

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TERMAL BARIYER KAPLAMALARIN OKSİDASYON VE SICAKLIK
KOROZYONU DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

ALİ AVCI

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
İMAL USULLERİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. AYŞEGÜL AKDOĞAN EKER**

İSTANBUL, 2015

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TERMAL BARIYER KAPLAMALARIN OKSİDASYON VE SICAKLIK KOROZYONU
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

Ali AVCI tarafından hazırlanan tez çalışması 23.02.2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Ayşegül AKDOĞAN EKER

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Ayşegül AKDOĞAN EKER

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Hüseyin Sönmez

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Nilgün KUŞKONMAZ

Yıldız Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Yüksek lisans öğrenimimin her aşamasında engin tecrübe ve bilgisi ile yolumu aydınlatan, öneri ve eleştirileriyle akademik hayatıma yön veren, maddi manevi her türlü desteği sağlayarak çalışmalarımı bitirmemi sağlayan, akademik danışmanlığın ötesinde manevi desteği ile moral ve motivasyonumu yüksek tutan kıymetli büyüğüm ve değerli hocam Prof.Dr. Ayşegül AKDOĞAN EKER'e, teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarımın yapılmasında laboratuvar imkânlarını esirgemeyen Prof.Dr. Yılmaz TAPTİK'a ve hem laboratuvar çalışmalarımda deneyimlerinden istifade ettiğim, hem de bilgi birikimi ile çalışmalarımda ilerlememde yardımcı olan değerli arkadaşım ve meslektaşım Arş. Gör. Muhammet KARABAŞ'a teşekkür ederim. Mekanik deneylerime yapmış oldukları desteklerinden dolayı Arş. Gör. Zekeriya CÖMERT ve Uzman Yahya BAYRAK'a teşekkür ederim.

Bugünlere ulaşmamda en büyük pay sahibi olan ve her türlü konuda desteklerini esirgemeyen değerli anne, babama ve sevgili eşime teşekkürlerimi sunarım.

Şubat, 2015

Ali AVCI

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	vii
KISALTMA LİSTESİ.....	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT.....	xv
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	4
1.3 Hipotez	4
BÖLÜM 2	
TERMAL BARIYER KAPLAMALAR	5
2.1 Termal Bariyer Kaplamalar ve Beklenen Özellikler	5
2.1.1 Altlık malzemesi.....	6
2.1.2 Seramik Üst katman	8
2.1.3 Bağ katman	8
2.2 Termal Bariyer Olarak Kullanılan Malzemeler	11
2.2.1 Yitriya Stabilize Zirkonya (YSZ).....	14
2.2.2 Müllit ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$).....	16
2.2.3 (Al_2O_3)	17
2.2.4 CeO_2+YSZ	18
2.2.5 $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$	18
2.2.6 Silikatlar	20
2.2.7 Nanoyapılı YSZ	20

2.3	Termal Bariyer Olarak Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	21
2.3.1	Termal iletkenlik	21
2.3.2	Termal Genleşme Katsayısı.....	23
2.3.3	Yoğunluk ve Gözenek	23
2.4	Termal Sprey Kaplama Yöntemleri	24
2.4.1	Atmosferik Plazma Sprey Yöntemi	27
2.4.1.1	Plazma Oluşumu.....	30
2.4.2	Elektron Işın Demeti Fiziksel Buhar Çökeltme Yöntemi (EB-PVD).....	30
2.4.3	Yüksek Hızlı Oksijen Yakıt HVOF (High Velocity Oxy-Fuel Combustion Spraying)	32
2.4.4	Alev Püskürtme Yöntemi	33
2.4.5	Elektrik Ark Sprey Yöntemi	34
2.4.6	Detonasyon Tabancası.....	34
2.5	Kaplama Yöntemlerinin Karşılaştırılması	35
2.6	Termal Bariyer Kaplamaların Uygulama Alanları	38
2.7	Termal Bariyer Kaplamalarda Hata Oluşumu ve Önlemler.....	40
2.7.1	Ayrılma.....	41
2.7.2	Oksidasyon ve Sıcaklık Korozyonu	43
2.7.3	Aşınma	45

BÖLÜM 3

DENEYSEL ÇALIŞMALAR	47	
3.1	Altlık Malzemenin Hazırlanması	49
3.2	Kaplama Tozlarının Seçilmesi.....	50
3.3	Kaplamaların Üretilmesi	51
3.4	Kaplamaların Karakterizasyonu	55
3.5	Termal Oksidasyon Deneyi	55
3.6	Sıcaklık Korozyonu Deneyi	55
3.7	Termal Şok Deneyi	56
3.8	Yapışma Mukavemeti Deneyi	57
3.9	Sertlik Deneyi	59
3.10	Aşınma Deneyi	59
3.11	Porozite Ölçümü	60

BÖLÜM 4

SONUÇ VE ÖNERİLER	62	
4.1	Kaplamaların Karakterizasyonu	62
4.2	Termal Oksidasyon Deneyi	66
4.3	Sıcaklık Korozyonu Deneyi	67
4.4	Termal Şok Deneyi	68
4.5	Yapışma Mukavemeti Deneyi	70
4.6	Sertlik Deneyi	72
4.7	Aşınma Deneyi	73
4.8	Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü	77

4.9 Porozite Ölçümü	77
4.10 Öneriler	78
KAYNAKLAR	79
EK-A	
SERTLİK DENEYİ SONUÇLARI	86
ÖZGEÇMİŞ	88

SİMGE LİSTESİ

%	Yüzde
°C	Derece Santigrat
μm	mikro metre
E	Elastiklik Modülü
gr	Gram
h	Saat
K	Kelvin
v	Fonon Hızı
α	Termal İletkenlik Katsayısı
ρ	Yoğunluk
Ω	Öz Direnç

KISALTMA LİSTESİ

Ağ.	Ağırlıkça
AISI	Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
Al ₂ O ₃	Alüminyum Oksit
APS	Atmosferik Plazma Sprey
CaO	Kalsiyum Oksit
CeO ₂	Sermuyum Oksit
Cv	Birm Hacimdeki Isı Sığıması
CVD	Kimyasal Buhar Biriktirme
DC	Doğru akım
D-Gun	Detonasyon Tabancası
EB-PVD	Elektron Işın Demeti Fiziksel Buhar Biriktirme
GPa	Giga Paskal
HfO ₃	Hafyüm Oksit
HV	Vickers sertlik değeri
HVOF	Yüksek Hızlı Oksijen Yakıt
LPPS	Düşük Basıncılı Plazma Sprey
MgO	Magnezyum Oksit
MPa	Mega Paskal
N	Newton
NYSZ	Nano Yitriya Stabilize Zirkonya
OM	Optik Mikroskop
PA	Poli Amid
PS	Plazma Sprey
PVC	Polivinil Klorür
PVD	Fiziksel Buhar Biriktirme
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SiO ₂	Silisyum Oksit
Ta	Tantanyum
TBC	Thermal Barrier Coating
TBK	Termal Bariyer Kaplama
TGO	Termal büyüyen oksit
TiO ₂	Titanyum Oksit

VPS	Vakum Plazma Sprey
XRD	X Işını Difraksiyonu
Y ₂ O ₃	İtriyum Oksit
YSZ	Yitriya Stabilize Zirkonya
ZrO ₂	Zirkonyum Oksit

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2. 1 Gaz türbin kesit görüntüsü	6
Şekil 2. 2 Ni esaslı süper alaşım malzemelerin sıcaklık altındaki mekanik özellikleri	7
Şekil 2. 3 Kronolojik olarak türbin parçalarının operasyon sıcaklığı artışı	9
Şekil 2. 4 Termal bariyer uygulaması örneği türbin kanadı kesiti	11
Şekil 2. 5 Zirkonya faz dönüşümleri	14
Şekil 2. 6 YSZ kaplama malzemesinin faz dönüşümü.....	15
Şekil 2. 7 Termal bariyer kaplama malzemelerinin ısı ve termal iletkenlik özellikleri ...	15
Şekil 2. 8 $La_2Zr_2O_7$ kaplama malzemesinin sıcaklığa bağlı değişen termal çevrim sayısının karşılaştırılması	19
Şekil 2. 9 Termal bariyer malzemelerinin termal iletkenlik özellikleri.....	21
Şekil 2. 10 Kaplama malzemelerine ait termal iletkenlik değerleri	23
Şekil 2. 11 Termal sprej kaplama görünümü	25
Şekil 2. 12 Termal Sprej kaplamaların sınıflandırılması	27
Şekil 2. 13 Plazma sprej yöntemi şematik görünümü	28
Şekil 2. 14 Termal sprej kaplamanın oluşumu	28
Şekil 2. 15 Plazma sprej ekipmanları.....	29
Şekil 2. 16 EB-PVD kaplama sistemi ve bileşenleri.....	31
Şekil 2. 17 HVOF sistemi şematik görünümü	33
Şekil 2. 18 Elektrik ark sprej yöntemi şematik görünümü	34
Şekil 2. 19 EB-PVD ve PS yöntemleri ile üretilmiş YSZ' ye ait termal iletkenlik değeri ...	36
Şekil 2. 20 (a) Gözenekli mikro yapıya sahip PS kaplamanın görüntüsü (b) Düzgün ve kolonsal yapıya sahip EB-PVD kaplama kesit görüntüsü	39
Şekil 2. 21 Termal sprej kaplamaların farklı sektörlerdeki uygulamaları.....	39
Şekil 2. 22 Egzoz manifold ağzı görünümü ve piston başları	40
Şekil 2. 23 Farklı yöntemlerle çökeltilmiş ve hasara uğramış kaplamalar	43
Şekil 2. 24 Hasar uğramış bir TBK'ya ait görüntü	43
Şekil 3.1 Deneysel çalışma şeması	43
Şekil 3. 2 Altlık malzemesinin teknik resmi.....	50
Şekil 3. 3 Amdry 997 SEM görüntüsü.....	51
Şekil 3. 4 Kaplanma numunelerine ait makro görüntüler.....	54

Şekil 3. 6 Üretilen kaplamaların şekilsel görünümü.....	53
Şekil 3. 7 Yapışma deneyi cihazı ve çeneler	59
Şekil 3. 8 Çekme deneyi sonrası uygun ve geçersiz deney	59
Şekil 3. 9 Porozite ölçümü yapmak için kullanılan SEM görüntüsü 300X	62
Şekil 4. 1 Kaplamalara ait SEM görüntüleri a) Z65A, b) Z50A, c)Z35A, d)Z, f)YSZ/Al ₂ O ₃ , g) Z+Z35A+Z50A+Z65A+A, h) Z+Z35A+A	65
Şekil 4. 2 APS kaplanmış YSZ kaplamaya ait SEM görüntüsü	66
Şekil 4. 3 APS kaplanmış YSZ kaplamaya ait XRD görüntüsü	66
Şekil 4. 4 Oksidasyon deney sonuçlarının gösterimi.....	67
Şekil 4. 5 Oksidasyon deney sonucu kaplamaların makro görüntüleri.....	68
Şekil 4. 6 Sıcaklık korozyonu sonrası kaplamaların makro görüntüleri	69
Şekil 4. 7 Kaplamaların sıcaklık korozyonu dayanımları	69
Şekil 4. 8 Termal şok deneyi sonrası kaplamaların makro görüntüleri.....	70
Şekil 4. 9 Kaplamaların termal şok dayanımları.....	70
Şekil 4. 10 Kaplamaların yapışma dayanımları.....	71
Şekil 4. 11 Çekme deneyi sonrası kaplamaların makro görüntüleri	72
Şekil 4. 12 a)YSZ SEM kesit görüntüsü b)Al ₂ O ₃ SEM kesit görüntüsü	73
Şekil 4. 13 Kaplamaların vikers sertlik değeri sonuçları.....	73
Şekil 4. 14 Kaplamalara ait aşınma kaybı oranları	74
Şekil 4. 15 Aşınma deneyi sonucu oluşan kaplamalara ait grafikler	76
Şekil 4. 16 Kaplamalara ait aşınma izleri: a) YSZ, b) Al ₂ O ₃ , c) Z65A, d) Z50A, e) Z35A	77
Şekil 4. 17 Sıcaklık korozyonu, oksidasyon ve termal şok dayanımlarının karşılaştırılması	79

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2. 1 Altlık malzemesi olarak kullanılan Ni esaslı süper alaşımların kimyasal bileşimleri.....	7
Çizelge 2. 2 TBK malzemelerinin avantaj ve dezavantajları.....	12
Çizelge 2. 3 Termal Bariyer Kaplama Malzemeleri ve Fiziksel Özellikleri	13
Çizelge 2. 4 Al ₂ O ₃ 'ün fiziksel ve mekanik özellikleri	17
Çizelge 2. 5 PS ve EB-PVD yöntemleri ile üretilmiş TBK' ların çeşitli yönlerden karşılaştırılması	38
Çizelge 2. 6 Termal bariyer kaplamanın dizel motor uygulamasındaki etkileri	39
Çizelge 3. 1 Altlık olarak kullanılan AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin kimyasal bileşimi	49
Çizelge 3. 2 Kullanılan tozların tane boyutu ve kimyasal bileşimleri	50
Çizelge 3. 3 HVOF yöntemi parametreleri	54
Çizelge 3. 4 Atmosferik plazma sprey yöntemi parametreleri	56
Çizelge 3. 5 Korozyon tuzlarının fiziksel özellikleri.....	56
Çizelge 3. 6 Aşınma deneyi öncesi kaplamaların yüzey pürüzlülük karakteristikleri.....	60
Çizelge 4. 1 Üretilen kaplamaların kalınlıkları.....	70
Çizelge 4. 2 Kaplamaların aşınma deneyi sonucu ağırlık kaybı	73
Çizelge 4. 3 Kaplamaların aşınma deneyi öncesi yüzey pürüzlülük değerleri, aşınma iz kalınlıkları ve sürtünme katsayıları	76
Çizelge 4. 4 Kaplamalara ait porozite miktarları	77

**TERMAL BARIYER KAPLAMALARIN OKSİDASYON VE SICAKLIK
KOROZYONU DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

Ali AVCI

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ayşegül AKDOĞAN EKER

Termal bariyer kaplamalar yüksek sıcaklıkta çalışan hava araçlarının ve endüstriyel motorların sıcağa maruz kalan parçalarında uygulama alanı bulmaktadır. Termal bariyer kaplamalar, ısıya maruz kalan parçaların yüzey sıcaklığını azaltarak süper alaşım altlık malzemenin ergime noktasına yakın sıcaklarda çalışmasını sağlamakta ve motor verimliliğini artırmaktadırlar. Bu teknoloji uçak- uzay araçlarını motorları için çok önem arz etmektedir.

Termal Bariyer kaplamalar(TBK), tipik olarak süper alaşım bir altlık malzemesi üzerine kaplı MCrAlY oksidasyon direnci sağlayan bağ katman, ısı yalıtım sağlayan seramik katman ve bu iki katman arasında oluşan termal büyüyen oksit (TGO)'dan meydana gelmektedir. Termal bariyer sisteminde, seramik üst katman olarak genelde termal yüksek genleşme katsayısı ve düşük termal iletkenliğinden dolayı itriya ile kararlı hale getirilmiş ZrO₂ kullanılmaktadır. Termal bariyer kaplamalar, yüksek sıcaklıklarda çalışan gaz türbin parçalarını bozulmalardan korumak ve motor performansını ve giriş sıcaklığını iyileştirmek için sıklıkla kullanılmaktadırlar.

Çalışmada, A, Z65A,Z50A, Z35A, Z, YSZ/Al₂O₃, Z+Z35A+Z50A+Z65A+A, Z+Z35A+A, Z+Z50A+A, Z+Z65A+A şeklinde YSZ ve Al₂O₃ tozlarından hazırlanmış kaplamalar; sıcaklık korozyonu ve oksidasyon testlerine tabi tutulmuştur. Homojen bir toz karışımı elde

etmek için alkol dolu kap içerisinde değirmen ile tozlar 3 saat boyunca karıştırılmış ve fırın içerisinde 140 °C' de 4 saatten fazla bir süre tutularak nemi alınmıştır. Bağ katman HVOF yöntemi ile seramik üst katman ise plazma sprej yöntemi ile üretilmiştir. Kaplamaların özellikleri, çevrim sayısı, termal bariyer kaplama etkisi ve yüksek sıcaklıkta geçen zaman açısından incelenmiş olup makro ve mikro yapılarındaki değişiklikler; taramalı elektron mikroskobu (SEM) karakterizasyon incelemesi yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Termal bariyer kaplama, Termal bariyer kaplamaların oksidasyon ve sıcaklık korozyonu, Plazma sprej kaplama, YSZ ve Al₂O₃ kaplamalar

**INVESTIGATION OF HOT CORROSION AND OXIDATION BEHAVIOUR OF
THERMAL BARRIER COATINGS**

Ali AVCI

Department of Mechanical Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Ayşegül AKDOĞAN EKER

Thermal barrier coatings (TBCs) are finding increasing application (in the most demanding) high-temperature environment of aircraft and industrial engines. They have the capability to improve the durability of engines by reducing the surface temperature of the underlying components. The use of TBCs, along with internal cooling of the underlying super alloy components, enabled advanced gas turbine engines to operate at temperatures even above the melting temperature of the super alloy, with achieving a remarkable increase in the efficiency and performance of engines. This technology has been regarded to improve as one of the most important and effective developments in the propulsion efficiency of advanced aero engines.

Thermal barrier coatings (TBCs) are widely used on super alloy substrate typically consist of a metallic MCrAlY bond coat to protect substrate from oxidation, thermal insulating ceramic top coat and thermally grown oxide layer (TGO) at the interface of ceramic top coat and metallic bond coat. In thermal barrier systems Yttria stabilized zirconia (YSZ) is most commonly used for thermal insulating ceramic top coat because of its low thermal conductivity and high thermal expansion coefficient.

In this study, The coatings powders are mixed in the compositions of A, Z65A,Z50A, Z35A, Z, YSZ/Al₂O₃, Z+Z35A+Z50A+Z65A+A, Z+Z35A+A, Z+Z50A+A, Z+Z65A+A.- The mixtures are milled along 3h in alcohol to provide homogenous mixture and kilns dry at 140°C in furnace. The substrates were applied grit blasting and cleaned by using alcohol before depositing. Bond coat was fabricated by using high velocity oxygen and fuel (HVOF) and the ceramic top coat was fabricated using plasma spray method (PS). Oxidation, hot corrosion and thermal shock tests are applied the coatings.

Keywords: Thermal barrier coatings, oxidation and hot corrosion behavior of TBCs, plasma spray coating, ZrO₂ and Al₂O₃ coating

1.1 Literatür Özeti

Metal ve alaşımları, yüksek sıcaklık, aşınma, korozyon, oksidasyon gibi koşullarda istenilen özellikleri gösterememeleri veya yetersiz kalmaları durumlarında, ileri teknoloji malzemeleri, (süper alaşımlar veya metal yüzeyine oksit, karbür, sermet, nitrür gibi farklı yapılarda kaplanan seramikler) devreye girer. Bu seramikler metal yüzeyini plazma sprey, fiziksel buhar çökeltme (PVD), kimyasal buhar çökeltme (CVD) gibi değişik metotlarla uygulanabilir.

Termal Bariyer kaplamalar (TBK'lar); öncelikle yüksek sıcaklık çalışmalarında termal bariyer olarak ve ayrıca aşınmaya karşı dayanım, gaz türbinlerinde ve dizel yanma odalarında motor verimliliğini artırmak için de kullanılmaktadır.

Termal bariyer kaplamalar(TBK); elektron demeti fiziksel buhar biriktirme (EB-PVD), plazma sprey(PS), yüksek hızla oksijen ve yakıt püskürtme (HVOF), kimyasal lazer buhar çökertme gibi birçok yöntemle uygulanabilir. TBK'lar temel olarak, altlık malzemeyi sıcaklıktan koruyan seramik üst katman ve oksidasyon direncini sağlayan metalik altlık arasındaki ısı genleşme farklılıklarını dengeleyen bağ katmandan oluşmaktadır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan termal bariyer kaplama %6-8 İtiryum ile stabilize edilmiş zirkonyum (YSZ) dir. Bunun nedeni, YSZ'nin düşük termal iletkenliği ve altlık metal malzeme ile termal uyumsuzluğunu azaltan yüksek termal genleşme özelliğine sahip olmasıdır. Zirkonyum tek başına TBK olarak kullanıldığında, 1170 °C'den sonra artan sıcaklıklarda monoklinik olan faz yapısı sırasıyla tetragonal ve kübik yapıya

dönüşmektedir. Dönüşümler sonucu hacim artışı ve beraberinde getirdiği ayrılmalara ve çatlaklara neden olmaktadır. TBK'larda faz dönüşümünü engellemek tetragonal ve kübik fazların kararlı hale gelebilmesi için zirkonyum itriyum oksit(Y_2O_3), kalsiyum oksit (CaO), magnezyum oksit (MgO) ve seryum oksit (CeO_2) gibi oksitlerle kararlı hale getirilmesi gerekmektedir. Aynı zaman da, YSZ içine parçacık veya kademeli olarak alümina ilavesi ile kompozit yapı oluşturularak mekanik özellikleri iyileştirilebilir[1].

Son zamanlarda, $La_2Zr_2O_7$, Al_2O_3 , $HfO_2-Y_2O_3$ gibi alternatif kaplama malzemeleri de kullanılmaktadır. Bunun yanında; nano boyutta YSZ, YSZ-Alümina tozları da geleneksel tozlara göre daha iyi dayanım, ömür, korozyon direnci gibi özellikler gösterdiği anlaşılmıştır[2].

Saremi ve Keyvani[3]; inconel 738 süper alaşım altlık malzeme yüzeyine sırasıyla YSZ, YSZ/ Al_2O_3 , ağı. %60YSZ+%40 Al_2O_3 ve Al_2O_3 /YSZ şeklinde hazırlanmış tozları atmosferik plazma sprey yöntemi (APS) ile kaplamışlar ve kaplamalara sıcaklık korozyonu uygulamışlardır. Ağırlıkça %55 V_2O_5 ve % 45 Na_2SO_4 şeklinde hazırlanmış tuz karışımı kaplamaların yüzeyine 30 mg olarak konulmuştur. Daha sonra kaplamalar fırın içerisinde $1050^\circ C$ sıcaklıkta 4 saat ısıtılıp yine fırında soğutulmuştur. İşlem kaplama yüzeyinde herhangi bir ayrılma olana kadar devam etmiştir. Yaptıkları analiz sonucunda, sıcaklık korozyonu dayanımı Al_2O_3 /YSZ kaplamanın en az YSZ/ Al_2O_3 kaplamanın ise en fazla olduğunu bildirmişlerdir. Al_2O_3 /YSZ kaplamanın sıcaklık korozyonu dayanımı en iyi çıkma nedeni, yoğun Al_2O_3 tabakasının ergimiş korozyon tuzlarını altlara doğru sızmasını yavaşlatmasından kaynaklandığı anlaşılmıştır. Ergimiş tuzlar itriya ile reaksiyona girerek hacim artışına ve beraberinde kaplamanın kalkmasına neden olduğunu yaptıkları çalışmada aktarmışlardır.

Saremi ve Keyvani diğer bir çalışmalarında aynı kaplamalara oksidasyon deneyi uygulamışlardır. Deneyi kaplamaları 4 saat fırında $1100^\circ C$ sıcaklıkta 4 saat fırında ısıtıp fırında soğutmuşlar ve kaplama yüzeyinde herhangi bir çatlak veya ayrılma olduğunda deneyi bitirmişlerdir. Sonuç olarak, Al_2O_3 ilavesi YSZ 'nin oksidasyon dayanımını arttırdığını belirtmişlerdir[4].

Benzer bir çalışma Afrasiabi ve diğeri; tarafından üretilmiş kaplamalar 1050 °C sıcaklıkta 8 saatlik çevrimler ile 40 saat boyunca sıcaklık korozyonunu uygulanmış olup, yapılan analizler sonucu ergimiş tuzların YSZ kaplamada faz dönüşümü ve neticesinde çatlak oluştuğu gözlemlenmiştir. Ayrıca yoğun Al₂O₃ tabakasının ergimiş korozyon tuzlarını altlara doğru sızmasını engellediğinden belirtilmiştir[5].

Diğeri bir çalışmada 100 saat 1100°C sıcaklıkta fırında tutularak oksidasyon deneyi uygulanan YSZ ve YSZ/ Al₂O₃ kaplamalar da termal bariyer kaplamalar için yıkıcı etki oluşturan termal büyüyen oksit tabakasının (TGO) oluşumu Al₂O₃ ilavesi ile azalmıştır[6].

Zhu ve diğeri, YSZ ve Al₂O₃/YSZ kaplamalar üretilmiş 5, 50 ve 200 saat izotermal oksidasyon deneyi yapılmış ve TGO oluşu incelenmiştir. Oksidasyon zamanına bağlı olarak TGO kalınlığının artışı ve YSZ kaplama ara yüzeyinde her zaman daha geniş bir TGO tabakasının oluştuğu anlaşılmıştır. Al₂O₃ varlığı YSZ'nin faz dönüşümünü sınırladığı ancak, uzayan oksidasyon zamanına bağlı olarak faz dönüşümünün arttığı belirtilmiştir[7].

Karacaoğlanlı ve diğeri, inconel 718 süper alaşım malzemesini, Yüksek Hızlı Oksijen Yakıt (HVOF) ve APS yöntemleri ile kaplama yapmışlar ve termal şok davranışını incelemiştir. %65YSZ+%35 Al₂O₃ kaplama malzemesi 6 dakika 1200°C sıcaklığa ısıtılıp 2 dakika soğutulma şeklinde termal çevrim testine tabi tutulmuştur. Sonuç olarak Al₂O₃ parçacıklarının oksijenin alt kısımlara doğru difüze olmasını sınırladığı ve bunun sonucunda TGO oluşumun yavaşladığı ve termal çevrim ömrünün arttığını bildirmişlerdir[8].

Çalışmada, YSZ ve Al₂O₃ tozları farklı oranlarda karıştırılmış atmosferik plazma sprey yöntemi ile kaplanmış olup 10 farklı kaplama elde edilmiştir. Literatüre ek olarak farklı kademeli kaplamalar da üretilmiş olup kaplamalara oksidasyon, sıcaklık korozyonu, termal şok dayanım deneyi, aşınma, sertlik ve çekme deneyleri uygulanmıştır. Yapılan deneyler sonucu kaplamaları, korozyon, oksidasyon ve mekanik dayanım açısından karşılaştırılmış ve YSZ içerisine Al₂O₃ ilavesinin etkileri incelenmiştir.

Yukarıda özeti verilen literatür çalışmalarında genel olarak YSZ içerisine Al_2O_3 ; YSZ/ Al_2O_3 , ağı. %60YSZ+%40 Al_2O_3 ve Al_2O_3 /YSZ oranlarda ilave edilmiş olmasına rağmen Z65A, Z50A, Z35A,Z,YSZ/ Al_2O_3 , Z+Z35A+Z50A+Z65A+A, Z+Z35A+A oranlarında kaplama yapılmamıştır. Bu bağlamda hazırlanan tez çalışması, 10 farklı oranda karıştırılan YSZ ve Al_2O_3 tozlarının; oksidasyon, sıcaklık korozyonu, termal şok direnci ve aşınma dayanımı özelliklerinin incelenmesinden dolayı literatüre katkı sağlamaktadır.

1.2 Tezin Amacı

Endüstride jet motorların, dizel motorla ve brülörlerde sıklıkla termal bariyer olarak kullanılan YSZ ve alümina tozları farklı şekillerde üretilmektedir. TBK'ların ömrü, mekanik dayanımı ve özellikle de sıcaklık korozyonu direnci; kaplama malzemesi ve kalınlığa bağlıdır. Çalışmada, farklı malzemeler ve kaplama kalınlıklarda ve farklı karışım oranlarında hazırlanan kaplamaların optimizasyonu sağlanması amaçlanmaktadır.

1.3 Orijinal Katkı

Çalışmada, 10 farklı oranda karıştırılan YSZ ve Al_2O_3 tozları yapılan deneyler sonucu karşılaştırılmış, elde edilen kaplamaların üretilmiş ve korozyon, oksidasyon ve termal şok dayanımları incelenmiştir. Ayrıca, literatürden farklı olarak Z65A+Z50A+Z35A+A, Z+Z65A+A, Z+Z50A+A, Z+Z35A+A karışım oranlarındaki kaplamalar üretilmiştir ve sonuçlar incelenip genel bir karşılaştırma yapılmıştır.

TERMAL BARIYER KAPLAMALAR

2. 1 Termal Bariyer Kaplamalar ve Beklenen Özellikler

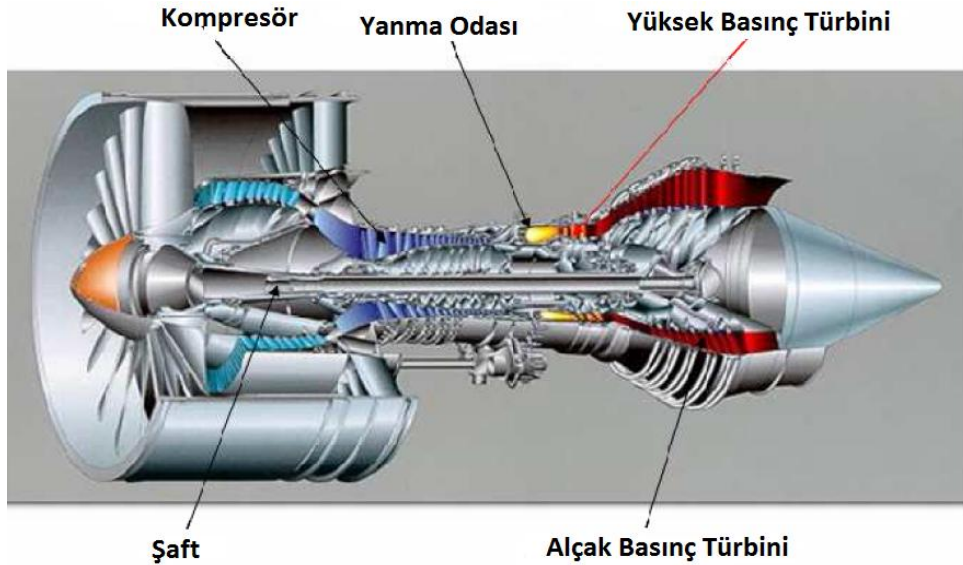
Genel olarak TBK'lar ısı yalıtım sağlayan üst seramik katman, oksidasyon direnci ve altlık malzeme ile seramik katman arasında var olan ısı genleşme farkını dengeleyen bağ katman ve süper alaşım altlık malzeme olmak üzere üç katmandan oluşan koruyucu kaplamalardır. Termal iletkenliği azaltmak altlık malzemesinin sıcaklıktan korumak için termal iletkenliği düşük seramik üst katman malzemeleri tercih edilir. Aynı zamanda, üst katmanın kalınlığının artmasında termal iletkenliği azaltan önemli bir faktördür. Ancak, kalınlığın artması türbin parçalarının boyutunun ve artık gerilmelerin artmasına aynı zamanda kaplama işlemi sırasında bağ katmanın oksitlenmesi sonucu "termal büyüyen oksit (TGO) " denilen bir oksit tabakasının oluşumuna neden olmaktadır[9,10].

TBK' ların üretilmesinde, plazma yöntemi ve elektron demeti fiziksel buhar çökeltme yöntemleri olmak üzere başlıca iki yöntem kullanılmaktadır. TBK'nın bağ katmanı ve seramik üst katmanı her ikisi de EB-PVD veya plazma sprej kaplama yöntemleri ile kaplanabilir. Plazma sprej yöntemi, atmosferik ortamın yanında bağ kaplama özelliklerini iyileştirmek için kontrollü atmosfer veya vakum altında da uygulanabilmektedir. Plazma sprej yöntemi; EB-PVD'ye termal çevrim dayanımı düşük olmasına rağmen PS'nin ekonomik oluşu, sistemin basit ve kolay uygulanabilirliği, düşük termal iletkenlik ve yüksek verim gibi avantajları bu yöntemi TBK ön plana

çıkartmaktadır. Düşük basınçlı plazma sprej (LPPS) yöntemi diğer bir adı vakum plazma sprej yöntemi de (VPS) kullanılmaktadır. Son yıllarda, vakum ortamı gerekmeden daha düşük maliyetli ve daha hızlı üretim yapılabilen yüksek hızlı oksit yakıt (HVOF) yöntemi kullanılmaktadır. PS yöntemine göre bu yöntem daha iyi tutunma dayanımı ve düşük oksit içeriği ve düşük gözenekli yapısı ile daha üstün bir yöntemdir[9,11,12,13].

2.1.1 Altlık malzemesi

Altlık malzemesi, termal bariyer kaplama sisteminde sıcaktan ve termal tozlar üzerine kaplandığı bir malzemedir. Nikel esaslı süper alaşımlar yaklaşık 1100°C kadar olan sıcaklıklara dayanım gösterdikleri için gaz türbinlerinde altlık malzemesi olarak kullanılırlar.



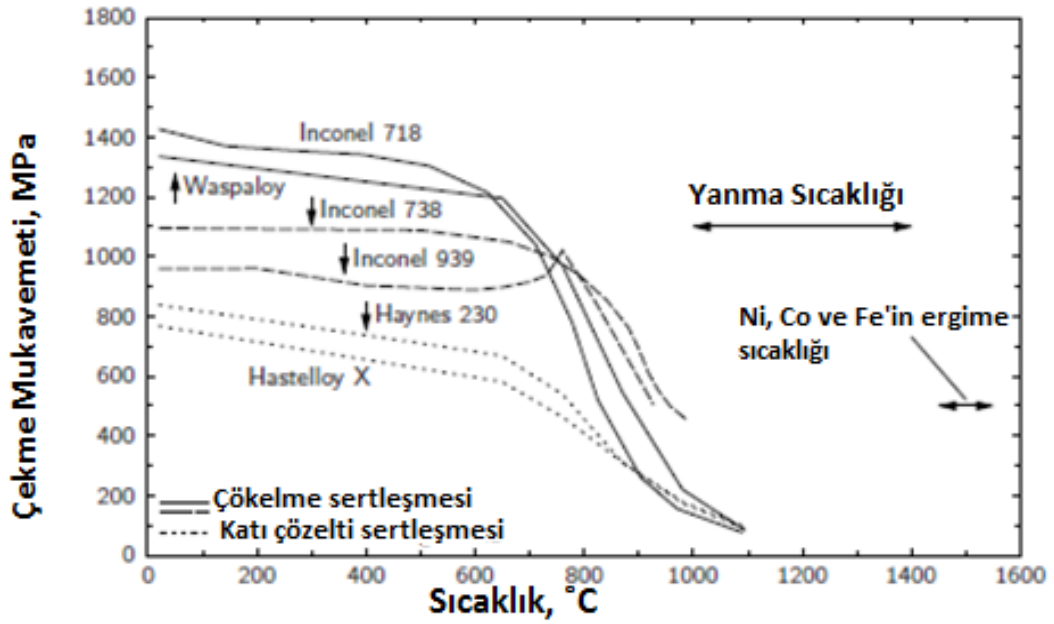
Şekil 2. 1 Gaz türbin kesit görüntüsü[14]

Sıcaklık ve basınç gibi ağır ortam şartlarında çok iyi oksidasyon ve korozyon dayanımı gösteren altlık malzemelerinin geleneksel yöntemlerle üretimi ve şekillendirilmesi hızlı pekleşme gösterdikleri için zordur. Genelde altlık malzemesi olarak kullanılan süper alaşımların, kimyasal bileşimleri Çizelge 2. 1'de verilmiş olup gaz türbinlerinde ergime noktalarının yaklaşık %90'na yakın sıcaklıklarda çalışabilirler (Şekil 2. 1).

