

# GAZ TÜRBİNLERİNDE TERMAL BARIYER KAPLAMA ESASLARININ İNCELENMESİ

İbrahim CAN

*İmalat Mühendisliği Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Türkiye*

*(ican@cumhuriyet.edu.tr)*

**Özet** – Mühendislik malzemelerini korozyon, aşınma ve erozyondan korumak, yağlama ve ısı yalıtımı sağlamak için pek çok farklı kaplama türü kullanılmaktadır. Bunlar arasında termal bariyer kaplamalar (TBC'ler) en karmaşık yapıya sahiptir ve uçak ve endüstriyel gaz türbini motorlarının en zorlu yüksek sıcaklık ortamında çalışması gerekir. Metal ve seramik çok katmanlardan oluşan TBC'ler, türbin ve yanma odası motor bileşenlerini sıcak gaz akışından yalıtır ve bu motorların dayanıklılığını ve enerji verimliliğini artırır. TBC'lerdeki iyileştirmeler, çalışma koşulları altında meydana gelen ve bunların başarısızlığına yol açan yapı ve özelliklerindeki karmaşık değişikliklerin daha iyi anlaşılmasını gerektirecektir. TBC'lerin yapısı, özellikleri ve arıza mekanizmaları burada, mevcut sınırlamalar ve gelecekteki fırsatlara ilişkin bir tartışma ile birlikte gözden geçirilmektedir. Bu çalışmada TBK genel olarak incelenmiş yaygın olarak gaz türbinlerinde kullanılan malzemeler ve uygulama yöntemleri incelenerek uygulamalar ile ilgili değerlendirme sonucu çıkarılmıştır.

*Anahtar Kelimeler – Gaz türbinleri, Kaplama Malzemeleri, Kaplama Yöntemleri, Termal Bariyer Kaplama*

## 1. GİRİŞ

Termal bariyer kaplama(TBK) genel olarak, ana metal üzerine kaplanmış MCrAlY bağ kaplama üzerine oluşturulan, bir oksit tabakasıdır[1].Yüksek sıcaklık koşullarında çalışan gaz türbini ve motor parçalarının fiziksel özelliklerinin artırılması amacıyla kullanılan bir sistem olarak tanımlanmaktadır.

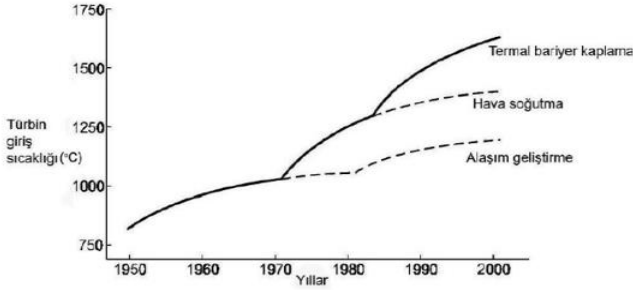
Termal bariyer kaplama özellikle gaz türbinleri için büyük önem arz etmektedir. Bunun nedeni Gaz türbinli motorlarda yüksek sıcaklıklara çıkıldığında daha yüksek itki ve güç elde edilmektedir. Bu sıcaklıklar yüksek sıcaklıklar, yanma odası ve türbin bıçağı malzemeleri dayanımı ile eş değerdedir. Gaz türbinlerinin malzeme dayanımını ve çevrim sıcaklığını artırmak böylece verimini artırıcı çalışmalar yapmak gaz türbin motorlarının servis ömürlerinin uzaması bakım maliyetlerinin düşmesi ve bileşenlerinin güvenlik derecelerinin artması bakımından önem arz etmektedir [2].

Bu çalışma özellikle gaz türbinlerinde, Termal bariyer kaplamanın tanımı, nerelerde kullanıldığına, avantajlarının neler olabileceğine, kaplama esnasında ne tür malzemelerden yararlanıldığına ve özelliklerine, bu kapsamda ne tür çalışmalar yapıldığına yönelik bir araştırmayı içermektedir.

