

KATMANLI ve FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ MALZEMELERDEN YAPILMIŞ TERMAL BARIYER KAPLAMALARINDAKİ TERMAL GERİLİMLERİN SONLU ELEMANLAR METODU İLE HESAPLANMASI

Kutay DİMİTOKA

Fem Takım Yöneticisi HAVELSAN A.Ş.

Bora YILDIRIM

Y. Doç. Dr. Makina Mühendisliği Bölümü Osmangazi Üniversitesi

Termal bariyer kaplamaları malzemenin çalışma sıcaklığını yükselterek sistemin verimini arttırmak amacı ile kullanılır. Genelde metal alt tabakanın üzerine homojen seramik kaplama şeklinde uygulanmaktadır. Bu tür kaplamalarda çalışma esnasında görülen en önemli problem, metal alt tabaka ile seramik kaplamanın termal genişleme sabitlerinin farklı olması nedeniyle ortaya çıkan büyük termal gerilmelerdir. Bu gerilmeler sonucunda sistemde çatlaklar ve metal/seramik ara yüzünde ayrılmalar görülmektedir. Söz konusu çatlakları ve ayrılmaları önlemek için fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerden yapılmış kaplamalar geliştirilmiştir. Bu tür kaplamalarda malzeme özellikleri kaplama kalınlığı boyunca fonksiyonel olarak değiştirilmekte ve bu sayede kaplama ile alt tabaka arasındaki uyumsuzluk ve termal gerilmeler en düşük dereceye indirilebilmektedir. Bu çalışmada nikel alaşımlı Rene-41 alt tabakasından ve Zirkonya/Rene-41 karışımı, katmanlı ve fonksiyonel derecelendirilmiş termal bariyer kaplamalarından oluşan silindir şeklindeki numunelerdeki termal gerilmeler, özel olarak geliştirilmiş sonlu elemanlar metodu kullanılarak hesaplanmış ve fonksiyonel derecelendirilmiş kaplamanın katmanlı kaplamalara göre daha güvenilir olduğu gösterilmiştir.

Anahtar sözcükler : *Termal bariyer kaplamaları, fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler, sonlu elemanlar.*

Thermal barrier coatings are used for increasing the operating temperature of the material hence the thermal efficiency of the system. Usually, homogeneous ceramic coatings on metal substrates are used for this purpose. The most important problem faced in the systems with these types of coatings is thermal stresses which develop during operation due to high mismatch in the thermal expansion coefficients of metal substrate and ceramic coating. As a result of these thermal stresses, edge cracking and debonding occur along metal/ceramic interface in the system. To prevent cracking and debonding, coatings made from functionally graded materials (FGMs) were introduced. In these types of coatings, material properties are

functionally changed along the thickness of the coating, thus the mismatch between substrate and coating and thermal stresses in the system are minimized. In this study thermal stresses in disk-shaped specimens of nickel based metal alloy Rene-41 substrate and Zirkonya/Rene-41 composite coatings are calculated using specially developed finite element method. Functionally gradient coating and layered coatings are considered and it is shown that functionally gradient coating is safer compared to layered coatings.

Keywords : Thermal barrier coatings, functionally gradient materials, finite elements.

GİRİŞ

Özellikle mikroelektronik alanı olmak üzere havacılık ve yüksek sıcaklık uygulamalarındaki, yeni teknoloji ihtiyaçlarının karşılanabilmesi amacıyla malzeme bilimi ve ortak mühendislikler sürekli olarak yeni malzemeler geliştirmek için araştırmalar yapmaktadırlar. Geçmişte bu geliştirme çalışmalarının çoğu kompozitler, alaşımlar, yarı iletkenler, kaplamalar ve ince film kaplamalar gibi malzemelerin imal edilmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Bu malzemelerde mikro yapılar kontrol edilerek homojen bir kütle elde edilebilmekte ve bu sayede termo mekanik özelliklerin kontrol edilebildiği malzemeler üretilmektedir. Diğer taraftan optimal bir dizayn için, bileşenlerde ve yapılarda homojen olmayan malzemelerin kullanılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Değişken özelliklere sahip malzeme veya malzeme sistemleri kullanılarak sağlamlık, tokluk, korozyon dayanımını arttırmak mümkün olacaktır. Doğadaki biyolojik sistemlerde de optimum performans için homojen olmayan malzeme kullanımı görülmektedir. Kemikler, deniz kabukları ve bambu kamışları gibi komponentler hepsi önemli homojen olmayan malzemelere örnek olarak gösterilebilir.

Pratik uygulamalarda kaplama teknolojisi, mühendislik malzemelerinin performansının arttırılabildiği bir alan olarak görülmektedir. Termal bariyer kaplamaları; sistemin termal verimliliğinin arttırılarak çalışma sıcaklığını yükseltmek amacıyla kullanılır ve bu sayede kaplamalar; korozyon, oksidasyon veya aşınmayı önlemek amacıyla kullanılırlar [1-2]. Özellikle bu dar alanda metal alt katmanları üzerine seramik kaplamalar doğal bir seçenek olarak görülebilir. Ancak metal alt katmanları üstüne homojen seramik kaplama uygulamaları; termal genleşme katsayılarındaki yüksek uyumsuzluklar sebebiyle, bağlanmış yapıda oldukça yüksek termal gerilmeleri ortaya çıkarır. Bunun sonucu olarak da yarı kompozit malzemede kırılmalar ve arayüz çatlakları oluşmaktadır. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerle (Functionally Gradient Materials=FGMs) seramiklerin korozyona karşı dayanımını, metallerin ise ısı ve mekanik dayanımını arttırmakta, aynı zamanda artık termal gerilmeleri azaltmaktadır; en alt katmanda ise arayüz boyunca bağlanma dayanımını arttırmaktadır [3-5]. FGM malzemeleri metal/seramik kompozitlerin bir sentezidir ve bu yolla önceden belirlenmiş bir kompozit profilini verebilmesi için hacimsel bölümlerin malzeme özellikleri, kalınlık yönünde sürekli değişir. ([6-7]' de uygulamalar ve geniş referanslar görülebilir) Teknik olarak kompozit profili, termomekanik özelliklerin istenildiği gibi ortaya çıktığı yarı homojen bir yapı şeklinde oluşturulabilir.