Çizelge 2. 1 Ni esaslı süper alaşımların kimyasal bileşimleri[15]

Süper Alaşımlar	Ağırlıkça Element Yüzdesi					
	600	617	625	690	718	X-750
Ni	72	44,2-56	58	59,5	50-55	70
Cr	14-17	20-24	20-23	30	17-21	14-17
Fe	6-10	3	5	9,2		5-9
Mo		8-10	8-10		2,8-3,3	
Nb			3,15-4,15		4,75-5,5	0,7-1,2
Co		10-15	1		1	1
Mn	1	0,5	0,5	0,3-5	0,3-5	1
Cu	0,5	0,5		0,01	0,2-0,8	0,5
Al		0,8-1,5	0,4	0,02	0,65-1,15	0,4-1
Ti		0,6	0,4		0,3	2,25-2,75
Si	0,5	0,5	0,5	0,35	0,35	0,5
C	0,15	0,15	0,1	0,019	0,08	0,08

Altlık malzemesi olarak en çok Inconel 718 süper alaşım kullanılmakta olup, sıcaklığa bağlı olarak değişen mekanik özellikleri Şekil 2. 2’de verilmiştir.



Şekil 2. 2 Ni esaslı süper alaşım malzemelerin sıcaklık altındaki mekanik özellikleri[16]

2.1.2 Seramik Üst katman

Seramik üst katman, termal bariyer kaplama sisteminin en üstünde bulunan gaz türbinlerinde sıcak gazlara ve motor çalışma sıcaklığına maruz kalan tabakadır. Üst katmanın görevi; ısıl yalıtım yaparak altlık malzemesini sıcaklıktan korumaktır. Üst katman olarak genelde itriyum oksit ile kararlı hale getirilmiş zirkonyum oksit çok sık olarak kullanılmaktadır. Bunun yanında Al_2O_3 , müllit, $La_2Zr_2O_7$, $La_2Ce_2O_7$, TiO_2 , Silika gibi tozlarda kullanılmaktadır. TBK olarak kullanılan tozların termal iletkenlik değerleri 1-30 W/mK arasında değişmesine rağmen zirkonyum oksitin değeri 2 W/mK ile en düşüktür.

Zirkonyanın yüksek iyonik iletkenliğe sahip olmasından dolayı oksijen seramik üst katmandan, bağ katmana doğru kolayca transfer olabilir ve bağ katman üzerinde kaplama ömrünü etkileyen bir termal büyüyen oksit tabakası oluşmasına neden olur.

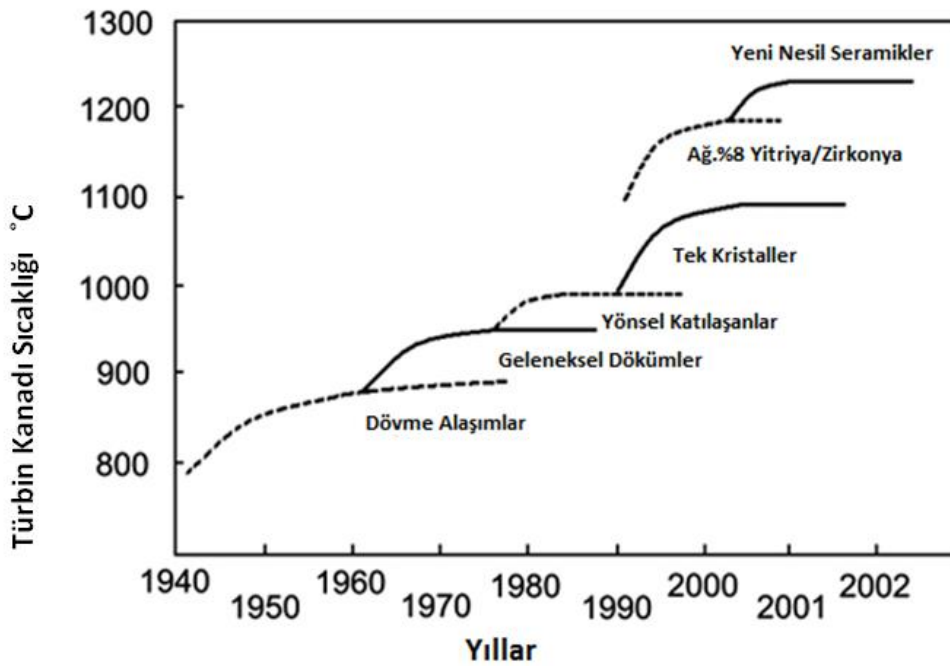
Şekilden görüldüğü üzere Ni bazlı süper alaşım altlık malzemesinin seramik üst katman arasındaki termal genleşme katsayısı arasında farkın az olduğu görülmektedir.

Üst katman kalınlığı, türbin uygulamalarında yaklaşık 300 μ m civarında iken dizel motorlarda 2mm'ye kadar kullanılabilir.

2.1.3 Bağ katman

Bağ katman da, MCrAlY şeklinde bağ katman malzemesi kullanılmakta olup, M ise nikel, kobalt veya iki elementin birleşimini belirtir. Bağ katman altlık malzeme yüzeyine; oksidasyon direnci sağlamak, tutunma kabiliyetini artırmak ve seramik katman ile metalik katman arasında var olan ısıl genleşme farklılıklarını dengelemek için kullanılır. Yapışmanın iyi olabilmesi için itriyum gibi nadir toprak elementleri sınırlı miktarlarda (< % 1) eklenmektedir[34]. Yüksek termal genleşme katsayısından dolayı bağ katman genel olarak metal alaşımlarından üretilir. Seramik üst katman poroz yapısından dolayı oksijen iyonlarının yüzeyden alt kısımlara doğru akmasına engel olamaz. Bu nedenle, altlık malzemesinin oksidasyona uğrayıp zamanla tükenmekten koruma işi bağ katmana aittir. Yüksek çalışma sıcaklıklarında; düşük oksijen difüzyonu, yoğun yapısı, homojen dağılımı ve yüksek tutunma kabiliyeti nedeni ile bağ katmanda diğer oksitlere tercihen $\alpha-Al_2O_3$ oluşumu istenmektedir. Bağ katman yapısında

bulundurduğu Al elementi sayesinde uzun süre TGO oluşumu sağlayan bir depo görevi görmektedir. Eğer, oksit tabakası düşük oksijen difüzyon hızına sahipse TGO oluşumu da yavaş olacaktır buna bağlı olarak TGO' dan gelen hatalar ve oksidasyon ertelenecektir[7]. Bağ katman içinde bulunan Al ve Cr elementleri; Al oksidasyon ömrünü artırırken sünekliği önemli miktarda azaltmaktadır. Cr elementi ise, bağ katman yüzeyinde oluşan krom oksit (Cr_2O_3) film tabakası çok iyi bir oksidasyon ve korozyon direnci sağlar. Türbin parçalarında operasyon sıcaklık artışı şekil 2. 3' de verilmiştir [17].



Şekil 2. 3 Kronolojik olarak türbin parçalarının operasyon sıcaklığı artışı[18]

Termal bariyer kaplamalardan;

- Yüksek ergime noktası,
- Ağır çalışma ortamlarında faz dönüşümü göstermemesi,
- Altlık malzeme ile seramik katmanın ısıl genleşme katsayılarının yakın olması,
- Yüksek aşınma ve erozyon direnci,
- Kimyasal kararlılık (oksitlenme ve korozyona karşı dayanım),
- Düşük maliyet,

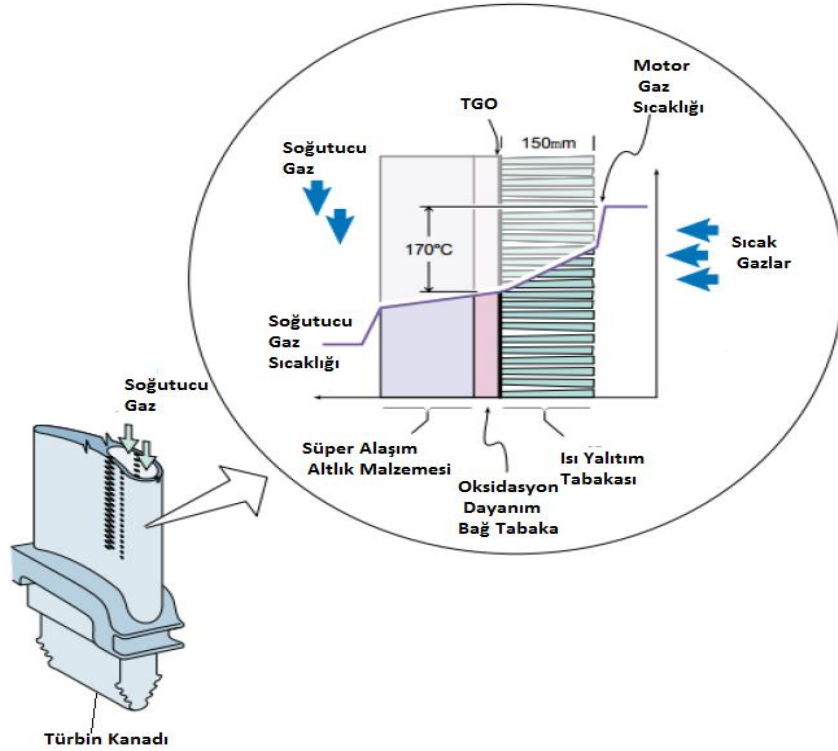
- Düşük elastisite modülü,
- Düşük termal iletkenlik,
- Metalik atlık ile en uygun ısıl genleşme davranışı,
- Altlık malzemeye iyi tutunma özelliği ve
- Düşük sinterleme oranı özellikleri beklenmektedir ancak, tüm bu özellikleri karşılayabilen TBK malzemesi sınırlıdır.

1960'lerden beri bazı seramik malzemeler düşük termal iletkenliklerinden dolayı kullanılan TBK'lar, öncelikle türbinlerin sıcaklığa maruz kalan parçalarının metal yüzeylerinin sıcaklıklarını düşürür, türbin giriş sıcaklığını yükselterek motor verimliliğini, aero-motorların çevrim ömürlerini artırır. Uzay araçlarında kalsit ile kararlı hale getirilmiş zirkonya ilk olarak kullanılan TBK uygulamasıdır. TBK seramik kaplamalar 1970 ve 1980'lerde türbin kanat parçalarında da kullanılmıştır[11,20].

Günümüzde, kullanılan askeri ve ticari hava araçlarında türbin giriş sıcaklıkları 1500-1600°C civarında olup önümüzdeki yıllarda bu değer 1760°C veya daha üzeri olması beklenmektedir. Süper alaşım altlık malzemelerinin ergime noktasının yaklaşık %90'nına denk gelen söz konusu yüksek sıcaklıklarda kullanılabilmesi pahalı soğutma sistemleri ile mümkün olabilmektedir. Ekonomik olmayan sistemlerle soğutulan türbinler yerine altlık malzemelerin termal bariyer seramiklerle kaplanması tercih edilmektedir. Uzay sanayinde kullanılan TBK'lar, türbin kanatlarının soğumasını hızlandırarak parçaların kullanım ömürlerini artırır. Bağ katman sayesinde yüksek sıcaklıklarda yakıttan gelen pis atıkların ve tuzların altlık malzemeyi sıcaklık korozyonuna uğratması engellenir[11,21,48].

Termal bariyer kaplamalar daha az soğutma havası kullanılarak, motor yanma odasındaki altlık malzemenin sıcaklığını sabit tutarak performansını iyileştirirler ve ömrünün artmasını sağlarlar. Gaz türbinlerinde ise yakıt tüketimi, türbinlerinde çalışma sıcaklığı artışı sağlanarak yakıt veriminin artmasını ve yakıt tüketiminin azalmasını sağlar. Tümünüyle seramikten üretilen türbin parçaları termal şok ve kırılma nedeni ile kullanımda istenilen verim sağlanamamıştır. TBK uygulaması ile normal şartlarda altlık

malzeme yüzey sıcaklığı 50-80 °C arasında azalırken, yüksek sıcaklıklarda bu değer 300 µm kalınlığında; YSZ kaplama için 170°C'ye kadar düşebilmektedir (Şekil 2. 4) [9,22,23].



Şekil 2. 4 Termal bariyer uygulaması örneği türbin kanadı kesiti[22]

2.2 Termal Bariyer Olarak Kullanılan Malzemeler

Termal bariyer kaplamalar, geleneksel türbinlerde kullanılan malzemelerin ergime noktalarını aşan türbin sıcaklıklarına maruz kaldıkları için türbin giriş sıcaklığını artırmak ve artan sıcaklıklarda yanma hattı, aktarma parçaları, türbin kanatları ve diğer sığağa maruz kalan türbin parçalarını korumak için geliştirilmişlerdir. İlk olarak uzay ve hava araçlarında, TBK uygulamalarında emaye ve kalsiya stabilize zirkonya kullanılmıştır. Hava araçlarının jet motorlarında mekanik, termal ve kimyasal gerilmeler oluşur tüm bu olumsuz şartlarda çalışabilecek YSZ, Al_2O_3 , TiO_2 , Müllit, $CaO/MgO+ZrO_2$, CeO_2+YSZ ve $La_2Zr_2O_7$ gibi çeşitli malzemeler geliştirilmiştir. TBK malzemesi seçerken termal genişleme katsayısı ve termal iletkenlik en önemli faktörlerdir. Yaygın olarak kullanılan TBK malzemelerinin avantaj ve dezavantajlar çizelge 2. 2'de fiziksel özellikleri Çizelge 2. 3'de verilmektedir[11,13,23].

Çizelge 2. 2 TBK malzemelerinin avantaj ve dezavantajları[11]

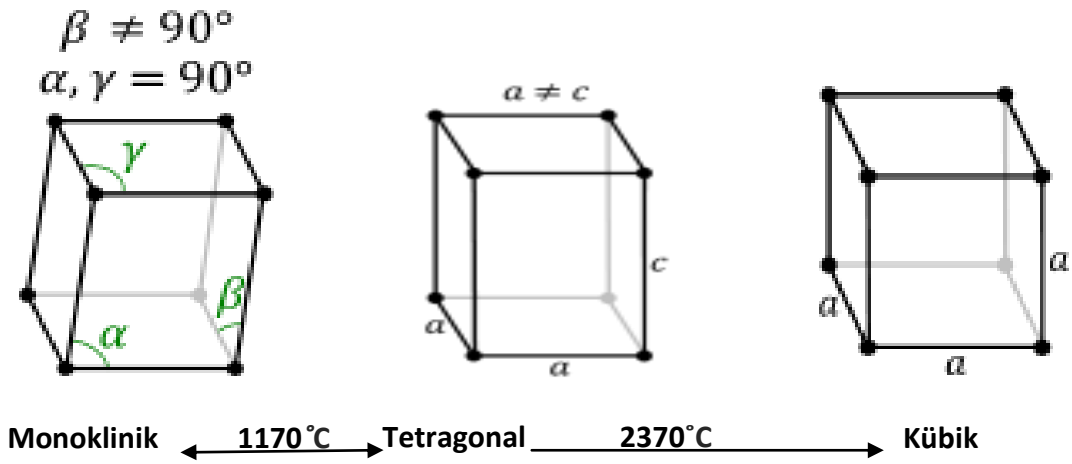
Malzemeler	Avantajları	Dezavantajları
7-8 YSZ	<ul style="list-style-type: none"> •Yüksek termal genişleme katsayısı •Düşük termal iletkenlik •Yüksek termal şok direnci 	<ul style="list-style-type: none"> •1200 °C üzeri sinterlenme •1170 °C'de faz dönüşümü •Korozyon ve oksijen difüzyonu
Müllit 3Al₂O₃2SiO₂	<ul style="list-style-type: none"> •Yüksek korozyon direnci •Düşük termal iletkenlik •İyi termal şok direnci •Düşük Oksijen geçirgenliği 	<ul style="list-style-type: none"> •Kristalizasyon (700-1000 °C) •Çok düşük termal genişleme katsayısı
Alümina (Al₂O₃)	<ul style="list-style-type: none"> •Yüksek korozyon direnci •Yüksek sertlik •Düşük oksijen geçirgenliği 	<ul style="list-style-type: none"> •1000°C ve üzeri faz dönüşümü •Yüksek termal iletkenlik •Çok düşük termal genişleme katsayısı
CeO₂+YSZ	<ul style="list-style-type: none"> •Yüksek termal genişleme katsayısı •Düşük termal iletkenlik •Yüksek korozyon direnci •YSZ'ye göre monoklinik fazdan tetragonal faza dönüşüm daha az •Yüksek termal şok direnci 	<ul style="list-style-type: none"> •Yüksek sinterlenme oranı •CeO₂'nin çökelme sıcaklığı 1100°C üzeri •Kaplama esnasında CeO₂ azalması
La₂Zr₂O₇	<ul style="list-style-type: none"> •Çok yüksek termal kararlılık •Düşük termal iletkenlik •Düşük sinterlenme oranı ve O₂ geçişi 	<ul style="list-style-type: none"> •Nispeten düşük termal genişleme katsayısı
La₂Ce₂O₇	<ul style="list-style-type: none"> •Çok yüksek termal kararlılık •Yüksek termal genişleme katsayısı •Düşük termal iletkenlik •Yüksek korozyon dayanımı 	<ul style="list-style-type: none"> •Kaplama esnasında CeO₂ azalması •1250°C üzeri nispeten yüksek sinterlenme oranı
Silikatlar	<ul style="list-style-type: none"> •Ucuz ve kolay ulaşılabilir •Yüksek korozyon direnci 	<ul style="list-style-type: none"> •Çok düşük termal genişleme katsayısı
SrZrO₃	<ul style="list-style-type: none"> •Yüksek termal genişleme katsayısı •Düşük termal iletkenlik •Düşük sinterlenme oranı 	<ul style="list-style-type: none"> •Faz dönüşümü •Termal sprey kaplama esnasında SrO azalması

Çizelge 2. 3 Termal Bariyer Kaplama Olarak kullanılan Malzemeleri ve Fiziksel Özellikleri[11]

Termal Bariyer Kaplama Olarak kullanılan Malzemeleri ve Fiziksel Özellikleri							
Malzemeler	Tm (K)	Dth (m ² s ⁻¹) × 10 ⁻⁶	λ (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	α (K ⁻¹) × 10 ⁻⁶	E (GPa)	Cp (Jg ⁻¹ K ⁻¹)	ν
	Ergime Noktası	Termal Difüzyon	Termal İletkenlik	Termal Genleşme	Elastisite Modülü	Isı Kapasitesi	Poison Oranı
ZrO ₂	2973	0.43	2.1 7	15.3	21		0,25
8YSZ	2123			8	40		0,22
3YSZ	2973	0.58	2.12	11.5 (293-1273K)		0,64	
CeO ₂	2873	0.86	2,7	13 (293–1500 K)	172 (293K)	0,47 (1273K)	0,27- 0,31
Al ₂ O ₃	2323	0.47	5.8 (1400K)	9.6 (1273K)	30 (293K)		0,26
Al ₂ O ₃ (TGO)				8 (293–1273 K)	360 (293K)		0,22
3Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂ (Müllit)	2123		3.3 (1400K)	5.3 (293–1273 K)	30 (293K)		0,25
La ₂ Zr ₂ O ₇	2573	0.54	1,56	9.1 (293-1273K)	175 (293K)	0,49	
SrZrO ₃	2963	1,25	3,42	8,1 (293-1273K)	181 (293K)	0,45	
Y ₃ Al ₅ O ₁₂	2243		3	9.1 (293-1273K)			
YBa ₂ ZrO ₆	1973		0.37 (543 K)		120 (293K)	2,8	
NiCoCrAlY (bağ tabaka)				17.5 (293–1273 K)	86 (293K)		0,3
IN737 (altlık malzemesi)				16 (293–1273 K)	197 (293K)		0,3

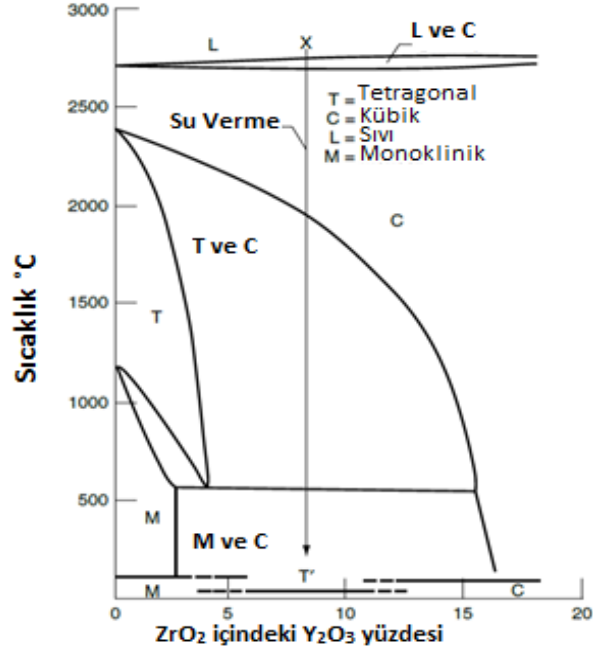
2.2.1 Yitriya Stabilize Zirkonya (YSZ)

Zirkonya sıcaklığa bağlı olarak faz dönüşümü göstermektedir. 1170 °C'ye kadar monoklinik kristal, 1170-2400 °C arasında tetragonal ve 2400 °C üzerinde kübik yapıya sahiptir. Tetragonal- monoklinik faz dönüşümleri çalışma ortamında hacimce yaklaşık %4 bir artışa neden olmaktadır. Ancak, ZrO₂'nin yüksek sertlik, düşük sürtünme katsayısı, iyi yapışma özelliği, iyonik iletkenlik, düşük termal iletkenliği ve yüksek ergime noktası gibi kimyasal ve fiziksel özellikleri bir numaralı TBK malzemesi yapmaktadır (Şekil 2. 5).



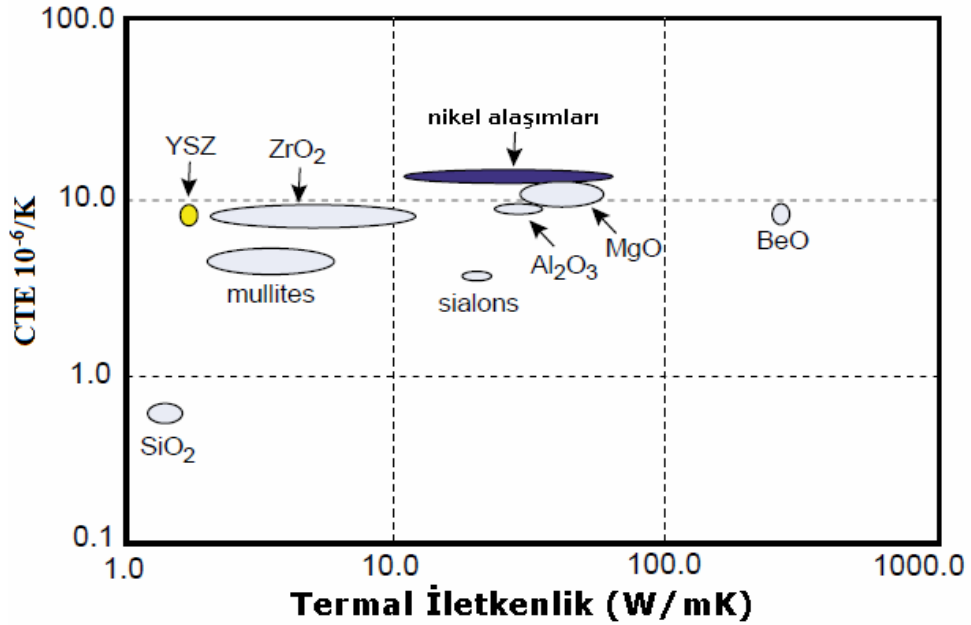
Şekil 2. 5 Zirkonya faz dönüşümleri[24]

Faz dönüşümü, kaplamada yıkıcı kalıntı gerilmeleri, çatlaklar, ayrılmaların oluşmasına ve çalışma ömrünün kısılmasına neden olmaktadır. Faz dönüşümüne uğrayan saf zirkonya, yerine değişen sıcaklıklarda tetragonal faz yapısını muhafaza edebilmesi için itriyum oksit (Y₂O₃), kalsiyum oksit(CaO), magnezyum oksit (MgO) gibi oksitlerle kararlı hale getirilmiş zirkonyum oksit (ZrO₂) kullanılmaktadır. Kararlı hale getirilmiş zirkonyum oksitin tetragonal ve kübik fazlardaki kararlılığı, düşük ısıl iletkenliği ve termal genleşme katsayısı, iyi kırılma tokluğu ve yüksek mekanik gerilmelere karşı dayanım nedeniyle tercih edilmektedir. Kararlı hale getirilmiş ve tetragonal faz yapısına sahip zirkonya düşük sıcaklıklarda dahi monoklinik faza dönüşüm göstermez. Ancak, yeterli zaman ve sıcaklık sağlandığında karalı tetragonal faz düşük sıcaklıklarda monoklinik faza dönüşebilir. 850-1000 °C'de meydana gelen tetragonal fazdan monoklinik faza geçiş su verilmiş çeliklerde görülen martenzitik dönüşüme benzemektedir(Şekil 2. 6) [25].



Şekil 2. 6 YSZ kaplama malzemesinin faz dönüşümü

Şekil 2. 7’de Zirkonyum oksit kaplama malzemesinin ısı genleşme katsayısının, altlık malzemesi olarak kullanılan nikel bazlı süper alaşımın ısı genleşme katsayısına çok yakın bir değere sahip olduğu ve ısı termal iletkenlik değerinin diğer kaplama malzemelerine göre çok düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 2. 7 Termal bariyer kaplama malzemelerinin ısı ve termal iletkenlik özellikleri[26]

YSZ içerisindeki itriyum oksit yoğunluğu malzemenin kullanılacağı yere ve uygulanan kaplama yöntemine göre farklılık gösterir. Isıl yalıtım istenilen yerlerde itriyum oksit oranı artırılabilir. Gaz türbinleri ve dizel motorlarında %7-8 oranında itriyum oksit içeren kaplamalar, termal çevrim dayanımı göstermeleri yanında Na_2SO_4 ve V_2O_5 elementlerinin neden olduğu sıcaklık korozyonuna diğer CaO ya da MgO göre daha yüksek dayanım gösterir. %7-8 YSZ sıcaklık korozyonuna karşı çok zayıftır eğer temiz dizel yakıt kullanılmazsa S,Na,V elementleri çok çabuk korozyona uğramasına neden olurlar.

YSZ sahip olduğu gözenekli yapı, yüksek sıcaklıklarda, oksijenin bağ katmana doğru transfer olmasına ve bağ katman üzerinde bir termal büyüyen oksit (TGO) oluşmasına neden olmaktadır. Termal bariyer kaplamalarda oluşan TGO ince ayrılmalara neden olmaktadır. Bunu durumu önlemek için alümina ve müllit gibi kalın bağ katmanlar kullanılmalıdır. Seramik matris içerisine çökelmiş veya disperse edilmiş zirkonyanın tetragonal yapıdan monoklinik yapıya dönüşümü sonucu seramik malzemelerin tokluğu ve mukavemeti artar[4, 11,26,27,28].

2.2.2 Müllit ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)

Müllit; düşük yoğunluğu, ağır çalışma şartlarında yüksek kimyasal kararlılığı, yüksek sıcaklık dayanımı, düşük termal iletkenliği ve ideal mukavemet ve sürünme davranışlarından dolayı önemli bir malzemedir. SiO_2 ve Al_2O_3 birleşimlerinden oluşan müllit YSZ'ye göre daha düşük genleşme katsayısına ve daha yüksek termal iletkenliğe sahip olup oksijen dayanımı daha yüksektir. Plazma sprey (PS) işlemi sonrasında soğuk altlık malzemeye ergimiş halde çarpıp hızlıca katılan müllit yapısında çok fazla amorf faz içerir. Bu amorf faz 750-1000°C sıcaklıkta kristalleşmeden dolayı hacimsel büzölmeler bunun sonucu olarak da kaplama ayrılmaları ve çatlaklar meydana gelir. Müllit 1500°C'nin üzerindeki sıcaklıklara kadar kararlı termal iletkenlik gösterir. Müllit kaplamaların, düşük sıcaklıklarda sahip olduğu termal çevrim sayısı YSZ'ye göre daha yüksektir. Ancak 1000°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda hacimsel büzölmelerden dolayı çevrim sayısı azalmaktadır[4,10,18,29].

Dizel motorları gibi yüzey sıcaklığı daha düşük olan yerlerde müllit zirkonyuma harika bir alternatiftir. Özellikle, SiC tabanlı SiC kaplamalarda aynı termal genleşme katsayısına sahip oldukları için müllit çok daha iyi bir alternatiftir.

Çalışmalar müllitin, sıcaklık korozyonundan çok etkilenmediğini Na ve V elementlerinin bol bulunduğu ortamlarda müllitin sıcaklık dayanımının çok iyi olduğu; 100 saatten fazla çevrim sonunda sadece 1µm kaplamanın etkilendiğini anlaşılmıştır

2.2.3 (Al₂O₃)

Al₂O₃ yüksek sıcaklıklarda kimyasal nötrlük ve mekanik zorlamalara karşı gösterdikleri dayanım, ekonomiklik, kolay bulunabilirlik ve düşük korozyon oranı özelliklerinden dolayı birçok alanda kullanılan bir malzemedir[4,13]. YSZ 'ye göre yüksek termal iletkenliğe ve düşük termal genleşme katsayısına sahip olduğu için TBK uygulamalarında tek başlarına çok fazla tercih edilmezler. Ancak, YSZ içerisine belli oranlarda eklenerek YSZ'nin tokluk ve elastisite modülü ile herhangi bir değişiklik yapmadan yapışma dayanımı, sertlik değerlerini artırır ve altlık malzemesi içinde oksidasyon direnci sağlamaktadır. Çizelge 2. 4'te Al₂O₃'ün fiziksel özellikleri ve mekanik özellikleri verilmektedir.

Çizelge 2. 4 Al₂O₃'ün fiziksel ve mekanik özellikleri[18]

Yoğunluk ρ (gr/cm ³)	3,95
Sertlik HV	1800-2000
Elastiklik Modülü E (Gpa)	300
Kırılma Tokluğu K _{iç} (MPa.m ^{1/2})	3,5
Eğme Dayanımı R _E (N/mm ²)	200-600
Çekme Dayanımı R _M (N/mm ²)	200-250
Elastislik Modülü E (GPa)	375
Isıl İletkenlik (W/m.K)	18
Isıl Genleşme Katsayısı α(10 ⁻⁶ °C ⁻¹)	7
Isıl Şok Direnç Sınırı (°C)	200
Öz Direnç Ω (Ohm.cm)	>10 ¹⁴

Kaplamanın erozyon davranışı, YSZ kaplama üzerine Al_2O_3 kaplanarak sertlik değeri arttırılabilir. Ancak, plazma spreylenen Al_2O_3 kaplamada γ ve δ - Al_2O_3 gibi birçok kararsız faz bulunur. Bu fazlar, termal çevrim esnasında α - Al_2O_3 kararlı fazına dönüşür ve yapıda %15 yakın hacimsel küçülmeye ve bunun neticesinde yapıda mikro çatlak oluşumuna neden olurlar. Cr_2O_3 , TiO_2 , Fe_2O_3 gibi geçiş metal oksitlerinin dolanmasıyla α fazı dengelenebilir. Alümina parçacıklarının YSZ içinde kullanılması ile O_2 'nin katmanlar arasından geçmesini azaltır. Böylece, TGO büyümesi Al_2O_3 ile baskı altına alınmış olur. Bu nedenle α - Al_2O_3 ZrO_2 ile birlikte karışım olarak kullanılırlar[26,27,30,31,36].

Alümina, ZrO_2 kristalleri etrafında sert bir matris ve basınç oluşturarak YSZ'nin faz dönüşümünü engellemektedir. Yapılan çalışmalar, tek başına kullanılan Al_2O_3 ya da ZrO_2 göre YSZ+ Al_2O_3 kompozitin daha iyi mekanik dayanımını artırır. Üst katman ve bağ katman arasındaki termal genişleme katsayısını azaltır. Ayrıca YSZ+ Al_2O_3 kompozitin çatlak gelişimini etkin şekilde engeller ve dayanımı ve tokluğu arttırırlar [8,6,11].

