

Plazma Sprey Termal Bariyer Kaplamaların Isıl ve Mekanik Özelliklerinin  
Optimizasyonu

Seyid Fehmi Diltemiz

DOKTORA TEZİ

Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalı

Ekim-2010

Thermal and Mechanical Properties Optimisation of Thermal Barrier Coatings

Seyid Fehmi Diltemiz

**DOCTORAL DISSERTATION**

Department of Metallurgical Engineering

October-2010

# Plazma Sprey Termal Bariyer Kaplamaların Isıl ve Mekanik Özelliklerinin Optimizasyonu

Seyid Fehmi Diltemiz

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca  
Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalında  
**DOKTORA TEZİ**  
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Yard. Doç. Dr. Melih Cemal KUŞHAN

Ekim 2010

**ONAY**

Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora öğrencisi Seyid Fehmi Diltemiz'in DOKTORA tezi olarak hazırladığı “**Plazma Sprey Termal Bariyer Kaplamaların Termal ve Mekanik Özelliklerinin Optimizasyonu**” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

**Danışman** : Yard. Doç. Dr. Melih Cemal KUŞHAN

**İkinci Danışman** : -

**Doktora Tez Savunma Jürisi:**

**Üye** : Yard. Doç. Dr. Melih Cemal KUŞHAN

**Üye** : Prof. Dr. Orhan Şerif KOMAÇ

**Üye** : Doç. Dr. Rahmi ÜNAL

**Üye** : Yard. Doç. Dr. Dilek TURAN

**Üye** : Yard. Doç. Dr. Osman Nuri ÇELİK

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ..... tarih ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Nimetullah BURNAK

Enstitü Müdürü

## ÖZET

Termal Bariyer Kaplamalar (TBK), havacılık ve enerji üretiminde görev alan gaz türbinlerinin sıcak kısımları başta olmak üzere, yüksek sıcaklık dayanımının istendiği sahalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Kullanımda olan mevcut kaplamaların termal, mekanik ve kimyasal özelliklerinde yapılacak olan iyileştirmeler; türbinlerin daha güvenli şekilde çalışmasını, türbin veriminin artmasını, türbin bakım aralıklarının uzamasını ve son derece pahalı olan sıcak kısım parçalarının ömürlerinin artmasını sağlayacaktır. Bu amaçla plazma sprey metodu ile elde edilmiş termal bariyer kaplamaların proses parametrelerinin değiştirilmesiyle farklı kaplamalar elde edilmiş, bu kaplamalar üzerinde ayrıca ön oksidasyon ve lazer sırlama modifikasyonları uygulanmıştır.

Proses parametreleri ve modifikasyonların, ısıl ve mekanik özellikler üzerindeki etkisi incelenerek, daha iyi performans özelliklerine sahip, optimize edilmiş kaplamaların geliştirilmesi amaçlanmıştır. Numuneler üzerinde; termal şok direnci, oksidasyon dayanımı, statik tutunma mukavemeti, sertlik gibi hem mekanik hem de termal özelliklerin belirlenmesine yönelik çeşitli test ve ölçümler gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışmasının sonucunda; iyi performans için, parametre seçiminin uyumlu bir aralıkta yapılması gerektiği belirlenmiştir. Kaplama katılığını arttıran işlem parametreleri ile hazırlanmış numunelerin termal şok direncinin diğer numunelerden daha düşük, çekme mukavemetlerinin ise daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Kaplama kalınlığının artırılmasının ısı yalıtımını iyileştirdiği, ancak termal şok direnci ve çekme mukavemetini düşürdüğü gözlenmiştir. Gerçek kullanıma sunulacak kaplamaların işlem parametrelerinin seçiminde, servis koşulları ve tez çalışmasında elde edilen bilgilerin bir arada kullanılması yararlı olacaktır. Uygulanan modifikasyonların, oksidasyon ve daha belirgin olarak termal şok direnci üzerinde olumlu etki gösterdiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Termal bariyer kaplama, plazma sprey, termal şok dayanımı, lazer sırlama.

## SUMMARY

Thermal Barrier Coatings (TBC) are extensively used in high temperature areas, especially on hot section parts of aviation and energy production type gas turbines.

Improvements on thermal, mechanical and chemical features of presently used coatings will allow the turbines work more reliably, increase the turbine efficiency, extend the turbine maintenance periods and increase the lives of hot section parts that are of high cost. In this dissertation, plasma sprayed thermal barrier coated parts prepared with different coating parameters, and these coatings have been modified with pre oxidation and laser glazing.

It has been aimed to improve optimized coatings with better performance features by investigating the effect of process parameters and modifications on thermal and mechanical properties. Coated and modified samples were subjected to thermal shock, oxidation, tensile and hardness tests, etc. The effect of process parameters and modifications on thermal and mechanical properties was reviewed to achieve more robust optimized coatings with high performance.

As a conclusion of the thesis it has been determined that for a better performance the parameter selection needs to be carried out at an appropriate range. It has been determined that specimen prepared with process parameters increasing the coating stiffness have lower thermal shock resistance and higher tensile strength. It has been observed that increasing the coating thickness allows better thermal resistance but decreases the thermal shock resistance and tensile strength. It shall be useful to use service conditions and knowledge gained through the thesis together during selecting the process parameters of coatings that are going to be used in service. It has been observed that the modifications applied have positive influence no oxidation and more noticeably the thermal shock resistance.

Keywords: Thermal barrier coatings, plasma spray, thermal shock resistance, laser glazing.

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım boyunca her türlü desteklerini ve emeklerini benden esirgemeyen danışmanım Yard. Doç. Dr. Melih Cemal KUŞHAN'a, jüri üyelerim Prof. Dr. Orhan Şerif KOMAÇ'a, Doç. Dr. Rahmi ÜNAL'a, Yard. Doç. Dr. Dilek TURAN'a, Yard. Doç. Dr. Osman Nuri ÇELİK'e, nitelikli bir çalışma olabilmesi için fedakarca saatlerini harcayan çalışma arkadaşlarım Mehmet KARAKIŞ, Önder SAVAŞ, Ömer GÜLTEN, Fikri SELEK, Kamil BACAĞ, Şule AKBACAĞ, Arif UÇAR'a ve son olarak sürekli yanımda durarak beni cesaretlendiren, ilham veren eşim Sibel Emir DİLTEMİZ ve motive eden biricik kızım Defne DİLTEMİZ'e en içten minnet duygularıyla teşekkürü borç bilirim.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	<b>v</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>vi</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>vii</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	<b>xi</b>
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	<b>xiv</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	<b>xv</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. YÜKSEK SICAKLIK KAPLAMALARI VE ÜRETİM METOTLARI</b> .....	<b>3</b>
2.1. Yüksek sıcaklık kaplamaları .....	6
2.1.1. Difüzyon kaplamalar .....	10
2.1.1.1. Basit difüzyon kaplama .....	10
2.1.1.2. Modifiye edilmiş difüzyon kaplamalar (co-depositon).....	11
2.1.2. MCrAlX kaplamalar .....	12
2.1.3. Termal bariyer kaplamalar (tbk).....	14
2.2. Termal Bariyer Kaplama Metotları .....	18
2.2.1. Termal sprej kaplama (thermal spraying).....	18
2.2.1.1. Plazma sprej (plasma spraying) .....	20
2.2.1.2. Diğer termal sprej kaplama teknikleri.....	24
i. Alev sprej (flame spraying).....	24
ii. Elektrik ark sprej .....	26
iii. Yüksek hızlı oksijen-yakıt yanma tip spreyleme (high velocity oxy-fuel combustion spraying) .....	26
2.2.2. Fiziksel buhar biriktirme (physical vapour deposition).....	27
2.3. Termal bariyer kaplama metotlarının karşılaştırılması .....	30



## İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
<b>3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....</b>	<b>32</b>
3.1. Deneysel Çalışma Detayları .....	32
3.1.1. Ön hazırlık .....	32
3.1.2. Plazma sprej işleminde kullanılan ekipman ve sarf malzemeler ...	33
3.1.3. Numune boyut ve ana malzemeleri .....	34
3.2. Test ve değerlendirme metotları.....	34
3.2.1. Çekme testi .....	34
3.2.2. İzotermal oksidasyon testi .....	36
3.2.3. Termal şok testi .....	37
3.2.4. Mikroyapı değerlendirmesi.....	40
3.2.5. Mikrosertlik testi.....	44
3.2.6. Bilgisayar modellemeleri.....	45
3.2.7. Ön oksidasyon modifikasyonu .....	45
3.2.8. Lazer sırlama modifikasyonu .....	46
3.3. Deney Numuneleri .....	48
<b>4. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME.....</b>	<b>51</b>
4.1. Test ve değerlendirme sonuçları.....	51
4.1.1. Çekme Testi.....	51
4.1.2. İzotermal Oksidasyon Testi .....	56
4.1.3. Termal Şok Testi .....	64
4.1.4. Mikroyapı Değerlendirmesi.....	70
4.1.4.1. Mesafe.....	70
4.1.4.2. Plazma gazları .....	72
4.1.4.3. Toz besleme gazı.....	74
4.1.4.4. Plazma akımı.....	75

## İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4.1.5. Mikrosertlik Ölçümleri .....	76
4.1.6. Bilgisayar Modellemesi .....	82
4.1.7. Ön Oksidasyon Testi .....	86
4.1.8. Lazer Sırlama Testi.....	87
4.2. Kaplama Parametrelerinin Numuneler Üzerinde Etkileri .....	88
4.2.1. Plazma gazları akışı .....	88
4.2.2. Toz taşıyıcı gaz akışı .....	89
4.2.3. Mesafe .....	89
4.2.4. Plazma akımı .....	90
4.2.5. Seramik toz morfolojisi .....	90
4.2.6. Paso sayısı.....	91
4.3. Başlıca Kaplama Karakteristiklerinin Numuneler Üzerindeki Etkileri..	91
4.3.1. Kaplama kalınlığı .....	91
4.3.2. Çekme mukavemeti .....	92
4.3.3. Mikrosertlik değerleri .....	93
4.3.4. Bağ kaplama oksit miktarı .....	93
4.3.5. Termal şok dayanımı .....	94
4.4. Modifikasyonlar ve Modellemeler .....	95
4.4.1. Ön oksidasyon .....	95
4.4.2. Lazer modifikasyonu .....	96
4.4.3. Bilgisayar modellemesi .....	96
<b>5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>	<b>98</b>
<b>KAYNAKLAR DİZİNİ.....</b>	<b>100</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>106</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Modern bir gaz türbininin kesit resmi (Stolle, 2004) .....	3
Şekil 2.2. Spesifik hava tüketimi ve basınç oranının türbin giriş sıcaklığına (TIT) bağlı değişimi (Boyce, 2002).....	4
Şekil 2.3. Spesifik yakıt tüketimi ve basınç oranının türbin giriş sıcaklığına bağlı değişimi (Boyce, 2002).....	4
Şekil 2.4. Türbin giriş sıcaklığında yıllara ve gelişen teknolojilere bağlı artış (Koolloos, 2001) .....	6
Şekil 2.5. Kaplama teknolojilerinin ömür ve sıcaklık dayanımı üzerindeki etkileri (Reed, 2006) .....	9
Şekil 2.6. Codep kaplama uygulanmış türbin pale mikroyapısı (200x) .....	11
Şekil 2.7. Sıcaklığa bağlı olarak bazı yalıtkan seramiklerin termal iletkenlik değerleri (Reed, 2006) .....	15
Şekil 2.8. Termal spreycaplama prosesi genel görünümü (sulzer metco, 2010)...	19
Şekil 2.9. Kaplama ve bileşenlerinin oluşumu (Weidmann et al., 2005) .....	21
Şekil 2.10. Plazma spreycaplama tekniği şematik görünümü (Sulzer Metco, 2010).....	22
Şekil 2.11. Plazma spreycaplama sistem bileşenleri (Sulzer Metco, 2010).....	22
Şekil 2.12. Plazma spreycaplama uygulaması .....	23
Şekil 2.13. Alev spreycaplama şematik görünümü (Sulzer Metco, 2010) .....	25
Şekil 2.14. Alev spreycaplama uygulaması (Weidmann et al., 2005).....	25
Şekil 2.15. Elektrik ark spreycaplama tekniği şematik görünümü (Sulzer Metco, 2010) ...	26
Şekil 2.16. Yüksek hızlı oksijen-yakıt yanma tip spreycaplama tekniği (Sulzer Metco, 2010)	27
Şekil 2.17. EB-PVD kaplama prosesi (Reed, 2006).....	28
Şekil 2.18. EB-PVD tekniğiyle türbin palesi üzerinde elde edilmiş kaplama mikroyapısı (Stolle, 2004) .....	29
Şekil 3.1. TBK uygulanmış çekme test numuneleri .....	35
Şekil 3.2. Fırın içerisinde yapıştırıcı kürleşme işlemine tabi tutulmuş, fikstür yardımıyla çekme çubuğu haline gelmiş çekme test numunesi.....	36
Şekil 3.3. Fırın içerisinde oksidasyon test numuneleri .....	37

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.4. Termal şok test düzeneği .....	39
Şekil 3.5. Termal şok test numunesi (metal yüzey).....	39
Şekil 3.6. Termal şok test numunesi (seramik yüzey) .....	40
Şekil 3.7. Sayısallaştırılmış mikroyapı görüntüsünden, eşik ayar tekniğinin kullanımıyla elde edilmiş seramik kaplamanın ikili resminin (binary image) eldesi .	43
Şekil 3.8. TBK numune mikroyapı bileşenleri (200x).....	44
Şekil 3.9. Ön oksidasyon işlemi sonrası seramik kaplama yüzeyindeki renk değişimi.....	46
Şekil 3.10. Farklı parametrelerle elde edilmiş lazer sırlama hatları içeren numune	47
Şekil 3.11. Lazer sırlama (üst bölge) yüzey SEM görüntüsü .....	47
Şekil 4.1. #B serisi numune çekme mukavemetleri.....	51
Şekil 4.2. #B2 numune çekme testi sonrası genel görünümü .....	55
Şekil 4.3. #B2 numune çekme testi sonrası mikroyapı (200x) .....	55
Şekil 4.4. Bağ kaplama izotermal oksidasyon karakteristiği .....	57
Şekil 4.5. İzotermik oksidasyon test sonunda TGO, kaplama altında kalan korunaklı ana metal ve korunaksız ana metalin oksitlenme dereceleri (100x) .....	58
Şekil 4.6. Seramik kaplama / bağ kaplama ara yüzeyinde boşluk (200x) .....	59
Şekil 4.7. İzotermik oksidasyon test sonuçları .....	60
Şekil 4.8. TBK numunelerin oksidasyon testi sonrası bağ kaplama oksit miktarlarındaki artış.....	62
Şekil 4.9. Seramik kaplama kalın ve gözenek miktarı ile bağ kaplama oksidasyon performans ilişkisi.....	63
Şekil 4.10. TBK kaplı numunelerin termal şok testi sonunda stereo görüntüleri..	64
Şekil 4.11. Termal şok test numuneleri toplam alan içerisinde hasarlı alan yüzdesi.	65
Şekil 4.12. TBK kaplanmış numune (AC) termal şok dayanımı / seramik katman kalınlık + gözenek ilişkisi .....	66
Şekil 4.13. Termal şok testi sonrası TBK yüzey görüntüsü.....	68

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.14. Termal şok testi sonrası TBK kesit görüntüsü (200x).....	69
Şekil 4.15. Kaplama katmanları oksit ve boşluk miktarı ile mesafe ilişkisi.....	70
Şekil 4.16. Kaplama katmanları kalınlık / mesafe ilişkisi .....	71
Şekil 4.17. Bağ kaplama mesafe / ergimemiş parçacık ilişkisi.....	72
Şekil 4.18. Bağ kaplama erimemiş parçacık, kalınlık, oksit ve boşluk ilişkisi.....	73
Şekil 4.19. Taşıyıcı gaz akısının bağ kaplama mikroyapısı üzerindeki etkileri ....	75
Şekil 4.20. Plazma akımı – seramik katman kalınlık + gözenek ilişkisi .....	76
Şekil 4.21. Bağ kaplama mikrosertlik değerleri .....	77
Şekil 4.22. Seramik kaplama mikrosertlik değerleri.....	78
Şekil 4.23. Bağ kaplama oksit / mikrosertlik ilişkisi .....	79
Şekil 4.24. Bağ kaplama sertlik / % oksit miktar ilişkisi.....	79
Şekil 4.25. Ölçüm sonucu geçersiz (sol ok) ve geçerli (sağ ok) kabul edilen sertlik izleri .....	81
Şekil 4.26. #B3 numune farklı yük değerleri için seramik katman mikrosertlik ölçüm sonuçları.....	81
Şekil 4.27. #B4 numune termal çözümüleme .....	82
Şekil 4.28. #B4 numune termomekanik çözümüleme (Von Misses kriteri).....	83
Şekil 4.29. #B4 numune termomekanik çözümüleme (Sx) .....	84
Şekil 4.30. Farklı gözenek miktarına sahip seramik katman kesitlerinin sabit ısı akısı altındaki termal çözümülemesi .....	85
Şekil 4.31. Seramik kaplama gözenek miktarı / termal yalıtkanlık ilişkisi .....	86
Şekil 4.32. Farklı aşamalardaki bağ kaplamanın % alüminyum oksit miktarları ..	87
Şekil 4.33. Lazer sırlama işlemi uygulanmış TBK numune mikroyapısı (200x) ..	88

**ÇİZELGELER DİZİNİ**

<b><u>Çizelge</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
Çizelge 2.1. Kaplama fonksiyonları ve kaplama malzeme karakteristikleri arasındaki ilişki (Hillary, 1996) .....	8
Çizelge 2.2. MCrAlX kaplamaların yaygın türlerinin % ağırlıkça kimyasal kompozisyonu (Reed, 2006).....	13
Çizelge 3.1. Kaplama tozlarının özellikleri .....	33
Çizelge 3.2. TBK numunelere ait metalografik numune hazırlama işlem parametreleri .....	41
Çizelge 3.3. Bağ kaplama termal spreyci parametreleri.....	49
Çizelge 3.4. Seramik kaplama termal spreyci parametreleri.....	50
Çizelge 4.1. TBK numuneleri çekme mukavemeti – üst katman kalınlığı.....	52
Çizelge 4.2. TBK numuneleri çekme testi kopma bölgeleri.....	54

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<b><u>Simgeler</u></b>	<b><u>Açıklama</u></b>
------------------------	------------------------

---

$\gamma$	Gamma üssü
----------	------------

### **Kısaltmalar**

TBK:	Termal bariyer kaplama
EB-PVD:	Elektron ışın fiziksel buhar biriktirme
TGS:	Türbin giriş sıcaklığı
YSZ:	Ytria ile kararlı hale getirilmiş zirkonya
CODEP:	Kombinasyon kaplama (Co-Deposition)
APS:	Atmosferik plazma sprej
VPS:	Vakum plazma sprej
HVOF:	Yüksek hızlı oksijen-yakıt yanma tip spreyleme
TGO:	Termal olarak gelişen oksit tabakası

## 1. GİRİŞ

Termal Bariyer Kaplamalar (TBK), havacılık ve enerji üretiminde görev alan gaz türbinlerinin sıcak kısımları başta olmak üzere, yüksek sıcaklık dayanımının istendiği sahalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Tez çalışmasında, gaz türbinleri üzerinde halen kullanılmakta olan mevcut kaplamaların termal ve mekanik özelliklerinin kullanım koşullarına göre optimize edilmesi ve geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu özelliklerde elde edilecek olan iyileştirmeler; türbinlerin daha güvenli şekilde çalışmasını, türbin veriminin artmasını, türbin bakım aralıklarının uzamasını ve son derece pahalı olan sıcak kısım parçalarının ömürlerinin artmasını sağlayacaktır (Bose, 2007; Stolle, 2004). Bu amaçlara ulaşabilmek için, plazma sprej tekniğiyle üretilen TBK'ların elde edilmesinde kullanılan işlem parametrelerinin, servis koşullarında maruz kalacağı termal ve mekanik zorlanmalar üzerindeki etkisinin anlaşılması gerekmektedir.

Tez çalışmasında, plazma sprej işlem parametrelerinden; kaplamanın özellikleri üzerinde etkili olacağı değerlendirilen plazma ve toz besleme gazlarının basınç ve debisi, plazma tabancası ile numune arasındaki mesafe, seramik katman toz morfolojisi, plazma akımı üzerinde değişiklikler yapılarak on farklı grup numune hazırlanmıştır. Daha sonra bu numunelerin bir kısmına vakum altında ısıl işlem ile ön oksidasyon ve bir kısmına da lazer ile sırlama modifikasyonları uygulanmıştır. Geriye kalan numuneler üzerine ise herhangi bir ek işlem yapılmamış, böylece modifikasyonların numunelerin termal ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinin anlaşılması amaçlanmıştır.

Numunelerin termal ve mekanik özelliklerinin anlaşılabilmesi için test ve değerlendirme ölçütleri belirlenmiştir. Test ve değerlendirme metodları oluşturulurken, standartlardan, literatürden, teknik uygulama kılavuzlarından ve yoğun olarak saha tecrübelerinden yararlanılmıştır. Tez çalışmasında numuneler üzerine uygulanan test ve değerlendirme metodları:

-Çekme testi



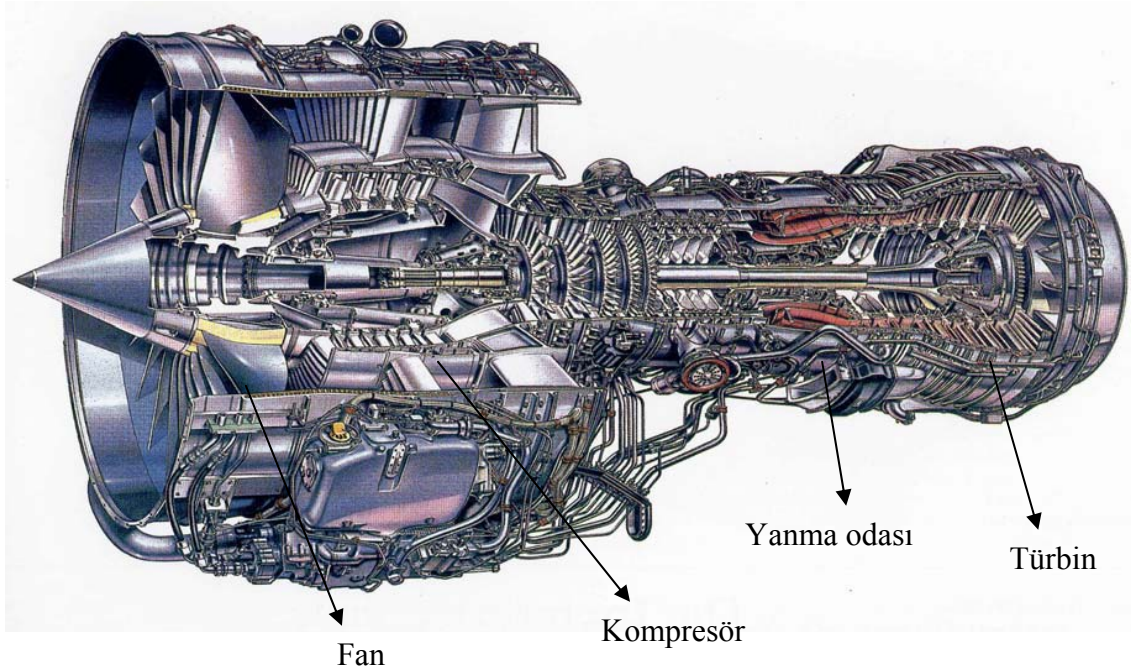
- İzotermal oksidasyon testi
- Termal şok testi
- Mikroyapı değerlendirmesi
- Mikrosertlik testi
- Bilgisayar modellemeleri

şeklindedir.

Test ve değerlendirme işlemleri sonucunda farklı kaplama parametreleri ve uygulanan modifikasyonların, termal ve mekanik özellikler üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Böylece kullanıma sunulacak sıcak kısım parçalarından beklenen özelliklere göre uygun parametre aralığı seçimi mümkün hale gelmiştir. Modifikasyonların hangi özelliklere etki ettiği ve gerçek parçalara uygulanmasındaki sınırlamalar üzerinde durulmuştur.

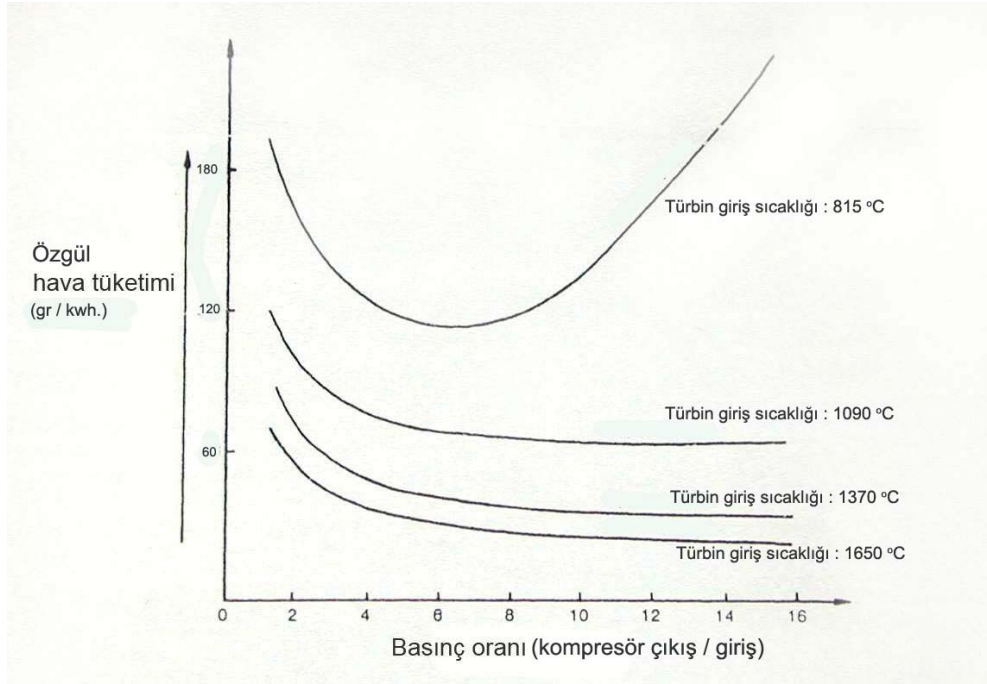
## 2. YÜKSEK SICAKLIK KAPLAMALARI VE ÜRETİM METOTLARI

Gaz türbinlerinde verim, türbin sıcaklığı ile yakından ilgilidir. Daha yüksek yanma sıcaklığı, gazların daha fazla genişmesi anlamına gelmektedir. Verimin artması, çevreye salınan gaz emisyonunun azalması, daha düşük yakıt sarfiyatı, daha uzun menzil ve uçuş süresi veya faydalı yükün artması gibi çok çeşitli avantajlar doğurmaktadır. (Bose, 2007) Şekil 2.1’de modern bir gaz türbininin başlıca kısımlarını gösteren kesit resmi görülmektedir (Stolle, 2004).

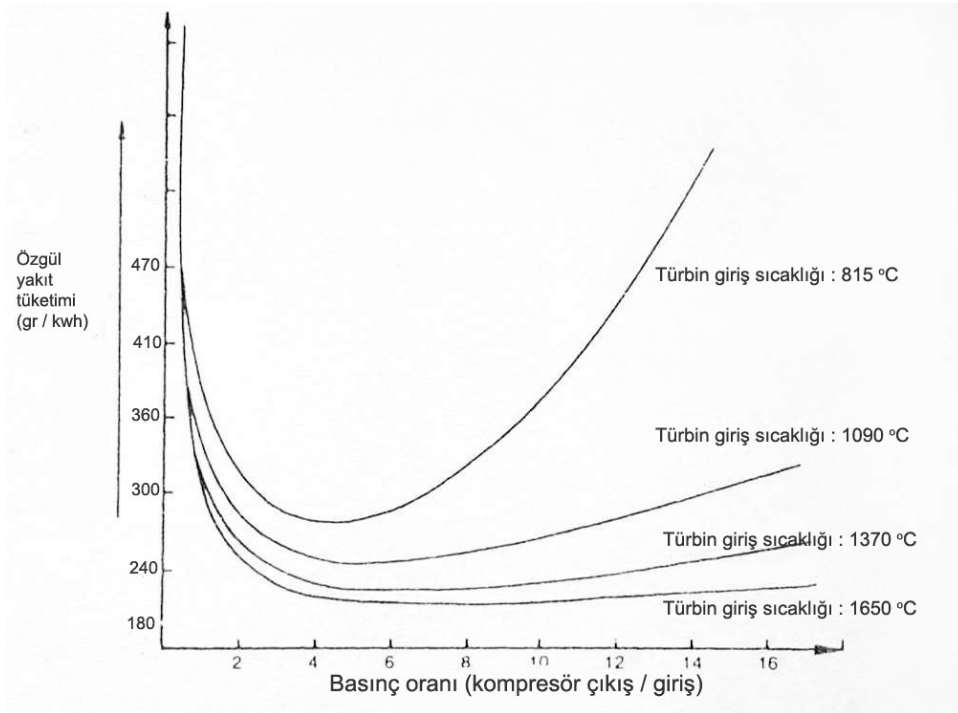


Şekil 2.1. Modern bir gaz türbininin kesit resmi (Stolle, 2004)

Gaz türbinlerinde verim açısından sıcaklık limiti en kritik sınırlayıcı faktör olmaktadır. Şekil 2.2 ve 2.3’de sırasıyla türbin giriş sıcaklığının artmasıyla verim artarken özgül hava ve yakıt tüketimlerinin nasıl azaldığı görülmektedir. Bu durum yüksek sıcaklık malzemelerine duyulan ihtiyacı arttırmaktadır. Yüksek sıcaklıkta çalışan malzeme ve alaşımların ham malzemeleri ve bu malzemelerin işlenmesi son derece pahalıdır (Boyce, 2002).



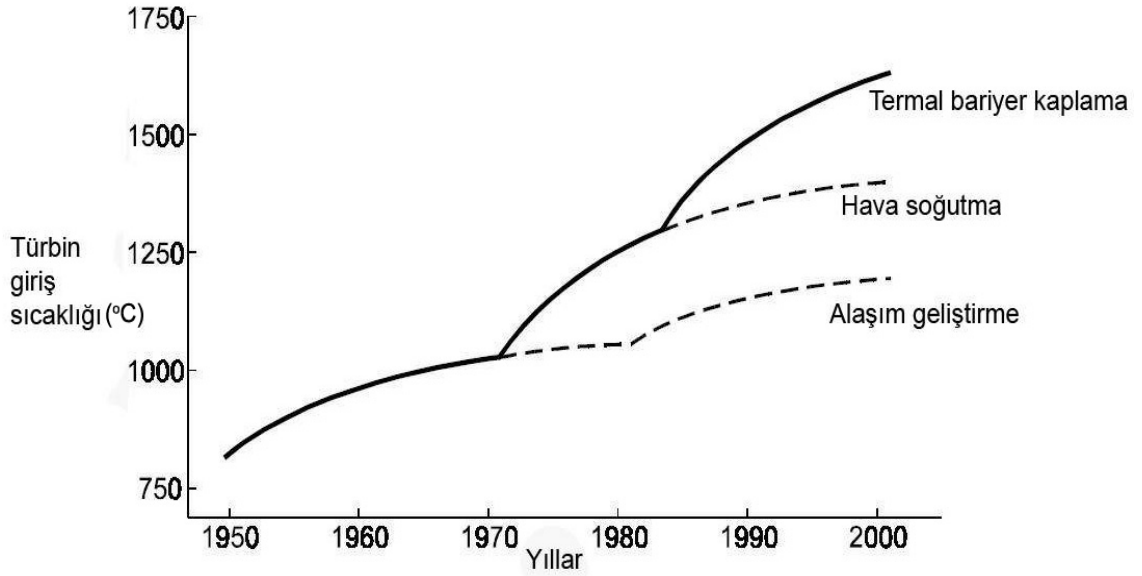
Şekil 2.2. Özgül hava tüketimi ve basınç oranının türbin giriş sıcaklığına (TIT) bağlı değişimi (Boyce, 2002).



Şekil 2.3. Özgül yakıt tüketimi ve basınç oranının türbin giriş sıcaklığına bağlı değişimi (Boyce, 2002).

Dolayısıyla pale, nozul, yanma odası gibi parçalardan oluşan bu malzemelerin soğutulması son derece önemlidir (Boyce, 2002). Modern gaz türbinlerinde yüksek verim ve uzun ömür için artan bir talep bulunduğundan sıcak gaz akışına maruz parçalar, sıcak korozyon, yüksek sıcaklık oksidasyonu, termal yorulma gibi hasarlara karşı korunmak durumundadır. Bunun için, parçalar, sadece oksidasyon dirençli veya aynı zamanda iyi ısı yalıtkanlık özelliği gösteren termal bariyer kaplamalar ile kaplanır.

Gaz türbinlerinden düşük maliyetle yüksek verim alabilmek için, sadece türbinin ilk fiyatı değil aynı zamanda işletme maliyetlerinin de düşük olması gerekmektedir. Düşük işletme maliyeti ise, spesifik yakıt tüketiminin düşük, bakım aralıklarının uzun ve tamir giderlerinin düşük olması ile mümkün olmaktadır (Stolle, 2004). Geçtiğimiz son bir kaç on yılda yeni, ısıya dayanıklı malzemeler geliştirilmesine yönelik pek çok çaba bulunmasına karşın, nikel esaslı süperalaşımalar gelişmiş gaz türbinlerinde hala en çok kullanılan malzeme durumundadır (Okazaki et al., 2001). Her malzeme gibi süper alaşımlar da çalışma sıcaklığı çok yüksek olduğunda kimyasal ve mekanik özelliklerinde bozunmaya uğrarlar. Süper alaşımların çalışma sıcaklığının üst sınırını başlangıç ergime (incipient melting) noktası belirlemektedir. Çoğu süper alaşım için bu değer 1300–1350 °C civarındadır. Buna karşın türbin giriş sıcaklığı 1400 °C gibi tipik bir değerle modern gaz türbinlerinde sürekli olarak yükselmektedir (Stolle, 2004). Bu tür aşırı koşullarda çalışan parçalar, ancak yüzey mühendisliğini kullanarak alınan önlemler sayesinde dayanabilmektedir. Bu sahada çalışan kaplamaların kullanım esnasında gösterecekleri kimyasal ve fiziksel dayanımın öngörülebilmesi, gaz türbinleri sahasında en kritik konuyu oluşturmaktadır. Malzeme sınırlarının zorlandığı bir gaz türbininde yanma odası ve türbin parçaları, üzerlerindeki kaplamaların onları koruyamaması durumunda çok kısa bir sürede hasarlanacaktır (Reed, 2006). Yeni malzemelerin ve kaplama, film soğutma gibi ileri soğutma tekniklerinin geliştirilmesiyle türbin yanma sıcaklığında yıllarla hızlı bir artışa olanak tanınmış ve buna bağlı olarak türbin veriminde yüksek artış sağlanmıştır. (Boyce, 2002; Funke et al., 1997). Şekil 2.4 de yıllar ve gelişen teknolojilere bağlı olarak türbin giriş sıcaklığındaki artış eğilimi görülmektedir.



Şekil 2.4. Türbin giriş sıcaklığında yıllara ve gelişen teknolojilere bağlı artış (Koolloos, 2001).

Termal bariyer kaplamalar (TBK), gaz türbinlerinin sıcak kısım parçaları başta olmak üzere, sıcak korozyon, oksidasyon ve ısıl dayanımın istendiği sahalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Böylece; hem daha yüksek çalışma sıcaklıklarına çıkılmasına, hem de parçaların çalışma sıcaklığını düşürerek ömürlerinin artmasına olanak sağlamaktadır. Metal yüzey sıcaklığını düşürmenin yanında, sıcak kısımda çalışan metalik malzemelere göre oksidasyon ve sıcak korozyon direnci çok daha yüksek olan termal bariyer kaplamalar, metalik malzemeyi ortam etkilerinden korumaktadır (Vaben et al., 2001; Nusier et al., 1998).

