



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

METALÜRJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MANGAN CÜRUFU İÇERİĞİNE SAHİP KAPLAMALARIN
OKSİDASYON VE SICAK KOROZYON DAVRANIŞLARININ
İNCELENMESİ

ELİF OLGUN

DANIŞMAN

PROF. DR. ABDULLAH CAHİT KARAOĞLANLI

BARTIN-2024



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**MANGAN CÜRUFU İÇERİĞİNE SAHİP KAPLAMALARIN OKSİDASYON VE
SICAK KOROZYON DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELİF OLGUN

JÜRİ ÜYELERİ

Danışman :

Üye :

Üye :

BARTIN-2024

KABUL VE ONAY

Elif OLGUN tarafından hazırlanan “MANGAN CÜRUFU İÇERİĞİNE SAHİP KAPLAMALARININ OKSİDASYON VE SICAK KOROZYON DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ” başlıklı bu çalışma, 03.06.2024 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak jürimiz tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan :

Üye :

Üye :

Bu tezin kabulü Lisansüstü Eğitimi Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/...../20... tarih ve 20...../.....-..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mustafa Sabri GÖK
Enstitü Müdürü

BEYANNAME

Bartın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Prof. Dr. Abdullah Cahit KARAOĞLANLI danışmanlığında hazırlamış olduğum “MANGAN CÜRUFU İÇERİĞİNE SAHİP KAPLAMALARININ OKSİDASYON VE SICAK KOROZYON DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ” başlıklı yüksek lisans tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

03.06.2024

Elif OLGUN

ÖN SÖZ

Tez çalışmam sırasında bilgi birikimini benimle paylaşan, bana yol gösteren ve her zaman bana destek olan değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Abdullah Cahit KARAOĞLANLI'ya en derin saygılarımla teşekkür ederim. Tez çalışma sürem içerisinde her zaman destek olan Sayın Doç. Dr. Derviş ÖZKAN, Sayın Doç. Dr. Gülfem BİNAL, Sayın Doç. Dr. Yasin ÖZGÜRLÜK, merhum Dr. Öğr. Üyesi Ahmet GÜLEÇ, Dr. Öğr. Üyesi Mustafa KAPLAN' a ve Sayın Dr.Okan ODABAŞ' a teşekkür ederim. Bu süre de her zaman yanımda olan aileme saygılarımla teşekkürlerimi beyan etmek isterim.

Elif OLGUN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

MANGAN CÜRUFU İÇERİĞİNE SAHİP KAPLAMALARININ OKSİDASYON VE SICAK KOROZYON DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Elif OLGUN

Bartın Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Abdullah Cahit KARAOĞLANLI

Bartın-2024, sayfa: 115

Metal üretiminde atık ürün olarak ortaya çıkan cüruf, işlenmiş metal cevherinin eritilmesi sırasında yüzeyde oluşan ve çoğunlukla oksitlerden oluşan tortu veya artık malzemedir. Bu cüruf, metal üretiminde bir yan ürün olarak değerlendirilir ve genellikle geri dönüşüm işlemlerinde kullanılır. Genel olarak, cürufun geri dönüşümü hem çevresel hem de ekonomik açıdan önemlidir. Atık cürufların geri kazanılması, hammadde tüketimini azaltır, enerji tasarrufu sağlar ve çevresel etkiyi azaltır. Bu nedenle, metal endüstrisinde cürufun etkin bir şekilde yönetilmesi ve geri dönüşümü büyük önem taşır. Cürufun; mekanik özellikleri, içerdiği değerli elementler ve endüstride ciddi miktarda açığa çıkması sebebiyle çevre kirliliği göz önüne alındığında, yüksek sıcaklık uygulama alanlarında kullanımı için alternatif adaydır. Ayrıca cüruf malzeme yüksek sıcaklık dayanımı, ısı yalıtımı, hafiflik, dayanıklılık ve mukavemet gibi avantajlar sağlar. Bu özellikler sayesinde havacılık ve uzay sanayisi başta olmak üzere birçok sanayi sektöründe verimlilik ve performansı arttırmak için kullanılan termal bariyer kaplamaların üretiminde de üst kaplama malzemesi olarak cüruf malzemeler son yıllarda kullanılmaya başlanmıştır.

Bu çalışmada, 25,4 mm çapında 5 mm kalınlığa sahip Nikel esaslı Inconel 718 süper alaşım malzemeler üzerine yüksek hızlı oksit yakıt (HVOF) tekniği kullanılarak CoNiCrAlY içeriğine sahip metalik esaslı bağ kaplamalar üretilmiştir. Metalik esaslı CoNiCrAlY bağ kaplamaların üzerine ise mangan üretimi esnasında ortaya çıkan oksit içeriğine sahip mangan cürufu atmosferik plazma sprej (APS) kaplama yöntemi kullanılarak termal bariyer kaplamalar (TBC) sistemi elde edilmiştir. Üretilen TBC sistemleri 600° C’de 5, 25, 50 ve 100 saat süresince izotermal oksidasyon testlerine tabi tutulmuştur. TBC sisteminin sıcak korozyon testleri ise 600° C’de 1, 3, 5 ve 10 saatlik süreçlerde gerçekleştirilmiştir. TBC sistemlerinin oksidasyon ve sıcak korozyon testleri öncesi ve sonrasında hasar mekanizmalarının oluşumunu, yapısal ve mikroyapısal değişim süreçlerini belirleyebilmek amacıyla X-ışını difraktometresi (XRD) analizleri, taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri, enerji dağılımlı spektrometre elemental haritalama (EDS) analizleri, porozite ve sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Geleneksel TBC sistemlerinde kullanılan metalik ve seramik kaplama malzemelerine göre üst seramik kaplama yapısında Mangan cürufunun kullanılarak atık bir ürün olan malzemenin termal sprej kaplama gibi bir yüzey mühendisliği yönteminde kullanılabilirliği sağlanmıştır. Başarılı bir şekilde Mangan cürufu kullanılarak üretilen TBC sisteminin en oksidasyon ve sıcak korozyon hasar oluşum süreçleri değerlendirilmiştir. Belirlenen sıcaklık ve zaman süreçlerinde Mangan cürufu içeriğine sahip TBC sisteminin yapısal olarak bozulmadan dayanımını koruduğu ve alternatif endüstriyel uygulamalarda kullanılabilir niteliğe sahip olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Atmosferik Plazma Sprej (APS), CoNiCrAlY, Mangan Cürufu, Oksidasyon, Sıcak korozyon, Termal bariyer kaplamalar (TBC), Termal sprej kaplamalar, Termal bariyer kaplamalar (TBC), Termal sprej kaplamalar, Yüksek Hızlı Oksit Yakıt (HVOF)

Bilim Alanı Kodu: 91510, 91513

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

INVESTIGATION OF OXIDATION AND HOT CORROSION BEHAVIOR OF COATINGS WITH MANGANESE SLAG CONTENT

Elif OLGUN

Bartın University

Graduate School

Department of Metallurgical and Materials Engineering

Thesis Advisor: Prof. Dr. Abdullah Cahit KARAOĞLANLI

Bartın-2024, pp: 115

Slag, a waste product of metal production, is the residue or residual material, mostly oxides, that forms on the surface during the smelting of processed metal ore. This slag is treated as a by-product of metal production and is often used in recycling processes. In general, slag recycling is both environmentally and economically important. Recovering waste slag reduces raw material consumption, saves energy and reduces environmental impact. Therefore, the effective management and recycling of slag in the metal industry is of great importance. Slag is an alternative candidate for use in high temperature application areas, considering its mechanical properties, the valuable elements it contains and environmental pollution due to its significant amount of release in the industry. In addition, slag material provides advantages such as high temperature resistance, thermal insulation, lightness, durability and strength. Thanks to these properties, slag materials have started to be used as top coating material in the production of thermal barrier coatings used to increase productivity and performance in many industrial sectors, especially in the aerospace industry.

In this study, metallic based bond coatings with CoNiCrAlY content were produced on nickel based Inconel 718 super alloy materials with a diameter of 25.4 mm and a thickness of 5 mm using high velocity oxy fuel (HVOF) technique. Thermal barrier coatings (TBC) system was obtained by using atmospheric plasma spray (APS) coating method of manganese slag with oxide content produced during manganese production on metallic based CoNiCrAlY bond coatings. The produced TBC systems were subjected to isothermal oxidation tests at 600°C for 5, 25, 50 and 100 hours. X-ray diffractometer (XRD) analyses, scanning electron microscopy (SEM) analyses, energy dispersive spectrometer elemental mapping (EDS) analyses, porosity and hardness measurements were performed to determine the formation of damage mechanisms, structural and microstructural change processes before and after oxidation and hot corrosion tests of TBC systems. Compared to the metallic and ceramic coating materials used in conventional TBC systems, the use of Manganese slag in the upper ceramic coating structure has enabled the use of a waste product material in a surface engineering method such as thermal spray coating. The oxidation and hot corrosion damage formation processes of the TBC system successfully produced using Manganese slag were evaluated. It has been observed that the TBC system with Manganese slag content maintains its strength without structural degradation at the specified temperature and time processes and can be used in alternative industrial applications.

Keywords: Atmospheric Plasma Spray (APS), CoNiCrAlY, High Velocity Oxy Fuel (HVOF), Hot corrosion, Manganese Slag, Oxidation, Atmospheric Plasma Spray (APS), CoNiCrAlY, High Velocity Oxy Fuel (HVOF), Hot corrosion, Manganese Slag, Oxidation, Thermal barrier coatings (TBC), Thermal barrier coatings (TBC), Thermal spray coatings

Scientific Field Code: 91510, 91513

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY.....	ii
BEYANNAME	iii
ÖNSÖZ	iv
ABSTRACT	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
TABLolar DİZİNİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xv
KISALTMALAR.....	xvii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	4
2.1 Termal Sprey Kaplamalar	4
2.1.1 Termal Sprey Kaplama Yöntemleri	7
2.1.1.2 Plazma Sprey Kaplama Yöntemi	9
2.1.1.3 Yüksek Hızlı Oksi Yakıt (HVOF) Kaplama Yöntemi.....	14
2.1.1.4 Soğuk Gaz Dinamik Sprey (CGDS) Kaplama Yöntemi	16
2.1.1.5 Detanasyon Tabancasıyla (D-gun) Kaplama Yöntemi.....	17
2.2 Termal Bariyer Kaplamalar (TBCs).....	18
2.2.1 TBC'lere Genel Bakış	19
2.2.2 TBC Sisteminin Bileşenleri.....	21
2.2.2.1 Altlık Malzemeler	21
2.2.2.2 Metalik Bağ Kaplamalar	22
2.2.2.3 Üst Kaplamalar.....	23
2.2.2.4 Termal Olarak Büyüyen Oksit (TGO) Tabakası	28
2.3 TBC Sistemlerinde Görülen Hasar Mekanizmaları	29
2.3.1 Oksidasyon Hasarı	30
2.3.2 Sıcak Korozyon Hasar Mekanizmaları.....	33
2.3.2.1 Yüksek Sıcaklık Sıcak Korozyonu (Tip I Sıcak Korozyon)	36
2.3.2.2 Düşük Sıcaklık Sıcak Korozyonu (Tip II Sıcak Korozyon).....	36
2.3.3 Termal Şok/Çevrim Hasarı	36

2.3.4 (CaO, MgO, Al ₂ O ₃ , SiO ₂) CMAS Hasarı	37
2.3.5 Katı Partiküllerin Oluşturduğu Erozyon Hasarları	39
2.4 Cüruflar	41
2.4.2 Endüstriyel Atık Olarak Açığa Çıkan Cüruf Çeşitleri.....	41
2.4.2.1 Yüksek Fırın ve Çelikhane Cürufları.....	42
2.4.2.2 Ferrokrom (FeCr) Cürufları.....	44
2.4.2.3 Mangan Esaslı Cüruflar	46
2.4.4 Cürufların Kullanım Alanları.....	48
3. MATERYAL VE METOT	52
3.1 Amaç	52
3.2 Altlık Malzemenin Karakterizasyonu.....	54
3.2.1 Altlık Malzemenin Kimyasal Kompozisyonu ve Mekanik Özellikleri	55
3.3 Toz ve Bağ Kaplama Karakterizasyonu	56
3.4 Mangan Cürufuna Ait Üst Kaplama Tozunun ve TBC Sisteminin Karakterizasyonu.....	60
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	65
4.1 Bulgular	65
4.1.1 Mangan Cürufu İçeriğine Sahip TBC Sisteminin İzotermal Oksidasyon Davranışları	65
4.1.1.1 Mangan Cürufu İçeriğine Sahip TBC Sisteminin 600°C’de İzotermal Oksidasyon Davranışlarının İncelenmesi.....	65
4.1.2 Mangan Cürufu İçeriğine Sahip TBC Sisteminin İzotermal Sıcak Korozyon Davranışları.....	73
4.1.2.1 Mangan Cürufu İçeriğine Sahip TBC Sisteminin 600°C’de İzotermal Sıcak Korozyon Davranışlarının İncelenmesi	73
4.2 Tartışma.....	80
4.2.1 Oksidasyon Testleri Sonrasında Mangan Cürufu Esaslı TBC Sisteminin Özelliklerinin Literatür ile Tartışılması.....	80
4.2.2 Sıcak Korozyon Testleri Sonrasında Mangan Cürufu Esaslı TBC Sisteminin Özelliklerinin Literatür ile Tartışılması.....	85
5.SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	91
5.1 Sonuçlar	91
5.2 Öneriler.....	92

KAYNAKLAR.....	93
ÖZGEÇMİŞ	115



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Sayfa No
1.1: Gaz türbin motoru	2
2.1: Termal sprey kaplamanın şematik görünümü	5
2.2: TBC'lerin üretiminde kullanılan termal sprey kaplama yöntemleri	8
2.3: Plazma tabancasının kesiti	10
2.4: Plazma sprey tabancası iç şeması ve prosedürü	11
2.5: APS yöntemi ile kaplama prosesi	12
2.6: VPS tabancası iç şeması ve prosedürü	13
2.7: CoNiCrAlY içeriğine sahip bağ kaplamanın (a) APS, (b) VPS üretim yöntemlerine ait mikro yapı görüntüleri	14
2.8: HVOF kaplama yönteminin gösterimi	15
2.9: HVOF yöntemiyle üretilen bağ kaplama	16
2.10: CGDS yönteminin şematik gösterimi	17
2.11: D-Gun prosesi	18
2.12: APS yöntemiyle üretilen tipik bir TBC sisteminin şematik görünümü.	19
2.13: TBC sistemine ait ısı geçiş gradyanı	20
2.14: Y_2O_3 sistemine ait faz diyagramı	25
2.15: Al_2O_3 'ün sıcaklığa bağlı polimorfik dönüşümü	29
2.16: CMAS toz partiküllerinin türbin kanadındaki hasarı	30
2.17: Ellingham diyagramı	32
2.18: EB-PVD yöntemi ile üst kaplama malzemesi üretilen sıcak korozyon hasarına uğramış TBC numunesine ait sıcak enine kesit görüntüsü	35
2.19: CMAS (Kalsiyum, Magnezyum, Alüminyum ve Silikat) hasarı	38
2.20: Katı partikül erozyon hasarına uğramış gaz türbin kanadı.....	40
2.21: FeCr cürufu tozuna ait SEM görüntüsü	45
2.22: Mangan cevheri görüntüsü	48
3.1: Protherm marka izotermal oksidasyon ve sıcak korozyon deneylerinin gerçekleştirildiği yüksek sıcaklık fırını.	53
3.2: QNESS marka vickers sertlik ölçüm cihazı.	53
3.3: Metcon Forcipol IV marka zımparalama ve parlatma işleminin cihazı.	54

3.4: Tel erozyon yöntemiyle üretilen nikel esaslı Inconel 718 süper alaşım altlık malzemenin şematik görünümü.	55
3.5: CoNiCrAlY bağ kaplama tozuna ait partikül boyut dağılım analizi.	57
3.6: CoNiCrAlY bağ kaplama tozuna ait SEM, EDS ve elementel haritalama analizi.	58
3.7: CoNiCrAlY bağ kaplamaya ait XRD analizi.	59
3.8: Mangan cürufu üst kaplama tozuna ait partikül boyut dağılım analizi.	62
3.9: Mn cürufuna ait; (a) üst yüzey SEM görüntüsü, (b) yüksek büyütmede alınan SEM görüntüsü ve EDS analizi, (c) XRD analizi.	62
3.10: Kaplanmış numunesine ait; (a)SEM ara yüzey kesit görüntüsü, (b)elementel haritalama analizi ve (c)XRD analizi.	64
4.1: 600°C’de gerçekleştirilen izotermal oksidasyon deneyi sonrası Mangan cürufu TBC sistemine ait SEM ara yüzey kesit görüntüsü.	84
4.2: 600°C ‘de, 100 saat deney süresi ile gerçekleştirilen izotermal oksidasyon sonrası Mangan cüruf esaslı TBC sistemine ait elementel haritalama analizi	68
4.3: 600°C izotermal oksidasyon sonrası Mangan cüruf esaslı TBC sistemine ait XRD analizi.	69
4.4: APS yöntemi ile kaplanan Mangan cüruf esaslı numunenin 600°C’de gerçekleştirilen oksidasyon deneyi öncesi ve sonrasındaki sertlik ölçümleri.	71
4.5: APS yöntemi ile kaplanan numunenin oksidasyon deneyi öncesi ve sonrası porozite ölçümleri.	72
4.6: 600°C’de gerçekleştirilen sıcak korozyon testine ait; (a) korozyon öncesi, (b) 5 saat korozyon deneyi sonrası SEM ara yüzey kenar görüntüsü.	74
4.7: 600°C’de, sırasıyla 1 saat, 3 saat, 5 saat ve 10 saat yapılan düşük sıcaklık sıcak korozyon deney sonrası numunenin SEM üst yüzey görüntüsü.	75
4.8: 600°C’de, 1 saat deney süresiyle gerçekleştirilen sıcak korozyon sonrası üst yüzey EDS görüntüsü.	76
4.9: 600°C’de, sırasıyla 1 saat, 3 saat, 5 saat ve 10 saat süreleri ile gerçekleştirilen düşük sıcaklık sıcak korozyon deneyi öncesi (kaplanan) ve sonrası Mangan cüruf esaslı TBC sistemine ait XRD analizi.	77
4.10: 600°C’de, 10 saat deney süresiyle gerçekleştirilen sıcak korozyon sonrası Mangan cüruf esaslı TBC sistemine ait kenar görüntüsü.	79

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo	Sayfa
No	No
2.1: Termal sprey kaplamaların endüstri de kullanım oranları.	6
2.2: TBC üretim yöntemlerine ait işlem sıcaklığı ve partikül hızları.....	9
2.3: Yüksek fırın cürufunun içerisinde bulunan kimyasal bileşiklerin ağırlıkça bulunan yüzde (%) oranları.....	43
2.4: Bazik oksijen fırın (BAF)cürufları ve Elektrik ark ocağı fırın (EAF) cüruflarının kimyasal kompozisyonu (%).....	44
2.5: Ferrokrom cürufu üretiminin ülkelere göre dağılımı (%)	46
2.6: Ferrokrom cürufuna ait kimyasal kompozisyon (%).....	46
3.1: Ni esaslı süper alaşım olan Inconel 718'in oda sıcaklığındaki mekanik ve fiziksel özellikleri.....	55
3.2: Ni esaslı süper alaşım olan Inconel 718'in elemen içeriğinin ağırlıkça oranı(%)	56
3.3: HVOF ile bağ kaplama üretim yöntemine bağlı parametreler.	60
3.4: APS yöntemiyle üst kaplama üretiminin bağlı olduğu parametreler.	61
3.5: Mangan cürufuna ait toz XRF analizi.	61
4.1: 5 saat, 25 saat, 50 saat ve 100 saatlik 600°C' de oksidasyon deneyi sonrası Mangan cüruf esaslı numunelerin sertlik değerleri ve tolerans aralıkları.	71
4.2: APS yöntemi ile kaplanan numunenin oksidasyon deneyi sonrası Mangan cüruf esaslı numunelerin porozite ölçümleri ve referans aralıkları.	71

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Al	: Alüminyum
Ar	: Argon
B	: Bor
Ba	: Baryum
C	: Karbon
c	: Kübik
Ce	: Seryum
cm	: Santimetre
Co	: Kobalt
Cr	: Krom
Cu	: Bakır
GPa	: Gigapascal
Gd	: Gadolinyum
H	: Hidrojen
He	: Helyum
Hf	: Hafniyum
K	: Kelvin
kH	: Kiloherzt
kW	: Kilowatt
La	: Lantanyum
m	: Monoklinik
mb	: Milibar
Mg	: Magnezyum
mHz	: Miliherzt
mm	: Milimetre
Mn	: Mangan
Mo	: Molibden
MPa	: Megapascal
m/s	: Metre/saniye
N	: Azot

Nb	: Niyobyum
O	: Oksijen
P	: Fosfor
Pa	: Pascal
Pt	: Platinyum
S	: Kükürt
s	: Saniye
Slpm	: Standart litre/dakika
Sn	: Kalay
Si	: Silisyum
Ti	: Titanyum
W	: Tungsten
Y	: Yitriyum
Yb	: İterbiyum
Zr	: Zirkonyum
γ	: Gama Fazı
β	: Beta Fazı
θ	: Teta Fazı
α	: Alfa Fazı
δ	: Delta Fazı
°C	: Santigrat Derece (Celcius)

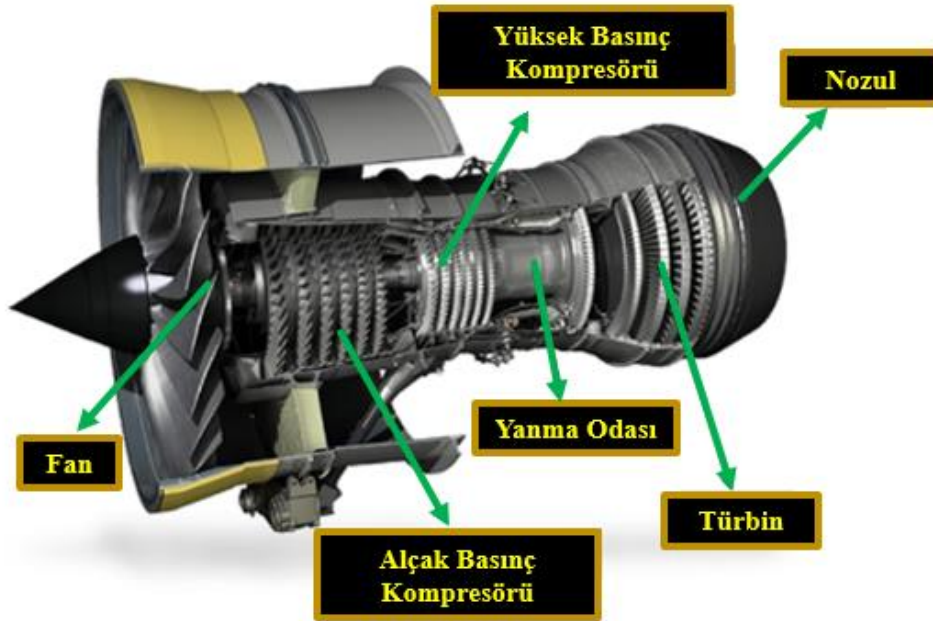
KISALTMALAR

APS	: Atmosferik Plazma Sprey
CGDS	: Soğuk Gaz Dinamik Sprey
CMAS	: CaO-MgO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂
CVD	: Kimyasal Buhar Biriktirme
D-GUN	: Detonasyon Tabancası
EDS	: Enerji Dağılımı X-Işını Spektroskopisi
EB-PVD	: Elektron Işını-Fiziksel Buhar Biriktirme
GZ	: Gadolinyum Zirkonat (Gd ₂ Zr ₂ O ₇)
HVOF	: Yüksek Hızda Oksi Yakıt Püskürtme
LPPS	: Düşük Basıncılı Plazma Sprey
LZ	: Lantanyum Zirkonat (La ₂ Zr ₂ O ₇)
PS	: Plazma Sprey
PS-PVD	: Plazma Sprey-Fiziksel Buhar Biriktirme
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
TBC	: Termal Bariyer Kaplama
TGO	: Isıl Olarak Büyüyen Oksit Tabakası
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
VPS	: Vakum Plazma Sprey
YMK	: Yüzey Merkezli Kübik
YSZ	: Yitriya ile Stabilize Edilmiş Zirkonya
XRD	: X-ışını difraktometresi

1. GİRİŞ

Endüstride üretim sonrasında çevre kirliliğine sebebiyet veren ciddi oranda atık malzeme ortaya çıkmaktadır. Sürekli gelişen endüstride, kısıtlı enerji kaynaklarının en verimli şekilde kullanılması, çevreci bir üretim yapılması, insan sağlığının düşünülmesi ve potansiyel hammadde kaynaklarının kullanımı göz önüne alındığında, üretim sonrası ortaya çıkan atık malzemelerin tekrar geri kullanıma elverişli hale getirilmesi oldukça önem taşımaktadır. Özellikle demir çelik üretimi gibi metal üretim ve işleme endüstrisinde açığa çıkan cüruf gibi atık malzemeler ağır metaller içerdiğinden hem insan sağlığı hem de çevreci yaklaşım bakımından geri dönüşümde kullanılması gerekmektedir. Cürufların geri dönüşümleri ile ilgili çok sayıda çalışma yapılmış olsa da günümüzde hala yeterli düzeyde değildir. Cürufun geri dönüşümde başlıca kullanım alanları inşaat sektöründeki beton agregası, çimento sanayisi, cüruf yünü ve dolgu malzemeleri gibi çok geniş bir yelpazedeki alanları kapsamaktadır. Geçmişten günümüze kadar gelen süreçte yüzey, malzeme ve makine mühendisleri malzemelere dışarıdan gelebilecek etkileri azaltma yolunu aramışlardır (Liu, 2023). Malzemelere dışarıdan gelen etkilerin azaltılması kullanılan malzemelerin ömürlerinde artışlar meydana getirmektedir. Malzemelerin ömürlerinin artması ise kullanılan hammadde ve cevher kullanımlarının azaltılmasına katkı sağlamaktadır (Sun, 2023). Dışarıdan gelen etkilerin azaltılması için gerçekleştirilen birçok yüzey işlemi günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Borlama, karbürleme, alevle yüzey sertleştirme işlemlerinin yanı sıra malzemelere çeşitli kaplama işlemleri de uygulanmaktadır (Arikawa, 2007). Kaplama işlemleri arasında yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılan termal spreylere kaplama (TBC) son yıllarda en fazla tercih edilen teknikler arasındadır. Termal spreylere kaplama yöntemleri ile korunması gereken altlık malzemeler dayanımı daha iyi olan yüksek dayanımlı malzemeler ile kaplanmaktadır (Zou, 2023). Ergimiş ya da yarı ergimiş olarak altlık yüzeyine gönderilen kaplama malzemeleri sayesinde özellikle havacılık ve uzay sanayisinde kullanılan malzemelerin dayanımları arttırılmaktadır. Havacılık, uzay, otomotiv ve denizcilik gibi çeşitli endüstrilerde yüksek sıcaklık uygulamalarında plazma spreylere (PS) kaplama, Yüksek Hızlı Oksi Yakıt (HVOF), Soğuk Gaz Dinamik Sprey (CGDS) gibi kaplama yöntemleri ile üretimi sağlanan termal bariyer kaplamalar (TBCs) son yıllarda en çok tercih edilen malzeme türü arasına girmektedir (Young, 2008). TBC sistemleri genel olarak dört ana katmandan meydana gelmektedir.

İlk tabaka (katman) olarak süper alaşım altlık bir malzeme, altlık malzemenin üzerine oksidasyon ve korozyondan altlık malzemeyi koruması için metalik esaslı bir bağ kaplama tabakası ve onun üzerine ise, ısı izolasyonu sağlaması için seramik esaslı bir üst kaplama tabakasından oluşmaktadır. Ayrıca bağ kaplama ve üst kaplama ara yüzeyinde yüksek sıcaklık etkisiyle kendiliğinden oluşan oksit tabakasından (TGO) meydana gelmektedir (Mouritz, 2012). TBC'lerin üretim yöntemleri yüksek verim ve geliştirilmesi açısından oldukça yakından alakalıdır. Seramik esaslı üst kaplama yaygın olarak PS kaplama ve elektron-ışını ile fiziksel buhar biriktirme (EB-PVD) yöntemleriyle üretilir (Peng, 2023). Bu üretim yöntemlerinden PS kaplama yöntemiyle üretilen kaplamaların mikro yapılarında splatlar ile beraber çatlaklar, boşluklar ve lameller arası poroziteler olmasından dolayı TBC sistemlerinin mekanik özellikleri ve kullanım ömürleriyle metalik bağ kaplamanın ve seramik üst kaplamanın mikro yapısıyla doğrudan alakalıdır (Landolt, 2007). Kompresörler, türbin kanatçıkları ve motor yanma odası gibi önemli gaz türbin parçaları çok yüksek sıcaklıklarda sürekli gerilmeler ve anlık sıcaklık artışlarına maruz kalmaktadırlar. Örnek bir gaz türbin motoru Şekil 1.1'de verilmiştir.



Şekil 1.1: Gaz türbin motoru (Bakan vd., 2020).

Bu parçaların kullanım amacına ve kullanım koşullarına bağlı olarak değişen çalışma ömürleri vardır (Towoju, 2023).

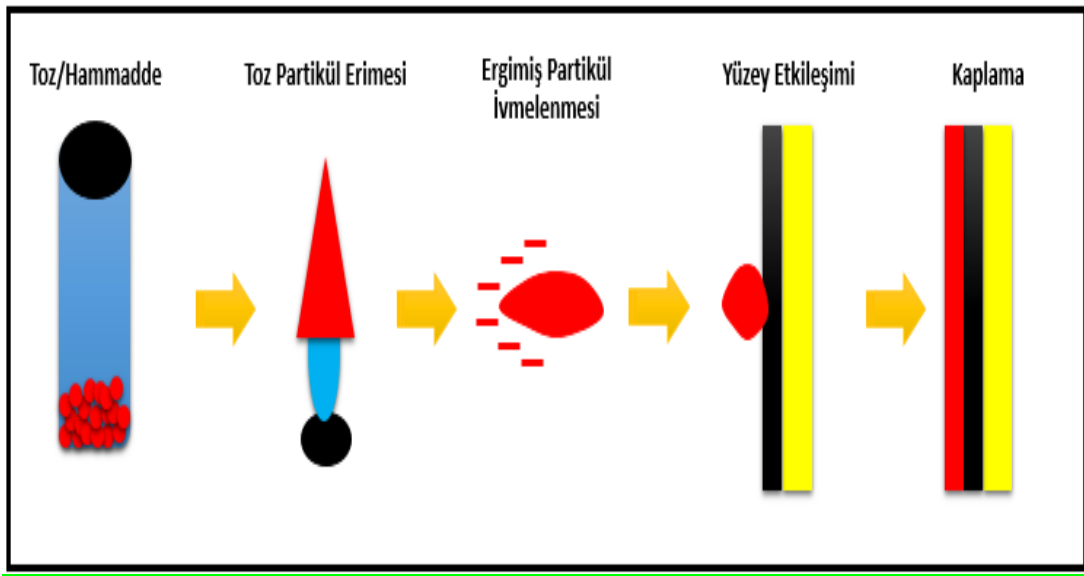
Jet motorları ve uçaklar gibi daimi olarak iniş, kalkış ve ani termal yükler altında kullanılan parçaların ömürleri, sıcak korozyon ve oksidasyon gibi hasar mekanizmaları nedeniyle düşmektedir. Özellikle bu tür yüksek sıcaklık etkisinde çalışan parçalarda yakıt kaynaklı, çevre korozyon ve tehlikeli ortamlar oluşturur (De Giorgi, 2023). Yüksek sıcaklıklar, yakıttaki bazı safsızlıkların da etkisiyle kullanılan malzemelerde sıcak korozyona neden olur. Sıcak korozyon olayı, yakıtın içindeki Na ve V partiküllerinin üst kaplama üzerindeki itriya ile stabilize edilmiş zirkonya (YSZ) ile reaksiyona girmesi sonucunda kaplama üzerindeki YSZ'nin tetragonal yapısından monoklinik yapıya dönüşmesine neden olur. Üst kaplama yapısı bu aşama dönüşümü nedeniyle parçalanır (Jiang, 2010). Çok pahalı olan türbin kanatlarının yeni bir türbin kanadı ile değiştirilmesi yerine kullanıldıkları yerlerde daha dayanıklı olmaları istenmektedir (Diez-Canamero, 2023). TBC, bakım sürecini uzatır ve bakım maliyetini düşürür. Uçaklarda türbin motorları ve kanatçıklarında TBC sistemlerinin kullanılması, uçaklarda manevra yeteneğini geliştirir. Bu da uçakların termo-mekanik ömrünü artırır (Altuncu, 2011). Endüstriyel alanda, özellikle uzay ve uçak sanayinde, termik bariyer kaplamalar oldukça yaygın ve gelişmeye açıktır. Bu nedenle, TBC sistemleri için sürekli olarak yeni ve çeşitli üretim teknikleri geliştirilmektedir (Miller, 1997). TBC'ler çalışma şartlarında oksidasyon, korozyon, aşınma ve termal şok gibi hasarlara maruz kalmaktadır. Bu mekanik hasarlar tezin TBC'lerin maruz kaldığı mekanik hasarlar bölümünde detaylandırılacaktır. Kullanılan üst kaplamalara alternatif olarak da çelikhane cürufu esaslı malzemeler kullanılabilir. Cürufun mekanik ve kimyasal özellikleri, atık malzeme olması, geri dönüşüm ile enerji kaynaklarının verimli kullanılması ve diğer üst kaplama malzemelerine nazaran çok düşük maliyetle olması gibi avantajlar göz önüne alındığında TBC sistemlerinde üst kaplama malzemesi olarak kullanımı için oldukça iyi bir adaydır (Öge, 2021).

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Termal bariyer kaplamalar (TBC), yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılan bileşenleri korumak için geliştirilmiş yenilikçi malzemelerdir. TBC'ler, gaz türbinleri, havacılık motorları ve diğer enerji üretim sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.1 Termal Sprey Kaplamalar

Termal spreycaplama, yüzeylerin yüksek sıcaklık, aşınma, korozyon, yorulma gibi mekanik ve kimyasal hasarlara karşı korunmasını sağlayan ve malzeme özelliklerinin iyileştirilmesi için kullanılan kaplama yöntemidir (Chourasia, 2023). 1900'lerde sıvı kurşunun top yüzeyine kaplanmasıyla termal spreycaplamalar keşfedildi. 1920'lerde patentli kaplamalar başta Almanya olmak üzere, Fransa, devamında Avrupa'ya ve Amerika'ya satılmıştır (Zağlı, 2010). Termal spreycaplama sistemleri, 20. yüzyılın başından beri kaplama pazarının önemli bir bölümünü oluşturmaya başladı (Karaali,2008; Şeker, 2009; Zağlı, 2010). 1900'lü yıllardan sonra hammadde fiyatlarındaki artış, termal spreycaplama yönteminin erozyona, korozyona ve oksidasyona karşı daha dayanıklı olduğunu göstermiştir (Eliaz, 2002). Termal spreycaplama yönteminde, beklentileri karşılaması için tekli sistemler yerine multi-karmaşık (çoklu) sistemler kullanıma başlanmıştır. Termal spreycaplama, metal veya metal içeriğine sahip olmayan toz, tel veya çubuk formdaki malzemelerin ergime sıcaklığına yakın sıcaklıklara kadar ısıtılıp yarı ergiyik şeklinde bir altlık malzeme üzerine biriktirilmesi ile oluşturulan bir kaplama tekniğidir (Güleç, 2006; Zağlı, 2010; Döleker, 2015). Dahası termal spreycaplamalar, birçok farklı yöntemden oluşur ve endüstride fazlasıyla yaygın bir kullanım alanına sahip olan bir yöntemdir (Miller, 1997). Termal spreycaplama teknolojisinde, malzemelerin yüzey özellikleri geliştirilerek çevresel koşullara karşı daha dayanıklı hale getirilir (Güleç, 2006; Zağlı, 2010; Döleker, 2015). Eriyik ya da yarı eriyik partiküllerin altlık malzeme yüzeyine çarpmasıyla partiküller yayılarak altlık malzeme yüzeyine birikir ve ara yüzeyde mekanik bir bağlanma oluşturur (Wei, 2023). Tozların altlık malzeme yüzeyi ile etkileşimlerinin bir sonucu olarak, altlık malzemenin üzerinde bir tabaka ortaya çıkar (Zağlı, 2010; Döleker, 2015). Termal spreycaplamanın en büyük avantajı, çok çeşitli malzemelere uygulanabilmesidir (Güleç, 2006; Döleker, 2015). Termal spreycaplama yönteminin şematik gösterimi Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1: Termal sprej kaplamanın şematik görünümü (Kahraman, 2000).

Termal sprej kaplamalar, toz formdaki metal veya metal olmayan malzemelerin ergime sıcaklığına kadar ısıtılıp eriyik veya yarı eriyik olarak çevresel şartlara karşı korunması ve özelliklerinin geliştirilmesi istenen malzemenin yüzeyine gönderilerek yüzeyde biriktirilmesiyle elde edilir (Murari, 2023). Bu yöntemin karbürleme/nitrürleme gibi difüzyon esaslı kaplamalardan farkı, difüzyon temelli kaplamalarda altlık malzeme ile kaplama malzemesi arasında kimyasal tepkimeler sonucunda difüzyon ile kaplama katmanı oluşturulurken termal sprej kaplama yönetiminde toz formda ki ergimiş ya da yarı ergimiş kaplama malzemesi altlık malzemenin yüzeyine biriktirilmesi prensibine dayanır (Karaoğlu, 2012). Termal sprej kaplamalar, farklı malzemelerin farklı özelliklerinden dolayı geniş bir uygulama alanı sunduğundan havacılık ve uzay sanayi, otomotiv gibi birçok endüstriyel alan da kullanılmaktadır (Sunitha, 2022). Seramik kaplamalar yüksek ergime sıcaklıklarına sahip olduklarından dolayı yüksek çalışma sıcaklıklarına karşı dayanıklıdır bu sebeple endüstriyel fırınlar, motor parçaları gibi istenilen alanlarda kullanılır. Termal sprej kaplamaların endüstri de kullanım oranları Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1: Termal spreyci kaplamaların endüstri de kullanım oranları (Öge, 2016).

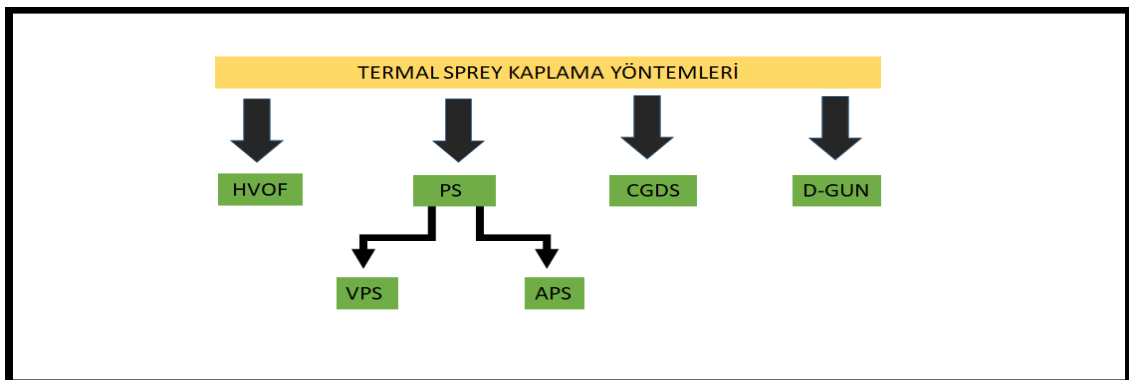
ENDÜSTRİ ALANI	KULLANIM ORANI(%)
Havacılık	%28
Otomotiv	%15
Ağır Su	%11
Korozyon Koruması	%10
Diğer OEM	%7
IGT ve Dizel	%5
Kağıt	%4
Borular ve Şişeler	%3
Cam Endüstrisi	%3
Tıp ve Ortodonti	%1
Diğer İşletme Endüstrileri	%13

Termal spreyci kaplamanın en önemli avantajları; eriyik hale gelen bütün malzemelerin kaplama malzemesi olarak kullanıldığından geniş bir malzeme grubuna uygulanmasıdır (Lynam, 2022). Ergime sıcaklığı yüksek olan malzemeler termal çarpılmalara maruz kalmaktadır ve malzeme yapısında değişim olmadan ısıtılma işlemi görmüş parçalara son işlem olarak uygulanabildiğinden dolayı altlık malzemenin önemli ölçüde ısıtılmaya ihtiyaç duyulmaması, malzeme boyutlarında ve özelliklerinde değişim olmadan deformasyona uğramıştır (Barczi ve Lippai, 2023). Kaplama soyularak yeni kaplama yapılabilmesi, kaplama işleminin oldukça hızlı olması, altlık malzemeyi hasarlara karşı koruduğundan ve altlık malzeme ile kaplama arasında kimyasal tepkime olmaması altlık malzemenin kimyasal özelliklerinde değişim olmamasına neden olur (Chourasia, 2023). Bu sebepten dolayı malzeme tasarrufu sağlar ve malzemenin maliyeti düşürür. Bu yöntemin dezavantajları ise; kaplama yapılmış olan malzemelerin doğal görünümünün düzgün olmaması, kaplama yapılacak olan malzemelerde boyut sınırının olması ve tabancada derin çukurlara sebep olmasıdır (Vardelle vd., 2016).

2.1.1 Termal Sprey Kaplama Yöntemleri

TBC üretiminde genellikle termal sprey kaplama yöntemleri kullanılmaktadır. Altlık malzeme yüzeyi, ergimiş ya da yarı ergimiş seramik malzemeler ile kaplanmaktadır. Termal sprey kaplama, uygulanan kaplama tekniğine göre farklı mekanik özelliklere sahiptir. 20. yüzyılın başlarında, malzemeleri korozyondan, oksidasyondan ve erozyondan korumak için çinko ile kaplanan termal sprey kaplama yöntemi başlamıştır (Shvydyuk, 2023). 1900'lerin ortalarından sonra yaygınlaşan termal sprey kaplama teknikleri günümüzde alev sprey, ark sprey, plazma sprey (PS); detanasyon tabancasıyla kaplama yöntemi (D-Gun), yüksek hız oksit yakıt kaplama yöntemi (HVOF) ve soğuk gaz dinamik sprey kaplama yöntemi (CGDS) olmak üzere çeşitli kategorilere ayrılmıştır. Genel olarak, termal sprey kaplama teknikleri, polimerler, seramikler, metaller ve kompozitlerin neredeyse tümüne uygulanabilir (Haynes, 2013). Metal veya metal olmayan bir besleme ünitesinden bir zemin üzerindeki iş parçasına kaplanır. Termal sprey kaplama işleminde, kaplama malzemesi toz, tel veya çubuk şeklinde yüksek sıcaklıklarda ısıtılır (Barwinska, 2023). Bu kaplama malzemeleri irili ufaklı partiküller ya da parçacıklar halinde iş parçasına yapışırlar. Ancak iş parçasının yüzeyi önceden pürüzlendirilmelidir (Li, 2023). Pürüzlendirildikten sonra kaplama işlemine hazırlanan iş parçasına ergiyik ya da yarı ergiyik haldeki kaplama malzemeleri birbirlerine yapışarak plakalar halinde iş parçasına tutunurlar. Kaplama malzemeleri iş parçasına yapıştıktan sonra soğur ve birbirleri üzerinde bir yığın oluştururlar (Basu vd., 2005). Termal sprey kaplamalar difüzyon yoluyla gerçekleştirilen kaplama yöntemlerinden üretim mekanizmasından dolayı farklılık gösterirler (Zhang, 2023). Birçok kaplama yönteminde kaplama malzemesi ile altlık arasında birtakım reaksiyonlar gerçekleşmesi sonucu kaplama tabakası oluşurken bu yöntemlerde kaplama malzemesi ve altlığın kimyasal bileşimi birbirine bağıllık göstermez. Bu sebepten dolayı bu metotlarla üretilen kaplama malzemelerinde çeşitlilik oldukça fazladır (Matsumoto, 2008). Termal sprey kaplama yöntemlerinde diğer kaplama yöntemlerinden farklı olarak kaplama malzemesi toz şeklinde parçacık olarak altlık yüzeyine gönderilir ve kaplanması sağlanır. Akımlı yöntemler ve fiziksel buhar biriktirme (PVD) gibi yöntemlerde kaplanacak olan malzeme buharlaştırılarak atomize edilir (He, 2023). Atomize olan malzeme altlık yüzeyinde yoğunlaştırılarak uygun bölgelere gönderilir, çekirdeklendirilir ve büyürler. Parçacık kaplanmasına dayalı termal sprey yöntemlerinde ergimiş ya da yarı ergimiş partiküller altlık yüzeyinde gönderilir (Xiao, 2023).

Bu kaplama mekanizması malzemelere; ergime sıcaklıkları çok yüksek olan seramiklerin kaplanması gibi oldukça farklı avantajlar sağlamaktadır (Schlichting, 2003). Termal spreycaplama işlemlerinde altlık ile kaplanacak olan malzeme arasında herhangi bir kimyasal reaksiyon oluşmadığından dolayı altlığın kimyasal yapısında da herhangi bir bozulma meydana gelmemiş olur. Bu sayede malzemenin dayanımı ve kullanım ömrü artmış olur (Portilla-Nieto, 2023). Ayrıca, kaplanacak olan malzemenin altlık yüzeyine yapışabilmesi için kaplama malzemelerinin plastik deformasyona uğraması gereklidir. Bu sebepten dolayı altlık yüzeyine gönderilen malzemeler katı hale çok yakın ve kinetik enerjilerinin de yüksek olması gerekmektedir (Gell, 2008). Parçaların altlığa yapışması, parçaların birbirine yapışması ve kaplama malzemesinin kimyası gibi özellikler termal spreycaplamaların özelliklerini etkileyen faktörlerdir. Altlık yüzeyine gönderilen parçacıklar yüzeye mekanik, metalürjik veya kimyasal olarak yapışırlar (Chen, 2008). Kaplama malzemesi parçacıklarının altlık yüzeyine çarpma hızları, boyutları, altlık yüzeyinin pürüzlülüğü, parçacıkların sıcaklığı ve altlığın sıcaklığı kaplamanın yapışma mukavemetini etkilemektedir (Gell, 2008). Günümüzde çoğunlukla termal spreycaplama yöntemleri havacılık ve uzay sanayisinde yüksek sıcaklık uygulamaları olan kompresörler, yanma odaları, türbin bıçakları gibi malzemelerin kaplanmasında kullanılmaktadır (Zamani, 2023). Bu yöntemle bu tip yüksek sıcaklık uygulamaları farklı ortamlarda malzemeleri korozyona, oksidasyona ve aşınmaya karşı korumaktadır. TBC’lerde; PS, HVOF, CGDS ve D-GUN gibi termal spreycaplama yöntemleri ile üretimi yapılır. PS üretim yöntemi de VPS ve APS olarak iki ayrı şekilde üretimi yapılır. TBC’lerin üretiminde kullanılan termal spreycaplama yöntemleri Şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.2: TBC’lerin üretiminde kullanılan termal spreycaplama yöntemleri (Lashmi vd., 2020).

Bu tez kapsamında, termal sprej kaplama yöntemleri açıklanacak fakat APS, HVOF ve CGDS kaplama yöntemleri gaz türbin motorları üretiminde yaygın olarak kullanıldığından dolayı diğer yöntemlere göre daha detaylı açıklanacaktır. TBC'lerin üretim yöntemlerine ait işlem sıcaklığı ve partikül hızları Tablo 2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.2: TBC üretim yöntemlerine ait işlem sıcaklığı ve partikül hızları (Döleker, 2015).