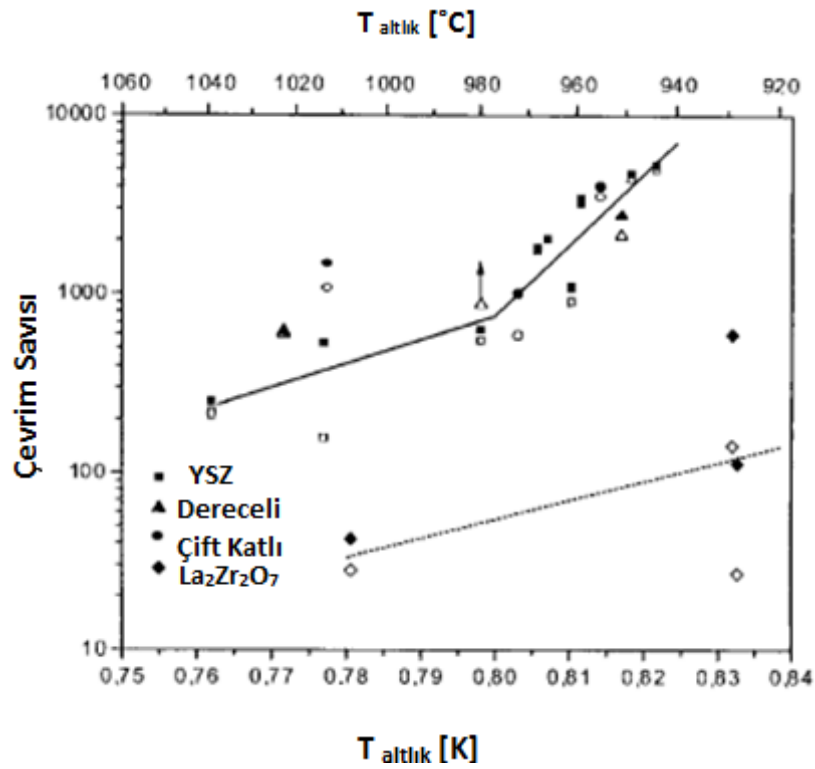
2.2.4 CeO_2 +YSZ

CeO_2 , YSZ'ye göre yüksek termal genişleme katsayısı ve düşük termal iletkenliği sahiptir, YSZ içerisine belirli oranlarda CeO_2 ilavesi ile kaplamanın termal çevrim ömrü iyileştirilebilir. YSZ içerisine seryum oksit ilavesi ile monoklinik fazdan tetragonal faza dönüşüm çok daha az olur. Karışımın termal yalıtım özelliği çok iyi olduğu için bağ katmanda meydana gelen gerilmeler daha azdır, kaplamanın termal genişleme katsayı ise büyümesi avantaj olmakla birlikte, YSZ içine CeO_2 ilavesi sertliği düşürür, CeO_3 içerisindeki CeO_2 'nin azalması sonucu kaplamanın reaksiyon oranlarının değişmesi ve sinterlenme oranının azalması gibi bazı dezavantajları da vardır[4,10,11,14,27].

2.2.5 $La_2Zr_2O_7$

Gaz türbin parçalarında kullanılan geleneksel kaplama malzemeleri gerekli sıcaklık değerlerini artık karşılayamadıkları için son zamanlarda $La_2Zr_2O_7$ esaslı seramik malzemelerin TBK olarak geliştirilmesi ve üretilmesine yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Lantonyum zirkonat (LZ) yüksek ergime noktası, düşük termal iletkenlik, düşük oksijen

geçirgenliği ve sinterlenme kabiliyeti gibi özelliklerinden dolayı yüksek sıcak uygulamalarında çok umut verici bir TBK malzemesidir. Ancak, LZ üretimi çok uzun sürmekte ve ticari olarak bulunması zordur. LZ, yüksek miktarda Al içeren NiCrAlY bağ katman olmaksızın kullanıldığında 1400°C sıcaklığa kadar faz kararlılığı gösterir. Ancak, bağ katman ile oluşan La_2O_3 fazı 1000°C'den daha düşük sıcaklıklarda ayrışmalara neden olur[32]. LZ, YSZ' ye göre daha düşük termal iletkenliği olmasına rağmen düşük termal genişleme katsayıları ve tokluklarından dolayı uzun termal çevrim dayanımı gösteremezler (Şekil 2. 8).



Şekil 2. 8 $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ /YSZ kaplama malzemesinin sıcaklığa bağlı değişen termal çevrim sayısının karşılaştırılması

Eğer, YSZ/ $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ şeklinde çift katmanlı kompozit kaplama yapılırsa mükemmel termal çevrim sayısı elde edilir. YSZ/ CeO_2 tabakalı kompozit kaplama ile iyi termal şok direnci sağlanır hem YSZ' ye göre daha yüksek sıcaklıklarda çalışabilir. $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ içerisine hacimce %20 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ya da BaTiO_3 ilave edilirse kaplama tokluğu artırılırken CeO_2 ilavesi ile termal iletkenlik azalır ve sinterlenme dayanımı artırılabilir. $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ (LZ) kübik priklor yapısının ergime noktasına (2300°C) kadar kararlı yapıdadır[4,11,32].

2.2.6 Silikatlar

Silikatlar daha çok çevresel etkilerden altlık malzemeyi korumak için kullanılırlar, TBK malzemesi olarak $ZrSiO_4$ ve doğal zirkon kumu ve doğal kalsiyum silikat ($CaSiO_3$) malzemeleri de yaygın olmasa da kullanılmaktadır. Zirkon düşük termal genleşme katsayısı ($4.99 \cdot 10^{-6} K^{-1}$, 300–1700 K) ve yüksek termal iletkenliği ($3.46 W m^{-1} K^{-1}$, 365–1810 K) sahiptir. Düşük sıcaklıklarda kimyasal kararlılığı çok iyidir. Zirkon saflık derecesine bağlı olarak $1676^\circ C$ 'de termal ayrışma gösterir[48]. Plazma sprej sırasında zirkon kristal (ZrO_2) ve amorf SiO_2 bileşenlerine ayrışır. Zirkon kristal, TBK malzemesi olarak gaz türbinlerinde kullanıldığında SiO_2 'in ayrışması SiO ve $Si(OH)_2$ buharlaşma zor olacağından problemlere neden olabilir. Kaplamada ZrO_2 faz termal yalıtım etkisi gösterebilir. $Fe_3Al_2(SiO_4)_3$, garnet taşı $Mg_3Al_2(SiO_4)_3$, $Ca_3Al_2(SiO_4)_3$, bazalt taşı gibi diğer silikatlar kolay bulunabilir ve TBK olarak kullanılma potansiyeline sahiptirler. $2CaO SiO_2$ ağırlıkça %10-30 arası $CaOZrO_2$ oksitleri, mükemmel termal şok ve sıcaklık korozyonu dayanımı gösterirler[4,11].

2.2.7 Nanoyapılı YSZ

Kaplamaların performansını iyileştirdiği için nano boyutta YSZ kullanımı artmaktadır[11]. APS nano yapılı zirkonya dönüşüm göstermeyen tetragonal faz ve mikro yapısı ergimemiş veya kısmen ergimiş parçacıklar, mikro çatlaklar, büyük gözeneklerden meydana gelmektedir. Nano yapılı YSZ kaplamalar, yüksek mikro sertlik, düşük termal iletkenlik ve pürüzlülüğü düşük kaplama yüzeyi gibi kaplama kalitesini etkileyen özellikler göstermektedirler. Nano boyutlu TBK'lar sahip oldukları düşük elastiklik modülü termal gerilimleri etkiler ve termal çevrim esnasında daha dayanıklı olmalarını sağlar. Nano boyutlu YSZ, daha küçük çaplı parçacık çapına sahip olduğu için yoğun bir mikro yapı oluşur ve O_2 'nin üst katmandan bağ katmana doğru geçişi ve oksidasyon oluşum oranı azalır. Bu nedenle, kaplamaların ayrılma dirençleri yüksektir. Nano yapılı YSZ (NYSZ)kaplamalar daha hassas mikro yapıya sahip olmaları düşük termal iletkenlik göstermelerine rağmen önemli bir termal genleşme farkı göstermemektedir[11,32]. YSZ ve NYSZ $1200^\circ C$ sıcaklığa kadar ısıtıldıklarında yaklaşık aynı oranda sinterlenme ve termal iletkenlik özelliği gösterirler[34].

NYSZ daha kararlı ve daha ince bir YSZ yapısı oluşturmak daha yüksek sıcaklıklarda çalışmak için geliştirildi.

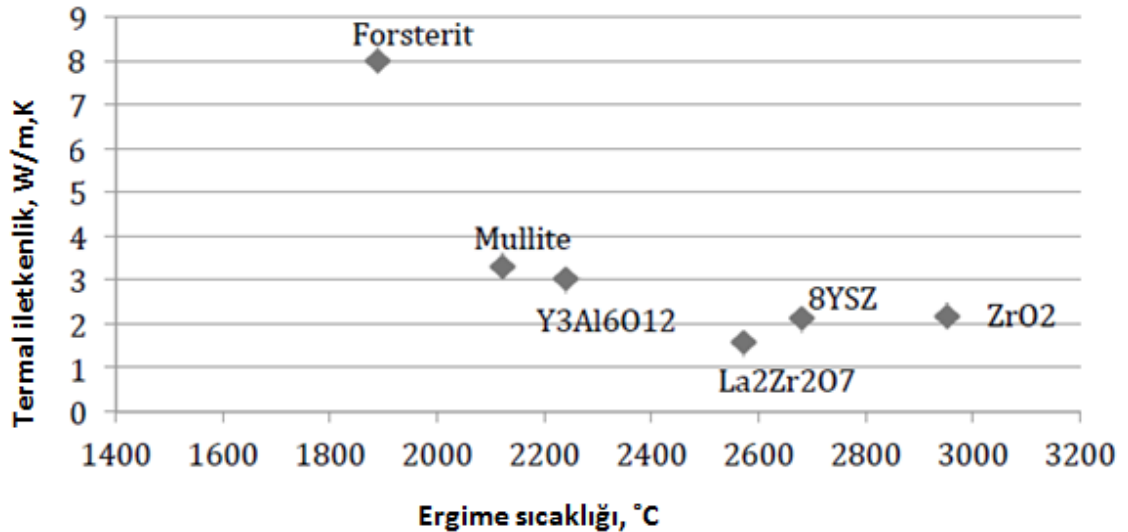
Keyvani ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmalarda nano boyutlu YSZ+Al₂O₃ kompozit kaplamanın geleneksel YSZ+Al₂O₃ kaplamaya göre

- Daha yüksek oksidasyon dayanımı,
- Daha yüksek sıcaklık korozyonu dayanımı ve
- Daha düşük faz dönüşümü gösterdiğini saptamışlardır [13].

2.3 Termal Bariyer Olarak Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

2.3.1 Termal iletkenlik

TBK sisteminde termal iletkenlik kafes titreşimler ve ışınım iki kontrol elemanının birleşimi ile gerçekleşir. Metallerde ısı iletimi büyük oranda serbest elektronlarla sağlanır. Ancak, kafes titreşimleri olarak da adlandırılan fononlar da iletme düşük de olsa katkıda bulunur. Termal bariyer kaplama olarak kullanılan malzemelerin termal iletkenlik özellikleri Şekil 2. 9’da verilmiştir.



Şekil 2. 9 Termal bariyer malzemelerinin termal iletkenlik özellikleri[4]

Termal iletkenlik iki basit formül ile bulunabilir,

$$K = 1/3 C_v * v * l \quad (1)$$

Cv birim hacimdeki ısı sığası, v fonon hızı ve l fononun ortalama yoludur.

$$K=\alpha \cdot C_p \cdot \rho \quad (2)$$

α ısıl genleşme katsayısı, C_p birim hacimdeki ısı sığası ve ρ yoğunluğu ifade eder.

Denklemden, fononun serbest yolu yerine yoğunluk, birim hacimdeki ısı sığası ve termal genleşme katsayısı α ile birlikte kullanılmıştır. Sinterlenme sonucu katılarda yoğunluk artar yoğun bir yapının da termal iletkenliği daha yüksektir.

Bir fonon başka bir fononla karşılaştığında uyumlu olmayan etkileşimler nedeniyle birbirlerine çarpıp saçılırlar. Kafes titreşimleri uyumlu olmayan karaktere sahiptir. Yani kafes içerisindeki dalgalar birbirleriyle etkileşirler, termal genleşme ve atomik yer değiştirme söz konusudur ve elastik katsayılar sıcaklık ve basınca bağlı olarak değişirler. Bu durumda fonon- fonon çarpışmaları atomik yer değiştirmelerin ve kafes dalgalarının genliğinin maksimum seviyeye çıktığı yüksek sıcaklıklarda çok önemli olmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda ortalama serbest yol ve sıcaklık birbirine ters orantılı olarak değişir. Bunun sebebi çarpışmalara daha çok fononun katılması ve çarpışma olasılığının artmış olmasıdır.

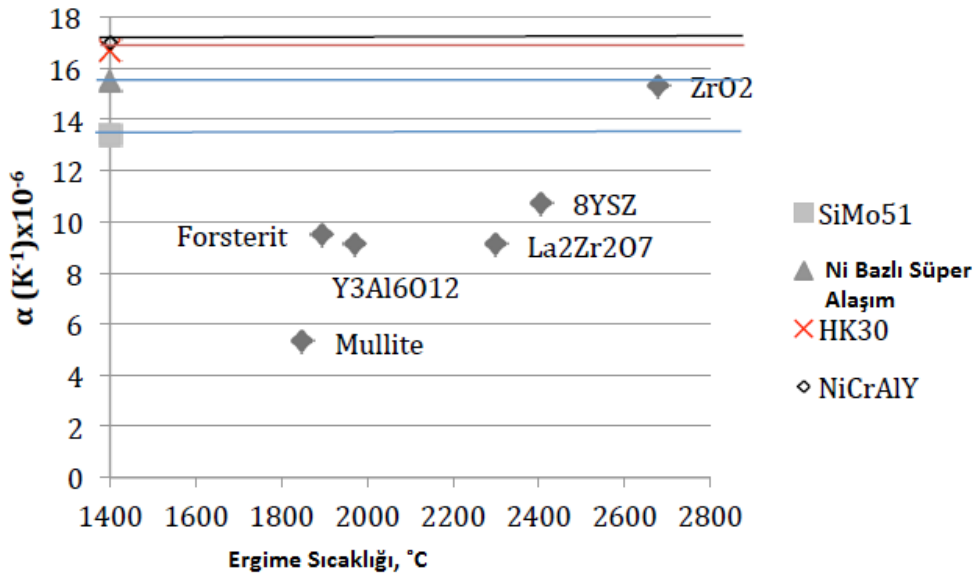
Dislokasyonlar, gözenekler ve katkıları gibi kristal kusurları da fononların periyodik dalga hareketlerini bozduğundan dolayı saçılmaya yol açar. Kristale yapılan katkı yoğunluğu ne kadar fazlaysa ve katkı kütlesi ne kadar büyükse saçılma da o kadar sıklaşır ve ortalama serbest yol düşer. $10K'$ nin altı gibi çok düşük sıcaklıklarda fonon- fonon saçılmaları ya da fonon-hata saçılmaları birincil değildir. Çok düşük sıcaklıkta ortamda oldukça az fonon mevcuttur ve mevcut fononların dalga boyları yapı içerisindeki katkıların büyüklüğünden oldukça fazladır. Çok düşük sıcaklıklardaki birincil saçılma mekanizması fononların numunenin sınırlarından saçılmasıdır ki dalga boyları oldukça büyüdüğünden numune boyutları ile yakın bir değere ulaşırlar. Bu durumda ortalama serbest yol numune çapı D ile orantılıdır ve sıcaklıktan bağımsız bir davranış sergiler. Yüksek sıcaklıklarda ise $1/T$ ile orantılı olarak değişim gösterir.

Zirkon kafesi içerisine yapılan itriya katkıları yapı içerisinde kusurlar oluşturur ve kafes titreşimleri engellenir, fonon- fonon saçılmaları artar ve ortalama serbest yol düşer. Katkı arttıkça kafes içerisinde oksijen boşluğu oranı artar. YSZ'de oksijen gözenek oranı

% 1,9 iken 7-8 YSZ' de bu oran % 3,8 olarak verilir. Zirkonun itriya ile stabilize edilmesi sonucu termal iletkenlik azalmış olur [4,11,30].

2.3.2 Termal Genleşme Katsayısı

TBK malzemesi seçerken dikkat edilmesi gerekli olan en önemli notalardan birisi bağ katman ile seramik üst katman arasındaki termal genleşme katsayılarıdır. Eğer dayanıklı, uzun ömürlü ve termal çevrimler boyunca daha az gerilmeler oluşan bir TBK elde etmek istenmiyorsa seçilecek malzemelerin termal genleşme katsayıları birbirine yakın olmalıdır. Seramik üst katman ile altlık malzeme arasındaki termal genleşme farkı çok büyük olursa gerilmelerin oluşması ve buna bağlı olarak hataların ortaya çıkması kaçınılmazdır. Şekil 2. 10'da TBK sisteminde sıkça kullanılan altlık malzemeleri, bağ katman NiCrAlY ve seramik katman ZrO₂ malzemelerine ait ısıl genleşme katsayıları verilmektedir. İdeal bir TBK sisteminde, sıklıkla kullanılan malzemelerin genleşme katsayıları birbirine yakın ve artan ortam sıcaklıklarında doğrusal eğri oluşturdukları şekil 2. 10'da görülmektedir.



Şekil 2. 10 Kaplama malzemelerine ait termal iletkenlik değerleri[4]

2.3.3 Yoğunluk ve Gözenek

Termal iletkenlikte ikinci denklemden anlaşılacağı üzere istenilen düşük termal iletkenlik elde etmek için yoğunluğun düşürülmesi ve gözeneklerin artması ile

mümkündür. Gözenekli yapı plazma sprej yönteminin kaçınılmaz bir sonucudur. Yüksek gözenekli yapıya sahip malzemeler daha az yoğunurlar ve termal iletkenliği çok düşük olan oksijenin buralarda var olması daha kolaydır. Katmanlar arası çatlaklar termal iletkenliği önemli ölçüde düşürürken katmanların ayrılmasına sebep olabilirler. Gözenekli yapı, termal genleşme uyumsuzluklarını gidermeye yardımcı olduklarından yapışma dayanımını arttırlar. Gözenekli yapıyı etkileyen bir diğer faktör elastiklik modülüdür. Daha dayanıklı, uzun ömürlü ve termal genleşme uyumsuzluklarından kaynaklı gerilmelerin az olduğu bir kaplama elde etmek için düşük elastiklik modülü olan altlık malzemeleri tercih edilmelidir. Çünkü seramik üst kaplama malzemelerinin termal genleşme katsayıları metalik altlık malzemelere göre çok daha fazladır. Operasyon sıcaklığına bağlı olarak sinterlenmeden kaynaklı kaplamaların gözenekli yapısı ve yoğunluğu değişebilir. Başlangıçta yüksek boşluğa sahip yapılar büyük oranda sinterlenerek uzun süreli çalışmalarda daha yoğun hal alabilirler.

2.4 Termal Sprej Kaplama Yöntemleri

Termal sprej kaplama ile ilgili ilk çalışmalar, malzemeleri korozyondan çinko ile korumak için 20. Yüzyılın başlarında kullanılmaya başlanmıştır. 1960'larda plazma tozların reflektör malzemelerin püskürtülmesi için kullanılmıştır. Günümüzde kullanılan termal sprej yöntemi kendi içinde alevle toz ve tel püskürtme, elektrik ark sprej, yüksek hızlı oksijen yakıt sprej yöntemleri olarak sınıflandırılabilir.

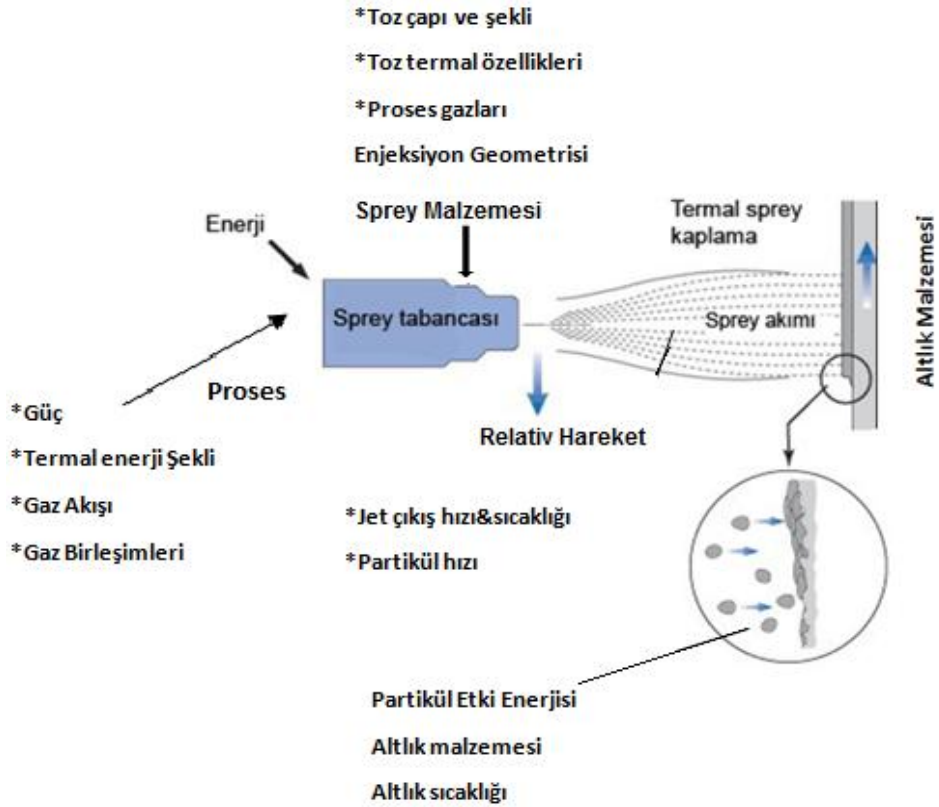
Termal sprej kaplama, ana malzeme kendinde olmayan korozyon, aşınma direnci, ısı direnci gibi özellikleri seramik kaplamadan kazanırken parçanın dayanımını, tokluğunu metal malzeme sağlar. Termal sprej kaplama ailesinin bir üyesi olan plazma sprej kaplama yöntemi, uçak ve uzay araçlarında kullanılan parçaları yüksek sıcaklık oksidasyonundan korumak için kullanılan bir yöntemdir.

Termal sprej yöntemi, tel veya toz halindeki kaplama malzemesi sprej tabancasında yüksek sıcaklarda eritilip alev veya plazma jet ile altlık malzeme üzerine doğru gönderilir. Ergimiş ve yarı ergimiş malzemeler altlık malzeme üzerine hızla çarparlar ve orada birikirler. Hızla gelen parçacıklar iyi bir tutuma ve bağlanma sağlar. Parçacıklar

malzeme yüzeyine mekanik, metalurjik veya difüzyon ile bağlanırlar. Şekil 2.11’de termal kaplama sisteminin genel görünümü verilmektedir.

Termal sprej kaplamalar;

- Aşınma, erozyon direnci,
- Korozyon-oksidasyon direnci,
- Isıl yalıtım katmanı,
- Elektrik yalıtımı ve
- Biyo uyumluluk aranan yerlerde kullanılırlar.



Şekil 2. 11 Termal sprej kaplama görünümü

Termal sprej yöntemi ile geleneksel olmayan farklı fiziksel özelliklere sahip birçok malzeme altlık üzerine aşınma, erozyon, kavitasyon, vb yüzey hatalarına karşı yüzeyi korumak için kaplanabilir. Sermetlerin aşınma direnci ve termal iletkenlik özellikleri veya düşük sürtünme katsayısına sahip malzemeler ile sert malzemeler bir arada

kullanılabilir. Korozyon ve aşınma dayanımı için bu yöntem ile kombine yapılabilir. Kromyum oksit ve tungsten karbür (WC/Co) çok kullanılan iki malzemedir.

Aşındırılabilir kaplamalar, daha çok türbin motorlarında dönen türbin kanatlarının düzgün kontrol edebilmek için sıklıkla kullanılır. Bu kaplamalar nikel/grafit, nikel, bentonit, alüminyum, polyester ve diğer yumuşak sert malzemelerin bileşimleridir. Seramikler veya karbürler gibi aşınmaya dayanıklı malzemeler aşınma oranını düşürmek için türbin kanat uçlarına kaplanırlar.

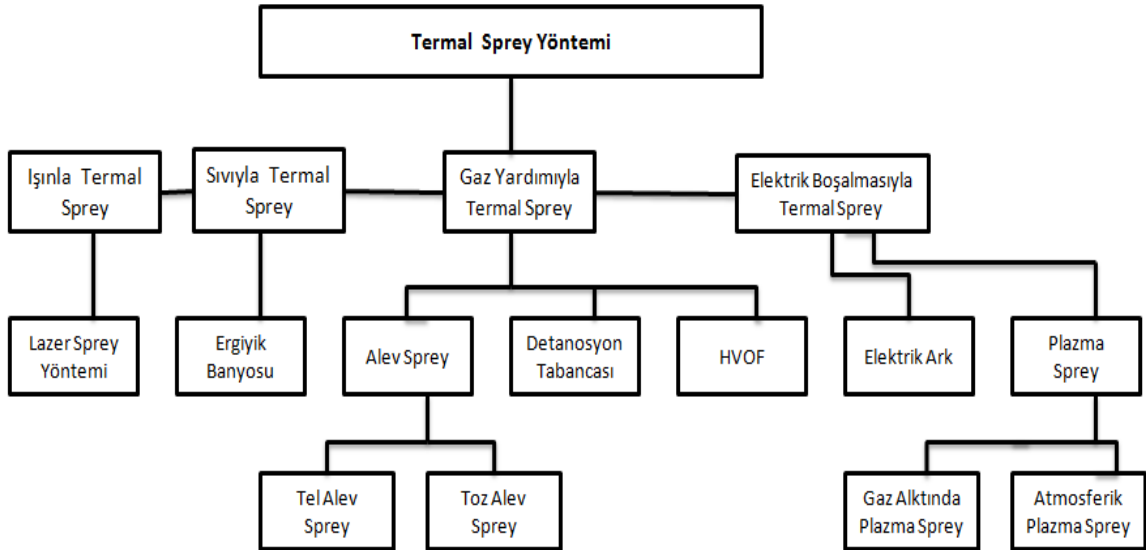
Termal yalıtım; termal bariyer kaplamalar düşük termal iletkenlik ve altlık malzemenin yüzey sıcaklığını azaltmak amaçlı kullanılırlar. Yüksek sıcaklık oksidasyonu ve korozyonuna karşı altlık malzemeyi korumak için en çok zirkonyum ve alüminyum oksit malzemeler kullanılırlar.

Birçok polimer kimyasal çözeltiler, korozyon veya aşınmaya karşı olarak termal sprej kullanılarak korunurlar. Toz alev sprej kaplama; polimer kaplama üretiminde kullanılan yöntemdir. Düşük ergime sıcaklığına sahip polivinil klorür (PVC), etilen vinil aksetat ve poliamid (PA) gibi malzemeler kolaylıkla spreylenebilir.

Korozyon dayanımı; daha çok soy metaller, kimyasal inert seramikler ya da plastikler gibi altlık malzemeler termal sprej kaplama ile çevresel, atmosferik, asidik veya yüksek sıcaklık korozyonundan korunabilir. Termal sprej uygulamalar da, gözenek varlığı korozyon dayanımı olumsuzluk etkilemektedir. Yüksek enerjili termal sprej kaplamalar yaklaşık %1'den daha az bir gözenekli yapıya sahip olduklarından dolayı korozyona maruz kalacak uygulamalar için uygundur. Çinko, saf alüminyum, nikel bazlı alaşımlar ile bakır-nikel alaşımları korozyon kontrolü için yaygın kullanılan malzemelerdir.

Elektrik iletimi; termal sprej kaplamalar elektrik iletimi, ısıtma elemanları, elektro manyetik, radyo dalgaları gibi yerlerde sıklıkla kullanılırlar. Kullanılan termal sprej yöntemine göre elektrik iletkenliği %40-90 arası artabilmektedir. Saf alümina, alümina titanya, müllit, alüminyum silikat gibi termal sprej yöntemi ile kaplanan malzemeler iletişim araçları ve cerrahi ekipmanlarda ve birçok farklı uygulamada elektriksel yalıtım amaçlı kullanılmaktadır.

Biyo uyumlu kaplamalar poroz titanyum malzemeler protez ve implant üretiminde kullanılırlar. Biyo aktif kalsiyum fosfat, hidra oksit apatit gibi kaplamalar doğal kemiklerle benzerlik gösterdiği için implant uygulamalarında kullanılırlar. Dental implantlar ve diğer ortopedik parçalar bu yöntem ile kaplanırlar. Şekil 2. 12’te termal sprey yöntemlerinin şekilsel olarak görünümü verilmektedir[3,6,7,13].



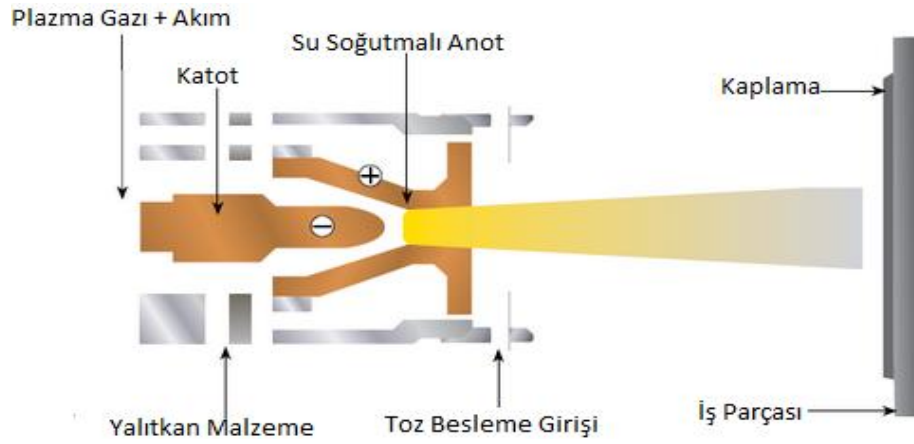
Şekil. 2. 12 Termal Sprey kaplamaların sınıflandırılması[38]

2.4.1 Atmosferik Plazma Sprey Yöntemi

Plazma sprey termal bariyer kaplamalar 1960’larda sıcakta çalışan malzemelerin yüzey sıcaklığını 100-200 °C düşürmek için geliştirilmiştir. Tipik termal bariyer kaplamalar üç katmandan oluşur. Çökelen kaplama kalınlıkları birkaç mikrondan iki üç milimetreye kadar aralıkta değişebilir. Bu yöntemle yüksek enerji üretildiği için her malzemenin çökeltmesi mümkündür. Bundan dolayı tüm termal sprey yöntemleri arasında en çok kullanılan yöntemdir[11,12,13].

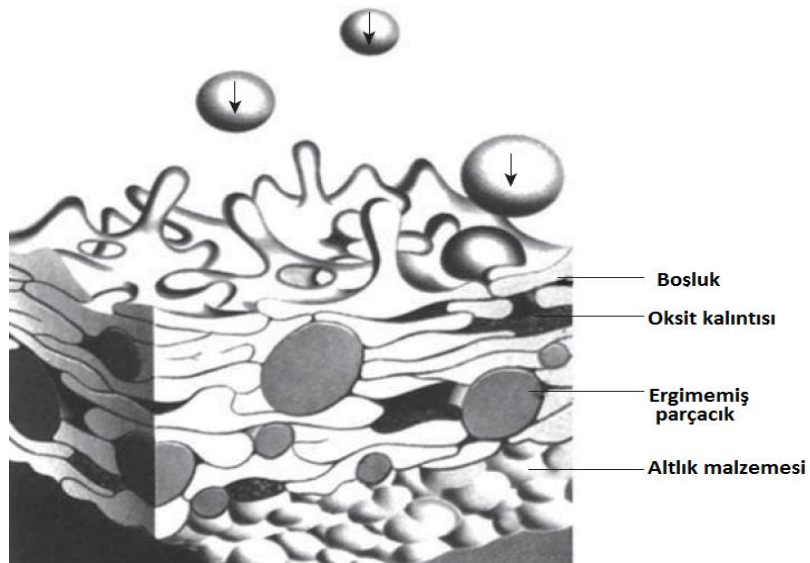
Plazma sprey yönteminde, kaplanma malzemeleri toz veya sıvı şekilde olabilir ama ekseriyetle toz malzemeler kullanılır. Plazma sprey yönteminde; kaplama malzemeleri yüksek sıcaklıklara (10000 K) ısıtılmış bir plazma alevinde ergitilerek altlık malzeme üzerine püskürtülür. Ergimiş parçacıklar altlık malzeme üzerinde hızlıca soğuyarak birikirler. Plazma oluşturmada bir kaç farklı yöntem vardır. Bunlar doğru akım (DC) plazma tabancası, radyo dalgası endüktif eşleşmiş plazma tabancalar ve bunların

birleşimi olan hibrit tabancalar. DC plazma tabancalar, plazma oluştururken yaygın kullanılan aletlerdir. Argon, Helyum Azot ve bunların karışımları çok fazla kullanılan proses gazlarıdır. Nozül ve elektrot arasında yüksek frekanslı bir ark ateşlenir proses gazları nozül ve elektrot arasından geçer iyonize olur. Birkaç mikrometreden 100µm ye varan boyutlar arasında değişen kaplama tozları gaz bulutu içerisine enjekte edildiğinde ergir ve altlık malzemeye doğru hızla püskürtülür. Plazma sprej aşamaları Şekil 2. 13’de şematik olarak verilmiştir[26,19,35].



Şekil 2. 13 Plazma sprej yöntemi şematik görünümü

Şekil 2. 14’de görüldüğü üzere plazma alevindeki hareket esnasında yüzey gerilimi nedeniyle küresel şekle sahip erimiş parçacıklar, ana malzeme yüzeyine çarptıklarında ısıl ve kinetik enerjilerini kaybederek deforme olurlar ve lameller şeklinde katılışrlar.

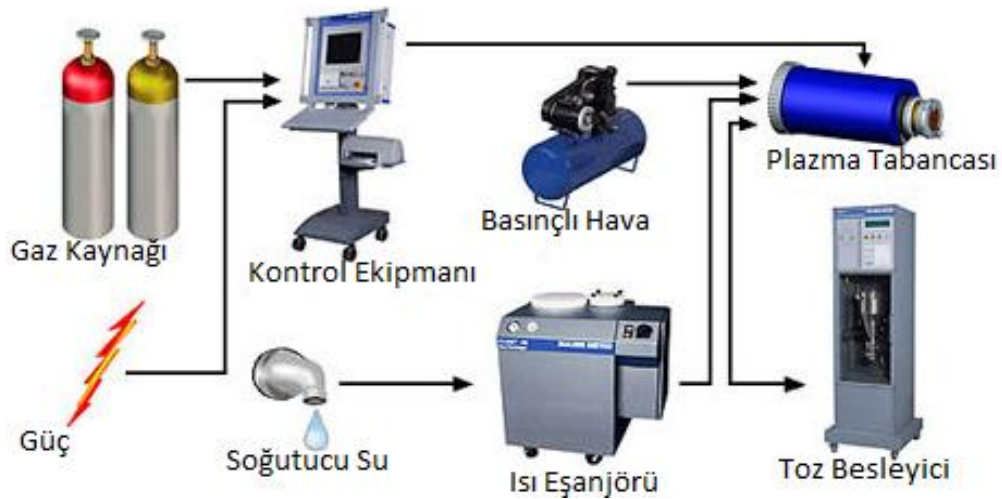


Şekil 2. 14 Termal sprej kaplamanın oluşumu[11]

Deformasyon miktarı ve dolayısıyla lamellerin şekli; ergimiş parçacıkların akışkanlığı ve ıslatılabilirliği, toz yapısı ve ana malzeme yüzeyinin karakteri gibi birçok faktöre bağlıdır.