## 2.1. Yüksek Sıcaklık Kaplamaları

Yüksek sıcaklıkta kullanılan kaplamalar, genel olarak aşağıdaki kriterleri yerine getirmelidirler;

-Korozyon, sıcaklık gibi, çalışma ortamının olumsuz etkilerine uygun dirençleri olmalıdır,

-Kaplandığı ana metalle uyumlu (termal genleşme farklılıkları, tutunma direnci, ana metalle olan kimyasal reaksiyonlar vb) olmalıdır,

-Kaplama uygulanabilir (maliyet, teknoloji vb. ) olmalıdır. (Mevrel et al. , 1989)

Yüksek sıcaklık uygulamaları malzemeleri genel olarak, mukavemet, sürünme, mekanik ve / veya termomekanik yorulma gibi spesifik özellikleri nedeniyle seçilmektedirler. Yüksek sıcaklıktaki kullanımları esnasında bu özellikler, korozif ortamla olan etkileşimleri sonucu bozunmaktadır. Bu değişiklikten kaçınmak için bir çözüm yolu, parçayı bir kaplama ile korumaktır. Yüksek sıcaklık kaplamalarının çoğu, ortamla olan etkileşim sonucu “**koruyucu oksit tabakası**” oluşumu esasına dayanmaktadır. Bu tabakanın rolü, kaplamayı saldırgan ortamdan izole etmek ve böylece yüksek sıcaklık korozyonundan kaynaklanan bozunmayı önlemektir. Açıkça görüldüğü gibi bu oksit tabakası pek çok koşulu tam olarak sağlamalıdır:

-Çalışma ortamında kararlı olmalıdır,

-Tabakanın büyüyerek ilerlemesi yavaş olmalıdır,

-Yoğun, gözeneksiz bir yapısı olmalıdır,

-Özellikle termal ve mekanik çevrimsel yükler göz önüne alındığında, kaplamaya tutunma direnci yüksek olmalıdır (Mevrel et al., 1989).

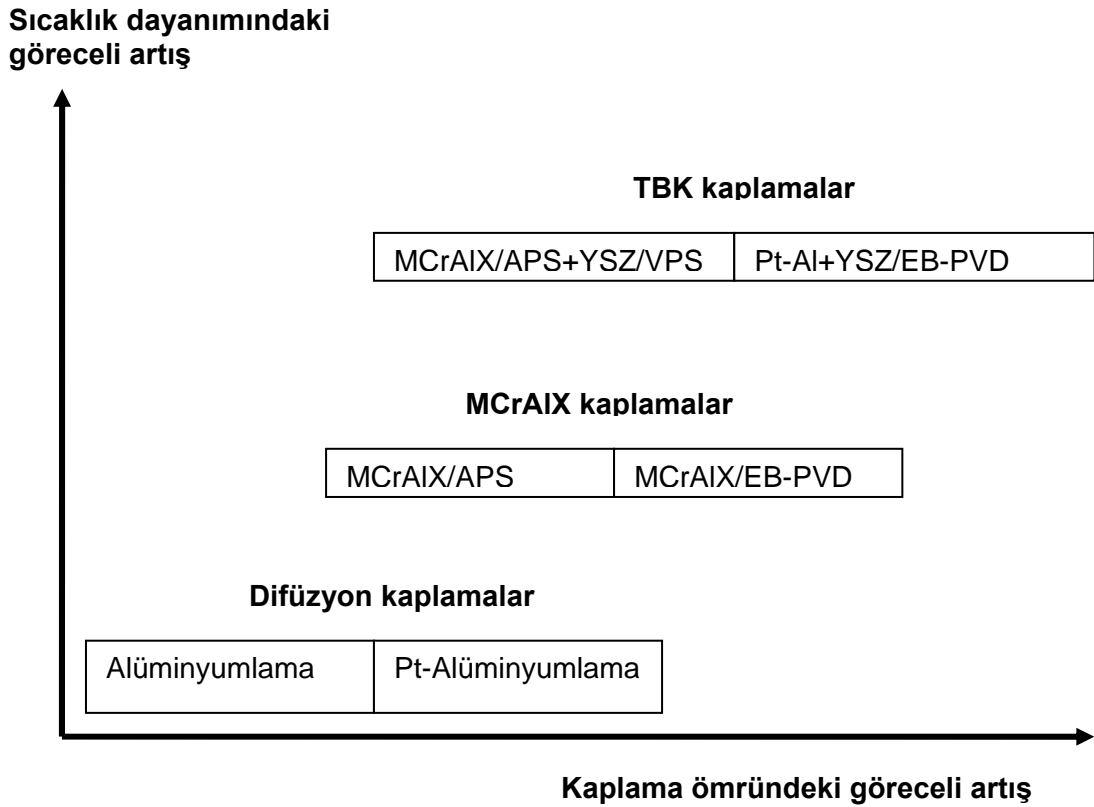
Çizelge 2.1’de kaplamadan beklenen özellikler ile kaplama malzemelerinin karakteristik özellikleri arasındaki ilişki özetlenmiştir.

Çizelge 2.1. Kaplama fonksiyonları ve kaplama malzeme karakteristikleri arasındaki ilişki (Hillary, 1996)

Kaplama fonksiyonu	Kaplama malzeme karakteristik özellikleri
Yüzey sıcaklığının düşürülmesi	Düşük ısı iletim katsayısı, Düşük ışıma ısı transferi, Yüksek yayınma katsayısı,
Oksidasyon hızının düşürülmesi	Düşük büyüme hızına sahip, termodinamik olarak kararlı oksit oluşumu,
Sıcak korozyon dayanımının artırılması	Kimyasal olarak kararlı, geçirimsiz oksit tabakası,
Parçacık erozyonuna dayanım	Sert, yoğun kaplama malzemesi,
Yüksek aşınabilirlik (fedakar aşınma)	Plastik deformasyonla sürtünme toleranslı malzeme (yoğunlaşma), Kırılma ile enerji dönüşümü kabiliyeti (malzeme kaybı),
Yüksek aşındırma kabiliyeti	Kesme kabiliyetini arttırmak için sert parçacıkların varlığı,

Uygulama pratiği de göz önüne alındığında, üç tip oksit bu kriterleri bir arada yerine getirmektedir; alümina ( $Al_2O_3$ ), krom oksit ( $Cr_2O_3$ ), ve silika ( $SiO_2$ ). Krom oksidin 900 °C üzerinde uçucu alt oksitler oluşturması, kullanım sıcaklığını özellikle yüksek hızlı gaz akımı altında daha düşük sıcaklıklarda sınırlı tutmaktadır. Silika kullanımını sınırlayan en önemli etmen, çoğu alaşımın içine silisyumun hızla difüze olması ve ana metaldeki elementlerle düşük ergime sıcaklığına sahip veya kırılğan bileşikler oluşturmasıdır. Dolayısıyla krom oksit oluşturan metalik kaplamalara benzer şekilde silika oluşturan metalik kaplamalar da, daha düşük sıcaklıklarla sınırlı kullanım alanına sahiptirler. Bu sınırlamalar, çoğu yüksek sıcaklık kaplamasının niçin alümina tabakası oluşumu esasına dayalı olduğunu açıklamaktadır (Mevrel et al., 1989).

Temel olarak üç farklı tip yüksek sıcaklık kaplama türü mevcuttur. Birincisi, kaplanan malzemenin difüzyon ve / veya ana metalle reaksiyonuyla kimyasal kompozisyonun sürekli bir gradyent gösterdiği difüzyon kaplamalar (diffusive coatings), ikinci olarak kaplama malzemesinin ana malzemenin yüzeyine biriktirildiği, ilave kaplamalar (overlay coatings) ve son olarak termal bariyer kaplamalar (Hillary, 1996; Eliaz et al., 2002). Şekil 2.5 günümüzde uygulanabilir farklı kaplama teknolojilerini, görece olarak kaplama ömürlerini ve kullanım sıcaklığı artışına katkısını göstermektedir (Reed, 2006).



Şekil 2.5. Kaplama teknolojilerinin ömür ve sıcaklık dayanımı üzerindeki etkileri (Reed, 2006)



### **2.1.1. Difüzyon kaplamalar**

Difüzyon kaplamalar, kullanılan ana metalin yüzeyini belirli elementlerce zenginleştirme ile oluşturulur. Bu amaçla kullanılan üç temel element yukarıda da değinildiği gibi alüminyum, krom veya silisyumdur (Eliaz et al., 2002).

#### **2.1.1.1. Basit difüzyon kaplamalar**

Alüminyum esaslı kaplamalar, gaz türbin uygulamalarında, nikel ve kobalt esaslı süperalaşımaları korumak için kullanılan en yaygın kaplama türüdür. Genellikle kutu sementasyon tekniğiyle oluşturulurlar. Kaplanacak parçalar kısmen sızdırmazlık sağlanmış kutulara kaplama toz karışımı ile beraber konulur ve koruyucu atmosfer altındaki fırınlarda 750 °C – 1150 °C arasındaki yüksek sıcaklıklarda belirli bir süre tutulurlar. Bu işlem esnasında alüminyum ana metale difüze olarak ana metal üzerinde bir kaplama oluşturur. Paket sementasyon tekniğinin başlıca avantajları:

- Uygulaması basit bir yöntem olması,
- Uygulamanın kontrolünün kolay olması,
- İşletme maliyetinin göreceli olarak daha düşük olması

şeklinde sıralanabilir. Bu avantajları dolayısıyla yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Fakat kaplamanın oluşum biçimi nedeniyle bazı dezavantajları da mevcuttur bunlar:

- Uygulanabilir kaplama kimyasal bileşimleri sınırlıdır,
- Kaplanabilecek malzeme yapısı (şekil, kimyasal kompozisyon vb) sınırlıdır,
- Kaplanan malzemenin kimyasal kompozisyonu ve yapısı kaplamanın performansı üzerinde çok etkilidir,

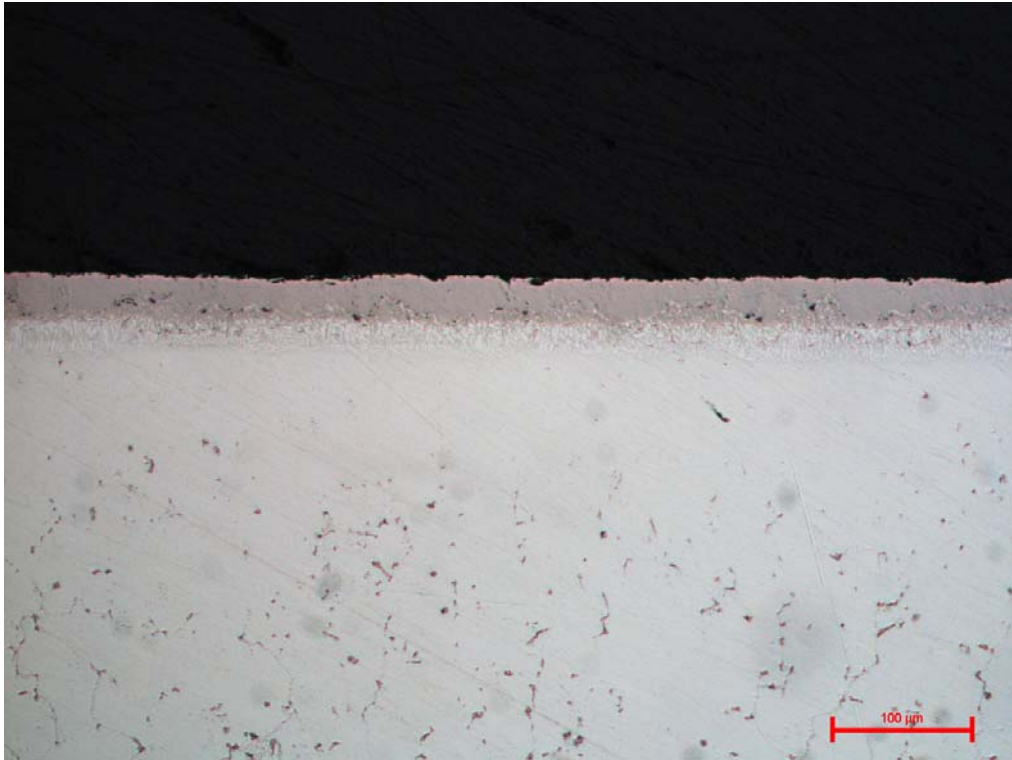
-Bu teknik ile sadece bir elementin kaplanması mümkündür, ancak bazı durumlarda ana metalin krom, yttrium gibi diğer elementlerce de zenginleştirilmesi arzu edilebilmektedir,

-Kaplanan malzemenin mukavemet özelliklerinde olumsuz değişiklikler meydana gelebilmektedir.

Kaplama öncesi 5-10  $\mu\text{m}$  kalınlığında platinin elektrolitik olarak ana malzeme üzerine kaplanması hem yüksek sıcaklık oksidasyonu hem de sıcak korozyon direncini arttırdığı bulunmuştur (Reed, 2006).

### **2.1.1.2. Modifiye edilmiş difüzyon kaplamalar**

Korozyon dayanımını geliştirmek başta olmak üzere kaplama özelliklerini iyileştirmek için, alüminyum esaslı kaplamaları modifiye edecek, alüminyumlama öncesi ön işlem veya ön kaplama ve birlikte kaplama gibi çeşitli yollar geliştirilmiştir. Ön işlemlerli kaplamalara tipik bir örnek, alüminyumlama işlemi öncesi parçalara kromlama işlemi uygulanarak kromca zenginleştirilmiş alüminyum kaplama elde edilmesi olarak verilebilir. Endüstriyel olarak mevcut C1A (SNECMA) ve PWA 32 kaplamaları bu şekildedir.



Şekil 2.6. Codep kaplama uygulanmış türbin pale mikroyapısı (200x)

İki veya daha fazla elementi içeren eş zamanlı kaplamanın (Co-deposition / CODEP), tek adımlı sementasyon ile uygulanması, endüstriyel uygulamada yaygın olarak görülmemektedir. Şekil 2.6'da tek adımlı paket sementasyon ile elde edilmiş alüminyum ve kromdan oluşan, türbin palesi üzerine uygulanmış Codep kaplama mikroyapısı görülmektedir.

### 2.1.2. MCrAlX kaplamalar

Genel olarak MCrAlX şeklinde ifade edilen ve süperalaşımların üzerlerine uygulanan bu kaplamalar, difüzyon yerine elektrolitik kaplamalarda olduğu gibi direkt olarak ana metalin üzerine tutunmaktadır. M; nikel, kobalt veya bu iki elementin kombinasyonunu temsil ederken, X küçük miktarlarda ilave edilen reaktif bir elementi temsil etmektedir. MCrAl alaşımları üzerinde oluşan alümina tabakasının, muhtemelen genişleme ve termal gerilmelerin etkisi sonucu tutunma dayanımı yeterince yüksek olmamaktadır. Tutunma dayanımını iyileştirebilmek için Yttrium gibi nadir toprak elementleri sınırlı miktarlarda (< % 1) ilave edilmektedir (Rabiei et al., 2000). Bu kaplamalar ilk olarak 1960'ların sonunda o yıllar için yeni bir teknoloji olan EB-PVD tekniğiyle üretilmiştir. Bu alaşımların o zaman ki kimyasal kompozisyonları kobalt esaslı olup, Co-25Cr-14Al-0,5Y en başarılı örneklerindedir. Bu tür kobalt esaslı kaplamalar halen yüksek sıcaklık korozyonuna karşı iyi dirençleriyle yaygın olarak kullanılmaktadır (Reed, 2006).

Kimyasal kompozisyonları ve yapıları kaplandıkları ana metalden bağımsız olan MCrAlY kaplamalar, günümüzde temelleri iyice oturmuş olan EB-PVD (elektron ışın fiziksel buhar biriktirme) ve plazma sprey gibi metotların geliştirilmesi sonucu uygulanabilmektedirler. Bunun sonucunda, ticari olarak mevcut ATD 14, LCO 29 gibi kobalt esaslı, Amdry 961, LN 21 gibi nikel esaslı çok sayıda kaplama bileşimi bulunmaktadır. Çizelge 2.2'de yaygın kullanılan başlıca MCrAlX kaplamaların kimyasal bileşimleri görülmektedir. Bu kompozisyonlardaki çeşitlilik büyük ölçüde termal sprey kaplama teknolojisinin bu kaplamalara uygulanabilmesi sonucu gerçekleşebilmiştir. Özellikle düşük buhar basıncına sahip Si, Hf, Ta gibi elementler,

Ni, Cr, Al, Y elementleriyle istenen kimyasal bileşim oranlarında EB-PVD tekniğiyle elde edilememektedir (Reed, 2006).

Çizelge 2.2. MCrAlX kaplamaların yaygın türlerinin % ağırlıkça kimyasal bileşimi (Reed, 2006).

	Ni	Co	Cr	Al	Y	Ti	Si	Diğer
NiCrAlY	Kalan	-	25	6	0,4			
NiCrAlY	Kalan	-	22	10	1			
NiCrAlY	Kalan	-	31	11	0,6			
NiCrAlY	Kalan	-	35	6	0,5			
CoNiCrAlY	32	Kalan	21	8	0,5			
CoCrAlY	-	Kalan	25	14	0,5			
NiCoCrAlTaY	Kalan	23	20	8,5	0,6			4,0 Ta
NiCoCrAlYSi	Kalan	0-40	12,5- 20	2-8	0-0,25	0-10	2-10	0-4Nb 0-4Mo 0-20 Fe 0-5 Mn

MCrAlY kaplamalar genellikle çok fazlı malzemelerdir. Eğer alüminyum içeriği çok yüksek değilse, nikel ve kobalt esaslı alaşımlar genel olarak,  $\beta$ -NiAl veya  $\beta$ -CoAl çökelti fazları içeren, sünek kübik yüzey merkezli  $\gamma$ -katı çözelti şeklindedirler. Gerçek mikroyapı  $\gamma'$ , sigma,  $M_5Y$ ,  $Y_2O_3$  gibi çeşitli fazları içeren daha karmaşık bir yapıda olabilmektedir (Reed, 2006).

MCrAlY kaplamaların oksidasyon davranışı; alaşım kompozisyonu, sıcaklık, kısmi oksijen basıncı, zaman, termal çevrim gibi çok sayıda faktöre bağlıdır. Metalik türlerin ve oksijenin, koruyucu krom oksit tabakası içerisinde difüzyon hızı oldukça düşüktür ve bu hız alümina tabakada daha da düşüktür. Bu alaşımlarda kromun bulunması, alümina tabakası oluşturmak için gerekli alüminyum miktarını düşürmektedir. % 5-10 kadar kromun bulunması gerekli alüminyum miktarını % 40'dan

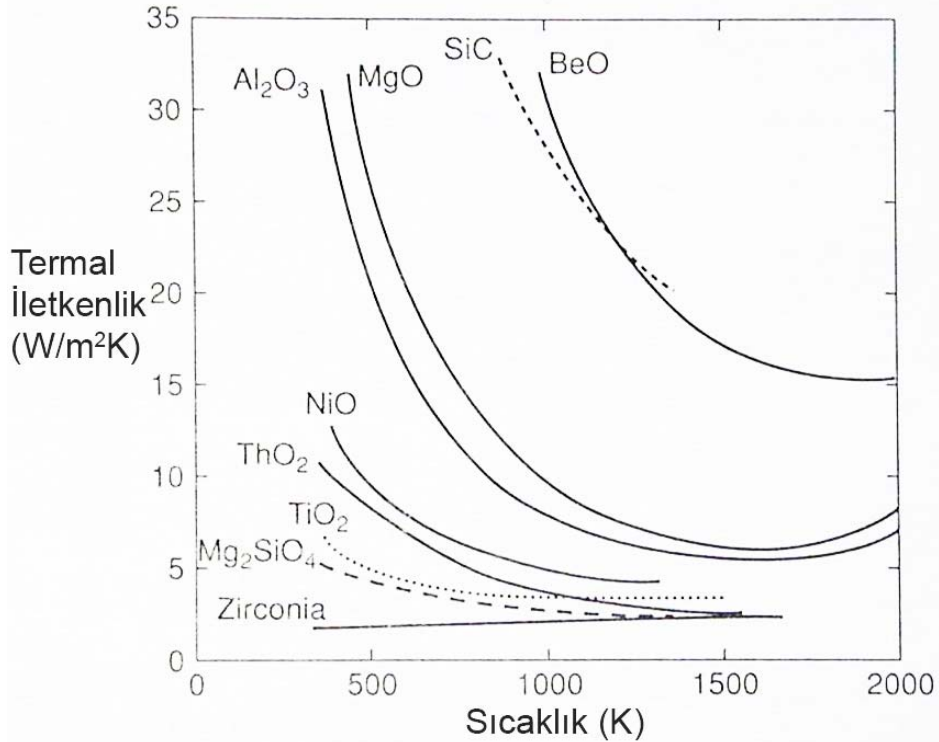
yaklaşık % 10 seviyesine indirmektedir. Krom ayrıca sıcak korozyon dayanımını da önemli ölçüde arttırmaktadır.

MCrAl alaşımları üzerinde oluşan ve termal gelişen oksit tabakası (TGO) olarak da adlandırılan alümina tabakasının, genişleme ve termal gerilmelerin etkisi sonucu tutunma dayanımı yeterince yüksek olmamaktadır. Tutunma dayanımını iyileştirebilmek için yttrium gibi nadir toprak elementleri sınırlı miktarlarda (< % 1) ilave edilmektedir.

### 2.1.3. Termal bariyer kaplamalar (TBK)

Termal bariyer kaplamalar genel olarak, ana metal üzerine kaplanmış MCrAlY bağ kaplama üzerine oluşturulan, bir oksit tabakası şeklindedir (Bolot et al., 2005). Günümüzde bağ kaplamaların çoğu yukarıda değinilen MCrAlY kompozisyonu veya nadiren yine yukarıda değinilen basit alümina ile platin-alümina difüzyon kaplama şeklindedir. Oksit tabakasının kalınlığı, türbin uygulamalarında ~300  $\mu\text{m}$ 'den dizel motorlarda ~2 mm'ye kadar değişebilmektedir. Oksit tabakası (üst kat) malzemesi olarak genellikle zirkonyum oksit ( $\text{ZrO}_2$ ) veya nadiren alümina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) kullanılmaktadır (Leyens et al., 1999; Portinha et al., 2005; Matsumoto et al., 2007; Hejwowski et al., 2002; Fujikane et al., 2007). Oksit tabakası olarak kullanılacak çeşitli termal yalıtkan seramik malzemelerin çok kristal formda sıcaklığa bağlı termal iletkenlik değişimleri Şekil 2.7'de verilmiştir. Gösterilen bu malzemelerin termal iletkenlik değerleri 1-30 W/mK arasında değişmekte olup, zirkonyum oksit 2 W/mK değeri ile en düşük olanıdır. Ayrıca termal iletkenlik değeri diğer yalıtkan malzemeler gibi güçlü bir sıcaklık bağımlılığı göstermemektedir. Bu bulgu bize niçin TBK uygulamalarında zirkonyum oksit kullanıldığını göstermektedir. Saf zirkonya 2400 °C üzerinde kübik, 1100-2400 °C arasında tetragonal ve 1100 °C altında da monoklinik kristal yapısına sahiptir. Tetragonal-monoklinik faz dönüşümü kullanım sırasında hacimce % 5 artış şeklinde değişikliğe ve bunun sonucunda meydana gelen kalıntı gerilmeler, çatlaklar gibi nedenlerle kaplamanın ömrünün kısalmasına neden olmaktadır (Kooloos, 2001; Dalkılıç, 2007; Portinha et al., 2005). Bu durumu önleyebilmek amacıyla zirkonyum

oksit, ytrium oksit ( $Y_2O_3$ ), magnezyum oksit (MgO), kalsiyum oksit (CaO), seryum oksit ( $CeO_2$ ) gibi stabilize edici oksitlerin ilavesi ile kısmi veya tamamen kararlı hale getirilmektedir. İlk termal bariyer kaplamalar, plazma sprej kaplama tekniği ile kalsiyum veya magnezyum ile kararlı hale getirilmiş zirkonya alaşımlardır ve 1960'larda uygulanmıştır. Bu kaplamalar yaklaşık 1000 °C sıcaklığın altına kadar iyi çalışır ancak bu sıcaklığın üzerinde monoklinik zirkonya oluşumu ve  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$  iyonlarının difüzyonu ile MgO ve CaO oluşumu neticesinde bozunurlar. Tamamen kararlı hale getirilmiş zirkonya, oda sıcaklığından ergime sıcaklığına kadar kübik faza sahiptir. %7  $Y_2O_3$  ilavesiyle kısmi kararlı hale getirilmiş zirkonyanın yaygın bir şekilde kullanılması, 1970'li yıllarda NASA tarafından yürütülen kapsamlı bir çalışma sonucunda %6-8  $Y_2O_3$  ile alaşımlandırılmış zirkonyanın en iyi termal çevrim ömrüne sahip olduğunun bulunması sonucudur (Reed, 2006; Portinha et al., 2005).



Şekil 2.7. Sıcaklığa bağlı olarak bazı yalıtkan seramiklerin termal iletkenlik değerleri (Reed, 2006).

Kısmi kararlı hale getirilmiş zirkonyum oksit, yüksek genleşme katsayısı, düşük ısı iletkenliği ve yüksek termal kararlılığı ile diğer üst kat malzemelerine göre öne çıkmaktadır (Chen et al., 2003; Portinha et al., 2005; Yamaguchi et al., 2007). Termal bariyer kaplamaların faydaları oldukça fazladır:

- Daha yüksek gaz sıcaklığı,
- Metalik parça içinde daha az soğutucu akışı,
- Metal yüzeyindeki sıcaklık farkının azaltılması,
- Sıcak korozyona karşı yüksek direnç,
- Metal saldırgan korozif ortamdan iyi bir şekilde koruma,
- Yüksek oksidasyon direnci.

Tüm bu avantajların sonucunda, artan verim, daha düşük emisyonlu motorların kullanımı, daha düşük maliyetli yakıtla çalışma imkânı, uzayan parça ömürleri, basitleştirilebilen türbin tasarımları gibi oldukça önemli çıktılar elde edilebilmektedir. Ancak termal bariyer kaplamaların potansiyelinden kaplamanın kullanım ömrüyle ilgili tam güvenilir tahminler yapılamadığından tam olarak yararlanılamamaktadır (Dalkılıç, 2007; Chen et al., 2003, Portinha et al., 2005; Vaben et al., 2001; Bi et al., 2000; Wolfe et al., 2005; Cao et al., 2008; Jan et al., 2008; Pindera et al., 2002).

Yanma odası, egzoz flapları gibi ince levha üzeri uygulamalar daha uzun bir süredir başarıyla uygulanırken, türbin kısmında veyn ve son olarak oldukça yüksek termal ve mekanik gerilmelere sahip türbin kanatçıklarında uygulamaları göreceli olarak daha yenidir (Chen et al., 2003; Rabiei et al., 2000; Goward et al., 1994; Nusier et al., 1998). Bu ilerleme, kaplama içindeki kalıntı gerilmelerin, gözeneklerin ve mikro çatlakların uygun bir şekilde kontrol altında tutulabilmesi sonucu gerçekleşmiştir.

Yapıştırıcı kat olarak da adlandırılan bağ kaplamanın temel görevi, oksijen geçirgenliği yüksek olan %8 ytrium kullanılarak kısmi kararlı hale getirilmiş zirkonya kaplama ile süper alaşım ana malzeme arasında oksijen bariyeri olarak görev alıp ana metalin oksidasyon direncini artırmak ve oksit tabakası ile ana metal arasındaki termal genleşme farkı gibi faktörlerden doğan mekanik uyumsuzlukları gidererek üst katın daha iyi tutunmasını dolayısıyla kaplama ömrünün artmasını sağlamaktır. Ayrıca, oksit tabakanın tutunması için ihtiyaç duyduğu pürüzlü yüzey de bağ kaplama ile

kazanılmaktadır (Kooloos et al., 2002; Okazaki et al., 2001; Almeida et al., 2006; Leyens et al., 1999; Matsumoto et al., 2007; Vaben et al., 2001; Chen et al., 2008).

Termal bariyer kaplamaların yüksek sıcaklıkta kullanımları, oksijenin seramik kaplamadan geçerek bağ kaplamaya ulaşip oksidasyona uğratmasına neden olur. Bağ kaplamanın üzerinde yavaşça oluşan oksit katmanı 'termal olarak gelişen oksit' (TGO) olarak adlandırılmaktadır. Bu tabaka bağ kaplamayı ve altındaki ana metali daha ileri oksidasyondan korumakla beraber, bu katmanın kullanım esnasında belirli bir kalınlığa erişmesi, bağ kaplama ile seramik kaplama arasında gerilimin artmasına ve seramik katmanın çatlama, kopma, bölgesel kalkma vb. şeklinde hasarlanmasına yol açmaktadır (Chen et al., 2008). Dolayısıyla, termal bariyer kaplamaların ömrünü belirleyen iki kritik faktör, kaplama katmanları ve ana metal arasındaki termal genişleme uyumsuzlukları ve termal gelişen oksit tabakasının kalınlığının artmasıyla bulunduğu bölgedeki gerilimi arttırmasıdır (Vaben et al., 2001).

Seramik katmandan oksijenin geçişiyle ilgili olarak;  $ZrO_2$  kristal yapısından iyonik difüzyon, gözenek ve mikro çatlaklardan gaz nüfuziyeti şeklinde iki temel mekanizma ön görülmektedir. Bu mekanizmalardan ikincisinin daha büyük rol aldığı değerlendirilmektedir. Kullanım esnasında yüksek sıcaklıktan oda sıcaklığına soğuma sırasında termal gelişen oksit tabakası, termal genişleme katsayıları arasındaki uyumsuzluktan dolayı büyük basma kalıntı gerilmelerine neden olur. Bir sonraki tekrar ısınma çevriminde kalıntı gerilimin azalması TGO / seramik katman ara yüzeyine paralel çekme gerilmelerinin oluşmasına ve bu arayüzeyde çatlama ve ayrılmaya yol açar. TGO katmanının daha kalın olması daha büyük gerilmelere yol açmaktadır. TGO katmanı genel olarak bağ kaplamaya oksijen geçişini azaltmakla beraber bağ kaplama içerisinde oksidasyon devam etmektedir, bunun nedeni TGO içerisindeki gözenekler ve termal çevrim sırasında TGO üzerinde oluşan çatlakların oksijen geçişi için uygun yollar oluşturmasıdır (Saremi et al., 2008; Matsumoto et al., 2007).

Termal bariyer kaplamaların her iki katmanı da elektron ışın fiziksel buhar biriktirme (EB-PVD) veya plazma sprey kaplama tekniği ile üretilebilmektedir. Plazma sprey işlemi, atmosferik ortamın yanı sıra bağ kaplama özelliklerinin geliştirilebilmesi



için kontrollü atmosfer veya vakum altında da yapılabilmektedir (Portinha et al., 2005; Bi et al., 2000; Scrivani et al., 2008). Son zamanlarda bağ kaplamanın vakum yerine nispeten daha düşük maliyetli yüksek hızlı oksit yakıt (HVOF) termal sprey tekniği ile kaplanmasının özellikle atmosferik kaplamaya göre daha iyi tutunma dayanımı ve daha düşük oksit içeriği ile avantaj sağladığı görülmüştür (Goedjen et al., 2003).

## **2.2. Termal Bariyer Kaplama Metotları**

Termal bariyer kaplamalar, termal sprey ve EB-PVD olmak üzere iki teknikte elde edilmektedir. Termal sprey kaplama; işlem kolaylığı, maliyet ve iyi ısı yalıtkanlık, EB-PVD ise düşük yüzey pürüzlülüğü, yüksek termal şok direnci ile öne çıkmaktadır. Her iki teknik de, parçaların kullanım koşullarından doğan ihtiyaç göz önüne alınarak seçilmektedir.

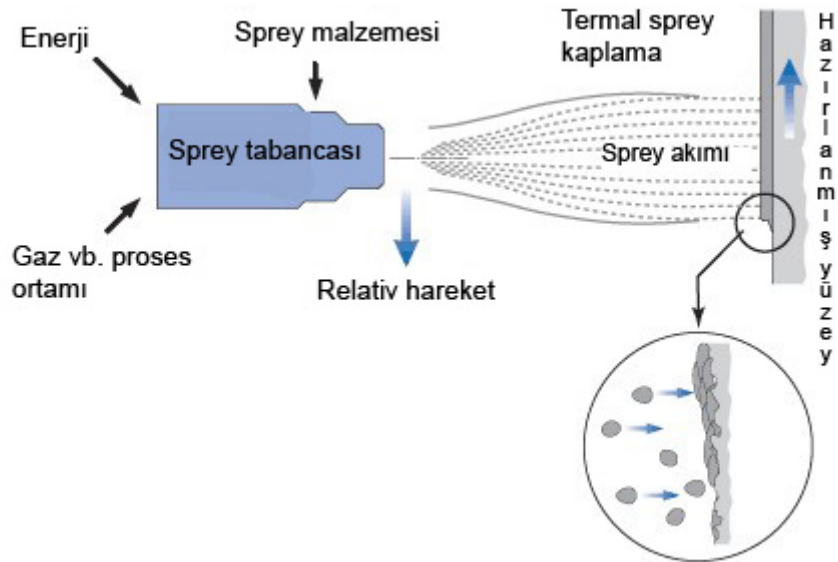
### **2.2.1. Termal sprey kaplama (thermal spraying)**

Termal sprey kaplama, çeşitli malzemeleri korozyondan korumak için çinko kullanımını amacıyla 1900'lerin başlarında keşfedildi. 1950'lerin sonları ile 1960'ların başlarında plazma sprey tabancasının geliştirilmesiyle, kaplama malzemesi olarak seramikler ve refrakter metaller gibi yüksek sıcaklık malzemelerinin kullanılması ticari olarak uygulanabilir hale geldi. Alev ve plazma spreye ilave olarak yüksek hız ve patlama sprey teknikleri ile günümüzde termal sprey metotları son derece zor ve yüksek beklenti gerektiren koşullarda dahi yaygın olarak kullanılmaktadır (Weidmann et al., 2005).

Termal sprey kaplama, ana malzemeye kendinde olmayan özel bir yüzey kalitesi kazandırmak için uygulanır. Dolayısıyla parçanın mukavemeti ana malzeme tarafından sağlanırken, korozyon, aşınma direnci veya ısı direnci gibi nitelikleri kaplama sağlar. Dolayısıyla termal sprey kaplamalar, havacılık ve enerji üretim endüstrilerinde gaz

türbinlerinin yeni ve yenilenmiş parçalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Weidmann et al., 2005).

Sprey işleminde, tel veya toz formundaki kaplama malzemesi, spray tabancasındaki yüksek ısı kaynağı ile ergitilir ve alev veya plazma jet ile kaplanacak olan malzemeye doğru hızlandırılır. Ergimiş ve yarı ergimiş parçacıklardan meydana gelen akım ana malzeme üzerine çarpar ve kaplamayı oluşturur. Parçacıklar yüzeye çarptıklarında mekanik olarak kenetlenir, deforme olur ve hızla katılırlar. Her bir parçacığın tutunması, mekanik bağlanma veya bazı durumlarda metalürjik bağlanma veya difüzyonla gerçekleşir. Parçacıkların hızının artması daha iyi bir tutunma dayanımı ve daha yüksek yoğunluk sağlar. Ana malzeme ile kaplama arasında iyi bir bağlanma sağlanması için ana malzeme yüzeyinin kaplama öncesi kumlama ile pürüzlendirilmesi, yağının alınması ve tamamen temizlenmesi son derece önemlidir (Weidmann et al., 2005; Tucker, 1994). Şekil 2.8’de termal spray kaplama işleminin genel görünümü verilmiştir (Sulzer Metco, 2010).