Metot	Partikül hızı (m/s)	İşlem Sıcaklığı (°C)
APS	200-300	15000
VPS	200-300	15000
HVOF	700-800	2500-3000
CGDS	800-900	800-900

2.1.1.2 Plazma Sprej Kaplama Yöntemi

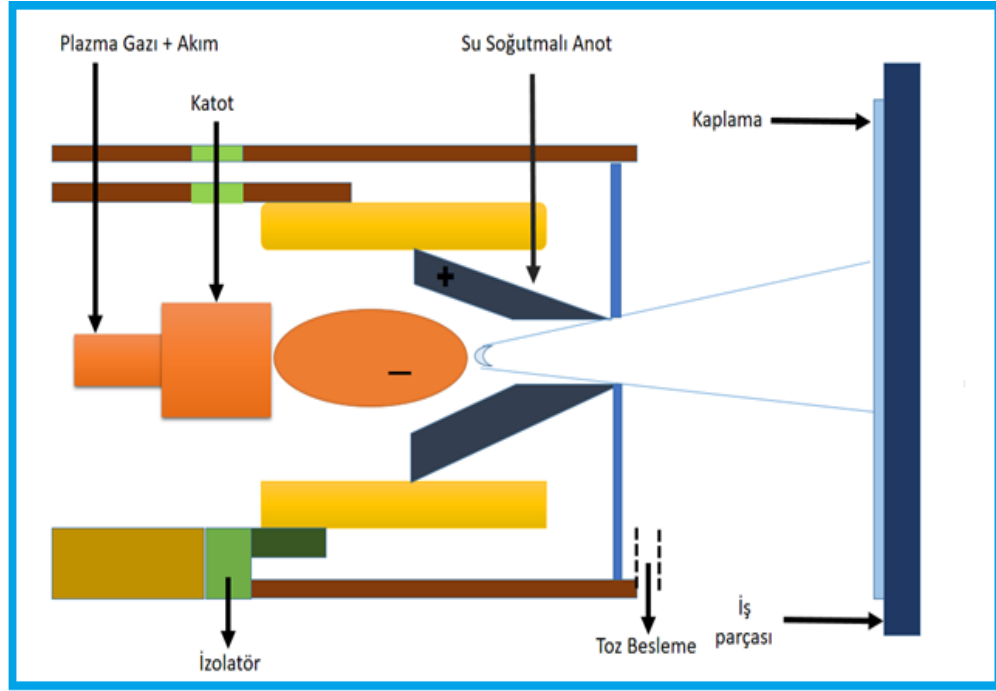
Termal sprej kaplama için kullanılan yaygın teknolojilerden biri, PS kaplama teknolojisidir (Joeris, 2023). İlk olarak, maliyeti yüksek olmayan ana malzemenin üzerine koruyucu, ince ve yüksek değerli bir tabaka oluşturmaktır. İşlem, herhangi gaz plazması bir malzeme tozunun içerisinde ergitilip ve altlık malzeme üzerine çok yüksek hızlarda püskürtülmesi yoluyla gerçekleştirilir (Dang, 2023). Bu nedenle, plastik olarak şekillendirilebilir ve daha yüksek dayanımlı bir malzeme üretilir. Bu sistem sayesinde malzemelerin işlem sıcaklıklarının yüksek olduğu çalışma şartlarında, çok geniş bir alanda işlenmesi ve endüstrilerde kullanılması mümkündür (Tozkoparan, 2010). Plazma, maddenin gaz halinde yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılıp iyonlara, elektronlara ve nötr atomlara ayrıştırılmasıyla oluşturulan maddenin gazdan sonra ki dördüncü halidir. Negatif yüklü elektronlar ile pozitif yüklü iyonlar birbirini çekerek birleşir. Bu birleşme sonucunda açığa çıkan entalpi ve yüksek sıcaklıklarda plazma oluşumu gerçekleşmiş olur (Keidar vd., 2019).

Maddenin plazma halinin avantajları;

- Yüksek iletkenliği ile diğer malzemelere ısı transferini çok iyi iletmesi
- Çok yüksek sıcaklıklarda ergiyen seramik, metal ve ya metal alaşımlarını ergitebilmesi

Bu özelliklere sahip olması yüksek ergime sıcaklıklara sahip seramik, metal ve ya metal alaşımları plazma sprej yöntemiyle kaplanmasına olanak sağlar (Kan,2023).

Plazma spreylendirme işlemi sahip olduğu yüksek sıcaklık sayesinde plazma tabancası ile sağlanmaktadır. Plazma tabancasının kesiti Şekil 2.3'te verilmiştir.

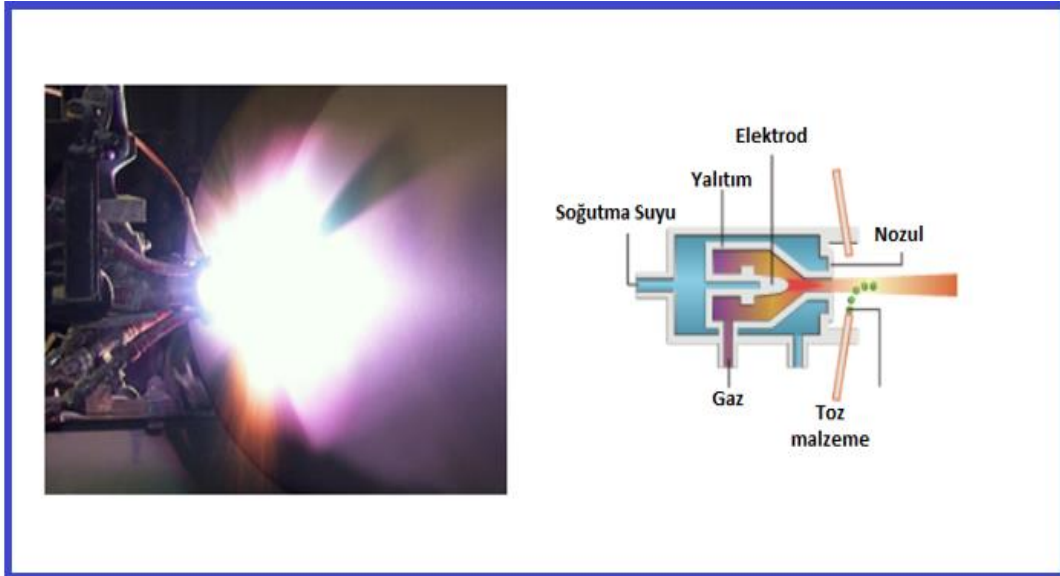


Şekil 2.3: Plazma tabancasının kesiti (Segondy, 2023).

Plazmanın enerjisi, hidrojen içeren argon ve ya azot gibi ikincil bir gaz ve plazma tabancası tarafından oluşturulur. Plazma tabancasının gösterildiği şekilde tozlar besleme kısmından sisteme gelerek atmosfere açık bir şekilde plazma aleviyle buluşur (Segondy, 2023). Besleme kanalından gelen toz kaplama malzemeleri ergimiş veya yarı ergimiş olarak altlık yüzeyine gönderilir. Sistem içerisinde su yardımıyla soğutma gerçekleşmektedir. Soğutma kanalları vasıtasıyla plazma tabancası sürekli olarak aktif bir şekilde çalışmaya devam etmektedir (Leng, 2023). Plazma spreylendirme yöntemleri, Atmosferik Plazma Spreylendirme (APS) kaplama yöntemi ve Vakum Plazma Spreylendirme (VPS) kaplama yöntemi olmak üzere ikiye ayrılır (Singh vd., 2023).

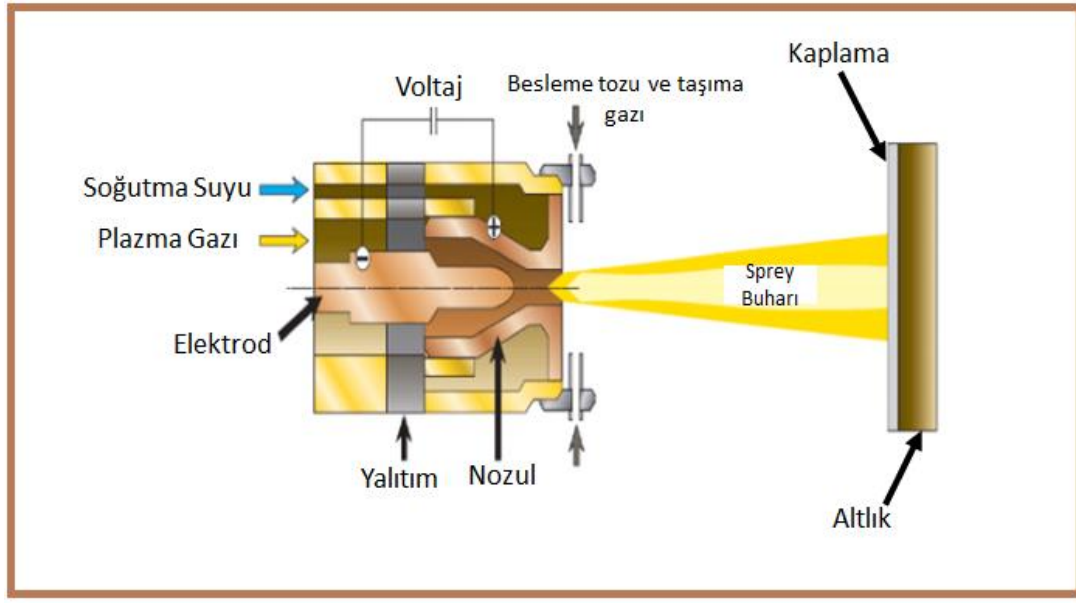
APS kaplama yöntemi, endüstri şartlarında metal ve seramik yüzeylere sahip malzemelerin kaplanmasında en yaygın kullanılan yöntemdir (García vd., 2015). APS yönteminde, kaplama işlemi atmosfer şartlarında gerçekleştirilir. Spreylendirme partikülleri tabancadan ayrıldıktan sonra kaplama işlemi yapılacak malzeme yüzeyine ulaşana kadar çevre ile etkileşime girmektedir (Semmler, 2023).

Açık hava atmosferinde kullanılması nedeniyle, diğer plazma işlemlerine kıyasla daha ekonomiktir. Oksidasyon hasarı ele alındığında, seramik ve oksidasyona karşı direnci yüksek kaplama malzemeleri sıklıkla püskürtülür (Zhang vd., 2023). Bu kaplama işleminde, bir plazma jeti kaplama hammaddesini toz haline getirmektedir. Argon ve helyum gazı gibi inert gazlar tipik olarak plazma oluşturur (Venkatachalapathy, 2023). Plazma sprej kaplama işlemi, iyonize inert gazın gizli ısısından yararlanır. Argon gazı, plazma üretiminde en çok kullanılan inert gazdır. Nozuldan çıkan bu gaz, plazma üretmek için yüksek (850-950 amper) akım gerektirir (Vijay, 2023). Bu nedenle, akımı arttırmak istediğimizde argon gazına ilave olarak hidrojen gazı eklenir. Ark akımının çok yüksek olması, ergime sıcaklığı oldukça yüksek olan malzemelerin eriyik hale getirilip rahatlıkla kaplama malzemesi olarak kullanılmasına olanak sağlar (Jahromi vd., 2023). Atmosferik koşullarda düşük hızlarda uygulanan APS yöntemi, açık hava atmosfer şartlarında yapılması nedeniyle, diğer PS metotlarına kıyasla oldukça ekonomiktir. APS, 1900'lerin ortalarında Almanya'da Reineke tarafından geliştirilmiştir (Gildersleeve ve Vaßen, 2023). Daha sonra Fransa, Avrupa ve Amerika başta olmak üzere ticari amaçlı olarak kullanılmaya başlanmıştır. 1960'lı yıllar itibarıyla, TBC üretirken PS tekniği hızlı bir şekilde gelişmeye başlanmıştır. Plazma tabancalarının tasarımında meydana gelen gelişmeler, bu gelişmelerin ana nedenidir. Plazma tabancalarının da güçlü üretilmesi, yüzeye püskürtülecek olan parçacıkların hızlarını ve sıcaklıklarını arttırmıştır (Altuncu, 2011). Plazma sprej tabancası iç şeması prosedürü Şekil 2.4'de gösterilmiştir.



Şekil 2.4: Plazma sprej tabancası iç şeması ve prosedürü (Tao vd., 2023).

APS kaplama yönteminde kaplama malzemesi toz haline getirilip plazmanın en sıcak bölgesine gönderilir. Bu bölgede ergiyik hale gelen toz partiküller plazma tarafından altlık malzeme yüzeyine gönderilir (Vaßen, 2023). APS yöntemi ile kaplama prosesi Şekil 2.5’de gösterilmiştir.



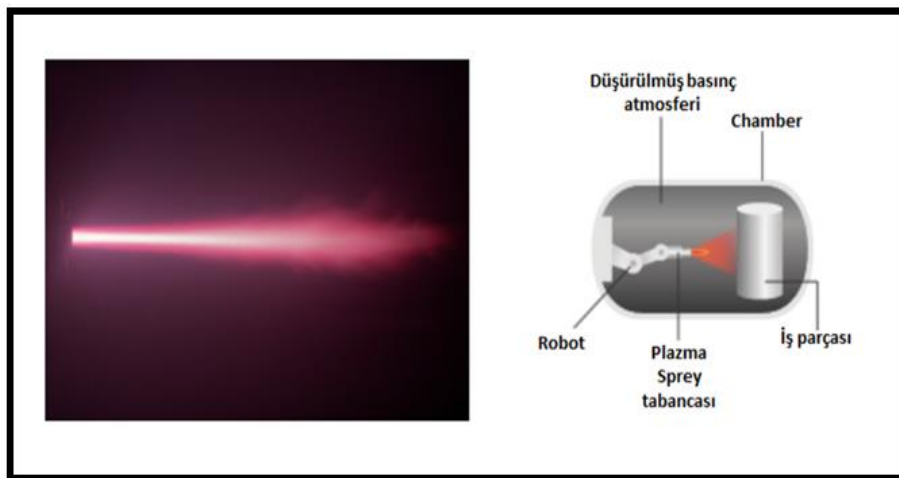
Şekil 2.5: APS yöntemi ile kaplama prosesi (Huang vd., 2023).

Kaplamanın özelliklerini etkileyen faktörler; kaplama malzemesinin partikül hızı, toz parçacıkların büyüklüğü ve plazma da enjekte edilen parçacıkların konumudur (Mittal, 2022). Bu etkenlerin içinden ise en önemlileri parçacıkların konumu ve kaplama malzemesinin hızıdır. Özellikle bu etkenlerin önemli olmasının sebebi, ergimiş alt katmana nüfuz edip etmediğini belirler (Martins, 2023).

VPS yöntemi ise, 1970'lerden sonra daha fazla geliştirilmeye başlandı. Bu teknik düşük basınçlı plazma sprej olarak da bilinir (Kielczawa, 2022). VPS yönteminin, kullanılmaya başlanmasındaki amaç malzemelerin sıcak korozyon hasarına karşı dayanımlarının daha fazla olmasıdır. Bu yöntemle, kaplama kalınlıklarının 50 μm 'den daha düşük olması nedeniyle endüstride CVD ve PVD gibi yöntemlerinin yerine tercih edilmeye başlandı (Srivastava, 2022). PS kaplama yöntemi, vakum ya da düşük basınçta kapalı bir ortam da ve ya inert gazlar eşliğinde kontrollü atmosferde gerçekleştirildiğinde bu yöntem VPS yöntemi olarak adlandırılır.

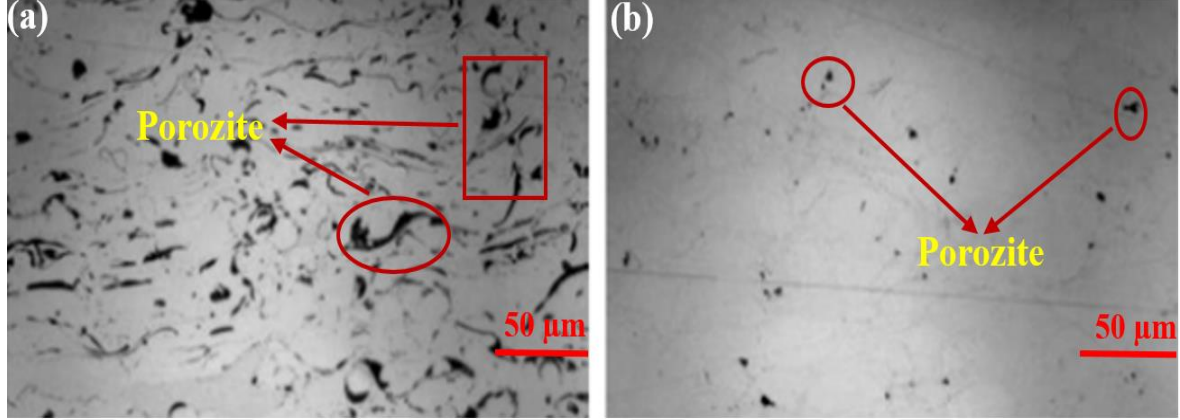
TBC sistemlerindeki metalik bağ kaplama gibi oksit içeriğinin minimum düzeyde istenilen kaplamaların üretimlerinde kullanılır (Sunitha, 2022). Oksit içeriğinin hiç olmamasının sebebi ise; vakum plazma sprej yönteminin gerçekleştirildiği kontrollü özel odalarda oksijen bulunmamasıdır. Bu yöntemle üretilen kaplamalar da spreje etki edecek ortamda gaz olmadığından üretilen kaplama çok düşük poroziteye sahiptir (Curry, 2022). Vakum plazma sprej, atmosferik plazma sprej üretim yöntemine göre daha karmaşık prosese sahiptir ve maliyeti yüksektir (Amer vd., 2023). Vakum altında yapılması nedeniyle APS yönteminden farklılık gösteren bu yöntem, kaplama sırasında vakumun sabit olarak tutulması oldukça zordur. Bu da VPS yönteminin en büyük dezavantajları arasındadır (Boulos, 2023). Vakumun sabit koşullarda tutulması, prosedürün istenilen düzeye ulaşmasına yardımcı olur (Davis, 2004). Çalışmada hidrojen, argon, azot ve helyum gazlarının karışımı kullanılır ve APS'ye kıyasla daha fazla elektrik güç girişi vardır (Mehmood, 2023). Partiküllerin boyutları 4–21 μm arasındadır. Sprej mesafesi 310-410 mm arasındadır. Vakum atmosferi, düşük basınçlı bir atmosferdir. Spreyin dinamik basıncı 655 Pa ile 13,3 kPa arasında değişmektedir ve öncesi basınç yaklaşık 1,3 Pa'dır (Pawlowski, 2008). Çekme dayanımı, alaşımlı bağ kaplamaların içeriklerine ve kalitelerine göre sıklıkla değişmektedir. Epoksi reçine testi uygulamaları sonucunda 85 MPa'yı aşar.

Uygulama parametrelerine bağlı olarak kaplamaların porozitesi %1'den %2'ye kadar değişmektedir (Barwinska vd., 2023). VPS kaplama kalınlıkları genellikle 150-500 μm arasındadır (Moskal vd., 2010). VPS tabancası iç şeması ve prosedürü Şekil 2.6' da verilmiştir.



Şekil 2.6: VPS tabancası iç şeması ve prosedürü (Rezanka vd., 2014).

CoNiCrAlY içeriğine sahip bağ kaplamanın atmosferik plazma sprej ve vakum plazma sprej üretim yöntemlerine ait mikro yapı görüntüleri Şekil 2.7’de verilmiştir.

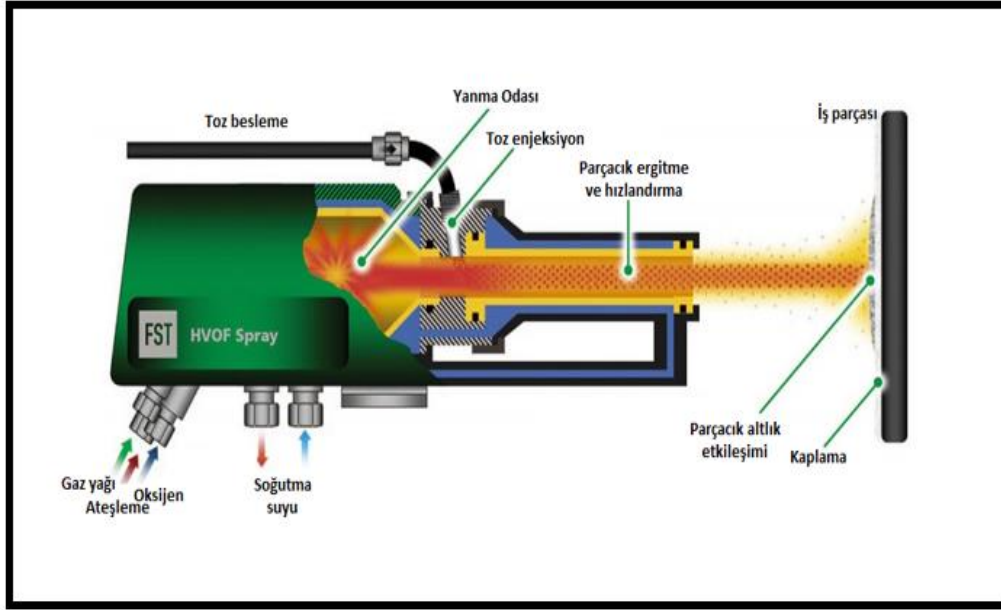


Şekil 2.7: CoNiCrAlY içeriğine sahip bağ kaplamanın (a) APS, (b) VPS üretim yöntemlerine ait mikro yapı görüntüleri (Karaoğlu, 2012).

Mikroyapılarda da görüldüğü üzere; atmosferik plazma sprej üretim yöntemiyle üretilen CoNiCrAlY içeriğine sahip bağ kaplamanın oksitlenmesi (a), vakum plazma plazma sprej yöntemiyle üretilen bağ kaplamanın oksitlenmesine (b) göre çok daha fazladır.

2.1.1.3 Yüksek Hızlı Oksi Yakıt (HVOF) Kaplama Yöntemi

HVOF yöntemi Union Carbide tarafından 1958 yılında keşfi yapılmıştır fakat 1980 yılından itibaren ticari olarak kullanılmaya başlanmıştır (Owoseni, 2021). Yüksek hız oksit yakıt kaplama, propan, hidrojen, doğalgaz, propilen ve asetilen içerikli gazların yüksek basınçta yanma odasına gönderilip yanma işlemine tabii tutulduktan sonra, ergime sıcaklığı 3000°K’in üzerinde olmayan kaplama malzemesi partikülleri yüksek hızda (ses hızından daha yüksek) nozuldan çıkarak altlık malzeme yüzeyine gönderilir (Odabaş, 2020). Kaplama malzemesinin partikülleri eriyik, yarı eriyik ve ya hareket hızının yüksek olmasından kaynaklı yumuşamış olarak altlık malzeme üzerine gönderilmektedir. Püskürtülen kaplama malzemesi plastik deformasyona uğrayarak soğur ve katılaşarak altlık malzemeyi kaplar (Daroonparvar, 2021). Şekil 2.8’de HVOF kaplama yönteminin şematik gösterimi verilmiştir.

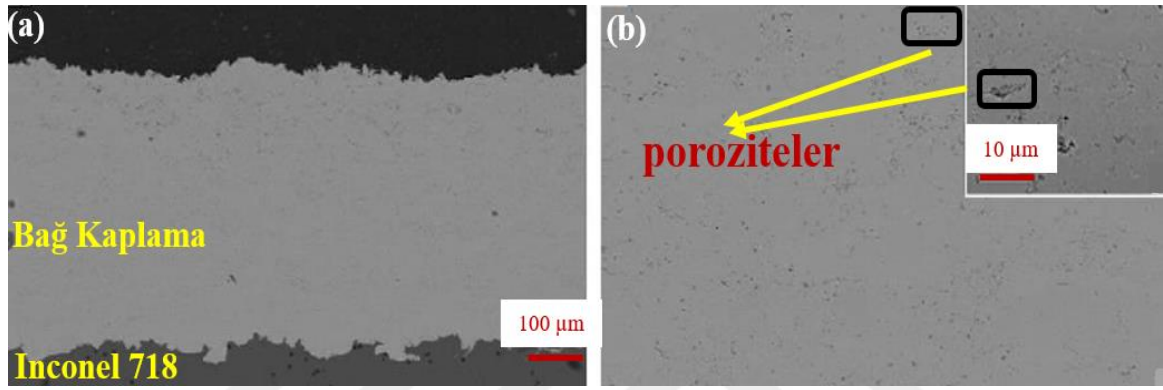


Şekil 2.8: HVOF kaplama yönteminin gösterimi (Lance vd., 2022).

HVOF kaplama metodunda, yakma işlemi sonucunda nozuldan çıkan gaz çok yüksek hızla ulaşır, bu hız ses hızı seviyesine yaklaştığı zaman proses kritik aşamaya gelir (Chadha, 2021). Kritik aşamanın üzerinde çıkan gaz sebebiyle süpersonik hızlara ulaşılır (Mauer, 2023). HVOF kaplama yönteminin avantajları; yoğunluğu yüksek, gözeneklilik oranı düşük, erozyon ve aşınma gibi mekanik hasarlara karşı dirençli, bağ mukavemeti yüksek ve altlık yüzeyini homojen olarak kaplayan kaplamalar üretilmesidir (Lance vd., 2022). Diğer termal sprej kaplama yöntemlerinden farklı olarak ise yoğunluğu en yüksek ve en yüksek dayanıma ihtiyaç duyulan uygulamalarda kullanılmasıdır (Odabaş, 2020). HVOF termal sprej kaplama yönteminin dezavantajları; yüksek sıcaklıktan kaynaklı kaplama yapılacak olan altlık malzemenin kimyasal kompozisyonunda termal hasarlara sebebiyet verir (Boissonnet, 2019). Bu nedenden dolayı sıcaklığa karşı direnci az olan plastik gibi ve ince malzemelerin bu yöntemle kaplama işlemi yapılamamaktadır. Yüksek sıcaklıktan dolayı kaplanacak süper alaşım altlık malzemeler bile paso olarak kaplama işlemi yapılır (Hernandez-Castaneda, 2019). Her pasodan sonra altlık malzeme kompresör ile soğutulup kaplama kalınlığı ölçülür. İstenilen kaplama kalınlığına ulaşıldığında işleme son verilir. Diğer termal sprej kaplama yöntemlerine oranla oldukça maliyeti yüksek bir kaplama yöntemidir (Mittal, 2022).

HVOF kaplama yöntemi aşınma gibi mekanik hasarlara karşı yüksek direnç sağladığı için krom karbür (Cr_2C_3), tungsten karbür (WC), süper alaşımlarda, havacılık sanayisinde ve

türbin kanatlarında oldukça yaygın kullanılır (Boulos, 2023). Bu kaplama yöntemiyle metallerin tümü ve sermetler kaplama işlemi yapılabilir. Gaz olarak aseliten kullanıldığında ergime sıcaklığı yüksek olan Zirkonya ve karbürleri üretimi yapılmaktadır (Srivastava, 2022). HVOF kaplama yöntemi, bağ katmanı MCrAlY kaplamalar üretimi için vakum plazma sprej yönteminin, gözenekliliği düşük ve VPS'e kıyasla daha düşük maliyet bakımından alternatifi olarak yapılmaktadır (Łatka vd., 2020). HVOF yöntemiyle üretilen CoNiCrAlY alaşımının 100 μm ve 10 μm ölçeklerde SEM görüntüleri Şekil 2.9'da verilmiştir.



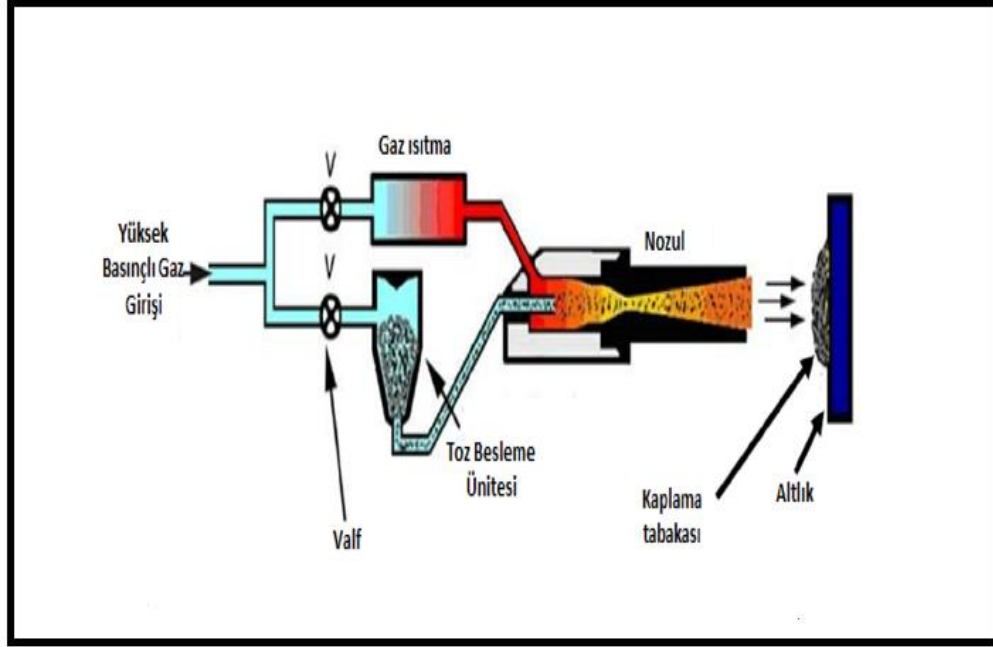
Şekil 2.9: HVOF yöntemiyle üretilen bağ kaplama (Döleker,2015).

2.1.1.4 Soğuk Gaz Dinamik Sprey (CGDS) Kaplama Yöntemi

CGDS kaplama metodu Rus bilim insanları tarafından 1980'li yıllarda geliştirilmiştir (Shen vd., 2022). CGDS metodunun temel amacı kaplama malzemesinin ergitilmeden plastik deformasyona uğrayarak altlık malzeme üzerine gönderilmesine dayanır (Zakeri,2022). Soğuk gaz dinamik sprej kaplama yöntemin de sıcaklık bakımından çok yüksek derecelere çıkmadığından dolayı oksitlenme oranı çok düşüktür (Shi, 2020). CGDS metodunun diğer kaplama yöntemlerinden farklılığı altlığın ve kaplama malzemesi olan partiküllerin çok yüksek sıcaklıklara tabii tutulmamasıdır (Vagge, 2022). CGDS metodunda kaplama malzemesi olan partiküllerin çarpma hızlarının yüksek olması sebebiyle altlık malzemeye yüksek oranda birikmiş kaplama sağlar (Cojocar, 2022).

Bu kaplama yöntemi plastik deformasyon temelli olduğu ve kafes yapısının distorsiyona uğrayarak altlık üzerine kaplama sağlandığı düşünülmektedir (Zakeri vd., 2022).

CGDS kaplama yöntemi bu sebepten dolayı gevrek malzemelerin kaplama malzemesi olarak kullanımı daha zordur. Genel olarak polimer ve metal esaslı malzemelerin kaplamalarında kullanılır (Gialanella vd., 2020). CGDS yönteminin şematik gösterimi Şekil 2.10'da verilmiştir.

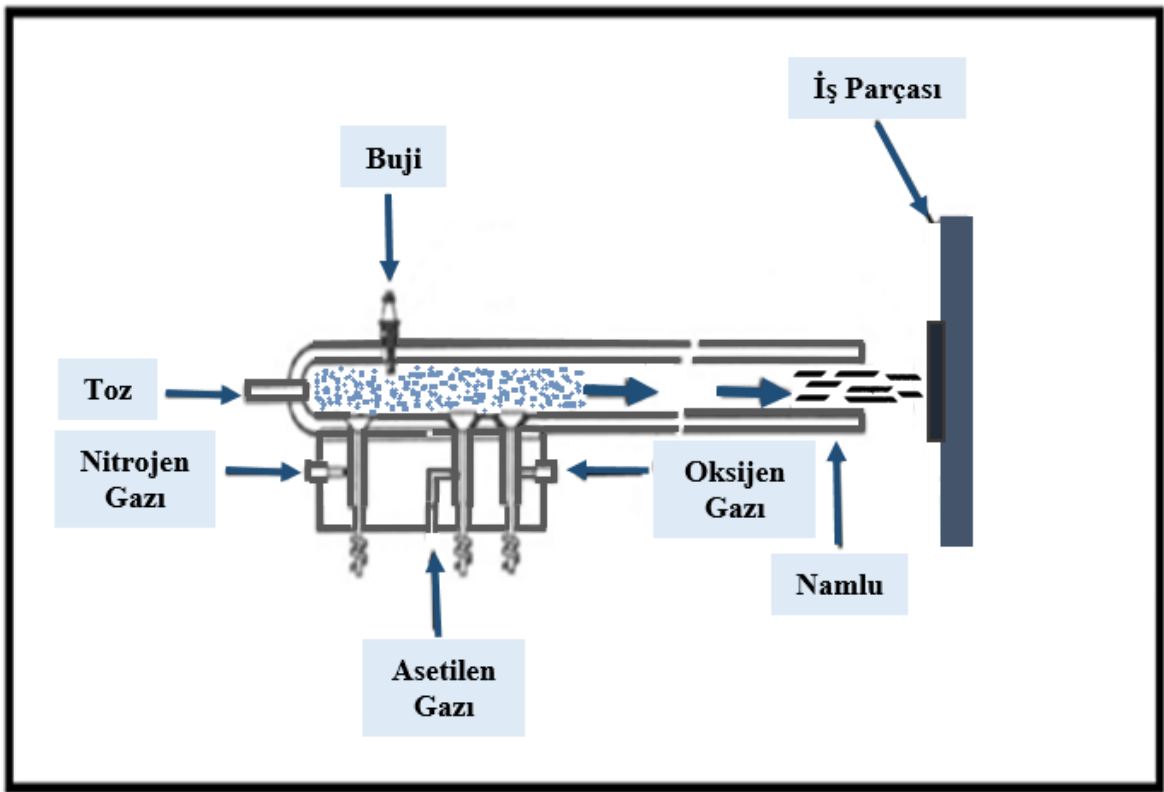


Şekil 2.10: CGDS yönteminin şematik gösterimi (Yandouzi, vd., 2007).

2.1.1.5 Detanasyon Tabancasıyla (D-gun) Kaplama Yöntemi

Detanasyon tabancasıyla kaplama yöntemi, kaplanacak malzeme ve oksii-asetilen gaz karışımının yanma odasında patlaması ve kaplama tozlarının tabanca nozulundan çıkarak hedef malzemeye ulaşmasıyla yapılmaktadır (Isaac, 2022). Bu sisteme ismini veren detanasyon veya patlatma tabancası, yaklaşık 1,5 ila 2 metre uzunluğunda yanma odasının bulunduğu bir çıkış borusundan oluşmaktadır. Buji, tabanca içinde yanmaktadır. Propan, propilen, asetilen ve oksijen, yanma işlemini gerçekleştiren gaz karışımıdır (Barwinska, vd., 2023). Bu yöntemde sprej hızı 900-1200 m/s'ye ve sıcaklık 4000°C'ye kadar çıkmaktadır (Boulos vd., 2023). Bu yöntemle yapılan kaplamaların yapışma mukavemeti genellikle 75 MPa ve tabancadaki karışım saniyede 4 ila 8 arasında patlamaktadır (Abbas, 2021). Havacılık ve uzay sanayisi dahil olmak üzere buhar türbinlerinde kullanılan nükleer bileşenler, reaktörlerin yapımında kullanılır.

Bu yöntem, havacılık ve uzay sanayisi başta olmak üzere buhar türbinlerinde, reaktörlerin yapımında kullanılan nükleer parçalarda, madencilikte sızdırmazlık elemanları ve diğer birçok alanda kullanılmaktadır (Ma, 2023). Kesici takımlar için sert kaplamaların yapılması, tasarımının oldukça basit ve kullanım ömrünün uzun olması, üretilen kaplamaların oldukça düşük gözenekli ve bağ mukavemetinin yüksek olması nedeniyle çok faydalıdır (Xiao, vd., 2023). Bununla birlikte, bu yöntemin dezavantajları; çalışması sırasında ortamda çok fazla gürültü üretmesi, kaplanacak malzemelerin büzülme potansiyeline sahip olması, bu da kaplama tozlarının altlığa çarpmasına neden olması ve diğer termal sprey kaplama sistemlerine göre daha pahalı olması. D-gun yöntem Şekil 2.11’ de verilmiştir.



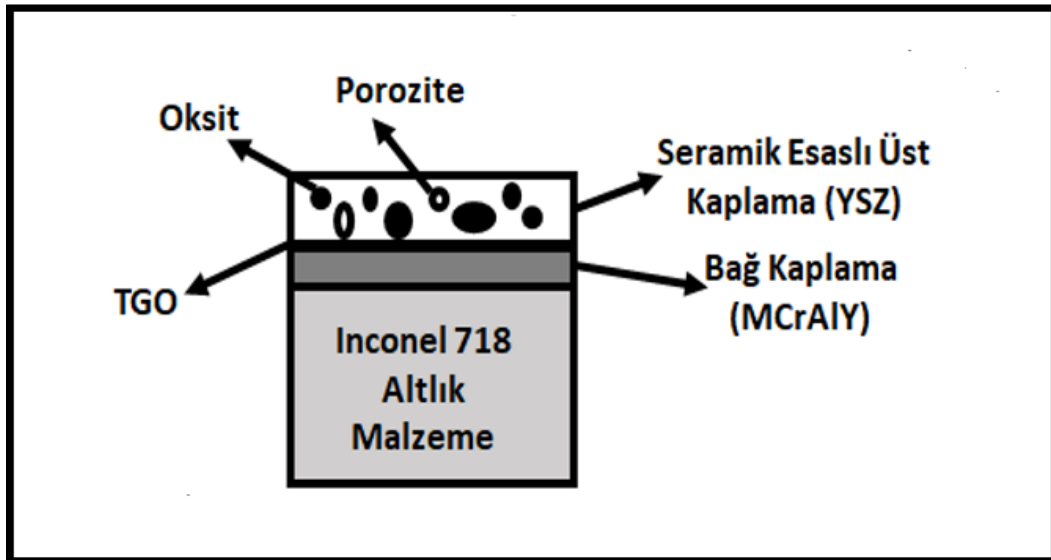
Şekil 2.11: D-gun prosesi (Singh vd., 2012).

2.2 Termal Bariyer Kaplamalar (TBCs)

Termal bariyer kaplamalar, altlık malzeme, bağ kaplama ve üst kaplama tabakası olmak üzere üç katmandan oluşmaktadır.

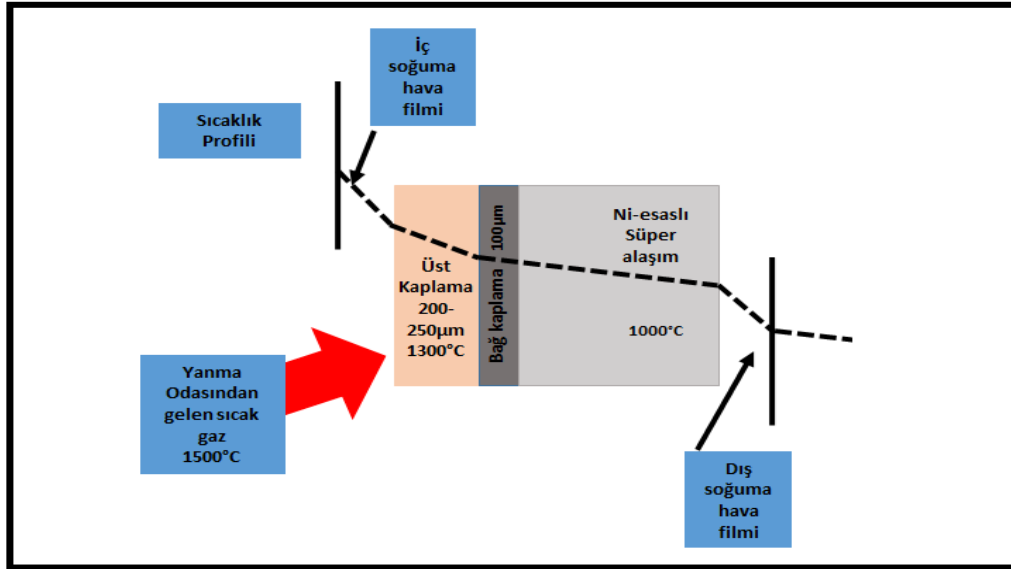
2.2.1 TBC'lere Genel Bakış

TBC sistemleri genellikle endüstriyel gaz türbinlerinde, otomotiv endüstrisinde, uçak ve gemi motorlarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Alonse vd., 2023). Bu sistemler, yüksek sıcaklık uygulamalarında ısıyı yalıtırken kullanım koşulları boyunca sıcaklığı düşürür. Ayrıca yanma türbinlerinin yapısal yüklerini yüksek sıcaklık, yüksek basınç, erozyon, korozyon ve oksidasyon gibi koşullardan korumaktadır (Burlacov vd., 2007). TBC sistemleri, gaz türbini motorlarının daha verimli çalışmasını sağlar. TBC sistemlerinin geliştirilmesi için yüzey, makine ve malzeme mühendisleri oldukça fazla çalışmalar gerçekleştirmişlerdir (Peng vd., 2012). Ayrıca, TBC teknolojilerinin gaz türbini endüstrisinin satış ve onarım operasyonları üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu düşünüldüğün de, türbin parçaları araştırma ve geliştirme çalışmalarının merkezi olmaya başlamıştır (Steinke vd., 2010). Geleneksel TBC sistemleri dört ayrı tabakadan oluşur. Bu tabakalar yüksek sıcaklık koşullarına dayanıklı süper alaşım altlık bir malzeme, metalik esaslı bir bağ kaplama, yüksek sıcaklık çalışma koşullarında kendiliğinden meydana gelen termal olarak büyüyen oksit tabakası (TGO), mükemmel bir ısı yalıtımı sağlayan seramik esaslı üst kaplamadır (Bonadei ve Marrocco, 2014). APS yöntemiyle üretilen tipik bir TBC sisteminin şematik görünümü Şekil 2.12'de gösterilmiştir.



Şekil 2.12: APS yöntemiyle üretilen tipik bir TBC sisteminin şematik görünümü.

Isı geçiş gradyanı, bir malzemenin kalınlığı veya katmanları arasındaki sıcaklık farkının bir ölçüsüdür (Zhang vd., 2023). Bu gradyan ne kadar dūřukse, yani sıcaklık farkı ne kadar azsa, termal bariyer kaplama sistemlerindeki malzemelerin ısı transferini kontrol etme yetenekleri o kadar iyidir (Kim ve Kim, 2021). TBC sistemleri genellikle çok katmanlı yapılar içerir. Bu katmanlar, farklı termal özelliklere sahip malzemelerden oluşur ve birlikte çalışarak ısı transferini minimize eder. İlk katmanlar genellikle yüksek sıcaklıklara dayanabilen seramik veya metal oksitler gibi yalıtım malzemelerinden yapılmıştır (Yan vd., 2021). Bu malzemeler, yüzeydeki sıcaklığı korumak için içerideki malzemeye geçen ısıyı sınırlar. İyi bir termal bariyer kaplama sistemi, yüksek sıcaklıklara maruz kalan yüzeylerin korunmasına yardımcı olur (Zhang vd., 2023). Bu, endüstriyel uygulamalarda, uzay araçlarında veya enerji üretim tesislerinde sıkça görülen durumlardır. Enerji verimliliği arttıa, işletme maliyetleri dūřer ve aynı zamanda malzeme dayanıklılığı artar, çünkü yüksek sıcaklıklara maruz kalan malzemelerin ömrü uzar (Chellaganesh vd., 2021). Bu nedenle, dūřuk ısı geçiş gradyanına sahip bir TBC sistemi, birçok endüstriyel uygulama için önemli bir avantaj sağlayabilir. şekilden de anlaşılacağı üzere motor blokları gibi yüksek sıcaklık uygulamalarında oluşan ısılar altık malzemeye direkt olarak iletilmesinden ziyade kademeli dūřuř sergileyerek iletilmektedir (Zhou vd., 2022). TBC sisteminin ısı geçiş gradyanı şekil 2.13’de verilmiştir.



şekil 2.13: TBC sistemine ait ısı geçiş gradyanı.

Altlık malzeme olarak Nikel esaslı süper alaşım malzemeler yüksek sıcaklıklarda oksidasyona, korozyona ve termal şoklara karşı oldukça dayanıklı malzemeler olduğundan dolayı TBC üretimlerinde en çok tercih edilen malzeme türleridir (Barwinska vd., 2023).

Kullanım koşullarında hem hammadde kullanımını azaltmak hem de yüksek maliyetli tamir ve onarımları azaltmak için TBC sistemlerinin üretiminde bağ kaplama olarak oksidasyon direnci yüksek metal esaslı MCrAlY içerikli metalik bağ kaplamalar yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Guo vd., 2023). MCrAlY malzemesi içerisinde bulunan M ise, metali temsil etmektedir. TBC sistemlerinde metal olarak tercih edilen element genellikle Co, Cr veya hem Co hem de Cr'dur. Bağ kaplamaların sistem içerisindeki görevi içerisindeki Al rezervuarı sayesinde altlık malzemeyi yüksek sıcaklıklarda oksidasyona karşı korumak ve aynı zamanda üst kaplamanın sisteme daha iyi bağlanmasını sağlamaktır (Thoutam vd., 2023). Yüksek sıcaklık çalışma koşullarında kendiliğinde oluşan TGO tabakası ise genel yapısı itibari ile Al_2O_3 bileşiğinden meydana gelmektedir. Geleneksel TBC sistemlerinin üretiminde genellikle üst kaplama malzemesi olarak da zirkonya esaslı seramik malzemeler kullanılmaktadır (Clarke ve Lev, 2003; Mohan, 2010).

2.2.2 TBC Sisteminin Bileşenleri

Gaz türbini parçalarının yüksek sıcaklıklarda korunması için TBC ve metalik alaşımlı kaplamalar en iyi seçeneklerdir (Grilli vd., 2021). 1900'lü yıllarda, plazma püskürtmeli TBC sistemleri, öncelikle MgO stabilize zirkonyadan oluşan, ticari gaz türbini motorlarında koruyucu kaplamalar olarak kullanılmıştır (Shvydyuk vd., 2023). Gelişmiş parça ömrü için yüksek dayanımlı TBC malzemelere yönelik araştırmalar, TBC sistemlerinin gelişmesine yardımcı oldu (Tsai vd., 2007; Xu vd., 2010; Zhou vd., 2015). Daha önce de belirtildiği gibi, geleneksel TBC sistemi dört katmandan oluşur (Akwaboa vd., 2009; Daroonparvar vd., 2014).

2.2.2.1 Altlık Malzemeler

Günümüzde, roket motorları, turbojetler, turbofanlar ve turboprop motorlar gibi havacılık sanayisinde, gaz türbinleriyle çalışan güç üretim sistemlerinde tercih edilmektedir (Sheikhi vd., 2023).