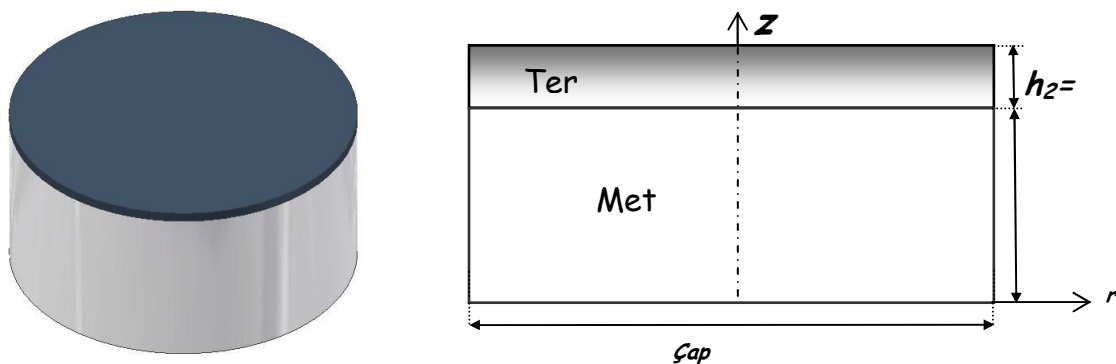
Malzeme özellikleri orantısal olarak değişen, iki bileşenin kısmi hacimlerini ya sürekli bir FGM tabakası [8] ile ya da birçok tabakalı arakatman ile sonuçlanan parçalı sabit bir yapı ile oluşturulabilir [3,9,10]. Çok tabakalı kaplamalarda teknik olarak yarı kompozit, sürekli olmayan termomekanik özelliklere sahip birbirinden farklı homojen malzemeler içerir. Sonuç olarak,

kırılma mekaniği problemi ile ilgili olarak, ençok bilinen anormallikler; bir arayüz çatlaklarının uçları etrafındaki gerilme ve deplasmanlardaki ani değişimler [11] ve serbest bir yüzey ve arayüzün kesişimindeki tekil gerilmelerdir [12]. FGM kaplamaları istenen iki ana yapıya sahiptir. İlki; seramiğin kısmi hacmi; arayüzde %0 dan yüzde %100' e kadar değiştiğinden, kaplama ile kaplanan arasındaki bağlanma malzeme uyumluluğu sebebiyle daha iyi olacaktır. İkinci olarak; malzeme özellikleri dağılımlarının düzgün olması sebebiyle FGM kaplı arakatmanda gerilme konsantrasyonları çok tabakalı homojen kaplamalara göre daha düşük olacaktır.

Bu çalışmada, sonlu boyutlardaki homojen metal malzeme üzerindeki bir FGM ve çok tabakalı bir seramik kaplamanın uniform sıcaklık değişiminden etkilenen, termal gerilmelerin aksel simetrik problemi ele alınmıştır. İlk olarak kaplamalardaki ara yüz çatlakları ve kenar çözümlerine neden olabilecek gerilmeler incelenecektir. Kaplanmış düzlemin dış yüzeylerindeki arayüzlerin kesişim noktalarındaki gerilme konsantrasyonları üzerinde özellikle durulacaktır. Arakatmanın sonlu boyutları sebebiyle problemin analitik çözümü oldukça zordur. Bu nedenle, termomekanik özellikleri sürekli olarak değişen nonhomojen malzemelerle ilgili, mekanik problemlerin etkili bir şekilde çözülebilmesi için bir sonlu eleman tekniği geliştirilmiş ve kullanılmıştır. Termal gerilme altındaki çok tabakalı kaplamanın sonlu eleman çözümü Case ve Kokini tarafından incelenmiştir [10]. FGM kaplamaları tekniği uygulaması [13]'de bulunabilir. FGM kaplamaları veya FGM' lerdeki çatlak problemleri için bu çalışmada kullanılan tekniğin etkinliği; hem bir kenarı çatlakmış FGM tabaka için mevcut analitik çözümlerde [14] hem de bir FGM ile kaplı homojen bir malzemenin ara yüz çatlaklarında denenerek ispatlanmıştır [15,16,17].

PROBLEMİN TANIMI

Problemdede kullanılan silindir numunenin boyutları Şekil 1`de verilmiştir [17-18]. Kullanılan boyutlar türbinlerde kullanılan ana metal ve kaplamaların boyutları olmakla birlikte yükleme olarak oda sıcaklığından türbin çalışma sıcaklığına geçişi temsil eden bir sıcaklık farkı olan $DT=600\text{ }^{\circ}\text{C}$ kullanılmıştır. Bir düzlem üzerinde serbest durduğu kabul edilen numunenin her yönde genişlemesine izin verilmiş ve oda sıcaklığında numunede artık gerilme olmadığı kabul edilmiştir.