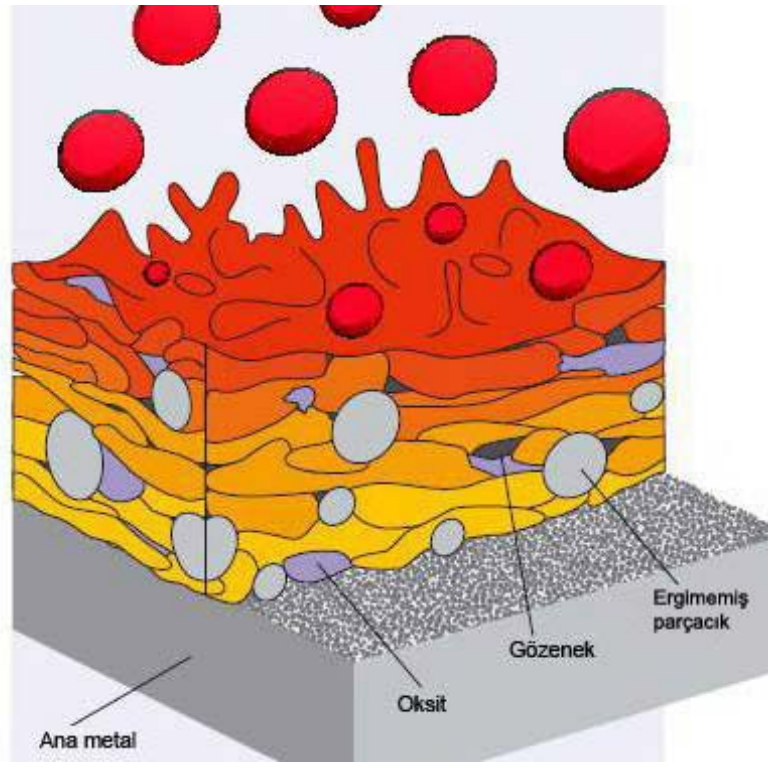


Şekil 2.8. Termal spray kaplama prosesi genel görünümü (Sulzer Metco, 2010).

Farklı spreyleme teknikleri, ısı kaynağı tarafından sağlanan farklı sıcaklıklar ve farklı parçacık hızlarına sahiptirler. Uygulamanın maliyeti, kullanım gereksinimleri, kaplama cinsi gibi faktörlere bağlı olarak uygun teknik seçilmelidir (Weidmann et al., 2005).

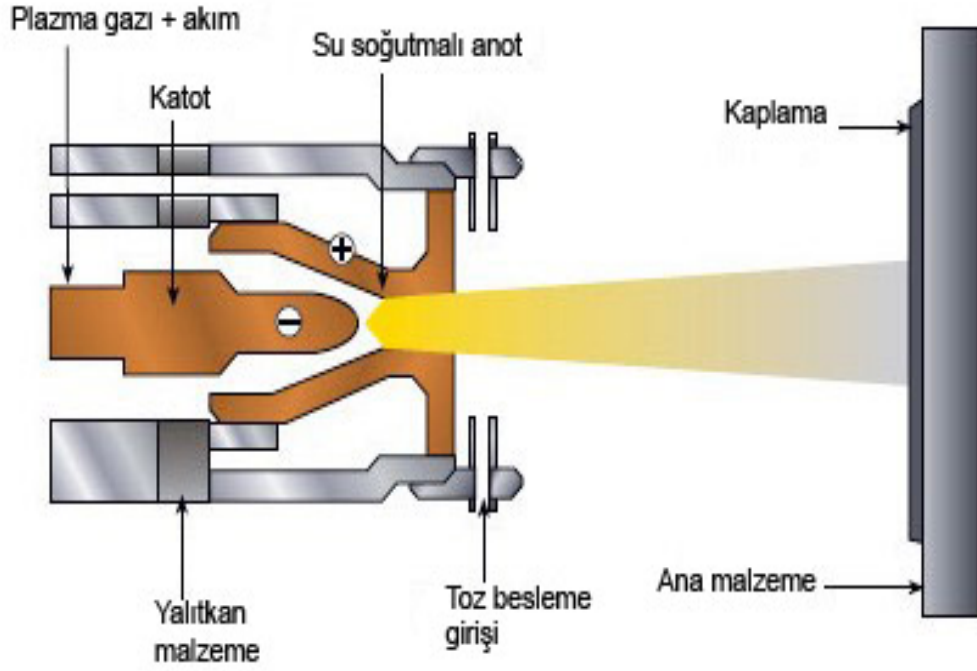
### **2.2.1. 1. Plazma sprej (plasma spraying)**

Plazma sprej, tüm termal sprej teknikleri içerisinde her malzemeyi ergitmeye yetecek kadar yüksek enerji üretebildiğinden belki de en esnek olanıdır. Kaplama malzemesi olarak toz kullanıldığından, plazma sprej prosesinde kullanılacak kaplama malzemelerinin sayısı adeta sınırsızdır (Sulzer Metco, 2010). Bu nedenle tüm termal sprej metotları içerisinde en yaygın olarak kullanılanıdır. Hava plazma spreyleme yanında kontrollü atmosfer altında da uygulama yapılabilmektedir (Weidmann et al., 2005). Anot (nozül) ve katot (elektrot) arasında yüksek frekanslı bir ark ateşlenir. Proses gazları (genellikle argon, azot, hidrojen veya helyum) anot ve katot arasından geçer, iyonize olarak sıcak plazma gaz halini alır. Oluşan plazmanın ısı güneşin yüzey ısısından daha yüksek olup 16.600 °C'ye kadar çıkabilir. Kaplama malzemesi gaz bulutu üzerine enjekte edildiğinde ergir ve hedef kaplanacak malzemeye doğru hızlanır (Sulzer Metco, 2010). Şekil 2.9'da plazma sprej tekniği ile toz taneciklerinin kaplamaya dönüşümü şematik olarak gösterilmiştir (Weidmann et al., 2005).

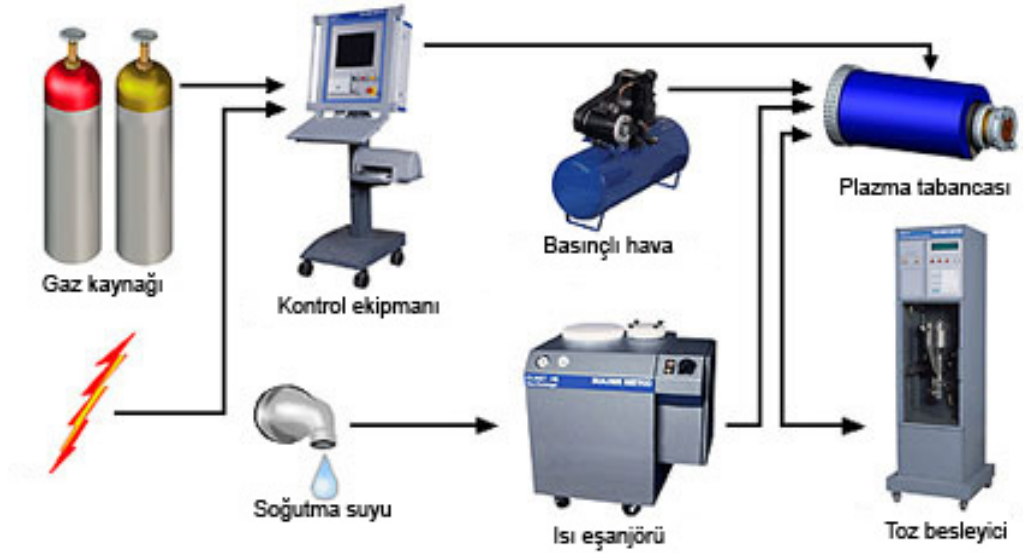


Şekil 2. 9. Kaplama ve bileşenlerinin oluşumu (Weidmann et al., 2005)

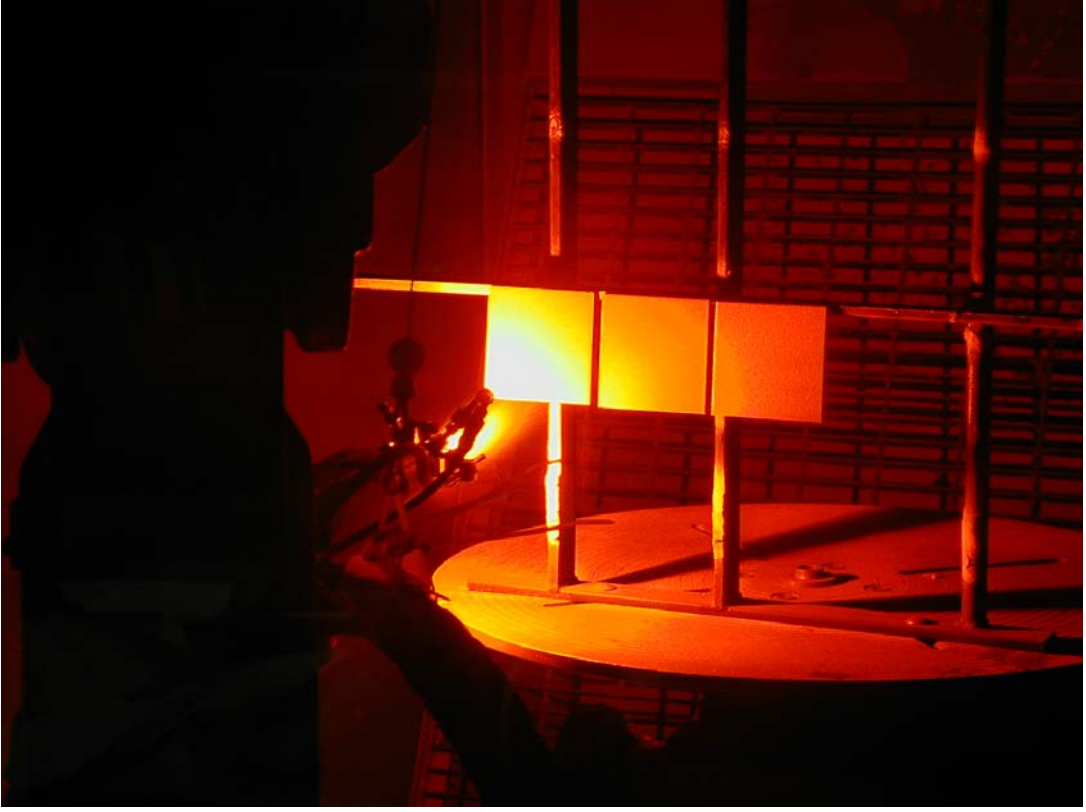
Plazma sprej kaplamalar, alev sprej gibi daha düşük ısıli termal sprej kaplamalardan daha yüksek yoğunluğa sahiptir. Bu metot seramik veya refrakter metaller gibi yüksek ergime noktasına sahip malzemelerin kaplanmasına olanak sağlar. Yüksek kaliteli kaplamalar üretmek için kullanışlı bir metot olduğundan aşınma yüzeylerinde, termal bariyer kaplama olarak türbinlerde yanma odaları, veyn ve palelerde, ortopedik implantlarda ve baskı merdanelerinde seramik kaplama olarak kullanılmaktadır (Weidmann et al., 2005). Şekil 2.10 ve 2.11’de sırasıyla plazma sprej tekniğinin şematik görünümü ve sistem bileşenleri, Şekil 2.12’de ise plazma sprej uygulaması verilmiştir.



Şekil 2.10. Plazma sprej tekniği şematik görünümü (Sulzer Metco, 2010).



Şekil 2.11. Plazma sprej sistem bileşenleri (Sulzer Metco, 2010).



Şekil 2.12. Plazma sprej uygulaması

Plazma sprej tekniği ile elde edilen termal bariyer kaplamanın mikroyapısı proses parametrelerine güçlü bir şekilde bağlıdır. Kaplama, katmanlar arası ve küresel gözenekler, kaplamanın soğuması sırasında meydana gelen termal kalıntı gerilmelerden kaynaklanan kaplama yüzeyine dik katmanlar arası çatlaklar içerir. Oluşan gözenek ağı, ve katmanlar arası paralel çatlaklar, kaplamanın düşük termal iletkenliğe sahip olmasında en etkili rolü oynamaktadır. Katmanlar arası gözenekler, kaplama yüzeyine ve dolayısıyla ısı akısına dik doğrultuda olduğundan termal direnç bölgeleri meydana getirerek seramik katmanın termal iletkenlik değerini dolu zirkonyanın yaklaşık yarısına indirmektedir. Buna karşılık, kaplama yüzeyine dik çatlaklar, kaplamanın genişlemesi ve küçülebilmesi için uygun sahalar oluşturarak termal şok dayanımını önemli ölçüde arttırmaktadır (Bolot et al., 2005; Portinha et al., 2005; Yoshiya et al., 2004). Kaplamanın çok yüksek sıcaklıklarda çalışması seramik kaplamada katmanlar arası mikro çatlakların sinterlenme etkisiyle kapanması neticesinde termal iletkenliğin

artmasına ve termal şoklara dayanımının düşmesine yol açmaktadır (Matsumoto et al., 2007).

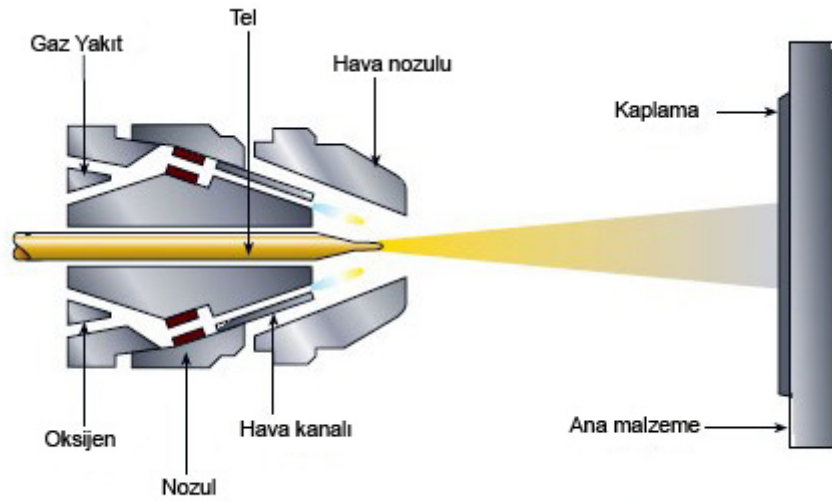
Seramik katman içerisindeki gözeneklerin artırılması kaplamanın iletkenlik değerini düşürmektedir, buna karşın gözenek miktarının aşırı artırılması kaplama taneleri arasındaki tutunma dayanımını düşüreceğinden mekanik bütünlüğün bozulmasına yol açmaktadır (Portinha et al., 2005).

### **2.2.1.2. Diğer termal sprej kaplama teknikleri**

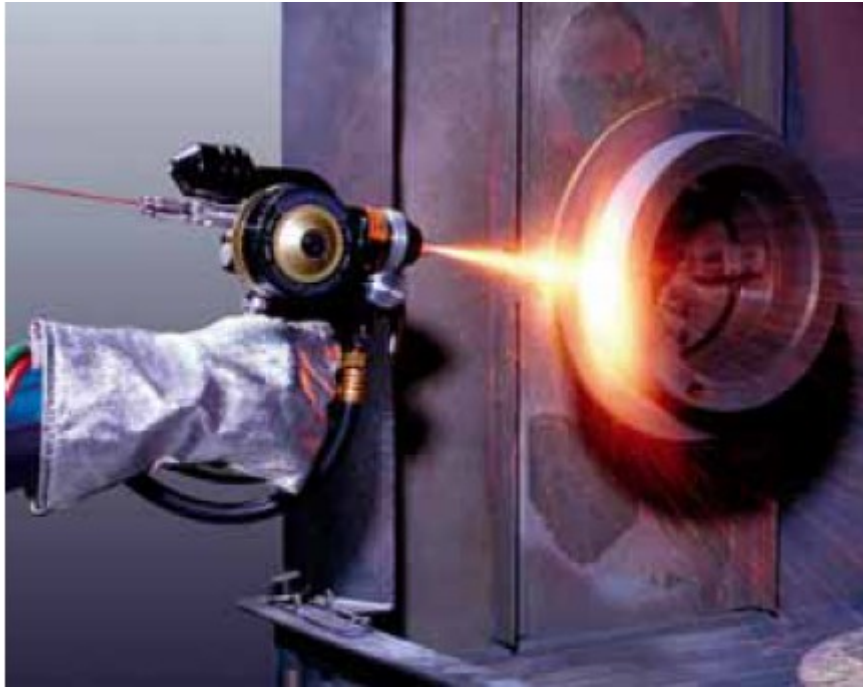
Termal sprej kaplama teknikleri çeşitlilik gösterip, her teknik beraberinde getirdiği avantajlarla farklı sahalarda kullanım alanı bulmaktadır. Bu bölümde termal sprej kaplama tekniğinin daha iyi anlaşılması amacıyla diğer uygulama türlerine kısaca değinilmiştir.

#### **i. Alev sprej (flame spraying)**

Tüm termal sprej kaplamalar içerisinde en eski metottur, keşfi 1911 yılında İsviçre’de gerçekleşmiştir (Tucker, 1994). Kaplama malzemesi tel veya toz olabilir ve oksijen-yakıt karışımından oluşan gaz alevinin içine sürülür. Ergimiş ve atomize olmuş parçacıklar sprej tabancası nozulundan yönlendirilmiş akışa katılırlar. Göreceli olarak düşük parçacık hızı nedeniyle, oksijene maruz kalma süresi uzadığından bu kaplamaların oksit miktarı bir miktar yüksektir. Tutunma dayanımı ve yoğunluk orta düzeydedir. Daha sonra yapılacak ergitme ile yoğunluk artırılabilir. Alev sprej kaplamalar, yapıların ve parçaların korozyon dayanımı, aşınmış şaftların yeniden boyutlandırılması gibi alanlarda yaygın olarak kullanılır (Weidmann et al., 2005). Şekil 2.13 ve 2.14’de sırasıyla tel kaplama malzemesi kullanılan alev sprej şematik görünümü ve uygulaması görülmektedir.



Şekil 2.13. Alev sprej kaplama şematik görünümü (Sulzer Metco, 2010).

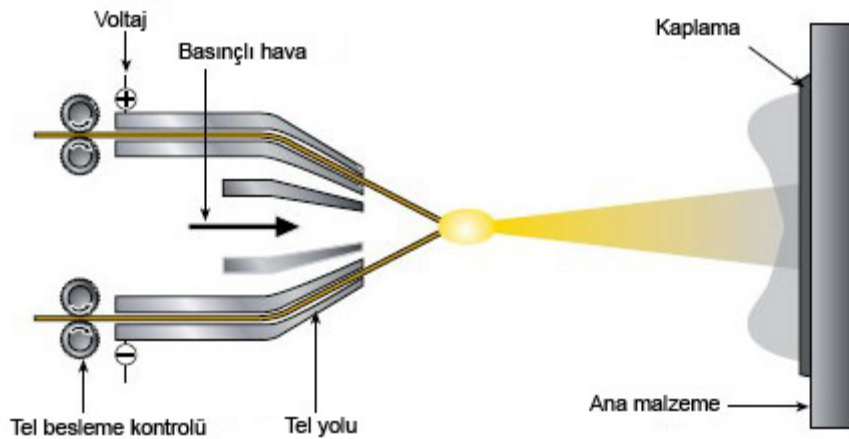


Şekil 2.14. Alev sprej kaplama uygulaması. (Weidmann et al., 2005).



## **ii. Elektrik ark sprej**

Bu teknik ısı kaynağı olarak kaplama malzemesinden üretilmiş iki ergiyerek tüketilen tel arasındaki arkı kullanır. Teller, basınçlı hava akımının önünde kesilir, arkın doğan ısı telleri erittikçe, basınçlı hava damlacıkları ana malzemeye doğru iter. Yüksek ark sıcaklığı ve parçacık hızı bu kaplamaya alev spreye oranla daha yüksek tutunma dayanımı ve yoğunluk sağlar. Bununla birlikte kullanılan basınçlı hava nedeniyle ark sprej kaplamalar daha yüksek oksit içeriğine sahiptir. Şekil 2.15’de elektrik ark sprej tekniği görülmektedir.

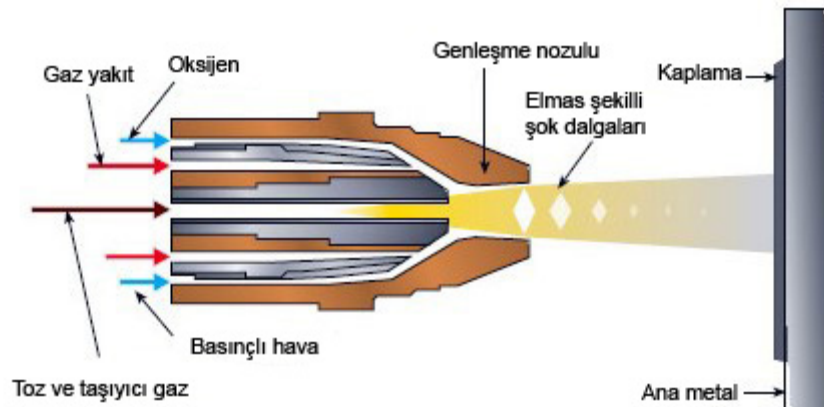


Şekil 2.15. Elektrik ark sprej tekniği şematik görünümü (Sulzer Metco, 2010).

## **iii. Yüksek hızlı oksijen-yakıt yanma tip spreyleme (high velocity oxy-fuel combustion spraying)**

Bu spreyleme tekniğinde, yakıt gaz ve oksijen bir hazneye iletilir, burada oluşan yanma sonucunda oluşan süpersonik alev hızının daha da artırıldığı bir nozula yönlendirilir. Kaplama malzemesi toz halinde bu akımın içine beslenir. Toz tanelerinin kazandığı aşırı yüksek hız, yüzeye çarptığında yüksek yoğunlukta ve güçlü bir kaplama oluşturur. Parçacıkların yüzeye çarpma anındaki yüksek kinetik enerjisi, taneciklerin

tam ergimemesi halinde bile kuvvetli bir mekanik bağ oluşmasına yol açar. Bu durum, HVOF tekniğini gaz türbin parçaları ve valflerde tungsten karbür ve nikel krom kaplamalarda yaygın olarak kullanılmasına yol açmaktadır (Weidmann et al., 2005). Şekil 2.16'da HVOF tekniği görülmektedir.

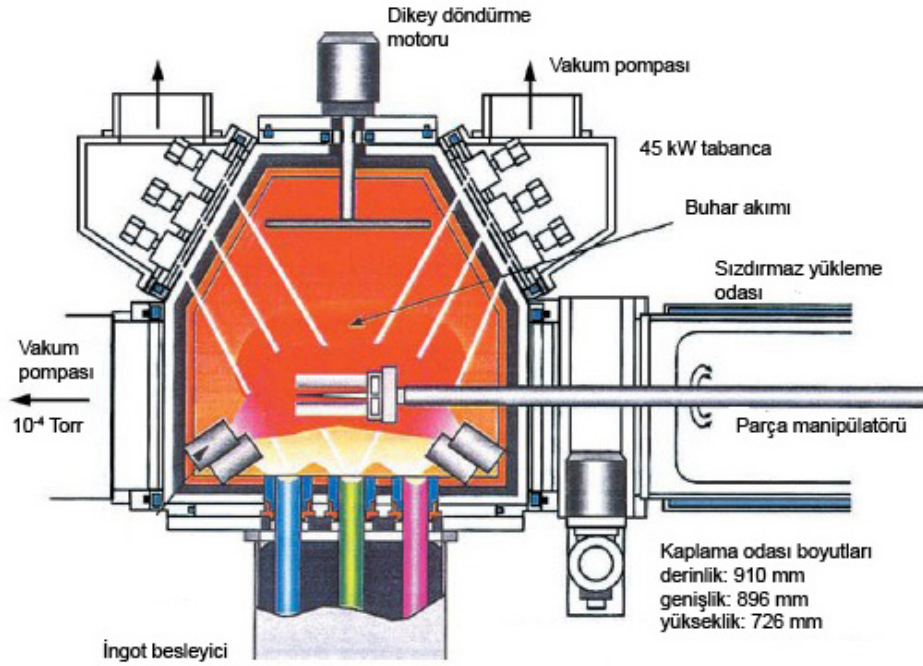


Şekil 2.16. Yüksek hızlı oksijen-yakıt yanma tip sprej tekniği şematik görünümü (Sulzer Metco, 2010).

### 2.2.2. Elektron ışın fiziksel buhar biriktirme (electron beam physical vapour deposition: EB-PVD)

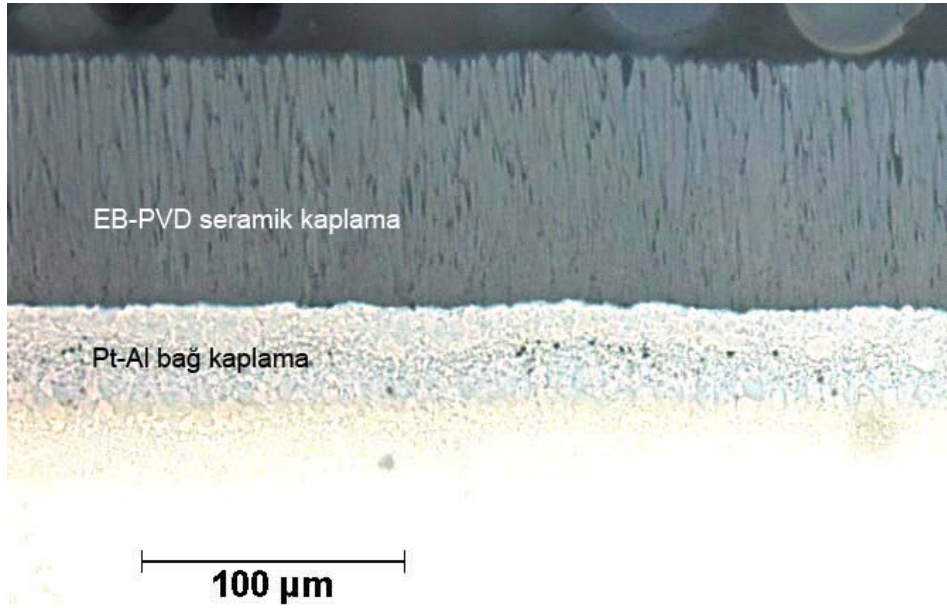
Gaz türbin malzemeleri için EB-PVD metodunun kullanımı 1960'ların sonlarında Pratt & Whitney tarafından MCrAlX kaplamalar için gerçekleştirilmiştir. Bu metotla MCrAlX türü kaplamaların uygulamaları yapılmakla beraber günümüzde seramik katmanın kendisi türbin palelerinin çalışma yüzeylerine yapılmaktadır (Yamaguchi et al., 2003; Kelly et al., 2008). MCrAlX kaplamaların EB-PVD uygulamaları günümüzde yerini büyük ölçüde termal sprej kaplamalara bırakmıştır. TBK uygulamaları, termal sprej tekniği kullanılarak 1970'lerden beri yanma odası parçalarında, EB-PVD tekniği kullanılarak da 1980'lerden itibaren türbin nozul sabit ve hareketli kanatçıklarında gerçekleştirilmektedir. Bu proste kaplama malzemesinin su soğutmalı bakır kap içerisinde soğutulan ingotu, elektron ışını ile buharlaştırılmakta,

ingotun üzerinde biriken buhar içerisinde kalan parça üzerinde kaplama oluşmaktadır. Şekil 2.17’de bu prosesin şematik görünümü verilmiştir. Kaplama malzemesi buharlaştıkça ingot ileri doğru itilerek yüksekliği sabit tutulmaktadır. Damlacık içermeyen, tamamen buharlaşmış, temiz ingot yüzeyine sahip buhar üretmek kritik öneme sahiptir. Böylece işlem sırasında istenmeyen kimyasal reaksiyonların önüne geçilmiş olur. Prosesin üretkenliğini makul bir düzeyde tutabilmek için (5-10  $\mu\text{m}$  / dakika), tipik bir değer olarak 40 kV gerilim altında 150 kW gücünde güçlü elektron tabancasına ihtiyaç vardır. Ayrıca, bir kaç paskaldan biraz daha yüksek güçlü bir vakum ortamı ve buhar bulutu içerisinde kaplanacak parçaların manipülasyonuna da ihtiyaç duyulur. Tüm bu gereksinimler EB-PVD prosesini, gaz türbin endüstrisindeki en pahalı kaplama metodu yapmaktadır. Motor uygulamalarına cevap verebilecek nitelikte EB-PVD tesisi tüm dünyada sadece 50 civarındadır (Reed, 2006).



Şekil 2.17. EB-PVD kaplama prosesi (Reed, 2006)

TBK uygulamalarında üstün yoğunluk, erozyon direnci ve kalkma ömrüne sahip kaplamaların elde edilebilmesinin, işlem sırasında ana metal sıcaklığının 850-1050 °C aralığında olması ile mümkün olduğu bulunmuştur. Kaplama değişkenlerinin dikkatli bir şekilde tasarlanmasıyla, elde edilen kaplama morfolojisi, yüzeye dik, birbirleriyle rekabet ederek gelişen kolon grupları şeklindedir. Şekil 2.18’de tipik bir %7 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ile kısmi stabilize edilmiş ZrO<sub>2</sub> seramik TBK malzemesinin EB-PVD tekniğiyle üretilmiş mikroyapısı görülmektedir. Yukarıda değinilen duruma paralel olarak seramik kaplamanın kolon yapısı resimde görülebilmektedir. Kolonlar arasındaki bağ oldukça zayıftır (Reed, 2006). Bu durumun neticesi olarak, EB-PVD tekniğiyle elde edilen kaplamaların kristallerinin kolonlu yapısı kaplama yüzeyine paralel çatlakların ilerlemesi önünde durdurucu bir engel oluşturmaktadır. Ayrıca bu yapı, termal çevrimler sırasında termal genleşme katsayıları arasındaki farklılıktan doğan gerilmeleri kolonlar arası poroziteleri sayesinde düşürerek termal şok ömrünü uzatmaktadır (Leyens et al., 1999; Bi et al., 2000). EB-PVD tekniğinin bir diğer avantajı da yüzey pürüzlülüğünün daha az olması sebebiyle türbin paleleri gibi kritik sahalarda aerodinamik akışı bozmamasıdır. (Bi et al., 2000)



Şekil 2.18. EB-PVD tekniğiyle türbin palesi üzerinde elde edilmiş kaplama mikroyapısı (Stolle, 2004).

### 2.3. Termal Bariyer Kaplama Metotlarının Karşılaştırılması

Her iki kaplama metodunda açıklanan mikroyapı özelliklerinin bir sonucu olarak, plazma sprej tekniğiyle üretilen termal bariyer kaplamalar daha iyi termal yalıtkanlık göstermesine karşın, fiziksel buhar biriktirme metoduyla üretilen kaplamalar başta termal şok olmak üzere daha iyi mekanik dayanım göstermektedir.

İki teknikle üretilen kaplamaların değinilen bu mikroyapı karakteristikleri göz önüne alındığında, hem iyi termal yalıtkanlık hem de iyi mekanik sağlamlığı bir arada bulduran kaplamaların elde edilmesi çok zor görülmektedir (Yoshiya et al., 2004). Yine de bu hedefe yönelik çalışmalar devam etmektedir.

Plazma sprej tekniğiyle üretilen kaplamaların mekanik özelliklerinin iyileştirilebilmesi için tez çalışmasında da kullanılan lazer sırlama ve ön oksidasyon modifikasyonlarının etkilerinin araştırılması, kaplama parametreleri üzerinde çalışılarak gözenek, mikro çatlakların yapısı ve kaplama içerisindeki dağılımının düzenlenmesi, özellikle kaplamanın sinterlenmesini önleyebilmek amacıyla yeni seramik kaplama malzemelerinin araştırılması, katmanlı yapıların üretilmesi gibi devam eden çalışmalar genel stratejiyi oluşturmaktadır (Matsumoto et al., 2006; Cao et al., 2008; Batista et al., 2005). Lazer sırlama modifikasyonunun, kaplama yüzeyindeki gözenekleri büyük ölçüde kapatarak oksijen difüzyonunu azalttığı ve oksidasyon ömrünü arttırdığı, ayrıca dikey çatlaklar meydana getirerek termal şok ömrüne olumlu katkıda bulunduğu son zamanlarda yapılan çalışmalarda rapor edilmiştir (Zhong et al., 2009; Ma et al., 2009; Morks et al., 2010).

EB-PVD tekniğiyle üretilen kaplamaların termal özelliklerini iyileştirebilmek amacıyla, kaplama parametreleri üzerinde çalışarak kolon yapısının inceltilmesi, kaplama yüzeyine dik kristal yapı yerine zik zak patern izleyen kaplamaların elde edilmesi, termal direnç yüzeyleri oluşturabilmek için nano boyutlarda çok katmanlı yapıların elde edilmesi gibi çalışmalar yapılmaktadır (Yoshiya et al., 2004; Schlichting et al., 2001; Wada et al., 2006; Tang et al., 2006; Zeng et al., 2002; Afrasiabi et al.,

2008; Scrivani et al., 2008; Cao et al., 2008; Chen et al., 2008; Zeng et al., 2002; Kim et al., 2003; Racek et al., 2006; Ma et al., 2006; Koollos et al., 2002).

### 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu kısımda, deneylerde kullanılan numuneler, bu numunelere uygulanan test ve değerlendirme metotları hakkında bilgiler verilmiştir. Deney numuneleri belirlenirken numune sayısını belirli bir seviyede tutularak, test sonuçlarından olabildiğince çok bilgi elde edilmesi amaçlanmıştır. Deneysel çalışmada öncelikle yapılan test türleri ve bu testlerden elde edilen bilgiler değerlendirilmiş, bu bilgilerin ışığında numuneler üzerine uygulanan işlemlerin yanında numune şekil ve boyutları da belirtilmiştir. Deneysel çalışmanın esasını;

- Farklı parametrelerle kaplanmış numunelerin elde edilmesi,
- Kaplanmış numunelere uygulanan modifikasyon işlemleri,
- Tüm bu numunelere belirlenmiş test ve ölçüm metotlarının uygulanması oluşturmaktadır.

#### 3.1. Deneysel Çalışma Detayları

Deneysel çalışma ile ilgili ön hazırlık işlemleri, kullanılan numune ve sarf malzemelerin detayları bu bölümde verilmiştir.

##### 3.1.1. Ön hazırlık

Plazma sprej prosesinde iyi bir tutunma elde edebilmek için, numuneler kaplama işlemi öncesi kumlanmaktadır. Kumlama işleminin iki temel fonksiyonu bulunmaktadır, bunlar ana malzeme üzerinde bulunabilecek oksit, kir vb. malzemelerin uzaklaştırılması ve kaplamanın tutunmasını sağlayacak pürüzlü bir yüzeyin elde edilmesidir. Bu amaçla numuneler kapalı emiş tipli bir üniteye kumlanmıştır. Kumlama parametreleri olarak; basınç 3,4 bar, mesafe 51 mm, açı 80 derece ve süre 45 sn/numune olarak seçilmiştir. Elde edilen yüzey koşullarının muhafaza edilebilmesi amacıyla numuneler kumlama sonrası bekletilmeden 30 dakika içerisinde kaplanmıştır.

Kaplama için kullanılacak olan tozlar atmosferik koşullardan etkilenerek bünyelerinde nem içerebileceklerinden kurutma işleminden geçirilmiştir. Kurutma atmosferik bir fırında 75 °C sıcaklıkta her iki katmanda kullanılacak tozun 60 dakika süreyle bekletilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Kumlamaya benzer şekilde tozlar, tekrar nem tutmaması için bekletilmeden toz konilerine (hopper) yerleştirilerek derhal kaplama uygulamasına geçilmiştir.

### 3.1.2. Plazma sprey işleminde kullanılan ekipman ve sarf malzemeler

Kaplama, Sulzer Metco firmasının ürünü olan kapalı kabinli tip 9 MB sistemi kullanılarak uygulanmıştır. Sistem, plazma torcunun daha yüksek hareket hassasiyetine sahip olması amacıyla ABB Robotech şirketinin robot kolu ile modifiye edilmiştir. Toz besleme sistemi yine Sulzer Metco firmasına ait 9MB sistemi olup, taşıyıcı gaz basınç ve debisinin yanında toz akış ve debisini de ayarlama yeteneğine sahiptir.

Bağ ve seramik kaplama tozlarına ait bilgiler çizelge 3.1’de verilmiştir. bağ kaplama tozu tüm numunelerde aynı iken, seramik kaplama tozu olarak iki farklı ürün seçilmiştir. Metco 204 tozunun belirgin özelliği, bu firmaya ait patentli HOSP (Hollow sphere) teknolojisidir. Bu teknolojiye üretilen kaplama tozları içi boş kürelerden oluşmaktadır.

Çizelge 3.1. Kaplama tozlarının özellikleri.

