Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi
Cilt: 12, No: 1, 2015 (57-64)

Electronic Journal of Machine Technologies
Vol: 12, No: 1, 2015 (57-64)

TEKNOLOJİK ARAŞTIRMALAR

www.teknolojikarastirmalar.com
e-ISSN:1304-4141

Makale
(Article)

Yeni Nesil Termal Bariyer Kaplama Malzemeleri

Muhammet KARABAŞ[*], Emre BAL[**]
[*]İstanbul Teknik Üniversitesi, Met. Ve Malz. Müh. Böl.,İstanbul/TÜRKİYE
mkarabas@itu.edu.tr
[**] Akdeniz Üniversitesi, Tek. Bil. M.Y.O, Antalya/TÜRKİYE

Özet

Termal bariyer kaplamalar (TBK), enerji ve uçak-uzay sanayisine ait gaz türbinlerinde yapısal bileşenlerin yüksek sıcaklığa karşı korunmasında çok geniş uygulama alanına sahiptir. Bununla birlikte, güç üretici motorların yüksek verimliliğe sahip olması operasyon sıcaklığının artması olarak düşünülebilir. Termal bariyer kaplama kavramı; soğutulan metalik malzeme ile sıcak gaz katmanı arasına, iş parçasına ısı transferini engelleyecek\yavaşlatacak termal yalıtım yeteneği yüksek malzeme katmanını içermektedir. Günümüzde geliştirmiş en iyi ve yaygın Termal Bariyer Kaplama örneği %8 İtriyum ile stabilize edilmiş zirkonyum (YSZ) dur. TBK, seramik bir kaplama olup, oda sıcaklığından 1200 °C'ye kadar kullanılabilir, düşük termal iletkenliğe, yüksek termal şok dayanımına sahiptir. Zirkonya oda sıcaklığından 1170 °C'ye kadar monoklinik kristal yapıdadır ve artan sıcaklıklarda tetragonal (1170-2370°C) yapıdan kübik kristal yapıya (>2700°C) allotropik dönüşümler gösterir. Bu dönüşümler % 3-5'lik hacim değişimini de beraberinde getirdiğinden kaplamaların bütünlüğü ve servis ömrü kısalır.
Kullanımda olan mevcut kaplama malzemeleri yerine termal, mekanik ve kimyasal özellikleri daha üstün malzemeler; türbinlerin daha güvenli şekilde çalışmasını, türbin veriminin artmasını, türbin bakım aralıklarının uzamasını ve son derece pahalı olan sıcak kısım parçalarının ömürlerinin artmasını sağlayacaktır. Bu çalışmada potensiyel özellikleri ile YSZ yerine alternatif olabilecek malzemeler incelenmiş ve tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Termal Bariyer Kaplamalar, YSZ, Plazma sprey

New Generation Thermal Barrier Coating Materials

Abstract

Thermal Barrier Coatings (TBC) find a large application as a protection shield against high temperature for the structural components in stationary and aerospace gas turbines. The Thermal Barrier Coating (TBC) concept involves placing a thermally insulating layer between a cooled metallic component and the hot working gas to reduce heat transfer to the component. However, to achieve higher efficiencies in power engines, increasing the operation temperature is envisaged State of the art TBC´s based on yttria stabilized zirconia (YSZ) may be used at temperatures up to 1200°C, have the ability of low thermal conductivity and high thermal shock resistance. Pure zirconia exists in three crystal phases at different temperatures. At very high temperatures (> 2370°C) the material has a cubic structure. At intermediate temperatures (1170 to 2370°C) it has a tetragonal structure. At low temperatures (below 1170°C) the material transforms to the monoclinic structure. The tetragonal-to-monoclinic phase transformation is martensitic and can be observed in heating and cooling periods. The transformation occurs while cooling zirconia from high temperatures and involves a 3-5% volume increase. The volume change induces a significant shear strain in the structure, affecting the integrity and the service life of the coating.
Improvements on new thermal barrier coating materials instead of presently used coatings ,better mechanical and chemical features 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 study, new generation ceramic thermal barrier coating materials which are used instead of YSZ have been discussed.