Plazma sprej yönteminde argon helyum gibi soy gazlar kullanılarak plazma sprej sırasında kaplamanın oksidasyonu en aza indirilmiş olur. Plazma yönteminde kaplama kalınlığı, sertlik ve gözenek gibi yüzey karakteristikliğini;

- Yüksek çökelme oranı,
- Otomatik süreç,
- Kaplama yüksek bağlanma kabiliyeti,
- Karmaşık şekilli kaplamaların kaplanabilirliği ve
- Parça iç kısımlarının kaplanabilirliği gibi parametrelerle kontrol edilebilir.



Şekil 2. 15 Plazma sprej ekipmanları[36]

Plazma sprej sistemi

- Sprej torcu veya sprej tabancası: malzemeyi ergitir ve çökecek parçacıkların hızlandırılması
- Besleyici: kaplanacak malzemenin toz veya sıvı olarak tabancaya sağlar,
- Media sağlayıcı: alev oluşması için gazları veya plazma jet ve tozları taşır
- Robot: altlık malzemesini ve tabancanın hareket ettirilmesini sağlar,

- Kontrol konsülü ekipmanlarından oluşur.

2.4.1.1 Plazma Oluşumu

Fizik ve kimyada plazma iyonize olmuş gaz ve maddenin dördüncü hali olarak adlandırılan plazma, yüksek kinetik enerji ve sıcaklığa sahip kısmen iyonize olmuş gaz parçacıklardır. Maddenin plazma hali katı, sıvı ve gaz halinden çok daha farklı olarak ele alınır çünkü katı malzemenin molekülerin hareketi çok azdır. Moleküllerin ortalama kinetik enerjisi herhangi bir yöntemle örneğin ısıtılarak artırıldığında malzeme önce sıvıya sonra gaz haline dönüşür. Gaz halinde iken ısı verilmeye devam edilirse iyonlaşma başlar ve elektronlar çekirdekten kurtularak serbest bir elektron uzayı meydana getirirler. Yeterince ısıtılmış gaz içerisinde iyonlaşma defalarca tekrarlanır ve serbest elektron ve iyon bulutları oluşmaya başlar. Ancak, bazı atomlar nötr kalmaya devam etmeleri sonucu oluşan iyon, elektron ve nötr atom karışımı veya kısaca plazma olarak adlandırılır[40,72].

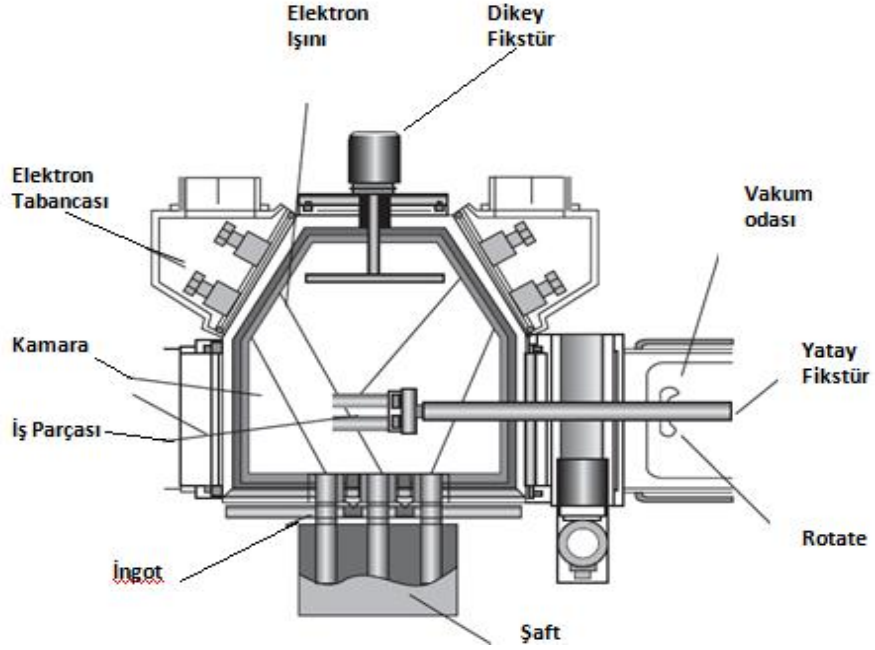
Mikroskobik açıdan plazma, sürekli hareket eden ve etkileşen yüklü parçacıklar topluluğu olarak ifade edilir. Plazma içinde nötr atom ya da moleküllerin olması plazma halini değiştirmez. Kimyasal reaksiyonları oldukça hızlıdır. Çünkü plazma maddenin en sıcak halidir ve elektronların çekirdek ile olan bağları zayıftır [73,74].

2.4.2 Elektron Işın Demeti Fiziksel Buhar Çökeltme Yöntemi (EB-PVD)

EB-PVD yöntemi ilk olarak Pratt ve Whitney tarafından 1970'lerde $ZrO_2-Y_2O_3$ tozların kaplamasıyla uygulanmış olup, çalışmalar devam etmektedir.

Elektron ışın demeti fiziksel çökeltme(EB-PVD) yöntemi, TBK üretimi için sıklıkla kullanılan yöntemlerden birisi olup birçok malzemenin çökeltmesi mümkündür. EB-PVD ile PS yöntemine göre daha iyi kaplama yüzeyi elde edildiği için bu yöntemle üretilen kaplamalar türbin kanatçıkları etrafındaki aerodinamik akımın bozulmasını engeller. Elde edilen kaplamaların mikro yapısı sütunsal olduğundan dolayı termal çevrim esnasında PS kaplamalara göre daha iyi termal şok dayanımı ve mekanik dayanım gösterirler. EB-PVD çökeltme yöntemi; Sıcaklıkta vakum altında

buharlaştırılması ve altlık malzeme üzerine çökeltilmesi ile oluşan bir kaplama yöntemidir (Şekil 2. 16).



Şekil 2. 16 EB-PVD kaplama sistemi ve bileşenleri[11]

Yöntemde, 2000°C'de elektron tabancası içerisinde oluşan elektron demetleri ve müteakibinde ısı elektronlar yüksek voltaj altında hızlandırılır. İngot içerisindeki malzemeye yüksek hızlı elektronlar çarparak malzemeyi ergitip buharlaşmasına yetecek kadar enerji üretilir ve altlık malzeme üzerine çökeltilir[11,12,13,28,29).

Yöntemin başlıca avantajları;

- Yüksek çökeltme oranı,
- Parametreler kolaylıkla kontrol edilebilmesi,
- Yüzey pürüzlülük değeri 1-1µm gibi düşük aralıkta olması,
- Altlık malzeme ve kaplama arasında güçlü yapışma oluşması,
- Proses parametreleri kolaylıkla değiştirilebilmesi ve
- Çökeltme miktarının kontrol edilebilir olmasıdır.

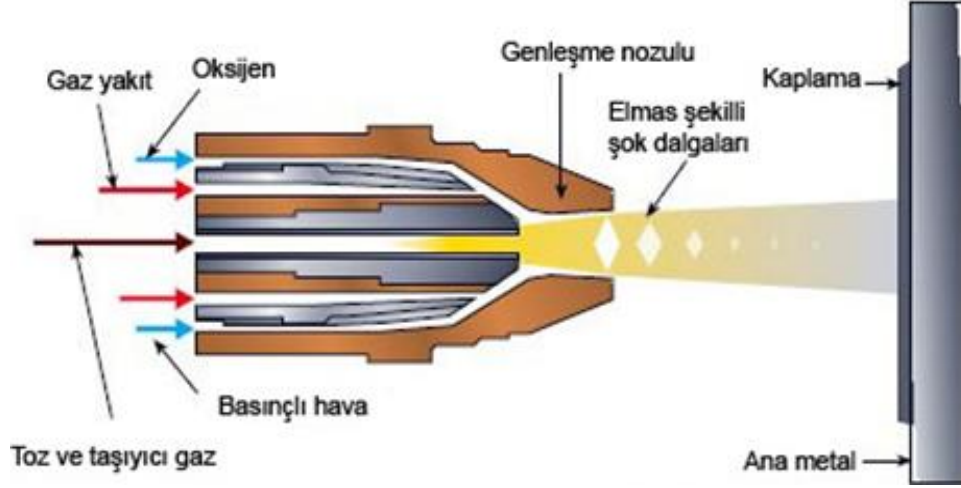
2.4.3 Yüksek Hızlı Oksijen Yakıt HVOF (High Velocity Oxy-Fuel Combustion Spraying)

Termal sprey yöntemleri arasında en yeni olan HVOF 1980'lerde James Browning tarafından geliştirilmiş daha sonra geliştirilen yöntem kendi başına kaplama yöntemi olarak kabul edilmiştir[13,21].

HVOF yönteminde yanıcı gaz olarak hidrojen, propan, propilen, asetilen ve gaz yağı genel olarak kullanılmaktadır. Yanıcı gaz basıncı 60-90 psi ve kaplama kalınlığı 0,2-2 mm arasında değişmektedir. HVOF yönteminde; yanıcı gazlar ve oksijen bir hazneye iletilir ve yanma sonucunda oluşan süpersonik alev hızının daha da arttırıldığı bir nozüle yönlendirilir. Kaplama malzemeleri nozüle toz halinde eklenir. Çok büyük miktarda gaz akışı, yüksek yanma sıcaklıkları nozül çıkış hızının 1525 ile 1825 m/s ulaşmasını sağlar. Püskürtülen parçacık hızı, tane boyut dağılımı ve yoğunluğa bağlı olarak 500-700 m/sn arasında değişebilir. Toz tanelerinin kazandığı bu aşırı yüksek hız, parçacıklar yüzeye çarptığında sahip olduğu yüksek kinetik enerji tanecikler tam ergimese dahi kuvvetli bir mekanik bağ oluşmasını sağlar. Toz besleme, yanma odasına yüksek basınç altında ve paralel basıncın düşük olduğu nozül uç kısmına yakın bir bölgeye olmak üzere iki şekilde yapılabilir. HVOF yönteminde; optimum püskürtme mesafesi, püskürtme tabancasına ve diğer püskürtme ekipmanlarına bağlı olmakla birlikte 220-380 mm arasında değişmektedir. Bu da kaplamadaki bileşenlerin yeterli olmayan sıcaklıktaki püskürtülme riskini artırır[9,10,11,14,20,21,26,29].

Genelde HVOF yöntemi, WC/Co ya da $Cr_2C_3/NiCr$ gibi yoğun, sert Sermet kaplamaların üretilmesinde kullanılır örneğin; hava araçlarının, türbin kanatlarının bağlama katmanının üretilmesinde kullanılmaktadır.

HVOF ile üretilen kaplamalar yüksek yoğunlukta, düşük oksit miktarı, güçlü ve işlem sonrası düşük gözenek ve gerilime sahiptirler. HVOF kaplamalar, yüksek yoğunluk ve dayanımın istendiği durumlarda ve diğer termal sprey yöntemleriyle elde edilemeyecek özelliklerin sağlanması amacıyla kullanılırlar. Aşınma, erozyon dayanımları ve tutunma kuvvetleri yüksektir. HVOF yönteminin şematik görünümü Şekil 2. 17'de verilmiştir.



Şekil 2. 17 HVOF sistemi şematik görünümü

HVOF yönteminin başlıca avantajları

- Yanma odasında gerçekleşen türbülansın dolayısı ile daha düzgün ve verimli bir ısıtma sağlanır,
- Yüksek hızlarından dolayı parçacıklar püskürtme esnasında havaya daha kısa süreyle maruz kalır ve böylece daha az oksit oluşur,
- Diğer yöntemlere göre daha düşük sıcaklıkta kaplama gerçekleşir.

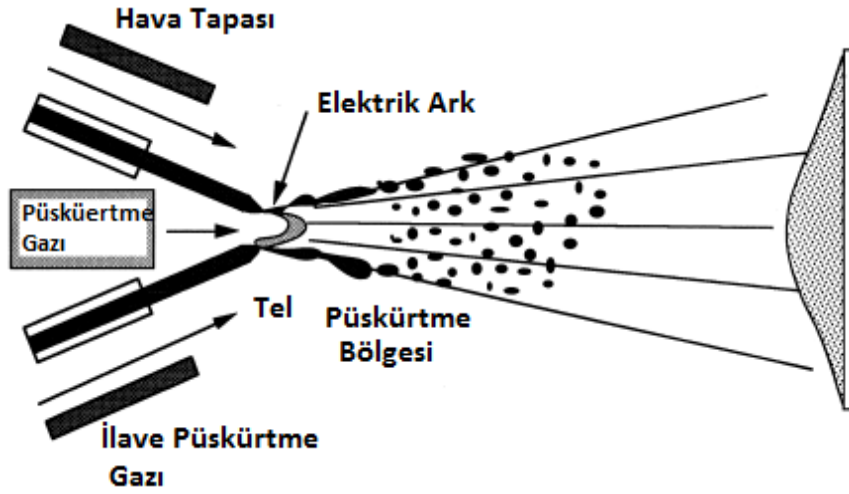
Yöntemin en önemli dezavantajları; yüksek miktarda gaz tüketimi, altlık malzemenin diğer yöntemlere göre daha fazla ısınması, ergime noktası yüksek kaplama malzemelerin yöntemde kullanılmaması olarak belirtilebilir. Ayrıca yöntem, bir jet motoru kadar gürültülidir yaklaşık 120 desibel seviyesinde çalışmaktadır[42].

2.4.4 Alev Püskürtme Yöntemi

Yöntem geleneksel olarak kullanılan ilk termal sprey yöntemidir, 1911 yılında İsviçre bulunmuştur. Oksi asetilen torçlar çok fazla kullanılır asetilen ve oksijen karışımı ile yüksek yanma sıcaklıkları elde edilir. Yüze kaplanacak tel veya tozlar püskürtme memesi içerisinde eritilerek altlık malzeme üzerine püskürtülerek kaplamalar üretilir. Ergimiş ve atomize olmuş parçacıklar sprey tabancası nozulünden yönlendirilmiş akıma katılırlar. Düşük parçacık hızından dolayı oksijene maruz kalma süreleri fazladır ve kaplamaların oksit oranı yüksektir[9,10,23].

2.4.5 Elektrik Ark Sprey Yöntemi

Isı kaynağı olarak kaplama malzeme sinden üretilmiş iki tel arasındaki ark kullanılır. Pozitif ve negatif kutuplarla yüklenmiş nozüllerden geçen teller birbirine dokununca ark meydana gelir (Şekil 2. 18). Teller basınçlı hava akımının önünde kesişir, arkta doğan ısı telleri ergitir ve basınçlı hava parçacıkları altlık malzemeye doğru hareket ettirilerek kaplama üretilmiş olur. Kullanılan basınçlı havadan dolayı bu yöntem ile elde edilen kaplamalar yüksek oksit içeriğine sahiptirler [13].



Şekil 2. 18 Elektrik ark spre yöntemi şematik görünümü[25]

2.4.6 Detonasyon Tabancası

Detonasyon tabancası (D-Gun) yöntemde, kaplanacak toz tanecikleri yanma odasında oksijen-asetilen karışımının patlaması ile erime sıcaklığına kadar ısınır ve tabanca içersine beslenen toz parçacıkları tam veya kısmen eriyerek ve nozülün ucundan altlık malzeme üzerine çok yüksek tanecik hızlarında püskürtülür.

Detonasyon tabancası, yaklaşık 1-2 metre uzunluğunda ucunda yanma hücresi bulunan bir çıkış borusundan meydana gelir. Yanma gaz karışımı; oksijen, asetilen, propan veya propilenden oluşabilir ve ateşleyici buji vasıtasıyla patlamaya gerçekleştirilir. Yöntemde, spre hızı 900-1200 m/s, sıcaklık 4000°C'ye kadar çıkabilir, yapışma mukavemeti 75 MPa ve oksijen-asetilen karışımıyla oluşan patlama saniyede 4-8 defa tekrarlanır. Türbin parçaları, buhar üreten borular, ısıl bariyer elemanları ve reaktör yapımında kullanılan nükleer parçalar, su pompaları parçaları, sızdırmazlık elemanları

(madencilik), ve uçak uzay endüstrisinde yanma nozülleri elektronik endüstrisi, yağ iletim tesisleri ve özellikle kâğıt ve matbaa silindirleri gibi birçok alanda parçaların kaplanması için kullanılmaktadır.

Yöntemin avantajları ve dezavantajları aşağıda verilmiştir.

Avantajlar

- Tasarımı basit ve servis ömrü uzundur,
- Elde edilen kaplamalar düşük gözenekli ve yüksek bağ mukavemetin sahiptirler,
- Kaplama kalınlığı ayarlanabilir,
- WC-Co gibi aşırı sert kaplamaların kaplanmasına olanak sağlar,
- Sistemde sıcaklık ve toz hızı değiştirilebilir.

Dezavantajları

- D-gun hantal bir yöntem olmasından dolayı diğer yöntemler kadar gelişmemiştir,
- Sistem çok sesli çalıştığından yalıtım gerekir,
- Kaplanacak malzemelerin büzülmesi muhtemeldir, kaplanacak malzemenin tozların çarpmasına dayanabilmesi gerekir,
- Çevrimli bir sistem olduğu için stabilizasyonu ve kaplama ürünlerinin izlenmesini güçtür ve
- Pahalı bir sistemdir

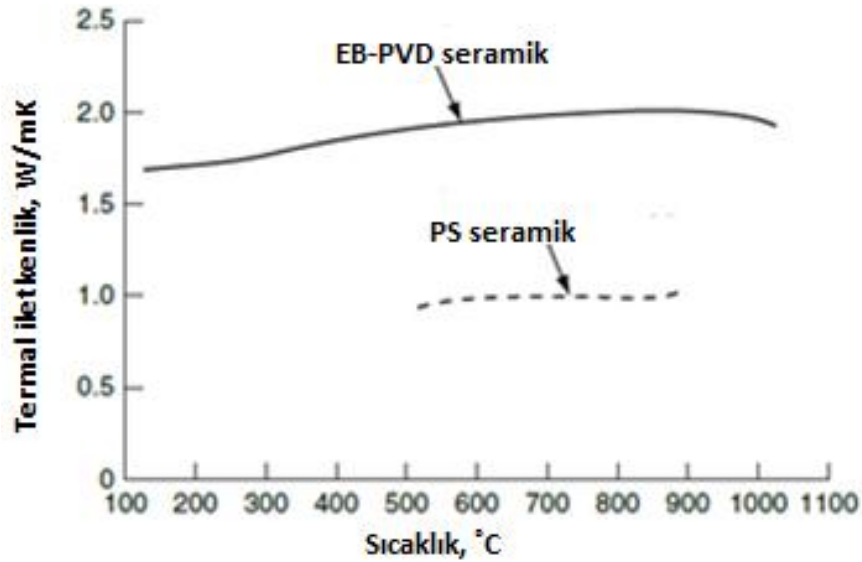
2.5 Kaplama Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Yaygın olarak kullanılan Plazma Sprey(PS) ve EB-PVD yöntemleri karşılaştırıldığında:

Plazma sprej yönteminde; ergimiş parçacıklar altlık malzeme yüzeyine hızla çarpıp ani katılaştıklarından dolayı üretilen kaplamalarda gözenekler, bölgesel ayrılmalar ve boşluklar oluşmaktadır. Altlık malzemesine yatay ve gözenekli mikro yapı kaplamaya, EB-PVD'ye göre daha düşük termal iletkenlik ve gerilme toleransı sunmaktadır. Elde edilen kaplamaların yüzeyi pürüzlüdür dolayısıyla seramik katmandan O₂'nin alt kısımlara doğru transfer olmasına ve oksidasyona neden olmaktadır. Seramik

kaplamalar için gözenekli yapı yoğun yapıya göre daha fazla gerilme toleransı sağlar ve bu sayede termal çevrim-şok dayanımı daha iyidir. Ancak, gözenekli ve katmanlı mikro yapı termal iletkenlik değerini %60'a kadar azaltmaktadır. Yatayda oluşan katmanlar ısıl genleşmeler esnasında altlık malzemeyi genleşmemeye zorlamakta ve bunun sonucunda kaplamada çatlamlar, ayrılmalar görülebilmektedir.

Şekil 2. 19'da PS ve EB-PVD yöntemleri ile üretilmiş termal %7 YSZ seramik katmanın termal iletkenlik değerlerinde görüldüğü gibi PS seramik kaplama artan çalışma sıcaklıklarında daha düşük ve kararlı termal iletkenlik eğrisine sahiptir[84].



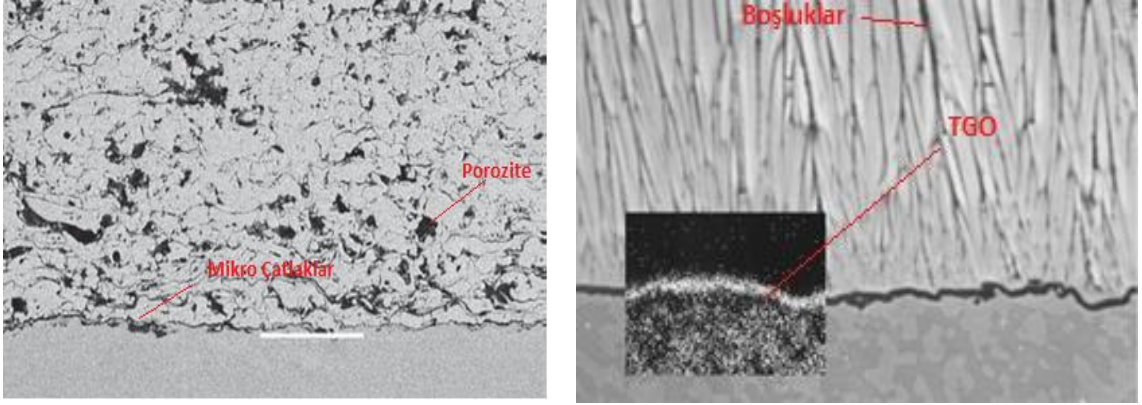
Şekil 2. 19 EB-PVD ve PS yöntemleri ile üretilmiş YSZ' ye ait termal iletkenlik değeri

EB-PVD yöntemi ile elde edilen kaplamalar PS kaplamalara nazaran daha yüksek gerilme toleransı, pürüzsüz yüzey ve oluşan seramik kaplama mikro yapısının kolay kontrolü gibi üstünlükleri vardır.

Ancak, PS-TBK' lar düşük maliyet, ayarlanabilir ve geniş aralıklı kaplama kalınlığı, yüksek ürün verimi, kaplama tozlarının kolay kontrol edilmesi ve düşük termal iletkenliğinden dolayı gaz türbinlerinde ve uzay araçlarında kullanılan başlıca yöntemdir.

EB-PVD ile PS yöntemine göre daha iyi kaplama yüzeyi elde edildiği için bu yöntemle üretilen kaplamalar türbin kanatçıkları etrafındaki aerodinamik akımın bozulmasını engeller. EB-PVD kaplamalar göstermiş oldukları aerodinamik, yüksek gerilme

mukavemeti, yüksek sıcaklık oksidasyonu özelliklerinden dolayı havacılık sektöründe, türbin parçalarında kullanılmaktadır. Elde edilen kaplamaların kolonsal mikro yapıları arasında var olan gözeneklerden dolayı kaplamalar altlık malzeme ile uyumlu ısıl genleşme gösterirler bunun sonucunda termal çevrim esnasında PS kaplamalara göre daha iyi termal şok dayanımı ve mekanik dayanım gösterirler (Şekil 2. 20).



(a) Gözenekli mikro yapıya sahip PS kaplamanın görüntüsü

(b) Düzgün ve kolonsal yapıya sahip EB-PVD kaplama kesit görüntüsü

Şekil 2. 20 PS ve EB-PVD kaplamalara ait mikro yapı görünümü[29]

EB-PVD yöntemi, tüm avantajları yanında ısıl iletkenliğinin yüksek olmasından dolayı gaz türbinlerinde verim düşüşüne neden olmaktadır. Seramik kaplamalar için gözenekli yapı yoğun yapıya göre daha fazla gerilme toleransı sağlar ve bu sayede termal çevrim-şok dayanımı daha iyi, termal iletkenlik değeri daha düşük olur. YSZ termal bariyer kaplamaların yüksek termal çevrim ömrü ve düşük termal iletkenlik için hacimce %15 ve üzeri oranda gözenek ile üretilmeleri uygundur. Her iki yöntemin özellikleri karşılaştırılmış olup Çizelge 2. 5’da kısaca gösterilmiştir.

Çizelge 2. 5 PS ve EB-PVD yöntemleri ile üretilmiş TBK' ların karşılaştırılması

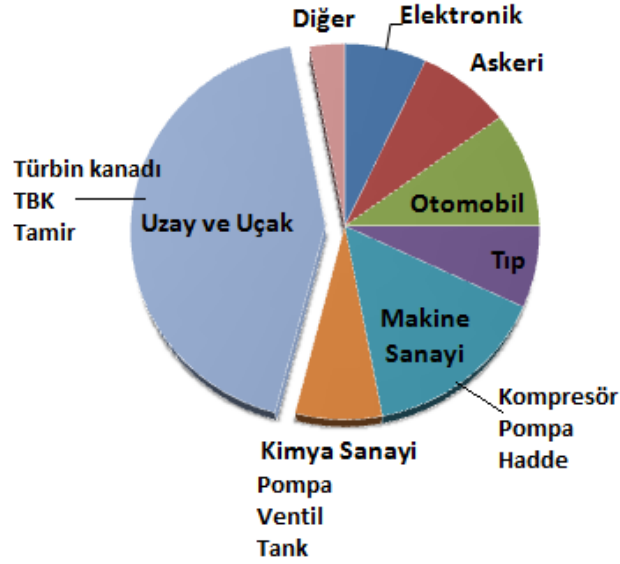
Karakteristik Özellik	PS	EB-PVD
Kaplama Malzemeleri	Tüm malzemeleri	Sınırlı
Yüzey Özelliği	Parlatma ile	Mükemmel
Bağ katman yüzey özelliği	Kumlama niteliğinde	Düzgün
Bağlanma mekanizması	Mekanik	Kimyasal
Uygulanabilir kalınlık	0.2-3 mm	0.1-0.3
Kaplama kaynağı	Hareket edebilir	Sabit
Parça geometrisine uyum	Uyumlu	Masraflı
İlk yatırım	Ekonomik	Pahalı
Çökme oranı	Yüksek	Düşük
Termal çevrim altında çalışma ömrü	Kısa süreli	Daha uzun süreli
Termal iletkenli (W/m-K)	0,8-0,9	1,5-2
Yüzey pürüzlülüğü (µm)	10,0	1,0
Yapışma (tutunma) mukavemeti	20-40	400
Elastiklik modülü (E)	200	90
Erozyon hızı (göreceli)	7	1
TBK ömrü ve Termal çevrim (göreceli)	1	5
Mikro yapı	Lamelli	Kolonsal

2.6 Termal Bariyer Kaplamaların Uygulama Alanları

Termal bariyer kaplamalar (TBK'lar) birçok alanda kullanılmaktadır (Şekil 2. 21). Aero uzay uygulamalarında türbin motorlarının sıcaklığı 1000°C operasyon sıcaklıklarının üzerine çıkabilirler. Yanmalı motorlarda, verimin artırılması, gaz yayılımını, yakıt tüketimini azaltmak ve oluşan yüksek sıcaklıklarda uzun ömürlü çalışma için termal bariyer kaplama yapılması gerekmektedir. Türbin motorlarında kullanılan TBK' lar dizel motor parçalarında da kullanılmaktadır. TBK' lar, dizel motorlarda verimlilik ve gücü artırırken gaz yayılımını azaltmaktadır. TBK' ların dizel motor uygulamalarındaki etkileri Çizelge 2. 6'da verilmektedir.

Termal sprey kaplamalar;

- Uçak Uzay sanayinde, türbin kanatlarında, yanma odasında ve pervanede TBK,
- Silindir başları, valflerin yüzeyleri piston halkaları, egzoz valfleri,
- Kesme bıçakları, kâğıt sanayi ve hadde silindirlerinde ve makine sanayinde aşınmaya ve erozyona karşı koruma,
- İçten yanmalı motorlarda; piston başı, silindir kapağı, supap ve manifoldlar da termal bariyer ve
- Tekstil makinelerinde ipliğin geçtiği bobin ve yönlendiricilerde aşınmaya karşı altlık malzemeleri korumak amaçlı kullanılmaktadır.

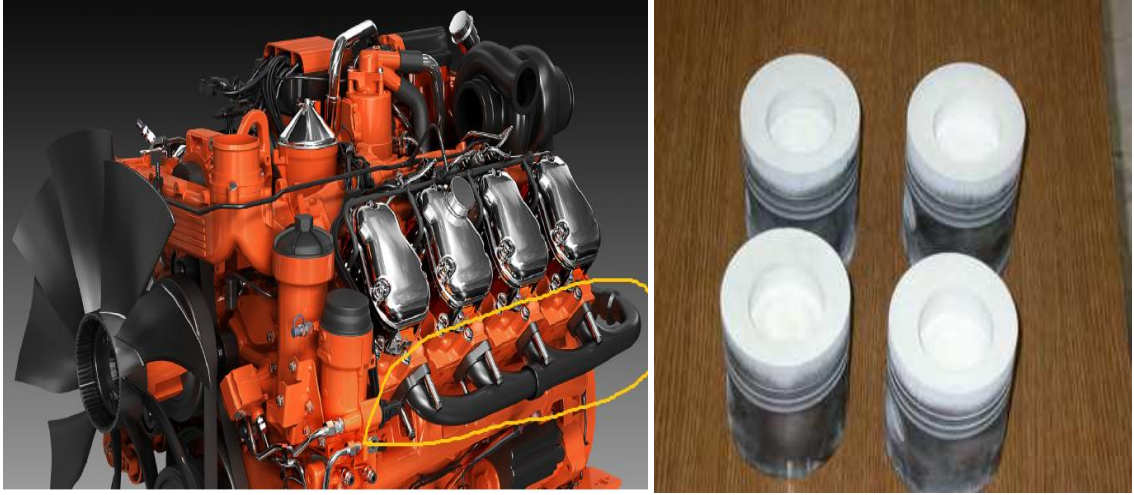


Şekil 2. 20 Termal sprey kaplamaların farklı sektörlerdeki uygulamaları

Çizelge 2. 6 Termal bariyer kaplamanın dizel motor uygulamasındaki etkileri

Avantajı	Yakıt tasarrufu	Motor kullanım ömrünün uzaması	Gaz yayılımının azalması	Parçacık azalması	Yağlayıcı tasarrufu	Güç randıman artışı	Bakım fiyatı azalması
Yüzde	11	20	20-50	52	15	10	20

Egzoz manifoldların da termal bariyer kaplama işlemine tabi tutulmaktadır. Egzoz manifoldu silindir içindeki yanmış gazın çıkışını sağlar ve turbo modellerde manifold turbo şarja direk bağlanır. Egzoz gaz basıncı turbo şarjın pompasını çalıştırır. Turbo şarj da temiz hava emerek bu havayı sıkıştırarak yanma odasına yollar. Bu nedenle, egzoz manifoldun da herhangi bir çatlak oluşmamalıdır. Sistemden çıkan gazın sıcaklığı 760°C'ye kadar çıkmaktadır. Termal çevrim, titreşim çıkan gazın basıncı ve akışı manifolddaki TBK' yı olumsuz etkiler[13,43].



Şekil 2. 212 Egzoz manifold ağzı görünümü ve piston başları

Termal bariyer kaplamaların, mukavemet ve güvenilirlik açısından çalışma ömürleri içinde hataya maruz kalıp kalmayacağını önceden tahmin edilememesi avantajlarını etkin bir biçimde kullanılmamasına neden olmaktadır.

2.7 Termal Bariyer Kaplamalarda Hata Oluşumu ve Önlemler

TBK sisteminde en çok rastlanan hatalar, bağ katmanda oluşan oksidasyon ve termal genişleme farklılıkları ve üst katmandaki ayrılmalarıdır. Bağ katman ve üst katman arasında oluşan oksit tabakası; bu iki tabaka arasında veya üst katman ile altlık malzeme arasında termal genişleme farklılıkları oluşmasına ve iç gerilmelere neden olmaktadır. TBK üst katmanın ayrılması sonucu altlık malzemeye ısı geçişi artacağı için altlık malzemesinin kısa süre de bozulmasına neden olur. TBK' larda hasar oluşmasının asıl sebebi gerilmeler, termal genişleme katsayısı farkı, TGO büyümesi, bağ katman çatlakları, bağ katmanda Al azalması ve sinterlenme, sürünme ve aşırı deformasyon

sonucu oluşan büzülmelerdir. TBK sisteminde, hasar daima seramik üst katman veya bağ tabakadaki gerilmelerden dolayı kaplamanın yüzeyden kalkması şeklinde olur (Şekil 2. 23)[14,42,43].

TBK'lerde başlıca hata oluşum nedenleri;

- Çatlak oluşumunun erken başlaması,
- Termal genişleme geriliminin uyumsuzluğu,
- Uçaklar kalkış yaparken yerden kaldırdıkları tozlar veya çöl ortamlarındaki tozlar TBK'lar üzerinde birikmesi,
- Termal olarak büyüyen oksit oluşumu,
- TGO'nun bağ katman ile seramik katman ara yüzeyinde gelişimi,
- Bağlama katmanının periyodik sürünmesi,
- Bağlı katmanda Al azalması veya bitmesi,
- Gözenekli yapıya sahip termal bariyer kaplamanın sinterlenmesi,
- Metal – seramik ara yüzey tokluğunun azalması,
- Mikro çatlakların birleşmesi,
- Çatlaklardan meydana gelen ayrışmalar ve
- 250 µm'den büyük kaplama kalınlıklarında seramik katmanın ayrılması şeklinde kısaca özetlenebilir.