Şekil 1. Silindir Numunenin İzometrik Görüntüsü ve Kesiti.

Dört farklı termal bariyer kaplaması modellenmiştir. İlk olarak sıklıkla kullanılan tek katmanlı

seramik (Zirkonya) termal bariyer kaplaması ve metal (Rene-41) alt tabakasından oluşan sistem modellenmiştir. Katmanların malzeme özellikleri [18] ve modelin bir şematiği Şekil 2a`da verilmiştir. İkinci olarak kullanılan numunede boyutlar değiştirilmeden termal bariyer kaplaması iki eşit parçaya bölünmüştür. Kaplamanın en altında Rene-41 metalinin özellikleri en üstünde ise Zirkonya seramiğinin özellikleri kullanılarak iki sınır arasında lineer interpolasyon yapılarak ara katman için seramik/metal karışımı olan malzeme özellikleri hesaplanmıştır. Bu numune için, katmanların malzeme özellikleri ve şematik modeli şekil 2b`de gösterilmiştir. Analizde kullanılan üçüncü numunede ise termal bariyer kaplaması dört eşit parçaya bölünmüştür. Modelimizin en alt katmanına Rene-41 metalinin özellikleri, kaplamanın en üst katmanına ise Zirkonya seramiğinin özellikleri verilmiştir. Ara katmanlar yine merkezlerinin düşey konumlarına göre Rene-41/Zirkonya karışımı malzeme özellikleri hesaplanmış ve malzeme özellikleri ile şematik model şekil 2c`de gösterilmiştir. Son numunede ise alt tabaka ve termal bariyer kaplaması olmak üzere iki tabaka vardır. Kaplamanın özelliği, malzeme özelliklerinin kalınlık boyunca kesiksiz olarak değişmesidir. En alt tabaka ile tek katmanlı kaplamanın arayüzünde malzeme özellikleri Rene-41 metalinin özellikleri olup kaplamanın en üstünde malzeme Zirkonya seramiğinin özelliklerine sahiptir. Ara bölgede malzeme özellikleri kalınlık boyunca kesiksiz ve lineer olarak Rene-41 özelliklerinden Zirkonya özelliklerine doğru değişmektedir. Katmanların ve fonksiyonel derecelendirilmiş malzemenin malzeme özelliklerini hesaplamak için aşağıda verilen lineer interpolasyon formülleri kullanılmıştır.

$$E = E_{\text{Seramik}} + (E_{\text{Metal}} - E_{\text{Seramik}}) \left(\frac{h_1 + h_2 - z}{h_2} \right) \text{ GPa}, \quad (1)$$

$$\alpha = \alpha_{\text{Seramik}} + (\alpha_{\text{Metal}} - \alpha_{\text{Seramik}}) \left(\frac{h_1 + h_2 - z}{h_2} \right) 1/^\circ\text{C}. \quad (2)$$

Bu denklemlerde E Young Modülü ve α ısıl genleşme sabitini ifade etmektedir. h_1 metal alt katmanın kalınlığı, h_2 termal bariyer kaplamasının kalınlığı ve z de düşey koordinat eksenidir (Şekil 1). Analizde kullanılan seramik (kısmi stabilize edilmiş Zirkonya) ve metal (Rene-41) malzemelerinin özellikleri Tablo 1`de verilmiştir.

Tablo 1. Analizde Kullanılan Seramik ve Metalin Malzeme özellikleri [18].

	E (GPa) (Young Modülü)	α (1/°C) (Isıl Genleşme Sabiti)	ν (Poisson Sabiti)
Seramik (Zirkonya)	27.6	$10.01 \cdot 10^{-6}$	0.25
Metal (Rene-41)	175.8	$13.91 \cdot 10^{-6}$	0.25

E=27.6 GPa, $\alpha=10.01 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ Zirkonya Seramik Katman	E=27.6 GPa, $\alpha=10.01 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$	E=27.6 GPa, $\alpha=10.01 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$
	E=138.8 GPa, $\alpha=12.94 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$	E=83.2 GPa, $\alpha=11.47 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$
	E=175.8 GPa, $\alpha=13.91 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$	E=120.2 GPa, $\alpha=12.45 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$
	E=175.8 GPa, $\alpha=13.91 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$	E=134.2 GPa, $\alpha=13.42 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$
E=175.8 GPa, $\alpha=13.91 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ Rene-41 Metal Katman	E=175.8 GPa, $\alpha=13.91 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$	E=175.8 GPa, $\alpha=13.91 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ Rene-41 Metal Katman

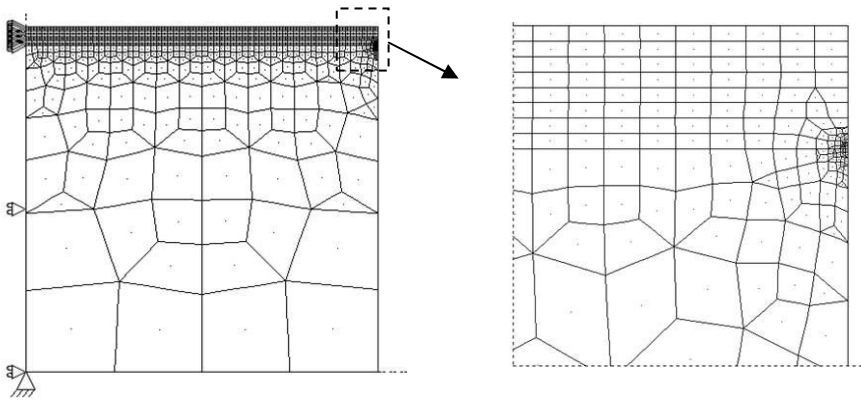
Şekil 2. Numunenin Katmanlarının Malzeme Özellikleri, E, Young Modülü, α , Isıl Genleşme Sabiti ve Her Katman için Poisson Sabiti, $\nu=0.25$ Olarak Kullanılmıştır.

