



Erciyes University Journal of the Institute of Science and Technology
Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

ISSN 1012-2354

Cilt (Volume): 28, Sayı (Issue): 2, Mart/March-2012

<http://fbe.erciyes.edu.tr/>



Mukayese metodu kullanılarak termal bariyer kaplamanın ısı iletim katsayısının deneysel olarak tayin edilmesi

Özge ALTUN^{*1}, Y. Erhan BÖKE²

¹Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, 26050, ESKİŞEHİR

²İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 34437 Gümüşsuyu, İSTANBUL

ÖZET

Termal Bariyer Kaplamalar (TBK) gaz türbinlerinin sıcak kısım parçalarında, malzemelerin yüksek sıcaklık etkilerinden korunması ve gaz türbininin veriminin artırılması amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Teknolojik gelişmelere paralel olarak gaz türbinlerinin çalışma sıcaklıkları giderek artmakta, buna bağlı olarak gaz türbinlerinde kullanılan TBK'ların ısıl ve mekanik dayanımlarının artırılması gerekmektedir. Isı iletim katsayısı, TBK'ların ısıl dayanımları açısından en önemli faktörlerden biridir. Bu çalışmada, atmosferik plazma sprey yöntemiyle gerçekleştirilmiş TBK'nın ısı iletim katsayısı mukayese metodu kullanılarak deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel olarak üç farklı gözeneklilik oranına sahip TBK için ölçüm yapılmıştır. Referans malzemesi olarak 321 paslanmaz çelik kullanılmış olup, referans malzemesinin sıcaklığa bağlı ısı iletim katsayısı ise Lazer-Flaş ölçüm metodu ile elde edilmiştir. Ölçümler oda sıcaklığı ile 600 °C arasında yapılmış, elde edilen sonuçlar literatür sonuçları ile kıyaslanmıştır.

Anahtar Kelimeler:

Isı iletim katsayısı,
Mukayese metodu,
Termal bariyer
kaplama

Determining the thermal conductivity of thermal barrier coatings experimentally by comparative method

ABSTRACT

Thermal Barrier Coatings (TBCs) are widely used in gas turbine hot section components to prevent parts from high temperature effects and increase the efficiency. Gas turbine operating temperatures are getting increase in parallel with the technological developments. Based on this, it is required to higher the thermal and mechanical resistance of thermal barrier coatings (TBCs) used in gas turbines. Thermal conductivity is one of factor for increasing the thermal resistance of TBCs. . In this study, thermal conductivity of TBC applied by Atmospheric Plasma Spray has been investigated experimentally by comparative method. Measurements have been carried out for TBC which have three different porosity. 321 stainless steel has been used for reference material, and the thermal conductivity of reference material depending on the temperature has been obtained by laser flash method. Measurements have been performed up to 600 °C and compared to results found in literature.

Keywords:

Thermal conductivity,
Comparative method,
Thermal Barrier
Coatings

* Sorumlu yazar (Corresponding author) e-posta: okutlu@ogu.edu.tr

1. Giriş

Teknolojik gelişmeler, tasarlanan parçaların işletim şartlarına dayanabilmesine bağlı olarak ilerleyebilmektedir. Özellikle havacılık, uzay, ve enerji alanındaki gelişmelerde en önemli faktörlerden biri yüksek sıcaklıklardır ve gaz türbin verimi çalışma sıcaklığı ile sınırlanmaktadır [1]. Bu nedenle ani sıcaklık değişimlerine ve yüksek sıcaklığa maruz kalan metallere, ısı iletkenlik değerleri oldukça düşük olan seramik malzemelerle kaplanması yöntemi olan TBK havacılık, uzay ve enerji santralleri alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Böylece seramik kaplama, kaplanan malzemenin yüzey sıcaklığını azaltmakta, sıcaklık artışlarından malzemenin etkilenmesini önlemekte ve ısı şok yüklerini azaltmaktadır.