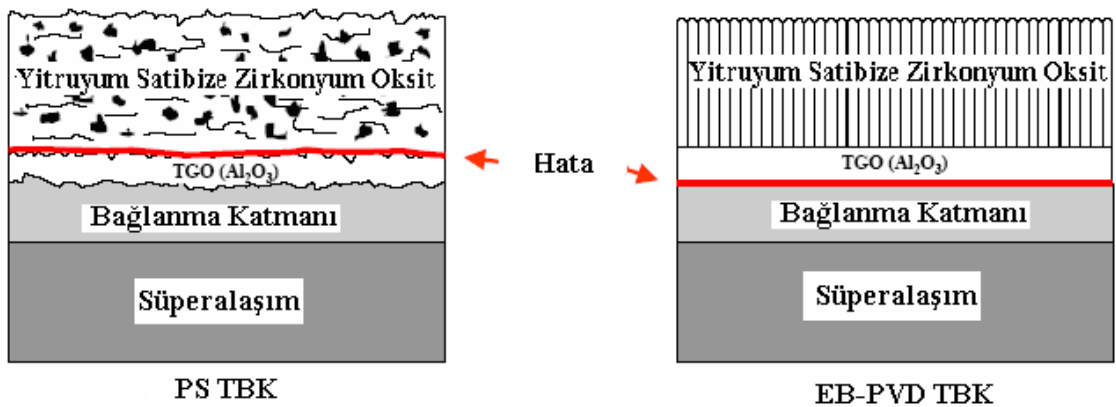
2.7.1 Ayrılma

TBK sisteminde ayrılma, seramik üst katmanın bir kısmının veya tamamının kalkması veya kopması şeklinde olabilir. Ayrılma, hem zayıf bir TBK oluşturarak altlık malzemeyi sıcaktan koruyamaz hem de sistemdeki diğer parçalar için tehlike oluşturabilecek enkazlar oluşturur.

TBK sisteminde bağ katman kullanmanın iki temel nedeninden birisi; altlık malzeme ile seramik üst katmanın daha iyi tutunmasını sağlama diğeri ise, yüksek sıcaklıklarda bağ

katman üzerin de bir Al_2O_3 tabakası oluşturmaktır. Yüksek sıcaklıklarda çok yavaş büyüyen Al_2O_3 tabakası, altlık malzemesi oksidasyondan korur. Koruyucu tabaka belirli bir süre içerisinde birçok problemi de beraberinde getirir. Yüksek sıcaklık, difüzyon ve servis süresi bağ kaplamada gelişen TGO sonuç olarak bağ katmanda bulunan alüminyumu tüketir ve Al azalmasına neden olur. TGO, ağırlıklı olarak $\alpha-Al_2O_3$ 'den meydana gelen bunun yanında Cr_2O_3 , NiO, Ni(Al, Cr) $_2O_4$ yapıları da içeren ve bağ katman ile üst katman boyunca düzensiz olarak uzanan oksit tabakasıdır[11]. Eğer, bağ katmandaki Al miktarı %8'in altına düşerse oksidasyona karşı koruma sağlayan Al_2O_3 tabakası oluşumu yetersiz kalır ve altlık malzemesinde zamanından önce hatalar meydana gelir. Bunun doğal sonucu olarak, TGO formu olarak uyumlu fiziksel özelliklerinden dolayı tercih edilen $\alpha-Al_2O_3$ yerine daha az koruyucu Ni ve Co içeren ve spinel olarak adlandırılan istenmeyen kırılğan ve sert fazların oluşumu TGO'nun $\alpha-Al_2O_3$ 'den oluşan oksit yapısını yıpratır, var olan çatlakların ilerlemesi veya yeni çatlak oluşumu artık daha kolay gelişebilir bir nitelik kazanır[43,44,45,46,47].

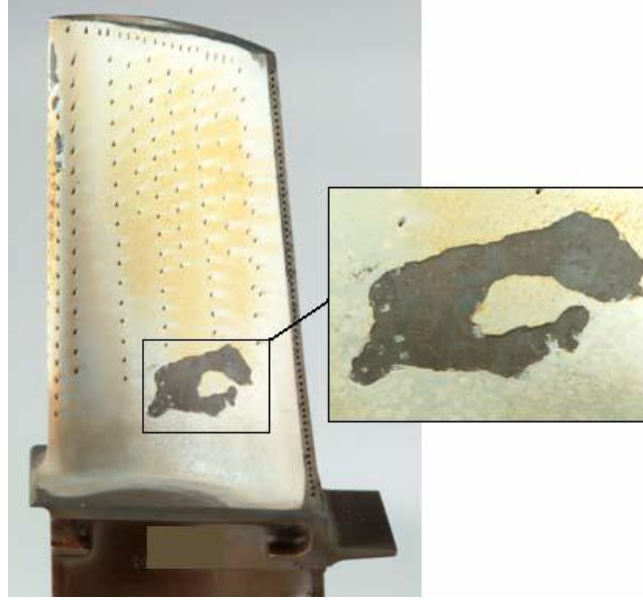
TGO katmanı, termal çevrim esnasında gelişir ve mikron mertebesinde kalınlığa ulaşır. TGO katmanı gelişip 8-10 μm mertebesine geldiği durumda kaplama sisteminin bağlanma mukavemeti anlamında en zayıf bölgesini oluşturur. Seramik-TGO ara yüzeyi ve bağlanma katmanı-TGO ara yüzeyinde veya ara yüzeye paralel gelişen çatlaklar hızla ilerleyerek kaplamanın yüzeyden ayrılmasına neden olur (Şekil 2. 22)[11,12,13]



Şekil 2. 23 Farklı yöntemlerle çöktürülmüş ve hasara uğramış kaplamalar[29]

TGO'da meydana gelen kademeli faz dönüşümü hacim değişimine ve bunun sonucu olarak kaplamada özellikle büzülme veya uzama gibi hatalar meydana gelir. TBK

sisteminde kaplama, TGO ve altlık malzeme arasındaki termal genişleme farklılıkları basma gerilmesi oluşmasına neden olmaktadır. Bunun sonucunda kaplamada ayrılmalar ve büzölmeler oluşmaktadır. Buruşmalar TGO tabakasının, bağ katmanı plastik deformasyonundan dolayı meydana gelir. TGO ile baş etmek ve hızını yavaşlatmak için kalın seramik katman kullanarak ara yüzey sıcaklığı düşürülebilir veya bağ katman PS, HVOF gibi yöntemlerle elde edilebilir. Ancak, seramik üst katmanın kalınlığı artıkça gerilmeler ve ayrılma riskleri artacağından tercih edilmez. Bağ katman (MCrAlY) içerisine Si, Ta, Hf gibi elementler ilave edilerek TGO büyüme hızı yavaşlatılabilir ve korozyon dayanımı artırılır [13,14]. Şekil 2. 24'de hasara uğrayıp altlık yüzeyinden ayrılmış bir termal bariyer uygulamasının makro görüntüsü verilmektedir.



Şekil 2. 24 Hasar uğramış bir TBK'ya ait görüntü[33]

2.7.2 Oksidasyon ve Sıcaklık Korozyonu

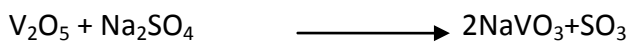
Oksidasyon, metal ve alaşımlarda atomların yapıdan dışarı çıkarak metal yüzeyinde oksijen ile reaksiyona girmesi ya da oksijenin metal içerisine difüzyonu sonucu oksit oluşması şeklinde gerçekleşir. Malzeme yüksek sıcaklıkta ve oksijen içeren bir ortama uzun süre maruz kalırsa yüzeyde oluşan oksitler ayrık değil çökelti şeklinde oluşur. Yüksek sıcaklıklarda malzemenin oksitlenip kayba uğramasının azaltılması için yüzey kararlılığı göstermesi gerekmektedir. TBK'ların en büyük problemleri oksidasyon

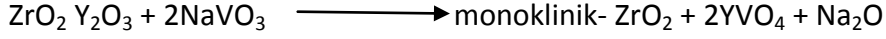
sonucu çatlak oluşumu ve ayrılma eğilimleridir. TBK' nın ömrü bağ katmanın yüksek sıcaklıkta korozyon ve oksidasyona karşı dayanımına bağlıdır[5].

Bağ katmanın MCrAlY ve Pt alüminit içeriği termal bariyer kaplamanın oksidasyon davranışı ve ömrünü etkileyen en önemli faktördür. Malzemeler oksijen CO₂ ve SO₂ gibi ortamlarda veya ergimiş tuzlar ve malzeme ile reaksiyona girebilecek katı parçacıklara maruz kaldıklarında korozyon ve erozyon gibi hatalar meydana gelir. Oksidasyon, yükselen ortam sıcaklıklarında metalik malzemenin oksijene veya oksijen içeren atmosfere maruz kalması sonucu oksitlerin oluşmasıdır. Yüksek sıcaklık uygulamalarında birçok malzemenin mükemmel sıcaklık dayanımı gösterdiği bilinmektedir. Yüksek sıcaklıklarda malzeme yüzeyinde oksidasyon sonucu oluşacak kaybın az olması için yüzey kararlılığı başta olmak üzere yüzeye iyi tutunabilmesi önemlidir. Çok iyi dış koruma sağladıkları için rağbet gören oksitler Al₂O₃, Cr₂O₃ ve SiO₂ yüksek sıcakta çalışan gaz türbinlerinde koruyucu özelliklerinden dolayı kullanılmaktadırlar[48,49,50].

MCrAlY bağ katman malzemesi olarak kullanıldığında, özellikle oksidasyonun ilk zamanlarında TGO homojen olmayan morfoloji veya bileşim gösterirler. Metal oksit sisteminde hem TGO'nun oluşturduğu belli orandaki hacim değişikliği hem de farklı formlardaki oksitin metalin yerini alması ya da metal ve oksit arasındaki termal genişleme katsayısı farkı veya özellikle alaşımlarda daha karışık bir mekanizmanın ortaya çıkması gibi durumlardan dolayı gerilmeler meydana gelir. Bunlara ilaveten, oksijenin altlık malzemeyi çözmesi oksidasyon mekanizmasında gerilmeler oluşmasına neden olabilir. Oksit ve metal ara yüzeyinde oluşan bir oksitin basma gerilmesi, anyon atomların akışını yavaşlatacağından ara katmana doğru oksijenini difüzyonu yavaşlayabilir.

Sıcaklık korozyonu, TBK sisteminde sıcak gazın etkisiyle ergiyen tuzların kaplamada kalıcı hasarlar meydana getirmesidir. Düşük kaliteli yakıtlar genellikle yüksek oranda Na₂SO₄ ve V₂O₅ tuzları içerirler. Bu tuzlar sıcaklığın etkisiyle ergiyerek stabilizör yitriya ile reaksiyona girerek soğuma sırasında kaplamada tetragonal veya kübik faz yapısının monoklinik faza dönüşmesine neden olmaktadır.





Faz dönüşümü, %3-5 arası hacim artışına ve beraberinde çatlak ve ayrılmalara neden olmaktadır. YSZ'nin bu tür ortamlarda çalışabilmesi için daha kararlı yapıya sahip olan Al_2O_3 ile birlikte kullanılması önerilmektedir [5,20. Sıcaklık korozyon direncini iyileştirmek için; In_2O_3 , Sc_2O_3 veya CeO_2 daha dayanıklı stabilizörlerin kullanılması, gözenekli kaplama yüzeyine ergimiş tuzların sızmasını azaltmak için lazer ile sırlama ve EB-PVD yöntemi ile YSZ kaplama üzerine daha yoğun yapıya sahip Al_2O_3 kaplanması. Al_2O_3 seramik katmanın üstüne kaplanarak ergimiş tuzların sızmasını azaltılmıştır. Al_2O_3 ilavesi mekanik özellikleri iyileştirir ve sıcaklık korozyonuna karşı kaplamaları korur.

Sıcaklık korozyonu jeneratörler, gaz türbinleri, içten yanmalı motorlar, akışkan yataklı yanma odaları, endüstriyel geri dönüşüm fırınlar, kâğıt ve boru endüstrisinde ciddi bir problemdir. Süper alaşımlar bu sektörlerde çözüm olarak kullanılmıştır ancak yüksek sıcaklık dayanımı ve yüksek sıcaklık korozyon direnci her zaman gösteremedikleri için yetersiz kalmışlardır. Yüksek sıcaklık korozyonu ve oksidasyon dayanımı, kimyasal kararlılık, mekanik tamlik ekonomiklik gibi tüm bu özellikler kaplama sistemi ile mümkündür[51,52,53].

Geleneksel bir TBK sistemi, oksidasyona ve korozyona karşı koruma sağlayan bir bağ katman ve ısı yalıtım sağlayan bir üst katmandan oluşur. Bağ katmanın oksidasyon direncini;

- Bağ katman ve altlık malzemesi,
- Bağ katman ve altlık arasındaki difüzyon kabiliyeti,
- Termal gelişen oksitin karakteristik ve morfolojik yapısı ve
- Kaplamanın faz dönüşümü ve çatlak oluşumu gibi faktörler etkilemektedir.

2.7.3 Aşınma

Seramik malzemeler yüksek sertlik, termal ve korozif ortamlara karşı dayanımları nedeni ile metalik ve polimer malzemeler üzerine kaplanmaktadır. Özellikle oksit seramik kaplamalar Sermetler ve metalik kaplamalara göre daha iyi korozyon ve

kavitasyon dayanımı gösterdikleri için tercih edilirler. Yüksek sıcaklık uygulamalarında termal bariyer olarak kullanılan zirkonya düşük termal iletkenliği ve yüksek termal genleşme katsayısının yanı sıra yüksek tokluk, şekilsel ve kimyasal kararlılık, yüksek aşınma dayanımı ve sertlik, düşük yoğunluk gibi özellikleri uygulama yerindeki parçanın servis ömrünü artırmaktadır.

Aşınma bir yük veya kuvvet sonucunda ana malzeme yüzeyinden aşındırıcı malzemenin parçacık koparması veya kimyasal etkiler sonucu malzemede meydana gelen kayıp olarak adlandırılmaktadır. Aşınma türleri, abrasif, adezif, erozyon, korozyon ve yorulma aşınması şeklinde sınıflandırılabilir.

Abrasif aşınma, bir yüzeyden diğerinin çok sert veya pürüzlü olduğu durumlarda sert parçacıkların daha az sert olan yüzeyi çizmesi veya delmesi şeklinde oluşmaktadır. Adezif aşınma, iki malzemenin birbiri üzerinde hareket etmesi sonucu yüzeyden parçacık ayrılması ile meydana gelmektedir. Yorulma aşınması, malzemenin tekrarlı ısıl veya mekanik etkiler sonrasında oluşan gerilimler veya ısıl gradyan sonucunda meydana gelmektedir. Korozyon aşınması ise, kimyasal veya elektrokimyasal etkiler sonucu malzeme yüzeyinde oluşan oksitler şeklinde meydana gelmektedir.

Ağırlık kaybı ile aşınma ölçümü;

En çok kullanılan ve ekonomik bir yöntemdir. Hacimsel aşınma miktarı olarak belirtmek istenirse kullanılan malzemenin yoğunluğu ve deney numunesi üzerine etki eden kuvvet göz önüne alınarak birim yol veya birim kuvvete karşılık gelen hacim kaybından yola çıkılarak hesaplanır[40,54,55,56]. Aşağıdaki formüller kullanılarak ağırlık kaybı ile aşınma miktarı hesaplanabilir;

$$W_s = \Delta V / F * L, W_s = \Delta M / \rho * F * L, K = V / L * F$$

F: Uygulanan kuvvet (N)

ρ : Yoğunluk

ΔM : Ağırlık kaybı (gr)

W_s : Özgül aşınma miktarı

$\Delta V = V$: Hacimsel malzeme kaybı (μm^3)

L: Koşma mesafesi (m)

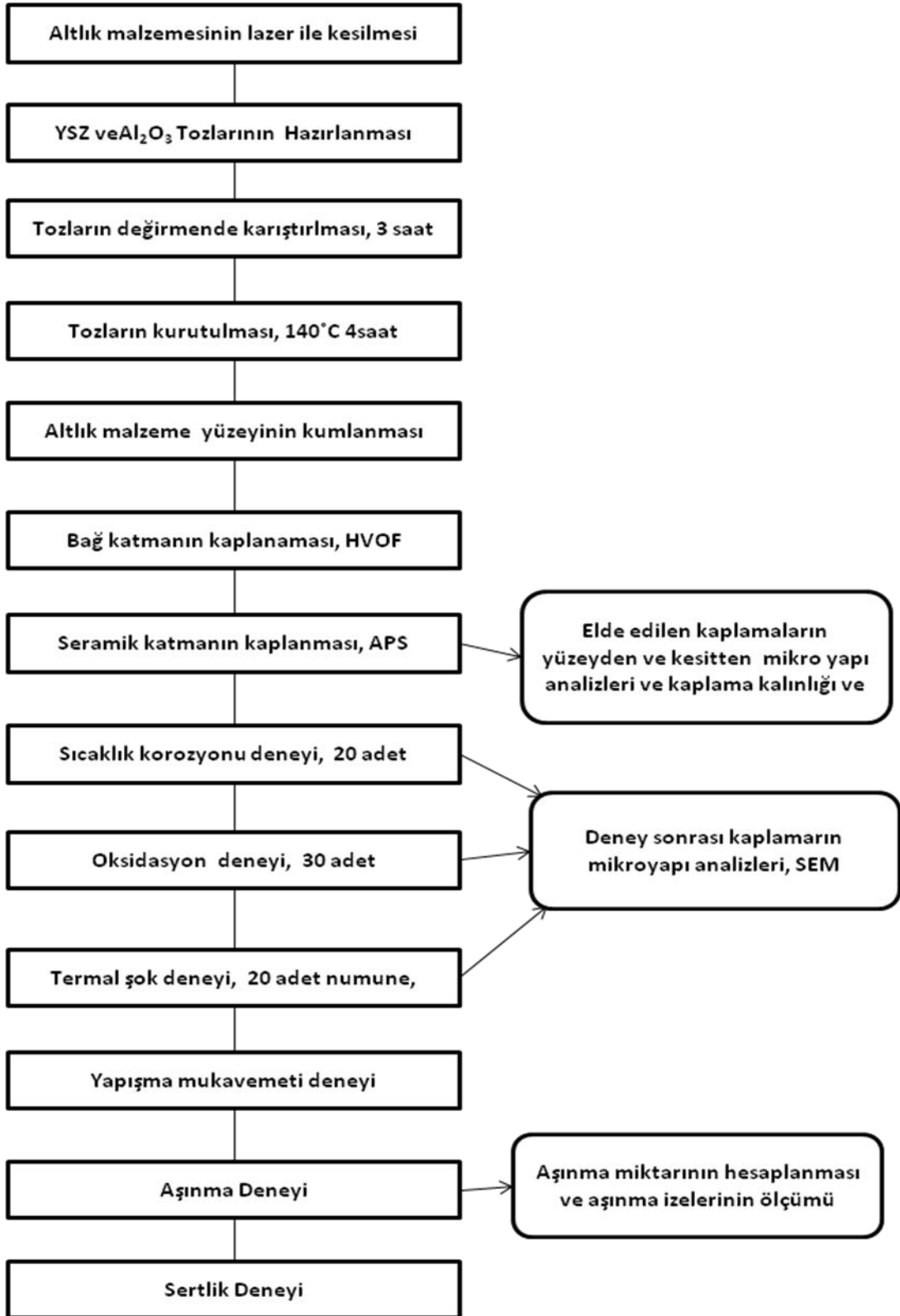
K: Aşınma Oranı ($\mu m^3 / N.m$)

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Hava araçları, türbin kanatlarında, dizel motorların yanma odalarında kullanılan termal bariyer kaplamalar, yaygın bir yöntem olan atmosferik plazma sprej ile üretilmiştir. Havacılık ve enerji sektöründe dünyada ve ülkemizdeki ilerlemeler, gaz türbinlerinde türbin giriş sıcaklığının artması yeni kaplama malzemelerinin geliştirilmesi veya mevcut kaplama malzemelerinin iyileştirilmesini gerekli kılmaktadır. Çalışmada, gaz türbinlerinde sıklıkla TBK malzemesi olarak ZrO_2 -ağ.% 8 Y_2O_3 (YSZ) tozu içersine Al_2O_3 tozu ilave edilmiş ve Al_2O_3 'in termal bariyer kaplama özelliklerine etkileri araştırtmıştır.

YSZ ve Al_2O_3 tozları karıştırılarak 10 farklı kaplama tozu hazırlanmıştır. AISI 304 paslanmaz çelik altlık malzemesi, bağ katman olarak ısıl geçiş özelliği olan metalik (MCrAlY) kaplama tozu sonrasında ise seramik kaplama tozları ile kaplanmıştır. Her bir grup kaplama tozundan 16 adet kaplama numunesi üretilmiştir.

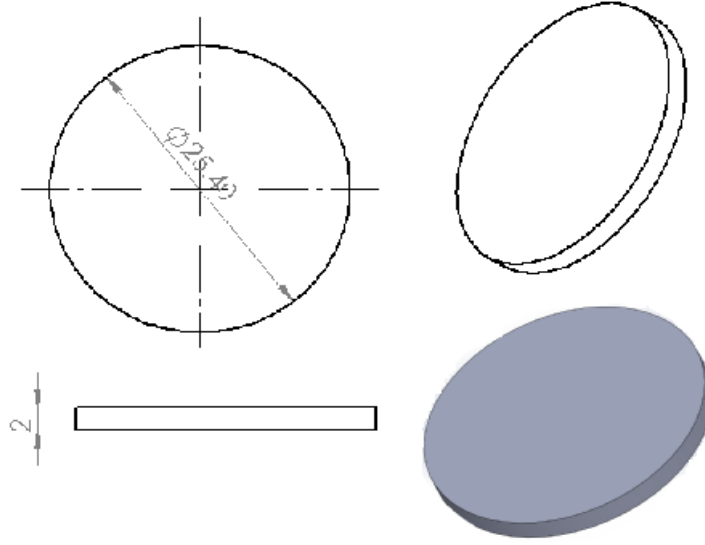
Elde edilen kaplamalara, çalışma otamlarında maruz kaldıkları ortam koşullarının etkilerini(servis ömrü ve dayanımı) belirlemek için sıcaklık korozyonu, oksidasyon ve termal şok deneyleri uygulanmış ve sonuçlar irdelenmiştir. Kaplamaların aşınma dayanımlarının belirlenmesi için aşınma deneyi uygulanmıştır. Yapılan deneysel çalışmaların işleyişi, kaplamaların elde edilmesi, uygulanan deneyler ve kaplamaların karakteristik özelliklerinin incelenmesi Şekil 3. 1'de şematik olarak verilmektedir.



Şekil 3. 1 Deneysel çalışma şeması

3.1 Altlık Malzemenin Hazırlanması

Çalışmada, kimyasal bileşimi Çizelge 3. 1’de verilen oksidasyon direncinin yüksek olması nedeniyle AISI 304 paslanmaz çelik altlık malzemesi olarak seçilmiş olup, numuneler $\varnothing 25,4$ mm. çapında ve 2mm. boyutta plakadan lazer ile kesilerek Şekil 3. 2’de teknik resmi verildiği gibi hazırlanmıştır. Altlık malzeme boyutları; çekme deneyi standardına uygunluk, mikro yapı analizine hazırlanabilirlik ve kaplama cihazında kullanılabilirlik göz önünde tutularak belirlenmiştir[20].



Şekil 3. 2 Altlık malzemesinin teknik resmi

Çizelge 3. 1 Altlık olarak kullanılan AISI 304 paslanmaz çeliğin kimyasal bileşimi

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
Ağırlıkça %	0,08	1,00	2,00	0,045	0,030	18,0-	---	8,0-
bileşim oranı						20,0		11,0
(AISI 304)								

Malzeme yüzeyinde olabilecek oksit, yağ, kir veya makro geometrik bozuklukları gidermek ve yapışma kalitesin artırmak için altlık malzemeler kaplama öncesi kumlanmıştır. Kumlama yapmanın bir nedeni de, APS yönteminde yüzeye paralel oluşan mikro yapının dik bağlanma kuvveti artırmak ve oksijenin seramik katmandan alt kısma doğru transferi azaltmaktır[20,37].

Kumlama işlemi, kumlama cihazın da 6 bar basınçla Al_2O_3 tozlarının numune yüzeyine 15 cm mesafeden püskürtülmesi ile gerçekleşmiştir. Kumlama işleminden hemen sonra kumlanmış yüzeylerde herhangi bir oksit oluşmadan kaplama işlemine başlanmıştır.

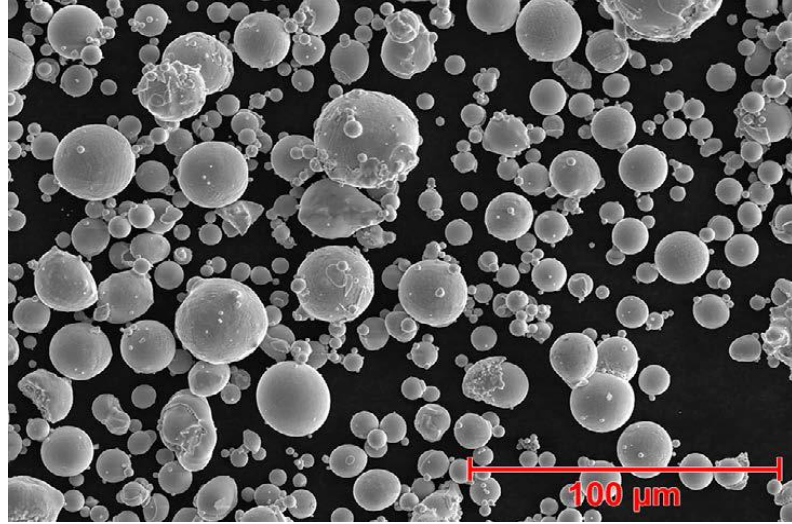
3.2 Kaplama Tozlarının Seçilmesi

Kaplama malzemesi olarak, Metco firmasından tedarik edilen 204B-XCL ZrO_2 -ağ.% 8 Y_2O_3 ve saflık oranı %98.0 olan Al_2O_3 (Metco 105 NS Beyaz) seramik üst katman, Amdry 997 (Ni 23Co 20Cr 8.5Al4 Ta 0.6Y) tozu ise bağ katman olarak kullanılmıştır. Bağ katman malzemesi olarak kullanılan Amdry 997 malzemesi içerisinde bulunan, kobalt sıcaklık dayanımı ve mukavemeti, krom ve itriyum oksidasyon ve ayrılma direnci sağlamaktadır, alüminyum ve krom koruyucu oksit tabakasının oluşması için depo olarak görev yapmakta ve gevrek çatlama karşı kaplamayı korumaktadır, tantanyum ise kaplamanın yüksek sıcaklıklardaki oksidasyon direncini artırdığı için seçilmiştir. Çizelge 3. 2’de kullanılan kaplama tozlarının, kimyasal ve fiziksel özellikleri verilmiştir. Kullanılan tozların tane boyutu ve tane şekli hakkında bilgi edinmek için taramalı elektron mikroskobundan görüntüleri alınmıştır.

Çizelge 3. 2 Kullanılan kaplama tozların tane boyutu ve kimyasal bileşimleri

Kaplama	Kimyasal Bileşim	Tane Şekli	Tane	Yoğunluk
YSZ	ZrO_2 8 Y_2O_3	Küresel	-75 +45 μm	5,9
Al_2O_3	2 ağ.% SiO_2 -98 ağ.% Al_2O_3	Küresel	-45 +15 μm	3,9
Amdry 997	Ni 23Co 20Cr 8.5Al4 Ta	Küresel	- 38 +5 μm	

Homojen bir toz karışımı elde etmek için alkol dolu kap içerisinde değirmen ile tozlar 3 saat boyunca karıştırılmış ve etüvde içerisinde 140 °C’ de 4 saat tutularak nemi alınmıştır. Bağ katman AMDRY 997kaplama tozunun küresel boyuta sahip olduğu SEM görüntüsünde görülmektedir. Küresel boyut toz yapısı kaplama esnasında tozun akışı kolaylaşmaktadır ve yapışma dayanımı artmaktadır [57].



Şekil 3. 3 Amdry 997 SEM görüntüsü

3.3 Kaplamaların Üretilmesi

Bağ katmanın kaplanmasında, yüzey pürüzlülüğü düşük olması ve kaplamanın yapışma mukavemeti çok daha iyi olduğundan dolayı HVOF yöntemi seçilmiştir. Seramik üst katman ise gaz türbinlerinin kaplanmasında yaygın olarak kullanılan ekonomik ve pratik bir sistem olan atmosferik plazma sprej yöntemi ile kaplanmıştır. APS ve HVOF kaplamaların kalınlıkları ve kesit görüntüleri taramalı elektron mikroskobu ile görüntülenmiştir.

Bağ katman kaplama işleminde, Sulzer Metco firmasına ait DJ-2700 tabanca ve seramik üst katmanın kaplanmasında 9 MBM plazma sprej tabancası kullanılmıştır. Kaplama işleminde kullanılan tabancalar, 3 eksenli CNC tezgâhının düşey eksenine yerleştirilmiştir(Şekil 3. 4) ve hareket eden tabanca sayesinde döner tabla üzerinde bulunan numuneler homojen bir şekilde kaplanabilmektedir. Altlık malzemeleri kaplama öncesi kumlanarak yüzeyi temizlenmiş ve pürüzlülüğü arttırılmıştır. Hazırlanan her bir grup kaplama tozundan 16 adet numune kaplanmış olup toplamda 160 kaplama üretilmiştir. Bağ katman, HVOF yöntemi kullanılarak ve Çizelge 3. 3'de verilen parametreler sabit tutularak kaplanmıştır. Bu sistemde, tabancanın hareketini ve numunelerin dönüş hızını kontrol edilebildiğinden kaplamalar istenilen kalınlıklarda elde edilebilmektedir. Bağ katmanın üretilmesinde hava-propan gaz karışımı oksijen ile yakılarak enerji elde edilmiştir[58,59,60].

Çizelge 3. 3 HVOF yöntemi parametreleri

Malzeme	Basınç (bar)			Akış Hızı (SCFH)			İşlem	
	Oksijen	Propan	Hava	Oksijen	Propan	Hava	Sprey mesafesi (mm)	Besleme Hızı (gr/dk)
AMDRY 997	10.3	6.2	7.2	24	40	50	250	50

Seramik üst katman kaplamak için APS tabancası takılmış ve Çizelge 3. 2’de özellikleri verilen tozlar bağ katman üzerine kaplanmıştır. Seramik kaplamalar Çizelge 3. 4’de belirtilen parametreler tüm numuneler için sabit tutularak APS yöntemi ile kaplanmıştır. Seramik üst katmanda ise birincil gaz olarak argon, ikincil gaz olarak hidrojen kullanılmıştır. Şekil 3.4’te altlık malzemesine uygulanan işlemlerin makro görüntüsü verilmektedir.

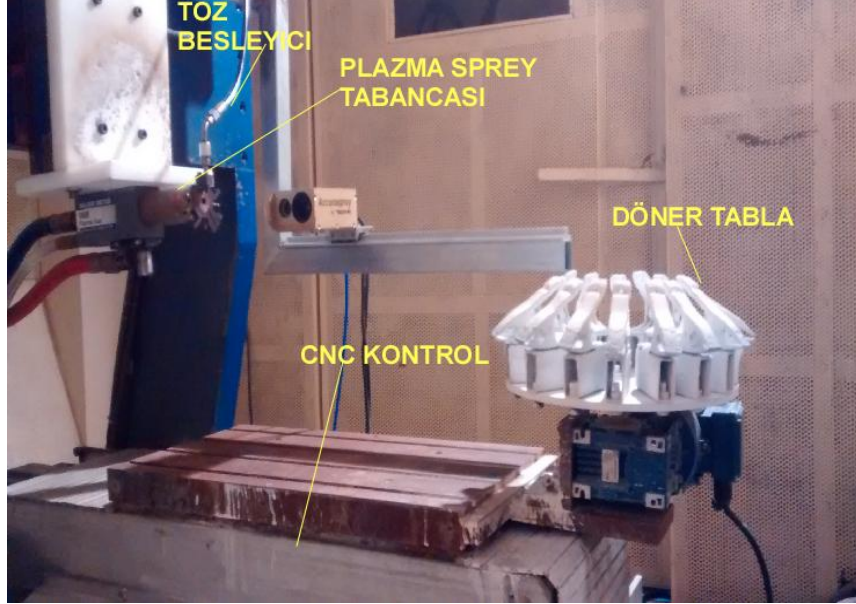
Çizelge 3. 4 Atmosferik Plazma sprej yöntemi parametreleri

Parametreler							
Akım (A)	Birincil Gaz, Ar	İkincil Gaz, H ₂	Taşıyıcı gaz akış hızı, Ar	Sprey mesafesi (mm)	Tabanca hızı (mm/dk)	Tabla dönme hızı (rpm)	Voltaj (V)
500	90	15	13,5	75	200	100	60



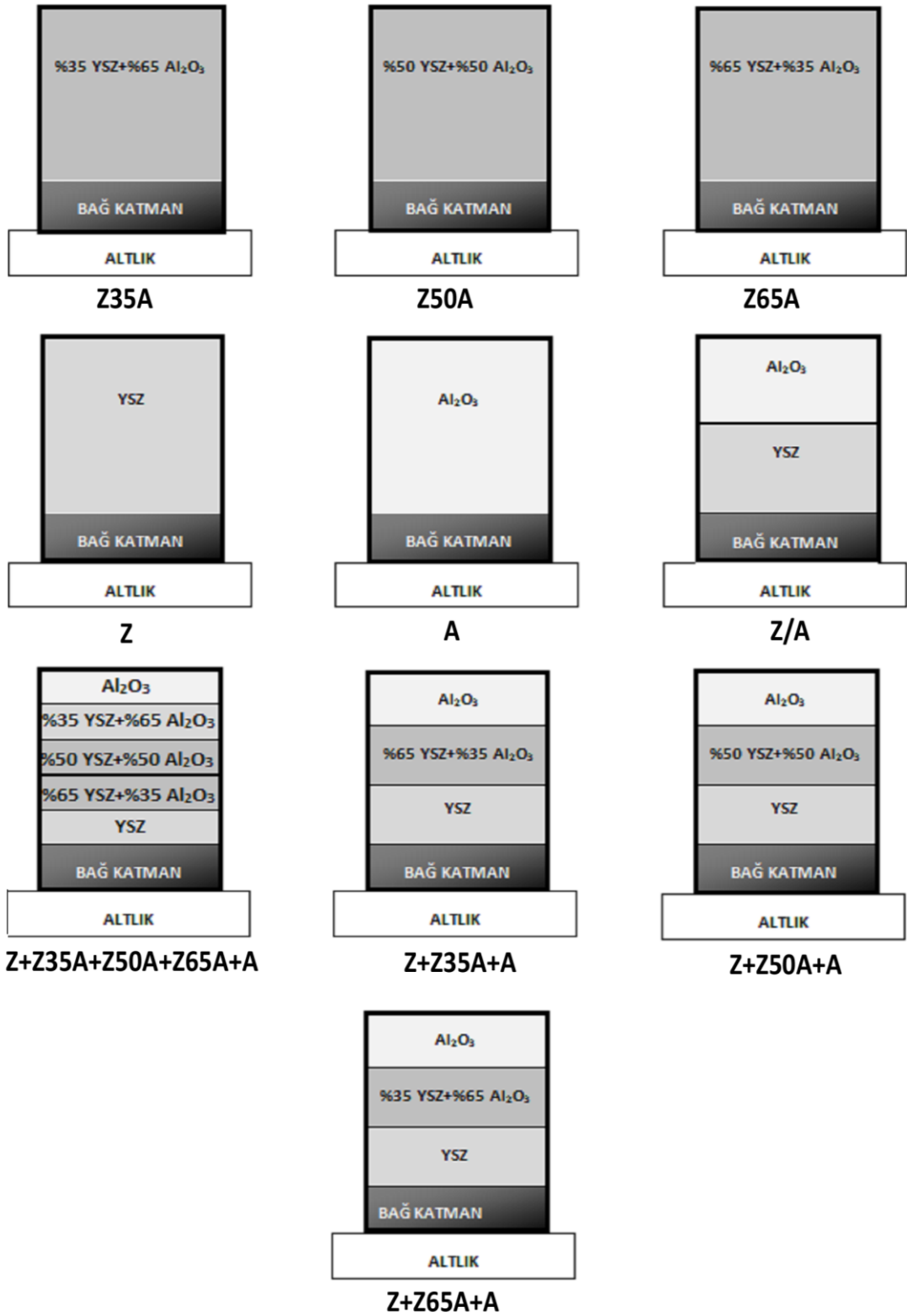
Şekil 3. 4 Kaplama numunelerine ait makro görüntüler

Kaplamalar İstanbul Teknik Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü bünyesinde bulunan Termal Bariyer Kaplama Laboratuvarında üretilmiştir. Şekil 3. 5 numenlerin kaplandığı HVOF ve APS sistemi resmi verilmektedir.