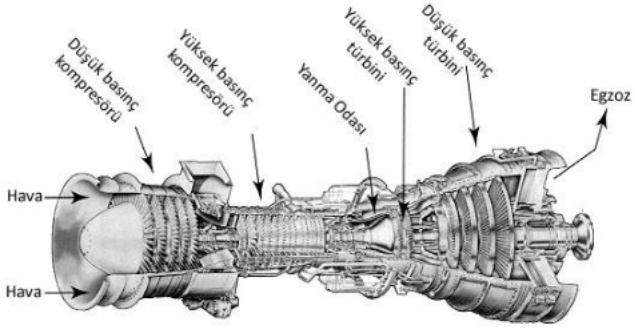
Keywords : Thermal Barrier Coating, YSZ, Plasma spray

Bu makaleye atıf yapmak için
Karabaş M. ve Bal E." Yeni Nesil Termal Bariyer Kaplama Malzemeleri" Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi 2015, 12 (1) 57-64

How to cite this article
Karabaş M. ve Bal E. " New Generation Thermal Barrier Coating Materials" Electronic Journal of Machine Technologies, 2015, 12 (1) 57-64

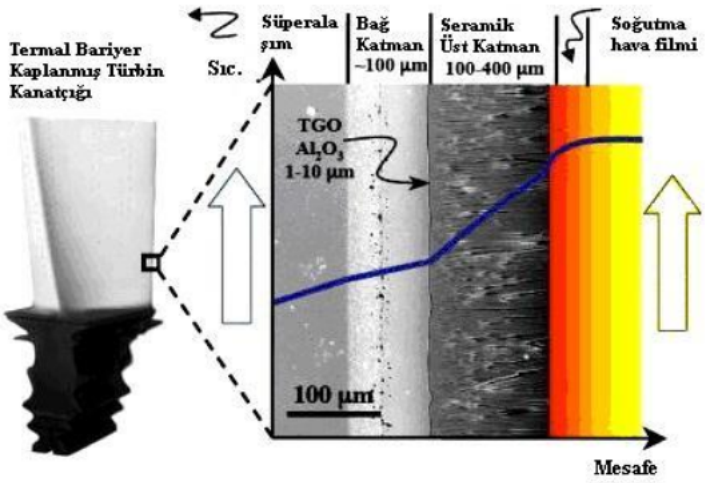
1. GİRİŞ

Günümüzde havacılık, deniz ve endüstriyel uygulamalarda kullanımı yaygın olan gaz türbini, yanma ile açığa çıkan ısı enerjisini mekanik enerjiye çevirmeye yarayan bir motor bileşeni olup kompresör, yanma odası ve türbin kanatlarından oluşmaktadır. Gaz türbinlerinin bir ucundan giren hava, kompresör tarafından basıncı artırıldıktan sonra yanma odasına aktarılır ve burada havanın içerisine yakıt püskürtülerek yakıtın yanması sağlanır. Yakıtın yanması sonucunda yüksek basınç ve sıcaklığa ulaşan gaz, türbin kanatlarına çarparak kanatları döndürür. Böylece uçakların ya da karasal güç jeneratör türbinlerinin çalışması için gerekli itki kuvveti elde edilmiş olur. Bu itki gücü sayesinde hava araçlarının hızı kontrol edilir [1].



Şekil 1. Gaz Türbininin Şematik Görünümü[2]

Uçak-uzay sanayinde gelişen teknoloji ile birlikte artan gereksinimlere bağlı olarak türbin kanatçıklarının tasarımı ve malzeme seçimi oldukça önemlidir. 1950'li yıllarda türbin kanatlarında dövme alaşımları olarak adlandırılan döküm sonrası mekanik yöntemlerle şekillendirilmiş malzemeler kullanılmıştır. 1960'lı yıllardan 1980'li yıllara kadar olan yirmi yıllık süreç içerisinde süper alaşımlar ve yönlü katılaştırılmış alaşımlar uygulamalarda tercih edilen malzemeler arasında yer almıştır. Ancak bu süreç içerisindeki farklı malzeme kullanımı, döküm teknolojisinin iyileştirilmesi ve gaz türbin motorlarında bulunan soğutma sistemlerinde gelişme gaz türbinlerinin kullanım sıcaklığını sadece 20˚C artırabilmiştir [1, 2]. 1980'li yıllardan itibaren gaz türbinlerinin çalışma sıcaklığını 100-200˚C artırabilen termal bariyer kaplama malzemeleri ve tek kristalli alaşımlar kullanılmaya başlanmıştır [2].



Şekil 2. Termal bariyer kaplamaların yapısı [2].

