

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

**FARKLI ÜST KAPLAMA İÇERİĞİNE SAHİP TERMAL BARIYER
KAPLAMALARIN (TBC) OKSİDASYON DAVRANIŞLARININ
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**HAZIRLAYAN
NİHAL MEŞEKİRAN**

**DANIŞMAN
YRD. DOÇ. DR. A. CAHİT KARAOĞLANLI**

BARTIN-2015

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

**FARKLI ÜST KAPLAMA İÇERİĞİNE SAHİP TERMAL BARIYER
KAPLAMALARIN (TBC) OKSİDASYON DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZIRLAYAN
Nihal MEŞEKİRAN

2008

DANIŞMAN
Yrd. Doç. Dr. Abdullah Cahit KARAOĞLANLI

BARTIN-2015

KABUL VE ONAY

Nihal MEŞEKİRAN tarafından hazırlanan “FARKLI ÜST KAPLAMA İÇERİĞİNE SAHİP TERMAL BARIYER KAPLAMALARIN (TBC) OKSİDASYON DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ” başlıklı bu çalışma, 28.08.2015 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 : Yrd. Doç. Dr. Yunus TÜREN

Üye : Yrd. Doç. Dr. Gülfem BİNAL

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

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

BEYANNAME

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

28.08.2015

Nihal MEŞEKİRAN

ÖNSÖZ

Bu tezin hazırlanma aşamasında, yardımlarını ve fedakarlığını esirgemeyen, çalışma sürecim boyunca bilgi ve tecrübeleriyle bana ışık tutan, desteğini her daim hissettiğim ve örnek aldığım saygıdeğer danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Abdullah Cahit KARAOĞLANLI' ya, deneysel çalışmalarım sürecinde desteklerini esirgemeyen Arş. Gör. Kadir Mert DÖLEKER, Arş. Gör. Yasin ÖZGÜRLÜK, Arş. Gör. Mecit ÖGE ve Uzm. Halil EŞGİN' e, bütün eğitim hayatım boyunca bana ilham veren ve her başarımda yanımda hissettiğim başta annem Fatma Menekşe MEŞEKİRAN, babam Fahri MEŞEKİRAN olmak üzere sevgili aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca TÜBİTAK 113R049 No' lu projeye, çalışmalarımda kullandığım CoNiCrAlY metalik bağ kaplamaların üretimleri konusunda sağlamış olduğu bilgi deneyimi ve sonrasında gerçekleştirilen testlerin koşullarının belirlenmesi için sağlamış olduğu destekten dolayı teşekkürü bir borç bilirim. Bu çalışmamı aileme ve sevdiklerime ithaf ediyorum.

Nihal MEŞEKİRAN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FARKLI ÜST KAPLAMA İÇERİĞİNE SAHİP TERMAL BARIYER KAPLAMALARIN (TBC) OKSİDASYON DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Nihal MEŞEKİRAN

Bartın Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

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

Bartın-2015, sayfa: XIX + 115

Termal Bariyer Kaplamalar (TBC), uzay ve uçak endüstrisinde, gaz türbin motorlarının yanma odaları ve türbin kanatçıkları gibi yüksek sıcaklığa maruz kalmış kritik bölge parçalarında sıklıkla tercih edilen, ısı izolasyonu amaçlı olarak kullanılan 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, CoNiCrAlY metalik bağ kaplama Atmosferik Plazma Sprey (APS) yöntemi kullanılarak yaklaşık olarak 100 µm kalınlığında üretilmiştir. Bağ kaplama sonrasında 300 µm kalınlığında, sırasıyla $ZrO_2+Y_2O_3$ (YSZ) ve ZrO_2+MgO olmak üzere iki farklı seramik üst kaplama malzemesi kullanılarak TBC' lerin üretimi tamamlanmıştır. Oksidasyon testi öncesi numuneler, metalografik açıdan incelemeye tabi tutularak yüzey pürüzlülük, porozite, sertlik değerleri ve Mikroyapısal özellikleri incelenerek oksidasyon testi sonrasındaki bulgularla karşılaştırılmıştır. İki farklı üst kaplama malzemesine sahip olan TBC sistemleri sırasıyla 900 °C, 1000 °C ve 1100 °C sıcaklıklarda 8, 24, 50 ve 100 saatlik zaman süreçlerinde izotermal oksidasyon testlerine tabi tutulmuştur. Oksidasyon testleri sonrası numunelerin XRD, SEM, EDX-elementel analiz, Termal Büyüyen Oksit tabakası (TGO) kalınlık değişimleri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Elde edilen veriler gerçekleştirilen testler öncesi

ve sonrasında karşılaştırılmış, bulgular literatürde yapılan çalışmalar ile tartışmalı olarak değerlendirilerek kayda alınmıştır.

Anahtar Kelimeler

Atmosferik Plazma Sprey (APS); Termal Bariyer Kaplama (TBC); Termal Olarak Büyüyen Oksit Tabaka (TGO); Oksidasyon

Bilim Kodu

604.02.01

ABSTRACT

Master's Thesis

INVESTIGATION OF OXIDATION BEHAVIOUR OF THERMAL BARRIER COATINGS (TBC) WITH DIFFERING TOP COATING CONTENTS

Nihal MEŞEKİRAN

Bartın University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Metallurgical and Materials Engineering

Thesis Advisor: Assistant Prof. Dr. Abdullah Cahit KARAOĞLANLI

Bartın-2015, pp: XIX + 115

Thermal Barrier Coatings (TBCs) is the coating type commonly preferred in aerospace and aircraft industry for critical region parts exposed to high temperatures such as the combustion chambers of gas turbine motors and turbine blades as a means for thermal insulation. TBCs provide protection 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 was deposited on Inconel 718 superalloy substrate material with a thickness about 100 μm using Atmospheric Plasma Spray (APS) method. Production of TBCs was accomplished with deposition of $\text{ZrO}_2+\text{Y}_2\text{O}_3$ (YSZ) and ZrO_2+MgO respectively, as two different ceramic top coating materials, having a total thickness of 300 μm . The specimens were subjected to metallographic investigation before the oxidation test, their surface roughness, porosity, hardness and microstructural properties were investigated and then compared with the results obtained after the oxidation test. The TBC systems with two different top coating material were subjected to isothermal oxidation tests at 900 °C, 1000 °C and 1100 °C for 8, 24, 50 hour periods, respectively. After the oxidation tests, XRD, SEM, EDX-elemental analyses as well as the changes in the thickness of Thermal Growth Oxide Layer (TGO) were investigated in detail. The obtained data were compared before and after the tests, and

the findings were evaluated and recorded in light of other related studies within the literature.

Key Words

Atmospheric Plasma Spray (APS); Thermal Barrier Coating (TBC); Thermally Grown Oxide Layer (TGO); Oxidation

Science Code

604.02.01

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL VE ONAY	ii
BEYANNAME.....	iii
ÖNSÖZ.....	iv
ÖZET	v
ABSTRACT	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLolar DİZİNİ.....	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xviii
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 Alev Sprey Kaplama Yöntemi	14
2.1.2 Elektrik Ark Sprey Kaplama Yöntemi	17
2.1.3 Plazma Sprey Kaplama Yöntemi	21
2.1.3.1 Plazmanın Tanımı.....	21
2.1.3.2 Atmosferik Plazma Sprey (APS) Kaplama Yöntemi	22
2.1.3.3 Vakum Plazma Sprey (VPS) Kaplama Yöntemi.....	28
2.1.4 Detonasyon Tabancalı (D-Gun) Sprey Kaplama Yöntemi	30
2.1.5 Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt (HVOF) Sprey Kaplama Yöntemi	32
2.1.6 Soğuk Gaz Dinamik Sprey (CGDS) Kaplama Yöntemi	35
2.2 Termal Bariyer Kaplamalar	37
2.2.1 Termal Bariyer Kaplamaların Hasar Oluşum Mekanizmaları	42
2.2.1.1 Termal Bariyer Kaplamaların Oksidasyon Davranışı	43
2.2.1.2 Termal Bariyer Kaplamalar Üzerine Sıcak Korozyonun Etkisi.....	48

BÖLÜM 3 MATERYAL VE YÖNTEM	54
3.1 Amaç	54
3.2 Toz ve Altık Malzemelerin Karakterizasyonu	54
3.2.1 Toz Malzemelerin Mikroyapısal Karakterizasyonu	55
3.2.2 Altık Malzemenin Kimyasal Kompozisyonu	56
3.3 Bağ Kaplamaların Üretilmesi	57
3.4 Bağ Kaplamaların Porozite Ölçümleri	59
3.5 Bağ ve Üst Kaplama Tabakalarının Yüzey Pürüzlülük Değerlerinin Ölçülmesi ...	59
3.6 Termal Bariyer Kaplamaların Üretilmesi	60
3.7 Altık Malzeme ile Bağ ve Üst Seramik Kaplamaların Sertlik Değerleri	62
3.8 Termal Bariyer Kaplamaların Oksidasyon Testleri	63
3.9 Termal Bariyer Kaplamaların Karakterizasyonu	64
BÖLÜM 4 BULGULAR VE TARTIŞMA	67
4.1 TBC' lerin Mikroyapısal Olarak İncelenmesi	67
4.1.1 Oksidasyon Testi Öncesi TBC' lerin Mikroyapıları	67
4.1.2 Oksidasyon Testi Sonrası TBC' lerin Mikroyapısal Farklılıkları	70
4.1.2.1 900 °C' de 8, 24, 50 ve 100 saatlik Oksidasyon Testi Sonrası TBC' lerin Mikroyapıları	70
4.1.2.2 1000 °C' de 8, 24, 50 ve 100 saatlik Oksidasyon Testi Sonrası TBC' lerin Mikroyapıları	77
4.1.2.3 1100 °C' de 8, 24, 50 ve 100 saatlik Oksidasyon Testi Sonrası TBC' lerin Mikroyapıları	83
4.1.3 Oksidasyon Testleri Sonrasında TGO Büyüme Değerlerinin İncelenmesi	87
4.1.4 TBC' lerin XRD Analizleri	92
4.1.4.1 Oksidasyon Testi Öncesi Kaplamaların XRD Analizleri	92
4.1.4.2 Toz Malzemelerin XRD Analizleri	93
4.1.4.3 Oksidasyon Testi Sonrası Üst Kaplamaların XRD Analizleri	95
4.2 Oksidasyon Testleri Sonrasında YSZ ve ZrO ₂ +MgO İçerikli Üst Kaplama Tabakasına Sahip TBC' lerde Meydana Gelen Mikroyapısal Değişimler ile TGO Büyüme Davranışlarının Tartışılması	100

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 5 SONUÇLAR VE ÖNERİLER	106
5.1 Genel Sonuçlar.....	106
5.2 Öneriler	108
KAYNAKLAR.....	110
ÖZGEÇMİŞ.....	115

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Sayfa No
1. Deneysel çalışmalarda izlenen yöntem ve çalışma planı	4
2. Termal sprej kaplamaların gelişimi, ekipmanları ve süreçlerin grafiksel gösterimi	6
3. Termal sprej kaplamanın şematik görünümü	7
4. Termal sprej yönteminde kullanılan kaplama malzemeleri	8
5. Termal sprej kaplama yöntemlerinin sınıflandırılması	9
6. Termal sprej kaplama proseslerinin oksit ve porozite oranlarının karşılaştırılması	10
7. Termal sprej kaplama yöntemlerinin birikme verimi ve kg/saatte birikme hızları.	10
8. Termal sprej kaplama yöntemlerinin yatırım maliyetlerinin karşılaştırılması	11
9. Çeşitli kaplama yöntemlerinin altlık sıcaklığı ve kaplama kalınlığı açısından karşılaştırılması.....	12
10. (a) Tel alev sprej yöntemi, (b) Toz alev sprej yöntemi gösterimi	15
11. Tel, çubuk veya şerit formunda alev püskürtme tabancasının kesiti	16
12. Alevle toz sprej kaplama yönteminin şematik gösterimi	17
13. Elektrik ark sprej tabancasının şematik gösterimi.....	18
14. Elektrik ark sprej kaplama yönteminin şematik gösterimi.....	19
15. İyonlaşma ve plazma oluşumu	22
16. Plazma sprej kaplama tabancası şematik gösterimi	23
17. Plazma sprej kaplama tabancasının elemanları.....	23
18. Plazma sprej kaplama yönteminin gösterimi	24
19. Plazma sprej kaplama yönteminin kaplama, splat yapısı ve kullanılan toz mikroyapısı ile birlikte şematik olarak gösterimi	25
20. Plazma sprej kaplama yönteminin oluşum mekanizmasının gösterimi	26
21. (a) Yüksek oksijen düzeyli NiAl kaplama, (b) Tipik gaz seviyeli 80Ni/20Cr kaplama.....	27
22. Vakum plazma sprej kaplama yönteminin şematik gösterimi	28
23. VPS kaplama yöntemi kullanılarak tipik MCrAlY kaplamasının mikroyapısı	29
24. Detonasyon tabancalı (D-Gun) sprej kaplama yönteminin şematik gösterimi	31
25. HVOF tabancasının şematik görünümü	33
26. HVOF sprej kaplama yönteminin şematik gösterimi.....	33

Şekil	Sayfa
No	No
27. HVOF yöntemi kullanılarak (a) Ni, (b) Alumina, (c) WC/Co esaslı kaplamaların mikro yapılarının gösterimi.....	34
28. CGDS yönteminin şematik gösterimi	36
29. Soğuk sprej proses ile üretilmiş kaplama kesitlerinin mikroyapı görünümleri.....	36
30. Tipik bir TBC sisteminin gösterimi	38
31. TBC sisteminde rastlanan tipik bir servis hasarının gösterimi.....	38
32. (a) Uçakların gaz türbin motorlarının iç yapısı ve (b) dış yapısının gösterimi	40
33. Yalın halde ve TBC kaplanmış türbin kanatçıklarının gösterimi	41
34. Ellingham diyagramının gösterimi.....	46
35. NiCrAlY alaşımlı bağ kaplama tabakası tozlarının mikroyapı gösterimi.....	47
36. PS kaplama yöntemiyle kaplanmış malzemelerin (a) oksidasyon öncesi, (b) 1100 °C' de 100 saat oksidasyon testi sonrası enine kesitini gösteren SEM görüntüleri ..	48
37. Plazma sprej kaplama tekniğiyle kaplanmış (a) YSZ seramik tabakanın mikroyapı görüntüsü, (b) 75 saat 900 °C sıcak korozyon testi sonrası YSZ kaplamaların üst yüzey SEM görüntüsü	50
38. 1050 °C' de 40 saat sıcak korozyon testi sonrası monoklinik ZrO ₂ ve YVO ₄ kristallerinin oluşumu sonucunda plazma sprej tekniğiyle kaplanmış YSZ seramik kaplamanın SEM görüntüsü.....	51
39. Kaplama tozlarının SEM mikroskopundaki görünümleri; (a) CoNiCrAlY, (b) ZrO ₂ -%8Y ₂ O ₃ , (c) ZrO ₂ -MgO.....	55
40. Silindirik formdaki altlık malzemenin tel erozyon yöntemiyle disk formuna getirilmesi.....	57
41. Kumlama işleminin gerçekleştirildiği ekipmanın gösterimi	57
42. Bağ kaplama üretiminde kullanılan Sulzer Metco marka APS cihazının görünümü.....	58
43. SJ-310 Mitutoyo marka yüzey pürüzlülük ölçüm cihazının gösterimi	59
44. Deneysel çalışmamızda kullandığımız APS yöntemiyle kaplanmış YSZ üst seramik kaplama tabakasına sahip numunelerin gösterimi	62

Şekil No	Sayfa No
45. TBC üretiminde; (a) Altlık malzeme, (b) Altlık malzeme üzerine kumlama işleminin yapılması, (c) CoNiCrAlY metalik bağ kaplamasının üretilmesi, (d) Oksidasyon testi öncesi sırasıyla YSZ ve ZrO ₂ +MgO içerikli üst seramik kaplamaların iki farklı numune üzerine uygulanması, (e) Oksidasyon testi sonrası iki farklı üst kaplama tabakasına sahip olan numunelerdeki değişimin gösterimi	64
46. APS yöntemi kullanılarak üretilen CoNiCrAlY içerikli metalik bağ ve YSZ üst seramik kaplama tabakasına sahip TBC sisteminin ara yüzey SEM görüntüsü.....	68
47. APS yöntemi kullanılarak üretilen YSZ üst seramik kaplama tabakasına sahip TBC sisteminin A) 300x, B) 600x büyütmedeki SEM görüntüleri	68
48. APS yöntemi ile üretilen CoNiCrAlY içerikli metalik bağ ve ZrO ₂ +MgO içerikli üst seramik kaplama tabakasına sahip TBC sisteminin SEM ara yüzey görüntüsü.	69
49. APS yöntemiyle üretilen ZrO ₂ +MgO içerikli üst seramik kaplama tabakasına sahip TBC sisteminin A) 600x, B) 2500x büyütmedeki SEM görüntüleri	70
50. 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.....	71
51. APS-YSZ üst seramik kaplama tabakasına sahip TBC yapısının 900 °C' de 100 saatlik oksidasyon sonrası elementel analiz görüntüsü	73
52. APS CoNiCrAlY bağ ve APS ZrO ₂ +MgO 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.....	74
53. APS- ZrO ₂ +MgO üst seramik kaplama tabakasına sahip TBC yapısının 900 °C' de 100 saatlik oksidasyon sonrası elementel analiz görüntüsü	76
54. APS CoNiCrAlY bağ ve APS YSZ üst seramik kaplamaya ait 1000 °C' de oksidasyon testi sonrası 2500x büyütmedeki SEM mikroyapıları; A) 8 saat, B) 24 saat, C) 50 saat ve D) 100 saat	78
55. APS-YSZ üst seramik kaplama tabakasına sahip TBC yapısının 1000 °C' de 100 saatlik oksidasyon sonrası elementel analiz görüntüsü	79
56. APS CoNiCrAlY bağ ve APS ZrO ₂ +MgO üst seramik kaplamaya ait 1000 °C' de oksidasyon testi sonrası 2500x büyütmedeki SEM mikroyapıları; A) 8 saat, B) 24 saat, C) 50 saat ve D) 100 saat.....	81

Şekil No	Sayfa No
57. APS-ZrO ₂ +MgO üst seramik kaplama tabakasına sahip TBC yapısının 1000 °C' de 100 saatlik oksidasyon sonrası elementel analiz görüntüsü.....	82
58. APS CoNiCrAlY bağ ve APS-YSZ üst seramik kaplamaya ait 1100 °C' de oksidasyon testi sonrası 2500x büyütmedeki SEM mikroyapıları; A) 8 saat, B) 24 saat, C) 50 saat ve D) 100 saat.....	84
59. APS-YSZ üst seramik kaplama tabakasına sahip TBC yapısının 1100 °C' de 100 saatlik oksidasyon sonrası elementel analiz görüntüsü	85
60. APS CoNiCrAlY bağ ve APS ZrO ₂ +MgO üst seramik kaplamaya ait 1100 °C' de oksidasyon testi sonrası 2500x büyütmedeki SEM mikroyapıları; A) 8 saat, B) 24 saat	87
61. Oksidasyon sonrası TGO kalınlık ölçümü yapılmış APS-YSZ üst kaplama içerikli TBC mikroyapısı	88
62. Oksidasyon sonrası TGO kalınlık ölçümü yapılmış APS-ZrO ₂ +MgO üst kaplama içerikli TBC mikroyapısı	89
63. 900 °C' de 8, 24, 50 ve 100 saat oksidasyon sonrası YSZ ve ZrO ₂ +MgO üst kaplama tabakasına sahip TBC' lerin TGO değerleri.....	90
64. 1000 °C' de 8, 24, 50 ve 100 saat oksidasyon sonrası YSZ ve ZrO ₂ +MgO üst kaplama tabakasına sahip TBC' lerin TGO değerleri.....	91
65. 1100 °C' de 8, 24, 50 ve 100 saat oksidasyon sonrası YSZ ve ZrO ₂ +MgO üst kaplama tabakasına sahip TBC' lerin TGO değerleri.....	91
66. Oksidasyon testi öncesi APS-YSZ içerikli üst kaplamalara ait XRD paternleri	92
67. Oksidasyon testi öncesi APS-ZrO ₂ +MgO içerikli üst kaplamalara ait XRD paternleri	93
68. Metalik bağ kaplamaların üretiminde kullanılan CoNiCrAlY tozunun XRD paternleri	94
69. Üst kaplamaların üretiminde kullanılan ZrO ₂ +%8Y ₂ O ₃ (YSZ) tozunun XRD paternleri	94
70. Üst kaplamaların üretiminde kullanılan ZrO ₂ +MgO tozunun XRD paternleri.....	95
71. APS yöntemiyle üretimleri gerçekleştirilen ZrO ₂ +Y ₂ O ₃ (YSZ) içerikli üst seramik kaplamanın 900 °C 100 saatlik oksidasyon testi sonrası XRD paternleri...	96

Şekil	Sayfa
No	No
72.	APS yöntemiyle üretimleri gerçekleştirilen $ZrO_2+Y_2O_3$ (YSZ) içerikli üst seramik kaplamanın 1000 °C 100 saatlik oksidasyon testi sonrası XRD paternleri.96
73.	APS yöntemiyle üretimleri gerçekleştirilen $ZrO_2+Y_2O_3$ (YSZ) içerikli üst seramik kaplamanın 1100 °C 100 saatlik oksidasyon testi sonrası XRD paternleri.97
74.	APS yöntemiyle üretimleri gerçekleştirilen ZrO_2+MgO içerikli üst seramik kaplamanın 900 °C 100 saatlik oksidasyon testi sonrası XRD paternleri.....98
75.	APS yöntemiyle üretimleri gerçekleştirilen ZrO_2+MgO içerikli üst seramik kaplamanın 1000 °C 100 saatlik oksidasyon testi sonrası XRD paternleri.....98
76.	APS yöntemiyle üretimleri gerçekleştirilen ZrO_2+MgO içerikli üst seramik kaplamanın 1100 °C 100 saatlik oksidasyon testi sonrası XRD paternleri.....99

TABLULAR DİZİNİ

Tablo		Sayfa
No		No
1.	Termal sprej kaplama proseslerinin karşılaştırılması.....	12
2.	Termal sprej yöntemlerinin bazı karakteristik özellikleri	13
3.	Çeşitli malzemeler için elektrik ark sprej kaplama yönteminin çalışma değerleri .	20
4.	Ni esaslı süper alaşım Inconel-718 malzemesinin kimyasal kompozisyonu	56
5.	CoNiCrAlY bağ kaplama üretiminde kullanılan kaplama parametreleri.....	58
6.	Oksidasyon testi öncesi bağ kaplamaların porozite oranları.....	59
7.	Oksidasyon testi öncesi bağ ve üst seramik kaplamaların yüzey pürüzlülük değerleri.....	60
8.	Bağ ve üst kaplamalarda kullanılan tabanca ve toz malzemelerinin özellikleri	61
9.	İki farklı üst seramik kaplamaların üretiminde kullanılan parametreler	62
10.	İki farklı üst seramik kaplama tabakasına sahip numunelerin bağ ve üst kaplamaları ile altlık malzemenin sertlik değerleri	63
11.	Zımparalama ve parlatma işlemi esnasında tercih edilen parametreler	65
12.	YSZ ve ZrO ₂ +MgO içerikli üst kaplamaya sahip numunelerin 8, 24, 50 ve 100 saat 900 °C, 1000 °C ve 1100 °C' deki oksidasyon testleri sonrasında TGO tabakası kalınlık değerleri (µm).....	90

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	: amper
Ar	: argon
Al	: alüminyum
Cr	: krom
Co	: kobalt
Ni	: nikel
cm	: santimetre
CoNiCrAlY	: kobalt nikel krom alüminyum yitria
g/dk	: gram/dakika
H	: hidrojen
K	: kelvin
kPa	: kilo paskal
kN	: kilo newton
kW	: kilo watt
kW/s	: kilo watt/saniye
m/sn	: metre/saniye
m/dk	: metre/dakika
MCrAlY	: metal krom alüminyum yitria
mm	: milimetre
MPa	: mega paskal
Pa	: Pa
s	: saniye
µm	: mikrometre
°C	: celcius
α	: alfa
β	: beta
γ	: gama
θ	: teta

KISALTMALAR

APS	: Atmosferik plazma sprej
CGDS	: Soğuk gaz dinamik sprej
CVD	: Kimyasal buhar biriktirme
D-Gun	: Detonasyon tabancası
EB-PVD	: Elektron ışını-fiziksel buhar biriktirme
EDX	: Elementel dağılım analizi
HVOF	: Yüksek hız oksijen-yakıt sprej
LPPS	: Düşük basınçlı sprej
PS	: Plazma sprej
PVD	: Fiziksel buhar biriktirme
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
TBC	: Termal bariyer kaplama
TGO	: Termal büyüyen oksit tabaka
TIG	: Tungsten inert gaz
MIG	: Metal inert gaz
VPS	: Vakum plazma sprej
YSZ	: Yitria ile stabilize edilmiş zirkonya

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 Giriş

Geçmişten günümüze birçok platformda tercih edilen termal bariyer kaplamalar, son yıllarda havacılık ve uzay endüstrisinde ön plana çıkmaktadır. Bunun en önemli sebepleri arasında yüksek sıcaklığa maruz kalan geleneksel gaz türbin parçaları, yanma motorları ve bu sistemlere ait parçaların hasara uğraması gelmektedir. Kullanılan yakıtın yüksek sıcaklıklarda yanması sebebiyle vuku bulan hasarları minimize edebilmek amacıyla süper alaşımlı malzemelere ihtiyaç duyulmuştur. Dayanım arttırıcı özelliğinden dolayı tercih edilen süper alaşımlı malzemeler, soğutma sistemlerinin desteğiyle kullanılmaya başlanmıştır. Fakat zaman geçtikçe hasar mekanizmaları uygulama alanlarında gün yüzüne çıkarak, üreticiyi farklı bir çözüm sürecine sokmuştur. Oksidasyon, korozyon ve termal şok gibi birçok olumsuz şartlara maruz kalan malzemeler, farklı kaplama tekniklerinin keşfiyle minimize edilmeye başlanmıştır. Böylelikle seramik içerikli malzemelerin de kaplama tekniklerinde kullanımı gün yüzüne çıkacaktır. Oksidasyon ve korozyon mekanizmalarına karşı yüksek dirence sahip olması ve düşük ısı iletkenlik katsayısı sebebiyle kaplama üretiminde tercih edilerek, TBC sistemlerinin temelleri atılmıştır (Davis, 2004).

Termal bariyer kaplamalar, genel olarak yanma hattı, iletim parçaları, motor bıçak ve kanatçıkları, gaz türbin motorlarındaki yanma parçaları ve vanalarda kullanılmaktadır. TBC' lerin kullanımıyla birlikte, söz konusu ekipmanların giriş sıcaklıkları azalarak, daha yüksek verim elde edilecektir. Hasarı minimize etmek için kullanıldıklarından, yüksek sıcaklıklarda soğutma sistemlerine daha az ihtiyaç duyulacaktır. Böylelikle ağırlık ve maliyet azalması sağlanacaktır. Termal bariyer kaplamalarda en çok karşılaşılan hasar mekanizmaları arasında, yüksek sıcaklık sebebiyle vuku bulan oksidasyon, yine yüksek sıcaklıklarda yakıtların yanma reaksiyonu sonucu türbin bıçaklarını hasara uğratması sebebiyle meydana gelen sıcak korozyon ve ani soğutmalar sonucunda kendini gösteren termal şok gelmektedir. Tüm bu hasar mekanizmalarına karşı malzemelerin korunması ve çalışma koşullarına dayanım ömrünü arttırabilmek amacıyla TBC sistemleri kullanılmaya başlanmıştır.

Tipik bir TBC sistemi; Ni esaslı süper alaşım altlıktan, seramik üst kaplamadan, seramik üst kaplamayı oksitlenmeden ve diğer olumsuz etkenlerden koruyan aynı zamanda metalik altlığa yapışmasını sağlayan (BC-Bond Coat) ve kaplama işlemi esnasında vuku bulan bir 'termal büyüyen oksit' ten (TGO) meydana gelmektedir (Dalkılıç ve Tanatmış, 2009). TBC sistemlerinin üretiminde farklı termal sprej kaplama yöntemleri kullanılmaktadır. Seramik üst kaplama üretiminde genellikle plazma sprej (PS) kaplama ve elektron ışını ile fiziksel buhar biriktirme yöntemleri (EB-PVD) tercih edilirken, metalik bağ kaplama üretiminde ise; genellikle plazma sprej (PS) kaplama yöntemi tercih edilmektedir. Endüstriyel uygulama alanlarında plazma sprej kaplama yönteminin daha çok tercih edilmesinin altında kullanılan her malzeme için uygun ve elverişli bir yöntem olması gelmektedir. Kaplama sisteminin özelliklerine göre kaplamanın mikroyapısında değişimler görülmektedir. APS yöntemiyle yapılan kaplamaların mikro yapı incelemelerinde küresel porlar ve ısı akısına dik ve paralel yönde mikro çatlaklar gözlenirken, EB-PVD yöntemiyle yapılan kaplamalarda ise; ısı akısına paralel yönde seyir eden kolon şeklinde yapılar gözlenmektedir (Minisker, 2009).

TBC sistemlerinde üretim parametreleri, çalışma koşulları ve oksidasyon sebebiyle metalik bağ kaplama ile üst kaplama arasında TGO tabakası meydana gelmektedir. Kararlı ve uniform olması halinde hasarı geciktirici özelliğe sahip olan bu tabaka, yapıda istenmektedir. Fakat izotermal oksidasyon sıcaklık ve süreçlerinin artışıyla birlikte TGO tabakası kararsız bir hal alarak, homojenliğini yitirmektedir. Böylelikle TGO kalınlığı artış göstererek, bulunduğu bölgenin üst kısımlarında karışık oksitlerin oluşumuna sebebiyet verecektir. Tüm bunlar TBC sistemlerinde üst seramik kaplama tabakasının ana malzemedan ayrılmasıyla sonuçlanacaktır (Young, 2008).

TGO tabakasının oluşumu ve TBC sistemlerindeki varlığı metalik bağ kaplama ile ilişkilidir. Oksidasyon dayanımının artması ve TGO' nun yapıda kararlı halde bulunması amacıyla metalik bağ kaplama üretiminde birçok farklı yöntemler denenmiştir. Bu yöntemler arasında HVOF ve CGDS metotları ön plana çıkmaktadır. Bağ kaplama malzemesi olarak MCrAlY (M=Ni, Co) tercih edilirken, üst seramik kaplama malzemesi olarak da genellikle Yttria ile Stabilize edilmiş ZrO₂ (YSZ) tercih edilmiştir. Son yıllarda YSZ üst seramik kaplama malzemesinin yanı sıra farklı üst seramik kaplamalar da kullanılmaya başlanmıştır. Nitekim ZrO₂+MgO içerikli üst seramik kaplamalar buna örnek gösterilmektedir. TBC sistemleri incelendiğinde üst seramik kaplamada EB-PVD

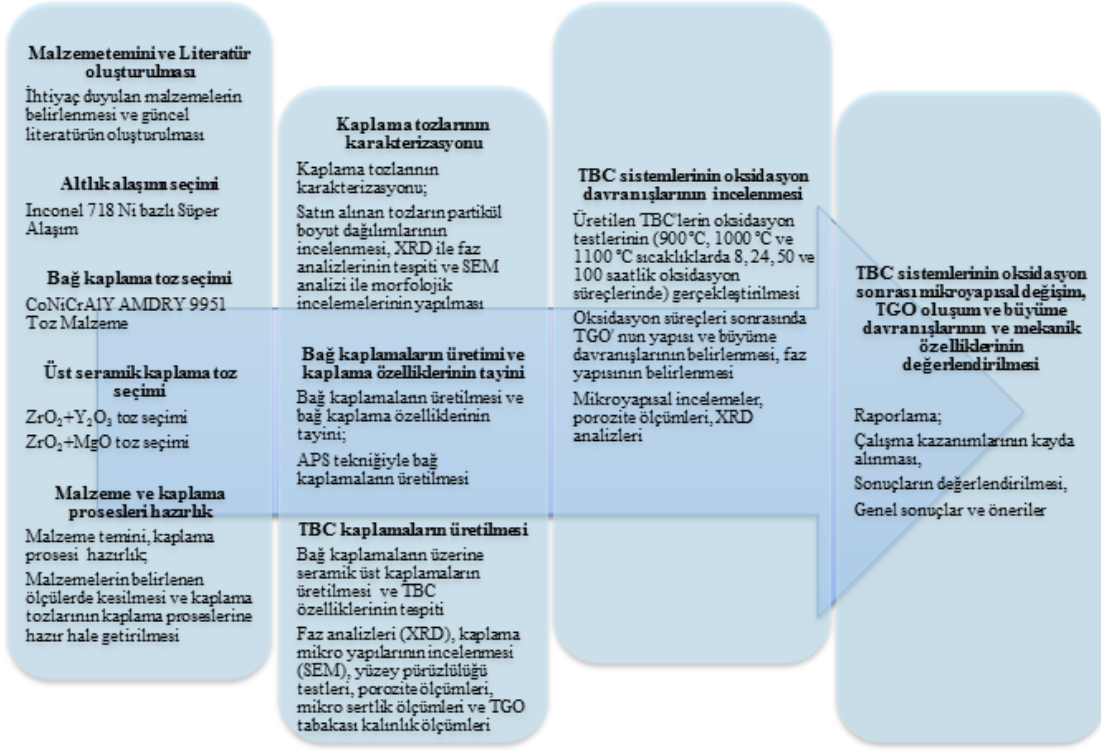
yönteminin termal sprey kaplama yöntemleri arasında en başarılı sonucu verdiği tespit edilmiştir. Uygulama koşullarının kolay ve elverişli olması bu yöntemin tercih nedenleri arasında gelmektedir (Karaoğlanlı vd., 2013).

Termal bariyer kaplamalar, gelişime açık ve son derece yaygın endüstriyel kullanım alanına sahip sistemlerdir. Bu sebeple, kararlı bir TGO tabakasına sahip, yüksek sıcaklıkta yüksek oksidasyon direnci gösteren ve diğer hasar mekanizmalarına dayanımı gözlenen TBC sistemleri için, farklı üretim yöntemleri ve yeni gelişmeler gün geçtikçe ilerlemektedir.

1.2 Çalışmanın Amacı

Bu tez çalışması kapsamında, Nikel bazlı bir süper alaşım olan Inconel-718 altlık malzeme üzerine, APS yöntemiyle metalik bir bağ kaplama, sonrasında yine APS yöntemiyle seramik üst kaplamalar üretilerek TBC' ler elde edilmiştir.

Ni esaslı Inconel-718 altlık malzeme üzerine CoNiCrAlY bağ kaplamalar, APS yöntemi kullanılarak yaklaşık 100 µm kalınlığa sahip olarak üretilmiştir. Daha sonra 300 µm kalınlığa sahip YSZ ve ZrO₂+MgO içerikli üst seramik kaplamalar iki farklı numune üzerine uygulanmıştır. APS yöntemiyle üretilen farklı iki üst seramik kaplamaya sahip olan TBC sistemlerinin SEM, EDX-elementel analiz, porozite ölçümleri, XRD, yüzey pürüzlülük değerlerinin ölçümleri, sertlik ölçümleri ve TGO kalınlık ölçümleri sonrasında özellikleri belirlenmiş ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır. 900 °C, 1000 °C ve 1100 °C sıcaklıklarda 8, 24, 50 ve 100 saatlik süreçlerde yapılan izotermal oksidasyon testleri ve oksidasyon sonrasında vuku bulan TGO oluşumu ve büyüme davranışları incelenerek, açıklamalar yapılmıştır. Yüksek lisans tez çalışması süresince izlenen yöntem, uygulanan test ve proses kademeleri sırasıyla Şekil 1' de gösterilmektedir.



Şekil 1: Deneysel çalışmalarda izlenen yöntem ve çalışma planı.

BÖLÜM 2

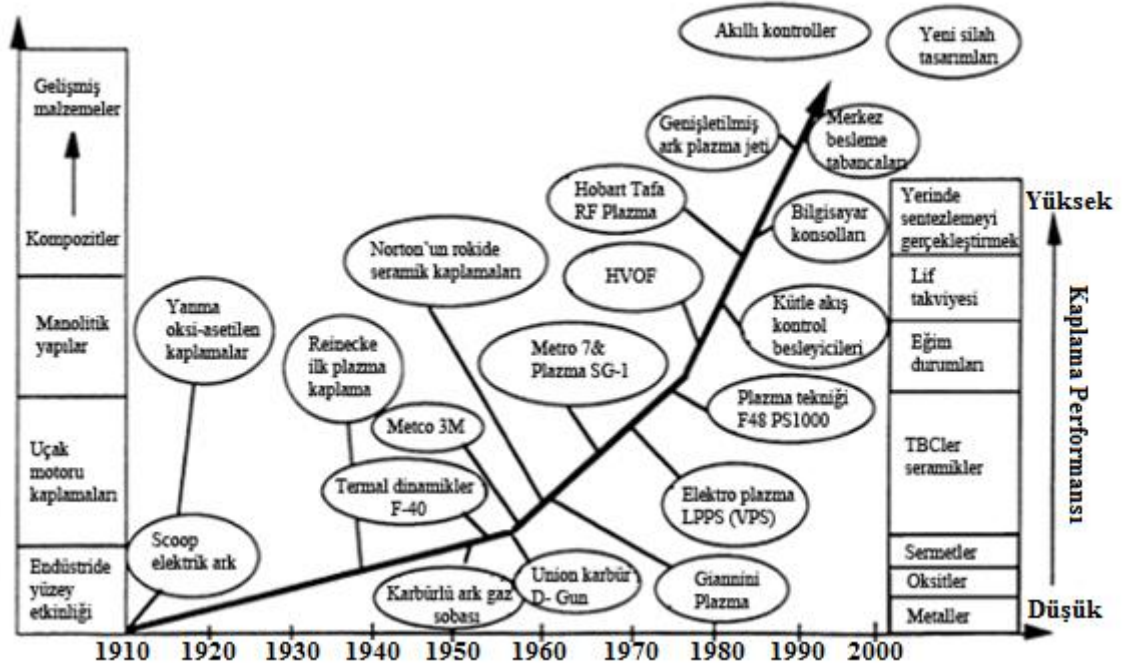
LİTERATÜR ÖZETİ

2.1 Termal Sprey Kaplamalar

Termal sprej kaplama yöntemi; bilinen kaplama teknikleri arasında en uygun endüstriyel kullanım alanına sahip ve farklı yöntemlerin bir arada kullanıldığı kaplama tekniği ailesinin bir dalıdır. Termal sprej kaplama tekniklerinde amaç, metal ve alaşım yüzeylerinde aşınmaya ve diğer özelliklere dayanıklı, çevresel olumsuz etkilere karşı koruyucu nitelikte bir kaplama tabakası meydana getirmektir. Kaplanmış malzeme aynı zamanda metallerin şekillendirilebilme ve tokluk özellikleri ile seramiklerin korozyon, aşınma ve yüksek sıcaklık dayanımı gibi üstün özelliklerini bir arada sağlamalıdır (AWS Committee, 1997).

Termal sprej kaplama ilk olarak top yüzeyine sıvı haldeki kurşunun püskürtülmesiyle 20. yy başlarında yaşayan İsviçreli bilim adamı Dr. M. Schoop tarafından icat edilmiştir. Püskürtme işlemi sonunda kurşunun topa yapıştığı tespit edilmiştir. Bu işlem esnasında ısı kaynağı olarak da O_2 ve C_2H_2 gazları kullanılmıştır. Püskürtme işleminin kaplanacak malzeme yüzeyine gönderilmesi için basit formda bir tabanca dizayn edilmiştir ve tüm bunlar sonucunda termal sprej kaplama yöntemi ortaya çıkmıştır. Daha sonraları sprej kaplama prosesleri hızlı adımlarla geliştirilmiştir ve birçok alanda kullanıma başlanmıştır. Basit formdaki tabancalar ilk başta metalik kaplamalarda kullanıma sunulmuştur. Zamanla daha modern teknolojilere açık ve üstün özellikli termal sprej kaplama cihazları icat edilerek, bu yöntemin gelişime açık bir yöntem olduğu gözler önüne serilmiştir. İsteğe bağlı olarak farklı uygulama amaçlarına ve alanlarına uygun tel ve toz şeklinde birçok kaplama malzemesi üretilmiştir. Termal sprej kaplama teknolojisinin başlangıcı olarak bilinen alev sprej prosesi, yerini 1908 yılında elektrik ark sprej prosesine bırakmıştır. Dr. M. Schoop aynı yıl içinde elektrik ark sprej prosesinin patentini alarak endüstriyel alanda kullanıma sunmuştur. Kaplama yöntemlerinde toz püskürtme uygulamaları için patlamalı tabanca (D-Gun) yönteminin süreci geliştirilerek 1955 yılında R. M. Poorman, H. B. Sargent ve H. Lamprey tarafından patenti alınmıştır. Detonasyon tabancalı biriktirme yönteminin kullanılmasıyla birlikte yüksek bağ mukavemetli, yoğun ve adhezyon direnci

yüksek, güvenilir kaplamalar üretilmeye ve kullanılmaya başlanmıştır. 1960 yılından günümüze kadar kullanıma sunulan termal sprey kaplama proseslerinin tümü detonasyon tabancalı biriktirme yöntemiyle kaplanmış yüzeylere benzerlikte kaplamalar üretmek için ortaya çıkmıştır. Ancak günümüzde HVOF kaplamalar, tüm kaplama proseslerine meydan okumaktadır. Farklı bir kaplama tekniği olan plazma sprey yöntemi 1962 yılında keşfedilip, havacılık endüstrisi ihtiyaçlarında kullanılmaya başlanmıştır. D. M. Yenni, R. M. Gage ve O. H. Nestor tarafından patenti alınan plazma sprey yöntemi; termal sprey kaplama teknolojisi olarak 1970' lerin başında yaygın kullanılmaya başlanmıştır. Detonasyon tabancası yöntemi haricinde yanma püskürtme teknolojisi; yüksek hızlı oksiyakıtlı kaplama yönteminin gelişmesiyle de oldukça yaygın hale gelmiştir. HVOF yöntemi; 1958' te R. C. Eschenbach, J. E. Pelton ve G. H. Smith tarafından icat edilip, patenti alınmıştır. Bu yöntem termal sprey kaplama teknolojisinin en yüksek ve önem arz eden kademesi olarak kullanıma geçmekte ve aynı zamanda diğer kaplama yöntemlerine göre oldukça maliyetli bulunmaktadır (Davis, 2004).



Şekil 2: Termal sprey kaplamaların gelişimi, ekipmanları ve süreçlerin grafiksel gösterimi (Davis, 2004).

Termal sprey kaplama teknolojisinde kaplama işlemi tel ya da genellikle toz formundaki kaplama malzemelerinin yüksek sıcaklık alevi ile ertilip, o esnada önceden hazırlanmış metal yüzeylerine çok hızlı bir şekilde püskürtülmesiyle tamamlanmaktadır. Kaplama

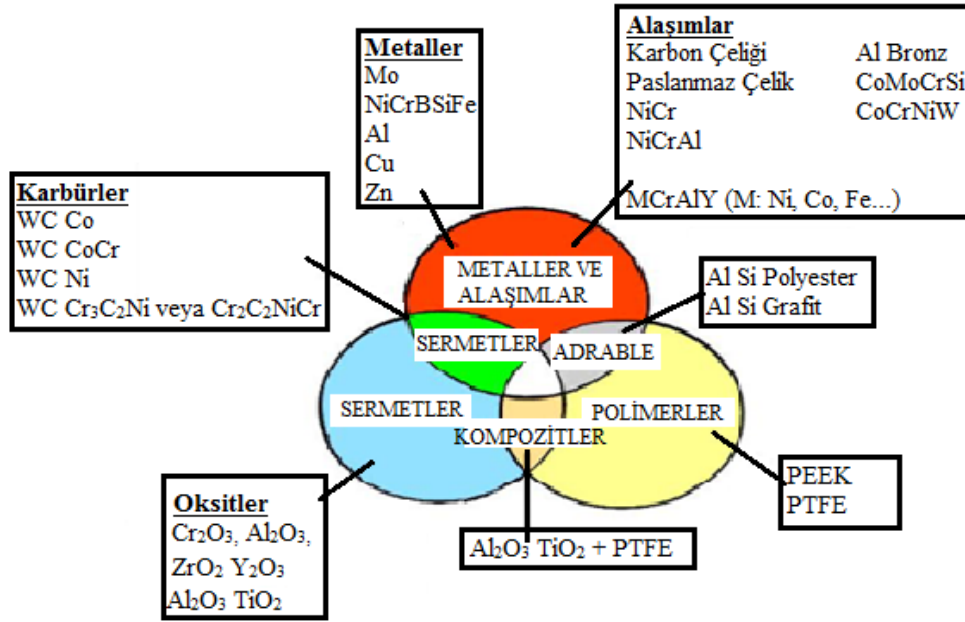
malzemesini ergetmek için gerekli olan ısı enerjisi, elektrik ya da alev ile elde edilmektedir. Elektrikli ısıtmada ark ve plazma proseslerinden yararlanılırken, alevle ısıtmada ise yanıcı gazlar kullanılır (Pawlowski, 2008). Termal sprej, metalik veya metalik olmayan kaplamalara uygulanabilen, bir grup kaplama teknolojisinin genel adıdır. Proseste, kaplama malzemesi (toz/tel) bir enerji kaynağı yardımıyla ısıtılır, sonrasında eriyik veya yarı eriyik forma dönüştürülür. Ardından ısıtılmış partiküller gaz veya atomizasyon jetiyle ivmelendirilerek hız kazanırlar. Isıtılan ve hızlandırılan partiküller önceden hazırlanmış altlık malzeme üzerine çarptırılarak, splat (yassı tanecik) şeklini alırlar. Böylece altlık malzeme ile birbirlerine bağlanmış olmaktadır (Davis, 2004). Şekil 3’ te şematik olarak termal sprej kaplama gösterilmiştir.



Şekil 3: Termal sprej kaplamanın şematik görünümü (Kahraman, 2000).

Termal sprej kaplamalar korozyonu, abrazyon, erozyon, kazıma gibi aşınma olaylarını engellemek, sıcak korozyonu ve oksidasyonu önlemek, ısı yalıtımı, elektrik iletimi veya yalıtımını sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Aynı zamanda iş parçasının ömrünü ve değerini arttırmak ve makina parçasındaki bozulmadan kaynaklanan kullanılamama süresinin azaltılması ve çok geniş uygulama alanında performansın artırılmasında çok etkindir. Termal sprej kaplamalara; havacılık, ziraat, elektronik, enerji, biyomedikal, karbon fiber kompozitler, gıda üretimi, kağıt üretimi ve matbaa, yağ ve gaz, otomotiv, sanayi, yarı iletkenler, savunma, enerji üretimi, güneş enerjisi başta olmak üzere çok geniş uygulama alanlarında parça ile dış ortam arasında aşınma, korozyon, ısı ve elektriğe karşı bir bariyer istendiğinde veya yüzeyde sürtünme sabitiyle oynanmak istendiğinde başvurulmaktadır. Termal sprej kaplamalarda hammadde olarak çoğu metal, karbür, seramik, plastik, sermet (seramik ve metal ihtiva eden alaşımlı kompozit yapı) uygulamalarda optimum özellikleri yakalamak için metalden kompozite birçok altlık malzeme üzerinde kullanılmaktadır (Schneider vd., 2006).