TBK'ların yüksek sıcaklık dayanımları ve uzun çalışma ömürleri nedeniyle termofiziksel özelliklerinin, özellikle de ısı iletim katsayılarının bilinmesi gerekmektedir. Isı iletim katsayılarının belirlenmesinde çoğunlukla kullanılan metot lazer flaş [2] metodudur. Lazer flaş metodunun diğer metotlara göre avantajı yüksek sıcaklıklara kolaylıkla çıkılabilme, kısa sürede ölçüm sonucu alınabilme ve küçük boyutlarda numune kullanılabilmesidir. Fakat lazer flaş metodu ile ısı yayılım katsayısı ölçülmesi nedeniyle katmanlı yapıya sahip numunelerle çalışırken her bir katmanın kalınlığının, genleşme katsayısının, özgül ısı değerinin doğru olarak tespit edilmesi gerekmektedir. Bu değerlerdeki hata ölçüm sonuçlarını büyük oranda etkilemektedir. Bu nedenle farklı ölçüm yöntemleri üzerinde de çalışmalar yapılmaktadır.

Curry ve ark. [3] sprej tabancasında modifikasyonlar yaparak elde ettikleri atmosferik plazma sprej (APS) kaplamanın ısı iletim katsayısını lazer flaş metodu ile ölçmüşlerdir. Yapılan değişiklikler ile gözeneklilik oranının etkilendiğini buna bağlı olarak ısı iletim katsayısının düştüğünü gözlemlemişlerdir.

Slifka ve ark. [4] APS yöntemiyle 3 farklı kalınlıkta yapılmış %8 yitriya takviyeli zirkonya (8YSZ) TBK'nın, ısı iletim katsayısını muhafazalı kızgın levha metoduyla ölçmüşlerdir. Ölçüm sonuçlarında ısı iletkenliğin sıcaklık ve kaplama kalınlığı ile az miktarda değiştiğini görmüşlerdir.

An ve Han [5] plazma sprej yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiş 8YSZ kaplamanın ısı iletim katsayısını deneysel olarak elde etmişlerdir. Çalışmada silindiriksel bir numunenin dış yüzeyini yüksek sıcaklığa maruz bırakmışlar, içteki metal ana malzemeyi ise zorlanmış taşınım soğutmuşlardır. Silindir içinden geçen soğutucu akışkan olarak hava

kullanılmış ve ısı direnç kavramından yararlanılarak kaplamanın ısı iletim katsayısı hesaplanmıştır. Literatürdeki standart ölçüm metotları ile elde edilen değerlere göre oldukça düşük (0.1 – 0.2 W/mK) değerler elde etmişlerdir.

TBK'ların tasarımında kaplamanın ısı iletim katsayısı kadar kaplamayı oluşturan bileşenlerin ısı iletim katsayısı ve bu bileşenler arasındaki temas direnci hakkında da bilgiye sahip olunmalıdır. Yitriya ve kalsiya takviyeli zirkonya kaplamanın sprej parametrelerinin özellikle de sprejleme mesafesinin ısı yayılım katsayısına etkisi Pawlowski ve ark.[6,7] tarafından incelenmiş ve 0.002 – 0.005 cm²/s arasında değiştiği görülmüştür. Gitzhofer ve ark. [8] TBK'ların ısı iletim katsayısının belirlenmesinde önemli bir parametre olan ısı temas direncini incelemişlerdir. Brandt ve ark. [9] plazma sprej zirkonya (%7, %8, %20 yitriya takviyeli), NiAl, NiCr, NiCrAl, NiCrAlY ve NiCoCrAlY kaplamalarında, lazer flaş yöntemi ile ölçülen ısı yayılım katsayısından ısı iletim katsayısını hesaplayabilmek amacıyla gerekli özgül ısı değerlerini 26°C ile 726°C arasında ölçmüşlerdir.

Bu çalışmada, sürekli rejim ölçüm yöntemlerinden biri olan mukayese metodu ile gözeneklilik oranı %13, %14 ve %16 olan APS kaplamanın ısı iletim katsayısı incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, literatür sonuçları ile kıyaslanmıştır.

