mitutoyo marka yüzey pürüzlülük ölçüm cihazının gösterimi (Meşekıran, 2015).

Tablo 7: CGDS yöntemiyle üretilmiş olan metalik bağ kaplamanın ve altlık inconel-718'in pürüzlülük değerleri.

Altık ve Kaplama	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Rz ( $\mu\text{m}$ )
Inconel-718 altık	5,38	29,85
CGDS bağ kaplama	7,20	37,62

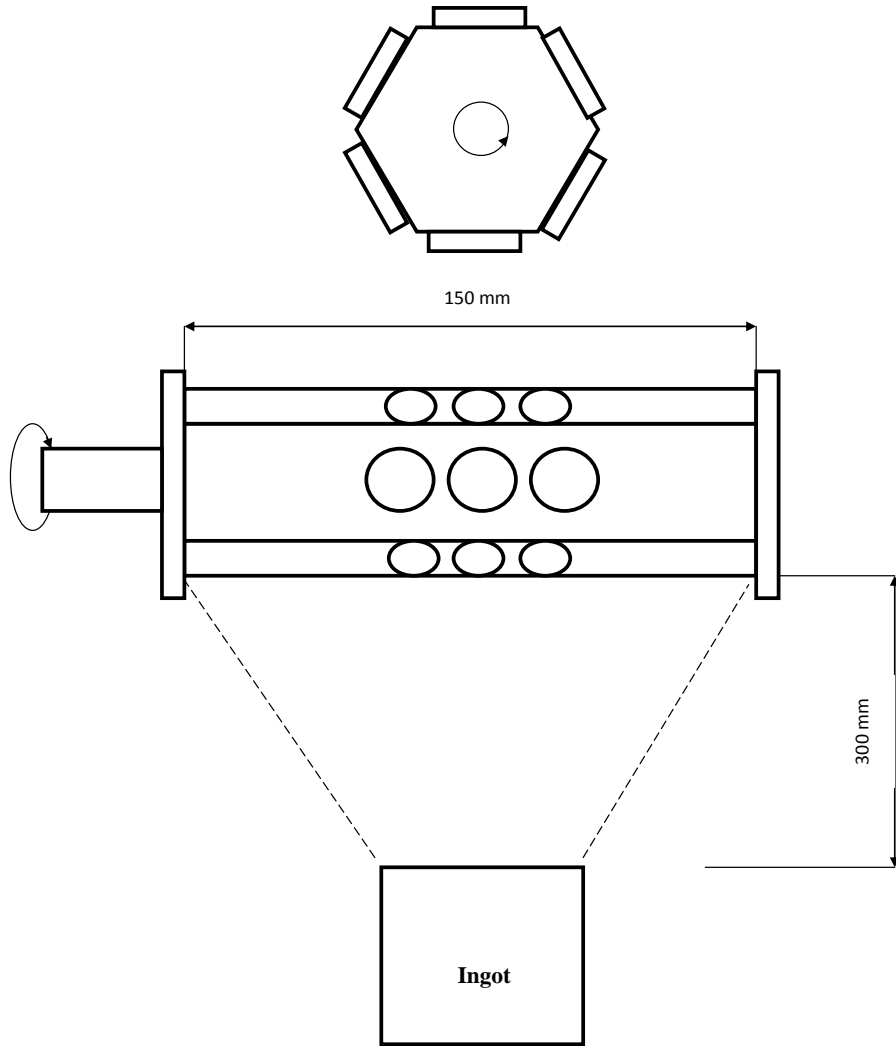
### 3.7 Termal Bariyer Kaplamalara Üst Kaplamanın Uygulanması

CoNiCrAlY içerikli metalik bağ kaplama Ni esaslı süper alaşım altlık malzeme üzerine ortalama 100  $\mu\text{m}$  kalınlığında kaplandıktan sonra termal bariyer kaplamaların üretimine seramik üst kaplamanın uygulanması yapılmıştır. Bu deneysel çalışmada seramik üst kaplama yöntemi olarak EB-PVD ile APS yöntemleri tercih edilerek yaklaşık olarak 300 $\mu\text{m}$  kalınlığında seramik üst kaplama biriktirilmesi yapılmıştır.

#### 3.7.1 EB-PVD Yöntemi İle Seramik Üst Kaplamanın Yapılması

Ünite ana çalışma çemberi, yükleme çemberi ve tabanca çemberinden oluşan fonksiyonel olarak tek bir bloktan yapılmış ve vakum çemberinden dizayn edilmiş bir sistemden oluşmaktadır. Çalışma çemberi temel işlemleri sağlayacak mekanizmalar ve aygıt bağlantıları için flanş ve bağlantı noktalarıyla teçhizatlandırılmıştır. Çalışma çemberi yan duvarı, çalışma çemberi açılmadan numunelerin tekrar yüklenmesine izin veren giriş valfi aracılığı ile yükleme çemberine bağlıdır. Çalışma çemberine bağlı üst duvar olan tabanca çemberine dört elektron ışın tabancası monte edilmiştir. Kaplama ünitesine numuneler yatay olarak yerleştirilmektedir. Şaft yükleme çemberine bağlı vakum girişi içinden geçmektedir. Sıcaklığı görüntülemek için şafttaki oyuk kısım boyunca termokupl yerleştirilmiştir.

Sabitlenmiş şaftın dönme ekseni boyunca çalışma çemberine metal ingotlar için 70 mm çaplı bakır su soğutmalı kroze yerleştirilmiş ve 70 mm yarıçaplı 5 buharlaştırıcı döner tip mekanizmaya seramik ingotlar yerleştirilmiştir. Su soğutma çubukları buharlaştırılacak malzemelerin beslenmesi için dikey olarak buharlaştırıcıların içine yerleştirilir. Buharlaştırıcıların yüzeyinden dönel ekseni şafta kadar ki mesafe 300 mm mesafeye eşittir. Üniteye girmesi için numunelerin bağlandığı düzenek şematik olarak Şekil 24’te gösterilmiştir.

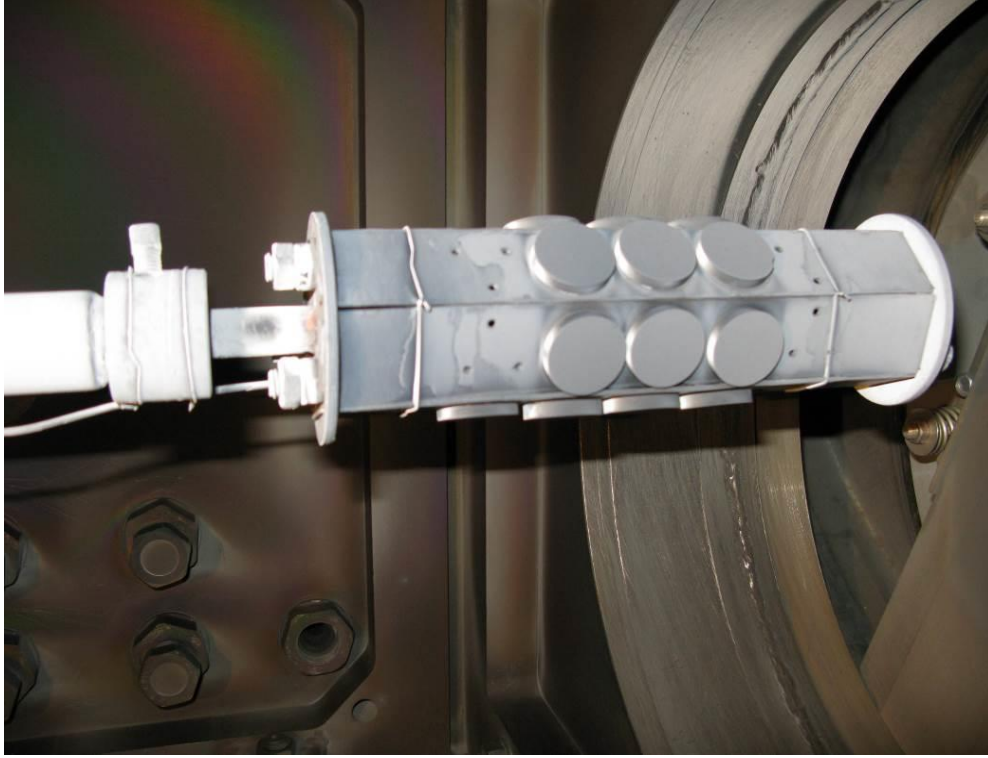


Şekil 24: Numunelerin bağlandığı düzeneğin şematik olarak gösterilmesi.

Yapılacak koruyucu kaplamalar için kullanılan seramik ingot malzemeler 68,5 mm çaplı 40-50 mm arası yüksekliğe sahip yttria ile stabilize edilmiş zirkonya ( $ZrO_2-8wt.\% Y_2O_3$ ) (YSZ) olarak tercih edilmiştir.

Koruyucu kaplamadan önce, 0,5 mm kalınlığında Ni80Cr20 bileşiminin ayaklarından gelen tel, nokta kaynağıyla test numunelerine bağlanmıştır. EB-PVD ünitesinin vakum çemberine test numuneleri yüklenmeden önce, her bir numunenin metal bağ kaplamasının yüzeyi 0,2 bar hava basıncında Al<sub>3</sub>O<sub>3</sub> tozlarıyla (partikül boyutu 40 ± 5 µm) 2 dakika boyunca hava abrasyonuna maruz bırakılmıştır. 60 dakika içinde, hava abrasyon işleminin ardından, hazırlanan numuneler teknolojik fikstürde sabitlenmiştir. Kaplama birikim sürecinin ısı modunu kaydetmek için Chromel-alumel tip termokupllar çalışan numunelerle aynı boyuttaki test numunelerinin içine yerleştirildi.

ZrO<sub>2</sub>8Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, seramik ingotlar EB-PVD ünitesi UE-202'nin Carousel (dönel) tip buharlaştırıcılarının içine yerleştirilmiştir. Sabitleyiciler ile beraber numuneler EB-PVD ünitesinin yükleme çemberindeki dönel su soğutmalı şafta sabitlenmiştir. Pompalamadan sonra, çalışma çemberi, tabanca çemberi ve yükleme çemberi P=5×10<sup>-5</sup> torr'luk çalışma basıncında vakum giriş valfi açıldı, sabitleyicilerle birlikte numuneler yükleme çemberinden çalışma çemberine hareket ettirildi ve ilgili bileşimin seramik ingotlarıyla birlikte carousel mekanizma buharlaştırıcısı üzerine yerleştirildi. Kaplamadan önce numuneler doğrudan, 900 ± 20 °C sıcaklığına elektron ışını ile ısıtıldı. Fikstür ile numunelerin dönme hızı 25 rpm's'ye eşitlendi. Isıtma ve elektron ışını ile birlikte seramik ingotların yüzeylerinin üzerinde sıvı havuzlarının şekillenmesinin ardından, ingotların devam eden buharlaşması dikey besleme sabit hızında gerçekleştirildi. ZrO<sub>2</sub>(8Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)'ün yoğunlaşma oranı 5-6 µm/dk'ya eşitlendi. Seramik koruyucu kaplama birikimi 800±20 °C sıcaklığında yapıldı. Kaplama süreci, seramik ingotun set uzunluğunun buharlaşmasının ardından kesildi. ZrO<sub>2</sub>(8Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) bileşiminde kaplamanın yapılmasının ardından buharlaşma ve ısıtma elektron tabancaları kapatıldı. Fikstür ile numuneler yükleme çemberinin içine hareket ettirildi ve vakum giriş valfi kapatıldı. Kaplamadan sonra fikstür ile numunelerin görünümü Şekil 25'te gösterildi. Numuneler 100 °C altına soğutulduktan sonra fikstür ile numuneler şafttan uzaklaştırıldı.



Şekil 25: Kaplamadan sonra fikstür ile numunelerin görünümü.

Kaplama işleminin ardından elde edilen numunelerde sertlik değerleri ölçülmüştür. Sertlik dış seramik kaplamanın üç bölgesinden ölçüldü: altlığa yakın yerden (alt bölge), orta bölgeden (ortada) ve seramik kaplama yüzeyi yakınından (üst). Ölçülen her üç değerın ortalaması alınarak EB-PVD yöntemiyle üretilen üst kaplamanın sertlik değeri belirlendi. Belirlenen bu değer yaklaşık olarak 713,8 Hardnes vickers (Hv)'dir.

### 3.7.2 APS Yöntemi İle Seramik Üst Kaplamanın Yapılması

Inconel-718 süper alaşım altlık malzemenin üzerine CGDS yöntemiyle 100 µm kalınlığında CoNiCrAlY içerikli metalik bağ kaplanmış numuneler F6-GTV marka APS cihazı kullanılarak yaklaşık 300µm kalınlığında YSZ üst kaplama yapılarak TBC numuneleri oluşturulmuştur. Tablo 8'de CGDS yöntemiyle bağ kaplaması üretilmiş olan TBC numunesinin üst kaplamasında kullanılan APS yönteminin parametreleri verilmiştir. Gaz akış oranı, toz besleme oranı ve tabanca mesafesi, YSZ' nin daha yüksek ergime sıcaklığına sahip olması ve yapışma kabiliyetinin metalik kaplamaya göre daha düşük olmasından dolayı daha yüksek değerler seçilerek uygulanmıştır. APS yöntemi kullanılarak üretilmiş olan TBC numunelerinin üst kaplama sertlik değeri yaklaşık olarak 708 Hv olarak ölçülmüştür.

Tablo 8: APS üst kaplama üretiminde kullanılan parametreler.

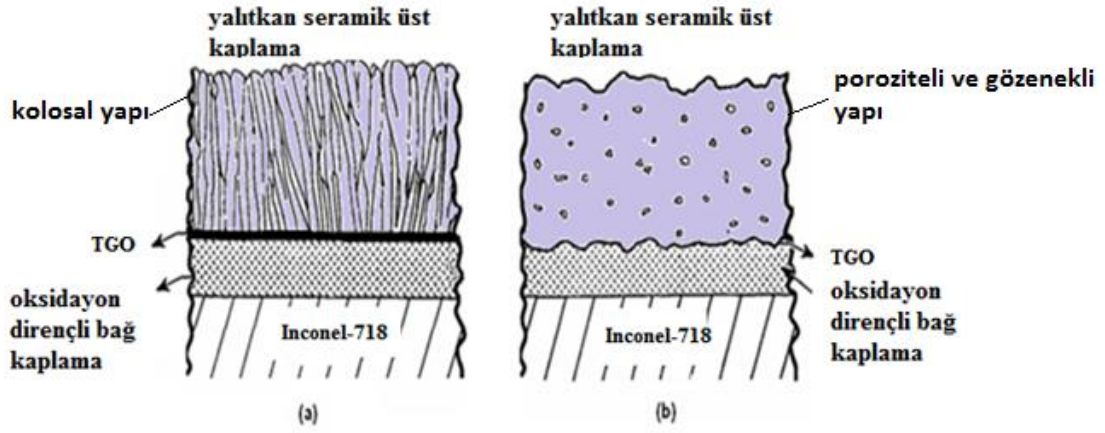
<b>APS YSZ Üst Kaplama</b>		
<b>Ark akımı</b> 630 A	<b>Elektrik gücü</b> 40 kW	<b>Argon akış oranı</b> 44 slpm
<b>Hidrojen Akış Oranı</b> 13 slpm	<b>Toz Besleme Oranı</b> 25 g/dk	<b>Tabanca Mesafesi</b> 90 mm



Şekil 26: Deneysel çalışmada kullanılan APS yöntemiyle kaplanmış YSZ üst seramik kaplama tabakasına sahip numunelerin gösterimi.