Termal sprey kaplama prosesleri kaplama malzemesi olarak her türlü malzemenin kullanılabilmesi için geniş uygulama alanlarına hitap eden bir üretim yöntemidir. Bir diğer avantajı ise; çoğunlukla çok yüksek sıcaklıklara maruz kalmadan altlık malzemenin ısıtılmasıyla kaplama işlemi kolaylıkla gerçekleşmektedir. Aynı zamanda hasar görmüş veya aşınmış kaplamalar, parçaların özellikleri ve boyutları değiştirilmeksizin çıkartılıp yeniden kaplanabilmektedir. Bu durumda yapıda herhangi bir kimyasal reaksiyon gerçekleşmediğinden ötürü, altlık malzeme ile kaplanacak olan malzemelerin yapılarında da kimyasal bozunmalar meydana gelmemektedir. Sprey kaplama yönteminde genellikle altlık malzeme yüzeyinde darbe veya eriyik kalıntılara rastlanmamaktadır. Aynı zamanda ön veya son ısıl işleme gerek duyulmaması bu yöntemin avantajları arasındadır (AWS Committee, 1997). Şekil 4' te termal sprey yönteminde kullanılan kaplama malzemeleri gösterilmektedir. Kullanılan kaplama malzemelerinin geniş bir yelpazeye sahip olduğunu görmemiz mümkündür.

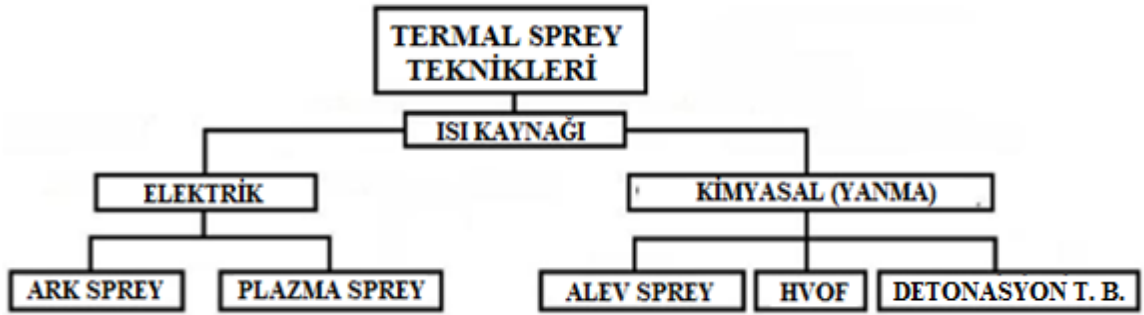


Şekil 4: Termal sprey yönteminde kullanılan kaplama malzemeleri (Tafralı, 2006).

Kaplama işleminin yalnızca torç veya tabancanın görebildiği yerlere uygulanabilmesi termal sprey kaplama teknolojisinin dezavantajları arasındadır. Bu dezavantaj görüş açısının darlığından kaynaklanmaktadır. Ayrıca geniş uygulama alanlarına hitap ettiğinden ötürü, kaplanacak olan malzemenin boyut farklılıkları, yapısında tabancanın giremeyeceği derecede derin ve küçük boşlukların olduğu düşünüldüğünde sağlıklı bir kaplama

yapılamamaktadır. Bu da bir diğer dezavantaj olarak pratikte karşımıza çıkmaktadır (Kahraman, 2000).

Termal sprej kaplama yöntemleri teknolojisi adı altında birçok kaplama yöntemi geliştirilmiştir. Bunların başlıcaları; ark sprej, plazma sprej, alev sprej, HVOF, detonasyon tabancalı biriktirme ve soğuk gaz dinamik sprej yöntemi olmak üzere 6' ya ayrılmaktadır. Şekil 5' te termal sprej kaplama yöntemlerinin sınıflandırılması gösterilmektedir.



Şekil 5: Termal sprej kaplama yöntemlerinin sınıflandırılması (Davis, 2004).

Termal sprej kaplama yöntemleri sınıflandırılırken kullanılabilir bir parametre ise; kaplama işlemi esnasında meydana gelen sıcaklık ve kaplama malzemesine verilen kinetik enerjidir. Kaplama malzemesine verilen kinetik enerji değeri genellikle alev sprej yönteminde elde edilir. Plazma sprej yöntemlerinde yüksek sıcaklıklar elde edilirken, detonasyon tabancası ve HVOF gibi yöntemlerde kaplama malzemesi süpersonik hızlara çıkmaktadır. Ergime sıcaklığı yüksek olan seramik ve benzeri malzemelerin kaplanması da yüksek sıcaklık meydana gelmektedir. Çok yüksek hızlarda gerçekleşen kaplama işlemleri ise; karbür türü ağır malzemelerin kaplanmasına olanak sağlamaktadır (Pawlowski, 2008).

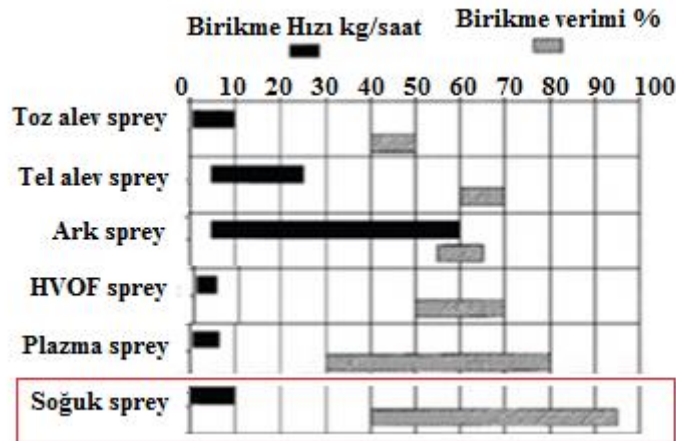
Elektrik ark sprej yönteminde kaplama malzemesi olarak metal ya da alaşım telleri tercih edilmektedir. Diğer yöntemlerde metal, seramik, kompozit ve hatta plastik esaslı toz malzemeler kaplanabilmektedir. Kaplama malzemelerinin ergitilmesinde ark, plazma ya da oksit yakıt benzeri ısı kaynaklarından faydalanılmaktadır. Kaplama endüstrisinde oksisasetilen, oksipropilen ve oksipropan gibi oksiyakıtlar kullanılmaktadır. En yüksek proses sıcaklıklarına plazma sprej yönteminde ulaşılırken, tel ya da toz şeklindeki bütün malzemelerin farklı termal sprej yöntemleriyle kaplanması mümkündür. Kaplamaların endüstriyel uygulamalarında performansını belirleyen en önemli parametrelerden birisi olan porozite özelliği incelendiğinde; porozite değerlerinin sprej yöntemine bağlı olarak

hacimce %0.1 ile %20 gibi geniş bir aralıkta değiştiği görülmektedir (Davis, 2004). Şekil 6' da termal sprej kaplama proseslerinin oksit ve porozite oranlarının karşılaştırılması gösterilmektedir.

Proses	Porozite %	Oksit %
Soğuk sprej	0.1-1	Toz ile aynı
HVOF sprej	1-5	0.2-1
Alev sprej	10-25	4-6
Ark sprej	10-15	0.5-3
Plazma sprej	1-20	0.5-1

Şekil 6: Termal sprej kaplama proseslerinin oksit ve porozite oranlarının karşılaştırılması (URL-3).

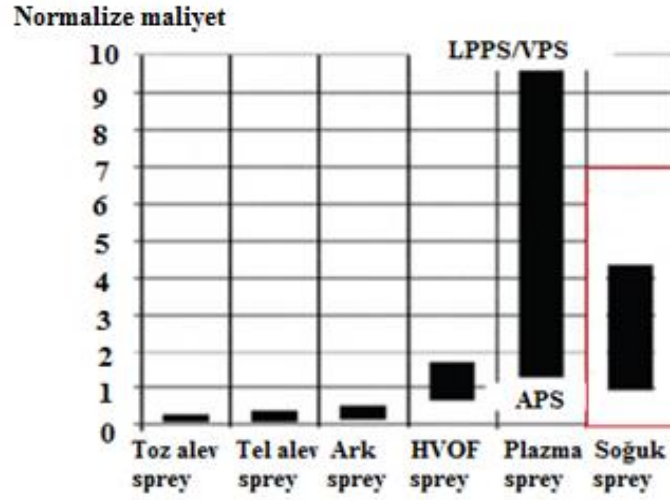
Şekil 6' da da görüldüğü gibi; soğuk gaz dinamik sprej prosesi en düşük oksit ve porozite oranına sahip kaplama sınıfına girmektedir. Püskürtme hızı ile oksit ve porozite miktarı ters orantılıdır. Püskürtme hızı arttıkça kaplama yüzeyindeki oksitlenme ve poroz miktarı azalmaktadır. Bu demektir ki; termal sprej kaplama prosesleri arasında püskürtme hızının en fazla olduğu prosesi soğuk gaz dinamik sprej yöntemidir (URL-3). Şekil 7' de termal sprej kaplama yöntemlerinin birikme verimi ve kg/saatteki birikme hızları şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 7: Termal sprej kaplama yöntemlerinin birikme verimi ve kg/saatte birikme hızları (URL-3).

Termal sprej kaplama prosesleri arasında yatırım maliyeti olarak bir karşılaştırma yaptığımızda; düşük basınçlı plazma sprej ve vakum plazma sprej yöntemleri yüksek

maliyetli prosesler arasında yerini almaktadır. Akabinde bu prosesleri HVOF (Yüksek hızlı oksji-yakıt) prosesi takip etmektedir. Bu prosesin maliyetinin yüksek olmasının sebebi; gaz sarfiyatının oldukça yüksek olmasıdır. Düşük maliyetli prosesler sınıfında ise; alev sprej ve ark sprej yerini almaktadır. Soğuk gaz dinamik sprej prosesi ise; yatırım maliyeti olarak plazma sprej yönteminden düşük, HVOF yönteminden yüksektir. Oldukça yüksek maliyetli olmasının sebebi; toz besleyici ve gaz ısıtıcı ekipmanlarının pahalı olmasıdır. Özellikle He gazının kullanılması prosesin maliyetini en yüksek seviyelere taşımaktadır. Maliyetinin yüksek olmasının yanı sıra kaplama kalitesi, zaman tasarrufu, birikme verimi ve uygulama pratikliği açısından diğer yöntemlere nazaran oldukça yüksek performans göstermektedir (URL-3). Şekil 8' de termal sprej kaplama yöntemlerinin yatırım maliyetinin karşılaştırılması gösterilmiştir.



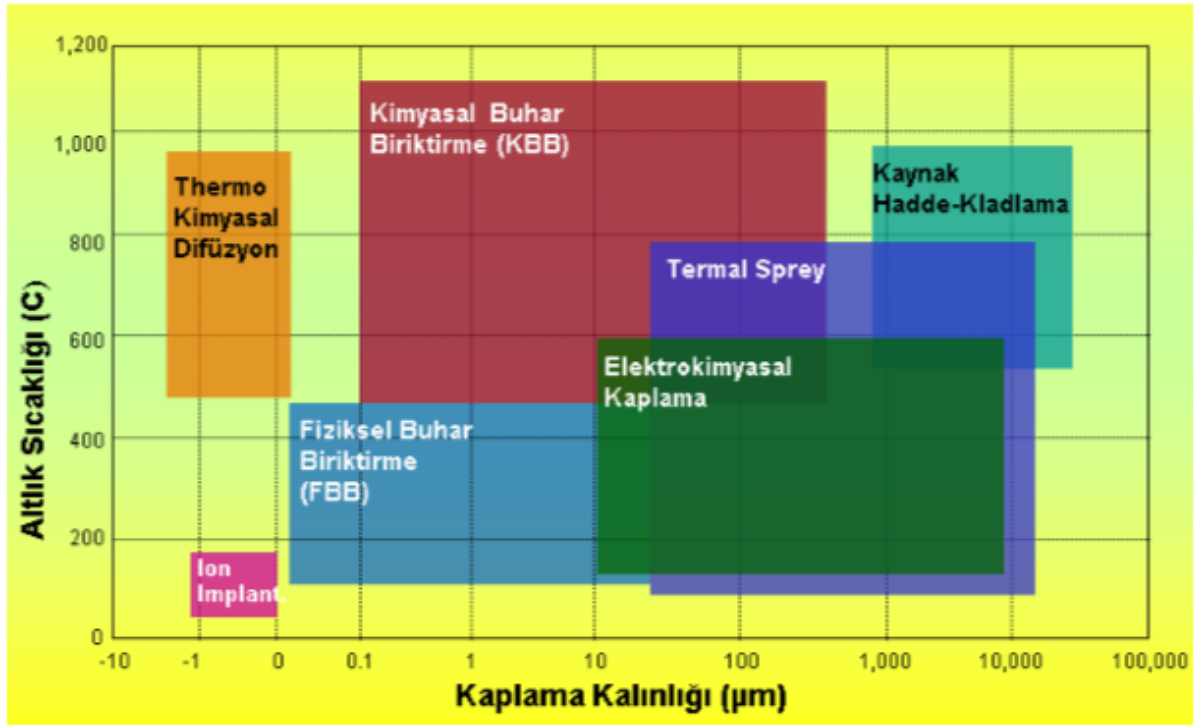
Şekil 8: Termal sprej kaplama yöntemlerinin yatırım maliyetinin karşılaştırılması (URL-3).

Şekil 8' de de gösterildiği gibi; en yüksek maliyetli proses plazma sprej yöntemidir. Soğuk gaz dinamik sprej yöntemi onu takip etmektedir.

Tablo 1: Termal sprej kaplama proseslerinin karşılaştırılması (Dorfman, 2012).

Proses	Partikül Hızı (m/s)	Proses Sıcaklığı (°C)
Soğuk Sprej	800-900	500-900
Alev-Toz	30-200	2500-3000
Alev-Tel	30-100	2500-3000
HVOF	700-800	2500-3000
Plazma-APS	200-300	15000
Plazma-VPS	200-300	15000
Ark Sprej	50-150	3000

Tablo 1' de ise; en yüksek sıcaklığa sahip olan proses plazma sprej iken, en yüksek partikül hızına sahip olan proses soğuk gaz dinamik sprej olarak görülmektedir. Aşağıda Şekil 9' da ise; kaplama yöntemlerinin altlık sıcaklığı ve kaplama kalınlığı açısından değerlendirilmesi gösterilmiştir. Termal sprej kaplama ailesini, kaplama kalınlığı 10-100.000 μm aralığında ve kaplama sıcaklığı 800 °C' lere kadar görmemiz mümkündür (Dorfman, 2012).



Şekil 9: Çeşitli kaplama yöntemlerinin altlık sıcaklığı ve kaplama kalınlığı açısından karşılaştırılması (URL-2).

Tablo 2: Termal sprey yöntemlerinin bazı karakteristik özellikleri (Kurt, 2001).

Biriktirme Yöntemi	Isı Kaynağı	Yönlendirici Gaz	Malzeme Besleme	Tabanca İçindeki Sıcaklık (°C)	Tipik Toz Hızı (m/sn)	Ortalama Sprey Hızı (kg/sa)
Alev püskürtme	O ₂ - C ₂ H ₂ O ₂ - H ₂	Hava	Tel, Toz	3000	40	2 - 6
Elektrik ark püskürtme	Elektrotlar arası ark	Hava	Tel	6000	100	12
Hava plazma püskürtme	Plazma ark	Soygaz	Toz	12000	400	3 - 9
Düşük basınçlı plazma püskürtme	Plazma ark	Soygaz	Toz	12000	400	3 - 9
Detonasyon alev püskürtme	O ₂ - C ₂ H ₂ - N ₂ gaz detonasyonu	Detonasyon dalgaları	Toz	4500	800	0.5
Yüksek hızlı oksijen - gaz	Oksijen - gaz yanması	Eksoz gazı	Toz	3000	400 - 600	2 - 4

Yukarıdaki Tablo 1' de termal sprey kaplama yöntemlerinin bazı karakteristik özellikleri verilmiştir. Geniş bir uygulama alanına sahip olan termal sprey kaplama yöntemlerinin yüksek sıcaklıkları ve hızları, proses parametrelerinin ölçümünü ve kontrolünü zorlaştırmaktadır. Bu sebeple, oldukça yaygın kullanılmasına rağmen kaliteli kaplamaların imali yetenekli ve tecrübeli üreticilerin elinden geçmektedir. Termal sprey kaplama yöntemiyle yüksek bağ mukavemetli, partikül hızı, gözenekliliği ve yoğunluğu yüksek, aşınmaya karşı oldukça dirençli kaplamalar meydana getirmek mümkündür. Sprey kaplama yönteminde temizlenmiş alt tabakaya kum püskürtülerek veya pürüzsüzleştirilerek yapışma genel olarak artırılır. Termal sprey kaplama yöntemlerinde bazı parametrelerin servis esnasında ölçülmesi oldukça zordur. Bu parametreler; termal iletkenlik, kırılma tokluğu, elastisite modülü, çekme gerilmesi vb. gibi önemli kaplama özellikleridir. Fakat bu yöntemde en çok istenen özellik altlığa yapışma özelliğidir. Bu da çekme yapışma testi ile tespit edilebilmektedir (Kurt, 2001).

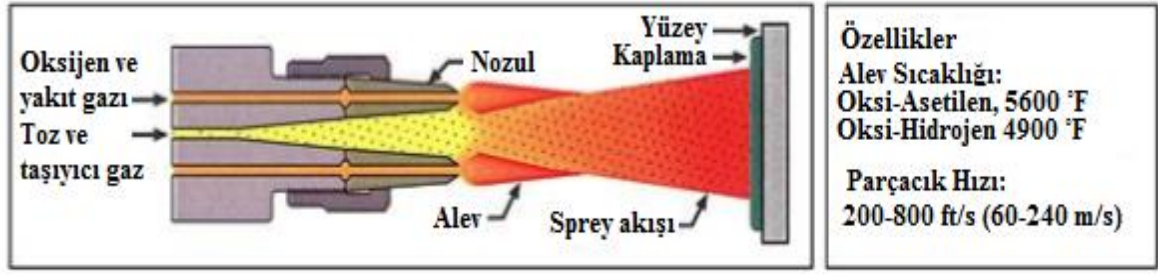
Termal sprey kaplama, koruyucu bir bariyer görevi üstlenmekte ve yıpranmış, hasara uğramış kısımların onarılması için iş parçası üzerinde ergimiş metal biriktirilmesi olarak özetlendiğinden, yüzeylerin korunmasını engelleyen bazı problemlerle de karşılaşmaktadır. Bunlar; korozyon, sürtünmeden dolayı ısınma, kaviteasyon, erozyon vb. gibi istenmeyen durumlardır. Yataklar, valfler, valf yatakları, türbin kanatları gibi ekipmanlarda termal sprey kaplama proseslerinden yararlanılmaktadır. En yaygın uygulama alanı ise; uçakların türbin-motor imalatları olarak gösterilmektedir.

2.1.1 Alev Sprey Kaplama Yöntemi

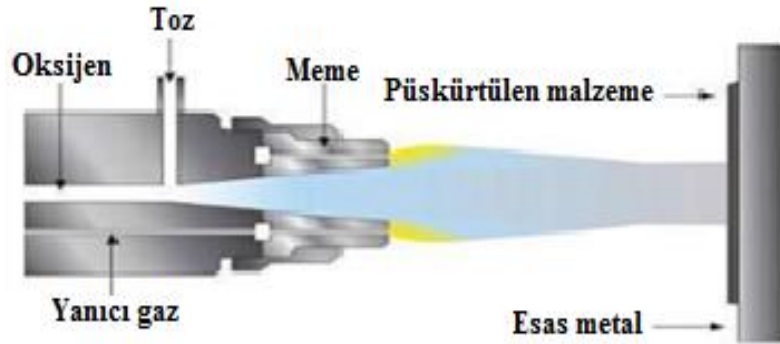
Termal sprej kaplama yöntemlerinin en ucuzu ve en basiti olan alev sprej kaplama yöntemi; ilk defa 1910 yılında İsviçreli bilim adamı M. Schoop tarafından alev püskürtme tabancasını bulmasıyla birlikte ortaya çıkmıştır, fakat 1945 yılına kadar gelişme gösterememiştir. İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra Çek Cumhuriyeti ve Sovyet Rusya ülkeleri arklı püskürme yöntemi ile ilgili çalışmalar başlatarak, günümüze kadar gelişip ilerlemesine ve çeşitli uygulama alanlarında kullanıma sunulmasına olanak sağlamıştır (Davis, 2004).

Alev sprej kaplama yöntemi; hem tel hem de toz kullanılarak uygulanabilmektedir. Yakıt gazı olarak asetilen ve propan gazları kullanılmaktadır. Oksijenin asetilenle oluşturduğu alevin sıcaklığı 3200 °C, propanla oluşturduğu alevin sıcaklığı ise 2800 °C' dir. Çeliklere püskürtülmek için genel olarak asetilen gazı tercih edilirken, ergime noktası daha düşük olan malzemeler için (çinko veya alüminyum gibi malzemeler) propan gazı tercih edilmektedir. Hidrojen gazı ise yüzeye çok ince tozların püskürtüldüğü aşamada kullanılabilir (Saowanee vd., 2011).

Alevle sprej kaplama yönteminde; tel ya da toz oksiyakıt alevi ile eritilmektedir. Kendi ucunu eriten tel, aleve karışarak beslenir. Alt tabaka üzerindeki sıvı veya yarı sıvı kıvamındaki parçacıklar ivme kazanarak memenin dış kısmına doğru sıkıştırılmış hava tarafından beslenirler. Çubuk ya da toz formundaki kaplama malzemesi 3300-3350 °C aralıklarında oksiyasetilen alevi kullanılarak ısıtılır. Sıkıştırılmış havayla birlikte toz seramik malzeme yaklaşık 200 m/sn hızla alt tabaka üzerine ivmelendirilip memeden geçirilir. Alev sprej kaplama yönteminde yüzey metalinin ergitilmesi için gerekli ısı oksijen ve yakıt gazının bir arada yakılmasıyla elde edildiğinden, yakıt gazı olarak asetilen, propan, doğal gaz ve hidrojen gazları tercih edilmektedir. Yüksek ısı verici özelliğinden dolayı genellikle asetilen kullanılır fakat diğer yakıt gazları daha ekonomik olduğundan dolayı bazı uygulamalarda tercih edilebilmektedir. Alt tabakaya uygulanan yakıt gazı sadece yanma işlemine yardımcıdır (Kahraman, 2000). Aşağıda tel alev sprej ve toz alev sprej yöntemlerinin gösterimi Şekil 10 (a) ve (b)' de verilmiştir.



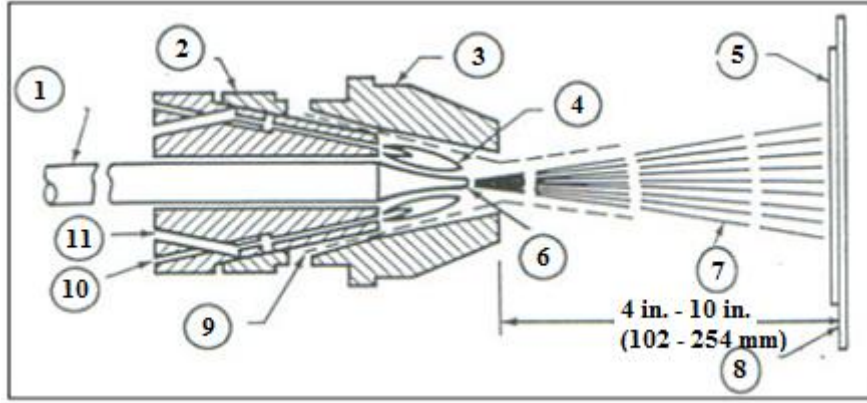
(a)



(b)

Şekil 10: (a) Tel alev sprej yöntemi, (b) Toz alev sprej yöntemi gösterimi (URL-1).

Şekil 10 (a)' da görüldüğü gibi proseste oksijen ile yakıt gazı karışımı yakılmaktadır. Daha sonra toz partikülleri taşıyıcı gaz sayesinde alev ile iletilmektedir ve akabinde alev sıcaklığıyla toz eriyik veya yarı eriyik hale gelmektedir. Gazın yaptığı basınçla partiküller hızlanıp ivme kazanarak altlık üzerine iletilmektedir ve böylece kaplama işlemi tamamlanmış olur. Burada gazların alev sıcaklığı kısıtlayıcı bir parametredir. Yakıt gazı kaplama malzemesinin cinsine göre seçilmelidir. Alev sprej kaplama yönteminde amaç; tel ya da tozu eriyik veya yarı eriyik hale getirmektir. Bu sebeple alev sıcaklığı yeterli değilse bu yöntem tercih edilmemelidir (Tafralı, 2006). Proseste tozu erimiş hale getirmek için nötr alev kullanılmaktadır. Fakat Alüminyum esaslı bir kaplama malzemesi kullanılacak ise; asetileni fazla olan alev tercih edilmelidir. Erimiş durumdaki metalden püskürtülen tanecikler 50 ile 200 mikron büyüklüğünde olmalıdır. Püskürtme hızı ile tanecik boyutu ters orantılıdır. Püskürtme hızının artmasıyla tanelerin küçüldüğü gözlenmektedir (Davis, 2004). Aşağıda Şekil 11' de tel, çubuk veya şerit püskürtme tabancasının kesiti verilmiştir.

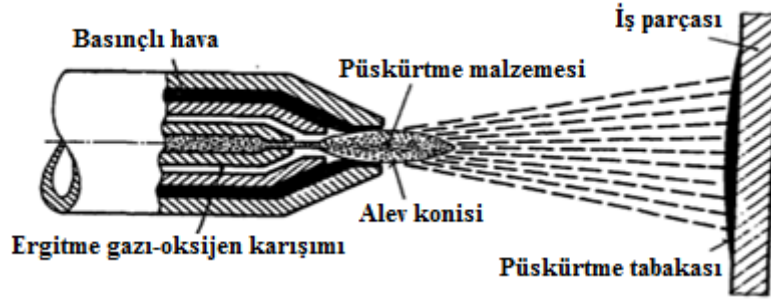


Şekil 11: Tel, çubuk veya şerit formunda alev püskürtme tabancasının kesiti. 1) Tel veya çubuk, 2) Gaz memesi, 3) Hava kampanası, 4) Yanma gazları, 5) Püskürtme dolgusu, 6) Ergimiş malzeme, 7) Püskürtme akısı, 8) İşlenmiş yüzey, 9) Püskürtme havası, 10) Yakıt gazı, 11) Oksijen (Tafralı, 2006).

Proseste püskürtme işlemi yapılırken; püskürtme demeti işlem yapılacak yüzeye 45 °C' den az açıyla uygulanmamalıdır. Aksi halde, püskürtülen tabaka süngerimsi bir hal alarak yapısı bozunur. Püskürtme açısı 70 °C olduğunda en iyi sonuç elde edildiği gözlenmiştir. Tabancanın ilerleme hızı yüksek olduğu durumlarda dar açılı püskürtme kullanılması gerekir. Tüm tabakalar bir öncekine dik olacak şekilde püskürtme işlemi tekrarlanarak istenilen kalınlıkta tabaka elde edilebilir. Kenar kısımlar daima ilk önce ve 45 °C açıyla işleme tabi tutulmalıdır (Dorfman, 2012).

Alevle tel sprej kaplama yönteminin diğer yöntemlere nazaran maliyetinin oldukça az olması avantajları arasındadır. Aynı zamanda yüksek dolgu oranına sahip olması ve çeşitli tel çaplarına adapte edilebilir olması üstün özellikleridir. Ancak kaplama tabakasında boşlukların fazla olması, bağ mukavemetinin ve çalışma sıcaklığının düşük olması da dezavantajları arasındadır (Davis, 2004).

Alevle toz sprej kaplama yönteminde ise; kaplanacak malzeme toz kullanılarak sprejlenir. Kullanılacak toz huniden tabancaya aktarılır. Toz, alev içerisine hava besleme ünitesi, oksijen akıntısı veya çekim kuvveti etkisiyle taşınır. Daha sonra alev tozu emerek, yanma gazlarının yardımıyla sıkıştırılmış olan hava alt tabakaya iletilir (Kıratlı vd., 2009).



Şekil 12: Alevle toz sprej kaplama yönteminin şematik gösterimi (Kahraman, 2000).

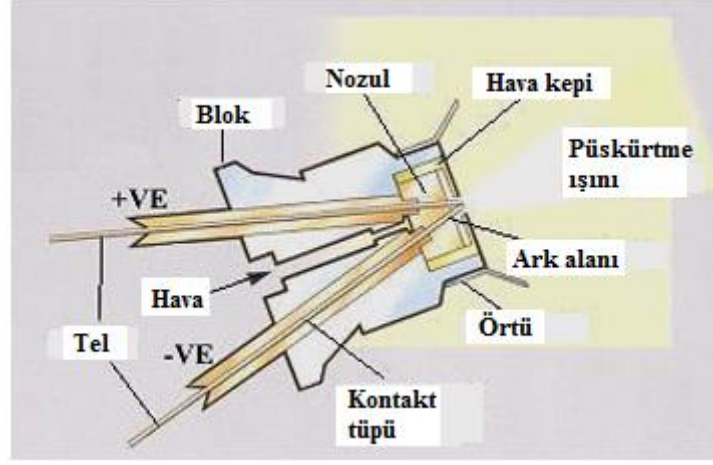
Şekil 12' de alevle toz sprej kaplama yönteminin şematik gösterimi verilmiştir. Toz püskürtme yönteminde çok ince parçacıklar ısı kaynaklarından geçerek ergimiş veya yarı ergimiş halde yüzeye gelirler ve yassı bir hal alırlar. Yassılaştırmaları sayesinde lamel haline gelerek oldukça hassas bir şekilde yüzeyin şekline uygun hareket ederler. Plazma sprej yöntemine göre ekipman maliyeti oldukça düşük olan alevle toz sprej kaplamada spreyleme hızı da düşüktür. Sprej kaplama işlemi yapılmadan önce yüzey yağlardan arındırılmış ve metalik kalıntılardan temizlenmiş olmalıdır. Yüzey hazırlığı, sprej kaplama işlemi yapılmadan hemen önce temizlenmelidir ki; kaplanacak olan tabakanın veya malzemenin tutunması da kesin sonuçlar verebilsin (Kurt, 2001).

2.1.2 Elektrik Ark Sprej Kaplama Yöntemi

Genellikle metal kaplama endüstrisinde kullanılan elektrik ark sprej yöntemi; ilk olarak 1910 yılında M. Schoop tarafından keşfedilmiştir fakat 1960 yılına kadar gelişme gösteremediğinden uygulama alanlarında pek tercih edilmemiştir. Diğer kaplama yöntemlerine nazaran daha düşük maliyetli ve kolay kullanılabilir olması sebebiyle tercih edilmeye başlayan bu yöntem; elektriği ileten tel formundaki malzemelerin kaplama işlemlerinde kullanılmaktadır (Davis, 2004).

Elektrik ark sprej kaplama prosesinde; iki adet devamlı olarak tüketilen tel mevcuttur. İnce toz zerrelere dolgu metali görevi görürken, sürekli akıtılan kaynak teli bobinde kullanılmaktadır. İki tel arasına konumlandırılan sıkıştırılmış hava, atomize edici meme önüne gelerek tellerin bir noktada beslenmesine sebep olmaktadır. Daha sonra ark eritilecek iki telin arasına yerleştirilir. Atomize edici meme, gaz buharına ivme kazandırarak alt tabaka üstünde yer alan erime bölgesine küçük partikülleri ulaştırır. Ark sprej kaplama prosesi; DC güç kaynağı, iki tel arasında sıkıştırılmış hava, sprej tabancası gibi çalışma ekipmanları sayesinde güvenilir ve sağlam kaplamaların elde edilmesine

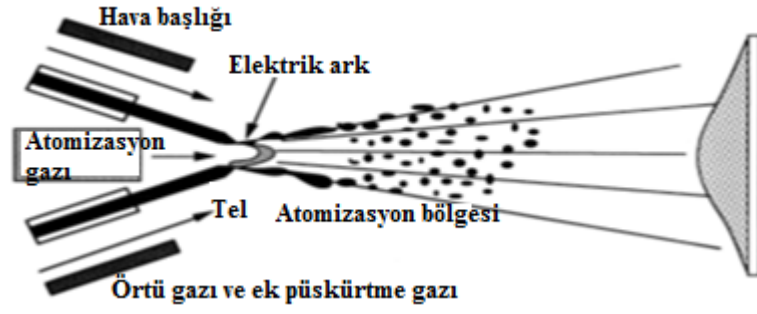
olanak sağlamaktadır. Aşağıdaki Şekil 13' te ark sprey tabancasının şematik gösterimi verilmektedir (Dorfman, 2012).



Şekil 13: Elektrik ark sprey tabancasının şematik gösterimi (Schneider vd., 2006).

Şekil 13' te de görüldüğü gibi, iki tel arasından mevcut sıkıştırılmış hava gönderilerek tel uçlarının birleşmekte ve ark oluşumu tamamlanmaktadır. Basıncın oldukça yüksek olduğu bu esnada gaz ivme kazanarak beslenmiş olan tellere erimiş damlacıklar halinde arkta gönderilmektedir.

Ark sprey kaplama prosesinde güç kaynağının dağıtma kapasitesi 18-40 volt aralığında vuku bulmalıdır. Arkın dengeli bir şekilde kullanılması voltajın düşük olmasıyla doğru orantılıdır. Voltajın artması bu durumda istenmeyen bir sorundur. Voltajın artmasıyla birlikte partikül boyutu da artış gösterecektir (Pawlowski, 2008). Ark sprey kaplama işlemi, korozyon ve aşınma gibi istenmeyen durumlara karşı alt tabakayı korumak ve yüzeyi metalle kaplamak için çeşitli endüstriyel uygulama alanlarında kullanıldığından, alt tabaka ile kaplama arasındaki bağın kuvvetli olması, kaplamanın verimi ve kaplama işlemi sonrasında vuku bulan gözenek miktarı oldukça önem arz etmektedir. Aynı zamanda kaplanacak olan yüzeyin pürüzlü olup olmaması da bu yöntem için önemlidir. Örnek vermek gerekirse; yüzeyin temiz ve pürüzsüz olması proste sonraki işlemler için kolaylık sağlayabilmekte ve zamandan tasarruf edilebilmektedir. Fakat bazı durumlarda ise yüzeyin pürüzlü olması yüzeyler arası sürtünmenin oluşmasına sebep olacak ve güç iletimi sağlayacağından tercih sebebidir. Kaplanacak olan yüzeyin fazla gözenekli olması, küçük toz zerreciklerinin çok hızlı bir şekilde püskürtülmesiyle istenilen seviyeye ulaşılabilir (AWS Committee, 1997). Şekil 14' te elektrik ark sprey kaplama yönteminin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 14: Elektrik ark sprey kaplama yönteminin şematik gösterimi (Davis, 2004).

Şekilde de görüldüğü gibi tipik bir elektrik ark püskürtme yöntemi; sabit gerilim DC dağıtıcı güç kaynağı, basınçlı hava beslemesi ve elektrik veya hava tahrikli motor içeren tel besleyiciler kullanılarak bütünlük kazanmaktadır. Aynı zamanda ark püskürtme tabancası, hava memesi, tel kılavuzu, hava kabı, ark kalkanı, kablo ve hortumlar da yardımcı ekipmanlarıdır (Davis, 2004).

Elektrik ark sprey kaplama işleminde erime gücü, akımın şiddetiyle ilişkilidir. Arklı püskürtmede kaynak transformatörleri kullanılmamaktadır. Bunun sebebi; erimenin düzgün olmaması, akımın sabit bir değerde uygulanamamasıdır. Transformatörler yerine kaynak jeneratörleri ve redresörleri tercih edilmektedir. Redresör; akü şarj etmeye yarayan ve DC güç sağlayan cihazların genel adıdır. Sabit voltaj ve sabit akım prensibine göre çalışan modelleri olduğundan dolayı, elektrik ark sprey kaplama yönteminde tercih edilmektedir. Ark sprey kaplama yönteminde metaller yaklaşık 4000 °C' de erirler. Yüzeye çarpan metal partikülleri, daha sıcak halde ve yassı şekildedirler (Tafralı, 2006). Aşağıda Tablo 3' te çeşitli malzemeler için ark sprey kaplama yönteminin çalışma değerleri verilmiştir.

Tablo 3: Çeşitli malzemeler için elektrik ark sprej kaplama yönteminin çalışma değerleri (Anık, 1993).

Malzeme	Tel Çapı (mm)	Telin İlerleme Hızı (m/dk)	Erime gücü	Akım Şiddeti (amper)	Enerji Sarfiyatı (kW/s)
Çelik	1,6	13,2	12,8	260-280	7,3
Cr-Ni' li Çelik	1,6	13,2	12,8	250-280	7,3
Bakır	1,6	14,6	15,6	230-240	6,2
Bronz	1,6	20	20,6	230-240	5,8
Pirinç	1,6	20	20,6	250-290	5,8
Çinko	2	20	16,9	250-290	5,6

Elektrik ark sprej kaplama yöntemiyle kaplanan malzemeler incelendiğinde yüksek seviyede gözenekli oldukları tespit edilmiştir. Bu sebeple kaplanacak olan malzeme ile alt tabaka arasında düşük bağ kuvveti vuku bulmaktadır. Gözeneklilik, alt tabakayı koruma yeteneğini azalttığından dolayı istenmeyen yapıların kaplanacak olan malzemeye geçmesine sebebiyet vermektedir. Bu durum yapının hasara uğrayıp, zarar görmesini ve mukavemetinin azalarak tabaka şeklinde kopmasına neden olur. Bundan dolayı, ark sprej kaplama yöntemi; yüksek gözenekliliğin kabul edilebileceği kaplamaların tercih edileceği uygulama alanlarında ve hataların büyük problemlere olanak sağlamadığı işlerde tercih edilmelidir. Problem esnasında hasar görmüş kaplamaların değişiminin mümkün olabileceği ve bu durumun uygulama sonucunu ve performansını etkilemeyeceği durumlarda elektrik ark sprej kaplama prosesi kullanılmalıdır. Kolay uygulanabilir olması, maliyet bakımından ucuz olması elektrik ark sprej kaplama yöntemini tercih sebebi yapan özellikleridir (Davis, 2004).

Metal kaplama yöntemlerinde ark sprej kaplama yöntemi en hızlı yöntemler arasında olup, yüksek verim elde etmektedir. Elektrik ark sprej kaplama yönteminde, TIG ve MIG kaynak yöntemlerinde kullanılan tellere eşdeğer teller kullanılmaktadır. Ark sprej kaplama, termal sprej kaplama yöntemleri arasında önemli bir mevkiye sahip olup, yüksek hızlı püskürtme özelliğiyle diğer prosesleri geride bırakmaktadır. Bu özelliği sayesinde gemi güverteleri için çelik yapılarda, su ve depolama tanklarında ve deniz altında kullanılacak ekipmanların korozyon ve aşınma özelliklerini iyileştirmek

amacıyla kullanılmaktadır (Dorfman, 2012). Aynı zamanda elektrik ark sprej kaplama yöntemiyle çinko, kurşun, kalay ve alüminyum esaslı malzemeler ince bir film kesiti şeklinde kaplanacak olan malzemenin yüzeyine püskürtülebilmektedir. Bu işleml elektrik ark sprej prosesinin yüksek depolama hızına sahip bir proses olduğunun ispatıdır. Bu özelliğiyle ark sprej kaplama tekniğiyle kaplanmış numunelerin yüzeyleri dış etkilere karşı korunmuş olacaktır. Ayrıca parçaların aşınmış kısımlarına dolgu görevi görmekte ve kır dökme demir parçaları üzerinde döküm hatalarının sonlandırılmasında da elektrik ark sprej prosesi ön plana çıkmaktadır. Boya ve plastik endüstrisinde, piston, rulman ve şaft gibi makine ekipmanlarının bakım ve onarımında da elektrik ark sprej yöntemi tercih edilmektedir. Bu prosesle iki tip tel kullanılarak kompozit kaplamalar da yapılabilmektedir. Bunun yanı sıra; yalnızca tel formunda kaplama malzemeleri için uygun olan ark sprej tekniği, uygulama platformunda kısıtlanmaktadır. Yoğunluğu düşük kaplamalar elde edilmesi de prosesin kusurları arasında göze çarpmaktadır (Schneider vd., 2006).

Elektrik ark sprej kaplama, kaymaz yüzey kaplamaları için istenilen bir prostestir. Yaygın olarak kullanılan bu yöntemin performansı; akım şiddeti, telin ilerleme hızı, gözeneklilik, püskürtme hızı vb. gibi parametrelere göre farklılık göstermektedir. Endüstriyel uygulama alanlarında kendini ispatlayan bu yöntem, gelişime açık bir halde günümüzde de tercih edilmektedir (Pawlowski, 2008).

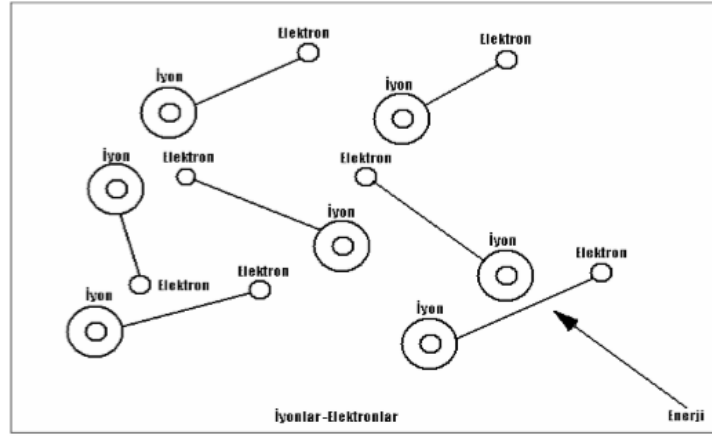
2.1.3 Plazma Sprej Kaplama Yöntemi

Plazma sprej kaplama prosesi; alev sprej ve ark sprej prosesinden sonra geliştirilmiş olup, 25 yıldan daha uzun bir süredir kullanılmaktadır. Bu prosesle ilgili en önemli incelemeler 1960' lı yılların başında gerçekleşmiştir. Günümüzde ise; herhangi bir malzeme herhangi bir altlık üzerine plazma sprej kaplama yapılarak kaplanabilmektedir. Bu özelliğinden dolayı geniş kullanım alanlarında tercih sebebi olmaktadır (Davis, 2004).

2.1.3.1 Plazmanın Tanımı

Plazma, maddenin katı, sıvı, gaz halinden sonra dördüncü hali olarak bilinmektedir. Bünyesinde iyon, elektron, nötr atom veya molekül, uyarılmış atom veya molekül, uyarılmış atom veya foton karışımını taşıyan kompleks bir yapıdır. Elektrik ve ısıyı oldukça iyi iletme kabiliyetine sahip olan plazma, manyetik ve elektrik alanlarında kendini göstermektedir. Aynı zamanda yüksek sıcaklık ve enerji özelliklerine de sahip olan plazma, dış ortama karşı nötr özellik göstermektedir. Atom ve moleküller için iyonizasyon

enerjisi oldukça önemli bir parametredir. İyonizasyon enerjisinden daha yüksek enerjiye sahip bir gaz atomu, bu enerjiyi bünyesinden atmak için kendinden bir elektron kopartarak iyonik hale geçmektedir. Bu olayın aynısı bir gaz kütesine uygulandığında plazma elde edilmiş olacaktır. Genellikle elektrik enerjisiyle plazma eldesi yaygın olarak tercih edilirken; manyetik, mekanik, ısı, ışın enerjileriyle de plazma elde edilebilmektedir. (Islak ve Buytoz, 2011). Aşağıdaki Şekil 15' te iyonlaşma ve plazma oluşumu gösterilmiştir.



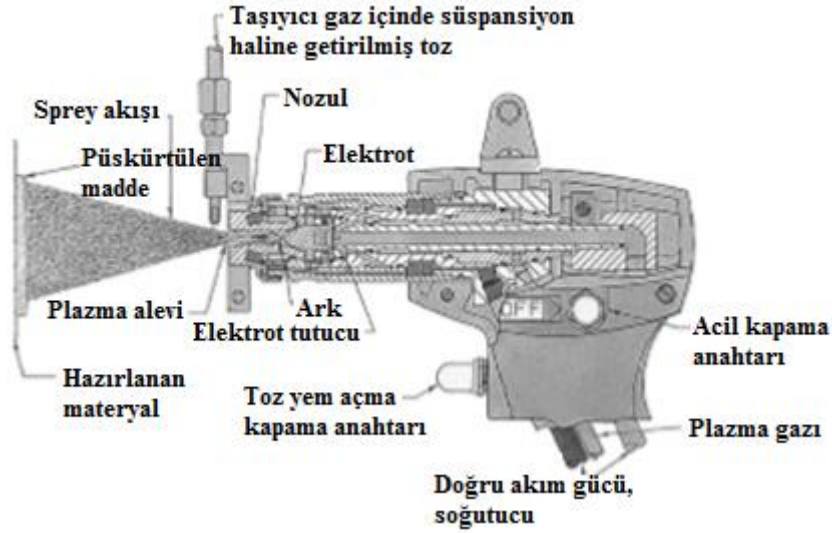
Şekil 15: İyonlaşma ve plazma oluşumu (Tafralı, 2006).

2.1.3.2 Atmosferik Plazma Sprey (APS) Kaplama Yöntemi

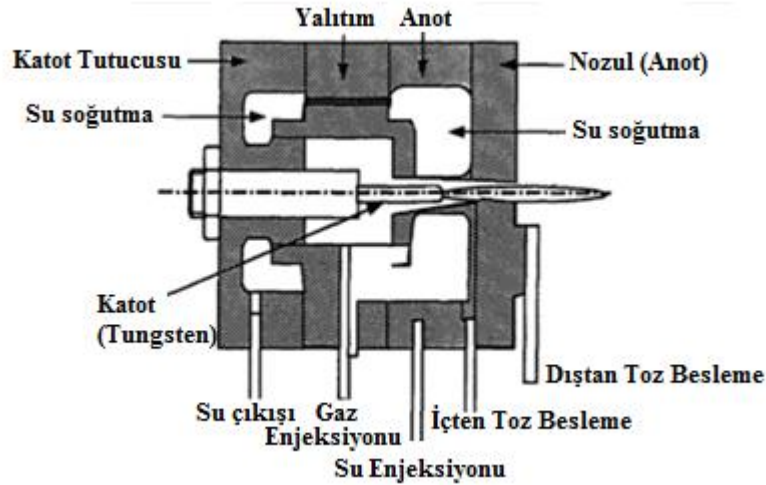
Plazma sprej kaplama yöntemi; altlık bir malzeme üzerine metalik veya metalik olmayan malzemelerin ergimiş veya yarı ergimiş bir formda çökertilmesiyle meydana gelen termal sprej kaplama ailesinin bir koludur. Bu proseste altlık malzeme soğutma sistemleri yardımıyla düşük sıcaklıklarda tutulabilmektedir (Yeşildal ve Günay, 2007).

Bu yöntemde atmosferik denmesinin sebebi; hava ile temas halinde uygulanmasıdır. Atmosferik plazma sprej kaplama yönteminde, plazma arkının ısıyla kaplanacak olan malzemenin yüzeyi ertilir. Ayrıca plazma arkı, elektrik arkının yoğunlaşması görevini üstlenmektedir. Arkın yoğunlaştırılması ark plazma kuvvetiyle mümkündür. Su soğutmalı bakır borular içerisine ark plazma kuvveti uygulanarak ark yoğun kıvama getirilir. Arkın akış yoğunluğu bu kuvvetle doğru orantılıdır. Yoğunluğu artan ark sayesinde plazma sprej kaplama yöntemi, metallerin kesilmesi veya kaplanması amacıyla kullanılmaktadır (Kurbanoglu ve Özkavak, 2013).

