

NiCr Bağ Kaplamaya Sahip Termal Bariyer Kaplama (TBC) Sisteminin Mekanik Alaşım Yöntemi Kullanılarak Üretilen CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ (CMAS) Tozları ile Korozyon Davranışlarının İncelenmesi

Aslıhan ATAR*¹, Yasin ÖZGÜRLÜK¹

¹Bartın Üniversitesi, Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 74100, Bartın, Türkiye

(Alınış / Received: 01.03.2021, Kabul / Accepted: 20.10.2021, Online Yayınlanma / Published Online: 25.12.2021)

Anahtar Kelimeler

Mekanik Alaşım, CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ (CMAS), Termal Bariyer Kaplamalar (TBCs), Atmosferik Plazma Sprey (APS) Kaplama, NiCr

Özet: Malzemelerin yüzey özelliklerinin geliştirilmesi ve çevresel şartlara daha iyi uyum sağlayabilmesi amacıyla geçmişten günümüze birçok alanda tercih edilen Termal bariyer kaplamalar (TBCs) uzay ve havacılık sanayisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. TBC'ler çalışma koşulları esnasında erozyon, sıcak korozyon, oksidasyon ve CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ (CMAS) gibi hasar mekanizmalarına maruz kalmaktadır. Tüm bu hasar mekanizmalarından dolayı TBC sistemlerinde dökülmeler ve bozulmalar meydana gelmektedir. Bu çalışmada, Inconel 718 süper alaşım altlık malzeme üzerine NiCr içeriğine sahip metal tozları bağ kaplama olarak, YSZ (ZrO₂-8wt.%Y₂O₃) içeriğine sahip seramik tozlar ise, üst kaplama olarak altlık üzerine kaplanmıştır. Atmosferik Plazma Sprey (APS) yöntemi kullanılarak üretilen TBC sistemleri üretimlerinin ardından, mekanik alaşım yöntemiyle üretilen CMAS camı yapısı eşliğinde korozyon testlerine tabi tutulmuşlardır. Gerçekleştirilen CMAS testleri öncesi ve sonrasında TBC sistemlerinin mikroyapısal ve mekaniksel özellikleri ileri karakterizasyon teknikleri kullanılarak incelenmiştir.

Investigation of Corrosion Behavior of Thermal Barrier Coating (TBC) System with NiCr Bond Coating with CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ (CMAS) Powders Produced Using the Mechanical Alloying Method

Keywords

Mechanical Alloying, CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ (CMAS), Thermal Barrier Coatings (TBCs), Atmospheric Plasma Spray (APS) Coating, NiCr

Abstract: Thermal barrier coatings (TBCs), which are preferred in many areas from past to present, are widely used in the space and aviation industry in order to improve the surface properties of materials and to better adapt to environmental conditions. TBCs are exposed to erosion, hot corrosion, oxidation and damage mechanisms such as CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ (CMAS) during working conditions. Due to all these damage mechanisms, spills and deteriorations occur in TBC systems. In this study, metal powders with NiCr content were coated on the Inconel 718 superalloy substrate as a bond coating, and ceramic powders with YSZ (ZrO₂-8wt.% Y₂O₃) were coated on the substrate as a top coating. TBC systems produced using the Atmospheric Plasma Spray (APS) method were subjected to corrosion tests after their production, accompanied by the glassy structure of CMAS produced by the mechanical alloying method. Before and after the CMAS tests, the microstructural and mechanical properties of TBC systems were examined using advanced characterization techniques.

1. Giriş

TBC'ler oldukça yüksek sıcaklıkta çalışan motorların gaz türbinlerinde yüksek sıcaklığa maruz kalan bileşenlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [1-4]. TBC'lerin esas amacı gaz türbin motor parçalarının termal izolasyonunu sağlanmanın yanında bu parçaları oksidasyon, sıcak korozyon, aşınma ve

uçuşan küllerin zararlı etkilerinden korumaktır [5-8]. Tipik bir TBC sistemi genel itibariyle termal izolasyonu sağlaması açısından nadir toprak elementleri ile stabil hale getirilmiş seramik bir üst kaplamadan, termal genleşme uyumsuzluğunu en aza indirmek ve seramik üst kaplamanın adezyonunu arttırmak amacıyla kullanılan metalik bir bağ kaplamadan, ve yüksek sıcaklığa dayanıklı Nikel esaslı