Gaz türbin motor bileşenlerinden biri olan türbin kanatlarının termal bariyer kaplama olarak adlandırılan seramik esaslı malzemeler ile kaplanabilmesi sonucunda türbin kanatlarının jet motorları, karasal güç

jeneratörleri ve gemi motorları gibi birçok alanda kullanılabilmesinin önü açılmıştır. Türbin kanatlarının yüksek basınç, yüksek sıcaklık ve oksidasyon gibi şiddetli çevresel etkilere maruz kalması nedeniyle kanatlarda meydana gelen oksidasyon ve korozyondan kaynaklanan bozulmalar termal bariyer kaplamalar sayesinde en aza indirilir.

Gaz türbinlerinin yüksek sıcaklığa ve basınca maruz kalan bölgelerine uygulanan termal bariyer kaplamalar düşük termal iletkenliğe sahip seramik malzemelerdir. Bu kaplamalar 100-400 µm kalınlığında olup metal yüzeyin üzerinde bir yalıtım katmanı olarak yer alır. Böylece düşük ısıl iletkenliğe sahip seramik malzemeler ile türbin kanatlarına çarpan yüksek sıcaklığa sahip gazın, türbin kanat ana malzemesini oluşturan metal yüzeyinin ısınmasını engeller [1,2].

Termal Bariyer Kaplamalar (TBK) genellikle metalik bağlanma katmanı ve seramik üst kaplama olmak üzere iki tabakadan oluşur. Bağlanma katmanı tipik olarak MCrAlY formunda olup Co, Fe ve Ni gibi metaller kullanılmaktadır [4]. Metalik altlık ile seramik üst kaplamanın arasındaki termal genleşme uyumsuzluğunu gidermek ve seramik üst kaplamanın yapışmasını iyileştirmek için bağlanma katmanı uygulanır [6].

Endüstride kullanılan termal bariyer kaplamaların çoğu Y_2O_3 (yttria) ile stabilize edilmiş ZrO_2 (YSZ) ' dan oluşmaktadır. YSZ düşük termal iletkenlik (2,12 W/m K ,1000 ˚C de) ve yüksek termal genleşme katsayısı ($11,5x10^{-6}$ / K, 30-1000 ˚C de),faz stabilitesi ve yüksek kırılma tokluğu ile TBK için oldukça kullanışlı gözükmektedir. Fakat 1200 ˚C ve daha yüksek yüzey sıcaklıklarının söz konusu olduğu servis şartlarında ZrO_2'de meydana gelen faz dönüşümlerinden kaynaklı hacim değişimleri ve bağ katman ile üst seramik katman arasında yüksek sıcaklık etkisi ile oluşan oksit tabakası (TGO) oluşumuna bağlı olarak YSZ kaplamalarda hasarlar meydana gelmektedir. Bunun için 1200 ˚C üzeri servis şartları için YSZ ye alternatif seramik esaslı yeni termal bariyer kaplama malzemelerin araştırılması ve üretilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

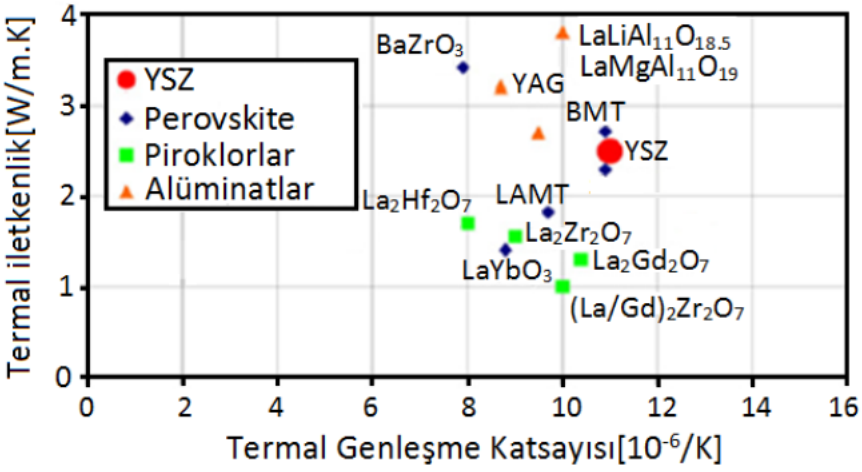
Tbk' lar için malzeme seçerken yüksek ergime noktası, oda sıcaklığı ile servis sıcaklığı arasında faz dönüşümü olmaması, düşük termal iletkenlik, kimyasal reaksiyona kolay girmeyen, metalik altlık malzeme ile termal genleşme katsayısı uyumu, altlık malzemeye iyi yapışma ve düşük sinterlenme oranı gibi özellikler göz önünde bulundurulmalıdır [10].