Plazma prosesi; plazma sprej kaplama tabancası, güç kaynağı, sprej malzemesi gibi ekipmanlarla tamamlanmaktadır. Aşağıda Şekil 16 ve Şekil 17' de plazma sprej kaplama tabancası ve tabancanın elemanları gösterilmektedir.



Şekil 16: Plazma sprej kaplama tabancası şematik gösterimi (Davis, 2004).

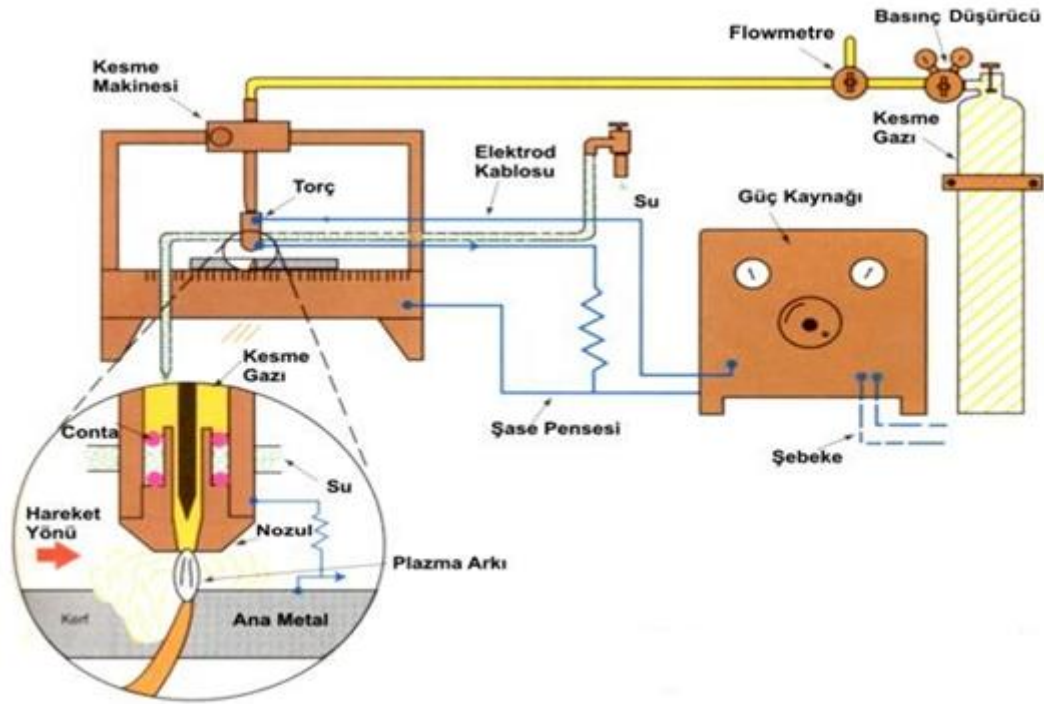


Şekil 17: Plazma sprej kaplama tabancasının elemanları (Kurt, 2001).

Plazma sprej tekniğinde ana düşünce; maliyeti düşük bir ana malzeme üzerine ince ve koruyucu değeri yüksek kalkan görevinde bir tabaka meydana getirmektir. Prosesin prensibinde, iyonizasyon işlemine tabi tutulmuş gazın içerisinde yer alan erimiş toz formundaki malzemenin, kaplanacak yüzeye yüksek sıcaklık ve hızlarda püskürtülmesi yer almaktadır. Çevresel koşullar, plazma ve toz partiküllerinin birbirleriyle etkileşimleri sprej kaplama tekniğinin kalitesini etkileyen önemli parametrelerdir. Toz partiküllerinin birbirleriyle etkileşimi; tozun şekli, boyutu, yoğunluğuna, plazma alevine ve alev hızına,

kimyasal bileşimine, entalpisine, tozun hangi şekilde plazma alevi içerisine gönderildiğine kadar birçok parametreyle ilişkilidir (Davis, 2004).

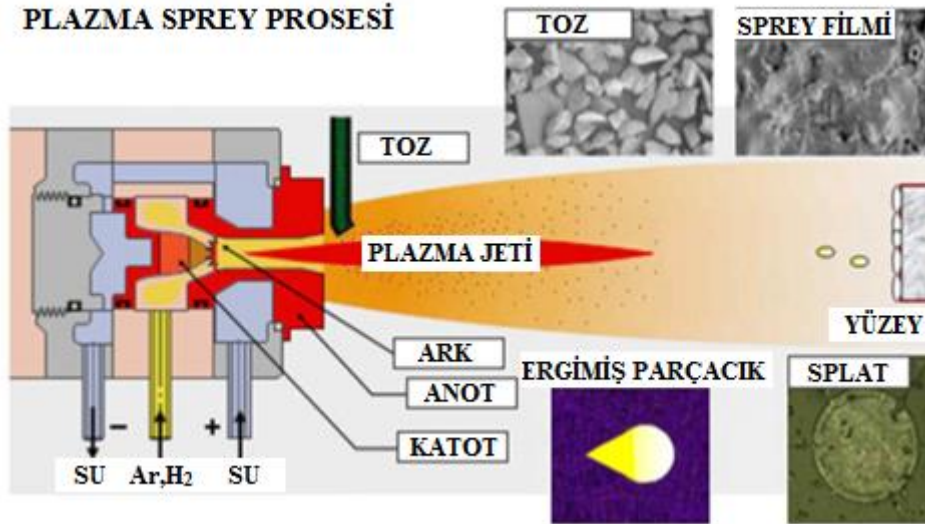
Plazma sprej kaplama gaz ünitesi, güç ünitesi, toz besleme ünitesi, soğutma ünitesi, püskürtme ünitesi ve kontrol ünitesi kısımlarından meydana gelmektedir. Genellikle ısı girdisi düşük olan bu sistemde, püskürtme hızı 0.45 kg/sa ile 14 kg/sa arasında değişmektedir. Bu değer aralıklarında değişim göstermesinin sebebi; kullanılan ekipmanların çeşidi ve değişebilen tozlardır (Dorfman, 2012). Şekil 18' de plazma sprej kaplama prosesinin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 18: Plazma sprej kaplama yönteminin gösterimi (Tafralı, 2006).

Plazma sprej kaplama prosesinde Tungsten Katot (-) ile bakır nozul anot (+) arasında oluşan arkta geçen gazlar (Argon-Hidrojen karışımı) iyonize edilmekte ve 15.000 °C ile 25.000 °C' ye kadar varabilen plazma sıcaklığında tozlar kaplanacak malzeme üzerine püskürtülmektedir. Alevle sprej kaplama tekniğine göre daha ekonomik, ömrü uzun ve bitişik dokuya sahip kaplamalar üretilebilmektedir. Yapışma değerleri 5.000-10.000 PSI arasında değişmektedir. Pürüzlülük oranı %5 veya daha az olan plazma sprej kaplama yöntemiyle kaplanmış numuneler, olumsuz dış etkenlere karşı dayanım özelliğiyle ön plana çıkmaktadırlar (Davis, 2004).

Prosesin yüksek sıcaklıkta gerçekleşmesi sebebiyle nozul sürekli olarak soğutma suyuna tabi tutulmalıdır. Kullanılan toz, taşıyıcı bir gaz (Ar, N₂) vasıtasıyla plazma alevi içerisine gönderilmektedir. Kaplama malzemesi olan toz partikülleri, açığa çıkan yüksek sıcaklık nedeniyle, erimiş ya da yarı erimiş formda iş parçasına ivmelendirilmektedir. Bu durum oldukça yüksek hızlarda gerçekleşmektedir. Yüksek hıza maruz kalarak iş parçasının yüzeyine çarptırılan eriyik, yüzeye çok hızlı temasa geçerek soğumaya başlar. Bu hızlı soğuma sonucunda da yapıda koruyucu yüzey tabakası yani çökelti oluşur. Çoğu zaman işlem sonunda oldukça düzgün ve parlak kaplamalar elde edildiğinden dolayı tekrardan yüzey işlemlerine başvurulmaz (İçingür ve Eray, 2008). Şekil 19' da plazma sprey kaplama yöntemi şematik olarak, kaplama, splat yapısı ve kullanılan toz mikroyapısı ile birlikte gösterilmektedir.

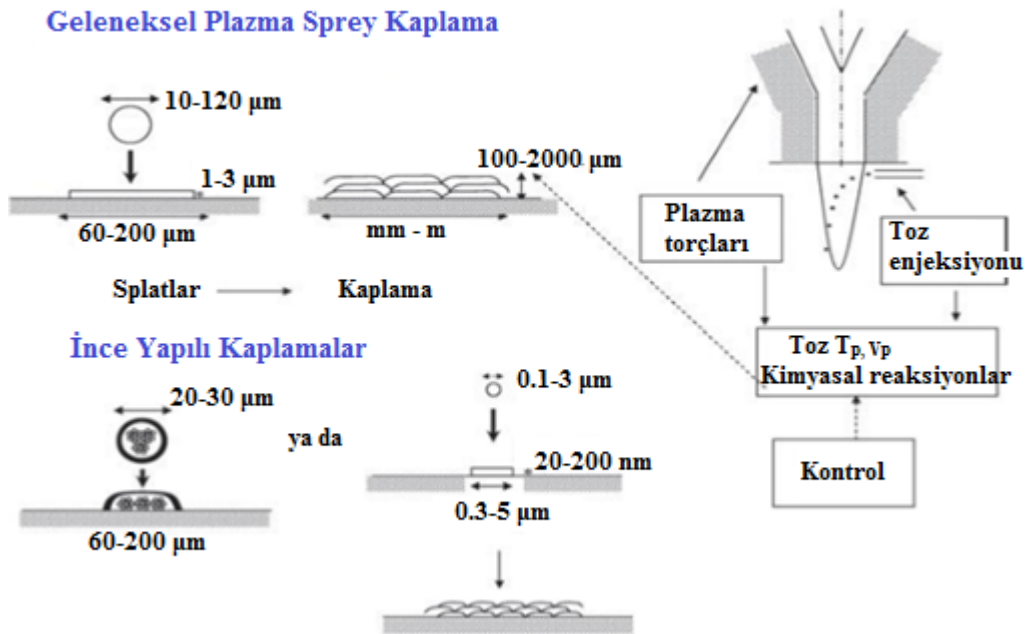


Şekil 19: Plazma sprey kaplama yönteminin kaplama, splat yapısı ve kullanılan toz mikroyapısı ile birlikte şematik olarak gösterimi (Robotti ve Zappini, 2012).

Plazma sprey kaplama yönteminde kaplamalar, altlık malzeme üzerine gönderilen partiküllerin yüzeye çarpmasıyla meydana gelmektedir. Bu sebeple kaplamayı etkileyen en önemli parametreler arasında yüzeye çarpıp temas eden partiküllerin boyutu, hızı ve sıcaklığı gelmektedir. Partiküllerin boyutu kaplanacak olan malzemenin yüzeyine göre değişmektedir. Hız ve sıcaklık parametreleri ise; plazma torcuna bağlıdır. Bu prosesin en önemli püf noktalarından birisi, altlık malzeme yüzeyine çarpan partiküllerin tam anlamıyla erimiş halde olması gerekliliğidir (Pawlowski, 2008).

Plazma sprej yöntemi çok yüksek sıcaklıklarda uygulanan bir yöntemdir. Yüksek sıcaklık beraberinde kaplama malzemesinin sıcaklığını da artırmaktadır. Bu esnada altlık malzeme çok fazla sıcaklığa maruz kalmadığından yapısında farklılık gözlenmemektedir. Plazma sprej yöntemi ile metal, polimer ve seramik içerikli tüm malzemeler kaplanabilmektedir. Hemen hemen tüm malzemelerin kaplanmasında faydalandığımız plazma sprej prosesi, uygulama alanı oldukça geniş ve donanımlı bir kaplama tekniğidir (Islak ve Buytoz, 2011).

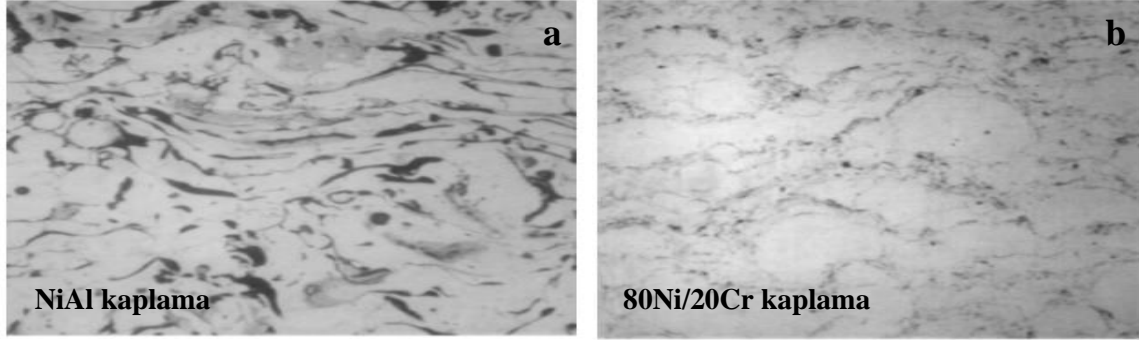
Plazma sprej kaplamalarda bağlanma mukavemetini artırmak için kaplama işlemi öncesi altlık malzeme yüzeyinin pürüzlendirilmesi gerekmektedir. Kaplanacak yüzeye ergitilmiş partiküller hızla püskürtülerek yüzeye çarptırıldıktan sonra hızla soğuyarak katı hal alırlar. Ergimiş partiküllerin katılaştığı anda altlık malzeme yüzeyindeki partiküllerde gerilme meydana gelir. Bu sebeple de; bu bölgeler sayesinde yüzeye çarpan partiküller yüzeye tutunma özelliği gösterirler (Kahraman, 2000). Şekil 20' de plazma sprej kaplama yönteminin oluşum mekanizması gösterilmektedir.



Şekil 20: Plazma sprej kaplama yönteminin oluşum mekanizmasının gösterimi (Fauchais, 2004).

Kaplama tozu, ergiyik veya yarı ergiyik forma getirilerek taşıyıcı gaz vasıtasıyla üst kısımdan plazmaya beslenmektedir. Bu esnada vuku bulan gazın debisi oldukça önem arz etmektedir. Gaz debisi az ise; toz plazma içerisine gönderilemez ve sonuç olarak da plazma beslenemez. Gaz debisinin fazla gönderilmesi halinde ise; plazma çok beslenerek,

partiküller erгийemez. Böylelikle prosesin işleyişi sağlıklı olmaz ve verim düşer. Tüm bunlar göz önüne alındığında; kaplama oluşum mekanizması için gazın debisinin düzgün ayarlanması oldukça önem arz etmektedir. Aşağıda Şekil 21' de atmosferik plazma sprej kaplama yöntemi uygulanan metal kaplamaların oksidasyon seviyelerini gösteren mikro yapıları gösterilmektedir.



Şekil 21: (a) Yüksek oksijen düzeyli NiAl kaplama, (b) Tipik gaz seviyeli 80Ni/20Cr kaplama (Davis, 2004).

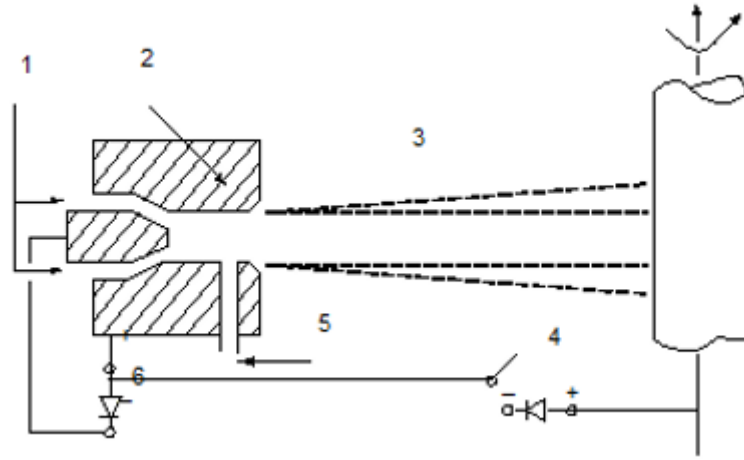
Plazma sprej kaplama yönteminin en büyük avantajı; her malzeme için uygulamaya açık bir kaplama yöntemi olmasıdır. Birbirinden bağımsız kaplanacak malzeme ile altlık malzeme seçimi yöntemin en önemli özelliğidir. Uygulama esnasında su ve koruyucu gaz kullanılması yöntem için büyük avantajdır. Kaplanacak malzemenin sıcaklığı soğutma işlemiyle 200 °C' den daha düşük sıcaklıklarda tutulabilmektedir. Bundan dolayı, şekil değişimi görülmemekle birlikte kaplanacak malzemelerin mikro yapılarında da farklılıklar gözlenmemektedir (AWS Committee, 1997).

Plazma sprej yöntemiyle gerçekleştirilen seramik kaplamalar, metalik kaplamalarla kıyaslandığında oldukça iyi aşınma ve korozyon direnci özellikleriyle öne çıkmaktadırlar. Korozyon ve aşınmaya dirençli uygulamalarda özellikle de dizel motorlarında tercih edilmektedirler (Davis, 2004).

Plazma sprej yönteminde kullanılan toz alaşımları arasında ise; paslanmaz ve karbon çelikleri, seramikler (alüminyum oksit, zirkonyum oksit vs.), bronzlar, karbürler (krom karbür, tungsten karbür vs.), süper alaşımlar ve sermetler gelmektedir. Bu proses; pistonlar, türbin kanatları, segmanlar, yanma odaları, krank milleri, roket nozulları vb. gibi uygulama alanlarında kullanılmaktadır (Pawlowski, 2008).

2.1.3.3 Vakum Plazma Sprey (VPS) Kaplama Yöntemi

1974 yılında E. Muehlberger isimli bilim adamı; (düşük basınçlı) vakum plazma sprej yönteminin temellerini atıp, ilk defa kullanmıştır. Atmosferik plazma sprej kaplama 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). Aşağıda Şekil 22' de vakum plazma sprej kaplama yönteminin şematik gösterimi verilmiştir.

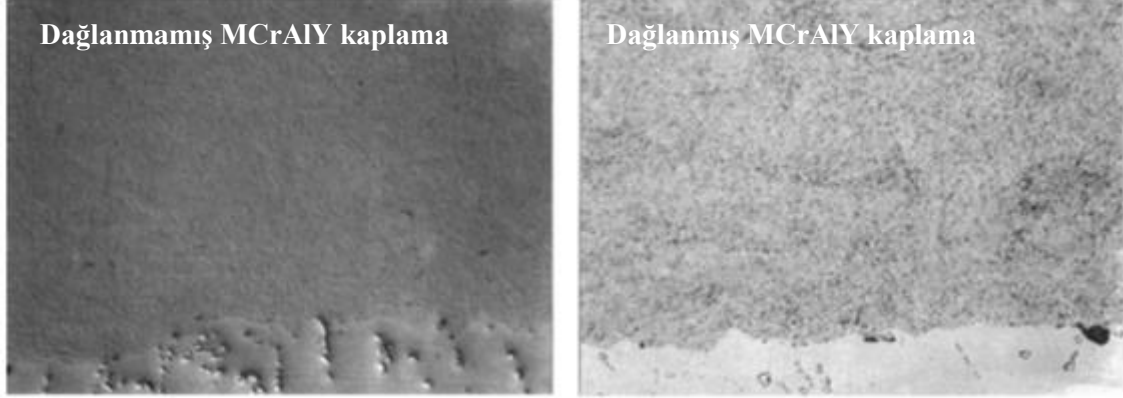


Şekil 22: Vakum plazma sprej kaplama yönteminin şematik gösterimi 1) Çalışma gazları girişi, 2) Anot, 3) Vakum çemberi, 4) Ark üretici, 5) Toz giriş kısmı, 6) Plazma üretici (Döleker, 2015).

Vakum prensibinde basınç önemli bir parametredir. Atmosferik basınç altında gaz molekülleri birbirine çok yakın mesafelerde olup temas halindedirler. Sürekli hareket halinde olduklarından kısa mesafede birbirleriyle çarpışırlar. Serbest yol denilen bu mesafe aralıklarında vakum pompası devreye girmektedir. Vakum pompasının işlevi molekülleri birbirlerinden ayırmaktır. VPS sprej kaplama bu işlevsel özelliği nedeniyle tercih edilmektedir (Tafralı, 2006).

Vakum plazma sprej kaplama prosesi; vakum altında tozların plazma jetine gönderilmesiyle kaplama işleminin uygulanmasıdır. Bu sistemde ark (-) negatif kutup, kaplanacak olan yüzeyin altlık malzemesi ise (+) pozitif kutuptur. Negatif kutuplanan ark ivme kazanarak kaplanacak olan malzemenin yüzeyinin temizlenmesini ve altlık malzemenin de ısınması görevini üstlenmektedir. Spreye tutunan partiküllerin en önemli

özelliği yüksek kinetik enerjiye sahip olmalarıdır. Böylelikle kaplanacak olan yüzey yüksek kinetik enerjili partiküller sayesinde düşük poroziteli olup, oksitlenmeden en az seviyede etkilenecektir (Dorfman, 2012). VPS tekniği; türbin kanat profili kaplamalarının ticari başarıya ulaşmasına vesile olmuştur (Davis, 2004). Aşağıdaki Şekil 23' te vakum plazma sprey yöntemi kullanılarak tipik MCrAlY kaplamasının mikroyapısı gösterilmektedir.



Şekil 23: VPS kaplama yöntemi kullanılarak tipik MCrAlY kaplamasının mikroyapısı (Davis, 2004).

Vakum plazma sprey kaplama yönteminde, elektronlar 10000 K ile 15000 K aralığında sıcaklığa sahip olmalıdırlar. Bu proseste argon ve hidrojen gazları, helyum ve azot gazlarıyla karıştırılarak uygulanır. Sistemde elektronun sıcaklık değeri önem taşıırken, plazmanın sıcaklığı önemli değildir. Bunun sebebi; sürekli değişen iyon ve moleköl sıcaklıklarıdır. VPS kaplama yönteminde; partiköl boyutu 5-20 µm aralığında seyir etmektedir. Elektriğin gücü bu proseste çok önemlidir. Güç; 80 kW ve üstünde bir değerde olmalı, basıncın düşük olmasına ve sabitlenmesine dikkat edilmelidir. İşlem yapılırken basıncın 655 Pa ile 13.3 kPa aralığında olması gerekmektedir. Kaplama işlemi yapılırken sprey uzaklığı 300-400 mm arasında olmalıdır (Davis, 2004; Pawlowski, 2008).

VPS kaplama tekniğinde, kaplama süresi, basınç ve proseste kullanılan güç önemli parametrelerdir. Bu yöntem gerçekleştirilirken, bu parametrelerin değiştirilebilecek şekilde olması gerekmektedir. Örneğin; uygulama esnasında basınç çok düşük seviyede seyir ederse atom ve moleköl sayısı da azalacaktır. Yapıya Argon eklendiğinde ise; yüzeydeki bazı atomlar koparak yapıdan uzaklaşacaktır. Sonuç olarak kaplanacak olan yüzey ile altlık malzeme arasındaki yapışma mukavemeti azalarak istenilen sonuçlara ulaşamayacaktır.

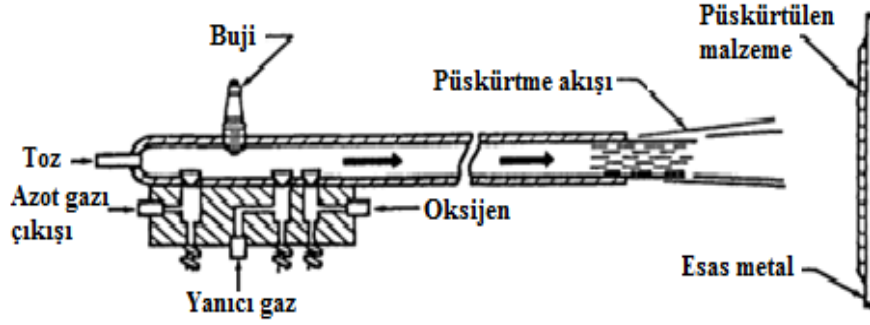
Bu durumlar VPS kaplama yönteminde oldukça dikkat edilmesi gereken hususlardır (Davis, 2004).

Plazma sprej kaplama yöntemlerinde kaplama tabakasının ana malzemeye yapışması esas alınmaktadır. Yapışma özelliği farklı parametrelerle vuku bulmaktadır. Bu parametreler, Van Der Walls kuvvetleri, difüzyon ve mekanik işlemlerdir. Altlık malzeme ile kaplama arasındaki bağ, difüzyon işlemine tabi tutulmuş kaplamalarda kullanılan malzemenin bileşimine göre değişiklik göstermektedir. Difüzyona maruz kalmamış kaplamalarda ise; kaplama tabakası ile altlık malzeme arasında yapışma ve dayanım, uygulanan prosesin koşullara göre değişim göstermektedir (Yeşildal ve Günay, 2007).

2.1.4 Detonasyon Tabancalı (D-Gun) Sprej Kaplama Yöntemi

Detonasyon tabancalı sprej kaplama yönteminde; kaplama 2-3 cm iç çapa sahip, 1-1.5 m uzunluğundaki su soğutmalı yanma odasında meydana gelmektedir. Bu yöntem için özel sprej tabancası üretilmiştir ve bu tabancanın haznesine azot, oksijen ve asetilen gazları konumlandırılarak toz haldeki kaplama malzemesinin üzerine püskürtülmektedir. Tabanca içerisinde püskürtülen toz miktarını ölçen bir hücre sistemi bulunmaktadır. Kaplama tozlarının ergitilmesi için oksijen-asetilen gaz karışımı ile taşıyıcı gazların saniyede bir kaç defa kontrollü şekilde patlatılması gerekmektedir. Sprej tabancası yardımıyla eriyik hale gelen toz partikülleri tekrar kontrollü şekilde kaplanacak malzemenin yüzeyine püskürtülerek yöntem tamamlanmaktadır (Kahraman, 2000).

Saniyede 4 ile 8 defa patlatılan asetilen-oksijen gazı gücünü elektrikten almaktadır. Patlatma işlemi yapılmadan önce azot gazının sistemden boşaltılması gerekmektedir. Patlatma işlemi için gerekli olan parametreler yüksek sıcaklık ve hızdır. Yüksek sıcaklık ve hız sayesinde sistemde mevcut olan gazlar harekete geçerek tozu ısıtacaklardır. Sonrasında da tabancadan 2500 ft/sn hızla çıkarak ivme kazanmış olacaklardır. Ergimiş toz partikülleri kaplanacak olan malzemenin yüzeyine çarptırılarak kaplama işlemi gerçekleşmiş olacaktır (Davis, 2004). Aşağıda Şekil 24' te detonasyon tabancalı sprej kaplama yönteminin şematik görünümü verilmiştir.



Şekil 24: Detonasyon tabanlı (D-Gun) sprej kaplama yönteminin şematik gösterimi (Kurt, 2001).

Patlamalı sprej kaplama yöntemi; metalik olmayan malzemelerin kaplanmasında tercih edilmemektedir. Bunun sebebi; yüksek hızda meydana gelen gaz akışı yüzeyde istenmeyen hasarlara sebebiyet vermektedir. Bu durum mühendislikte yüzey erozyonu olarak ifade edilmektedir. Bu proses; 50-60 HRC' den daha yüksek sertliğe dayanım gösteren malzemeler için idealdir (Tafralı, 2006).

Bilindiği üzere bu proste yanıcı gazlar kullanılmaktadır. Gazların bünyesindeki ısıl ve kinetik enerjileri de avantaj teşkil etmektedir. Yüksek sıcaklık ve çok yüksek hızlarda uygulanan bu yöntem sayesinde yüzeye bağı oldukça kuvvetli tabakalar elde edilmektedir. Bu da boşluk oranı düşük ve yüksek bağ mukavemetli kaplamaların üretilmesi anlamına gelmektedir (Dorfman, 2012).

Yüksek sıcaklıklarda meydana gelen bu teknikte, ana malzemenin sıcaklığı 150 °C' nin altında olmalıdır. Sıcaklığın stabil kalması için CO₂ ile soğutma işlemi yapılmaktadır. Sistemde kullanılan alevin sıcaklığı ise, yaklaşık 3000 °C civarındadır. Yüzeye çarpan partiküllerin çok hızlı olması, ana malzeme yüzeyinde boşluk seviyesinin düşük olmasını sağlamaktadır. Böylece bağ mukavemeti yüksek kaplamalar elde edilmiş olmaktadır. Püskürtülen tozların tane büyüklükleri 6 ile 50 mm aralığında değişmektedir. Bu yöntem oldukça maliyetli ve gürültülü bir yöntem olduğundan özel olarak hazırlanmış bir uygulama odasında yapılmalıdır. Sistemin uygulanma esnasında dışarıya verdiği ses, 150 dB' den fazladır. Partikül hızları bakımından alev ve plazma sprej kaplama yöntemleriyle karşılaştırıldığında; patlamalı sprej kaplama yöntemi birinci sırada gelmektedir. Aynı zamanda bu yöntemin kinetik enerjisi, alev sprej yönteminden yaklaşık 25 kat daha fazladır (Kurt, 2001).

Bu yöntemde; tabancanın sıcaklığı yaklaşık 3315 °C' nin üstünde olmasına rağmen, kaplanacak olan malzemenin sıcaklığı 150 °C' nin altında stabildir. Yöntemin en önemli özelliği; kaplama işlemi yapılırken kaplanacak olan malzemenin mekanik özelliklerinde farklılıkların gözlenmemesidir. Bu sebeple ergime sıcaklığı yüksek malzemelerin kaplanmasında tercih sebebi olmaktadır. Fakat düşük biriktirme hızı, sistemin fazlaca gürültülü olmasından dolayı özel bir uygulama odasında yapılması kısıtlılığı ve oldukça maliyetli olması da dezavantajları arasındadır (Davis, 2004).

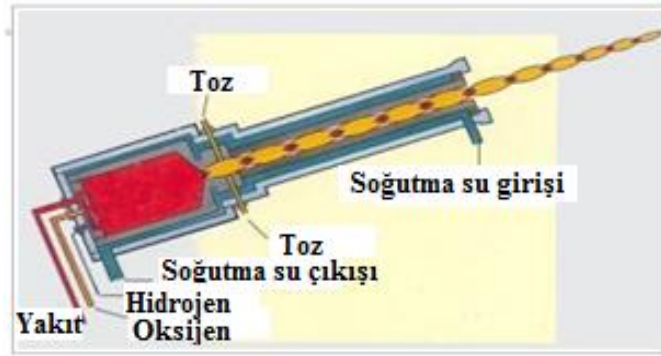
Prosesin yüksek sıcaklık ve hız parametrelerini göz önüne aldığımızda, aşınmaya, korozyona ve oksidasyona dayanım gösteren kaplamaların imal edilmesi istenmektedir. Bu sebeple bu uygulama; uçakların gaz türbin motorları ve ekipmanlarında, nükleer güç endüstrisinde, kağıt ve plastik sanayinde, tekstil makina parçaları ve kesici uç takımlarında koruyucu görevi üstlenmek ve malzemelerin ömrünü artırmak amacıyla kullanılmaktadır (Yeşildal ve Günay, 2007; Dorfman 2012).

2.1.5 Yüksek Hız Oksi-Yakıt (HVOF) Sprey Kaplama Yöntemi

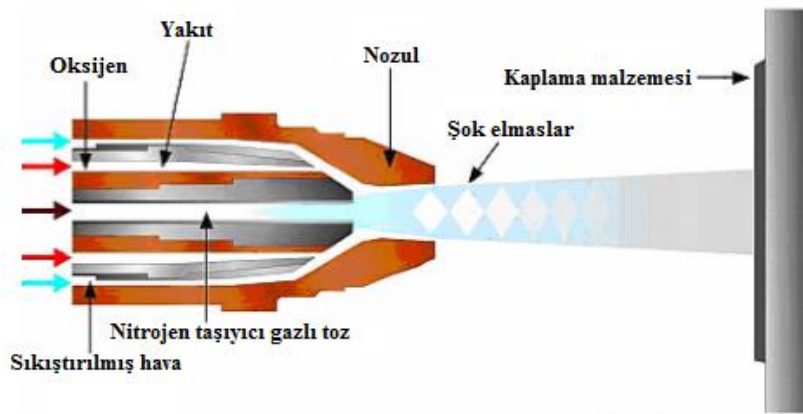
Yüksek hız oksijen-yakıt sprey kaplama yöntemi; termal sprey kaplama teknolojisinin son on yıldaki en mühim ve diğer yöntemleri geride bırakacak özellikteki buluşu ünvanıyla ön plana çıkmaktadır. Yöntem 1980' li yılların başlarında detonasyon tabancalı sprey kaplama yöntemine ek olarak icat edilmiş ve gelişim sürecine girmiştir. HVOF kaplamalarında kullanılan tozların partikül hızları oldukça yüksek olduğundan dolayı yapıda porozite oranı yok denecek kadar azdır. Aynı zamanda bu yöntemin tercih edildiği kaplamalar düşük yoğunluk özelliğine sahiptirler (Pawlowski, 2008).

Bu yöntemde yakıt gazı olarak propan, propilen, hidrojen veya kerosen kullanılmaktadır. Çok yüksek hızlarda HVOF tabancasından püskürtülen yakıt gazı, yanma odasında oksijen ile temas geçerek yanmaktadır. Basıncın maksimum olduğu sırada toz partikülleri tabancanın namlusundan püskürtülmektedir. Bu esnada yanıcı gazın basıncı 4.1 ile 6.2 bar aralığında değişmekte ve bu durum püskürtme hızını da etkilemektedir. Diğer sprey kaplama tekniklerinden daha yüksek püskürtme hızına sahip olan HVOF yöntemi sonucunda düşük poroziteli ve sert kaplamaların eldesi mümkündür. Proseste kullanılan malzeme tercihinin ve kaplamanın kalitesine göre farklılıklar yapılabilmesi yönetime oldukça avantaj sağlamaktadır (Davis, 2004).

HVOF termal sprey kaplama prosesinde; yüksek basınç koşullarında oksijen gazı ile yakıt gazı karıştırılarak yanma reaksiyonu vuku bulmaktadır. Yanmanın asıl amacı; çok yüksek partikül hızlarında kaplama yönteminin tamamlanmasıdır. Sistemde kullanılan yakıt gazları (hidrojen, propan, asetilen vb.), HVOF tabancasının ön haznesinde bulunan siflon sisteminde karıştırılarak nozulda gönderilirler. Nozulda biriken gaz karışımı silaha enjekte edilerek tutuşturulmaktadır. Tutuşma işlemi sonucunda açığa çıkan alev, spiral şeklinde dönerek tüm mekanizmayı sarmalar ve sonuç olarak ergimiş toz zerrecikleri kaplanacak olan yüzeyin tüm bölgesine homojen olarak yayılarak işlem tamamlanmaktadır (Demir, 2009). Burada vuku bulan alevin spiral şeklindeki hareketi, toz partiküllerinin ısınmasına, ivmelenmesine ve eriyik hale gelmesine olanak sağlamaktadır. Bu proseste kullanılan alevin sıcaklığı 2500-3000 °C aralığında, alev hızı ise 2000 m/s olmalıdır. Sonuç olarak partikül hızları 600-800 m/sn aralığında seyir eden olan tozlar, tabanca vasıtasıyla yüksek basınçta püskürtülerek kaplama işlemi tamamlanır (Davis, 2004). Aşağıda Şekil 25 ve 26' da sırasıyla yüksek hız oksiyakıt sprey kaplama yönteminde kullanılan tabanca ve prosesin şematik görünümü verilmiştir.



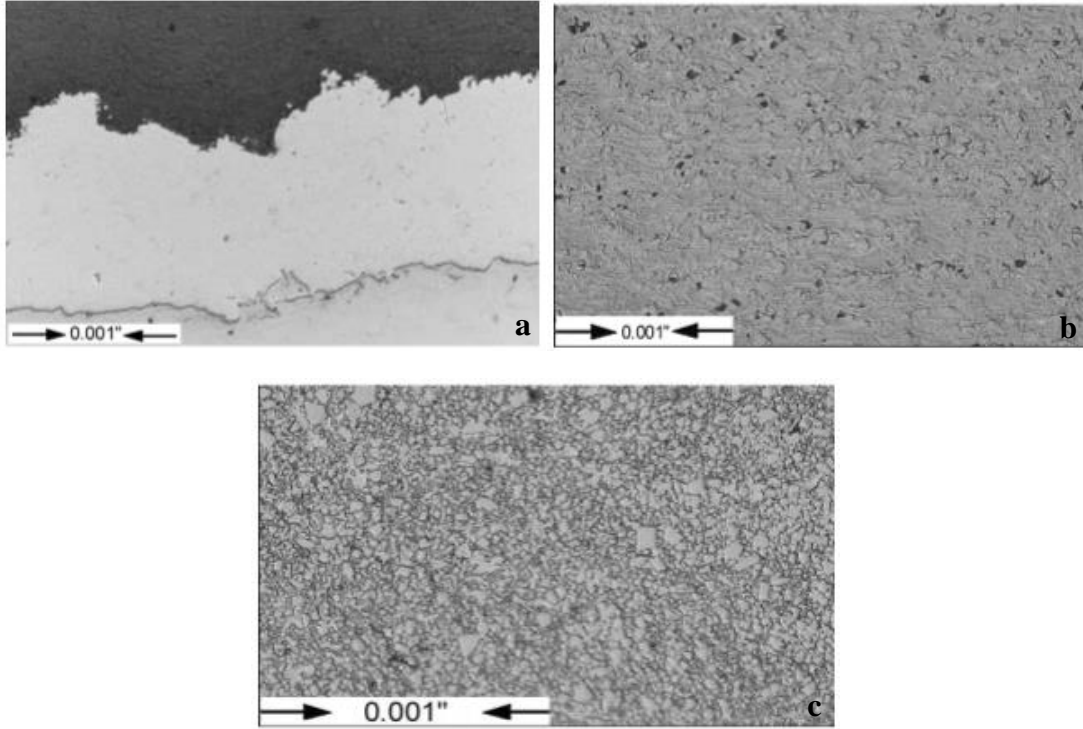
Şekil 25: HVOF tabancasının şematik görünümü (URL-2).



Şekil 26: HVOF sprey kaplama yönteminin şematik gösterimi (Tafralı, 2006).

HVOF yöntemi, yüksek kinetik enerjiye sahip bir prosestir. Yüksek kinetik enerji sayesinde yüksek partikül hızlarına ulaşılan bu sistemde, yapışma dayanımı kuvvetli kaplamalar yapmak mümkündür. Kaplama kalınlıkları 0.05-0.5 mm aralığında değişmektedir. Bununla birlikte, olağanüstü aşırı ısıtmaya maruz kalındığında, yüksek kinetik enerji koruyucu kaplamaların oluşmasına neden olarak ana malzemenin zarar görmesini engellemektedir. WC/Co gibi oksit kaplamaların uygulanmasında da HVOF yöntemi tercih edilmektedir (Mingheng vd., 2005).

Bu yöntemde kullanılan başlıca toz alaşımları; karbürler (tungsten karbür, krom karbür vb.), nikel-krom alaşımları, paslanmaz çelik, Al-Bronz, süper alaşımlar (Inconel, stellite, hastelloy C triballoy 800, MCrAlY) 'dir (URL-4). Aşağıda Şekil 27' de HVOF yöntemi kullanılarak Ni, Al ve WC/Co esaslı kaplamaların mikroyapıları gösterilmektedir.



Şekil 27: HVOF yöntemi kullanılarak (a) Ni, (b) Alumina, (c) WC/Co esaslı kaplamaların mikro yapılarının gösterimi (Davis, 2004).

HVOF yöntemi; çok geniş uygulama alanına sahip bir termal spreycaplama yöntemidir. Her türlü malzemeye hitap eden bu yöntem, günümüzde birçok alanda kullanılmakta ve gün geçtikçe ileri teknolojiye ayak uydurmaktadır. Uçak sanayinde türbin kanatlarında, kağıt sanayinde kurutma silindirleri ve sıyırıcı bıçaklarda, tekstil sanayinde polimer bıçaklarında, tel çekme sanayinde tel çekme makaraları, kafalar, kademeli kasnaklar gibi

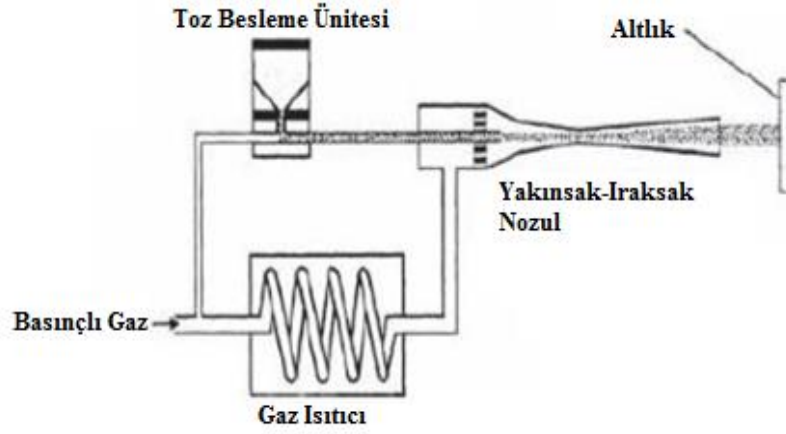
önemli ekipmanlarda kullanılmakta ve koruyucu ve dayanım arttırıcı göreviyle ön plana çıkmaktadır (URL-4).

2.1.6 Soğuk Gaz Dinamik Sprey (CGDS) Kaplama Yöntemi

Bu yöntem; plazma sprej ve HVOF sprej kaplama yöntemlerine alternatif bir yöntem olarak günümüzde kullanılmaktadır. Proses genel olarak, toz partiküllerinin kaplanacak olan malzeme yüzeyine yüksek kinetik enerji sarfıyatıyla çarptırılması ve herhangi bir hasara sebebiyet vermeden püskürtme işlemine tabi tutulması olarak özetlenmektedir. Proses işlevsel olarak HVOF kaplama yöntemine benzemektedir. HVOF kaplama prosesinden sıcaklık parametresiyle ayrılmaktadır. Soğuk gaz dinamik sprej kaplama yönteminde nozul içerisinden açığa çıkan gazın sıcaklığı diğer yöntemlere nazaran düşüktür. Bu yöntemde yakıt gazı olarak kullanılan helyum ve azot gazları kullanılmaktadır. Yakıt gazı ilk olarak hava ile temas geçerek nozula aktarılmaktadır. Karışan gazlar nozulda beslenmektedir. Nozulda beslenmeden önce bu taşıyıcı gazların 700 °C sıcaklıkta bir ön ısıtmaya tabi tutulması gerekmektedir. Bunun sebebi; kinetik enerjiye sahip gaz moleküllerinin enerjilerini üst seviyeye çıkartmak ve hızlarının artışına olanak sağlamaktır. Sistemdeki nozul, yakınsak ve ıraksak şeklindedir. Bu nozulların en büyük özelliği ses üstü hızlara çıkılmasına yardımcı olmasıdır. Toz ve taşıyıcı gazları bünyesinde bulunduran nozulda karışım gerçekleşmektedir. Sonrasında bir anda genleşme meydana gelerek hız artış göstermektedir. Beslenen gaz karışımı 300-1200 m/sn hız aralığında ana malzemenin yüzeyine püskürtülerek soğuk gaz dinamik sprej kaplama prensibi tamamlanmış olur (Karaoğlanlı vd., 2013).

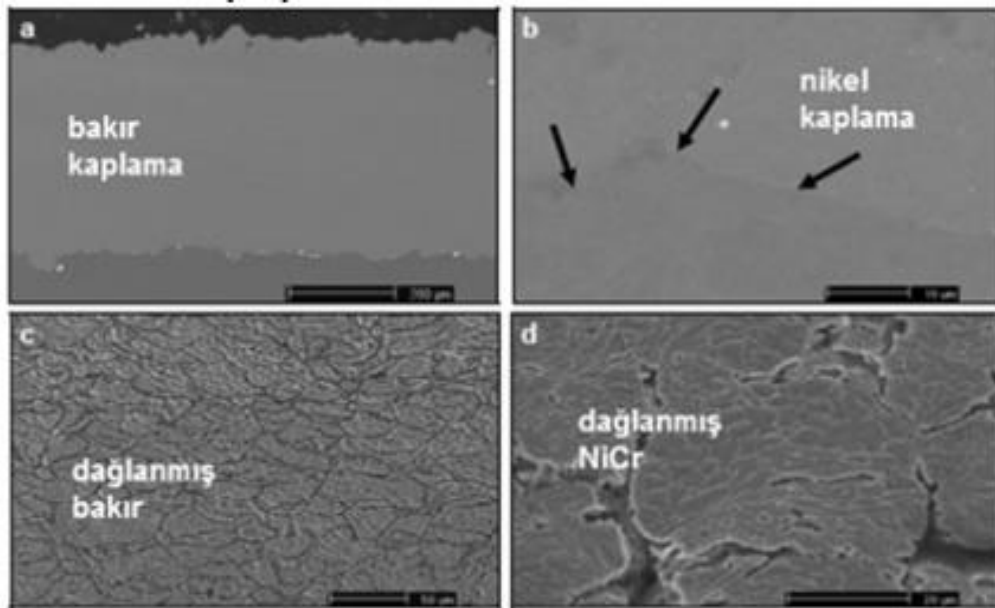
Her kaplama malzemesi için kritik bir hız değeri mevcuttur. Kritik hız parametresi soğuk gaz dinamik sprej kaplama yöntemi için önemli bir parametredir. Çünkü kritik hız değerinin üzerine çıkıldığında adhezyon vuku bulacakken, kritik hız değerinin altına inildiğinde yüzeyde erozif aşınma gözlenecektir. Soğuk gaz dinamik sprej yönteminde kaplama malzemesinin birikmesi ve akabinde kaplama işleminin meydana gelmesi partikül hızına bağlı olarak değişmektedir (Pawlowski, 2008).

Soğuk gaz dinamik sprej yöntemi; kinetik sprej, dinamik sprej, kinetik metalizasyon gibi isimlerle de anılmaktadır. Aşağıda Şekil 28' de soğuk gaz dinamik sprej kaplama prosesinin şematik görünümü verilmektedir.



Şekil 28: CGDS yönteminin şematik gösterimi (Karaoğlanlı vd., 2013).

Diğer kaplama yöntemlerine göre soğuk spray kaplama yöntemi daha düşük sıcaklıklarda kullanılmakta ve bu özelliğiyle malzemelerin iç yapısında prosesten kaynaklı değişim gözlenmemektedir. Düşük sıcaklık parametresi sayesinde oksidasyon, deformasyon gibi istenmeyen durumlar yapıda daha az kendini göstermektedir. Sistemin en büyük dezavantajı; çok yüksek sıcaklıklarda işlem görmemesidir. Düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilen bu yöntem seramik malzemeler için uygun değildir fakat metal ve polimer malzemeler için uygulama alanı oldukça geniştir (URL-3). Aşağıda Şekil 29' da soğuk gaz dinamik spray kaplama tekniğiyle üretilmiş kaplama kesitlerinin mikroyapı görünümleri verilmiştir.