Süper alaşımlar ve yüksek mekaniksel gerilmeler gerektiren durumlarda kullanılabilecek malzemelerdir (Aydınmakina, 2014). Süper alaşımlar terimi, İkinci Dünya Savaşı sonrası sanayinin gelişmesiyle literatüre girmiştir. Süper alaşımlar, yüksek sıcaklıklarda yüksek performans gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Huang vd., 2023). Alaşımlar, nikel, niyobyum, kobalt, titanyum ve diğer elementlerin bir veya birkaçının içerdiği, zorlu çevresel koşullar altında yüksek gerilmelere ve sıcaklıklara karşı stabilitesini koruyan ve son derece yüksek sertlik seviyelerine sahiptir (Dalkılıç, 2001; Aydınmakina, 2014). Ayrıca, 600°C gibi yüksek sıcaklıklarda uzun süreli sıcak korozyona ve aşınmaya karşı güçlü bir dayanımı vardır (Chellaganesh vd., 2021). Süper alaşımlar üç kategoriye ayrılır: demir, kobalt, krom, kobalt ve nikel esaslı alaşımlar; ve kobalt ve karbür kuvvetlendirmeli ve katı çökelti sertleştirilmiş nikel esaslı alaşımlar (Grilli vd., 2021). Döküm ve dövme esastır. Süper alaşımlı demir, kobalt ve nikel gibi malzemeler yüksek sıcaklıklarda daha dayanıklıdır (Karaoğlu, 2012; Aydınmakina, 2014). Ayrıca süper alaşım malzemeler deniz, otomotiv, havacılık gibi endüstrilerde yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılan TBC sistemlerinin üretimlerinde de tercih edilmektedir (Maniam vd., 2021). Oksidasyon, korozyon, aşınma, yorulma gibi hasar mekanizmalarına karşı genellikle nikel esaslı Inconel 718 süper alaşım altlık malzemeler kullanılmaktadır (Moreno-Rubio vd., 2023).

2.2.2.2 Metalik Bağ Kaplamalar

1960'lı yıllar itibariyle yapılmış olan araştırmalarda, demir esaslı (Fe - %25 Cr - %4 Al - %1.0 Y) alaşımlarının termal şok çevrim davranışına karşı dayanım gösterdikleri bulunmuştur (Bose, 2017). Oksidasyona karşı direnç sağlamak için üst malzeme seramik kaplama ile altlık malzemesi metal bağ kaplama ile birleştirilir. Oksidasyona dirençli MCrAlY kaplamalar bağ kaplamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. İyi bağlama özellikleri, bağlantı kurmanın temel gerekliliğidir (Richer, 2010). Seramik içerikli üst kaplama malzemesi yüksek oksijen geçirgenliği nedeniyle, alttaki metalik katmana oksijenin girmesini engellemelidir. Bağ kaplamadaki ek alüminyum, yüksek sıcaklıklarda alümina tabakası oluşturarak oksijenin geçişini engeller (Ke vd., 2005; Ke vd., 2006). Metalik bağ kaplama, seramik esaslı üst kaplama malzemesi ile altlık olarak kullanılan malzeme arasında mekaniksel bir bağlantı sağlar ve bu da üst kaplamanın adezyonunu artırır (Bose, 2017).

Seramik içerikli üst kaplama malzemesi yüksek oksijen geçirgenliği nedeniyle, alttaki metalik katmana oksijenin girmesini engellemelidir (Vagge ve Ghogare, 2022). Bağ kaplamadaki ek alüminyum, yüksek sıcaklıklarda alümina tabakası oluşturarak oksijenin geçişini engeller (Ding vd., 2023).

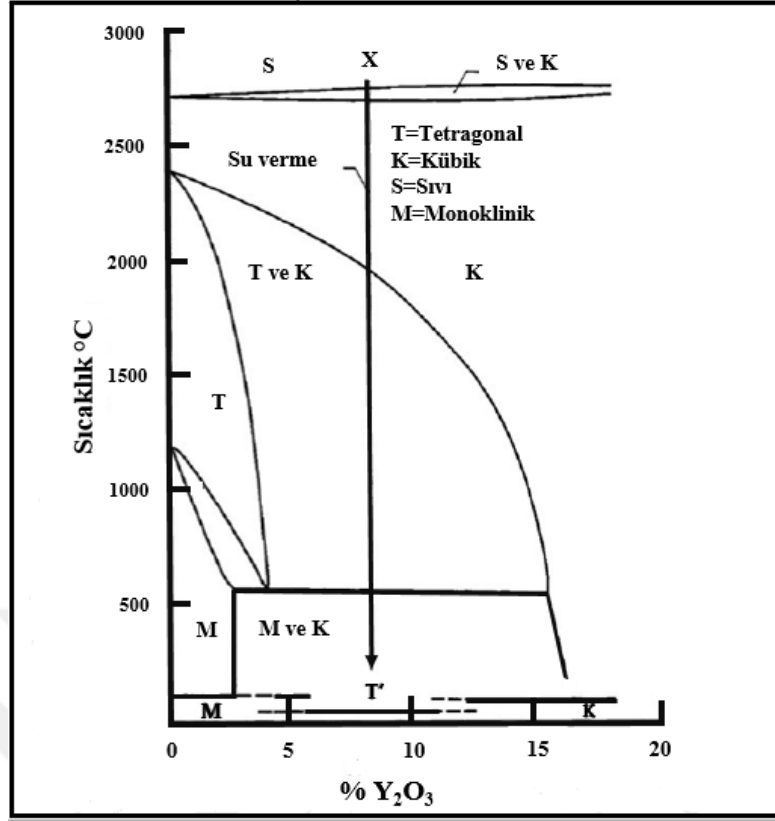
Metal bağ kaplama, üst kaplama malzemesi ile süper alaşım altlık malzeme ile arasında mekaniksel bir bağlantı sağlar ve bu da üst kaplamanın adezyonunu artırır (Bose, 2017). Biriktirme yöntemine bağlı olarak, bağ kaplama tabakasının kalınlığı 75-150 μm ' dir. (Lima, 2022). Ayrıca bağ kaplama, termal bariyer kaplama sistemlerindeki kimyasal homojenliği sağlar ve $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ dönüşümü yoluyla sürünmeye karşı direncini artırır (Mehmooda vd., 2023). Soğutma ve ısıtma çevrimleri sırasında meydana gelen ara yüzey üzerindeki ısı stresi azaltmak için, metalik bağ kaplamanın üst kaplama malzemeleri ile altlık malzemelerinin aralarında ısı genleşme katsayısı olması gerekir (Sjöström ve Brodin, 2010; Hejrani vd., 2017). Bağ kaplamalar genel olarak metalik tozlardan elde edilir ve altlık malzemeyi güçlendirir. CoCrAlY içerikli bağ kaplama, süneklik ihtiyacına cevap veremediklerinden dolayı havacılık uygulama alanlarında artık yeterli görülmemektedir (Mohan, 2010). NiCoCrAlY içeren bağ kaplama ise çok sünektir ve sıcak korozyon ve oksidasyon hasarına karşı yeterli dayanıma sahiptir. Bu kaplamaların oksidasyon ve sıcak korozyon hasarlarına karşı olan üstün dayanımı, reaktif bileşenlerle karşılaştırıldığında itriya elementindeki büyüme hızının düşük olmasıdır (Aygün, 2008). Cr içeriğinin yüksek olması, kaplama malzemesini sıcak korozyona karşı daha iyi korumaktadır. Toz içeriği metaliktir, bu nedenle APS, VPS, HVOF ve D-gun gibi termal sprey kaplama tekniklerinin neredeyse tümü kullanılabilir (Mohan, 2010; Gök, 2015).

2.2.2.3 Üst Kaplamalar

TBC sistemlerinde en yüksek sıcaklık düşüşü, seramik içerikli üst kaplama sayesinde gerçekleşir. Sıcaklık düşüşü 100-300 $^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar olabilir (Pakseresht vd., 2022). Sıcaklık düşüşünü gerçekleştiren bu tabakanın kalınlığı 150 ile 350 μm arasındadır (Meghwal vd., 2020). Bu tabakanın kalınlığı, biriktirme yöntemine bağlıdır. Üst kaplama malzemesinin en üstün özellikleri, sıcaklığın daha fazla azalmasını sağlamak için ısı iletkenliğinin düşük olması, plazma gazının sıcaklığına karşı dayanmak için ergime noktasının yüksek olması, termal genleşme katsayısının yüksek olması sayesinde termal genleşme uyumsuzluğunun

önlenmesi ve gerilme toleransının yüksek olması nedeniyle delaminasyon önlenir. (Mohan, 2010). Bağ kaplama tabakasının gereksinimleri arasında yüksek termal şok direnci, kimyasal uyumluluk ve mikroyapı olarak kararlılık yer almaktadır. Ek olarak, seramik esaslı üst kaplamanın faz kararlılığını oda sıcaklığı ve çalışma sıcaklıklarının yüksek olduğu uygulama alanlarında garanti etmesi gerekir (Grilli vd., 2021).

Sonuç olarak, dikkate alınması gereken çok az durum vardır. Bunlardan biri, Y_2O_3 ile kısmen stabilize edilmiş YSZ'dir. Bu malzemeye alternatif yeni TBC malzemeleri geliştirildi (Moy vd., 2010; Karaoğlu vd., 2011; Karaoğlu vd., 2015). Üst seramik kaplama için YSZ, yüksek ısı genleşme katsayısı ve düşük ısı iletkenlik katsayısı sebebiyle TBC sistemlerinde sıklıkla kullanılan malzemeler arasındadır (Mohan, 2010). Ayrıca YSZ'nin mikro çatlak ve dönüşüm sertleştirilmesi nedeniyle üstün bir termal şok direnci sergiler (Mohsen vd., 2007). Katı bir çözelti halinde zirkonyumu CaO , MgO , Y_2O_3 , Sc_2O_3 , CeO_2 ve diğer nadir toprak oksitleri gibi çeşitli stabilizatörlerle alaşımlandırarak zirkonyumu stabilize etmek mümkündür (Pakseresht vd., 2022). Ağırlıkça %7-8 oranında itriya(Y_2O_3) ile kısmen stabilize edilmiş zirkonya, TBC uygulamalarında gerçekleştirilen bir dizi kapsamlı çalışmada ZrO_2 stabilizatörü olarak kullanılmıştır (Mrdak vd., 2023). YSZ'nin avantajları arasında ısı genleşme katsayısı yüksek, ısı iletkenliği düşük ve termal şok direnci yüksek olması yer almaktadır. Tetragonal ZrO_2 fazının (t' - ZrO_2) kararlılığı sayesinde YSZ TBC'ler yüksek sıcaklıklarda uzun süre dayanabilirler. Y_2O_3 sistemine ait faz diyagramı Şekil 2.14'de gösterilmiştir.



Şekil 2.14: Y_2O_3 sistemine ait faz diyagramı (Özgürlük, 2020).

Faz diyagramında da görüldüğü gibi, Y_2O_3 bileşiği sıcaklık arttıkça kristal yapısında allotropik dönüşüm gösterir (Dokur, 2014). YSZ kaplamaları üretmek için genellikle APS veya EB-PVD yöntemlerinden biri kullanılır (Huo vd., 2022). Kaplama kalınlığı, aerodinamik gereklilik, tamir edilebilirlik ve üretim maliyetleri, kaplama yönteminin seçiminde önemli bir rol oynar. Bu yöntemler, ZrO_2 fazını elde etmek için gereken yüksek soğutma hızlarını sağlar. ZrO_2 'nin t'-fazının yalnızca dönüştürülemez özellikleri değil, aynı zamanda yüksek mukavemeti ve dayanıklılığını da gösterdiği kabul edilir. Özellikleri nedeniyle YSZ, üst kaplama malzemesi için idealdir (Parchovianský vd., 2022). Üst kaplama ve metal bağ kaplama arasındaki termal genleşme uyumsuzluğu nedeniyle kusurlar, ısıtma ve soğutma döngüleri sırasında anlık delaminasyona karşı YSZ malzemesini tercih eder. YSZ dışında $La_2Zr_2O_7$ 'nin üst kaplama malzemesi olarak da iyi bir seçimdir (Karaoğlu, 2023). YSZ'den %20 daha az termal iletkenliğe ve daha düşük elastik modüle sahip daha iyi gerilme toleransına sahiptir. $Gd_2Zr_2O_7$, $Nd_2Zr_2O_7$, $Gd_{2,58}Zr_{1,57}O_7$ ve $Sm_2Zr_2O_7$ ise diğer üst kaplama malzemesi adaylarıdır (Habibi, 2010). TBC sistemlerinde son yıllarda özellikle nadir toprak elementleri ve proklor faz yapılarına sahip üst kaplama malzemeleri de yaygın

bir şekilde kullanılmaktadır. En çok tercih edilen malzemeler arasında $Gd_2Zr_2O_7$ içerikli malzemeler kullanılmaktadır. $Gd_2Zr_2O_7$, gadolinyum ve zirkonyum elementlerinden oluşan bir piroklor yapısına sahiptir. Bu yapının termal bariyer kaplaması olarak kullanılmasının nedeni, korozyona karşı yüksek direnç, yüksek sıcaklıklardaki dayanımı ve termal şok direnci gibi önemli özelliklere sahip olmasıdır. Bu özellikler, malzemenin yüksek sıcaklık ortamlarında stabil kalmasını sağlar ve uzun ömürlü bir performans sunar. TBC'ler genellikle üç katmanlı bir yapıya sahiptir: bir metalik tabaka, bir termal bariyer tabakası ve bazen bir bağlayıcı tabaka. $Gd_2Zr_2O_7$, termal bariyer tabakası olarak kullanılan seramik malzemelerden biridir. Bu tabaka, yüksek sıcaklık uygulamalarında sıcak gazların geçtiği bileşenlerde termal yalıtım sağlar. Bu şekilde, bileşenlerin sıcaklığa dayanıklılığını artırarak performanslarını iyileştirir. Ancak, malzemenin özellikleri ve performansı, uygulandığı koşullara ve bileşenin gereksinimlerine bağlı olarak değişebilir. Bu nedenle, belirli bir uygulama için TBC malzemesi seçilirken, ortamın sıcaklık, basınç ve diğer faktörler göz önünde bulundurulmalıdır. Bu, bileşenin uzun ömürlü ve güvenilir bir şekilde çalışmasını sağlamak için önemlidir (Özgürlük, 2020).

Piroklor yapısı, perovskit yapısına benzeyen bir kristal yapıdır. Bu yapı, genellikle bazı nadir toprak elementleri ve geçiş metallerinden oluşan bileşiklerde bulunur. Piroklor, genellikle $A_2B_2X_6$ kimyasal formülüne sahip bileşikler ifade eder. Burada A ve B nadir toprak elementlerinden oluşurken, X ise oksijendir. $Gd_2Zr_2O_7$ bileşiği, gadolinyum (Gd) ve zirkonyum (Zr) elementlerinden oluşan bir piroklor yapısına sahiptir. Bu yapıda, Gd ve Zr iyonları oksijen iyonları arasında düzenli bir şekilde dizilmiştir. Piroklor yapısı, bu iyonların özel bir düzenlenmesini içerir ve bu düzenleme, bileşiğin belirli özelliklerini belirler. Piroklor yapıları, yüksek sıcaklık stabilitesine ve korozyon direncine sahip olabilirler. Bu özellikler, $Gd_2Zr_2O_7$ gibi bileşiklerin termal bariyer kaplaması olarak kullanılmasını destekler. Bu yapı, malzemenin termal şoklara ve yüksek sıcaklıklara dayanıklılığını artırırken, aynı zamanda belirli kimyasal ve fiziksel özelliklere de katkı sağlar (Döleker, 2018). TBC sistemlerinde GZ üst kaplamasına ek olarak kullanılan diğer bir nadir toprak zirkonatı ise, lantanyum elementi ile oluşturulan $La_2Zr_2O_7$ bileşiğidir. Bu uygulamada, $La_2Zr_2O_7$ genellikle metalik bir tabaka (örneğin, alüminyum oksit), bir termal bariyer tabakası ($La_2Zr_2O_7$ gibi seramik malzemeler) ve bazen bir bağlayıcı tabaka (genellikle nikel) ile birlikte kullanılır. $La_2Zr_2O_7$ 'nin TBC sistemlerinde kullanımı, yüksek sıcaklık ortamlarında çalışan bileşenlerin termal izolasyonunu sağlamak için önemlidir.

Bu malzeme, yüksek sıcaklık dayanımı, termal şok direnci ve korozyon direnci gibi özelliklere sahiptir. Ayrıca, piroklor yapısı, malzemenin istikrarını artırır ve uzun ömürlü performans sağlar. $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 'nin TBC sistemlerindeki kullanımı, özellikle havacılık endüstrisi (jet motorları), enerji üretimi (gaz türbinleri) ve endüstriyel ısıtma sistemleri gibi uygulamalarda yaygındır. Bu malzeme, yüksek sıcaklık ortamlarında çalışan bileşenlerin daha verimli ve dayanıklı olmasını sağlar, böylece sistemlerin performansını artırır ve bakım gereksinimlerini azaltır (Özgürlük, 2020). Ayrıca TBC sistemlerinde kullanılan diğer üst kaplama malzemeleri ise, hegza alüminatlardır. Hegza alüminatlar termal bariyer kaplaması (TBC) sistemlerinde kullanılan önemli bir üst kaplama malzemesidir. Genellikle strontiyum (Sr), baryum (Ba) veya kalsiyum (Ca) gibi alkali toprak veya toprak-alkali metalleri ile alüminyum ve oksijenin birleşiminden oluşurlar. Bu malzemeler, yüksek sıcaklıklardaki dayanımları, termal şok dirençleri ve korozyon karşı olan yüksek dayanımları gibi özelliklere sahip olmalarıyla bilinirler. Hegza alüminatlar, genellikle bazı nadir toprak elementlerinin katkılarıyla optimize edilirler. Bu nadir toprak elementleri, malzemenin termal özelliklerini iyileştirmeye yardımcı olabilirler. Örneğin, yitrium (Y) katkısı, malzemenin termal iletkenliğini azaltabilir ve sıcaklığa dayanıklılığını artırabilir. TBC sistemlerinde Hegza alüminatlar kullanılmasının ana nedenlerinden biri, yüksek sıcaklık uygulamalarında iyi bir termal bariyer oluşturmalarıdır.

Bu malzemeler, genellikle metalik bir tabaka (örneğin, alüminyum oksit), bir termal bariyer tabakası (Hegza alüminatlar gibi seramik malzemeler) ve bazen bir bağlayıcı tabaka (genellikle nikel) ile birlikte kullanılır. Hegza alüminatlar TBC sistemlerindeki kullanımı, özellikle havacılık endüstrisi (jet motorları), enerji üretimi (gaz türbinleri) ve endüstriyel fırınlar gibi yüksek sıcaklık ortamlarında çalışan bileşenler için yaygındır. Bu malzemeler, bileşenlerin termal izolasyonunu sağlayarak performanslarını artırır ve uzun ömürlü bir çalışma sağlar. (Habibi, 2010).

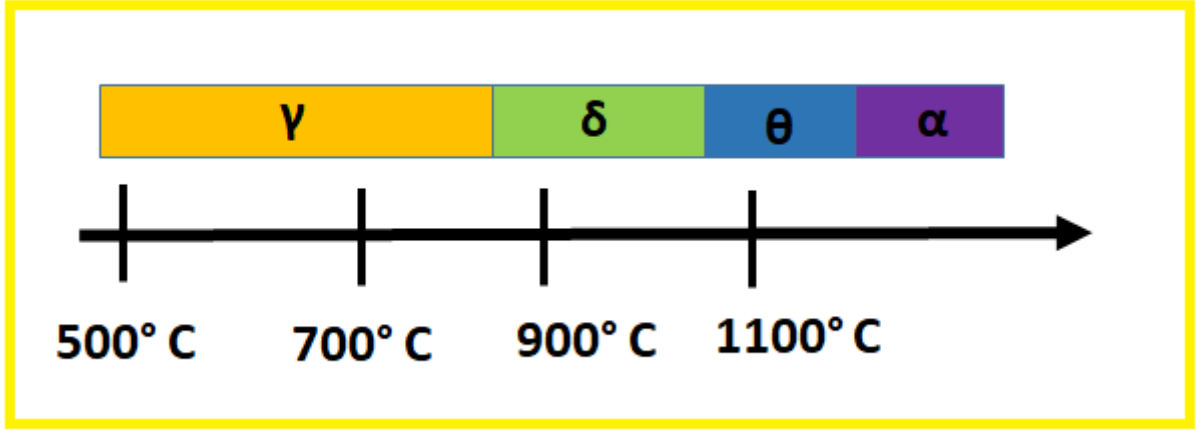
Geleneksel olarak kullanılan ticari üst kaplamalar dışında TBC'ler de üretim atığı olarak ortaya çıkan cürufların da üst kaplama malzemesi olarak kullanılabilir niteliği araştırılmaktadır. Cüruflar, kimyasal kompozisyonlarında genellikle Al_2O_3 , SiO_2 , MgO ve CaO gibi seramik esaslı oksitli bileşikler içerir (Fu vd., 2023). Kompozisyonunda içerdiği bu seramik esaslı oksitli bileşikler, metallere kıyasla termal iletkenliklerinin daha düşük olmasından dolayı termal olarak yalıtım istenilen uygulama alanlarında çalışılması için

alternatif malzeme olarak potansiyel bir adaydır (Singh vd., 2023). Cürufların kimyasal kompozisyonları, mekaniksel özellikleri ve atık malzeme olarak açığa çıkması sebebiyle ekonomik olması düşünüldüğünde son zamanlarda katma değer bakımından yüksek olan TBC sistemleri gibi uygulama alanlarında kullanımları başlanmasına rağmen yapılan çalışmalar yeterli düzeyde değildir (Gómez-Acebo, 2014). Bu tez çalışmasında Mangan cürufu TBC sisteminin üst kaplama malzemesi olarak kullanılarak, yüksek sıcaklık özellikleri ayrıntılı olarak incelenmiştir.

2.2.2.4 Termal Olarak Büyüyen Oksit (TGO) Tabakası

TGO tabakasının oluşma şekli, bağ kaplama olarak kullanılan malzeme, MCrAlY alaşımında bulunan maddelerin oksijene karşı olan ilgisinin bir sonucudur. Al_2O_3 , bu maddeler arasında alüminyuma en yakın olduğu için oksit film tabakasını oluşturur (Habibi, 2014). Altlık olarak kullanılan malzeme kaplama sırasında oksijen ve yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında, bağ kaplamanın yüzeyinde kendiliğinden ve çok yavaş bir şekilde uzayan TGO tabakası oluşur. Bu tabaka, meydana gelebilecek oksidasyonları önler (Roy ve Ghosh, 2023). Bağ kaplamanın yüzeyine seramik esaslı üst kaplama malzemesi uygulanmadan önce, TGO tabakası koşulların ve sıcaklığın uygun olduğu ortamda 3-4 μm büyür (Yang vd., 2024). Daha sonra yapılacak olan üst kaplama, bu oluşan tabakanın adezyona uğramasına yardımcı olur. Bazı olası durumlarda, kaplama sırasında seramik esaslı üst kaplama üzerinde TGO tabakası oluşur (Roy vd., 2022). TBC'leri kullanırken, seramik esaslı üst kaplama üzerinde 8-10 μm kalınlığa sahip bir TGO tabakası birikir (Amer vd., 2023). TGO tabakasının büyüklüğü esas olarak dışarı çıkmış olan katyonların difüzyon hareketi ile kontrol edilir (Habibi, 2014). Seramik üst kaplamalar yapılırken yapıda poroziteler ve çatlaklar oluşur. Bu poroziteler ve çatlaklar oksijenin geçişini sağlar.

YSZ'nin iyonik geçirgenliği nedeniyle, seramik üst kaplama yoğun olduğunda TGO tabakası oluşmasının kaçınılmaz sonuç olduğu görülmüştür (An vd., 2023). TGO tabakası oluşması sırasında Al_2O_3 polimorfik olarak değiştirilir. TBC'lerde sıcaklıkla değişen bu polimorfik dönüşümler hacim genişlemesine neden olur, bu da yapıda çatlamlar ve kırılmalara neden olur (Young, 2008). Al_2O_3 'ün sıcaklığa bağlı olarak meydana gelen polimorfik dönüşümleri Şekil 2.15'de gösterilmektedir.



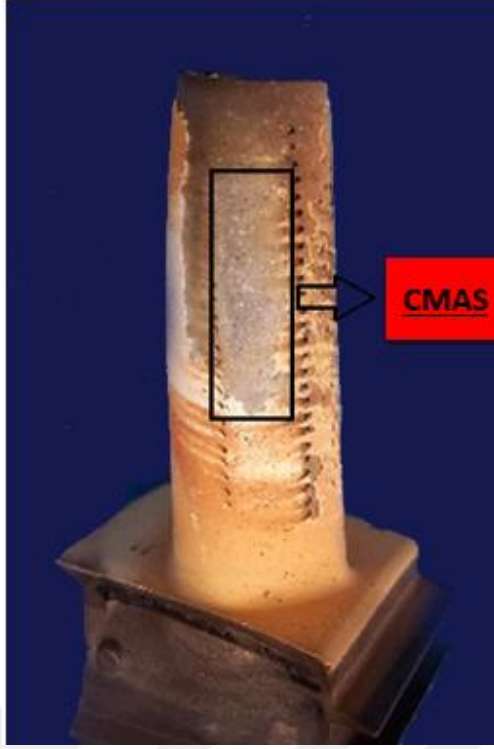
Şekil 2.15: Al_2O_3 ' ün sıcaklığa bağlı polimorfik dönüşümü (Young, 2008).

Şekil 2.15'de görüldüğü üzere, alüminyum oksit direkt olarak $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ değildir. Bu bileşik, artan zaman ve sıcaklık ile kararsız veya yarı kararlı bir halden kararlı bir hale dönüşür (Duan vd., 2023). Bu polimorfik dönüşüm, hacim değişiklikleri nedeniyle yapıda çatlamalara neden olur.

2.3 TBC Sistemlerinde Görülen Hasar Mekanizmaları

Seramik esaslı üst kaplama, metalik bağ kaplama ve süper alaşım esaslı altlık malzemeden oluşan TBC sistemleri, uzay ve havacılık endüstrisinde ki yüksek sıcaklık gerektiren uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Alam vd., 2023). Kullanım koşullarında yüksek sıcaklıklar ve dış etkenler nedeniyle bu sistemlerde çok sayıda hasar mekanizması çalışmaktadır. Bu hasar mekanizmaları, TBCs'in kullanım ömründe etkilidir ve tek başlarına veya birkaçının birleşmesi sonucunda sistem üzerinde etkili olabilir (Traa vd., 2023).

Oksidasyon, sıcak korozyon, termal şok/çevrim, volkanik küllerin ve çöl kumlarının meydana getirdiği camsı $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ (CMAS) etkisi ve katı partiküllerin oluşturduğu erozyon hasarları TBC sistemlerinde meydana gelen önemli hasar mekanizmaları arasındadır (Presby vd., 2023). Türbin kanatlarında meydana gelen CMAS hasarı Şekil 2.16'de gösterilmektedir.



Şekil 2.16: CMAS toz partiküllerinin türbin kanadındaki hasarı (Hu vd., 2020).

2.3.1 Oksidasyon Hasarı

Oksidasyon terim olarak, metal ile oksijenin kimyasal reaksiyonu sonucu oksit formunun oluşmasıdır (Badea vd., 2023). Atmosfer koşullarında saf metaller ve alaşımları oldukça ince yapıya sahip alttaki metali koruma amacı ile oksit tabakası oluşturarak, sıcaklığın düşük olduğu şartlarda metalin daha da fazla oksidasyon hasarına maruz kalmasını önlerler (Parlakyiğit, 2013). TBC sisteminde, üst kaplamanın oksijen geçirgenliği seviyesine, sıcaklığa ve zamana bağlı olarak üst kaplama ve bağ kaplama tabakaları arasında TGO oluşur (Chen vd., 2022). Bağ kaplamada bulunan alüminyum konsantrasyonu miktarına göre alüminyum tamamen tükenip üniform ve kararlı bir yapı olan $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ bozulur ve kompleks oksit bileşikler oluşur (Lim, 2022). Oluşan kompleks oksitler, TBC sisteminin ara yüzeyinde lokal gerilmelerin daha da artmasına sebep olur ve ara yüzeyden kaplama tabakası kopmaya başlar (Chai vd., 2023). Bu sebeple TBC sistemlerinde TGO'nun büyüme miktarı ve adezyonunun oksidasyon hasarı davranışlarındaki en fazla etkili faktörler olduğu, yapılmış olan çalışmalarda gösterilmiştir (Doleker vd., 2021). Metallerin oksitlenmeleri için, termodinamik olarak Gibbs serbest enerjilerinden faydalanılmaktadır (An vd., 2021).

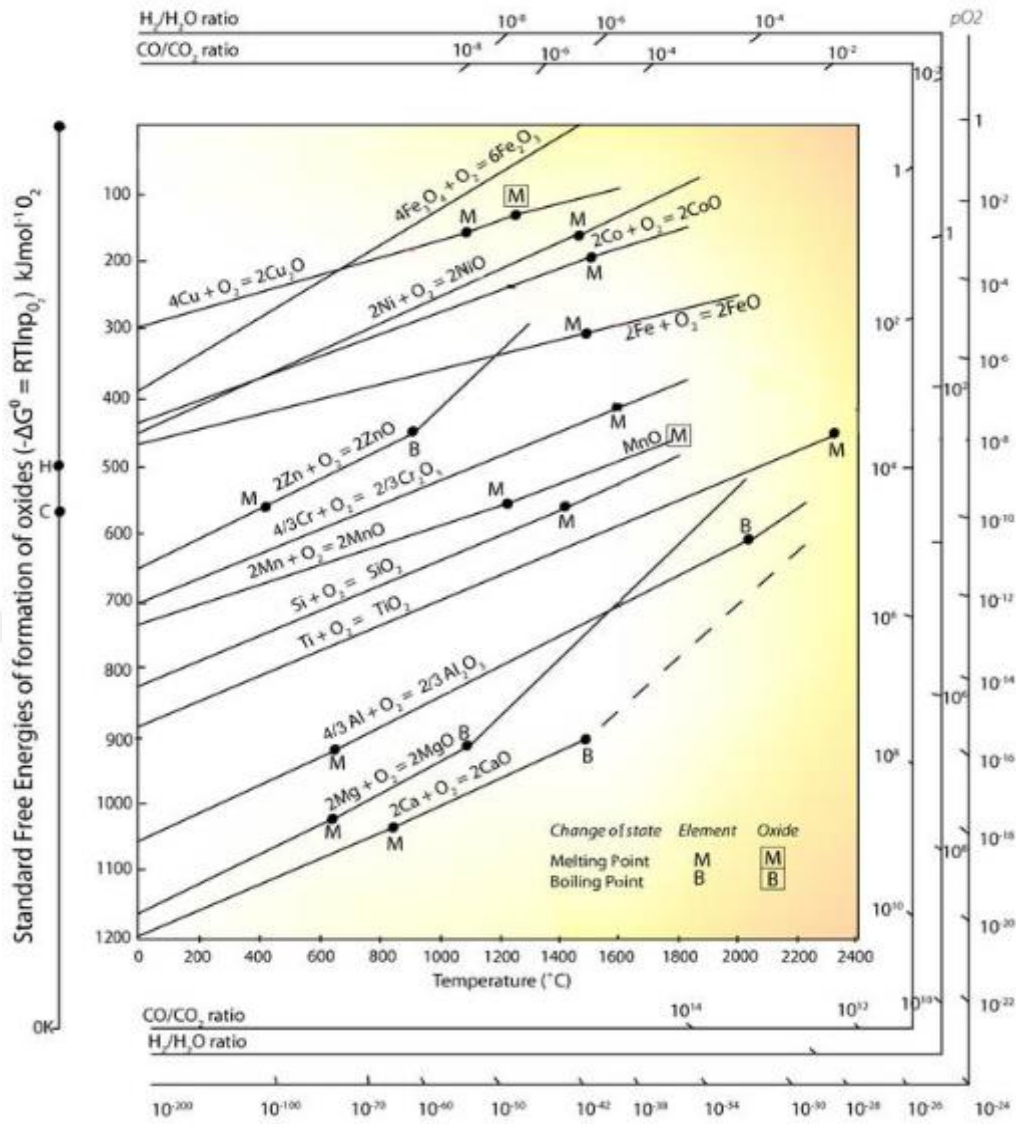
Örneğin; $N + O_2 = NO_2$ kimyasal tepkimesinin gerçekleşmesi için gerekli Gibbs serbest enerjisi formülü Eşitlik 2.1’ de verilen denkleme göre hesaplanır.

$$\Delta G = \Delta G^0 + RT \ln (\alpha_{NO_2} \div \alpha_{NpO_2}) \quad \text{Eşitlik 2.1.}$$

Bu denklemde pO_2 oksijenin kısmi basıncını, α_N ve α_{NO_2} saf metale ve okside ait aktivitelere dir. $\Delta G=0$ olduğunda, yani denge şartlarında Eşitlik 2.1’e göre tekrar denklemde düzenleme yapılırsa farklı oksitli yapıların kararlılık seviyelerini hesaplamak için kullanılabilir. Bu denklem Eşitlik 2.2’ de verilmiştir.

$$\Delta G^0 = - RT \ln (\alpha_{NO_2} \div \alpha_{NpO_2}) \quad \text{Eşitlik 2.2.}$$

Ellingham diyagramına göre elementlerin oluşturdukları oksitli bileşiklerin kararlılık ve reaktivite seviyeleri kolay bir şekilde anlaşılmaktadır. Örneğin, bu Ellingham diyagramına göre; oda koşulları şartlarında oksitlenmesi gerekli olan en düşük serbest enerji Ca elementine ait olmasına rağmen en kararlı oksitli yapı da CaO bileşiğine aittir (Şarkı, 2012). Ellingham diyagramına göre sıcaklık oksidasyon hasarı ile doğrudan etkilidir. Sıcaklık arttıkça oksitlenme daha kolay olurken, oksitli yapıların kararlılıklarında azalma olduğu görülür (Kumar vd., 2023). Metal ve oksitli yapıların termodinamik bakımından kararlılık düzeylerini, oluşmaları ve ya çözümleri için ihtiyaç duyulan serbest enerji ortamının oksijen basıncı CO/CO_2 ve H_2/H_2O basınç parametrelerine bağımlı olarak örnek bir Ellingham diyagramı Şekil 2.17’da verilmiştir.



Şekil 2.17: Ellingham diyagramı (Şarkı, 2012).

TBC sisteminde oksijen molekülleri üst kaplamadan sistem içerisine geçiş yaptığında bileşenlerin oksijenle teması en aza indirilmesi gerekmektedir. Üst kaplama malzemesi ile altlık malzeme arasında bulunan bağ kaplama oksidasyon hasarına karşı direnci yüksek olduğu için sistemi korur (Kumar vd., 2020).

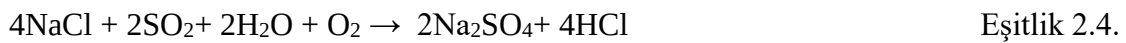
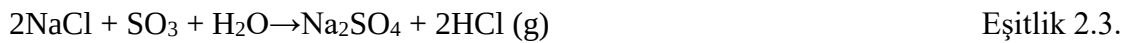
Elementler tek başına kullanıldıklarında oksidasyon hasarına karşı dirençleri düşük olur. Fe hızlı bir şekilde oksitlenerek kütle olarak kayıba uğramaktadır. Al, düşük ergime sıcaklığına sahip olduğu için servis koşullarının yüksek olduğu çalışma ortamlarında kullanımı için çok elverişli değildir (Ouyang ve Suo, 2021).

Cr, çalışma şartlarında tek başına kullanıldığında çok gevrek yapıya sahiptir. Ni ise çalışma şartları için istenilen düzeyde termal ve mekanik özelliklere sahip değildir. Bu sebeple bağ kaplamada elementler çalışma şartlarında kullanıma uygun olarak alaşımlanarak kullanılır (Ebach-Stahl vd., 2021). Farklı olarak bağ kaplama üretimi mümkün olsa da, genel olarak gaz türbin motor kanatları için MCrAlY bağ kaplamalar tercih edilir. Bağ kaplama tabakası TBC sistemini oksidasyona karşı koruyan tabakadır (Parthiban vd., 2024). Bağ kaplama üretimi yapılırken oksidasyon hasar direnci de ciddi bir öneme sahiptir. Bağ kaplamanın porozite ve boşluk oranlarının yüksek olması, yüksek sıcaklıktaki çalışma şartlarında TGO oluşumunu da destekler (Karaoglanlı vd., 2019). Bağ kaplamadaki alüminyum içeriğinin yüksek olması, metal altlık malzemeyi oksidasyona karşı korumak için gereklidir (Shvydyuk vd., 2023). Çalışma sıcaklıkları, oksijenin varlığına bağlı olarak alümina veya TGO tabakasının büyümesine izin verir. Düşük yoğunluklu alümina oluşumu hacim genişlemesine neden olduğundan, alümina büyümesi kontrol altında tutulması gerekir (Pakseresht vd., 2022). Hacimde ki bu değişiklik nedeniyle 1 GPa'ya kadar basınç gerilmeleri meydana gelir (Clarke, 2003). Hacim değişimini durdurmak için TGO α -alümina olmalıdır (Rabiei ve Evans, 2000). TGO arttıkça bağ katındaki Al miktarı azalır. Bu, bağ katındaki Al eksikliğinin diğer oksitlerin (Ni ve Co içeren Y_2O_3 ve $Y_3Al_5O_{12}$ gibi) oluşmasına neden olur (Gell, 1987; Rabiei ve Evans, 2000; Yang vd., 2017). Zayıf mekanik özellikleri nedeniyle bu spinel fazlar arzu edilmez ve oksidasyonu hızlandırarak ek oksijen yolları sağlar (Clarke, 2003; Wu vd., 2011). Ek basınç gerilimi, TGO katmanı ve 3-6 GPa'ya kadar olan alt tabaka arasındaki ısıl genleşme uyumsuzluğu nedeniyle ortaya çıkar (Evans vd., 2001). Sıkıştırma artık kaplamanın yayılmasına neden olan ana nedendir (Atkinson vd., 2000). Düzlem içi gerilme, TGO'nun artması nedeniyle de sürünme deformasyonuna neden olabilir (Strangman vd., 2006). APS kaplamaları, fiziksel yapıştırma nedeniyle pürüzlü bir yüzeye sahip olmalıdır. Bununla birlikte, düzlem dışı gerilmeler oluşturma potansiyeline sahiptir. Ek olarak, mikro çatlaklar düzensiz oksidasyona neden olur ve bunun sonucunda oksit tabakasının büyümesi düzensizdir (Aygün, 2008).

2.3.2 Sıcak Korozyon Hasar Mekanizmaları

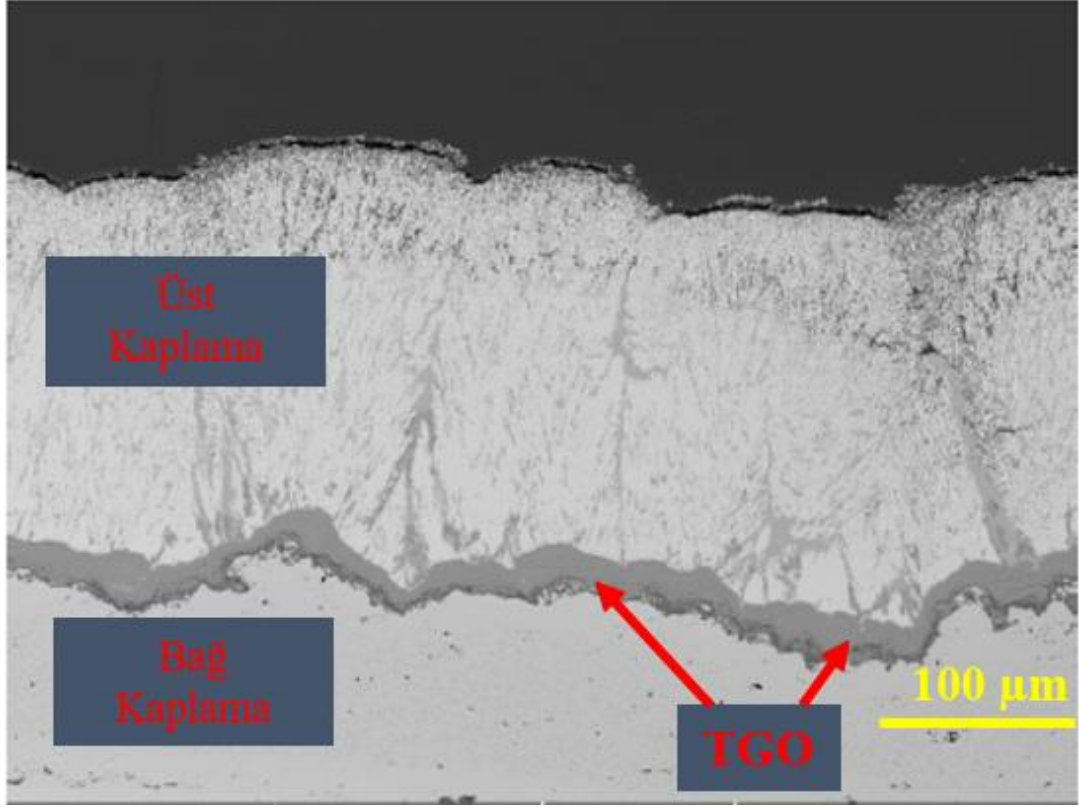
Havacılık, uzay, otomobil ve gemicilik gibi yüksek sıcaklık uygulamalarında gaz türbin motorları gibi enerji üretim ekonomisini ve verimliliğini artırma çabaları nedeniyle, çalışma sıcaklığı yüksek olan ortamların TBC üzerindeki etkisinin araştırılması kaçınılmaz bir hale

geldi (Vijay Kumar vd., 2022). Yapılan araştırmalar, yüksek sıcaklık gerektiren uygulama alanlarında TBC’lerde, genellikle yakıtın kalitesinin düşük olmasından dolayı gelen partiküllerin kaynaklanan ergimiş tortu nedeniyle zarar verdiğini göstermiştir (Jatadhara vd., 2023). Ucuz ve safsızlığı yüksek olmayan alternatif yakıtların kullanılması, sıcak kesit türbin bileşenleri üzerinde P, Na, V, K, Ca ve S açasından zengin aşındırıcı özelliğe sahip bileşiklerin oluşumuna teşvik edilir (Gök, 2015; Özgürlük, 2016). Devamlı olarak servis koşulları yüksek sıcaklıkta çalışıldığında donma-çözölme sürecinde, bu safsızlıklar TBC sistemi ile kimyasal olarak etkileşmektedir. Sıcaklığın yüksek olduğu şartlarda çalışırken bu yapılar TBC mekanizmasına yapışır, ergir veya ergitir. Metalik bağ kaplama ve süper alaşım altlık malzemelerinde aşınma, sıcak korozyon denilen hasar mekanizması nedeniyle hızlanır. TGO tabakasında da oksidasyon hızlanır (Zhou, 2015). Bu hasar mekanizması, yapıyı çatlamalar, bozulmalar ve dökölmelere neden olur. Bu hasar, seramik üst kaplamadan başlar ve daha sonra diğer katmanlara yayılır (Huo vd., 2022). Vanadyum oksit (V₂O₅) ve Sodyum Sülfat (Na₂SO₄) tuzları, bu hasar mekanizmasında seramik üst kaplama malzemesinde ki porozitelerden ve boşluklardan içeri girmektedir (Pakseresht vd., 2022). Kullanım sırasında vanadyum ve sodyum tuzları üst kaplama malzemesinin stabilize edilmiş yapısını bozarak altlığa ve bağ kaplamaya geçer. Genellikle üst kaplama malzemesi YSZ olan TBC’lerde, yakıt kalitesinin düşükölüğu sebebiyle kirliliklerinden gelen tuzlar (V₂O₅, NaCl ve Na₂SO₄) servis koşullarında eriyerek YSZ üst kaplama malzemesiyle reaksiyona girer (Mehmooda vd., 2023). Stabilize olmuş zirkonyanın kararlılığını kısmi olarak bozmaktadır. Zirkonya, tetragonal fazda ki sahip olduğu stabil olan kararlılığını kaybederek kübik veya monoklinik faza geçer (Iqbal vd., 2023). Korozyon olayında, kaplama yüzeyinde hasara neden olan sıcak korozyon hasar mekanizması nedeniyle yüzeyde biriken eriyik tuzlar Eşitlik 2.1, Eşitlik 2.2 ve Eşitlik 2.3 denklemlerine göre ilerler (Eliaz, 2002).



Bu denklemlere göre, sülfat, kükürdün ve sodyum klorürün tepkimeye girmesiyle oluşmuştur (Pakseresht vd., 2022). Birikmiş bu sodyum sülfat bileşeni kaplama yüzeyinde birikir. Sodyum sülfat bileşiği yaklaşık 885°C’lik bir ergime sıcaklığında artar ve kaplamanın yüzeyinde bulunan porozite ve boşluklardan içeri girer. İçeri giren eriyik, bu

bölümlerde elektrokimyasal reaksiyonları oluşturur (Raza vd., 2022). Sıcaklığın daha düşük olduğu durumlarda bile demir ve nikel içeren bağ kaplamaları ve altlık malzeme ile anodik tepkimeler meydana getirerek TBC sistemlerine büyük zarar vermektedir (Barwinska vd., 2023). EB-PVD yöntemi ile üst kaplama malzemesi üretilen sıcak korozyon hasarına uğramış TBC numunesine ait sıcak enine kesit görüntüsü Şekil 2.18’de verilmiştir.



Şekil 2.18: EB-PVD yöntemi ile üst kaplama malzemesi üretilen sıcak korozyon hasarına uğramış TBC numunesine ait sıcak enine kesit görüntüsü (Özgürlük, 2016).

Sıcak korozyon hasar mekanizması gerçekleştiği sıcaklığa göre 2 Tip olarak meydana gelmektedir. Tip 1, yüksek sıcaklık sıcak korozyonu ve Tip 2 ise düşük sıcaklık sıcak korozyonu olarak adlandırılır (Roy ve Ghosh, 2023). Bu iki tür sıcak korozyon, alaşımın özellikleri, alaşımın termomekanik durumu, yakıttaki kirleticilerin özellikleri, sıcaklık çevrimi ve sıcaklık, hava akımının hızı, gazın özellikleri ve gaz hızları, aşınma gibi birçok faktör tarafından etkilenebilir (Raza vd., 2022).

2.3.2.1 Yüksek Sıcaklık Sıcak Korozyonu (Tip I Sıcak Korozyon)

Tip I olarak bilinen yüksek sıcaklık sıcak korozyonu, 850 °C'nin üzerinde meydana gelen korozyon türüdür (Mehmooda vd., 2023). Üst yüzeydeki alkali metallerin ergimesi bu tür korozyonun başlangıcıdır (Reddy vd., 2022). Reaksiyonlar, bir dizi kimyasal etkileşimin ardından altlık malzemenin üzerini kaplayan kroma kadar gider. Malzeme, kromun tükenmesinin ardından oksidasyona uğrar ve rijitliğini tamamen kaybeder (Huang vd., 2023). Tip 1 sıcak korozyonunda Na_2SO_4 baskın tuzdur. Genel olarak deniz atmosferi sodyum sağlar, ancak yakıtlardaki bazı emrüteler de sodyum sağlar (Honarparvar vd., 2021). Na ve SO_2 reaksiyonu, yüksek sıcaklıktaki yanma sırasında Na_2SO_4 oluşturur (Iqbal vd., 2022). Yakınlarda bulunan kurşun, fosfor ve vanadyum gibi elementlerin tuz karışımına dahil olduğunda, sodyum sülfat ile birleşip ve sıcaklığın daha düşük olduğu durumlar da bile korozyona neden olur (Eliaz, 2002; Özgürlük, 2016).