### 3.8 Termal Bariyer Kaplamaların Sıcak Korozyon Testlerinin Yapılması

Inconel-718 süper alaşım altlık malzeme üzerine CGDS yöntemiyle yaklaşık olarak 100  $\mu$ m kalınlığında CoNiCrAlY içerikli metalik bağ kaplanmış numuneler farklı yöntem ve aynı içeriğe sahip seramik üst kaplamalar ile yaklaşık 300  $\mu$ m olarak kaplanmıştır. Bu deneysel çalışmada APS ve EB-PVD yöntemi ile üst kaplamaları üretilmiş TBC numuneleri sıcak korozyon testine tabi tutulmuştur. Bu iki yöntem ile üretilen TBC numunelerinin şematik olarak gösterimi Şekil 27'de verilmiştir.

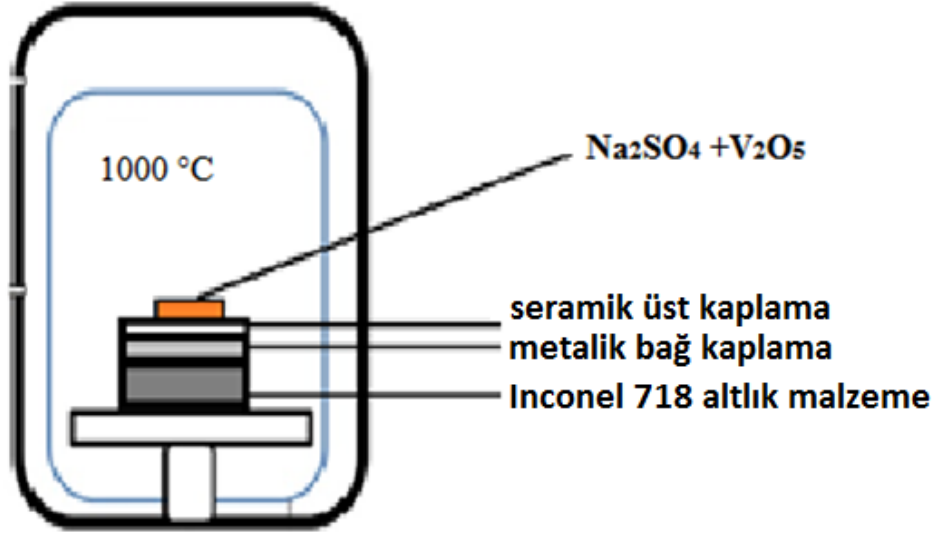


Şekil 27: EB-PVD ve APS yöntemiyle üst kaplaması gerçekleştirilmiş TBC numunelerinin şematik gösterimi (a) EB-PVD, (b) APS (Jones,1997).

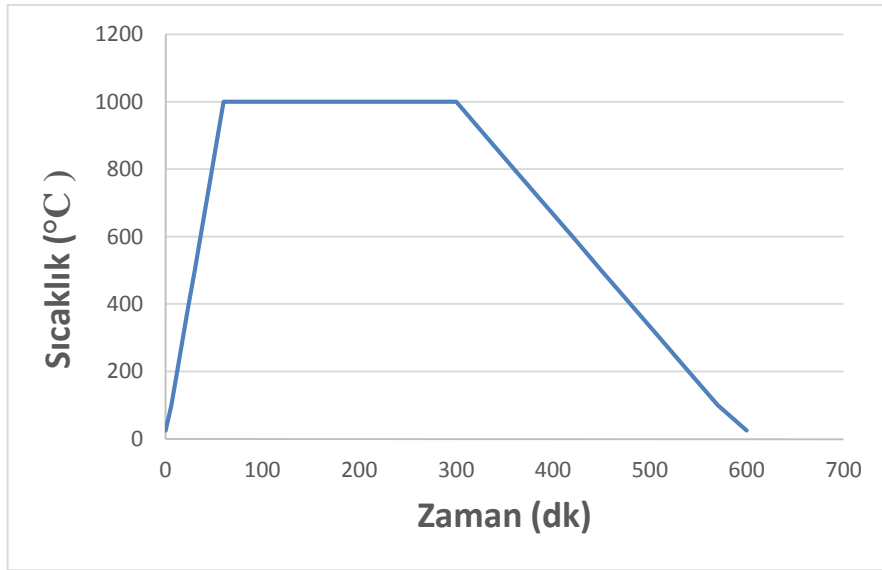
Sıcak korozyon testi için Merck marka yaklaşık %99'luk saflığa sahip sodyum sülfat tuzu ile ACROS ORGANİCS marka yaklaşık %98'lik saflığa sahip vanadyum oksit tozlarının karışımı numunelerin yüzeylerine serpilerek Protherm marka yüksek sıcaklık fırınına 1000 °C'de 4'er saatlik çevrimler için verilir. Yüksek sıcaklık fırını herhangi bir vakum ortamında değil atmosfere açık bir ortamda çalışmaktadır. Sıcak korozyon testi şematik olarak Şekil 28'de gösterilmiştir. Tıpkı şekilde gösterildiği gibi korozyon tozları numunenin tam olarak kenar kısmına koyulmaz. Bunun sebebi ise numunelerde yüksek sıcaklıkta oluşabilecek kenar etkisinin önüne geçebilmek içindir. Fırın içerisine konan numuneler fırında 4 saat boyunca 1000 °C'de bekletilerek sıcak korozyon testinin bir çevrimi tamamlanır. Şekil 29'da ise sıcak korozyon testinde kullanılan fırının çalışma sıcaklığı ile süresi arasındaki grafik temsili olarak gösterilmiştir. Grafikte gösterildiği gibi fırının ısınarak 1000 °C'ye çıkması ve bu sıcaklıkta 4 saat bekleme süresinin yanı sıra fırının soğuması ve oda sıcaklığına düşmesi içinde belli bir süre beklenilmesi gerekmektedir. Fırının çalışması esnasında geçen bu sürelerin toplam değeri ise yaklaşık olarak 10 saati bulmaktadır. Sıcak korozyon testine numune yüzeyindeki kaplamalar bozuluncaya kadar devam edilmiştir. Her çevrim sonu ve başlangıcında numuneler çıplak gözle incelenerek makro düzeyde fotoğrafları çekilip tekrar fırına verilmiştir. Bu deneysel çalışmada numunelerin bozulma kriteri olarak kaplamadaki bozulmanın yaklaşık %40'ı bulunduğu durumlarda sıcak korozyon testine son verilerek numunelerin karakterizasyon işlemlerine geçilmiştir. APS yöntemiyle üst kaplaması üretilmiş ve oldukça porozite ve gözenekli yapıya sahip olan TBC numunesi 12 saatlik sıcak korozyon testinden sonra bozulma kriteri olan %40'a ulaşırken üst kaplaması EB-PVD ile üretilmiş olan TBC numunesi 20 saate kadar dayanmıştır.



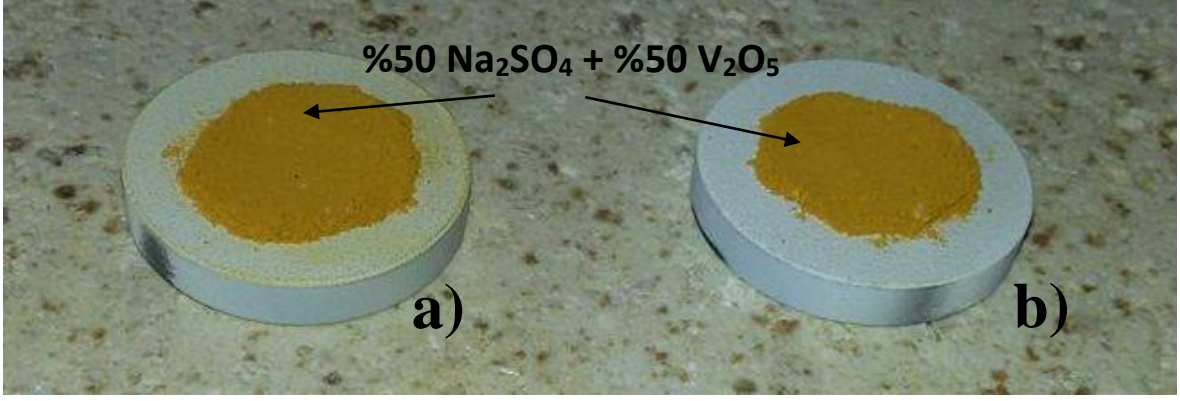
## Yüksek Sıcaklık Fırını



Şekil 28: Sıcak korozyon testinin fırın içerisindeki konumunun şematik gösterilmesi.



Şekil 29: Sıcak korozyon testinde kullanılan çalışma çevrimi.

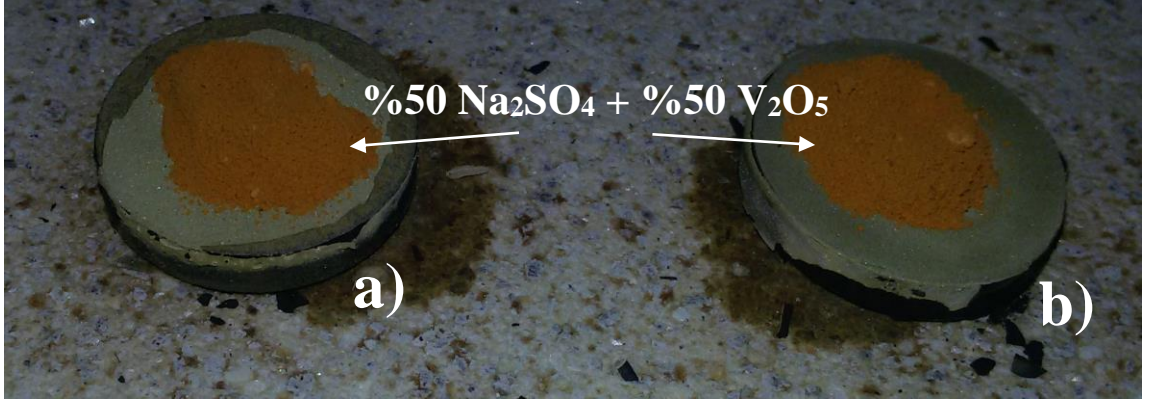


Şekil 30: Sıcak korozyon testi öncesi fırına verilmek üzere hazır hale getirilmiş TBC numuneleri (a) APS üst kaplamalı, (b) EB-PVD üst kaplamalı.

Şekil 30'da gösterildiği gibi numuneler ateş tuğlasından yapılmış yüksek sıcaklıklara dayanıklı kroze üzerine koyulmuştur. Literatür araştırmaları neticesinde ise sıcak korozyon testi için numune yüzeyine hangi tozdan ne kadar koyulacağına karar verilmiştir. Sıcak korozyon testi için bu deneysel çalışmada %50 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + %50 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> toz karışımından 10 mg/cm<sup>2</sup> miktarında konulmasına karar verilmiştir. Numune çapı 1 inç yani yaklaşık 2,5 cm olduğundan dolayı numune yüzey alanı hesaplanarak numune yüzeyin kenar etkisi oluşturabilecek alan da hesaba katılarak şekilden de görüldüğü gibi numunelerin kenar etkisi göstermemesi için üzerine serpilmiş tozlar kenar kısımdan daha içeriye doğru malzeme yüzeyine serpilmiştir. Yaklaşık olarak 30 mg toz karışımıyla birlikte şekil 30'daki gibi hazırlanan numuneler daha sonra ise fırına verilmiştir.



Şekil 31: 1000 °C'de 4 saatlik çevrim sonucunda fırından çıkan numuneler (a) APS üst kaplamalı, (b) EB-PVD üst kaplamalı.



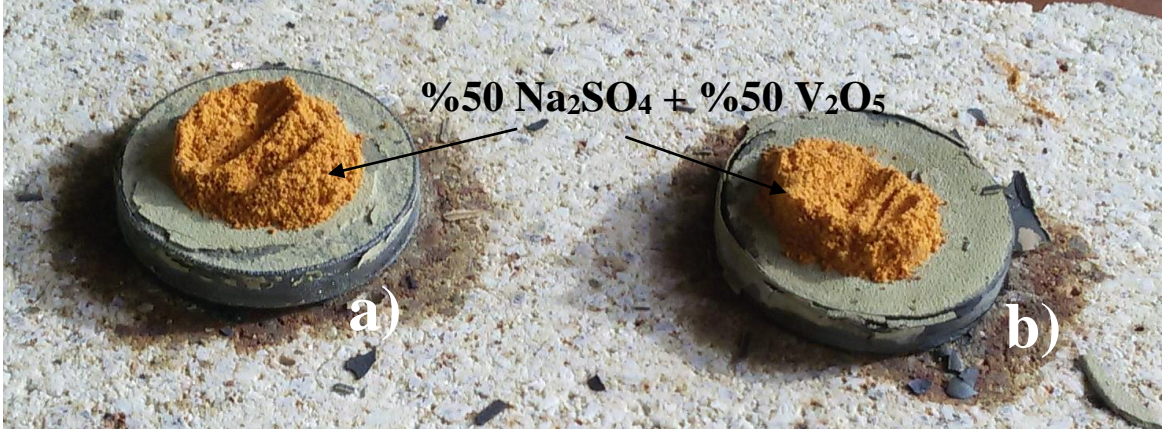
Şekil 32: 4 Saatlik çevrimin ardından diğer çevrim için fırına verilmek üzere hazır duruma gelen numuneler (a) APS üst kaplamalı, (b) EB-PVD üst kaplamalı.

Şekil 30,31 ve 32'den de görüldüğü gibi sıcak korozyon sonrasında kaplama yüzeylerinde bozulmalar, dökülmeler meydana gelmeye başlamaktadır. Bu bozulma veya dökülme oranı yüzdesi 40'i geçtikten sonra sıcak korozyon çevrimlerine son verildi ve bu süreç APS yöntemiyle üretilen numune için yaklaşık 12 saat yani 3 çevrim sürdü. Diğer EB-PVD ile üretilmiş olan numune de ise bu süreç 20 saat sürmüştür. Daha sonra ise karakterizasyon işlemlerine geçildi.



Şekil 33: 1000 °C'de 8 saatlik çevrim sonucunda fırından çıkan numuneler (a) APS üst kaplamalı, (b) EB-PVD üst kaplamalı.

Şekil 33'te 8 saatlik sıcak korozyon testinin ardından fırından çıkan numuneler gösterilmektedir. Şekil 34'te ise fırından 8 saat sıcak korozyon testi yapılmış ve daha sonrasında diğer çevrim için fırına verilmek üzere yüzeyine sıcak korozyon testi için toz serpilmiş numunelerin görüntüsü verilmiştir. Şekil 35'te de 12 saatlik sıcak korozyon testinden sonra dökülmelerin meydana geldiği numune görüntüleri verilmiştir.



Şekil 34: 8 saatlik çevrimin ardından diğer çevrim için fırına verilmek üzere hazır duruma gelen numuneler (a) APS Üst Kaplamalı, (b) EB-PVD Üst Kaplamalı.



Şekil 35: 1000 °C'de 12 saatlik çevrim sonucunda fırından çıkan numuneler (a) APS üst kaplamalı, (b) EB-PVD üst kaplamalı.