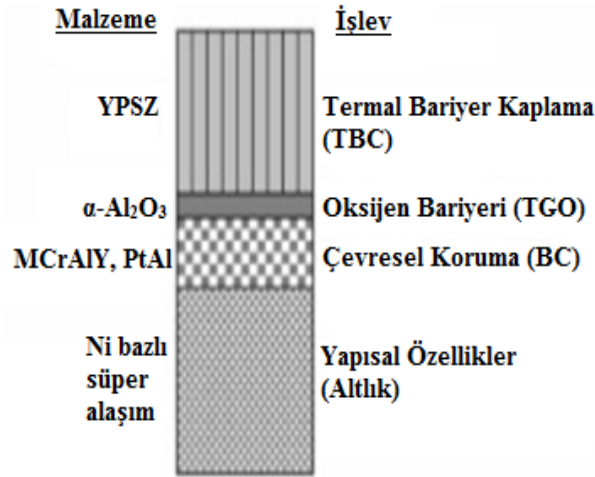
Şekil 29: Soğuk spray proses ile üretilmiş kaplama kesitlerinin mikroyapı görünümleri (Davis, 2004).

Soğuk gaz dinamik sprey kaplama yöntemiyle iyi adhezyon özelliğine sahip dayanımı yüksek sert kaplamalar elde edilmektedir. Proseste kaplama kalınlığının artmasıyla yapışma mukavemeti azalacaktır. Bu da istenmeyen bir durumdur. Genel olarak galvanik korozyonun gözlemlendiği soğuk sprey kaplamalarda, korozyon nedeniyle metalik malzemede aşınma ve kayıp meydana gelmektedir. Sistemde korozyonu önlemenin en iyi yolu, korozyona dirençli kaplamalar kullanmak ve korozyona hassasiyet gösteren malzeme seçimlerinden uzak durmaktır. Özellikle porozlu yapıya sahip malzemelerde korozyon daha sık görülmektedir. Porozite oranının artması korozyonu tetikleyici bir parametredir (Karaoğlanlı vd., 2013).

1994 yılında Alkhimov tarafından ilk kez patenti alınan soğuk gaz dinamik sprey yöntemi; genellikle uçak motorlarında ve otomobil sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Son zamanlarda ise korozyonu önlemek ve tamir amacıyla helikopter pervanelerinde işlev görmektedir (Davis, 2004; Pawlowski, 2008).

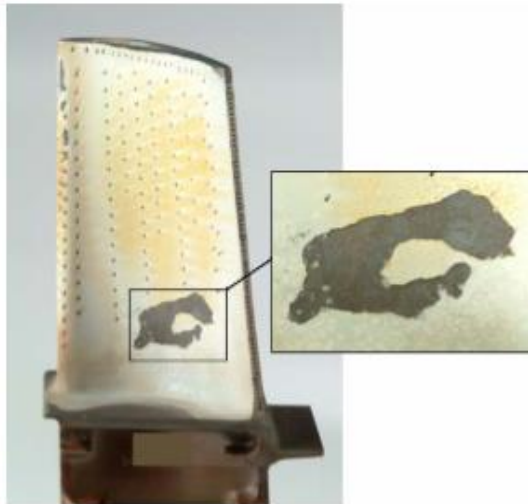
2.2 Termal Bariyer Kaplamalar

Termal bariyer kaplamalar, genellikle uzay ve uçak endüstrisinde; motorların yanma odaları ve gaz türbin bıçaklarında yüksek sıcaklığa maruz kalan ekipmanları korumak amacıyla kullanılan kaplamalardır (Alperine vd., 1997). Tipik bir termal bariyer kaplama (TBC) sistemleri; Ni esaslı süper alaşım altlıktan, seramik üst kaplamadan, seramik üst kaplamayı oksitlenmeden ve diğer olumsuz etkenlerden koruyan aynı zamanda metalik altlığa yapışmasını sağlayan (BC-Bond Coat) ve kaplama işlemi esnasında vuku bulan bir 'termal büyüyen oksit' ten (TGO) meydana gelmektedir (Dalkılıç ve Tanatmış, 2009). Aşağıda Şekil 30' da tipik bir TBC sistemi gösterilmektedir.



Şekil 30: Tipik bir TBC sisteminin gösterimi (Dalkılıç ve Tanatmış, 2009).

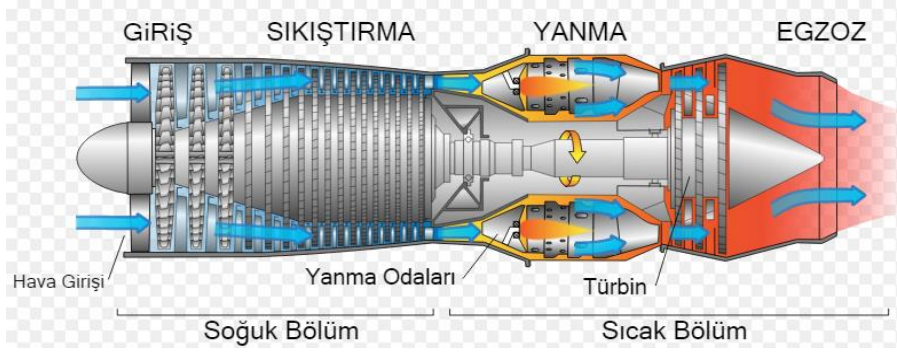
Termal bariyer kaplamalar genellikle metalik bir alt tabakaya homojen olarak seramik kaplama uygulanmasıyla oluşmaktadır. Bu tür kaplamalarda karşılaşılan en büyük problem; termal gerilmelerdir. Termal gerilmeler metalik alt tabaka ile seramik üst kaplamaların termal genişleme sabitlerinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır (Erkmen ve Taşdıvar, 2006). Uygulama esnasında istenmeyen bir durum olan termal gerilmeler sonucunda metal ile seramik ara yüzeyinde ayrılımlar ve yapıda çatlaklar meydana gelmektedir. Türbin kanatçığına uygulanan termal bariyer kaplama sistemlerinde servis esnasında seramik kaplamaların pullanarak hasara uğraması bu duruma verilebilecek örnektir. Hasar seramik üst kaplama ile bağ kaplama arasında görülmektedir (Hill vd., 2008). Aşağıda Şekil 31' de TBC' lerde rastlanan tipik bir servis hasarı gösterilmektedir.



Şekil 31: TBC sisteminde rastlanan tipik bir servis hasarının gösterimi (Dalkılıç ve Tanatmış, 2009).

Termal bariyer kaplamalar malzemelerin çalışma sıcaklığını yükselterek sistemin performansını artırmak amacıyla geliştirilmiştir. Aynı zamanda korozyon, oksitlenme ve aşınmayı önlemek amacıyla kullanılan TBC' ler, bu özelliğiyle endüstride oldukça tercih edilmektedir (Kulkarni ve Herman, 2004). Daha önce de belirttiğimiz gibi metal alt tabaka ile seramik kaplamaları yapıştırma esnasında ısıl genişleme farklılıklarından doğan termal gerilmeler, sistemde karşılaştığımız en büyük problemdir. Bu problemi en aza indirmek ve önlem almak sebebiyle yapıda Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemelerden (FDM) yapılmış kaplamalar üretilmektedir (İçingür ve Eray, 2008). Yapılan deneysel çalışmalara göre bu malzemelerden yapılmış kaplamalar süper ısıl direnç göstermekte ve özellikle uçak sanayinde gelişmiş ekipmanların kritik bölgelerinde tercih edilmektedir (İçingür ve Eray, 2008). Termal bariyer kaplamaların bir diğer en önemli özelliği ise; termal iletkenlikleridir. Kaplanacak olan malzemenin termal iletkenliğinin artması bazı önemli parametreleri olumsuz yönde etkilemektedir. Termal iletkenlik artışı, sıcaklık yalıtımını düşürerek, bağ tabakanın oksidasyona maruz kalma riskini artırmaktadır. Termal bariyer kaplamalarda tercih edilen malzeme, boşluk oranı fazla ve taneli yapıda olmalıdır. Çünkü tanecik oranının artışı ile porozite miktarının fazlalığı termal iletkenliği düşüren parametrelerdir (Kaßner vd., 2008).

Genellikle TBC' ler uçakların gaz türbinlerinde, benzinli ve dizel motorların piston tepesi, silindir kapağı ve vanaların kaplanması tercih edilmekte ve homojen şekilde kaplanacak olan malzemenin yüzeyiyle temas geçmektedir (Hazar ve Öner, 2004). Özellikle türbin bıçaklarında kullanılan TBC' ler; Ni esaslı süper alaşımlı bir altlık malzeme, MCrAlY bağ kaplama, termal yalıtımı sağlayan seramik üst kaplama ve bağ kaplama ile seramik üst kaplamanın yapıştırıldığı anda vuku bulan ve oksitlenmeye meyilli bir TGO tabakasından meydana gelmektedir (Parlakıyığıt vd., 2013). Genellikle üst kaplama olarak seramik malzemelerin tercih edildiği bu sistemde, %8 oranında Yitria esaslı Zirkonya bulunmaktadır. Yapısında Yitria ile Zirkonya kararlı hale gelmektedir (Saremi vd., 2007). Aşağıda Şekil 32' de uçakların gaz türbin motorlarının iç yapısı ve dıştan görünümü gösterilmektedir. TBC kaplamaların sıklıkla tercih edildiği yapıyı görmemiz mümkün olacaktır.



(a)



(b)

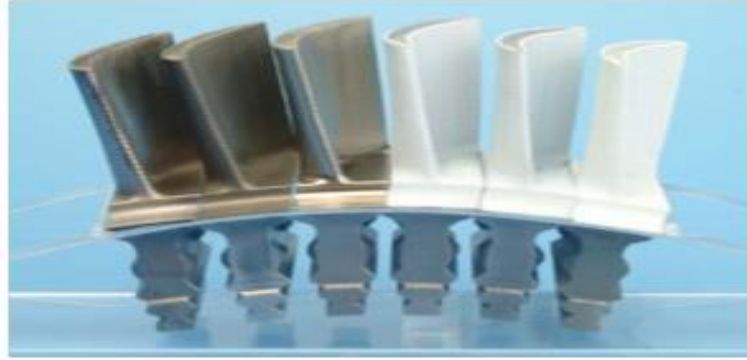
Şekil 32: (a) Uçakların gaz türbin motorlarının iç yapısı ve (b) dış yapısının gösterimi (URL-5).

Termal bariyer kaplama uygulamalarında çeşitli termal sprey kaplama yöntemlerinden yararlanılmaktadır. Bunun yanı sıra elektron demetiyle fiziksel buhar biriktirme (EB-PVD) yöntemiyle de termal bariyer kaplamalar üretilmektedir (Alperine vd., 1997). Fakat endüstride TBC' ler oldukça önem arz ettiklerinden ve adeta kalkan görevi gördüklerinden her türlü malzemeye kolaylıkla uygulanabilmesi istenmektedir. Bu sebeple EB-PVD yöntemi yüksek maliyetli olduğundan tercih edilmemektedir. En çok tercih edilen termal sprey kaplama yöntemleri arasında atmosferik plazma sprey kaplama (APS) ve yüksek hızlı oksî-yakıt (HVOF) sprey kaplama yöntemleri gelmektedir (Hill ve Phelps, 2008). Fiziksel buhar biriktirme yöntemi ile kaplama malzemesi elektron demetiyle buharlaştırılarak, kaplanacak olan yüzeye buhar formunda homojen olarak dağılmakta ve yüzeyi kaplamaktadır. Aynı zamanda bu yöntemle uygulanan kaplamalar, her çeşit malzeme yüzeyine uygunluk özelliğiyle ön plana çıkmaktadır. İster oldukça kaygan ve düzgün, ister pürüzlü yüzeye sahip bir malzemenin kaplama işlemi standartlara uygun şekilde tamamlanmaktadır. Bu yöntemle kaplanan malzeme yüzeyleri oldukça düzgün

olduğundan dolayı ekstra bir yüzey işlemine maruz kalmadan kullanıma sunulmaktadır (Hill ve Phelps, 2008).

APS kaplama yöntemi ise; yüksek sıcaklıklarda uygulandığından dolayı sistemde istenmeyen oksit yapısıyla karşı karşıya kalınmaktadır. Aynı zamanda bu yöntemin kullanıldığı kaplamalarda porozite sorunu vuku bulmakta, porozite de termal iletkenliği düşürmektedir. Özellikle poroz yapıli kaplamalar istendiğinde APS yöntemi tercih sebebi olmaktadır. Yapıdan poroziteyi azaltmak amacıyla da VPS yöntemi kullanılmaktadır. Böylelikle plazma sprej kaplama yönteminin TBC' ler için oldukça elverişli bir yöntem olduğu görülmektedir (Döleker, 2015).

Termal sprej kaplama yöntemlerinin bir diğeri olan HVOF sprej yöntemi; çok yüksek hızlarda meydana gelmektedir. Bu yöntem için düşük sıcaklık ve çok yüksek hız parametreleri gerekmektedir. Kaplanacak olan malzeme yüzeyine toz partikülleri, düşük sıcaklıklarda ve aşırı hıza sahip oldukları an püskürtülmektedirler (Davis, 2004). Sonuç olarak; HVOF yöntemiyle düşük porozite özelliğine sahip termal bariyer kaplamalar elde edilebilmektedir. Aşağıda Şekil 33' te TBC kaplanmış ve yalın haldeki türbin kanatçıkları gösterilmektedir.



Şekil 33: Yalın halde ve TBC kaplanmış türbin kanatçıklarının gösterimi (Dalkılıç ve Tanatmış, 2009).

Termal bariyer kaplamaların temelleri 1960' lı yılların başlarına dayanmaktadır. 60' lı yıllarda ilk olarak roket uygulamasında motor nozullarında kullanılan termal bariyer kaplamalar, oksidasyonu ve adhezyonu önlemek amacıyla kalkan niteliği taşımaktadır. Fakat o yıllarda yapılan deneysel çalışmalar sonunda istenilen düzeyde kaplama özelliklerine ulaşılammış, yapıda çatlama ve ayrılmalar vuku bulmuştur (Davis, 2004). Gün geçtikçe gelişen teknolojiyle birlikte termal bariyer kaplamaların uygulama alanları da

genişlemiş ve birçok metot kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle termal sprey kaplama yöntemleri bu metotların başında yer almakta ve bariyer kaplamaların uygulama alanları da genişlemektedir (Parlakyiğit vd., 2013). Uçak türbin kanatçıklarında ve türbin bıçaklarında plazma sprey yöntemiyle TBC' ler kullanılmakta ve oldukça sağlam sonuçlar elde edilmektedir. Aynı zamanda motorların yanma odalarında ve vanalarda da plazma sprey kaplama yöntemiyle TBC' ler kullanılarak geçmişten günümüze kadar geliştirilip iyileştirilmiştir. Günümüzde halen endüstriyel alanda oldukça avantaj sağlayan TBC' ler gelişime açık ve geniş kapsamlı bir tekniktir (Gürbüz ve Gökkaya, 2013).

2.2.1 Termal Bariyer Kaplamaların Hasar Oluşum Mekanizmaları

Termal bariyer kaplamalar uçakların gaz türbin motorlarında, vanalarında ve yanma odalarında aynı zamanda gemicilik ve gemi ekipmanlarının kritik bölgelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Termal bariyer kaplamaların asıl hedefi; kaplanacak olan malzemelerin yüzeyine boşluk oluşturmayacak şekilde yapışmak ve yapıyı çevresel dış etkilerden korumaktır. Böylelikle kaplanacak olan malzemenin mekanik özellikleri uygun standartlarda olacak ve endüstriyel alanda kullanıma sunulacaktır (Bose, 2007).

Termal bariyer kaplamalar genellikle Ni alaşımlı altlık malzeme, bağ tabaka, bağ tabaka ile üst tabaka arasında kaplama işlemi esnasında meydana gelen TGO yapısı ve seramik üst kaplama kademelerinden oluşmaktadır. Numunelerde herhangi bir hasara karşı önlem alınması üzerine kalkan vazifesi görmektedirler. Çevresel etkilerin yanı sıra termal bariyer kaplamaların hasar oluşum mekanizmaları; oksidasyon, termal şok ve korozyondur. Özellikle yüksek sıcaklıklarda meydana gelen sıcak korozyon TBC sistemlerinde istenmeyen ve telafisi mümkün olmayan hasarlara sebebiyet vermektedir. Belirli bir sıcaklığa maruz kalmış malzemelerde aniden soğutma işlemi uygulandığında ise; yapıda sıcaklık farklılığından kaynaklanan gerilmeler meydana gelmekte ve bu termal gerilmeler çatlaklara sebebiyet vermektedir. Bu duruma termal şok denmektedir. Termal şok direnci malzemelerde değişken özelliklere bağlı olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu mekanik özellikler kırılma, elastisite modülü, mukavemet, termal genleşme ya da termal gerilme olabilmektedir. Diğer bir hasar mekanizması olan oksidasyon ise; kaplama işlemi esnasında vuku bulan TGO yapısındaki oksijen miktarının fazlalığından kaynaklanan bir durumdur (Xu ve Guo, 2011).

Tüm bu hasar mekanizmalarının en aza indirilebilmesi için; kaplama esnasında meydana gelen TGO yapısının kalınlığı belirli bir seviyede olmalı ve kaplanacak olan malzemelerin adhezyonu en iyi seviyede vuku bulmalıdır (Wiley, 2009).

2.2.1.1 Termal Bariyer Kaplamaların Oksidasyon Davranışı

Termal bariyer kaplamalar, motorların yanma odaları, yakıt tankları ve nozullar gibi uçakların belirli bölümlerinde, denizcilik ve havacılık sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Young, 2008). Aynı zamanda yüksek sıcaklığa dayanım gösteren malzemelerde ve termal şok direnci gibi mekanik özellikleri iyileştirmek amacıyla endüstriyel uygulama alanlarında tercih edilmektedirler (Gürbüz ve Gökkaya, 2013). Yapısında iki katman halinde kompozit malzemeler bulunduran TBC sistemlerinde ilk katman yani zemin malzemesi olarak M-Cr-Al-Y kompozit malzemeleri yer almaktadır. Daha önce de bahsettiğimiz gibi TBC' ler uçakların yanma odalarında sıklıkla kullanılan sistemlerdir. İçeriğinde %8 ZrO₂ veya %20 Y₂O₂ malzemeleri ile birlikte ZrO₂.MgO gibi kompleks yapıları barındırarak yanma odalarında işlev görmektedirler (Bose, 2007).

Daha önce de ifade ettiğimiz gibi, tipik bir TBC sistemi; altlık malzeme, bağ kaplama, seramik üst kaplama ve bağ kaplamanın oksitlenmesiyle kaplama esnasında vuku bulan TGO olmak üzere 4 kademedir meydana gelmektedir. Termal büyüyen oksit tabakası (TGO) bağ kaplama ile üst kaplama arasında kaplama işlemi esnasında açığa çıkmaktadır (Young, 2008). TGO oluşumu seramik üst kaplamaların fazlaca oksijen geçirgenliğine sahip olmasından kaynaklanan kaçınılmaz bir durumdur. Aynı zamanda yapıdaki bağ kaplamaların özellikleri de TGO oluşumunu tetikleyen bir diğer faktördür. Yüksek gözenekliliğe sahip bir bağ kaplama, oksidasyonu beraberinde getirecek ve TGO oluşumu hızlanacaktır (Xu ve Guo, 2011). Yüksek sıcaklıklarda porozlu yapıya sahip bir bağ kaplamada TGO oluşumu elverişlidir. Yapıda oksijenin fazlaca olması zamanla oksidasyonun artmasına sebebiyet vermektedir. Oksidasyona maruz kalan yapıda, alüminyum difüzyonuyla karşı karşıya kalınacaktır. Alüminyumun difüzyonu ara yüzeyde birikerek, TGO' nun daha kalın ve kararlı olmasını sağlayacaktır. Zaman geçtikçe yapıda alüminyum tamamen bitecek ve α -Al₂O₃ yapısı bozulacaktır. Bunun sonucunda yapıda karışık oksitler meydana gelecektir. TGO tabakasının α -Al₂O₃ içerikli olması tercih edilmektedir. Çünkü TGO' nun kalın ve kararlı bir yapıda olması ve karışık oksitlerin de yapıda birikmesiyle gerilmeler süre gelmektedir (Young, 2008). Gerilmeler beraberinde çatlak oluşumuna sebebiyet vererek kaplanacak olan malzeme ara yüzeye tam anlamıyla

yapışamayacak ve ayrılmalar meydana gelecektir. Bu da termal bariyer kaplamalarda TGO' nun mekanik özelliklerinin ne kadar önem taşıdığını gözler önüne sermektedir. İyi bir ısı bariyer kaplama işleminde TGO' nun artışının minimum seviyede olması sağlıklı ve sağlam kaplamalarla sonuçlanmaktadır. TGO' nun yapışma kabiliyeti ne kadar iyiyse, lokal gerilme seviyesi de o kadar düşecek ve mukavemeti yüksek ısı bariyer kaplamalar elde edilecektir (Saremi vd., 2007).

Termal büyüyen oksit tabakası esasında bağ kaplama ile üst kaplama arasındaki ince bir kesit olarak ifade edilmektedir. İçeriğinde α -Al₂O₃ bulunmaktadır ve tercih edilmektedir. TGO yapısının içinde alüminyumun tercih edilmesinin asıl sebebi; MCrAlY alaşımli bağ kaplamaların içerisindeki elementler arasında oksijene ilgisi en fazla olan elementin Al olmasından kaynaklanmaktadır (Young, 2008). Alüminyumun oksijenle teması halinde hemen Al₂O₃ oluşmaya başlayacaktır. Yüksek sıcaklığa maruz kalan ara yüzeyde de bu sebeple Al oksitlenecektir. Oksidasyon olayı termal bariyer kaplamaların kullanıldığı malzemelerde her şekilde vuku bulan problemlerin başındadır. Oksidasyon yapıda ne kadar uzun süreli olursa oksijen afinitesi artacağından termal büyüyen oksit tabakası da kalınlaşacaktır. TGO' nun kalınlaşması istenmeyen bir durumdur (Bose, 2007). Yapıda kararlı ve ince bir kesit şeklinde oluşmaları, tabakalar arası iyi adhezyon özelliğine olanak sağlamaktadır. Bağ kaplama tabakasında yer alan Al, ara yüzeye doğru difüzyona uğrayarak, gitgide azalacaktır. Al' un bağ kaplamada azalmasıyla birlikte, zaman geçtikçe oksijen yapıda artacaktır. Oksijen gitgide aktive olacaktır, bir yandan da alüminanın oluşumu için gerekli olan Al azalacaktır. Bunun sonucunda da; TGO tabakasında karışık oksitler vuku bulacaktır (Young, 2008). Örneğin, düşük Al içerikli bağ kaplama tabakasına sahip bir TGO, NiO spinellerine dönüşmektedir (Döleker, 2015).

Bağ kaplamaların oksitlenmesinin bir diğer sebebi de; seramik üst kaplamalardır. Üst kaplamalarda seramiklerin tercih edilmesinin sebebi; metalik ve polimerik malzemelere nazaran korozif ve termal şartlara daha yüksek dayanıma sahip olmalarıdır. Aynı zamanda; seramikler nispeten düşük yoğunluklu ve yüksek sertlik özellikleriyle TBC sistemlerinin vazgeçilmez üst kaplama malzemeleridir (Schulz vd., 2004). Fakat seramik üst kaplamalarda çalışma esnasında çevresel etkilerden dolayı çatlakların meydana gelmesiyle oksijen geçişi gözlenmektedir. Bu da, beraberinde kaçınılmaz olan oksidasyonu getirmektedir. Yoğunluğu yüksek olan seramik üst kaplamalarda da oksijen geçişi görülmekte ve TGO tabakası oluşmaktadır (Bose, 2007). Sistemde TGO tabakasından

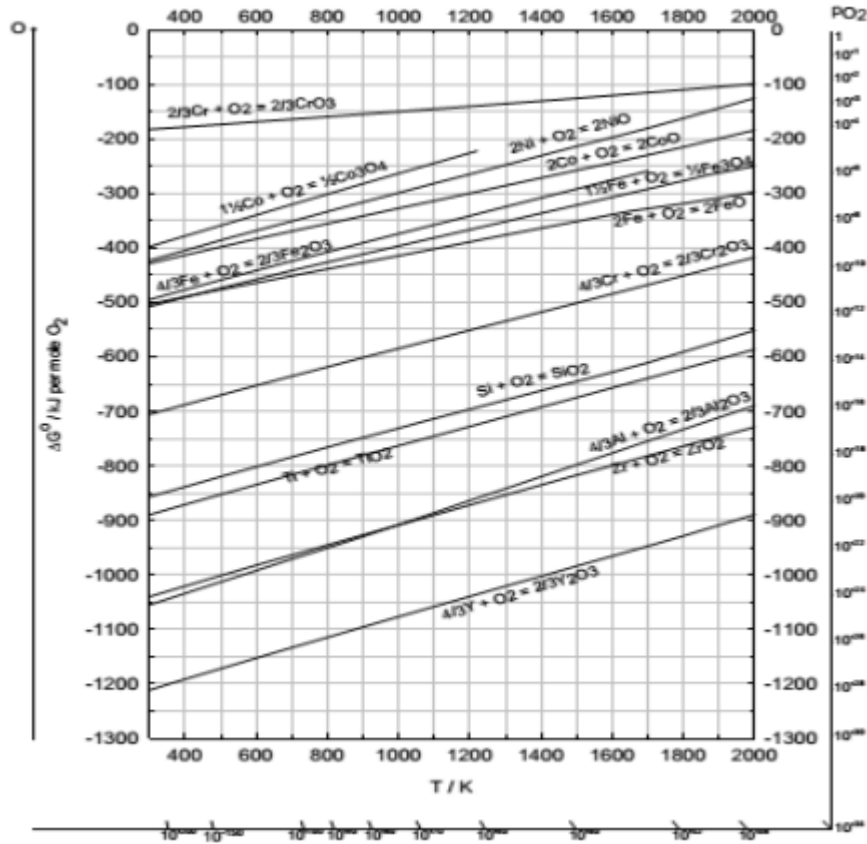
kaçış mümkün olmamakla birlikte, istenilen minimum kesitte ve kalınlıkta oluşmasıdır. Bu sebeple TGO tabakasında α -Al₂O₃ istenmektedir. Bunun sebebi; α -Al₂O₃ daha yavaş bir şekilde TGO tabakasının büyümesini sağlamaktadır. TGO tabakasının yavaş ilerlemesi, bağ tabakadan oksijen geçişini azaltmaktadır (Bose, 2007).

Sıcaklık yükseldikçe zamanla TGO tabakası da büyüyecek ve yapıda termal gerilmeleri de beraberinde getirecektir. Bu termal gerilmeler genişmeden kaynaklanan basma gerilmeleridir. Zamanla artan gerilmeler sonucunda, TGO tabakasının takviyesiyle yapıda çatlaklar meydana gelmektedir (Young, 2008). Böylelikle seramik üst kaplama ile bağ kaplama arasında ayrılmalar vuku bularak, adhezyon yok olacaktır. TGO tabakasının ayrılmasına sebebiyet veren faktör; polimorfik dönüşümleridir. Sıcaklık artışıyla birlikte sırasıyla γ - δ - θ - α -Al₂O₃' e dönüşmektedir. 1100 °C ve üstü sıcaklıklarda θ -Al₂O₃ formundan daha kararlı olan α -Al₂O₃' e dönüşen Al₂O₃, TGO tabakasında en çok istenilen yapıdır (Arikawa vd., 2007). Bunun sebepleri literatürde detaylıca anlatılmıştır.

Termal bariyer kaplama sisteminde bağ kaplama tabakası esasında başrolü üstlenmektedir. Bağ kaplama sayesinde seramik üst kaplama ile altlık malzeme arasında adhezyon sağlanmaktadır. Aynı zamanda bağ kaplamalar korozyon ve oksidasyona karşı direnç sağladıklarından dolayı TBC sistemlerinde oldukça önem arz eden tabakalardır (Bose, 2007). Daha önce de belirttiğimiz gibi bağ kaplamaların sağlıklı olması TGO tabakasına bağlıdır. Bağ kaplamaların uzun süre dayanıklı olması için termal büyüyen oksit tabakasının yapıda yavaş ve stabil ilerlemesi gerekmektedir. Zamanla oksidasyonun artmasıyla birlikte, Al elementi yapıda azalarak tükenecek ve sonuç olarak karışık ve spinel oksitler oluşacaktır. Al içerikli oksit tabakası yapıda daha yavaş ilerlediği için, Al tercih sebebidir (Young, 2008).

Oksidasyon olayı meydana gelirken sistemin belirli bir enerjiye sahip olması gerekmektedir. Bu enerjiye de Gibbs serbest enerjisi denmektedir. MCrAlY alaşımlı bağ kaplama tabakasında oksijenle temasa geçen elementlerin öncelik sırasını, hangisinin önce oksitlenip hangisinin geç oksitleneceğini tespit edebilmemiz için Ellingham diyagramını okuyabilmemiz gerekmektedir. Literatürdeki önceki bilgilerimize baktığımızda oksidasyon işleminde Al elementinin yapıda tercih edildiği ve istendiği bilgisini öğrenmiştik. Diyagramı okuduğumuzda ise; Al elementinin oksitlenmesi için gerekli olan serbest Gibbs enerjisinin en düşük seviyede olduğunu tespit edebiliriz. Diyagramda aşağıya doğru inildiğinde hangi elementin önce oksitleneceği gösterilmektedir. Yukarıya doğru

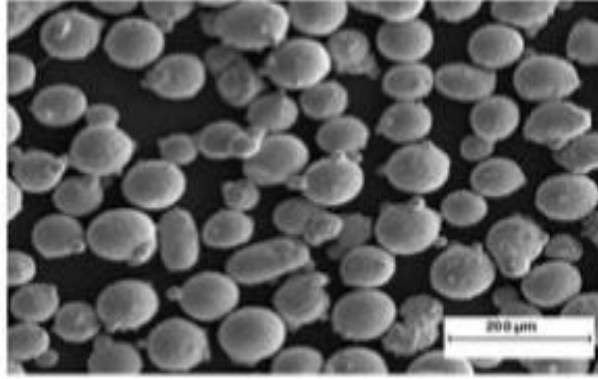
çıkıldığında ise; hangi oksitin daha kararlı yapıda olduğu görülmektedir. Yani diyagramın en üst kısmı en kararlı oksit, en alt kısmı ise ilk oksitlenen elementi ifade etmektedir (Young, 2008). Örnek vermek gerekirse; Al elementinin Gibbs serbest enerjisi; Ni, Cr ve Co elementlerine göre daha düşüktür. Aynı zamanda oksidasyon sonucunda oluşan Al_2O_3 oksit tabakasının diğer elementlerin oluşturacağı oksit tabakasından daha kararlı bir yapıda olduğu ispat edilmektedir (Bose, 2007). Aşağıda Şekil 34' te Ellingham diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 34: Ellingham diyagramının gösterimi (Young, 2008).

Termal bariyer kaplama sisteminde bağ kaplama tabakası üzerinde etkili olan TGO tabakasının oluşum aşamasında yapıda Al elementi tükenecek ve oksidasyondan kaynaklı $\alpha-Al_2O_3$ oluşacaktır. Fakat $\alpha-Al_2O_3$ ' ün oluşabilmesi için Al elementinin yapıda belirli bir seviyede tutulması gerekmektedir. Bu seviye sağlanmazsa yapıda farklı oksitler meydana gelir ve sağlamlık açısından bu durum istenmemektedir (Xu ve Guo, 2011). Alüminyumun stabil seviyede tutulmaması $\theta-Al_2O_3$ ya da $\gamma-Al_2O_3$ ' ün düşük sıcaklıklarda oluşumuna sebebiyet vererek, dayanımı düşük ve kısa ömürlü termal bariyer kaplamaların elde edilmesiyle sonuçlanacaktır (Xu ve Guo, 2011).

Sonuç olarak bağ kaplamaların oksidasyonunu minimum seviyeye indirmek için yapıda α - Al_2O_3 oluşumunun sağlanması gerekmektedir. Şekil 35' te NiCrAlY alaşımlı bağ kaplama tabakasının tozlarına ait mikroyapı görüntüsü verilmiştir.



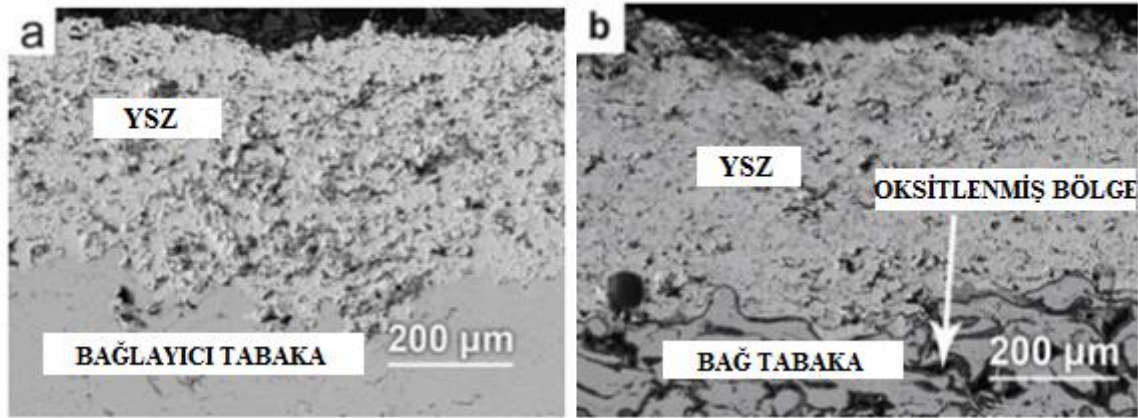
Şekil 35: NiCrAlY alaşımlı bağ kaplama tabakası tozlarının mikroyapı gösterimi (Parlakyiğit vd., 2013).

Yukarıdaki şekilde de gösterildiği gibi bağ kaplama tabakasında kaplama tozlarının ebatı α - Al_2O_3 oluşumunda önem arz etmektedir. Toz boyutlarının küçültülmesiyle birlikte alüminyum difüzyonu hızlanacak ve yapıdaki Al daha uzun sürede tükenecek ve bozunacaktır. Alüminyumun geç tükenmesiyle birlikte Al stabil seviyeye ulaşabilecek ve istenilen düzeyde α - Al_2O_3 ' ler oluşacaktır. Böylelikle uzun ömürlü bağ kaplama tabakaları elde edilecek, korozyon, aşınma ve oksidasyona direnç sağlanmış olacaktır (Parlakyiğit vd., 2013).

Literatürde daha önce de bahsettiğimiz gibi TBC' lerde üst kaplama malzemesi olarak genellikle seramikler tercih edilmektedir. Seramik üst kaplamalar otomotiv endüstrisinde piston ve valf gibi ekipmanların korunmasında kullanılmaktadır (Dalkılıç ve Tanatmış, 2009). Genellikle APS yöntemiyle kaplanan üst seramik kaplama tabakaları; abrazyonu, yüksek sıcaklıkta aşınmayı ve sürtünmeyi azaltmak amacıyla tercih edilmektedirler. APS yönteminin yanı sıra EB-PVD kaplama yöntemiyle de daha kompleks yapıdaki ve yoğun içerikli malzemeler kaplanmaktadır (Alperine vd., 1997).

Porozite ve boşlukların yoğun olduğu yapılarda sıcaklık arttıkça sinterleşme meydana gelmektedir. Taneler birleşerek daha büyük taneli yapılar oluşmaktadır (Xu ve Guo, 2011). Sıcaklık artışıyla birlikte sinterleşme kabiliyeti de artacak yoğun yapıli kaplamalar elde edilecektir. Yoğunlaşan kaplama yapısında yüksek sıcaklık sebebiyle termal gerilmeler

meydana gelecektir. İşte bu gerilmeler hasara sebebiyet vermektedir (Young, 2008). Yoğunlaşan seramik üst kaplama tabakasının mekanik özelliklerinde özellikle termal iletkenlik, sertlik, yapışma ve elastisite modülü gibi önemli parametrelerinde artış söz konusu olacaktır (Arikawa vd., 2007). Şekil 36 (a) ve (b)' de termal spreycaplama yöntemiyle kaplanmış malzemelerin enine kesitini gösteren SEM görüntüleri verilmiştir. (a)' da oksidasyon öncesi, (b)' de ise 1100 °C' de 100 saat oksidasyon testine tabi tutulmuş kaplamanın mikroskobik yapısı gösterilmektedir. YSZ üst seramik kaplamanın kullanıldığı yapıda porozite değişimini ve YSZ konumunu görmemiz mümkündür (Saremi vd., 2007).



Şekil 36: PS kaplama yöntemiyle kaplanmış malzemelerin (a) oksidasyon öncesi, (b) 1100 °C' de 100 saat oksidasyon testi sonrası enine kesitini gösteren SEM görüntüleri (Saremi vd., 2007).

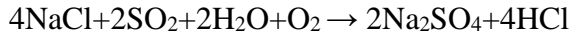
2.2.1.2 Termal Bariyer Kaplamalar Üzerine Sıcak Korozyonun Etkisi

TBC' lerin hasar oluşum mekanizmalarının bir diğeri olarak bilinen sıcak korozyon, kaplamalar için oldukça tehlikeli ve istenmeyen bir durumdur. Genellikle sıcaklık farklılıklarından meydana gelen bu korozyon türünde, kaplamalar ağır hasara maruz kalabilmektedir (Young, 2008). Sıcak korozyon TBC' lerde yüksek sıcaklık parametresiyle vuku bulmaktadır (Bose, 2007). Uçak motorlarının yanma odalarında, gaz türbin kanatçıklarında ve türbin bıçaklarının yüksek sıcaklığa maruz kaldığı belirli bölgelerinde meydana gelmektedir (Xu ve Guo, 2011).

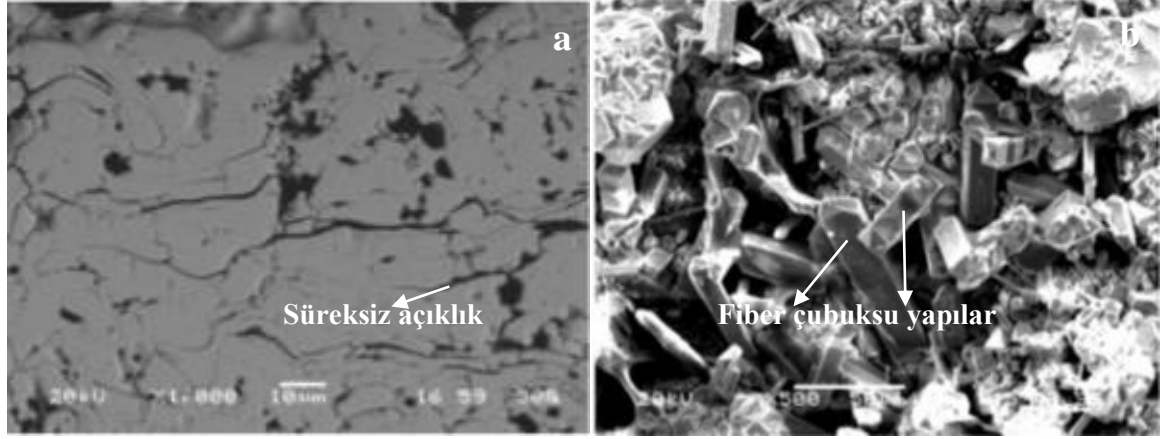
Proses olarak sıcak korozyon; yüksek sıcaklıkta metalik yüzeylerin üzerine ergimiş tuzların birikmesiyle ve belirli bölgelerde kalıplaşıp yüzeyi deforme etmesiyle oluşan bir korozyon cinsidir (Jiang vd., 2008). Kullanılan yakıtların kirliliğinden kaynaklı ergimiş vanadat-sülfat tuzlarının malzeme yüzeyinde birikmesiyle vuku bulan bu korozyon çeşidi; elektrik

üretiminde kullanılan ekipmanların belirli bölümlerinde ve gemicilik endüstrisinde yaygın olarak görülmektedir (Altuncu vd., 2007). Çok yüksek sıcaklıklara maruz kalan malzemelerde sıcak korozyon gözlenmektedir. Sıcak korozyonun oluşumunda başrol görevindeki eriyik tuzlar, Yitria ile reaksiyona girebilmektedirler. Akabinde soğuma işlemine tabi tutulan kaplamalarda faz dönüşümleri vuku bulmaktadır. Faz dönüşümüne maruz kalan TBC' ler, zaman içerisinde hacimce genişirler. Böylelikle kaplamalarda ayrılmalar ve çatlaklar oluşmaya başlayacaktır. Bu sebeple sıcak korozyonun minimize edilmesi sağlam ve uzun ömürlü kaplamaların elde edilebilmesi için önem taşımaktadır (Young, 2008).

Sıcak korozyonun oluşumu esnasında metal yüzeyde biriken eriyik tuz, genellikle Na₂SO₄ tuzudur. SO₃ ile NaCl' nin reaksiyona girmesi sonucu açığa çıkan Na₂SO₄ yüzeyde birikerek sıcak korozyonu tetikler (Jones, 1997). Na₂SO₄' ün açığa çıktığı reaksiyon (1.1)' de formülize edilmiştir.



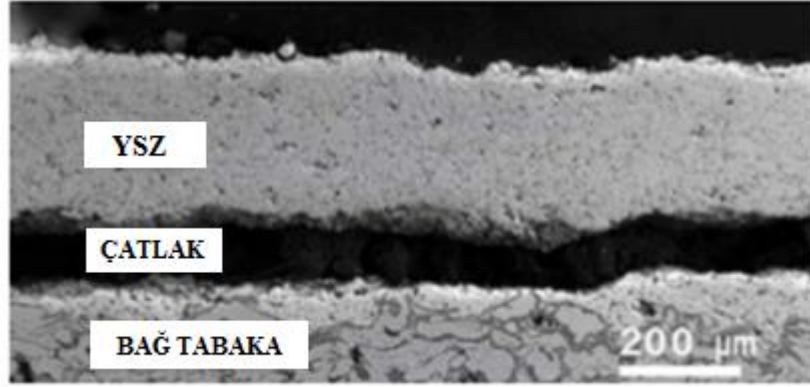
Reaksiyon sonucu oluşan Na₂SO₄ eriyik tuzunun ergime sıcaklığı da sıcak korozyon oluşumunda önem arz etmektedir (Jones, 1997). Uçakların yanma odalarında meydana gelen bu reaksiyonda; sıcaklığın yükselmesiyle birlikte yakıttan elde edilen sülfür ile havadan elde edilen sodyum klorür birleşmektedir. Birleşme sonucunda açığa çıkan tuzun yapıda fazla bulunması oksitlenmeyi artırıcı niteliktedir (Young, 2008). Gaz türbinlerindeki hava sayesinde zamanla sistemde soğuma gerçekleşmektedir (Mobarra vd., 2006). Sıcaklık yükseldikçe Na₂SO₄ tuzlarının yapıda birikmesi esnasında farklı sülfatların da yapıda eriyebilirlikleri gözlenmektedir (Bose, 2007). Bu sebeple Na₂SO₄ tuzunun ergime sıcaklığı değişiklik gösterebilmektedir.



Şekil 37: Plazma sprej 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., 2007).

Şekil 37' de gösterildiği gibi, 900 °C' de 75 saat sıcak korozyon testine tabi tutulan YSZ seramik tabakanın test sonrası yapısında fiber çubuksu yapılar gözlenmektedir. Deneysel çalışmalar sonucunda gözlenen fiber yapıların bileşiminde vanadyum, yitrium ve oksijen elementlerinin olduğu tespit edilmiştir (Altuncu vd., 2007).

Literatürde daha önce de belirttiğimiz gibi, sıcak korozyon uçakların gaz türbinlerinde, türbin bıçak ve vanalarında daha fazla gözlenmektedir. Bu hasar mekanizmasını etkileyen bir diğer faktör de kullanılan yakıttır. Gaz türbin motorlarında kullanılan yakıt ne kadar kaliteli olursa sistem o kadar az hasara uğramaktadır. Düşük kaliteli yakıtların kullanılması yüksek sıcaklıklara ulaşıldığında empürileri beraberinde getirerek, yapının sıcak korozyona uğramasına neden olmaktadır (Eliaz vd., 2000). Böylelikle TBC sistemlerinde hasarlı kaplamalar oluşacak ve ekonomik olarak büyük zararlarla sonuçlanacaktır.



Şekil 38: 1050 °C' de 40 saat sıcak korozyon testi sonrası monoklinik ZrO_2 ve YVO_4 kristallerinin oluşumu sonucunda plazma spreyle kaplanmış YSZ seramik kaplamanın SEM görüntüsü (Saremi, 2007).

Şekil 38' de SEM görüntüsü verilen YSZ seramik kaplamaya 1050 °C sıcaklıkta 40 saat sıcak korozyon testi uygulanması sonucunda kaplamanın geniş bir çatlak oluşturduğu gözlenmektedir.

TBC' lerde sıcak korozyon 2 şekilde gözlenmektedir. Bunlar Tip I ve Tip II sıcak korozyon olarak adlandırılmaktadır. Tip I sıcak korozyonu; yüksek sıcaklıklarda, Tip II sıcak korozyonu ise düşük sıcaklıklarda meydana gelmektedir (Eliaz vd., 2000). Deneysel çalışmalar sonucunda Tip I sıcak korozyonun kademeli olarak ilerlediği gözlemlenmiştir. İlk kademede az miktarda korozyona uğrarken, ikinci kademede oldukça yüksek hızda korozyona uğradığı tespit edilmiştir. Yüksek sıcaklıklara maruz kalınan Tip I korozyonunda, ilk kademede korozyonun yavaş ilerlemesinin sebebi, oksidasyonun oluşmasıdır. Oksidasyonun oluşmasından sonra ikinci kademeye geçilen yapıda korozyon hız kazanır. Böylelikle oksit tabakası korozyona maruz kalarak yapıdan ayrılır (Shifler, 2003).

Genellikle gemicilik ve uçak sanayinde karşı karşıya kaldığımız sıcak korozyon hasar mekanizması, deneysel çalışmalar sonucunda malzemenin tuza bandırılması veya tuzla kaplanması metotlarıyla incelenmektedir (Young, 2008).

Tip I Sıcak Korozyonu

Tip I sıcak korozyonu yüksek sıcaklıklarda meydana gelen bir korozyon çeşidi olup, dört kademede gerçekleşmektedir. Sıcaklık aralığı 750 °C ile 950 °C arasında değişmektedir. Çok yüksek sıcaklıklarda vuku bulduğundan ilk olarak korozyon yavaş seyir eder. Böylece

yapıda koruyucu oksit tabakası oluşmaktadır. Daha sonra kromca fakirleşmeye başlayarak, SO_3 ile $NaCl$ reaksiyona girmektedir. Yanma reaksiyonu sonucunda Na_2SO_4 eriyik tuzu oluşarak yapıda birikmesiyle sıcak korozyon oluşumu başlayacaktır (Bose, 2007). Yakıttan gelen sülfür ile havadan gelen sodyum klorür birleşirken, havada ve yakıt içerisinde yer alan empüriteler tuzlarla reaksiyona girerek karışık oksitlerin oluşumuna sebebiyet verecektir. Bu olay daha düşük sıcaklıklarda korozyon başlangıcına sebebiyet verecektir. Bu da demektir ki; sıcak korozyon beklenilenden daha hızlı seviyede TBC' leri hasara uğratabilecek tehlikeli bir mekanizmadır (Döleker, 2015).

4 kademedan meydana gelen Tip I sıcak korozyonunu şu şekilde gözlemleyebiliriz.

- 1) Metal yoğunlaşması meydana gelerek yüzey yavaş yavaş bozulmaya başlayacaktır ve bununla birlikte koruyucu oksit tabakası oluşacaktır.
- 2) Kromca fakirleşme başlayarak oksit tabakasında bozunmalar artacaktır.
- 3) Ana malzeme oksidasyona uğrayacaktır.
- 4) Yüksek sıcaklıklarda meydana gelen sıcak korozyon sebebiyle gaz türbin bıçaklarının iç kesimlerinde hasar meydana gelecektir ve oldukça büyük zararlara sebebiyet verecektir (Eliaz vd., 2000).