3. 5 HVOF ve APS kaplama sistemi gösterimi

Tüm kaplamalara ait toz dağılım oranları ve toz dağılım sıralamaları Şekil 3. 6'da resim şeklinde verilmiştir. Hazırlanan tozlar; YSZ tozu Z, Al_2O_3 tozu A ile olmak üzere Şekil 3. 6' görüldüğü gibi kısaltılmıştır.



Şekil 3. 6 Üretilen kaplamaların şekilsel görünümü

3.4 Kaplamaların Karakterizasyonu

Kaplamaların çatlak oluşumu, mikro yapıları ve morfolojisini inceleyebilmek için kaplama yüzeyinden ve kesitten 300x büyütmede SEM fotoğrafları alınmıştır.

3.5 Termal Oksidasyon Deneyi

Termal bariyer kaplamalarda, bağ katman oksidasyon direncinin artırılması kaplamanın termal çevrim dayanımını da artırır[21].

Son yıllarda parçacık kompozit YSZ/Al₂O₃ tozlar, kolay ulaşılabilirlik ve düşük maliyet farklı kaplama yöntemlerine uyum sağlama ve TBK'nın performansını artırdıkları ve TGO oluşumunu erteledikleri için yaygın olarak kullanılmaktadır[7].

Termal oksidasyon deneyi için kaplamalar; hava ortamında elektrikli fırın içerisine yerleştirilmiştir ve fırın 1050°C sıcaklığa ulaştıktan sonra kaplamalar 4 saat fırında bekletilmiştir. Bu işlem her bir kaplama için, yüzeyde herhangi bir çatlak veya ayrılma görülmesi durumunda sona erdirilmiştir.

Belirlenen sıcaklık değeri zirkonyanın faz dönüşümüne ve motor çalışma sıcaklığına çok yakın bir değer seçilmiştir. Deneyin güvenli sonuç vermesi için 3 adet kaplama deneye tabi tutulmuş ortalama ayrılma zamanı deney sonucu olarak kabul edilmiştir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile deney kaplamalar incelenmiştir. Oksidasyon deneyi sonrası oluşan TGO kalınlıkları ölçülmüş olup kaplamalara ait oksidasyon deneyi sonuçları çevrim saati olarak verilmiştir[2,4,6,30,37,42,44,49,50].

3.6 Sıcaklık Korozyonu Deneyi

Sıcaklık korozyonu deneyi gaz türbinlerinde, yakıt içerisinde bulunan korozif tuzlar korozyon meydana gelmektedir. Korozif tuzlar, YSZ ile reaksiyona girerek kaplamanın bozulmasına neden olmaktadır. Deneyde her bir kaplamanın sıcaklık korozyonun dayanımını belirlemek için korozyon tuzları ağırlıkça %55 V₂O₅ ve %45 Na₂SO₄ oranlarında karıştırılarak kaplama yüzeyine 30mg/cm² oranında tartılarak konulmuştur. Tuzların bazı fiziksel özellikleri Çizelge 3. 5'de verilmektedir[8].

Çizelge 3. 5 Korozyon tuzlarının fiziksel özellikleri

Tuzlar	Ergime noktası (°C)	Yoğunluk (g/cm ³)
V ₂ O ₅	690	3,3
Na ₂ SO ₄	884	2,7

Deney yapılırken kenarlarda oluşabilecek kaplamasız yüzey veya korozyon tuzunun kenardan sızması gibi durumların olmaması için kenarlardan içe doğru en az 3mm kaçınılmıştır. Kaplamalar, fırın içerisine yerleştirilmiştir ve hava ortamında 1050 °C sıcaklık da 4 saat tutulup fırında soğutulmuştur. İşlem periyodik olarak devam etmiş olup, her bir soğuma sonrası soğuyan kaplamalar gözle kontrol edilmiş herhangi bir ayrılma, kalkma olması durumunda ilgili numune için deney sonlandırılmıştır. Deney sonuçları aşağıda grafik olarak verilmiştir. Kaplama kalınlığına ve poroziteye bağlı olarak sıcaklık korozyonu dayanımındaki değişimler, mikro yapının ve korozyon tuzlarının kaplama üzerine etkileri incelenmiştir.

Literatürde çalışmaların, gözenekli yapıya sahip geleneksel YSZ tek başına kullanmak yerine daha yoğun yapıya sahip olan Al₂O₃ birlikte (Al₂O₃/YSZ) kullanmanın sıcaklık korozyonunu dayanımını artırdığı belirtilmektedir[2,3,4,5,6,7,21,49,50].

3.7 Termal Şok Deneyi

Termal bariyer kaplamalarda kritik bir parametre olan TGO oluşumu ve çalışma ortamında maruz kalacağı, termal şoklara karşı dirençlerinin belirlenmesi amacıyla termal şok deneyi uygulanmıştır. Termal şok deneyi, kaplamaların dayanımlarını ve çevrim ömürlerini belirlemektedir. Yüksek çalışma sıcaklıklarında, TBK uygulanmış altlık malzeme ile bağ katman arasındaki termal genleşme farklılıkları bu bölgede termal gerilimlere neden olmaktadır. Çalışma sıcaklıklarına ve zamana bağlı olarak bu gerilmeler belirli bir oranda düşmektedir. Dolayısıyla maksimum gerilme, parçanın ilk ısınma ve soğuma anlarında meydana gelmektedir.

Kaplamalar 1050 °C fırın içerisinde 8 dakika tutulmuş ve 2 dakika su içinde soğutulmuştur. Deneyler her bir kaplama için; kaplamanın yarısından fazlası ayrılana kadar işlem devam etmiştir. Deneyde, elde edilen kaplamaların termal şok dayanımları hakkında bilgi edimilmiştir[8,22,39,42,45,49,52,62].

3.8 Yapışma Mukavemeti Deneyi

Yapışma deneyi her bir grup kaplama için 2 adet olmak üzere toplamda 20 adet uygulanmıştır. Kaplamanın oda sıcaklığındaki altlık malzemeye ve diğer kaplama katmanlarıyla olan yapışma kalitesini ve servis ömrünü belirlemek yapışma mukavemeti deneyi yapılır. Kaplama kalınlığı ve gözenekler, yapışma mukavemetini etkileyen iki önemli faktördür. Kaplama kalınlığı arttıkça yapışma mukavemeti azalır.

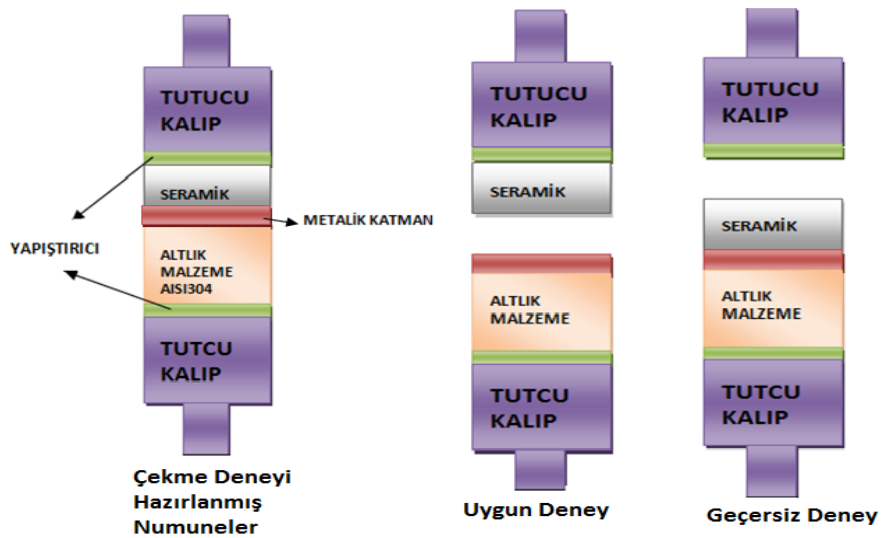
Kaplamalar; kullanılan yapıştırıcıdan daha mukavemetli olması halinde kopma yapıştırıcı katmanda gerçekleştiğinden kaplamanın ancak minimum çekme dayanımı bulunabilir dolayısıyla yapıştırıcının dayanımı kaplamayı test edebilecek değerde olmalıdır. Bu nedenle yapıştırıcı malzemesi olarak yüksek dayanıma sahip olan JB welding epoksi yapıştırıcı malzemesi temin edilmiştir.

Çekme çenelerinin yüzeyi yapışmanın iyi olabilmesi için Al_2O_3 aşındırıcı tozlarla kumlanmış ve yapışma öncesi tüm yüzeyler yağ, nem, kir, pas vb. hatalara karşı aseton ile temizlenmiştir. Daha sonra çeneler ve kaplamanın her iki yüzeyi yapıştırıcı malzeme ile ince film şeklinde kaplanmış olup yapıştırma işleminden sonra numuneler oda sıcaklığında 24 saat bekletilmiştir(Şekil 3. 7)[40,44,63].



3. 7 Yapışma deneyi cihazı ve çeneler

Çekme deneyleri; aksenal deney cihazı sıcaklığında yapışmış yüzeyler ayrılana kadar uygulanmıştır. Yapışma mukavemeti; 25,4 mm çapında kaplanmış numunelere, Şekil 3. 6'de görülen ASTM C 633-79 standardına göre hazırlanmış çekme çeneleri ile hidrolik çekme cihazında (DARTEC) (RK 94057) yapılmıştır. Kaplamalar kopana kadar 2 mm/dak hızla çekme deneyine tabi tutulmuştur. Kopmanın yapıştırıcıdan olması durumunda deney geçersiz deney olarak kabul edilmiş ve deney tekrar edilmiştir. Kaplamaların yapışma mukavemetinin tespitinde kullanılan tüm değerler seramik katman-bağlanma katmanı ara yüzeyinden ve seramik katmanın içerisinde kopan değerlerdir(Şekil 3. 8). Deney sonuçları, maksimum yük ve alan bağlantısı ile bulunmuştur[67].



3. 8 Çekme deneyi sonrası uygun ve geçersiz deney

3.9 Sertlik Deneyi

Atmosferik plazma sprey yönteminde, püskürtme hızı ne kadar fazla ise, kaplamaların sertliği o kadar yüksek olur. Kaplamada oluşan oksitler genellikle kaplamanın sertliğini arttırırken; yapışma dayanımını azaltmaktadırlar. Kaplama tabakalarının sertliği; porozite, tabakanın heterojen yapısı ve uygulanan yük değerlerine bağlı olarak farklılık göstermektedir.

Sertlik değerleri, HVS1000 mikro vikere cihazı ile kaplama yüzeyinden alınmıştır. Deney için toplam 5 adet numune hazırlanmış ve deneye tabi tutulmuştur. Uygulanan yük 300 gr yükleme süresi 15 sn olarak belirlenmiştir. Sertlik testi uygulanmadan önce numune yüzeyi sırasıyla 240, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200 numaralı SiC zımparalar ve elmas pasta ile parlatılmıştır. Numune yüzeyinin rastgele 17 farklı yerinde ölçüm alınmış en büyük ve en küçük ölçüm değerleri göz ardı edilerek ölçülen 15 sertlik değerinin aritmetik ortalaması esas alınmıştır (Şekil 3. 4'te). Ölçüm alınırken kenarlarda var olan gerilme yığılımları ve batıcı ucun numuneye temas ettiğinde uygulanan yükün eşit dağılmaması sonucu oluşabilecek hatalar olabileceğinden kenarlardan en az 3 mm kaçınılarak ölçüm yapılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü, malzemenin mekanik özelliğini etkilediği için yüzey pürüzlülüğü $Ra < 0,8$ olarak ölçülmüştür [6,7,40,44,64,65].

3.10 Aşınma Deneyi

Kaplamaların tribolojik performansını belirlemek için yüzey durumu en önemli faktördür. Kaplama sonrası numunelerin yüzey pürüzlülükleri 1,5-2,4 aralığında değişme göstermektedir. Tüm kaplamaların Ra değeri; karşılaştırma yapabilmek ve düş değerine getirilmiştir (Şekil 3. 5). Yüzey pürüzlülüğü, 5µm radüsten ve yüzeyin en az 5 farklı yerinden ölçülmüştür. Yüzey pürüzlülük parametreleri çizelge 3. 7'de verilmektedir. Sonra numune yüzeyleri herhangi bir yağ, istenmeyen atıklara karşı alkol ile temizlendi ve sıcak hava ile kurutuldu. Kaplamaların ağırlıkları hassas terazi ile aşınma öncesi ve aşınma sonrası olmak üzere iki defa tartılarak aşınma kaybı belirlenmiştir. Ağırlık kaybı çok düşük miktarlarda olduğu için hassas terazi kalibresi her bir ölçüm için tekrar yapılmıştır.

APS sprey yöntemi ile üretilen kaplamalar yüksek aşınma dayanımı, kolay yağlama gibi olumlu tribolojik özellikler göstermektedirler. Toz morfolojisi, mikro çatlaklar ve gözenekli yapı kaplamaların sürtünme ve aşınma gibi tribolojik özelliklerini etkilemektedir bu nedenle aşınma öncesi yüzey pürüzlülük değerleri Çizelge 3. 6 verilmiştir.

Çizelge 3. 6 Aşınma deneyi öncesi kaplamaların yüzey pürüzlülük karakteristikleri

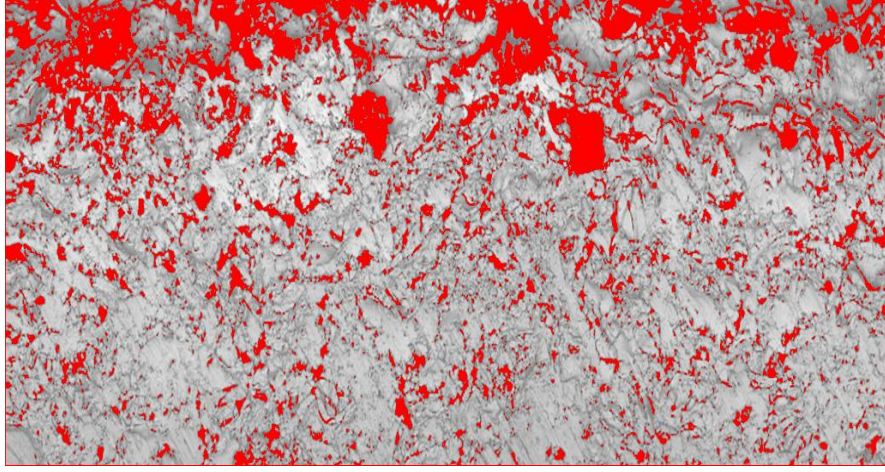
Parametreler	A	Z65A	Z50A	Z35A	Z
Ra(μm)	0,71	0,744	0,79	0,70	0,76
Rsk	-3,65	-3,78	-3,223	-4	-3,51
Rz(μm)	6,07	6,048	6,85	6,7	6,8
Rsm(μm)	0,055	0,056	0,051	0,052	0,62
Rp(μm)	1,18	1,17	1,26	1,14	0,98
Rv(μm)	5,47	4,87	5,5	5,52	5,83
Rq	1,11	1,14	1,16	1,041	1,16

Aşınma testi, Tribo technic pin-on disk deney (Fransa) cihazıyla kuru koşma koşulları altında ASTM G99-04 standardına göre yapılmıştır[20]. Normal yük 8N, aşındırıcı olarak sertlik değeri yüksek olan 6000 μm'lik Al₂O₃ ve WC¹ küre, koşma mesafesi 1000 m, koşma hızı tüm numuneler için 220.0mm/s olarak kullanılmıştır. Testler yaklaşık 1 saat 15 dakika sürdü ve herhangi bir yağlayıcı malzeme kullanılmamıştır. Aşınan yüzeyler 100x büyütme ile ışık mikroskobu ile incelenmiş ve kaplama kalınlıkları ölçülmüştür. Aşınma miktarı ağırlık kaybı yöntemi $W_s = \Delta M / \rho * F * L$ formülü ile hesaplanmıştır[40,51,54,55,56,57,66,68,69,70].

3.11 Porozite Ölçümü

Kaplamalara ait poroziteler SEM görüntülerinden faydalanarak image analiz yöntemi ile ASTM B276 standardına göre kesitten ölçülmüştür (Şekil. 3.16).

¹ WC Tungsten karbür 2050 HV_{0,3}, Al₂O₃ alüminyum oksit 1600 HV_{0,3}



Şekil 3. 9 Porozite ölçümü yapmak için kullanılan SEM görüntüsü 300X

Plazma sprey kaplama yöntemi sonucu oluşan porozite, kaplama içerisindeki boşluklardır. Yönteme ve kaplama tozuna bağlı olarak porozite kaplama içerisinde %20 oranlarına kadar bulunabilir. Porozite, kaplamanın korozyona uğramasına ve yapışma mukavemetini azalmasına neden olduğu için istenmeyen bir özelliktir. Ancak, termal bariyer kaplamalarda ısıl iletimi azalttığı için bu özellik bir avantaj olarak değerlendirilmektedir.

4. BÖLÜM

SONUÇ VE ÖNERİLER

4.1 Kaplamaların Karakterizasyonu

Termal bariyer kaplamaların detaylı mikro yapı analizleri, kaplama morfolojisi, poroziteleri, dikey ve yatay çatlak oluşumları hakkında bilgi edinmek üzere kesitten ve yüzeyden SEM görüntüleri alınmıştır.

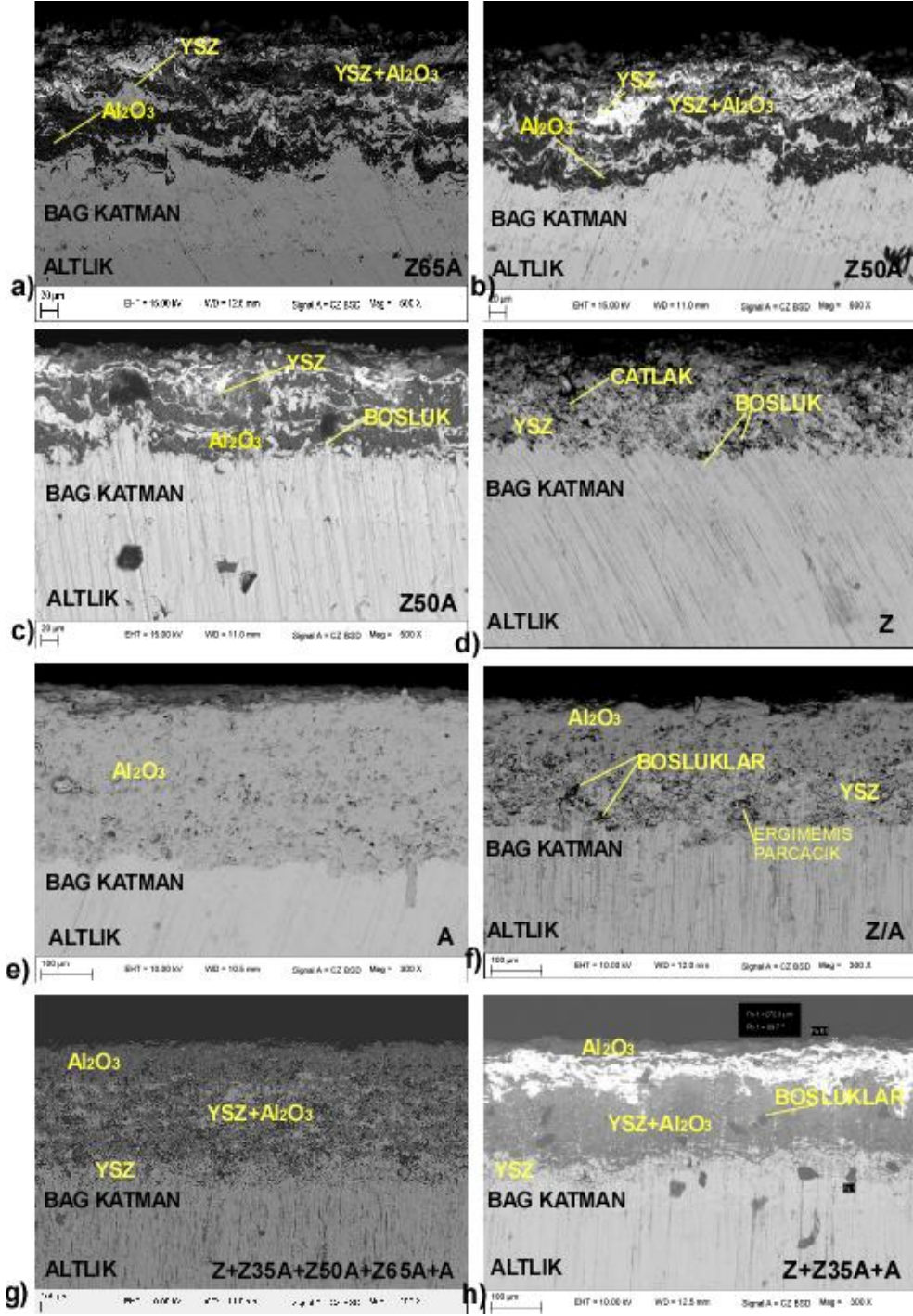
Kaplamaların EDS analizleri seramik katman ve metalik katmanı oluşturan elementlerin kaplama kalınlığı boyunca dağılımı görmek için alınmıştır.

SEM görüntülerinde, altlık malzemenin yeterince pürüzlendirildiği ve bağ katmanının altlık malzemeye bağlanmasının iyi olduğu anlaşılmaktadır. APS mikro yapının yüzeye paralel ve homojen olarak oluştuğu görülmektedir. Kaplama öncesi yüzey pürüzlülüğünün artırılması sayesinde yüzeye dik yapılarında oluştuğu görülmektedir. Bağ katman ile seramik katman arasında ayrılmalara neden olacak herhangi bir çatlaklar oluşumu ve porozite görülmemektedir. Bu da bağ katman ile altlık malzemenin iyi yapıştığını göstermektedir.

Kaplamaların mikro yapı görüntüleri incelendiğinde; atmosferik plazma sprey yöntemi ile yapılan kaplamaların kimyasal bağlanma yerine mekanik bağlanma ile bağlandığı görülmektedir. Kompozit kaplamalara ait görüntüler (Şekil 4. 1 a,b,c) incelendiğinde beyaz olarak görülen yerler YSZ kaplama siyah olanlar Al_2O_3 tozlarına aittir. YSZ

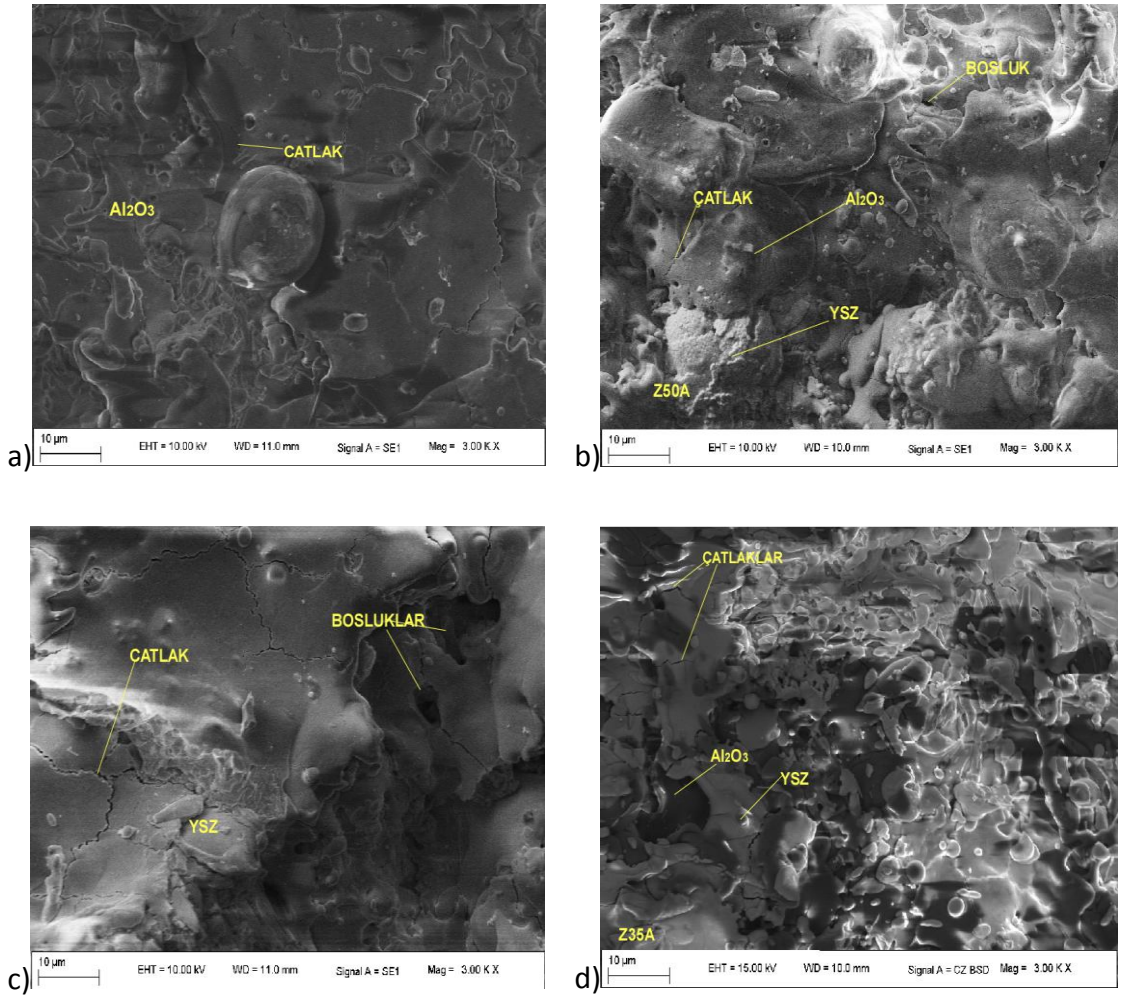
içerisinde Al_2O_3 dağılımı net olarak görülmekte olup Al_2O_3 oranının artması poroziteyi kısmen düşürmüştür. Görüntülerdeki siyah bölgeler Al_2O_3 beyaz bölgeler ise YSZ'ye aittir. Ayrıca, mikro yapıda gözenekler net bir şekilde gözükmemekte olup YSZ oranına bağlı olarak gözenekli yapının arttığı görülmektedir. Bunun nedeni plazma sprej kaplama esnasında zirkonya ve alüminyum oksit parçacıklarının soğuma oranlarının farklı olmasıdır. Soğuma farkları, birçok mikro çatlak oluşmasına neden olmaktadır. YSZ'ye ait olan şekil 4. 1 d gözeneklerin diğer kaplamalara göre daha çok olduğu ve yapının dalgalı olduğu görülmektedir. A kodlu %100 Al_2O_3 içeren şekiller diğerlerine göre daha yoğun bir yapıya sahiptir (Şekil 4. 1 e). Z/A kaplama numunesinde YSZ gözenekli yapısı ile altta üzerinde daha az gözenekli yapıya sahip olan Al_2O_3 tabakası görülmektedir (Şekil 4. 1 f).

Şekil 4. 1'de görüldüğü üzere YSZ kaplama Al_2O_3 göre daha yoğunluk ve poroziteli bir yapıya sahiptir. Bu poroziteler oksijenin hızlı bir şekilde kaplamanın içine doğru transfer olmasına neden olmaktadır. Bütün kaplamalarda, ergimemiş veya yarı ergimmiş parçacıklar görülmektedir olup bu parçacıkların etrafında oksitler ve poroziteler meydana gelmektedir. Ayrılmalar ilk olarak bu boşluklardan başlamaktadır.

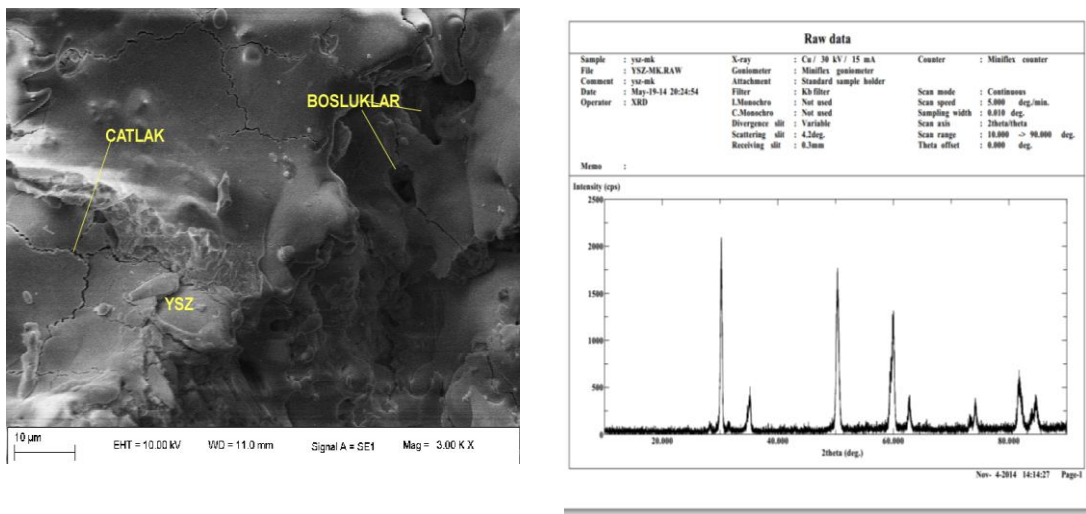


Şekil 4. 1 Kaplamalara ait SEM görüntüleri a) Z65A, b) Z50A, c)Z35A, d)Z, f)YSZ/Al₂O₃, g) Z+Z35A+Z50A+Z65A+A, h) Z+Z35A+A

Şekil 4. 2 kaplamaların yüzeyinden alınan SEM görüntülerine bakıldığında, bazı mikro çatlaklar görülmektedir bu çatlaklara, plazma sprej kaplama esnasında parçacıkların ani soğuması sonucu meydana gelen termal gerilmeler sebep olmaktadır. Bu çatlaklar TBK'ların termal şok dayanımlarını ve gerilme toleranslarını artırmaktadırlar.



Şekil 4. 2 APS kaplanmış YSZ kaplamalara ait SEM görüntüsü, a) A, b) Z50A, c)Z, d)Z35A

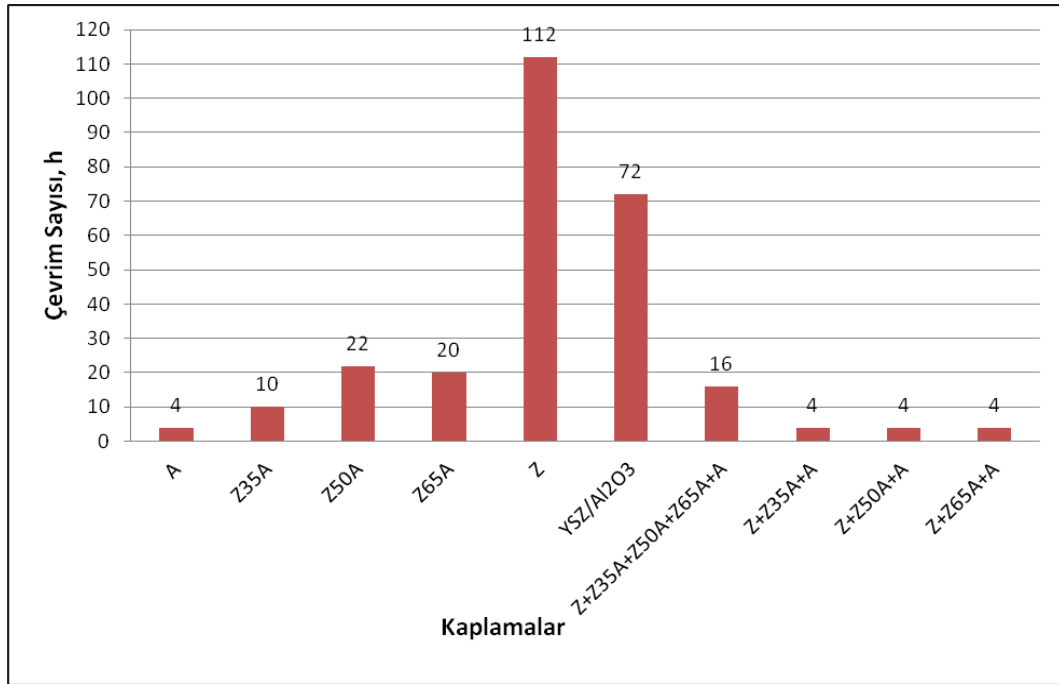


Şekil 4. 3 PS kaplanmış YSZ kaplamaya ait XRD görüntüsü

4.2 Termal Oksidasyon Deneyi

Oksidasyon deneyi, 1050 °C sıcaklıkta kaplamalarda bozulma meydana gelene kadar yapılmıştır. Al₂O₃ yoğun yapısından dolayı oluşan termal gerilmeler ve faz dönüşümü oksidasyon dayanımını düşürmektedir. Oksidasyon deneyi sonrası APS Al₂O₃ faz dönüşüm miktarını belirlemek için XRD analizleri yapılmıştır.