### 3.9 Termal Bariyer Kaplamaların Sıcak Korozyon Testi Öncesi ve Sonrası Karakterizasyonu

Sıcak korozyon testinden önce bir takım analizleri yapılmış olan numuneler sıcak korozyon testinden sonra da bazı analizlere tabi tutuldu. Sıcak korozyon testinden sonra kesit görüntüsü almak için numunelerin ufak bir kısmı ilk olarak bakalit kalıbına sığabilmesi ve kolaylıkla işleme tabi tutulabilmesi için hassas kesme cihazı yardımıyla kesilmiştir. Kesilen numune parçaları oldukça hassas olduğu için sıcak bakalite alınmasından ziyade soğuk bakalite alınması daha uygun olduğu düşünülerek epoksi reçine ve sertleştiricisi yardımıyla soğuk bakalit kalıbı içerisine konan numuneler ayrı ayrı olarak soğuk bakalit kalıbı içerisinde zımparalama ve parlatma aşamaları için kalıba alınmıştır. Soğuk bakalite alınan

numuneler yarım saatlik sürenin ardından bakalitin sertleşmesiyle birlikte bakalit kalıbından çıkartılarak zımparalama ve parlatma aşamalarına geçilmiştir. Zımparalama aşamasında, numuneler sırasıyla 60, 80, 120, 180, 240, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200 ve 2000 mesh'lik SiC zımpara diskleri kullanılarak zımparalama işlemi gerçekleştirilmiştir. İşlem sırasında her bir zımpara diski yaklaşık 4 dakika numune yüzeyini zımparalamıştır. Zımparalama işlemi sulu ortamda yapılmıştır. Sulu olmasının sebebi ise zımparadan kopan parçacıkların ve bakalitten gelen parçacıkların numune yüzeyine zarar vermemesinin yanında numunenin sürtünmeden kaynaklanan ısıyı bünyesinde tutmasına engel olmak içindir. Zımparalama işleminin bitmesinin ardından parlatma işlemine geçilmiştir. Parlatma aşamasında ise numuneler sırasıyla 6 µm, 3 µm, 1 µm ve 0,25 µm' lik elmas aşındırıcı içeren solüsyon kullanılarak parlatma işlemine tabi tutulmuştur. Tablo 12'de zımparalama ve parlatma aşamalarının parametreleri verilmiştir. Zımparalama aşaması her kademe için 4'er dakika sürerken parlatma aşamasında bu süre biraz daha kısa tutulmuştur.

Tablo 9: Zımparalama ve parlatma işlemi esnasında tercih edilen parametreler.

<b>Zımparalama İşlemi</b>				
<b>Zımpara (mesh)</b>	<b>Basınç (bar)</b>	<b>Hız (rpm)</b>	<b>Süre (saniye)</b>	<b>Su Kullanımı</b>
120, 180, 240, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200, 2000	10	300	240	var
<b>Parlatma İşlemi</b>				
<b>Elmas Boyutu</b>	<b>Basınç (bar)</b>	<b>Hız (rpm)</b>	<b>Süre (saniye)</b>	<b>Su Kullanımı</b>
6 µm 3 µm 1 µm 0,25 µm	10	300	120	Yok

Bakalite alınarak zımparalama ve parlatma işlemi yapılmış olan numuneler SEM cihazında görüntü alınabilmesi için önce bünyelerindeki fiziksel suyun giderilmesi amacıyla 100 °C'de yaklaşık olarak yarım saat vakum altında bekletilmektedir. Daha sonra ise incelenecek olan numunelerin üst tabakaları seramik kaplama olduğu için ve iletkenliğinin düşük olmasından dolayı altınla kaplanarak iletkenlik özelliği artırılmıştır. Bu işlemlerin ardından numuneler

SEM cihazında incelemeye hazır hale gelmiştir. Sıcak korozyon testine tabi tutulmuş ve metalografik olarak hazır hale gelmiş numuneler Tescan MAIA3 SEM cihazında kesit görüntüsü alınması için incelemeye alınmıştır. Sıcak korozyona uğramış olan ve bakalite alınmamış olan numunelerin geriye kalan kısmı ise SEM’ den yüzey görüntüsü alınması için herhangi bir metalografik hazırlamaya tabi tutulmadan vakuma alınarak bünyesindeki fiziksel suyun buharlaştırılmasının ardından altınla kaplandı. Çeşitli büyütmelerde SEM cihazından görüntüler alındıktan sonra, numunelerden faz analizi için EDS analizi yapıldı. EDS analizi yapılan numunelerde oluşan fazların tespit edilmesinin ardından numuneler XRD analiz cihazı yardımıyla oluşmuş olan fazların şiddet ve açılarının tespitleri yapılmıştır. Son olarak ise numunelerin tıpkı diğer analizler gibi hem sıcak korozyon testinden önce hem de sıcak korozyon testinden sonra elementel dağılımını ayrıntılı bir şekilde belirleyebilmek için elementel haritalama analizi yapılmıştır. SEM, EDS, XRD ve elementel haritalama analizleri numunelere hem sıcak korozyondan önce, hem de sıcak korozyon testinden sonra yapılmış görüntü ve değerler karşılaştırılmıştır.

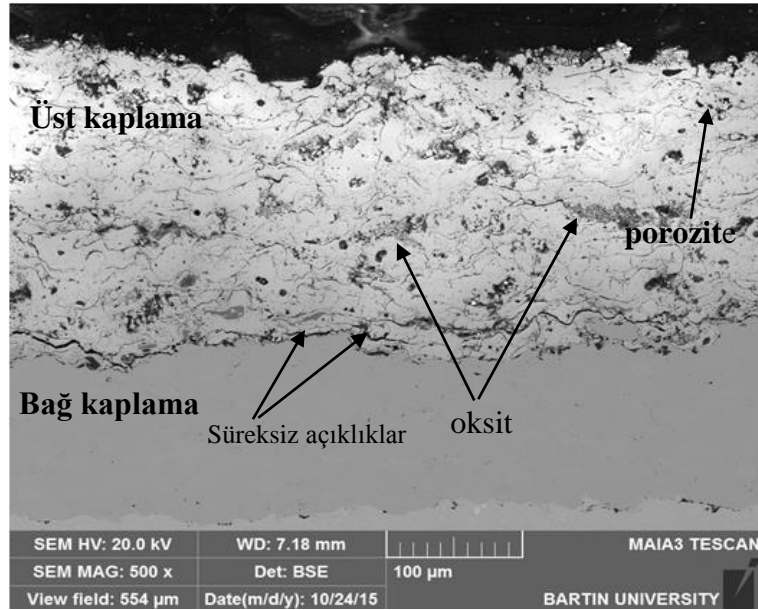
## BÖLÜM 4

### BULGULAR VE TARTIŞMA

#### 4.1 TBC Numunelerinin Mikroyapısal İncelenmesi

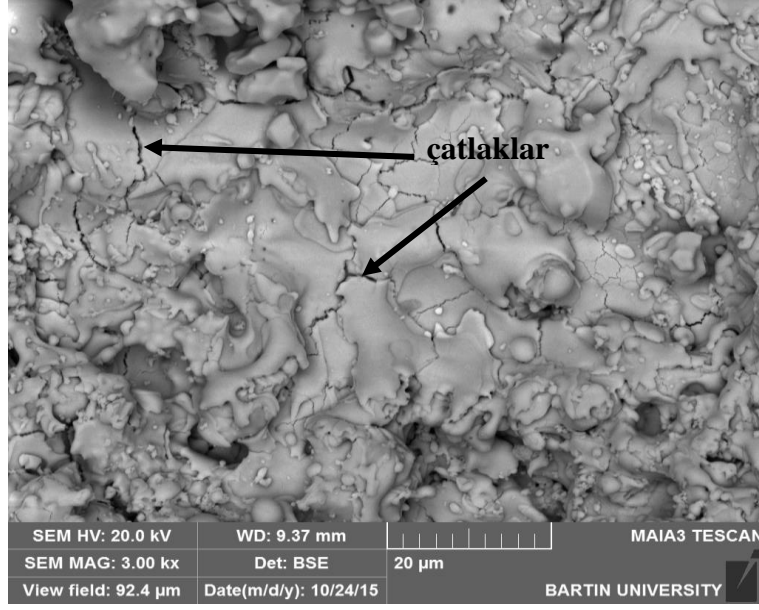
##### 4.1.1 CGDS Bağ Kaplamalı APS Üst Kaplamalı TBC Numunesinin Mikroyapısı

APS yöntemiyle üretilen TBC numunelerinde genellikle porozite miktarının yüksek olmasının yanında çatlak ve oksit gibi birçok kusur mevcuttur. APS yöntemi atmosfere açık koşullarda yapıldığından dolayı oksit içeriği diğer yöntemlerden fazla miktardadır. Ancak üretilen numunenin bağ kaplaması CGDS yöntemiyle üretildiğinden dolayı bağ kaplamada oksit ve porozite miktarı yok denecek kadar az miktardadır. Şekil 36’da bağ kaplamasının CGDS yöntemiyle, üst kaplamasının da APS metoduyla üretilen TBC numunesinin SEM cihazında çekilmiş enine kesit görüntüsü verilmiştir.



Şekil 36: APS yöntemiyle üst kaplaması üretilmiş numunenin enine kesit görüntüsü.

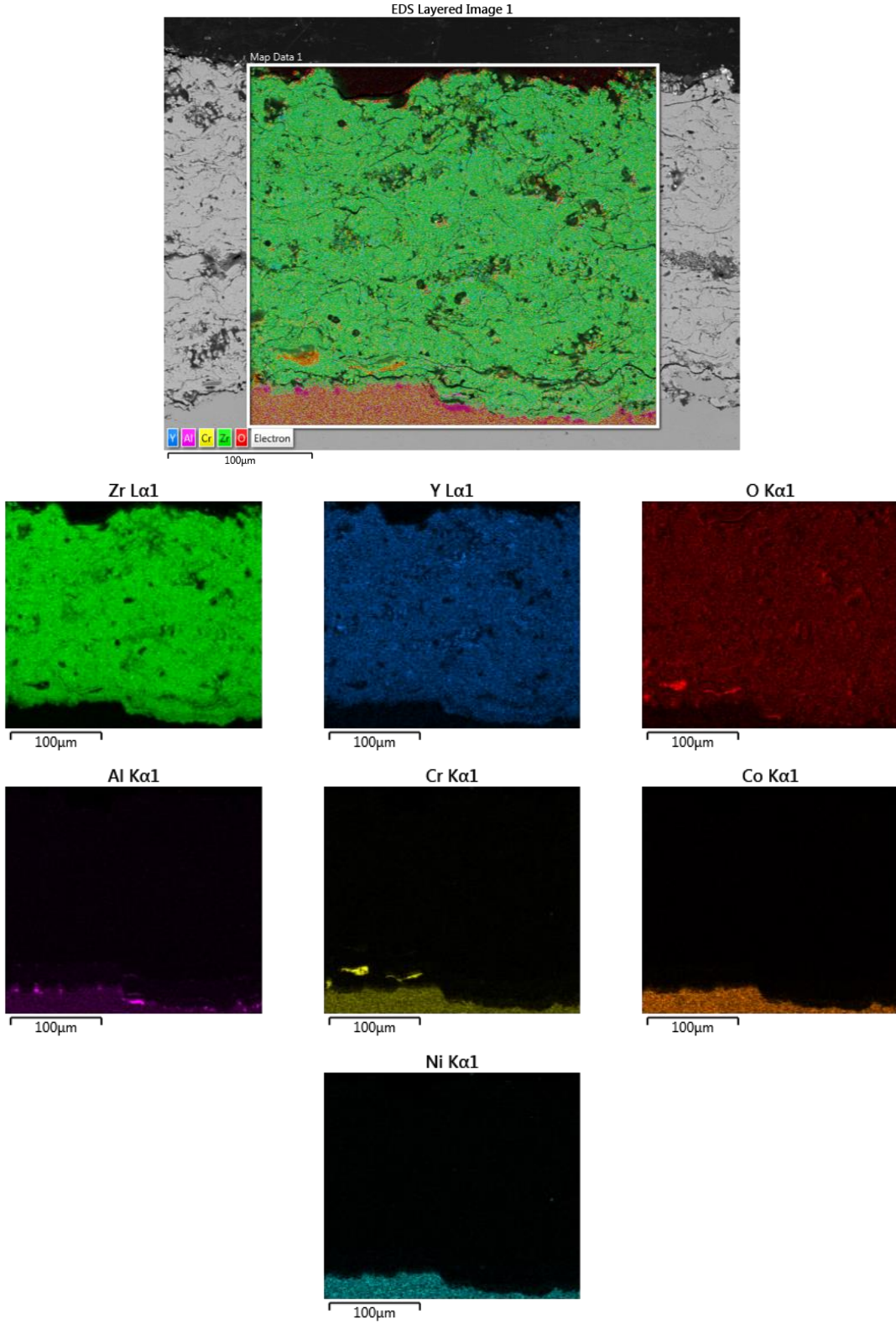
Şekil 36’da 500x büyütmede enine kesit SEM görüntüsünde görüldüğü gibi CGDS bağ kaplama ve APS üst kaplama yöntemleri kullanılarak üretilmiş olan TBC’de bağ kaplamada oksit, porozite ve süresiz açıklık tabakasına çok fazla rastlanmamaktadır. Ancak üst kaplamada dikkate değer ölçülerde oksit, porozite ve süresiz açıklık görülmektedir.



Şekil 37: APS yöntemiyle üst kaplaması üretilmiş numunenin üst yüzey görüntüsü.

Şekil 37’de bağ kaplaması CGDS yöntemiyle, üst kaplaması ise APS yöntemiyle üretilmiş olan TBC numunesinin 3.00 kx büyütmede üst yüzey görüntüsü verilmiştir. Şekilden de görülebildiği gibi APS yöntemiyle üst kaplamanın üretilmesinden dolayı süreksiz çatlaklar görülebilmektedir. Şekil 38’ de ise APS yöntemiyle üst kaplaması üretilmiş numunenin sıcak korozyon testi öncesi kesit görüntüsünün elementel alan analizi verilmiştir. Alan analizinden de anlaşıldığı üzere üst kaplamayı oluşturan elementlerin içeriği Zr, Y ve O olması üst kaplamanın YSZ kaplama olduğunun bir göstergesidir. Alana dahil olan bağ kaplamanın ufak bir bölümünde ise CoNiCrAlY içeriğinin bulunduğu çıkan analiz sonucu görülmektedir.

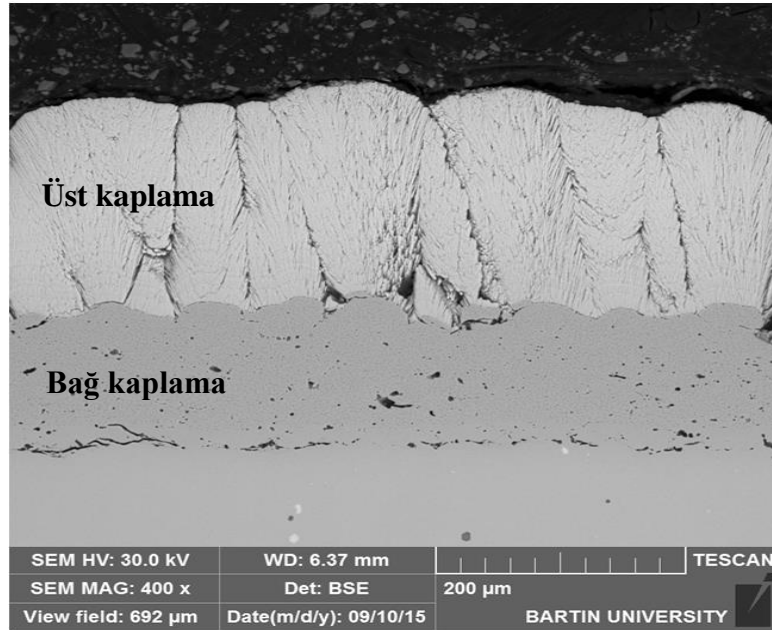




Şekil 38: APS yöntemiyle üst kaplaması üretilmiş numunenin sıcak korozyon testi öncesi kesit görüntüsünün elementel haritalama analizi.