Tip II Sıcak Korozyonu

Tip II sıcak korozyonu, düşük sıcaklıklarda meydana gelen bir korozyon çeşidi olup, 500 °C ile 800 °C aralığında meydana gelmektedir. Düşük sıcaklıklarda meydana gelmesinden ötürü mikroskopta incelendiğinde yüzeyinde derin çatlaklara veya telafisi mümkün olmayan hasarlara rastlanmamaktadır (Eliaz vd., 2000).

Sıcak korozyona tabi tutulan numunelerde krom önemli bir elementtir. Kromca fakirleşme beraberinde koruyucu oksit tabakasını yok ederek sıcak korozyonun hızlı bir şekilde tabakayı sarmasına olanak sağlamaktadır (Bose, 2007). Tip II sıcak korozyonu çeşidinde de krom önem arz etmektedir. Kromun varlığı korozyona direnci artırıcı niteliktedir (Saremi vd., 2007).

Yapılan bir diğer deneysel çalışmalarda; nikelce zengin kaplamaların içeriğinde kobalt bulunan kaplamalardan daha dayanıklı olduğu ve korozyona direnç gösterdiği gözlenmiştir. Tip II sıcak korozyonuna en erken maruz kalan numuneler kobalt içerikli kaplamalardır

(Young, 2008). Bu sebeple özellikle gemi ve denizcilik, uçak ve havacılık gibi endüstriyel alanların kritik materyallerinde kobalt içerikli kaplamalar yerine nikel içerikli kaplamalar kullanılması malzemenin ömrünü uzatarak Tip II sıcak korozyonuna karşı tedbir niteliğindedir (Xu ve Guo, 2011).

BÖLÜM 3

MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Amaç

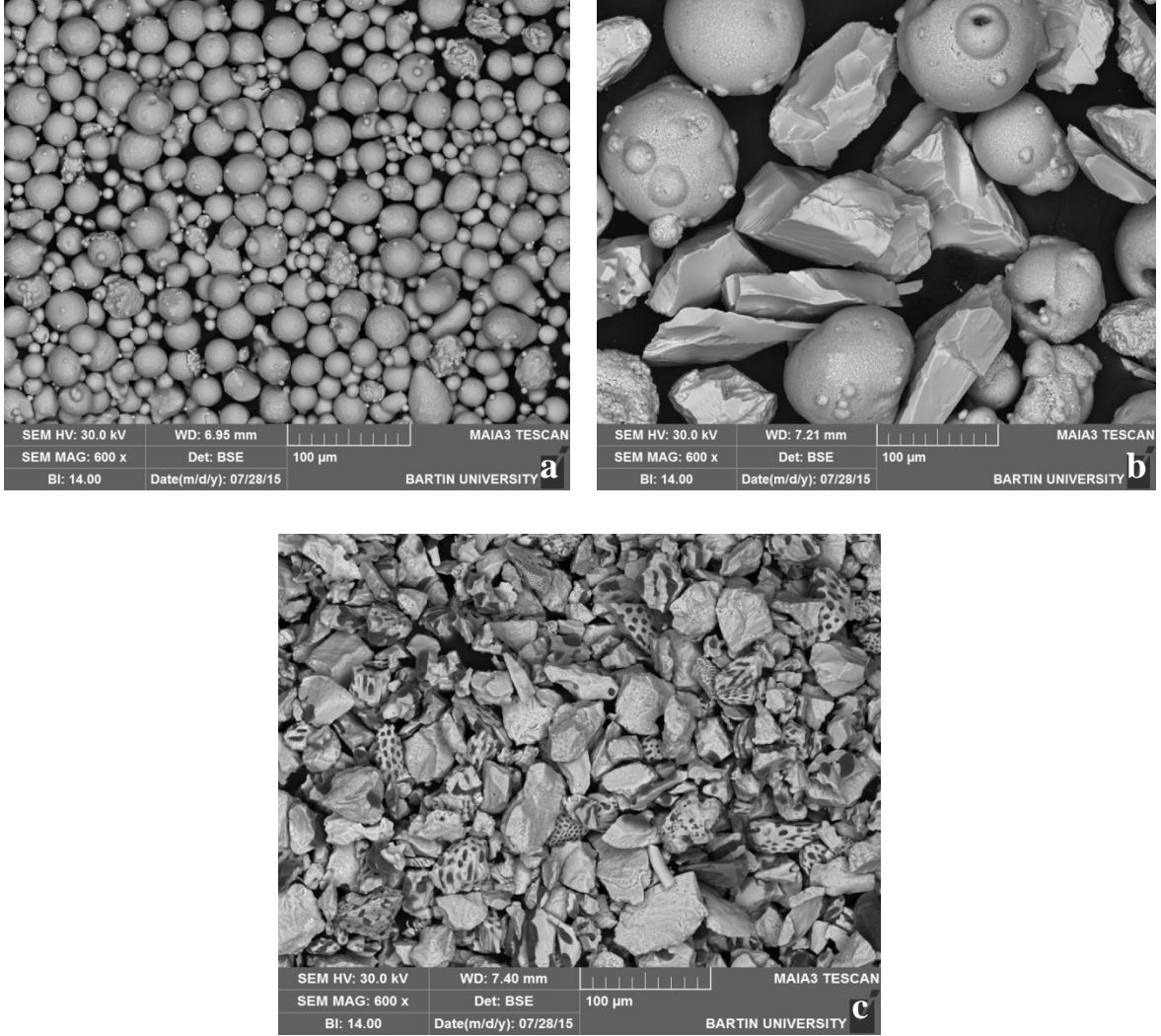
Termal bariyer kaplamaların oksidasyon davranışı üzerine etkilerini incelediğimiz bu deneysel çalışmada, Inconel-718 Nikel esaslı süper alaşım altlık malzeme kullanılmaktadır. Altlık malzeme üzerine CoNiCrAlY (Sulzer Metco, Amdry 9951, 5-37 µm) tozları APS yöntemi yardımıyla kaplanarak metalik bağ kaplama üretimi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen metalik bağ kaplama tabakasının kalınlık değeri 100 µm büyüklüğündedir. Daha sonra üst kaplama olarak sırasıyla ZrO₂+%8Y₂O₃ (YSZ) (Sulzer Metco, -106+16 µm) ve ZrO₂+MgO (Sulzer Metco, -106+16 µm) tozları APS yöntemi kullanılarak yaklaşık 300 µm kalınlığında olacak şekilde iki farklı numune yüzeyine kaplanmıştır. Elde edilen tüm numunelerin yüzey pürüzlülük, sertlik ve yüzdelik porozite parametreleri belirlenerek, değerlendirmeler yapılmıştır. Daha sonra üretilen TBC' ler farklı süre ve sıcaklıklarda oksidasyon testine tabi tutulmuştur. Oksidasyon testi öncesi ve sonrası metalografik olarak hazırlanan numuneler; mikroskopik ortamda incelenerek, belirli büyüklüklerde görüntüleri alınıp yapısal değişiklikler yorumlanmıştır. Kaplama tabakasına oksidasyon davranışının etkisi incelenerek, literatürdeki bilgilerle kıyaslanıp açıklamalar yapılmış, sonuçları belirlenmiştir.

3.2 Toz ve Altlık Malzemelerin Karakterizasyonu

Ni içerikli süper alaşım olan Inconel-718' in altlık malzeme olarak tercih edildiği TBC sisteminde kaplama üretilirken iki farklı toz kullanılmıştır. Bağ kaplama tabakası Sulzer Metco firması tarafından üretilmiş CoNiCrAlY tozlarından oluşmaktadır. Bu tozların büyüklüğü 5 ile 37 µm aralığında değişmektedir. Üst kaplama üretiminde ise sırasıyla iki farklı numune üzerine ZrO₂+%8Y₂O₃ (YSZ) ve ZrO₂+MgO içerikli, partikül boyutları 106 ile 16 µm aralığında değişen, Sulzer Metco firması tarafından üretilmiş tozlar tercih edilmiştir.

3.2.1 Toz Malzemelerin Mikroyapısal Karakterizasyonu

MAIA3 TESCAN SEM cihazının kullanıldığı toz malzemelerinin karakterizasyon işleminde, 600 büyütme yapılarak görüntüler alınmıştır. Yapılan inceleme sonucunda toz boyutlarının değer aralıklarındaki doğruluk tespit edilmiştir. Şekil 39 (a)' da CoNiCrAlY metalik bağ kaplama tozlarının mikroyapısal görünümü verilmiştir. Tozların küresel formda ve sık aralıklı olduğu bu inceleme sonucunda gözlenmektedir.



Şekil 39: Kaplama tozlarının SEM mikroskopundaki görünümleri; (a) CoNiCrAlY, (b) ZrO₂-8Y₂O₃, (c) ZrO₂-MgO.

Yukarıda Şekil 39 (b)' de görüldüğü gibi ZrO₂+8Y₂O₃ tozlarının morfolojisi, CoNiCrAlY bağ kaplama tozlarına nazaran daha düzgün yapıdadır. Küresel yapılardan daha çok düzlemsel yapılar göze çarpmaktadır. Şekil 39 (c)' de ise; ZrO₂+MgO tozlarının morfolojisi gösterilmiştir. YSZ ve bağ kaplama tozlarına nazaran oldukça girintili çıkıntılı

ve sık bir yapı görülmektedir. YSZ tozu ile kıyaslandığında daha düzlemsel ve tanecikler arası mesafenin oldukça az olduğu dikkat çekmektedir. SEM incelemelerimiz sonucunda kullanılan CoNiCrAlY içerikli bağ kaplama tozu küresel formdayken, üst seramik kaplama tozları düzlemsel formda göze çarpmaktadır.

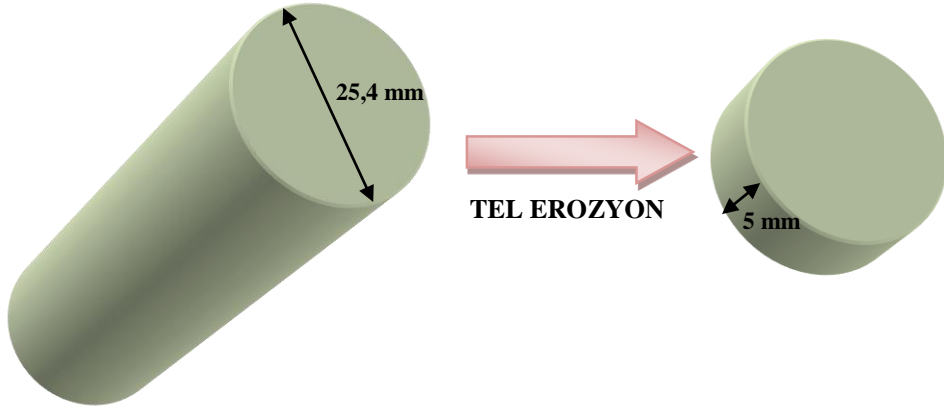
3.2.2 Altlık Malzemenin Kimyasal Kompozisyonu

Deneysel çalışmada altlık malzeme olarak tercih ettiğimiz Inconel-718, Ni içerikli bir süper alaşım olup, korozyon, oksidasyon ve yüksek sıcaklığa maruz kalınan şartlarda üstün performans göstererek dayanım artırıcı özelliğiyle ön plana çıkmaktadır. Aşağıda Tablo 4' te kullandığımız Inconel-718 süper alaşım malzemesinin kimyasal kompozisyon değerleri gösterilmektedir. Tablo 4' ten de anlaşılacağı gibi, korozyona dayanım gösterici özelliğe sahip olmasının sebebi, içeriğindeki Ni ve Cr elementlerini fazlaca bünyesinde bulundurmasıdır. Inconel-718 süper alaşım malzemesi genellikle uçak ve uzay endüstrisinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Yüksek dayanım kabiliyetinden ötürü altlık malzemesi olarak deneysel çalışmamızda yer almaktadır.

Tablo 4: Ni esaslı süper alaşım Inconel-718 malzemesinin kimyasal kompozisyonu.

Inconel-718 Süper alaşım malzemesinin % 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

Üretilen altlık malzemeler, uzun bir çubuk formunda ve 1 inç (25,4 cm) çapında silindirik şeklinde temin edilmiştir. Farklı sıcaklık ve sürelerde oksidasyon testlerine tabi tutulacağından ve toz partikülleriyle kaplanacağından dolayı tel erozyon yöntemi kullanılarak disk şekline getirilmiştir. Silindirik diskler 5 mm kalınlığına ulaştığında istenilen seviyede altlık malzeme elde edilmiş olacaktır. Şekil 40' ta silindirik formdaki altlık malzemenin tel erozyon yöntemiyle disk formuna getirilmesi şematize edilmiştir.



Şekil 40: Silindirik formdaki altlık malzemenin tel erozyon yöntemiyle disk formuna getirilmesi.

3.3 Bağ Kaplamaların Üretilmesi

Bağ kaplama üretimi öncesi, kaplanacak olan malzemeye yüzey işlemleri uygulanmaktadır. Yüzeyde istenmeyen oksit, yağ, kir, artık vb. yapıların uzaklaştırılması ve kaplamaların yapışma mukavemetini olumsuz yönde etkileyecek herhangi bir duruma istinaden kumlama işlemi yapılmıştır. Yüzey ile mesafesi yaklaşık 10 cm olacak şekilde 75 °C' lik açıyla 2,5 barlık basınç altında 60 mesh' lik Al_2O_3 tozlarının püskürtülmesiyle işlem tamamlanmaktadır. Bağ kaplama üretimi gerçekleştirilmeden önce numuneler etil alkol yardımıyla ultrasonik temizlemeye tabi tutulmuştur. Aşağıda Şekil 41' de kumlama işleminin gerçekleştirildiği ekipman şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 41: Kumlama işleminin gerçekleştirildiği ekipmanın gösterimi.

APS yöntemiyle CoNiCrAlY bağ kaplama üretiminde farklı parametrelerden yararlanılmaktadır. Bu parametreler belirlenirken üretici firmadaki çalışanlardan bilgi alınmıştır. Bağ kaplamaların üretimi esnasında Sulzer Metco marka APS cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz yardımıyla yaklaşık 100 µm kalınlığında CoNiCrAlY bağ kaplamalar elde edilmiştir. Aşağıda Şekil 42' de bağ kaplama üretiminde tercih edilen Sulzer Metco marka APS cihazı gösterilmektedir.



Şekil 42: Bağ kaplama üretiminde kullanılan Sulzer Metco marka APS cihazının görünümü.

Tablo 5: CoNiCrAlY bağ kaplama üretiminde kullanılan kaplama parametreleri.

APS Tekniğiyle CoNiCrAlY Bağ Kaplama	
Ark Akımı <i>600 A</i>	Argon Akış Oranı <i>90 slpm</i>
Hidrojen Akış Oranı <i>15 slpm</i>	Toz Besleme Oranı <i>30 g/dk</i>

3.4 Bağ Kiplamaların Porozite Ölçümleri

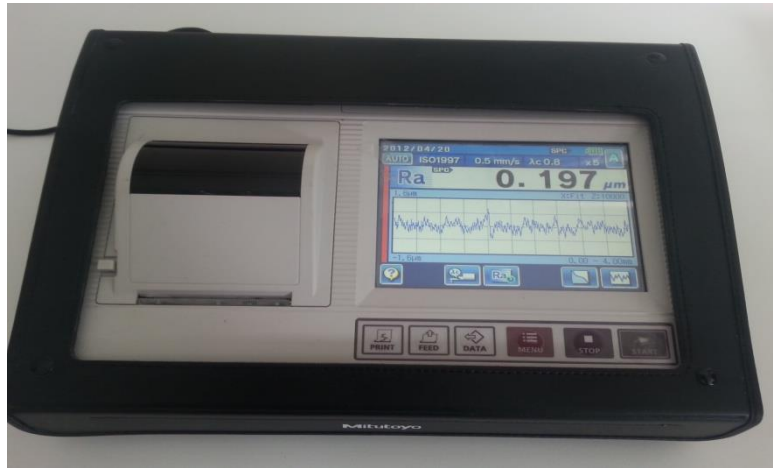
Oksidasyon testine tabi tutulmamış numunelerin porozite ölçümleri yapılarak, numunelerin iç yapılarındaki değişimler incelenmiştir. Porozite ölçümleri Image J bilgisayar programı yardımıyla matris ve porozite renklerindeki farkların tanıtılması sonucunda hesaplanmıştır. Numunelerin bağ kiplamalarının farklı bölgelerinden beş adet görüntü alınarak, her bir görüntünün porozite değerleri elde edilmiştir. Tüm değerlerin ortalaması alınarak verilere eklenmiştir. Aşağıda Tablo 6' da oksidasyon testi öncesi $ZrO_2+\%8Y_2O_3$ (YSZ) ve ZrO_2+MgO içerikli seramik üst kiplama tabakasına sahip numunelerin bağ kiplamalarının ortalama yüzdelik porozite değerleri verilmiştir.

Tablo 6: Oksidasyon testi öncesi bağ kiplamaların porozite oranları.

Üst Kiplama	Bağ Kiplama Porozite Oranı (%)
Oksidasyon testi öncesi $ZrO_2+\%8Y_2O_3$ (YSZ)	7,18
Oksidasyon testi öncesi ZrO_2+MgO	7,7

3.5 Bağ ve Üst Kiplama Tabakalarının Yüzey Pürüzlülük Değerlerinin Ölçülmesi

DIN EN ISO 3274 standartlarına göre uygulanan yüzey pürüzlülük ölçümlerinde, SJ-310 Mitutoyo marka test cihazı kullanılmıştır. Aşağıda Şekil 43' te kullanılan yüzey pürüzlülük ölçüm cihazının görünümü verilmiştir. Her bir değer, numunelerin 5 farklı bölgesinden ölçüm yapılarak tespit edilmiştir. 5 farklı bölge ölçümlerinin ortalaması alınarak elde edilen değerler yüzey pürüzlülük değerleri olarak yorumlanmıştır. Aşağıda Tablo 7' de oksidasyon testi öncesi bağ ve üst kiplamaların yüzey pürüzlülük değerleri verilmiştir.



Şekil 43: SJ-310 Mitutoyo marka yüzey pürüzlülük ölçüm cihazının gösterimi.

Tablo 7: Oksidasyon testi öncesi bağ ve üst seramik kaplamaların yüzey pürüzlülük değerleri.

Kaplama Yapısı	Yüzey Pürüzlülüğü (Ra-μm)
APS yöntemiyle CoNiCrAlY bağ kaplama	7.34
ZrO ₂ +%8Y ₂ O ₃ (YSZ) üst seramik kaplama	6.30
ZrO ₂ +MgO üst seramik kaplama	5.78

3.6 Termal Bariyer Kaplamaların Üretilmesi

Ni esaslı süper alaşım altlık malzeme üzerine CoNiCrAlY içerikli metalik bağ kaplama üretimi tamamlandıktan sonra TBC' ler, seramik üst kaplamaların uygulanmasıyla tamamlanacaklardır. Gerçekleştirilen deneysel çalışmada iki farklı üst kaplama tozlarıyla kaplanmış numuneler mevcuttur. Üst kaplama üretiminde ilk olarak ZrO₂+%8Y₂O₃ (YSZ) tozları numune üzerine uygulanmıştır. İkinci numune üzerine ise ZrO₂+MgO tozları uygulanmıştır. Bağ kaplamaları aynı, üst seramik kaplamaları iki farklı toz içeriğine sahip bu numuneler; APS yöntemi kullanılarak TBC sistemlerinin üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretim esnasında Sulzer Metco marka atmosferik plazma sprej kaplama cihazı tercih edilerek, 300 μ m kalınlığında üst kaplamaların üretimi sağlanmıştır. Aşağıdaki Tablo 8' de bağ ve üst seramik kaplamalarda kullanılan tabanca ve toz malzemelerinin özellikleri verilmiştir.

Tablo 8: Bağ ve üst kaplamalarda kullanılan tabanca ve toz malzemelerinin özellikleri.

<u>Sprey Tabancası</u>			<u>Toz Malzeme Özellikleri</u>	
Kaplama Tipi (Kalınlık)	Metot	Firma	Toz Firması	Nominal Partikül Boyutları
Bağ Kaplama (100 µm)	APS	F6-GTV, Almanya	CoNiCrAlY, Amdry 9951, (Sulzer Metco)	5-37 µm
Üst Kaplama (300 µm)	APS	F6-GTV, Almanya	ZrO ₂ /Y ₂ O ₃ , 80/20, (Sulzer Metco)	-106+16 µm
Üst Kaplama (300 µm)	APS	F6-GTV, Almanya	ZrO ₂ /MgO, 80/20, (Sulzer Metco)	-106+16 µm

Üst kaplamaların üretim aşamasında da farklı parametrelerden yararlanılmıştır. Bu parametreler deneysel çalışma sonucunda elde edilerek değerlendirilmiştir. Daha önce de belirttiğimiz gibi deneysel çalışmada iki farklı üst kaplama malzemesi kullanılmıştır. Her bir üst seramik kaplama tabakası bağ kaplamadan farklı özelliklere sahip olduğundan, farklı parametreler kullanılmıştır. Örneğin; APS yöntemiyle kaplanmış YSZ seramik esaslı üst kaplama oldukça yüksek ergime sıcaklığına sahip olduğu için, bağ kaplamaya nazaran daha yüksek parametre değerleri seçilmiştir. Bunun bir diğer sebebi de; YSZ üst seramik kaplama malzemesi adhezyonunun metalik bağ kaplamaya nazaran daha düşük seviyede olmasıdır. Aşağıda Tablo 9' da kullanılan iki farklı üst seramik kaplamaların üretiminde tercih edilen parametreler sırasıyla gösterilmektedir.

Tablo 9: İki farklı üst seramik kaplamaların üretiminde kullanılan parametreler.

APS ZrO₂+%8Y₂O₃ (YSZ) Üst Kaplama	
Ark Akımı <i>630 A</i>	Argon Akış Oranı <i>90 slpm</i>
Hidrojen Akış Oranı <i>20 slpm</i>	Toz Besleme Oranı <i>25 g/dk</i>
APS ZrO₂+MgO Üst Kaplama	
Ark Akımı <i>630 A</i>	Argon Akış Oranı <i>90 slpm</i>
Hidrojen Akış Oranı <i>20 slpm</i>	Toz Besleme Oranı <i>25 g/dk</i>

Tablo 9' da da gösterildiği gibi iki farklı üst seramik kaplama tozlarıyla kaplanmış numunelerin üretimi aşamasında tercih edilen parametreler eşdeğerdir. Aşağıda Şekil 44' te deneysel çalışmamızda kullandığımız APS yöntemiyle kaplanmış YSZ üst seramik kaplama tabakasına sahip numunelerimiz gösterilmektedir.



Şekil 44: Deneysel çalışmamızda kullandığımız APS yöntemiyle kaplanmış YSZ üst seramik kaplama tabakasına sahip numunelerin gösterimi.

3.7 Altlık Malzeme ile Bağ ve Üst Seramik Kaplamaların Sertlik Değerleri

Altlık malzeme, bağ ve üst seramik kaplamaların sertlik değerlerinin ölçümünde Q10ness marka mikrosertlik cihazı kullanılmıştır. Ölçümler 5 farklı noktadan kademeli olarak gerçekleştirilmiştir. Kaplama yüzeyinden aşağıya doğru 5, 10, 15, 20 ve 25 µm' lik mesafelerle CoNiCrAlY içerikli bağ kaplama için 15 s süre zarfında 10 gf' lik yük

uygulanmasıyla sertlik ölçümleri tamamlanmıştır. Üst seramik kaplamalar için ise; yine kaplama yüzeyinden aşağıya doğru 5, 10, 15, 20 ve 25 µm' lik mesafelerle 5 s süre zarfında 25 gf' lik yük uygulanmasıyla beşer kez tekrarlanan bu ölçümlerin ortalama değeri alınarak işlem tamamlanmıştır. Aşağıda Tablo 10' da ölçüm sonrası bağ kaplamaların sertlik değerleri her bir numune için gösterilmektedir.

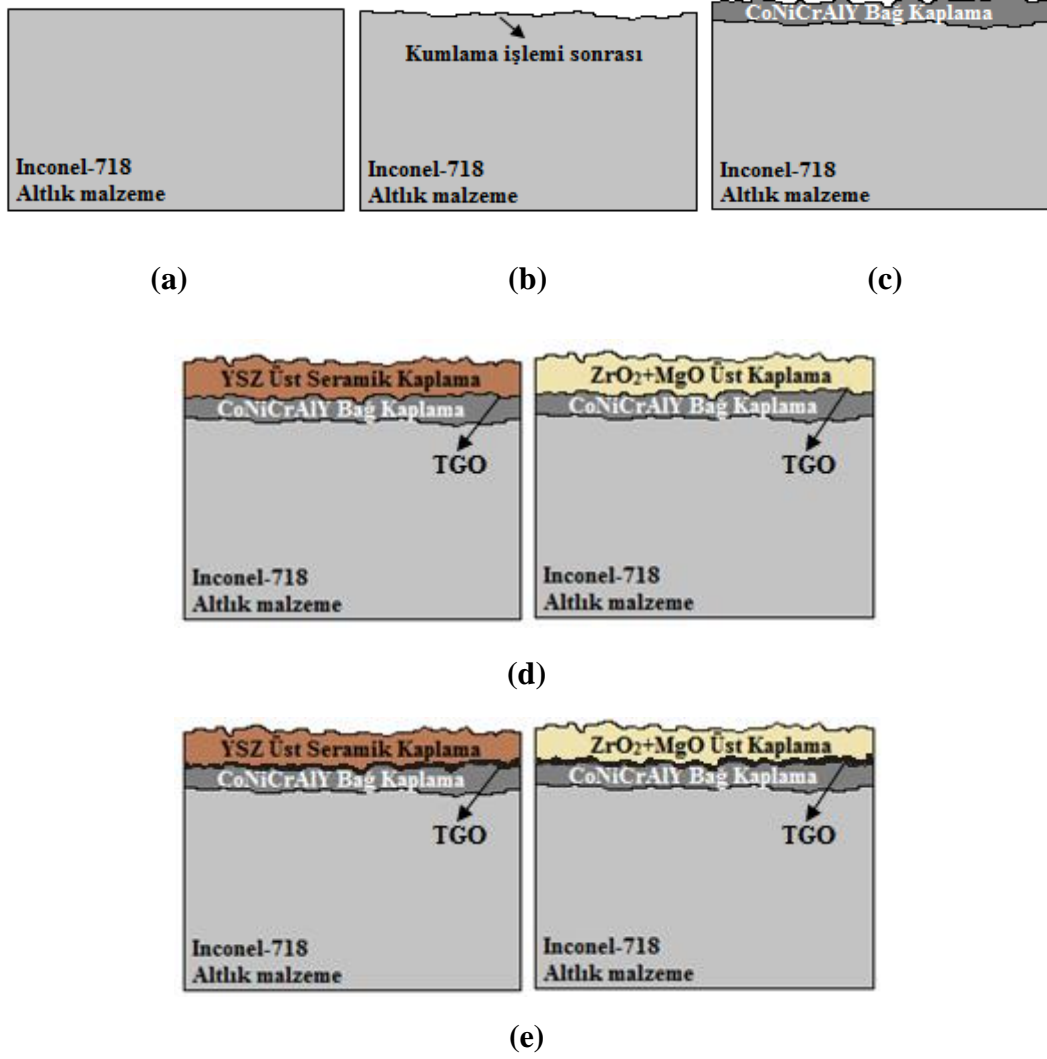
Tablo 10: İki farklı üst seramik kaplama tabakasına sahip numunelerin bağ ve üst kaplamaları ile altlık malzemenin sertlik değerleri.

Kaplama	Sertlik Değeri (Hv)
Inconel-718 Altlık Malzeme	542
APS Bağ Kaplama	427
APS TBC+YSZ Üst Kaplama	805
APS TBC+ZrO ₂ +MgO Üst Kaplama	607

Altlık malzeme olarak kullanılan Inconel-718 süper alaşımı, mukavemeti yüksek ve iyi adhezyon özelliğinden dolayı tercih edilmektedir. Genellikle dayanım kabiliyetine ihtiyaç duyulan durumlarda güçlendirici özelliğiyle dikkat çekmektedir. Havacılık ve uzay sanayinde oldukça ön plana çıkan Inconel-718' in sertlik ölçümlerine bakıldığında da oldukça iyi seviyede sertliğe sahip olduğu görülmektedir. Sertlik ölçümleri sonucunda YSZ içerikli üst seramik kaplamanın, ZrO₂+MgO içerikli üst seramik kaplamaya nazaran oldukça sert olduğu tespit edilmiştir. Deneysel çalışma sürecinde de YSZ içerikli üst seramik kaplamaya sahip numunelerin daha dayanıklı olduğu gözlenmiştir.

3.8 Termal Bariyer Kaplamaların Oksidasyon Testleri

Deneysel çalışmamızda kullandığımız termal bariyer kaplamalar, Protherm markalı yüksek sıcaklık fırınında 900 °C, 1000 °C ve 1100 °C sıcaklıklara tabi tutularak, sırasıyla 8, 24, 50 ve 100 saatlik sürelerde izotermal oksidasyona uğratılmıştır. Oksidasyon testi öncesi ve sonrasında yapıdaki TGO tabakasının değişimi gözlemlenerek yorumlanmıştır. Aynı zamanda oksidasyon testinin kaplamalar üzerindeki etkileri tartışılmıştır. Aşağıda Şekil 45' te oksidasyon testi öncesi ve sonrasında termal bariyer kaplamalardaki değişim gösterilmektedir.



Şekil 45: TBC üretiminde; (a) Altlık malzeme, (b) Altlık malzeme üzerine kumlama işleminin yapılması, (c) CoNiCrAlY metalik bağ kaplamanın üretilmesi, (d) Oksidasyon testi öncesi sırasıyla YSZ ve ZrO₂+MgO içerikli üst seramik kaplamaların iki farklı numune üzerine uygulanması, (e) Oksidasyon testi sonrası iki farklı üst kaplama tabakasına sahip olan numunelerdeki değişimin gösterimi.

Yukarıdaki Şekil 45' te da gösterildiği gibi oksidasyon testi öncesi TBC sistemlerindeki TGO kalınlığı stabil iken, oksidasyon testi sonrasında yüksek sıcaklığa maruz kalmış numunelerde TGO kalınlığında artış görülmektedir.

3.9 Termal Bariyer Kaplamaların Karakterizasyonu

900 °C, 1000 °C ve 1100 °C sıcaklıklarda sırasıyla 8, 24, 50 ve 100 saat süre zarfında oksidasyon testine tabi tutulan TBC' ler, metalografik açıdan incelenmesi amacıyla belirli işlemlerden geçirilmiştir. İlk olarak disk şeklindeki numuneler bakalit kalıbına sığabilmesi

ve kolaylıkla işleme tabi tutulabilmesi için hassas kesme cihazı yardımıyla 4 eşit parçaya kesilmiştir. Oksidasyon testine tabi tutulmayan iki farklı üst seramik kaplama tabakasına sahip olan her bir numune, epoksi ve sertleştirici karışımıyla hazırlanan reçine kullanılarak ayrı ayrı kalıplarda soğuk bakalite alınmıştır. Oksidasyon işlemine tabi tutulan numuneler ise; fırın içerisinde oda sıcaklığı seviyesine düşene kadar soğumaya bırakılmıştır. Sonrasında fırından çıkartılan numuneler oldukça hassas olduklarından zaman kaybetmeden soğuk bakalite alınmıştır.

Soğuk bakalite alınan her bir numune yaklaşık yarım saat sonra kalıplardan çıkartılıp, sırasıyla 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 tamamlandıktan sonra numuneler sırasıyla 6 µm, 3 µm, 1 µm ve 0,25 µm' lik elmas aşındırıcı içeren solüsyon kullanılarak parlatma işlemine tabi tutulmuştur. Aşağıda Tablo 11' de zımparalama ve parlatma işlemi esnasında tercih edilen parametreler gösterilmektedir.

Tablo 11: Zımparalama ve parlatma işlemi esnasında tercih edilen parametreler.

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

Metalografisi tamamlanmış numunelerin bünyesindeki fiziksel suyun giderilmesi amacıyla 100 °C sıcaklıkta yaklaşık yarım saat bekletilmekte ve bu işlem vakum altında tamamlanmaktadır. Daha sonra üst seramik kaplama tabakası YSZ ve ZrO_2+MgO olan numuneler altınla kaplanarak iletkenlik özellikleri iyileştirilmiştir. Tüm bu işlemlerden sonra SEM incelemesi için numuneler hazır hale gelmektedir. Oksidasyon testine tabi tutulmuş ve metalografisi tamamlanmış numunelerin, TESCAN ve FEI Model Quanta 450 FEG-EDS cihazı vasıtasıyla SEM incelemeleri tamamlanmıştır. SEM ve EDX analizi yapılan numunelerin TGO kalınlık değerleri incelenmiştir. TGO kalınlık değerlerinin ölçümü SEM cihazındaki bilgisayar programı yardımıyla tespit edilerek, oksidasyon testi sonrası yapıdaki TGO kalınlığının hangi seviyede değişim gösterdiği gözler önüne serilmiştir. Sonrasında üst ve bağ kaplama tozları ile oksidasyon testi öncesi ve sonrasında kaplamaların XRD analizleri incelenmiştir. 900 °C, 1000 °C ve 1100 °C sıcaklıklarda 100 saatlik oksidasyon sürecine tabi tutulan numunelerin XRD paternleri alınarak, faz yapıları tespit edilmiştir. Tüm bu incelemeler sonucunda oksidasyon testi öncesi ve sonrasında numunelerde vuku bulan TGO kalınlık değerleri kıyaslanarak deneysel çalışma tamamlanmıştır.

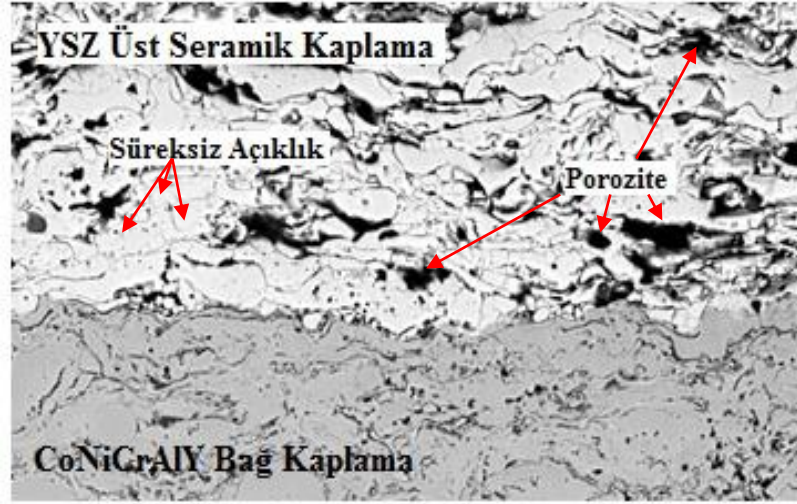
BÖLÜM 4

BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 TBC' lerin Mikroyapısal Olarak İncelenmesi

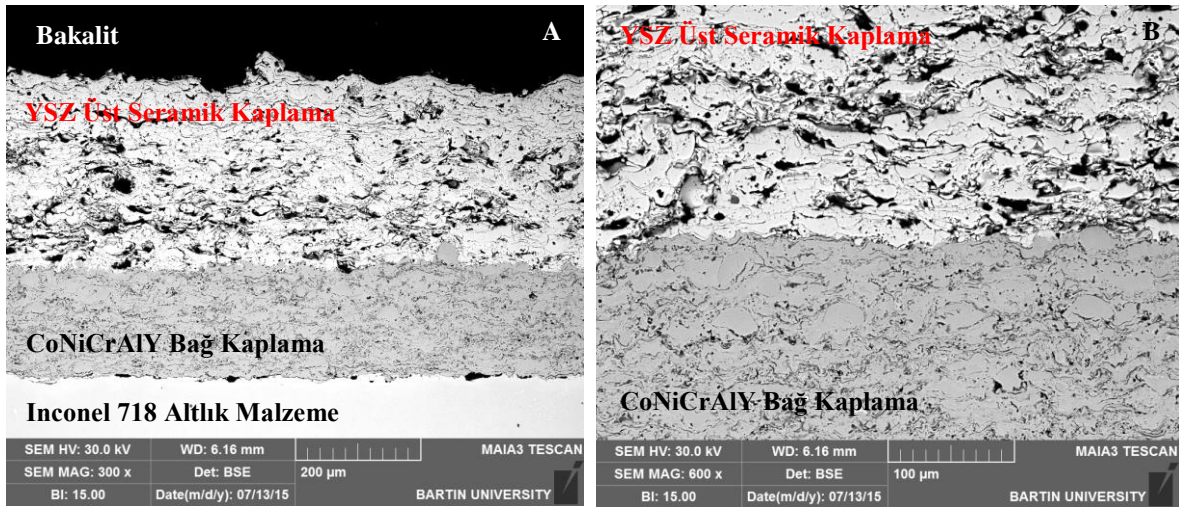
4.1.1 Oksidasyon Testi Öncesi TBC' lerin Mikroyapıları

Bilindiği gibi deneysel çalışmada termal bariyer kaplama sistemleri atmosferik plazma spreyle kaplama yöntemiyle üretilmiştir. Inconel-718 süper alaşım altlık malzeme üzerine CoNiCrAlY içerikli metalik bağ kaplama tabakası APS yöntemiyle uygulanmıştır. Daha sonra disk şeklindeki numunelerin yüzeyine iki farklı üst seramik kaplama tabakası uygulanmıştır. İlk numuneye 300 µm kalınlığında YSZ içerikli seramik üst kaplama, ikinci numuneye ise yine aynı kalınlıkta ZrO₂+MgO içerikli seramik üst kaplama gerçekleştirilmiştir. APS yöntemiyle üretilmiş TBC sistemleri böylece deneysel çalışmaya hazır hale gelmiştir. 5 mm kalınlığa sahip disk şeklindeki numuneler dört eşit parçaya kesilerek, metalografi için uygun boyutlara getirilmiştir. Uygun bir metalografik çalışma için soğuk bakalite alınan iki farklı üst seramik kaplama tabakasına sahip numuneler, belirli kademelerde zımparalanıp, parlatma işlemine tabi tutulmuşlardır. Metalografisi tamamlandıktan sonra incelenecek yüzey etil alkolle temizlenerek SEM görüntüsü için hazır hale gelecektir. Oksidasyonsuz numuneler YSZ ve ZrO₂+MgO içerikli üst seramik kaplama tabakasına sahip olduklarından iletkenliğin sağlanması amacıyla altınla kaplanarak, SEM cihazına yerleştirilecektir. TBC sistemlerinde APS yönteminin tercihi, yüzey işlemleri sonrasında yapıda boşluk ve porozite oluşumuna sebebiyet vermektedir. Üretimin atmosferik koşullar altında gerçekleşmesi kaplama tabakasında oksitlerin gözlenmesiyle sonuçlanmaktadır. Bu sebeple iyi bir metalografik çalışma porozite ve oksit seviyesini minimize etmek adına oldukça önem taşımaktadır. Aynı zamanda üretim esnasında yöntemin doğru parametrelerle uygulanması, sorumlu kişi veya kişilerin gerekli tecrübe ve donanıma sahip olmaları da sağlıklı bir metalografi için oldukça önem taşımaktadır. Aşağıda Şekil 46' da APS yöntemi kullanılarak üretimi gerçekleştirilmiş CoNiCrAlY içerikli metalik bağ ve seramik üst kaplamalara sahip TBC sisteminin ara yüzey SEM görüntüsü verilmiştir.



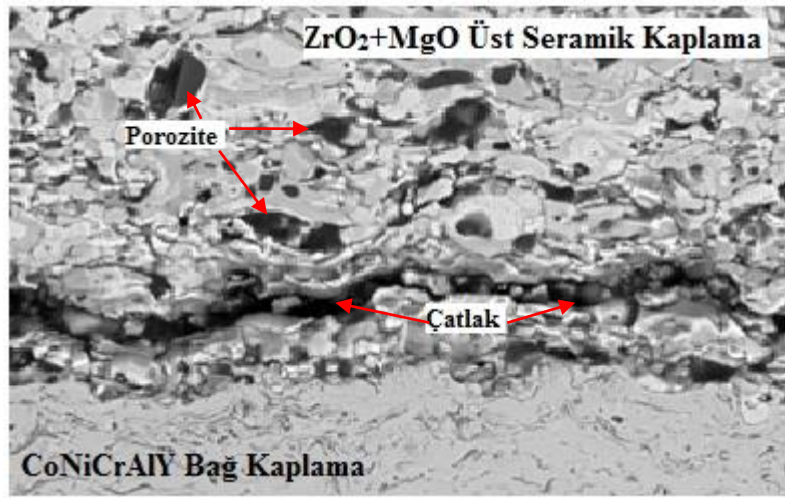
Şekil 46: APS yöntemi kullanılarak üretilen CoNiCrAlY içerikli metalik bağ ve YSZ üst seramik kaplama tabakasına sahip TBC sisteminin ara yüzey SEM görüntüsü.

Yukarıdaki Şekil 46' da APS yöntemi kullanılarak üretilen TBC sisteminin ara yüzey SEM görüntüsü incelendiğinde; bağ kaplama içeriğinde porozite ve boşluğun yok denecek kadar az olduğu gözlenmektedir. Bunun yanı sıra YSZ içerikli üst seramik kaplama tabakasında bölgesel olarak seyir eden siyah alanların porozite ve boşluklu yapıyı temsil ettiği görülmektedir. Açık gri renkli olan bölgeler ise; süreksiz açıklık olarak ifade edilmektedir. Yapıda porozite ve boşluk oranı fazla olmasına rağmen yüzeyde genellikle dalga şeklinde görülmektedir. Bunun sebebi ise; kaplama yöntemi olarak APS yönteminin tercih edilmesidir. Atmosferik koşullar altında kaplamaların gerçekleştirilmesi ara yüzey incelemelerinde dalga şeklinde görünüme sebebiyet vermektedir.



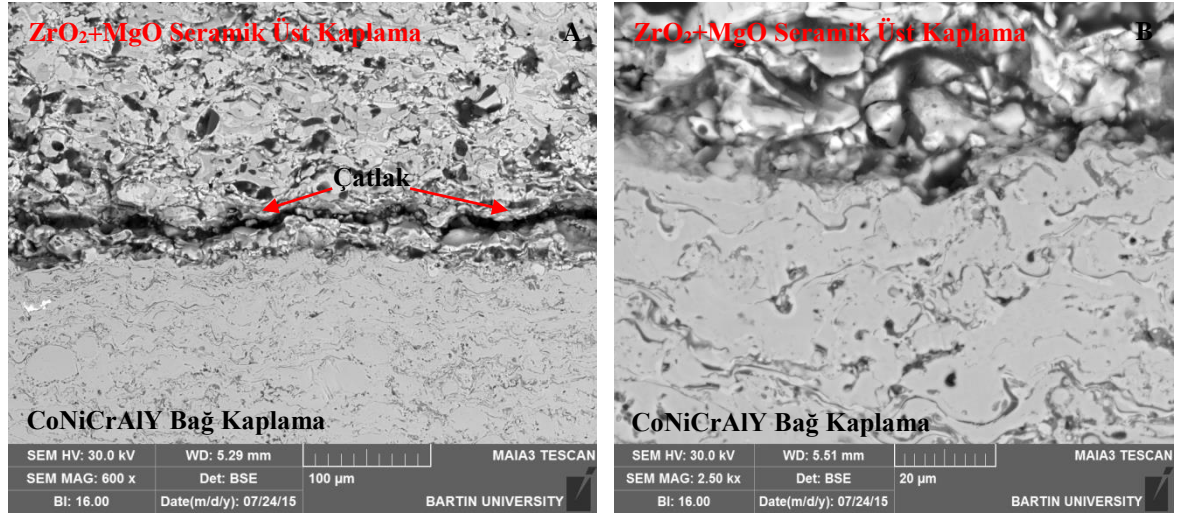
Şekil 47: APS yöntemi kullanılarak üretilen YSZ üst seramik kaplama tabakasına sahip TBC sisteminin A) 300x, B) 600x büyütmedeki SEM görüntüleri.

Şekil 47' de 300x ve 600x büyütmelerde APS yöntemiyle üretilmiş YSZ üst seramik kaplama tabakasına sahip TBC' lerin SEM görüntüleri verilmiştir. Altlık malzeme, bağ kaplama ve YSZ üst seramik kaplama tabakalarının yapısal farklılıklarını gözlemlemek mümkündür. Oldukça dayanıklı olan altlık malzeme üzerine CoNiCrAlY içerikli bağ kaplamanın uygulanmasıyla birlikte, metalik kaplama içeriğinde boşluğun görülmediği gözlemlenmektedir. YSZ üst seramik kaplama tabakasında ise; porozite miktarı az da olsa görülmektedir. Aşağıda Şekil 48' de ise; yine APS yöntemiyle üretilen CoNiCrAlY içerikli metalik bağ ve ZrO₂+MgO içerikli üst seramik kaplama tabakasına sahip TBC sisteminin SEM ara yüzey görüntüsü verilmiştir.



Şekil 48: APS yöntemi ile üretilen CoNiCrAlY içerikli metalik bağ ve ZrO₂+MgO içerikli üst seramik kaplama tabakasına sahip TBC sisteminin SEM ara yüzey görüntüsü.

Şekil 48' de SEM görüntüsü verilen ZrO₂+MgO içerikli üst seramik kaplama tabakasına sahip TBC sisteminde, yer yer siyah görümlü bölgeler poroziteyi ifade etmektedir. Bağ kaplama ile üst seramik kaplama arasında vuku bulan çatlak, iki bölge boyunca ilerleme göstermektedir. Bunun sebebi; numunelerin uygun boyutlarda kesimi esnasında, titreşim hareketliliğinden kaynaklı kaplamaların gözle görülmeyecek şekilde atması veya kesme işleminin hızlı bir şekilde gerçekleştirilmesidir. ZrO₂+MgO içerikli üst seramik kaplama tabakasına baktığımızda, YSZ içerikliye nazaran daha yoğun yapılı olduğu görülmektedir. Bölgesel boşluk ve porozite miktarı YSZ içerikli kaplamaya nazaran daha fazla gözlenmektedir. Bu durum, YSZ içerikli üst seramik kaplamaya sahip numuneleri daha dayanıklı kılmaktadır.