2. Gereç ve yöntem

Mukayese metodu [10,11] ile ölçümleri yapmak için hazırlanan referans malzemesinin ısı iletim katsayısı lazer flaş metodu ile ölçülmüştür. Deneyselerde kullanılmak üzere silindir şeklindeki 321 paslanmaz çelik bir çubuktan 12.7 mm çapında ve ortalama 4 mm kalınlığında numuneler hazırlanmıştır. Ölçüm işlemlerinin daha hassas yapılması için çubuk malzemeden tornalama işlemi ile düzgün bir şekilde kesilen numunelerin yüzeyleri düzleştirilmiştir. Bu numunelerin lazer flaş yönteminden elde edilen difüzyon ve Denklem 1'den hesaplanan ısı iletim katsayısı değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Lazer flaş metodunda üç numunenin ısı iletim katsayısı aynı anda ölçülmüştür. Bu işlem esnasında aynı özelliklere sahip üç numune kullanılmasının amacı, deneysel hataların en az seviyeye indirilmesidir. Tablo 1 elde edilen değerlerin ortalaması alınarak oluşturulmuştur.

$$k = \alpha \cdot \rho \cdot C_p \quad (1)$$

Burada α difüzyon hızı, ρ yoğunluk, C_p özgül ısı değerleridir.

Tablo1. Lazer Flaş Yönteminden Elde Edilen Sonuçlar

Sıcaklık (°C)	Difüzivite (mm ² /s)	Yoğunluk (g/cm ³)	C _p (J/g.K)	k (W/mK)
23	3.536	7.970	0.5	14.091
100	3.784	7.970	0.5	15.079
200	4.029	7.970	0.5	16.056
300	4.252	7.970	0.5	16.944
400	4.415	7.970	0.5	17.594
500	4.595	7.970	0.5	18.311
600	4.753	7.970	0.5	18.941

Mukayese yönteminde kullanılmak üzere hazırlanan numuneler, 321 paslanmaz çelik üzerine % 8 yitriya takviyeli zirkonyum oksit (8YSZ) esaslı kaplamadan oluşmaktadır. Kaplama işleminden önce, hazırlanan 113 mm çapında ve disk şeklindeki paslanmaz çelik numunelerin yüzeyleri pürüzsüz hale getirilmiş ve kalınlıkları ölçülmüştür. Kaplama sonrasında ölçülen

toplam kalınlıktan, ana malzemenin kalınlığı çıkarılarak kaplamanın kalınlığı hesaplanmıştır. Kaplama işlemlerinde TBK'nın gözeneklilik oranının değiştirilmesi amacı ile atılma mesafesi tüm numunelerde farklı tutulmuştur. Tablo 2'de ana malzeme olarak kullanılan çelik disklerin kalınlığı ile kaplamanın atılma mesafeleri gösterilmiştir.

Tablo 2. Deney numunelerine ait parametreler

Numune No	Ana Malzeme Kalınlığı (mm)	Atılma Mesafesi (mm)
1	9.910	177.8
2	9.960	152.4
3	9.830	127.0

Ana malzemeler, kaplama işlemi öncesinde yüzeyindeki nemden arındırılması amacıyla 250°C'nin altındaki fırında bir saat süresince ısıtılma tabi tutulmuştur. Bu şekilde yapılan ısıtılma işlemi, çeliğin mikro yapısında

herhangi bir değişiklik meydana getirmemekte olup, ısıtılma katsayısını değiştirmemektedir. Şekil 1'de hazırlanmış olan numunelere ait resimler gösterilmiştir.



Şekil 1. Mukayese yöntemiyle ölçüm yapmak için hazırlanmış numuneler.