#### 4.1.2 CGDS Bağ Kaplamalı EB-PVD Üst Kaplamalı TBC Numunesinin Mikroyapısı

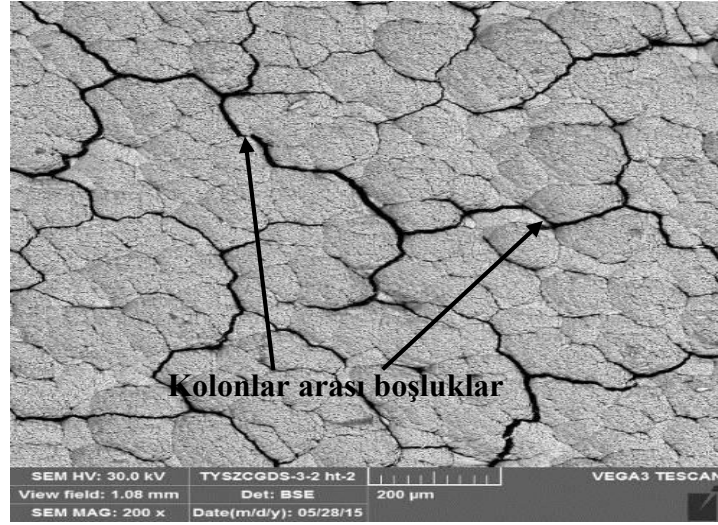
EB-PVD yöntemiyle üretilen TBC' ler APS ile üretilenlere göre porozite, oksit ve çatlak miktarları daha azdır. EB-PVD yöntemi ışın demetleri vasıtasıyla fiziksel buhar biriktirme şeklinde olduğundan dolayı kaplama esnasında numuneler atmosferle temas halinde değildirler. Bu sebepten dolayı bu yöntem APS yöntemine göre daha az poroziteye sahiptir. EB-PVD yönteminin APS yönteminden diğer bir farkı da kaplama birikmesi yatay kolonlar halinde değil dikey kolonlar halinde birikmesidir. Bu özelliğe numunelerin sıcak korozyon ve oksidasyon gibi saldırgan ortamlarda kaplamalarda meydana gelen hasar boyutunu düşürmektedir. Şekil 39'da EB-PVD yöntemiyle üst kaplaması üretilmiş olan TBC numunesinin görüntüsü verilmiştir.



Şekil 39: EB-PVD yöntemiyle üst kaplaması üretilmiş numunenin enine kesit görüntüsü.

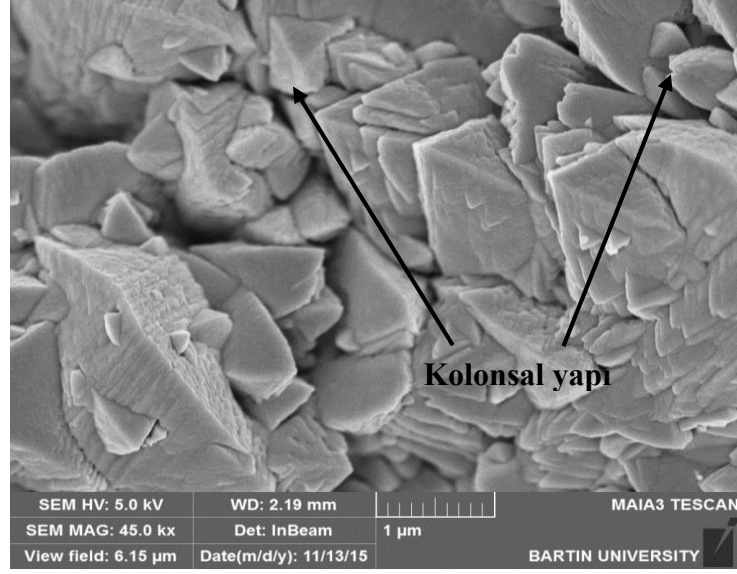
EB-PVD yönteminde kolonların dikey oluşması diğer yöntemlere göre yüksek sıcaklıklarda oluşan korozyon ve oksidasyon gibi hasarlara karşı kaplamaları daha dayanıklı hale getirmektedir. Ancak kaplamanın vakum altında gerçekleşmesi ve yüzeyde oksit tabakalarının, porozitelerin azlığı her ne kadar iyi bir durum gibi görünse de bu süreksizliklerin olmayışı kaplamadaki iletkenlik özelliğini arttırmaktadır. İletkenlik özelliğinin artmasıyla da kaplanan malzemelerin termal şok dirençlerine karşı daha dayanıksız olmasını sağlamaktadır. Şekil 39'da 400x büyütme ile çekilmiş SEM

görüntüsündeki kesitte verilen EB-PVD üst kaplamada porozite ve oksit içerinin azlığı görölmektedir.



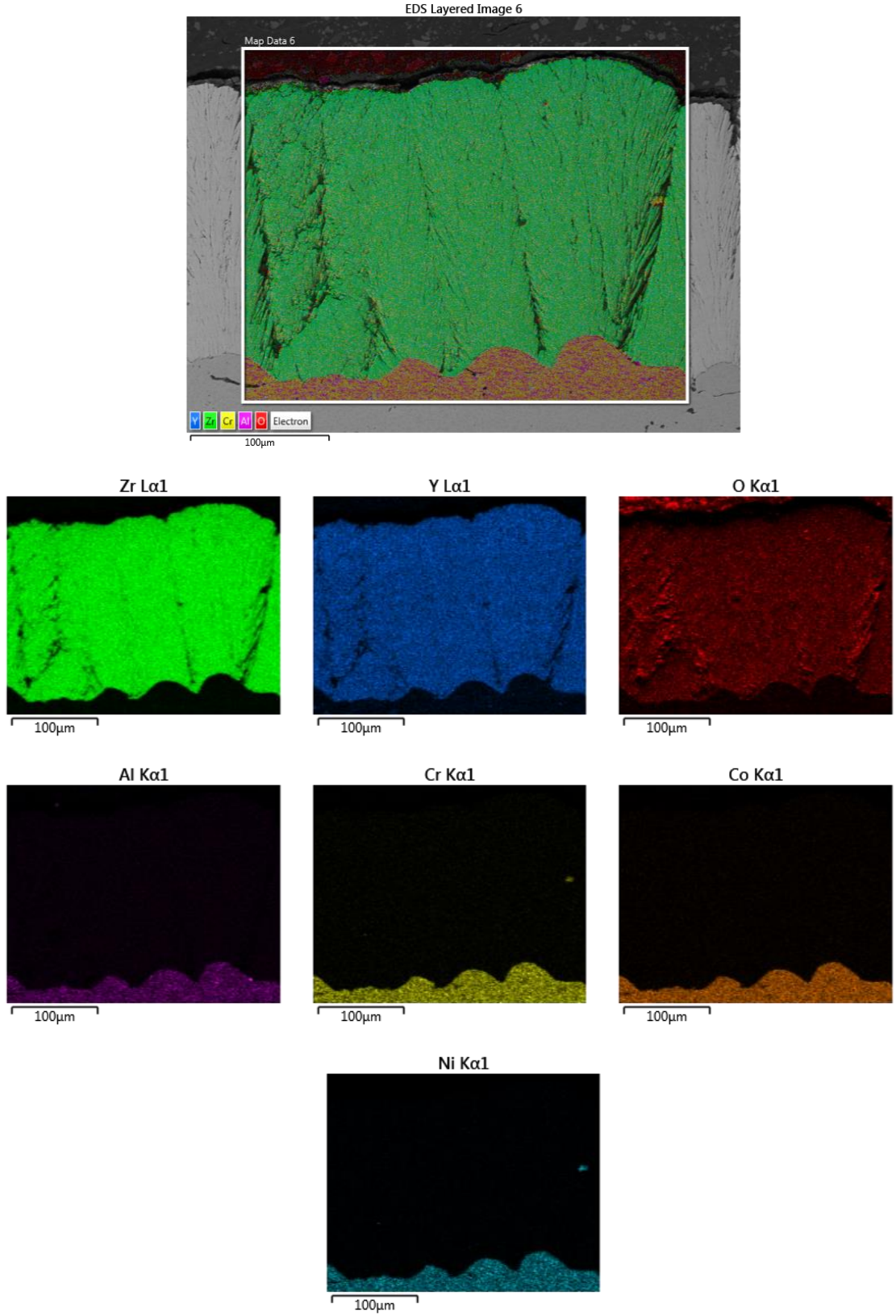
Şekil 40: EB-PVD yöntemiyle üst kaplaması üretilmiş numunenin üst yüzey görüntüsü (200x büyütmede).

Şekil 40'da ise EB-PVD yöntemiyle üst kaplaması üretilmiş olan numunenin üst yüzey görüntüsü verilmiştir. Görüntü büyütme oranı oldukça yetersiz olduğundan numune yüzeyinin derinliklerine inilememiştir. Daha yüksek büyütme oranlarına çıkıldığında ise EB-PVD yönteminin karakteristik özelliği olan kolonsal yapılar Şekil 41'de oldukça belirgin hale gelmiştir. EB-PVD tekniği ile üst kaplaması üretilmiş olan TBC örneğinde kolonsal olarak oluşan üst kaplamada üst yüzey görüntüsü üçgen piramit şeklini almıştır (Şekil 41). Şekil 40 incelendiğinde ise kolonlar arası boşluklar TBC numunesinde oldukça belirgindir.



Şekil 41: EB-PVD yöntemiyle üst kaplaması üretilmiş numunenin üst yüzey görüntüsü.

Şekil 41’de gösterilen üst yüzey görüntüsünde büyütme miktarı 45.0 kx değerindedir. Ancak bu büyütme miktarına çıkıldığında EB-PVD ile üretilmiş numunenin üst yüzey görüntüsü belirginleşmiştir. Şekil 42’de ise EB-PVD yöntemiyle üst kaplaması üretilmiş numunenin sıcak korozyon testi öncesi kesit görüntüsünün elementel alan analizinden de görüldüğü gibi üst kaplamayı oluşturan elementler tıpkı APS numunesinde olduğu gibi Zr, Y ve O’ den oluşmaktadır. Bu elementlerden oluşması da üst kaplamanın bir YSZ kaplaması olduğunu göstermektedir. Bağ kaplama da aynı şekilde APS numunesindeki bağ kaplamanın içeriği gibidir. Bu dağılımlardan kaplamalarımızın istenilen özelliklerde üretildiği yargısına varılabilmektedir.

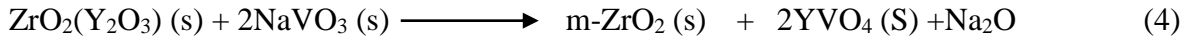


Şekil 42: EB-PVD yöntemiyle üst kaplaması üretilmiş numunenin sıcak korozyon testi öncesi kesit görüntüsünün elementel haritalama analizi.

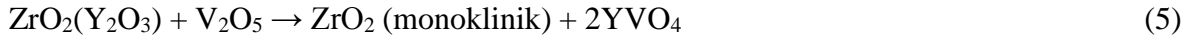
## 4.2 TBC Örnekleri Üzerindeki Sıcak Korozyon Etkisi

Sıcak korozyon etkisi, erimiş tuzların üst tabakadaki mikro çatlaklar ve porozitelerden sızması sonucu gerçekleşir. Servis koşullarında sodyum, vanadyum, kurşun gibi elementlerin YSZ üst kaplama tabakasının yapısını değiştirmesi ile oluşur. Yakıt kirliliğinden kaynaklanan sodyum, sülfür, fosfor, vanadyum gibi elementler yapıda var olduğunda  $Y_2O_3$  fazı ile reaksiyona girer.  $Y_2O_3$  fazının yokluğunda ise, tetragonal  $ZrO_2$  fazının stabilizasyonu mümkün olmadığı için tetragonal-monoklinik faz dönüşümü gerçekleşir. Bu dönüşüm hacim değişikliğine sebep olduğundan kaplama tabakasının bütünlüğünü bozarak, hasar oluşumuna yol açmaktadır. (Ajay, 2015).

Sıcak korozyon olayı Eşitlik 3 ve Eşitlik 4'deki reaksiyonlar neticesinde meydana gelmektedir:

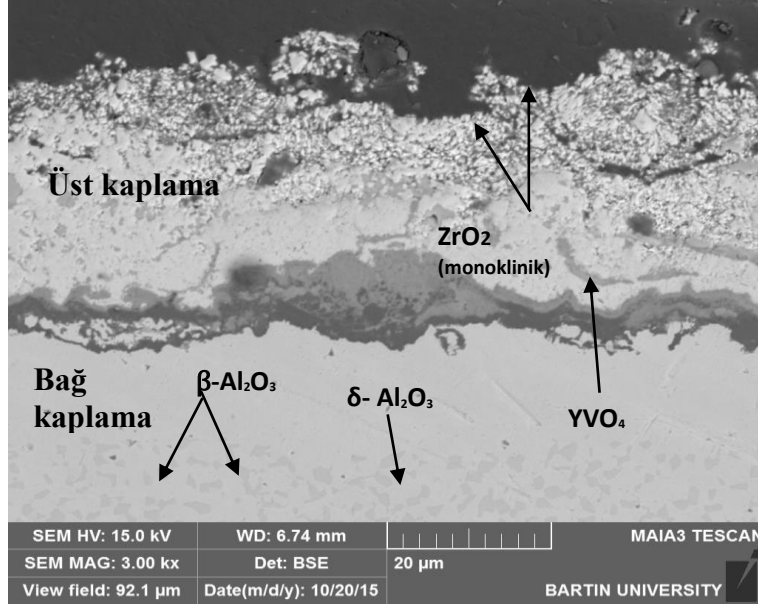


Aşağıdaki reaksiyon ise sıcak korozyon mekanizmasında direkt olarak meydana gelmektedir (Eşitlik 5):



### 4.2.1 CGDS Bağ Kaplamalı APS Üst Kaplamalı TBC Numunesinin Sıcak Korozyon Testi Sonrası Mikroyapısal İncelenmesi

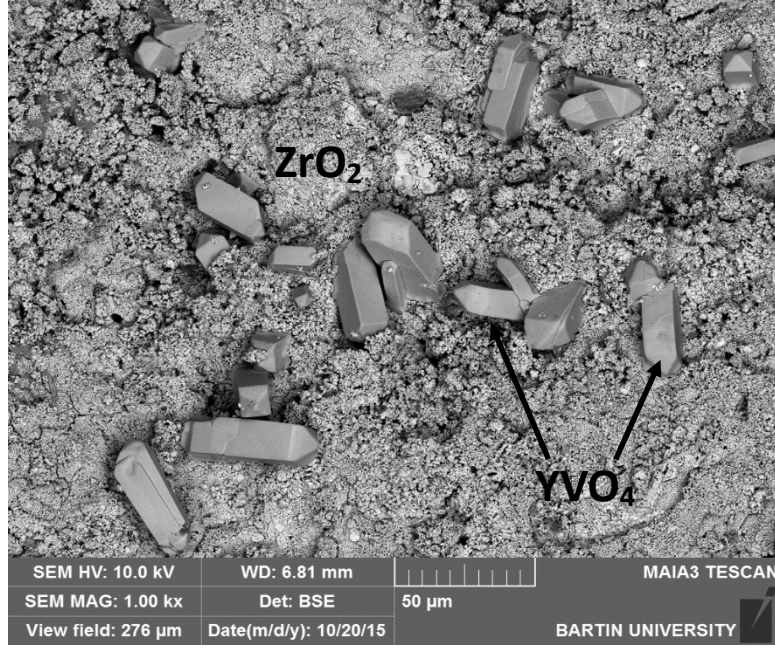
CGDS bağ kaplamalı APS üst yüzey kaplamalı numunede üst kaplama olarak YSZ kullanılmıştır. Genel itibariyle tetragonal kafes yapısına sahip olan üst kaplama sıcak korozyon testine tabi tutulduktan sonra monoklinik yapılara doğru kaydığı görülmüştür. Şekil 43'de sıcak korozyon sonrasında kesit görüntüsü alınan CGDS bağ kaplamalı APS üst kaplamalı TBC numunesinde faz yapılarının değiştiği görüntüdeki renk kontrastından da tahmin yürütülerek yapılabilir.