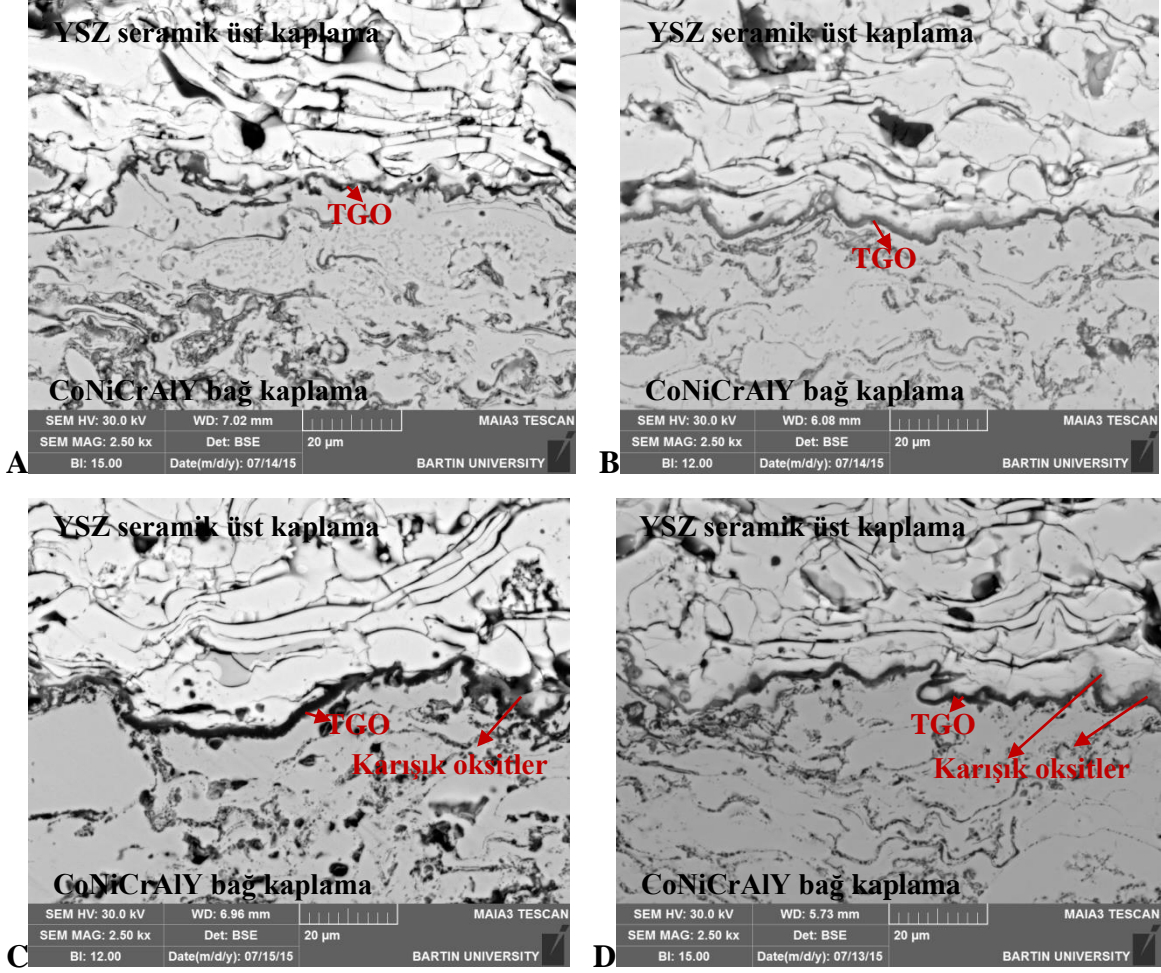
Şekil 49: APS yöntemiyle üretilen ZrO₂+MgO içerikli üst seramik kaplama tabakasına sahip TBC sisteminin A) 600x, B) 2500x büyütmedeki SEM görüntüleri.

Şekil 49' da 600x ve 2500x büyütmelerde APS yöntemiyle üretilmiş ZrO₂+MgO içerikli üst seramik kaplama tabakasına sahip TBC sisteminin SEM görüntüleri verilmiştir. 2500x büyütmede SEM görüntüsü incelendiğinde, bağ kaplama tabakasında üretimden kaynaklı oksitli yapı net bir şekilde görülmektedir. ZrO₂+MgO içerikli üst seramik kaplama tabakası ise yoğun ve yer yer porozite içerikli olarak gözlenmektedir.

4.1.2 Oksidasyon Testi Sonrası TBC' lerin Mikroyapısal Farklılıkları

4.1.2.1 900 °C' de 8, 24, 50 ve 100 saatlik Oksidasyon Testleri Sonrası TBC' lerin Mikroyapıları

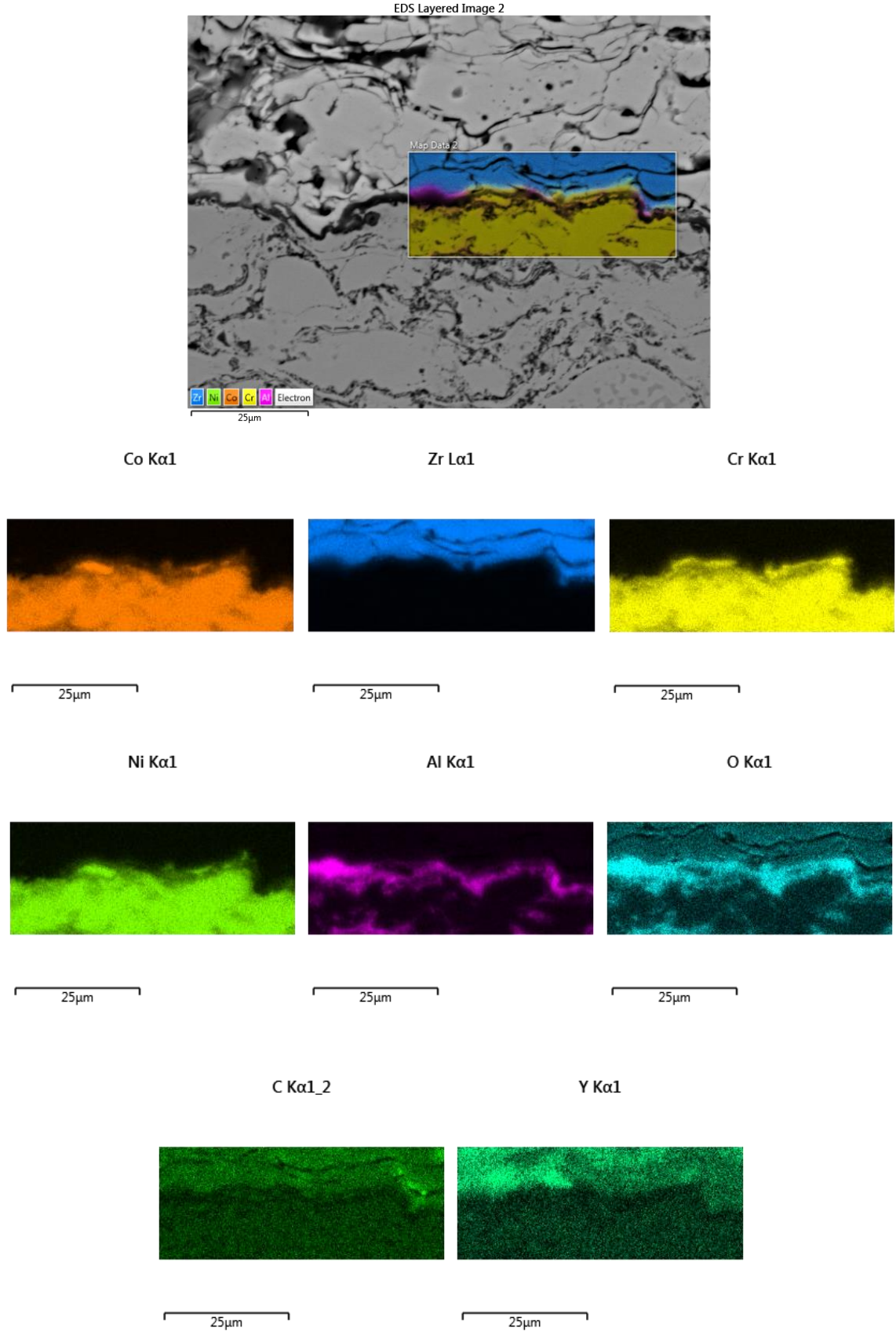
Şekil 50' de 900 °C' de 8, 24, 50 ve 100 saatlik oksidasyon sonrası YSZ üst seramik kaplama tabakasına sahip TBC' lerin SEM mikroyapı resimleri verilmiştir. Resimleri incelediğimizde porozite ve boşlukların yapıda vuku bulunduğu görülmektedir. Fazlaca gözlenmemesine rağmen yapıda porozitenin meydana gelmesiyle oksijen difüze olarak, alüminyum elementiyle reaksiyona girecektir. Afinitesi yüksek olan alüminyum reaksiyon sonucu Al₂O₃ tabakasını oluşturacaktır.



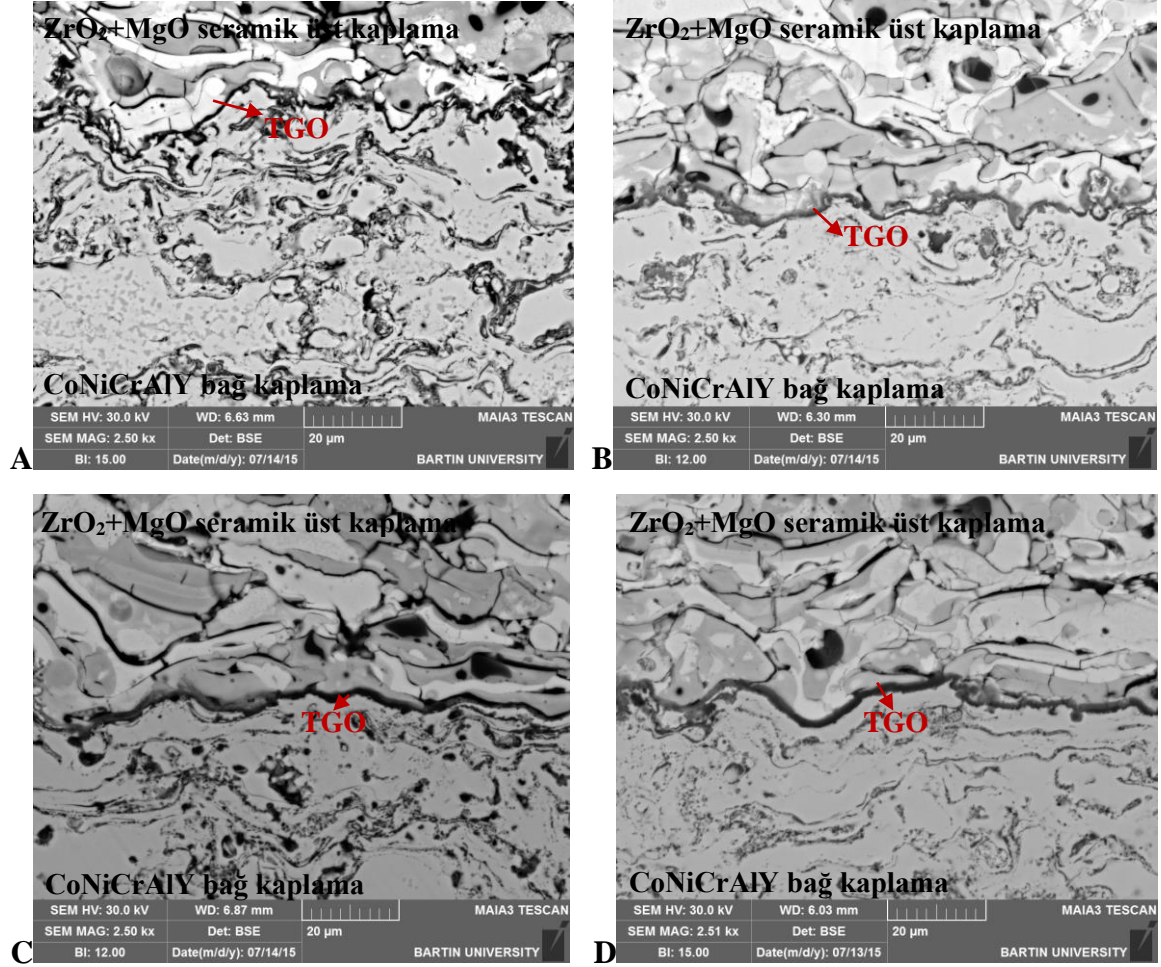
Şekil 50: APS-CoNiCrAlY bağ ve APS-YSZ üst seramik kaplamaya ait 900 °C' de oksidasyon testi sonrası 2500x büyütmedeki SEM mikroyapıları; A) 8 saat, B) 24 saat, C) 50 saat ve D) 100 saat.

Şekil 50' deki SEM görüntülerini incelediğimizde, 900 °C' ye maruz kalan YSZ üst seramik kaplama tabakasına sahip TBC sisteminde 8 saatlik oksidasyon testinde TGO kalınlığı oldukça ince görülmektedir. Aynı sıcaklıkta artan zaman dilimiyle birlikte TGO tabakasının kalınlığındaki artış net bir şekilde görülmektedir. Artan zaman dilimiyle yapının sıcaklığa daha çok maruz kalması YSZ üst kaplamanın oksijen iletkenliğini de artıracaktır. Böylelikle yapıda oksijen yoğunluğundan kaynaklı oksidasyon meydana gelecek ve sistemde devamlı seyir edecektir. Oksidasyon süresinin artışı beraberinde YSZ üst seramik kaplamanın daha yoğun hale gelmesine sebebiyet vererek sinterleşmesine neden olacaktır. Şekil 50 (A)' da 8 saatlik oksidasyon sonrası YSZ kaplamanın porozite ve boşluk miktarı daha fazla ve net bir şekilde gözlenirken, Şekil 50 (D)' de 100 saatlik oksidasyon sonrası YSZ kaplama sinterleşerek daha yoğun bir yapıda görülmektedir.

Oksidasyonun 8 ve 24 saatlik dilimlerinde üniform bir TGO büyümesi gözlenirken, 50 saatlik ve sonrası oksidasyonlarda TGO kalınlığı oldukça artış göstermektedir. Bunun sebebi; 50 saatten sonra alüminyumun yapıda tamamen tükenmesidir. Alüminyumun tükenmesiyle birlikte karışık oksitler meydana gelecektir. Nitekim Şekil 50 (C) ve (D) incelendiğinde TGO tabakasının hemen üst bölümlerindeki bulanık gri bölgeler karışık oksitleri ifade etmektedir. Şekil 51' de 900 °C' de 100 saatlik oksidasyon sonrası YSZ üst seramik kaplama tabakasına sahip TBC sisteminin elementel analiz görüntüsü verilmiştir. Şekil 51 incelendiğinde, alüminyumun oksijen ile reaksiyonu sonucu TGO tabakasının meydana geldiği bölgede Al_2O_3 oluşturduğu görülmektedir. Element dağılımından anlaşılacağı gibi NiO , Cr_2O_3 ve $(Co)Al_2O_4$ gibi spinel oluşumlar, elementel renklerin üst üste gelmesinden anlaşılmaktadır. TGO tabakasının üst kısımlarına baktığımızda koyu gri renkli bölgeler karışık oksitleri ifade etmektedir. Elementel analiz görüntüleri bu bölgelerde alüminyumun var olmadığını ifade etmektedir.



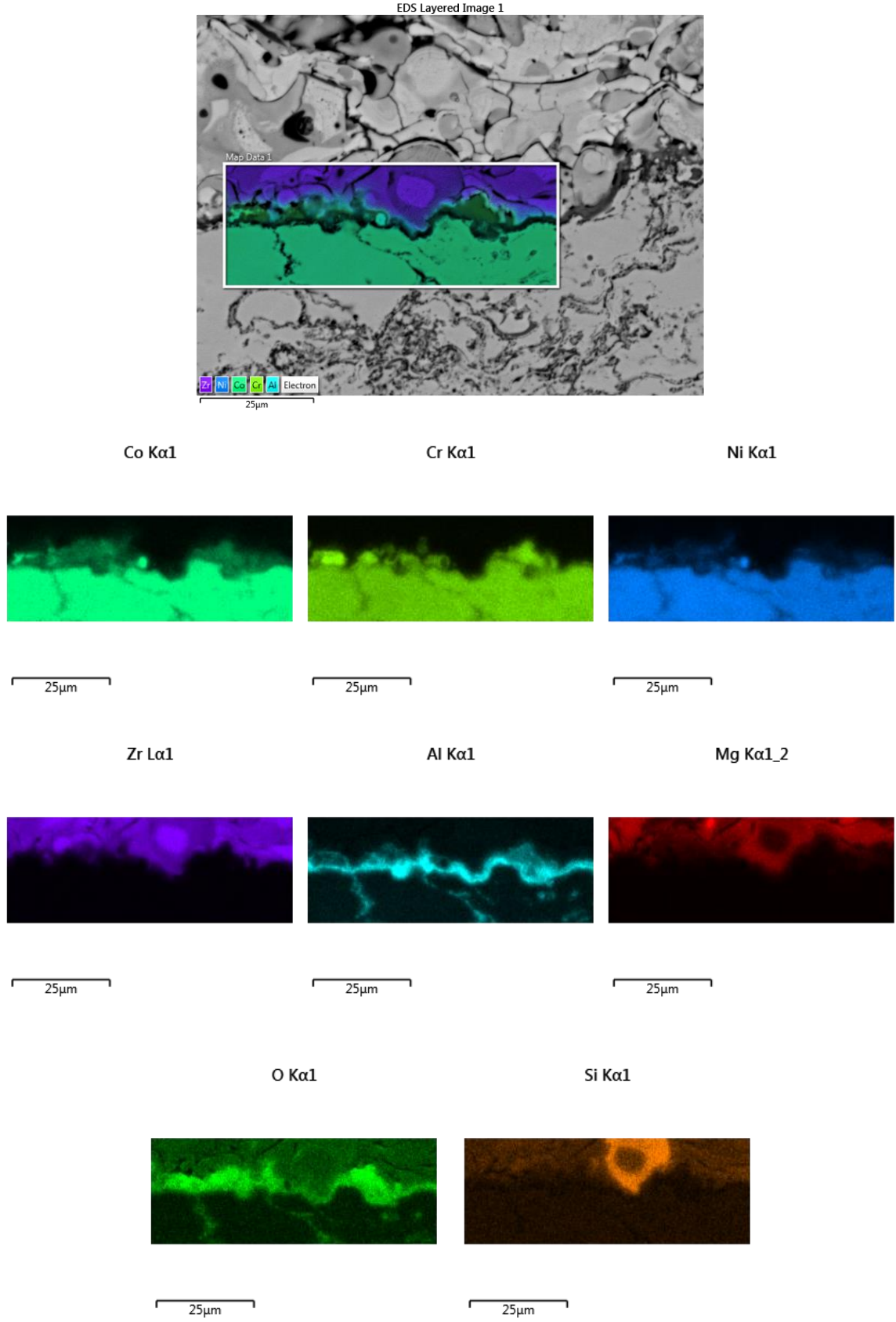
Şekil 51: APS-YSZ üst seramik kaplama tabakasına sahip TBC yapısının 900 °C' de 100 saatlik oksidasyon sonrası elementel analiz görüntüsü.



Şekil 52: APS-CoNiCrAlY bağ ve APS-ZrO₂+MgO 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.

Şekil 52' de 900 °C' de 8, 24, 50 ve 100 saatlik oksidasyon testi sonrası APS-ZrO₂+MgO üst seramik kaplama tabakasına sahip bir TBC sisteminin 2500x büyütmedeki SEM mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde; 8 saatlik oksidasyon sonrası ince bir film şeklinde TGO tabakası yapıda vuku bulmaktadır. 24 saatlik oksidasyon sonucunda ise; TGO tabakasının yer aldığı bölgelerde koyu gri renkte karışık oksitler gözlenmektedir. Bu durum alüminyumun yapıda tükendiğinin göstergesidir. Yüksek sıcaklığa maruz kalan yapıda oksijen afinitesi yüksek olan alüminyum ile reaksiyona girerek alümina meydana getirecektir. Fakat oksidasyon sürekli olarak devam ettiği için oksijen yapıda birikerek Ni, Co ve Cr gibi elementlerle reaksiyon ihtiyacı güdecektir. Bu durum karışık oksit dediğimiz yapıların oluşmasına neden olacaktır.

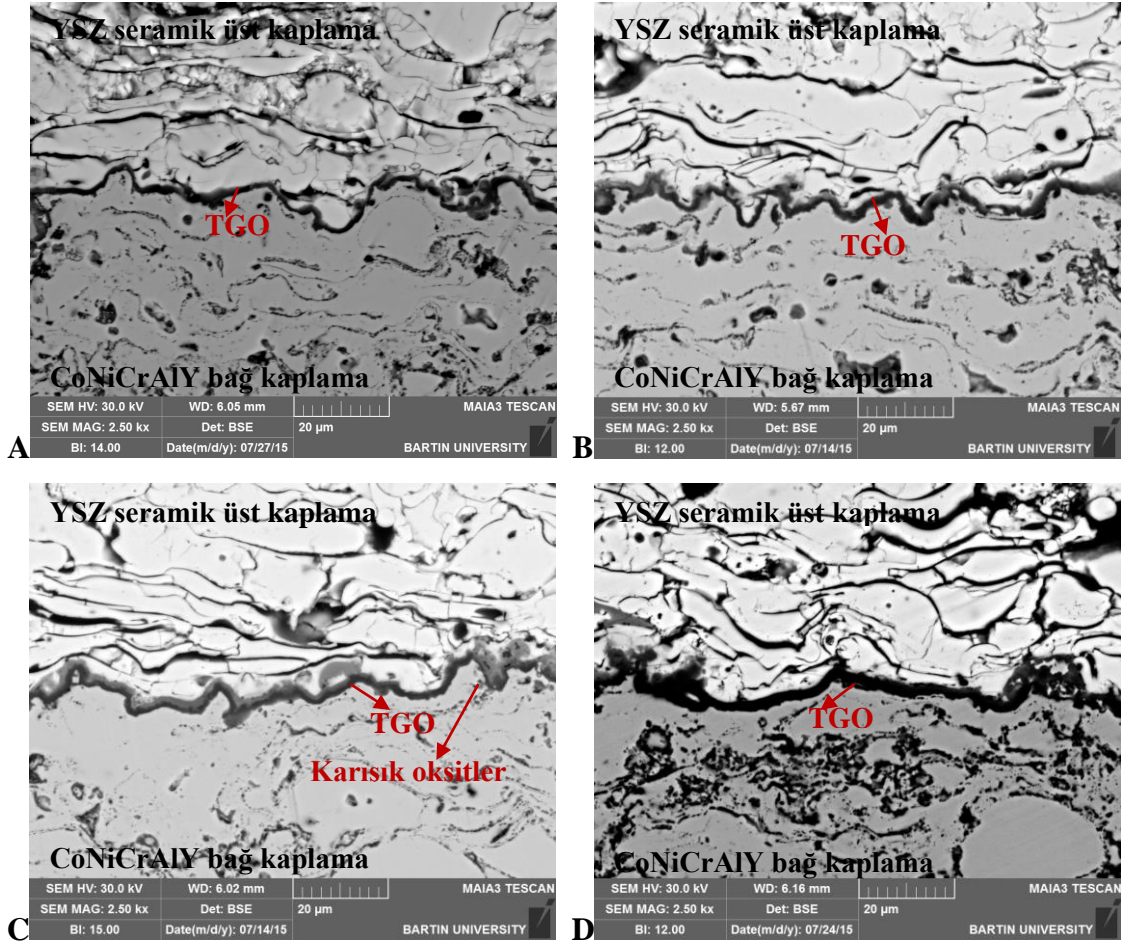
50 ve 100 saatlik oksidasyon sonucu ise; yapıda daha kalın TGO gözlenmektedir. ZrO_2+MgO üst seramik kaplama tabakası YSZ' ye nazaran daha hassastır. Mikroyapısı daha sık ve daha düzlemsel olmasına rağmen, özellikle 100 saatlik oksidasyon sonrası yoğun bir hal aldığı gözlenmektedir. Fakat YSZ üst seramik kaplama ile kıyaslandığında, 50 ve 100 saatlik oksidasyon sonrası TGO kalınlıklarında aşırı bir farklılık görülmemektedir. Aşağıda Şekil 53' te 900 °C' de 100 saatlik oksidasyon sonrası ZrO_2+MgO üst seramik kaplama tabakasına sahip TBC sisteminin elementel analiz görüntüsü verilmiştir. Elementel analiz incelendiğinde; TGO yapısının üst kısmında karışık oksitlerin oldukça fazla olduğu gözlenmekte ve TGO homojenliğini kaybetmektedir. Özellikle kobalt ve krom elementlerinin yapıda daha baskın renklerde vuku bulması Cr_2O_3 ve $(Co)Al_2O_4$ spinel oluşumlarının göstergesidir. Alüminyum ve oksijenin bulunduğu bölgeler net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 53: APS-ZrO₂+MgO üst seramik kaplama tabakasına sahip TBC yapısının 900 °C' de 100 saatlik oksidasyon sonrası elementel analiz görüntüsü.

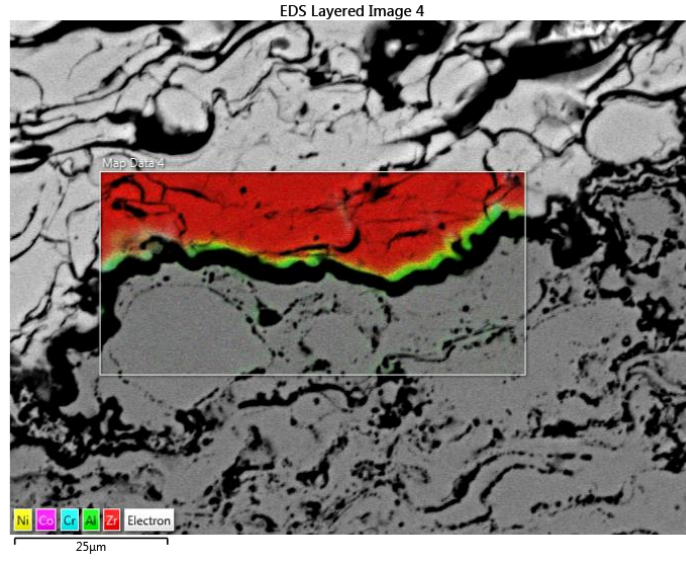
4.1.2.2 1000 °C' de 8, 24, 50 ve 100 saatlik Oksidasyon Testleri Sonrası TBC' lerin Mikroyapıları

Şekil 54' te 1000 °C' de 8, 24, 50 ve 100 saatlik oksidasyon sonrası YSZ üst seramik kaplama tabakasına sahip TBC' lerin SEM mikroyapı resimleri verilmiştir. Resimler incelendiğinde 24 saatlik oksidasyon testi itibariyle karışık oksitler koyu gri renkte TGO tabakasının üst kısımlarında gözlenmektedir. Bu durum alüminyumun tükendiğinin göstergesidir. Sadece ara yüzeyde Al_2O_3 olarak bulunmakta ve tükenmesi sebebiyle karışık oksit oluşumuna sebebiyet vermektedir. Sıcaklık ve zaman diliminin artışıyla birlikte YSZ kaplamanın oksijen iletkenliği de artacaktır. Nitekim 50 ve 100 saatlik oksidasyon testi sonrası mikroyapıya bakıldığında TGO büyümesi gözlenmektedir. Özellikle 100 saatlik oksidasyon testi sonucu ciddi şekilde TGO kalınlığında artış söz konusudur. Oksidasyon süresi artışı üst kaplamanın sinterleşmesine sebebiyet vermektedir.

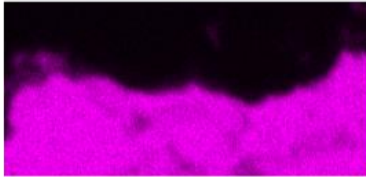


Şekil 54: APS-CoNiCrAlY bağ ve APS-YSZ üst seramik kaplamaya ait 1000 °C' de oksidasyon testi sonrası 2500x büyütmedeki SEM mikroyapıları; A) 8 saat, B) 24 saat, C) 50 saat ve D) 100 saat.

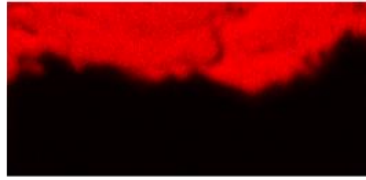
Aşağıda Şekil 55' te 1000 °C' de 100 saatlik oksidasyon sonrası YSZ üst seramik kaplama tabakasına sahip TBC sisteminin elementel analiz görüntüsü verilmiştir. Elementel analize göre; oksijen ve alüminyum renklerine bakıldığında üst üste bindikleri gözlenmektedir. Bu da reaksiyon sonucu alüminanın yapıda bulunduğu göstergesidir. Alüminanın TGO tabakasının bulunduğu bölgede seyir ettiği açıkça görülmektedir. Üst seramik kaplama tabakasında ise zirkonya elementinin baskın olduğu gözlemlenmektedir.



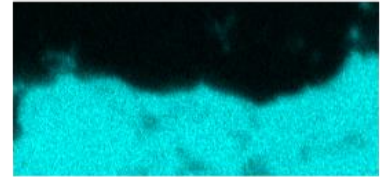
Co K α 1



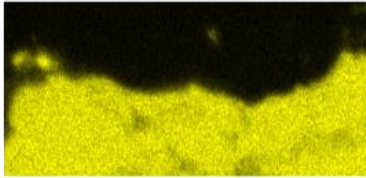
Zr L α 1



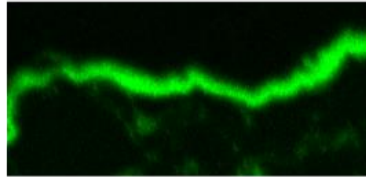
Cr K α 1



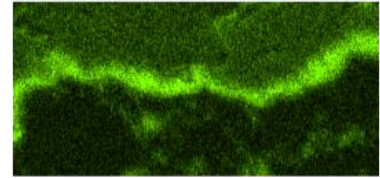
Ni K α 1



Al K α 1



O K α 1



C K α 1_2

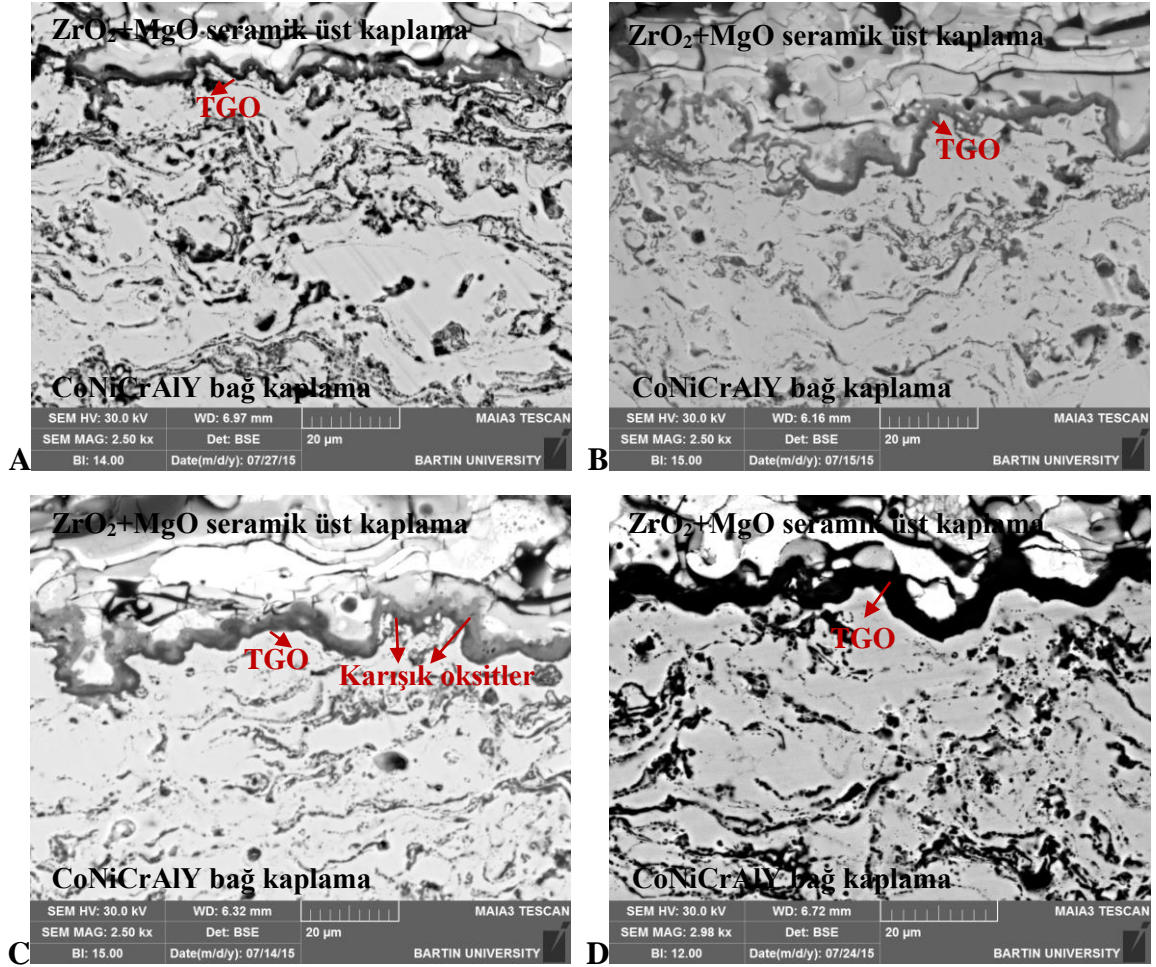


Y K α 1



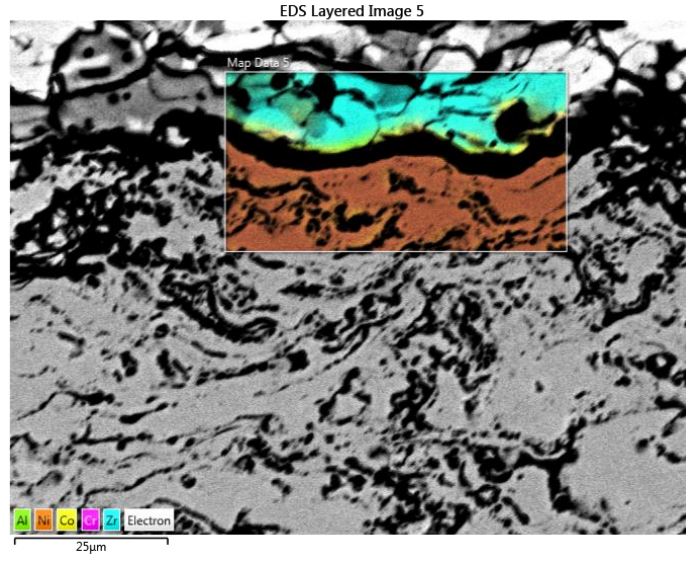
Şekil 55: APS-YSZ üst seramik kaplama tabakasına sahip TBC yapısının 1000 °C' de 100 saatlik oksidasyon sonrası elementel analiz görüntüsü.

Şekil 56' da ise; 1000 °C' de 8, 24, 50 ve 100 saatlik oksidasyon sonrası ZrO_2+MgO üst seramik kaplama tabakasına sahip TBC' lerin SEM mikroyapı resimleri verilmiştir. 1000 °C' de oksidasyona tabi tutulan ZrO_2+MgO içerikli üst kaplama tabakası, YSZ' ye nazaran daha hassastır. Nitekim yapıda porozite ve boşlukların yanı sıra çatlak oluşumu da gözlenmektedir. YSZ üst kaplama tabakası kadar oksijen iletkenliği yüksek olmamasına rağmen, ZrO_2+MgO üst kaplama tabakası da oksijeni oldukça iyi iletmektedir. SEM görüntüleri incelendiğinde; 8 saatlik oksidasyon sonrası TGO oluşumu vuku bulmaktadır. Fakat YSZ' ye nazaran karışık oksit miktarının bu evrede fazla olduğu görülmektedir. 8 ve 24 saatlik oksidasyon testleri sonrası üniform bir TGO büyümesi gözlenirken, 50 saatlik oksidasyon testi itibariyle TGO kalınlığında artış söz konusudur. Aynı zamanda 50 saatlik oksidasyon testi sonrası ZrO_2+MgO , YSZ üst kaplamanınkine oranla daha fazla karışık oksidi bünyesinde barındırmaktadır. 100 saatlik oksidasyon testi sonrası mikroyapıya bakıldığında ise; TGO tabakasında çok ciddi artış söz konusudur. 1000 °C' de 100 saatlik oksidasyon sonrası TGO büyüme oranları karşılaştırıldığında, ZrO_2+MgO içerikli üst kaplama YSZ içerikli üst kaplamanın önüne geçmektedir.



Şekil 56: APS-CoNiCrAlY bağ ve APS-ZrO₂+MgO üst seramik kaplamaya ait 1000 °C' de oksidasyon testi sonrası 2500x büyütmedeki SEM mikroyapıları; A) 8 saat, B) 24 saat, C) 50 saat ve D) 100 saat.

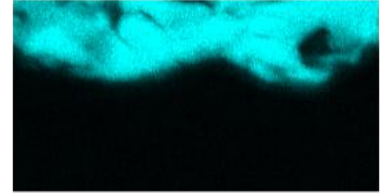
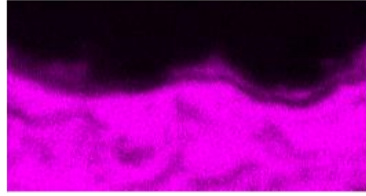
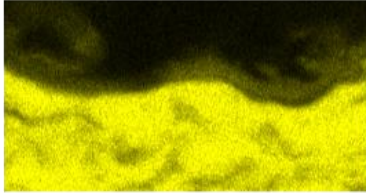
Aşağıda Şekil 57' de ise; 1000 °C' de 100 saatlik oksidasyon sonrası ZrO₂+MgO üst seramik kaplama tabakasına sahip TBC sisteminin elementel analiz görüntüsü verilmiştir. Alüminyumun tükenmesiyle vuku bulan karışık oksit elementleri renklere bakıldığında yapıdaki konumları açıkça görülmektedir. Oksijen ve alüminyum yine üst üste aynı bölgelerde yer alarak alüminanın oluşmasına neden olmakta ve kalın bir TGO tabakasının oluşmasına sebebiyet vermektedir.



Co K α 1

Cr K α 1

Zr L α 1



10µm

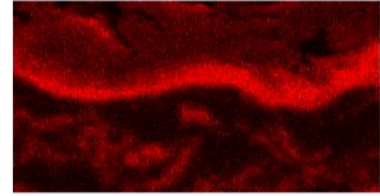
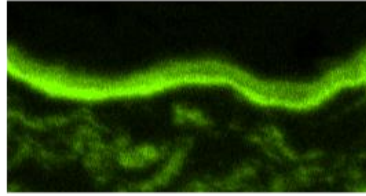
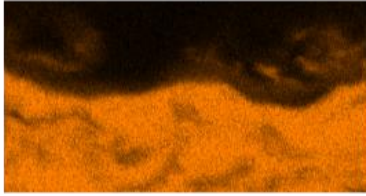
10µm

10µm

Ni K α 1

Al K α 1

O K α 1



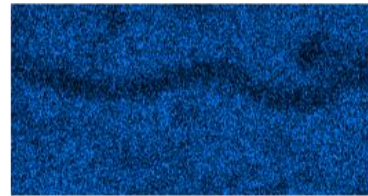
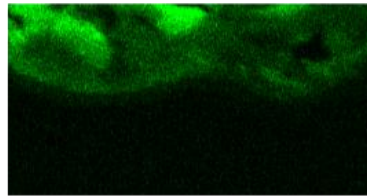
10µm

10µm

10µm

Mg K α 1_2

Fe K α 1



10µm

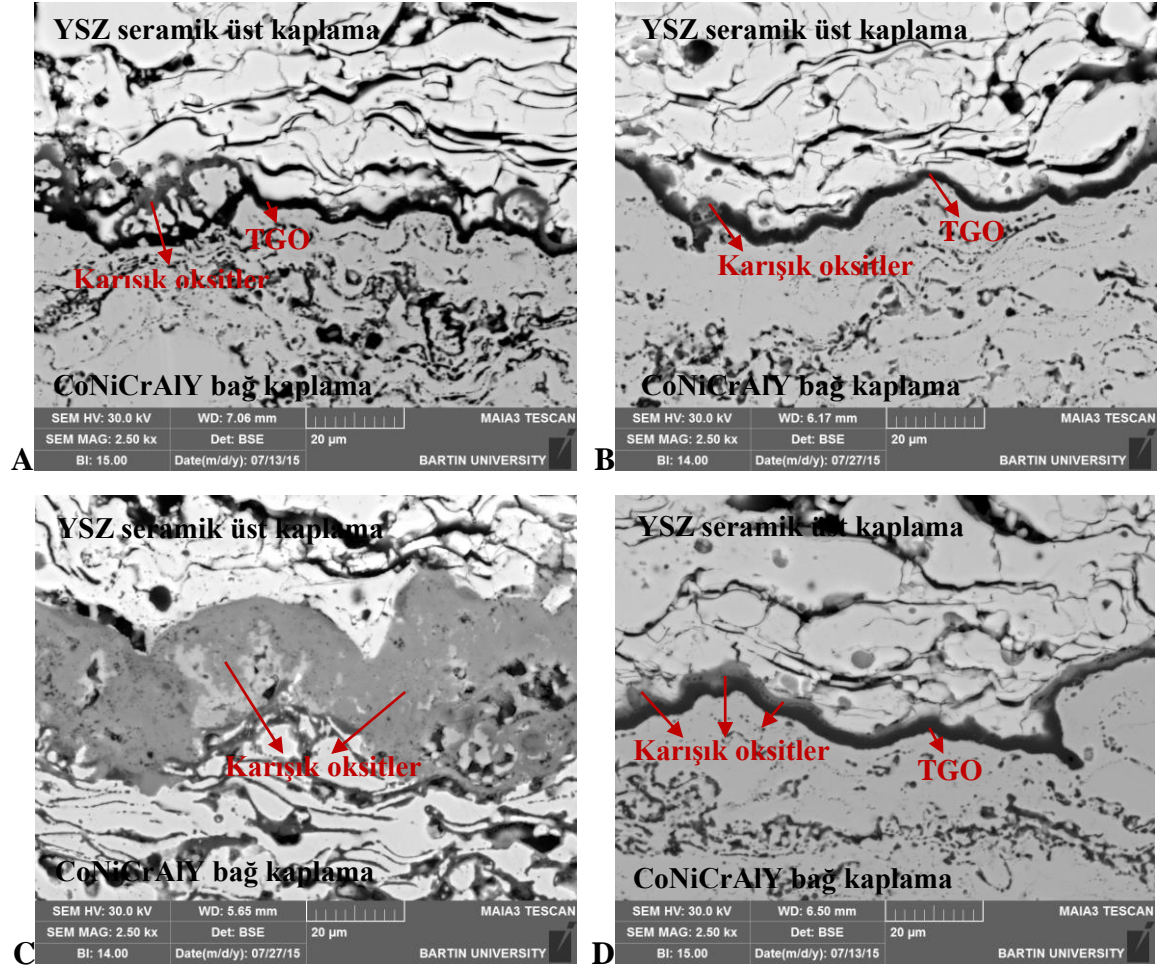
10µm

Şekil 57: APS-ZrO₂+MgO üst seramik kaplama tabakasına sahip TBC yapısının 1000 °C' de 100 saatlik oksidasyon sonrası elementel analiz görüntüsü.

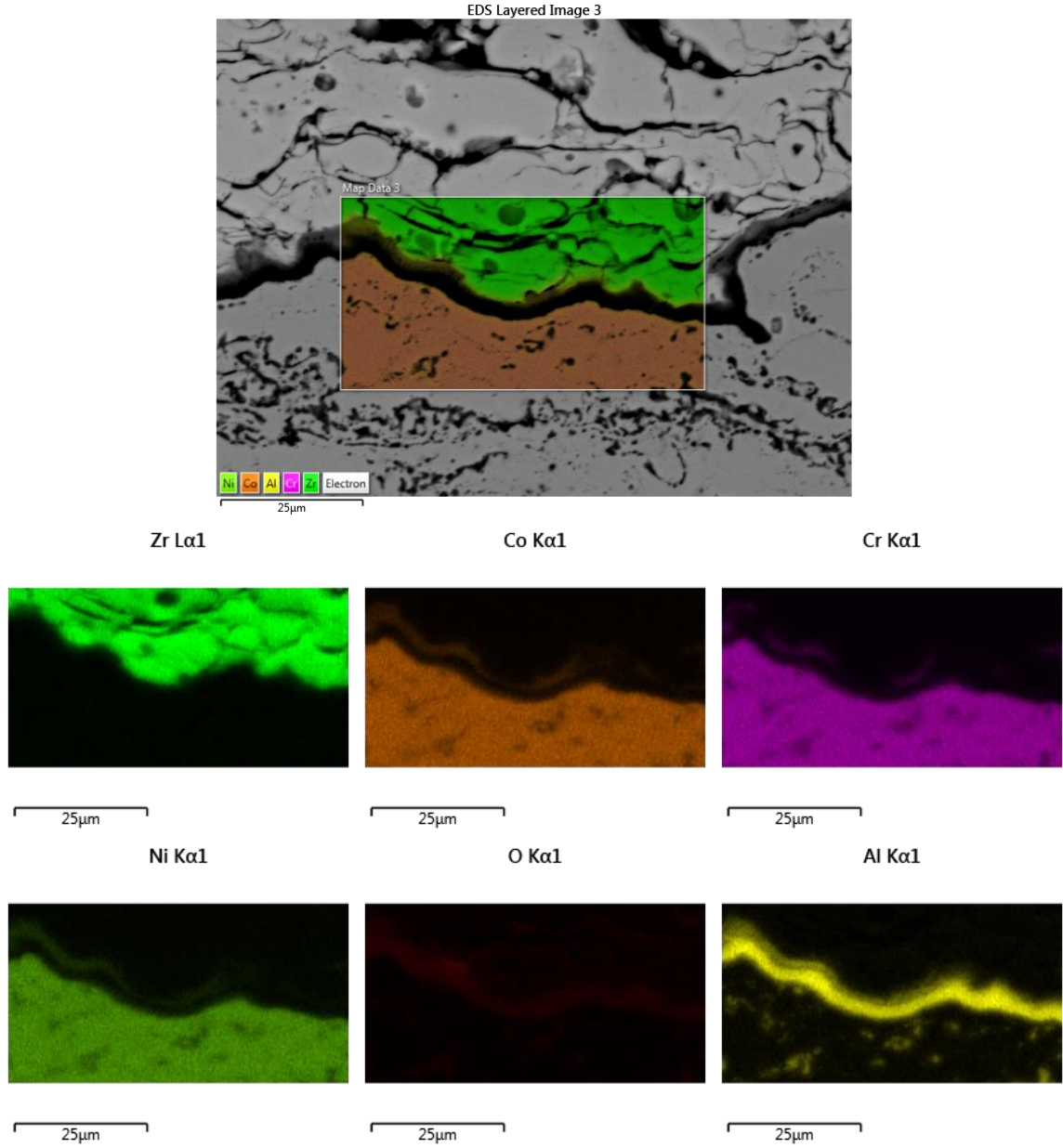
4.1.2.3 1100 °C' de 8, 24, 50 ve 100 saatlik Oksidasyon Testleri Sonrası TBC' lerin Mikroyapıları

Şekil 58' de 1100 °C' de 8, 24, 50 ve 100 saatlik oksidasyon sonrası YSZ üst seramik kaplama tabakasına sahip TBC' lerin SEM mikroyapı resimleri verilmiştir. Şekiller incelendiğinde, TGO tabakası artan zaman dilimiyle birlikte büyüme göstermektedir. 1100 °C' deki oksidasyon sonrası karışık oksitler SEM mikroskobunda daha net bir şekilde gözlenmektedir. TGO tabakasının üst kısmında koyu gri renkli bölgeler karışık oksitleri ifade etmektedir. TGO üniform yapısını 50 saatlik oksidasyon sürecinde koruyamamıştır. Alüminyum hızlı bir şekilde tamamen tükenerek, yapıda oldukça yoğun karışık oksitler gözlenmektedir. TGO tabakasının gözlenememesi ve yapının kalın bir tabaka halinde karışık oksitleri barındırması, seçilen numuneden de kaynaklı olabilmektedir. Zamanın artmasıyla birlikte YSZ üst kaplamada sinterleşmenin etkisiyle çatlakların azaldığı gözlenmektedir. 8 ve 24 saatlik oksidasyon sürelerine bakıldığında TGO kalınlığı ve karışık oksit oluşumu üniform iken, 50 saatlik oksidasyon sonrası oldukça fazla karışık oksit yapıda bulunmaktadır. Alüminyum bu safhada tamamen tükendiğinden, spinel ve karışık oksit oluşumu kaçınılmaz hale gelmiştir. Nitekim diğer safhalara kıyasla oldukça yüksek seviyede karışık oksit mevcuttur. 100 saatlik oksidasyon testi sonrası ise; TGO artışı görülmekte ve karışık oksitler TGO boyunca yapıda koyu gri renkte bulunmaktadır. YSZ üst seramik kaplama diğer oksidasyon testlerine nazaran 1100 °C' lik oksidasyon testine hassasiyet göstermekte ve mikroyapıda çatlak oluşumu gözlenmektedir. Fakat bu sıcaklıkta test sonrası herhangi bir kırılma ya da ayrılma barındırmaması deneysel çalışmamız için uygun bir kaplama olduğunu gözler önüne sermektedir.