*İlgili yazar: ozgurlukyasin@gmail.com

bir süper alaşım altlık malzemeden oluşur. Nikel esaslı altlık malzemelerden en yaygın olarak kullanılanı ise oksidasyon ve korozyona karşı direnci oldukça iyi olan Inconel 718 süper alaşım altlık malzemesidir [9–12]. Metalik bağ kaplama malzemesi olarak da MCrAlY-tip kaplamalar genellikle kara ve havacılık gaz türbinlerinin sıcak bölümlerindeki süper alaşım altlık malzemeleri oksidasyondan ve sıcak korozyondan korumak için kullanılır. Kaplama içeriğindeki M ile geliştirilmiş olan element ise genellikle nikel veya kobalttır. Krom ve Alüminyum ise, oksidasyon ve sıcak korozyon direncini arttırmak için kaplama içeriğine eklenmiştir. Düşük miktarlarda eklenen Yttrium (Y) elementi de kaplama içerisindeki oksit tabakasının altlık yüzeyine yapışma mukavemetini arttırması için konulmaktadır [13–15]. MCrAlY-tip kaplamalar genel itibariyle Atmosferik Plazma Sprey (APS), Süper Sonik Plazma Sprey (SSPS), Detonation gun (D-gun), Yüksek hızlı oksit yakıt (HVOF) ve Soğuk Gaz Dinamik Sprey (CGDS) gibi termal sprej kaplama yöntemleri kullanılarak üretilmektedir. Seramik üst kaplama malzemelerinin üretilmesinde ise atmosferik plazma sprej yöntemi (APS) ve elektron ışınıyla fiziksel buhar biriktirme yöntemi (EB-PVD) olmak üzere iki tip kaplama yöntemi kullanılmaktadır. APS yöntemi ucuz ve geleneksel bir yöntemdir [16–18]. TBC'lerin üretimlerinde ekonomik açıdan tercih edilmesinden dolayı oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. APS yönteminde kaplama işlemi atmosfere açık olarak ve oldukça yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirildiğinden oluşan kaplama mikro yapısı düşük yoğunluklu, poroziteli ve oldukça gözenekli oluşur. Ayrıca bu yöntemde kaplanacak olan malzeme yüzeye laminer bir şekilde biriktirilir [19].

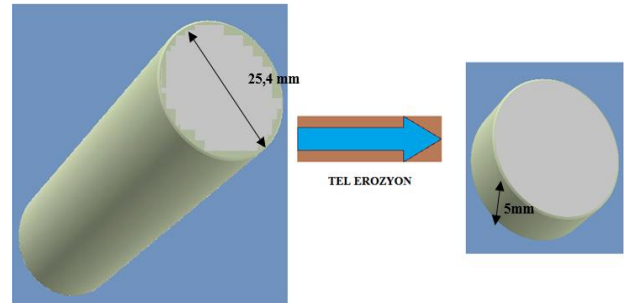
Son yıllarda termal bariyer kaplamalar gaz türbin motorlarında önemli parçalar olmaya başladılar. Çalışma koşullarında TBC'ler bütün sistemlerin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkileyecek hasara uğraticı birçok hasar mekanizmasına maruz kalmaktadır. Dahası, CMAS ismiyle bilinen ve kalsiyum-magnezyum-Alümina Silikatın ergimesi sonucuyla yeni bir hasar tipi olan korozyon türünün üzerine dikkat çekilmeye başlandı [20,21]. CMAS; toz, kaya vb. içerikli partiküllerin bir çevresel birikme formu olup, bu tür partiküller türbinlerin sıcak bölge parçaları gibi uygulamalarda, servis esnasında sıklıkla TBC'ler de hasara sebebiyet vermektedir [22,23]. TBC'ler de yüksek sıcaklıklarda Ca, Mg, Al, Si gibi kanyonların yüzeyde ergiyerek birikmesi sonucunda CMAS etkisi gerçekleşmektedir. CMAS partiküllerinin ve seramik üst kaplamaların etkileşimiyle camsı soda-silikat fazı oluşur ve açık boşluklardan TBC sisteminin içine sızar. TBC'ler de ki CMAS etkisi biriktirme yöntemleriyle yakından alakalıdır. EB-PVD kaplamalar kolonsal mikro yapılarından dolayı CMAS atağına karşı daha savunmasızdır [24,25]. Termal çevrimler sırasında bu faz ile seramik üst kaplama arasında ısıl genleşme farkı sonucu ve uzama toleransının azalmasıyla çatlaklar oluşarak hasar gerçekleşir [25–27]. CMAS ergir ve TBC malzemesi

üzünün ıslatarak açık boşlukların tamamının içine kapiler etki ile sızar. Soğuma sonrası, CMAS katılaştığında penetre olduğu tabaka yüksek modüle erişir. CMAS'ın penetre olduğu bu bölgelerdeki boşluklar dolduğundan uzama toleransını düşürken, termal iletkenlik artmaktadır [28–30].