Şekil 43: APS yöntemiyle üst kaplaması üretilmiş numunenin sıcak korozyon testinden sonra enine kesit görüntüsü.

1000 °C sıcaklıkta gerçekleştirilen, 12 saatlik sıcak korozyon testi sonrasında  $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{V}_2\text{O}_5$  ergimiş tuzlarının etkisiyle, YSZ kaplamaların yüzeyi korozyon ürünleri ile kaplanmış ve faz dönüşümleri meydana gelmiştir. TBC kaplama yapısı hem sıcak korozyona hem de belirtilen sıcaklıkta oksidasyon etkisine maruz kalmıştır.

Şekil 43’de verilen ara yüzey mikroyapı resminde oluşan sıcaklık etkisiyle ara yüzeyde oluşan TGO yapısı görülmektedir. Oluşan TGO yapısı üst seramik kaplamadan oksijenin penetrasyonu sonucu bağ ve üst kaplama ara yüzeyinde oluşmaktadır. CoNiCrAlY bağ kaplama üzerinde matriks ve çökelti olmak üzere iki faz bulunmaktadır. Matriks yapısı Ni/Co bazlı katı çözeltilisinden oluşurken ( $\gamma$ -fazı), çökelti fazı Ni ve Al intermetalik bileşiği olan " $\beta$ -NiAl" fazından oluşmaktadır.  $\beta$ -fazı Al açısından zengin bir faz olmakla birlikte servis esnasında bu fazın içindeki Al yüzeye doğru nüfuz ederek TGO’yu oluşturacak alümina tabakasının oluşmasını sağlamaktadır. Şekil 43’de bağ kaplamanın üst kaplama yüzeyine ortalama 15-20  $\mu\text{m}$  yakın bölgelerinde oluşan  $\beta$ -fazı yapıları görülmektedir. Sıcak korozyon etkisi ile tetragonal faz yapısından monoklinik faz yapısına dönüşen  $\text{ZrO}_2$  ve oluşan  $\text{YVO}_4$  bileşiği Şekil 43’de görülmektedir. Sıcak korozyon olayının vuku bulduğunu ise  $\text{YVO}_4$  bileşiğinin varlığı ve tetragonal yapıya sahip olan  $\text{ZrO}_2$ ’nin faz yapısının değişmesi sonucu monoklinik faz yapısına dönüşmesini kanıt olarak gösterebiliriz. Şekil 44’de sıcak korozyon testleri sonrasında CGDS bağ kaplamalı APS üst kaplamalı TBC numunesinin üst yüzey görüntüsü 1.00 kx büyütmede verilmiştir.

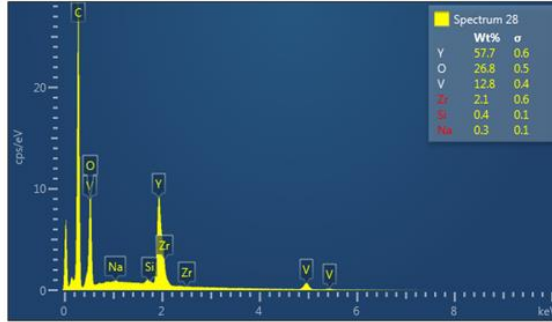
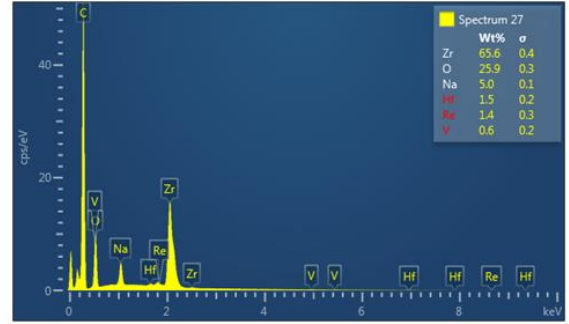
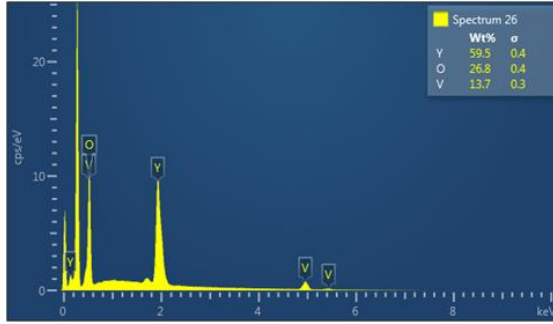
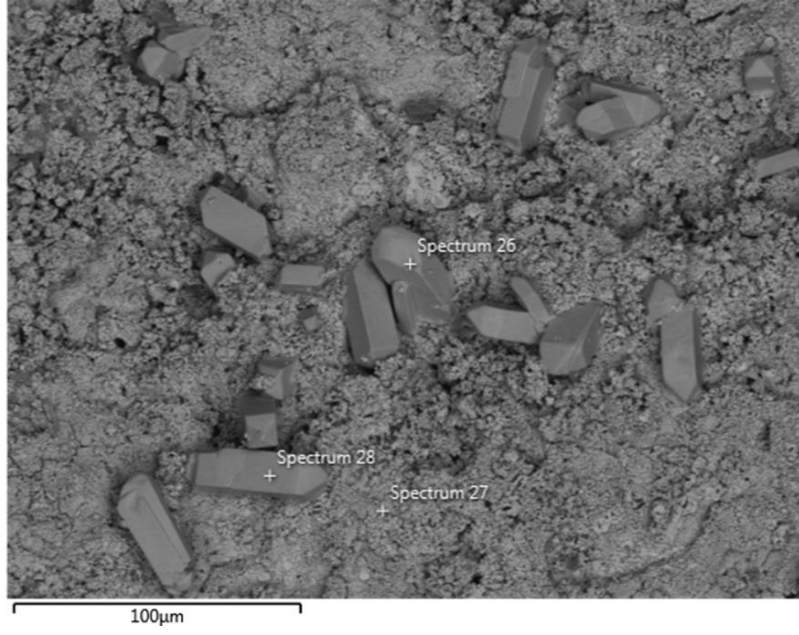


Şekil 44: APS yöntemiyle üst kaplaması üretilmiş numunenin sıcak korozyon testinden sonra 1.00 kx büyütmede üst yüzey görüntüsü.

Şekil 44 ve 45'te CGDS yöntemi kullanılarak üretilen CoNiCrAlY içerikli bağ ve APS tekniği kullanılarak üretilen TBC kaplamaların 12 saatlik sıcak korozyon testi sonrasındaki sırasıyla üst yüzey görüntüsü ve EDS analizleri verilmektedir.

Şekiller test öncesi görüntülerle karşılaştırıldığında uzun çubuksu yapıların oluştuğu görülmektedir. Yapılan EDS analizleri ve XRD analizleri birleştirilmesi neticesinde sıcak korozyon testinin ardından oluşmuş olan bu çubuk şeklindeki yapıların  $YVO_4$  olduğu belirlenmiştir.



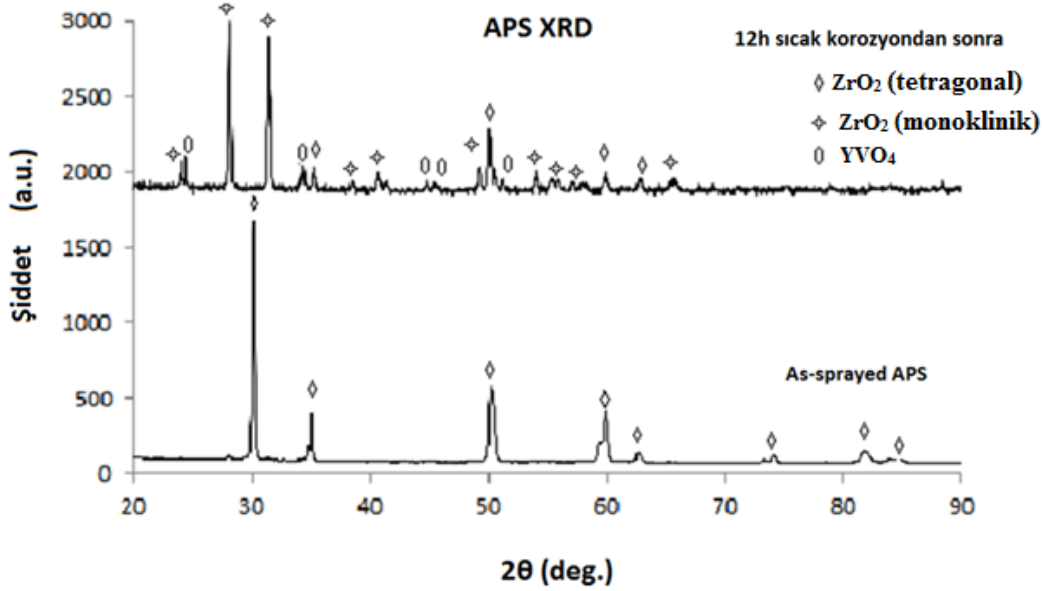


Şekil 45: APS yöntemiyle üst kaplaması üretilmiş TBC yapısının sıcak korozyon testi sonrasındaki üst yüzey EDS analizi.

Şekil 46'da CGDS yöntemi kullanılarak üretilen CoNiCrAlY içerikli bağ ve APS tekniği kullanılarak üretilen TBC kaplamaların üretim ve sıcak korozyon testi sonrasındaki XRD sonuçları verilmektedir.

Grafiğin üst kısmında yer alan eğri sıcak korozyon sonrasında numunede meydana gelen fazları göstermektedir. Bu fazlar  $YVO_4$ , monoklinik  $ZrO_2$ , tetragonal  $ZrO_2$ 'dir. Sıcak

korozyon öncesinde ise üst kaplamada tetragonal  $ZrO_2$ 'dan başka faza rastlanmamıştır. Diğer yapılan EDS analizi ile bu XRD analizi sonuçları göz önüne alındığında 12 saatlik sıcak korozyon neticesinde üst kaplamada meydana gelen atmaların faz dönüşümlerinden olduğunu göstermektedir.



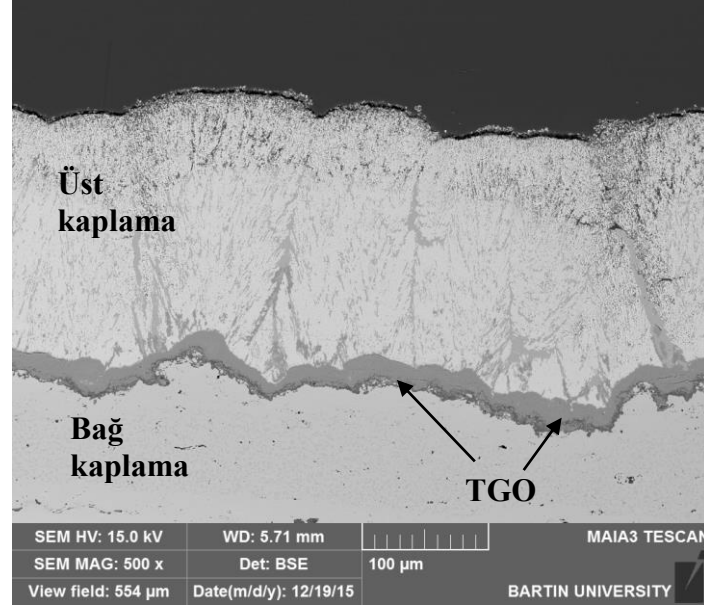
Şekil 46: APS Yöntemiyle üst kaplaması üretilmiş TBC numunesinin üretim ve sıcak korozyon testi sonrasındaki XRD analiz sonuçları.

Şekil 47'de ise 12 saatlik sıcak korozyon testinden sonra APS yöntemiyle üst kaplaması üretilmiş numunenin kesit görüntüsünün elementel alan analizi verilmiştir. Analizden de anlaşıldığı üzere kaplama yapısında yeni elementlerin var olduğu görülmektedir. Özellikle sıcak korozyon testinde kullanılan Vanadyum elementinin var olması ve bulunduğu bölgede Y elementinin de yoğun bir şekilde belirginleşmesi üst kaplama yapısında diğer analizler ve SEM görüntülerinde ortaya çıkan yapıların  $YVO_4$  olduğunu göstermektedir. Üst kaplama ve bağ kaplama arasındaki TGO tabakasının belirginleşmesi ve kalınlaşması ise numunenin sıcak korozyon testinin yanı sıra oksidasyon mekanizmasının da meydana geldiğini göstermektedir.



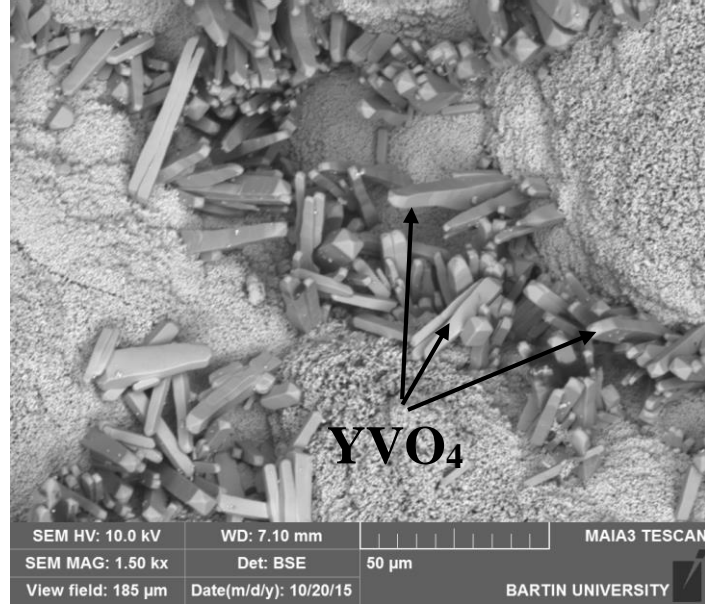
#### 4.2.2 CGDS Bağ Kaplamalı EB-PVD Üst Kaplamalı TBC Numunesinin Sıcak Korozyon Testi Sonrası Mikroyapısal İncelenmesi

Şekil 48’de CGDS yöntemi kullanılarak üretilen CoNiCrAlY içerikli bağ ve EB-PVD tekniği kullanılarak üretilen TBC kaplamaların 20 saatlik sıcak korozyon testi sonrasındaki ara yüzey mikroyapısı verilmektedir.