Şekil 59' da ise; 1100 °C' de 100 saatlik oksidasyon sonrası YSZ üst seramik kaplama tabakasına sahip TBC sisteminin elementel analiz görüntüsü verilmiştir. Elementel analiz incelendiğinde; TGO yapısının Al_2O_3 şeklinde oluştuğu ve oldukça yüksek seviyede karışık oksidi bünyesinde barındırdığı görülmektedir. Bu durum TGO tabakasının homojenliğini azaltmaktadır. TGO tabakası üstünde biriken elementlerin varlığı, spinelleşmenin ve karışık oksit oluşumunun göstergesidir.



Şekil 58: APS-CoNiCrAlY bağ ve APS-YSZ üst seramik kaplamaya ait 1100 °C' de oksidasyon testi sonrası 2500x büyütmedeki SEM mikroyapıları; A) 8 saat, B) 24 saat, C) 50 saat ve D) 100 saat.

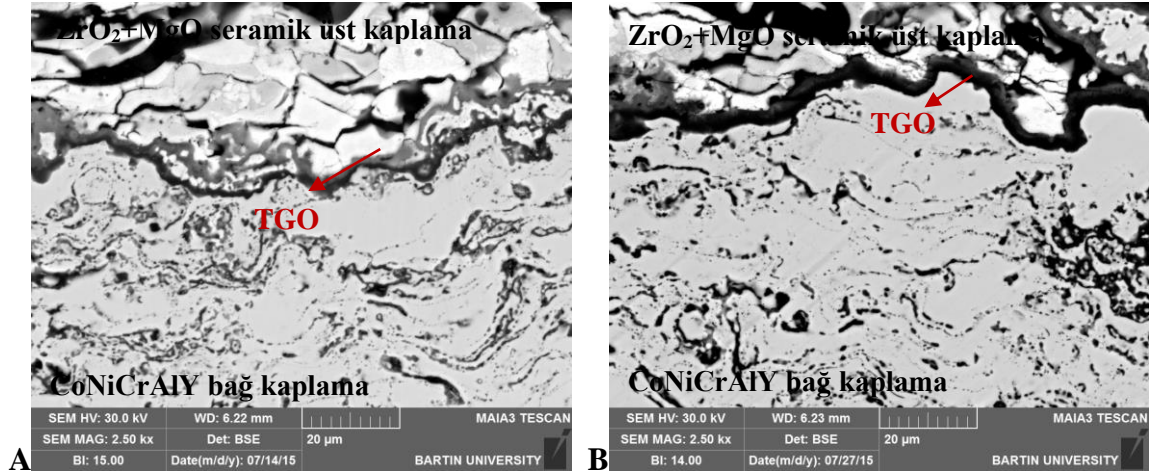


Şekil 59: APS-YSZ üst seramik kaplama tabakasına sahip TBC yapısının 1100 °C' de 100 saatlik oksidasyon sonrası elementel analiz görüntüsü.

Aşağıda Şekil 60' ta 1100 °C' de 8 ve 24 saatlik oksidasyon sonrası ZrO_2+MgO üst seramik kaplama tabakasına sahip TBC' lerin SEM mikroyapı resimleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde; 8 saatlik oksidasyon sonrası TGO tabakası ince bir film şeklinde gözlenmektedir. Bağ kaplama ile üst kaplama arasında vuku bulan TGO' nun üst bölgelerinde oldukça fazla karışık oksite rastlanmaktadır. Bu safhada ZrO_2+MgO , YSZ üst kaplamaya nazaran daha fazla karışık oksite sahiptir. Porozite ve boşluk miktarından kaynaklı oksijen iletimiyle, Al tükenerek Al_2O_3 ' ü meydana getirmiştir. Üst kaplamada

çatlak oluşumu gözlenmekte ve bu durum ZrO_2+MgO üst kaplamanın 1100 °C sıcaklığa hassasiyetinden kaynaklanmaktadır.

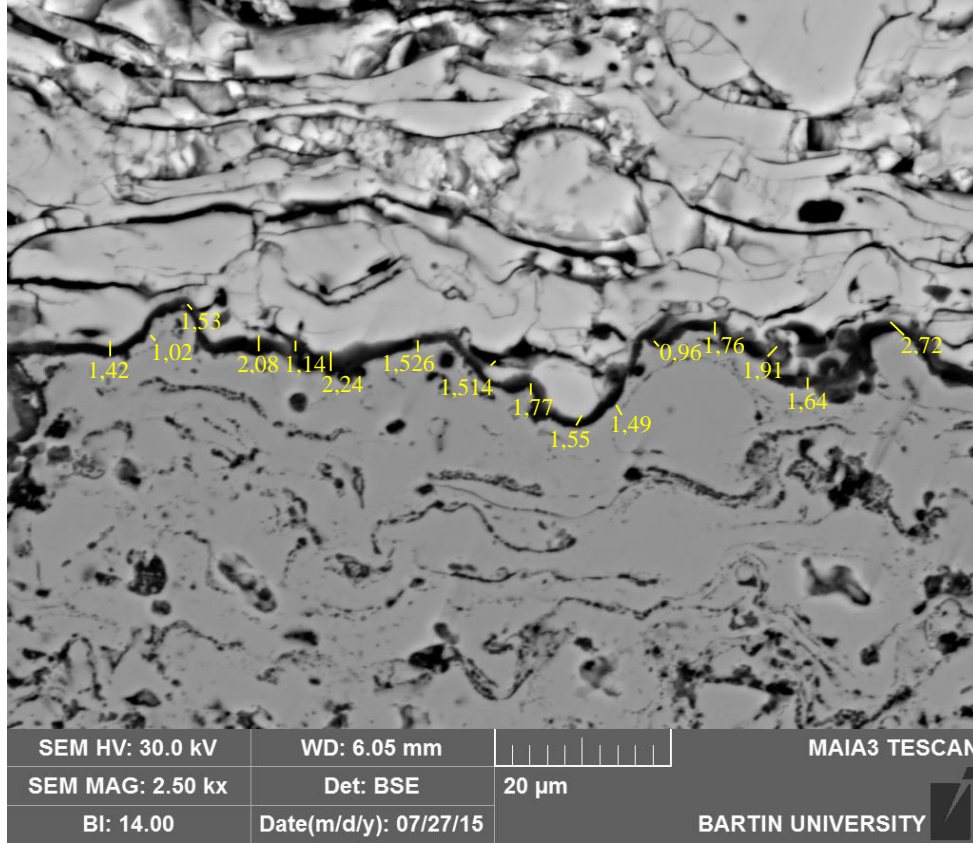
24 saatlik oksidasyon testi sonrası SEM görüntüsü incelendiğinde ise; TGO tabakasının kalınlaştığı net bir şekilde görülmektedir. Yapıdaki karışık oksit TGO uzantısının üst bölgeleri boyunca daha düzlemsel seviyede kendini göstermektedir. Yapılan deneysel çalışmamızda ZrO_2+MgO üst kaplamanın 1100 °C' de 50 ve 100 saatlik oksidasyon testleri defalarca denenmiştir, fakat oksidasyon sonrası kaplama altlık malzeme yüzeyinden ayrıldığı için işleme tabi tutulamamıştır. Bunun sebepleri arasında; ZrO_2+MgO üst kaplamanın artan zaman dilimiyle birlikte 1100 °C sıcaklığa hassasiyet göstermesi verilebilir. Bunun yanı sıra, hazırlanma safhasında kesme işlemine tabi tutulan numuneler, kesim aşamasında titreşime maruz kalmaktadırlar. Bu durum kaplama yüzeyinde gözle görülmeyecek seviyede süresiz çatlakların oluşmasına sebep olabilmektedir. Kesme cihazına uygulanan güç, sarfedilen zaman, kullanıcı tecrübesi ve kesme esnasında titreşimin frekansı çatlak oluşumuna sebebiyet verecek parametrelerdir. Aynı zamanda altlık malzeme üzerine APS yöntemiyle kaplanan ZrO_2+MgO içerikli üst seramik kaplamanın kaplama parametreleri de oksidasyon testi sonrası dayanımı etkilemektedir. Kullanıcının üst kaplama tozunu püskürtme hızı, tabanca mesafesi, toz akış oranı ve ekipmanın doğru ve tecrübeli bir kullanıcı tarafından uygulanması dayanımı etkileyici parametrelerdir. MgO , yüksek ergime sıcaklığı özelliğiyle dikkat çekmektedir (2852 °C). Karışık oksit ve spinellerin TBC sistemindeki artışı, MgO ' in ısıl şok direncinin artmasına neden olmaktadır. Spineller ile MgO arasındaki ısıl genleşme farkının oldukça yüksek olması beraberinde MgO ' nun termal şok direncini artıracaktır. Bu durum aşırı mikroçatlakların meydana gelmesiyle, kırılmalara vesile olarak elastisite modülünün azalmasına neden olacaktır. Oksidasyon testinde zamanın artması beraberinde üst kaplama mikroyapısındaki spinel ve karışık oksitlerin artışına neden olmaktadır. Bu durum ısıl genleşme farkını oldukça yükselterek, çatlak oluşumuna sebebiyet verecektir. Tüm bunlar göz önüne alındığında, ZrO_2+MgO içerikli üst seramik kaplama tabakasına sahip TBC sisteminin 1100 °C' de 50 ve 100 saatlik oksidasyonu sonucu numunelerin kaplamalarında ayrılma ve kopma gözlenmektedir. Bu sebeple mikroyapı morfolojileri incelemeye tabi tutulamamıştır.



Şekil 60: APS-CoNiCrAlY bağ ve APS-ZrO₂+MgO üst seramik kaplamaya ait 1100 °C' de oksidasyon testi sonrası 2500x büyütmedeki SEM mikroyapıları; A) 8 saat, B) 24 saat.

4.1.3 Oksidasyon Testleri Sonrasında TGO Büyüme Değerlerinin İncelenmesi

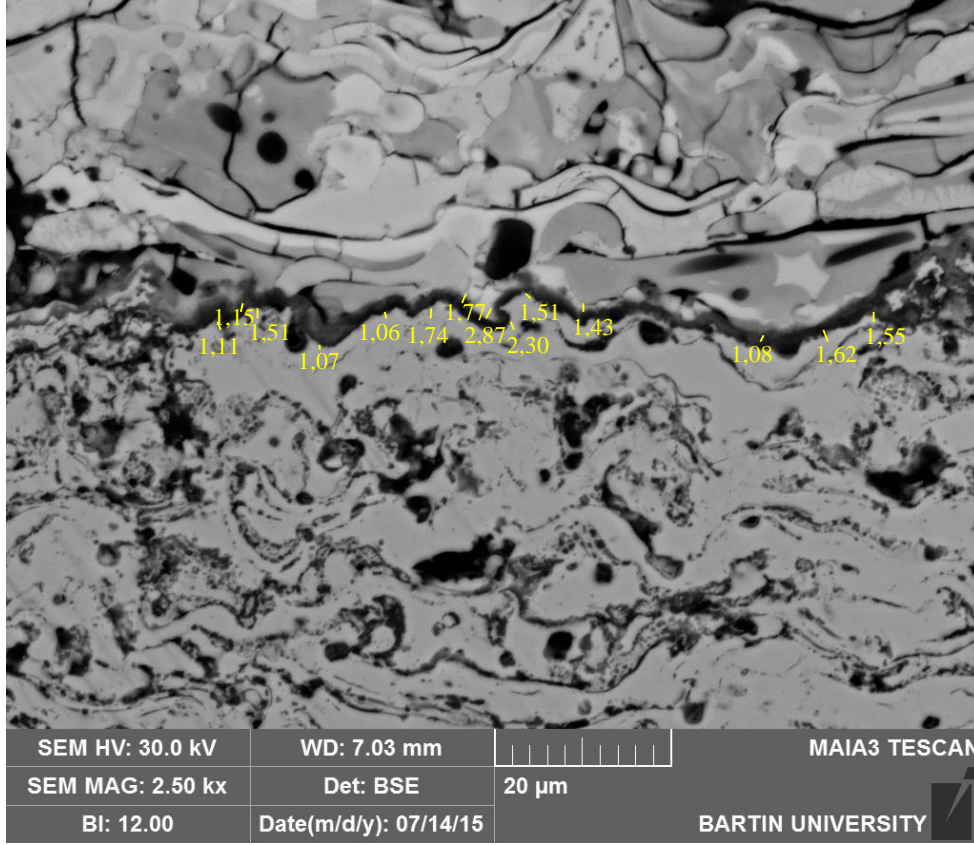
Oksidasyon testleri tamamlanan numunelerin TGO kalınlıkları, SEM cihazının ölçüm özelliği ile yapılmıştır. SEM mikroyapı resimleri 2500x büyütmede alınarak, ölçümler koyu renkli TGO tabakasının uzunluğu boyunca belirli aralıklarla hesaplanmıştır. Oksidasyon sonrası YSZ ve ZrO₂+MgO içerikli üst kaplama tabakalarına sahip TBC' lerin TGO büyüme değerleri ayrı ayrı hesaplanarak, her bir SEM görüntüsünden yaklaşık 10 adet ölçüm alınıp, ortalaması verilere eklenmiştir. Şekil 61' de oksidasyon sonrası TGO tabaka kalınlığı ölçülmüş YSZ üst kaplamaya sahip bir TBC sisteminin mikroyapı görüntüsü verilmiştir.



Şekil 61: Oksidasyon sonrası TGO kalınlık ölçümü yapılmış APS-YSZ üst kaplama içerikli TBC mikroyapısı.

Şekil 61' de verilen SEM görüntüsünü incelediğimizde, YSZ içerikli TBC sisteminin TGO kalınlık değerleri; oksidasyon testine tabi tutulan tüm YSZ üst seramik kaplamaya sahip numunelerin SEM görüntülerindeki TGO kalınlık değerlerinin ortalamasıdır.

Aşağıda Şekil 62' de ise; oksidasyon sonrası TGO tabaka kalınlığı ölçülmüş ZrO_2+MgO üst kaplamaya sahip bir TBC sisteminin mikroyapı görüntüsü verilmektedir. Yine oksidasyon sonrası elde edilen tüm mikroyapı görüntülerinin TGO kalınlık ölçümleri yapılarak, ortalama değerler bulgulara eklenmiştir.



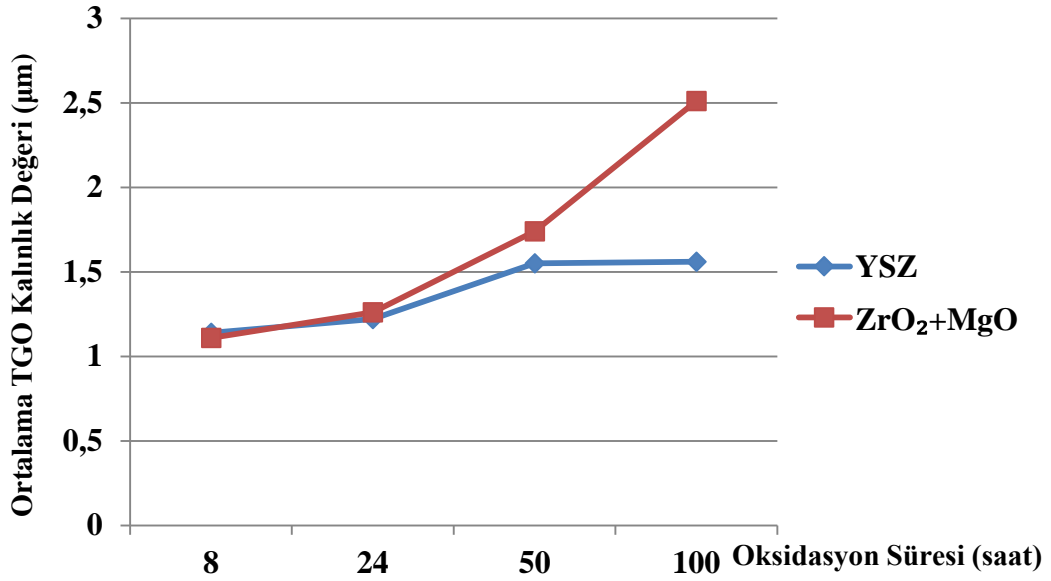
Şekil 62: Oksidasyon sonrası TGO kalınlık ölçümü yapılmış APS-ZrO₂+MgO üst kaplama içerikli TBC mikroyapısı.

Farklı iki üst kaplama tabakasına sahip numunelerin TGO kalınlık ölçümleri göz önüne alındığında, TGO büyüme davranışları yaklaşık olarak aynı orandadır. Bu durum TGO büyüme kararlılığında herhangi bir değişimin söz konusu olmadığını göstermektedir.

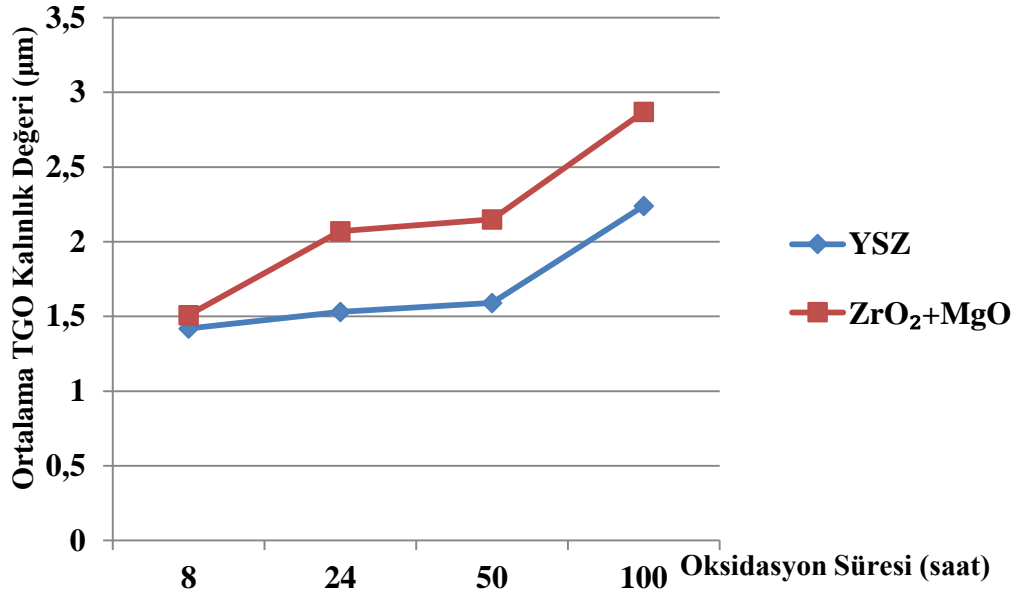
Tablo 12' de YSZ ve ZrO₂+MgO içerikli üst kaplamaya sahip numunelerin 8, 24, 50 ve 100 saat 900 °C, 1000 °C ve 1100 °C' deki oksidasyon sonrası TGO tabakası kalınlık değerleri bulunmaktadır. Sonuçlara bakıldığında, üç oksidasyon testinde de, oksidasyonun ilk safhalarında birbirine yakın TGO kalınlık değerleri gözlenmektedir. Daha sonrasında TGO kalınlık değerlerinin artan zamana bağlı olarak arttığı görülmektedir.

Tablo 12: YSZ ve ZrO₂+MgO içerikli üst kaplamaya sahip numunelerin 8, 24, 50 ve 100 saat 900 °C, 1000 °C ve 1100 °C' deki oksidasyon testleri sonrasında TGO tabakası kalınlık değerleri (µm).

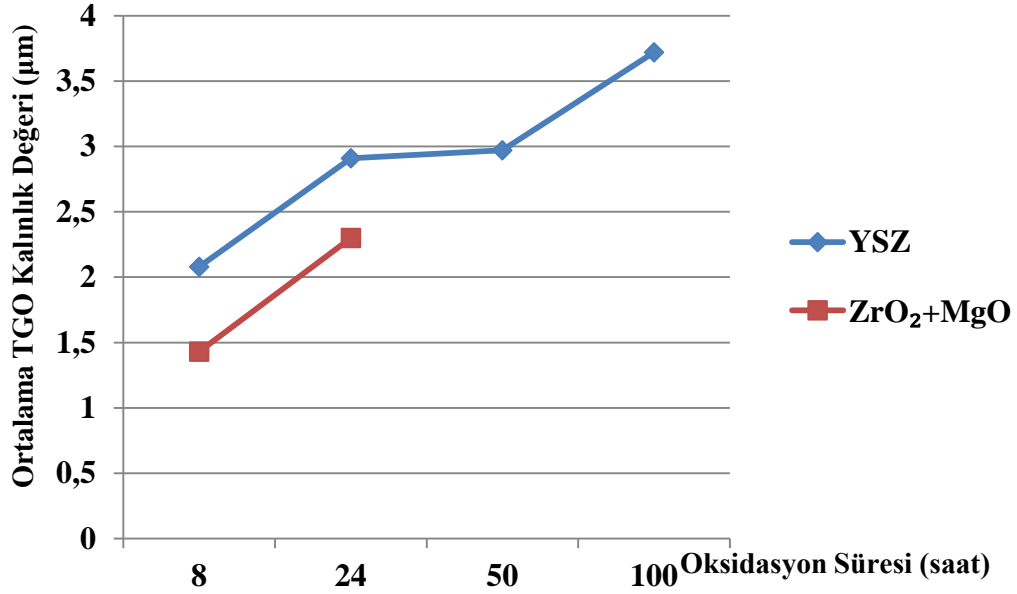
Süre (saat)	900 °C APS-YSZ	1000 °C APS-YSZ	1100 °C APS-YSZ
8	1,14	1,42	2,08
24	1,22	1,53	2,91
50	1,55	1,59	2,97
100	1,56	2,24	3,72
Süre (saat)	900 °C APS-ZrO ₂ +MgO	1000 °C APS-ZrO ₂ +MgO	1100 °C APS-ZrO ₂ +MgO
8	1,11	1,51	1,43
24	1,26	2,07	2,30
50	1,74	2,15	-
100	2,51	2,87	-



Şekil 63: 900 °C' de 8, 24, 50 ve 100 saat oksidasyon sonrası YSZ ve ZrO₂+MgO üst kaplama tabakasına sahip TBC' lerin TGO değerleri.



Şekil 64: 1000 °C' de 8, 24, 50 ve 100 saat oksidasyon sonrası YSZ ve ZrO₂+MgO üst kaplama tabakasına sahip TBC' lerin TGO değerleri.



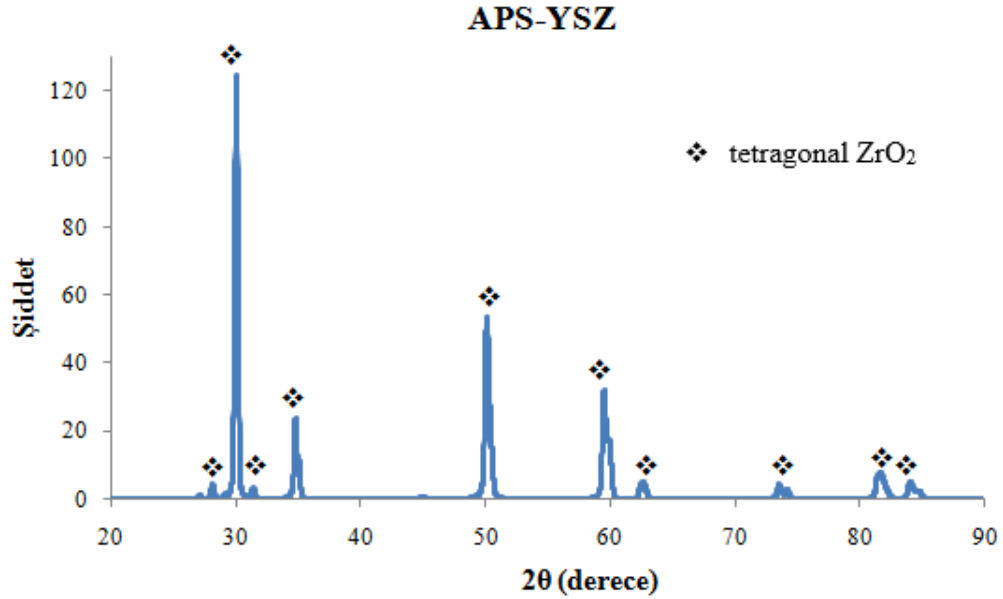
Şekil 65: 1100 °C' de 8, 24, 50 ve 100 saat oksidasyon sonrası YSZ ve ZrO₂+MgO üst kaplama tabakasına sahip TBC' lerin TGO değerleri.

4.1.4 TBC' lerin XRD Analizleri

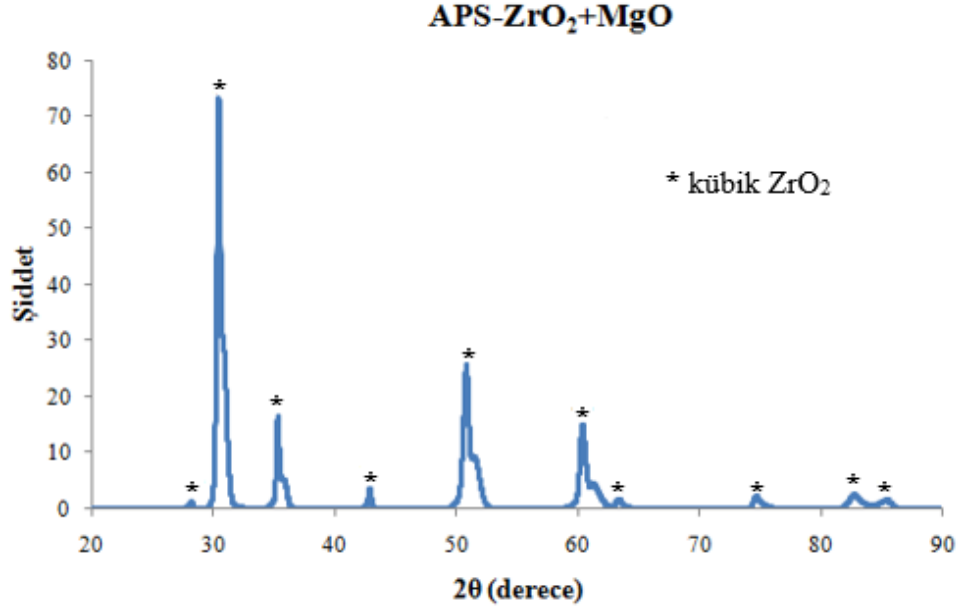
Deneysel çalışma sonucunda elde edilen veriler, oksidasyon testi öncesi ve sonrasında YSZ ve ZrO_2+MgO içerikli üst seramik kaplama tabakalarına, kullanılan üst ve bağ kaplama tozlarına ait yapıların XRD analizleridir.

4.1.4.1 Oksidasyon Testi Öncesi Kaplamaların XRD Analizleri

Oksidasyon testi öncesi YSZ ve ZrO_2+MgO içerikli üst kaplamalara sahip TBC numunelerinden elde edilen XRD analiz sonuçları Şekil 66 ve Şekil 67' de verilmiştir. Şekil 66 incelendiğinde; tetragonal faz yapısı tespit edilmiştir. 30 °C' deki pik seviyesi maksimumdur ve tetragonal fazın en belirgin seviyede gözleendiği bölgedir. Şekil 67 incelendiğinde ise; ZrO_2+MgO içerikli üst kaplamaya sahip TBC yapısında, kübik- ZrO_2 fazın mevcut olduğu gözlenmektedir. İki farklı üst kaplamaya sahip TBC sistemlerinin oksidasyon öncesi XRD analizleri karşılaştırıldığında, aynı derecelerde benzer piklerin vuku bulduğu ve faz yapılarının farklı olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 66: Oksidasyon testi öncesi APS-YSZ içerikli üst kaplamalara ait XRD paternleri.

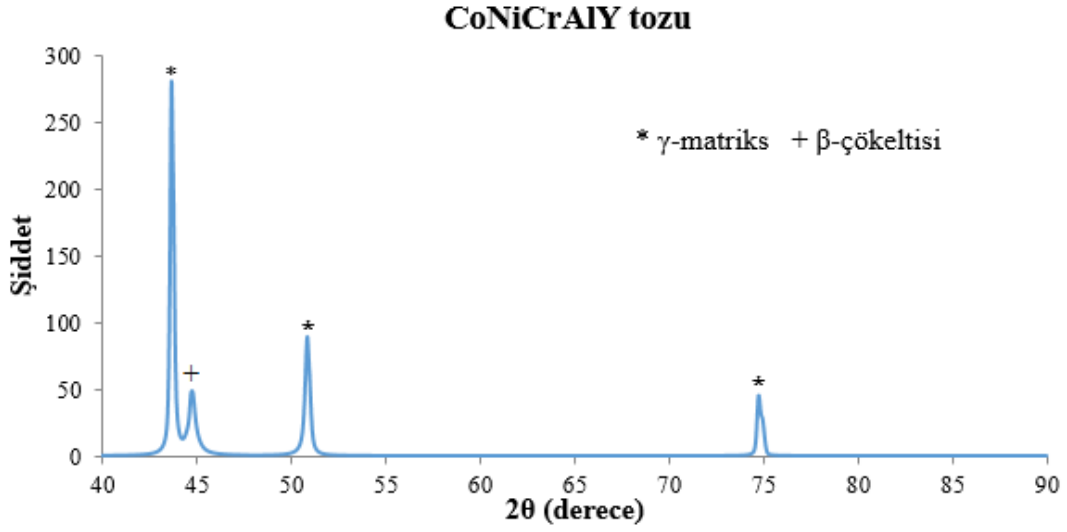


Şekil 67: Oksidasyon testi öncesi APS-ZrO₂+MgO içerikli üst kaplamalara ait XRD paternleri.

4.1.4.2 Toz Malzemelerin XRD Analizleri

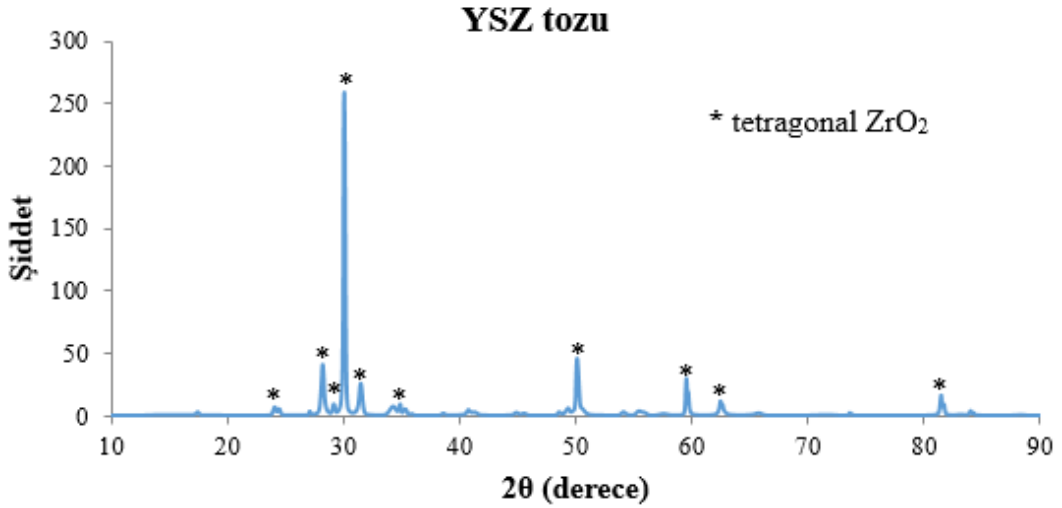
Bağ ve üst kaplamaların üretiminde kullanılan CoNiCrAlY, ZrO₂+%8Y₂O₃ ve ZrO₂+MgO tozlarına ait XRD pikleri sırasıyla Şekil 68, Şekil 69 ve Şekil 70' de verilmiştir. Grafiklerden de anlaşılacağı gibi kaplama işleminde kullanılan tozların istenilen özelliklerde olduğu ve oksit içermediği kanıtlanmıştır.

Şekil 68' de metalik bağ kaplamaların üretiminde kullanılan CoNiCrAlY tozunun XRD paternleri verilmektedir. Grafiği incelediğimizde; metalik bağ kaplamada kullanılan CoNiCrAlY tozu, Ni-Co içerikli γ -matriksinden ve NiAl' den meydana gelen β -çökeltilerinden meydana gelmektedir. Grafikte gösterilen pikler, bu yapıları net bir şekilde ifade etmektedir. YMK γ -matriks (Co-Ni katı çözelti) fazına ait latis parametresi a: 3,58607 Å, üç şiddetli pik olarak (111), (200) ve (220) atomik düzlemlerindedir. HMK NiAl β -fazına ait pikler ise; yapıda daha düşük şiddette görülmektedir.



Şekil 68: Metalik bağ kaplamaların üretiminde kullanılan CoNiCrAlY tozunun XRD paternleri.

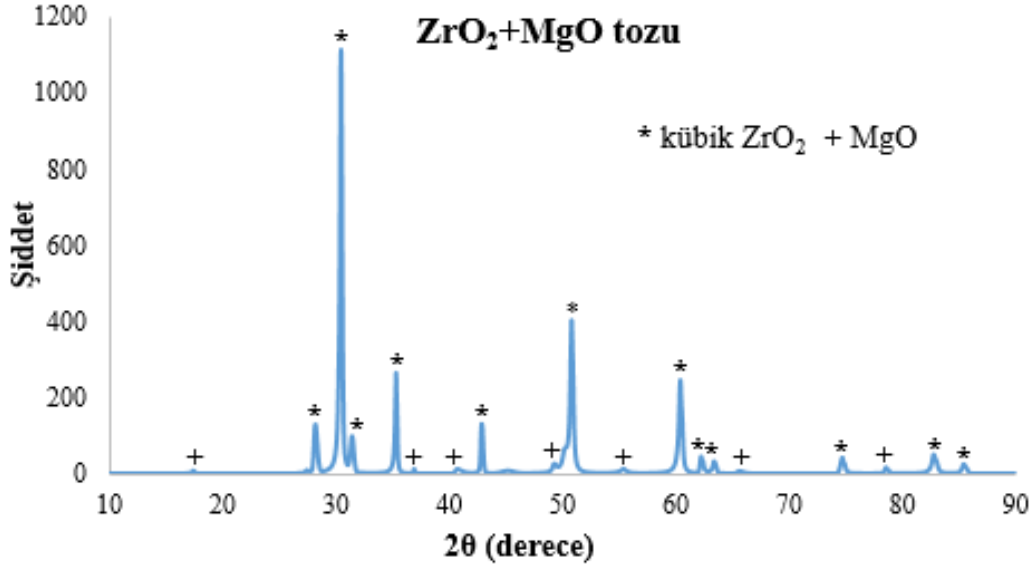
Şekil 69' da üst kaplamaların üretiminde kullanılan $ZrO_2+\%8Y_2O_3$ (YSZ) tozunun XRD paternleri verilmektedir. Grafiği incelediğimizde; üst kaplamada kullanılan YSZ tozunun tamamen tetragonal faz yapısına sahip olduğu ve piklerin tetragonal ZrO_2 ' den oluştuğu gözlenmektedir.



Şekil 69: Üst kaplamaların üretiminde kullanılan $ZrO_2+\%8Y_2O_3$ (YSZ) tozunun XRD paternleri.

Şekil 70' de ise; üst kaplamaların üretiminde kullanılan ZrO_2+MgO tozunun XRD paternleri verilmektedir. Grafiği incelediğimizde; üst kaplamada kullanılan ZrO_2+MgO tozunun kübik faz yapısına sahip olduğu gözlenmektedir. Faz analizine bakıldığında ana

pikler kübik ZrO_2 ' yi ifade ederken, safsızlık olarak düşük şiddetli MgO pikleri gözlenmektedir.



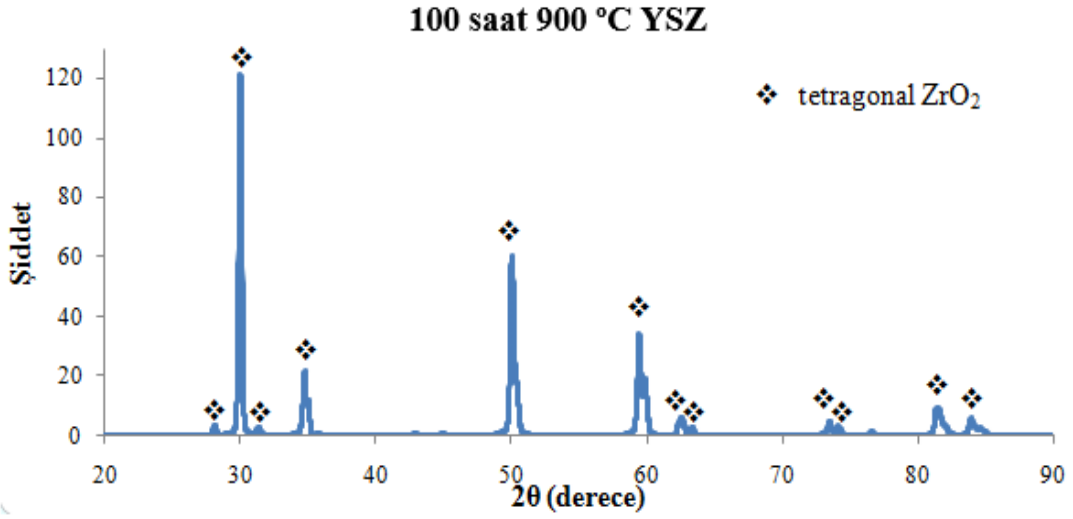
Şekil 70: Üst kaplamaların üretiminde kullanılan ZrO_2+MgO tozunun XRD paternleri.

4.1.4.3 Oksidasyon Testi Sonrası Üst Kaplamaların XRD Analizleri

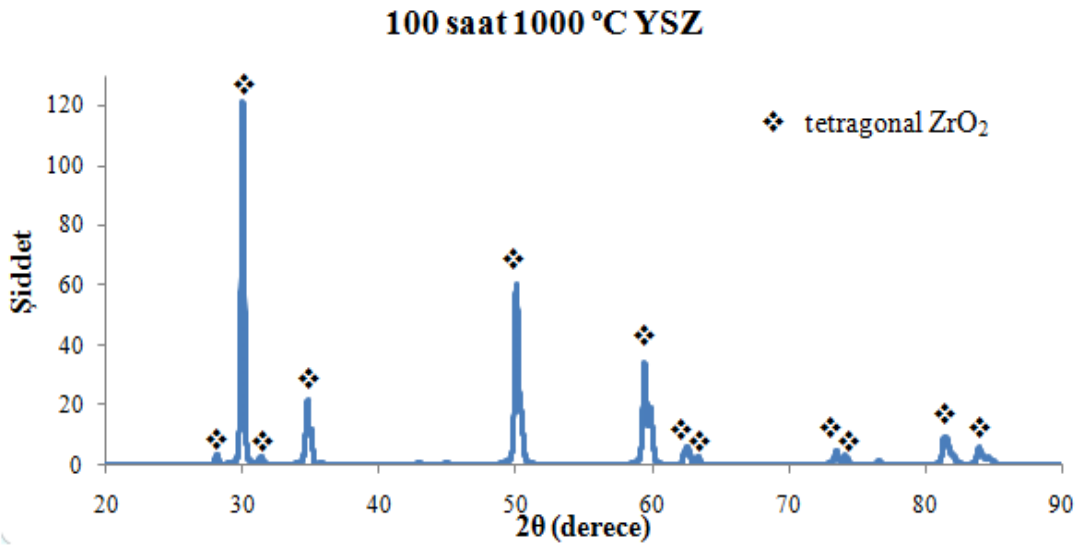
Sıcaklık ve zaman parametrelerine bağlı olarak oksidasyon testi öncesi ve sonrasında kullanılan iki farklı seramik üst kaplamaların yapılarında vuku bulan oksit fazlarının incelenmesi XRD yöntemi kullanılarak tespit edilmiştir. TBC sistemlerinde kullanılan iki farklı seramik üst kaplamaların yapısındaki yüksek porozite miktarı ve kaplama kalınlıkları nedeniyle X-ışınlarının penetrasyon derinliği düşük seviyelerde seyir etmektedir. Penetrasyon için yeterli enerjiye sahip olamayan X-ışını cihazları nedeniyle ara yüzeyde meydana gelen oksit tabakasından veri elde edilememiştir. Çalışma sonucunda YSZ ve ZrO_2+MgO içerikli üst seramik kaplama tabakalarına ait veriler değerlendirilmiştir. 900 °C, 1000 °C ve 1100 °C sıcaklıklarda 8, 24, 50 ve 100 saatlik oksidasyon testlerine tabi tutulan YSZ ve ZrO_2+MgO içerikli üst seramik kaplama tabakalarına sahip, APS yöntemi kullanılarak üretimi gerçekleştirilen TBC sistemlerinin, belirtilmiş sıcaklıklarda yalnızca 100 saatlik oksidasyon süreci sonrası XRD analizleri yapılmıştır.

Aşağıda Şekil 71, Şekil 72 ve Şekil 73' te APS yöntemiyle üretimleri gerçekleştirilen $ZrO_2+Y_2O_3$ (YSZ) içerikli üst seramik kaplamasının sırasıyla 900 °C, 1000 °C ve 1100 °C sıcaklıklarda 100 saatlik oksidasyon testi sonrası XRD analizleri verilmektedir. 100 saatlik oksidasyon sürecine tabi tutulan 900 °C, 1000 °C ve 1100 °C sıcaklıklarda gerçekleştirilen

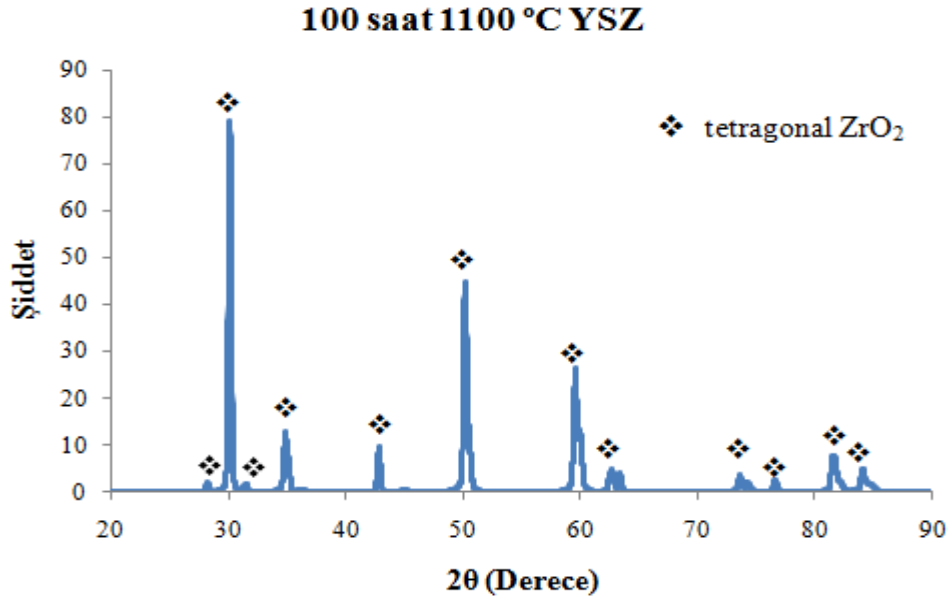
XRD analizleri incelendiğinde; üç farklı grafikte de benzer sonuçlar görülmektedir. Grafiklere bakıldığında; tetragonal faz yapısı görülmektedir. 100 saat 1100 °C' lik oksidasyon sonrası YSZ üst kaplamanın XRD analizini incelediğimizde; 900 °C ve 1000 °C sıcaklıklarına göre ana piklerin şiddetinin biraz daha artışı söz konusudur. Özellikle 2θ olarak 30°, 45°, 50°, 60° ve 85° açılarındaki piklerde artışı görmemiz mümkündür. Üç farklı sıcaklıkta da benzer faz yapısına sahip olan YSZ üst kaplama, tetragonal ZrO₂ fazını bünyesinde bulundurmaktadır.



Şekil 71: APS yöntemiyle üretimleri gerçekleştirilen ZrO₂+Y₂O₃ (YSZ) içerikli üst seramik kaplamanın 900 °C 100 saatlik oksidasyon testi sonrası XRD paternleri.

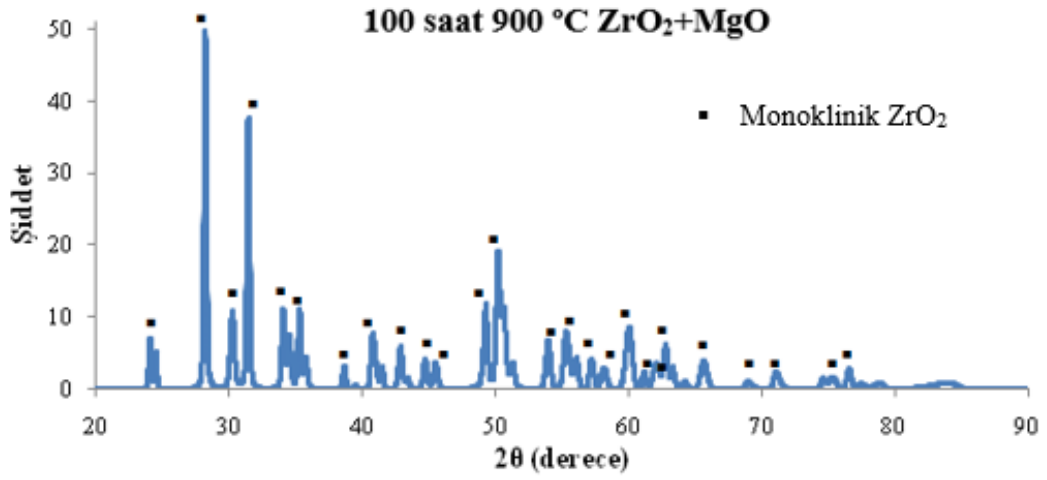


Şekil 72: APS yöntemiyle üretimleri gerçekleştirilen ZrO₂+Y₂O₃ (YSZ) içerikli üst seramik kaplamanın 1000 °C 100 saatlik oksidasyon testi sonrası XRD paternleri.