Turbo-jet motorları ya da gaz türbinlerinin türbin kanatları ve pervaneleri, mühendislik malzemeleri içinde en yüksek stres altında çalışan bileşenleri olarak gösterilebilir [3]. Bunun en önemli sebeplerinden biri söz edilen yapısal bileşenlerin, kullanım sırasında limit sıcaklık değerlerine ulaşmasıdır. Süper alaşımların çalışma sıcaklığının üst sınırını, malzemenin başlangıç ergime noktası belirlemektedir. Çoğu süper alaşım için bu değer 1300–1350 °C civarında olsa dahi türbin giriş sıcaklığı 1400 °C gibi tipik bir değer kabul edilirse, süper alaşımların kullanımı oldukça kısıtlanmaktadır. Bu kısıtlamadan dolayı yüksek sıcaklık malzemelerine olan ihtiyaç artmaktadır.

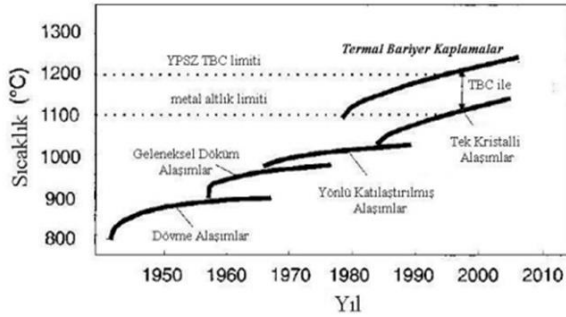
Termal bariyer kaplamalar kullanılarak türbin giriş sıcaklığı (TGS) artırılarak daha yüksek verim

elde etmek veya gerekli soğutma sisteminin azaltılması ile ağırlık ve maliyet azalması sağlanmaktadır. Şekil 1. son elli yıl içinde Türbin giriş sıcaklığının (TGS) değişimi görülmektedir.



Şekil 1. Türbin Giriş Sıcaklığında Yıllara Ve Yöntemlere Bağlı Artış[4]

Gelecekte türbin giriş sıcaklıklarının 1600°C'yi aşması beklenmektedir [5,6]. Bu yüksek sıcaklıklara ancak ekonomik olmayan gelişmiş soğutma sistemleri veya geliştirilmiş yüksek sıcaklık malzemeleri kullanılarak ulaşılabileceği açıktır. Geleneksel döküm alaşımlardan yönlü olarak katılaştırılmış (DS) ve tek kristalli (SX) alaşımlara geçiş, malzeme performansında gerçekten çarpıcı iyileşmeler sağlamıştır (Şekil 2) [7].



Şekil 2. Malzemelerin sıcaklık performansındaki gelişme[7]

## II. TBK UYGULAMA ALANLARI

Termal bariyer kaplamalar genel olarak havacılık endüstrisinde, savunma, otomotiv sanayinde, enerji santrallerinde mühendislik malzemelerini yüksek sıcaklıktan koruma amacıyla kullanılırlar. Havacılıkta kullanılan gaz türbin motorlarındaki tipik TBK uygulamaları yanma odaları, yanma boruları, yakıt buharlaştırıcıları, türbin kanatçıklarında kullanılmaktadır[8].

Termal bariyer kaplamanın amacı, alaşım yüzeyindeki sıcaklığı düşürerek çalışma sıcaklığını

arttırmaktır, dolayısıyla kaplama malzemesinin kritik özelliği düşük ısı iletkenliğidir. Termal iletkenlik, yalnızca malzemenin doğal özelliklerine değil, aynı zamanda mikro yapı ve morfolojiye de bağlıdır, bu nedenle, istenen mikro yapıları ve morfolojileri elde etmek için işleme tekniklerinin geliştirilmesi önemlidir. Yüksek sıcaklıkta kullanım sırasında mikro yapılar ve dolayısıyla özellikler değişebilir. Termal döngü sırasında veya aşındırıcı ortamlardaki reaksiyonlardan kaynaklanan faz değişiklikleri de meydana gelebilir ve kaplamanın bozulmasına neden olabilir. Düşük termal iletkenliğe ek olarak, kaplama malzemesinin alaşımla iyi bir uyumluluğu olmalıdır. Yttria-stabilize zirkonya (YSZ) bu kriterleri karşılar ve termal bariyer kaplamalar için en yaygın kullanılan malzemedir. Zirkonya bazlı termal bariyer kaplamalar etkili olsa da, geliştirilmiş kaplama sistemleri çalışma sıcaklığında daha fazla artışa ve daha uzun stabiliteye yol açabilir, bu da gaz türbini motoru enerji dönüştürme sistemlerinin verimliliğinin artmasına ve maliyetinin düşmesine yol açar [9].