Bu çalışmanın amacı ise, CMAS camsı yapısına karşı daha dayanıklı yeni nesil TBC sistemlerinin geliştirilmesi olduğu için bu kapsamda, CMAS korozyon testleri gerçekleştirilmiştir. Bu korozyon testleri için ilk olarak CaO, MgO, Al₂O₃ ve SiO₂ tozları ticari olarak elde edilerek, mekanik aktivasyon işlemine tabi tutulmuştur. Mekanik aktivasyon ile yüzey enerjileri arttırılan CMAS tozları 100 mg'lık peletler haline getirilerek sinterlenmiştir. TBC numunelerinin üzerine hazırlanan peletlenmiş CMAS tozları yerleştirilerek korozyon gerçekleştirilmiştir. Korozyon testleri öncesi ve sonrasında deneylerde kullanılan TBC numunelerinin analiz ve karakterizasyon işlemleri gerçekleştirilerek, elde edilen sonuçlar, literatür çalışmaları dikkate alınarak değerlendirilmiştir.

2. Materyal ve Metot

Çalışmada, süper alaşım altlık malzeme (Inconel 718) üzerine NiCr içeriğine sahip metalik tozlar bağ kaplama olarak biriktirilmiştir. APS üretim yöntemi kullanılarak üretilen bağ kaplama katmanının boyutu yaklaşık olarak 100 µm'dir. Üst kaplama olarak ise, %7-8 oranında Y₂O₃ ile stabilize edilmiş zirkonya (YSZ) tercih edilmiştir. Bağ kaplama üzerine yine APS yöntemiyle biriktirilen üst kaplamanın da kalınlığı yaklaşık olarak 200 µm'dir.



Şekil 1. Silindirik formdaki altlık malzemenin tel erozyon yöntemiyle disk formuna getirilmesi

2.1. Altlık malzemenin kimyasal bileşimi ve özellikleri

Nikel esaslı süper alaşım Inconel 718 altlık oksidasyona, korozyona, aşınmaya ve erozyona karşı dirençli bir malzemedir. Aynı zamanda bu alaşım çatlaklara karşı da oldukça dayanıklıdır. Bu malzemenin içeriğinde önemli miktarlarda niyobyum, molibden ve az miktarlarda alüminyum bulunmaktadır. Ayrıca bu malzeme, yüksek sürünme mukavemetine sahip olduğu için roket motorları, nükleer reaktörler, gaz türbinleri ve uzay araçlarında kullanımı tercih edilmektedir. Şekil 1'de gösterildiği

gibi uzun silindirik çubuklar şeklinde üretilmektedirler. Uzun çubuklar olarak satın alınan Inconel 718 malzemeler tel erozyon yardımıyla 5'er mm' lik kalınlıklarda kesilerek deney düzeneği için hazır hale getirilmektedir.

2.2. Bağ Kaplamanın Üretilmesi

APS yöntemiyle bağ kaplama üretim işlemine başlanmadan önce, tel erozyonla kesilen altlık malzemeler yüzeylerinin pürüzlendirilmesi ve temizlenmesi için kumlama işlemine tabi tutulmuştur. Kumlama işlemi yaklaşık olarak 10 cm' lik bir mesafede ve 60-80°'lik açı yapılarak 1,5-3 bar basınç aralığında 50-65 mesh boyut aralığında Al₂O₃ tozları vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Bu işlemin ardından tüm altlık malzemeler ultrasonik temizleme işlemine tabi tutulmuştur. Daha sonra ise, -53 +20 µm boyut aralığında NiCr tozu vasıtasıyla bağ kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Bağ kaplama işlemi özellikleri Tablo 1'te ayrıntılı olarak verilmiştir.

Tablo 1. Kaplama proseslerinde kullanılan kaplama sistem ve toz malzeme özellikleri

Kaplama türü	Sprey tabancası		Toz Malzeme Özellikleri	
	Yöntem	Firma	Toz cinsi	Parçacık boyutu
Bağ kaplama	APS	GTV	NiCr	-53 +20 µm
Üst kaplama	APS	GTV	YSZ	-45+20 µm

Tablo 2'te APS yöntemiyle bağ kaplama parametreleri ayrıntılı olarak verilmiştir.