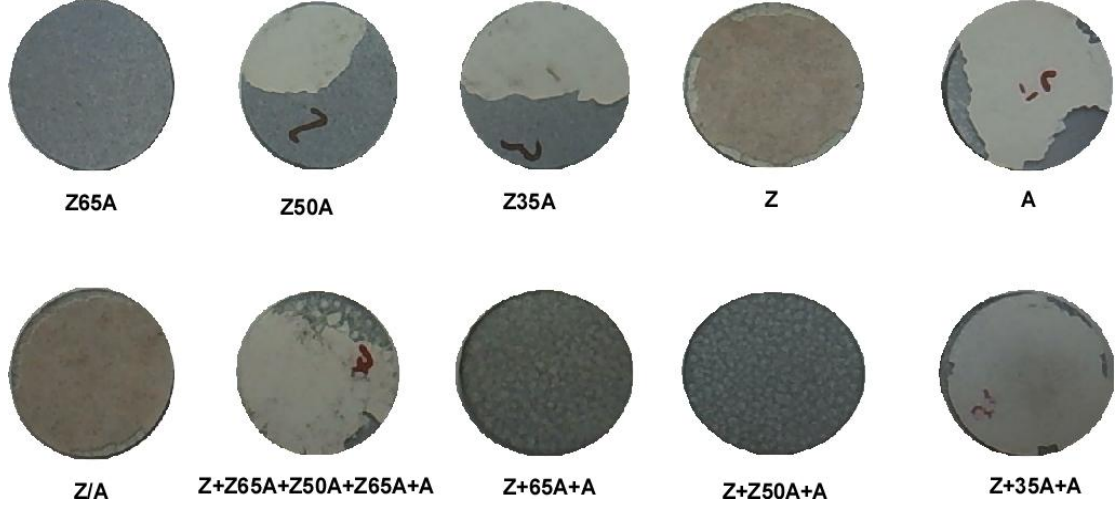
Plazma sprej işlemi sırasında oluşan kübik γ -Al₂O₃ fazının büyük kısmı sıcaklığın etkisiyle daha kararlı yapıya sahip olan α -Al₂O₃ dönüşmektedir. Katmanların ayrılması ve kaplama hasarlarının başlıca nedeni faz dönüşümü sırasında meydana gelen hacim değişimi ve sinterlenmeden kaynaklanan porozite değişimidir. Diğer bir etken ise termal genişleme Al₂O₃ ile altlık ve diğer seramik malzeme arasındaki termal genişleme farklılıkları sonucu oluşan gerilmelerdir.



Şekil 4. 4 Oksidasyon deney sonuçlarının gösterimi

Ayrıca, makro görüntüler incelendiğinde Al₂O₃ oranı fazla olan kaplamalarda oksidasyon deneyi sonrası ayrılmanın doğrudan bağ katmandan olduğu ancak seramik kaplamanın herhangi bir bozulmaya uğramadığı görülmektedir. YSZ içerisinde Al₂O₃; YSZ'nin faz dönüşümünü azaltmak, kaplamada TGO oluşumu için depo görevi yapmak ve yoğun yapısı sayesinde oksijenin alt kısımlara sızmasını engellemek gibi birçok

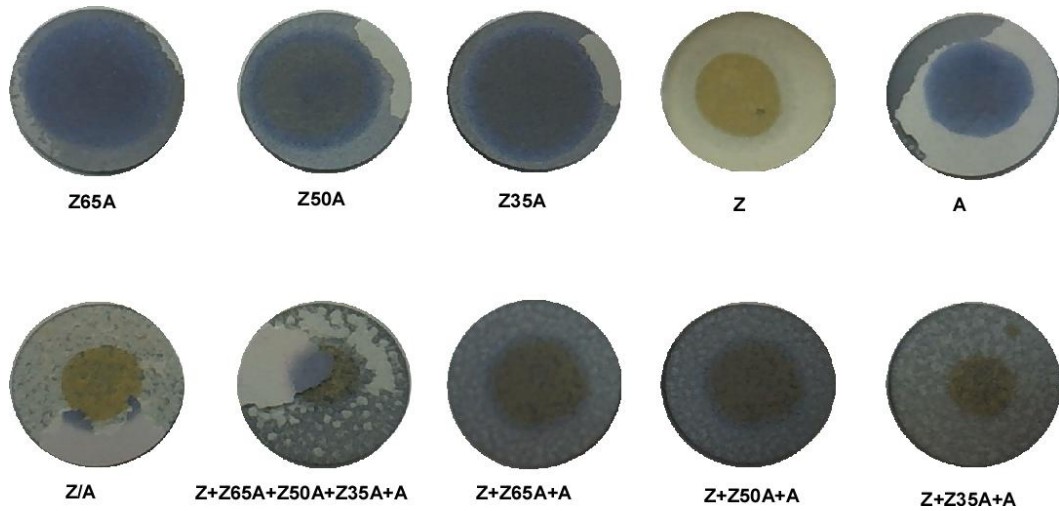
avantajının yanında termal gerilmelere çok çabuk maruz kalması ve altlık malzeme ile termal genişleme katsayısı farkının büyük olması kaplamada ayrılmalara neden olmaktadır.



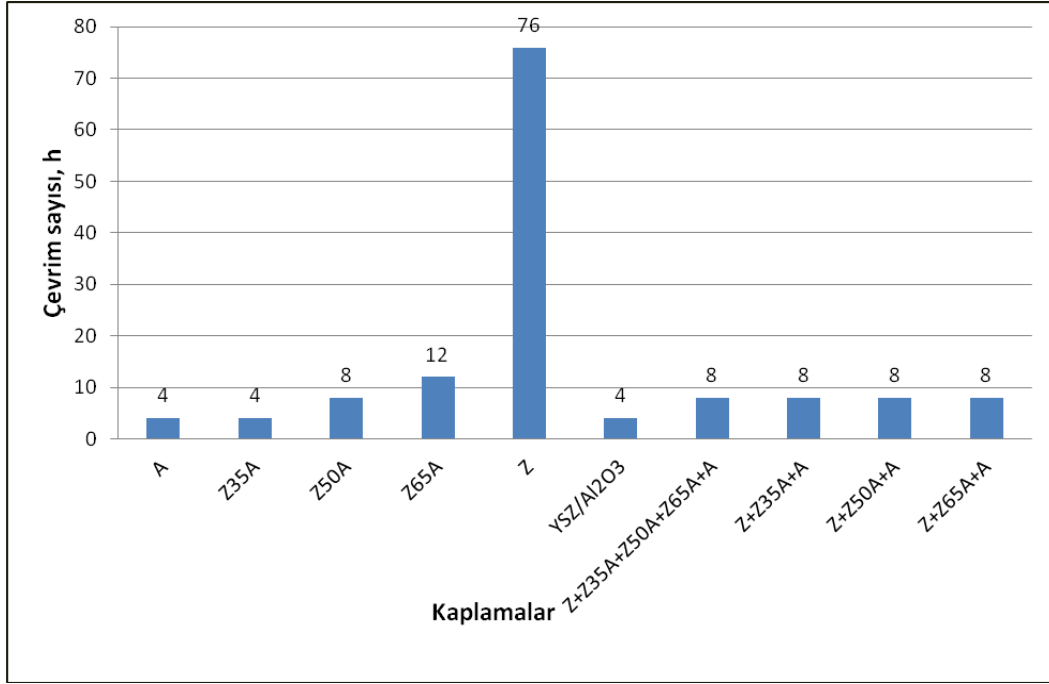
Şekil 4. 5 Oksidasyon deney sonucu kaplamaların makro görüntüleri

4.3 Sıcaklık Korozyonu Deneyi

Kaplamaların yüzeyinde oluşan mikro çatlaklar ergimiş korozyon tuzunun kaplamanın altlık kısmına doğru sızmakta ve kaplama malzeme ile reaksiyona girmektedir. Alümina ilavesi ile daha yoğun bir kaplama yüzeyi elde edilerek korozyon tuzlarının kaplamanın alt kısımlarına sızması azaltılmıştır.



Şekil 4. 6 Sıcaklık korozyonu sonrası kaplamaların makro görüntüleri

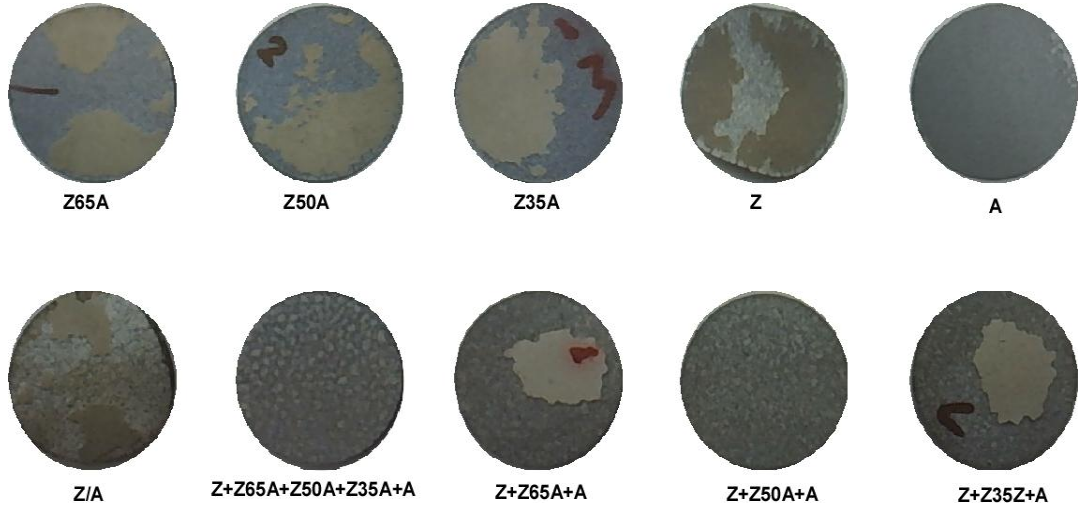


Şekil 4. 7 Kaplamaların sıcaklık korozyonu dayanımları

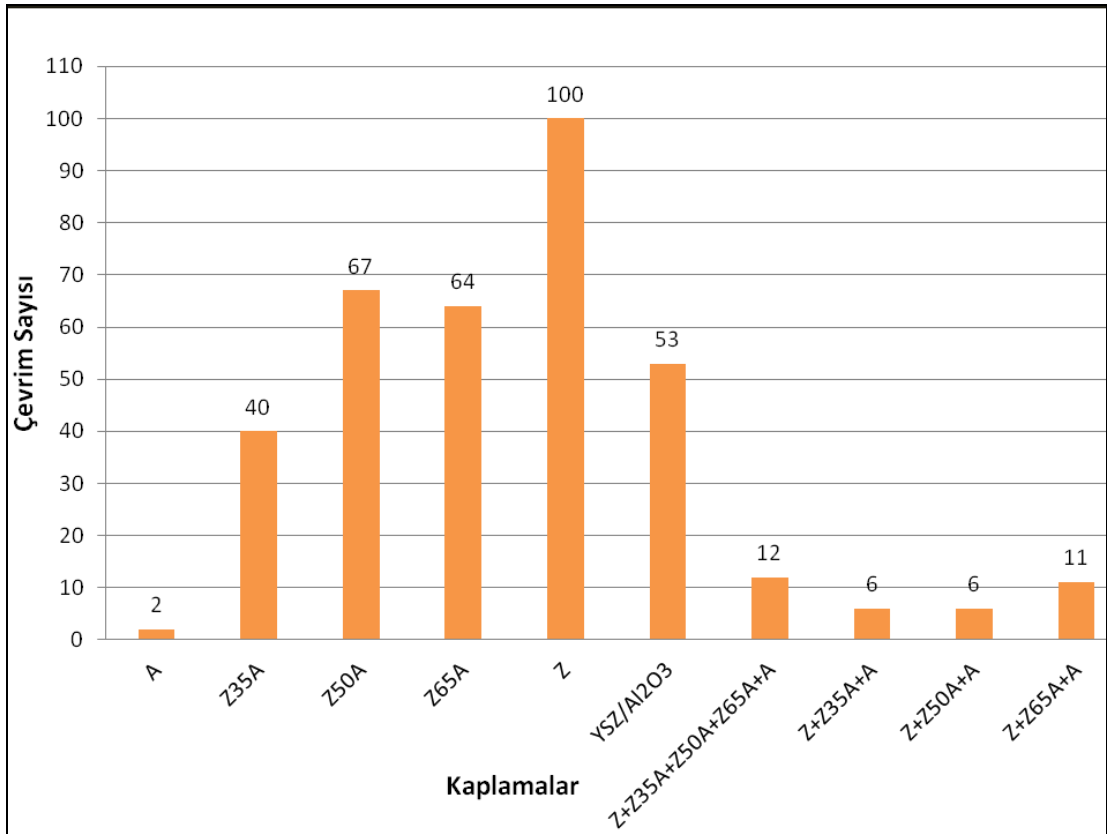
4.4 Termal Şok Deneyi

Şekil 4. 9 'da termal şok deneyi sonuçları incelendiğinde, sırasıyla Z, Z50A, Z65A, Z/A VE Z35A kaplamalarının çevrim sayısının iyi olduğu görülmektedir. Al₂O₃ kaplamanın yoğun yapısı çok fazla ısının iletilmesine neden olduğu ve Al₂O₃ kaplamada meydana gelen gerilmelerden dolayı termal şok dayanımı çok düşük çıkmıştır. Atmosferik plazma spreY ZS kaplamaların poroziteli mikro yapısı sayesinde ısı iletim azaldığı ve termal şok direncini artığı anlaşılmıştır.

Şekil 4. 8 kaplamaların makro görüntülerine bakıldığında altlık malzemenin de termal çevrim sonucu deforme olduğu bunun sonucu olarak kaplamanın ayrıldığı görülmektedir. Termal şok deneyi sırasında belirli bir çevrim sayısını geçtikten sonra kaplamanın daha hızlı bozulduğu gözlemlenmiştir.



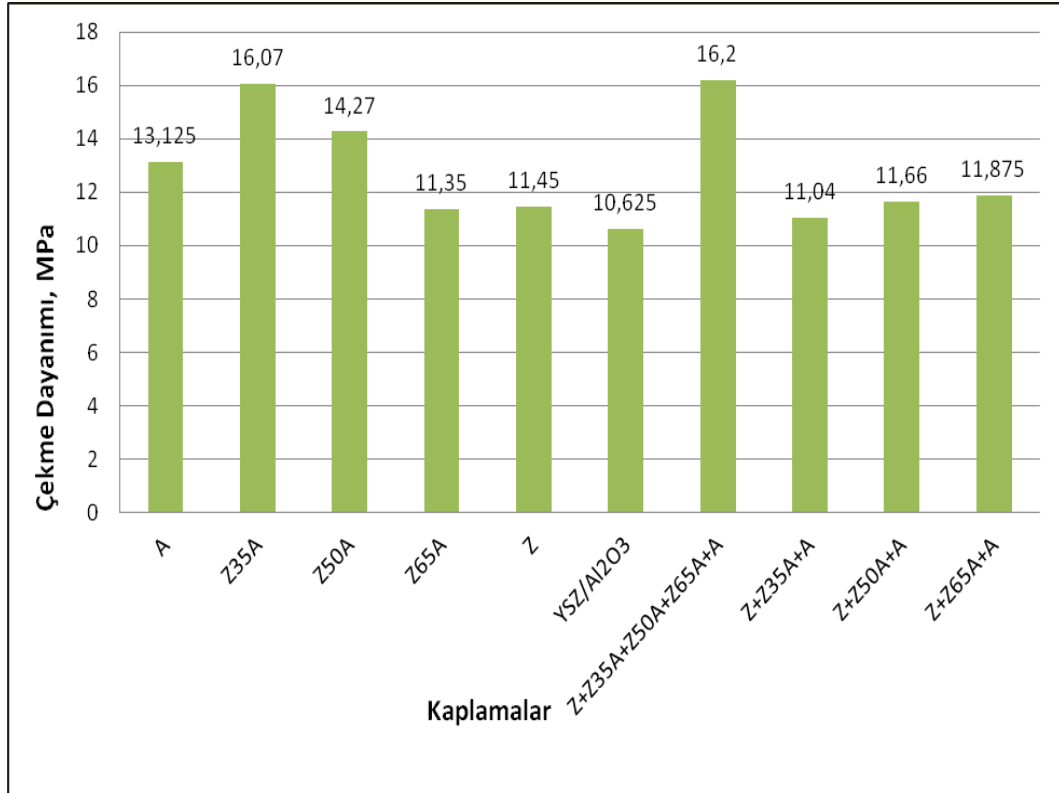
Şekil 4. 8 Termal şok deneyi sonrası kaplamaların makro görüntüleri



Şekil 4. 9 Kaplamaların termal şok dayanımları

4.5 Yapışma Mukavemeti Deneyi

Literatürde yapılan çalışmalarda, YSZ içerisine Al_2O_3 ilavesinin kaplamanın yapışma dayanımına etkisi farklı şekillerde değerlendirilmiştir. Son zamanlarda yapılan çalışmalarda, Al_2O_3 ilavesi ile kaplamaların ilavesinin kaplama dayanımını arttırdığı belirtilmiştir[20]. Tez çalışmamızda elde edilen sonuçlarda ise YSZ içerisinde Al_2O_3 oranının artması kaplama yapışma dayanımını arttırdığı görülmektedir. Yapışma mukavemeti deney sonuçları incelendiğinde, en iyi sonuç YSZ+ Al_2O_3 kompozit kaplamalardan elde edilmiştir. Z35A, Z50A, Z65A kaplamalarında sırasıyla, Al_2O_3 oranının artması doğru orantılı olarak yapışma dayanımını da arttırmıştır. Ağ. %YSZ ve % Al_2O_3 kaplamalar incelendiğinde YSZ'nin yapışma dayanımının Al_2O_3 'den daha düşük olduğu görülmektedir. En yüksek dayanımı gösteren Z+Z35A+Z50A+Z65A+A kaplamanın içerisindeki ağırlıkça Al_2O_3 oranının diğer tüm kaplamalardan daha yüksek olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 4. 10 Kaplamaların yapışma dayanımları

Çizelge 4. 1 Üretilen kaplamaların kalınlıkları

Kaplama bileşimi	Bağ katman kalınlığı, (µm)	Seramik katman kalınlığı, (µm)
A	93	318
Z65A	70	125
Z50A	79	127
Z35A	80	120
Z	95	190
Z/A	90	262
Z+Z35A+Z50A+Z65A+A	80	308
Z+Z35A+A	75	272
Z+Z50A+A	80	306
Z+Z65A+A	80	300

Kaplamaların kalınlıkları SEM cihazı ile kesitten ölçülmüş olup bağ katmana ve seramik üst katmana ait sonuçlar Çizelge 4. 6'da verilmektedir.

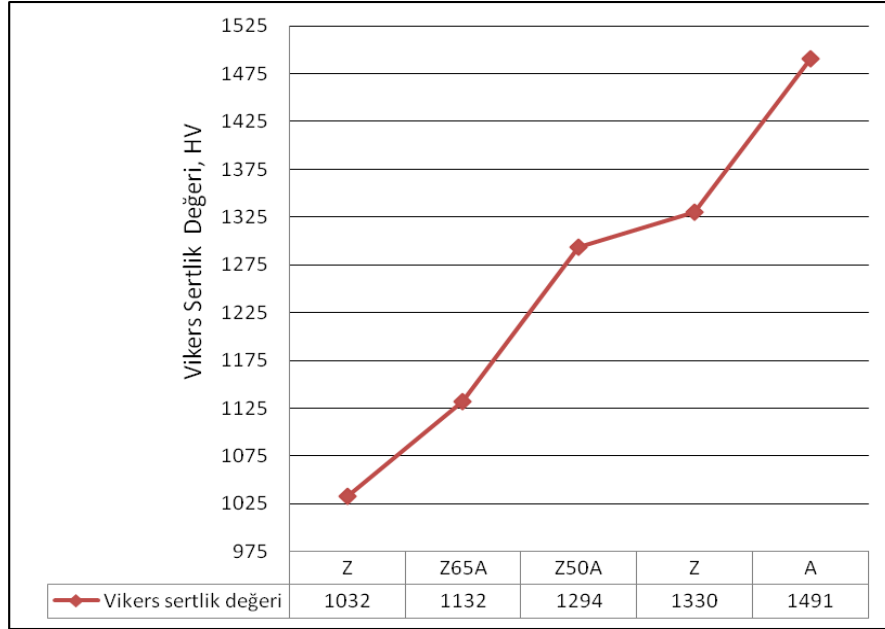
Şekil 4. 11'de çekme deneyi yapılmış kaplamalara ait makro görüntüler incelendiğinde; kaplamaların standarda uygun şekilde, bağ katmandan ayrıldığı görülmektedir.



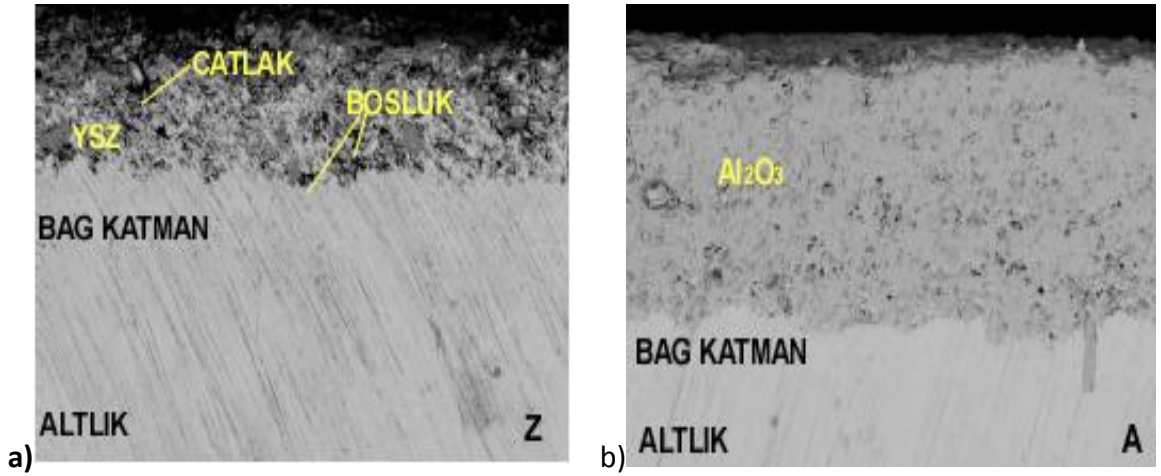
Şekil 4. 11 Çekme deneyi sonrası kaplamaların makro görüntüleri

4.6 Sertlik Deneyi

Kaplamaların vikers sertlik deney sonuçları incelendiğinde, YSZ içerisine ilave edilen Al_2O_3 sertlik değerini artırmaktadır. Sonuçlar, porozite değerleri ters orantı özelliği göstermektedir. Porozite değeri arttıkça sertlik değerinde düşmektedir. Şekil 4.12’de görüldüğü gibi, kaplama içerisinde Al_2O_3 oranı arttıkça vikers sertlik değeri HV 1032 ile HV 1491 arasında değişmektedir. Al_2O_3 ’nin ergime noktasının YSZ’den daha düşük olmasından dolayı Al_2O_3 oranının artması kaplamanın yoğunluğunu artırmakta ve porozitesini düşürmektedir. Şekil 4.13’de Al_2O_3 ’nin kesit görüntüsünün daha yoğun YSZ’nin daha poroziteli bir yapıya sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 4. 12 Kaplamaların vikers sertlik değeri sonuçları



Şekil 4. 13 a) YSZ SEM kesit görüntüsü, b) Al_2O_3 SEM kesit görüntüsü

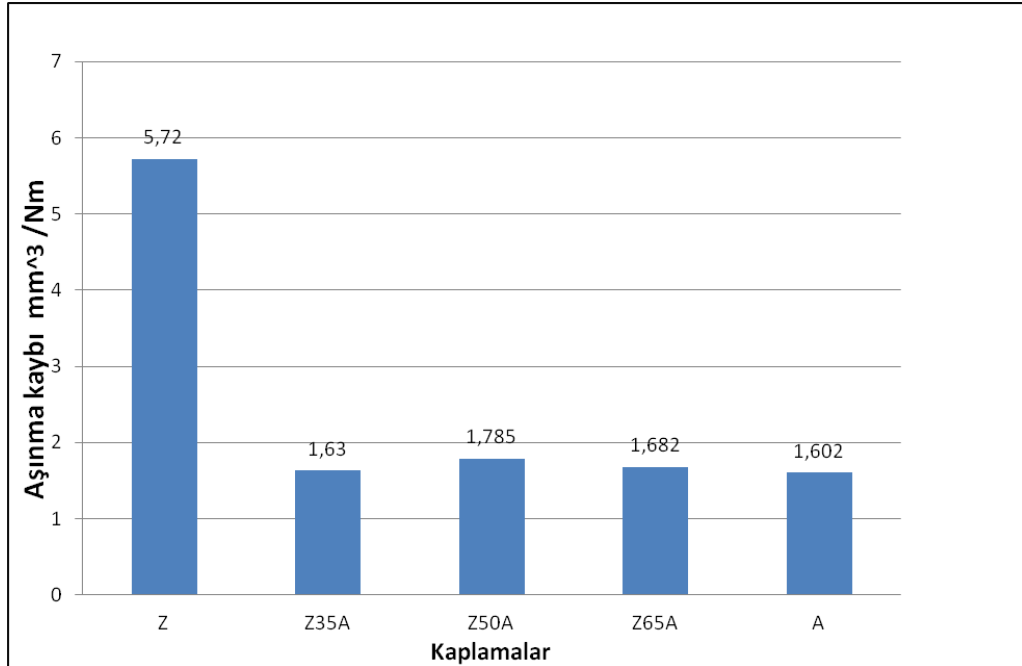
4.7 Aşınma Deneyi

Aşınma kaybına baktığımızda en çok kayıp YSZ'de en az kayıp ise Al_2O_3 kaplama malzemesinde meydana gelmiştir. YSZ+ Al_2O_3 kompozitler ise Al_2O_3 'ye çok yakın aşınma miktarı göstermişlerdir (Şekil 4.14). Buradan Al_2O_3 ilavesi aşınma kaybını azalttığı anlaşılmaktadır.

Çizelge 4. 3 Kaplamaların aşınma deneyi sonucu ağırlık kayıpları

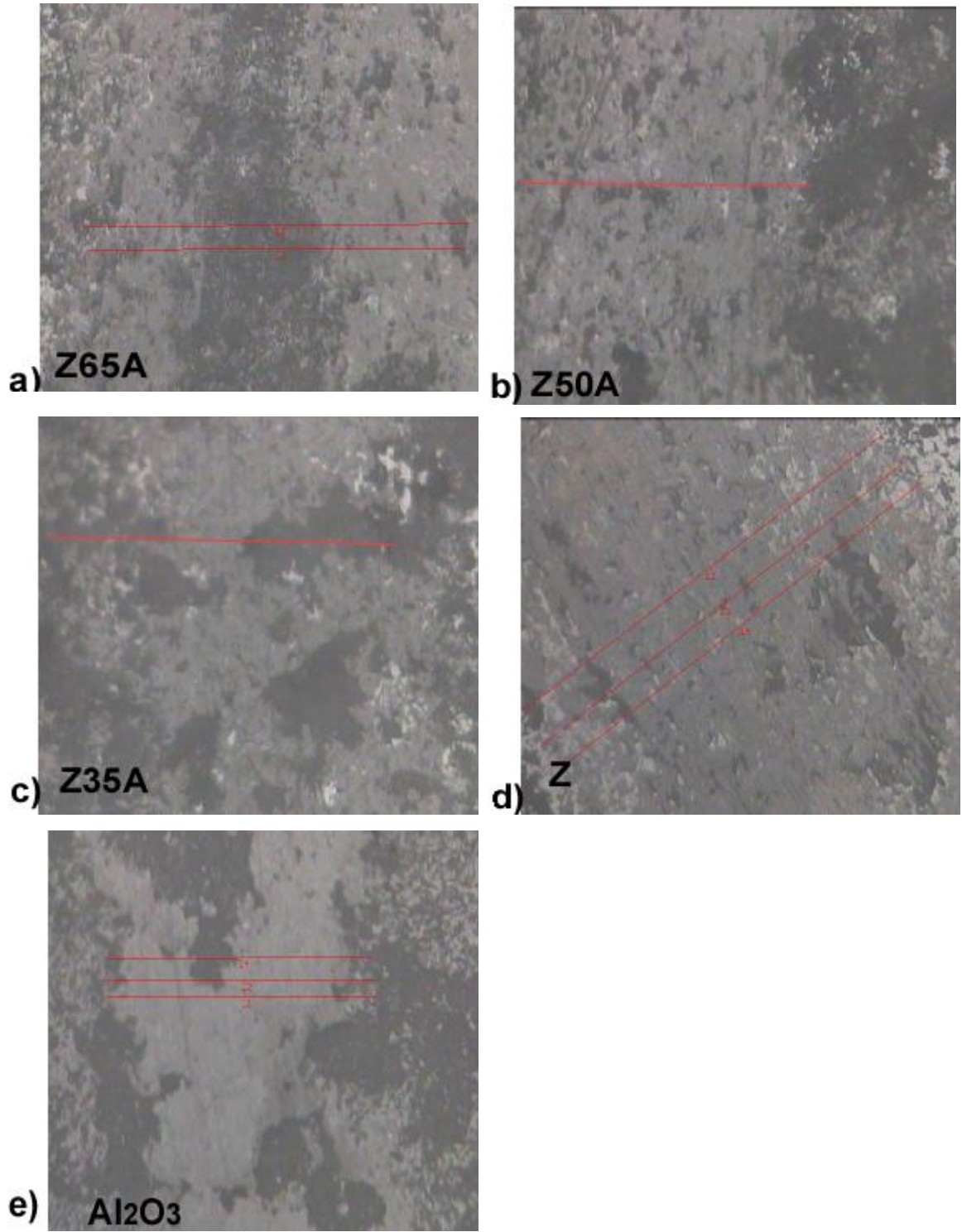
Numuneler	Z	Z65A	Z50A	Z35A	A
Yoğunluk (g/cm^3)	5,9	5,2	4,9	4,6	3,9
İlk Ağırlık (gr)	8,5278	8,1890	8,0996	8,1868	8,3216
Son Ağırlık(gr)	8,5251	8,1883	8,0989	8,1862	8,3211
Ağırlık Kaybı(gr)	0,0027	0,0007	0,0007	0,0006	0,0005

Aşınma miktarı, $W_s = \Delta M / \rho * F * L$ denklemi kullanılarak ve Çizelge 4. 2'de ölçülen ağırlık değerleri esas alınarak hesaplanmıştır.



4.14 Kaplamalara ait aşınma kaybı oranları

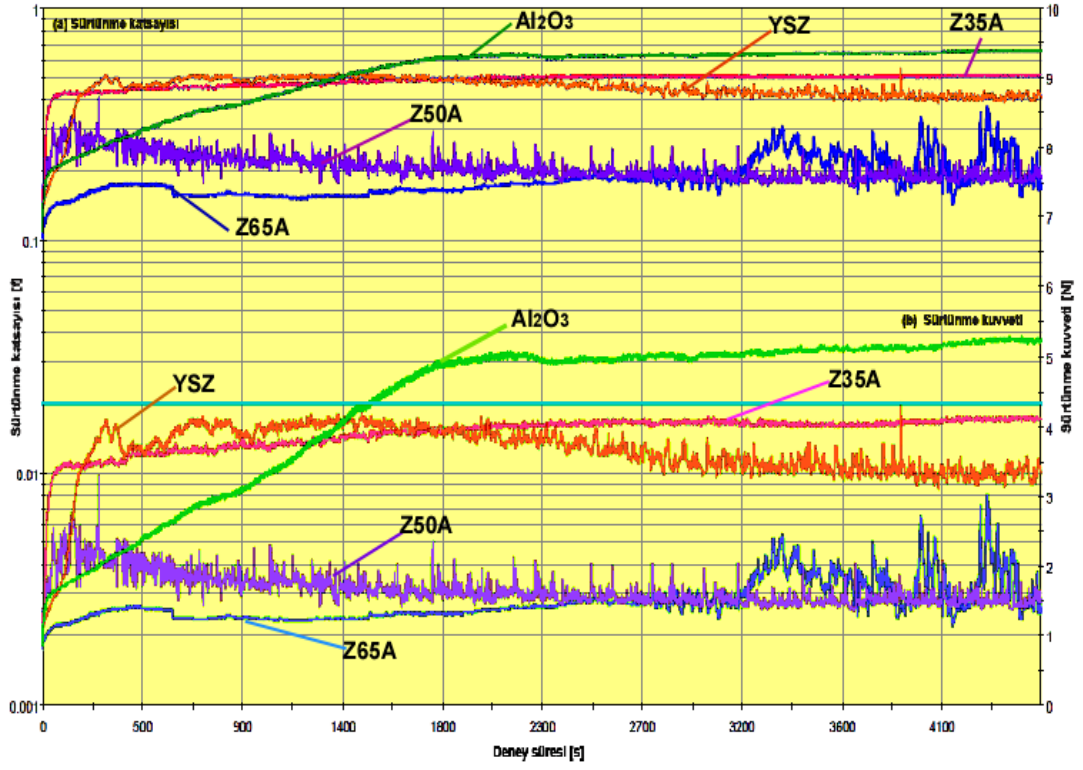
Bunun en önemli sebebinden birisi porozitedir çünkü porozite oranı yüksek (%13,3) olan YSZ'nin aşınma izlerini incelediğimizde; aşındırıcı yüzeyden daha kolay parçacık kaldırmaktadır. Kalkan parçacığı diğer bir parçacık takip etmekte ve eksen boyunca daha fazla aşınma meydana gelmektedir. Daha yoğun yapıya sahip olan Al_2O_3 'de ise aşınma miktarı çok azdır çünkü yoğun yapısı sayesinde aşındırıcının yüzeyden parçacık kaldırması çok daha zordur. Aşınma iz kalınlıkları ve yüzey pürüzlülükleri de aşınma miktarını etkilemektedir. Z35A numunesi yüksek Al_2O_3 içeriği yüksek ve yüzey pürüzlülük değeri düşük olduğu için aşınma kaybı ve aşınma iz kalınlığı az olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 4. 15). Z50A numunesinde her iki tozdan eşit miktarda bulunmaktadır. Kaplamanın aşınma miktarı, diğer kompozitlere göre özellikle Z65A ile kıyasladığımızda birbirine çok yakın bir değer çıkmıştır. Bunun nedeni, yüzey pürüzlülüğü değerinin diğer tüm kaplamalara göre fazla olmasıdır. Aşınma iz kalınlığı da yüzey pürüzlülüğüne bağlı olarak artmıştır. Z65A numunesi ağırlık %65 oranında YSZ içermesine rağmen aşınma miktarı düşük çıkmıştır. YSZ içersine farklı oranlardaki Al_2O_3 ilavesi aşınma miktarını ciddi oranda düşmesini sağlamaktadır.