2.3.2.2 Düşük Sıcaklık Sıcak Korozyonu (Tip II Sıcak Korozyon)

Tip II olarak adlandırılan düşük sıcaklık sıcak korozyonu genellikle 600°C ile 850°C sıcaklıkları arasında meydana gelen korozyon türüdür (Cai vd., 2022). CoSO_4 ve Na_2SO_4 bileşiklerinin 550°C olan ötektik ergime sıcaklığının üzerinde bir karıncalanma korozyonu meydana gelir (Saxena vd., 2019). Bu tür korozyonda SO_3 gazları meydana gelir. Aynı türde, NiSO_4 ve Na_2SO_4 bileşikleri SO_3 gazını yanma maddesi olarak üreterek Tip II Sıcak korozyonunu üretirler (Miller vd., 2021). Düşük ve yüksek sıcaklık sıcak korozyonunu karşılaştırmak için kullanılan SO_3 gazının kısmi basıncı Nikel esaslı alaşımlarda meydana gelir (Meier, 2022).

2.3.3 Termal Şok/Çevrim Hasarı

Termal şok, malzemelerin hızlı bir şekilde sıcaklık değişikliklerine maruz kaldığında ortaya çıkan bir hasar türüdür (Rajabi vd., 2022). Özellikle yüksek sıcaklıklara maruz kalan malzemelerde meydana gelir. TBC sistemleri genellikle yüksek sıcaklıklara dayanıklı malzemelerin üzerine uygulanan kaplamalardır. Bunlar genellikle gaz türbinleri ve benzeri yüksek sıcaklıkta çalışan sistemlerde kullanılır. Termal şok hasarı, malzemelerdeki termal genişleme farklarından kaynaklanır (Yan vd., 2023).

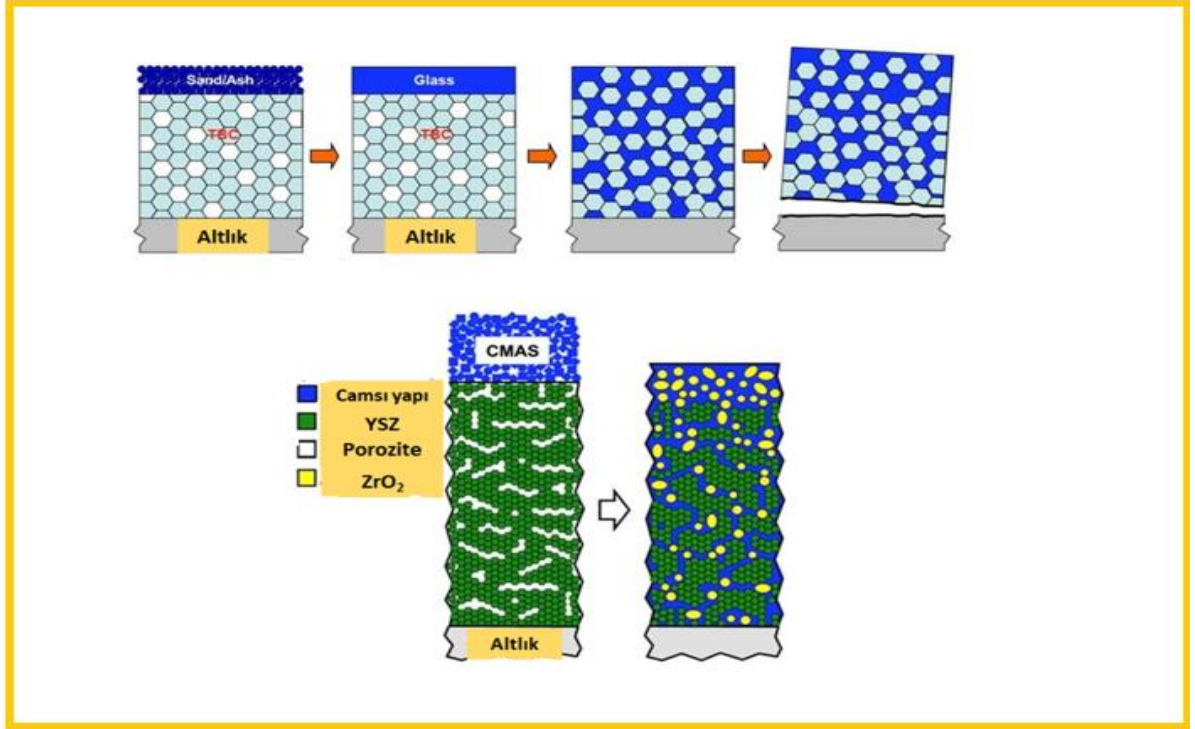
Malzemeler ısındığında genellikle genişler ve soğuduklarında ise daralır. Eğer malzemenin bir kısmı hızla ısıtılıp soğutulursa, bu genişleme ve daralma farkları nedeniyle gerilimler oluşabilir. Bu gerilimler, malzemede çatlaklar, soyulmalar veya deformasyonlara neden olabilir. TBC sistemlerinde termal şok hasarı, genellikle kaplamanın hızla ısınması veya soğuması sonucunda meydana gelir (Hu vd., 2020). Örneğin, gaz türbinleri çalışırken ani bir duruşa veya hızlı bir başlangıca maruz kalabilirler. Bu durumda, türbin kanatlarındaki TBC kaplamaları hızla ısınır veya soğur ve bu termal şoklar nedeniyle hasar görebilir (Rahimi vd., 2023). Termal şok hasarının etkileri çeşitli olabilir. Bunlar arasında kaplama soyulması, çatlaklar, erozyon, delaminasyon (katmanların ayrılması) ve mekanik dayanıklılığın azalması yer alabilir (Essa vd., 2021). Bu hasarlar, TBC sistemlerinin performansını düşürebilir ve uzun vadede sistemde arızalara neden olabilir. Termal şok hasarını azaltmak veya önlemek için birkaç önlem alınabilir. Bunlar arasında kaplama malzemelerinin seçimi, kaplamanın kalınlığı ve kompozisyonu, kaplama altındaki yüzeylerin hazırlanması, tasarım optimizasyonu ve sistemlerin çalışma koşullarının kontrolü bulunur (Pakseresht vd., 2022). Ayrıca, kaplama altındaki malzemelerin termal genişleme katsayılarının uyumlu olması ve malzeme ara yüzeylerinde stresleri azaltmak için tampon tabakalar kullanılması gibi faktörler de termal şok hasarını azaltmada yardımcı olabilir (Bernier, 2001; Evans vd., 2001; Scrivani vd., 2008; Limarga ve Clarke, 2009). Kırılganlıkları fazla olan seramik gibi malzemelerin dezavantajlarından birisi de termal şok dayanımlarının düşük olmalarıdır. Termodinamik şok direnci, termal genişleme katsayısına, poisson oranına, kırılma mukavemetine, termal iletkenliğe ve elastik modülüne bağlıdır (Guo vd., 2004; Guo vd., 2006; Kara, 2008).

2.3.4 (CaO, MgO, Al₂O₃, SiO₂) CMAS Hasarı

CMAS (Kalsiyum, Magnezyum, Alüminyum ve Silikat) hasarı, TBC sistemlerinde yaygın bir sorundur (Chavez vd., 2021). CMAS, çoğunlukla atmosferden gelen kirliliklerin yanı sıra, yakıtın veya motor yağının bileşenlerinden oluşan bir tür cam benzeri bir malzemedir. CMAS, yüksek sıcaklıklarda erir ve TBC kaplamalarının altında birikir (Perrudin vd., 2019). CMAS hasarı genellikle aşağıdaki süreçleri içermektedir;

- CMAS Oluşumu: TBC sistemlerinin çalıştığı yüksek sıcaklıklarda (genellikle 1000°C civarı), atmosferdeki kirliliklerden ve yakıt bileşenlerinden gelen silika,

kalsiyum, magnezyum ve alüminyum gibi elementlerin birleşmesiyle CMAS oluşabilir (Velasco vd., 2021). CMAS, genellikle türbin kanatları üzerinde birikir ve zamanla bir tabaka oluşturur. CMAS (Kalsiyum, Magnezyum, Alüminyum ve Silikat) hasarı Şekil 2.19’da verilmiştir.



Şekil 2.19: CMAS (Kalsiyum, Magnezyum, Alüminyum ve Silikat) hasarı (Kumar, 2018).

- Kaplama Delaminasyonu: CMAS tabakası, TBC kaplamasıyla yapışmaz bir arayüz oluşturur ve mekanik bir bağlantı sağlamaz (Li vd., 2021).
- Bu durumda, CMAS tabakası ve kaplama arasındaki termal genleşme farkları nedeniyle gerilmeler oluşur. Bu gerilmeler zamanla artar ve kaplamanın altındaki bağlantı zayıflar, sonuçta kaplama delaminasyonu meydana gelir. Kaplama delaminasyonu, TBC'nin koruyucu etkisini azaltır ve sistemde hasarlara neden olur (Ma vd., 2023).
- Al_2O_3 Oluşumu: CMAS, yüksek sıcaklıklarda erirken, alüminyum oksit içeren TBC kaplamasının içine nüfuz edebilir. Bu durumda, CMAS ile alüminyum arasında bir reaksiyon gerçekleşir ve Al_2O_3 bileşikleri oluşur (Ma vd., 2023). Al_2O_3 bileşikleri,

kaplama içerisinde çeşitli fazlar ve kristal yapılar oluşturabilir. Bu durum, kaplama yapısında değişikliklere ve zayıflamalara yol açar.

CMAS hasarı, TBC sistemlerinin performansını olumsuz etkiler ve uzun vadede ciddi arızalara yol açabilir (Li vd., 2021). Kaplama delaminasyonu, termal bariyerin zayıflamasına ve malzemelerin daha yüksek sıcaklıklara maruz kalmasına neden olarak dayanıklılığı azaltır. Al_2O_3 oluşumu ise kaplama içerisinde çeşitli faz geçişlerine ve kimyasal reaksiyonlara yol açar, kaplama yapılarının bozulmasına ve hasarların artmasına neden olabilir (Avcı vd., 2020).

2.3.5 Katı Partiküllerin Oluşturduğu Erozyon Hasarları

Aşınma, malzemelerin farklı malzemelerle temas etmesi sonucunda meydana gelen malzeme kaybı hasarlarının genel adıdır. Aşınma, mekanik ve/veya kimyasal etkilerle malzemelerde olumsuz sonuçlara neden olur (Beake, 2021). Bu durum, endüstriyel makine bileşenlerinin güvenilirliği üzerinde büyük bir etkiye sahip olmanın yanı sıra yüksek maliyetlere yol açar. Aşınma konusunda sistematik çalışmalar 1950-1960'lı yıllarda başlamış olsa da, günümüzde hala bu sorunlar devam etmektedir ve aşınma olgusunun karmaşıklığını açıkça ortaya koymaktadır (Bonu vd., 2022). Katı partikül erozyonu da endüstride sıkça karşılaşılan bir aşınma sorunudur ve bu konuda çeşitli akademik çalışmalar devam etmektedir (Kleis ve Kulu, 2008).

Bu erozyon hasarı, malzeme yüzeyine küçük katı partiküllerin art arda çarpması sonucunda malzeme yüzeyinde meydana gelen hasar mekanizmalarının adıdır (Pakseresht vd., 2022). Parçacıkların yüksek hızda gaz ve ya sıvı ortamda malzeme yüzeyine çarpması ve ya sürtünmesi sonucu katı partikül erozyonu oluşur. Bu tür erozyonun etkileri uzun süredir bilinmektedir. Bununla birlikte, aşındırıcılığı yüksek hızlı olan su jeti kesimi ve kumlama gibi alanlarda kullanışlı olan SPE'nin yanı sıra, jet ve buhar türbinleri, partiküllü madde taşıyan boru hatları, vanalar, yakma sistemleri ve akışkan yataklar gibi mühendislik uygulamalarında çok ciddi bir problemdir (Patnaik vd., 2010). Katı partikül erozyonu, aşındırma mekanizması kompleks ve birden fazla süreci içerir. Genel olarak, katı partiküllerin malzeme yüzeyine çarpması sonucunda mekaniksel hasarlardır (Zhang vd., 2023).

Ancak katı partikül erozyonu esnasında, partikül ve yüzey arasında fiziksel, kimyasal ve termal tepkimeler gibi ikincil süreçler de ciddi oranda önemlidir. Örneğin, uçak gaz türbini/kompresör kanatları, kum bulamaçları taşıyan boru hatları, petrol arıtma ve arama sistemleri, roket motoru kuyruk memeleri ve uçucu küle maruz kalan kazan boruları gibi sistemler erozif ortamlarda çalışmaktadır. Malzemelerin aşındırıcıya karşı tepkilerinin deney koşulları altında test edildiğinde bir korelasyon olduğu çok erken fark edilmiştir (Uczak de Goes vd., 2022). Yüksek teknolojiyle geliştirilen makine bileşenleri, günümüz endüstrisinde, giderek zorlaşan çalışma koşullarında gereken performansı sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Ancak, bu zorlu çalışma koşulları nedeniyle katı partikül erozyon aşınması, makine bileşenlerinde çeşitli arızalara ve önemli ölçüde azalmış ömürlere neden olmaktadır (Pakseresht vd., 2022). TBC sistemlerinin bozulmasında etkili olan katı partikül erozyon hasarı, aşındırıcı bir ortam (kum fırtınasının bulunduğu bölgeler) ve yüksek ısı akışının varlığında oldukça önemli hale gelmektedir. Gaz türbin motorundan geçen partiküller parçalanmaya yol açabilir (Prashar vd., 2023). Kum fırtınasının bulunduğu bölgeden geçen uçağın gaz türbin kanadındaki aşındırıcı toz parçacıklarının verdiği hasarı gösteren resim Şekil 2.20’de gösterilmiştir.



Şekil 2.20: Katı partikül erozyon hasarına uğramış gaz türbin kanadı (Prashar vd., 2023).

Katı partikül erozyon aşınma mekanizması sırasında, partikülün çarptığı yüzeyin özellikleri, çarpma açısı, çarpma hızı, kütleli debi ve partikül boyutu gibi parametreler, aşınma hızını önemli ölçüde etkilemektedir (Mittal ve Paul, 2022). Sünnek ve gevrek malzemelerde, aşınma miktarı partiküllerin çarpma açısına göre değişir. Sünnek malzemelerde, kesme veya aşınmış olan parçanın yer değiştirmesi sonucunda kalıcı olarak deformasyon (plastik deformasyon) oluşurken, tokluğu düşük olan (gevrek) malzemelerde aşındırıcı partiküllerin yüzeye çarpma noktasından çevresine doğru ilerleyen çatlaklar ve bu çatlakların birleşmesiyle malzeme de kayıp meydana gelir (Cernuschi vd., 2016). Ayrıca, gevrek ve sünnek malzemelerde zamanla ilişkili katı partikül erozyonu aşınması mekanizması da birbirinden farklıdır. Sünnek olmayan malzemelerde zamanla ilişkili erozif aşınma lineer olurken, aşındırıcı partiküllerin malzeme yüzeyinde kısmen gömülmesi sebebiyle sünnek malzemelerde geçici bir dönem olan kuluçka (inkübasyon) dönemi meydana gelir (Velusamy vd., 2023). Partiküllerin yüzeye çarpışma süresi uzadıkça, ilk olarak yüzeyde yapışmış olan parçalar kopar ve ardından hedef malzeme yüzeyinde plastik ve elastik deformasyon hasarları oluşur (Steinberg vd., 2022).

2.4 Cüruflar

Cüruf ; Metal ve ya metal esaslı hammaddelerin eritilmesi sonucu meydana gelen ve metal esaslı hammaddeden daha düşük yoğunluğa sahip oksit ve silikat gruplarını içeren ve metal ile yoğunluklarının farklı olması nedeniyle eriyiğin yüzeyinde biriken atık ürün olarak tanımlanmaktadır (Manchisi vd., 2020). Karakteristik olarak özelliklerine göre başlıca 3 gruba ayrılırlar; demir alaşımlarını içeren cüruflar, Fe alaşımlarını içermeyen gruplar ve yakma işlemi sonucu ortaya çıkan cüruf gruplarıdır. Cürufların miktarı üretilen malzeme oranına bağlıdır (Shen vd., 2003). Endüstriyel atık günümüzde çeşitli sektörlerde yaygın olarak kullanılan cüruf çeşitleri aşağıda sıralanmıştır.

2.4.2 Endüstriyel Atık Olarak Açığa Çıkan Cüruf Çeşitleri

Sıvı ham demir üretiminin devamında ham çelik üretiminin ve nihai ürün olarak yassı ve slab üretimine kadar ki bütün proseslerde cüruf oluşmaktadır. Üretimi yapılan nihai ürün kimyasal kompozisyonunda cüruf istenmeyen bir bileşiktir (Soysal, 2014).

Metalurjik atık olarak ortaya çıkan cüruflar; yüksek fırında demir üretimi sonucunda açığa çıkan cüruflar, çelik üretimi sonucu açığa çıkan çelikhane cürufları, demir dışı metallerin (Mangan, Alüminyum, Bakır gibi) üretiminde açığa çıkan cüruflardır.

2.4.2.1 Yüksek Fırın ve Çelikhane Cürufları

Yüksek fırın cürufu, hammaddesi demir olan cevherin yakıt olarak kullanılan kok kömürü ve kireçtaşı ile reaksiyon göstermesi, ergimiş dökme demir ve hammaddedeki minerallerden ve yanma olayı sonucu ortaya çıkan kalıntılardan meydana gelen silikat kompozisyonları içeriğine sahip sıvıdır (Duan vd., 2023). Dökme demire göre daha düşük yoğunluğa sahip olduğu için üstte yüzer şekilde kalır ve kolaylıkla ayrışır. Her bir ton dökme demir üretim sonucunda 240-310 kg aralığında cüruf elde edilir (Bhagyaraj, 2023). Yüksek fırın cürufu, ergiyik formda fırından alındıktan sonra yüksek basınçla bol miktarda ve şiddetli su püskürtülmesiyle beraber su havuzuna düşer. Ani bir soğuma işlemine maruz kalır ve bu soğuma sonucunda milimetrik tanecikler biçiminde camsı yapıya sahip malzeme meydana gelir (Elmı, 2022).

İlk işleme adımında, cüruf ya söndürülür ya da yavaşça soğutulur. Yüksek fırın cürufları genellikle dört farklı şekilde katılaştırılır. Katılaştırma cüruf kaplarında veya hava içinde dökme pedleri hava soğutmalı cüruf oluşturur. Su ile söndürmede granüle cüruf oluşur. Su ile köpürmede yüksek gözenekliliğe sahip pomza cürufu yapıları oluşur. Hava ile üfleme veya buhar ısı yalıtımı ile cüruf yünü oluşur (Reuter vd., 2004). Yüksek fırın cürufu, alüminyum, magnezyum ve kalsiyum bakımından oldukça zengin camsı yapıya sahip bir silikat grubudur. Kimyasal kompozisyonu hammadde ve yüksek fırın içerisinde gerçekleştirilen ilave edilen elementlere bağlıdır. Ağırlıkça yüzde (%) olarak yüksek fırın cürufunun içerisinde bulunan kimyasal bileşikler Tablo 2.3’de verilmiştir.

Tablo 2.3: Yüksek fırın cürufunun içerisinde bulunan kimyasal bileşiklerin ağırlıkça bulunan yüzde (%) oranları (Sas vd., 2021).

Bileşikler	Oranlar (%)
CaO	% 35-%42
SiO ₂	%35-%40
Al ₂ O ₃	%8-%15
MgO	%8-%9
S	%0,7-%1,5
FeO	%0,5-%0,8
MnO	%0,3-%1

Yüksek fırında üretilen sıvı pik demire uygulanan yüksek fırın sonrasında ve çelikhane işlemlerinin öncesinde (Si, P, S vb. elementlerin uzaklaştırılması), sıvı olarak bulunan pik demirin kompozisyonundaki karbonu gidermek için bazik oksijen fırınlarına saf oksijen üfleme işlemi uygulanır. Çelik üretimlerinde kullanılan yöntemle göre sıvı ham demirden farklı oksit gruplarından oluşan kompozisyona sahip çelikhane cürufu atık olarak açığa çıkar. Çelik cürufu, demirden çelik üretiminin bir yan ürünüdür. Farklı besleme malzemesi ve eritme ile çok çeşitli kimyasal ve mineral bileşimler içerir. Yüksek fırın cürufları ile karşılaştırıldığında, bazik oksijen fırın (BOF) cürufu ve elektrik ark ocağı fırın (EAF) cürufları bir oksidasyon sürecinden geçtikten sonra üretilir.

Bu nedenle daha yüksek Demir oksit içeriğine ve Fe %2-8, CaO %40-60, MgO %3-10, MnO %1-8 gibi birkaç değerli element ve bileşiklere sahiptir (Reuter vd., 2004). BAF ve EAF çelik cüruflarına ait kimyasal bileşim Tablo 2.4'te verilmiştir.

Tablo 2.4: Bazik oksijen fırın (BAF)cürufları ve Elektrik ark ocağı fırın (EAF) cüruflarının kimyasal kompozisyonu (%) (Uysal ve Bahar, 2018).

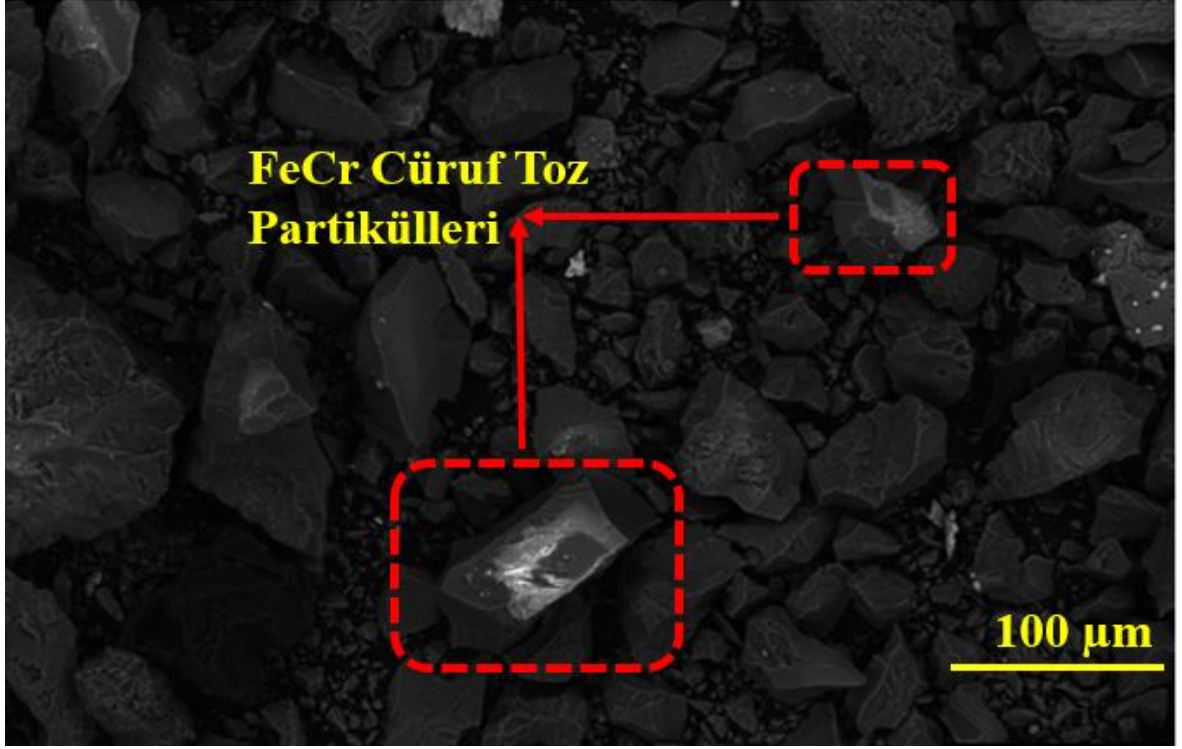
Oksitler (%)	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	MnO	P ₂ O ₅
BAF Cürufu	45-60	10-15	1-5	3-9	7-20	3-13	2-6	1-4
EAF Cürufu	30-50	11-20	10-18	5-6	8-22	8-13	5-10	2-5

2.4.2.2 Ferrokrom (FeCr) Cürufları

Endüstride, paslanmaz çeliğin önemli bir bileşeni olan ferrokrom üretiminde açığa çıkan yan ürüne ferrokrom cürufu denir. Üretilen ürünün daha ağır kısmı ferrokrom metaldir ve dolayısıyla cüruf katmanına doğru batar (Das vd., 2023). Ferrokrom metal eriyiği cüruftan izole edilip, fırın tabanında kalır. Metallerin ve cürufların özgül ağırlıklarındaki farklılıklar bu süreçte fayda sağlar. Sonuç olarak metal ve cüruf aynı kanal üzerinden boşaltılır (Collivignarelli vd., 2020). Dünya genelinde metalürji bakımından belirli kalite de olan ferrokrom üretimi, kromit (krom ve demir kompozisyonuna sahip mineral) hammaddesinin indirgeme ürünü olarak kok kömürü kullanılarak elektrik ark ocaklarında 1500°C-1700°C sıcaklık aralığında indirgenerek üretimi sağlanmaktadır (Miyan vd., 2023). Bu işlemlerin ardından üretilen ürün potaya dökülür ve yüzeyde kalan sıvı haldeki cüruf, yaklaşık 1000°C-1550°C sıcaklıkları aralığında özel olarak tasarlanmış cüruf potalarına alınır, stok sahalarına götürülür ve soğuması için bırakılır (Bramfitt, 2007). Ergimiş cüruf, işlenmesini kolaylaştırma amacı ile su jeti ile soğutulur veya atmosferik koşullarda hava soğutması için bırakılır.

Ferrokrom cürufları havada soğumaya bırakılması sonucunda aktif olmayan ve kristal bir form kazanır. Bu sebeple bu cüruf türüne “ Havada soğutulmuş elektrik ark fırın cürufu” olarak da bilinir (Ahmed vd., 2023). Üretimi yapılan cürufun fiziksel olarak özellikleri

büyük ölçüde soğutma işlemine bağlıdır. Hava ile soğutulan cüruf daha büyük boyutlarda olurken, su jeti ile soğutulan cüruf granüle olur. Hava ile soğutulan yöntemde; cüruf geometrik olarak iri agregalar olarak oluşurken, su jeti ile soğutulan cüruf ince agregalar şeklinde üretilir (Das vd., 2023). FeCr cüruf partikülleri genel yapı itibariyle köşe kenarlıdır. FeCr cüruf tozuna ait partiküllerin SEM görüntüsü Şekil 2.21’de verilmiştir.



Şekil 2.21: FeCr cürufu tozuna ait SEM görüntüsü (Küçük vd., 2018).

Ferrokrom cürufları karbon miktarına göre 3 gruba ayrılırlar; düşük karbon içeriğine sahip ferrokromlar, orta karbon içeriğine sahip ve yüksek karbon içeriğine sahip ferrokromlardır. Yüksek karbonlu ferrokromlar içerisinde %50-55 Cr oranındaki düşük Cr değerine sahip ferrokromlar ise şarj krom olarak isimlendirilirler (Wei vd., 2023).

Üretilen her ton ferrokrom için 1000-1200 kg ferrokrom cürufu üretilir. Küresel düzeyde açığa çıkan ferrokrom cürufunun yaklaşık olarak yıllık 11-17 milyon tondur (Kumar vd., 2022). İhtiyaç doğrultusunda artan ferrokrom üretiminden kaynaklı olarak atık olarak açığa çıkan ferrokrom cürufu da artmıştır. Ferrokrom üretimi başta Güney Afrika olmak üzere,

Türkiye, Kazakistan, Hindistan ve düşük miktarda diğer ülkelerde üretilir. Ferrokrom cürufu üretimi ülkelere göre dağılımı (%) Tablo 2.5’de verilmiştir.

Tablo 2.5: Ferrokrom cürufu üretiminin ülkelere göre dağılımı (%) (Das vd., 2023).

Güney Afrika	%39
Türkiye	%23
Kazakistan	%15
Hindistan	%9
Diğer Ülkeler	%14

Ferrokrom cürufların kimyasal kompozisyonunu incelediğimizde, oksit halde bulunan silisyum, magnezyum, alüminyum ve kalsiyum elementlerinin yapının yaklaşık %95’ni oluşturduğu görülmektedir (Ozdal, 2019). Ferrokrom cürufuna ait kimyasal kompozisyon (%) Tablo 2.6’da verilmiştir.

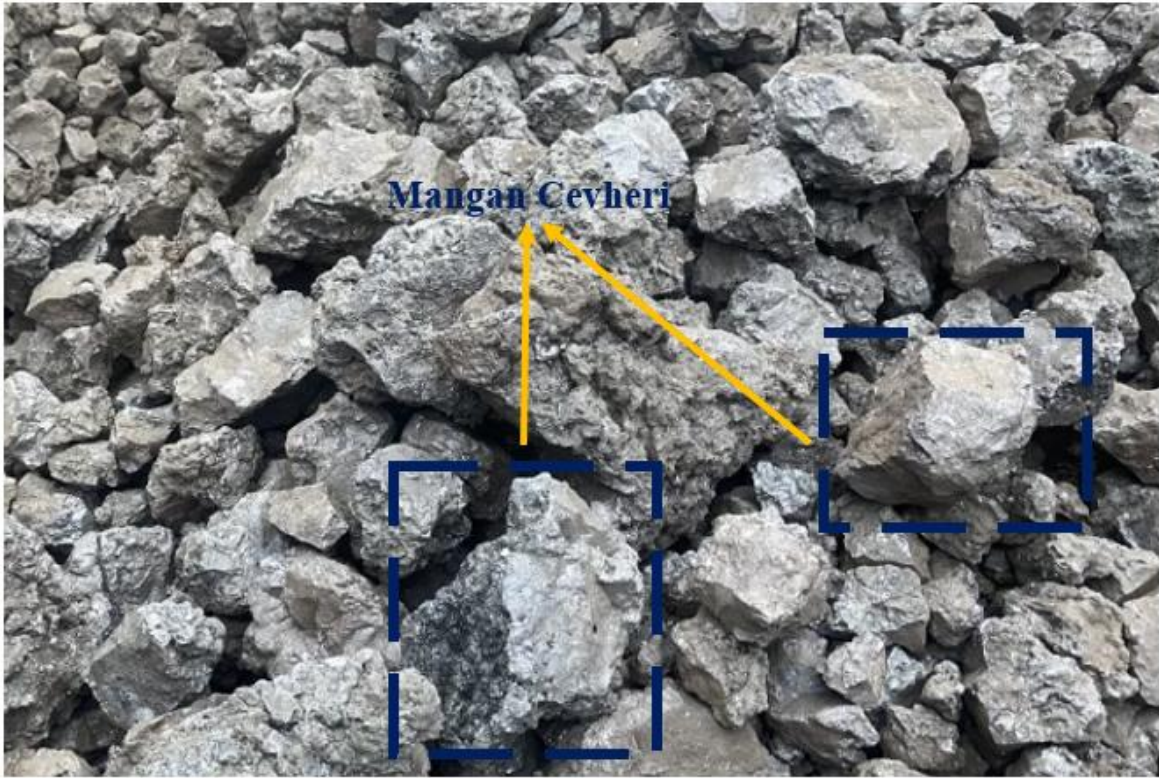
Tablo 2.6: Ferrokrom cürufuna ait kimyasal kompozisyon (%) (Ozdal, 2019).

Bileşikler	Oranlar (%)
CaO	% 45,50
MgO	% 12,76
Al₂O₃	% 8,68
Fe₂O₃	% 1,03
Cr₂O₃	% 0,51

2.4.2.3 Mangan Esaslı Cüruflar

Mangan doğada doğal bir metal olarak bulunmaz. Bir geçiş metalidir ve birden fazla kararlı oksidasyon durumuna sahiptir (Ghosh, 2020). Yaygın olarak +2, +3 ve +4 oksidasyon bileşiklerinde bulunur. Mangan cevheri kaynaklarının mineralojik bileşim açısından benzer özelliklere sahip, temel olarak dört jeolojik süreçten oluşur. Bu jeolojik süreçler; tortul yataklar, hidrotermal yataklar, artık mevduat ve deniz tabanı nodülleri olarak sınıflandırılabilir (Singh vd., 2020).

Bu durum mangan cevherinin üç cevher tipinde sınıflandırılmasında yardımcı olur. Bu sınıflandırma; oksit, silikat ve karbonat cevherleri olarak bilinir. Mangan cevher kaynakları yaklaşık olarak %40'ı karbonat minarelleri, %25'i silikat gruplarından ve %20'i de oksitli minarellerden oluşmaktadır (Tsukamoto vd., 2020). Mangan, metalürji endüstrisinde, enerji depolama, çelik üretiminde, pil teknolojilerinde ve kimya endüstrisi birçok önde gelen sektörlerde kullanımı çeşitlendirilmiştir (Toro vd., 2020). Mangan tüketimi, artan ham çelik üretimi ve ferroalyajların iyileştirilmesiyle ilişkilidir. Manganezin demir dışı uygulamaları arasında kuru hücreli piller, bitki gübresi bileşenleri, hayvan yemi ve tuğlalar için renklendirici üretimi yer alır (Hagelstein, 2009). Manganın bu kadar çeşitli sektörlerde kullanımı, ihtiyaç olan mangan miktarının artırmasına bağlı olarak mangan üretimi de artmıştır. Dünya çapında mangan cevheri (%35 yüksek tenörlü mangan) üretimi yaklaşık 6 milyon ton/yıl, elektrolitik mangan metal talebi ise yaklaşık 0,7 milyon ton/yıldır. Toplam mangan talebi küresel olarak inşaat (%23), makine (%14) ve ulaştırma (%11) gibi endüstriler tarafından tüketilmektedir (Hagelstein, 2009). Toplam mangan üretiminin yaklaşık %90'ı, kükürt sabitleme ve deoksidasyon için çelik ve paslanmaz çelik üretiminde %0,3-%0,8 oranında katkı maddesi olarak kullanılır. Metalurjik kalitedeki mangan cevheri rezervlerinin büyük orandaki kısmı Güney Afrika, Avustralya, Gabon ve Brezilya da bulunur. Küresel olarak %74'ünü içeren karadaki en büyük mangan cevheri yatağı olan Güney Afrika da bulunan Kalahari Manganez Sahasıdır (Coetsee, 2020). Güney Afrika'nın başlıca mangan cevher kaynakları; Mamatvan veya Gloria gibi karbonat içeren cevherler ve Kleyenstüber gibi yüksek demir ve mangan içeren cevherler olmak üzere iki gruba ayrılır. Çin ve Hindistan ciddi miktarda demir cevheri rezervlerine (%10 Mn-%35Mn) sahiptir. Mangan cevherine ait görüntüsü Şekil 2.22'de verilmiştir.



Şekil 2.22: Mangan cevheri görüntüsü (URL-1).

Mangan çelik üretiminde alaşım katkısı malzemesi olarak kullanılması nedeniyle, birincil kullanım alanı olan Çin ve Hint demir çelik endüstrisi olmak üzere dünyadaki mangan alaşımlarının büyük bir kısmını Çin ve Hindistan üretmektedir. Uluslararası Mangan Enstitüsü (IMnI) verilerine göre; 2017 yılında ferromangan alaşımı üretimlerinin 4.179 Mt'u yüksek karbonlu ferromangan (HCF_{FeMn}) ve 13.819 Mt'u Silikomangan (SiMn) olarak belirler. Çin'in mangan üretimindeki payı; %37 yüksek karbonlu ferromangan ve %62 silikomangandır. Hindistan'ın mangan üretimindeki payı ise; %12 yüksek karbonlu ferromangan ve %14 silikomangandır (Uluslar Arası Manganez Enstitüsü (IMnI), 2018). Kullanılan mangan, yüksek karbonlu ferromangan (HC FeMn), silikomangan (SiMn) ve ağırlıkça %rafine ferromangan (Ref. FeMn) alaşımları formundadır. Üretilen malzemenin mukavemetini, tokluğunu ve sertliğini arttırmak için bir alaşım elementi olarak kullanılır (Olsen vd., 2007).

2.4.4 Cürufların Kullanım Alanları

Cüruflar, ham çelik eritme işleminin yan ürünüdür ve üretiminin yaklaşık %12-20'sini oluşturur (Yang ve Yang, 2023).

Dünya Çelik Birliği'nin yayınladığı yıllık verilere göre; 2022 yılında dünya ham çelik üretiminin 1878,5 milyon ton olduğunu gösteriyor. Çelik cürufu emisyonlarına ilişkin ihtiyatlı tahminler 225 milyon tonu aşmaktadır (Raabe, 2023). Örnek olarak Çin'i ele alalım; Dünyanın en büyük ham çelik üreticisi olan Çin'in çelik cürufu envanteri 2012 yılında 400 milyon tonu aşmıştır. 2020'de 1468 milyon tona kadar ulaştı ve yılda 100 milyon tonun üzerinde bir oranla hala artmaktadır (Ren ve Li, 2023). Sürekli gelişmekte olan endüstri de artan metalürjik ürünlere olan ihtiyaç talebinden dolayı üretim artması sebebiyle metalürjik üretim atığı olan cüruf miktarında da artış olur. Cüruflar metal üretim endüstrilerinde uygun bir biçimde kullanılmadığı ve geri dönüşümü yapılmadığı durumlarda ciddi oranda atık miktarlarına sebebiyet verir (Yu ve Du, 2023). Cüruf atıklarının bu kadar yüksek oranlarda olması sebebiyle endüstride depolama alanları gerekmektedir. Bu depolama alanlardaki atık cüruflar çevre kirliliklerine sebep olmakla birlikte insan sağlığı açısından da zararlı durumları beraberinde getirir (Kong vd., 2023). Cüruflar bünyesinde belirli bir miktarda değerli metal gruplarını içerdiklerinden dolayı aslında ikinci derece metal kaynakları durumundadırlar. Cüruflardan değerli metal gruplarının geri kazanımı hem metal üretiminde kullanılan cevherlerinin tasarruf sağlama hem de çevre kirliliğinin önlenmesi açısından katkı sağlar (Raabe, 2023). Metallerle ait cüruflar, demir cevherindeki yabancı maddelerin uzaklaştırılması nedeniyle çelik tesislerinde demirin işlenmesi sırasında üretilen demir çelik endüstrisinin bir yan ürünüdür. Erimiş cüruf, yüksek su jeti basıncı altında söndürülen sinterlenmiş bir metal ürünü olan öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu (GGBFS), ikincil bir hammadde kaynağıdır (Amran vd., 2021). Zamanla mineral kristalizasyonu oluşmadığında cüruf %80-%90 oranında cam fazına geçer. Cüruf tozlarının yüksek oranda bir diğer kullanım alanı ise çimento sektörüdür. Oldukça ince cüruf tozu, çimento içeriğinin toplam %40-%65'ini değiştirmek için serbest kireçle karıştırılır (Gencel vd., 2021). Daha iri olan cüruf tozu ise, beton içeriğinde agrega olarak kullanılır. Cürufun beton üretiminde, çimentonun hidrotasyon ısını azaltma, uzun vadede basınç dayanıklılığını artırma ve betonun adyabatik sıcaklık artışını önemli ölçüde azaltma gibi bir çok faydası vardır (Mokal vd., 2023). Ticari olarak üretilen ilk cüruf bazlı çimento 1865 yılında Almanya'da gerçekleştirilmiştir.

Şu an günümüzde ise dünya genelinde yılda 200 milyon tonun üzerinde cüruf bazlı çimento kullanılmaktadır (Amran vd., 2021). Metalürjik atık olan cüruflar, yapı malzemeleri üretiminde kullanıma uygundur. Özellikle beton, çimento ve tuğla üretiminde kullanılarak

malzeme maliyetlerini azaltır ve sürdürülebilir inşaat uygulamalarına katkıda bulunur. Yol inşaatlarında agrega olarak kullanılabilir. Cürufkların uygun şekilde işlenmesi ve sınıflandırılması, yolların temel malzemesi olan asfaltta kullanılmalarına olanak tanır (Loureiro vd., 2022). Çelik üretimi sonrasında oluşan metalurjik atıklar, geri dönüşüm tesislerinde kullanılarak çelik üretiminde yeniden değerlendirilir. Bu sebeple ham madde kullanımını azaltılır ve enerji tasarrufu sağlanır (Broadbent, 2016). Bazı metalurjik atıklar, çimento üretiminde katkı maddesi olarak kullanılabilir. Cürufklar çimentonun özelliklerini iyileştirir ve çimento üretiminde kullanılan klinker miktarını azaltır (Parron-Rubio vd., 2019). Bazı metalurjik atıklar, toprak düzenlemesi ve tarım uygulamalarında kullanılabilir. Atıkların içerdikleri mineraller, toprak verimliliğini artırır ve bitki besin maddelerini sağlar (Mehmood vd., 2021). Bazı metalurjik atıklar, kimyasal endüstride kullanılabilir. Metalurjik atıkların içerdikleri elementler sebebiyle kimyasal süreçlerde katalizör veya reaktan olarak kullanılabilir (Harvey vd., 2022). Bazı metalurjik atıklar, metalurjik süreçlerde geri kazanılarak yeniden kullanılabilir. Geri kazanım, ham madde tüketimini azaltabilir ve doğal kaynakların korunmasına katkıda bulunabilir (Gabasiane vd., 2021). Manganın en belirgin kullanım alanlarından biri ise çelik endüstrisidir. Mangan demir cevherinin metalurjik işlemlerinde katkı maddesi olarak kullanılır. Çelik üretiminde Mangan katkısı, çeliğin çatlama direncinin artması ile birlikte dayanıklılığının artmasını sağlar (Gürol ve Kurnaz, 2020). Ayrıca, mangan içeren çelikler, demir cevherinin içerdikleri kirleticileri absorbe ederek daha kaliteli bir çelik üretimini sağlar (He vd., 2021). Manganın bir diğer en fazla kullanım alanı ise pil teknolojileridir. Özellikle lityum-iyon piller mangan dioksit (MnO_2) içermektedir. MnO_2 'in uzun ömürlü olması, düşük maliyetli olması ve yüksek enerji yoğunluğu gibi avantajlarından dolayı pil teknolojilerinde tercih edilen bir katkı maddesidir (Shin vd., 2020). Lityum-iyon piller, elektrikli araçlardan taşınabilir elektronik cihazlarına kadar gibi birçok farklı uygulama alanlarında yer bulmaktadır (Zhang vd., 2022). Mangan, başka farklı kimyasal işlemlerde de kullanılır. Özellikle mangan tuzları; cam, seramik ve boyaların üretimi sırasında katalizör görevinde kullanımı mevcuttur (Puthran ve Patil, 2023). Mangan bileşikleri; demir ve manganın giderilmesi için kimyasal reaksiyonlarla, su arıtma sistemlerinde de kullanımı vardır (Das ve Poater, 2021).

Genel itibarıyla, manganın birçok çeşitli endüstriyel uygulama alanlarında geniş bir kullanım yelpazesi mevcuttur. Çelik üretiminden kimya endüstrilerine, pil teknolojilerinden su arıtma sistemlerine kadar birçok sektörde kullanımı vardır (Rudi vd., 2020).

Mangan elementinin kullanım alanlarının bu kadar çeşitli olması, manganın endüstriyel süreçlerde ve sürekli gelişmekte olan modern teknolojide son derece kritik element olmasını sağlamıştır (Hotchkiss vd., 2024).



3. MATERYAL VE METOT

Tez çalışmasının bu bölümünde, yaygın olarak kullanılan TBCs'ın performansını değerlendirmek için kaplanan numunenin sıcak korozyon ve oksidasyon deneyleri sonrası davranışları incelenmiştir.

3.1 Amaç

Tez çalışmasında, altlık malzeme olarak Inconel 718 süper alaşım tercih edilmiş olup, bu altlık malzeme yüzeyine 5-42 μm toz boyutuna sahip CoNiCrAlY metalik tozu HVOF üretim yöntemi ile Inconel 718 altlık malzeme yüzeyine bağ kaplama olarak püskürtülmüştür. Bu işlemten sonra üst kaplama malzemesi olarak APS üretim yöntemi ile üretilen Mangan (Mn) cürufu ile üst kaplama yapılarak bir TBC sistemi üretilmiştir. Her bir tabaka bir sonraki alt başlıkta detaylı olarak açıklanacaktır. Üst kaplama malzemesi olarak Mn cürufu esaslı ve CoNiCrAlY bağ kaplamaya sahip TBC numunesi sırasıyla Protherm PLF 120/7 marka 2000 watt gücünde 50/60 Hz. frekansta yüksek sıcaklık fırınında 600°C' de; 5, 25, 50 ve 100 saatlik izotermal oksidasyon testleri yapılmıştır. Ayrıca 600°C'de ağırlıkça %45 Na₂SO₄ + %55V₂O₅ toz karışımına sahip sıcak korozyon tuzları kullanılarak, hassas teraziyle 2,3 mg/cm² miktarda hesaplanan toz karışımları TBC numunesinin yüzeyine koyularak 1, 3, 5 ve 10 saatlik sıcak korozyon testlerine tabii tutulmuştur. Deney süreleri tamamlanmış numuneler fırından çıkarılıp soğuk bakalite alındıktan sonra önce 60, 80, 100, 120, 320, 400 ve 600 mesh boyutlarında kaba zımparalama, 800, 1000, 1200, 2000 ve 2500 mesh boyutlarında ince zımparalama yapılmasının ardından 3, 1 ve 0,25 μm boyutlarında elmas solüsyon yardımıyla partlatma işlemine sabi tutulmuştur.

SEM cihazında alınan görüntülere ve diğer verilere göre deney öncesi ve sonrası EDS, XRD ve elementel haritalama analizi gibi karakterizasyon belirleyici yöntemlerle analizleri yapılmış olup numunenin sahip olduğu ve değişkenlik gösterdiği faz yapıları, farklı sıcaklıklarda vermiş olduğu pikler incelenip literatür de ki diğer çalışmalar ile karşılaştırılması yapılmıştır. Daha sonra bu değişkenliklerin sebebi tayin edilmeye yönelik tahminler yapılmıştır. İzotermal oksidasyon ve sıcak korozyon deneylerinin gerçekleştirildiği yüksek sıcaklık fırınına ait resimler Şekil 3.1'de verilmiştir. SEM görüntüleri alınan numuneler Vickers sertlik cihazı ile sertlik ölçümleri yapıp, yorumları yapılmaktadır.

Vickers sertlik ölçüm cihazı Şekil 3.2’ de verilmiştir. Zımparalama ve parlatma işleminin yapıldığı cihaz Şekil 3.3’te verilmiştir.



Şekil 3.1: Protherm marka İzotermal oksidasyon ve sıcak korozyon deneylerinin gerçekleştirildiği yüksek sıcaklık fırını.



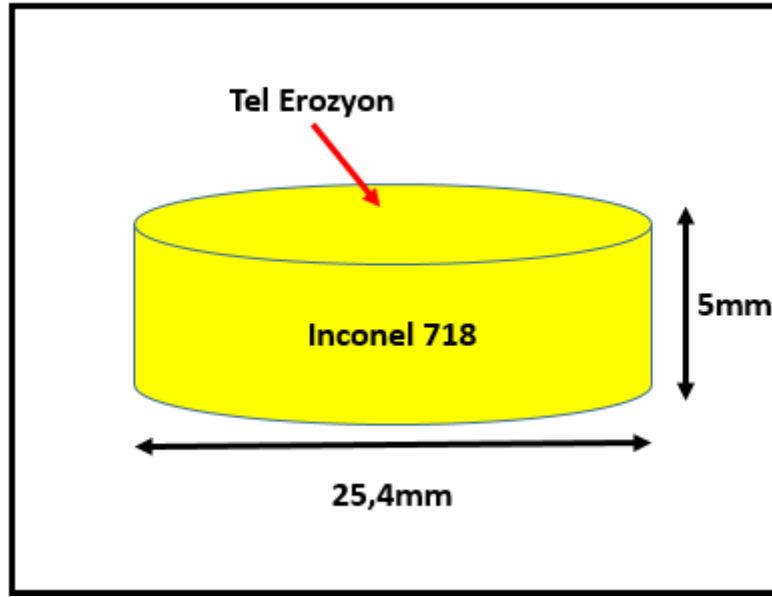
Şekil 3.2: QNESS marka vickers sertlik ölçüm cihazı.