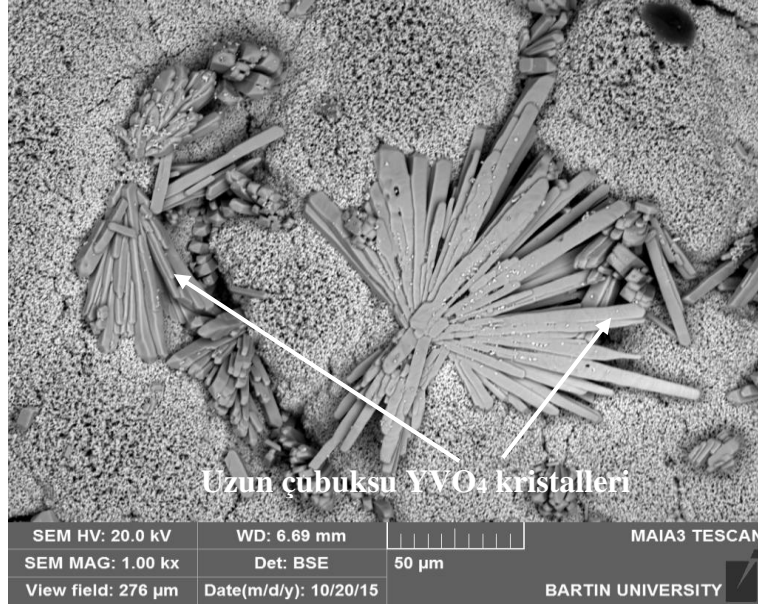
Şekil 48: EB-PVD yöntemiyle üst kaplaması üretilmiş numunenin sıcak korozyon testinden sonra enine kesit görüntüsü.

Üst yüzey kaplaması EB-PVD prosesi ile TBC sisteminde sıcak korozyon testi sonrasında bağ/üst kaplama ara yüzeyinde herhangi bir ayrılma meydana gelmemiştir.



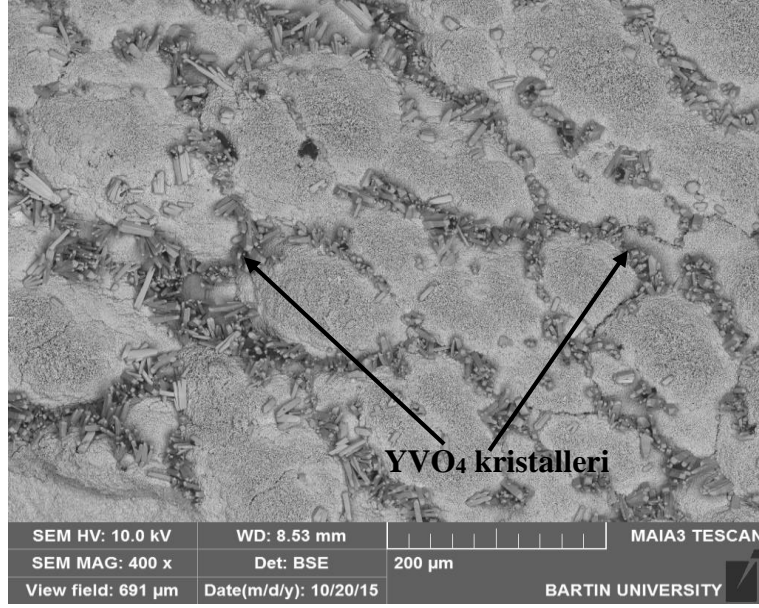
Şekil 49: EB-PVD yöntemiyle üst kaplaması üretilmiş numunenin sıcak korozyon testinden sonra 1.50 kx büyütmede üst yüzey görüntüsü.

Şekil 49’da EB-PVD yöntemiyle üst kaplaması üretilmiş olan numunenin sıcak korozyon testinden sonraki üst yüzey görüntüsü 1.50 kx büyütmede verilmiş şekil üzerinde de görüldüğü gibi çubuk şeklindeki yapılar 1000 °C’de 20 saatlik sıcak korozyon testi sonucunda oluşmuştur. Bu yapıların oluşmasına test esnasında sıvı faza geçen  $V_2O_5$  tozunun ve yapıdaki YSZ’ de bulunan %8 oranındaki yitrium elementinin neden olduğu açıktır. Numunede oluşmuş olan bu yapıları üst yüzeyin farklı bölgelerinde ve farklı büyütmelerde de görmekteyiz Şekil 50 ve 51’de aynı numuneye ait üst yüzeyin farklı bölgelerinden, farklı büyütmelerde alınmış SEM görüntüleri verilmiştir.



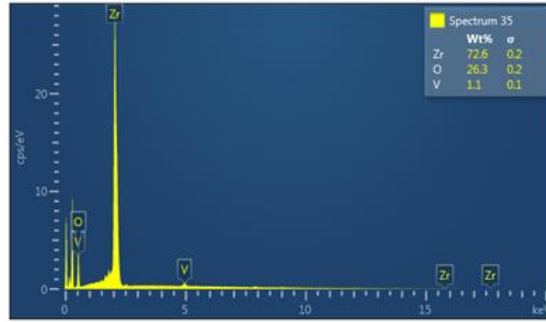
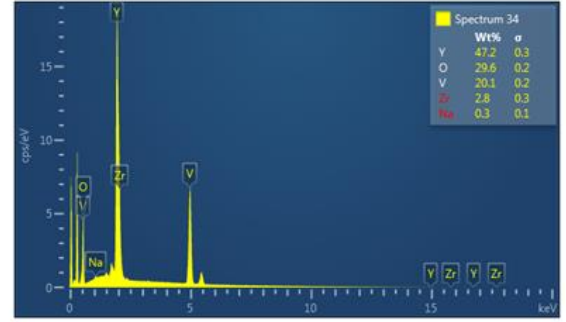
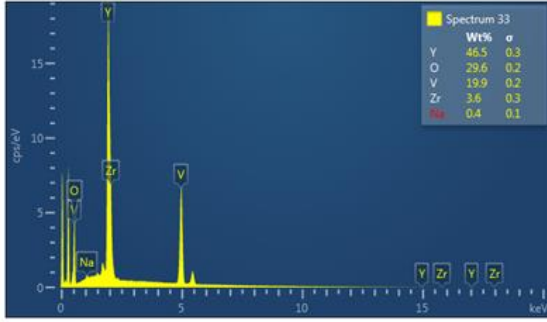
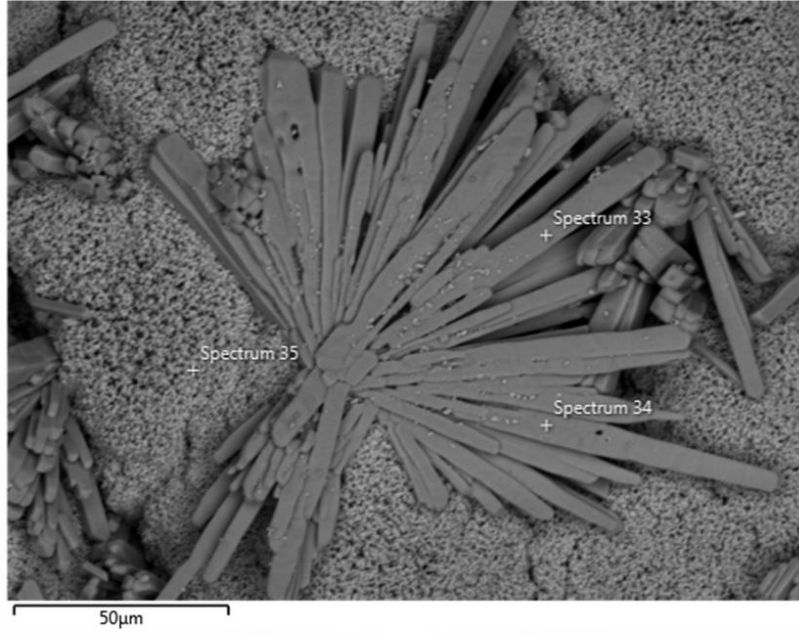
Şekil 50: EB-PVD yöntemiyle üst kaplaması üretilmiş numunenin sıcak korozyon testinden sonra 1.00 kx büyütmede üst yüzey görüntüsü.

Şekil 50’de de görüldüğü gibi çubuksu yapılar üst yüzeyin belirli bölgelerinde yitrium içeriği oranınca ve sıvı faza geçmiş olan  $V_2O_5$ ’ in bu element ile etkileşmesi neticesinde oluşmuştur. Daha açık renkte görülen yapılar ise  $ZrO_2$  yapısıdır. Sıcak korozyon testi öncesi tetragonal yapıda olan  $ZrO_2$  sıcak korozyon testi sonrası yapılan analizlerde monoklinik yapıya dönüşmüştür. EB-PVD yöntemiyle üst kaplaması yapılmış olan numunede üst yüzeyin 400x büyütmedeki görüntüsü ise Şekil 51’de verilmiştir. Şekil 51’ de çubuk şekilde oluşmuş olan yapıların genel dağılım ve yoğunlama bölgeleri açık bir şekilde gözükmektedir. Tıpkı tane sınırymış gibi belirli bölgelerde bu yapıların oluşması o bölgelerde korozyon için gerekli olan reaksiyon enerjisinin daha yüksek olmasından ya da bu bölgelerin EB-PVD ile üretilmiş üst kaplamada kolonsal olarak büyüyen üst kaplamadaki aralık bölgeler olduğu tahmin edilmektedir. Bu tahmini destekleyen diğer bir etken ise yaklaşık 900 °C ve üzerinde  $V_2O_5$  tozunun tamamen sıvı faza geçmesidir. Yapılan deneysel çalışmada sıcak korozyon testi 1000 °C’de gerçekleştiği için korozyon testi esnasında  $V_2O_5$  tozu tamamen sıvı faza geçmektedir. Sıvı faza geçen  $V_2O_5$  kolonsal yapılar arasındaki boşluklardan aşağıya sızarak kaplamanın iç kısımlarına doğru ilerler bu bölgelerde yüksek sıcaklıklarda uzun kaldığı düşünüldüğünde ise tıpkı bir çukurcuk (pitting) korozyonu oluşur. Korozyon ürünü olarak da  $YVO_4$  bileşiği oluşmuştur.



Şekil 51: EB-PVD yöntemiyle üst kaplaması üretilmiş numunenin sıcak korozyon testinden sonra 400 kx büyütmede üst yüzey görüntüsü.

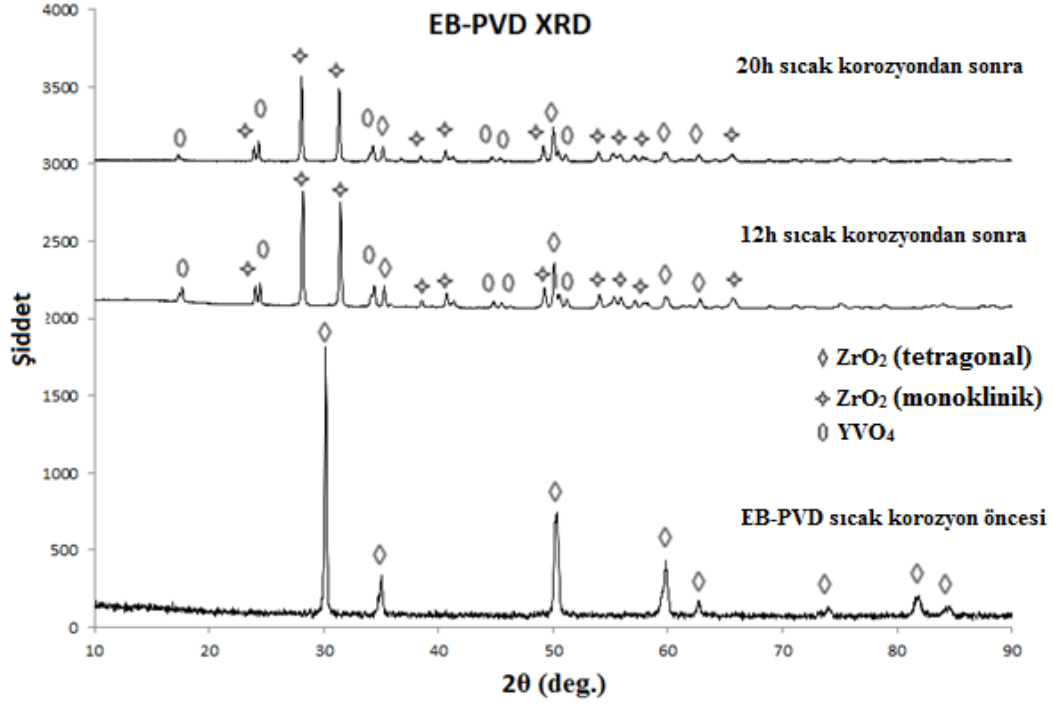
Şekil 52’de ise EB-PVD tekniği ile üretilmiş olan TBC numunesinin sıcak korozyon sonrasında üst yüzeyinden elde edilmiş SEM görüntüsünde de açıkça görüldüğü gibi uzun çubuksu yapıların EDS analizi neticesinde içeriğinde vanadyum, yitriya ve oksijen miktarı oldukça fazla çıkmıştır. Açık renkli yapının içeriğinin ise zirkonyum ve oksijen miktarının oldukça yüksek olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 52: EB-PVD yöntemiyle üst kaplaması üretilmiş TBC yapısının sıcak korozyon testi sonrasındaki üst yüzey EDS analizi.

Şekil 52’de CGDS yöntemi kullanılarak üretilen CoNiCrAlY içerikli bağ ve EB-PVD tekniği kullanılarak üretilen TBC kaplamaların üretim ve sıcak korozyon testi sonrasındaki XRD sonuçları verilmektedir.





Şekil 53: EB-PVD yöntemiyle üst kaplaması üretilmiş TBC numunesinin üretim ve sıcak korozyon testi sonrasındaki XRD analiz sonuçları.

TBC numunelerinin diğer yapılan incelemeleri de göz önünde bulundurduğumuzda elde ettiğimiz yapıların fazlarının neler olduğunu, faz dönüşümünün sıcak korozyon testinden sonra olup olmadığının ispatını XRD analizi yaparak anlaşılmıştır. Bu aşamada numuneler sıcak korozyon testinden önce XRD cihazına sokularak elde edilen şiddet ve açığa bağlı pikler kaydedildikten sonra, numuneler sıcak korozyon testinden sonra da XRD cihazına sokulmuştur. Sıcak korozyon testlerinin bitmesinden sonra XRD analizleri yapılmış olan numunelerin pikleri de aynı grafik üzerinde karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bu sayede değişen faz yapıları belirtilmiştir.



### 4.3 Sıcak Korozyon Testi Sonrasında Meydana Gelen Mikroyapısal Değişimlerin İrdelenmesi

Habibi (2014) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, APS yöntemi kullanılarak nadir toprak elementleri olan YSZ,  $Gd_2Zr_2O_7$  ve YSZ+  $Gd_2Zr_2O_7$  'tan oluşan 3 farklı bileşime sahip TBC sistemleri üretilmiş ve 1050 °C 'de sıcak korozyon testlerine tabi tutulmuştur. Yapılan XRD ve SEM karakterizasyonları sonucunda;  $NaVO_3$  ve  $Y_2O_3$  bileşiklerinin reaksiyona girerek  $YVO_4$ , bileşimini oluşturduğu, tetragonal fazda stabilize olmuş  $ZrO_2$  yapısının ise monoklinik faza dönüştüğü tespit edilmiştir. Her iki dönüşüm olayının da üst kaplamada hacim artışından kaynaklanan bozulmalara sebebiyet verdiği belirlenmiştir. Benzer sonuçlar, 1000 °C gerçekleştirilen sıcak korozyon çalışmalarımızda da görülmüş, YSZ yapısının bozularak  $YVO_4$  ' e dönüştüğü tespit edilmiştir.