	Tane boyut aralığı (µm)	Tane şekli	Üretici firma	Kimyasal bileşim (% ağırlık)			
				67 Ni	22 Cr	10 Al	1 Y
<b>Bağ kaplama</b>	-106+52	Küresel	Practor	67 Ni	22 Cr	10 Al	1 Y
<b>Seramik kaplama</b>	-106+11	Küresel	Saint Gobain	92 ZrO <sub>2</sub>	8 Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		
<b>Seramik kaplama</b>	-106+11	Küresel (içi boş)	Sulzer Metco	92 ZrO <sub>2</sub>	8 Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		



### 3.1.3. Numune boyut ve ana malzemeleri

Bölüm 3.1’de verilen test ve değerlendirmeleri gerçekleştirebilmek amacıyla, (25x25) mm<sup>2</sup> kare, (25x30) mm<sup>2</sup> dikdörtgen ve 25 mm çapında disk numuneler kullanılmıştır. Numune boyutlarının seçiminde mikroyapı analizine hazırlanabilirlik açısından uygunluk, test cihazında kullanılabilirlik ve testle ilgili standartlar göz önünde tutulmuştur. Ana metal olarak 18/10 Cr Ni paslanmaz çelik malzemeler kullanılmıştır. Paslanmaz çelik malzemenin kullanılmasındaki temel neden, süper alaşımlara oranla oksidasyon direncinin daha düşük olması nedeniyle kaplamaya yönelik oksidasyon testlerinde daha hassas sonuçlar alınabilmesi olanağıdır.

### 3.2. Test ve değerlendirme metotları

Numuneler yoluyla termal bariyer kaplamalar hakkında faydalı bilgilerin toplanabilmesi için öncelikle ihtiyaç duyulan test ve ölçüm türlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla yapılan değerlendirmede kullanım ömrü üzerinde kritik öneme sahip özelliklerin ölçülerek kaplanmış numuneler üzerinde bilgi elde edilmesi ve özellikle kıyaslama yoluyla kaplama parametrelerinin belirlenmesine çalışılmıştır. Numune isimlerinin sonuna gelen AC kodu kaplamanın modifikasyonsuz halini, L kodu lazer, V ise vakum ısıtım işlemi ifade etmektedir.

#### 3.2.1. Çekme testi

Kaplamanın oda sıcaklığındaki ana metal veya diğer kaplama katmanlarıyla olan tutunma direnci mukavemetinin belirlenmesine yönelik olarak çekme testi uygulanmıştır. Test işlemi, termal spreyle kaplamalar için hazırlanmış olan GE E50 TF 60-59 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Termal spreyle kaplanmış numunelerde çekme testi sonucunda kopma; kaplama katmanlarının içerisinde, katman ara yüzlerinden (bağ kaplama / ana metal, bağ kaplama / seramik kaplama) veya yapıştırmacıdan gerçekleşebilir. Test sonucunda kopma tüm bu zincir içerisindeki en

zayıf halkadan veya bu bölgelerin karışımından meydana gelmektedir. Kaplamanın kullanılan yapıştırıcıdan daha mukavemetli olması durumunda kopma yapıştırıcı katmanda gerçekleştiğinden kaplamanın ancak minimum çekme mukavemeti anlaşılabilir.

TBK numunelerinin çekme direncinin ölçülmesi için, 25,4 mm çapındaki disk numunelere kaplama uygulanmış ve 3M firmasının epoksi esaslı EC 2086 yüksek mukavemetli yapıştırıcısı kullanılarak numune çekme çubukları arasına yerleştirilmiştir. Kullanılan yapıştırıcı macun şeklinde olup yapıştırılacak karşılıklı yüzeylere sürülmektedir. Daha sonra bir fikstür yardımıyla numunenin aksel hizalanması yapılarak yapıştırıcının kurluşması için numuneler 185 °C sıcaklıkta fikstür içerisinde iki buçuk saat bekletilmiştir. Oda sıcaklığına fırın içerisinde soğutulan numuneler çekme test cihazında düşük hızda kopana dek çekilerek kopma yük değerleri kaydedilmiştir. Elde edilen yük değerleri kesit alanına bölünerek çekme mukavemeti ve yüzey incelemesinin ardından kopma bölgeleri belirlenmiştir. Şekil 3.1 ve 3.2’de çekme testi uygulamak için TBK disk numuneler ve fikstürle birlikte fırın içerisine yerleştirilmiş hali görülmektedir.



Şekil 3.1. TBK uygulanmış çekme test numuneleri.



Şekil 3.2. Fırın içerisinde yapıştırıcı kürleşme işlemine tabi tutulmuş, fikstür yardımıyla çekme çubuğu haline gelmiş çekme test numunesi.

### 3.2.2. İzotermal oksidasyon testi

Farklı parametrelerle elde edilmiş bağ kaplamaların kendi oksidasyon dirençlerini ve kaplandıkları ana metali oksidasyondan koruma özelliklerini inceleyebilmek için, numunelere uzun süreli izotermal oksidasyon testi uygulanmıştır. Fırında tuma sıcaklığı, parçaların çalışma sıcaklığından daha yüksek olduğundan numunelerin oksidasyona uğraması daha kısa sürede gerçekleştirilebilmektedir. Böylece gerçek parçaların çalışma koşulları hızlandırılarak test edilebilmektedir. Bu amaçla 25,4 mm ayırıt uzunluğunda TBK kaplanmış kare numuneler, 1120 °C sıcaklığa önceden ısıtılmış fırın içerisine yerleştirilmiş, sabit sıcaklıkta 23 saat bekleme süresinin sonunda fırın içerisinde soğutulmaya bırakılmıştır. Oksidasyon testinde kullanılan zaman ve sıcaklık parametreleri, benzer kaplamalar içeren uçak parçalarının kullanım öncesi ömür testlerinde kullanılan değerlerdir. Şekil 3.3’de fırın içerisinde oksidasyon testi uygulanan numuneler görülmektedir.



Şekil 3.3. Fırın içerisinde oksidasyon test numuneleri.

Ana metaldeki oksidasyonun şiddetinin değerlendirilmesi ana metal / bağ kaplama ara yüzeyinden ve kaplamasız ana metale doğru oksit derinliği ölçülerek gerçekleştirilmiştir. Bağ kaplamadaki değerlendirme ise kaplamanın kendi içerisindeki % oksit miktarındaki artışın ölçülmesi yoluyla yapılmıştır. Ölçümler, test sonrası numunelerin metalografik numune hazırlama sonrası, mikroyapı analizlerine tabi tutulmasıyla gerçekleştirilmiştir.

### 3.2.3. Termal şok testi

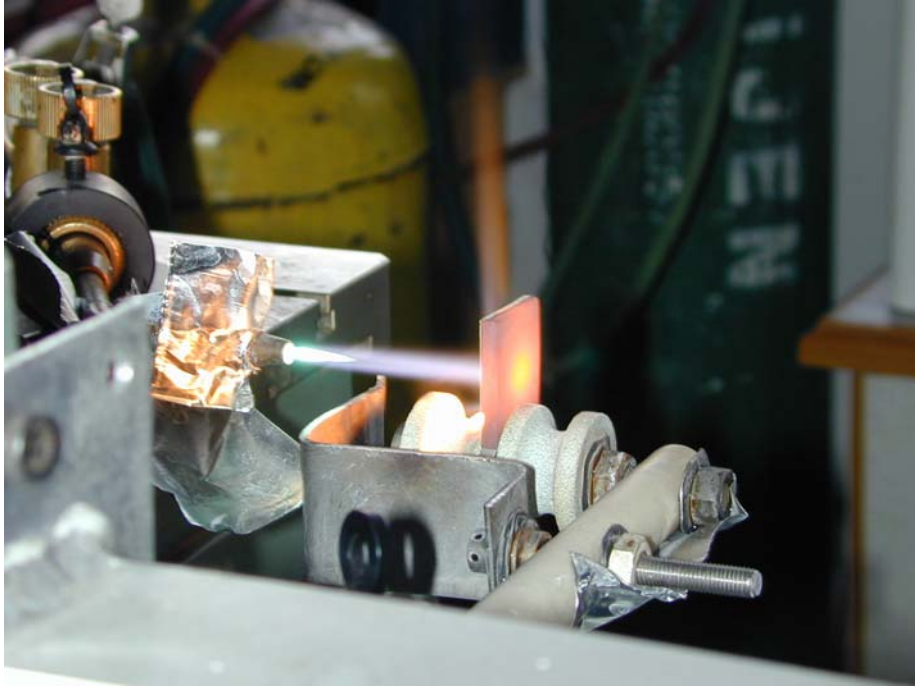
Yüksek çalışma sıcaklıklarına çıkıldığında, TBK uygulanmış parçaların ana malzemeleri ile kaplama katmanları arasındaki termal genişleme farklılıkları bu bölgede termal gerilimlere neden olmaktadır. Belirli bir süre boyunca çalışma sıcaklıklarında kaldığında bu gerilmeler belirli bir oranda düşmektedir. Dolayısıyla maksimum gerilme, parçanın ilk ısınma ve soğuma anlarında meydana gelmektedir.

TBK kaplamalarda kritik bir parametre olan ve kullanım ömründe sürekli maruz kalacağı, termal şoklara karşı dirençlerinin belirlenmesi amacıyla termal şok test düzeneği hazırlanmış ve uygulanmıştır.

Testin uygulanabilmesi için strok mesafesi ayarlanabilen iki anahtar arasında gidip gelen, seramik bir fikstüre tutturulmuş (25 x 30) mm<sup>2</sup> ayırıt uzunluğunda TBK kaplanmış dikdörtgen numuneler kullanılmıştır. Sistem bilgisayar kontrollü olup, test numuneleri seramik kaplı yüzeylerinden, belirli sürelerle oksitlenmiş torcundan üretilen ısı kaynağının altında ısıtılmış, daha sonra havada soğutulmuştur. Test sırasında numunelerin rejim halindeyken ısıtma hızı 10 °C/sn'nin üzerinde tutulmuştur. Numuneler için ısıtma ve soğutma süreleri eşit olacak şekilde 30 saniye olarak ayarlanmış, numunelerin metal arka yüzey sıcaklığı ~900 °C ile 550 °C arasında tekrarlı olarak değişmiştir. Sürekli olarak bu işlem tekrarlanmış, her 50 çevrimde bir numunelerin oda sıcaklığına soğumasına izin verilerek kaplamanın oluşan hasar yönüyle durumu değerlendirilmiştir. Torcun alev huzmesinin çapı yaklaşık 10 mm olacak şekilde ayarlanmış, bu sayede numune üzerinde 3 boyutlu termal gerilim sahası elde edilebilmiştir. Şekil 3.4'de termal şok test düzeneği, şekil 3.5 ve 3.6'da termal şok test düzeneği ile test sırasında ısıtılan numuneler, sırasıyla metal arka yüzeyinden ve seramik kaplı ön yüzeyinden üç boyutlu ısı dağılımıyla birlikte görülmektedir. Şekil 3.5 ve 3.6'daki numuneler dikkatlice incelendiğinde alev huzmesinin yer aldığı merkez kısımda sıcaklığın daha yüksek olduğu, kenarlara doğru numunenin sıcaklığının her iki yüzeyde de soğuduğu, köşelerin ise en soğuk bölgeyi oluşturduğu gözlemlenebilir. Böylece kaplama içerisinde ısı x, y ve z eksenlerinde bölgesel değişkenlik göstermektedir. Bu değişkenliğe bağlı olarak gelişen termal gerilim de üç eksenli olmaktadır.



Şekil 3.4. Termal şok test düzeneği.



Şekil 3.5. Termal şok test numunesi (metal yüzey).



Şekil 3.6. Termal şok test numunesi (seramik yüzey).

#### 3.2.4. Mikroyapı değerlendirmesi

Kaplamanın ara yüzlerinde ve her katmanın kendi içindeki mikroyapı içeriklerini belirlemek için TBK kaplanmış ve modifiye edilmiş numune gruplarının tamamında mikroyapı incelemesi uygulanmıştır. Mikroyapı değerlendirmesi; kaplama, vakum ısıl işlem, lazer sırlama, izotermal oksidasyon testi, termal şok ve çekme testi adımlarının sonrasında gerçekleştirilmiştir.

Mikroyapı incelemesine tabi tutulacak numunelere, metalografik numune hazırlama adımlarından kesme, kalıplama, zımparalama ve parlatma işlemleri uygulanmıştır. Kesme işlemi kırılğan seramik kaplama üzerinde minimum hasara yol açacak şekilde alüminyum oksit ince kesme diski kullanılarak Struers marka Secotom 10 model hassas kesme cihazında düşük devir ve ilerleme hızlarında yapılmıştır. Kalıplama buehler marka soğuk vakum kalıplama cihazında, vakum altında soğuk kalıplama tekniğiyle düşük büzülme değerine sahip, epoksi reçine kullanılarak

gerçekleştirilmiştir. Zımparalama Buehler marka Phoenix 4000 model otomatik zımparalama parlatma cihazında otomatik olarak düşük yük ve devir değerlerinde Struers marka silisyum karbür ve elmas disklerle kabadan inceye 3 kademede gerçekleştirilmiştir. Parlatma, kaba ve ince olarak iki kademede 3 µm ve 1 µm struers marka elmas süspansiyon kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İnce parlatma, düşük devir ve kuvvet ile Buehler marka titreşimli otomatik parlatma cihazında uzun sürede yapılmıştır. Çizelge 3.2’de numune hazırlama adımları verilmiştir.

Çizelge 3.2. TBK numunelere ait metalografik numune hazırlama işlem parametreleri.

	<b>Malzeme</b>	<b>Yük (N)</b>	<b>Devir (dev/dk)</b>	<b>Zaman (dk)</b>	<b>Tane boyutu</b>	<b>İlerleme Hızı (mm/s)</b>
<b>Kesme</b>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	1800	-	-	0,015
<b>Soğuk kalıplama</b>	Epoksi	-	-	480	-	-
<b>Kaba zımparalama</b>	SiC	18	150	3	220 grit	-
<b>İnce zımparalama</b>	SiC	18	150	3	500 grit	-
<b>İnce zımparalama</b>	Elmas	18	150	3	600 grit	-
<b>İnce zımparalama</b>	Elmas	18	150	3	1200 grit	-
<b>Kaba parlatma</b>	Elmas	22	150	6	3 µm	-
<b>İnce parlatma</b>	Elmas	4	~5	120	1 µm	-

Mikroyapı incelemesi ile elde edilen veriler:

- Bağ ve seramik kaplama kalınlıkları,
- Bağ ve seramik kaplama gözenek miktarı,
- Bağ kaplama oksit miktarı,
- Ana metal / bağ kaplama ara yüz oksit ve boşluk değerlendirilmesi,
- Bağ kaplama / seramik kaplama ara yüz oksit ve boşluk değerlendirilmesi,

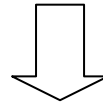
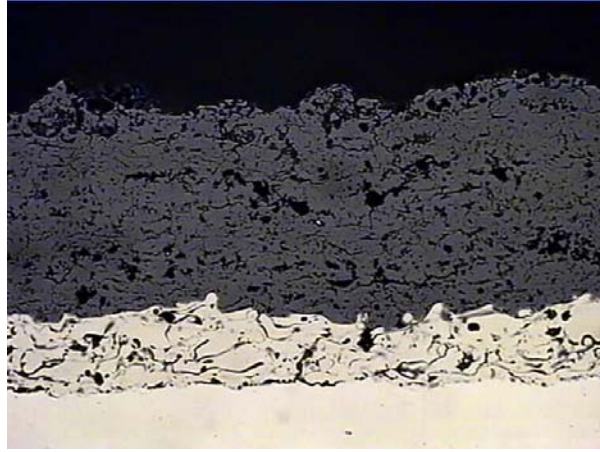


-Her iki kaplama katmanının ergimemiş partikül, çatlak, yüzey pürüzlülüğü vb. yapısal özellikleri şeklindedir.

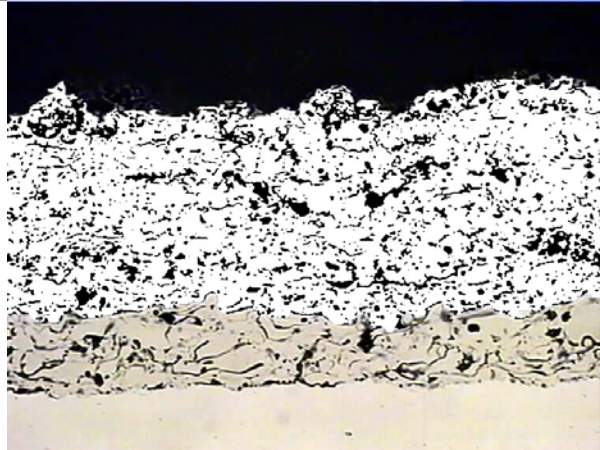
Tüm mikroyapı ölçümleri, Leo marka S440 model taramalı elektron mikroskobu, bu mikroskopa birlikte çalışan Oxford Instruments EDX dedektörü, Nikon marka optiphot 100 model optik mikroskop ve birlikte çalışan Nikon marka Ds Fi-1 model CCD sensörlü kamera kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Her iki mikroskoptan elde edilen sayısal (dijital) görüntüler, NIS-elements F, Leica image analyzer, J micro vision, Adobe Photoshop CS3 görüntü analiz ve işlemci programları kullanılarak işlenmiş, konvansiyonel ölçüm metotlarına oranla yüksek hassasiyetle ölçümler gerçekleştirilmiştir. Her bir numune kaplama katmanı için 20 adet görüntü, numune enine kesiti boyunca yaklaşık eşit aralıklarla alınmış ve ölçümler bu görüntüler üzerinden yapılmıştır. Bu sayısal görüntüler, aynı zamanda bilgisayar modellemelerinde de kullanılmıştır. Şekil 3.7'de örnek bir mikroyapı numunesinin seramik kaplama gözenek miktarının ölçülmesi için eşik ayar tekniği (thresholding) kullanılarak ikili resim (binary image) eldesi verilmiştir.

Mikroyapı numunesinden optik mikroskop, sayısal kamera ve görüntü analiz programı ile sayısal görüntünün elde edilmesi

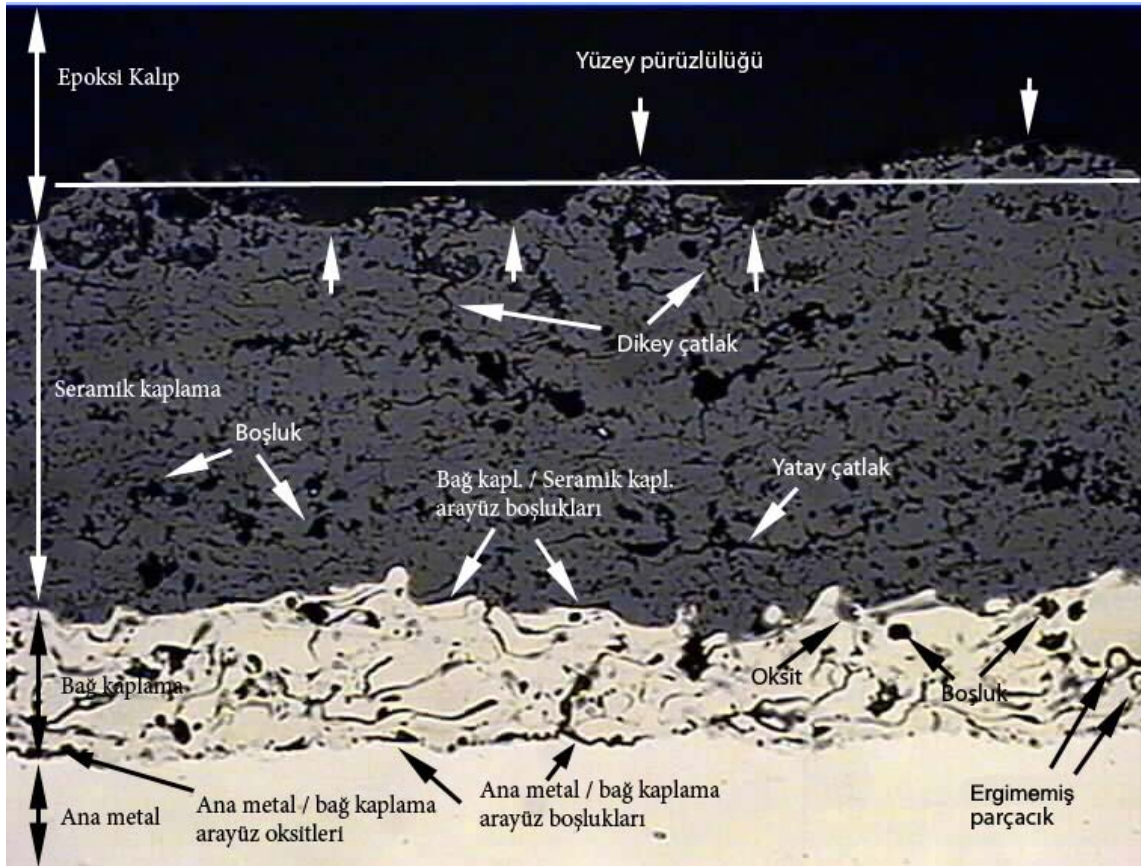


Görüntü işleme teknikleri ile eşik ayar kullanarak (thresholding) seramik katmana ait ikili resim (binary image) elde edilmesi



Şekil 3.7. Sayısallaştırılmış mikroyapı görüntüsünden, eşik ayar tekniğinin kullanımıyla elde edilmiş seramik kaplamanın ikili resminin (binary image) eldesi.

Şekil 3.8’de 200x büyütme altında optik mikroskopla elde edilmiş örnek bir mikrograf ve bazı mikroyapı bileşenleri görülmektedir.



Şekil 3.8. TBK numune mikroyapı bileşenleri (200x).

Ayrıca mikrosertlik testi için ihtiyaç duyulan mikroyapı kesiti de hazırlanan bu numunelerden karşılanmıştır.

### 3.2.5. Mikrosertlik testi

TBK'yı oluşturan her iki kaplama katmanının sertliklerinin elde edilmesi için mikrosertlik testi uygulanmıştır. Ölçümler, mikroyapı değerlendirmesi için hazırlanmış parlatılmış numune kesitlerine Buehler marka mikrosertlik ölçüm cihazı kullanılarak 100 gf ve 300 gf kuvvetler kullanılarak elmas piramit uç ile vickers cinsinden gerçekleştirilmiştir. Termal spreycaplama prosesinin doğası gereği ölçüm değerleri arasındaki fark büyük olduğundan, her bir kaplama katmanı için 10 ölçüm yapılmış ve

ortalama değerler alınmıştır. Her bir ölçüm sonrasında oluşan izin durumu değerlendirilmiş, boşluk, çatlak vb. mikroyapı bileşenlerinin etkisiyle doğru şekilde oluşmayan izler geçersiz kabul edilerek ölçümler yinelenmiştir.

### **3.2.6. Bilgisayar modellemeleri**

Kaplamanın termal ve mekanik davranışlarını incelemek, testler sırasında elde edilemeyecek yararlı bilgilere ulaşabilmek için bilgisayar modellemesine başvurulmuştur. İlk aşamada kaplama katmanlarının ve ana metalin termal iletkenlik, termal genleşme gibi termal, poisson oranı, elastisite modülü gibi mekanik özellikleri bilgisayara veri olarak girilmiştir. Ardından dijital numune mikrografları kullanılarak piksellerden oluşan numune görüntüleri vektörlere çevrilmiş ve numunelere ait bilgisayar kesit modelleri elde edilmiştir. Üçüncü aşamada bu modeller sonlu elemanlar metoduyla önce termal, daha sonra termal verileri dikkate alan termomekanik çözümlenmeden geçirilmiştir. Böylece kaplama katmanları ve ara yüzlerindeki ısı ve gerilim değerleri gibi bilgilere ulaşılmıştır. Bu işlemlerin geerestirilebilmesi için mikroyapı analizinde değinilen programların yanısıra, Vextractor 3.10, Solid Works 2007 ve Cosmos 2007 programlarından yararlanılmıştır.

### **3.2.7. Ön oksidasyon modifikasyonu**

Kaplama özellikleri üzerinde önemli etkiye sahip olacağı düşünölen, farklı parametrelerle kaplanmış numunelere bir modifikasyon işlemi olarak ön oksidasyon işlemi uygulanmıştır. Bu işlemin uygulanmasında kaplamanın termal ömrü üzerinde etkisi olduğu düşünölen bağ kaplama / seramik kaplama ara yüzünde kullanım koşullarında zamanla gelişen termal olarak büyüyen oksit tabakasının kontrollü olarak istenen nitelikte olgunlaştırılması ve kaplama katmanları ile ana metal içerisinde bulunabilecek kalıntı gerilimlerin ortadan kaldırılması hedeflenmiştir. İşlem vakum altında 1080 °C sıcaklıkta 30 dakika süreyle numunelerin bekletilmesiyle geerestirilmiştir. İşlem sonunda numune seramik kaplama yüzeylerinde bir miktar

renk değişikliği gözlenmiştir. Şekil 3.9'da ön oksidasyon uygulama öncesi ve sonrası numune yüzeyleri görülmektedir.

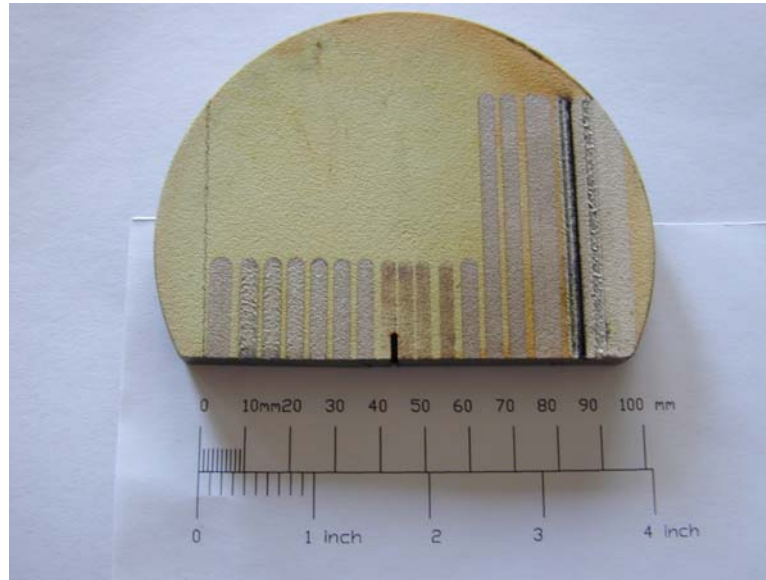


Şekil 3.9. Ön oksidasyon işlemi sonrası seramik kaplama yüzeyindeki renk değişimi  
a) Uygulama öncesi, b) Uygulama sonrası.

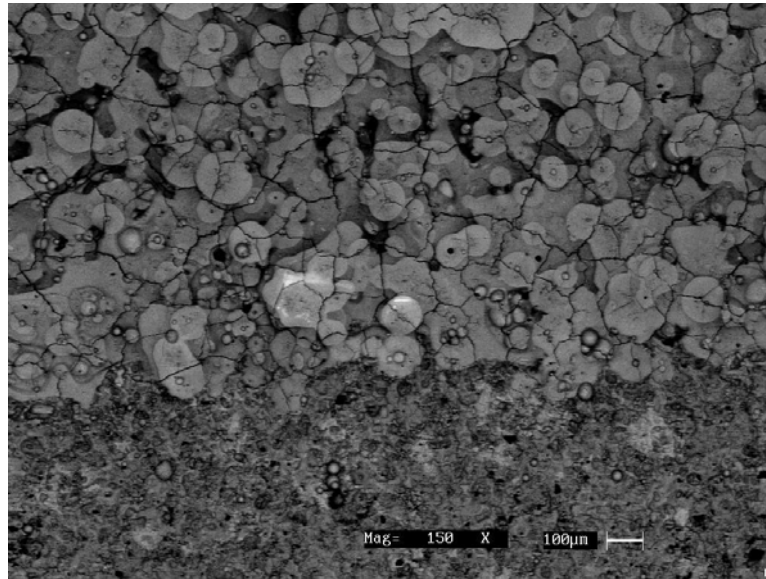
### 3.2.8. Lazer sırlama modifikasyonu

Seramik kaplamanın yüzeyinde kısmi bir sinterleme sağlamak böylece özelliklerdeki değişimi incelemek amacıyla lazer sırlama işlemi, kaplanmış numunelere uygulanmıştır. İşlem parametrelerini lazer odak mesafesi, ilerleme hızı, frekans ve voltaj oluşturmaktadır. 100 mm çapında kaplama uygulanmış bir disk numune yüzeyine 90 derece açıyla gelen lazer ışını yardımıyla, bu parametrelerin 20 farklı versiyonu uygulanmış, SEM, stereo, optik mikroskoplar ile yapılan yüzey ve mikroyapı değerlendirmeleri sonucu ideal özelliklerde olduğu düşünölen parametre seti diğer

numuneler üzerine uygulanmıştır. Şekil 3.10 ve 3.11’de lazer sırlama hatları içeren numunenin stereo ve SEM yüzey görüntüleri verilmiştir.



Şekil 3.10. Farklı parametrelerle elde edilmiş lazer sırlama hatları içeren numune



Şekil 3.11. Lazer sırlama (üst bölge) yüzey SEM görüntüsü

### 3.3. Deney numuneleri

Yukarıda değinilen test ve değlendirmelerin yapılacağı numuneler hazırlanırken kaplamanın özellikleri üzerinde etkili olacağı düşünölen parametreler üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu parametreler;

- Yanıcı gazlar argon ve hidrojenin basıncı ve debisi
- Taşıyıcı gaz argon basıncı ve debisi,
- Sprey mesafesi,
- Plazma tabancası akımı,
- Seramik kaplama tozu morfolojisi
- Paso sayısı,

olarak belirlenmiştir.

Ayrıca kaplanmış numunelere;

- Seramik kaplama yüzeyinin lazerle sırlanması,
- Kaplama sonrası ısı işlem

modifikasyonları da uygulanmıştır.

Çizelge 3.3 ve 3.4’de sırasıyla TBK numunelere ait bağ kaplama ve seramik kaplamaların, tezde kullanılan kaplama proses parametreleri görölmektedir.





Çizelge 3.4. Seramik kaplama termal sprej proses parametreleri.

Seramik Kaplama Parametreleri / Numune #	#B2	#B3	#B4	#B5	#B6	#B7	#B8	#B9	#B10	#B11
Plazma Ar (psi / sfch)	<b>100/120</b>	<b>80/60</b>	100/80	<b>100/120</b>	100/80	100/80	100/80	100/80	100/80	100/80
Plazma H2 (psi / sfch)	<b>60/25</b>	50/15	<b>40/10</b>	50/15	<b>60/25</b>	50/15	50/15	50/15	50/15	50/15
Toz Ar (psi / sfch)	50/17,5	50/17,5	50/17,5	50/17,5	50/17,5	50/15	<b>60/25</b>	50/17,5	50/17,5	50/17,5
Toz Besleme (gr / dk)	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Mesafe (inç)	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	4,5	4,5	4,5	4,5	<b>6</b>
Açı (derece)	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
Akım (amper)	500	500	500	500	500	500	500	<b>450</b>	<b>400</b>	<b>400</b>
Voltaj (volt)	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Toz Kurutma (75 °C-1 saat)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Paso sayısı	3	3	3	3	3	<b>2</b>	3	3	3	3

## 4. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

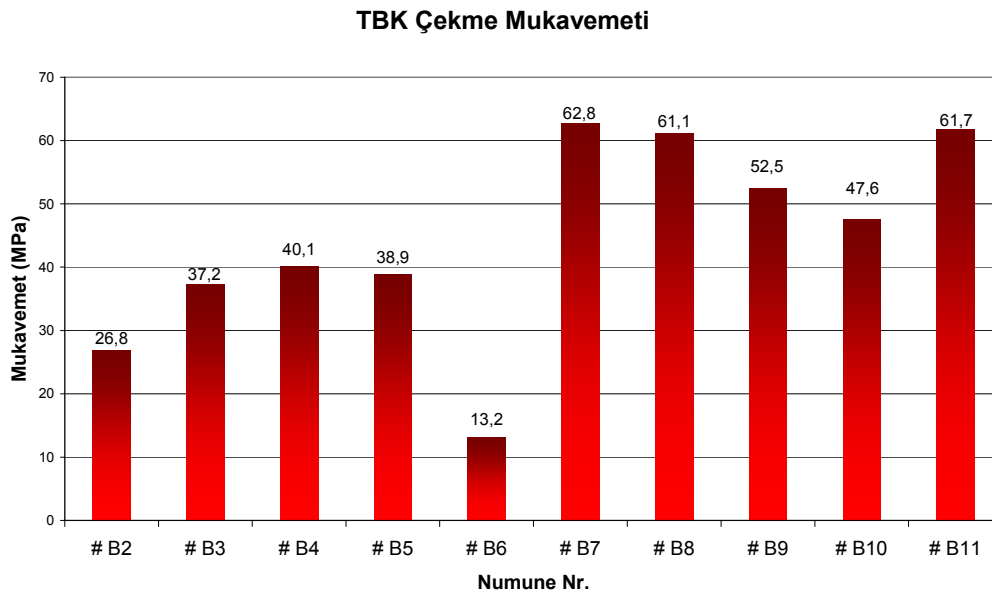
Bu bölümde bölüm 3’de değinilen deneysel çalışmalar sonucunda elde edilmiş sonuçlar üzerinde durulacaktır.

### 4.1. Test ve Değerlendirme Sonuçları

Sonuçların yorumlanmasında; kaplama parametrelerinin ve uygulanan modifikasyonların, ölçülen özellikler üzerindeki etkileri, numuneler arasında kıyaslama ve literatürde daha önce elde edilmiş sonuçlardan yararlanılmıştır.

#### 4.1.1. Çekme Testi

Çekme test sonuçları, kaplamanın kopma mukavemeti ve kopmanın kaplama içerisinde gerçekleştiği bölge olmak üzere iki yönden değerlendirilmiştir. Test sonucunda şekil 4.1’de verilen kopma mukavemetleri elde edilmiştir.



Şekil 4.1. #B serisi numune çekme mukavemetleri.

Şekil 4.1 incelendiğinde; #B2'den #B6'ya kadar olan numunelerin mukavemet değerlerinin, #B7 - #B11 arasındakilere oranla belirgin şekilde düşük olduğu görülmektedir. İki grup arasındaki belirleyici fark kullanılan seramik kaplama tozundan ve buna bağlı gelişen kaplama kalınlıkları arasındaki farklılıktan kaynaklanmaktadır. #B7-#B11 numunelerin seramik kaplamaları daha önce de belirtildiği gibi Metco firmasının Metco 204 HOSP ürünüdür. Bu ürünün kimyasal bileşimi diğer kaplama tozu (Saint Gobain) ile aynı olmakla birlikte (%8 YSZ) toz tanecikleri içi boş kürelerden (HOSP-hollow sphere) meydana gelmektedir. Bu durumun sonucu olarak numune üzerine atılan kaplama paso sayısı aynı tutulmakla birlikte metco gurubunda kaplama kalınlığı daha düşük olmakta, kaplama içerisindeki kalıntı gerilmeler daha düşük seviyede kalmaktadır. Ayrıca ikinci grup numuneler çizelge 3.4'de görüldüğü gibi daha uzun mesafelerden atılmıştır. Mikroyapı analizlerinde daha sonra görüleceği üzere mesafenin artması kaplama kalınlığının düşmesine yol açmaktadır. Kaplamanın ince olması, kırılmanın ilerleyeceği kusurlar içeren birbirine yakın zayıf bölgelerin bulunma olasılığını azaltmaktadır. Son olarak ince kaplamalar seramiklerin çok hassas olduğu eksen dışı gerilmelere çekme testi sırasında daha az maruz kalmaktadır. Çizelge 4.1'de kaplama kalınlığı ile kopma mukavemeti değerleri görülmektedir. Tüm bu etmenler göz önüne alındığında, numuneler arasında çekme mukavemetleri baz alınarak yapılan karşılaştırmaların her iki grup için kendi içinde ve kaplama kalınlıklarını da dikkate alarak yapılması gerektiği anlaşılmaktadır.

Çizelge 4.1. TBK numuneleri çekme mukavemeti – üst katman kalınlığı.