Deney Seti

Mukayese metodunda numunenin ısı iletim katsayısı, ısı iletim katsayısı bilinen referans bir cisim kullanılarak tayin edilmektedir. Numune ve referans cisim, ısı kaynağı ve ısı çukuru arasına yerleştirilerek sıcaklık farkı oluşturulmaktadır. Çevreye karşı ısı yalıtımı sağlanmış bu sistemde, numune ve referans cisimden geçen ısı enerjisi miktarı aynı olmaktadır. Numune ve referans cismin, alt ve üst yüzey sıcaklıkları ölçülerek ve referans cismin ısı iletim katsayısından yararlanılarak, iletilen ısı enerjisi miktarı tespit edilmektedir. Bu şekilde belirlenen ısı enerjisi miktarı kullanılarak numunenin ısı iletim katsayısı tayin edilmiş olur. Bu prensibe göre oluşturulmuş deney sistemi Şekil 2’de gösterilmiştir. Deney sistemi, yağ haznesi, ölçme düzeneği, referans sıcaklık malzemesi, sıcaklık ölçer, voltaj regülatörü ve ampermetre gibi elemanlardan oluşmaktadır.[12].

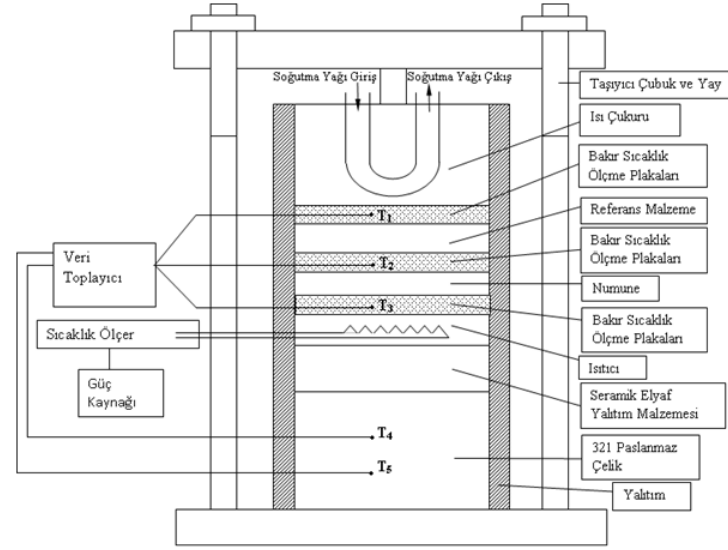


Şekil 2. Mukayese yöntemiyle ölçüm yapılan deney sistemi.

Numune, referans cisim ve deney sistemindeki tüm elemanlar 100 cm^2 alanında olup, silindirik yapıdadır. Deney sisteminin en üstünde yağ deposuna bağlı ve pompa yardımıyla termal yağ dolaşımı sağlanan bir ısı çukuru bulunmaktadır. Isı kaynağı olarak bir elektrikli direnç kullanılmıştır. Numune, referans cisim ve sıcaklık ölçme plakaları, ısı çukuru ve ısı kaynağı arasına yerleştirilmiştir. Numune ile referans cismin alt ve üst yüzey sıcaklıkları, merkezine termoeleman yerleştirilmiş 1 cm kalınlığında disk şeklindeki bakır plakalar kullanılarak ölçülmüştür. Deney setine ait şematik gösterim Şekil 3’te verilmiştir.

Deney sisteminde sıcaklık ölçme plakaları, yüksek ısı iletim katsayısı nedeniyle bakır malzemeden yapılmıştır. Deney düzeneğinde ısı kaynağından ısı çukuruna doğru sırasıyla sıcaklık ölçme plakası, numune, sıcaklık ölçme plakası, referans cisim ve

sıcaklık ölçme plakası yerleştirilmiştir. Bu düzenlemeye göre ısı geçişi aşağıdan yukarıya doğru aksel yönde oluşturulmuştur. Isı kaynağının altına, aksel yönde ısı kaybını engellemek amacıyla 15 cm kalınlığında seramik elyaf yalıtım malzemesi yerleştirilmiştir. Isı yalıtım tabakasının altında ise 15 cm yüksekliğinde 321 paslanmaz çelikten yapılmış silindirik bir blok bulunmaktadır. Bu silindirik blok ısıtıcı elemanın altındaki yalıtım malzemesinden aksel yönde kaybolan ısı enerjisini tespit edebilmek amacıyla kullanılmış ve bloğun ekseninde, iki farklı yükseklikte termoeleman ile sıcaklık değerleri ölçülmüştür.