Habibi (2014), farklı kompozisyon içeriklerine sahip TBC'ler de oluşan sıcak korozyon ürünlerinin içerik yapısına bağlı olarak farklılık gösterdiği saptamıştır. Özellikle kaplama yapısındaki YSZ içeriğinin azalması ve  $Gd_2Zr_2O_7$  içeriğinin artmasına bağlı olarak oluşan  $YVO_4$  miktarı azalırken,  $GdVO_4$ , miktarının arttığı belirlenmiştir. Buna ek olarak,  $Gd_2Zr_2O_7$ 'lü kaplamaların YSZ'li kaplamalara göre daha dayanıklı olduğu tespit edilmiştir.

Clarke ve Levi (2003), APS tekniği ile üretilmiş olan TBC'ler genellikle düşük yoğunluklu, yatay splat sınırlı ve poroziteli bir yapı olduğu ve EB-PVD tekniği ile üretilmiş olan TBC'lerin ise ince sütunlu ve oldukça yoğun bir mikro yapıdan oluştukları belirtilmiştir. Sahip oldukları bu mikro yapılardan dolayı EB-PVD yöntemi kullanılarak üretilmiş olan TBC'lerin APS tekniğine göre kullanım koşulları altında hasar oluşumlarına daha dirençli olduğu literatür araştırmaları neticesinde belirlenmiştir.

TBC' lerde ki ana hasar mekanizmalarının başında gelen oksidasyon ve korozyon etkisinin değerlendirildiği çalışmada, Saremi ve arkadaşları 1100 °C 'de 22, 42 ve 100 saatlik sürelerde oksidasyon testleri yapmıştır. Sıcak korozyon için ise 1050°C'de  $NaSO_4+V_2O_5$  tuzları eşliğinde 40 saatlik zaman sürecinde testler gerçekleştirilmiştir. Oksidasyon testleri neticesinde mikroyapısal incelemelerde TGO tabasında alumina dışındaki karışık oksitlerin de meydana geldiği gözlemlenmiştir. XRD analizleri sonucunda sıcak korozyon testleri

neticesinde yapıda monoklinik  $ZrO_2$  ve  $YVO_4$  fazlarının oluştuğu ve bu fazların ise kaplamada dökülmelere sebebiyet verdiği belirtilmiştir (Saremi vd., 2007).

Gaz türbinlerinde meydana gelen tip1 ve tip 2 sıcak korozyon mekanizmalarının özelliklerinin belirtildiği derleme çalışmasında, Eliaz ve arkadaşları her iki tip sıcak korozyon mekanizmasının da alaşım kompozisyonu, termomekanik gerilmeler, kirlilik kompozisyonu, termal çevrimler, ortamdaki gaz kompozisyonu, gazın hızı ve erozyon proseslerinden etkilendiği belirtilmiştir (Eliaz vd., 2002).

Jones (1997), TBC'ler de sıcak korozyonun etkilerini değerlendirdiği APS yöntemi ve EB-PVD yöntemini kıyas ettiği derleme çalışmasında, kolonsal mikroyapıya sahip olan EB-PVD yöntemiyle üretilmiş kaplamaların poroziteli ve gözenekli yapıya sahip APS yöntemiyle üretilmiş olan kaplamalara göre daha fazla dayanım gösterdiği belirtilmiştir. Bu durumun, yaptığı literatür araştırmaları neticesinde ergimiş tuzların poroziteli yapıdan daha rahat bir şekilde kaplama içerisine sızdığı gösterilmiştir. Benzer sonuçlar, yapılan EDS analizleri neticesinde kaplama içine sızmış olan  $YVO_4$  yapısının varlığı ve APS yöntemi ile üretilen TBC sisteminin 12 saat, EB-PVD yöntemi kullanılarak üretilen TBC sisteminin ise 20 saat sıcak korozyon testine dayanması yönüyle gerçekleştirdiğimiz çalışmamızda da görülmektedir.

Afrasiabi vd. (2008), 1050 °C sıcaklıkta  $Na_2SO_4+V_2O_5$  tuz karışımları ile YSZ, YSZ+ $Al_2O_3$ , YSZ/ $Al_2O_3$  ile kaplanmış farklı TBC'leri sıcak korozyon testlerine tabi tutmuş ve TBC'lerin SEM, XRD ve EDS analizlerini gerçekleştirmiştir. Elde edilen çalışma sonuçlarında da 1000 °C' de  $Na_2SO_4+V_2O_5$  tuz karışımları ile sıcak korozyon testine tabi tutulan çalışmamızdaki gibi çubuksu  $YVO_4$  ve monoklinik  $ZrO_2$  yapıları elde edilmiştir.

Reddy ve Gandhi (2013), gerçekleştirdikleri çalışmada yüksek sıcaklıkta gerçekleştirilen sıcak korozyon deneylerinde fırın ortamı soğuma hızının oluşan korozyon ürünlerini etkilediği belirtilmiştir. Çalışmada sıcak korozyon testleri sonrası elde edilen monoklinik zirkonya ve  $YVO_4$ , yapılarına ek olarak fırının yavaş soğutulması esnasında  $NaYV_2O_7$ , ZrOS bileşikler oluşurken, hızlı soğutulması esnasında ise yapıda sadece monoklinik zirkonyanın oluştuğu gösterilmiştir.

Mobarra vd. (2006), gerçekleştirdikleri araştırmada çalışmamızdan farklı olarak Inconel 738 süper alaşım altlık malzeme yüzeyine düşük basınçlı plazma sprej metodu kullanılarak CoNiCrAlY metalik kaplamalar üretilmiştir. 850 °C’de %90 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ,% 10 NaCl içerikli toz karışımı malzeme yüzeyine 2,5 mg/cm<sup>2</sup> miktarında serpilerek sıcak korozyon testine tabi tutulmuştur. 24 saatlik sıcak korozyon testinin ardından yapılan SEM ve EDS analizleri neticesinde kaplama kalınlığının azaldığı görülmüştür. Direkt olarak CoNiCrAlY kaplama yapısında faz dönüşümleri ve β-NiAl fazında azalmalar meydana gelmesinin sebebi olarak termal çevrim testleriyle ilişki kurulmuş ve kaplama içerisindeki Al’ nin dışa doğru, Ni’ in ise içe doğru göç etmesinin etkili olduğu belirtilmiştir.

Pittsburgh üniversitesinde yapılan bir çalışmada, YSZ’ nin sıcak korozyon davranışını geliştirmek için EB-PVD yöntemiyle YSZ’ nin üst yüzeyi Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>’ le kaplanmıştır. Sıcak korozyon testleri için hem Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ile kaplanan numuneler hem de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kullanılmayan numuneler 950 °C’de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + %0-15 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> tuz karışımlarında V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>’in değişen oranlarında katılarak sıcak korozyon olayına vanadyumun içeriğinin etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar vanadyumun varlığı hem Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ile kompozit olan üretilen kaplama yapısında hem de sadece YSZ içeriğine sahip kaplama yapısında hasar oluşum miktarını arttırmıştır. Düşük sıcaklıklarda %5 vanadyumun olmasıyla birlikte Na<sub>2</sub>O-V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bileşiminin sıvı faza geçmesi, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplamadan YSZ kaplama yapısına doğru sızıntılar olduğunu göstermektedir (Mao, 2003).

Xie vd. (2003), 850 °C’de %75 NaCl ve %25 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> tuz karışımını HVOF yöntemiyle üretilen CoNiCrAlY kaplama ve emaye kaplamanın sıcak korozyon dayanımlarını karşılaştırmak için uygulamışlardır. 80 saatlik sıcak korozyon testinin ardından, emaye kaplamayla CoNiCrAlY kaplamalar karşılaştırıldığında korozyon direncinin emaye kaplamada sıcak korozyon tuzlarının yüksek sıcaklıktaki sızıntısı oldukça düşük olduğundan sıcak korozyona karşı dayanımlarının mükemmel olduğu belirtilmiştir. Yapılan SEM ve elementel haritalama analizlerinden emaye kaplamada ufak iyonik penetrasyondan kaynaklanan kimyasal değişimlerin dışında herhangi bir değişikliğin olmadığı gösterilmektedir.

Mifune vd. (2004), çift tabakalı ve kademeli kaplamaların karşılaştırdığı bir çalışmada, termal sprej yöntemiyle içerik olarak %15 CaO ile stabilize edilmiş ZrO kaplama üzerine

$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  kaplanarak üretilen çift tabakalı (C<sub>2</sub>S-15CZ) TBC ve %8  $\text{Y}_2\text{O}_3$  ile stabilize edilmiş olan (8YSZ) kademeli TBC kaplamalar sıcak korozyon testine tabi tutulmuştur. 1000 °C' de, fırın ortamında 3 saat tutularak sonrasında oda sıcaklığına soğutma rejiminin uygulandığı, %85  $\text{V}_2\text{O}_5$  ve %15  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  tuz karışımının sıcak korozyon etkisinin incelenmesinde referans alındığı çalışmada yapılan incelemeler neticesinde  $\text{V}_2\text{O}_5$  tozunun geleneksel 8YSZ kaplamada bozulmalara sebebiyet verdiği, çift kaplamalı yapıda ise ilave üst kaplama yapısının sıcak korozyon etkisi sonucunda oluşan ergimiş tuzların bağ kaplamaya geçmesine engel olduğu gösterilmiştir.

Altuncu vd. (2008) tarafından farklı içeriğe sahip TBC'lerin (yitriya ve serya ile stabilize edilmiş zirkonya) sıcak korozyon testleri gerçekleştirilmiştir. TBC'ler 900 °C'de ağırlıkça %60  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ve %40  $\text{V}_2\text{O}_5$  ergimiş tuz banyosunda yaklaşık 75 saat bekletilmiştir. Test işleminin ardından gerçekleştirilen SEM, XRD ve EDS analizleri neticesinde YSZ esaslı kaplamalarda stabilizör  $\text{Y}_2\text{O}_3$  ile eriyik halde  $\text{V}_2\text{O}_5$  ve  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  karışım tuzlarının reaksiyonu sonucu monoklinik  $\text{ZrO}_2$  fazı ve  $\text{YVO}_4$  kristallerinin oluştuğu gözlenmiş ve oluşan yapıların üst kaplamada bozulmalara sebebiyet verdiği anlaşılmıştır. Diğer TBC numunelerinde ise stabilize edilmiş zirkonyada herhangi bir değişim gözlemlenmemiştir.

Feuerstein vd. (2007), günümüzde kullanılan termal sprej ve EB-PVD yöntemlerinin gaz türbin motorlarındaki TBC sistemlerinin hem teknik hem de ekonomik olarak ele aldıkları bir derleme çalışması gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, EB-PVD ile üretilen TBC'lerin kolonsal ve sık kaplama yapısına sahip olmasının yanında bağlanma etkisinin kimyasal olduğu, termal sprej yöntemi ile üretilen TBC'lerin ise laminer, porozite ve oksitli bir mikro yapıya sahip olmasının yanında bağlanma etkisinin mekanik bir etki sonucu olduğu belirtilmiştir.

## BÖLÜM 5

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

#### 5.1 Genel Sonuçlar

Yapılan deneysel çalışmada, Inconel 718 süper alaşım altlık malzeme üzerine, CGDS yöntemi kullanılarak CoNiCrAlY içerikli metalik bağ kaplamaların üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen bağ kaplamaların üzerine APS ve EB-PVD yöntemleri ayrı ayrı kullanılarak YSZ içerikli seramik üst kaplamanın üretimleri gerçekleştirilmiştir. Farklı üretim yöntemleri kullanılarak YSZ üst kaplaması üretilmiş olan TBC' ler yüksek sıcaklık fırınında 1000 °C' de, 4' er saatlik çevrim (fırın içi ısıtma ve oda sıcaklığına soğutma) süreçlerinde sıcak korozyon testine tabi tutulmuştur. Üretilen TBC sistemlerinin gerek üretim gerekse sıcak korozyon testleri sonrasında, XRD, SEM, EDS, elementel haritalama analizleri, sertlik ve porozite analizleri gerçekleştirilmiştir. Tüm bu analizler ile ara yüzey kesit ve üst yüzey görüntülerinden elde edilen mikro yapıların ayrıntılı incelemeleri neticesinde elde edilen genel sonuçlar maddeler halinde aşağıda belirtilmiştir:

1. CGDS yöntemi kullanılarak, Inconel 718 süper alaşım altlık malzeme üzerine CoNiCrAlY bağ kaplamaların üretimleri başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.
2. CGDS yöntemi kullanılarak üretilen metalik bağ kaplamaların üzerine YSZ içerikli seramik üst kaplamaların üretimleri APS ve EB-PVD yöntemleri ile başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiş ve farklı yapıdaki TBC sistemleri elde edilmiştir.
3. CGDS tekniği kullanılarak üretilen metalik bağ kaplama yapısının proses üretim özelliklerinden kaynaklı olarak yoğun yapıda, düşük porozite ve oksit içeriğine sahip olduğu görülmüştür. APS tekniği kullanılarak üretilen TBC sistemi laminer yapıda, yüksek porozite ve oksit içerikli bir yapıya sahip iken, EB-PVD tekniği kullanılarak üretilen TBC sisteminin kolonsal, düşük porozite ve oksit içeriğindeki bir yapıya sahip olduğu görülmüştür.

4. Sıcak korozyon testlerinin gerçekleştirildiği fırın ortamının atmosfer ortamına açık olmasından dolayı incelenen numunelerde sıcak korozyon etkisinin yanında, oksidasyon etkisi neticesinde oluşan TGO yapısı da gözlemlenmiştir. Oksidasyon etkisi neticesinde oluşan TGO yapısının uygulanan zaman süreçlerinin artması neticesinde artan kalınlığa sahip olduğu kaplamaların ara yüzey kesit incelemelerinin değerlendirmeleri sonucunda belirlenmiştir. Genel olarak  $Al_2O_3$  içerikli TGO yapısının bütünlüğünün Al' nin tükenmeye başlamasıyla NiO ve spinel gibi diğer karışık oksit formalarına dönüştüğü belirlenmiştir.
5. APS ve EB-PVD yöntemleriyle üretilmiş olan TBC sistemlerinin sıcak korozyon testlerinde kriter olarak belirlenen %40'lık hasar miktarına APS ile üretilmiş olan TBC sisteminde 12 saatlik sıcak korozyon etkisi neticesinde ulaşılırken, EB-PVD yöntemiyle üretilmiş olan TBC sisteminde 20 saatlik sıcak korozyon etkisi neticesinde ulaşılmıştır. Bu durum, EB-PVD yöntemiyle üretilmiş olan TBC sistemi yapısının sıcak korozyon etkisine daha dayanıklı olduğunu ve bu koşullar altında daha uzun çevrim ömrüne sahip olduğunu göstermektedir.
6. Sıcak korozyon testleri sonucunda, üst seramik kaplama yapılarında sinterleşme etkisinin olduğu SEM mikroyapısal incelemeleri, porozite analizleri ve sertlik değerlendirmeleri sonucunda görülmüştür. Sinterleşme etkisi neticesinde, üst seramik kaplama yapısındaki kolonlar arası ve açık porozitelerin kapandığı, yapısal yoğunlaşmanın arttığı hem mikroyapısal hem de mekanik testler sonucunda belirlenmiştir. Oluşan bu durum, TBC'lerin yüksek sıcaklık koşulları altında termo-mekanik gerilmeleri tolere etmeleri ve ısıl iletkenlik artışlarına sebebiyet vermesi sebebiyle istenmeyen bir hasar oluşum faktörüdür.
7. APS tekniği kullanılarak üretilmiş olan TBC sistemine ait üst kaplama yapısı yüksek porozite içeriğine sahiptir. Bu durum, yüksek sıcaklıkta gerçekleştirilen sıcak korozyon testi esnasında ergimiş hale geçen  $Na_2SO_4+V_2O_5$  tuzlarının kolay bir şekilde kaplama yapısı içerisine nüfus ederek reaksiyonlar için uygun ortam bulmasına sebebiyet vermiştir. EB-PVD tekniği kullanılarak üretilmiş olan TBC sistemine ait üst kaplama yapısı kolonsal, sık bir yapıda ve düşük



porozite içeriğine sahiptir. Bu duruma bağlı olarak, ergimiş tuzların kaplama yapısı içerisine nüfusiyeti zorlaşmakta ve daha fazla zaman süreci gerektirmektedir. Bu belirtilen durum neticesinde sıcak korozyon testlerinde, EB-PVD tekniği kullanılarak üretilen TBC sistemi, APS tekniği kullanılarak üretilen TBC sistemine oranla daha uzun çevrim test ömrüne sahip olmuştur.