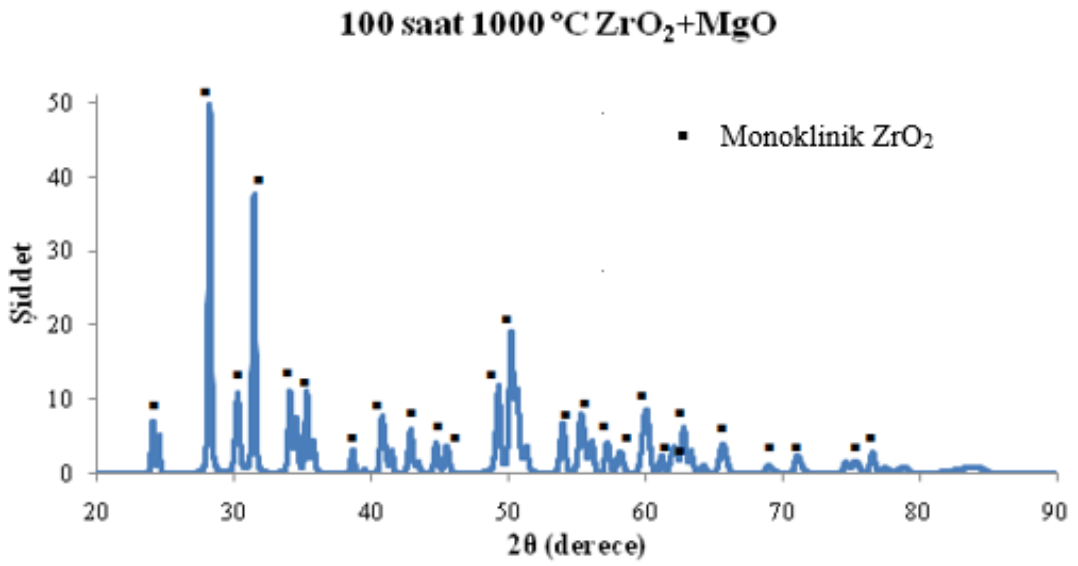


Şekil 73: APS yöntemiyle üretimleri gerçekleştirilen $ZrO_2+Y_2O_3$ (YSZ) içerikli üst seramik kaplamanın 1100 °C 100 saatlik oksidasyon testi sonrası XRD paternleri.

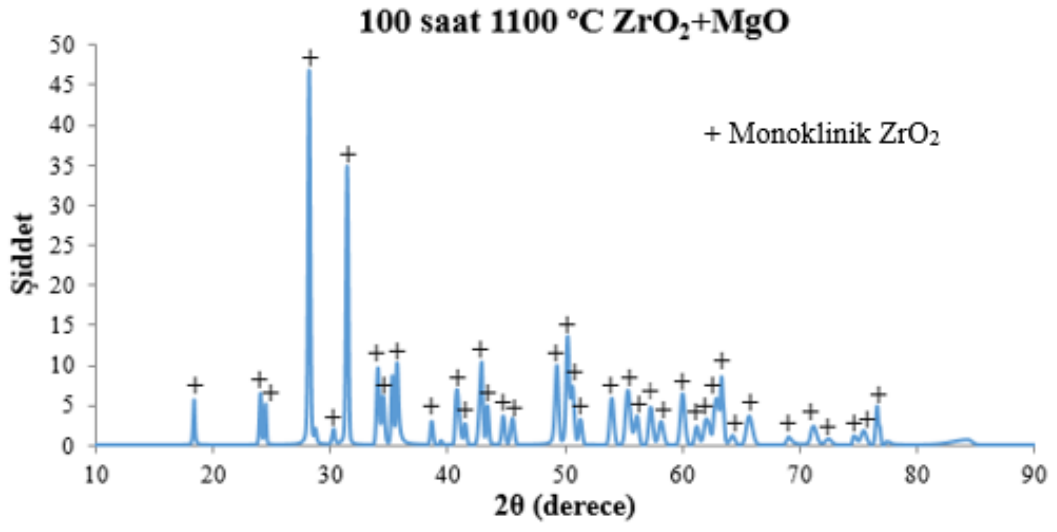
Şekil 74, Şekil 75 ve Şekil 76' da ise; APS yöntemiyle üretimleri gerçekleştirilen ZrO_2+MgO içerikli üst seramik kaplamanın sırasıyla 900 °C, 1000 °C ve 1100 °C sıcaklıklarda 100 saatlik oksidasyon testi sonrası XRD analizleri verilmektedir. Faz analizleri incelendiğinde; üç farklı oksidasyon sıcaklığında gerçekleştirilen testler sonucunda, benzer ana piklerin varlığı söz konusudur. 900 °C ve 1000 °C' lik oksidasyon testleri sonrası XRD analizlerine göre, 1100 °C' lik oksidasyon testi sonrası XRD analizlerinin pikleri daha şiddetlidir. Özellikle ana piklerin şiddeti sıcaklığın artışıyla birlikte artmaktadır. Üç grafiğin XRD analizlerinde de 2θ olarak yaklaşık 29°, 32° ve 52° lerde en şiddetli pikler gözlenmektedir. 900 °C, 1000 °C ve 1100 °C sıcaklıklarda 100 saatlik oksidasyon testleri sonrası APS- ZrO_2+MgO içerikli üst kaplamanın faz yapısı monoklinik ZrO_2 ' dir. Her bir oksidasyon sıcaklığı için ZrO_2+MgO üst kaplamanın faz yapısı benzerdir.



Şekil 74: APS yöntemiyle üretimleri gerçekleştirilen ZrO₂+MgO içerikli üst seramik kaplamanın 900 °C 100 saatlik oksidasyon testi sonrası XRD paternleri.



Şekil 75: APS yöntemiyle üretimleri gerçekleştirilen ZrO₂+MgO içerikli üst seramik kaplamanın 1000 °C 100 saatlik oksidasyon testi sonrası XRD paternleri.



Şekil 76: APS yöntemiyle üretimleri gerçekleştirilen ZrO₂+MgO içerikli üst seramik kaplamanın 1100 °C 100 saatlik oksidasyon testi sonrası XRD paternleri.

4.2 Oksidasyon Testleri Sonrasında YSZ ve ZrO₂+MgO İÇERİKLİ ÜST KAPLAMA TABAKASINA SAHİP TBC' LERDE MEYDANA GELEN MİKROYAPISAL DEĞİŞİMLER İLE TGO BÜYÜME DAVRANIŞLARININ TARTIŞILMASI

Oksidasyon testleri yüksek sıcaklık fırınlarında gerçekleştirilen en önemli hasar mekanizmalarıdır. TBC sistemlerinde ciddi önem teşkil eden oksidasyon testleri sonrasında, APS yöntemi kullanılarak elde edilmiş bağ ve üst kaplamada porozite ve boşluk miktarı artarak, kritik sıcaklıklarda mikro yapılarda yer yer çatlaklar gözlenmektedir. Üretilen YSZ ve ZrO₂+MgO içerikli üst kaplamaların en belirgin özellikleri oksijen geçirgenliklerinin yüksek olmasıdır. Bu özellikleri nedeniyle bağ ve üst kaplama ara yüzeylerinde TGO tabakası meydana gelmektedir. Literatürde bu durumu açıklayıcı bilgiler verilmektedir.

TGO tabakası, TBC sistemlerinin ara yüzeylerinde vuku bulan ve Al₂O₃ içerikli bir tabakadır. Oksidasyon test süreçlerinin artmasıyla birlikte TGO kalınlığında da artış gözlenmektedir. Sıcaklığın artışıyla büyüyen TGO tabakasının özellikle üst bölgelerinde karışık oksitler oluşurken, TGO kararlılığını kaybetmektedir. İki farklı üst seramik kaplama tabakasına sahip TBC sistemlerinin TGO büyüme davranışları kıyaslandığında; genellikle aynı oranlarda TGO kalınlık değerlerine sahip oldukları görülmektedir. 900 °C ve 1000 °C' lik oksidasyonlar sonucunda ZrO₂+MgO üst kaplamaya sahip TBC' lerin, YSZ üst kaplamaya sahip TBC' lere oranla daha fazla TGO büyümesi gözlenmektedir. Fakat 1100 °C' lik oksidasyon sonrasında YSZ üst kaplamaya sahip TBC' lerin TGO tabakasında ciddi oranda artış görülmektedir. 1000 °C' lik oksidasyon sonrasındaki TGO kalınlık değerleri karşılaştırıldığında; ZrO₂+MgO içerikli TBC' lerin, YSZ içerikli TBC' lere oranla TGO kalınlığındaki büyüme oranı daha fazladır. Tüm oksidasyon testleri sonucunda alüminyumun yapıda tamamen tükendiği tespit edilmiştir. YSZ içerikli TBC' lerin ZrO₂+MgO içerikli TBC' lere oranla oksidasyon direncinin daha yüksek olduğu gözlenmektedir. Nitekim 1100 °C' de ZrO₂+MgO üst kaplamaya sahip numuneler 50 ve 100 saatlik oksidasyon sonrası kaplamaların ayrılması ve kopması ile sonuçlanmıştır. Defalarca yinelenen oksidasyon testlerine rağmen netice değişmemiştir.

ZrO₂+MgO içerikli üst kaplamalar, YSZ içerikli üst kaplamalara nazaran daha porozlu yapıya sahiptir. Nitekim deneysel çalışmadaki ölçüm sonuçları da bunu ispatlamaktadır. ZrO₂+MgO içeriğe sahip kaplamaların bükülme dirençleri düşüktür. Aynı zamanda porozlu yapısına bağlı olarak aşındırıcı özelliğinin fazla olması, YSZ içerikli üst

kaplamalara göre kullanım alanını kısıtlamaktadır. Özellikle biyomedikal uygulamalarda tercih edilen ZrO_2+MgO içeriğe sahip kaplamaların, son yıllarda bu alanda da kullanımının azaldığı tespit edilmiştir. Bunun sebepleri arasında bükülme direncinin düşük olması, dayanım kabiliyetinin istenilen seviyede olmaması, üretim aşamasında kullanılan kaplama parametreleri ve bu parametrelerin uygun çalışma koşullarında gerçekleştirilememesi gibi birçok etken gelmektedir (Bultan vd., 2010).

Yitria ile Stabilize edilmiş Zirkonya (YSZ) ise; çok iyi iyon iletimine sahiptir. Bu özelliğinden dolayı YSZ içerikli kaplamalar, uzay endüstrisinde oldukça tercih edilmektedir. Aynı zamanda geleceğin yakıt teknolojisi olarak gösterilen katı oksit yakıt üretiminde de kullanılmaktadır. YSZ içerikli üst kaplamalar, arttırılmış sertliği ve ısı değişimlerine karşı direnç göstermesi özellikleriyle de ZrO_2+MgO içerikli üst kaplamaların önüne geçmektedir. Bu sebeple endüstride aşındırıcı ve mühendislik seramiği olarak da kullanılmaktadır (Bultan vd., 2010). Bulton ve arkadaşlarının (2010) yaptığı deneysel çalışmanın literatür içeriğinde; dayanım arttırıcı özelliğinden dolayı YSZ' nin ZrO_2+MgO ' ya nazaran uzay ve uçak endüstrisinde daha fazla tercih edildiği dile getirilmiştir. YSZ' nin biyomedikal uygulamalar dışında geniş uygulama alanlarında kullanıldığından bahsedilmiştir.

İki farklı üst seramik kaplama tabakasına sahip TBC' lerin yüzey pürüzlülük değerleri karşılaştırıldığında; YSZ üst kaplamaların ZrO_2+MgO içerikli üst kaplamalara oranla yüzey pürüzlülükleri fazladır. Yüzey pürüzlülüğünün azalması ile oluşacak TGO alanı azalacağından, Al tükenimi de azalacaktır (Döleker, 2015). Alüminyum tükeniminin azalması, oksidasyon sürecindeki $\theta-Al_2O_3$ ve $\gamma-Al_2O_3$ yapılarının daha kısa sürede kararlı $\alpha-Al_2O_3$ yapısına dönüşmesi olarak ifade edilmektedir. Literatürde de ifade edildiği gibi; kararlı $\alpha-Al_2O_3$ ' ün yapıda kendini göstermesi, uygulanan bağ kaplama ile ilişkilidir. Bağ kaplamanın yüzey işlemlerine tabi tutulması, yapıdaki TGO oluşumunda da değişimi beraberinde getirecektir. Zhang ve arkadaşları (2006) yaptıkları deneysel çalışmalarda; yüzey pürüzlülüğü yüksek olan kaplama tabakalarında oksidasyon işlemine tabi tutulduktan sonra kütle artışının olduğunu tespit etmişlerdir. Yüzey pürüzlülüğünün azaltılmasıyla, TGO tabakasının hacimsel olarak azaldığını ispatlamışlardır. Gerçekleştirilen deneysel çalışmada; YSZ içerikli üst kaplamaya sahip TBC' lerin yüzey pürüzlülük değerlerinin ZrO_2+MgO içerikli üst kaplamalara göre yüksek olması sebebiyle, yapısındaki TGO kalınlığının artışı da ön plandadır. Benzer TGO kalınlık değerlerine sahip

olmalarına rağmen, YSZ içerikli kaplamaların yapısında Al tükenimi daha erken başlamaktadır. Oksidasyon sonrası yapıda vuku bulan TGO tabakasının daha geç oluşumu için, bağ kaplamalar yüzey işlemlerine tabi tutulmaktadır. Böylece bağ ve üst kaplamalar arasında oluşan TGO, yapıda daha geç kendini göstererek, kaplamalara hasar verecek derecede olmayacaktır. Bağ kaplamalar; kumlama, bilyalı dövme ve zımparalama gibi yüzey işlemlerine tabi tutularak, bu sorun çözülmeye çalışılmıştır. Hesnawi ve arkadaşları (2007) bağ kaplamalar üzerinde yüzey işlemlerini deneyerek, zımparalama işlemine tabi tutulan bağ kaplamaların yüzey pürüzlülüğünün en düşük değerde olduğunu raporlamışlardır. Kısacası yüzey pürüzlülüğünün azalmasıyla TGO' nun oluşum alanı daralarak, Al tükenimi yavaşlayacaktır. Böylece TGO tabakasında istenilen α -Al₂O₃ kararlı yapısına daha kısa sürede ulaşılabilecektir.

Termal bariyer kaplama sistemlerinde ısı yalıtımının sağlanması seramik üst kaplama tabakasıyla mümkündür. Bu sebeple seramik üst kaplama seçiminde oldukça dikkat edilmesi ve istenilen özelliklere uygun seçim yapılması gerekmektedir. Yaklaşık 1600 °C sıcaklıkta gazlara maruz kalan termal bariyer kaplamaların, bu sıcaklıklara dayanabilmesi için seçilen üst kaplama malzemesinin ergime sıcaklığının yüksek olması gerekmektedir. Nitekim deneysel çalışmada tercih ettiğimiz YSZ ve ZrO₂+MgO içerikli üst kaplamaların ergime sıcaklıkları yüksektir. İkisi kıyaslandığında YSZ üst kaplama ön plandadır. Bengi (2009) yaptığı deneysel çalışmada; termal bariyer kaplamaların ısıl özelliklerini inceleyerek, ZrO₂' nin en iyi Y₂O₃ ile stabilizesinin dayanım açısından uçak ve uzay endüstrisinde kullanımının uygunluğunu raporlamıştır. Sıcaklık azaldıkça malzemenin termal iletkenliği artmaktadır. Bu sebeple termal iletkenliği düşük malzemeler TBC sistemleri için uygundur. Isı iletimi seçilen malzemenin yanı sıra, üretilen kaplamanın yapısıyla da ilişkilidir. Literatürde de belirtildiği gibi; TBC sistemlerinde seramik katman, metalik bir bağlanma katmanının üzerine kaplanmaktadır. Termal çevrimlere dayanım gösterebilmesi için, seçilecek olan seramik üst kaplamanın, bağ kaplama ile altlık malzemenin termal genleşme katsayıları ile uyum içerisinde olması gerekmektedir. TBC sistemlerinde kullanılacak olan kaplamalarda faz kararlılığı istenmektedir. Bunun sebebi; faz değişimi esnasında hacimsel değişimin de vuku bulmasıdır. Hacimsel değişime uğrayan kaplamalar hasara sebebiyet verecektir. Bundandır ki; seçilecek olan kaplama malzemesi oda sıcaklığı ile 1600 °C sıcaklığa kadar faz kararlılığı göstermelidir. Deneysel çalışmada XRD analizleri incelendiğinde; YSZ içerikli üst kaplamaya sahip TBC' lerin oksidasyon testleri sonrası tetragonal-ZrO₂ faz yapısının artan sıcaklıkla değişim

göstermediği literatürde ifade edilmiştir. Nitekim ZrO_2+MgO içerikli üst kaplamaların XRD analizleri incelendiğinde ise; oldukça sık piklere rastlanmasına rağmen, oksidasyon testleri sonrası faz yapısının farklı olduğu raporlanmıştır.

TBC' lerde aşırı oksitlenme çalışma ömrünü kısaltacağından dolayı, seçilecek olan kaplama malzemelerinin oksijen afinitesi düşük olmalıdır. Aynı zamanda sıcaklığın izole edilebilmesi için seçilecek seramik üst kaplamanın porlu bir yapıya sahip olması gerekmektedir. Çalışma koşulları altında kaplamanın porlu yapısını koruyabilmesi için, sinterlenme oranının düşük seviyede olması istenmektedir. TBC' ler oldukça korozif ortamlarda kullanılmaktadır. Bu sebeple, seçilecek olan kaplamaların korozyon direncinin yüksek olması ve böylelikle uzun vadeli kullanılması istenmektedir. Tüm bu özellikler göz önüne alındığında; deneysel çalışmada tercih edilen YSZ ve ZrO_2+MgO içerikli üst seramik kaplamaların uygunluğu söz konusudur. Nitekim günümüzde TBC sistemlerinde en çok tercih edilen üst kaplama YSZ' dir. Yapılan araştırmalarda YSZ' ye alternatif malzemelerin eldesi için çalışılmaktadır. Farklı alanlarda YSZ' ye oranla daha iyi sonuçlar veren malzemeler bulunsa da, performans açısından daha uygunu bulunamamıştır. Chen ve arkadaşları (2003) yaptıkları deneysel çalışmada; TBC' lerde plazma sprey yöntemi kullanılarak üretimleri gerçekleştirilen YSZ ve $ZrO_2+\%12CeO_2$ içerikli üst kaplamalara sahip TBC sistemlerinde karşılaştırmalar yaparak, YSZ içerikli üst kaplamaya sahip TBC' lerin daha üstün özelliklerde olduğunu raporlamışlardır. Özellikle dayanım ve faz kararlılığı incelemelerinde YSZ' nin üstün performans gösterdiği ispatlanmıştır. Zirkonyumun stabilize edilmesinde en çok kullanılan malzeme Y_2O_3 ' tür. Bunun en önemli sebebi; Y_2O_3 uzun süreli çalışma koşullarında kararlılığını kaybetmemektedir. Özellikle $\%6-8$ oranında Y_2O_3 içeren kaplamalar, uçak motorlarında oldukça tercih edilmektedir. Taşdıvar (2006), içten yanmalı motorların termal bariyer kaplanması konulu çalışmasında YSZ üst kaplamaya sahip TBC sistemlerinin içten yanmalı gaz türbin motorlarında en çok kullanılan kaplama malzemesi olduğundan ve performans olarak YSZ kaplamaların diğer kaplama malzemelerine nazaran oldukça üstün özelliklere sahip olduğundan bahsetmiştir.

ZrO_2+MgO üst kaplama içeriğindeki MgO ' nun termal iletkenliği YSZ' ye nazaran yüksektir. Aynı zamanda termal genleşme katsayısı da düşük olan MgO , yüksek sıcaklıklara çıktığında hacimsel olarak artış göstermekte, altlık malzeme ve bağ kaplamayla uyumsuzluğu gözlenmektedir. Bu sebeple uzun zaman dilimlerinde yüksek oksidasyon sıcaklıklarına maruz bırakıldığında ZrO_2+MgO üst kaplama, altlık malzemedan

ayrılarak, yapının hasara uğramasına sebebiyet vermektedir. Nitekim deneysel çalışmada, 1100 °C sıcaklıkta 50 ve 100 saatlik oksidasyon testleri sonucunda ZrO_2+MgO üst kaplama, altlık malzemedan ayrılarak, dayanım gösterememiştir. Porozlu bir yapıya sahip olmasına rağmen YSZ üst kaplamaya nazaran oksijen afinitesi yüksektir. Bu sebeple özellikle 900 °C ve 1000 °C' lik oksidasyon testleri sonrasında TGO artışı, YSZ' ye oranla yüksektir. 1100 °C sıcaklıkta 50 ve 100 saatlik oksidasyona dayanım gösterememiş olması ve aynı sıcaklıkta YSZ üst kaplamanın TGO kalınlığının artmasına rağmen dayanım göstermiş olması, YSZ üst kaplamanın daha çok tercih edilmesinin ispatıdır. Bengi (2009) deneysel çalışmasında; YSZ üst kaplamaya sahip TBC' lerin dayanım arttırıcı özelliğinden bahsederek raporlamıştır. Nitekim bu durumu açıklayıcı bilgiler literatürde de açıklanmıştır.

Bağ ve üst kaplama üretiminde tercih edilen APS kaplama yöntemi, her malzeme için uygun bir yöntemdir. Kaplama üretiminde APS yöntemi yerine, EB-PVD kaplama yönteminin tercih edilmesiyle daha dayanıklı kaplamaların eldesi mümkün olacaktır. Aynı zamanda HVOF ve CGDS kaplama yöntemleriyle kaplanmış olan TBC' lerin de dayanım kabiliyetlerinde artış gözlenmektedir. Bilindiği gibi, PS yöntemi kullanılarak üretilen kaplamaların mikro yapılarında splatların varlığı söz konusudur. Bu durum, beraberinde gözenek, çatlak ve boşluk oluşumunu getirmektedir. Özellikle APS yöntemiyle üretimleri gerçekleştirilen kaplamalar, boşluklu yapıya sahiptirler. Bu sebeple üst kaplama üretiminde, APS yöntemi yerine EB-PVD kaplama yönteminin kullanımı daha sağlıklıdır. Fakat APS yöntemine göre daha maliyetli olduğu için tercihen ikinci sıradadır. APS yöntemi ile üretilmiş kaplamaların mikro yapıları analiz edildiğinde; kaplama üretiminden kaynaklı oksit içeriği de gözlemlenmektedir (Karaoğlanlı vd., 2013). Kaplamaların çalışma ömrü ve mekanik özellikleri, tercih edilen bağ ve üst kaplamaların mikro yapılarıyla alakalıdır. Bu durumu açıklayıcı bilgiler literatürde bulunmaktadır. Vaßen ve arkadaşları (2004), APS ve EB-PVD kaplama yöntemleri kullanılarak YSZ üst kaplama içerikli TBC' lerin üretilmesiyle ilgili deneysel çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmalar sonucunda, EB-PVD kaplama yöntemiyle üretilen TBC' lerin oldukça dayanıklı ve istenilen çalışma koşullarında olduğunu raporlamışlardır. APS yöntemi yerine, EB-PVD kaplama yönteminin kullanılması porozlu yapıyı azaltacak ve akabinde dayanım artacaktır. Sonuç olarak, ZrO_2+MgO üst kaplama içerikli TBC' lerin 1100 °C' de 50 ve 100 saatlik oksidasyon testleri sonrası, altlık malzemedan ayrılmasının bir sebebi de uygulanan kaplama yöntemi olarak ifade edilmektedir.

Yapılan bu çalışmada, YSZ ve ZrO_2+MgO içerikli farklı üst kaplamalara sahip TBC sistemlerinin oksidasyon testleri sonrası TGO kalınlık değerleri incelenerek, karşılaştırmalar yapılmıştır. Uygulanan üst kaplamaların mekanik özellikleri, kaplama parametreleri ve kaplama yöntemleri göz önüne alınarak, birbirleriyle kıyaslamaları yapılmıştır. Oksidasyon sonrası TGO kalınlık değerleri belirlenerek, XRD analizleri sonucunda faz yapıları belirlenmiştir. Tüm bu deneysel çalışmalar sonucunda; YSZ üst seramik kaplama içerikli TBC'lerin kullanım açısından ön plana çıktığı gözlenmiştir. Yüzey pürüzlülük ve sertlik değerleri yüksek olan YSZ üst kaplamalar, porozite oranı yüksek olan ZrO_2+MgO üst kaplamaların oksidasyon direnci, korozif ortama dayanım, faz kararlılığı gibi özellikleriyle performans olarak önüne geçmektedir.

BÖLÜM 5

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Genel Sonuçlar

Deneysel çalışmada, Inconel-718 altlık malzeme üzerine, APS yöntemiyle CoNiCrAlY içerikli metalik bağ kaplamalar uygulanmıştır. Bağ kaplama tabakasına sahip numunelerin yarısına APS yöntemiyle YSZ içerikli seramik üst kaplamaların üretimi gerçekleştirilirken, diğer numuneler APS yöntemi kullanılarak ZrO_2+MgO içerikli seramik üst kaplamalar üretilmiştir. Böylece altlık ve bağ kaplama tabakası aynı, seramik üst kaplama tabakası farklı TBC yapıları elde edilmiştir. Altlık malzeme, bağ ve üst kaplamaların mesafeye bağlı sertlik değişimleri, bağ ve üst kaplamaların yüzey pürüzlülük değerlerinin belirlenmesi ile bağ kaplamaların porozite ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Sonrasında TBC yapıları, yüksek sıcaklık fırınında 8, 24, 50 ve 100 saatlik süreçlerde 900 °C, 1000 °C ve 1100 °C sıcaklıklarda izotermal oksidasyon testlerine tabi tutulmuştur. Oksidasyon testleri sonrası üst kaplama tabakası farklı olan TBC yapılarında oluşan TGO tabakasının büyüme davranışları incelenerek, numuneler arasında karşılaştırmalar yapılmıştır. Oksidasyon testleri öncesi bağ ve üst kaplama tozları ile 900 °C, 1000 °C ve 1100 °C 100 saatlik oksidasyon testleri sonrası YSZ ve ZrO_2+MgO içerikli üst kaplamaların XRD analizleri incelenerek, faz yapıları tespit edilmiştir. Yapılan deneysel çalışma sonucunda elde edilen veriler değerlendirilerek, bulgulara eklenmiş ve yorumlanmıştır. Deneysel çalışmaların genel sonuçları maddeler halinde aşağıda verilmektedir:

1. Inconel-718 süper alaşım altlık malzeme üzerine APS yöntemi kullanılarak CoNiCrAlY içerikli metalik bağ kaplama tabakası uygun koşul ve materyaller vasıtasıyla başarılı bir şekilde üretilmiştir.
2. Üretimi gerçekleştirilen bağ kaplamaların üzerine YSZ içerikli üst seramik kaplamalar APS yöntemi uygulanarak ilk TBC sistemi elde edilmiştir. Diğer bağ kaplama numuneleri üzerine yine APS yöntemi kullanılarak ZrO_2+MgO içerikli seramik üst kaplama tabakalarının üretimi gerçekleştirilmiştir. Böylece iki farklı üst kaplamaya sahip TBC sistemleri elde edilmiştir.

3. TBC' ler herhangi bir işleme tabi tutulmadan önce, kaplamalarının porozite değerlerinin ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Değerlere bakıldığında, ZrO_2+MgO üst seramik kaplamaya sahip TBC' lerin yüzdelik porozite içeriğinin, YSZ üst seramik kaplamaya sahip TBC' lere oranla daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

4. Yüzey pürüzlülük değerleri incelendiğinde; bağ kaplamanın yüzey pürüzlülük değerinin, üst seramik kaplamalarinkinden yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra, YSZ üst kaplamaya sahip numunelerin yüzey pürüzlülük değeri, ZrO_2+MgO üst kaplamaya oranla daha yüksektir.

5. Oksidasyon testi öncesi altlık malzeme, bağ ve seramik üst kaplamaların sertlik değerlerinin ölçümü gerçekleştirilmiştir. Mesafeye bağlı olarak sertlik değerleri belirlenen TBC' lerde, tercih edilen altlık malzemenin sertliği, bağ kaplamaninkinden yüksek, üst seramik kaplamalarinkinden ise düşüktür. Seramik üst kaplamalar arasında karşılaştırma yapıldığında; YSZ üst kaplamanın sertliği, ZrO_2+MgO üst kaplamaya göre yüksektir.

6. Üretimleri tamamlanan TBC' ler 900 °C, 1000 °C ve 1100 °C sıcaklıklarda sırasıyla 8, 24, 50 ve 100 saatlik oksidasyon süreçlerinde izotermal oksidasyon testlerine tabi tutulmuştur. Oksidasyon sonrası ara yüzeyde oluşan TGO tabakasının büyüme kabiliyeti incelenerek, farklı iki üst kaplama tabakasına sahip TBC' lerde TGO kalınlıklarının değişimleri ölçülüp, karşılaştırılmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda, ZrO_2+MgO seramik üst kaplamaya sahip TBC yapılarındaki TGO büyüme kabiliyetinin, $ZrO_2+Y_2O_3$ (YSZ) seramik üst kaplamaya sahip TBC yapılarından daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

7. Oksidasyonun ilk aşamalarında Al_2O_3 içerikli TGO tabakasının üniform yapıda olduğu gözlemlenmiştir. Zaman diliminin artışı ile birlikte, farklı sıcaklıklarda meydana gelen oksidasyon sonucunda Al' nin tükenimi gerçekleşmiştir. Oksijenle reaksiyonu sonucunda alümina tabakası meydana gelmiştir. Bununla birlikte, yapıda Co, Ni, Cr elementlerinin varlığı ile NiO, Cr_2O_3 ve CoO gibi karışık oksit yapıları oluşmaya başlamıştır. Farklı iki üst kaplamaya sahip TBC' lerin 100 saatlik oksidasyon testleri sonucunda, bağ ile üst kaplama arasında Al tükeniminden kaynaklı Al_2O_3 ' ü bünyesinde bulduran TGO tabakasının varlığı söz konusudur. Karışık oksitler ise; genellikle bu tabakanın üst bölgelerinde gözlenmektedir. ZrO_2+MgO üst kaplamaya sahip TBC' ler için kritik sıcaklık olan 1100 °C' lik oksidasyonun 50 ve 100 saat dilimlerinde üst kaplamanın ayrılması nedeniyle TGO büyüme davranışları gözlenememiştir.

8. Oksidasyon testi sonrası üst seramik kaplamaların mikroyapılarında artan sıcaklık ve zaman dilimine bağlı olarak sinterleşme meydana gelerek, porozite ve boşlukların yapıda azaldığı gözlenmiştir.

9. Oksidasyon testi öncesi bağ ve üst kaplama tozlarının faz analizleri incelendiğinde; bağ kaplama tozunun Ni-Co içerikli γ -matriks ve NiAl' den oluşan β -çökelti fazlarını barındırdığı, YSZ seramik üst kaplama toz yapısının tetragonal-ZrO₂, ZrO₂+MgO seramik üst kaplama tozlarının ise; kübik-ZrO₂ ve MgO faz yapılarını içerdiği tespit edilmiştir. Oksidasyon testleri öncesi APS yöntemi kullanılarak üretimleri gerçekleştirilen YSZ üst kaplamalar, tetragonal-ZrO₂ faz kararlılığında iken; APS yöntemiyle üretilen ZrO₂+MgO üst kaplamalar, kübik-ZrO₂ faz içeriğine sahiptir. 900 °C, 1000 °C ve 1100 °C 100 saatlik oksidasyon testleri sonrası YSZ üst kaplamaların faz yapısında değişiklik olmadığı gözlemlenerek, tetragonal-ZrO₂ fazı içerdiği ispatlanmıştır. ZrO₂+MgO üst kaplamaların ise; tüm oksidasyon testleri sonrası faz yapısı değişmemiş, monoklinik-ZrO₂ fazını içerdiği kanıtlanmıştır.

Genel sonuçlar ışığında gerçekleştirilen deneysel çalışma, Inconel-718 altlık malzeme üzerine CoNiCrAlY içerikli metalik bağ kaplamanın, sonrasında ise YSZ ve ZrO₂+MgO seramik üst kaplamaların APS yönteminin uygulanmasıyla elde edilen TBC sistemleriyle gerçekleştirilmiştir. TBC sistemleri farklı sıcaklık ve zaman dilimlerinde izotermal oksidasyon testlerine tabi tutularak, TGO tabakasının oluşumu ve büyüme özellikleri incelenmiştir. İki farklı üst kaplamaya sahip TBC' lerin TGO büyüme davranışları karşılaştırılmıştır. Oksidasyon testi öncesi bağ ve üst kaplama tozlarının XRD analizlerinden yola çıkılarak, faz yapıları tespit edilmiştir. 100 saatlik oksidasyon testleri sonrası farklı iki üst kaplamaya sahip TBC' lerin XRD analizleri incelenerek, birbirleriyle karşılaştırmalar yapılmıştır. Elde edilen veriler ve bulgular literatürde yapılan çalışmalar değerlendirilerek karşılaştırmalı olarak yorumlanmıştır.

5.2 Öneriler

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

1. Üst kaplamaların üretiminde APS yönteminden farklı olarak EB-PVD tekniğinin kullanılarak, üretilen TBC sistemlerinin oksidasyon koşullarında seramik katman ile

bağlayıcı katman ara yüzeyinde meydana gelen TGO tabakasının büyüme davranışlarının ve mekanik özellik değişimlerinin karşılaştırılması,

2. Aynı sıcaklık ve zaman dilimlerinde oksidasyon testlerine tabi tutulan TBC sistemlerinin aynı zamanda sıcak korozyon ve termal şok testlerinin gerçekleştirilerek sonrasında mikroyapı değişimleri ile faz yapılarının incelenmesi ve hasar mekanizmaların değerlendirilmesi,

3. Bağ ve üst kaplama üretiminde kullanılan tozların bileşimi, boyutu ve üretimi esnasında uygulanan parametre ve yöntemlerin optimizasyon çalışmalarının gerçekleştirilerek oksidasyon sonrası TGO tabakasının büyüme davranışlarının irdelenmesi,

4. YSZ ve ZrO_2+MgO seramik üst kaplama tozları yerine farklı seramik üst kaplama tabakalarına sahip ve bağ kaplamanın üretiminde HVOF ve diğer termal spreycaplama yöntemlerinin uygulanarak TBC sistemlerinin üretilmesi, üretilen TBC sistemlerinin oksidasyon koşulları sonrasında mikroyapı morfolojisinin incelenmesi ile TGO tabakasının büyüme davranışlarının kıyaslanması, ileride gerçekleştirilecek olası çalışmalar için önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Aksoy T. ve Aksel C. (2009). ZrO₂-Y₂O₃ ilaveli MgO-MgAl₂O₄ kompozit refrakterlerin mekanik özelliklerinin ve mikroyapısal karakteristiklerinin incelenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, Özel Sayı, 161-169.
- Alperine S., Derrien M., Jaslier Y. ve Mevrel R. (1997). Thermal barrier coatings: the thermal conductivity challenge. *AGARD SMP Meeting on "Thermal Barrier Coatings"*, Denmark, R-823, 10 s.
- Altuncu E., Üstel F. ve Erdoğan G. (2007). Sıcak korozyon ortamının plazma sprey tekniği ile üretilmiş termal bariyer kaplamalar üzerine etkisi. Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli; Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye, 9 s.
- Ank S. (1993). *Kaynak Teknolojileri El Kitabı*. Gedik Holding Yayınları: Ergör Matbaası, İstanbul, 269-286 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*. John Wiley&Sons: CESP, 27 (3): 69-80.
- AWS Committee on Thermal Spraying. (1997). *Thermal Spraying Practice, Theory and Application*. American Welding Society, INC, Florida, 184 s.
- Bengi T. (2009). Termal Bariyer Kaplamaların Isıl Özelliklerinin İncelenmesi ve Düşük Termal İletkenlik İçin Parametre Optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İleri Teknolojiler Anabilim Dalı, İstanbul, 59 s.
- Bose S. (2007). *High Temperature Coatings*. Butterworth-Heinemann: Elsevier Burlington, 300 s.
- Boyras T. ve Addemir O. (2010). Sıcak şekillendirilmiş ZrO₂ seramiklerde bağlayıcı giderme ve karakterizasyon. *İTÜ Mühendislik Dergisi*, 9 (2): 147-154.
- Bultan Ö., Öngül D. ve Türkoğlu P. (2010). Zirkonyanın mikroyapılarına ve üretim şekillerine göre sınıflandırılması. *İstanbul Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Dergisi*, 44 (2): 197-204.
- Das S., Mitra N. K. ve Das S. (2012). Sintered properties and sintering behavior of MgO-ZrO₂ composite hydrogel prepared by coprecipitation technique. *Science of Sintering*, 44: 35-45.
- Davis J. R. (2004). *Handbook of Thermal Spray Technology*. ASM International: Ohio, 338 s.
- Dalkılıç S. ve Tanatmış A. A. (2009). Termal bariyer kaplama sistemlerinde yüksek sıcaklıkta düşük çevrimli yorulma şartları altında oluşan hasarların incelenmesi. *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, 4 (2): 15-27.

- Demir A. (2009). Fren Disklerine Uygulanan Kaplamaların Frenleme Performansına Etkisinin Deneysel İncelenmesi. Doktora tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Kocaeli, 98 s.
- Dorfman M. R. (2012). *Thermal Spray Coatings in Handbook of Environmental Degradation of Materials*. Elsevier: New York, 298 s.
- Döleker K. M. (2014). Bilyalı Dövme İşleminin Termal Bariyer Kaplamaların Oksidasyon Davranışı Üzerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Bartın, 94 s.
- Erkmen Z. E. ve Taşdıvar D. (2006). İçten yanmalı motorların termal bariyer kaplanması. Marmara Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, *Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 16: 119-127.
- Eliaz N., Shemesh G. ve Latanision R. M. (2000). Hot corrosion in gas turbine components. *Engineering Failure Analysis*, 9: 31-43.
- Fauchais P. (2004). Understanding plasma spraying. *Journal of Applied Physics D: Applied Physics*, 37: 86-108.
- Guo H. B., Vaßen R. ve Stöver D. (2004). Atmospheric plasma sprayed thick thermal barrier coatings with high segmentation crack density. *Surface and Coatings Technology*, 186 (3): 353-363.
- Gürbüz H. ve Gökaya H. (2013). Termal bariyer kaplamanın motor yakıt sarfiyatı egzoz sıcaklığı ve emisyonlara etkilerinin deneysel olarak incelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20 (1): 15-19.
- Hazar H. ve Öner C. (2004). Dizel motorlarında termal bariyer kaplamanın egzoz emisyonlarına etkisi. Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Makine Eğitimi Bölümü, Elazığ, 48-51 s.
- Hill M. D., Phelps D. P. ve Wolfe D. E. (2008). *Progress in Thermal Barrier Coatings: Corrosion Resistant Thermal Barrier Coating Materials for Industrial Gas Turbine Applications*. John Wiley&Sons: CESP, 29 (4): 123-132.
- Islak S. ve Buytoz S. (2011). Microstructure properties of ZrO_2/Al_2O_3 - %13 TiO_2 composite coating produced with plasma spray method on AISI 304 stainless steel. *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS '11)*, Elazığ, s 12.
- İçingür Y. ve Eray E. (2008). Seramik kaplama kalınlığının ısı iletim katsayısına etkisi. *10. Uluslararası Yanma Senpozyumu*, Sakarya, s 12.
- Jiang S. M., Peng X., Bao Z. B., Liu S. C., Wang Q. M., Gong J. ve Sun C. (2008). Preparation and hot corrosion behaviour of a MCrAlY+AlSiY composite coating. *Elsevier Corrosion Science*, 50: 3213-3220.
- Jones R. L. (1997). *Some Aspects of the Hot Corrosion of Thermal Barrier Coatings*. Journey of Thermal Spray Technology, ASM International, 6: 77-84.

- Kahraman N. (2000). Toz Alev Spreyleme Yöntemiyle Kaplanan Numunelerde Kaplama Parametrelerinin Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi (yayınlanmamış), Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Anabilim Dalı, Ankara, 86 s.
- Karaoğlanlı A. C., Altuncu E., Özdemir İ., Türk A. ve Üstel F. (2011). Structure and durability evaluation of YSZ+Al₂O₃ composite TBCs with APS and HVOF bond coats under thermal cycling conditions. *Surface and Coatings Technology*, 205 (2): 369-373.
- Karaoğlanlı A. C., Türk A. ve Özdemir İ. (2013). Seramik esaslı plazma spreyleme kaplamalarının oksidasyon davranışlarının incelenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 401-405.
- Karaoğlanlı A. C., Türk A. ve Üstel F. (2013). Soğuk gaz dinamik spreyleme (CGDS) kaplama teknolojisi ve uygulamaları. *APJES*, 1 (1): 20-27.
- Kaßner H., Stuke A., Rödig M., Vaßen R. ve Stöver D. (2008). *Progress in Thermal Barrier Coatings: Influence of Porosity on Thermal Conductivity and Sintering in Suspension Plasma Sprayed Thermal Barrier Coatings*. John Wiley&Sons: CESP, 29 (4): 147-158.
- Keyvani A. (2015). Microstructural stability oxidation and hot corrosion resistance of nanostructured Al₂O₃/YSZ composite compared to conventional YSZ TBC coatings. *Journal of Alloys and Compounds*, 623: 229-237.
- Kıratlı N., Yetkin S. H. ve Çoğur T. (2009). Investigation of the wear and hardness behaviour of aluminium alloy coated using the powder flame spraying method. Pamukkale Üniversitesi, *Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15 (3): 441-446.
- Kırmalı Ö. ve Özdemir A. K. (2012). Zirkonya esaslı seramikler. İnönü Üniversitesi, *Sağlık Bilimleri Dergisi*, 2: 15-18.
- Koroğlu V. (2013). Refrakter Üretimine Yönelik Olarak Zirkonya Stabilizasyon Çalışmaları. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 99 s.
- Kulkarni A. ve Herman H. (2004). *Progress in Thermal Barrier Coatings: Industrial TBCs*. John Wiley&Sons: CESP, 83 (6): 9801-9804.
- Kurbanoğlu C. ve Özkavak Varol H. (2013). Atmosferik ve vakum şartlarında plazma kaplama deney düzeneğinin tasarlanması. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 10 (2): 27-36.
- Kurt C. (2001). Toz Püskürtme Yönteminde Bronz Kaplanmış Çelik Malzemelerde Kaplama Ara Yüzeylerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi (yayınlanmamış), Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Anabilim Dalı, Ankara, 51 s.
- Ma K. ve Schoenung J. M. (2011). Isothermal oxidation behavior of cryomilled NiCrAlY bond coat: Homogeneity and growth rate of TGO. *Surface and Coating Technology*, 205: 5178-5185.

- Mingheng L., Dan S. ve Panagiotis D. C. (2005). Modelling and control of HVOF thermal spray processing of WC-Co coatings. Department of Chemical Engineering, University of California, Los Angeles, 177-194 s.
- Minisker M. A. (2009). Termal Sprey Yöntemiyle Oluşturulan Kaplamaların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İleri Teknolojiler Anabilim Dalı, İstanbul, 73 s.
- Mobarra R., Jafari A. H. ve Karaminezhad M. (2006). Hot corrosion behavior of MCrAlY coatings on IN738LC. *Surface & Coatings Technology*, 201: 2202-2207.
- Nilüfer İ. N., Gökçe H., Çimenoğlu H. ve Öveçoğlu L. (2014). Seryumdioksit ilavesinin zirkonyumdioksit özelliklerine etkisinin incelenmesi. *Mühendis ve Makine Dergisi*, 55 (652): 30-33.
- Parlakyiğit A. S., Karaoğlanlı A. C., Gülmez T. ve Türk A. (2013). YSZ içerikli seramik üst ve NiCrAlY içerikli metalik bağ kaplamaya sahip termal bariyer kaplama (TBC) sisteminin mikroyapısal özelliklerinin incelenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 331-334 s.
- Pawlowski L. (2008). *The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings: Second Edition*. John Wiley&Sons: Chichester, 626 s.
- Richer P., Yandouzi M., Beauvais L. ve Jodoin B. (2010). Oxidation behaviour of CoNiCrAlY bond coats produced by plasma, HVOF and cold gas dynamic spraying. *Surface and Coatings Technology*, 204 (24): 3962-3974.
- Robotti P. ve Zappini G. (2012). "Chapter 9 - Thermal Plasma Spray Deposition of Titanium and Hydroxyapatite on Polyarylether ether ketone Implants," in *PEEK Biomaterials Handbook*, Oxford: William Andrew Publishing, 119-143 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.
- 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, 398-403 s.
- Schneider K. E., Belashchenko V., Dratwinski M., Siegmann S. ve Zagorski A. (2006). *Thermal Spraying for Power Generation Components*, Germany, 271 s.
- Schulz U., Saint-Ramond B., Lavigne O., Moretto P., Vanlieshcut A. ve Borger A. (2004). *Progress in Thermal Barrier Coatings: Low Thermal Conductivity Ceramics for Turbine Blade Thermal Barrier Coating Application*. John Wiley&Sons: CESP, 25 (4): 375-380.
- Singh B. K. (2007). Processing & Characterization of Stabilized Zirconia Using Dolomite. National Institute of Technology Rourkela, Department of Ceramic Engineering, 31 s.

- Soykan H. Ş. ve Karakaş Y. (2001). MgO ile kısmen stabilize edilmiş ZrO₂' de X-ışınları difraksiyon yöntemiyle kantitatif faz analizi. *Turk J Engin Environ Sci* 25: 191-197.
- 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.
- Tucker R. C. (2004). *ASM Handbook Volume 5 Surface Engineering*. ASM International: Ohio, 338 s.
- URL-1 (2015). http://www.tungsten-powder.com/Molten_Metal_Flame_Spray.html, (1 Nisan 2015).
- URL-2 (2015). <http://www.ytmk.sakarya.edu.tr/yuzey.html>, (2 Nisan 2015)
- URL-4 (2015). <http://www.senkronyuzey.com/hvof.html>, (2 Nisan 2015).
- URL-5 (2015). http://en.wikipedia.org/wiki/Gas_turbine, (28 Mayıs 2015).
- Xu H, Guo H. (2011). *Thermal barrier coatings*. Woodhead Publishing: Cambridge, 339 s.
- Yeşildal R. ve Günay Y. Z. (2007). The coating with plazma spray method and research of spray characteristics. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, *Fen ve Mühendislik Dergisi*, 9 (1): 59-76.
- Yılmaz D. (2011). Yüksek Enerjili Öğütme Sistemleri ile YSZ Tozlarının Sentezi ve Polimer/YSZ Sistemlerinin Piroлиз Sonrası Davranışlarının İncelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İleri Teknolojiler Anabilim Dalı, İstanbul, 78 s.
- Young D. J. (2008). *High temperature oxidation and corrosion of metals: Volume 1 Corrosion series*. Elsevier: The Netherlands, 574 s.
- Zhang Q., Li C.-J., Li C.-X., Yang G.-J. ve Lui S.-C. (2008). Study of oxidation behavior of nanostructured NiCrAlY bond coatings deposited by cold spraying. *Surface and Coatings Technology*, 202: 3378-3384.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Nihal MEŞEKİRAN
Doğum Yeri ve Tarihi : SAMSUN / 10.05.1990

Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi : Bartın Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği (2009-2013)
Yüksek Lisans Öğrenimi : Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği (2013-2015)
Bildiği Yabancı Diller : İngilizce (İyi Derecede)
Bilimsel Faaliyet/Yayımlar : -
Aldığı Ödüller : Bartın Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Fakülte ve Bölüm 3.' lüğü

İş Deneyimi

Stajlar : Yeşilyurt Demir Çelik Fabrikası (Samsun, 2011)
DSİ 7. Bölge Müdürlüğü (Samsun, 2012)
Projeler ve Kurs Belgeleri : ISO 9001: 2008 Kalite Yönetim Sistemi
ISO 14001: 2004 Çevre Yönetim Sistemi
OHSAS 18001: 2007 İş Sağlığı ve İş Güvenliği Standardı
LPG Sorumlu Müdür Sertifikası
Çalıştığı Kurumlar : Doğa Mühendislik Doğalgaz Isıtma Soğutma Sistemleri (Ocak 2014-Mart 2014)
ANTESAN LTD. ŞTİ. (Haziran 2014-Eylül 2014)

İletişim

E-Posta Adresi : nihalmesekiran@gmail.com
Tarih : 28.08.2015 (Tez Sınav Tarihi)