SONLU ELEMANLAR FORMULASYONU

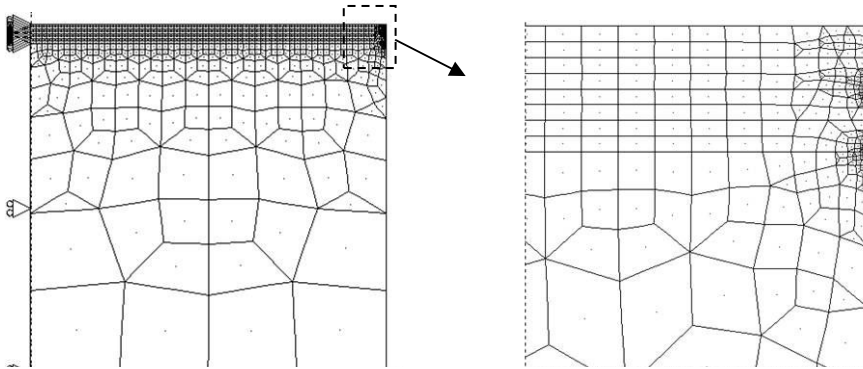
Silindir şeklindeki numunelerin sonlu elemanlar analizinde iki boyutlu modelleri kullanılmıştır. Bunun nedeni ise kullanılan modelden elde edilen sonuçların aksel simetriye sahip olmasıdır. Başka bir deyişle modelin sol kenarını merkez alıp 360 derece döndürülmesi sonucu yine silindir numune elde edilmekte ve 360 derece boyunca her açıdaki kesitte aynı sonuçlar elde edilebilmektedir. Bunun gibi aksel simetriye sahip olan problemlerde üç boyutlu modellerin kullanılması hem zaman hem de disk alanı kaybına neden olup farklı bir sonuç da getirmemektedir.

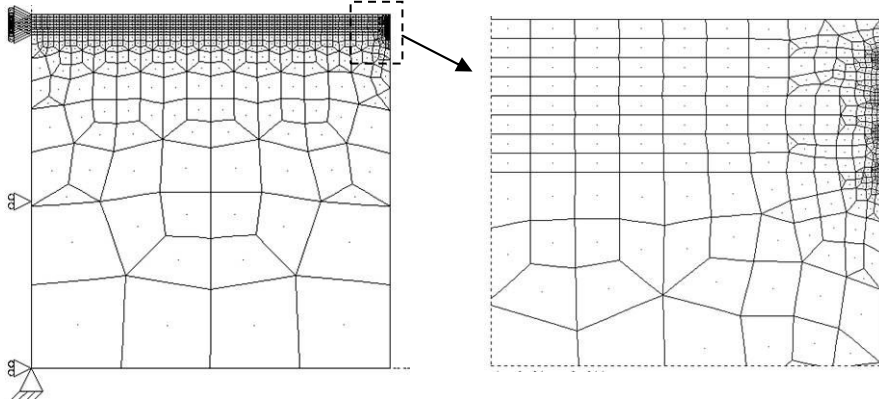
Sonlu elemanlar modellerinde 12 düğüm noktalı dörtgen ve 10 düğüm noktalı üçgen elemanlar kullanılmıştır. Bu elemanlar kübik interpolasyon yapabilmekte ve az miktarda kullanılsalar bile yüksek doğrulukta sonuçlar üretebilmektedirler. Bu elemanların şekil fonksiyonları referans [19]'da bulunabilir.

Sonlu elemanlar analizinde kullanılan modeller Şekil 3-5`de gösterilmiştir. Özellikle dış yüzeyde katmanların kesişim noktalarındaki ani gerilim artışı için bu noktalarda çok küçük elemanlar kullanılmıştır. Fonksiyonel derecelendirilmiş kaplamalı numune için tek katmanlı kaplamalı numunede kullanılan model aynen kullanılmasına rağmen özel bir formülasyon uygulanarak sonuçlar elde edilmiştir. Katmanlı kaplamalardan oluşan numuneleri modellemek için bilinen aksel simetrik sonlu elemanlar formülasyonu kullanılmıştır.



Şekil
3.
Tek





Şekil
5.
Dört

Elastiklik problemlerinin sonlu eleman formülasyonu bu konu ile ilgili birçok kitapdan veya makaleden bulunabilir. Homojen olmayan (FGM) malzemeleri içeren elastiklik problemlerini basitleştirmek için, arakatmanın termomekanik özellikleri sabit kabul edilmiştir [13]. Geometrideki değişiklikler ve adım adım oranlanan malzemenin özelliklerinde doğru çözümler elde edebilmek için çok küçük sonlu elemanlar kullanmak gereklidir.