MgO, CaO, Y_2O_3 ve CeO_2 gibi bileşikler ile modifiye edilmiş Zirkonya üstün kimyasal, mekanik, termal ve elektriksel özellikleri ile öne çıkmaktadır. Yttria ile modifiye edilmiş zirkonya yüksek dayanım ve kırılma tokluğu ile en çok bilinen malzemelerden biridir. Ytterbia modifiye zirkonya ise yüksek üç nokta eğme dayanımı, yüksek sertlik ve kübik yapıdaki yüksek düzenlilik oranı gibi özelliklere sahiptir. Ce ile stabilize edilmiş zirkonya ise yüksek termal performans, korozyon dayanımı, yüksek sıcaklık faz stabilitesi ile öne çıkan TBK malzemeleri olmuşlardır.

Günümüze kadar yeni teknoloji termal bariyer kaplamalar ile ilgili yapılan çalışmalara bakıldığında YSZ'ya alternatif olarak Piroklorlar, Hegzaaluminatlar, Perovskitler, kompleks formda seramik esaslı bileşikler öne çıkmaktadır [9].

2. PİROKLOR SERAMİKLER

1300 ˚C' nin üzerindeki servis şartlarında $A_2B_2O_7$ yapısındaki zirkonat esaslı piroklorlar düşük termal iletkenlik, yüksek sıcaklık faz stabiliteleri özellikleri ile YSZ' ya alternatif TBK malzemeleri olarak öne çıkmaktadır [9].



Şekil 3.YSZ ve alternatif termal bariyer kaplamaların termal özellikleri [9].

TBK'larda en çok kullanılan piroklor bileşikleri $Ln_2Zr_2O_7$ (Ln: La,Gd,Sm,Nd,Eu), Hf esaslı ($La_2Hf_2O_7$ ve $Gd_2Hf_2O_7$) ve seryum esaslı $La_2Ce_2O_7$(LC) dir. Bu bileşikler arasında $La_2Zr_2O_7$ (LZ) düşük termal iletkenlik(1,56 W/m K) ve 2000 ˚C' ye kadar faz stabilitesi özellikleri ile en çok dikkat çeken piroklor yapısı olarak öne çıkmıştır. Fakat yapılan çalışmalarda LZ'ın termal genleşme katsayısının YSZ'ya göre daha düşük olduğu görülmüştür ($9x10^{-6}K^{-1}$). Taban malzeme ve bağ katman kaplamanın termal genleşme katsayısının LZ'a göre daha yüksek olması TBK'larda iç gerilmelere sebep olarak kaplamalarda çatlaklar oluşmasına sebep olarak kaplama ömürlerini oldukça azaltmaktadır [9].

Yüksek sıcaklık performansı ile öne çıkan bir diğer piroklor yapıdaki seramik ise $Gd_2Zr_2O_7$(GZ)'tır. Servis sıcaklığı 1300°C'nin üzerinde olan GZ, YSZ'den daha düşük termal iletkenliği (GZ: 1,6 ,YSZ: 2,2 $Wm^{-1}K^{-1}$), yüksek sıcaklıklardaki faz stabilitesi (~1400°C), CMAS'ın (Ca-Mg-Al-Si) yarattığı etkiye karşı mükemmel direnç göstermesi ve jet motoru yakıtlarının sebep olduğu yüksek sıcaklık korozyonuna karşı iyi dayanımı gibi özellikleri ile dikkat çeken piroklor seramiklerden biridir. Ancak GZ'nin termal genleşme katsayısının ($10,4x10^{-6}$/°C); YSZ ($11,0x10^{-6}$/°C)'den bir miktar düşük olması ve ısı etkisiyle büyüyen oksit katmanı (TGO) ile reaksiyona girmesi sonucu termal çevrim ömrü düşüktür.

Preslenmiş ve sinterlenmiş numuneler üzerinden yapılan analizlerde ise $Sm_2Zr_2O_7$, $Dy_2Zr_2O_7$, $Er_2Zr_2O_7$ ve $Yb_2Zr_2O_7$ gibi piroklor yapıda seramiklerin termal genleşme katsayılarının YSZ'ya oldukça yakın oldukları görülmektedir. Bu malzemelerin termal genleşme katsayılarının sıcaklığın artması ile arttığı ve 1200°C' de yaklaşık 11.2×10^{-6}/°C ile 10.7×10^{-6}/°C arasında değiştiği bildirilmiştir [19]. Bu seramiklerin termal iletkenlik değerleri incelendiğinde ise atom çapının büyümesi ile termal iletkenlik değerinin de arttığı bildirilmiştir. Plazma sprey ile üretilmiş $Sm_2Zr_2O_7$ termal bariyer kaplamaların termal iletkenlik değeri ise 8YSZ'dan oldukça düşük olduğu görülmüştür [18]. Fakat günümüze kadar bu malzemelerin termal bariyer kaplamalarının termal çevrim performans testleri ile ilgili bir çalışma ortaya konulamamıştır.