8. TBC sistemlerine uygulanan sıcak korozyon testleri sonrasında gerçekleştirilen XRD analizleri neticesinde faz değişimlerinin olduğu gözlenmiştir. Sıcak korozyon testi öncesinde tamamen tetragonal  $ZrO_2$  faz yapısına sahip olan TBC sistemlerinin, test sonrasında monoklinik  $ZrO_2$ ,  $YVO_4$  ve tetragonal  $ZrO_2$ 'den oluşan faz yapılarının oluşum gösterdiği belirlenmiştir.
9. TBC sistemlerinin üst yüzey yapılarından elde edilen mikroyapısal görüntülerde, oluşan çubuksu yapıların yapılan EDS analizleri neticesinde  $YVO_4$  kristallerine ait olduğu anlaşılmıştır.  $YVO_4$  kristallerinin oluşumuna YSZ üst kaplama yapısından sızan  $Y_2O_3$  ve  $NaSO_4$  ve  $V_2O_5$  tuzlarının reaksiyonu neticesinde oluşan  $NaVO_3$  bileşimine ait kimyasal reaksiyonlarda katkıda bulunmuştur. TBC sistemlerindeki kaplamaların atmasına sebebiyet veren unsurların, oluşan çubuksu formdaki  $YVO_4$  kristallerinin yanında tetragonal faz yapısından monoklinik faz yapısına dönüşmüş olan  $ZrO_2$ 'ye ait (soğuması esnasındaki %3-5 oranında gerçekleşen hacimsel değişimler) hacimsel dönüşümler olduğu anlaşılmıştır.

Gerçekleştirilmiş olan bu çalışmada, biriktirme mekanizması ve proses özellikleri yönüyle diğer kaplama yöntemlerinden ayrılan yenilikçi proseslerden biri olan CGDS yöntemi kullanılarak CoNiCrAlY içerikli metalik bağ kaplamalar üretilmiştir. TBC sistemlerinin üst seramik kaplama yapıları ise, APS ve EB-PVD teknikleri kullanılarak üretilmiş ve sıcak korozyon test çevrim şartları altında her iki TBC sisteminin özellikleri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Yapılan çalışma ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilen deneysel verilerin literatürde bu alanda yapılan çalışmalara yol gösterici bir kaynak oluşturacağı düşünülmektedir.

## 5.2 Öneriler

Tez kapsamında elde edilen veriler ışığında ileride gerçekleştirilecek olası çalışmalar için öneriler aşağıda maddeler halinde verilmiştir;

1. Sıcak korozyon testlerinin gerçekleştirilmesi için gerekli olan tuzların karışım miktarlarının değiştirilerek farklı oranlarda  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ve  $\text{V}_2\text{O}_5$  içeriklerinin kullanılarak sıcak korozyon davranışlarının incelenmesi,
2. Sıcak korozyon mekanizmasını oluşturan tuzların çeşitleri ve kombinasyonları artırılarak (örneğin; deniz koşullarında kullanılan motorlar için ortama  $\text{NaCl}$  tuz ilavesinin katılması gibi) sıcak korozyon testlerinin yapılarak ayrıntılı incelemelerin gerçekleştirilmesi,
3. Sıcak korozyon fırın içi kalma test süresi, testlerin fırın ortamı, atmosferik şartlarda çevrimli olarak sürekli testlerin hale getirilmesi ve test sıcaklıklarının değiştirilerek belirtilen parametrelerin sıcak korozyon mekanizmasına olan etkilerin incelenmesi,
4. Farklı kompozisyonlara sahip üst kaplamaların ya da kademeli olarak çift kaplamaların üretilip kullanılarak, sıcak korozyon etkisinin mikroyapısal düzeyde ayrıntılı incelemelerinin gerçekleştirilmesi,
5. En az üç farklı sıcaklık ve farklı zaman süreçleri kullanılarak gerek mikroyapısal incelemeler ile gerekse kaplamaların ağırlık değişimlerinin sıcaklık-zaman süreçlerinde ölçülerek sıcak korozyon etkisinin mekanizma olarak ayrıntılı değerlendirilmesinin ve kinetiğinin çıkarılması gelecek çalışmalarda düşünülebilir.

## KAYNAKLAR

- 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 A*, 478: 264-269.
- 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.
- Ajaya, A., Rajaa, V.S., Sivakumarb, G. ve Joshi, S.V. (2015). Hot corrosion behavior of solution precursor and atmospheric plasma sprayed thermal barrier coatings. *Corrosion Science*, 98: 271–279.
- Altuncu, E., Üstel, F., Erdoğan, G. (2008). Sıcak korozyon ortamının plazma sprey tekniği ile üretilmiş termal bariyer kaplamalar üzerine etkileri, *11. Uluslar. Korozyon Semp. İzmir-KORSEM*, 429-437.
- Altuncu, E. (2011). YSZ ve CSZ Esaslı Termal Bariyer Kaplamaların Üretimi, Karakterizasyonu ve Termal Çevrim Performanslarının Karşılaştırılması. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilimdalı, Sakarya, 258 s.
- Arikawa, H., Kojma, Y., Okada, M., Hoskioka, T. ve Hisamatsu, T. (2007). Progress in thermal barrier coatings: oxidation behavior and main causes for accelerated oxidation in plasma sprayed thermal barrier coatings. *Ceramic Engineering and Science Proceedings*, 27 (3): 69-80.
- Bernier, J. (2001). Evolution and Characterization of Partially Stabilized zirconia (7wt% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) Thermal Barrier Coatings Deposited By Electronbeam Physical Vapor Deposition. A master's Thesis Submitted to the faculty of the Worcester Polytechnic Institute.
- Bose, S. (2007). *High Temperature Coatings*. Butterworth-Heinemann: Elsevier Burlington, 300 s.
- Clarke, D. R. ve Levi, C. G. (2003). Materials design for the next generation thermal barrier coatings. *Annual Review Of Materials Research*, 33: 383–417.
- Çay, V. V. ve Ozan, S. (2005). *Süperalaşım ve Uygulama Alanları*. Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları. Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü-ELAZIĞ.
- Davis, J. R. (2004). *Handbook of Thermal Spray Technology*. ASM International: Ohio.
- DeMasi-Martin, J. T. (1994). Protective coatings in the gas turbine engine. *Surface and Coatings Technology*, 68/69: 1-9.

- Döleker, M. (2015). Bilyali 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.
- Dorfman, M. R. (2012). *Handbook of Environmental Degradation of Materials*. Elsevier: New York.
- Eliasz, N., Shemesh, G. ve Latanision, R. M. (2002). Hot corrosion in gas turbine components. *Engineering Failure Analysis*, 9: 31-43.
- Erdoğan, G. (2009). Çevresel Bariyer Kaplamaların Üretimi ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya, 83 s.
- Evans, A. G., Mumma, D. R., Hutchinson, J. W., Meierc, G. H. ve Pettit, F. S. (2001). Mechanisms controlling the durability of thermal barrier coatings. *Progress in Materials Science*, 46 (5): 505-553.
- Feuerstein, A., Knapp, J., Taylor, T., Ashary, A., Bolcavage, A. ve Hitchman, N. (2007). Technical and economical aspects of current thermal barrier coating systems for gas turbine engines by thermal spray and EBPVD: A Review. *Journal of Thermal Spray Technology*, 17(2): 199-213.
- Güleç, A. (2006). Termal Püskürtme Tekniği ile Yüksek Performanslı Zn/Al (85/15) Kaplamaların Üretimi ve Karakterizasyonu. Yüksek lisans Tezi, Sakarya Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya, 117 s.
- 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. 1-107 s.
- Hass, D. D., (2000). Directed Vapor Deposition of Thermal Barrier Coatings Ph.D. Dissertation, University of Virginia.
- Herman, H. ve Shankar, N. R. (1987). Survivability of thermal barrier coatings. *Materials Science & Engineering*, 88: 69-74.
- Jones, R. L. (1997). Some aspects of the hot corrosion of thermal barrier coatings. *Journey of Thermal Spray Technology*, 6: 77-84.
- Karaali, E.İ. (2008). TBK Kaplamaların Termal Şok Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya, 109 s.

- Karaođlanli, A. C., Dikici, H. ve Kùçük, Y. (2013). Effects of heat treatment on adhesion strength of thermal barrier coating systems. *Engineering Failure Analysis*, 32: 16-22.
- Karaoğlanli, A. C. (2012). Termal Bariyer Kaplamalarda Bağ Tabakasının Farklı Yöntemlerle Üretilmesi ve Özelliklere Etkisi. (Yayınlanmamış doktora tezi), Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya, 225 s.
- Karaoğlanlı A. C., Türk, A. ve Özdemir, İ. (2013). Seramik esaslı plazma sprej kaplamaların oksidasyon davranışlarının incelenmesi. *Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering*, 14: 401-405.
- Karaoğlanlı, A. C., Türk, A. ve Üstel, F. (2013). Soğuk gaz dinamik sprej (CGDS) kaplama teknolojisi ve uygulamaları. *Akademik Platform Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 1(1): 20-27.
- Karaoğlanli, A. C., Ogawa, K., Türk A., ve Özdemir, İ. (2014). Thermal Shock and Cycling Behavior of Thermal Barrier Coatings (TBCs) Used in Gas Turbines, Chapter 10. *In Progress in Gas Turbine Performance*. InTech.
- Landolt, D. (2007). *Corrosion and Surface Chemistry of Metals*. Taylor and Francis Group: Lausanne.
- Liu, J. (2004). Effects of Bond Coat Surface Preparation on Thermal Cycling Lifetime And Failure Characteristic of Thermal Barrier Coatings. (Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi). University of Central Florida, Department of Mechanical, Materials, and Aerospace Engineering, Florida, 109 s.
- Mao, S. X. (2003). *Impermeable Thin Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Overlay For TBC Protection From Sulfate and Vanadate Attack in Gas Turbines*. Quarterly Progress Report. Department of Mechanical Engineering University of Pittsburgh, Pittsburgh.
- Mifune, N., Harada, Y., Doi, T. ve Yamasaki, R. (2004). Hot-corrosion behavior of graded thermal barrier coatings formed by plasma-spraying process. *Journal of Thermal Spray Technology*, 13: 561-569.
- Miller, R.A. (1997). Thermal barrier coatings for aircraft engines: History and directions. *Journal of Thermal Spray Technology*, 6(1): 35-42.
- Mobarra, R., Jafari, A. H. ve Karaminezhad, M. (2006). Hot corrosion behavior of MCrAlY coatings on IN738LC. *Surface & Coatings Technology*. 201:2202-2207.
- Mouritz, A. (2012). *Introduction to Aerospace Materials*. Woodhead Publishing: Philadelphia.
- Padmavathi, C., Upadhyaya, A. ve Agrawal, D. (2007). Corrosion behavior of microwave sintered austenitic stainless steel composites. *Scripta Materialia*, 57: 651-654.

- Pawlowski, L. (2008). *The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings: Second Edition*. John Wiley & Sons: Chichester.
- Reddy, N., Gandhi, A. S. (2013). Molten salt attack on yttria-stabilised zirconia by dissolution and precipitation, *Journal of the European Ceramic Society*, 3: 1867-1874
- Saral, U. (2007). Alümina İlavesinin YSZ Termal Bariyer Kaplamaların Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya, 85 s.
- Saremi, M., Afrasiabi, A. ve Kobayashi, A. (2007). Bond coat oxidation and hot corrosion behavior of plasma sprayed YSZ coating on Ni superalloy. *Transactions of JWRI*, 36(1): 41-45.
- Schulz, U., Saint-Ramond, B., Lavigne, O., Moretto, P., Vanlieshcu, A. ve Borger, A. (2004). Progress in thermal barrier coatings: low thermal conductivity ceramics for turbine blade thermal barrier coating application. *Ceramic Engineering and Science Proceedings*, 25 (4):375-380.
- Saowanee, S., Vishnu, R. ve Sutham, N. (2011). A Thermal Coating Process Using Self-Propagating High-Temperature Synthesis Assisted Flame Spray Coating. Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Thailand, 403 s.
- Szulc, M., (2004). Manufacture and Characterization of Plasma-Sprayed, Segmented  $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$  Based Thermal Barrier Coatings. Master Thesis, Silesian University of Technology Dept. Material Engineering and Metalurgy Katowice University of Applied Sciences Steinfurt.
- Şeker, İ. Y. (2009). Ark Sprey Teknolojisi Yardımıyla Üretilen Krom İçerikli Kaplamaların Karakterizasyonu. Yüksek lisans Tezi, Sakarya Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya, 116 s.
- Tafralı, M. (2006). Tel Püskürtme ile Kaplamada Püskürtme Parametrelerinin Mikroyapı ve Gözenekliliğe Etkisi. Yüksek Lisans Tezi (yayınlanmış), Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Anabilim Dalı, Ankara, 96 s.
- Tozkoparan, D. (2010). Plazma Sprey Kaplama Kalitesine Etki Eden Faktörlerin Taguchi Yöntemiyle Optimizasyonu. Yüksek lisans Tezi, Sakarya Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya, 76 s.
- Wright, P. K. ve Evans, A. G. (1999). Mechanisms governing the performance of thermal barrier coatings. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 4: 255-265.
- Xie, D., Xiong, Y. ve Wang, F. (2003). Effect of an enamel coating on the oxidation and hot corrosion behavior of an HVOF-sprayed Co-Ni-Cr-Al-Y coating. *Oxidation of Metals*, 59: 503-516.

- Xu, H. ve Guo, H. (2011). *Thermal barrier coatings*. Woodhead Publishing: Cambridge.
- Yılmaz, M. (1997). Seramik Kaplamalarda Ara Malzeme ve Porozitenin Termal Şok Üzerine Etkisi. Yüksek lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya, 84 s.
- Young, D. (2008). *High Temperature Oxidation and Corrosion of Metals*. Elsevier: Amsterdam.
- 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.

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Yasin ÖZGÜRLÜK  
Doğum Yeri ve Tarihi : İZMİR / 01.03.1988

### Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi : Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği (2007-2011)  
Yüksek Lisans Öğrenimi : Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği (2013-2016)  
Bildiği Yabancı Diller : İngilizce (Orta Derecede)  
Bilimsel Faaliyet/Yayımlar : -  
Aldığı Ödüller : Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölüm 3.' lüğü

### İş Deneyimi

Stajlar : İzmir Demir Çelik (İzmir, 2010)  
Tisaş (Trabzon Silah Sanayi) (Trabzon, 2009)  
Özkan Demir Çelik (İzmir, 2009)  
Projeler ve Kurs Belgeleri : ISO 9001: 2008 Kalite Yönetim Sistemi  
OHSAS 18001: 2007 İş Sağlığı ve İş Güvenliği Standardı  
Çalıştığı Kurumlar : Bartın Üniversitesi (halen devam ediyor)

### İletişim

E-Posta Adresi : yozgurluk@bartin.edu.tr

Tarih : 14.01.2016 (Tez Sınav Tarihi)