	#B2	#B3	#B4	#B5	#B6	#B7	#B8	#B9	#B10	#B11
Çekme Mukavemeti (MPa)	26,8	37,2	40,1	38,9	13,2	62,8	61,1	52,5	47,6	61,7
Seramik katman Kalınlığı(µm)	413	330,5	226,5	326,4	557,5	65	96,7	155,6	141,8	76,1

Bu değerlendirmelerin ardından, kopma mukavemetleri birbirlerine yakın olan #B3, #B4ve #B5 numuneler incelendiğinde, #B4 numunenin kopma mukavemetinin kalınlıkla birlikte ele alındığında diğer iki numuneye göre daha düşük olduğu görülmektedir. Kaplama parametreleri incelendiğinde, kopma mukavemetinin düşük hidrojen akışı ve buna bağlı düşük ısılı plazmada azaldığı görülmektedir. Düşük argon akışı bulunan #B3 numunenin kopma mukavemetinin, #B5'e oranla sınırlı miktarda azalmasından bu etkinin hidrojen argon oranla daha belirleyici olduğu anlaşılmaktadır.

Benzer şekilde #B9 ve #B10 numuneler karşılaştırıldığında, #B9 numunenin ~%10 daha kalın olmasına karşın ~%10 daha yüksek kopma mukavemeti göstermesi nedeniyle plazma mesafesinin artmasının kopma mukavemetini olumsuz etkilediği sonucuna varılmaktadır. Mesafenin artması kaplama toz taneciklerinin plazmadan ayrıldıktan sonra havada daha çok yol alması anlamına gelmektedir. Bu durum taneciklerin daha çok ısı kaybederek birbirleri üzerine yığılmasına mikroyapı analizlerinin de doğruladığı şekilde boşluk ve aynı zamanda bağ kaplamanın içerisinde yer alan oksit miktarlarının artmasına neden olmaktadır. Bunun sonucunda, kaplamanın çekme mukavemeti, mesafe ile ters orantılı olarak değişmektedir.

Kaplamanın kalktığı bölge, en düşük çekme mukavemetine sahip katman anlamına gelmektedir. Çizelge 4.2'de kaplamaların kalkma bölgeleri verilmiştir.

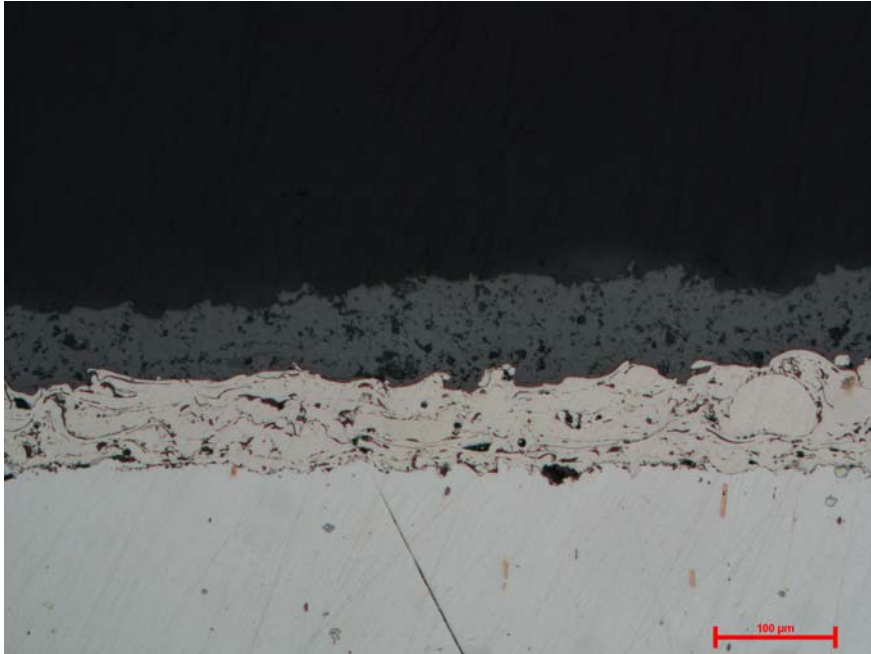
Çizelge 4.2. TBK numuneleri çekme testi kopma bölgeleri.

Numune Nr.	Kopma bölgesi
#B2	%100 seramik kaplama
#B3	%90 bağ / seramik kaplama ara yüz, %10 seramik kaplama
#B4	%98 bağ / seramik kaplama ara yüz, %2 seramik kaplama
#B5	% 85 bağ / seramik kaplama ara yüz, %15 seramik kaplama
#B6	%100 seramik kaplama
#B7	% 2 bağ / seramik kaplama ara yüz, %98 seramik kaplama
#B8	% 100 seramik kaplama
#B9	%100 seramik kaplama
#B10	%4 bağ / seramik kaplama ara yüz, %96 seramik kaplama
#B11	%100 seramik kaplama

Çizelgedeki değerler incelendiğinde; kaplamanın bağ kaplama / seramik kaplama ara yüzünün ve seramik kaplamanın, kopma mukavemeti düşük bölgeleri oluşturduğu görülmektedir. Şekil 4.2 ve 4.3’de çekme testinde seramik kaplamadan kopan #B2 numune test sonrası genel görünümü ve mikroyapısı verilmiştir. Bağ kaplama / seramik kaplama ara yüzünde kalıntı gerilmelerin yüksek değerlere ulaştığı ayrıca iki kaplama katmanının elastisite modülü, süneklik gibi özelliklerinin farklı olması nedeniyle çekme gerilmelerine maruz kaldığında bu ara yüzeyde gerilimin daha da yükseldiği değerlendirilmektedir. Seramik katman kalınlığının artmasının, kalıntı gerilmeleri yükselterek kaplamayı daha kolay hasarlanır hale getirdiği bilinmektedir (Bose, 2007).



Şekil 4.2. #B2 numune çekme testi sonrası genel görünümü.



Şekil 4.3. #B2 numune çekme testi sonrası mikroyapı (200x).

#B2-#B6 gurubunda seramik katmanı en kalın iki kaplamada kopmanın %100 seramik katman içerisinde meydana gelmesi, bu katmanın belirli bir değerden daha kalın olması durumunda kaplama içerisindeki en düşük mukavemete sahip alana dönüştüğü anlamına gelmektedir. Bu durum bize termal yalıtkanlık özelliğini iyileştirmek için en temel yöntem olan basitçe seramik katmanın kalınlığını arttırmanın pratikte zor olduğunu göstermektedir.

Seramik kaplama kalınlığının çok azaldığı #B7- #B11 gurubunda ise bağ kaplama / seramik kaplama ara yüzeyinde ve seramik katman içerisinde kalıntı gerilmelerin seramik katmandaki incelmeye bağlı olarak azaldığı ve bunun neticesinde kopmaların ağırlıklı olarak seramik katman içerisinde ancak daha yüksek değerlerde meydana geldiği görülmektedir. Yüksek kopma değerleri de göz önüne alındığında termal bariyer kaplamalarda iyi mekanik özelliklerin ince seramik katman kalınlığında elde edilmesinin mümkün olduğu görülmektedir. Havacılık uygulamalarında termal bariyer kaplamaların çalışma koşulları, içten yanmalı motorlar ve enerji üretiminde kullanılan gaz türbinlerine göre daha ağır, aynı zamanda güvenilirlik ihtiyacı da daha yüksektir. Bu durum, havacılık sektöründe kullanılan tbk'ların seramik katman kalınlığının daha ince olmasını açıklamaktadır.

#### **4.1.2. İzotermal Oksidasyon Testi**

Bu testin sonuçları, sabit sıcaklık ve zaman altında ana metalin ve bağ kaplamasının oksitlenme miktarı yönüyle değerlendirilmiştir. İlk önce bir grup numune üzerinde 1000 °C sabit sıcaklıkta artan sürelerle oksidasyon işlemi uygulanmış ve mikroyapı analizleri ile bağ kaplama üzerinde oksidasyonun ilerleme karakteristiği elde edilmiştir. Şekil 4.4'de oksidasyonun ilerleme hızının parabolik yapısı görülmektedir.



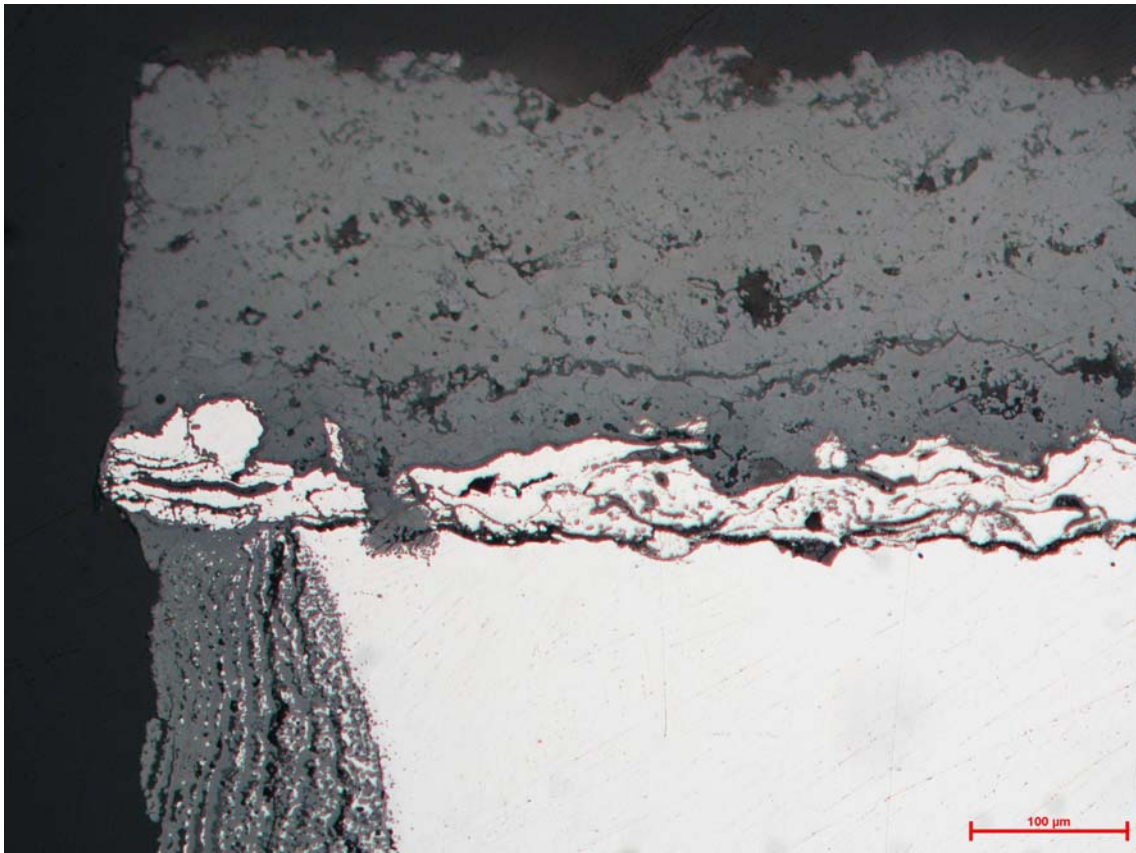
Şekil 4.4. Bağ kaplama izotermal oksidasyon karakteristiği

Grafik incelendiğinde; bağ kaplama içerisinde oksidasyon hızının zamana bağlı olarak azalması, oluşan oksit tabakasının oksijen geçiş hızını önemli ölçüde azalttığını ve anılan test sıcaklıklarında kararlı bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Ön oksidasyon modifikasyonunun da temelini esasen bu olgu oluşturmaktadır. Bağ kaplama / seramik kaplama ara yüzeyinde oluşan TGO katmanı kalınlaştıkça altındaki bağ kaplamayı daha ileri oksidasyondan belirli bir oranda korumaktadır. Ancak yine de yapılan mikroyapı analizlerinde bağ kaplamanın iç kısımlarının da zamana ve oksijen geçişine bağlı olarak oksitlenmeye devam ettiği yapılan ölçümlerde tespit edilmiştir. Şekil 4.4'deki oksidasyon miktarları, TGO katmanı dikkate alınmadan bağ kaplamanın içerisinde ölçülmüştür.

Oksidasyon testine tabi tutulan numunelerin kaplamasız yan ve arka yüzeyleri de optik mikroskop altında incelenmiştir. Bu inceleme sonucunda kaplamanın ana metali



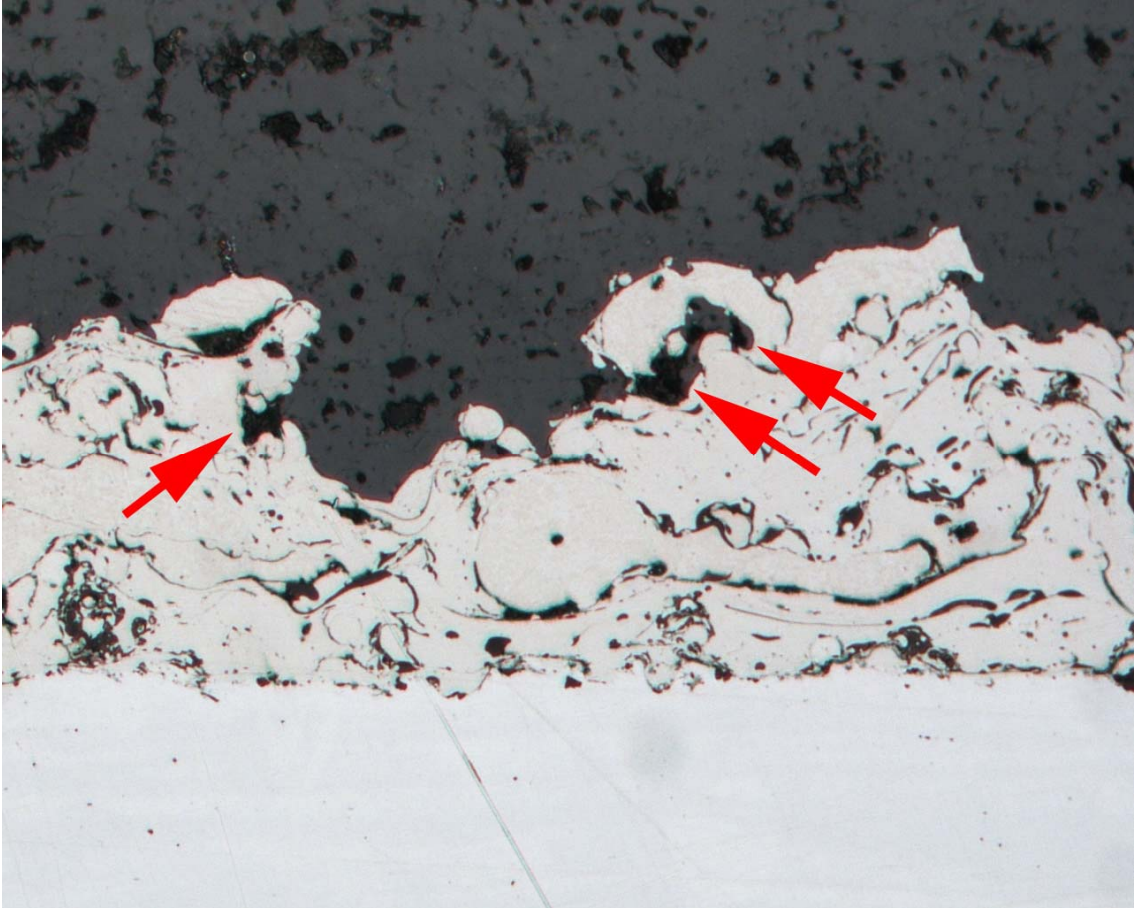
oksidasyondan ne kadar koruduğu hakkında fikir elde edilmesi hedeflenmiştir. Şekil 4.5’de #B4 numunenin kaplamalı ve kaplamasız yüzeylerinin kesiştiği köşe kısımdan alınmış mikrograf görölmektedir. Bu alanda yapılan ölçümlerde; TGO kalınlığı ortalama 2,8  $\mu\text{m}$ , kaplama altı ana metal üzerindeki ortalama oksit katman kalınlığı 4,4  $\mu\text{m}$ , çıplak metal oksit kalınlığı ise yaklaşık 40 kat fazla olacak şekilde  $\sim 180 \mu\text{m}$  civarındadır.



Şekil 4.5. İzotermik oksidasyon test sonunda TGO, kaplama altında kalan korunaklı ana metal ve korunaksız ana metalin oksitlenme dereceleri (100x).

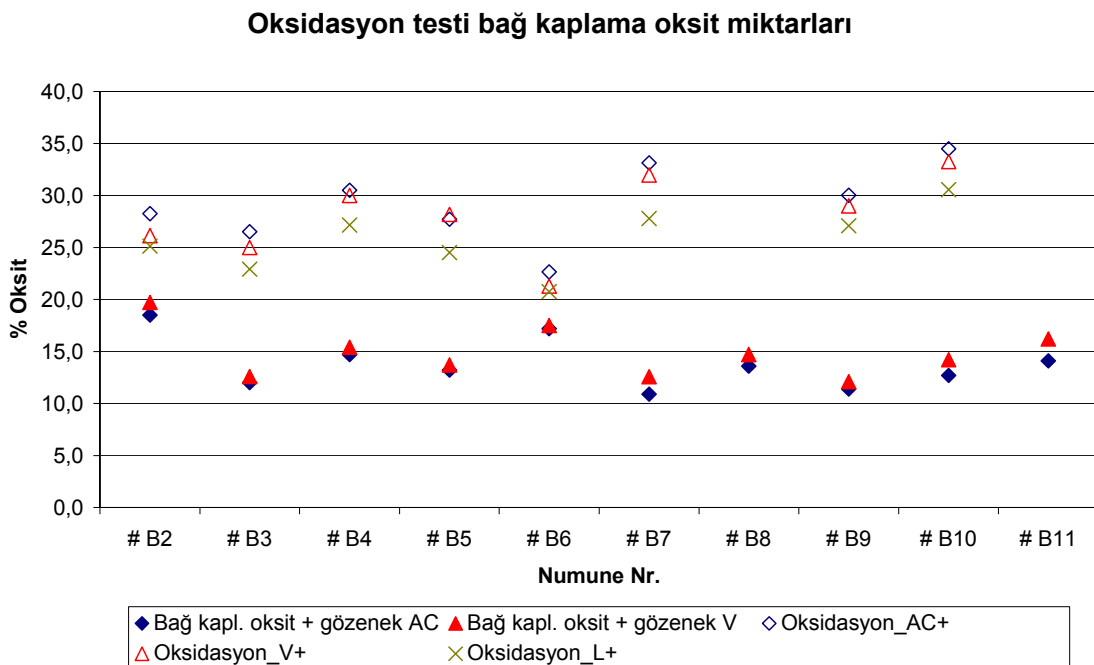
Yine mikroyapı analizleriyle yapılan bu ölçümlerde bağ kaplama içerisinde bulunan kaplama boşluklarının, ergimemiş tanecik sınırlarının ve katmanlar arası oksit

sınırlarının oksidasyon için öncelikli sahalara olduğu gözlenmiştir. Bağ ve seramik kaplama katmanları arasında boşluk oluşumunda öncelikli sahalardan birisinin de, seramik katmanın tutunmasında gerekli bir özellik olan bağ kaplama üst yüzey pürüzlülüğüyle ilgili olduğu görülmüştür. Bağ kaplamanın aşırı pürüzlü olması durumunda seramik tozlarının giremeyeceği kapalı formda girintiler meydana gelmektedir. Bu sahalara katmanlar arası mukavemet değerlerini düşürmektedir. Şekil 4.6'da #B3 numuneye ait böyle bir örnek mikroyapı görülmektedir.



Şekil 4.6. Seramik kaplama / bağ kaplama ara yüzeyinde boşluk (200x).

Motorun sıcak kısım parçalarının bir bakım aralığında maruz kaldığı oksidasyon şiddetini temsilen, hızlandırılmış bir test olan 1120 °C sıcaklıkta 23 saat fırında bekletme sonunda, numunelerde bağ kaplamasının içerisinde gerçekleşen oksidasyon miktarları ölçülmüştür. Şekil 4.7’de kaplanmış numuneler (AC) ve vakum ısıl işlemi (V) sonrası bağ kaplama içerisindeki başlangıç oksidasyon miktarları, aynı numunelerin ve lazer modifiyeli numunelerin test sonrası (AC+, V+, L+) bitiş oksidasyon miktarları bağ kaplama içerisindeki % alan cinsinden verilmiştir.



Şekil 4.7. İzotermik oksidasyon test sonuçları.

Şekil 4.7’de toplu halde verilen test sonuçları incelendiğinde, lazer sırlama modifikasyonunun kaplama oksidasyon ömrü üzerinde olumlu etkiye sahip olduğu görülmektedir. Vakum ön oksidasyon modifikasyonundaki etkinin ise daha belirsiz

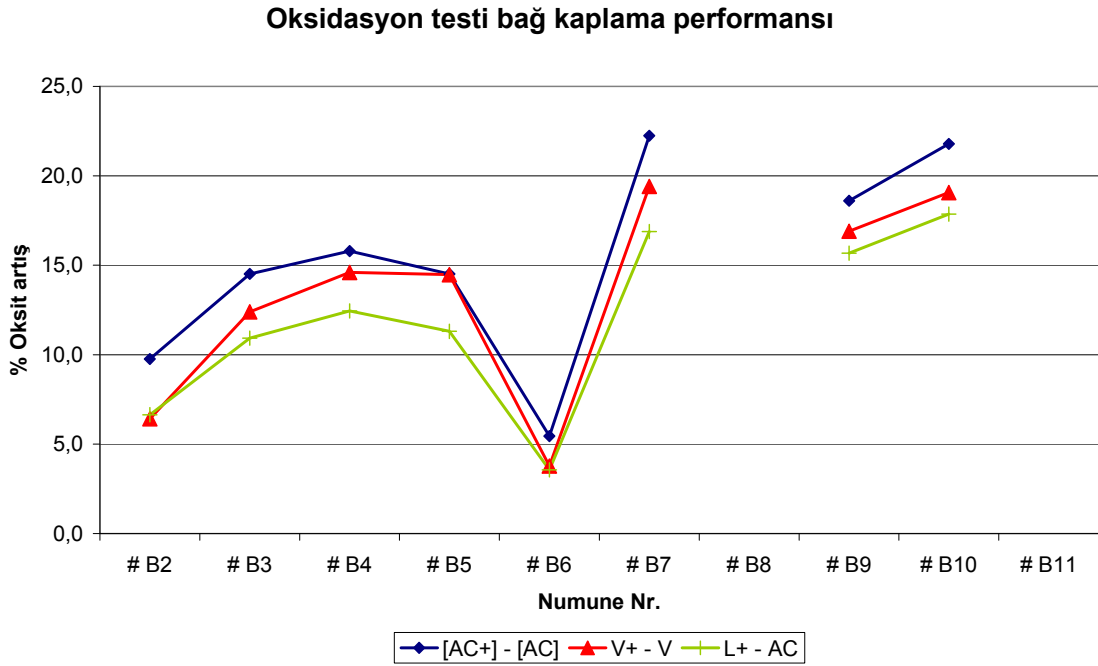
olduğu, bazı numunelerde test sonrası oksidasyon miktarının daha yüksek ölçüldüğü görülmektedir.

Kaplamaların oksidasyon performansı iki farklı açıdan değerlendirilmiştir. Bunlardan birincisi numuneler arasındaki farklılara bakılmaksızın test sonunda şekil 4.7’de görülen en düşük oksit değerine sahip kaplamanın en başarılı kabul edilmesidir. Bu değerlendirmeye göre #B6 numunenin lazer sırlanmış versiyonu en iyi, #B10 numunenin modifiyesiz (AC) versiyonu da en kötü performansa sahiptir. İkinci yaklaşımı gözlemleyebilmek için her bir grup, eşitlik 4.1 kullanılarak başlangıç değerinden çıkartılmış, böylece test sonundaki oksitlenme % artış değerlerine ulaşılmıştır.

$$\% \text{ Oksidasyon artışı: } \frac{\text{Test sonu oksit} - \text{Test öncesi oksit}}{\text{Test sonu oksit}} \times 100 \quad (4.1)$$

Lazer sırlama modifikasyonunun bağ kaplamanın başlangıç oksit miktarı üzerinde herhangi bir etkisi bulunmadığından, hem AC+ hem de L+ numunelerin başlangıç değeri kaplama sonrası değer AC olarak alınmıştır. Eşitlik 4.1 uygulandıktan sonra şekil 4.8’deki veriler elde edilmiştir.

Şekil 4.8 dikkatlice incelendiğinde, kaplama oksidasyon performanslarının sıralamasının değiştiği görülebilir. Yeni duruma göre en yüksek performans çok daha belirgin olmak üzere yine #B6 lazer, en kötü performans ise #B7 modifiyesiz versiyonlardadır. Her iki şekil bir arada incelendiğinde; numunelerin başlangıç oksidasyon değerlerinin, bitiş oksidasyon değerlerine paralel olmadığı ancak yine de düşük başlangıç değerinin sonuç üzerinde bir derecede etkili olduğu görülmektedir. Bu durum, yüksek oksidasyon dayanımına sahip bağ kaplamaların, az boşluk içeren, iyi ergimiş, katmanlar arası düşük başlangıç oksit ve boşluk değerlerine sahip olması gerektiğini göstermektedir.



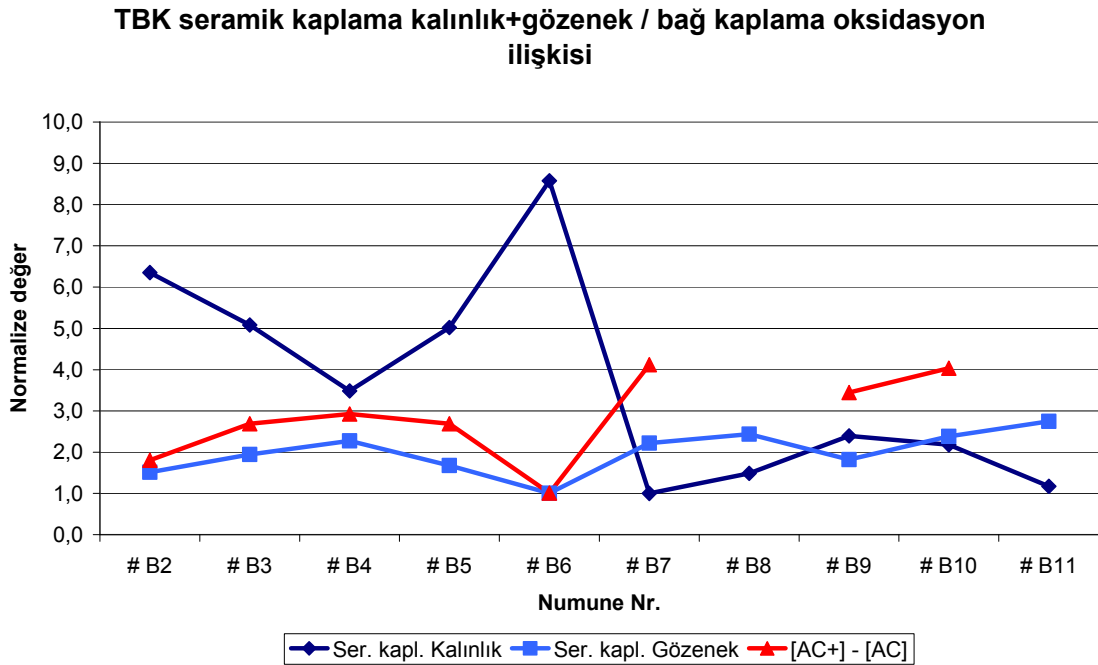
Şekil 4.8. TBK numunelerin oksidasyon testi sonrası bağ kaplama oksit miktarlarındaki artış.

Lazer sırlama işlemi sonrası oksidasyon performansının bu işlem olmayan numunelere oranla daha yüksek olduğu şekil 4.7 ve 4.8’de görülmektedir. Lazer işlemi sonucunda seramik kaplamanın üst katmanlarının ergiyerek kaplama gözeneklerini ve katmanlar arası boşlukları oksijen geçişini zorlaştıracak şekilde doldurduğu mikroyapı analizleri ile tespit edilmiştir. Lazer modifikasyonu sonrası bu bölgede aynı zamanda oksijen geçişini kolaylaştıracak dikey çatlaklar meydana gelmekle birlikte, net sonucun oksidasyon ömrüne olumlu katkı sağladığı test sonundaki değerlerden anlaşılmaktadır. Oluşan dikey çatlaklar oksidasyon ömründe lazer modifikasyonunun tam olarak etkili olmasını engellese de bu çatlaklar daha sonra görüleceği üzere termal şok ömrü açısından kritik önem taşımaktadır.

Eşitlik 4.1 ile yapılan basit hesaplamaların ardından vakum modifikasyonunun gerçek performansının şekil 4.7’de görülenden bir miktar daha yüksek olduğu

anlaşılmaktadır. Vakum modifikasyonu da benzer şekilde termal şok, mikroyapı ve mikrosertlik analizlerinde görüleceği üzere oksit katmanlarının niteliği, kalıntı gerilmeler ve bağ kaplama metalinin faz dağılımı yönleriyle önem taşımaktadır.

Şekil 4.7 ve 4.8 bir arada değerlendirildiğinde, yakın özelliklere sahip bağ kaplamaların oksitlenme derecesinin başka bir etken tarafından yönlendirildiği anlaşılmaktadır. Örneğin başlangıç oksit değerleri nispeten birbirine yakın ve düşük olan #B3, #B7 ve #B9 numunelerden, #B3'ün test sonunda diğer iki numuneye oranla çok daha az oksitlendiği belirlenmiştir. TBK numunelerinden yapılan tüm ölçümler göz önüne alınıp irdelendiğinde; bu etmenin seramik katmanın kalınlık ve gözenek miktarı olduğu anlaşılmıştır. Şekil 4.9'da normalize edilmiş haliyle modifiyesiz numunelerin eşitlik 4.1'den elde edilen oksit miktarlarındaki artış ile birlikte seramik katman kalınlık ve gözenek değerleri verilmiştir.



Şekil 4.9. Seramik kaplama kalın ve gözenek miktarı ile bağ kaplama oksidasyon performans ilişkisi.

Şekil 4.9 incelendiğinde, numunelerin bağ kaplamalarındaki oksidasyon artış miktarlarının seramik kaplama kalınlığı ile ters, gözenek miktarları ile doğru orantılı olduğu görülmektedir. Seramik katman ne kadar kalın ve gözeneksiz ise, bağ kaplamayı yüksek sıcaklıklardaki çalışma koşullarında oksidasyondan o kadar korumaktadır. Lazer sırlama modifikasyonunda elde edilen oksidasyon performansındaki iyileşme de seramik kaplamanın gözenek miktarının azaltılmasının etkisini doğrulamaktadır. Böylece, on numune arasında başlangıç oksidasyon değeri ikinci yüksek olan #B6 bağ kaplama, üzerinde en yüksek kalınlık ve en düşük gözenek değerine sahip seramik kaplama bulunduğundan test sonunda en düşük oksidasyon miktarına ve en düşük net oksit artış değerine sahip olmuştur.

#### 4.1.3. Termal Şok Testi

Numunelerin termal şok dayanımları, sabit çevrim sayısı sonunda kaplama üzerinde meydana gelen hasarların yüzey alanının toplam yüzey alanına oranlanması ile değerlendirilmiştir. Şekil 4.10'da sırasıyla kaplanmış, lazer sırlanmış ve vakum ısıtma işlemi yapılmış #B2 numunenin 350 çevrimlik test sonunda hasarlı bölgelerinin stereo görüntüleri verilmiştir.



#B2 (6,4x)

#B2L (6,4x)

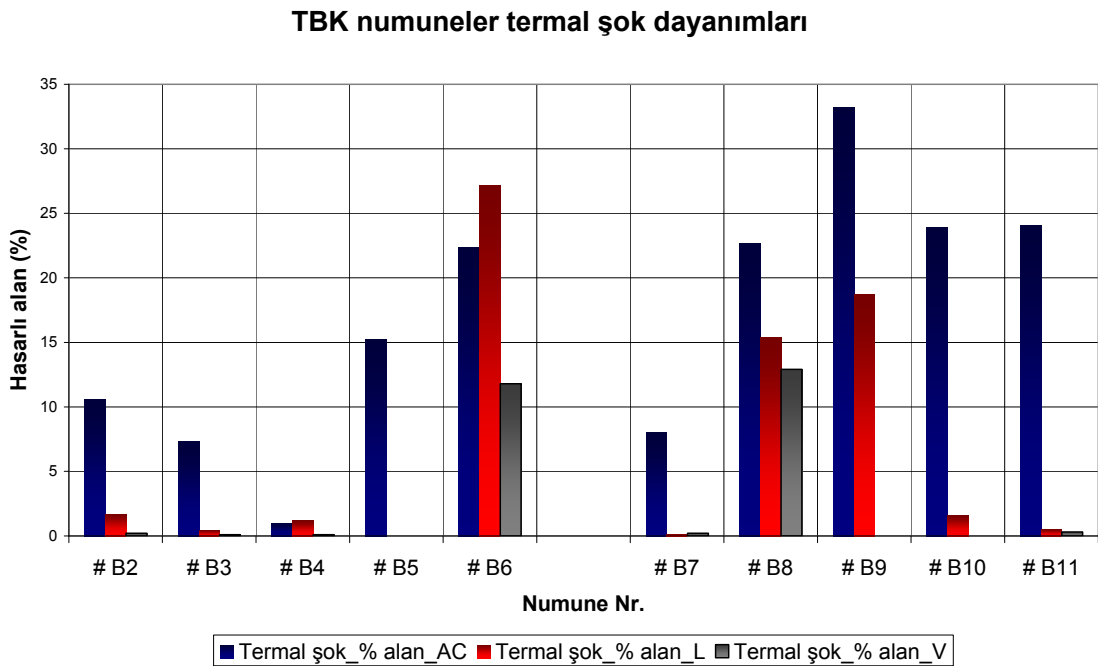
#B2V (6,4x)

Şekil 4.10. TBK kaplı numunelerin termal şok testi sonunda stereo görüntüleri.  
a) Kaplanmış, b) Lazer sırlanmış, c) Ön oksidasyon uygulanmış

#B2 numunenin versiyonları arasındaki fark genel durumu yansıtmaktadır. Test sonunda numune yüzeylerinden yapılan değerlendirmeler sonucunda, numunelerin büyük çoğunluğunda vakum ısıtma işlemi ve lazer sırlamanın termal yorulma ömrünü hem hasar miktarı hem de hasarlanma çevrim sayısı açısından büyük oranda arttırdığı, bu etkinin vakum ısıtma işleminde daha belirgin olduğu tespit edilmiştir.

Vakum ısıtma işleminin kaplama içindeki kalıntı gerilmeleri ortadan kaldırması ve bağ kaplamanın faz dağılımını değiştirmesi, lazer sırlama işleminin ise kaplama yüzeyinde yüzeye dik çatlaklar meydana getirmesi nedeniyle termal şok ömrünü arttırdığı değerlendirilmiştir.

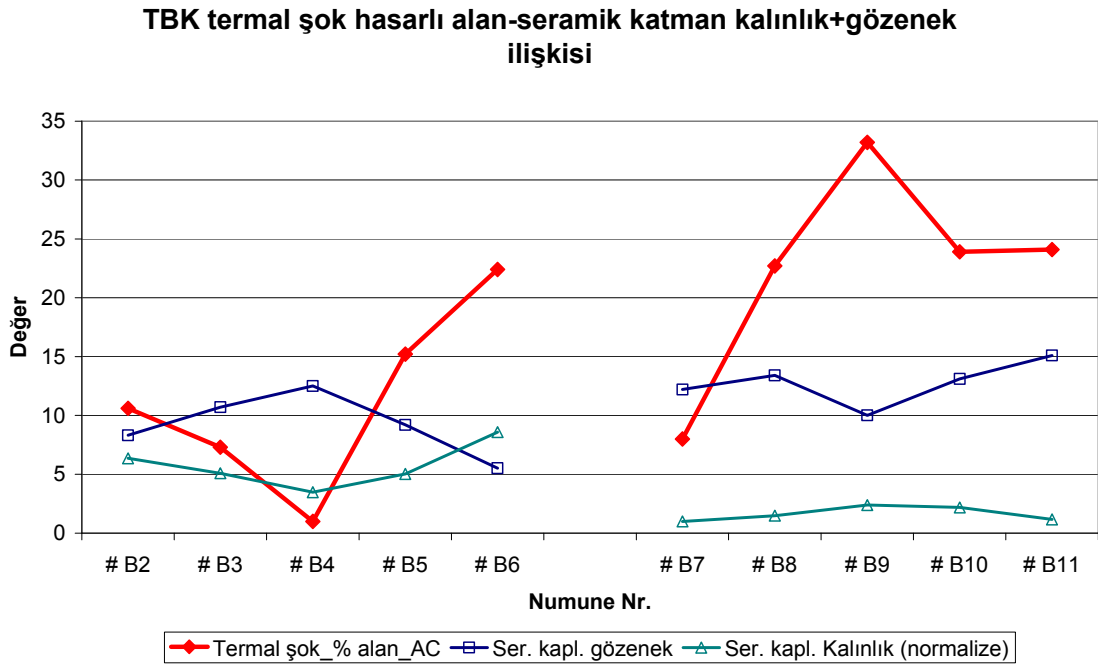
Şekil 4.11'de seramik kaplamanın hasarlı yüzey alanının, toplam numune yüzey alanına oranı şeklinde termal şok test sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.11. Termal şok test numuneleri toplam alan içerisinde hasarlı alan yüzdesi.