Atomlararası mesafe ve atomların belirli bağ mukavemetinden dolayı, latis yapısı kristalin termofiziksel özellikleri üzerinde oldukça etkilidir. Piroklor yapıdaki seramik malzemelerin termofiziksel özelliklerini geliştirmek amacıyla $A_2B_2O_7$ stokiometrisinde bulunan A ve B katyonlarının yerine molar olarak nadir toprak elementleri ile modifiye edilmesi de birçok çalışmaya konu olmuştur.

Lehmann ve çalışma grubu tarafından yapılan çalışmada LZ molar olarak %15 ve %30 miktarlarda Nd, Eu,Gd,Dy nadir toprak elementleri ile modifiye edilmiş ve preslenmiş ve sinterlenmiş numuneler üzerinden termal genleşme katsayısı ve termal iletkenlik ölçümleri alınmıştır. Termal genleşme katsayısı ölçümleri sonucunda 1000 C üzeri sıcaklıklarda modifiye edilmiş LZ' ın termal genleşme sayısı modifiye

edilmiş LZ'a gore düşük değerlerde çıkmıştır. En yüksek termal genleşme değerine ise Gd ile molar %30 oranında yapılan modifiye sonucunda elde edilmiştir. Molar olarak LZ' ın nadir toprak elementlerinden Dy ile %15 modifiye edilmesi sonucunda ise termal genleşme katsayısında dikkate değer bir değişim gözlemlenmemiştir. Termal iletkenlik ölçümleri sonucunda ise en düşük termal iletkenlik değerinin LZ'ın molar olarak %30 Gd ile modifiyesi sonucu ölçüldüğü görülmüştür[6].

GZ' ın Yb ile modifiyesi sonucu $(Gd_{1-x}Yb_x)_2Zr_2O_7(x = 0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7)$ bileşiminde seramikler üretilmiş ve termofiziksel özellikleri analiz edilmiştir. Yb_2O_3 ile takviye edilmiş GZ'ın termal iletkenlik değeri 1400 C'de 0.88–1.00 W/mK arasında bulunmuştur. Bu değer geleneksel GZ'tan %20 daha düşüktür. $(Gd_{0.9}Yb_{0.1})_2Zr_2O_7$ bileşimi en düşük termal iletkenlik değerine sahip olup Yb dopant miktarının artması ile termal iletkenlik değerinin artmakta olduğu görülmüştür. Bu seramiklerin termal genleşme katsayıları ise $11.8 \times 10^{-6}K^{-1}$-$13 \times 10^{-6}K^{-1}$ aralığında ölçülmüş olup bu değerin YSZ'dan yüksek olduğu bildirilmiştir [12].

Tablo 1. Bazı yeni nesil termal bariyer kaplama malzemelerinin termofiziksel ve mekanik özellikleri[3,9].

Malzeme	Erime Noktası (°C)	Termal Genleşme Katsayısı (30 °C-1000 °C, 10^{-6}/K	Termal İletkenlik(1000 °C, W/mK)	Elastisite Modülü(GPa)
YSZ	2680	11,5	2,12	210±10
Piroklor seramikler				
$La_2Zr_2O_7$	2300	9,1	1,56	175
$La_2Ce_2O_7$		12,3	3,42	
$Gd_2Zr_2O_7$	2570	10,4	1,6(800)	
$Sm_2Zr_2O_7$	2200	10,8	1,6(700)	
$Y_2Ti_2O_7$	2098	9,4	3.3	283
Hegza aluminatlar				
$LaMgAl_{11}O_{19}$		9,5	2,7	130±10
$GdMgAl_{11}O_{19}$		9,6	2,6	
$Gd_{0.7}Yb_{0.3}MgAl_{11}O_{19}$		9,6	1,9	
$LaLiAl_{11}O_{19}$		10	3,8	
Perovskit seramikler				
$BaZrO_3$	2690	7,9	3,42	181±10
$SrZrO_3$	2800	10,9	2,3	170±10
$CaZrO_3$	2550	8,4-8,9	2	
$Ba(Mg_{1/3}Ta_{2/3})O_3$	3100	10,9	2,71	186±2
$La(Al_{1/4}Mg_{1/2}Ta_{1/4})O_3$		9,7	1,82	174±2
$BaLa_2Ti_3O_{10}$		10-13	0,7(1200)	