Normal olarak rijitlik matrisi $[K]$ her bir düğüm noktası için deplasmanlar ve yükler sırasıyla $\{u\}$ ve $\{F\}$ ise

$$[K]\{u\} = \{F\} \quad (3)$$

dir. Buradan

$$\left([K] = \int_V [B]^T [D] [B] dV \right) \{u\} = \left(\{F\} = \int_V [B]^T [D] \{\alpha\} \Delta T dV \right) \quad (4)$$

yazılabilir. Burada V hacim, $[D]$ elastisite matrisi ve $\{u\}$ gerilmeler sonucu oluşan deplasmanları içeren vektör ve $[B]$ ise şekil fonksiyonlarının türevlerini içeren matris, α termal genişleme sabiti ve ΔT sıcaklık değişimidir.. Bu çalışmada, elastisite matrisi $[D]$ ve a uzay koordinatlarına bağlı

olarak hesaplanmıştır. Denklem (2) Gauss integral tekniği kullanılarak çözülür ve $[D]$, a her bir Gauss integrasyon noktasında hesaplanır. Eksenel simetrik problemleri için (2)

$$\left([K] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [B]_{ij}^T [D]_{ij} [B]_{ij} 2\pi r_i J_{ij} w_i w_j \right) \{u\} = \left(\{F\} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [B]_{ij}^T [D]_{ij} \{\alpha\}_{ij} \Delta T 2\pi r_i J_{ij} w_i w_j \right) \quad (5)$$

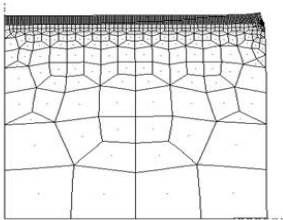
halini alır. Burada i ve j indisleri Gauss integrasyon noktalarıdır. J Jacobian matrisinin determinanı ve w_i, w_j Gauss ağırlık faktörleridir. r_i ise i ' ninci Gauss noktasının yatay koordinatıdır. 12 düğüm noktalı elemanlar kullanılarak oluşturulan modeller ile $n = 4$ alınarak çözülen FGM problemlerinde oldukça doğru sonuçlar elde edilebilmektedir.

Modellerin oluşturulmasında ve çözümlerin elde edilmesinde Lehigh üniversitesinde geliştirilen Frac2d programı kullanılmıştır.

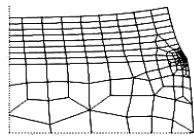
NÜMERİK SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Isıl Genleşme Sonucunda Numunelerin Geometrisi

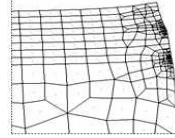
Modellerimize uygulanan sıcaklık farkından sonra ısıl genleşmeler sonucu numunelerin yeni geometrileri Şekil 6` da verilmiştir. Bu şekilde görüldüğü gibi katmanların tam yüzeyde kesiştiği noktalardaki aşırı ve kesikli deplasmanlar mevcuttur. Bu deplasmanlar fonksiyonel derecelendirilmiş kaplama için kesiksiz ve azdır.



a) Numunenin açısız simetrik modeli



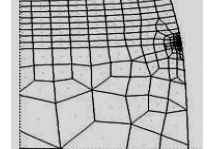
b) Tek katmanlı kaplama



c) İki katmanlı kaplama



d) Dört katmanlı kaplama



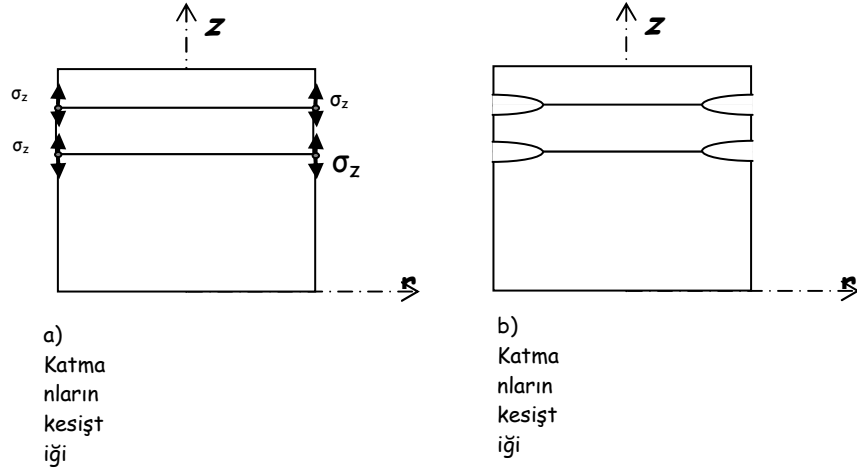
e) Fonksiyonel Derecelendirilmiş Kaplama

Şekil 6. Isıl Genleşmeler Sonucunda Numunenin Geometrisi (Deplasmanlar 100 ile Çarpılıp Deforme Olmuş Geometriler Çizilmiştir).

Düşey Gerilmelerin Dağılımı

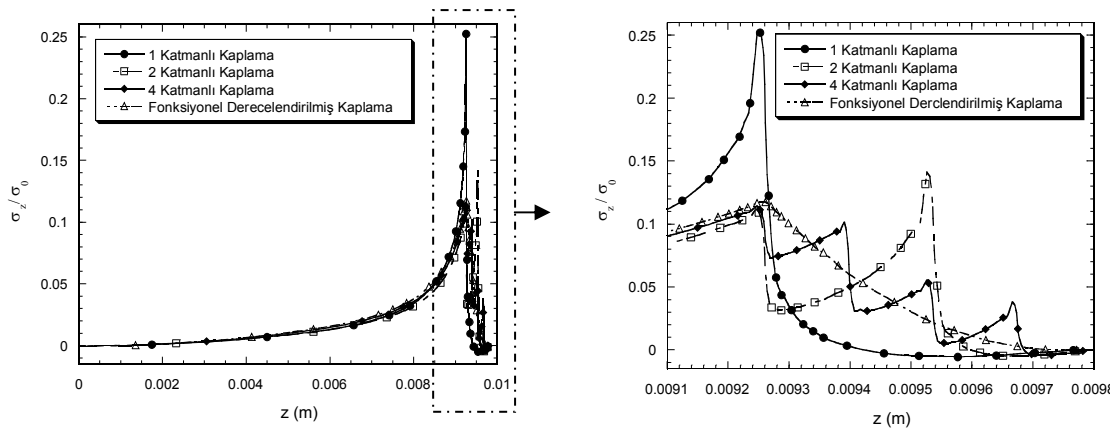
Katmanlı termal bariyer kaplamalarında görülen en önemli problem katmanların arasındaki ısıl genleşme sabitinin farklı olması nedeniyle ortaya çıkan termal gerilmelerdir. Bu gerilmelerin düşey olanları, katmanların dış yüzeydeki kesişim noktalarında çok yüksek değerlere ulaşmakta ve