## III. TERMAL BARIYER KAPLAMALARIN TARİHSEL GELİŞİMİ

Termal bariyer kaplama konusundaki çalışmalar 1950 yıllarından beri NASA Laboratuvarlarında yapılmaktadır. Bu araştırmaların hedefi, uçak motoru ile roket parçalarının yüzeylerinin korunmasına yöneliktir. 1960'larda ticari uçak motorlarında NiAl bağ kaplamalı ilk alev püskürtmeli seramik katmanlar kullanıldı [10]. TBK'lar ilk olarak 1970'li yılların ortasında gaz türbin motorlarının yanma odasında başarıyla kullanılmıştır. 1980'li yılların başında uçak türbin motorlarının kanatlarına kaplama yapılması başlanılmıştır. Uçakların ve gaz türbin kanatlarının kaplanmasında ilk olarak emaye kaplamalar kullanılmıştır [11]. TBC malzemeleri ve kaplama teknolojisi sürekli gelişme gösterdi. TBK'lar için CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub> denenmiştir. Altlık/tabana malzemesi olarak da Ni ve Mo denenmiştir. Bunların kullanılmasıyla daha yüksek sıcaklıklara dayanıklı kaplamalar geliştirilmeye başlanılmıştır[12]. Ancak 1980'lerde TBC'ler önemli ölçüde iyileştirildi [13]. Takip eden yıllarda itriya ile stabilize edilmiş zirkonya(YSZ) istisnai

bir seramik üst kaplama malzemesi olarak tanımlandı[ 14, 15].

#### IV. TERMAL BARIYER KAPLAMA SİSTEMİNİN KATMANLARI

Gaz türbini parçaları, güneş panelleri ve dizel motor bileşenleri gibi yüksek sıcaklık bileşenleri için TBC'ler tercih edilmiştir. TBC düşük termal iletkenliğe, faz kararlılığına ve iyi sinterleme direncine sahiptir[16].  $Al_2O_3$ ,  $BeO$ ,  $Y_2O_3$ ,  $CeO_2$ ,  $ThO_2$ ,  $In_2O_3$ ,  $SnO_2$ ,  $ZrO_2$ , müllit, titanya,  $Si_3N_4$ , porselen, elmas ve düşük ısı iletkenliğine sahip diğer TBC malzemeleri yaygın olarak kullanılmaktadır. TBC'ler, yalnızca 0,1 mm kalınlık için yüzey sıcaklıklarını 100–200 °C'ye kadar düşürmüştür[16]. TBC'lerin birincil amacı, malzemesinin yüzeyinde daha yüksek ısı direncinin yanı sıra daha yüksek korozyon ve erozyon direnci sağlamaktır. Enerji santralleri endüstrisinde, temel bileşenler için ısı yalıtımı sağlamak için TBC'ler kullanılır. Bileşenlerin oksidasyon, korozyon, aşınma ve erozyon aşınma direncine karşı yardımcı olur[17].

Tablo.1 TBC Katmanlarının rolü [17]

TBC katmanları	Yaklaşık değer	Katmanların Rolü
Bond Ceket	75 ila 125 $\mu m$	Termal Gerilmenin Azaltılması, Oksidasyon Direncinin Artırılması
TGO	1 ila 20 mikron	Oksidasyon ve Korozyon koruması sağlamak
Üst kat	100 ila 400 $\mu m$	Isı yalıtımı
Yüzey	-	Termo Mekanik Yükleme

Termal bariyer kaplamalar; bir süper alaşım altlıktan, kaplama işlemi esnasında oluşup çalışma esnasında bağ kaplamanın oksitlenmesiyle ortaya çıkan termal gelişen oksitten (TGO: Thermally Grown Oxide), seramik üst kaplamanın metalik altlığa yapışmasını sağlayan ve altlığı oksitlenmeye karşı koruyan bir bağ kaplamadan (BC: Bond Coat) ve sıcaklık yalıtımı sağlayan seramik bir üst kaplamadan oluşmaktadır.