Şekil 3. Mukayese yöntemiyle ölçüm yapılan deney setinin şematik gösterimi

Deneysel esnasında, ısı kaynağı olan elektrik direncine, bir voltaj regülatörü kullanılarak gerilim farkı uygulanmıştır. Elektrik direncine verilen gerilim farkı ve akım şiddeti ölçülmüştür. Gerilim farkı değiştirilerek ısı kaynağının sıcaklığı kontrol edilmiş, böylece farklı ortalama sıcaklıklarda numunenin ısı iletim katsayısının tayini sağlanmıştır. Isı çukuru olarak kullanılan yağ banyosu başka bir kaynaktan ısıtılmamış ya da soğutulmamıştır. Numune ve referans cisimden oluşan ölçme düzeneğinden geçen ısı yağ sıcaklığını artırmıştır. Ölçme noktalarındaki sıcaklıkların ve yağ banyosu sıcaklığının kararlı olduğu şart sağlandığında deney tamamlanmış ve ölçme büyüklükleri kaydedilmiştir. Ölçülen sıcaklıklar, referans cismin kalınlığı ile ısı iletim katsayısı ve numune kalınlığı kullanılarak, TBK’nın ısı iletim katsayısı hesap yoluyla tayin edilmiştir.

3. Bulgular

Mukayese metodundanelde edilen sıcaklık değerlerinden yararlanarak ısı iletim katsayısının hesaplanması için Fourier yasası ve ısı dirençlerin seri düzenlenme halindeki eşitlikleri kullanılmıştır. Numune ve referans cisimden radyal yönde ısı geçişinin olmadığı kabulü ile numuneden geçen ısı miktarı referans malzemesinden geçen ısı miktarına eşittir ve

$$Q_{numune} = Q_{ref} \quad (6)$$

şeklinde yazılabilir. Fourier yasasından yararlanarak Denklem (6) aşağıdaki gibi ifade edilebilir,

$$\frac{k_{numune}}{d_{numune}} A(T_2 - T_3) = \frac{k_{ref}}{d_{ref}} A(T_1 - T_2) \quad (7)$$

Alt yüzeyi çelik, üst yüzeyi ise TBK'dan oluşan numunenin ısı iletim katsayısı k_{numune} Denklem (7)'den hesaplanmıştır. Burada T_1 referans malzemesinin üst yüzey sıcaklığı, T_2 referans malzemesinin alt ve numunenin üst yüzey sıcaklığı, T_3 numunenin alt yüzey sıcaklığıdır.

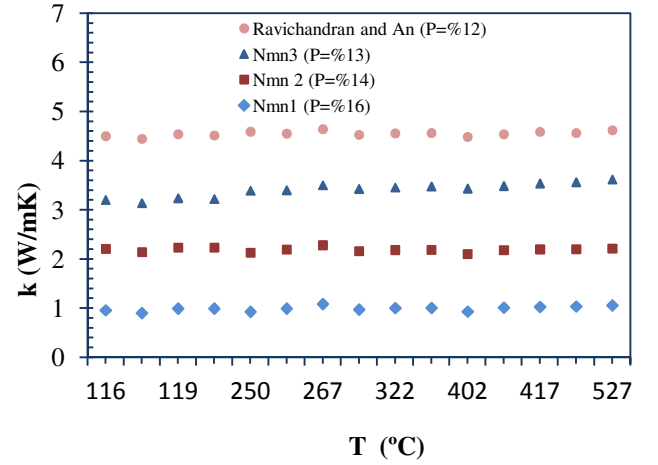
Isı iletim katsayısı ölçülen numunelerin gözenek oranını ve kalınlığını hassas bir şekilde belirlemek için Leica Image Analyzer donanım / yazılım sistemi kullanılmıştır. Analiz sonucunda elde edilen kaplama kalınlıkları ve gözeneklilik oranları Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Numunelere ait kaplama kalınlıkları ve gözeneklilik oranları