Piroklor yapıdaki seramikler ile ilgili yapılan bir diğer çalışmada LZ'ın, $La_{1.7}Dy_{0.3}Zr_2O_7$, $La_2(Zr_{1.8}Ce_{0.2})_2O_7$,$La_{1.7}(DyNd)_{0.15}(Zr_{0.8}Ce_{0.2})_2O_7$ bileşiminde modifikasyonları üretilmiş ve termal iletkenlik ve termal genleşme katsayıları preslenmiş ve sinterlenmiş numuneler üzerinden karakterize edilmiştir. Piroklor yapıdaki LZ' de La^{3+} yerine nadir toprak elementlerinin yerleşmesi termal iletkenlik değerinin saf LZ ye göre oldukça düşürmüştür, Zr^{4+} yanına yapılan Ce katyonu ilavesi ise termal genleşme katsayısını oldukça uygun değerlere getirmiştir [14].

Xiang ve arkadaşlarının 2011 yılında yayınladığı bir çalışmada ise LZ, hem La katyonlarının hemde Zr katyonlarının yerinin nadir toprak elementleri ile modifiyesine konu olmuş ve $(La_{0.7}Yb_{0.3})_2(Zr_{0.7}Ce_{0.3})_2O_7$

and $(La_{0.2}Yb_{0.8})_2(Zr_{0.7}Ce_{0.3})_2O_7$ bileşiminde seramikler üretilmiştir. Termal genleşme katsayıları analizi sonucunda iki malzeme içinde LZ dan daha yüksek değerler ölçülmüştür. Termal iletkenilk değerleri ise LZ'den daha düşük olduğu bulunmuştur [15].

NASA laboratuvarlarında Bansan tarafından yapılan bir çalışmada ise $La_{1.7}Gd_{0.3}Zr_2O_7$, $La_{1.7}Yb_{0.3}Zr_2O_7$ and $La_{1.7}Gd_{0.15}Yb_{0.15}Zr_2O_7$ bileşiminde seramikleri sinterleme ile üretilmiş ve termal iletkenlik ölçümleri alınmıştır. Elde edilen sonuçlar neticesinde Gd_2O_3 ve Yb_2O_3 ile yapılan çift modifikasyon sonucu elde edilen ürünün en düşük termal iletkenlik değerlerine sahip olduğu bulunmuştur [16].

3. PEROVSKİT SERAMİKLER

ABO_3 kristal yapısına sahip olan perovskit seramikler yüksek sıcaklıklarda kararlı stabiliteleri ile termal bariyer kaplama malzemelerinin geliştirilmesi ile ilgili çalışmalara konu olmuştur. Perovskit yapısı A ve B noktalarına atomik kütlesi yüksek atomların yerleşmesi sonucu yüksek sıcaklıklarda düşük termal iletkenlik değerlerine sahip olmaktadır. Bu değerler daha önceki çalışmalarda 1000°C'de SrZrO3 için 2,1 $Wm^{-1}K^{-1}$, $BaZrO_3$ için ise 3.4 $Wm^{-1}K^{-1}$ bulunmuştur. Fakat bu iki malzeme için yapılan termal çevrim testleri kimyasal ve termal kararlılıklarının düşük olduğunu göstermiştir. 1200°C yüzey sıcaklığında yapılan termal çevrim testlerinde, ara sıcaklıklarda $SrZrO_3$ yapısında orthorombik-tetragonal faz dönüşümü meydana gelmekte ve bu faz dönüşü kaplamaların termal çevrim ömürleri üzerinde olumsuz etki yapmaktadır. Ayrıca tokluklarının ve termal şok dirençleri düşük olması bu malzemelerin termal çevrim ömürlerini düşürmektedir [9,17].