Şekil 3.3: Metcon Forcimat IV marka zımparalama ve parlatma işleminin cihazı.

3.2 Altlık Malzemenin Karakterizasyonu

Yüksek sıcaklık uygulamalarından oksidasyon, sıcak korozyon ve aşınma gibi yüksek mekanik özellikler barındıran ve kalınlığı yaklaşık olarak 25,4mm x 5mm boyutuna sahip ve tel erozyon yöntemiyle kesilen Ni esaslı süper alaşım olan Inconel 718 altlık malzeme tercih edilmiştir. Tel erozyon yöntemi kullanılarak, 1 inç (25,4 mm) çapında, uzun çubuk ve silindirik forma sahip Ni esaslı Inconel 718 süper alaşım altlık malzemeye kaplama işlemleri yapıldıktan sonra, oksidasyon ve sıcak korozyon deneylerine tabi tutulmasında gerekli boyutlara getirilmesi için tel erozyon yöntemi ile 5 mm kalınlıkta silindirik disk formda daha parlak ve pürüzsüz şekilde uygun şartlara getirilmiştir. Şekil 3.4'te piyasadan temin edilen nikel esaslı Inconel 718 süper alaşım altlık malzemenin şematik görünümü gösterilmiştir.



Şekil 3.4: Tel erozyon yöntemiyle üretilen nikel esaslı Inconel 718 süper alaşım altlık malzemenin şematik görünümü.

3.2.1 Altlık Malzemenin Kimyasal Kompozisyonu ve Mekanik Özellikleri

Altlık olarak kullanılan Ni esaslı süper alaşım Inconel 718 malzemesinin oda sıcaklığındaki mekanik ve fiziksel özellikleri Tablo 3.1’de, EDS analiz yöntemi ile tayin edilen element içeriklerinin ağırlıkça (%) oranları Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.1: Ni esaslı süper alaşım olan Inconel 718’in oda sıcaklığındaki mekanik ve fiziksel özellikleri (Barwinska vd., 2023).

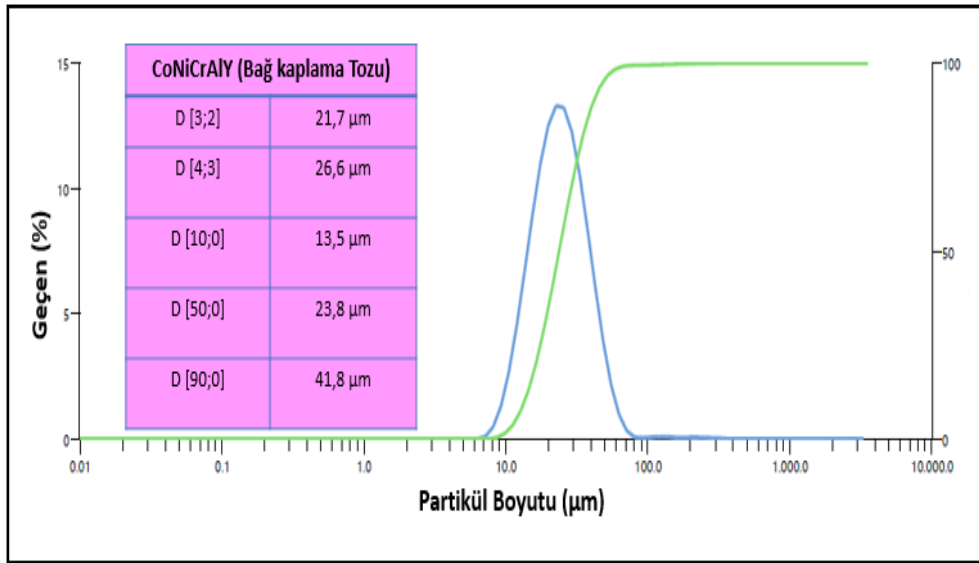
Çekme Dayanımı	Akma Dayanımı	Sertlik (Brinel)	Özgül Ağırlık	Ergime Sıcaklığı
960-970 MPa	545-560 MPa	≤362-364 HB	8190 kg/m ³	1250 - 1350 °C

Tablo 3.2: Ni esaslı süper alaşım olan Inconel 718'in elemen içeriğinin ağırlıkça oranı (%) (Özkan vd., 2023).

Element	Ağırlıkça (%)
Ni	53,6
Fe	18,1
Cr	18
Nb	5,3
Mo	3
Ti	1
Al	0,6
Diğer	< 0,5

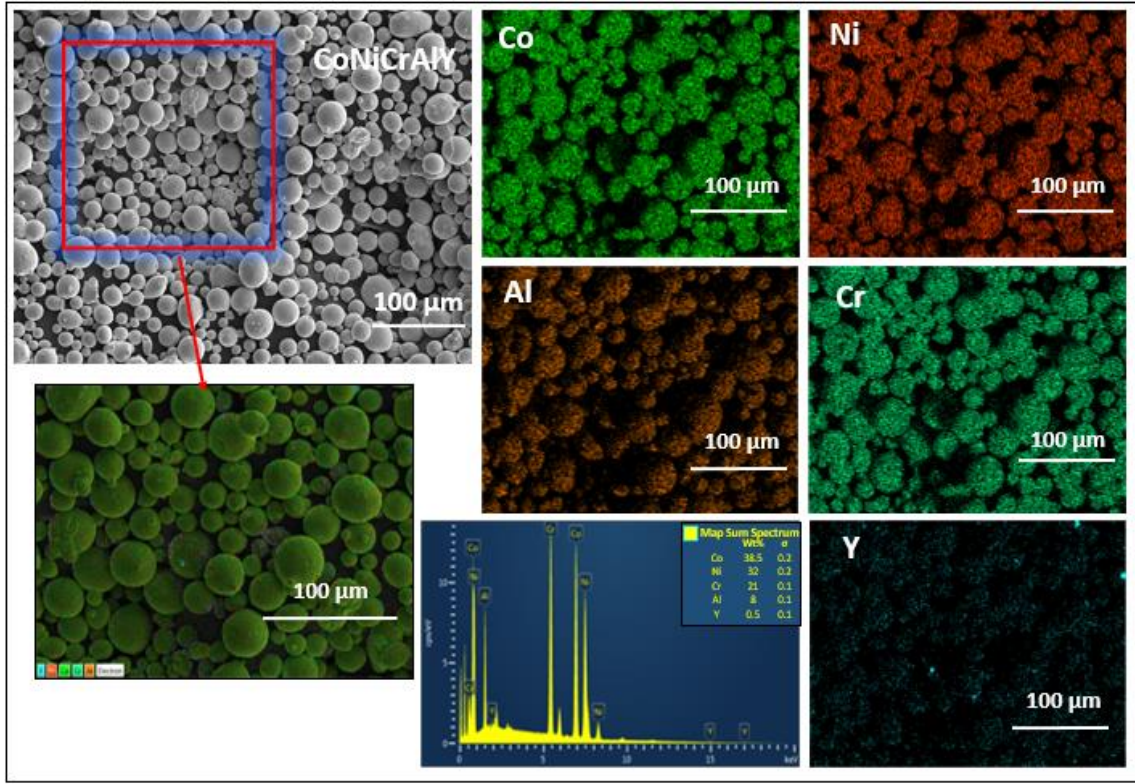
3.3 Toz ve Bağ Kaplama Karakterizasyonu

Bağ kaplamada kullanılacak toz seçiminde yüksek oksidasyon ve korozyon direncine sahip olan ve gaz atomizasyon yöntemiyle üretilen MCrAlY metalik tozu seçilmiştir. Burada M ile temsil edilen Co, Ni veya CoNi elementleridir. Gaz atomizasyon yöntemiyle üretilip HVOF ile kaplanan ticari olarak elde edilen CoNiCrAlY bağ kaplama tozuna yapılan partikül boyut dağılım analizi sonucunda ortalama partikül boyutu 23,8 µm olarak hesaplanmıştır. Bağ kaplama ait partikül boyut dağılım analizi Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



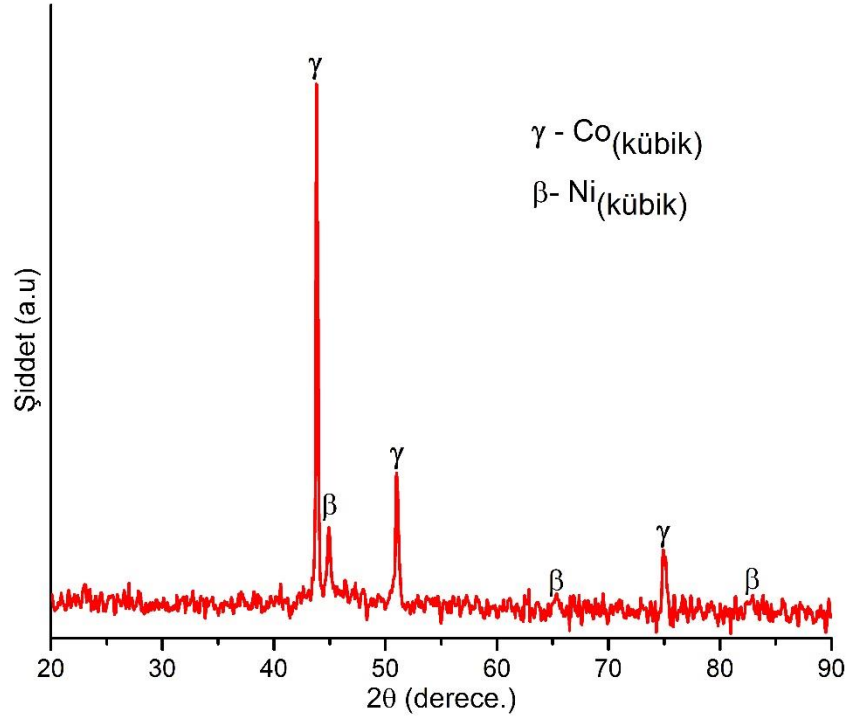
Şekil 3.5: CoNiCrAlY bağ kaplama tozuna ait partikül boyut dağılım analizi.

CoNiCrAlY bağ kaplama tozlarına ait SEM cihazında gerçekleştirilen elementel haritalama analizi ne göre; kobalt, nikel, krom ve alüminyum elementlerinin yoğun olarak görüldüğü İttriya elementinin ise eser miktarda olduğu görülmektedir. CoNiCrAlY bağ kaplama tozuna ait SEM, EDS ve elementel haritalama analizi Şekil 3.6’da verilmiştir.



Şekil 3.6: CoNiCrAlY bağ kaplama tozuna ait SEM, EDS ve elementel haritalama analizi.

Ayrıca analizde mevcut olan SEM görüntüsünde metalik esaslı bağ kaplama tozlarının tamamen küresel formda olduğu net bir şekilde görülmektedir. Bağ kaplama tozlarının küresel formda olması termal sprey kaplama üretim yöntemlerinden olan HVOF tekniğiyle üretilen bağ kaplamaların homojen olarak kaplanmasına katkı sağlayacağı düşünülmektedir. CoNiCrAlY bağ kaplamaya ait XRD analizinde, bağ kaplama içerisinde kübik kafes yapılarına sahip Co ve Ni elementlerinin pik verdiği görülmektedir. CoNiCrAlY bağ kaplamaya ait XRD analizi Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.7: CoNiCrAlY bağ kaplamaya ait XRD analizi.

Bağ kaplama tozunun karakterizasyon işlemleri yapıldıktan sonra bağ kaplama işlemi yapılmadan önce deneylerde kullanılacak numunelere, altlık malzeme üzerinde olması muhtemel olan yağ, kir ve metal tozu gibi istenmeyen safsızlıkların temizlenmesi, yüzeyin yapışma mukavemetini artırılması ve istenilen pürüzlülük derecesine getirilmesi istenmesi sebepleriyle kumlama işlemi yapılmıştır. Kumlama işlemi, Al_2O_3 tozlarının basınçlı hava yardımı ile 2-2,5 bar basınç altında yaklaşık olarak 7-11 cm mesafeden ve yatayla 75° açı olacak şekilde altlık malzeme yüzeyine püskürtülmüştür. Bu işlemin sonrasında ve öncesinde numune altlık malzemesi, etil alkol(C_2H_5OH) içinde ultrasonik temizleme yöntemi ile bir sonraki kaplama işlemleri için uygun duruma getirilmiştir. Kumlama işleminin ardından temizleme işleminden sonra HVOF yöntemi ile üretimi gerçekleştirilen CoNiCrAlY içeriğine sahip tozlar kalınlığı 100 μm olarak altlık malzeme yüzeyine biriktirilmiştir. Biriktirilen bağ kaplamada kullanılan Co, Ni, Cr, Al ve Y'nın tercih edilmesinin başlıca nedenleri vardır. Co elementi, oksidasyon direncini artırır ve korozyona karşı direnç sağlar. Ni, yüksek sertlik sağlar. Cr, oksidasyon sırasında Cr_2O_3 oluşturur ve TGO rezervi oluşturur. Ayrıca korozyona karşı direnci yüksektir.

Al elementi, oksidasyon sırasında TGO yapısını $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ olarak yüksek oranda oluşturur. Ellingham diyagramlarına göre oksijen reaktivliği en yüksek olduğu için ilk Al oksitlenir. Oksit bariyeri oluşturarak altlığın hasara uğramasını yavaşlatır. Bu sebepten dolayı belli bir seviyeye kadar bu oksitlenme bizim için iyidir. Fakat içeriğindeki Al bitmesine yakın oksit tabakası ortadan kalkar ve kaplama hasara doğru gider. Y elementi ise, ZrO_2 sıcaklık artışlarında farklı kafes yapılarına sahiptir. Tetragonal yapıdayken daha geniş monoklinik yapıya geçer. Bu geçiş sonucu hacim artar kaplama hasara uğrar. Bunu engellemek için Y kaplamaya %6-8 oranında ilave edilir. ZrO_2 'nin kafes yapısının değiştirmesini engeller. Stabilize ederek YSZ formuna dönüştürür. Ayrıca bağ kaplamanın yapışma mukavemetini artırır. HVOF üretim yöntemi ile üretim gerçekleştirilen bağ kaplama belli parametrelere bağlıdır. HVOF ile bağ kaplama üretim yöntemine bağlı parametreler ise Tablo 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.3: HVOF ile bağ kaplama üretim yöntemine bağlı parametreler.

Yanma Gazları	O_2 (250 slpm) C_3H_8 (80 slpm) Hava (700 slpm)
Toz Taşıyıcı Gaz	N_2 (6,5 slpm)
Toz Besleme Oranı	25 g/dk
Kaplama Mesafesi	200 mm

3.4 Mangan Cürufuna Ait Üst Kaplama Tozunun ve TBC Sisteminin Karakterizasyonu

Nikel esaslı süper alaşım olan Inconel 718 altlık malzeme yüzeyine HVOF üretim yöntemi ile biriktirilmiş bağ kaplama işlemleri tamamlandıktan sonra numune üst kaplama prosesi için hazırdır. Üst kaplama malzemesi olarak yüksek ergime sıcaklığına sahip sıcaklığına ve aşınmaya karşı dirence sahip olan seramik esaslı malzemeler kullanılır. Fakat alternatif olarak atık malzemelerinin değerlendirilmesi ve biğrikti bakımından da çelikhane cürufları da üst kaplama malzemesi olarak kullanılabilir. Yüksek ergime sıcaklıklarına sahip çelikhane cüruflarını da kapsayan sert seramik malzemeler, yüksek enerji gerektirmesi nedeniyle APS ve EB-PVD gibi üretim yöntemleri ile gerçekleştirilmektedir.

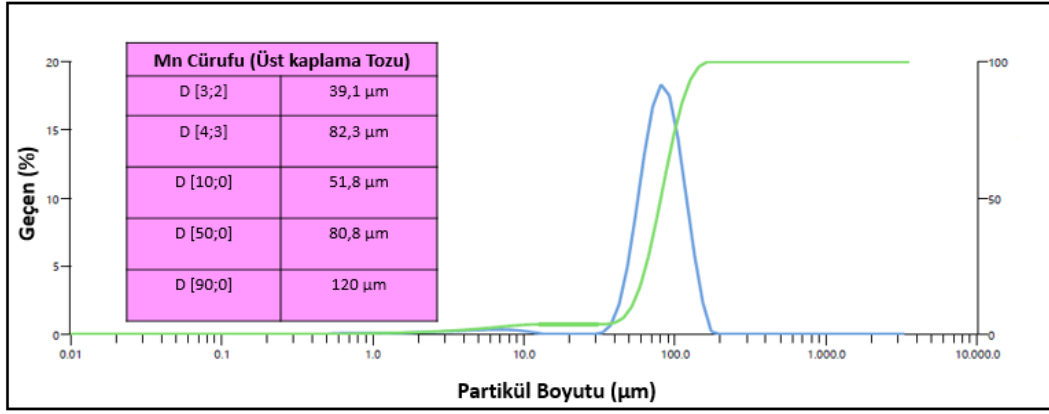
APS yöntemiyle üretimi gerçekleştirilen Mn cüruf üst kaplama malzemesi belli parametrelere bağlıdır. APS yöntemi ile üst kaplama tozu olarak kullanılan Mn cürufuna ait kaplama üretim parametreleri Tablo 3.4’te verilmiştir. Üst kaplama tozu olarak kullanılan Mn cürufuna ait partikül boyut dağılım analizi Şekil 3.8’de gösterilmiştir. Partikül boyut dağılımı sonucu üst kaplamada kullanılan Mn cürufuna ait ortalama partikül boyutu 80,8 μm olarak hesaplanmıştır. Üst kaplama tozuna ait üst yüzey SEM, XRD ve EDS analizleri Şekil 3.9’da verilmiştir. Mangan cürufuna ait toz XRF analizi sonucu elde edilen ağırlıkça bileşik oranları Tablo 3.5’de gösterilmiştir.

Tablo 3.4: APS yöntemiyle üst kaplama üretiminin bağlı olduğu parametreler.

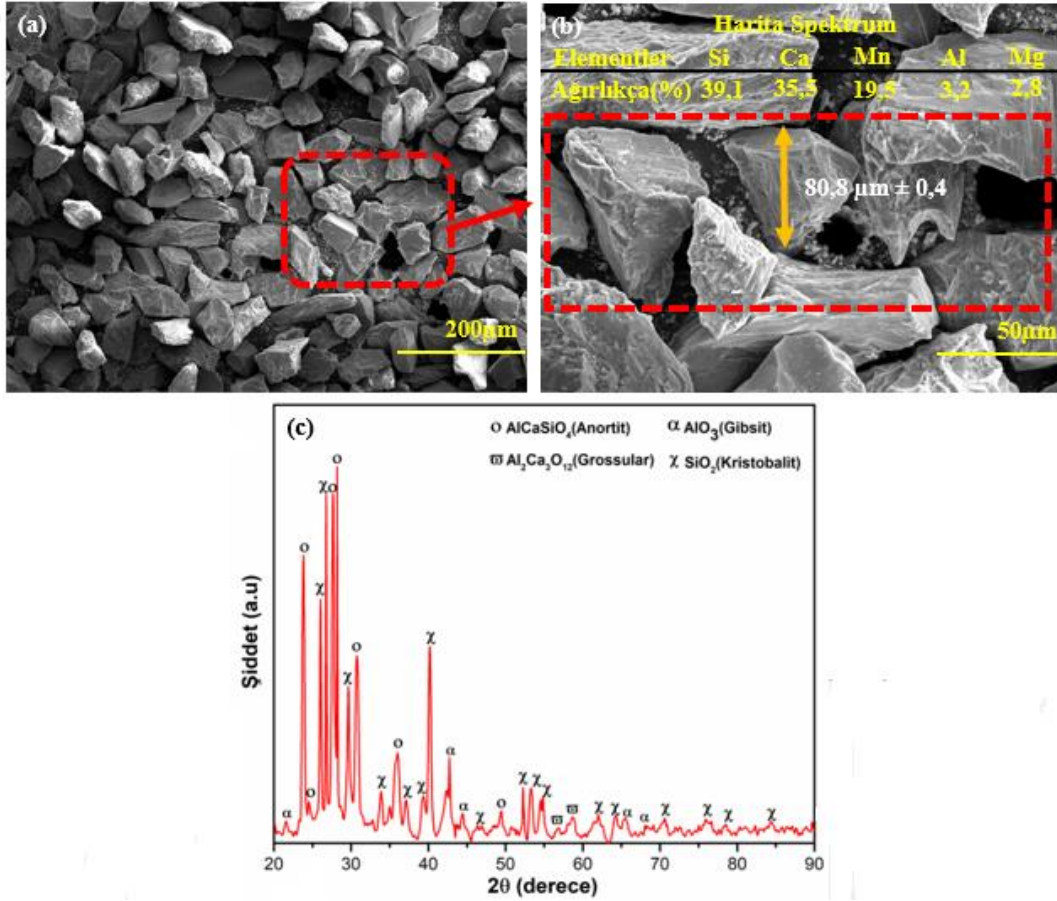
Elektrik Akımı	630 A
Elektrik Gücü	40 kW
Argan Akış Oranı	44 slpm
Hidrojen Akış Oranı	13 slpm
Toz Besleme Oranı	25 g/dk
Tabanca Mesafesi	90 mm

Tablo 3.5: Mangan cürufuna ait toz XRF analizi.

Bileşikler	Oran(%)
SiO ₂	43,0289
CaO	25,3428
MnO	18,3228
Al ₂ O ₃	6,6143
MgO	2,4840
BaO	1,6398
SO ₃	0,7720
Fe ₂ O ₃	0,7590
K ₂ O	0,6910
SrO	0,3224
Cl	0,0220



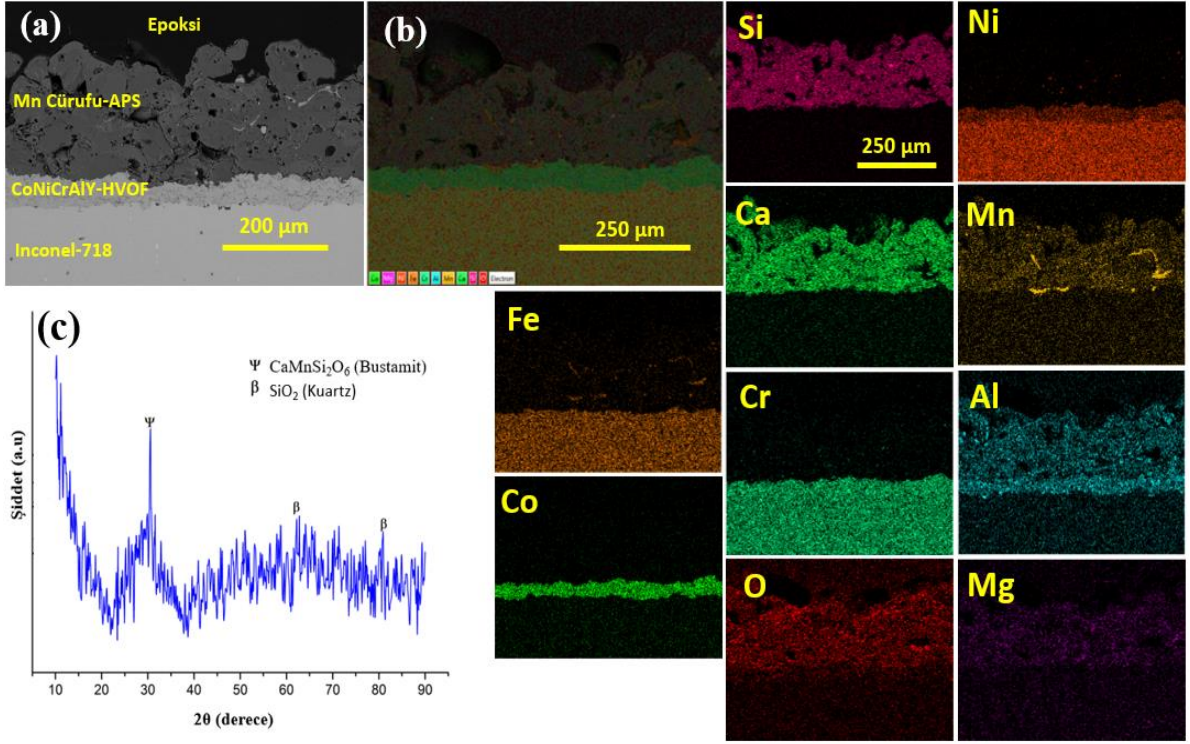
Şekil 3.8: Mangan cüruflu üst kaplama tozuna ait partikül boyut dağılım analizi.



Şekil 3.9: Mangan cürufluna ait; (a) üst yüzey SEM görüntüsü, (b) yüksek büyütmede alınan SEM görüntüsü ve EDS analizi, (c) XRD analizi.

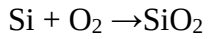
Şekil 3.9 incelendiğinde, yüksek büyütmede alınan SEM görüntüsünde net bir şekilde tozlar aglomere olmadan dağılmışlardır. Ayrıca yapılan EDS analizinde cüruflar içerisinde yüksek ve birbirine yakın miktarlarda Si ve Ca elementinin bulunması kaplama öncesi ve sonrasında

oluşabilecek faz/bileşiklerin genelinde olacağını göstermektedir. Dahası cüruflar genellikle camsı bir yapıya sahip olduğundan dolayı SiO_2 bileşiği pik vermiştir. Buradaki SiO_2 kristobalit formundadır. Inconel 718 altlık malzemenin üzerine bağ kaplama işlemi yapıldıktan sonra üst kaplama olan Mn cüruf biriktirilmesi ile üretilen TBC numunesi deneyler için hazırdır. Oksidasyon ve sıcak korozyon deneylerine başlanmadan önceki hiç işlem görmemiş olarak numuneden alınan kaplanmış numune SEM kesit görüntüsünden elde edilen verilere göre; süper alaşım altlık malzeme, CoNiCrAlY içerikli ve HVOF yöntemiyle üretilen bağ kaplama ve APS yöntemiyle biriktirilen seramik esaslı üst kaplama net bir şekilde görülmektedir. Bağ kaplama yapısında HVOF tekniğinin karakteristik özelliği olan oksitsiz, porozitesiz ve yoğun mikro yapı görülürken, üst kaplama yapısında APS yönteminin karakteristik özelliği olan oksitli, poroziteli ve laminar mikroyapı görülmektedir. Bağ kaplama yapısının yoğun olması ise, yüksek sıcaklıklarda altlık malzemeyi oksidasyon ve sıcak korozyon hasarlarına karşı daha sağlam duruma getirecektir. Üretilen TBC sisteminde as-sprayed SEM kenar görüntüsünde üst kaplama malzemesi olan Mn cürufu ile bağ kaplama olan CoNiCrAlY arasında yüksek yapışma mukavemeti sağlandığı açıkça görülmektedir. Aynı zamanda APS yöntemiyle üretiminden kaynaklı olarak üst kaplamada çok sayıda poroziteler bulunmaktadır. Dahası ergimiş ve yarı ergimiş yapılar olduğu düşünülmektedir. Kaplanmış numune SEM ara yüzey kesit görüntüsü, XRD analizi ve elementel haritalama analizi Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10: Kaplanmış numunesine ait; (a)SEM ara yüzey kesit görüntüsü, (b)elementel haritalama analizi ve (c)XRD analizi.

APS yöntemi ile üst kaplama yapıldığından dolayı üst kaplama kompozisyonunun içeriği oksitli bileşiklerden oluşmaktadır. Üretilen TBC sisteminden alınan kaplanmış numune XRD analizi incelendiğinde en şiddetli pik olan 30°’de $\text{CaMnSi}_2\text{O}_6$ bileşiği pik vermiştir. Yani malzemenin içeriğini yüksek oranda bustamit oluşturmaktadır. Geri kalan pikleri ise cüruftan kaynaklı düzensiz amorf camsı faz olan SiO_2 (kuvars) bileşiği oluşturmaktadır. SiO_2 (kuartz) fazının muhtemel reaksiyonu Eşitlik 3.1’de verilmiştir (Shaba vd., 2023).



Eşitlik 3.1.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tez çalışmasının bu bölümünde, termal bariyer kaplamaların performansını değerlendirmek amacıyla yapılan deneysel çalışmaların sonuçları sunulacak ve bu sonuçlar literatürdeki mevcut çalışmalarla karşılaştırılacaktır.

4.1 Bulgular

Elde edilen bulgular, kaplamaların yüksek sıcaklık uygulamalarındaki dayanıklılığı ve etkinliği hakkında önemli bilgiler sunmaktadır. Bulguların analizi, kaplama malzemelerinin ve uygulama yöntemlerinin performans üzerindeki etkilerini anlamamıza yardımcı olacak ve gelecekteki araştırmalara yönelik önerilerde bulunmamıza olanak tanıyacaktır.

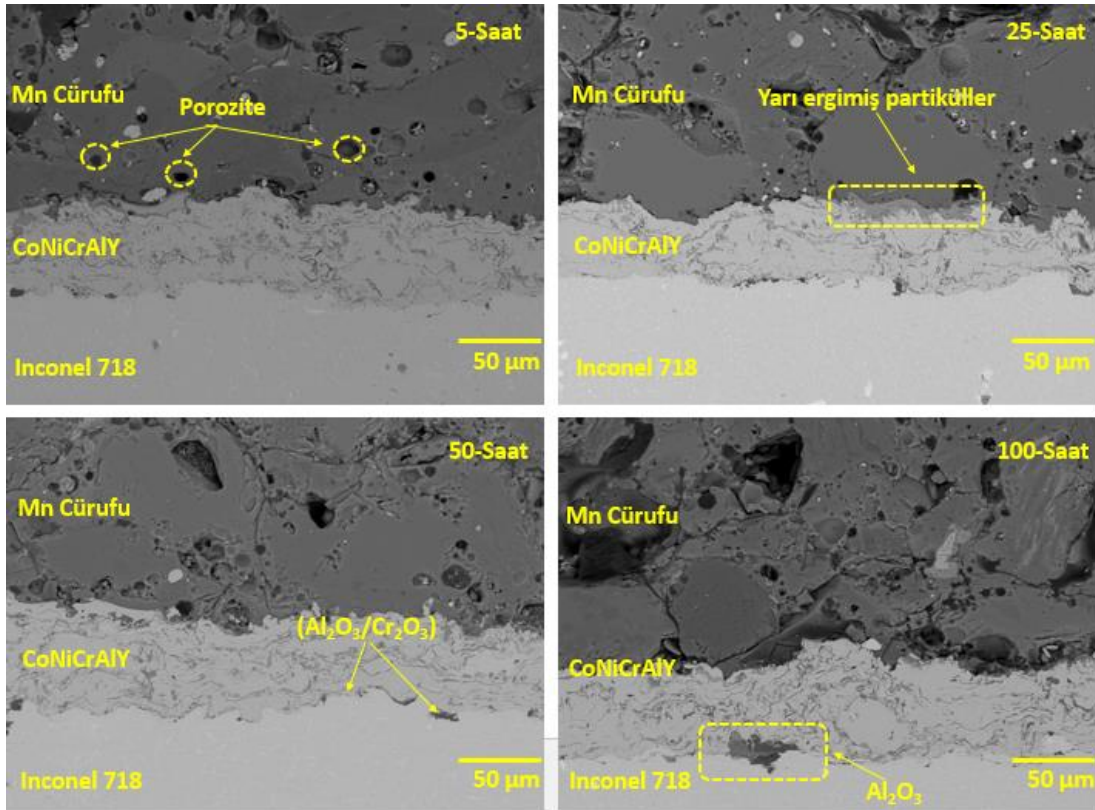
4.1.1 Mangan Cürufu İçeriğine Sahip TBC Sisteminin İzotermal Oksidasyon Davranışları

Mn cüruf esaslı üst kaplamalı TBC numunesi yüksek sıcaklık fırınında 600°C’de sırasıyla 5 saat, 25 saat, 50 saat ve 100 saat süreleri ile olmak üzere izotermal oksidasyon deneyine tabii tutulmuştur. Deney süreleri tamamlanan her bir numune fırın içerisinde soğuması için gerekli süre geçtikten sonra çıkarılıp, bakalite alındıktan sonra SEM görüntüleri alınması için zımpara ve parlatma işlemleri yapılmıştır.

4.1.1.1 Mangan Cürufu İçeriğine Sahip TBC Sisteminin 600°C’de İzotermal Oksidasyon Davranışlarının İncelenmesi

600°C izotermal oksidasyon testleri sonrasında APS yönteminden kaynaklı oluşan poroziteler oksidasyon süresi arttıkça sinterleşme etkisinden dolayı azalmıştır. 100 saatlik oksidasyon testi sonrası alınan SEM görüntüsünde az miktarda oksit tabakasının oluşumu gerçekleştiğinden dolayı Mn cürufu içerikli TBC sistemi oksidasyon testine dayanmıştır. Oksidasyon deneyinde 5, 25, 50 ve 100 saat boyunca izotermal olarak gerçekleştirilen oksidasyon testlerinin ardından elde edilen kesit SEM görüntüleri alınmıştır.

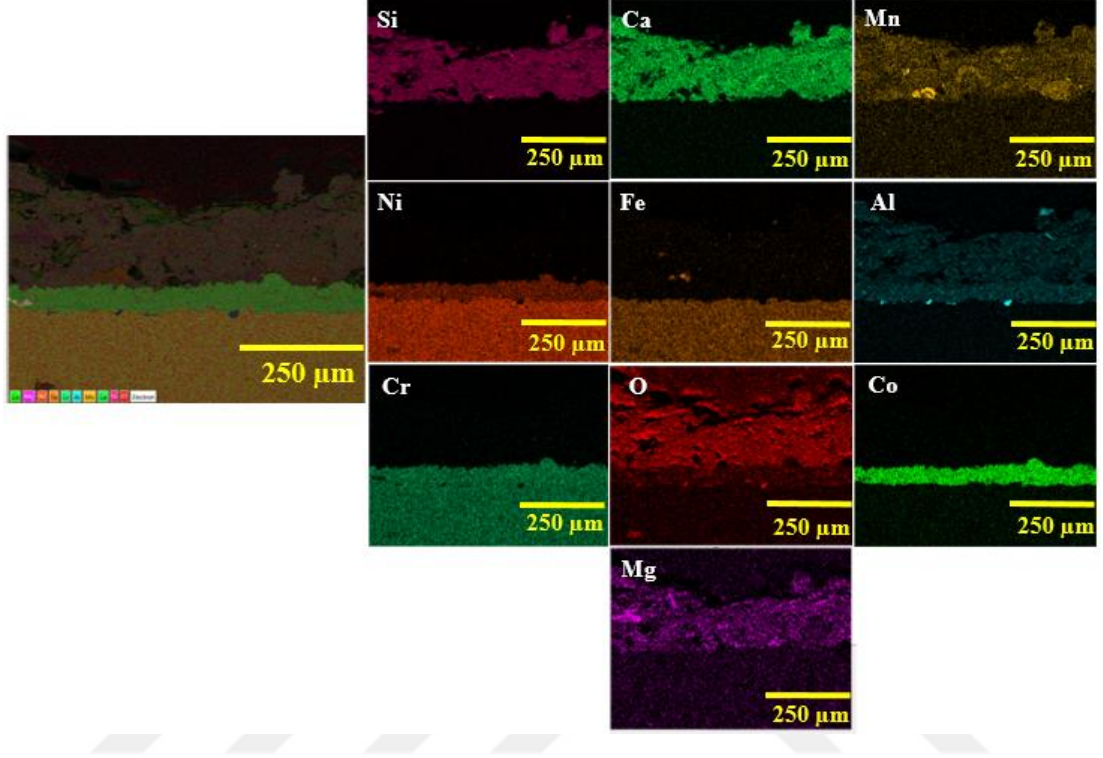
Nikel esaslı süper alaşım altlık malzeme üzerine CoNiCrAlY içeriğine sahip bağ kaplaması termal sprey kaplama yöntemlerinden olan HVOF tekniğiyle üretilen üst kaplaması ise, APS yöntemiyle biriktirilen cüruf içerikli TBC sistemlerinde oksidasyon testlerinden önce tüm yüzeyde homojen olarak dağılan poroziteler üst kaplamada kapanmaya başlamıştır. İlerleyen oksidasyon sürecine bakıldığında oksidasyon etkisinin bağ kaplamaya ulaşmadığı ve herhangi bir hasar vermediği görülmektedir. Yaklaşık olarak 50 saatlik testlerden sonra bağ kaplama yapısında bazı oksidasyon etkileri görülmeye başlanmıştır. Yüksek sıcaklıklarda oksijene karşı afinitesi yüksek olduğu bilinen Al elementi ilk olarak oksitlenmeye başlayarak yapı içerisinde Al_2O_3 bileşiklerini oluşturmaya başlamıştır. İlerleyen oksidasyon sürecine bakıldığında ise, Ellingham diyagramına göre afinitesi Al elementinden sonra oldukça yüksek olan Cr elementi oksitlenmeye başladığı düşünülmektedir. Al ve Cr oksitlenmeleri sonucunda kaplamanın ara yüzeyinde Al_2O_3 (alüminyum oksit) ve Cr_2O_3 (krom oksit) gibi oksitli bileşikler meydana gelmiştir. Üst kaplama malzemesi olan Mn cürufu kristal ve camsı yapıya sahip olması sebebiyle porozite miktarı düşüktür. APS yöntemiyle üretilmiş üst kaplamada porozite oranı yüksek olsa da oksidasyon süresi boyunca sinterleşme etkisiyle bu oranın düştüğü düşünülmektedir. Düşen porozite oranı oksijenin geçişini zorlaştırır. Üst kaplamadan alt tabakalara nüfuz eden oksijen miktarı az olduğundan difüzyon olayı zorlaşır. 600°C’de gerçekleştirilen izotermal oksidasyon deneyinde Mn cürufu esaslı üst kaplamaya sahip TBC numunesi mekanik ve kimyasal kompozisyonundan dolayı oksidasyon deneyinde üstün dayanıklılık göstermiştir. Difüzyon olayının zor gerçekleşmesi ve deneye tabii tutulan TBC numunesinin göstermiş olduğu yüksek dayanım göz önüne alındığında TGO tabakasının oluşmadığı düşünülmektedir. 600°C izotermal oksidasyon sonrası Mn cüruf esaslı TBC sistemine ait SEM ara yüzey kesit görüntüsü Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1: 600°C’de gerçekleştirilen izotermal oksidasyon deneyi sonrası Mangan cürufu esaslı TBC sistemine ait SEM ara yüzey kesit görüntüsü.

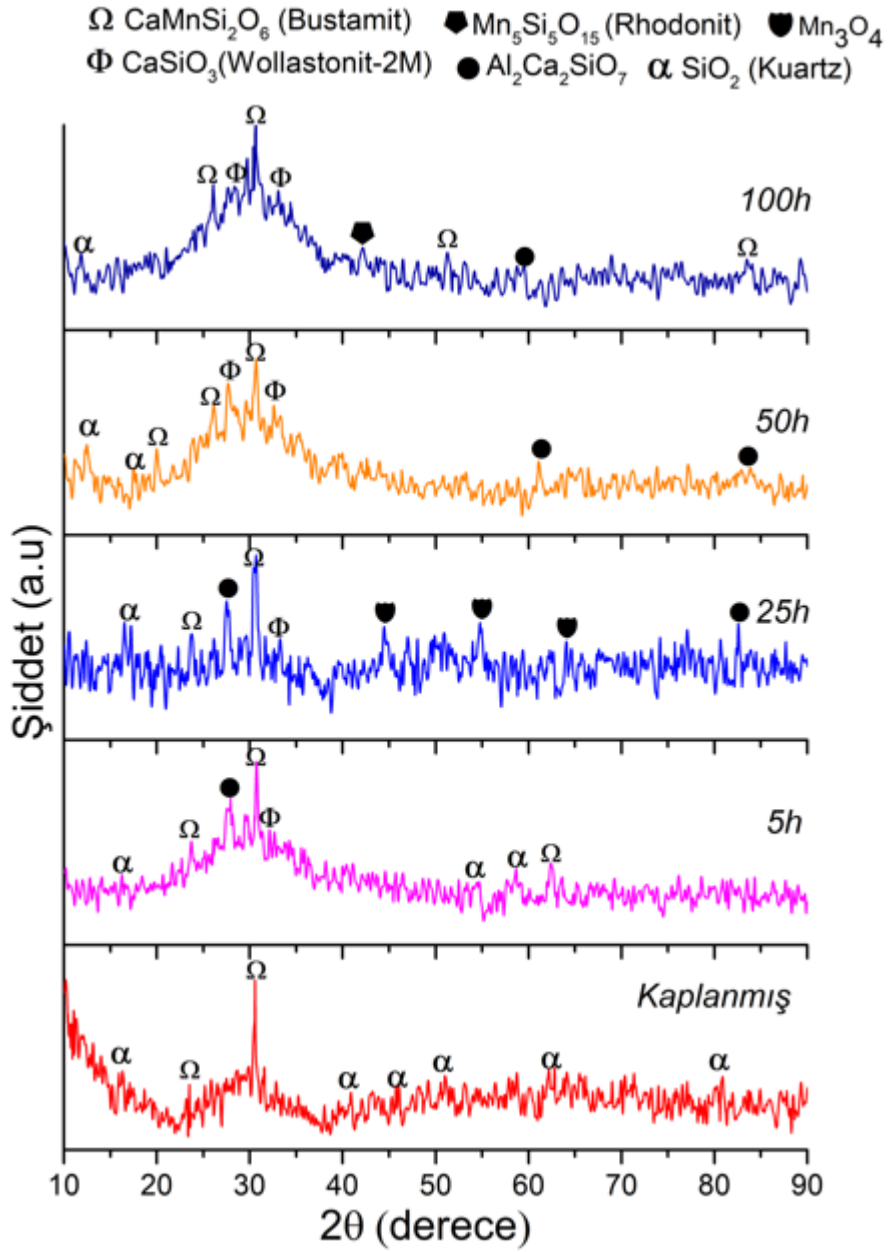
600°C’ de 25 saat deney süresi ile gerçekleştirilen oksidasyon deney sonuçlarında yapılan elementel haritalama analizine göre; bağ kaplamada Co, Ni, Cr ve Al homojen bir dağılımda olduğu görülmektedir. Mn, Mg, Ca, Si ve Al üst kaplama malzemesi içerisinde bulunmaktadır. Fe ise Inconel altlık malzeme içerisinde bulunmaktadır. Altlık malzeme ve bağ kaplama da bulunan Cr sıcaklığın etkisiyle difüzyon ile üst katmanlara geçmiştir. Oksidasyon testlerinden sonra elde edilen elementel haritalama analizinde TBC sistemi bütünlüğünün bozulmadığı net bir şekilde görülmektedir. Bağ kaplama ve üst kaplama içeriğinde bulunan Al elementi tüm TBC sistemine dağıldığı görülmektedir. Bağ kaplama ve üst kaplama ara yüzeyinde Al elementinin ağırlıklı bir şekilde yer aldığı görülmektedir. Ellingham diyagramına göre oksijene karşı yüksek afinitesinden dolayı ilk oksitlenen bağ kaplama elementinin Al olduğu düşünülmektedir. Bu elementten sonra ise, Cr elementi oksijenle birlikte birleşerek krom oksitli yapılar oluşturduğu elementel haritalama analizinde Cr elementi ile O elementinin üst üste çakıştığı bir şekilde görülmektedir.

600°C’de, 100 saat deney süresi (100 saatliğı koyılım)ile gerçekleştirilen izotermal oksidasyon sonrası Mn cüruf esaslı TBC sistemine ait elementel haritalama analizi Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



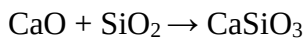
Şekil 4.2: 600°C ‘de, 100 saat deney süresi ile gerçekleştirilen izotermal oksidasyon sonrası Mangan cürufu esaslı TBC sistemine ait elementel haritalama analizi

Sırasıyla 5 saat, 25 saat, 50 saat ve 100 saat süreleri ile olmak üzere 600°C’de yapılan izotermal oksidasyon deneylerin sonucunda numunelere XRD analizi yapılmıştır. 600°C izotermal oksidasyon sonrası Mangan cüruf esaslı TBC sistemine ait XRD analizi Şekil 4.3’te verilmiştir.



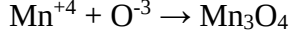
Şekil 4.3: 600°C izotermal oksidasyon sonrası Mangan cüruf esaslı TBC sistemine ait XRD analizi.

Cüruf esaslı TBC sisteminin üretiminden sonra gerçekleştirilen XRD analizinde oksidasyon testlerinden önce sistemde SiO_2 (kuvars), $\text{CaMnSi}_2\text{O}_6$ (bustamit), CaSiO_3 (volastonit) ve $\text{Al}_2\text{Ca}_2\text{SiO}_7$ faz yapıları görülmüştür. Yapı içerisinde bulunan SiO_2 ile CaO ile birleşerek CaSiO_3 (Volostenit) fazını oluşturmuştur. Oluşan fazın kimyasal formülü Eşitlik 4.1’de verilmiştir (Liu,2014).



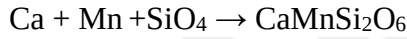
Eşitlik 4.1.

İlerleyen oksidasyon sürecine bakıldığında ise, metal saflaştırılması esnasında sistemde az miktarda kalan Mn metali yüksek sıcaklıklarda iyon haline gelen O elementi ile Mn_3O_4 bileşimini meydana getirmiştir. Sistem içerisindeki mangan oksit bileşiminin oluşum formülü Eşitlik 4.2’de verilmiştir (Ren,2021).

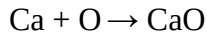


Eşitlik 4.2.

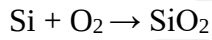
Sistem içerisinde oluşan $CaMnSi_2O_6$ (Bustamit), $CaSiO_3$ (Volastonit) ve SiO_2 (Silisyum dioksit) fazlarının oluşum reaksiyonları da aşağıdaki gibidir (Cao vd., 2022; Li vd., 2023; Que vd., 2023; Lu vd., 2024; Xu vd., 2024; Ma vd., 2024). Ayrıca $Mn_5Si_5O_{15}$ bileşiği yapılan araştırmalarda da pik vermiştir (Pertlik ve Zahiri, 1999).



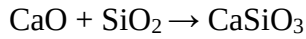
Eşitlik 4.3.



Eşitlik 4.4.



Eşitlik 4.5.