TBK numunelerin kendi aralarındaki termal şok dayanımları üzerinde etkili olması beklenen etmenler olan seramik kaplama kalınlığı ve gözenek miktarı, modifiyesiz kaplamaların termal şok ömrü ile birlikte incelendiğinde şekil 4.12 elde edilmiştir.



Şekil 4.12. TBK kaplanmış numune (AC) termal şok dayanımı / seramik katman kalınlık + gözenek ilişkisi.

Şekil 4.12 incelendiğinde; #B2 - #B6 grubunda en düşük dayanımın maksimum kalınlık ve minimum gözeneğe sahip #B6, en yüksek dayanımın ise maksimum gözenek ve minimum kalınlığa sahip #B4 numunede olduğu görülmektedir. #B7 - #B11 numune grubunda da benzer durum görülmektedir, en düşük dayanım kalınlığın fazla, gözenekliliğin az olduğu #B9 numunede gözlenmiştir. Numunelerin kendi içlerindeki karşılaştırma, çekme testi sonuçlarına benzerlik göstermektedir. Termal şok ömrünün büyük ölçüde seramik kaplama kalınlığına ve gözenekliliğine bağlı olduğu değerlendirilmiştir.

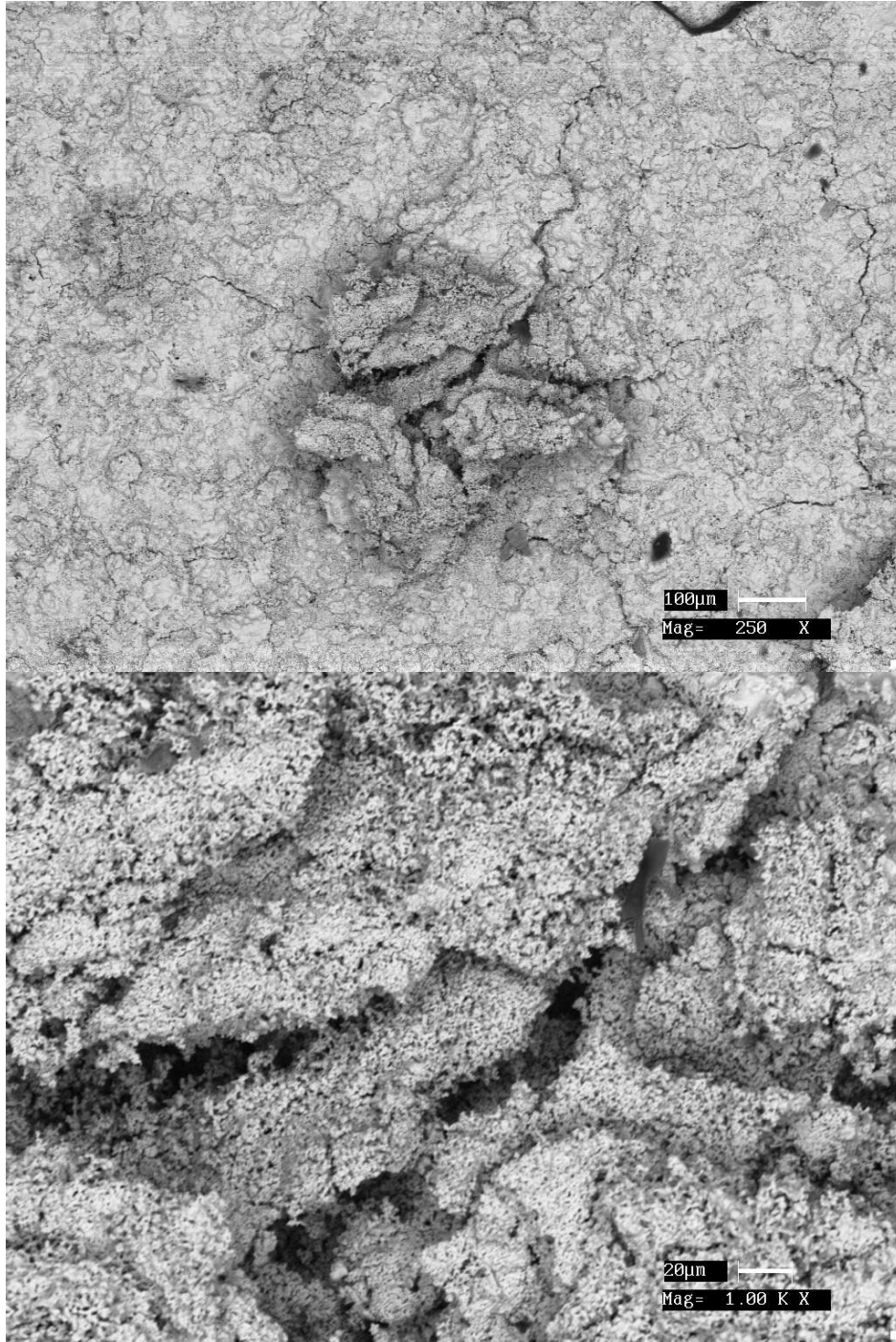
Yine çekme testine benzer şekilde burada da #B2 - #B6 ile #B7 - #B11 grupları arasında kaplama tozları arasındaki farklılıktan kaynaklanan sonuçlar elde edilmiştir. Kaplama kalınlığına olan bağımlılık her iki grup için de kendi içlerinde uyumlu görülmektedir. Düşük seramik kaplama kalınlığına karşın, termal şok dayanımları #B7 - #B11 gurubunda diğer guruptan daha yüksek değildir. #B7 - #B11 gurubun seramik katmanının daha yüksek katılığa (stifness) sahip olduğu değerlendirilmiştir. Yüksek çekme mukavemetleri de bu gözlemi destekler niteliktedir.

Seramik kaplama kalınlığı göz önüne alındığında benzer kalınlıktaki #B3 numunenin, #B5'e oranla bir miktar daha yüksek termal şok dayanımına sahip olduğu görülmektedir. Kaplama parametreleri göz önüne alındığında, yakın gözeneklilik ve seramik kaplama kalınlığına karşın #B5 numunenin yüksek argon birincil gaz debi ve basınç oranlarıyla daha sıcak bir kaplama olduğu, toz tanelerinin birbirlerine daha iyi tutunması sonucunda kaplama katılığının (stifness) arttığı ve buna bağlı olarak termal şok ömrünün de azaldığı değerlendirilmiştir.

En iyi termal şok dayanımına sahip #B4 numunenin, düşük kalınlığına rağmen çekme test mukavemeti #B3 ve #B5 numuneye yakın bulunmuştu. Bu durum, düşük hidrojen ikincil akış ve debi değerine sahip soğuk bir kaplama olan #B4 seramik katmanın düşük çekme dayanımına ve katılık değerine sahip olduğunu göstermektedir. İyi termal şok dayanımında düşük katılık değerinin, seramik tanecikleri arasındaki zayıf bağlanma sonucu birbirleri üzerinde termal gerilmeler altında daha rahat hareket edebilme kabiliyeti kazandırması nedeniyle olumlu etki sağladığı değerlendirilmiştir.

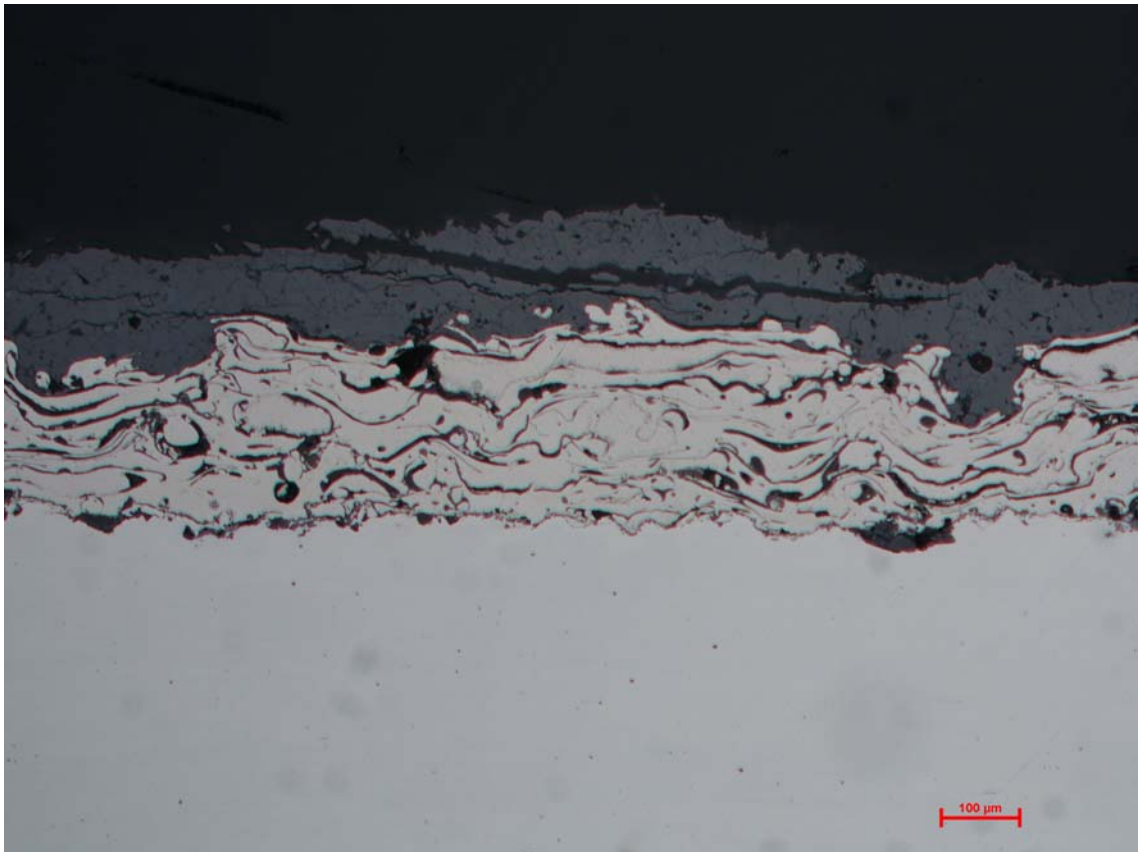
Numunelere termal şok testi uygulanırken kaplama yüzeyindeki hasarların, test koşulları altında sıcaklığın en yüksek olduğu alev altında ve merkeze yakın bölgelerde küçük kabarmalar şeklinde başladığı gözlenmiştir. Taramalı elektron mikroskobu ile test sonrasında #B2 numune yüzeyinden, böyle bir hasarlı bölgeye ait 250 ve 1000 büyütmedeki görüntüler şekil 4.13'de görülmektedir. Şekil 4.13 incelendiğinde,

kaplamanın kalkması nedeniyle ısıyı soğuk arka yüzeye transfer edemeyen seramik kaplama katmanlarının aşırı ısınarak kısmen ergiyip sinterlendiği gözlenmiştir.



Şekil 4.13. Termal şok testi sonrası TBK yüzey görüntüsü a) 250x, b) 1000x.

Bu sinterlenmenin seramik katmanın elastisite modülünü, gerilmeleri ve gerinme enerjisini arttırdığı bilinmektedir (Smialek et al., 2008). Hasarın ilerleyen aşamalarında bu bölgelerden seramik kaplama / bağ kaplama ara yüzeyine yakın, seramik kaplama içerisinde yer alan yüzeye paralel çatlakların ilerlediği ve daha sonra yüzeyden parça kopmaları (pull out) meydana geldiği değerlendirilmiştir. Mekanik gerilmeler olmaksızın termal gerilmeler altındaki uygulamalarda yüzeyden parça kopmaları (spalling) TBK'larda sık görülen bir hasar şeklidir (Bartsch et al., 2008; Cao et al., 2008). Şekil 4.14'de termal şok testi sonrası hazırlanan kesit mikroyapı görüntüsünde paralel çatlaklar ve sinterlenmiş seramik katman görülmektedir.



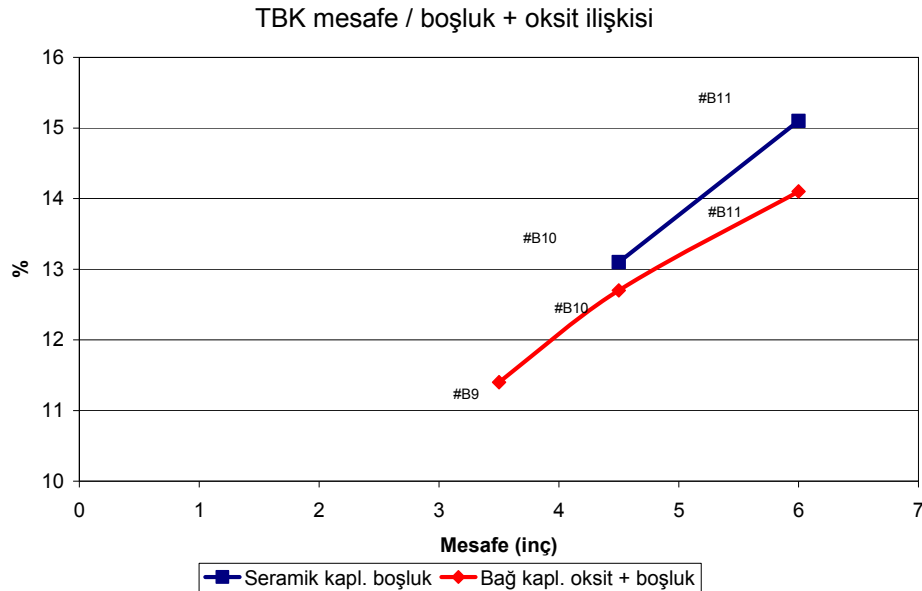
Şekil 4.14. Termal şok testi sonrası TBK kesit görüntüsü (200x).

#### 4.1.4. Mikroyapı Değerlendirmesi

Kaplanmış numunelerin mikroyapı özelliklerinin belirlenmesinin yanında izotermal oksidasyon ve lazer sırlama numunelerinin de ölçümünde kullanılan mikroyapı değerlendirme, kaplama hakkında yararlı bilgiler vermektedir. Mikroyapı analizleriyle elde edilen verilerin büyük bölümü diğer sonuç başlıklarının altında yer geldikçe verilmiştir. Bu bölümde ilave olarak diğer bölümlerde verilmemiş ve kaplama özellikleri üzerinde etkili parametrelerle ilgili sonuçlar ele alınmıştır.

##### 4.1.4.1. Mesafe

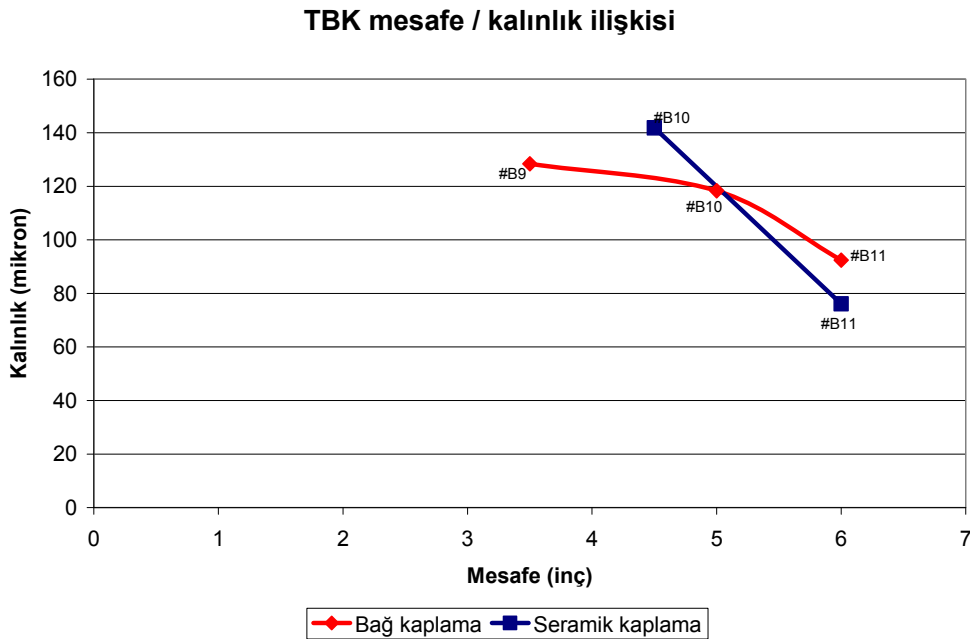
Hem bağ kaplamada hem de seramik kaplamada, önemli bir proses parametresi olan mesafenin mikroyapı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bağ kaplamada mesafenin kaplama içi oksit ve boşluk, seramik kaplamada ise boşluk miktarı üzerindeki etkisi şekil 4.15’de görülmektedir.



Şekil 4.15. Kaplama katmanları oksit ve boşluk miktarı ile mesafe ilişkisi.

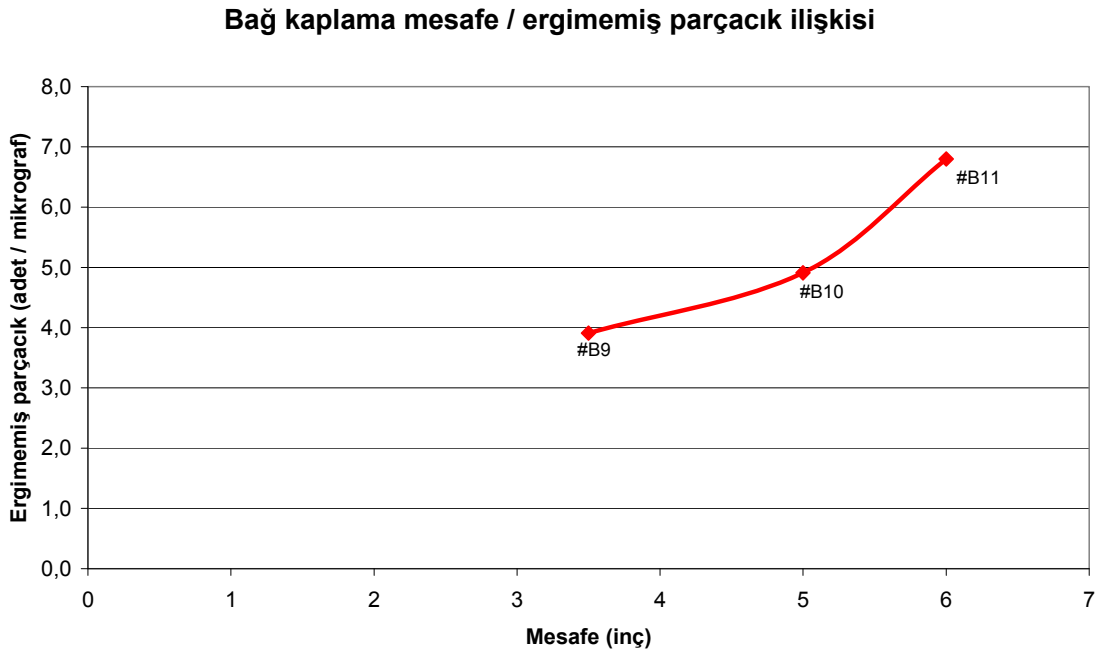
Her iki katman için de mesafenin artması kaplama toz taneciklerinin plazmadan ayrıldıktan sonra havada daha çok yol alması anlamına gelmektedir. Bu durum taneciklerin daha çok ısı kaybederek birbirleri üzerine yığılmasına böylece boşluk ve aynı zamanda havayla daha çok temas edildiği için bağ kaplamanın içerisinde yer alan oksit miktarlarının artmasına neden olmaktadır. Aynı zamanda mesafe uzadıkça toz tanecikleri hava direncine daha çok maruz kalarak hızlarını kaybetmekte ve çarpma esnasındaki kinetik enerjileri azalmaktadır. Bunun sonucunda şekil 4.15’de görüldüğü gibi kaplama içerisindeki boşluk miktarı mesafe ile artmakta, bağ kaplama içerisindeki oksit miktarında da artış görülmektedir.

Mesafenin, kaplama katmanlarının kalınlığı üzerindeki etkisi şekil 4.16’da verilmiştir. Bu etki de yukarıda açıklanan nedenlerden benzer şekilde kendini göstermiş ve kaplama kalınlığı mesafe ile ters orantılı olarak değişkenlik göstermiştir.



Şekil 4.16. Kaplama katmanları kalınlık / mesafe ilişkisi.

Mesafenin bağ kaplama içerisindeki ergimemiş parçacık miktarı üzerindeki etkisi yukarıda açıklanan bilgiler doğrultusunda benzer şekilde gelişmiştir. Mesafe arttıkça kaplama tanecikleri soğuduğundan bağ kaplama içerisindeki ergimemiş parçacık miktarı artmaktadır. Şekil 4.17’de bu ilişki görülmektedir.



Şekil 4.17. Bağ kaplama mesafe / ergimemiş parçacık ilişkisi.

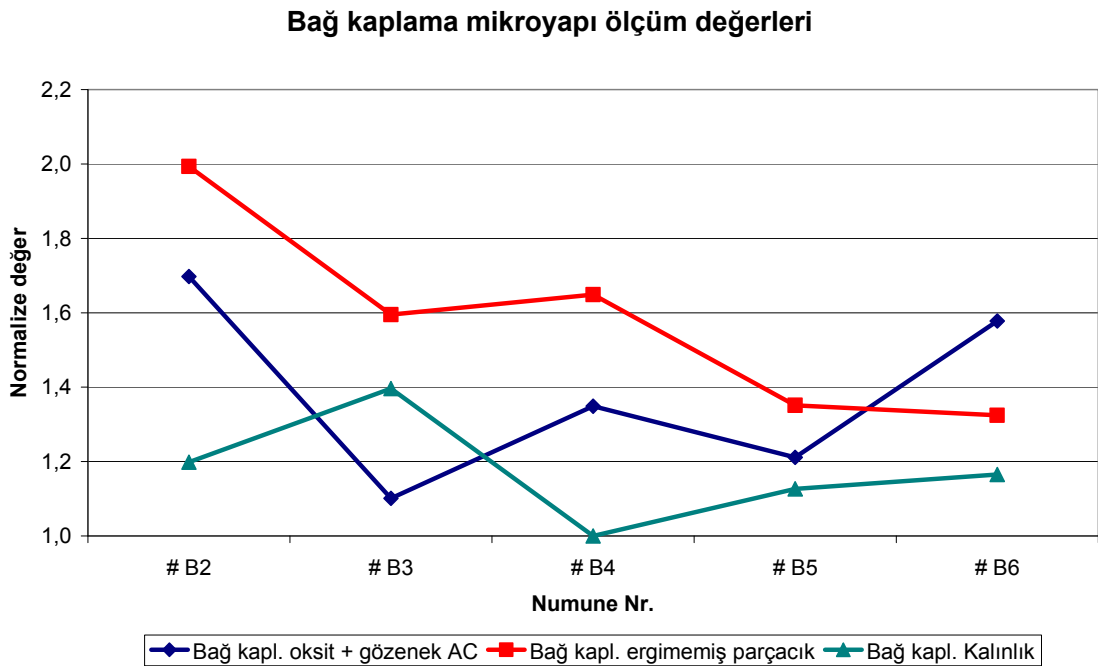
#### 4.1.4.2. Plazma gazları

Plazmayı oluşturmakta kullanılan ve önemli bir parametre olan argon ve hidrojen gazlarının basınç ve debileri üzerinde yapılan değişikliklerin numune mikroyapı bileşenlerine yansımaları, mesafe gibi değişkenlere oranla daha karmaşık bir şekilde gerçekleşmektedir. İncelenen mikroyapı bileşeni sadece değişen gaz akış ve debileri ile değil aynı zamanda diğer ölçüm sonuçları ile bir arada değerlendirilmelidir. Bu durumun arkasında yatan temel etmen, gaz akış ve debi oranlarına bağlı olarak

plazmanın ısı, hız, oksitleyici özelliklerinin bir arada değişmesidir. Böylece örneğin daha çok argon akış ve debisine sahip daha sıcak bir plazma, aynı zamanda hızını arttırdığından sabit toz besleme oranı ile toz tanecikleri plazma içerisinde yeterince merkezlenememekte ve bunun sonucunda taneciklerin kaplanma sıcaklığında belirgin artış olmamaktadır.

İdeal kaplama parametreleri, toz taneciklerinin büyük kısmının plazmanın sıcak merkezinde yer aldığı, uygun sıcaklık ve hızda kaplama yüzeyine, doğru bir açıyla ve sıklıkla çarptığı durumu sağlamalıdır.

Plazma gazlarının değiştirildiği #B2-#B6 numunelerin bağ kaplama mikroyapı bileşenleri şekil 4.18’de verilmiştir.



Şekil 4.18. Bağ kaplama ergimemiş parçacık, kalınlık, oksit ve boşluk ilişkisi.

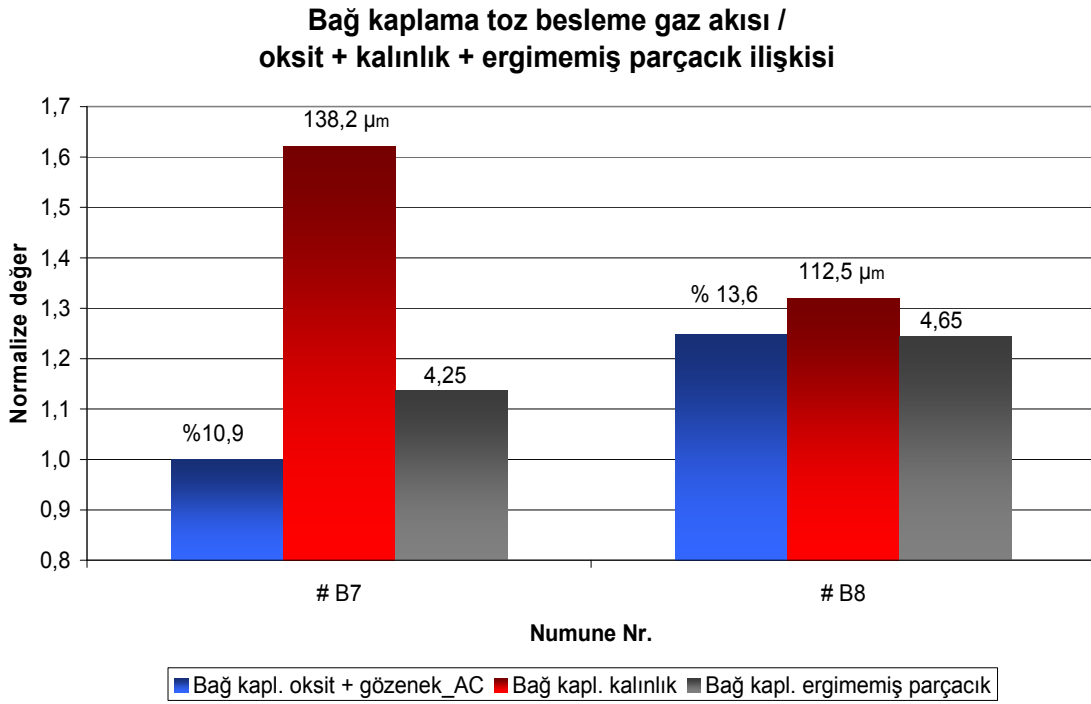


Yukarıda verilen bilgiler de dikkate alınarak şekil 4.18 üzerinden yapılan değerlendirmede en yüksek plazma sıcaklığına sahip #B2 numunenin çok sayıda erimemiş parçacık içerdiği görülmektedir. #B4 ve #B6 numuneler irdelendiğinde, daha yüksek hidrojen akısının plazmayı ısıttığı ve buna bağlı olarak erimemiş parçacık miktarının azaldığı, kalınlığın ve oksit miktarının ise arttığı gözlenmiştir. #B3 ve #B5 numuneler irdelendiğinde, termal şok ömründe de yapılan değerlendirmeye paralel olarak #B5 numunede erimemiş parçacık miktarının daha düşük ve sıcaklığın yükselmesinin sonucunda oksit miktarının daha yüksek olduğu gözlenmiştir.

#### 4.1.4.3. Toz besleme gazı

Taşıyıcı toz akış değerini kritik bir parametre haline getiren mekanizmanın kökeninde, plazma akışına dahil olan tozların plazmanın en sıcak kısmı olan merkezine yakın yer alması gerekliliği bulunmaktadır. Düşük gaz akışında tozlar merkeze ulaşamamakta, yüksek gaz akışında ise tozlar merkezi geçerek tekrar plazma dış çapına yerleşmektedir. Kaplama uygulaması sırasında ergime sonucu parlak hale gelen tozlar gözlemlenerek bu durum doğrulanmıştır. Dolayısıyla toz akışının plazma merkezinde yer aldığı ideal bir gaz akış aralığı bulunmaktadır. Bu değer aralığı tek olmayıp, plazma gazlarının akışına ve dolayısıyla debi ve hız, plazma tabancası ile kaplanacak numune arasındaki mesafe, kaplanacak tozun yoğunluğu, şekli, tane boyutu, toz besleme çıkışı ile plazma akışı arasındaki açı gibi çok sayıda parametre ile etkileşim halindedir.

Şekil 4.19'da diğer tüm parametrelerin sabit tutulup, sadece toz besleme gaz akışının değiştirilmesine bağlı olarak bağ kaplama mikroyapı karakteristiklerinde meydana gelen değişimler görülmektedir. Şekil incelendiğinde, #B7 numunenin daha düşük taşıyıcı argon gaz debi ve basıncı (2,8 bar / 4,7 lt/dk) ile diğer parametrelerin sabit kalması koşulunda toz taneciklerini plazma içerisinde daha iyi merkezlediği, bunun sonucunda kaplama kalınlığının arttığı, erimemiş tanecik sayısının ve kaplama içerisindeki oksit miktarının azaldığı görülmektedir.

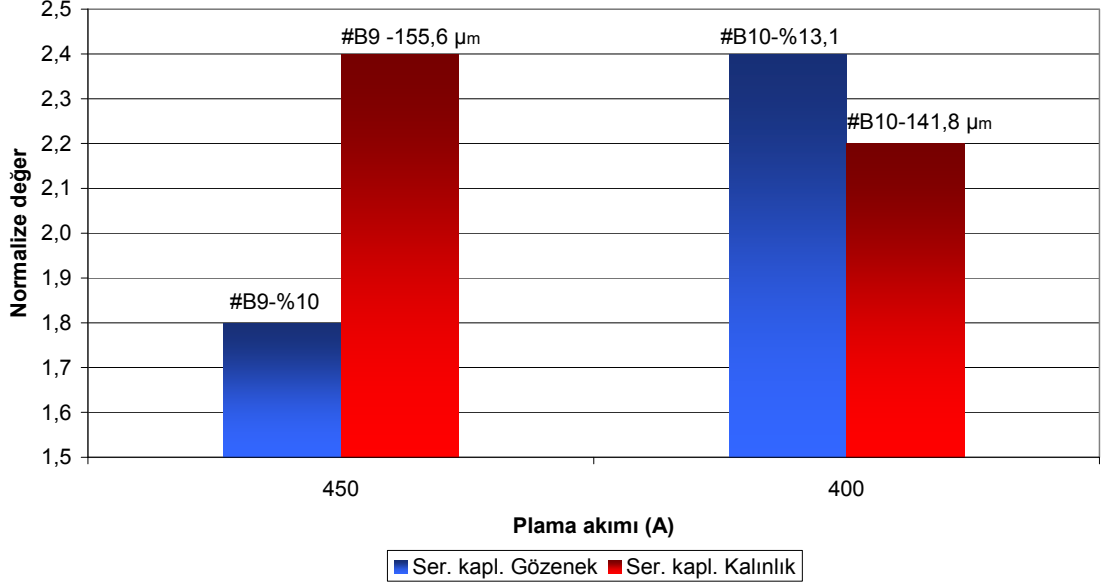


Şekil 4.19. Taşıyıcı gaz akısının bağ kaplama mikroyapısı üzerindeki etkileri.

#### 4.1.4.4. Plazma akımı

Plazma akımının artırılması, plazma sıcaklığının artmasına ve buna bağlı olarak sıcak kaplama koşullarının oluşmasına yol açmaktadır. Şekil 4. 20’de plazma akımının değiştirildiği #B9 ve #B10 numunelerdeki seramik katman kalınlık ve gözenek miktarındaki değişim verilmiştir.

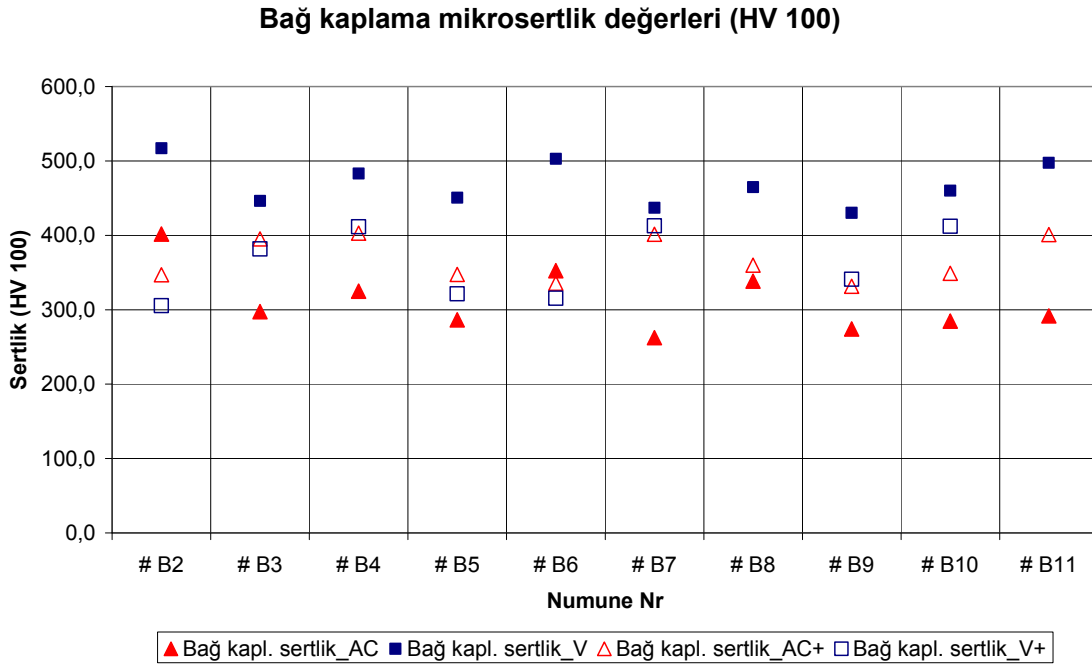
### Seramik kaplama plazma akım / kalınlık + gözenek ilişkisi



Şekil 4.20. Plazma akımı – seramik katman kalınlık + gözenek ilişkisi.