Şekil 3. Termal bariyer kaplama katmanları[2]

#### V. TABAN MALZEMESİ

Gaz türbinli motorlarda altlık(taban) malzemesi genellikle Ni, In ya da Cr esaslı süper alaşımlar olup 1100-1200 °C'ye kadar dayanım gösterebilmektedirler. Yüksek sıcaklık ve basınçlarda korozyon ve oksidasyon direnci gösteren bu süper alaşımlar için çalışma sınırı, ergime noktalarının %90'ı civarındadır. Mekanik yükü süper alaşım altlık taşımaktadır [2]. Alt tabaka malzemeleri, diğer şeylerin yanı sıra, sürünmeye, mekanik yüklere, termal yorgunluğa ve çalışma gerilimlerine dayanabilmelidir. Titanyum, titanyum-alüminyum ve niyobyum alaşımları, nikel bazlı süper alaşımlar gibi dizel motorlarda alt tabaka malzemesi olarak kullanılabilir.

##### Bağ tabaka

Bağ tabakanın (metalik tabaka) temel amacı, üst tabakayı altlığa yapıştırmak ve oksidasyonun alt tabakaya ulaşmasını önlemek/geciktirmektir. MCrAlY olarak bilinen süper alaşım esaslı bir kaplamadır. M; nikel, kobalt, demir veya bu elementlerin birleşimini temsil etmektedir. Bağ katman içinde bulunan Al elementi oksidasyon ömrünü arttırırken sünekliği önemli miktarda azaltmakta ve Cr elementi ise bağ katman yüzeyinde oluşan krom oksit ( $Cr_2O_3$ ) sayesinde oksidasyon ve korozyon direnci sağlamaktadır. Y(itriyum) elementi ise yapışmanın iyi olmasını sağlamaktadır[2].

#### VI. TERMAL GELİŞEN OKSİT (TGO)

Termal gelişen oksitin (TGO) amacı ise seramik üst tabakayı bağ tabakaya bağlamak ve bağ tabakasının taban malzemeye yapışma kabiliyetini azalttığı için oksitlenmesini önlemektir. Son kat ile bağ katı arasında bir  $Al_2O_3$  oluşumu, bağ katında Al ile reaksiyona giren ve kaplanmış malzemeyi ortadan kaldırarak TBC bozulmasına neden olur. Böylece yüksek sıcaklıkta kaplamadan gelen oksijen akışından kaynaklanır[18]. Termal bariyer kaplama katmanları içerisindeki bu gerilmeler özellikle oksitleme özelliği fazla, yüksek sıcaklıklardaki kullanım koşullarında ortaya çıkmaktadır. Bu koşullarda TGO katmanın kalınlaşması (6- 8  $\mu m$ ) ve artan gerilmelerle, termal bariyer kaplama sisteminde kırılmalar ve ayrılmalar gözlemlenmektedir[19].

MCrAlY tipi bağ kaplamaları ile TGO gelişimini önlemek için krom ve alüminyum ile geliştirilmiş fonksiyonel gradyan katmanlara sahip kaplamalar kullanılır. Krom, ısı korozyonuna karşı dirence yardımcı olurken, alüminyum, yüzeyin oksidasyondan korunmasına yardımcı olur [20]. TGO gelişiminin bağ kaplama katmanı içinde içe doğru veya dışa doğru oksijen difüzyonu ile başlatılıp başlatılmadığını belirlemek için araştırma halen devam etmektedir [17].