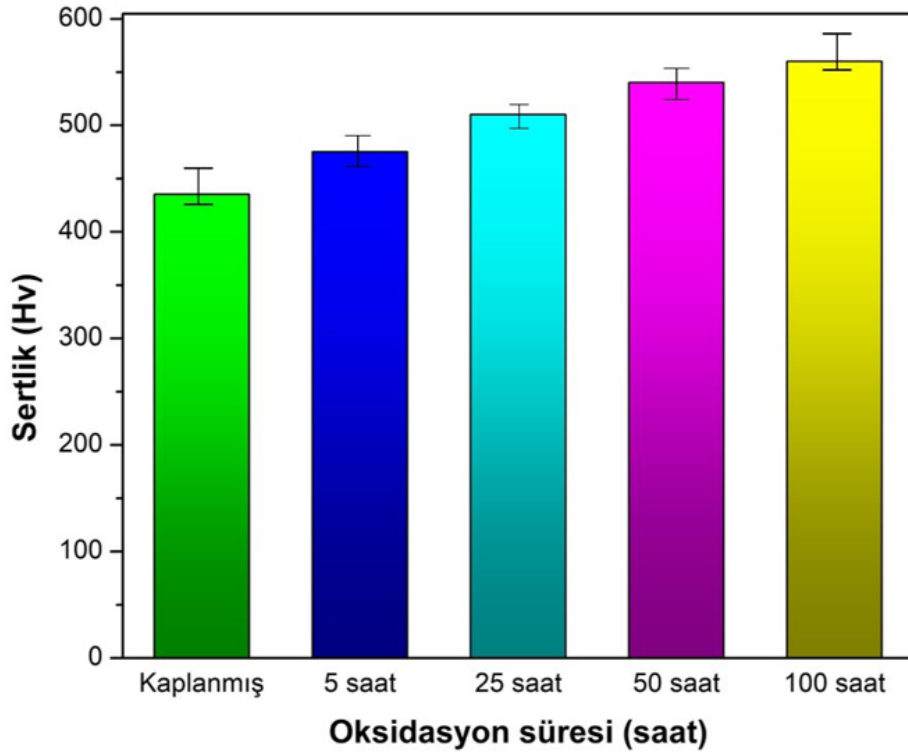
Eşitlik 4.6.

Oksidasyon testlerinin ardından elde edilen faz yapıları sırasıyla eşitlik 4.3, 4.4, 4.5 ve 4.6’da verilen olası eşitliklere göre reaksiyonlar oluşmuştur. Üst kaplama yapısı içerisinde mevcut olan Ca, Mg, Al ve Si elementlerinin oksijene karşı olan afinitesine göre reaksiyonların gerçekleştiği düşünülmektedir. Oksidasyon deneyinden önce tamamen camsı bir yapıya sahip olan TBC üst kaplama malzemeleri kaçınılmazı mümkün olmayan yüksek sıcaklıklardaki oksidasyon testlerinden sonra faz dönüşümleri gösterdiği düşünülmektedir. Gerçekleşen bu faz dönüşümleri üst kaplama yapısı içerisinde mevcut olan elementlerin oksijene karşı göstermiş olduğu ilgi ile alakalıdır. Tamamen stabil olarak üretilen üst kaplama yapısı içerisinde meydana gelen faz değişimleri kaplama sisteminin ilerleyen süreçlerde hasara uğramasına sebebiyet verecektir. SEM görüntüleri de alınan numuneler sertlik ölçüm cihazında ölçümü yapılmıştır. Ölçüm parametreleri ise; 200 gr yük altında 5 saniye de ve HV 0,2 vickers sertliği olarak analizleri yapılmıştır. Numunelerin 5 saat, 25saat, 50 saat ve 100 saatlik $600^{\circ}C$ ’de oksidasyon deneyi sonundaki sertlik değerleri saptanmıştır.

Her deney saati için ortalama değerleri ve tolerans aralıkları hesaplanıp Tablo 4.1’de, grafiği ise Şekil 4.4’te verilmiştir. Numunenin oksidasyon deneyi öncesi ve sonrasında porozite ölçümleri yapılmış olup bu ölçümlerin ortalama değerleri Şekil 4.5’te, porozite ölçümlerin ortalama değer ve tolerans aralıkları da Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.1: 600°C’ de geręekleřtirilen sırasıyla; 5 saat, 25 saat, 50 saat ve 100 saatlik oksidasyon deneyi sonrası Mangan cüruf esaslı numunelerin sertlik değerleri ve tolerans aralıkları.

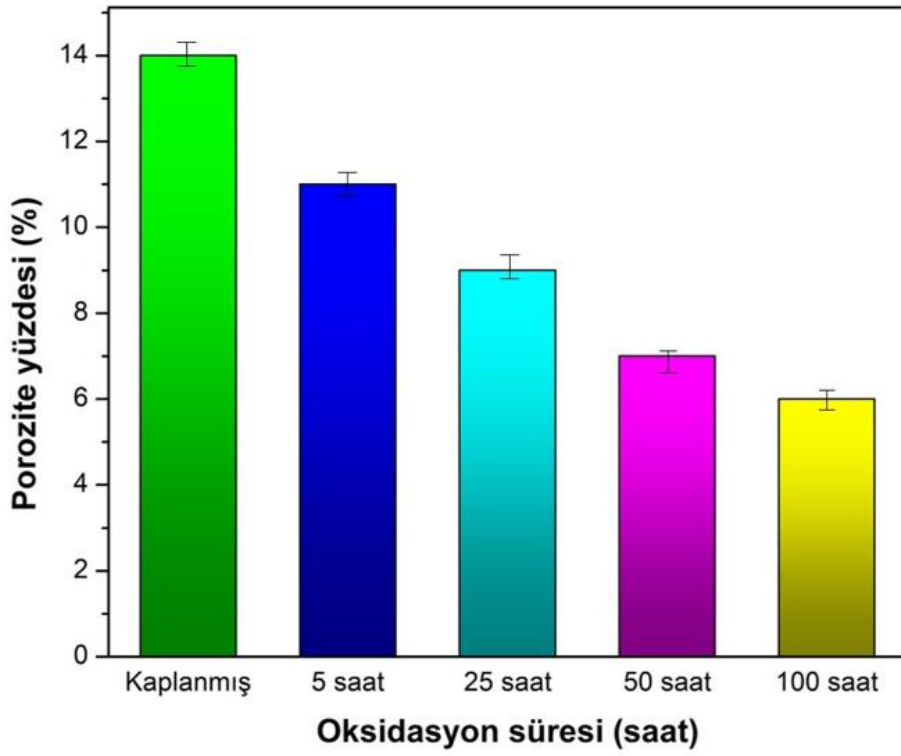
Kaplanmış numune	5 saat	25 saat	50 saat	100 saat
435 ± 40	470 ± 25	510 ± 30	540 ± 25	560 ± 45



Şekil 4.4: APS yöntemi ile kaplanan Mangan cüruf esaslı numunenin 600°C’ de geręekleřtirilen oksidasyon deneyi öncesi ve sonrasındaki sertlik ölçümleri.

Tablo 4.2: 600°C’ de gerçekleştirilen sırasıyla; 5 saat, 25 saat, 50 saat ve 100 saatlik oksidasyon deneyi sonrası Mangan cüruf esaslı numunelerin porozite değerleri ve tolerans aralıkları.

Kaplanmış numune	5 saat	25 saat	50 saat	100 saat
14 ± 5	11 ± 4	9 ± 4,5	7,5 ± 4	6 ± 5



Şekil 4.5: APS yöntemi ile kaplanan Mangan cüruf esaslı numunenin oksidasyon deneyi öncesi ve sonrası porozite ölçümleri.

Tablo 4.1 ve Şekil 4.4’te görüldüğü üzere numunelerin 600°C’de oksidasyon deneyinde, deney süresi uzadıkça numunelerin sertlik değerlerinde artış meydana gelmiştir. Sertlik değeri süre ve sıcaklığa doğrudan bağlıdır. Deney süresi ve sıcaklığı arttığında üst kaplamada bulunan boşluklar sinterleşmeden dolayı kapandığından dolayı porozite oranı azalıyor.

Tablo 4.2 ve Şekil 4.5'te görüldüğü gibi deney süresi uzadıkça porozite değerleri azalmaktadır. Porozite oranı azaldıkça sertlik değeri yükselir. Bu sebepten dolayı Tablo 4.1 ve Şekil 4.4'te deney süresi arttıkça sertlik değerleri artmıştır.

4.1.2 Mangan Cürufu İçeriğine Sahip TBC Sisteminin İzotermal Sıcak Korozyon Davranışları

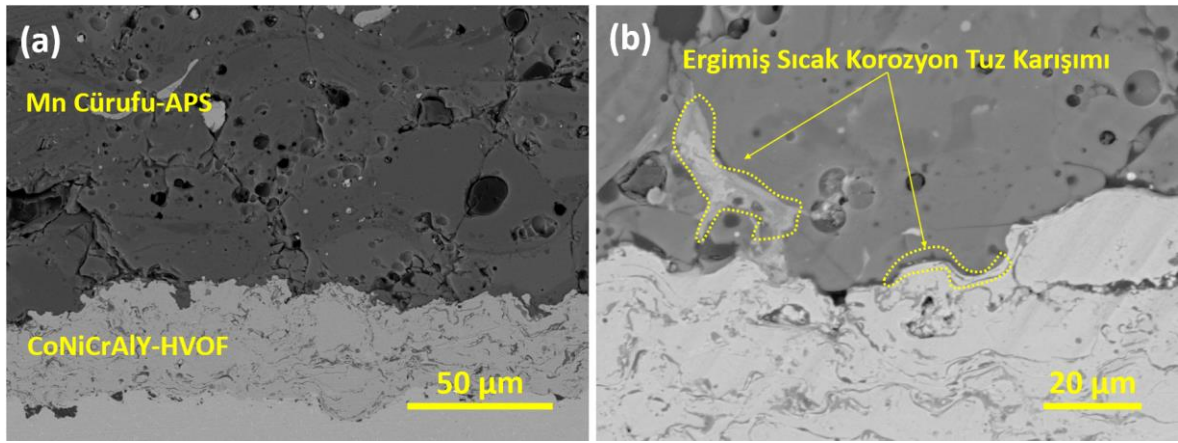
Mn cüruf esaslı TBC numunesi 600°C'de izotermal yüksek sıcaklık fırınında sırasıyla 1 saat, 3 saat, 5 saat ve 10 saat olmak üzere sıcak korozyon deneyine tabi tutulmuştur. Sıcak korozyon deneyinde numune üzerine 2-3 mg/cm² miktar aralığında % 45 Na₂SO₄ + % 55 V₂O₅ kimyasal bileşimine sahip tuz, numunenin kenarlarına çok fazla gidilmeden numune ortasına dağıtılarak yüksek sıcaklık fırınına koyulmuştur. Numune ortasına dağıtılan sıcak korozyonda kullanılan kimyasal tuzun miktarının ne çok fazla ne de çok az olmaması şartıyla kullanım miktarına dikkat edilmiştir. Her bir sıcak korozyon deneyi için fırının 600°C'e geldiği dakikadan itibaren saatleri hesaplanıp, deney süreleri tamamlanınca fırın kapatılmıştır. Deney süresi tamamlanan her bir numune fırının soğumasının ardından çıkarılmıştır. SEM cihazında görüntü alımı için soğuk bakalite alınan numunelere, zımparalama ve parlatma işlemleri uygulanmıştır. Sonrasında ise SEM görüntüleri alınmıştır.

4.1.2.1 Mangan Cürufu İçeriğine Sahip TBC Sisteminin 600°C'de İzotermal Sıcak Korozyon Davranışlarının İncelenmesi

600°C'de sıcak korozyon deneyine tabii tutulan Mangan cürufu esaslı üst kaplamaya sahip TBC numunesinin, deney sonrasında alınan SEM ara yüzey kenar görüntüsü Şekil 4.6'da verilmiştir. 600°C'de sıcak korozyon deneyinde kullanılan % 45 Na₂SO₄ + %55 V₂O₅ kimyasal bileşimine sahip tuzun sıcaklığın etkisiyle ergiyerek ara yüzeye dağıldığı Şekil 4.7'de görülmektedir. Ergimiş sıcak korozyon tuzları TBC sisteminin üst yüzeyindeki boşluk ve gözeneklerden sızarak bağ kaplama ve üst kaplama ara yüzeyi arasında birikmiş ve TBC sisteminde hasar oluşumunu hızlandırmıştır.

Deneylerin yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilmesi ise, APS yöntemiyle üretilen üst kaplama yapısında mevcut olan boşluk, gözenek ve porozitelerin ilerleyen korozyon sürecine bağlı olarak kapanmaya başladığını göstermektedir.

Atmosfer koşullarına açık bir şekilde gerçekleştirilen sıcak korozyon deneylerinde sinterleşme etkisinin de var olduğu görülmektedir. TBC sistemlerinde ilerleyen korozyon sürecine bağlı olarak sinterleşme termal iletkenliği ve sertliği artıracığından sistemin esas görevi olan termal yalıtım özelliğinin azalmasına neden olacağı düşünülmektedir. Yüksek sıcaklığın etkisi ile yoğunlaşan üst kaplama malzemesinin ısı iletkenliğinde artışlar meydana gelecektir. Isıl iletkenliğin artması da kullanım koşulları esnasında altlık malzemeye daha fazla ısı iletilmesi ve sistemin daha çabuk hasara uğramasına neden olacaktır. 600°C’de yapılan sıcak korozyon sonrası SEM ara yüzey kenar görüntüsü Şekil 4.6’da verilmiştir.



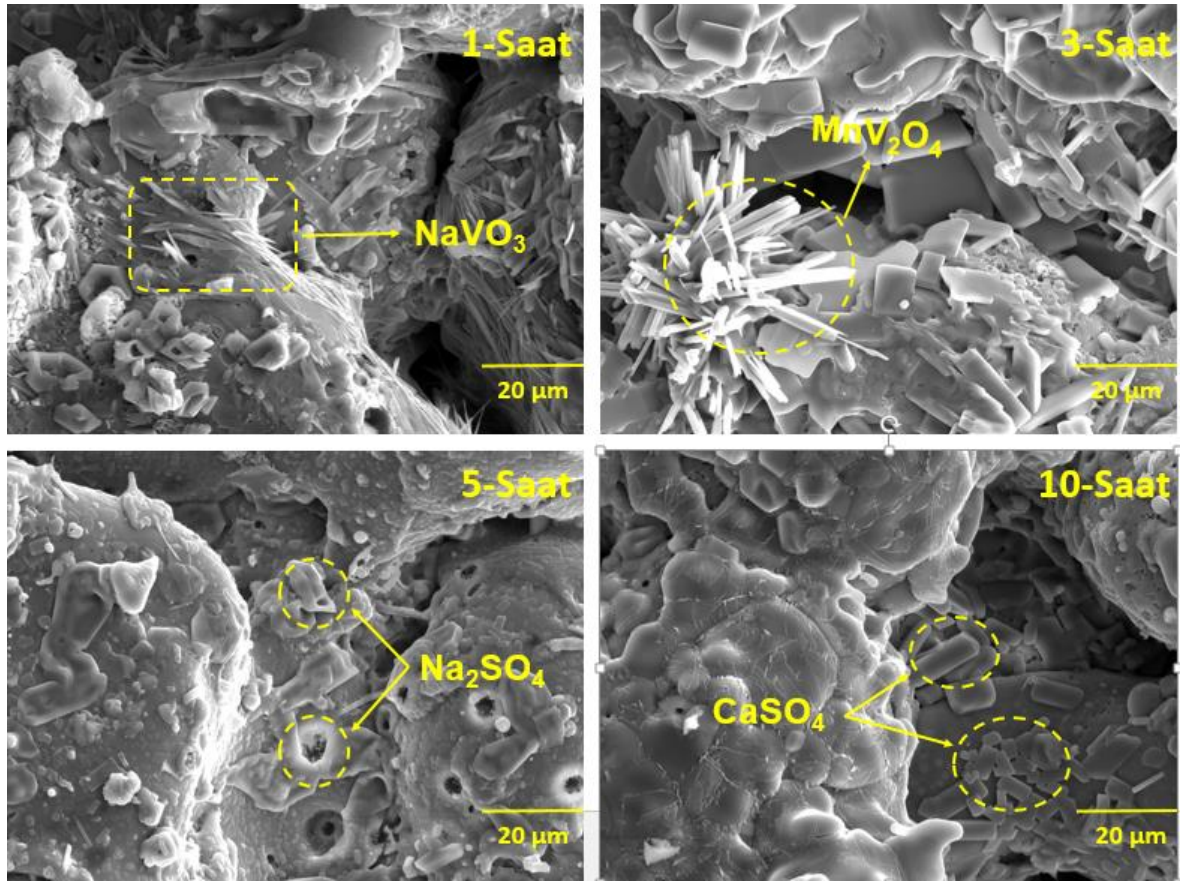
Şekil 4.6: 600°C’de gerçekleştirilen sıcak korozyon testine ait; (a) korozyon öncesi, (b) 5 saat korozyon deneyi sonrası SEM ara yüzey kenar görüntüsü.

600°C’de gerçekleştirilen Tip II sıcak korozyon deneyindeki 1 saat, 3 saat, 5 saat ve 10 saat sonunda elde edilen üst yüzey SEM görüntüleri verilmiştir. Yüksek büyütmelerde elde edilen SEM görüntülerinde ilk 1 saatlik test sonrasında ergimiş sıcak korozyon tuzlarının TBC sisteminin üst yüzeyinde sıcak korozyon etkileri oluşturmaya başladığı görülmektedir. Camsı yapıya sahip üst kaplama tabakasında çubuksu yapılar oluşmaya başlamıştır. Dendirit şeklinde oluşmaya başlayan çubuksu yapılar ilerleyen korozyon sürecine bağlı olarak uzun çubuksu yapılara dönüşmeye başlamışlardır. Uzun çubuksu yapılar kaplama tabakasında faz değişimlerinin meydana geldiğinin göstergesi olduğu düşünülmektedir.

Korozyon tuzu içerisinde mevcut olan sodyum ve vanadyum elementlerinin üst kaplama ve kendi aralarında reaksiyon oluşturmalarının neticesinde farklı faz yapıları oluşmaya

başlamıştır. 1 saat deney süresi sonunda NaVO_3 fazı oluşmuştur. Bu faz şekilde de görüldüğü gibi çok çok ince (tüy gibi) çubuksu yapılar görünümündedir.

Deneyin 5 saatlik süre sonundaki çıkan SEM üst yüzey görüntüsünde Na_2SO_4 fazı ortaya çıkmıştır. Na_2SO_4 fazı, boşluklu yapı görünümüne sahiptir. Şekil 4.7’de ki 3 saat deney süresi sonunda MnV_2O_4 fazı ortaya çıkmıştır. Bu faz ise, ince çubuklar ve çubuksu kareler görünümündedir. Uzun çubuksu yapılar sistem içerisindeki üst kaplamada hacim artışı meydana getireceğinden kaplama yapısının bozulmasına neden olacağı düşünülmektedir. 600°C ’de, sırasıyla 1 saat, 3 saat, 5 saat ve 10 saat gerçekleştirilen düşük sıcaklık sıcak korozyon deney sonrası numunenin SEM üst yüzey görüntüsü Şekil 4.7’de verilmiştir.

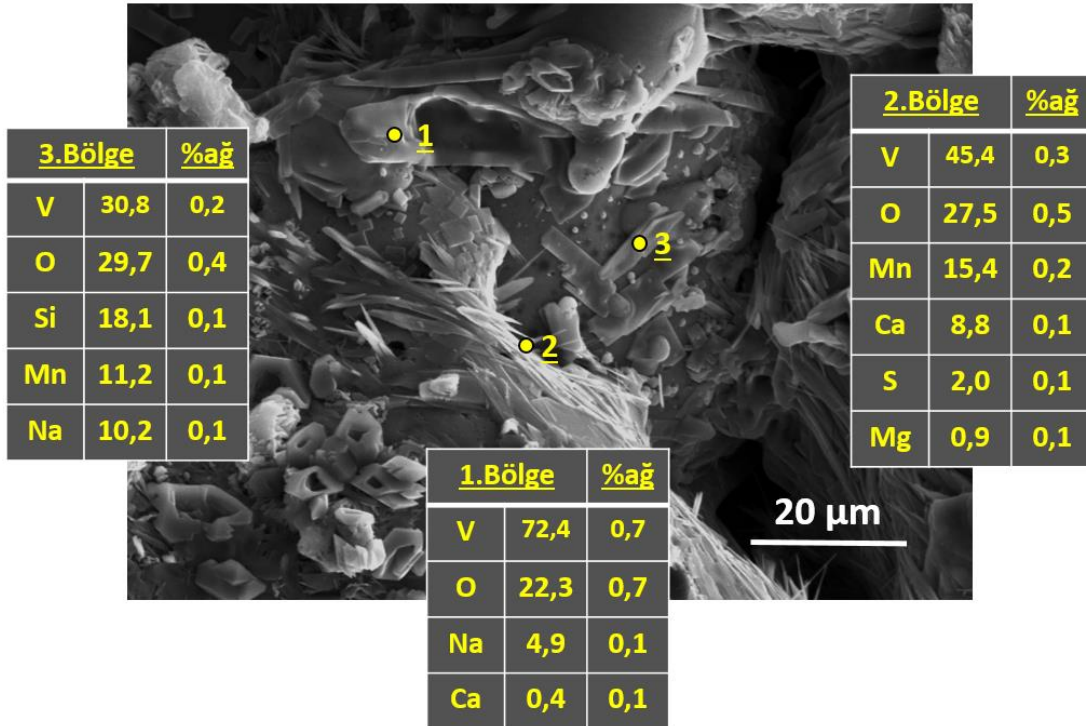


Şekil 4.7: 600°C ’de, sırasıyla 1 saat, 3 saat, 5 saat ve 10 saat yapılan düşük sıcaklık sıcak korozyon deney sonrası numunenin SEM üst yüzey görüntüsü.

600°C ’de yapılan düşük sıcaklık sıcak korozyon sonrası TBC sistemlerinin üst yüzeyinden elde edilen elementel nokta analizi verilmiştir. Elementel nokta analizinde işaretlenen noktaların hangi elementleri içerdiği net bir şekilde görülmektedir.

1 nolu bölgede Vanadyum, Oksijen, Sodyum ve Kalsiyum elementlerine yoğun bir şekilde rastlanılmaktadır. 2 nolu bölgede Oksijen, Vanadyum, Sodyum, Kalsiyum, Silisyum, Kükürt ve Alüminyum elementlerinin yoğunluğu görülmektedir.

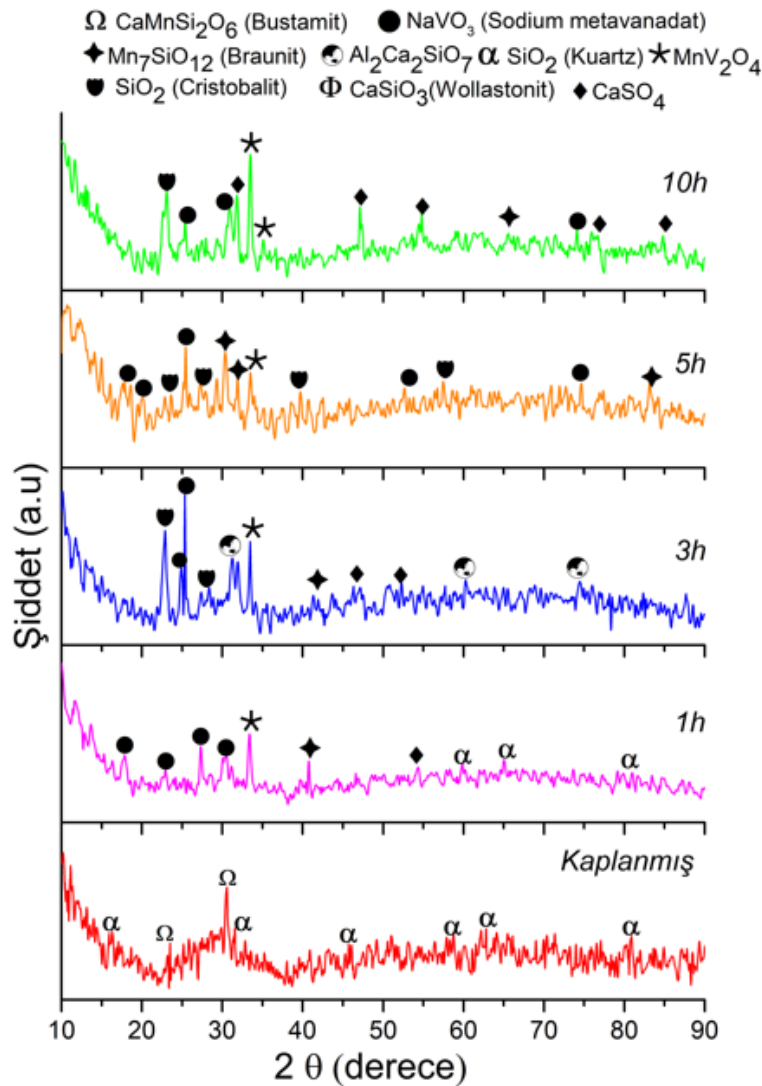
3 nolu bölgede ise, Oksijen, Vanadyum, Kalsiyum, Mangan, Silisyum, Magnezyum ve Alüminyum elementlerinin yoğunluğu görülmektedir. Elde edilen üst yüzey SEM görüntüsünde sıcak korozyon tuzlarının etkisi net bir şekilde görülmektedir. Uzun çubuksu yapıların var olması ergimiş korozyon tuzlarının yüksek sıcaklıklardaki etkisini net bir şekilde göstermektedir. 600°C’de gerçekleştirilen sıcak korozyon sonrası üst yüzey EDS görüntüsü Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.8: 600°C’de, 1 saat deney süresiyle gerçekleştirilen sıcak korozyon sonrası üst yüzey EDS görüntüsü.

Sıcak korozyon deney öncesi ve sonrasında yapılan XRD analiz sonuçlarına göre; korozyon testlerinden önce SiO₂ (Kuartz), CaMnSi₂O₆ (Bustamit) ve CaSiO₃ (Volastonit) faz yapıları analizde net bir şekilde görülmektedir. Sıcak korozyon deneylerinin başlamasının ardından ergimiş korozyon tuzlarının varlığı cüruf içerisinde eser miktarda bulunan Mn metali ile

MnV₂O₄ bileşimini oluşturmuştur. V₂O₅ ve Na₂SO₄ tuz karışımlarının ergiyerek aralarında gerçekleştirdikleri korozyon ürünü olan NaVO₃ (Sodyum vanadat) fazı görülmektedir. Üst kaplama malzemesi içerisinde bulunan Mn, Ca, Si ve Al elementleri ile de Mn₇SiO₁₂ (Braunit), SO₄, CaSO₄ ve MnO (Mangan Monoksit) faz yapılarına da rastlanmıştır. Sıcak korozyon testleri öncesinde camsı yapıya sahip olan TBC sisteminde meydana oluşan bu spinel faz yapıları sistemin hasara uğramasını arttırıcı etkilere yol açacaktır. 600°C’de, sırasıyla 1 saat, 3 saat, 5 saat ve 10 saat süreleri ile gerçekleştirilen düşük sıcaklık sıcak korozyon deneyi öncesi (kaplanan) ve sonrası cüruf esaslı TBC sistemine ait XRD analizi Şekil 4.9’da verilmiştir.



Şekil 4.9: 600°C’de, sırasıyla 1 saat, 3 saat, 5 saat ve 10 saat süreleri ile gerçekleştirilen düşük sıcaklık sıcak korozyon deneyi öncesi (kaplanan) ve sonrası Mangan cüruf esaslı TBC sistemine ait XRD analizi.

Daha sonra 600°C sıcak korozyon tozları numune yüzeyine konduktan sonra tozlar kaplama kompozisyonuyla reaksiyona girerek çok sayıda spinel bileşikler oluşturmuştur. 1 saatlik deney sonucunda korozyon etkisiyle yapı içerisinde NaVO_3 fazları oluşmuştur. Bu fazlar çubuğumsu ve iğnemsî yapıya benzemektedir. 3 saatlik deney süresi sonunda ise SiO_2 (Kristobalit), $\text{Al}_2\text{Ca}_2\text{SiO}_7$, fazları ortaya çıkmıştır.

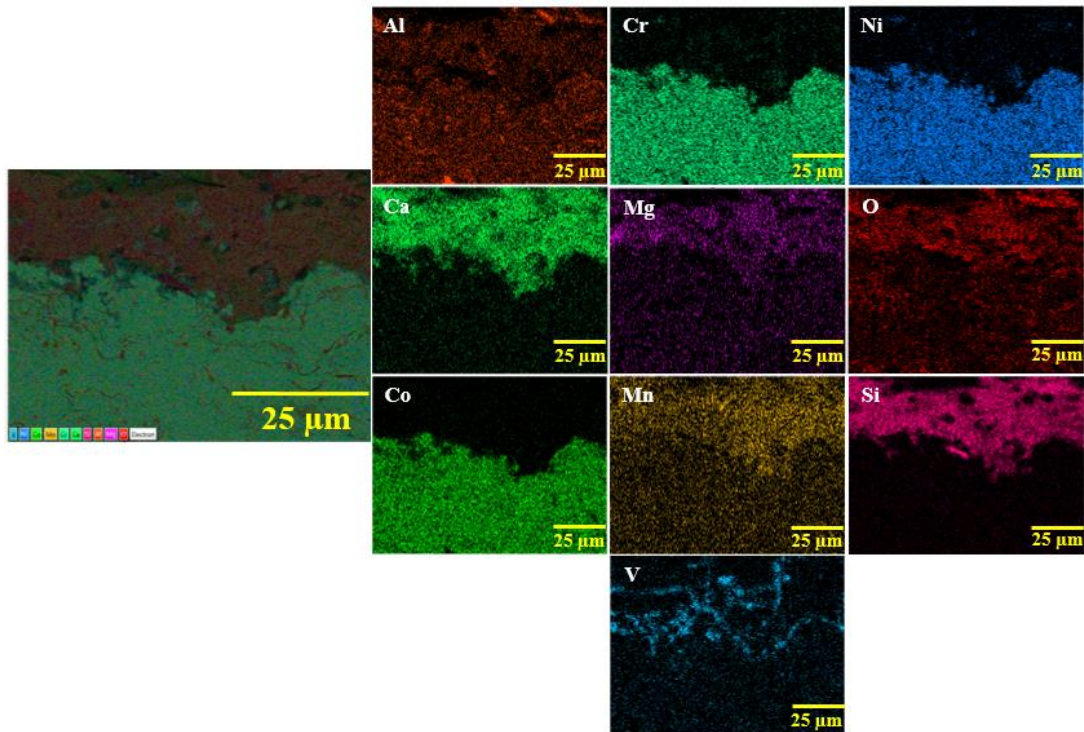
Yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen sıcak korozyon testlerinin ardından yapı içerisinde 3 saatlik deney süresi sonunda 3 saatlik korozyon deneyinin ardından Mg, Al, Ca ve Si elementleri aşağıdaki olası eşitliklere göre faz değişimleri sergilemişlerdir (Yuan vd., 2022; Zhou vd., 2023; Liu vd., 2023; Aghababaeian vd., 2023; Panichkittikul vd., 2024; Amal vd., 2024; Yan vd., 2024). Çubuksu yapıyı oluşturan MnV_2O_4 bileşiğinin oluşumunda korozyon tuzlarından olan Na_2SO_4 ile Mn elementi yer değiştirme tepkimesine girerek MnSO_4 bileşiği meydana gelmiştir. Devamında MnSO_4 ile V_2O_5 reaksiyona girerek çubuksu yapıda olan MnV_2O_4 bileşiği oluşmuştur. Bu oluşum Eşitlik 4.10'da verilmiştir (Wei vd., 2024).



3 saatlik 600°C'lik sıcak korozyon testlerinin ardından Eşitlik 4.6, 4.7, 4.8 ve 4.9'daki olası reaksiyonlar eşliğinde üst kaplama yapısında $\text{Al}_2\text{Ca}_2\text{SiO}_7$, NaVO_3 ve SiO_2 fazları ortaya çıkmıştır. Özellikle bu faz yapıları TBC sistemine dışardan eklenen Vanadyum elementinin etkisi sonucunda meydana gelmiştir. Sıcak korozyonun 5 ve 10 saatlik ilerleyen süreçlerinde benzer faz yapılarının sistemde yoğun olduğu görülmektedir. Sıcak korozyon testlerinin gerçekleştirildiği sıcaklıklarda artan test süresinin üst kaplama yapısında çok fazla bir faz değişikliği oluşturmadığı anlaşılmıştır. Oluşan bu bileşikler numune de gerilimi arttırmıştır. Artan bu ek gerilim sonrasında kaplamada hasar meydana gelmiştir. Ayrıca süre arttıkça çok sayıda indirgenme ve yükseltgenme tepkimeleri gerçekleşmiştir. 600°C'de gerçekleştirilen

düşük sıcaklık sıcak korozyon testlerinden sonra TBC sisteminin ara yüzey kesit görüntüsünün elementel haritalama analizi gerçekleştirilmiştir. Elementel haritalama analizine göre Mn cürufundan üretilen üst kaplama tabakası, CoNiCrAlY içeriğine sahip bağ kaplama tabakası ve Inconel 718 altlık malzeme net bir şekilde görülmektedir.

Yüksek sıcaklığın, test koşullarının atmosfer koşullarına açık olarak gerçekleştirilmesinin ve sıcak korozyon tuzlarının TBC sistemine olan etkisi görülmektedir. Sistem içerisinde üst kaplama yapısında Kalsiyum, Magnezyum, Silisyum ve Mangan elementlerine rastlanılmaktadır. Üst kaplama tabasında, bağ kaplama tabakasında ve altlık malzemede herhangi bir sıcak korozyon tuzlarının elementlerine rastlanılmamıştır. Bunun sebebinin sıcak korozyon tuzlarının sistem içerisinde daha derinlere inmesi veya diğer elementlere göre miktarının oldukça az olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca yapı içerisinde oksijen elementinin tüm kesit yüzeyine dağılmış olması da sistemin sıcak korozyon testlerinin atmosfer koşullarına açık olarak gerçekleşmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. 600°C’de yapılan sıcak korozyon sonrası cüruf esaslı TBC sistemi ait kenar görüntüsü Şekil 4.10’da verilmiştir.



Şekil 4.10: 600°C’de, 10 saat deney süresiyle gerçekleştirilen sıcak korozyon sonrası cüruf esaslı TBC sistemine ait kenar görüntüsü.

4.2 Tartışma

Gerçekleştirilen tez çalışması, 600°C’de izotermal oksidasyon ve sıcak korozyon testleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen bu testler literatürde mevcut olan diğer çalışmalar ile karşılaştırmalı olarak tartışılmıştır.

4.2.1 Oksidasyon Testleri Sonrasında Mangan Cürufu Esaslı TBC Sisteminin Özelliklerinin Literatür ile Tartışılması

Gerçekleştirilen tez çalışmasında, Inconel 718 nikel esaslı süper alaşım altlık malzeme üzerine termal spreycaplama yöntemlerinden oksitsiz, porozitesiz ve yoğun bir kaplama biriktirilmesini sağlayan bir yöntem olan HVOF termal spreycaplama tekniği kullanılarak CoNiCrAlY içerikli metalik esaslı bağ kaplamalar kaplanmıştır.

Bağ kaplamaları üretilen sistemlerin üzerine APS yöntemiyle tamamen atık bir ürün olan ve mangan üretimi sonrasında ortaya çıkan cüruf esaslı üst kaplamanın biriktirildiği TBC sistemleri 600°C’de 5, 25, 50 ve 100 saat boyunca fırın içerisinde izotermal olarak oksidasyon testlerine maruz bırakılmıştır. Gerçekleştirilen bu tez çalışmasına benzer olarak yine APS yöntemini kullanarak TBC sistemlerinin üst kaplamalarını üreten Hu ve arkadaşları geleneksel üst kaplama malzemesi olan YSZ malzemesini üst kaplama malzemesi olarak kullanmışlar ve oksidasyon testlerini gerçekleştirmişlerdir. Hu ve diğerlerinin gerçekleştirmiş oldukları modelleme çalışmasında bizim çalışmamızın aksine oksidasyon testlerinin sıcaklıkları 1100-1150°C arasında değişmiştir (Hu vd., 2021). Bizim gerçekleştirmiş olduğumuz çalışmada sıcaklığın nispeten diğer çalışmaya göre düşük olması ve üst kaplama malzememizin camsı bir faz yapısına sahip olmasından ve oksijen geçişinin geleneksel üst kaplama malzemelerine göre daha az olmasından dolayı sistem içerisinde TGO oluşumu görülmemiştir. TBC sistemi oksidasyon testlerine karşı dayanımını korumuştur. Literatürde mevcut olan geleneksel üst kaplama malzemesiyle üretilen birçok çalışmada da benzer özellikler görülmüştür. Kaplama sistemi yüksek sıcaklığın etkisi ile TGO oluşumu meydana gelmiş sistemde gerilme artışları oluşmuş ve sistemler hasara uğramıştır (Ebrahimzade vd., 2019; Qin vd., 2024; Ouyang vd., 2017).

Ebrahimzade ve arkadaşlarının bizim çalışmamıza benzer olarak MCrAlY içerikli bağ kaplamayı nikel esaslı altlık üzerine kaplanması ve üzerine APS yöntemiyle üst kaplamanın biriktirilmesiyle ürettikleri TBC sistemlerini termal çevrimli oksidasyon testlerine maruz bırakmışlardır.

Termal çevrimli oksidasyon testlerinin ardından TBC numunelerinde çatlak başlangıcı, ilerlemesi ve hasar oluşumları meydana gelmiştir. Gerçekleştirilen bu çalışmada oksidasyon etkisine ek olarak termal olarak ısınma ve soğumanın da etkisi olduğu net bir şekilde görülmüştür. Bizim gerçekleştirmiş olduğumuz çalışma ise izotermal oksidasyon testleri olarak gerçekleştirildiği için termal olarak ısınma ve soğumanın yani termal gradyanın etkisi görülmemiştir (Ebrahimzade vd., 2019).

Ouyang ve arkadaşlarının kendi kendini iyileştiren ve APS yöntemiyle ürettikleri TBC sistemlerinde 1 atmosfer basınç altında 1100°C’de 20 saat boyunca gerçekleştirdikleri çevrimli oksidasyon testlerinde ise kendiliğinden oluşan oksit tabakasının sistem içerisine katılan SiC etkisi ile kendi kendini iyileştirdiği ve normalde oluşması gereken TGO tabakasının kalınlığının azaldığı ve hatta neredeyse yok olduğu görülmüştür (Ouyang vd., 2017). Deneysel çalışmalar değerlendirildiğinde üst kaplama üzerine oksijene karşı afinitesi oldukça yüksek olan alüminyum içerikli bir koruma tabakası kaplandığında oksijenin kaplama içerisine nüfus etmesi zorlaşmaktadır. Benzer etki bizim gerçekleştirmiş olduğumuz tez çalışmasında üst kaplamadaki camsı yapıda da mevcuttur. Üst kaplamada mevcut olan camsı yapı atmosferden gelen oksijen elementinin alt tabakalara ilerlemesini azaltmaktadır. Bilindiği üzere yüksek sıcaklık oksidasyonu havacılık ve uzay sanayisinde kaçınılmaz mümkün olmayan bir hasar mekanizmasıdır. TBC sistemleri içerisinde üretilmesi oldukça maliyetli üst kaplama malzemeleri yerine maliyeti neredeyse sıfır olan ve tamamen atık bir ürün olan seramik esaslı kaplamaların kullanılması ilerleyen zamanlarda da yüksek sıcaklık oksidasyon hasar mekanizmasını azaltıcı etkiler oluşturacağı düşünülmektedir.

Dong ve arkadaşları da bizim gerçekleştirmiş olduğumuz çalışmaya benzer şekilde APS ve HVOF termal spreyci kaplama yöntemlerinin bir arada kullanıldığı bir çalışmada, oksijen elementinin termal çevrimle birlikte olan etkisini inceledikleri bir çalışmada da yaklaşık olarak 1150°C’de ani ısıtma ve soğutmaların TBC üzerinde olan etkisini incelemişlerdir.

Yaklaşık olarak 90 çevrime sonucunda TBC sistemlerinde hasarlar meydana gelmiş ve testler son bulmuştur (Dong vd., 2023).

Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde geleneksel oksitli, poroziteli ve laminar üretim yöntemi olan APS yöntemi ile üst kaplamaların biriktirilmesine ek olarak oksitsiz, porozitesiz ve yoğun bir yapı oluşumuna sebep olan HVOF tekniğinin bağ kaplama üretiminde kullanılması oldukça verimli sonuçlar vermiştir. Üst kaplama yapısında mevcut olan boşluk ve gözeneklerin oksijen geçini arttırması bu sistemlerde dezavantaj sağlarken, testlerin yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilmesinden dolayı sistem içerisindeki ısı girdisini oldukça düşürmektedir. Bu sebepten dolayı kullanılacak olan TBC sistemlerinin maruz kalacakları sıcaklıklar oldukça önemlidir. Eğer TBC sistemleri otomotiv ve denizcilik gibi sektörlerde kullanılacaksa üst kaplamadaki ısı girdisinden ziyade oksijen geçişinin engellenmesi daha önemlidir. Eğer havacılık ve uzay sanayisinde TBC sistemi kullanılacaksa ısı girdisinin bu sistemler içerisinde yüksek olmasından dolayı APS yöntemiyle üretilen boşluklu ve gözenekli yapı ısı girdisini azaltacağından kullanım amacı için oldukça uygun olacaktır. Ayrıca bağ kaplamaların oksitsiz, porozitesiz ve yoğun bir yapı ile oluşturulması ise, üst kaplamadan geçen oksijen elementlerinin altlık malzemeye ulaşmadan sistem içerisinde mevcut olan ve oksijene karşı afinitesi yüksek olan elementler ile etkileşmesini sağlayacaktır. Bu etkileşim her ne kadar oksit tabakasında artış oluştursa da süper alaşım altlık malzeme de herhangi bir hasar oluşumuna sebebiyet vermeyecektir.

Guo-sheng AN ve diğerinin yüksek sıcaklık oksidasyonu ve oksit büyümesi araştırdıkları bir çalışmada da bizim çalışmadakine benzer bir şekilde altlık malzeme olarak Inconel 718 süper alaşım malzeme üzerine NiCoCrAlY bağ kaplama ve üzerine geleneksel TBC malzemesi olan seramik kaplamalar kaplanmıştır. Bizim çalışmamızdan farklı olarak TBC sisteminin üretiminde geleneksel üst kaplama malzemesi üzerine yitrium alüminyum garnet (YAG) kaplama biriktirilmiştir. Çift tabakalı üst kaplamaya sahip bu sistemde NiCoCrAlY içeriğine sahip bağ kaplama D-Gun termal spreycaplama yöntemiyle biriktirilmiştir (Guo-sheng vd., 2023). Çift tabakalı sistemin oksidasyon etkisini azaltmak için üzerine lazer yöntemiyle ergittikleri tabaka kullanılmıştır.

Lazer ergitme yöntemiyle çift tabakalı sistem üzerine kaplanan TBC sisteminin 1100°C’de oksidasyon davranışlarının test edildiği çalışmada çift tabakalı sistemin üzerine uygulanan

koruyucu kaplamanın oksidasyonu azaltıcı etkisi olduğu görülmüştür. Benzer etki bizim gerçekleştirdiğimiz çalışmada üst kaplamadaki camsı yapılardan dolayı da meydana gelmiştir. Literatürdeki diğer çalışmalarda da bizim çalışmamıza benzer etkiler görülmüştür (Weijie ve Chen, 2023; Johromi, 2023; Dong vd., 2022).

Yenilenmiş TBC'lerin bileşenlerinin performans değerlendirmesi, TBC'lerin mühendislik uygulamaları ve yüksek sıcaklık bileşenlerinin servis ömrünün uzatılması açısından çok önemlidir. Pan ve arkadaşları, gerçekleştirilen bu tez çalışmasından farklı olarak EB-PVD yöntemiyle üretimi tamamlanan TBC sistemlerinin mikro yapılarını, oluşan oksit tabakaların faz bileşimlerini ve kristal yapılarını inceledikleri çalışmada, birincil oksidasyon sürelerinden sonra yenilenmiş TBC numunelerinin ikincil oksidasyon davranışlarını incelemişlerdir. Yapılan çalışmada, γ fazının kabalaşmasının, yenilenmeden önce birincil oksidasyondan sonra tek kristalli süper alaşım altlıkta meydana geldiğini ve bu olayın, yenilenmiş tek kristalli süper alaşım altlıkta muhafaza edildiğini göstermektedir. Ayrıca, γ fazı kanal genişliği, yenileme öncesi birincil oksidasyon süresinin artmasıyla birlikte arttığı görülmüştür. Yenilenen numunelerin oksit tabakası, ilk oksidasyon aşamasında belirli miktarda θ - Al_2O_3 'e sahiptir ve içeriği, yenileme öncesindeki birincil oksidasyon süresi ile pozitif olarak ilişkilidir. Yenilenen numunelerin oksit tabakası, geç oksidasyon aşamasında karışık oksit parçacıklarıyla katkılanmış Al_2O_3 'ten oluşur. Yenilenmiş numunelerin TGO kalınlığı, aynı oksidasyon koşulu altındaki sıradan numunelerinkinden daha yüksektir. Yenilenen numunelerin oksit tabakasında oluşan boşluklar ve çatlaklar gibi belirli miktarda mikro kusurlar vardır. Ek olarak, tek kristal alt tabakanın mikro yapılarından etkilenen, yenilenen numunelerin oksit tabakası eş eksenli Al_2O_3 iken sıradan numunelerin TGO'su üstte eş eksenli Al_2O_3 ve altta sütunlu Al_2O_3 'tür (Pan vd., 2024). Bizim gerçekleştirdiğimiz çalışmada ise, Pan ve arkadaşlarının çalışmalarının aksine oksidasyon hasar mekanizması altlık malzemeye kadar ulaşmamıştır. Bunun sebebinin ise, oksidasyon testlerinin 1050°C 'de değil 600°C gibi daha düşük sıcaklıklarda gerçekleşmiş olmasından kaynaklanmaktadır.

Zhang ve diğerleri, geleneksel YSZ üst kaplama malzemesinin AlCoCrFeNi metalik bağ kaplama üzerine farklı iki yöntem olan APS ve PS-PVD yöntemlerini kullanarak kapladıkları TBC numunelerinin oksidasyon kinetiklerini karşılaştırdıkları çalışmada, oksidasyon testlerini 1000°C ve 1100°C 'de gerçekleştirmişlerdir.

Her iki yöntemde de kullanılan AlCoCrFeNi metalik bağ kaplama malzemesi mükemmel bir oksidasyon direnci gösterdiği görülmüştür. Ayrıca, bizim tez çalışmamızdan farklı olarak TBC numunelerinin her birinde yoğun bir TGO tabakası oluştuğu görülmüştür (Zhang vd., 2024).

Yeni bir TBC malzemesi olarak yüksek entropili okside sahip sistemlerin oksidasyon davranışlarının incelendiği diğer bir çalışmada, Zhang ve diğerleri, $(La_{0.2}Gd_{0.2}Y_{0.2}Sm_{0.2}Ce_{0.2})_2Zr_2O_7$ zirkonya esaslı 5 farklı elementin eşit oranda bir araya getirilmesiyle oluşturulan oksit içerikli yüksek entropili alaşımı üst kaplama malzemesi olarak kullanmışlardır. Yüksek düzensizlik özelliğine sahip olan yüksek entropili alaşımların TBC sistemlerinde yeni nesil üst kaplama malzemesi olarak kullanılması yüksek sıcaklıklarda sistemi oksidasyon testlerine karşı daha korunaklı hale getirmektedir. Bizim çalışmamıza benzer şekilde yeni nesil üst kaplama malzemesinin kullanıldığı çalışmanın bizim çalışmamızdan farkı ise, tez çalışmamızdaki üst kaplama malzemesi tamamen düşük ücretli ve sıfır maliyetlidir. Oysaki Zhang ve arkadaşlarının gerçekleştirmiş olduğu çalışmadaki üst kaplama malzemesi oldukça zahmetli ve fiyatı yüksektir (Zhang vd., 2024-2). Ayrıca yüksek entropili alaşımların üst kaplama yapısında metal bileşenlerin güvenliğini ve çalışma sıcaklığını artırmak ve uzun süreli servis sırasında aşırı ısınmayı önlemek için gaz türbini kanatlarının yüzeyinde kullanılmaya başlanması da düşünülmektedir.