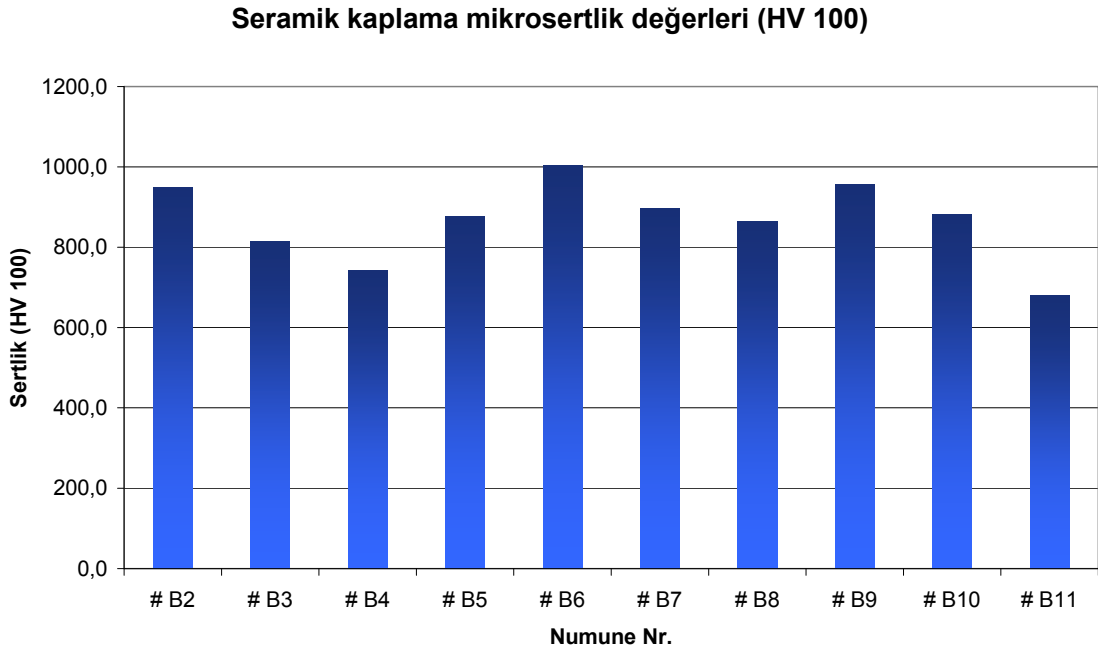
#### 4.1.5. Mikrosertlik ölçümleri

TBK numunelerinin her iki kaplama katmanının ölçülen mikrosertlik değerleri şekil 4.21 ve 4.22’de verilmiştir.



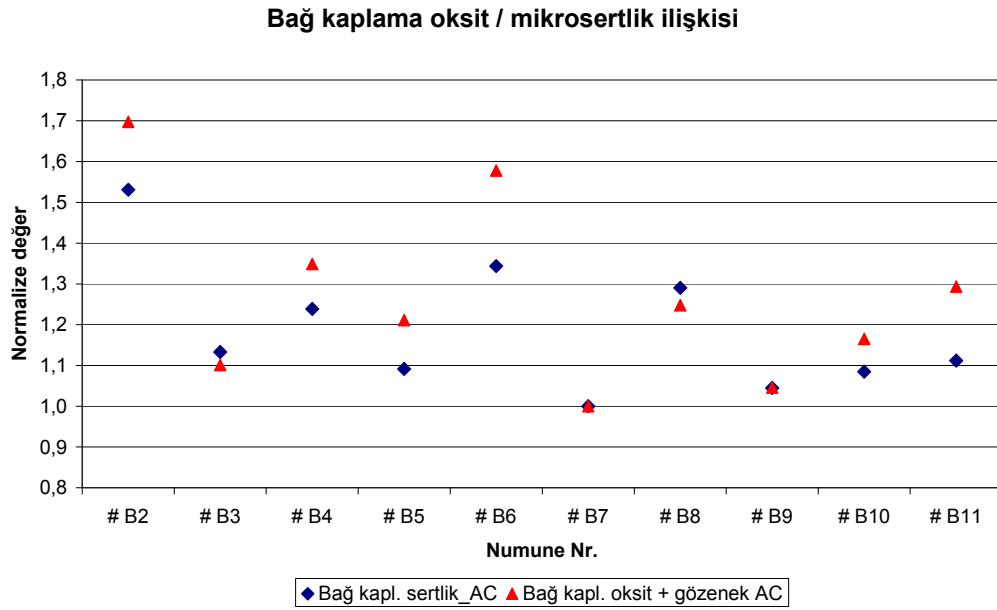
Şekil 4.21. Bağ kaplama mikrosertlik değerleri.

Vakum ısıtma işlemi neticesinde tüm bağ kaplamaların sertlik değerleri artmıştır. İzotermal oksidasyon testi sonrası yapılan ölçümlerde ise sertliğin tekrar başlangıç değerlerine yaklaştığı gözlenmiştir. Vakum sertlik değerlerindeki bu artış yaşlanma sonucunda çökelen fazlara ve oksit miktarının artmasına, oksidasyon testi sonrasında da oksit miktarının artmasına karşın bu fazların aşırı yaşlanmasına veya çözünmesine bağlanmaktadır. Literatür incelendiğinde; bağ kaplamanın içerisinde, kullanım koşullarında sert  $Ni_3Al - \gamma'$  (gamma prime) intermetalik fazın çökeldiği ve zamanla aşırı yaşlanma sonucu bu fazın irileştiği veya daha yumuşak fazlara dönüştüğü görülmüştür. (Reed, 2006).

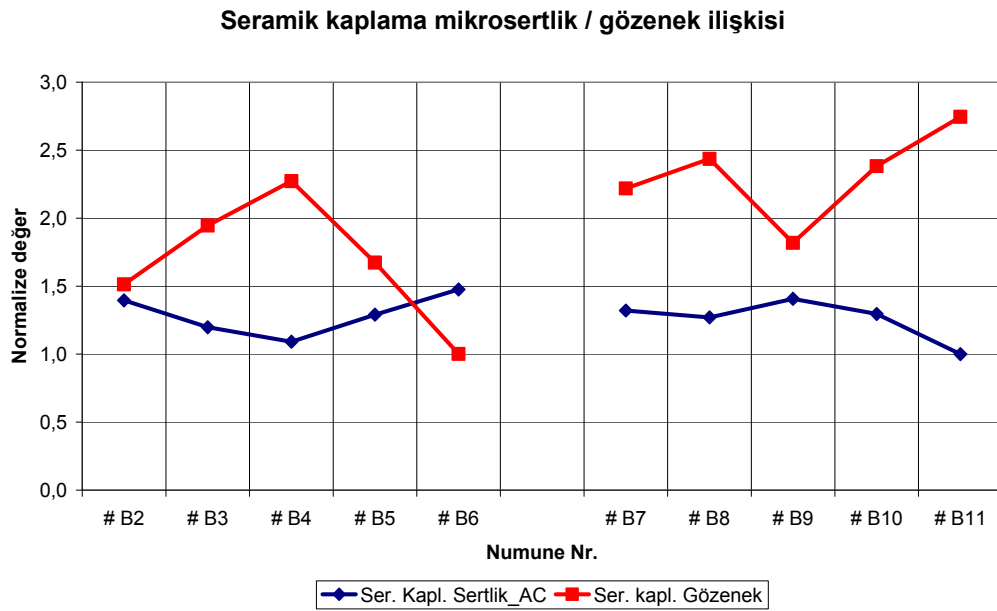


Şekil 4.22. Seramik kaplama mikrosertlik değerleri.

Şekil 4.23 ve 4.24’de sertlik değerleri üzerinde birincil derecede etkisi olduğu değerlendirilen sırasıyla bağ kaplama oksit ve seramik kaplama gözenek miktarları mikrosertlik değerleriyle birlikte normalize edilmiş şekilde verilmiştir. Bağ kaplama oksit miktarı ile sertlik değerleri doğru orantılı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu durumun arkasında yatan temel etmen, oksit fazın sertliğinin bağ kaplamayı oluşturan diğer fazlardan daha yüksek olmasıdır.



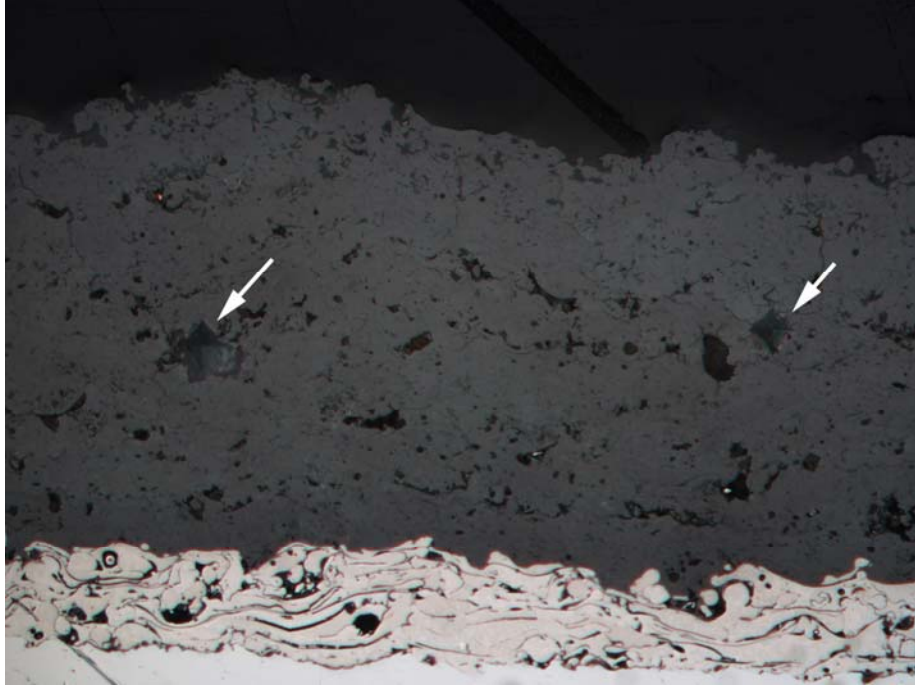
Şekil 4.23. Bağ kaplama oksit / mikrosertlik ilişkisi.



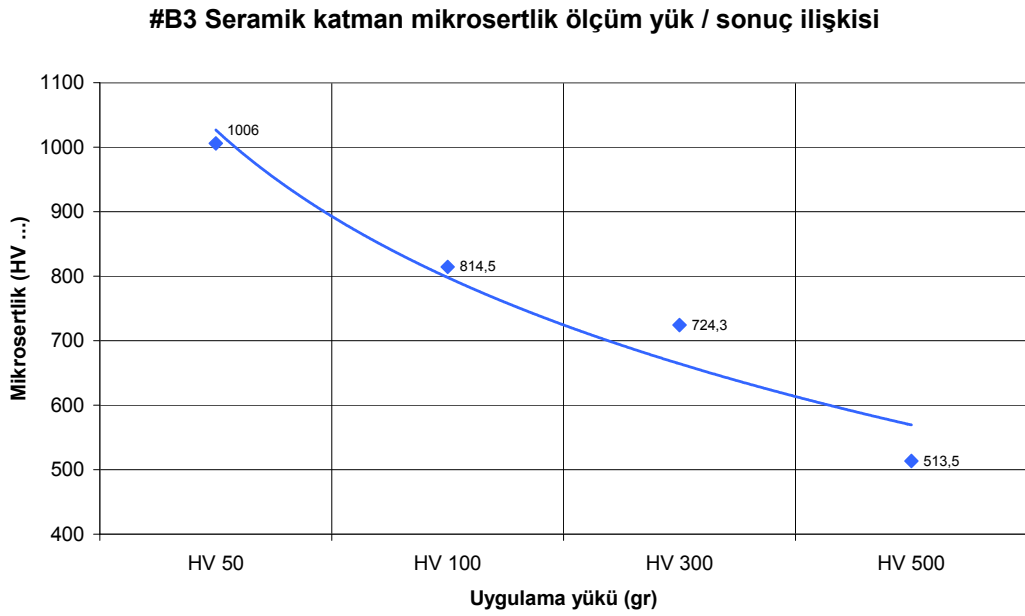
Şekil 4.24. Bağ kaplama sertlik / % oksit miktar ilişkisi.

Seramik kaplama gözenek miktarı ile sertlik ise ters orantı şeklinde davranış göstermektedir. Seramik kaplama ne kadar gözenekli ise kaplamanın katılık değeri o kadar azalmaktadır.

Mikrosertlik ölçümlerinden elde edilen bir sonuç ta, kaplamanın sertliğinin uygulanan yük değerine bağlı olarak değişkenlik göstermesidir. Bu durum kompozit malzemelerdeki bileşenlerin farklılığından (fiber – matris vb. ) kaynaklanan bölgesel sertlik değişimlerine ya da dökme demir mikroyapısındaki grafit ve ferrit gibi değişkenlerin sertlik üzerindeki etkilerine benzetilebilir. Termal spreycaplama, prosesin doğası gereği çok farklı sertlik değerlerine sahip mikroyapı bileşenleri içerip, mikrosertlik ölçümlerinde iyi bir averaj değeri alınması zorlaşmaktadır. Ölçüm adedi artırılarak bu durumun üstesinden gelinmeye çalışılmıştır. Ayrıca kaplamanın içersinde çok sayıda boşluk ta bulunmaktadır ve sertlik ucu batırıldığında izin altında ezilen malzeme bu boşluklara doğru elastik / plastik şekil değiştirmekte veya boşlukların etrafında çatlamakta ve değerlerin olduğundan düşük çıkmasına neden olmaktadır. Bazen de sertlik ucu batırılan yüzeyin altında boşluk çıkmakta ve kaplama kırılarak ölçülebilecek düzgün bir iz oluşmamaktadır. Bu nedenle iz batırıldıktan sonra etrafındaki mikroyapı ile olan bütünlüğü incelenip ölçülerek geçerli kabul edilmiştir. Şekil 4.25’de elmas mikrosertlik ucu batırıldıktan sonra geçerli ve geçersiz olan iki iz görülmektedir. Genel olarak mikrosertlik ölçümlerinde yük değeri düşürüldükçe kaplamayı oluşturan toz taneciklerinin sertliğine yaklaşılmakta (intrinsic values), yük değeri büyüdükçe, kaplamayı oluşturan bütünü sertliğine yaklaşılmaktadır (extrinsic values). Konvansiyonel mikrosertlik ölçüm teknikleriyle, kaplamayı oluşturan toz taneciklerinin boyutu çok küçük olduğundan gerçek tanecik sertliğine (real intrinsic values) veya kaplamanın kalınlığı sınırlı miktarda olduğundan gerçek kaplama bütünü sertliğine (real extrinsic values) ulaşmak mümkün olmamaktadır. Şekil 4.26’da seramik katman için aynı numune üzerinde farklı yüklerle elde edilmiş mikrosertlik değerleri görülmektedir.



Şekil 4.25. Ölçüm sonucu geçersiz (sol ok) ve geçerli (sağ ok) kabul edilen sertlik izleri.

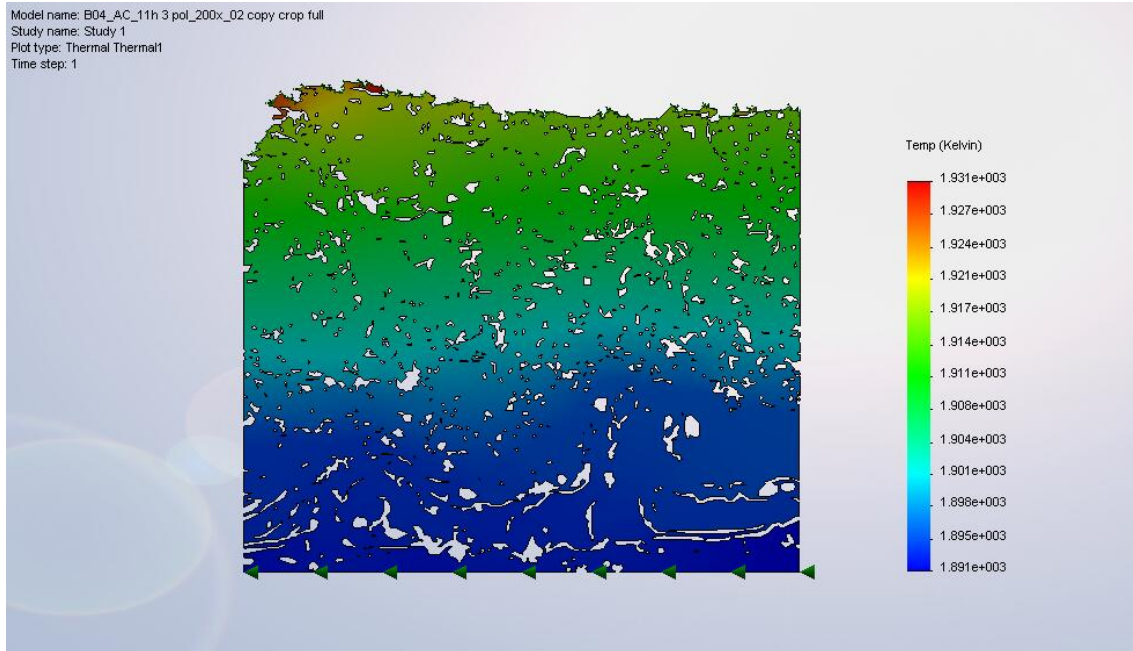


Şekil 4.26. #B3 numune farklı yük değerleri için seramik katman mikrosertlik ölçüm sonuçları.

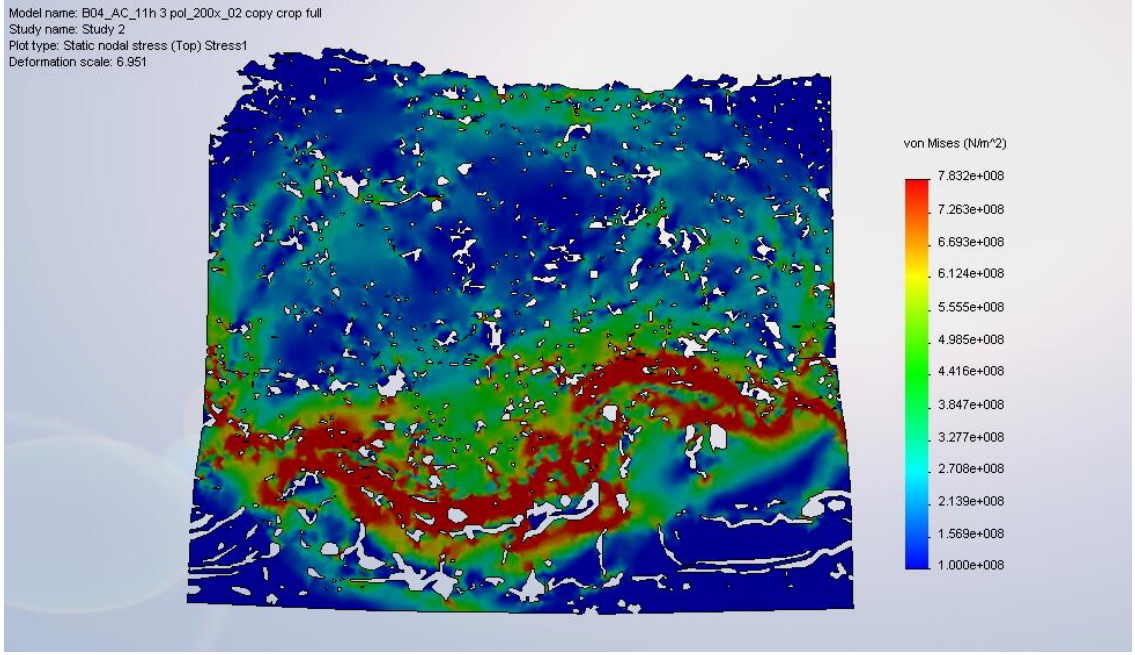


#### 4.1.6. Bilgisayar Modellemesi

Bilgisayar modelleri yardımıyla kaplamanın içerisindeki ısı dağılımı ve kaplama katmanları arasındaki termal genişleme farkından kaynaklanan gerilmelerin dağılımı elde edilmiştir. Ayrıca farklı seramik katman gözenek miktarına sahip numunelerin mikrograflarından yararlanılarak, gözenek miktarının efektif ısı iletim katsayısı ile olan ilişkisi irdelenmiştir. Şekil 4.27 ve 4.28'de #B4 modelin termal ve termomekanik çözümlenmeleri görülmektedir.



Şekil 4.27. #B4 numune termal çözümlenme.

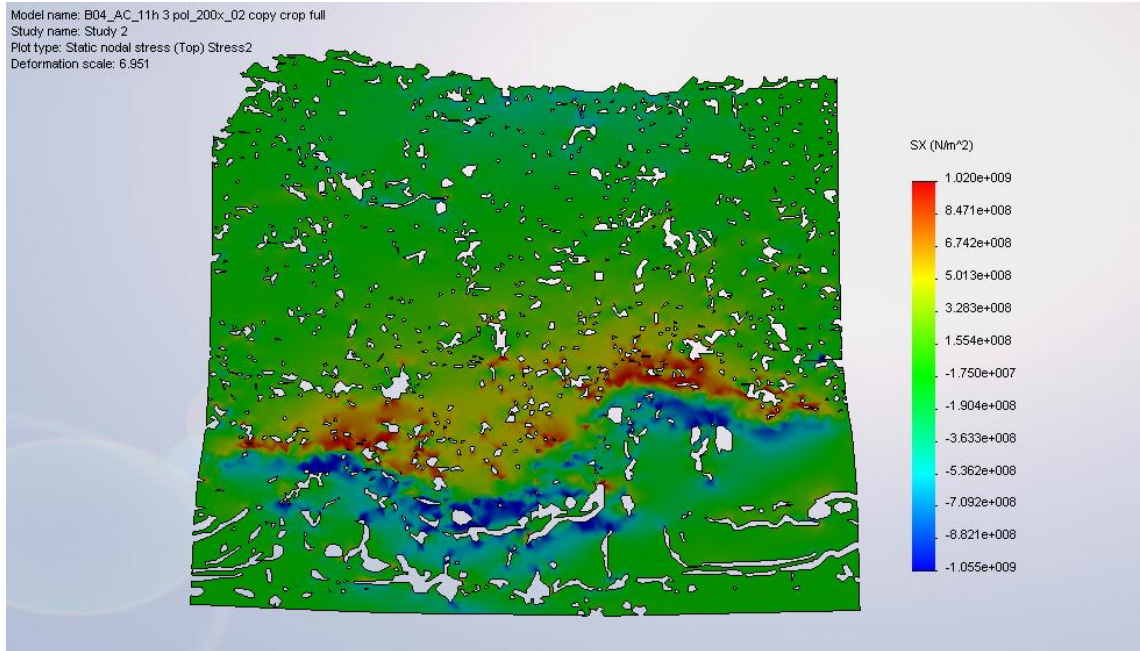


Şekil 4.28. #B4 numune termomekanik çözümlene (Von Misses kriteri).

Şekil 4.27 ve 4.28'deki kırmızı renkler sırasıyla sıcaklığın ve gerilimin yükseldiği, mavi renkler ise azaldığı sahaları göstermektedir. Şekillerin alt kısmı bağ kaplama, üst kısmı ise seramik kaplamayı göstermektedir. Şekil 4.28'de beliren ve gerilimin yükseldiği kırmızı hat şeklindeki saha iki kaplama katmanı arasındaki sınır bölgesidir. Şekil 4.27 incelendiğinde; kaplamada termal yalıtımın beklendiği şekilde seramik katman tarafından sağlandığı, yüksek ısı iletim katsayısı nedeniyle bağ kaplamanın bu konuda belirgin katkısının bulunmadığı görülmektedir. Şekil 4.28'de ise; kaplama içindeki gerilimin termal şok test sonuçlarına da uyumlu bir şekilde bağ kaplama / seramik kaplama ara yüzeyinde ve bu yüzeye yakın sahalarda, her iki kaplama katmanı içerisindeki gözenek sınırlarında ve birbirine yakın gözeneklerin arasında kalan et kalınlığının incelendiği ligamentlerde kritik değerlere ulaştığı tespit edilmiştir. Termomekanik çözümlene sonuçları, seramik katman içerisindeki gözenek boyut ve dağılımının önemine işaret etmektedir. Özellikle bağ kaplama / seramik kaplama arayüzeyine yakın gözeneklerin eş boyutlu ve yaklaşık eşit mesafeli bir dağılım

göstermesi, termal şok testinde ve çekme testinde de zayıf görülen bu bölgenin mukavemeti üzerinde olumlu rol oynayacaktır.

Sinüs dalga formuna benzer şekilde oluşan bağ kaplama yüzeyinin bu pürüzlü yapısının da kaplama içi gerilimler üzerinde etkili olduğu, homojen dağılım göstermeyen arayüz geriliminden anlaşılmaktadır. Bu durumun daha detaylı gözlemlenmesi amacıyla termomekanik gerilmenin çözüm sonuçları “Von Misses” yerine kaplamaya paralel düzlem içi  $S_x$  gerilmeleri ön kriterine göre ele alınmış ve şekil 4.29 elde edilmiştir.



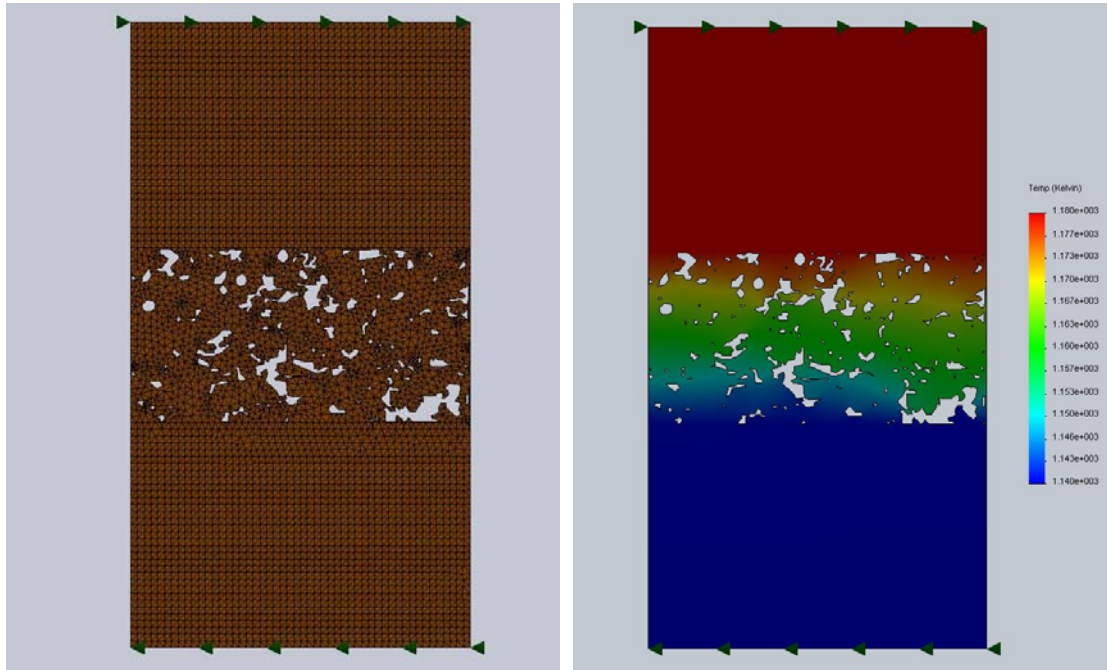
Şekil 4.29. #B4 numune termomekanik çözümü ( $S_x$ ).

Şekil 4.29 incelendiğinde; arayüzeyin bağ kaplama tarafında basma, seramik kaplama tarafında ise çekme gerilmeleri olduğu, seramik kaplama tarafındaki gerilmelerin, bağ kaplamanın dış bükey pürüzlü bölgelerinde daha fazla yükseldiği anlaşılmaktadır.

Seramik katmanın gözenek miktarının, kaplamanın efektif ısı iletim katsayısı üzerindeki etkisinin ölçülebilmesi için, standart boyutlardaki seramik kaplama kesitleri mikrograflardan elde edilmiş ve iki bakır blok arasına alınarak modellenmiştir. Sabit ısı akısı altında her iki bakır bloğun yüzey sıcaklık sonuçları alınmış ve tek boyutlu ısı iletiminde kullanılan standart 4.2 eşitliği kullanılarak modellenen kaplamanın  $k_{\text{efektif}}$  değeri hesaplanmıştır (Incropera and DeWitt, 1996). Hesaplama, bakır bloğun ısı iletim katsayısı, seramik katmanın yanında çok yüksek olduğundan etkisi ihmal edilmiştir. Gözeneksiz dolu zirkonyanın ısıl iletkenlik katsayısı “ $k=2$ ” olarak alınmıştır.

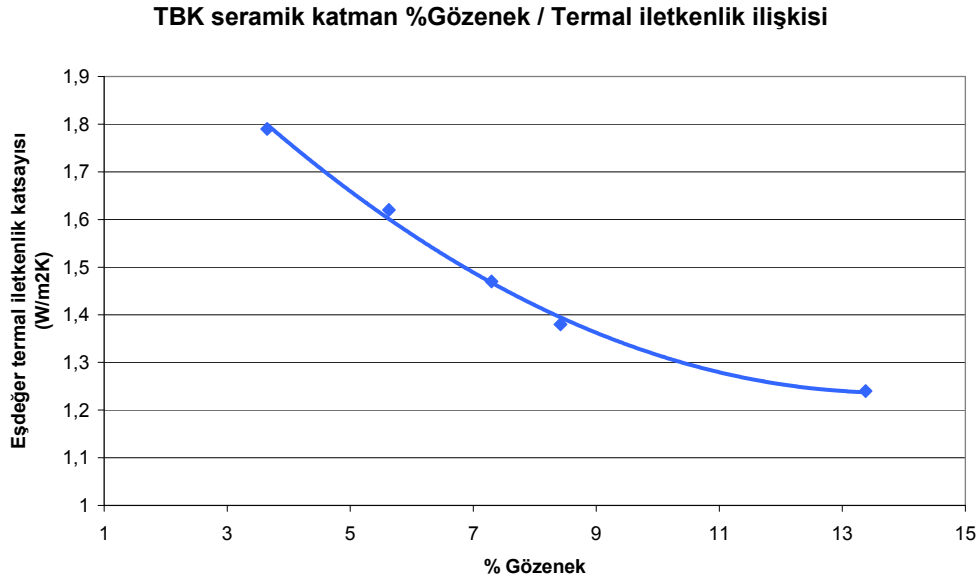
$$k_{\text{efektif}} = \text{Sıcaklık farkı} / (\text{Seramik katman kalınlığı} \times \text{Isı akısı}) \quad (4.2.)$$

Çözümlemesi yapılan bir modelin ağ örgü (mesh) ve sonuç ısı dağılımı şekil 4.30’da, bu sonuçlardan ve eşitlik 4.2.’den yararlanılarak elde edilen ısı iletim katsayılarının ( $k_{\text{efektif}}$ ) mevcut modellerdeki gözenek miktarına göre dağılımı ise şekil 4.31’de verilmiştir.



Şekil 4.30. Farklı gözenek miktarına sahip seramik katman kesitlerinin sabit ısı akısı altındaki termal çözümü.

Şekil 4.30 incelendiğinde, gözeneğin yoğun bulunduğu sahalarda ısı iletiminin önemli ölçüde azaldığı görülmektedir.



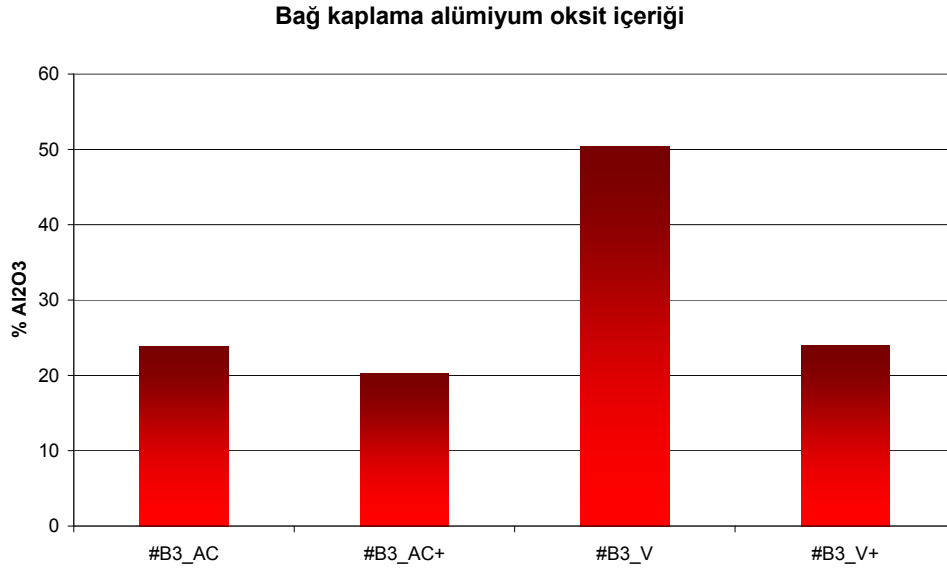
Şekil 4.31. Seramik kaplama gözenek miktarı / termal yalıtkanlık ilişkisi.

Şekil 4.31'de gözenek miktarının artmasıyla, efektif ısı iletiminin beklendiği şekilde önemli derecede azaldığı görülmektedir.

#### 4.1.7. Ön Oksidasyon Testi

Ön oksidasyon işlemi sonrasında bağ kaplama / seramik kaplama ara yüzeyinde, oksidasyon işlemi öncesi optik mikroskopta 200 büyütme altında belirlenemeyen yaklaşık 1-2  $\mu\text{m}$  kalınlığında bir oksit tabakası meydana gelmiştir. Ayrıca ana metal / bağ kaplama ara yüzeyinde, işlem öncesi kesikli bir yapıda olan oksit tabakası daha sürekli ve belirgin bir hal almıştır. Bağ kaplama içerisindeki oksit tabakasından numunenin çeşitli aşamalarında SEM / EDX ünitesi ile yapılan spot analizleri yardımıyla oksit tabakanın alüminyum oksit miktarı ölçülmüştür. Ön oksidasyon işleminin, bağ kaplama oksitlerini alüminyum oksit yönünden zenginleştirdiği

anlaşılmıştır. Alüminyum oksit, nikel ve krom oksite oranla daha yüksek sıcaklık dayanımına sahip olup, arzu edilen bir oksit formudur. İzotermal oksidasyon testi sonunda bağ kaplamadaki alüminyum oksit miktarı vakum modifiyeli versiyonda bir miktar daha yüksek kalmıştır. Şekil 4.32’de ölçülen bu değerler görülmektedir.



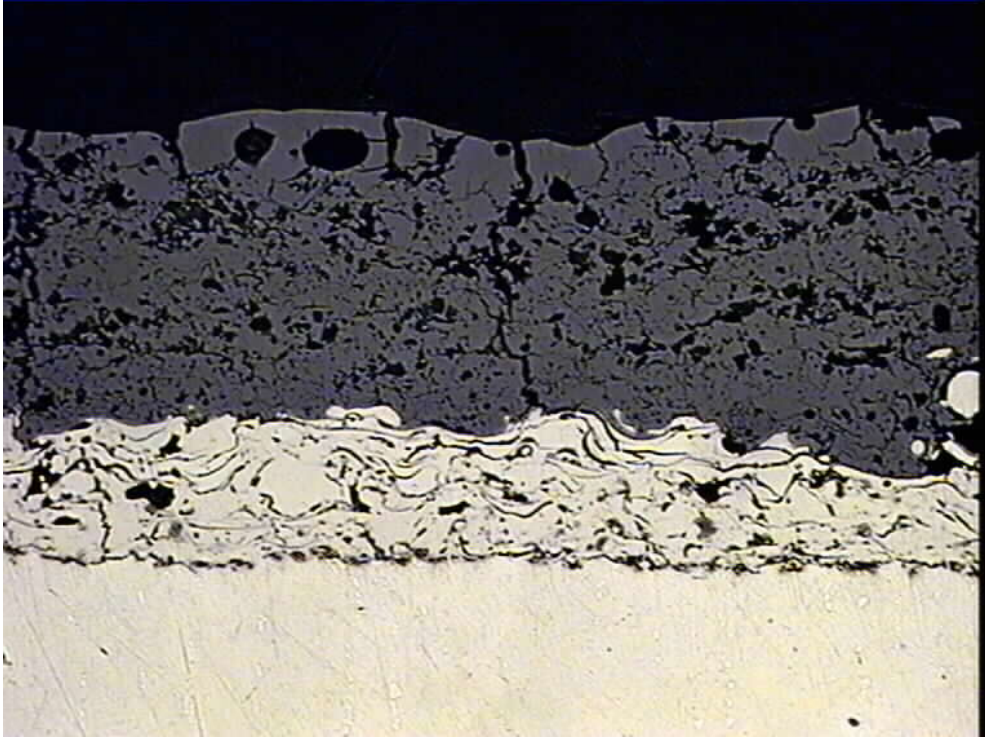
Şekil 4.32. Farklı aşamalarda bağ kaplamanın % alüminyum oksit miktarları.

Bu modifikasyon sonrasında numunelerin termal şok dayanımları ve yaşlanma sonucu mikrosertlik değerlerindeki değişimler ilgili kısımlarda verilmiştir.