Numune No	Kaplama Kalınlığı (mm)	Gözeneklilik Oranı
1	0.530	%16
2	0.550	%14
3	0.545	%13

% 8 YSZ APS kaplamanın ısı iletim katsayısını ölçmek için mukayese metodu kullanılarak tasarlanan deney sisteminde referans malzemesi olarak, ısı iletim katsayısının sıcaklığa göre değişimi lazer flaş yöntemi ile belirlenen, aynı zamanda da ana malzeme olarak kullanılan 321 paslanmaz çelik seçilmiştir. Ayrıca ısı iletim katsayısı tayin edilecek numuneler, 321 paslanmaz çelik üzerine TBK olmak üzere iki tabakadan oluşmaktadır. Mukayese yöntemi ile elde

edilen efektif ısı iletim katsayısı değerlerinin sıcaklığa göre değişimi Şekil 4'de verilmiştir.



Şekil 4. Mukayese yöntemi ile elde edilen deneysel sonuçlar.

Farklı gözeneklilik oranları için mukayese yöntemi ile elde edilen deneysel sonuçlar, literatürden [13] elde edilen deneysel sonuçlar ile kıyaslandığında elde edilen sonuçların literatür ile uyumlu olduğu görülmüştür. Literatürden elde edilen sonuçlar %12 gözeneklilik oranına sahip APS kaplama için elde edilen sonuçlardır. Gözeneklilik oranı malzemenin kaplanmasından sonra belirlendiği için deneysel çalışmada literatüre en yakın gözeneklilik oranı olarak %13 gözenekliliğe sahip numune elde edilebilmiştir.

4. Tartışma ve sonuç

Bu çalışmada atmosferik plazma sprey yöntemiyle gerçekleştirilmiş %8 yitriya takviyeli zirkonya kaplamanın ısı iletim katsayısı, farklı gözeneklilik oranları için mukayese metodu referans alınarak kurulan deney sistemi ile ölçülmüştür. Yapılan deneyler sonucunda, kaplamanın atılma mesafesi arttıkça gözeneklilik oranının arttığı, buna bağlı olarak ta ısı iletim katsayısının düştüğü gözlemlenmiştir. Daha yüksek gözeneklilik oranı elde edebilmek için kaplamanın atılma mesafesinin artırılması uygulama açısından kolay ve ek maliyet getirmeyen bir çözüm sunmaktadır. TBK'nın zorlu çalışma koşullarında sadece düşük ısı iletkenliğinin yeterli olmadığı da göz önüne alınmalıdır. Gözeneklilik oranının yüksek olması, ısı iletkenlik açısından istenen bir özellik olmasına rağmen malzeme dayanımını azaltmaktadır. Yüksek gözeneklilik oranı nedeniyle kaplama daha kırılğan bir hal almaktadır. Bu nedenle gözeneklilik ve dayanım arasında optimum bir değer ilişkisi