Shi ve diğerlerinin gerçekleştirmiş olduğu APS yöntemiyle TBC hazırlamak için iki tür YSZ nano toz malzemesi kullanılmıştır. Öncelikle farklı orijinal morfolojilere sahip hammaddeler, farklı içyapıya sahip hammaddeleri oluşturduğu görülmüştür. İkinci olarak, bu hammaddeler püskürtme sonrasında farklı yapı ve gözenekliliğe sahip TBC'ler meydana getirmiştir. Buna bağlı olarak hammaddelerin morfolojilerindeki farklılıklar, kaplamaların performansında da farklılıklara neden olmuştur. Bizim tez çalışmamızdan farklı olarak gerçekleştirilen bu çalışmada üst kaplama olarak geleneksel YSZ değil yeni nesil YSZ üst kaplama malzemeleri kullanılmış ve oksidasyon davranışları test edilmiştir (Shi vd., 2024).

Zhang ve arkadaşlarının TBC performanslarını geliştirmek için lazer ergitme yöntemini kullandıkları çalışmada, bağ kaplamaların dayanımını geliştirdikleri görülmüştür.

1050°C'ye aniden ısıtma ve soğutma yöntemine dayanan çalışmada bağ kaplamaların üstün dayanım gösterdiği görülmüştür.

Bizim gerçekleştirdiğimiz çalışmada ise, oksidasyon testleri için fırının sürekli aynı sıcaklıklarda tutulması gerekmektedir. 600°C gibi düşük bir sıcaklıklarda oksidasyon testlerinin gerçekleştirilmesi ve sıcaklığın çevrimli değil izotermal olması bizim gerçekleştirdiğimiz çalışmada TBC numunelerinin daha fazla dayanabildiğini göstermiştir. Bizim tez çalışmamızda, bağ kaplamanın HVOF tekniğiyle biriktirilmesi bağ kaplamada oksitsiz, porozitesiz ve gözeneksiz bir yapı oluşturmuştur. Üst kaplama tabakasının ise, maliyeti neredeyse sıfır ve atık bir ürün olan cüruf malzemesinden oluşması yüksek sıcaklıklarda üst kaplama tabakasının camsı yapılara dönüşmesi kaplama tabakasındaki oksidasyon hasar mekanizmasını azaltıcı etkiler oluşturmuştur.

Gerçekleştirilen bu çalışma, yeni nesil HVOF tekniği ile geleneksel termal sprey kaplama tekniği olan APS tekniğinin bir arada kullanıldığı ve üst kaplama malzemesinin maliyetsiz olduğu eşsiz bir çalışma olarak değerlendirilmektedir. Üst kaplama tabakasının yüksek sıcaklıklarda camsı tabakalar oluşturması oksijen geçişini engellediği gibi, bağ kaplama tabakasının yoğun ve gözeneksiz olması da oksidasyon hasar mekanizmasında meydana gelen TGO artışlarını engellemiştir.

4.2.2 Sıcak Korozyon Testleri Sonrasında Mangan Cürufu Esaslı TBC Sisteminin Özelliklerinin Literatür ile Tartışılması

Gerçekleştirilen tez çalışmasında havacılık ve uzay sanayisi başta olmak üzere birçok endüstride sıklıkla kullanılan TBC sistemlerinin 600°C’de yakıtlardan ve atmosferden gelen kirliliklerin oluşturduğu sıcak korozyon davranışları incelenmiştir.

Termal sprey kaplama yöntemlerinden olan HVOF ve geleneksel bir üst kaplama tekniği olan APS yöntemlerinin mükemmel bir uyum sergileyerek üretildiği TBC sistemlerinde oksidasyon testlerinde olduğu gibi sıcak korozyon testlerinde de aynı özelliklere sahip TBC sistemleri kullanılmıştır. Altlık malzeme olarak Inconel 718 nikel esaslı süper alaşım malzeme üzerine CoNiCrAlY içerikli üst kaplamaya sahip sistem üzerine seramik esaslı cüruf malzemeler biriktirilmiş ve TBC sistemleri üretilmiştir.

Yaklaşık olarak 1 inç çapında olan altlık malzemeler sıcak korozyon testlerine başlamadan önce 4 eşit parçaya bölünmüş ve üzerlerine ağırlıkça %55 V₂O₅ ve %45 Na₂SO₄ tuzları karıştırılıp eklenerek testlere başlanmıştır. İzotermal olarak gerçekleştirilen testler 1, 3, 5 ve

10 saatlik süreler eşliğinde gerçekleştirilmiştir. Literatürde düşük sıcaklık sıcak korozyonu olarak geçen bu testlere karşı tez kapsamında üretilen tüm TBC sistemleri stabilitesini muhafaza etmiştir.

Sigaroodi ve arkadaşlarının bizim çalışmamıza benzer şekilde HVOF yöntemiyle bağ kaplamalarını ürettikleri, üst kaplamalarını ise APS yöntemiyle ürettikleri TBC sistemlerinin sıcak korozyon davranışlarını incelemişlerdir (Sigaroodi vd., 2024). Gerçekleştirdikleri çalışmada, bağ kaplamaların bir kısmı HVOF bir kısmı ise APS yöntemi kullanılarak test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar oksitsiz, yoğun ve porozitesiz kaplama mikroyapısına sahip olan HVOF yöntemiyle üretilen TBC sistemlerinin APS yöntemiyle üretilenlere göre sıcak korozyon davranışlarına karşı daha fazla dayanıklı olduklarını göstermiştir. Bizim çalışmadan farklı olarak altlık malzeme seçiminde Inconel 738 nikel esaslı süper alaşım altlık malzemenin kullanıldığı çalışmada altlıkların boyutu bizim çalışmaya benzer şekilde 1 inç çapında seçilmiştir. Sıcak korozyon tuz karışımlarının ağırlıkça %50 V_2O_5 ve %50 Na_2SO_4 olarak seçilmiş ve testler 1/4 yerine tam bir TBC numunesi üzerinden gerçekleştirilmiştir. Testler sonrasında bizim çalışmamıza benzer şekilde HVOF tekniğinin APS yöntemine göre sıcak korozyon testlerine karşı daha dayanıklı olduğu kanısına varılmıştır.

Kırkıbyık ve diğerleri Inconel 625 nikel esaslı süper alaşım altlık malzeme üzerine biriktirdikleri yeni nesil üst kaplama malzemeleri kullanarak ürettikleri TBC sistemlerinin sıcak korozyon davranışlarını incelemişlerdir. Elde edilen faz yapıları ve reaksiyonlar ise, bizim gerçekleştirmiş olduğumuz çalışma ile benzerlik göstermiştir (Kırkıbyık vd., 2022). Korozyon testlerinin oldukça yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilmesi ve testlerin atmosfer koşullarına açık olmasından dolayı sistem içerisinden kendiliğinden gelişen oksit tabakası tabakalarında artışlar görülmüştür. Bizim gerçekleştirmiş olduğumuz çalışmada ise herhangi bir oksit tabakası artışı görülmemiştir.

Syamkumar ve diğerleri denizcilik endüstrisinde kullanılan dizel motorlardaki TBC sistemlerin sıcak korozyon davranışlarını incelemiştir (Syamkumar vd., 2024). Sıcaklık olarak bizim çalışmamıza benzer şekilde 600-800°C tip II düşük sıcaklık sıcak korozyonu olan bu çalışmada, bizim çalışmamızdan farklı olarak altlık malzeme seçiminde düşük karbonlu çelik malzemenin kullanıldığı çalışmada bağ kaplama olarak NiCrAlY üst kaplama

mullit kaplama kullanılmıştır. Çalışmada bizimkine benzer şekilde üst yüzeyden alınan SEM görüntülerinde uzun çubuksu yapılar görülmüş fakat gerçekleştirilen XRD analizlerinde üst kaplama içeriğinin farklı olmasından dolayı farklı faz yapıları ortaya çıkmıştır. Sıcaklığın düşük olmasına rağmen üst kaplama yapısında iç kısımlara kadar oksijen ilerlemiş ve TBC sistemine hasar vermiştir. Çalışmada altlık malzeme olarak çelik malzemenin kullanılması da oksidasyon ve korozyon sürecini etkileyen diğer bir faktör olmuştur. Bizim gerçekleştirmiş olduğumuz çalışmada altlık malzeme olarak süper alaşım Inconel 718'in kullanılması kaplamasız yüzeylerde dahi oksidasyon ve korozyon ürünleri oluşmamasında etkili olmuştur. Üst yüzeylerden alınan elementel haritalama analizlerinde de korozyon tuzlarının TBC sistemine olan etkisi net bir şekilde görülmektedir.

Xiang ve diğerlerinin farklı seramik üst kaplamaların üzerine uyguladıkları Na_2SO_4 ve V_2O_5 tuz karışımlarının etkisinin incelendiği diğer bir çalışmada ise, sıcak korozyon testleri 1000°C 'de 5 saat çevrimler halinde gerçekleştirilmiştir. Çevrimli sıcak korozyon testlerinin bizim gerçekleştirmiş olduğumuz izotermal korozyon testlerinden farklı korozyon testleri tek bir numune üzerinden gerçekleştirilmesi ve belli bir hasar oranı görüldükten sonra testlere son verilmesidir. Yaklaşık olarak %20'lik hasar oranı görüldükten sonra testlere son verilmiştir. Testlerde sıcaklık yüksek olması ve çevrimli olarak gerçekleşmesinden dolayı TBC sistemlerinde oluşan hasarlar oldukça fazladır (Xiang vd., 2023).

Moskal ve diğerleri yeni nesil üst kaplama malzemesi olan $\text{Sm}_2\text{Zr}_2\text{O}_7+8\text{YSZ}$ ile üretilen TBC sistemi üzerine sıcak korozyon davranışlarını incelemişlerdir. 920°C 'de gerçekleştirilen testlerde bizim çalışmamızdan üst kaplama malzemesi farklı olduğundan dolayı bizim gerçekleştirmiş olduğumuz çalışmadaki ortaya çıkan fazlardan daha farklı faz yapıları ortaya çıkmıştır (Moskal vd., 2020).

Huo ve diğerleri de geleneksel üst kaplama malzemesi olan YSZ'nin üzerine lazer yöntemiyle mikro glazing uygulayarak ürettikleri TBC sistemlerine 1100°C 'de 20 saat boyunca V_2O_5 ve Na_2SO_4 tuz karışımları eşliğinde sıcak korozyon deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Sistem içerisinde uzun çubuksu yapıların var olduğu ve bu uzun çubuksu yapıların YSZ sistemi içerisinde gelen yitrium elementi ile sıcak korozyon tuzları arasında mevcut olan V_2O_5 tuzlarından gelen vanadyum elementinin oluşturmuş olduğu faz yapısı olduğu görülmüştür.

Sistemde sıcak korozyon testlerinden sonra faz yapısının değişimi hacim artışına sebep olacağından TBC sistemlerinde hasarlar meydana gelmiştir (Huo vd., 2023). Bizim gerçekleştirmiş olduğumuz çalışmada ise, üst kaplama malzemesi camsı bir yapıya sahip olduğundan ve faz yapısında hacim artışı meydana gelmediğinden dolayı herhangi bir hasar oluşumu gözlenmemiştir.

Fan ve diğerleri YSZ kaplamaya sahip TBC sistemini Al_2O_3 ile modifiye ettikleri sistem üzerine bizim çalışmadan farklı olarak NaCl tuzlarını kullanarak sıcak korozyon testlerini gerçekleştirmişlerdir. Bizim çalışmadan farklı olarak üst kaplama malzemesini EB-PVD yöntemiyle ürettikleri çalışmada termal çevrim testlerine benzer şekilde testler gerçekleştirilmiştir. EB-PVD yönteminin mikroyapısal olarak biriktirilmesi APS yönteminden oldukça farklıdır. APS yönteminde laminar bir biriktirme söz konusu iken, EB-PVD yönteminde kolonsal biriktirme söz konusudur. APS yönteminde mevcut olan porozite, boşluk ve gözenek EB-PVD yönteminde mevcut değildir. Daha yoğun sık ve kolonsal mikroyapı olması TBC sistemlerinin dayanımını arttırmaktadır. Özellikle sıcak korozyon testlerinde ergimiş korozyon tuzlarının kaplama iç yapısına gidişi engellenmektedir (Fan vd., 2021). Ayrıca bu sebepten dolayı bu çalışmada ortaya çıkan TBC numunelerinin dayanımları bizim çalışmamıza göre oldukça fazla gözükmektedir. Dahası gerçekleştirilen çalışmada EB-PVD yöntemiyle üretilen üst kaplama malzemesine ek olarak Al_2O_3 ile modifiye söz konusu olmasından dolayı TBC sisteminin dayanımı oldukça arttırılmıştır.

Huo ve diğerlerinin gerçekleştirmiş olduğu başka bir çalışmada ise, APS yöntemiyle üretilen TBC sistemleri üzerine lazer yöntemiyle mikro gazing uygulanmış yüksek sıcaklıklarda sıcak korozyon davranışları araştırılmıştır (Huo vd., 2022). Bizim çalışmada ve literatürde mevcut olan diğer çalışmalara benzer şekilde TBC sistemlerinin üst yüzeylerinden alınan SEM görüntülerinde uzun çubuksu yapılar söz konusudur.

Oluşan bu uzun çubuksu yapıların sistemdeki sıcak korozyon tuzlarının üst kaplama ile reaksiyon vermesi neticesinde meydana gelmiştir. Elde edilen bu görüntülerdeki faz yapıları literatürdeki mevcut olmuş diğer çalışmalarda da söz konusudur (Muhammadi vd., 2019; Avcı vd., 2023).

Erimiş tuz saldırısının neden olduğu sıcak korozyon hasar mekanizması, TBC'lerin bozulmasına ve erken arızalanmasına yol açan ana faktörler arasındadır. Jin ve arkadaşları,

1050°C'de $V_2O_5 + Na_2SO_4$ 'e maruz kalan EB-PVD yöntemiyle üretilen TBC'lerin erimiş tuz ortamındaki korozyon davranışlarını karakterize etmişlerdir.

Bizim gerçekleştirmiş olduğumuz çalışmaya benzer şekilde aynı tuz karışımlarının kullanıldığı çalışmada üst kaplama malzemesi olarak kullanılan YSZ kaplaması içerisine sızan ergimiş sıcak korozyon tuzları yüksek sıcaklıklarda tamamen stabilize olan üst kaplamanın içerisinde bulunan Y_2O_3 bileşiklerinin yapıdan ayrılarak korozyon tuzlarıyla bileşik oluşturdıkları görülmüştür. Tamamen tetragonal fazda stabil olan üst kaplama malzemesi içerisinden stabilizatörlerin ayrılması üst kaplama yapısının faz değişimine neden olmuştur. Üst kaplama malzemesi tetragonal fazdan monoklinik faz yapısına dönüşmüştür. Üst kaplama yapısı içerisinde meydana gelen bu faz dönüşümleri kaplamada hacim artışına sebep olmuş ve kaplamada hasarlar meydana gelmiştir. Bizim gerçekleştirmiş olduğumuz tez çalışmasında ise, üst kaplama tabakasının camsı bir yapıya sahip olması kaplama tabakası içerisine sızan sıcak korozyon tuzlarının miktarını azaltıcı etkiler oluşturmuştur. Ayrıca, sıcak korozyon testlerinin bizim çalışmamızda daha düşük sıcaklıklarda gerçekleşmesi korozyon tuzlarının zarar verici etkisini azaltmıştır (Jin vd., 2024).

Gaz türbin motorlarının sıcak bölümlerini koruyan TBC sistemleri sistemlerine yakıtlardan ve atmosfer ortamından gelen yabancı maddeler yüksek sıcaklıklarda korozyon etkisi meydana getirmektedir. Özellikle APS yönteminin üretim özelliklerinden kaynaklı olan pürüzlü ve gözenekli yüzey yapısı üst kaplama içerisine nüfuz eden yabancı maddelerin miktarını arttırıcı etkilerde bulunmaktadır. Özçelik ve diğerlerinin, gerçekleştirmiş olduğu farklı özelliklerde modifiye edilmiş üst kaplamalara sahip TBC sistemlerinin sıcak korozyon davranışları değerlendirilmiştir. Bizim gerçekleştirdiğimiz tez çalışmasından farklı olarak üst kaplama malzemesi nano yapılı YSZ, $YSZ+Al_2O_3$, $YSZ+TiO_2$ ve $YSZ+Al_2O_3+TiO_2$ içeriğine sahip 4 farklı üst kaplamaya sahip TBC sistemleri APS yöntemiyle üretilmiştir. Üretilen TBC sistemleri yaklaşık olarak 1100°C'de izotermal olarak ayrı ayrı sıcak korozyon testlerine tabi tutulmuşlardır. Sıcak korozyon testlerinin ardından üst kaplama yapıları içerisinde uzun çubuksu yapılar yer almaktadır.

Testlerin yüksek sıcaklıklarda gerçekleşmesi, yapı içerisinde tetragonal faz yapısında stabil olan üst kaplamalar tetragonal yapıdan monoklinik yapıya dönüşüm göstermiştir. YSZ üst

kaplama içerisine katılan diğer bileşikler ise, yapıdan ayrılan stabizatörleri azalttığından dolayı daha az hasar uğramıştır (Özçelik vd., 2024).

Singh ve diğerleri de, bizim çalışmamızda kullanılan sıcak korozyon tuzlarına benzer tozlar kullanarak karbon nanotüp ve garafen nano plateler üzerine yaklaşık olarak 1350°C’de sıcak korozyon testlerini gerçekleştirmişlerdir. Gerçekleştirilen çalışmada kullanılan sıcak korozyon tuzları bizim çalışmamızla benzerlik gösterirken, testlerin 1350°C gibi yüksek sıcaklıklarda gerçekleşmesi bakımından oldukça farklılık göstermektedir (Singh vd., 2024).

Zhou ve arkadaşları PS-PVD yöntemiyle YSZ içeriğine sahip üst kaplama ile üretilen TBC sistemlerinin yaklaşık 1000°C’de $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{V}_2\text{O}_5$ tuz karışımları ile gerçekleştirdikleri sıcak korozyon testlerinde bizim çalışmamızdan farklı olarak uzun çubuksu yapıların var olduğu görülmektedir. Sistem içerisinde var olan bu uzun çubuksu yapılar yapı içerisinde meydana gelen faz değişimlerinden oluştuğu anlaşılmaktadır. Lazer ergitme yöntemiyle modifiye edilen YSZ üst kaplamanın ise, sistem içerisinde daha fazla dayandığı görülmektedir (Zhou vd., 2024).

Gerçekleştirilen tez çalışmasında, üst kaplama yapısının camsı yapıya sahip olması, sıcak korozyon testlerinin düşük sıcaklıklarda gerçekleşmesi ve kullanılan üst kaplamaların oldukça verimli olmasından kaynaklı olarak tüm TBC numuneleri sıcak korozyon testlerine karşı oldukça dayanımı oldukça yüksek çıkmıştır. Elde edilen bu sonuçlar yeni nesil bir kaplama malzemesi olan mangan metalinin üretimi esnasında ortaya çıkan ve tamamen atık bir ürün olan cüruf malzemelerin TBC üretiminde kullanılabileceğini gösterdiği düşünülmektedir.

5.SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Gerçekleştirilen tez çalışmasında havacılık ve uzay sanayisi başta olmak üzere, otomotiv, denizcilik ve daha birçok endüstride yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılan TBC sistemleri esas alınmıştır. TBC sistemlerinin geleneksel kullanımda olan altlık, metalik bağ ve seramik kaplama yapısında seramik üst kaplama malzemesinin atık bir malzeme olan Mangan cürufu kullanılarak üretilmesi sağlanmıştır.

5.1 Sonuçlar

Deneyisel çalışmalar sonucunda elde edilen kazanımlar aşağıda maddeler halinde verilmektedir.

- Inconel 718 süperalaşım altlık malzeme üzerine CoNiCrAlY metalik bağ ve Mangan cürufu içeriğine sahip üst kaplama yapısı HVOF ve APS yöntemleri kullanılarak başarılı bir şekilde üretilmiştir.
- Geleneksel TBC sistemlerinde kullanılan metalik ve seramik kaplama malzemelerine göre üst seramik kaplama yapısında Mangan cürufunun kullanılarak atık bir ürün olan malzemenin termal spreycaplama gibi bir yüzey mühendisliği yönteminde kullanılabilirliği sağlanmıştır.
- Mangan cürufu içeriğine sahip TBC sisteminin 600°C’de farklı zaman süreçlerinde izotermal oksidasyon ve sıcak korozyon testleri başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.
- Artan izotermal oksidasyon sıcaklık ve zaman sürecine göre Mangan içeriğine sahip TBC sisteminin mikroyapısal olarak değişime uğradığı, porozite ve sertlik değerlerinin değiştiği aynı zamanda farklı faz yapısı oluşumlarının varlığı tespit edilmiştir.
- Sıcak korozyon testleri sonucunda Mangan içeriğine sahip TBC sisteminde mikroyapısal olarak değişim ve bozulmaların yanında kristal yapısı oluşumları tespit edilmiştir.
- Cüruf malzeme içeriğinde CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ miktarının fazla olması sistemin üst kaplama malzemesini camsı bir yapıya sahip olmasını sağlamıştır.

- Oksidasyon ve sıcak korozyon testleri sonucunda TBC sisteminde belirgin bir çatlama veya ayrışma gözlenmemiştir. Kaplamanın bütünlüğü korunmuş ve yüzeyde herhangi bir görsel bozulma oluşmamıştır. Porozite miktarları kısmen düşerken sertlik değerleri de göreceli oranda artış göstermiştir.
- Çalışmalar sonucunda başarılı bir şekilde Mangan cürufu kullanılarak üretilen TBC sisteminin en oksidasyon ve sıcak korozyon hasar oluşum süreçleri değerlendirilmiştir. Belirlenen sıcaklık ve zaman süreçlerinde Mangan cürufu içeriğine sahip TBC sisteminin yapısal olarak bozulmadan dayanımını koruduğu, demir ve çelik endüstrisi başta olmak üzere farklı alternatif endüstriyel uygulamalarda kullanılabilir niteliğe sahip olduğu görülmüştür.

5.2 Öneriler

Deneysel çalışmalarda Mangan cürufu içeriğine sahip TBC sistemi başarılı bir şekilde üretilerek izotermal oksidasyon ve sıcak korozyon testleri farklı zaman süreçlerinde gerçekleştirilmiştir. Seçilen sıcaklık ve zaman süreçlerinde elde edilen değerlendirmeler neticesinde TBC sisteminde major bir yapısal hasar oluşumu gözlemlenmemiştir. İlerleyen çalışmalar ve araştırmalar aşağıda verilen maddeler de olduğu gibi gerçekleştirilebilecektir.

- Mangan cürufu esaslı TBC sisteminin izotermal oksidasyon ve sıcak korozyon testlerinin daha farklı sıcaklık ve zaman süreçlerinde gerçekleştirilmesi,
- İzotermal oksidasyon ve sıcak korozyon test süreçleri neticesinde TBC sisteminde oluşan ısı değişimlerinin belirlenebilmesi amacıyla termal iletkenlik ve termal genleşme testlerinin gerçekleştirilmesi,
- İzotermal oksidasyon ve sıcak korozyon testlerinin dışında CMAS, termal çevrim, aşınma ve katı partikül erozyonu testleri gibi diğer hasar mekanizmalarının tespitlerine yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi,
- TBC sisteminde üst seramik kaplama yapısına alternatif olan seçilen Mangan cürufu yapısının yerine diğer farklı cüruf yapısı ve kompozisyonlarının seçilmesi,
- Çalışma sonuçlarından elde edilen verilerin endüstriyel uygulamalarda değerlendirilebilmesi amacıyla başta Demir ve Çelik sektörü olmak üzere servis kullanım koşulları altında kaplama sisteminin test edilerek performans sonuçlarının belirlenmesi ilerleyen çalışmalarda yapılabilecek olası faaliyetlerdir

KAYNAKLAR

- Abbas, M. (2021). Microstructural characterization of High Velocity Oxy-Fuel (HVOF) sputtering nickel coatings.(Doctoral dissertation, UNSW Sydney).
- Aghababaeian, S., Beygzadeh, M., Dehghan, M., Halek, F. S. ve Aminy, M. (2023). Energy and economic aspects of efficient radiative heating for biodiesel production: Prospects and challenges of using solid magnetic CaO/CoFe₂O₄ nano-catalyst. *Energy*, 129986.
- Ahmed, M. J., Santos, W. F. ve Brouwers, H. J. H. (2023). Air granulated basic Oxygen furnace (BOF) slag application as a binder: Effect on strength, volumetric stability, hydration study, and environmental risk. *Construction and Building Materials*, 367, 130342.
- Akwaboa, S., Silva, M. B., Mensah, P., Diwan, R., Wolfe, D. E.ve Guo, S. (2009). Comparison of cyclic oxidation performance of APS and EBPVD processed TBCs on IN738 with a bond coat of NiCoCrAlY powder with 0.25% Hf. In *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition* 43826, 2063-2068.
- Akyuz, S., Akyuz, T., Basaran, S., Bolcal, C. ve Gulec, A. (2007). FT-IR and micro-Raman spectroscopic study of decorated potteries from VI and VII century BC, excavated in ancient Ainos–Turkey. *Journal of molecular structure*, 834, 150-153.
- Alam, M. Z., Parlikar, C., Kumawat, M., Lakshmi, S. G. ve Das, D. (2023). High-Temperature Resistant Coatings for Strategic Aero-space Applications. *Defence Science Journal*, 73(2).
- Alonso, E., Pineault, D. G., Gambogi, J. ve Nassar, N. T. (2023). Mapping first to final uses for rare earth elements, globally and in the United States. *Journal of Industrial Ecology*, 27(1), 312-322.
- Amal, R., Nadeem, R., Intisar, A., Rouf, H., Hussain, D. ve Kousar, R. (2024). An insight into the catalytic properties and process optimization of Fe, Ni doped eggshell derived CaO for a green biodiesel synthesis from waste chicken fat. *Catalysis Communications*, 187, 106848.
- Amer, M., Curry, N., Hayat, Q., Sharma, R., Janik, V., Zhang, X. ve Bai, M. (2023). Cracking behavior of Gd₂Zr₂O₇/YSZ multi-layered thermal barrier coatings deposited by suspension plasma spray. *Coatings*, 13(1), 107.
- Amer, M., Curry, N., Hayat, Q., Sharma, R., Janik, V., Zhang, X. ve Bai, M. (2023). Cracking behavior of Gd₂Zr₂O₇/YSZ multi-layered thermal barrier coatings deposited by suspension plasma spray. *Coatings*, 13(1), 107.
- Amran, M., Murali, G., Khalid, N. H. A., Fediuk, R., Ozbakkaloglu, T., Lee, Y. H., ve Lee, Y. Y. (2021). Slag uses in making an ecofriendly and sustainable concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 272, 121942.
- An, G. S., Li, W. S., Wang, Z. P., Li, F. E. N. G., Cheng, B., Lan, Z. H. O. U. ve Zhang, Y. (2023). High-temperature oxidation and TGO growth behaviors of laser-modified YAG/YSZ double-ceramic-layer TBC. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 33(4), 1178-1192.

- An, G. S., Li, W. S., Wang, Z. P., Li, F. E. N. G., Cheng, B., Lan, Z. H. O. U. ve Zhang, Y. (2023). High-temperature oxidation and TGO growth behaviors of laser-modified YAG/YSZ double-ceramic-layer TBC. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 33(4), 1178-1192.
- An, G., Li, W., Feng, L., Cheng, B., Wang, Z., Li, Z. ve Zhang, Y. (2021). Isothermal oxidation and TGO growth behaviors of YAG/YSZ double-ceramic-layer thermal barrier coatings. *Ceramics International*, 47(17), 24320-24330.
- Atkinson, A., Selcuk, A. ve Webb, S. J. (2000). Variability of stress in alumina corrosion layers formed in thermal-barrier coatings. *Oxidation of metals*, 54, 371-384.
- Avci, A., Eker, A. A. ve Karabas, M. (2020). An investigation of oxidation, hot corrosion, and thermal shock behavior of atmospheric plasma-sprayed YSZ–Al₂O₃ composite thermal barrier coatings. *International Journal of Materials Research*, 111(7), 567-580.
- Avci, A., Karabaş, M., Eker, A. A., Akman, E. ve Aslan, C. (2023). Hot corrosion behavior of CYSZ thermal barrier coating with optimized laser surface modification. *Ceramics International*, 49(19), 31396-31404.
- Aydınmakina, F. (2014). Jet Motoru Türbin Kanatçıklarının Alüminit Kaplamalarının Element Hareketlerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 100.
- Aygun, A. (2008). Novel Thermal Barrier Coatings (TBCs) that are resistant to high temperature attack by CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ (CMAS) glassy deposits. Doktora Tezi, The Ohio State University, Ohio, 157 s.
- Badea, T. A., Condruz, M. R. ve Paraschiv, A. (2023). A Study on Long-Term Oxidation and Thermal Shock Performance of Nanostructured YSZ/NiCrAlY TBC with a Less Dense Bond Coat. *Materials*, 16(15), 5294.
- Bahçeli, S., Güleç, G., Erdogan, H. ve Söğüt, B. (2016). Micro-Raman and FT-IR spectroscopic studies of ceramic shards excavated from ancient Stratonikeia city at Eskişehir village in WestSouth Turkey. *Journal of Molecular Structure*, 1106, 316e321.
- Bakan, E., Mack, D. E., Mauer, G., Vaßen, R., Lamon, J. ve Padture, N. P. (2020). High-temperature materials for power generation in gas turbines. In *Advanced ceramics for energy conversion and storage*. Elsevier, (pp. 3-62).
- Barczi, A. ve Lippai, A. (2023). The Microbiological Characteristics of the Microwave-treated Samples and the Convection-heat-treated Samples Shows No Deviation in Case of Surface Water Treatment. *Journal of Central European Green Innovation*, 11(1), 82-95.
- Barwinska, I., Kopec, M., Kukla, D., Senderowski, C. ve Kowalewski, Z. L. (2023). Thermal Barrier Coatings for High-Temperature Performance of Nickel-Based Superalloys: A Synthetic Review. *Coatings*, 13(4), 769.
- Barwinska, I., Kopec, M., Kukla, D., Senderowski, C. ve Kowalewski, Z. L. (2023). Thermal Barrier Coatings for High-Temperature Performance of Nickel-Based Superalloys: A Synthetic Review. *Coatings*, 13(4),

- Barwinska, I., Kopec, M., Kukla, D., Senderowski, C. ve Kowalewski, Z. L. (2023). Thermal Barrier Coatings for High-Temperature Performance of Nickel-Based Superalloys: A Synthetic Review. *Coatings*, 13(4), 769.
- Beake, B. D. (2021). Elevated temperature nanomechanics of coatings for high-temperature applications: a review. *Emergent materials*, 4(6), 1531-1545.
- Bernier, J. S. (2001). Evolution and characterization of partially stabilized zirconia (7wt% Y₂O₃) thermal barrier coatings deposited by electron beam physical vapor deposition. Doktora Tezi, Worcester Polytechnic Institute, 105.
- Boissonnet, G. (2019). Factors influencing the thermal insulation potential of different thermal barrier coating systems (Doctoral dissertation, Université de La Rochelle).
- Bonu, V. ve Barshilia, H. C. (2022). High-Temperature solid particle erosion of aerospace components: its mitigation using advanced nanostructured coating technologies. *Coatings*, 12(12), 1979.
- Bose, S. (2017). High temperature coatings. Butterworth-Heinemann, Oxford.
- Boulos, M. I., Fauchais, P. L. ve Pfender, E. (2023). Plasma Spray Torches. In Handbook of Thermal Plasmas (pp. 795-848). Cham: Springer International Publishing.
- Boulos, M. I., Fauchais, P. L., Henne, R. H. ve Pfender, E. (2023). Plasma in the Thermal Spray Coating Industry. In Handbook of Thermal Plasmas (pp. 1423-1508). Cham: Springer International Publishing.
- Broadbent, C. (2016). Steel's recyclability: demonstrating the benefits of recycling steel to achieve a circular economy. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21, 1658-1665.
- Burlacov, I., Jirkovský, J., Kavan, L., Ballhorn, R. ve Heimann, R. B. (2007). Cold gas dynamic spraying (CGDS) of TiO₂ (anatase) powders onto poly (sulfone) substrates: Microstructural characterisation and photocatalytic efficiency. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 187(2-3): 285-292.
- Cai, J., Wei, J., Zu, Z., Guan, Q. ve Lyu, P. (2022). Comparative hot corrosion performance of arc ion plated NiCoCrAlYSiHf coating in Na₂SO₄/NaCl/V₂O₅-media via high-current pulsed electron beam. *Materials Characterization*, 191, 112074.
- Cao, C., Cheng, Y., Hu, H., Wang, H., Liu, S., Hu, M. ve Yao, H. (2022). Products distribution and sulfur fixation during the pyrolysis of CaO conditioned textile dyeing sludge: Effects of pyrolysis temperature and heating rate. *Waste Management*, 153, 367-375.
- Cernuschi, F., Guardamagna, C., Capelli, S., Lorenzoni, L., Mack, D. E., ve Moscatelli, A. (2016). Solid particle erosion of standard and advanced thermal barrier coatings. *Wear*, 348-349, 43-5.
- Chadha, S. (2021). Numerical modelling of suspension high velocity oxy fuel (S-HVOF) thermal spray (Doctoral dissertation, University of Nottingham).
- Chai, Y., Yang, X. ve Li, Y. (2023). Growth prediction and interlayer stress evolution of double-layered TGO in breakaway oxidation of thermal barrier coating

- system. *Surface and Coatings Technology*, 458, 129348.
- Chavez, J. J. G., Naraparaju, R., Mikulla, C., Mechnich, P., Kelm, K., Ramana, C. V. ve Schulz, U. (2021). Comparative study of EB-PVD gadolinium-zirconate and yttria-rich zirconia coatings performance against Fe-containing calcium-magnesium-aluminosilicate (CMAS) infiltration. *Corrosion Science*, 190, 109660.
- Chellaganesh, D., Khan, M. A. ve Jappes, J. W. (2021). Thermal barrier coatings for high temperature applications—a short review. *Materials Today: Proceedings*, 45, 1529-1534.
- Chen, L., Meng, G. H., Li, C. J. ve Yang, G. J. (2022). Critical scale grain size for optimal lifetime of TBCs. *Journal of Materials Science & Technology*, 115, 241-250.
- Chen, W. R. (2023). Design of oxidation resistant and spallation resistant low- β /near- γ/γ' -MCrAlYs for thermally-sprayed TBCs. *Materials Chemistry and Physics*, 301, 127590.
- Chourasia, S., Tyagi, A., Pandey, S. M. ve Murtaza, Q. (2023). A Critical Review of Thermal-Barrier Coatings and Critical Examination on Post Heat Treatment. *Recent Trends in Mechanical Engineering: Select Proceedings of PRIME 2021*, 845-852.
- Chourasia, S., Tyagi, A., Pandey, S. M., Murtaza, Q. ve Gupta, K. (2023). A Critical Review on Design and Examination of High-Temperature Thermal Spray Carbon-Based Composite Coatings at High Temperature. *Recent Trends in Mechanical Engineering: Select Proceedings of PRIME 2021*, 853-860.
- Clarke, D. R. (2003). The lateral growth strain accompanying the formation of a thermally grown oxide. *Acta materialia*, 51(5), 1393-1407.
- Clarke, D. R. ve Levi, C. G. (2003). Materials design for the next generation thermal barrier coatings. *Annual review of materials research*, 33(1), 383-417.
- Coetsee, T. (2020). A review of ore smelting in high carbon ferromanganese production. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 41(4), 255-278.
- Cojocar, C. V., Aghasibeig, M. ve Irissou, E. (2022). NiCoCrAlX (X= Y, Hf and Si) Bond Coats by Cold Spray for High Temperature Applications. *Journal of Thermal Spray Technology*, 31(1), 176-185.
- Collivignarelli, M. C., Cillari, G., Ricciardi, P., Miino, M. C., Torretta, V., Rada, E. C. ve Abbà, A. (2020). The production of sustainable concrete with the use of alternative aggregates: A review. *Sustainability*, 12(19), 7903.
- Cook, D. C., Shaw, M. J., Schindelholz, E., Bramfitt, B. L., Lawrence, S. J. ve Nester, R. C. (2007, March). Spectroscopic Evaluation Of The Corrosion Products On The Turret Of The American Civil War Ironclad, Uss Monitor. In NACE CORROSION (pp. NACE-07238). NACE.
- Curry, N., Mahade, S., Venkat, A. ve Joshi, S. (2022). Erosion performance of suspension plasma spray thermal barrier coatings—A comparison with state of art coatings. *Surface and Coatings Technology*, 437, 128311.
- Dalkılıç, S. (2001). Jet Motorlarında Parça Yenileme İşlemleri. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Sivil Havacılık Anabilim Dalı, Eskişehir, 122.

- Dang, X., Yuan, J., Wang, J., Li, X., Huang, Z., Hu, X. ve Li, Y. (2023). Plasma sprayed Yb4Hf3O12 thermal barrier coatings with excellent thermophysical properties and robust CMAS corrosion resistance. *Ceramics International*, 49(16), 27473-27485.
- Daroonparvar, M., Bakhsheshi-Rad, H. R., Saberi, A., Razzaghi, M., Kasar, A. K., Ramakrishna, S. ve Berto, F. (2022). Surface modification of magnesium alloys using thermal and solid-state cold spray processes: Challenges and latest progresses. *Journal of Magnesium and Alloys*, 10(8), 2025-2061.
- Daroonparvar, M., Yajid, M. A. M., Yusof, N. M., Bakhsheshi-Rad, H. R., Hamzah, E., ve Nazoktabar, M. (2014). Investigation of three steps of hot corrosion process in Y₂O₃ stabilized ZrO₂ coatings including nano zones. *Journal of Rare Earths*, 32(10), 989-1002.
- Das, S. K., Tripathi, A. K., Kandi, S. K., Mustakim, S. M., Bhoi, B. ve Rajput, P. (2023). Ferrochrome slag: A critical review of its properties, environmental issues and sustainable utilization. *Journal of Environmental Management*, 326, 116674.
- Das, T. K. ve Poater, A. (2021). Review on the use of heavy metal deposits from water treatment waste towards catalytic chemical syntheses. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(24), 13383.
- De Giorgi, M. G., Menga, N. ve Ficarella, A. (2023). Exploring Prognostic and Diagnostic Techniques for Jet Engine Health Monitoring: A Review of Degradation Mechanisms and Advanced Prediction Strategies. *Energies*, 16(6), 2711.
- Diez-Cañamero, B. ve Mendoza, J. M. F. (2023). Circular economy performance and carbon footprint of wind turbine blade waste management alternatives. *Waste Management*, 164, 94-105.
- Ding, Z., Brouwer, J. C., Kwakernaak, C., Zhu, J. N., Popovich, V., Hermans, M. J. ve Sloof, W. G. (2023). Mo (Al_xSi_{1-x})₂ healing particles for high temperature ceramics and encapsulation by selective oxidation of aluminium. *Materials & Design*, 225, 111577.
- Dong, H., Liang, X., Bai, J., Lan, L., Wang, X., Zou, H. ve Zhang, X. (2023). The relationship between the film hole distribution and thermal cycle performance of TBCs by APS and HVOF. *Surface and Coatings Technology*, 467, 129694.
- Dong, T. S., Kong, L. C., Fu, B. G., Li, J. K. ve Li, G. L. (2022). Effect of CeO₂ doping on high temperature oxidation resistance of YSZ TBCs. *Ceramics International*, 48(24), 36450-36459.
- Duan, W., Huang, B., Li, Y., Huang, X., Zhou, M. ve Qiang, W. (2023). Hf and Ta co-doping MCrAlY alloy to improve the lifetime of coatings. *Surface and Coatings Technology*, 468, 129781.
- Ebach-Stahl, A., Schulz, U., Swadźba, R. ve Munawar, A. U. (2021). Lifetime improvement of EB-PVD 7YSZ TBCs by doping of Hf or Zr in NiCoCrAlY bond coats. *Corrosion Science*, 181, 109205.
- Ebrahimzade, V., Uchtmann, H., Singheiser, L., Küger, M. ve Malzbender, J. (2019). Microstructure and cyclic oxidation behavior of APS TBC systems drilled with various laser methods. *Surface and Coatings Technology*, 378, 125018.

- Essa, S. K., Chen, K., Liu, R., Wu, X. ve Yao, M. X. (2021). Failure mechanisms of APS-YSZ-CoNiCrAlY thermal barrier coating under isothermal oxidation and solid particle erosion. *Journal of Thermal Spray Technology*, 30, 424-441.
- Evans, A. G., Mumm, D. R., Hutchinson, J. W., Meier, G. H. ve Pettit, F. S. (2001). Mechanisms controlling the durability of thermal barrier coatings. *Progress in materials science*, 46(5), 505-553.
- Fan, J. F., Liu, G., Zhuo, X. S., Zhang, X. F., Feng, J. L., Jiang, W. ve Zhou, K. S. (2021). In-situ reaction synthesis Al₂O₃ overlay modified 7YSZ TBC for NaCl hot corrosion. *Ceramics International*, 47(16), 22404-22415.
- Ferring, C. R. (1986). Rates of fluvial sedimentation: implications for archaeological variability. *Geoarchaeology*, 1(3), 259-274.
- Fu, F., Hu, N., Ye, Y. ve Chen, G. (2023). The foaming mechanism and properties of SiO₂-Al₂O₃-CaO-based foamed ceramics with varied foaming agents. *Ceramics International*, 49(20), 32448-32457.
- Gabasiane, T. S., Danha, G., Mamvura, T. A., Mashifana, T. ve Dzinomwa, G. (2021). Environmental and socioeconomic impact of copper slag—a review. *Crystals*, 11(12), 1504.
- Gell, M., Duhl, D. N., Gupta, D. K. ve Sheffler, K. D. (1987). Advanced superalloy airfoils. *Jom*, 39(7), 11-15.
- Gencel, O., Karadag, O., Oren, O. H. ve Bilir, T. (2021). Steel slag and its applications in cement and concrete technology: A review. *Construction and Building Materials*, 283, 122783.
- Ghosh, S. K. (2020). Diversity in the family of manganese oxides at the nanoscale: from fundamentals to applications. *ACS omega*, 5(40), 25493-25504.
- Gildersleeve, E. J. ve Vaßen, R. (2023). Thermally sprayed functional coatings and multilayers: a selection of historical applications and potential pathways for future innovation. *Journal of thermal spray technology*, 32(4), 778-817.
- Gómez-Acebo, T. (2014). Summary report of CALPHAD XLII—San Sebastian, Spain, 2013. *Calphad*, 45, 62-117.
- Gök, M. G. (2015). Çok Katmanlı ve Fonksiyonel Derecelendirilmiş CYSZ/Gd₂Zr₂O₇ Esaslı Yeni Nesil Termal Bariyer Kaplamaların Üretimi ve Karakterizasyonu, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 150 s.
- Grilli, M. L., Valerini, D., Slobozeanu, A. E., Postolnyi, B. O., Balos, S., Rizzo, A. ve Piticescu, R. R. (2021). Critical raw materials saving by protective coatings under extreme conditions: A review of last trends in alloys and coatings for aerospace engine applications. *Materials*, 14(7), 1656.
- Guo, J., Ye, Y., Xue, Y., Zhu, Y., Wei, J., Cai, J. ve Hua, Y. (2023). High temperature oxidation resistance of laser shock modified NiAlHf metallic bond layer. *Surface and Coatings Technology*, 458, 129297.
- Gürol, U. ve Kurnaz, S. C. (2020). Effect of carbon and manganese content on the microstructure and mechanical properties of high manganese austenitic steel. *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*, 56(2), 171-182.

- Habibi, M. H. (2014). Hot Corrosion Behaviour of New Candidates for Thermal Barrier Coatings Application in Turbine Simulated Environments. Doktora Tezi, Louisiana State University and Agricultural & Mechanical College. The Department Of Mechanical And Industrial Engineering, Tahran, 138 s.
- Hagelstein, K. (2009). Globally sustainable manganese metal production and use. *Journal of environmental management*, 90(12), 3736-3740.
- Harvey, J. P., Courchesne, W., Vo, M. D., Oishi, K., Robelin, C., Mahue, U., ... ve Al-Haiek, A. (2022). Greener reactants, renewable energies and environmental impact mitigation strategies in pyrometallurgical processes: A review. *MRS Energy & Sustainability*, 9(2), 212-247.
- He, S., Wilson, B. P., Lundström, M. ve Liu, Z. (2021). Hazard-free treatment of electrolytic manganese residue and recovery of manganese using low temperature roasting-water washing process. *Journal of Hazardous Materials*, 402, 123561.
- He, W., Mauer, G. ve Wei, L. (2023). Development of plasma spray-physical vapor deposition for advanced thermal barrier coatings. In Thermal Barrier Coatings (pp. 229-265). Woodhead Publishing.
- Hernandez-Castaneda, J. C., Chi, W. Y., Yongwei, F., Lan, N., Khin, M. ve Hongyu, Z. (2019). Investigation on high power laser removal of thermal barrier coating (TBC) and bond layer (MCrAlY) from Inconel 718 alloy. *Int. J. Peening Sci. Technol.*, 1(3), 201-219.
- Honarparvar, S., Zhang, X., Chen, T., Alborzi, A., Afroz, K. ve Reible, D. (2021). Frontiers of membrane desalination processes for brackish water treatment: A review. *Membranes*, 11(4), 246.
- Hotchkiss, E., Urdaneta, M. P. ve Bazilian, M. D. (2024). Comparing methods for criticality and security in minerals for clean energy. *The Extractive Industries and Society*, 17, 101402.
- Hu, Z. C., Liu, B., Wang, L., Cui, Y. H., Wang, Y. W., Ma, Y. D. ve Yang, Y. (2020). Research progress of failure mechanism of thermal barrier coatings at high temperature via finite element method. *Coatings*, 10(8), 732.
- Hu, Z. C., Wang, L., Zhuang, M. X., Zhang, H. Y., Li, G. S., Liu, Y. ve Yang, Y. (2021). Influence of internal oxidation of the bond-coat on the residual stress around the TGO and failure modes of the APS-TBCs: A finite element simulation study. *Ceramics International*, 47(4), 5364-5373.
- Huang, J., Sun, W., Huang, R. ve Ma, W. (2023). Cracking behavior of atmospheric plasma-sprayed 8YSZ thermal barrier coatings during thermal shock test. *Coatings*, 13(2), 243.
- Huang, X., Qi, H., Li, S., Song, J., Yang, X. ve Shi, D. (2023). Effect of thermal barrier coatings on the fatigue behavior of a single crystal nickel-based superalloy: Mechanism and lifetime modeling. *Surface and Coatings Technology*, 454, 129184.
- Huang, Y., He, Y., Yang, B., Khan, A., Zhao, X. ve Song, P. (2023). Effect of YSZ/TaSi₂-MCrAlY thermal barrier coatings on oxidation resistance in air and water vapor. *Ceramics International*, 49(9), 14551-14562.