katmanların birbirinden ayrılmasına sebep olmakta ve bundan dolayı ara yüz kenar çatlakları oluşmaktadır. (Şekil 7) Bu noktalardaki gerilmelerin yüksek oluşunun nedeni katmanların kesiştiği köşe noktalarındaki tekilliktir. Bu çatlaklar zamanla ilerleyerek katmanların dökülmesine ve sistemin işleyişinin bozulmasına neden olmaktadır.



Şekil 7. Numunede Tekil Düşey Gerilmelerin Oluştugu Noktalar ve Bu Gerilmeler Sonucunda Oluşan Ara Yüz Kenar Çatlakları .

Tekil düşey gerilmeler, ne kadar az olursa ara yüz kenar çatlaklarının oluşma ihtimali o kadar az olacaktır. Şekil 8'de numunenin sağ kenarındaki düşey gerilmeler, değişik kaplama türleri için verilmiştir.



Şekil 8. Numunenin sağ kenarındaki düşey gerilmeler için verilen grafikler.

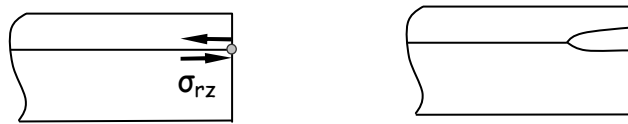
Bu şekilden de anlaşılacağı gibi tek katmanlı kaplama ile alt metal tabakanın kesiştiği dış noktada ($r = 10$ mm ve $z = 9.26$ mm) düşey gerilimde çok büyük bir sıçrama vardır. Tek bir kesişim olduğu

için tek ve şiddetli bir sıçrama görülmektedir. İki katmanlı kaplama için iki sıçrama mevcuttur. Birinci sıçrama kaplamanın alt katmanı ile en alt metal tabakanın kesiştiği noktadadır ($r = 10$ mm ve $z = 9.26$ mm). İkinci sıçrama ise kaplamanın üst katmanı ile alt katmanın sağ kenarda kesiştiği noktadır ($r = 10$ mm ve $z = 9.536$ mm). Burada dikkat edilmesi gereken sıçrama (tekil düşey gerilim) sayısı artmasına rağmen büyüklükleri tek katmanlı kaplamadaki sıçramaya göre oldukça düşüktür. Bu da katmanların ayrılmasını ve ara yüz kenar çatlaklarının oluşma ihtimalini düşürmektedir. Dört katmanlı kaplamada dört tane düşey gerilim sıçraması görülmektedir. Bu tekil gerilimler sağ kenarda her katmanın bir diğeri ile kesiştiği noktalarda gözlenmektedir ($r = 10$ mm ve $z = 9.26, 9.398, 9.536, 9.674$ mm). Bu sıçramaların hepsinin büyüklükleri iki katmanlı ve tek katmanlı kaplamalarda görülen sıçramalardan çok daha düşüktür. Buradan çıkarılabilecek sonuç katman sayısı arttıkça sıçrama sayısı artmasına rağmen tekil gerilimlerin büyüklükleri azalmakta ve daha güvenli termal bariyer kaplamaları elde edilmektedir. Önceden de belirtildiği gibi kaplamadaki katmanların sayıları artırılarak fonksiyonel derecelendirilmiş kaplama elde edilmekte ve bu sayede malzeme özelliklerinin kalınlık boyunca kesiksiz olarak değişmektedir. Malzeme özellikleri kesiksiz olarak değiştiği için bu kaplamadan elde edilen düşey gerilimler de kesiksiz ve düzgün olmaktadır. Düşey gerilimlerde hiçbir sıçrama olmadığı gibi büyüklükleri de diğer kaplama çeşitlerinden elde edilen tekil gerilimlere göre çok düşüktür.