sağlanmalıdır. Ayrıca deneysel çalışmalar kapsamında gerek literatür araştırmalarından, gerekse de deneysel çalışmalardan elde edilen tecrübelerle dayanarak, TBK'ların ısı iletim katsayısının doğru olarak tayin edilebilmesinin zor bir işlem olduğu belirlenmiştir. Bunun en büyük nedenlerinden biri kaplamanın çok ince olmasıdır. TBK'ların pratikte kullanılan kalınlık değerleri yaklaşık olarak 0.2 mm mertebelerindedir. Bu çalışmada ise ince katmandaki ölçüm işleminin zor olması nedeniyle kaplamanın üniform yapısını ve özelliklerini bozmadan kaplama kalınlıkları 0.55 mm mertebelerine artırılmıştır. Kaplama kalınlığının artırılması, kaplama boyunca meydana gelen sıcaklık farkının daha büyük olması sebebiyle, ölçüm kolaylığı sağlamakta, deneysel hataları azaltmakta ve ısı iletim katsayısının daha doğru tayin edilmesini sağlamaktadır. Kaplama kalınlığının 0.55 mm'den daha kalın yapılması durumunda, kaplamanın metal yüzeye yapışmasında zorluklar ve ölçüm amacıyla yüksek sıcaklıklara ısıtma işlemleri esnasında metal yüzeyinden kalkmalar meydana geldiği tespit edilmiştir.

Kaynaklar

1. Boyce M.P., 2001, Gas Turbine Engineering Handbook, Gulf Professional Publishing, 816 pp.
2. ASTM E1461, 2002, Standard Test Method for Thermal Diffusivity by the Flash Method, ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 13 p.
3. Curry N., Markocsan N., Li X.H., Tricoire A., Dorfman M., 2011, Next Generation Thermal Barrier Coatings for the Gas Turbine Industry, Journal of Thermal Spray Technology, vol 20(1-2), 108-115
4. Slifka, A.J., Filla, B.J., Phelps, J.M., Bancke, G., and Berndt C.C., 1997, Thermal Conductivity of a Zirconia Thermal Barrier Coating, Journal of Thermal Spray Technology, 7(1), 43-46.
5. An, K., Han, M.K., 2006, An Experimental Technique to Evaluate The Effective Thermal Conductivity of Y₂O₃ Stabilized ZrO₂ Coatings, Mater. Sci., 41, 2113- 2120.
6. Pawlowski, L., Lombard, D., Mahlia, A., Martin, C., Fauchais, P., 1984, Thermal Diffusivity of Arc Plasma Sprayed Zirconia Coatings, High Temperatures-High Pressures, 16, 347-359.
7. Pawlowski, L., Lombard, D., Tourenne, F., Kassabji, F., Fauchais, P., 1985, Thermal Diffusivity of Plasma Sprayed NiAl, NiCr, NiCrAl, NiCrAlY, and NiCoCrAlY Coatings, High Temperatures-High Pressures, 17, 611-625.
8. Gitzhofer, F., Pawlowski, L., Lombard, D., Martin, C., Kaczmarek, R., and Boulos, M., 1985, The apparent thermal diffusivity and thermal contact resistance in plasma sprayed coatings, High Temperatures -High Pressures, 17, 563-573.
9. Brandt, R., Pawlowski, L., Neuer, G., Fauchais, P., 1986, Specific Heat and Thermal Conductivity of Plasma Sprayed Yttria-Stabilized Zirconia and NiAl, NiCr, NiCrAl, NiCrAlY, NiCoCrAlY Coatings, High Temperatures -High Pressures, 18, 65-77.
10. ASTM E1225, 2004, Standard Test Method for Thermal Conductivity of Solids by Means of the Guarded-Comparative-Longitudinal Heat Flow Technique, ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 8 p.
11. TSE EN 674, 1998, Cam - Yapılarda Kullanılan - Isıl Geçirgenlik (U Değeri) Tayini Mahfazalı Sıcak Levha Metodu, Türk Standartları Enstitüsü, 7s.
12. Altun O., 2007, Isıl Engelleyici Kaplamalarda Isı İletim Katsayısının Değişimi, Doktora Tezi, ESOGÜ, Fen Bilimleri, Eskişehir, 150p.
13. Ravichandran, K.S., An, K., Dutton, R.E., Semiatin, S.L., 1999, Thermal Conductivity of Plasma-Sprayed Monolithic and Multilayer Coatings of Alumina and Yttria-Stabilized Zirconia, Journal of the American Ceramic Society, 82(3), 673-682