- Huo, K., Dai, F., Qian, W., Ye, Y., Cai, J., Hua, Y. ve Zhang, X. (2022). Hot corrosion behavior of APS YSZ coatings treated by laser micro glazing (LMG) under molten salts ($V_2O_5 + Na_2SO_4$). *Corrosion Science*, 209, 110731.
- Huo, K., Guan, Z., Cai, J., Ye, Y., Hua, Y. ve Dai, F. (2022). Hot corrosion behavior of EB-PVD YSZ coatings treated by nanosecond pulsed laser. *Surface and Coatings Technology*, 448, 128889.
- Huo, K., Guan, Z., Cai, J., Ye, Y., Hua, Y. ve Dai, F. (2022). Hot corrosion behavior of EB-PVD YSZ coatings treated by nanosecond pulsed laser. *Surface and Coatings Technology*, 448, 128889.
- Huo, K., Qian, W., Cai, J., Ye, Y., Hua, Y., Zhang, X. ve Dai, F. (2023). The hot corrosion resistance of APS YSZ coatings micro glazed via an ultraviolet picosecond ultrashort pulsed laser. *Corrosion Science*, 222, 111435.
- Iqbal, A., Khan, M. J. ve Moskal, G. (2022). A review on the degradation of coatings under hot corrosion process. *Contemporary problems of power engineering and environmental protection*, 27.
- Iqbal, A., Moskal, G., Głowacka, H. M., Pawlik, T. ve Cavalerio, A. (2023). Phase decompositions of $Gd_2Zr_2O_7 + 8YSZ$ TBC systems under the condition of long-term high-temperature oxidation. *Surface and Coatings Technology*, 462, 129471.
- Isaac, F. O. (2022). A Review of coating methods and their applications in compression and spark-ignition engines for enhanced performance. *FUOYE Journal of Engineering and Technology*, 7(2), 217-221.
- Jahromi, M. G., Razavi, R. S., Valefi, Z., Naderi-Samani, H. ve Taghi-Ramezani, S. (2023). Evaluating laser surface melting of NiCrAlY-APS coating and its effect on high-temperature oxidation behavior of NiCrAlY/YSZ thermal barrier coating before and after surface melting. *Heliyon*, 9(12).
- Jatadhara, G. S., Banapurmath, N. R., Chandrashekhar, T. K., Nagesh, S. B. ve Harari, P. A. (2023). Effect of diesel engine modification operated with karanja biodiesel and its blends. *Materials Today: Proceedings*, 80, 409-414.
- Jin, X., Fu, S., Li, P., Wang, J., Hou, C., Wang, H. ve Fan, X. (2024). Microstructures evolution, corrosion and oxidation mechanisms of EB-PVD thermal barrier coatings exposed to molten salt corrosion. *Journal of the European Ceramic Society*.
- Joeris, J., Tiwari, A., Brinckmann, S., Kurze, F., Guillon, O. ve Vaßen, R. (2023). Evaluation of major factors influencing the TBC topcoat formation in axial suspension plasma spraying (SPS). *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 20(2), 884-895.
- Kan, W. F. ve Matthews, S. (2023, May). Characterisation of Shrouded Plasma-Sprayed Al4C3-Ni Alloy Composite Coatings as Novel Bond Coats for TBCs. In *ITSC 2023* (pp. 365-372). *ASM International*.
- Karaoglanli, A. C. (2023). Structure and durability evaluation of blast furnace slag coatings and thermal barrier coatings (TBCs) under high temperature conditions. *Surface and Coatings Technology*, 452, 129087.

- Karaoglanli, A. C., Altuncu, E., Ozdemir, I., Turk, A. ve Ustel, 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, S369-S373.
- Karaoglanli, A. C., Doleker, K. M., Demirel, B., Turk, A., ve Varol, R. (2015). Effect of shot peening on the oxidation behavior of thermal barrier coatings. *Applied Surface Science*, 354, 314-322.
- Karaoglanli, A. C., Grund, T., Turk, A. ve Lampke, T. (2019). A comparative study of oxidation kinetics and thermal cyclic performance of thermal barrier coatings (TBCs). *Surface and Coatings Technology*, 371, 47-67.
- Karaoglanli, A. C. (2012). Termal Bariyer Kaplamalarda Bağ Tabakasının Farklı Yöntemlerle Üretilmesi ve Özelliklere Etkisi. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 225 s.
- Ke, P. L., Wang, Q. M., Gong, J., Sun, C. ve Zhou, Y. C. (2006). Progressive damage during thermal shock cycling of D-gun sprayed thermal barrier coatings with hollow spherical ZrO₂-8Y₂O₃. *Materials Science and Engineering: A*, 435, 228-236.
- Keidar, M., Yan, D. ve Sherman, J. H. (2019). Cold plasma cancer therapy. Morgan & Claypool Publishers.
- Kielczawa, T., Sokołowski, P. ve Małachowska, A. (2022). The influence of substrate topography on the plasma jet flow in the substrate boundary layer under suspension plasma spray conditions: a numerical approach. *Journal of Thermal Spray Technology*, 31(1), 84-101.
- Kim, K. ve Kim, W. (2021). Effect of heat treatment on microstructure and thermal conductivity of thermal barrier coating. *Materials*, 14(24), 7801.
- Kirbiyik, F., Gok, M. G. ve Goller, G. (2022). Application of thermal gradient and thermal cycling tests to Al₂O₃/CYSZ functionally graded TBC in the presence of simultaneous hot corrosion and CMAS effects. *Surface and Coatings Technology*, 444, 128688.
- Kleis, I., ve Kulu, P. (2007). Solid particle erosion: Occurrence, prediction and control. In *Solid Particle Erosion: Occurrence. Prediction and Control*, Springer London.
- Kong, F., Ying, Y. ve Lu, S. (2023). Heavy metal pollution risk of desulfurized steel slag as a soil amendment in cycling use of solid wastes. *Journal of Environmental Sciences*, 127, 349-360.
- Kucuk, Y., Oge, M., Gok, M. S., ve Karaoglanli, A. C. (2018). Ferrochromium slag as a protective coating material against oxidation for caster rolls. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 15(5), 1240-1247.
- Kumar, A., Patnaik, P. C. ve Chen, K. (2020). Damage assessment and fracture resistance of functionally graded advanced thermal barrier coating systems: Experimental and analytical modeling approach. *Coatings*, 10(5), 474.
- Kumar, M., Majumdar, J. D. ve Manna, I. (2023). Development of Gd₂O₃ doped yttria stabilized zirconia based thermal barrier coating for improved high temperature oxidation and erosion resistance. *Ceramics International*, 49(23), 38081-38093.

- Kumar, R. (2018). Low Thermal Conductivity YAG-Based Thermal Barrier Coatings with Enhanced CMAS Resistance.
- Lance, M. J., Kane, K. A. ve Pint, B. A. (2022). The Effect of APS-HVOF Bond Coating Thickness Ratio on TBC Furnace Cycle Lifetime. *Oxidation of Metals*, 98(3), 385-397.
- Łatka, L., Pawłowski, L., Winnicki, M., Sokołowski, P., Małachowska, A. ve Kozerski, S. (2020). Review of functionally graded thermal sprayed coatings. *Applied Sciences*, 10(15), 5153.
- Legodi, M. A. ve de Waal, D. (2007). The preparation of magnetite, goethite, hematite and maghemite of pigment quality from mill scale iron waste. *Dyes and pigments*, 74(1), 161-168.
- Leng, K., Romero, A. R., Curry, N. ve Hussain, T. (2024). Multilayer GZ/YSZ thermal barrier coating from suspension and solution precursor plasma spray. *Ceramics International*, 50(1), 631-649.
- Li, D., Jiang, P., Gao, R., Sun, F., Jin, X. ve Fan, X. (2021). Experimental and numerical investigation on the thermal and mechanical behaviours of thermal barrier coatings exposed to CMAS corrosion. *Journal of Advanced Ceramics*, 10, 551-564.
- Li, G. R., Liu, T., Luo, X. T., Yang, G. J. ve Li, C. J. (2023). Tailoring sintering-resistant thermal barrier coatings by considering critical healing width of two-dimensional interlamellar pores. *Journal of Advanced Ceramics*, 12(7).
- Li, P., Hou, C., Jin, X., Lu, P., Li, Z., Xiong, K. ve Fan, X. (2024). Secondary oxidation behaviors of refurbished EB-PVD TBCs specimens after different primary oxidation time. *Surface and Coatings Technology*, 479, 130463.
- Li, W., Qiu, J., Liu, C. ve Jiang, M. (2024). Experimental investigation of the phase equilibria of CaO–Al₂O₃–TiO₂ slag system at 1500° C with p (O₂)= 10⁻³ atm. *Ceramics International*, 50(4), 6068-6078.
- Lim, LY (2022). Termal Bariyer Kaplamaların Termomekanik Davranışının Modellenmesi ve Karakterizasyonu (Doktora tezi, Toronto Üniversitesi (Kanada).
- Lima, R. S. (2022). Porous APS YSZ TBC manufactured at high powder feed rate (100 g/min) and deposition efficiency (70%): microstructure, bond strength and thermal gradients. *Journal of Thermal Spray Technology*, 31(3), 396-414.
- Lima, R. S. (2022). Porous APS YSZ TBC manufactured at high powder feed rate (100 g/min) and deposition efficiency (70%): microstructure, bond strength and thermal gradients. *Journal of Thermal Spray Technology*, 31(3), 396-414.
- Limarga, A. M. ve Clarke, D. R. (2009). Characterization of electron beam physical vapor-deposited thermal barrier coatings using diffuse optical reflectance. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 6(3), 400-409.
- Liu, M., Yang, X., Zhao, L., Guo, J., Zhang, L. ve Shao, Y. (2024). Effect of alkaline oxides (CaO and MgO) on the mechanical properties of SiC-based foam ceramics. *Ceramics International*, 50(7), 10152-10159.
- Liu, Y., Wang, L., Guo, Y., Feng, Y., ve Du, Y. (2023). Investigation on surface morphology and phase transition characteristics in EDM for 8YSZ TBC on Inconel 718

- superalloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 124(10), 3615-3630.
- Loureiro, C.D., Moura, C.F., Rodrigues, M., Martinho, F.C., Silva, H.M. ve Oliveira, J.R. (2022). Steel slag and recycled concrete aggregates: Replacing quarries to supply sustainable materials to the asphalt paving industry. *Sustainability*, 14 (9), 5022.
- Lu, Z., Bai, J., Kong, L., Li, H., Guo, Z., Bai, Z. ve Li, W. (2024). Effect of SiO₂/CaO on the viscosity and structure of yellow phosphorus slag in the electric furnace. *Fuel*, 358, 130214.
- Lynam, A., Romero, A. R., Xu, F., Wellman, R. W. ve Hussain, T. (2022). Thermal spraying of ultra-high temperature ceramics: a review on processing routes and performance. *Journal of thermal spray technology*, 31(4), 745-779.
- Ma, J., Duan, Y., Chen, W., Li, Q., Guo, J., Cao, X. ve Yang, J. (2023). High temperature tribological properties of the D-gun WC-12Co coating in fluoride molten salt. *Wear*, 530, 205031.
- Ma, X., Ruggiero, P., & Wildridge, G. (2023). Evaluation of CMAS resistance and failure behavior for phase composite thermal barrier coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 32(2), 693-705.
- Ma, X., Zhu, Z., Wu, J., Wei, H., Gong, C., Yoriya, S. ve Yao, H. (2024). Structural reconfiguration of Al/CaO adsorbent by Ni doping to improve sintering resistance and arsenic removal performance. *Applied Surface Science*, 652, 159325.
- Manchisi, J., Matinde, E., Rowson, N. A., Simmons, M. J., Simate, G. S., Ndlovu, S. ve Mwewa, B. (2020). Ironmaking and steelmaking slags as sustainable adsorbents for industrial effluents and wastewater treatment: a critical review of properties, performance, challenges and opportunities. *Sustainability*, 12(5), 2118.
- Maniam, K. K. ve Paul, S. (2021). Progress in novel electrodeposited bond coats for thermal barrier coating systems. *Materials*, 14(15), 4214.
- Martins, R. F., Couto, A. A. ve Camello Lima, C. R. (2023, May). Study on the Attack of Molten Silicates to Thermal Barrier Coatings at Varying Service Temperatures. In ITSC 2023 (pp. 647-652). *ASM International*.
- Mauer, G., Rauwald, K. H., Sohn, Y. J. ve Vaßen, R. (2023). The Potential of High-Velocity Air-Fuel Spraying (HVOF) to Manufacture Bond Coats for Thermal Barrier Coating Systems. *Journal of Thermal Spray Technology*, 1-10.
- Meghwal, A., Anupam, A., Murty, B. S., Berndt, C. C., Kottada, R. S. ve Ang, A. S. M. (2020). Thermal spray high-entropy alloy coatings: a review. *Journal of Thermal Spray Technology*, 29, 857-893.
- Mehmood, K., Imran, M., Ali, L., Umer, M. A., Abbas, M. ve Saleem, M. (2023). Development of Cost-Effective Microstructure and Isothermal Oxidation-Resistant Bond Coats on Inconel 718 by Atmospheric Plasma-Sprayed NiCoCrAlFe High-Entropy Alloy. *JOM*, 75(1), 239-247.
- Mehmood, S., Wang, X., Ahmed, W., Imtiaz, M., Ditta, A., Rizwan, M., ... ve Li, W. (2021). Removal mechanisms of slag against potentially toxic elements in soil and plants for sustainable agriculture development: A critical review. *Sustainability*, 13(9),

- Mehmood, Z., Sarosh, A. ve Awan, O. A. A. (2023). Recent Advancements in Thermal Barrier Coatings (TBC) for High-Temperature Gas Turbines.
- Meier, G. H. (2022). Invited review paper in commemoration of over 50 years of oxidation of metals: current aspects of deposit-induced corrosion. *Oxidation of Metals*, 98(1), 1-41.
- Michaelian, K. H. (1986). The Raman spectrum of kaolinite# 9 at 21 C. *Canadian Journal of Chemistry*, 64(2), 285-294.
- Mifune, N., Harada, Y., Doi, T. ve Yamasaki, R. (2004). Hot-corrosion behavior of graded thermal barrier coatings formed by plasma-spraying process. *Journal of Thermal Spray Technology*, 13, 561-569.
- Miller, B. A., Shipley, R. J., Parrington, R. J. ve Dennies, D. P. (2021). Abrasive Wear Failures. Failure Analysis and Prevention; Miller, BA, Shipley, RJ, Parrington, RJ, Dennies, DP, Eds.
- Mittal, G. ve Paul, S. (2022). Suspension and solution precursor plasma and HVOF spray: A review. *Journal of Thermal Spray Technology*, 31(5), 1443-1475.
- Miyan, N., Omur, T., Kabay, N. ve Birol, B. (2023). The potential usage of waste ferrochrome slag in alkali-activated mixes. *Journal of Building Engineering*, 107026.
- Mohammadi, M., Kobayashi, A., Javadpour, S. ve Jahromi, S. A. J. (2019). Evaluation of hot corrosion behaviors of Al₂O₃-YSZ composite TBC on gradient MCrAlY coatings in the presence of Na₂SO₄-NaVO₃ salt. *Vacuum*, 167, 547-553.
- Mohan, P. (2010). Environmental degradation of oxidation resistant and thermal barrier coatings for fuel-flexible gas turbine applications. Doktora Tezi, University of Central Florida Orlando, Florida, 79.
- Mohsen, S., Abbas, A., ve Akira, K. (2007). Bond coat oxidation and hot corrosion behavior of plasma sprayed YSZ coating on Ni superalloy. *Transactions of JWRI*, 36(1), 41-45.
- Mokal, M. P., Mandal, R., Nayak, S. ve Panda, S. K. (2023). Efficacy of high-volume fly ash and slag on the physicomechanical, durability, and analytical characteristics of high-strength mass concrete. *Journal of Building Engineering*, 76, 107295.
- Moreno-Rubio, M., Vázquez, J., Navarro, C. ve Domínguez, J. (2023). Experimental study on the fretting fatigue of Inconel 718 superalloy. *Tribology International*, 186, 108637.
- Moskal, G., Jucha, S., Mikuśkiewicz, M., Migas, D. ve Jasik, A. (2020). Atypical decomposition processes of Sm₂Zr₂O₇+ 8YSZ dual-phase TBCs during hot corrosion. *Corrosion Science*, 170, 108681.
- Moskal, G., Swadźba, L., Mendala, B., Góral, M. ve Hetmańczyk, M. (2010). Degradation of the TBC system during the static oxidation test. *Journal of microscopy*, 237(3), 450-455.
- Moy, C. K., Cairney, J., Ranzi, G., Jahedi, M. ve Ringer, S. P. (2010). Investigating the

- microstructure and composition of cold gas-dynamic spray (CGDS) Ti powder deposited on Al 6063 substrate. *Surface and Coatings Technology*, 204(23), 3739-3749.
- Mrdak, M., Lačnjevac, Č. ve Bajić, D. (2023). Characterization of zirconium oxidecoating stabilized with cerium and yttrium oxide deposited on the bonding coating nickel chromium aluminum cobalt yttrium oxide. *Materials Protection*, 64(1), 5-12.
- Murari, G., Nahak, B. ve Pratap, T. (2023). Hybrid surface modification for improved tribological performance of IC engine components—a review. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: *Journal of Process Mechanical Engineering*, 09544089221150718.
- Olsen, S. E., Olsen, S., Tangstad, M. ve Lindstad, T. (2007). Production of manganese ferroalloys. Tapir academic press.
- Ouyang, T. ve Suo, J. (2021). TiC-self-healing thermal barrier coating structures and oxidation resistance. *Surface and Coatings Technology*, 412, 127065.
- Ouyang, T., Xiong, S., Zhang, Y., Liu, D., Fang, X., Wang, Y. ve Suo, J. (2017). Cyclic oxidation behavior of SiC-containing self-healing TBC systems fabricated by APS. *Journal of Alloys and Compounds*, 691, 811-821.
- Owoseni, T. A. (2021). Development of nanostructured ceramic coatings from suspension and solution precursor thermal spraying process (Doctoral dissertation, University of Nottingham).
- Ozgurluk, Y., Doleker, K. M. ve Karaoglanli, A. C. (2018). Hot corrosion behavior of YSZ, $Gd_2Zr_2O_7$ and YSZ/ $Gd_2Zr_2O_7$ thermal barrier coatings exposed to molten sulfate and vanadate salt. *Applied Surface Science*, 438, 96-113.
- Özçelik, A., Eker, A. A., Karabaş, M., Ali, Avcı, A. ve Küçükyıldırım, B. O. (2024). Enhanced CMAS and hot corrosion degradation of YSZ thermal barrier coating with nano powders. *Surface and Coatings Technology*, 481, 130624.
- Özdal, M. (2019). Ferrokrom cürufu ve yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen geopolimer betonların donma çözülme dayanıklılığının araştırılması (Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Özgürlük, Y. (2016). Soğuk Gaz Dinamik Sprey (CGDS) Kaplama Yöntemiyle Üretilen Termal Bariyer Kaplamaların (TBC) Sıcak Korozyon Davranışlarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bartın, 86 s.
- Özkan, D., Erdoğan, G., Binal, G., Özgürlük, Y. ve Karaoğlanlı, A. C. (2023). Atmosferik Plazma Sprey (APS) Yöntemi ile Üretilmiş MCrAlY ve YSZ içerikli Termal Bariyer Kaplama (TBC) Sisteminin 750° C Sıcaklıktaki Oksidasyon ve Sıcak Korozyon Davranışlarının İncelenmesi. *International Journal of Engineering Research & Development (IJERAD)*, 15(2).
- Pakseresht, A., Sharifianjazi, F., Esmailkhanian, A., Bazli, L., Nafchi, M. R., Bazli, M. ve Kirubaharan, K. (2022). Failure mechanisms and structure tailoring of YSZ and new candidates for thermal barrier coatings: A systematic review. *Materials & Design*, 222, 111044.
- Panichkittikul, N., Mariyappan, V., Wu, W. ve Patcharavorachot, Y. (2024). Improvement of

- biohydrogen production from biomass using supercritical water gasification and CaO adsorption. *Fuel*, 361, 130724.
- Parchovianský, M., Parchovianská, I., Hanzel, O., Netriová, Z. ve Pakseresht, A. (2022). Phase evaluation, mechanical properties and thermal behavior of hot-pressed LC-YSZ composites for TBC applications. *Materials*, 15(8), 2839.
- Cintas, M. D. (2019). Slag substitution as a cementing material in concrete: Mechanical, physical and environmental properties. *Materials*, 12(18), 2845.
- Parthiban, K., Bykash, S. ve Ghosh, S. (2024). Surface and interfacial microstructure evolution of isothermally oxidized thermal barrier coating system. *Results in Surfaces and Interfaces*, 14, 100169.
- Patnaik, A., Satapathy, A., Chand, N., Barkoula, N. M. ve Biswas, S. (2010). Solid particle erosion wear characteristics of fiber and particulate filled polymer composites: A review. *Wear*, 268(1), 249–263.
- Peng, H., Wang, L., Guo, L., Miao, W., Guo, H. ve Gong, S. (2012). Degradation of EB-PVD thermal barrier coatings caused by CMAS deposits. *Progress in Natural Science: Materials International*, 22(5): 461-467.
- Perrudin, F., Vidal-Sétif, M. H., Rio, C., Petitjean, C., Panteix, P. J. ve Vilasi, M. (2019). Influence of rare earth oxides on kinetics and reaction mechanisms in CMAS silicate melts. *Journal of the European Ceramic Society*, 39(14), 4223-4232.
- Pertlik, F., & Zahiri, R. (1999). Rhodonit mit geringem Kalziumgehalt: Kristallstrukturbestimmung und kristallchemische Berechnungen. *Monatshefte für Chemie/Chemical Monthly*, 130, 257-265.
- Portilla-Nieto, Y., Hernaiz, M., Linder, M., Aranzabe, E., Doppiu, S. ve del Barrio, E. P. (2023). Development of active thermochemical barrier coatings using metal oxides. *Surface and Coatings Technology*, 458, 129345.
- Poursaeidi, E., Jamalabad, Y. Y., Rahimi, J. ve Sigaroodi, M. R. J. (2022). The effect of CMAS penetration on the microstructure and failure of the TBCs applied by APS/APS method. *Surface and Coatings Technology*, 451, 129053.
- Prashar, G., Vasudev, H. ve Thakur, L. (2023). A comprehensive Review on the Hot Corrosion and Erosion Performance of thermal Barrier Coatings. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 59(3), 461-492.
- Presby, M. J., Stokes, J. L., Harder, B. J., Lee, K. N. ve Hoffman, L. C. (2023). High-Temperature Solid Particle Erosion of Environmental and Thermal Barrier Coatings. *Coatings*, 13(5), 902.
- Puthran, D. ve Patil, D. (2023). Usage of heavy metal-free compounds in surface coatings. *Journal of Coatings Technology and Research*, 20(1), 87-112.
- Qin, S., Cao, H., Gao, Z., Martins, J. P., Liu, Y., Brewster, G. ve Xiao, P. (2024). Integrating APS TBCs with a built-in Al₂O₃ protection network for superior CMAS resistance. *Corrosion Science*, 227, 111724.
- Que, T., Lu, Y., Shan, Y., Huang, K., Liu, F., Ding, X. ve Zhou, H. (2024). Effects of CaO additive on sintering behaviour and properties of CaO–B₂O₃–SiO₂ glass-ceramics for LTCC applications. *Ceramics International*, 50(4), 6091-6098.

- Raabe, D. (2023). The materials science behind sustainable metals and alloys. *Chemical Reviews*, 123(5), 2436-2608.
- Rabiei, A. G. E. A., ve Evans, A. G. (2000). Failure mechanisms associated with the thermally grown oxide in plasma-sprayed thermal barrier coatings. *Acta materialia*, 48(15), 3963-3976.
- Rahimi, J., Poursaeidi, E., Montakhabi, F., Sigaroodi, M. R. J. ve Jamalabad, Y. Y. (2023). Experimental and numerical life evaluation of TBCs with different BC and diffusion coating under cyclic thermal loading. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 20(5), 2888-2918.
- Rahimi, J., Sigaroodi, M. R. J. ve Poursaeidi, E. (2023). Thermal shock resistance of thermal barrier coating with different bondcoat types and diffusion pre-coating. *Ceramics International*, 49(2), 2061-2072.
- Rajabi, M., Aboutalebi, M. R., Seyedein, S. H. ve Ataie, S. A. (2022). Simulation of residual stress in thick thermal barrier coating (TTBC) during thermal shock: A response surface-finite element modeling. *Ceramics International*, 48(4), 5299-5311.
- Raza, A., Ahmad, F., Badri, T. M., Raza, M. R. ve Malik, K. (2022). An influence of oxygen flow rate and spray distance on the porosity of HVOF coating and its effects on corrosion—A review. *Materials*, 15(18), 6329.
- Raza, A., Ahmad, F., Badri, T. M., Raza, M. R., Malik, K. ve Ali, S. (2022). Selection of Materials Based on Thermo-Mechanical Properties of Thermal Barrier Coatings and Their Failures—A Review. *Advances in Material Science and Engineering: Selected Articles from ICMMPE 2021*, 255-264.
- Reddy, G. M. S., Prasad, C. D., Patil, P., Shetty, G., Ramesh, M. R. ve Rao, T. N. (2022). Investigation of thermally sprayed NiCrAlY/TiO₂ and NiCrAlY/Cr₂O₃/YSZ cermet composite coatings on titanium alloys. *Engineering Research Express*, 4(2), 025049.
- Rezanka, S., Mauer, G. ve Vaßen, R. (2014). Improved thermal cycling durability of thermal barrier coatings manufactured by PS-PVD. *Journal of Thermal Spray Technology*, 23, 182-189.
- 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.
- Roy, P. ve Ghosh, S. (2023). Oxidation and Hot Corrosion Behavior of Thermal Barrier Coatings-A Brief Review. *High Temperature Corrosion of Materials*, 99(5), 331-343.
- Roy, P., Mukherjee, P., Jana, A., Das, M. ve Ghosh, S. (2022). Comparative study on thermal cyclic resistance of glass–ceramic-bonded TBC system and conventional TBC system. *Journal of the Australian Ceramic Society*, 58(2), 587-596.
- Rudi, N. N., Muhamad, M. S., Te Chuan, L., Alipal, J., Omar, S., Hamidon, N. ve Harun, H. (2020). Evolution of adsorption process for manganese removal in water via agricultural waste adsorbents. *Heliyon*, 6(9).
- Saxena, S., McIntosh, J., Dawood, Z., Maloney, A., Carolan, R., Mitsudharmadi, H. ve

- Goldmeer, J. (2019, June). Development of a high-pressure hot-corrosion burner rig for testing structural materials following long exposures to Arabian extra light crude oil combustion products. In Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air (Vol. 58608, p. V003T03A011). *American Society of Mechanical Engineers*.
- Scrivani, A., Rizzi, G. ve Berndt, C. C. (2008). Enhanced thick thermal barrier coatings that exhibit varying porosity. *Materials Science and Engineering: A*, 476(1-2), 1-7.
- Segondy, S., Rio, C., Landais, S., Bacos, M. P., Guyon, C. ve Rousseau, F. (2023). Impact of Precursor Thermal Decomposition Reactions on YSZ Coatings Deposited with a Low-Power Plasma Torch at Short Spray Distance. *Journal of Thermal Spray Technology*, 32(2), 719-728.
- Semmler, C., Gyoktepeliler-Akin, E. ve Killinger, A. (2023). Plasma sprayed ceramic coatings for the thermal protection of carbon fiber reinforced plastics (CFRP): Thermal and mechanical properties of YSZ, aluminum titanate, cordierite and mullite coatings. *Surface and Coatings Technology*, 462, 129509.
- Sheikhi, M. R., Aygun, H. ve Altuntas, O. (2022). Aeroengines: Principles, Components, and Eco-friendly Trends. In Materials, Structures and Manufacturing for Aircraft (pp. 127-151). *Cham: Springer International Publishing*.
- Shen, Z., Liu, G., Zhang, R., Dai, J., He, L. ve Mu, R. (2022). Thermal property and failure behavior of LaSmZrO thermal barrier coatings by EB-PVD. *Iscience*, 25(4).
- Shi, J., Zhang, T., Sun, B., Wang, B., Zhang, X. ve Song, L. (2020). Isothermal oxidation and TGO growth behavior of NiCoCrAlY-YSZ thermal barrier coatings on a Ni-based superalloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 844, 156093.
- Shi, X., Han, X., Sun, C., Wang, D., Li, G., Deng, L. ve Wang, Y. (2024). The effect of two raw YSZ materials with different morphology on TBCs via atmospheric plasma spraying: Microstructures and high-temperature performance. *Surface and Coatings Technology*, 483, 130723.
- Shin, J., Seo, J. K., Yaylian, R., Huang, A. ve Meng, Y. S. (2020). A review on mechanistic understanding of MnO₂ in aqueous electrolyte for electrical energy storage systems. *International Materials Reviews*, 65(6), 356-387.
- Shvydyuk, K. O., Nunes-Pereira, J., Rodrigues, F. F. ve Silva, A. P. (2023). Review of ceramic composites in aeronautics and aerospace: A multifunctional approach for TPS, TBC and DBD applications. *Ceramics*, 6(1), 195-230.
- Sigaroodi, M. J., Rahimi, J., Poursaeidi, E. ve Montakhabi, F. (2024). Impact of bond coat types on calcium-magnesium-alumina-silicate and hot corrosion behavior in thermal barrier coatings. *Corrosion Science*, 227, 111742.
- Singh, L., Chawla, V. ve Grewal, J. S. (2012). A review on detonation gun sprayed coatings. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 11(03), 243.
- Singh, P., Pandit, N. ve Keshri, A. K. (2024). Plasma-sprayed GNP/CNT reinforced lanthanum-cerate coatings: Hot corrosion assessment in Na₂SO₄-V₂O₅ environment. *Surface and Coatings Technology*, 481, 130676.
- Singh, S., Berndt, C. C., Singh Raman, R. K., Singh, H. ve Ang, A. S. (2023). Applications

- and developments of thermal spray coatings for the iron and steel industry. *Materials*, 16(2), 516.
- Singh, V., Chakraborty, T. ve Tripathy, S. K. (2020). A review of low grade manganese ore upgradation processes. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 41(6), 417-438.
- Sontevska, V., Jovanovski, G., Makreski, P., Raskovska, A. ve Soptrajanov, B. (2008). Minerals from Macedonia. XXI. Vibrational spectroscopy as identificational tool for some phyllosilicate minerals. *Acta chimica slovenica*, 55(4), 757-766.
- Soysal, B. (2014). Çelikhane Cürufunun Yapı Malzemesi Olarak Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Kimya Mühendisliği Programı
- Sridharan, S., Xie, L., Jordan, E. H., Gell, M. ve Murphy, K. S. (2005). Damage evolution in an electron beam physical vapor deposited thermal barrier coating as a function of cycle temperature and time. *Materials Science and Engineering: A*, 393(1-2), 51-62.
- Srivastava, M., Jadhav, M. S., Chakradhar, R. P. S. ve Singh, S. (2022). Investigation of HVOF sprayed novel $\text{Al}_{11}\text{Co}_2\text{Cr}_0\text{Ni}_2\text{Si}_0\text{Ti}_0\text{HEA}$ coating as bond coat material in TBC system. *Journal of Alloys and Compounds*, 924, 166388.
- Steinberg, L., Mikulla, C., Naraparaju, R., Pavlov, P., Löffler, M., Schulz, U. ve Leyens, C. (2022). Erosion behavior of CMAS/VA infiltrated EB-PVD $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ TBCs: Special emphasis on the effect of mechanical properties of the reaction products. *Wear*, 506, 204450.
- Steinke, T., Sebold, D., Mack, D. E., Vaßen, R. ve Stöver, D. (2010). A novel test approach for plasma-sprayed coatings tested simultaneously under CMAS and thermal gradient cycling conditions. *Surface and Coatings Technology*, 205(7): 2287-2295.
- Sun, X., Mazur, M. ve Cheng, C. T. (2023). A review of void reduction strategies in material extrusion-based additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 67, 103463.
- Sunitha, K. ve Vasudev, H. (2022). A short note on the various thermal spray coating processes and effect of post-treatment on Ni-based coatings. *Materials Today: Proceedings*, 50, 1452-1457.
- Syamkumar, K., Babu, N., Govindarajan, S. ve Arya, S. B. (2024). Hot corrosion behaviour of mullite thermal barrier coatings for marine diesel engines. *Ceramics International*, 50(2), 2808-2818.
- Şarkı, P. (2012). Malzeme ve test parametrelerinin MCrAlY ve NiPtAl bağ kaplamalı TBC sistemlerinin ömrü üzerindeki etkisi (Cilt 137). *Forschungszentrum Jülich*.
- Takamori, H., Itamochi, T., Tsuji, T., Atarashi, D., Ishikawa, Y., Okumura, Y. ve Kikuchi, H. (2023). Mechanisms of CaO particle gelation by laser ablation of CaO powder dispersed in alcohol. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 679, 132573.
- Tao, S., Yang, J., Shao, F., Zhao, H., Zhong, X., Zhuang, Y. ve Tao, S. (2023). Effect of Cracks on Thermal Shock Behavior of Plasma-Sprayed Thick Thermal Barrier Coatings. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 32(11), 4998-5014.
- Thoutam, A. K., Lamana, M. S., Mahdavi, A., Liberati, A. C., Ben Ettouil, F., Moreau, C. ve

- Dolatabadi, A. (2023, May). Influence of HVAF Process Parameters on In-Flight NiCoCrAlY Particle Oxidation and Corresponding Splat Characteristics. In ITSC 2023 (pp. 618-624). *ASM International*.
- Toro, N., Jeldres, R. I., Órdenes, J. A., Robles, P. ve Navarra, A. (2020). Manganese nodules in Chile, an alternative for the production of Co and Mn in the future—A review. *Minerals*, 10(8), 674.
- Towoju, O. (2023). Impact of cooling fluid temperature on the structural integrity of gas turbine stator blades. *Engineering and Technology Journal*, 41(07), 1001-1009.
- Traa, A., Soo, S. K., AlOkda, A., Ko, B., Rocheleau, C. E. ve Van Raamsdonk, J. M. (2023). Endosomal trafficking protein TBC-2 modulates stress resistance and lifespan through DAF-16-dependent and independent mechanisms. *Aging cell*, 22(3), e13762.
- Tsai, P. C., Lee, J. H. ve Hsu, C. S. (2007). Hot corrosion behavior of laser-glazed plasma-sprayed yttria-stabilized zirconia thermal barrier coatings in the presence of V₂O₅. *Surface and Coatings Technology*, 201(9-11), 5143-5147.
- Tsukamoto, Y., Nonaka, K., Ishida, A. ve Kakegawa, T. (2020). Geochemical and mineralogical studies of ca. 12 Ma hydrothermal manganese-rich rocks in the Hokuroku district in Japan. *Ore Geology Reviews*, 121, 103539.
- Uczak de Goes, W., Markocsan, N. ve Gupta, M. (2022). Thermal Swing Evaluation of thermal spray coatings for internal combustion engines. *Coatings*, 12(6), 830.
- Vagge, S. T. ve Ghogare, S. (2022). Thermal barrier coatings. *Materials Today: Proceedings*, 56, 1201-1216.
- Vardelle, A., Moreau, C., Akedo, J., Ashrafizadeh, H., Berndt, C. C., Berghaus, J. O. ve Vuoristo, P. (2016). The 2016 thermal spray roadmap. *Journal of thermal spray technology*, 25, 1376-1440.
- Vaßen, R., Kalfhaus, T., Vorkötter, C., Sohn, Y. J., Conze, S. ve Berger, L. M. (2023). Atmospheric Plasma Spraying of Different MgO/Al₂O₃ Feedstocks. *Journal of Thermal Spray Technology*, 32(2), 514-522.
- Velasco, J. H. R., Petrosky, K., Kilaz, G., Kenttämä, H. ve Trice, R. W. (2021). Thermochemical interaction of biofuel impurities with yttria-stabilized zirconia thermal barrier coatings. *Ceramics International*, 47(17), 24675-24682.
- Velusamy, R., Babu, A. S., Swaminathan, M. R. ve Hariharan, P. (2023). Evaluation of Mechanical, Tribological, and Thermal Characterization of GZ TBCs for Heavy Duty Diesel Engine Application. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 1-15.
- Venkatachalapathy, V., Katiyar, N. K., Matthews, A., Endrino, J. L. ve Goel, S. (2023). A guiding framework for process parameter optimisation of thermal spraying. *Coatings*, 13(4), 713.
- Vijay Kumar, M., Srinivas Reddy, T., Rami Reddy, C., Rami Reddy, S. V., Alsharef, M., Alharbi, Y. ve Alamri, B. (2022). Impact of a Thermal Barrier Coating in Low Heat Rejection Environment Area of a Diesel Engine. *Sustainability*, 14(23), 15801.
- Vijay, V. A., Santhy, K., Sivakumar, G. ve Rajasekaran, B. (2023). Thermal expansion and

- microstructure evolution of atmospheric plasma sprayed NiCrAlY bond coat using in-situ high temperature X-ray diffraction. *Surface and Coatings Technology*, 452, 129132.
- Villar, S. J. ve Edwards, H. G. M. (2005). Near-infrared Raman spectra of terrestrial minerals: relevance for the remote analysis of Martian spectral signatures. *Vibrational Spectroscopy*, 39(1), 88-94.
- Wang, X., Lv, J., Ying, Y., Ma, Y., Wu, A., Lin, X. ve Yan, J. (2023). A new insight into the CaO-induced inhibition pathways on PCDD/F formation: Metal passivation, dechlorination and hydroxide substitution. *Science of the Total Environment*, 885, 163782.
- Wei, K., Lin, C. K., Tung, P. C., Ho, J. R. ve Tsao, I. Y. (2023). Formation of subsurface Cu-O-Si system through laser-induced plasma-assisted copper penetration for fabricating robust adhesive copper wire on glass substrate. *Applied Surface Science*, 609, 155149.
- Wei, S., Wang, Y., Chen, S., & Song, L. (2024). Structure regulation and synchrotron radiation investigation of cathode materials for aqueous Zn-ion batteries. *Chemical Science*.
- Wei, W., Samuelsson, P. B., Jönsson, P. G., Gyllenram, R. ve Glaser, B. (2023). Energy consumption and greenhouse gas emissions of high-carbon ferrochrome production. *JOM*, 75(4), 1206-1220.
- Wu, H., Liu, X., Cao, X., Guo, Q. ve Yu, G. (2024). Effects of phosphorus on the fusion characteristics of synthetic ashes with different Al₂O₃/CaO ratios. *Fuel*, 361, 130698.
- Wu, H., Wang, J., Liu, X., Cao, X., Guo, Q. ve Yu, G. (2023). Synergistic effects and mechanism of the ternary flux system Fe₂O₃-CaO-MgO on the coal ash slag fluidity. *Fuel*, 343, 127963.
- Wu, J., Guo, H. B., Gao, Y. Z., ve Gong, S. K. (2011). Microstructure and thermo-physical properties of yttria stabilized zirconia coatings with CMAS deposits. *Journal of the European Ceramic Society*, 31(10), 1881-1888.
- Wu, M., Liu, Y., Qu, W., Guo, W., Zhang, H., Pei, Y. ve Gong, S. (2023). Thickness-related failure behaviors of the thermal barrier coatings under thermal gradient cycling. *Surface and Coatings Technology*, 468, 129748.
- Xiang, Y., Yan, K., Yu, H., Guo, Y., Ying, Y., Li, Z. ve Fang, C. (2023). Comparative investigation on the hot corrosion failure of YSZ and GdYb-YSZ double-ceramic-layer thermal barrier coatings under Na₂SO₄+ V₂O₅ molten salts. *Ceramics International*, 49(11), 18678-18688.
- Xiao, J., Pan, J., Gu, Y., Lu, H., Yu, N., Lv, M. ve Chen, X. (2023). Study on construction mechanism of ceramic-metal thermal barrier coating system by plasma spraying. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 54(7), 2827-2840.
- Xiao, R., Sun, M., Cheng, J., Guo, J., Chen, J., Chen, J. ve Yang, J. (2023). High temperature tribological properties of D-gun Al₂O₃ coatings in fluoride molten salts. *Surface and Coatings Technology*, 458, 129350.

- Xu, B., Fu, R., Liu, Y. ve Hu, Y. (2024). Fabrication of CaO pellets via polyvinyl alcohol (PVA) method for efficient CO₂ capture and solar energy storage. *Separation and Purification Technology*, 335, 126135.
- Xu, Z., He, L., Mu, R., He, S., Huang, G. ve Cao, X. (2010). Hot corrosion behavior of rare earth zirconates and yttria partially stabilized zirconia thermal barrier coatings. *Surface and Coatings Technology*, 204 (21-22), 3652-3661.
- Yan, G., Sun, Y., Zhao, X., Liu, W., Wang, Q., Li, C. ve Zhou, Y. (2023). The enhanced thermal shock resistance performance induced by interface effect in blade-level La₂Ce₂O₇/YSZ thermal barrier coating. *Applied Surface Science*, 619, 156723.
- Yan, X., Duan, C., Yu, S., Dai, B., Sun, C. ve Chu, H. (2024). Revealing the mechanism of oxygen vacancy defect for CO₂ adsorption and diffusion on CaO: DFT and experimental study. *Journal of CO₂ Utilization*, 79, 102648.
- Yan, Z., Gainey, B., Gohn, J., Hariharan, D., Saputo, J., Schmidt, C. ve Lawler, B. (2021). A comprehensive experimental investigation of low-temperature combustion with thick thermal barrier coatings. *Energy*, 222, 119954.
- Yandouzi, M., Sansoucy, E., Richer, P., Jodoin, B. ve Ajdelsztajn, L. (2007, May). Deposition and characterization of WC–Co coatings prepared by continuous-and pulsed-cold spray processes. In Proceedings of the The international thermal spray conference Beijing, China: ASM International (OH).
- Yang, M. Q. ve Yang, J. Y. (2023). Vanadium extraction from steel slag: Generation, recycling and management. *Environmental Pollution*, 123126.
- Yang, M., Wang, X., Feng, W., Fu, Y., Jiang, Y., Chen, F. ve Chen, Y. (2024). Effects of TGO growth on the interface stress distribution based on 3D pores in TBC ceramics layer. *Materials Today Communications*, 38, 107878.
- Yang, W. P., Li, J. R., Liu, S. Z., Zhao, J. Q., Shi, Z. X., ve Wang, X. G. (2017). Microstructures of low angle boundaries of a third generation single crystal superalloy DD9. In *Materials Science Forum* 898, 413-421.
- Yildirim, I. Z. ve Prezzi, M. (2017). Experimental evaluation of EAF ladle steel slag as a geo-fill material: Mineralogical, physical & mechanical properties. *Construction and Building Materials*, 154, 23-33.
- Yu, Y. H. ve Du, C. M. (2023). A review on the P enrichment and recovery from steelmaking slag: Towards a sustainable P supply and comprehensive utilization of industrial solid wastes. *Science of The Total Environment*, 164578.
- Yuan, H., Guan, R., Cao, C., Ji, M., Gu, J., Zhou, L. ve Li, J. (2022). Combined modifications of CaO and liquid fraction of digestate for augmenting volatile fatty acids production from rice straw: Microbial and proteomics insights. *Bioresource Technology*, 364, 128089.
- Zakeri, A., Bahmani, E. ve Ramazani, A. (2022). A review on the enhancement of mechanical and tribological properties of MCrAlY coatings reinforced by dispersed micro and nanoparticles. *Energies*, 15(5), 1914.
- Zamani, P., Qomi, H. A., Veisi, H., Bonyadi, M. ve Alizadeh, M. Coating life prediction and health monitoring of a gas turbine combustion chamber based on performance-

based prediction functions.

- Zhang, B., Chen, K. ve Baddour, N. (2023). Evaluation of Solid Particle Erosion of EB-PVD TBCs under Thermal Cycling Conditions Based on a Stochastic Approach. *Coatings*, 13(1), 156.
- Zhang, D. (2011). Thermal barrier coatings prepared by electron beam physical vapor deposition (EB-PVD). In Thermal barrier coatings (pp. 3-24). *Woodhead Publishing*.
- Zhang, D., Wang, N., Song, R., Zhou, M., Tang, X. ve Zhang, Y. (2024). A new TBC material: $(\text{La}_{0.2}\text{Gd}_{0.2}\text{Y}_{0.2}\text{Sm}_{0.2}\text{Ce}_{0.2})_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ high-entropy oxide. *Ceramics International*, 50(1), 2490-2500.
- Zhang, X., Li, D., Liu, X., Sun, T., Lin, X. ve Ren, Z. (2023). Research of segmentation recognition of small disease spots on apple leaves based on hybrid loss function and cbam. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1175027.
- Zhang, X., Li, Z., Luo, L., Fan, Y. ve Du, Z. (2022). A review on thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles. *Energy*, 238, 121652.
- Zhang, X., Zhang, H., Zhang, N., Deng, C. ve Wang, C. (2024). Oxidation behavior of AlCoCrFeNi bond coating in the YSZ-TBCs produced by APS and PS-PVD method. *Ceramics International*.
- Zhang, Y., Gao, W., Dou, M., Chong, K., Wu, D. ve Zou, Y. (2024). A new strategy for improving TBCs performance through tailoring the bond coating interface with laser texturing. *Materials Today Communications*, 38, 108121.
- Zhang, Y., Jiang, H., Tian, S., Xu, W., Wang, T., Zhang, S. ve Zhang, Y. (2023). High temperature oxidation resistance of TNM alloy coated with/without 8YSZ/NiCoCrAlY thermal barrier coatings. *Applied Surface Science*, 611, 155704.
- Zhang, Y., Zhou, X., Cheng, H., Geng, Z. ve Li, W. (2023). Fabrication and Oxidation Resistance of a Novel $\text{MoSi}_2\text{-ZrB}_2$ -Based Coating on Mo-Based Alloy. *Materials*, 16(16), 5634.
- Zhang, Z., Zeng, W., Zhang, X. ve Zeng, Y. (2024). Comparative Study on Different Methods for Prediction of Thermal Insulation Performance of Thermal Barrier Coating Used on Turbine Blades. *Journal of Thermal Science*, 33(1), 172-189.
- Zhou, L., Wang, S., Li, Z., Cao, X., Liu, R. ve Yun, J. (2023). Simultaneously removal of phosphorous and COD for purification of organophosphorus wastewater by catalytic ozonation over CaO. *Journal of Water Process Engineering*, 51, 103397.
- Zhou, Q., Wei, Y., Xu, G., Yang, L. ve Zhou, Y. (2024). Microstructure and microcrack evolution mechanism of thermal barrier coatings under CMAS infiltration and corrosion: Experimental and numerical modeling. *Corrosion Science*, 229, 111890.
- Zhou, Q., Wen, J., Li, Y., Han, J., Zhou, B., Guo, H. ve He, J. (2024). Molten salt corrosion behavior of laser remelted PS-PVD YSZ thermal barrier coatings. *Journal of Materials Research and Technology*, 30, 2666-2679.
- Zhou, X., Zou, B., He, L., Xu, Z., Xu, J., Mu, R. ve Cao, X. (2015). Hot corrosion behaviour of $\text{La}_2(\text{Zr}_{0.7}\text{Ce}_{0.3})_2\text{O}_7$ thermal barrier coating ceramics exposed to molten calcium magnesium aluminosilicate at different temperatures. *Corrosion Science*,

100, 566-578.

Zhou, Y., Yang, L. ve Zhu, W. (2022). Thermal Barrier Coatings: Failure Theory and Evaluation Technology. *Springer Nature*.

Zou, S., Lu, J. X., Xiao, J., Duan, Z., Chau, C. K., Sham, M. L. ve Poon, C. S. (2023). Development and characteristics of novel high-strength lightweight core-shell aggregate. *Construction and Building Materials*, 393, 132080.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı :
Doğum Yeri ve Tarihi :

Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi :
Yüksek Lisans Öğrenimi :
Bildiği Yabancı Diller :
Bilimsel Faaliyet/Yayınlar :

Tez Savunma Tarihi

İş Deneyimi

Stajlar :
Projeler ve Kurs Belgeleri :
Çalıştığı Kurumlar :

İletişim

E-Posta Adresi :

Tarih :