#### VII. SERAMİK ÜST TABAKA

Seramik üst kaplama TBC sistemlerinde en fazla sıcaklık düşüşünün gerçekleştiği ilk katmandır. Yaklaşık olarak 100 ile 300 °C arasında sıcaklık düşüşü olması muhtemeldir [21]. Sıcaklık düşüşünü gerçekleştiren bu tabakanın kalınlığı, biriktirme yöntemine bağlı olarak 100 - 300 µm arasındadır. Üst kaplama malzemesi için en önemli özellik daha fazla sıcaklık azalması sağlamak için düşük ısıl iletkenliktir, plazma gaz sıcaklığına dayanmak için yüksek erime noktası, termal genişleme uyumsuzluğunu önlemek için yüksek termal genişleme katsayısı ve delaminasyondan kaçınmak için yüksek gerilme toleransıdır [22]. Bu katman için diğer şartlar ise termal şok direncinin yüksek olması, mikroyapısal kararlılık ve kimyasal uyumluluktur. Ayrıca seramik üst tabakanın oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklık çalışma koşullarında faz kararlılığını sağlaması gereklidir. Bu nedenle, dikkate alınabilecek çok az malzeme vardır. Bunların başında ise, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ile kısmen stabilize edilmiş YSZ gelmektedir. Son 20 yıllarda ise, bu malzemeye alternatif yeni nesil TBC malzemeleri geliştirilmeye başlanmıştır [23,24].

Bağlayıcı malzemenin çalışma sıcaklığında oksidasyona ve/veya korozyona karşı direncinin yüksek olması gerekir. Bu niteliklere sahip MCrAlY alaşımı türbin kanatları için bağlayıcı olarak geliştirilmiştir [25,26]. Daha güvenilir ve uzun servis ömrüne sahip TBK'ların üretilmesinde tek kristal malzemelerin kullanımı daha yüksek gerilim toleransı karakteristiğine sahip MCrAlY alaşımlarının kullanılması ileri bir aşama olarak tanımlanabilir [27].

#### VIII. TERMAL BARIYER KAPLAMADA KULLANILAN MALZEMELER VE ÖZELLİKLER

Termal bariyer kaplamalar, termomekanik ve kimyasal gerilmeler üzere tüm olumsuz

şartlara karşın bazı özelliklere sahip olmalıdır. Termal bariyer kaplama malzemesi seçerken termal genişleme katsayısı ve termal iletkenlik en önemli faktörlerdir. Termal bariyer kaplamada aranan özellikler şöyle sıralanabilir [2,28]

- Düşük termal iletkenlik
- Düşük yoğunluk
- Düşük sinterleme oranı
- Kullanılan ortamda termodinamik kararlılık göstermesi
- Yüksek erime noktası
- Yüksek deformasyon dayanım
- Yüksek aşınma ve erozyon direnci
- Kaplanacak metal ile seramik kaplamanın termal genişleme karakteristikleri birbirine yakın olması
- Mekanik gerilmelere karşı dayanıklı olması
- Kristal yapının sıcaklık ile değişmemesi
- Yüksek oksidasyon ve korozyon direnci

Bu özelliklerin sağlanması, termal bariyer kaplama malzemelerini sınırlandırmaktadır. Bu gereksinimleri sağlayan birkaç tane termal bariyer kaplama malzemesi mevcuttur ve bu malzemeler ile yapılan kaplamalar, kaplama parametrelerinin de uygun seçilmesi ile optimum seviyede gerçekleşmektedir. Tüm bu olumsuz şartlarda çalışabilmesi için, termal bariyer kaplama malzemesi olarak YSZ, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, Mülli (3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>2SiO<sub>2</sub>), Y<sub>3</sub>Al<sub>x</sub>Fe<sub>5-x</sub>O<sub>12</sub>, CeO<sub>2</sub>+YSZ ve La<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> gibi çeşitli malzemeler geliştirilmiştir. [2,28]

#### IX. BARIYER KAPLAMA ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Enerji üretim enstitüleri ve otomotiv gibi birçok alanlarda çok çeşitli kaplama metotları kullanılmaktadır. Çok fazla altlık malzemesi üzerine çeşitli kaplamaları biriktirme özelliğine sahiptir. Termal bariyer kaplamaları üretmek için yaygın olarak EB-PVD ve plazma sprej biriktirme yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemler kullanılırken termal iletkenlik, gerilim toleransı ve yeniden üretilebilir olması gibi birçok faktör dikkate alınmalıdır [22].

Biriktirme teknikleri açısından, iki yöntem iyice yerleşmiştir. Biri elektron ışını fiziksel buhar biriktirme (EB-PVD) ve diğeri atmosferik plazma püskürtme (APS). EB-PVD tarafından biriktirilen kaplamalar, özellikle sütunlu mikro yapılara sahiptir ve esasen yüksek termo-mekanik yüklü uçak motorları kanatları için kullanılır. Bu arada APS süreci, EB-PVD'ye kıyasla çalışma sağlamlığı

ve ekonomik uygulanabilirliği ile övünür, bu nedenle artık bu süreçle daha fazla TBC geliştirilmektedir. Tipik olarak, yanma odası kutuları ve kanatlı platformlar gibi statik bileşenler APS ile kaplanır. Sabit gaz türbinlerinde kanatlar da sıklıkla termal püskürtme işlemleriyle kaplanır[29].