Bunun için $SrZrO_3$ yapısında bulunan Zr noktaları Yb ve Gd gibi dopantlar ile modifiye edilmiş ve söz konusu faz dönüşümleri engellenmeye çalışılmıştır. Yb ile yapılan modifiye sonucu 200 ile 1200°C arasındaki termal iletkenlik değerlerinde %20 lik bir düşüş olduğu tespit edilmiştir. Perovskit yapı seramiklerin başka elementler ile modifiyesi sonucu daha karmaşık yapıda perovskit seramikler üretilmiş ve termofiziksel özellikleri araştırılmıştır. $Ba(Mg_{1/3}Ta_{2/3})O_3$ (BMT) ve $La(Al_{1/4}Mg_{1/2}Ta_{1/4})O_3$ (LAMT) bu kompleks seramiklerden ikisidir. $Ba(Mg_{1/3}Ta_{2/3})O_3$ yaklaşık 3000°C' lik ergime sıcaklığı ve 1100°C'de 2.5 $Wm^{-1}K^{-1}$ termal iletkenlik değeri ile termal bariyer uygulamaları için oldukça uygun bir malzeme olarak görülmektedir. $La(Al_{1/4}Mg_{1/2}Ta_{1/4})O_3$ ise metallerle uyumlu termal genleşme katsayısı($11.9x10^{-6}K^{-1}$) ve yüksek sıcaklıklarda düşük termal iletkenlik(yaklaşık 2 $Wm^{-1}K^{-1}$) özellikleri ile termal bariyer kaplama malzemesi olarak kullanılabilir görülmektedir. Fakat bu malzemelerin plazma sprey ile uygulanması sırasında bazı problemler yaşanmaktadır. Yapıda bulunan Mg partiküller plazma içerisinden geçerken buharlaşmakta ve kaplamalarda stokiometrik olmayan bölgeler meydana gelmektedir. Bu durum plazma sprey işlemi sırasında partikül sıcaklığını düşürücü bazı optimizasyonlar ile azaltılabilmektedir [9,17].

4. HEKZA ALUMİNATLAR

Magnetolumbit yapısına sahip olan hekza aluminatlar yüksek ergime sıcaklığı, yüksek termal genleşme katsayısı, düşük termal iletkenlik, 1800 °C üzerinde yüksek sinterlenme direnci ve faz kararlılığı ile termal bariyer uygulamaları için oldukça uygun malzemeler olarak öne çıkmaktadır. $(La,Nd,Gd)MAl_{11}O_{19}$ komposizyonuna sahip hekza aluminatlarda M yerine Cr, Mn, Mg, Zn, Sm gibi elementler kullanılabilmektedir.

$LaMgAl_{11}O_{19}$(LaMA) termofiziksel özellikleri ve zirkonya tabanlı kaplama malzemelerine göre yüksek sinterlenme direnci ile yeni nesil termal bariyer kaplama malzemesi araştırmalarına konu olmuştur. Fakat plazma sprey işlemi ile püskürtülmesi bazı problemlere neden olmaktadır. LaMA plazma içerisinden geçerken dekompozisyona uğramakta ve kaplama içerisinde bazı bölgelerde Al_2O_3 ve amorf yapıların oluşmasına neden olmaktadır. LaMA kaplamalar için 1600 °C de termal iletkenlik değeri 1.9 $Wm^{-1}K^{-1}$,

termal genleşme katsayısı ile yaklaşık $9.6x10^{-6}K^{-1}$ olarak ölçülmüştür. LaMA yapısında Mg nin Mn ile yer değiştirmesi sonucunda termal iletkenlik değeri 1600 °C de 1.4 $Wm^{-1}K^{-1}$ olarak ölçülmüştür. Hekza aluminatlar için tasarlanan diğer bileşimler ise $GdMgAl_{11}O_{19}$, SmMgAl11O19, and $Gd_{0.7}$-$Yb_{0.3}MgAl_{11}O_{19}$ bileşimleri olmuştur. Preslenmiş ve sinterlenmiş numuneler üzerinden yapılan ölçümlerde Yb ile modifiye edilmiş bileşimin daha düşük termal iletkenlik değerine sahip olduğu belirlenirken termal genleşme katsayılarının birbirine yakın olduğu görülmüştür [13].

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüze kadar yüksek sıcaklık uygulamaları için YSZ yerine kullanılabilecek birçok malzeme araştırmalara konu olmuştur. 1200°C üzeri yüksek sıcaklık uygulamaları için kullanılacak malzemelerin uzun termal çevrim ömrü, düşük oksijen geçirgenliği, düşük termal iletkenlik ve metalik malzemeler ile uyumlu termal genleşme katsayısı gibi özelliklere sahip olması büyük önem taşımaktadır. Ayrıca bu malzemelerin termal bariyer kaplamaların üretiminde kullanılan plazma spray ve EB-PVD gibi işlemler sırasında faz kararlılığını ve kompozisyonunu koruması kritik parametrelerden birisidir.