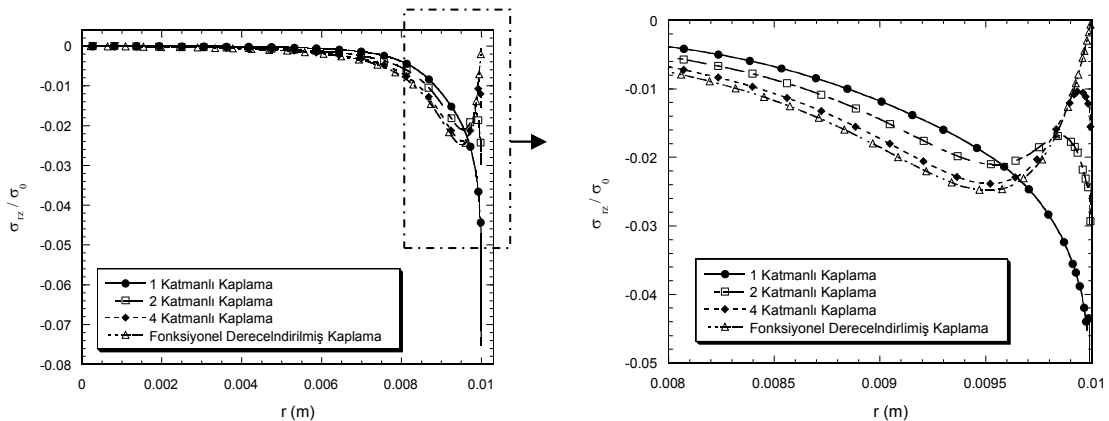
Kesme Gerilimlerinin Dağılımı

Termal bariyer kaplamalarında katmanlar arasında ayrılmalar ve çatlaklar meydana gelmesine neden olan diğer bir gerilim tekil kesme gerilimidir (Şekil 9). Kesme geriliminde de düşey geriliminde olduğu gibi aynı noktalarda tekillik vardır.

Şekil 10`da metal en alt tabaka ile termal bariyer kaplaması arayüzündeki kesme geriliminin yarıçap boyunca dağılımı farklı kaplama çeşitleri için verilmiştir. Katmanlı kaplamalar için yarıçapın sonuna doğru tekil kesme gerilimleri görülmektedir. Görüldüğü gibi bu gerilim tek katmanlı kaplama için büyük, iki katmanlı kaplama için az, dört katmanlı kaplama için oldukça az ve fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeden yapılmış kaplama için sıfırdır.



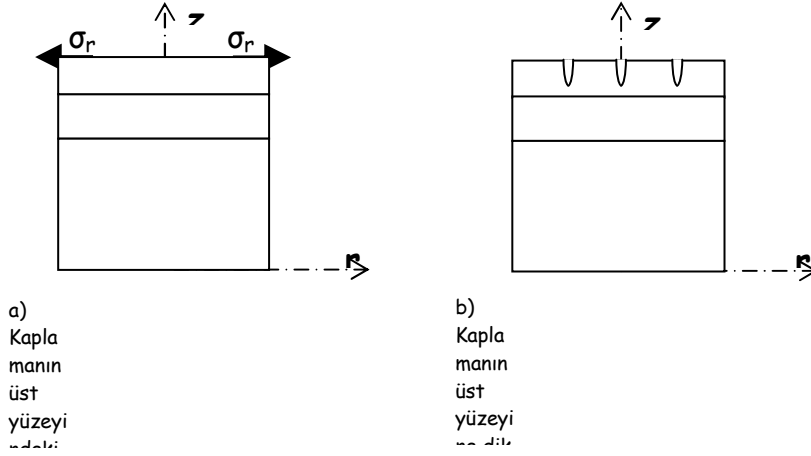
Şekil 9. Numunede Tekil Kesme Geriliminin Oluştugu Nokta ve Bu Gerilim Sonucunda Oluşan Kenar Çatlağı



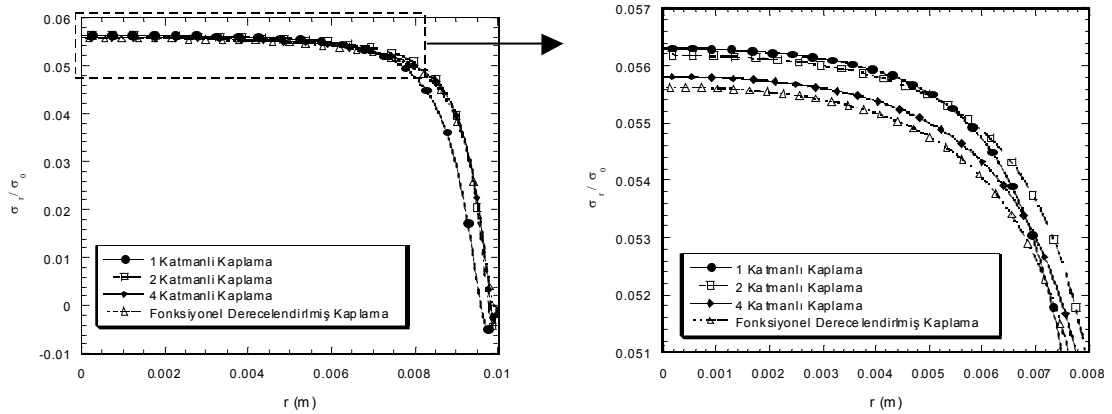
Şekil 10. En Alt Metal Tabaka ile Kaplama arasındaki Kesme Gerilimlerin Farklı Kaplamalar İçin Yarıçap Boyunca Dağılımı, $S_0 = \alpha_{Metal} D T E_{Metal}$

Yatay Gerilimlerin Dağılımı

Termal bariyer kaplamalarında katmanların birbirinden ayrılması sonucunda oluşan ara yüz kenar çatlakları ile birlikte sıcak ortama ilk maruz kalan kaplamanın en üst yüzeyinde de yüzeye dik kenar çatlakları da görülmektedir (Şekil 11). Bu çatlakların oluşmasında rol oynayan gerilim kaplamanın en üst yüzeyindeki yarıçap yönündeki yatay gerilimdir. Şekil 12`de kaplamanın üst yüzeyindeki yatay gerilimlerin yarıçap boyunca dağılımı farklı kaplama çeşitleri için verilmiştir.



Şekil 11. Numunenin Üst Yüzeyindeki Yatay Gerilimler ve Bu Gerilimler Sonucunda Oluşan Kenar Çatlakları.