Tablo 2 Kaplama İşlemi ve Özellikleri[29].

	Kaplama yöntemleri	Kaplama kalınlığı	Malzemeler	Özellikler
1	PVD	1-5 mikron	Ti(C,N)	Aşınma direnci
2	CVD	1-50 mikron	SiC	Aşınma direnci
3	Termal Sprey	40-3000 mikron	Seramik ve metalik alaşımlar	Aşınma ve korozyon direnci
4	Sert krom Plaka	10-100 mikron	Krom	Aşınma direnci
5	Kaynak kaplaması	500-5000 mikron	Ni bazlı alaşımlar	Aşınma direnci

#### A. İkinci Seviye Başlık

Ana başlıkların detaylandırılması için 2. seviye ve 3. seviye başlıklar kullanılabilir.

#### X. SONUÇ VE ÖNERİLER

Geçmişte birçok farklı TBC malzemesi araştırılmıştır. Termal iletkenlik ve termal genişleme katsayısının temel özelliklerinin bir karşılaştırması Tablo.6'da listelenmiş ve Şekil 13'te çizilmiştir. Açıkçası, piroklor ve kusur küme malzemeleri en ilgi çekici aralığı, yani düşük termal iletkenlik ve oldukça yüksek termal genişleme katsayılarını kapsar. Çalışmalar, bu tür malzemeler de işleme sırasında ciddi problemler göstermediğini ortaya koymuştur. Bu malzemelerin en uygun malzemeler gibi görüldüğünü göstermiştir. Bununla birlikte, daha fazla geliştirme, termal döngüsel performans ve termal kararlılık açısından diğer malzemelerin de belirli avantajlarını ortaya çıkarabilir.

Nikel esaslı süper alaşım Inconel 718 altlık oksidasyona, korozyona, aşınmaya ve ısıya karşı dirençli bir malzemedir. Aynı zamanda bu alaşım, çatlamalara karşı da oldukça dayanıklıdır. Çalışmalarda, araştırmacılar tarafından daha çok tercih edilmektedir[55].

#### KAYNAKLAR

[1] (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.  
 [2] (Arslanoğlu, 2020).  
 [3] Peters, M., Fritscher, K., Staniek, G., Kaysser, W. A., & Schulz, U. (1997). Design and properties of thermal barrier coatings for advanced turbine engines. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 28(8), 357-362.  
 [4] Koolloos M. F. J., 2001, Behaviour of low porosity microcracked thermal barrier coatings under thermal loading  
 [5] Leyens, C., Fritscher, K., Gehrling, R., Peters, M., & Kaysser, W. A. (1996). Oxide scale formation on an MCrAlY coating in various H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O atmospheres. *Surface and Coatings Technology*, 82(1-2), 133-144.  
 [6] Schulz, U., Krell, T., Leushake, U. ve Peters, M., Graded design of EB-PVD thermal barrier coating, AGARD SMP Meeting on “Thermal Barrier Coatings”, Denmark, 199  
 [7] Peters, M., Leyens, C., Schulz, U., & Kaysser, W. A. (2001). EB-PVD thermal barrier coatings for aeroengines and gas turbines. *Advanced engineering materials*, 3(4), 193-204.  
 [8] Stolle, R. (2009). Conventional and advanced coatings for turbine airfoils. *Journal of MTU Aero Engines*, (D-90955).  
 [9] Clarke, D. R. (2003). Materials selection guidelines for low thermal conductivity thermal barrier coatings. *Surface and Coatings Technology*, 163, 67-74.  
 [10] Bose, S., & DeMasi-Marcin, J. (1997). Thermal barrier coating experience in gas turbine engines at Pratt & Whitney. *Journal of thermal spray technology*, 6, 99-104.  
 [11] R.A. Miller, J. Therm. Spray Technol. 6 (1997) 35. Miller, R. A. (1997). Thermal barrier coatings for aircraft engines: history and directions. *Journal of thermal spray technology*, 6, 35-42.  
 [12] Çiftiyürek, E. (2009). % 8 Ysz (itriyum İle Stabilize Edilmiş ZrO<sub>2</sub>) Termal Bariyer Kaplamaların (tbk) Üretimi Ve Proses Parametreleri Optimizasyonu (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü)  
 [13] R. Bürgel, I. Kvernes, in: W. Betz, et al., (Eds.), D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, NL, 1986, p. 327.  
 [14] S. Stecura, Adv. Ceram. Mater. 1 (1986) 68.  
 [15] N. Czech. cfi/Ber. DKG 77 (2000) 18. Aktaran, Vaßen, R., Jarligo, M. O., Steinke, T., Mack, D. E., & Stöver, D. (2010). Overview on advanced thermal barrier coatings. *Surface and Coatings Technology*, 205(4), 938-942.  
 [16] Clarke, D. R., & Phillpot, S. R. (2005). Thermal barrier coating materials. *Materials today*, 8(6), 22-29  
 [17] Jude, S. A. A., Jappes, J. W., & Adamkhan, M. (2022). Thermal barrier coatings for high-temperature application on superalloy substrates-A review. *Materials Today: Proceedings*.  
 [18] .Kopc, M., Kukla, D., Yuan, X., Rejmer, W., Kowalewski, Z. L., & Senderowski, C. (2021). Aluminate thermal barrier coating for high temperature