Şekil 4. 15 Kaplamalara ait aşınma izleri: a) YSZ, b) Al₂O₃, c) Z65A, d) Z50A, e) Z35A

Şekil 4. 16'da aşınma deneyi sonucu oluşan grafikler verilmekte olup her bir kaplama için sürtünme katsayısı ve sürtünme kuvveti değerleri görülmektedir. Şekil 4. 15 incelendiğinde; Al₂O₃ hariç diğer tüm kaplamaların başlangıç ve bitiş sürtünme katsayısı ve sürtünme kuvveti değerlerinde büyük fark olmadığı görülmektedir. Sadece

deney sonuna doğru Z65A kaplamasının ağırlıkça %65 YSZ içerdiğinden YSZ'den kaynaklanan sürtünme kuvvetinde artış olduğu görülmektedir.



Şekil 4. 16 Aşınma deneyi sonucu oluşan kaplamalara ait grafikler

Aşınma deneyi öncesi kaplamaların yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüş olup Çizelge 4.3'te verilmektedir. Aşınma sonuçlarının karşılaştırma yapılabilmesi için ortalama yüzey pürüzlülük değeri her bir kaplama için yaklaşık $0,74 \pm 0,05$ olarak ölçülmüştür.

Çizelge 4. 3 Kaplamaların aşınma deneyi öncesi yüzey pürüzlülük değerleri, aşınma iz kalınlıkları ve sürtünme kat sayıları

Kaplama Numunesi	Aşınma iz kalınlıkları (μm)	Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü R_a ,	Sürtünme Katsayısı
A	473	0,7	0,540
Z35A	540	0,709	0,484
Z50A	874	0,795	0,208
Z65A	650	0,744	0,190
Z	737	0,761	0,454

4.8 YüzeY Pürüzlülüğü Ölçümü

YüzeY pürüzlülüğü değerleri (Ra) porozitenin artması ile artmaktadır. YSZ'nin pürüzlülük değerinin Al₂O₃ 'e göre daha yüksek olduğu anlaşılmıştır. YSZ içerisine Al₂O₃ ilavesi pürüzlülüğü düşürmektedir. YüzeY pürüzlülüğü değerleri sertlik ve aşınma deneyi öncesi ortalama Ra değerini kontrol etmek için yapılmıştır.

4.9 Porozite Ölçümü

Yapılan alışmalar sonucunda plazma spreY yöntemi ile kaplanmış YSZ'nin porozite oranının Al₂O₃ 'e göre çok büyük olduğu belirlenmiştir. Al₂O₃ kaplamanın ise porozite değerinin düşük ve daha yoğun bir yapıya sahip olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca, YSZ içerisinde Al₂O₃ oranının artması poroziteyi düşürmektedir. Çizelge 3. 4'de YSZ, Al₂O₃ ve ağ. %50 YSZ+%50 Al₂O₃ kaplamalara ait porozite sonuçları verilmektedir.

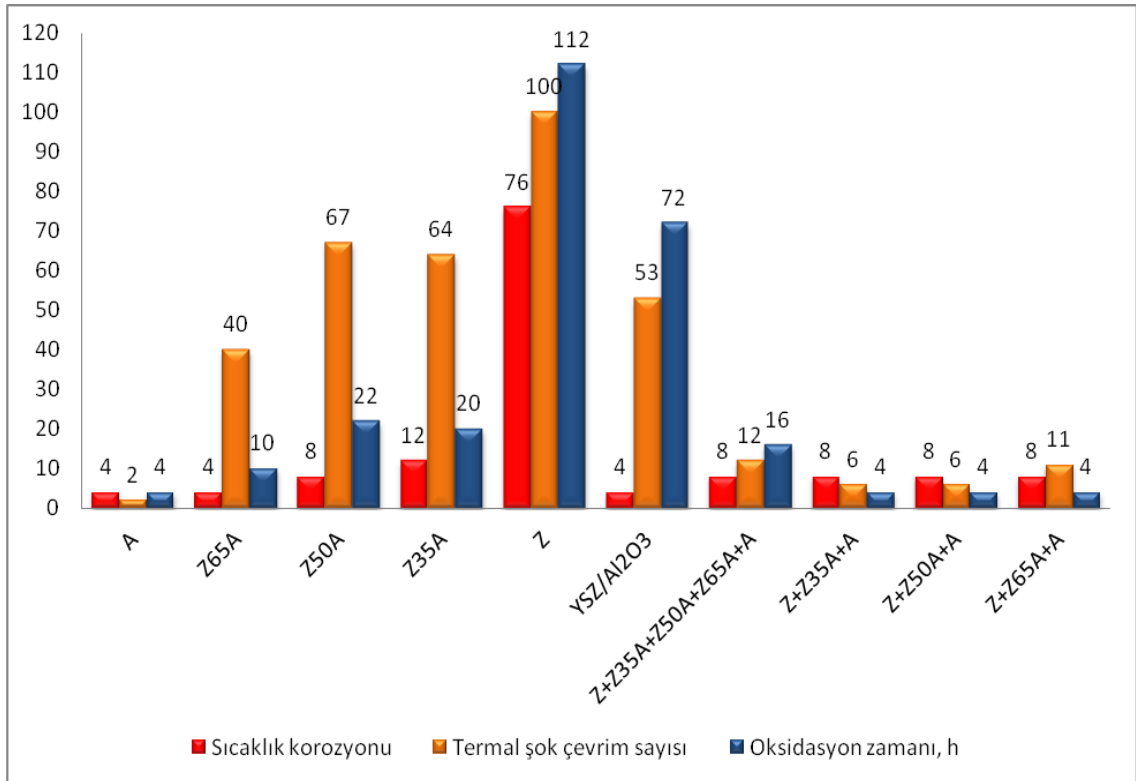
Çizelge 4. 4 Kaplamalara ait porozite miktarları

Kaplama Numunesi	Porozite (%)	Maksimum Çevre Uzunluğu	Minimum Çevre Uzunluğu(μm)	Maksimum Alan(μm ²)	Minimum Alan (μm ²)
YSZ	13,3	3376.3217	4.5320	4.5320	607472,27
Al ₂ O ₃	3,39	3648,24	4,5320	4,5320	771406,56
Z50A	6,5	3748,24	4,5320	4,5320	771406,56

Plazma spreY yöntemi ile üretilen YSZ'nin porozite değerleri yüksek olduğu anlaşılmıştır. Yapılan aşınma ve sertlik deneyleri sonrası yüksek porozitenin kaplamanın aşınma miktarını artırdığı ve sertliğini azalttığı belirlenmiştir. Ancak, poroziteli yapıya sahip YSZ, porozite hem ısı iletkenliği azalttığı hem de gerilme birikmelerine müsaade etmediği için çok iyi termal çevrim dayanım göstermiştir.

4.10 Öneriler

Kaplamalara uygulanan sıcaklık korozyonu, termal şok ve oksidasyon deney sonuçlarının tümü Şekil 4. 16'da tek bir grafikte verilmektedir. YSZ kaplama malzemesi tüm deneyler de en iyi sonuç vermiştir. YSZ/ Al₂O₃ kaplamanın sıcaklık korozyonu dayanımı hariç termal şok dayanımı ve oksidasyon dayanımının iyi olduğu görülmektedir. Z65A, Z50A ve Z35A kompozit numuneleri diğer Z+Z65A+Z50A+Z35A+A, Z+Z65A+A, Z+Z50A+A, Z+Z35A+A kademeli kompozit numunelere göre çok daha iyi sonuç göstermiştir. +Z65A+Z50A+Z35A+A, Z+Z65A+A, Z+Z50A+A, Z+Z35A+A kaplamaları literatürden farklı olarak denenmiştir ancak kaplamaların korozyon, oksidasyon ve termal şok dayanımlarının çok düşük çıkmıştır. Bunun nedeni; YSZ içerisindeki Al₂O₃ oranının artması sonucu iç gerilmelerin oluşmasıdır.



Şekil 4. 17 Sıcaklık korozyonu, oksidasyon ve termal şok dayanımlarının karşılaştırılması

KAYNAKLAR

-
- [1] Yao, R. (n.d.), Plasma-sprayed thermal barrier coatings with segmentation cracks, 161–174.
- [2] Keyvani, A., Saremi, M., Heydarzadeh, M., Valefi, Z., Yeganeh, M., ve Kobayashi, A. (2014). “Microstructural stability of nanostructured YSZ – alumina composite TBC compared to conventional YSZ coatings by means of oxidation and hot corrosion tests”. *Journal Of Alloys And Compounds*, 600:151–158. Doi:10.1016/j.jallcom.2014.02.004
- [3] Keyvani, A., Saremi, M., ve Heydarzadeh Sohi, M., (2010). “Microstructural stability of zirconia–alumina composite coatings during hot corrosion test at 1050°C”. *Journal of Alloys and Compounds*, 506(1):103–108. Doi:10.1016/j.jallcom.2010.06.110
- [4] Keyvani, A., Saremi, M., ve Sohi, M. H. (2011). Oxidation resistance of YSZ-alumina composites compared to normal YSZ TBC coatings at 1100°C. *Journal of Alloys and Compounds*, 509(33):8370–8377. Doi:10.1016/j.jallcom.2011.05.029
- [5] Afrasiabi, A., Saremi, M., ve Kobayashi, A., (2008). “A comparative study on hot corrosion resistance of three types of thermal barrier coatings: YSZ, YSZ+ Al₂O₃ and YSZ/Al₂O₃”. *Materials Science and Engineering: A*, 478(1-2):264–269. Doi:10.1016/j.msea.2007.06.001
- [6] Saremi, M., Afrasiabi, A., ve Kobayashi, A., (2008). “Microstructural analysis of YSZ and YSZ/ Al₂O₃ plasma sprayed thermal barrier coatings after high temperature oxidation”. *Surface and Coatings Technology*, 202(14):3233–3238. Doi:10.1016/j.surfcoat.2007.11.029
- [7] Zhu, C., Javed, A., Li, P., Yang, F., Liang, G. Y., ve Xiao, P., (2012). “A study of the microstructure and oxidation behavior of alumina/yttria-stabilized zirconia (Al₂O₃/YSZ) thermal barrier coatings”. *Surface and Coatings Technology*, 212:214–222. Doi:10.1016/j.surfcoat.2012.09.052
- [8] Karaoglanli, A. C., Altuncu, E., Ozdemir, I., Turk, A., ve Ustel, F., (2011). “Structure and durability evaluation of YSZ+Al₂O₃ composite tbc's with APS

- and HVOF bond coats under thermal cycling conditions”. *Surface and Coatings Technology*, 205:S369–S373. Doi:10.1016/j.surfcoat.2011.04.081
- [9] J.R.Davis,(2004). *Handbook of Thermal Spray Technology*,ASM.
- [10] A.John Willey, (2008). *Progress in Thermal Barrier Coatings*,The American Ceramaic Society.
- [11] Huibin, X.,veHong,G., (2011). *Thermal barrier coatings*, Limited, W. P. Publishing,Sawston,302p.
- [12] Cantor,B.,(2001), *Aerospace Materials, Series in Materials Science and Engineering Fundamentals of Fibre Reinforced Composite Materials*,The Institute of Physics, London.
- [13] Blomqvist, C. (2014). *Thermal barrier coatings for diesel engine exhaust application*, Master Thesis,Science Institu,Stockholm.
- [14] Dalkılıç, S.,(2007). *Bir Termal Bariyer Kaplama Sisteminin Yorulma Davranışının İncelenmesi*, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [15] Wikipedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Inconel>, 20 Kasım 2015.
- [16] Giampaolo, T. (2003). *The Gas Turbine Handbook: Principles and Practice. Control* (p. 451).
- [17] Oberste Berghaus, J., Legoux, J.G., Moreau, C., Tarasi, F., ve Chráska, T, (2007). “Mechanical and Thermal Transport Properties of Suspension Thermal-Sprayed Alumina-Zirconia Composite Coatings”. *Journal of Thermal Spray Technology*, 17(1):91–104. Doi:10.1007/s11666-007-9146-0
- [18] Kahraman,Y., (2011). *Termal bariyer kaplı gaz türbin kanatlarında çalışma esnasında oluşan gerilmelerin modellenmesi ve analizi*, Doktora Tezi,Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [19] Osorio, J. D., Toro, A., ve Hernández-ortiz, J. P., (2012). “Thermal barrier coatings for gas turbine applications failure mechanisms and key microstructural features recubrimientos de barrera térmica para aplicación en turbinas a gas: mecanismos de falla y principales características microestructurales, 149–158.
- [20] Altuncu, E., Üstel, F., ve Erdoğan, G., (2007). *Sıcak Korozyon Ortamının Plazma Sprey Tekniği ile Üretilmiş Termal Bariyer Kaplamalar Üzerine Etkileri*
- [21] Sreedhar, G., Alam, M. M., ve Raja, V. S., (2009). “Hot corrosion behaviour of plasma sprayed YSZ/Al₂O₃ dispersed nickel coatings on Inconel-718 superalloy”. *Surface and Coatings Technology*, 204(3):291–299. Doi:10.1016/j.surfcoat.2009.07.026
- [22] Karaoglanli, A. C., ve Ogawa, K., (2014). *Thermal Shock and Cycling Behavior of Thermal Barrier Coatings (tbc) Used in Gas Turbines*.
- [23] Bhatia, A., (1999). *Thermal Spraying Technology and Applications*, (877).

- [24] Wikipedia, http://tr.wikipedia.org/wiki/Kristal_yap%C4%B1, 10Ocak 2015.
- [25] High Temperature Coatings, Sudhangshu Bose, H. T. (n.d.).
- [26] Saral, U., Alümina İlavesinin YSZ Termal Bariyer Kaplamaların Mikro Yapı Üzerine Etkileri(2007). Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [27] BENGİ, T., Termal Bariyer Kaplamaların Isıl Özelliklerinin İncelenmesi Ve Düşük Termal İletkenlik İçin Parametre Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [28] Saral,U., ve Toplan N., YSZ Termal Bariyer Kaplamaların Mikroyapısal Ve Mekanik Özelliklerine Alümina İlavesinin Etkisi,The Effect of Al₂O₃ Addition On The Microstructure And Mechanical Properties Of YSZ Thermal Barrier Coatings. VII. Seramik Kongresi.
- [29] Çiftyürek, E., %8 YSZ (İtiryum İle Stabilize Edilmiş ZrO₂) Termal Bariyer Kaplamaların (Tbk) Üretilmesi Ve Proses Parametreleri Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [30] Gao, J., He, Y., ve Wang, D., (2011). "Preparation of YSZ/Al₂O₃ micro-laminated coatings and their influence on the oxidation and spallation resistance of mcraly alloys". Journal of the European Ceramic Society, 31(1-2):79–84. Doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2010.08.010
- [31] Azhar, A. Z. A., Ratnam, M. M., ve Ahmad, Z. A., (2009). "Effect of Al₂O₃/YSZ microstructures on wear and mechanical properties of cutting inserts". Journal of Alloys and Compounds, 478(1-2):608–614. Doi:10.1016/j.jallcom.2008.11.156
- [32] Cao XQ, Vassen R, Jungen W, Schwartz S, Tietz F, Stöver D.,(2001) "Thermal Stability of Lanthanum Zirconate Plasma-Sprayed Coating". Journal of the American Ceramic Society;84(9):2086-2090.
- [33] Mishra, S. K., Pandey, S., Mahato, P., Kumar, K. S., Bysakh, S., Sreemany, M., ve Pathak, L. C., (2012). "Microstructural studies on EB-PVD deposited nicraly, YSZ and lanthanum zirconate for thermal barrier applications". Surface and Coatings Technology, 207:143–148. Doi:10.1016/j.surfcoat.2012.06.045
- [34] Racek O, Berndt CC, Guru DN, Heberlein J.,(2006). Nanostructured and conventional YSZ coatings deposited using APS and TTPR techniques. Surface and Coatings Technology;201(1-2):338-346.
- [35] Yaşar, H.,(1997). Termal bariyer kaplamanın turbo doldurmalı bir dizel motorunun performansına etkileri, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [36] Özel, S., (2009). Alüminyum alaşımı ve bronzu yüzeyine oksit ve karbür bileşiklerinin plazma sprey yöntemiyle kaplanmasının araştırılması, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, Elazığ.

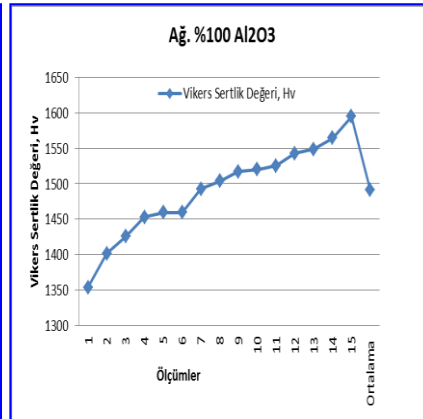
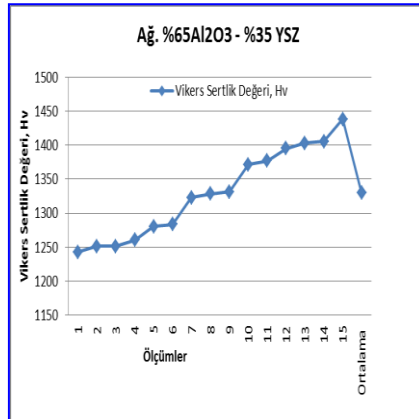
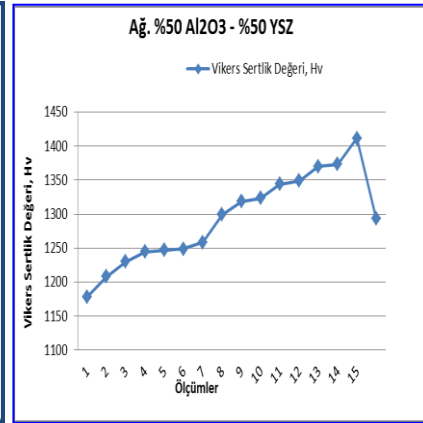
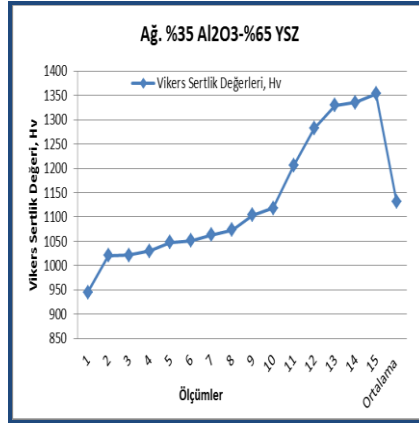
- [37] Haynes, J.A., Unocic, K.A., ve Pint, B.B., (2012). "Effect of water vapor on the 1100 °C oxidation behavior of plasma-sprayed tbc's with HVOF nicocrax bond coatings". *Surface and Coatings Technology*, 215:S39–S45. Doi:10.1016/j.surfcoat.2012.07.099
- [38] Aerospace Materials Series in Materials Science and Engineering Fundamentals of Fibre Reinforced Composite Materials. (n.d.).
- [39] Wang, S., Xu, C., Ding, Y., ve Zhang, X., (2013). "Thermal shock behavior of zrb₂-sic composite ceramics with added tasi₂". *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 41:507–516. Doi:10.1016/j.ijrmhm.2013.06.010
- [40] Darut, G., Ageorges, H., Denoirjean, a., ve Fauchais, P., (2013). "Tribological performances of YSZ composite coatings manufactured by suspension plasma spraying". *Surface and Coatings Technology*, 217:172–180. Doi:10.1016/j.surfcoat.2012.12.008
- [41] Akdoğan, V.,U., (2011). Termal Bariyer Kaplamaların Lazer İle Yüzey Modifikasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [42] Diltemiz, S.,F., (2010). Plazma Sprey Termal Bariyer Kaplamaların Isıl ve Mekanik Özelliklerinin Optimizasyonu, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [43] Özgören, Y., (2005). "Stirling Motorunda Termal Bariyer Kaplamanın Motor Performansına Etkilerinin Deneysel Olarak İncelenmesi", 122–133.
- [44] Ren, C., He, Y. D., ve Wang, D. R., (2011). "Cyclic oxidation behavior and thermal barrier effect of YSZ-(Al₂O₃/YAG) double-layer tbc's prepared by the composite sol-gel method". *Surface and Coatings Technology*, 206(6):1461–1468. Doi:10.1016/j.surfcoat.2011.09.02
- [45] Loghman-Estarki, M. R., Shoja Razavi, R., Edris, H., Pourbafrany, M., Jamali, H., ve Ghasemi, R., (2014). "Life time of new SYSZ thermal barrier coatings produced by plasma spraying method under thermal shock test and high temperature treatment". *Ceramics International*, 40(1):1405–1414. Doi:10.1016/j.ceramint.2013.07.023
- [46] Ren, C., He, Y. D., ve Wang, D. R., (2011). "Preparation and characteristics of three-layer YSZ-(YSZ/Al₂O₃)-YSZ tbc's". *Applied Surface Science*, 257(15):837–6842. Doi:10.1016/j.apsusc.2011.03.010
- [47] Sundberg, M., Malmqvist, G., Magnusson, a., ve El-Raghy, T., (2004). "Alumina forming high temperature silicides and carbides". *Ceramics International*, 30(7):1899–1904. Doi:10.1016/j.ceramint.2003.12.046
- [48] Shanmugavelayutham, G., Yano, S., ve Kobayashi, A., (2006). "Microstructural characterization and properties of Zro₂/ Al₂O₃ thermal barrier coatings by gas tunnel-type plasma spraying". *Vacuum*, 80(11-12):1336–1340. Doi:10.1016/j.vacuum.2006.01.056

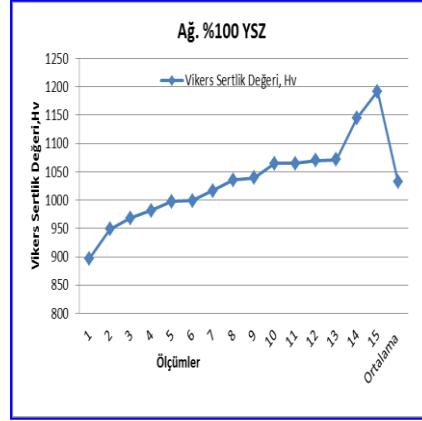
- [49] Keyvani, A., Saremi, M., Heydarzadeh, M., Valefi, Z., Yeganeh, M., ve Kobayashi, A., (2014). "Microstructural stability of nanostructured YSZ – alumina composite TBC compared to conventional YSZ coatings by means of oxidation and hot corrosion tests". *Journal Of Alloys And Compounds*, 600:151–158. Doi:10.1016/j.jallcom.2014.02.004
- [50] Saremi, M., Valefi, Z., ve Abaeian, N., (2013)." Hot corrosion, high temperature oxidation and thermal shock behavior of nanoagglomerated YSZ–Alumina composite coatings produced by plasma spray method". *Surface and Coatings Technology*, 221:133–141. Doi:10.1016/j.surfcoat.2013.01.038
- [51] Ghasemi, R., Shoja-Razavi, R., Mozafarinia, R., ve Jamali, H., (2013). "Laser glazing of plasma-sprayed nanostructured yttria stabilized zirconia thermal barrier coatings". *Ceramics International*, 39(8):9483–9490. Doi:10.1016/j.ceramint.2013.05.066
- [52] Ghasemi, R., Shoja-Razavi, R., Mozafarinia, R., ve Jamali, H., (2014). "The influence of laser treatment on thermal shock resistance of plasma-sprayed nanostructured yttria stabilized zirconia thermal barrier coatings". *Ceramics International*, 40(1):347–355. Doi:10.1016/j.ceramint.2013.06.008
- [53] Yao, J., Lv, L., He, Y., ve Wang, D., (2013). "Size effect of (Al₂O₃–Y₂O₃)/YSZ micro-laminated coating on high-temperature oxidation resistance". *Applied Surface Science*, 279:85–91. Doi:10.1016/j.apsusc.2013.04.039
- [54] Tennenhouse, R., ve Tests, F. D. P. W. (2013). *Pin-On-Disk Wear Tests for Evaluating Ceramic Cutting Tool Materials*, 43–57.
- [55] Method, S. T., (2013). *Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus 1*, 05(Reapproved 2010), 5–9. Doi:10.1520/G0099-05R10.2
- [56] Totten, G. E., Wedeven, L. D., ve Dickey, J. R. (2001). *Bench Testing of Industrial Fluid Lubrication and Wear Properties Used in Machinery Applications*, USA.
- [57] Metco, S. (2006). *Thermal Spray Materials Guide*. Americas, The, (May).
- [58] Vaßen, R., Jarligo, M. O., Steinke, T., Mack, D. E., ve Stöver, D., (2010). "Overview on advanced thermal barrier coatings". *Surface and Coatings Technology*, 205(4):938–942. Doi:10.1016/j.surfcoat.2010.08.151
- [59] Cao, X. Q., Vassen, R., Tietz, F., ve Stoeber, D., (2006). "New double-ceramic-layer thermal barrier coatings based on zirconia–rare earth composite oxides". *Journal of the European Ceramic Society*, 26(3):247–251. Doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2004.11.007
- [60] Chen, X., Gu, L., Zou, B., Wang, Y., ve Cao, X., (2012)." New functionally graded thermal barrier coating system based on lamgal11o19/YSZ prepared by air plasma spraying". *Surface and Coatings Technology*, 206(8-9):2265–2274. Doi:10.1016/j.surfcoat.2011.09.076

- [61] Corporation, B. G., (2011). Failure mechanism of thermal barrier coatings by electron beam physical vapor deposition (EB-PVD) under thermomechanical coupled loads, China.
- [62] Eriksson, R., Sjöström, S., Brodin, H., Johansson, S., Östergren, L., ve Li, X.-H., (2013). "TBC bond coat-top coat interface roughness: Influence on fatigue life and modelling aspects". *Surface and Coatings Technology*, 236:230–238. Doi:10.1016/j.surfcoat.2013.09.051
- [63] Shi, G., Wang, Z., Liu, M., Liang, J., ve Wu, Z., (2011). "Microstructure and oxidation behavior of nicocral/YSZ microlaminates produced by EB-PVD". *Materials Characterization*, 62(11):1066–1070. Doi:10.1016/j.matchar.2011.07.018
- [64] C.S., R., V., B., ve P.V., A., (2012). "Synthesis, spheroidization and spray deposition of lanthanum zirconate using thermal plasma process". *Surface and Coatings Technology*, 206(13):3017–3035. Doi:10.1016/j.surfcoat.2011.10.052
- [65] Chicot, D., Ageorges, H., Voda, M., Louis, G., Ben Dhia, M. A., Palacio, C. C., ve Kossman, S., (2014). "Hardness of thermal sprayed coatings: Relevance of the scale of measurement". *Surface and Coatings Technology*. Doi:10.1016/j.surfcoat.2014.04.043
- [66] Islak, S. (2011). Plazma Püskürtme Yöntemiyle AISI 304 Paslanmaz Çelik Yüzeyinde Elde Edilen ZrO₂ / Mikroyapı Özellikleri, (May), 16–18.
- [67] Bartuli, C., Bemporad, E., Tulliani, J. M., Tirillò, J., Pulci, G., ve Sebastiani, M. (2009). Mechanical properties of cellular ceramics obtained by gel casting: Characterization and modeling. *Journal of the European Ceramic Society*, 29(14), 2979–2989. Doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2009.04.035
- [68] Gmbh, W. V. (n.d.). *Ceramics - Processing , Reliability , Tribology and Wear* (Vol. 12).
- [69] Mecklenburg, R., ve Adhesive, T. (2013). Testing for Adhesive Wear real Area of Contact, 12–29.
- [70] Trejo-Arroyo, D., Zárate-Medina, J., Alvarado-Orozco, J. M., Contreras-García, M. E., Boldrick, M. S., ve Muñoz-Saldaña, J., (2013). "Microstructure and mechanical properties of Al₂O₃-YSZ spherical polycrystalline composites". *Journal of the European Ceramic Society*, 33(10):1907–1916. Doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2013.01.034
- [71] Sathish, S., Geetha, M., Aruna, S. T., Balaji, N., Rajam, K. S., ve Asokamani, R., (2011). "Sliding wear behavior of plasma sprayed nanoceramic coatings for biomedical applications". *Wear*, 271(5-6):934–941. Doi:10.1016/j.wear.2011.03.023
- [72] Fitzpatrick, R., (2004). *The Physics of Plasmas*, Texas.

- [73] Wikipedia, <http://tr.wikipedia.org/wiki/Plazma>, 15 Aralık 2014 .
- [74] Cao, X. Q., Vassen, R., ve Stoeber, D., (2004). "Ceramic materials for thermal barrier coatings". Journal of the European Ceramic Society, 24(1):1–10. Doi:10.1016/S0955-2219(03)00129-8

SERTLİK DENEYİ SONUÇLARI





Ağ. %35 Al2O3-%65 YSZ				Ağ. %50 Al2O3 - %50 YSZ				Ağ. %65Al2O3 - %35 YSZ			
500 g 15s	Vikers Sertlik Değeri VSD	D1 µm	D2 µm	500 g 10s	Vikers Sertlik Değeri VSD	D1 µm	D2 µm	500 g 10s	Vikers Sertlik Değeri VSD	D1 µm	D2 µm
1	944,61	32,66	60,00	1	1178,44	23,66	32,44	1	1242,71	28,38	26,25
2	1020,67	31,47	28,81	2	1208,41	24,84	30,56	2	1251,4	28,44	26,00
3	1021,69	33,44	26,81	3	1230,07	27,03	27,78	3	1251,4	24,97	29,47
4	1030,22	29,56	30,44	4	1244,54	26,56	28,03	4	1260,18	24,56	29,69
5	1047,61	28,03	31,47	5	1247,28	27,50	27,05	5	1280,4	25,88	27,94
6	1050,79	27,53	31,88	6	1248,65	22,94	31,56	6	1283,26	27,63	26,13
7	1062,92	26,44	32,63	7	1258,79	29,19	25,09	7	1323,02	28,28	24,66
8	1073,43	30,47	28,31	8	1299,16	26,84	26,59	8	1328,34	27,84	25,00
9	1103,64	31,56	26,41	9	1318,83	28,78	24,25	9	1331,36	29,09	23,36
10	1118,25	31,10	24,50	10	1323,32	26,16	26,72	10	1371,6	23,41	28,59
11	1205,36	26,03	29,44	11	1344,06	28,50	24,03	11	1376,89	25,09	26,81
12	1282,31	25,94	27,84	12	1348,68	29,91	22,53	12	1395,11	27,81	23,75
13	1329,34	25,16	27,66	13	1370,02	23,06	28,97	13	1403,26	25,28	26,13
14	1335,91	28,75	23,04	14	1373,18	25,66	26,31	14	1405,45	20,03	31,28
15	1353,32	28,63	23,72	15	1411,48	25,13	26,13	15	1438,3	28,94	21,84
Ortalama	1132			Ortalama	1294			Ortalama	1330		

Ağ. %100 Al2O3				Ağ. %100 YSZ			
500 g 10s	Vikers Sertlik Değeri VSD	D1 µm	D2 µm	500 g 10s	Vikers Sertlik Değeri VSD	D1 µm	D2 µm
1	1353,32	24,94	27,41	1	896,76	32,06	32,25
2	1401,62	25,63	25,81	2	948,54	36,44	26,09
3	1425,35	21,38	29,63	3	968,57	33,88	28,00
4	1452,56	25,78	24,75	4	981,54	29,47	32,00
5	1459,49	27,22	24,19	5	997,7	28,50	32,47
6	1459,49	26,78	23,63	6	998,68	31,56	29,38
7	1492,46	20,66	29,19	7	1016,29	31,13	29,28
8	1503,9	27,44	22,22	8	1035,39	30,19	29,66
9	1517,32	24,19	25,31	9	1038,86	31,41	28,34
10	1519,78	24,06	25,34	10	1064,36	26,06	32,97
11	1525,33	23,75	25,56	11	1064,36	31,59	27,44
12	1542,8	24,56	24,47	12	1069,79	29,88	29,00
13	1548,48	25,44	23,50	13	1070,88	29,38	29,47
14	1564,42	22,69	26,00	14	1143,93	30,25	26,63
15	1594,94	25,28	22,88	15	1191,57	26,13	29,66
Ortalama	1491			Ortalama	1032		

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı	:Ali AVCI
Doğum Tarihi ve Yeri	:20.04.1988 AMASYA
Yabancı Dili	:İngilizce
E-posta	:aliavci@yildiz.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Makine Eğitimi	Marmara Üniversitesi	2010
Lise	CNC Makineleri	Of H.M.B Ulusoy ATL	2006

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2012	Yıldız Teknik Üniversitesi	Araştırma Görevlisi(ÖYP)
2011-2012	Akdeniz Üniversitesi	Araştırma Görevlisi(ÖYP)
2010-2011	Hakkari Üniversitesi	Araştırma Görevlisii (ÖYP)

Bildiri

1. Avcı.Ali, Eker Akdoğan. Ayşegül (2014). Tribological Performances of YSZ and Al₂O₃ Composite Coatings Deposited By Air Plasma Spray Process. 8th International

Quality Conference, 735-740.

2. Avcı.Ali, Küçükyıldırım.BOnur, Eker Akdoğan Ayşegül (2014). Fatigue Behavior Of Ni-Ti Shape Memory Alloy Wires

Proje

ENDÜSTRİYEL OTOMASYON EĞİTİMİ İNOVASYON VE TEKNOLOJİ GELİŞTİRME MERKEZİ