6. KAYNAKLAR

1. J. L. XU , K. A. KHOR, Plasma spraying for thermal barrier coatings: processes and applications, Thermal barrier coatings, Part 2, Woodhead Publishing Limited (2011).
2. Coatings For Turbine Blades ,http://www.msm.cam.ac.uk/phase trans/2003/Superalloys/coatings/index.html, (2013).
3. W. Ma and H. Dong, Ceramic thermal barrier coating materials, Thermal barrier coatings, Part 1, Woodhead Publishing Limited (2011).
4. Peters, M., Leyens, C., Schulz, U ve Kaysser, W.A., EB-PVD thermal barrier coatings for aeroengines and gas turbines, Advanced Engineering Materials, Volume 3, Issue 4, pages 193–204, (2001).
5. H. Guo, Y. Wang, L. Wang, and S. Gong , Thermo-Physical Properties and Thermal Shock Resistance of Segmented $La_2Ce_2O_7$/YSZ Thermal Barrier Coatings, , J. Therm. Spray tech. , 18 (2009).
6. H. Lehmann, D. Pitzer, G. Pracht, R. Vassen,*, D. Stöver , Thermal Conductivity and Thermal Expansion Coefficients of the Lanthanum Rare-Earth-Element Zirconate System, , *J. Am. Ceram. Soc.,* 86 , 1338–44 (2003).
7. H. Zhou, D. Yi, Z. Yu, L. Xiao , Preparation and thermophysical properties of CeO_2 doped $La_2Zr_2O_7$ ceramic for thermal barrier coatings, ,Journal of Alloys and Compounds 438 217–221(2007).
8. D. Zhu, D.S. Fox, N. P. Bansal, and R. A. Miller, Advanced Oxide Material Systems for 1650 °C Thermal/Environmental Barrier Coating Applications, NASA/TM, 213-219 (2004).
9. R. Vaßen , M. O. Jarligo, T. Steinke, D. E. Mack, D. Stöver , Overview on advanced thermal barrier coatings, , Surface & Coatings Technology 205 ,938–942, (2010).
10. X.Q. Cao, R. Vassen, D. Stoever , Ceramic materials for thermal barrier coatings, , Journal of the European Ceramic Societyi 24, 1–10, (2004).
11. D. Stöver, G. Pracht, H. Lehmann, M. Dietrich, J-E. Döring, and R. Vaßen, New Material Concepts for the Next Generation of Plasma-Sprayed Thermal Barrier Coatings, , JTTEE5 13:76-83 (2003)

12. Lei Guo, Hongbo Guo, Hui Peng, Shengkai Gong, Thermophysical properties of Yb_2O_3doped $Gd_2Zr_2O_7$ and thermal cycling durability of $(Gd_{0.9}Yb_{0.1})_2Zr_2O_7$/YSZ thermal barrier coatings, Journal of the European Ceramic Society 34 ,1255–1263, (2014) .
13. Narottam P. Bansal , Dongming Zhu, Thermal properties of oxides with magnetoplumbite structure for advanced thermal barrier coatings, Surface & Coatings Technology 202, 2698–2703, (2008).
14. ZHOU Hongming , YI Danqing, Effect of rare earth doping on thermo-physical properties of lanthanum zirconate ceramic for thermal barrier coatings, JOURNAL OF RARE EARTHS, Vol. 26, No. 6, Dec., p. 770, (2008).
15. Jianying Xiang, Shuhai Chen, Jihua Huang , Hua Zhang, Xingke Zhao, Phase structure and thermophysical properties of co-doped $La_2Zr_2O_7$ ceramics for thermal barrier coatings, Ceramics International 38 ,3607–3612, (2012).
16. Narottam P. Bansal , Dongming Zhub, Effects of doping on thermal conductivity of pyrochlore oxides for advanced thermal barrier coatings, Materials Science and Engineering A 459 ,192–195, (2007).
17. W. Ma, M.O. Jarligo, D.E. Mack, D. Pitzer, J. Malzbender, R. Vaßen, and D. Stover, New Generation Perovskite Thermal Barrier Coating Materials, JTTEE5 17:831–837, (2008).
18. Jianhua Yu, Huayu Zhao, Shunyan Tao, Xiaming Zhou, Chuanxian Ding, Thermal conductivity of plasma sprayed $Sm_2Zr_2O_7$ coatings, Journal of the European Ceramic Society, 30, 799–804, (2010).
19. Yexia Qin, Jingdong Wang, Wei Pan, Chunlei Wan and Zhixue Qu, Low Thermal Conductivity Ceramics for Thermal Barrier Coatings, Key Engineering Materials Vols. 336-338 pp, 1764-1766, (2007).