- performance of MAR 247 nickel based superalloy. *Coatings*, 11(1), 48.
- [19] Minisker, M.A.(2009). Termal Sprey Yöntemiyle Oluşturulan Kaplamaların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul
- [20] Moskal, G. (2009). Thermal barrier coatings: characteristics of microstructure and properties, generation and directions of development of bond. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 37(2), 323-331
- [21] Aygun, A. (2008). Novel Thermal Barrier Coatings (TBCs) that are resistant to high temperature attack by CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> (CMAS) glassy deposits (Doctoral dissertation, The Ohio State University).
- [22] Mohan, P. (2010). Environmental degradation of oxidation resistant and thermal barrier coatings for fuel-flexible gas turbine applications. University of Central Florida.
- [23] Karaoglanli, A. C., Doleker, K. M., Demirel, B., Turk, A., & Varol, R. (2015). Effect of shot peening on the oxidation behavior of thermal barrier coatings. *Applied Surface Science*, 354, 314-322
- [24] Moy, C. K., Cairney, J., Ranzi, G., Jahedi, M., & Ringer, S. P. (2010). Investigating the microstructure and composition of cold gas-dynamic spray (CGDS) Ti powder deposited on Al 6063 substrate. *Surface and Coatings Technology*, 204(23), 3739-3749.
- [25] Zubacheva, O. A. (2004). Plasma-Sprayed and Physically Vapor Deposited Thermal Barrier Coatings: Comparative Analysis of Thermoelastic Behavior Based on Curvature Studies (Doctoral dissertation, Bibliothek der RWTH Aachen).
- [26] Khan, A. N., Lu, J., & Liao, H. (2003). Effect of residual stresses on air plasma sprayed thermal barrier coatings. *Surface and Coatings Technology*, 168(2-3), 291-299.
- [27] Peters, M., Fritscher, K., Staniek, G., Kaysser, W. A., & Schulz, U. (1997). Design and properties of thermal barrier coatings for advanced turbine engines. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 28(8), 357-362.
- [28] Kahraman, Y. (2011). Termal bariyer kaplı gaz türbin kanatlarında çalışma esnasında oluşan gerilmelerin modellenmesi ve analizi (Doctoral dissertation, Sakarya Üniversitesi (Turkey)).
- [29] J Chellaganesh, D., Khan, M. A., & Jappes, J. W. (2021). Thermal barrier coatings for high temperature applications—a short review. *Materials Today: Proceedings*, 45, 1529-1534S. Zhang, C. Zhu, J. K. O. Sin, and P. K. T. Mok, “A novel ultrathin elevated channel low-temperature poly-Si TFT,” *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 20, pp. 569–571, Nov. 1999.