#### 4.1.8. Lazer Sırlama Testi

Lazer sırlama testi sonrasında yapılan mikroyapı değerlendirmesinde seramik kaplamanın üst yüzeyinde lazer parametrelerine bağlı olarak sinterleşme ve dikey çatlaklar meydana geldiği gözlenmiştir. Şekil 4.33’de bu modifikasyon sonrası seramik katman yüzeyinde ortalama 30 µm kalınlığında değişime uğramış bölge görülmektedir. .

Lazer sırlama işlemi sonrası oksidasyon ve termal şok dayanımlarındaki değişim artış yönünde meydana gelmiş ve ilgili kısımlarda verilmiştir.



Şekil 4.33. Lazer sırlama işlemi uygulanmış TBK numune mikroyapısı (200x).

## 4.2. Kaplama Parametrelerinin Numuneler Üzerinde Etkileri

Kaplama parametrelerinin elde edilen ve ön görülen etkileri aşağıda sıralanmıştır.

### 4.2.1. Plazma gazları akışı

TBK numuneleri incelendiğinde, literatürle uyumlu şekilde plazmayı oluşturan gazların akışındaki artış, özellikle hidrojenle daha belirgin olmak üzere plazma ısısının

artmasına ve böylece kaplanacak tozlara daha fazla enerji transferine olanak vermektedir. Numunelere kaplama uygulaması sırasında yüzey sıcaklıkları ölçülmüş ve yüksek gaz akışında numune yüzeylerinin daha fazla ısındığı yukarıdaki veriyi doğrular nitelikte tespit edilmiştir. Bu durum toz taneciklerinin daha iyi eriyerek birbirlerine daha çok tutunmalarına yol açmaktadır. Ayrıca gaz akışının artması plazmanın hızını da arttırmakta ve buna bağlı olarak kaplanan toz tanecikleri daha yüksek kinetik enerji ile yüzeye ulaşmaktadır. Plazma ısı ve hızındaki artış, bağ ve seramik kaplamada daha düşük boşluk ve ergimemiş tanecik meydana gelmesine bağ kaplamada ısının belirli bir değerin üzerine çıkması durumunda oksit miktarının yükselmesine yol açmaktadır.

#### **4. 2. 2. Toz taşıyıcı gaz akışı**

Taşıyıcı toz akış değerini kritik bir parametre haline getiren mekanizmanın kökeninde, plazma akışına dahil olan tozların plazmanın en sıcak kısmı olan merkezine yakın yer alması gerekliliği bulunmaktadır. Düşük gaz akışında tozlar merkeze ulaşamamakta, yüksek gaz akışında ise tozlar merkezi geçerek tekrar plazma dış çapına yerleşmektedir. Kaplama uygulaması sırasında ergime sonucu parlak hale gelen tozlar gözlemlenerek bu durum doğrulanmıştır. Dolayısıyla toz akışının plazma merkezinde yer aldığı ideal bir gaz akış aralığı bulunmaktadır. Bu değer aralığı tek olmayıp, plazma gazlarının akışına, plazma tabancası ile kaplanacak numune arasındaki mesafeye, kaplanacak tozun yoğunluk, şekil, tane boyutuna, toz besleme çıkışı ile plazma akışı arasındaki açı gibi çok sayıda parametreye bağlıdır.

#### **4. 2. 3. Mesafe**

Mesafenin artması kaplama toz taneciklerinin plazmadan ayrıldıktan sonra havada daha çok yol alması ve hava direncine maruz kalarak tanecik hızının azalması anlamına gelmektedir. Bu durum, hem kaplama zamanını uzattığı için hem de havayla



daha fazla soğumaya neden olduğundan; taneciklerin termal ve kinetik enerjilerinin düştüğü daha düşük hızlı soğuk kaplama koşullarını meydana getirmektedir. Bu koşullar ise; boşluk, ergimemiş parçacık ve aynı zamanda bağ kaplamanın içerisinde yer alan oksit miktarlarının artmasına neden olmaktadır.

#### **4. 2. 4. Plazma akımı**

Plazma akımının artırılması, plazma sıcaklığının artmasına ve buna bağlı olarak sıcak kaplama koşullarının oluşmasına yol açmaktadır. Plazma gazlarının akış ve debisinin artırılmasına göre plazma hızını daha az artırıp sıcaklığın yükselmesini sağlamaktadır.

#### **4. 2. 5. Seramik toz morfolojisi**

TBK numunelerin bir kısmında içi dolu, diğerinde ise içi boş küre seramik tozlar kullanılmıştır. Diğer parametrelerden bağımsız olarak aynı paso sayısında kaplama kalınlığı içi boş tozlarda, beklenilebileceği gibi daha düşük çıkmaktadır. Genel olarak içi boş tozlarla üretilen kaplamaların katılık değerinin yüksek çıkması tozların daha iyi ergiyerek kaplandığını göstermektedir. Tozun içi boş olması, kütlesinin büyük bir kısmının ısı transferinin gerçekleştiği yüzeyde bulunduğu anlamına gelmektedir. Toz taneciği plazma içerisinden geçerken daha çabuk ve homojen olarak ısınmaktadır. Buna karşılık toz taneciği plazmadan ayrıldıktan sonra havada yol alırken de daha çabuk soğumaktadır. İçi boş taneciklerle gerçekleştirilen kaplama prosesinde mesafe daha hassas bir değişken olmaktadır. Boş tozların hacimlerine göre kütleleri daha düşük olduğundan görünür yoğunlukları düşmektedir. Plazma gazlarına maruz kaldıklarında bu tozların sürüklenmeleri daha kolay gerçekleşeceğinden toz besleme ve plazma gazlarının akış değerleri bu durum göz önüne alınarak ayarlanmalıdır.

#### **4. 2. 6. Paso sayısı**

Diğer parametreler değişmeksizin sadece kaplama kalınlığını değiştirmenin en ideal yolu olarak görünmektedir. Yapılan ölçümlerde kaplama kalınlığının kritik bir karakteristik olduğu göz önüne alındığında paso sayısının önemli bir kontrol değişkeni olduğu anlaşılmaktadır.

### **4.3. Başlıca Kaplama Karakteristiklerinin Numuneler Üzerindeki Etkileri**

Deneysel sonuçlardan yararlanılarak, başlıca kaplama karakteristiklerinin numuneler üzerindeki önemli etkileri aşağıda verilmiştir.

#### **4.3.1. Kaplama kalınlığı**

Tüm kaplama karakteristikleri içerisinde her bir numune ve gerçek parça için tahribatsız olarak hızlı ve kolay bir şekilde ölçülebilecek tek karakter olan kalınlık, kaplamanın kullanım performansı ile ilişkili kritik bilgiler içermektedir. Seramik ve bağ kaplama kalınlıkları, kaplanacak parçanın başlangıç et kalınlığının ölçülmesinin ardından her aşamada, iğne uçlu mikrometre gibi uygun bir cihazın kullanılmasıyla sahada ölçülebilmektedir. Öncelikle, sabit paso sayısı ve toz besleme miktarında, diğer parametrelerin değiştirilmesi durumunda kaplama verimindeki değişikliği anında görme imkanı vermektedir. Uygun parametreler belirlendikten sonra, kaplamanın kullanılacağı yere ve koşullara uygun kalınlıklarda kaplamanın elde edilmesi, basitçe paso sayısının değiştirilmesi ile mümkün olmaktadır.

Diğer değişkenlerin sabit kalması koşuluyla seramik kaplama kalınlığı arttıkça; yalıtkanlık özelliği artmakta, termal şok dayanımı düşmekte, çekme mukavemeti düşmekte, bağ kaplamayı oksidasyondan koruma kapasitesi artmaktadır. Dolayısıyla

enerji üretiminde kullanılan gaz türbinlerinin yanma odaları gibi mekanik gerilmelerin düşük olduğu statik parçalarda, sıcaklık değişimlerinin düşük, rejim halinde yüksek sıcaklıklarda çalışma süresinin uzun olduğu koşullar göz önüne alındığında; seramik katman kalınlığının yüksek tutulması, hem metal yüzey sıcaklığını düşmesi, hem de bağ kaplamanın oksidasyondan korunması gibi faydalı sonuçlar verecektir.

Yapılan çalışma sonucunda bağ kaplamanın oksitlenmesi durumunda oksijen geçirgenliğinin bir miktar azaldığı ve kaplama içi katmanların da oksidasyona uğradığı gözlenmiştir. Bağ kaplama kalınlığının artırılması, daha çok kaplama içi katman meydana getireceğinden, bağ kaplamanın daha iyi bir şekilde oksijen bariyeri olarak rol almasını sağlayacaktır. Sıcaklığın yüksek olduğu oksitleyici koşullarda bağ kaplamanın kalınlığının yüksek tutulması ana metali oksidasyondan daha iyi koruyacaktır.

#### 4.3.2. Çekme mukavemeti

Daha öncede belirtildiği gibi seramik kaplama kalınlığı çekme mukavemeti ile ters orantılı olarak bulunmuştur. Yine seramik kaplama gözenekliliği de çekme mukavemetini çentik etkisiyle düşürmektedir.

Yapılan testlerde bağ kaplamanın çekme mukavemeti belirlenememiş ancak bağ kaplama / ana metal ara yüzeyinin çekme mukavemeti açısından zayıf bölge olduğu belirlenmiştir. Bu ara yüzeyde oksit ve boşluk miktarının az olmasının bölgenin çekme mukavemetini arttıracığı değerlendirilmiştir. Mikroyapı analizlerinde aşırı pürüzlü kapalı formda girintiler içeren bağ kaplama yüzeyinin, ara yüzey boşluk miktarını arttırdığı tespit edilmiştir.

Plazma gazları akışının ve plazma akımının artırılması ile sıcak plazma koşullarının oluşturulması durumunda, seramik katman gözenek miktarı azaldığından çekme mukavemeti yükselmektedir. Bu durumda, sıcak kaplama koşulları ergiyen toz

miktarını arttırdığından çekme mukavemetiyle ters orantıya sahip kaplama kalınlığını arttırdığı unutulmamalı, gerekiyorsa paso sayısı düşürülmelidir.

Mesafenin artırılması da soğuk kaplama koşullarına neden olduğundan ve tozların hem termal hem de kinetik enerjilerini düşürdüğünden, çekme mukavemetini düşürmektedir.

Kaplama kalınlığının sabit tutulmasıyla elde edilecek çekme mukavemeti, seramik katmanın katılığının bir ölçüsü olacaktır. Böyle bir durumda yüksek çekme mukavemetine sahip seramik katman içeren kaplamaların termal şok ömürlerinin düşük, bağ kaplamayı oksidasyondan koruma performanslarının yüksek olması beklenmelidir.

#### **4.3.3. Mikrosertlik değerleri**

Mikrosertlik değerleri, seramik kaplamanın gözenek miktarıyla ters, bağ kaplamanın oksit miktarıyla doğru orantılı şekilde davranış göstermiştir.

Yapılan ölçümlerde kaplama katmanlarının mikrosertlik değerlerinin kuvvetli bir şekilde uygulama yüküne bağımlılık gösterdiği gözlenmiştir. Sertlik değerlerinin kullanılabilmesi için uygulama yükünün de göz önünde tutulması gerekliliği unutulmamalıdır.

#### **4.3.4. Bağ kaplama oksit miktarı**

Bağ kaplamanın içerisindeki oksit miktarının yükselmesi, iki kaplama katmanı ara yüzeyindeki oksit miktarının da yükselmesi anlamına gelmektedir. Bu ara yüzey çekme testinde de görülen zayıf bir bölge olup, meydana gelen oksit katmanının termal gerilmeler altında yüksek elastisite modülüyle termal şok dayanımını olumsuz

etkileyeceği değerlendirilmektedir. İyi oksidasyon dayanımına sahip bağ kaplamaların, düşük boşluk ve ergimemiş parçacık içeren, katmanlar arası düşük başlangıç oksit değerlerine sahip olması gerekmektedir. Sıcak kaplama koşulları iyi ergimeyi sağlamakla beraber toz taneciklerinin aşırı ısınması, ortam atmosferinden daha çok etkilenecek oksit yoğunluğunun artmasına yol açmaktadır. Bu nedenle plazmanın sıcaklığını arttırmaktan çok onu verimli şekilde kullanmak için toz taneciklerinin plazmanın merkezinde yol almaları, hem düşük boşluk ve ergimemiş parçacık, hem de düşük oksit içeriğini sağlayacaktır.

#### **4.3.5. Termal şok dayanımı**

Termal şok dayanımının yüksek olması kaplamanın kullanım sahasını genişletmektedir. Uygulanan test koşulları altında, numuneler seramik kaplama / bağ kaplama ara yüzeyinden veya seramik kaplamanın kendi içinden genellikle küçük parçacıklar halinde kalkmaktadır (pull out). İnce seramik kaplamalar daha çok seramik / bağ kaplama ara yüzeyinden, kalın seramik kaplamalar ise kendi içinde ve çoğunlukla pasolar arası yüzeylerden hasarlanmıştır.

Testler sonucunda seramik katmanın katılık değerini yükselten etmenlerin ve seramik kaplama kalınlığının artmasının termal şok dayanımını düşürdüğü belirlenmiştir. Seramik kaplamanın kalınlığı arttıkça, bilgisayar modellemelerinin de doğruladığı şekilde kaplama içerisindeki ısı farkı büyümekte, seramik kaplama yüzey sıcaklığı artmaktadır. Buna bağlı olarak hasar oluşumunda önemli bir adım olan seramik katmanın sinterlenmesi artmaktadır.

Mevcut deney koşullarında ve deney numunelerinin içinde bulunduğu aralıkta seramik katmanın gözenek miktarının artmasının, termal şok dayanımını olumlu etkilediği değerlendirilmiş ancak, seramik kaplama taneciklerinin daha yüksek miktarda boşluk içermesinin hem çentik etkisi hem de seramik kaplama içerisindeki ısı

gradyentini arttırdığından termal şok ömrünü azaltacağı değerlendirilmiştir. Sonuç olarak seramik kaplamanın çok soğuk ya da sıcak plazma koşulları altında atılmasının termal şok direncinin düşmesine neden olacağı değerlendirilmiştir.

Son olarak termal şok test sonuçları değerlendirilirken, test sırasında kaplama içerisinde meydana gelen olaylar serisinin karmaşık olduğu, test koşullarının değiştirilmesi durumunda sonuçların değişebileceği de unutulmamalıdır.

#### **4.4. Modifikasyonlar ve Modellemeler**

Numunelere uygulanan modifikasyonlar ve modellemelerin sonuçları bu bölümde verilmiştir.

##### **4.4.1. Ön oksidasyon**

Ön oksidasyon modifikasyonu ile bağ kaplama içerisinde istenen nitelikte oksit oluşturulması, bağ ve seramik kaplama içerisindeki kaplama işleminden gelen kalıntı gerilimlerin düşürülmesi hedeflenmiştir. İşlem sonunda bağ kaplamanın mikrosertlik değerlerinin yaşlanmaya bağlı olarak önemli ölçüde arttığı gözlenmiştir. Elektron mikroskobu ve EDX detektörü ile yapılan analizlerde düşük basınç altında gerçekleştirilen bu işlem sonunda bağ kaplamada, istenen niteliklere sahip alüminyum oksit içeriğinin arttığı belirlenmiştir. Son dönemlerde yapılan çalışmalarda da düşük basınç altında gerçekleştirilen ön oksidasyon işleminin, alüminyum oksit oluşumuna katkı sağladığı ve mukavemet üzerinde olumsuz etkisi olan diğer oksitlerin oluşumunu büyük ölçüde önlediği belirlenmiştir (Chen et al., 2008). Yapılan izotermal oksidasyon işlemi sonucunda bağ kaplamanın oksidasyon dayanımını sınırlı bir miktar arttırdığı görülmüştür.

Bu modifikasyonun en belirgin etkisi, termal şok dayanımında gözlenmiştir. Mevcut deney koşullarında numunelerin büyük kısmı, test sonunda belirgin hasar oluşmadan testi tamamlamayı başarmıştır. Mevcut iyileşmenin, bağ ve seramik kaplamadaki kalıntı gerilimlerin düşürülmesi ve bağ kaplamanın yaşlanma neticesinde ana metal ile seramik kaplama arasındaki termal genişleme uyumsuzluğunu daha iyi tolere etmesi sonucu olduğu değerlendirilmiştir.

Kaplama sonrası bir uygulama olduğundan, gerçek parçalarda mevcut ısıl işlem kondüsyonu ve çıkılan yüksek sıcaklığa uyumluluk göz önünde tutulmalıdır.

#### **4. 4. 2. Lazer modifikasyonu**

Lazer modifikasyonu da ön oksidasyona benzer şekilde bağ kaplamanın oksidasyon dayanımını sınırlı bir miktar arttırmış, termal şok dayanımını da ön oksidasyondan bir miktar daha az olmak koşuluyla önemli miktarda arttırmıştır. Seramik katman üst yüzeyini daha az gözenekli ve dikey ters çatlaklar içeren bir yapıya kavuşturması yukarıda değinilen özelliklerde iyileşmeye sebep olmuştur.

Ön oksidasyon modifikasyonuna göre önemli bir avantajı gerçek parçalara uygulandığında, ana metal üzerinde ısıl işlem kondüsyonunun değişmesi vb. olumsuz etkiler meydana getirmemesidir. Oluşan ısı lokal olup, yüksek sıcaklığa dayanıklı bir alaşım için önemsiz derecede ana metal ısınmasına yol açmaktadır.

#### **4.4.3. Bilgisayar modellemesi**

Bilgisayar modellemeleri ile kaplamanın termal ve mekanik davranışları ön görülmeye çalışılmıştır.

Farklı gözenek oranına sahip kaplamaların mikroyapılarından hazırlanan modeller, seramik katman gözenek miktarının, efektif ısı iletim katsayısı üzerinde parabolik etkiye sahip olduğunu göstermiştir.

Kaplama içersinde biriken gerilim dağılımının bağ kaplama / seramik kaplama ara yüzeyinde olduğu, bu ara yüzeyin seramik kaplama tarafında çekme ve bağ kaplama tarafında ise basma yükleri şeklinde gerçekleştiği bu modellerden anlaşılmaktadır. Bağ kaplamanın pürüzlülüğünün gerilme sahası üzerinde etkili olduğu gözlenmiştir. Termal genişleme farklılıklarından doğan gerilme bağ kaplama / seramik katman ara yüzeyinde kendini göstermektedir. Bu nedenle tam bu ara yüzeyde bulunan termal olarak gelişen oksit tabakasının varlığı ve mekanik özellikleri büyük önem taşımaktadır.

Kaplama içerisindeki mikro çatlakların modelin içine bilgisayarın kapasite sınırlarını aşması vb. nedenlerle dahil edilememesi, kaplamanın kullanıma bağlı olarak kritik özelliklerindeki değişimin (bağ kaplamanın sürünmeye uğraması, kalıntı gerilimlerin varlığı ve değişime uğraması, faz dönüşümleri vb. ) modele ilave edilememesi gibi nedenlerle bilgisayar modellemesi kaplama ile ilgili yararlı öngörüler vermekle birlikte kesin sonuçlar sağlayamamaktadır.



## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmada, TBK'ların kullanım özelliklerinin geliştirilmesi için önemli olduğu değerlendirilen kaplama parametreleri irdelenmiş ve optimize edilmiş kaplama numuneleri elde edilmesine çalışılmıştır. Ayrıca bu numunelerin özelliklerini daha da iyileştirebilmek amacıyla, ön oksidasyon ve lazer sırlama olmak üzere iki farklı modifikasyon uygulanmıştır. Kaplamanın performansı, tez çalışmasında irdelenen parametrelerle büyük ölçüde değişkenlik göstermektedir. Arzu edilen tüm performans kriterlerinin bir arada en yüksek olduğu numune bulunmamaktadır. Bunun yerine kullanım koşullarına göre önerilebilecek optimize edilmiş parametre aralıkları belirlenmiştir.

Yapılan tez çalışmasında elde edilen veriler ve bu verilere dayalı öneriler aşağıda kısaca sunulmuştur:

-Plazma ısının artmasına yol açan etmenler sıcak kaplama koşullarının oluşmasına yol açıp, genel olarak kaplamanın katılığını, çekme mukavemetini, kalınlığını, oksit miktarını arttırmaktadır.

-Plazma ısısının azalmasına yol açan etmenler ise soğuk kaplama koşullarının oluşmasına yol açıp, kaplamanın ergimemiş parçacık, gözenek miktarını arttırmaktadır.

-Sıcak kaplama koşullarını elde edebilmek için; başta hidrojen olmak üzere plazma gazlarının debi ve basıncının artırılması, plazma akımının artırılması, mesafenin kısaltılması, toz taneciklerinin plazmayı olabildiğince merkezlemesi (uygun toz taşıyıcı gaz debi ve basıncı seçilmesiyle) ve seramik katman için içi boş toz taneciklerinin kullanılması faydalı olacaktır.

-Soğuk kaplama koşulları için ise yukarıda değinilen işlemlerin tersini uygulamak gerekmektedir.

-Kullanım koşullarında kaplamadan; yüksek ısıl yalıtım, yüksek çalışma sıcaklığı ve düşük termal şok direnci istendiği durumlarda, sıcak kaplama koşullarıyla

kaplanmış ve yüksek seramik katman kalınlığına sahip TBK'ların kullanılması iyi sonuçlar verecektir.

-Termal şok direncinin yüksek olması arzu edilen çalışma koşullarında ise soğuk kaplama koşullarıyla kaplanmış numuneler kullanılmalıdır.

-Kaplama kalınlığı, sahada kaplama uygulanan gerçek parçalar üzerinde kolayca ölçülebilecek ve kaplama verimini gösterebilecek etkin bir ölçüm aracıdır.

-Ön oksidasyon ve lazer sırlama modifikasyonları numunelerin termal şok ve oksidasyon performansını arttırmıştır. Ön oksidasyonda daha fazla olmak üzere her iki modifikasyonda da termal şok ömründeki artış oksidasyon ömründekinden daha belirgin gerçekleşmiştir.

-Ön oksidasyon modifikasyonu ile, bağ kaplamada istenen nitelikte alüminyum oksit tabakası oluşturulmuştur.

-Lazer sırlama modifikasyonu kaplama yüzeyini yeniden ergitip sinterleyerek yüzey mikroyapısını değişikliğe uğratmıştır.

-Gaz türbinleri ve diğer sahalarda kullanılan TBK'lı parçalara uygulanabilirlik açısından lazer sırlama modifikasyonu, kaplanan malzemenin sıcaklığını fazla arttırmadığından daha avantajlı durumdadır.

Tüm çalışmalar ve ulaşılan sonuçlar göz önüne alındığında, kaplama üzerindeki parametreler ve sonuçları çok yönlü olup, birbirleriyle sinerji gösteren bir etkileşim halindedir. Dolayısıyla tez çalışmasında hedeflenen proses optimizasyonuna büyük ihtiyaç duyulmaktadır.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Afrasiabi A., Saremi M. and Kobayashi A., 2008, A comparative study on hot corrosion resistance of three types of thermal barrier coatings: YSZ, YSZ +Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and YSZ/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, *Materials Science and Engineering A*, 478, 264–269
- Almeida D.S., Silva C.R.M. and Nono M.C.A., Cairo C.A.A., 2006, EB–PVD TBCs of zirconia co-doped with yttria and niobia, a microstructural investigation, *Surface & Coatings Technology*, 200, 2827 – 2833
- Bartsch M., Baufeld B., Dalkilic S., Chernova L. and Heinzelmann M., 2008, Fatigue cracks in a thermal barrier coating system on a superalloy in multiaxial thermomechanical testing, *International Journal of Fatigue*, 30, 211–218
- Batista C., Portinha A., Ribeiro R.M., Teixeira V., Oliveira C.R., 2005, Evaluation of laser-glazed plasma-sprayed thermal barrier coatings under high temperature exposure to molten salts, *Surface & Coatings Technology*, 200, 6783-6791
- Bi X., Xu H. and Gong S., 2000, Investigation of the failure mechanism of thermal barrier coatings prepared by electron beam physical vapor deposition, *Surface and Coatings Technology*, 130, 122-127
- Bolot R., Antou G., Montavon G. and Coddet C., 2005, A two-dimensional heat transfer Model for thermal barrier coating average thermal conductivity computation, *Numerical Heat Transfer, Part A*, 47, 875–898
- Bose S., 2007, *High temperature coatings*, Elsevier Inc, USA, 304 p.
- Boyce M. P., 2002, *Gas turbine engineering handbook*, G.P. Publishing, Boston, 816p.
- Bunshah R. F., 1994, *Handbook of deposition technologies For Films and Coatings*, 888p.
- Cao N.Y., Kagawa Y. and Liu Y.F., 2008, Stress analysis of a barb test for thermal barrier coatings, *Surface & Coatings Technology*, 202, 3413–3418
- Cao X., Li J., Zhong X., Zhang J., Zhang Y., Vassen R. and Stoeber D., 2008, La<sub>2</sub>(Zr<sub>0.7</sub>Ce<sub>0.3</sub>)<sub>2</sub>O<sub>7</sub>—A new oxide ceramic material with high sintering-resistance, *Materials Letters*, 62, 17-18, 2667-2669
- Cao X., Zhang Y.F., Zhang J.F., Zhong X.H., Wang Y., Ma H.M., Xu Z.H., He L.M. and Lu F., 2008, Failure of the plasma-sprayed coating of lanthanum hexaluminate, *Journal of the European Ceramic Society*, 28, 10, 1979-1986

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)**

- Chen H., Zhou X. and Ding C., 2003, Investigation of the thermomechanical properties of a plasma-sprayed nanostructured zirconia coating, *Journal of the European Ceramic Society*, 23, 1449–1455
- Chen W., Wu X., Marple R., Nagy R. and Patnaik C., 2008, TGO growth behaviour in TBCs with APS and HVOF bond coats, *Surface & Coatings Technology*, 202, 2677–2683
- Chen W.R., Wu X., Marple B.R., Lima R.S. and Patnaik P.C., 2008, Pre-oxidation and TGO growth behaviour of an air-plasma-sprayed thermal barrier coating, *Surface & Coatings Technology*, 202, 3787–3796
- Dalkılıç S., 2007, Bir termal bariyer kaplama sisteminin yorulma davranışının incelenmesi, Anadolu Üniversitesi, doktora tez çalışması
- Eliasz N., Shemesh G. and Latanision R.M., 2002, Hot Corrosion in gas turbine components, *Engineering Failure Analysis*, 9, 31-43
- Fauchais P., Vardelle A. And Vardelle M., 1997, Recent developments in plasma sprayed thermal barrier coatings, *AGARD Advisory Reports*, R-823, 165 p.
- Fujikane M., Setoyama D., Nagao S., Nowak R. and Yamanaka S., 2007, Nanoindentation examination of yttria-stabilized zirconia (YSZ) crystal, *Journal of Alloys and Compounds*, 431, 250–255
- Funke C., Mailand J.C., Siebert B., VaBen R., Stöver D., 1997, Characterization of  $ZrO_2$ -7 wt.%  $Y_2O_3$  thermal barrier coatings with different porosities and FEM analysis of stress redistribution during thermal cycling of TBCs, *Surface and Coatings Technology*, 94-95, 106-111
- Goedjen J.G., Sabol S. and Dighe S., 2003, Westinghouse thermal barrier coating development, *Westinghouse Power Generation Publications*
- Goward G., Seigle L., 1994, *ASM Handbook*, ASM International Handbook Committee, 5, 2535p.
- Hejwowski T. and Weronki A., 2002, The effect of thermal barrier coatings on diesel engine performance, *Vacuum*, 65, 427–432
- Hillary R.V., 1996, *Coatings for high temperature structural materials*, National Research Council, 84 p.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)**

- Jan V., Dorcakov'a F., Dusza J. and Bartsch M., 2008, Indentation creep of free-standing EB-PVD thermal barrier coatings, *Journal of the European Ceramic Society*, 28, 241–246
- Kelly M., Singh J., Todd J., Copley S. and Wolfe D., Metallographic techniques for evaluation of thermal barrier coatings produced by electron beam physical vapor deposition, 2008, *Materials Characterization*, 59, 863 – 870
- Kim H., Kim C. and Park G., 2003, Evaluation of functionally graded thermal barrier coatings fabricated by detonation gun spray technique, *Surface and Coatings Technology*, 168, 275–280
- Koolloos J. and Marijnissen G., 2002, Burner rig testing of "herringbone" EB-PVD thermal barrier coatings, National Aerospace Laboratory NLR, NLR-TP-2002-293, 14 p.
- Koolloos M. F. J., 2001, Behaviour of low porosity microcracked thermal barrier coatings under thermal loading,
- Leyens C., Schulz U., Pint B.A. and Wright I.G., 1999, Influence of electron beam physical vapor deposited thermal barrier coating microstructure on thermal barrier coating system performance under cyclic oxidation conditions, *Surface and Coatings Technology* 120–121, 68–76
- Ma W., Gong S., Xu H. and Cao X., 2006, The thermal cycling behavior of Lanthanum–Cerium Oxide thermal barrier coating prepared by EB–PVD, *Surface & Coatings Technology*, 200, 5113 – 5118
- Wen Ma W., Dong H., Guo H., Gong S., Zheng X., 2010, Thermal cycling behavior of  $\text{La}_2\text{Ce}_2\text{O}_7/8\text{YSZ}$  double-ceramic-layer thermal barrier coatings prepared by atmospheric plasma spraying, *Surface & Coatings Technology*, 204, 3366-3370
- Matsumoto M., 2007, Development of plasma-sprayed thermal barrier coatings with low thermal conductivity and high oxidation resistance, *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 115, 118-123
- Matsumoto M., Hayakawa K., Kitaoka S., Matsubara H., Takayama H., Kagiya Y., Sugita Y., 2006, The effect of preoxidation atmosphere on oxidation behavior and thermal cycle life of thermal barrier coatings, *Materials Science and Engineering A*, 441, 119-125
- Mevrel R., and Veyes J.M., 1989, Effect of protective coatings on mechanical properties of superalloys, *AGARD Conference Proceedings*, CP-461, 226 p.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)**

- Morks M.F., Berndt C.C., Durandet Y., Brandt M., Wang J., 2010, Microscopic observation of laser glazed yttria-stabilized zirconia coatings, *Applied Surface Science*, 256, 6213-6218
- Nusair Khan A., Lua J., Liao H., 2003, Heat treatment of thermal barrier coatings, *Materials and Engineering A*, 359, 129-136
- Nusier S. And Newaz G., 1998, Analysis of interfacial cracks in a tbc / superalloy system under thermal loading, *Engineering Fracture Mechanics*, 60, 577-581
- Okazaki M., Okamoto M. and Harada Y., 2001, Interfacial fatigue crack propagation in Ni-base superalloy protective coatings, *Fatigue Fracture Engineering Materials Structures*, 24, 855-865
- Pindera M.J., Aboudi J., Arnold S.M., 2002, Analysis of spallation mechanism in thermal barrier coatings with graded bond coats using the higher-order theory for FGMs, *Engineering Fracture Mechanics*, 69, 1587-1606
- Portinha A., Teixeira V., Carneiro J., Martins J., Costa M.F., Vassen R. and Stoeber D., 2005, Characterization of thermal barrier coatings with a gradient in porosity, *Surface & Coatings Technology*, 195, 245- 251
- Rabiei A. and Evans A. G., 2000, Failure mechanisms associated with the thermally grown oxide in plasma-sprayed thermal barrier coatings, *Acta Materiala*, 48, 3963-3976
- Racek O., Berndt C., Guru N. and Heberlein J., 2006, Nanostructured and conventional YSZ coatings deposited using APS and TTPR techniques, *Surface & Coatings Technology*, 201, 338-346
- Reed R. C., 2006, *The superalloys fundamentals & applications*, Cambridge University Press, 360 p.
- Saremi M., Afrasiabi A. and Kobayashi A., 2008, Microstructural analysis of YSZ and YSZ/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> plasma sprayed thermal barrier coatings after high temperature oxidation, *Surface & Coatings Technology*, 202, 3233-3238
- Schlichting K.W., Padture N.P. and Klemens P.G., 2001, Thermal conductivity of dense and porous yttria-stabilized zirconia, *Journal of Materials Science*, 36, 3003-3010
- Scrivani A., Rizzi G. and Berndt C., 2008, Enhanced thick thermal barrier coatings that exhibit varying porosity, *Materials Science and Engineering A*, 476, 1-7

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)**

- Smialek J.L., Zhu D. and Cuy M.D., 2008, Moisture-induced delamination video of an oxidized thermal barrier coating, *Scripta Materialia*, 59, 1, 67-70
- Stolle R., 2004, Conventional and advanced coating for turbine airfoils, MTU aero engines publications, [http://www.mtu.de/en/technologies/engineering\\_news / development / Stolle\\_Conventional\\_and\\_advanced\\_coatings.pdf](http://www.mtu.de/en/technologies/engineering_news/development/Stolle_Conventional_and_advanced_coatings.pdf) , 10 p.
- Sulzer Metco Product & Services, 2010, [www.sulzer-metco.com](http://www.sulzer-metco.com)
- Tang F., Ajdelsztajn L., Kim E., Provenzano V. and Schoenung M., 2006, Effects of variations in coating materials and process conditions on the thermal cycle properties of NiCrAlY/YSZ thermal barrier coatings, *Materials Science and Engineering A*, 425, 94–106
- Tsai P.C., Lee J.H. and Hsu C.S., 2007, Hot corrosion behavior of laser-glazed plasma-sprayed yttria-stabilized zirconia thermal barrier coatings in the presence of V2O5, *Surface & Coatings Technology*, 201, 5143–5147
- Tucker R.C., 1994, *ASM Handbook*, ASM International Handbook Committee, 5, 2535p.
- Vaßen R., Kerkhoff G. and Stover D., 2001, Development of a micromechanical life prediction model for plasma sprayed thermal barrier coatings, *Materials Science and Engineering A*, 303, 100–109
- Wada K., Yoshiya M., Yamaguchi N. and Matsubara H., 2006, Texture and microstructure of ZrO<sub>2</sub>-4mol% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> layers obliquely deposited by EB-PVD, *Surface & Coatings Technology*, 200, 2725– 2730
- Weidmann E., Guesnier A., Duclos B., 2005, Metallographic preparation of thermal spray coatings, *Struers Application Notes*, [www.struers.com](http://www.struers.com)
- Wolfe D., Singh J., Miller R., Eldridge J. and Zhu D., 2005, Tailored microstructure of EB-PVD 8YSZ thermal barrier coatings with low thermal conductivity and high thermal reflectivity for turbine applications, *Surface & Coatings Technology*, 190, 132– 149
- Yamaguchi N., Wada K., Kimura K. and Matsubara H., 2003, Microstructure modification of yttria-stabilized zirconia layers prepared by EB-PVD, *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 111, 883-889
- Yoshiya M., Wada K., Jang B.K. and Matsubara H., 2004, Computer simulation of nano-pore formation in EB-PVD thermal barrier coatings, *Surface & Coatings Technology*, 187, 399– 407

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)**

- Zeng Y., Lee S. W., Gao L. ve Ding C. X., 2002, Atmospheric plasma sprayed coatings of nanostructured zirconia, *Journal of the European Ceramic Society*, 22, 347–351
- X.H. Zhong X.H., Wang Y.M., Xua Z.H., Zhang Y.F., Zhang J.F., Cao X.Q., 2010, Hot-corrosion behaviors of overlay-clad yttria-stabilized zirconia coatings in contact with vanadate–sulfate salts, *Journal of the European Ceramic Society*, 30, 1401–1408



## ÖZGEÇMİŞ

Seyid Fehmi DİLTEMİZ, 1973 yılı Türkiye Malatya doğumludur. Yüksek öğrenime kadar olan eğitimini Eskişehir’de tamamlamıştır. Lisans eğitimini, İstanbul Yıldız Teknik Üniversitesinde 1990–1994 yılları arasında Kimya Metalurji Mühendisliği Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünde gerçekleştirmiştir. Çalışma hayatını, son 11 yıldır havacılık sektörü içerisinde, metalurji laboratuvarı bölümünde yürütmektedir. Laboratuvar bünyesinde, uçak gövde ve gaz türbinlerine yönelik hasar analiz, termal bariyer kaplama da dahil olmak üzere kritik proseslerin kontrolü ve geliştirilmesi gibi işlemleri gerçekleştirmektedir. Halen evli ve bir kız çocuk babasıdır.