Şekil 12. Kaplamanın Üst Yüzeyindeki Yatay Gerilmelerin Farklı Kaplamalar İçin Yarıçap Boyunca Dağılımı, $S_0 = \alpha_{Metal} D T E_{Metal}$

Bu şekilden de anlaşılacağı gibi bu gerilimlerde tekil bir nokta yoktur ve gerilimler silindir numunenin merkezine doğru artmakta ve yan yüzeyine doğru azalmakta ve sıfıra inmektedirler. Bu nedenden dolayı kaplamanın üst yüzeyinde merkeze yakın bölgeler yüzeye dik çatlak oluşumu bakımından daha kritiktir. Merkeze yakın bölgelerdeki gerilimler incelendiğinde, kaplamanın katman sayısının artması ile azaldığı görülmektedir. Ve yine en düşük yatay gerilim dağılımı fonksiyonel derecelendirilmiş malzemedan yapılmış kaplama için elde edilmiştir.

SONUÇ

Bu çalışmada silindir şeklinde metal altabaka ile termal bariyer kaplamasında uygulanan sıcaklık değişimi sonucunda oluşan termal gerilimler incelenmiş ve bu gerilimlerden dolayı meydana gelebilecek kusurlar belirtilmiştir. Farklı termal bariyer kaplamaları ele alınmış ve her tip kaplama için elde edilen termal gerilimler diğerleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak termal bariyer kaplaması ve metal alt tabakdan oluşan bir sistemde kenar ve ara yüz kenar çatlakları oluşturabilecek gerilimler kaplamadaki katman sayısı ile ters orantılı olarak azalmıştır. Kaplamanın özellikleri (FGM) fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme özelliklerine yaklaştıkça gerilimlerde düzenli bir azalma görülmüştür. En güvenli kaplama tipi fonksiyonel derecelendirilmiş malzemedan yapılmış kaplama olduğu ispat edilmiştir. Bu tip kaplamada kusur meydana getirebilecek bütün gerilimlerin diğer katmanlı kaplamalardan elde edilen gerilimlerden daha düşük olduğu görülmüştür.

KAYNAKÇA

1. **A.P. Batakis, J.W. Vogan**, Rocket Thrust Chamber Thermal Barrier Coatings, NASA Contract Report 1750222, 1985
2. **D.L. Houck**, Thermal Spray: Advances in Coatings Technology", Proceedings of the National Thermal Spray Conference, ASM International, 1987
3. **T. Hirano, T. Yamada**, Multi-Paradigm Expert System Architecture Based Upon the Inverse Design Concept, International Workshop on Artificial Intelligence for Industrial Applications, Hitachi, Japan, May 25-27 (1988).
4. **T. Hirano, T. Yamada, J. Teraki, M. Niino, A. Kumakawa**, A study on a Functionally Gradient Material Design System for a Thrust Chamber, Proceedings of the 16 th International Symposium Space Technology ve Science, Sapporo, Japan, 1988
5. **M. Niino, S. Maeda**, Recent Development Status of Functionally Gradient Materials, I.S.I.J. International 30 (1990) 699-703
6. **M. Yamanouchi, M. Koizume, T. Hirai, I. Shiota**, FGM-90, Proceedings of the 1 st International Symposium on Functionally Gradient Materilas, FGM Forum, Sendai, Japan (1990)
7. **J.Holt, M. Koizumi, T. Hirai, Z. Munir**, in Ceramic Transactions, Proceedings of the 2nd International Symposium on Functionally Gradient Materials 34, 1992
8. **A. Kawasaki, R. Watanabe**, in FGM-90, Yamanouchi et. al., Sendai, Japan, 1990, 197-202
9. **K.Kokini, Y. Takeuchi**, in FGM-90, Yamanouchi et. al., Sendai, Japan, 1990, 31-36

10. **M. Case, K. Kokini**, in *Ceramic Coatings*, K. Kokini, The 1993 ASME Winter Annual Meeting, New Orleans, Louisiana, MD-Vol. 44, 1993, 149-162
11. **F. Erdoğ an**, *ASME Journal of Applied Mechanics* 32, 1965, 403-410
12. **F. Erdoğ an, V. Biricikoğ lu**, *International Journal of Engineering Science* 11, 1973, 645-766
13. **R.L. Williamson, B.H. Rabin**, in *Ceramic Transactions, Proceedings of the 2 nd International Symposium Functionally Gradient Materials*, Holt et al. 34,1992
14. **F. Erdoğ an, B.H. Wu**, in *Ceramic Transactions, Proceedings of the 2 nd International Symposium Functionally Gradient Materials*, Holt et al. 34,1992
15. **F. Erdoğ an, Y.F.Chen**, in *Ceramic Transactions, Proceedings of the 2 nd International Symposium Functionally Gradient Materials*, Holt et al. 34,1992
16. **Y.F.Chen**, *The Interface Crack Problem in Nonhomogeneous Bonded Materials of Finite Thickness*, Ph.D. Dissetation, Lehigh University,1990
17. **B. Yildirim, F. Erdogan**, *Edge Crack Problems in Homogenous and FGM Thermal Barrier Coatings Under Uniform Thermal Loading*, *Journal of Thermal Stresses* (Basım için Kabul edildi)
18. **S. Nusier, G. Newaz**, *Analysis of Interfacial Cracks in a TBC/Superalloy System under Thermal Loading*, *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 60, pp. 577-581, 1998.
19. **B. Yildirim**, *Nonlinear Thermal Stress/Fracture Analysis of Multilayer Structures using Enriched Finite Elements*, Ph.D. Dissetation, Lehigh University, Bethlehem, PA, 2000.