Tablo 2. APS yöntemiyle bağ kaplama işlemindeki parametreler

Kaplama	Ark akımı	H ₂ akış oranı	Ar akış oranı	Toz besleme oranı	Sprey uzaklığı
NiCr	500 A	15 slpm	80 slpm	25 g/min	80 mm

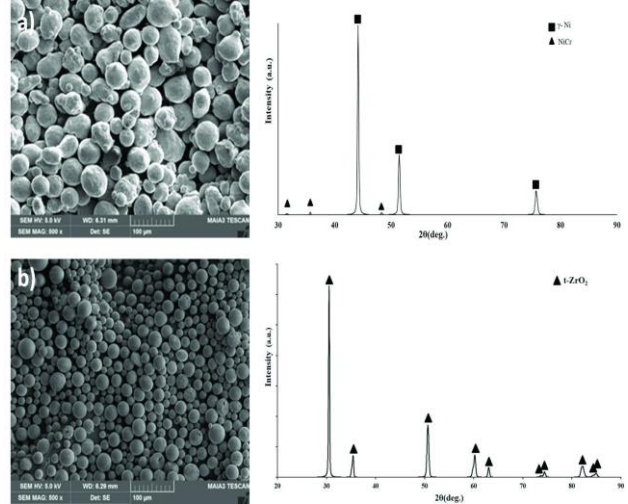
2.3. Termal Bariyer Kaplamalara Üst Kaplamanın Uygulanması

Bu deneysel çalışmada seramik üst kaplama yöntemi olarak APS yöntemi tercih edilerek yaklaşık olarak 200 µm kalınlığında yitria ile stabilize edilmiş zirkonya (YSZ) içerikli seramik üst kaplama biriktirilmesi yapılmıştır. Kaplama üretiminde kullanılan kaplama parametreleri aşağıdaki Tablo 3'de verilmektedir.

Tablo 3. Üst Kaplamaların üretiminde kullanılan kaplama parametreleri

Kaplama	Ark akımı	H ₂ akış oranı	Ar akış oranı	Toz besleme oranı	Sprey uzaklığı
YSZ	630 A	20 slpm	90 slpm	25 g/min	90 mm

Bağ kaplama ve üst kaplama üretiminde kullanılan tozların SEM görüntüleri ve faz analizleri ise Şekil 2' de verilmiştir. NiCr tozları küresel bir şekle sahiptir ve γ-Ni ve NiCr fazlarından oluşur. Benzer şekilde, YSZ tozları küresel biçime sahiptir, ancak sadece t-ZrO₂'dan oluşurlar.



Şekil 2. a) NiCr tozları ve XRD analizi, b) YSZ tozları ve XRD analizi

2.4. CMAS korozyon tozunun hazırlanışı

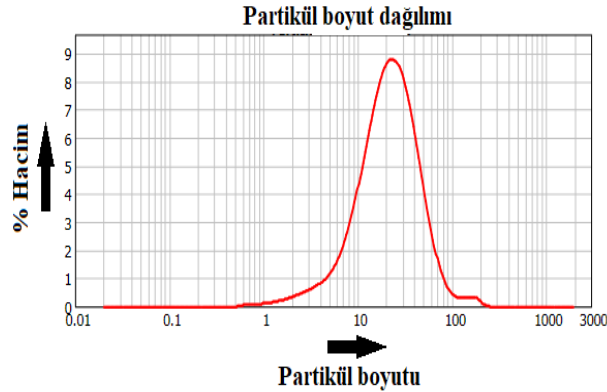
CMAS etkisine sebep olan bileşimlerin kabul gören net bir ergime noktası olmadığı için bu etkiyi yok etme de net bir çözüm yoktur. Bu çalışmanın amacı ise, CMAS camı yapısına karşı daha dayanıklı yeni nesil TBC sistemlerinin geliştirilmesidir. Bu araştırmanın amacına ulaşmak için CMAS cam kimyasının ve temas hasarını direncinin anlaşılması gerekmektedir. Artan servis sıcaklığına bağlı olarak, çoğu durumda termal olarak aktifleşen bir işlem olan malzemelerin çevresel bozulmasının şiddetinin artması beklenmektedir. Bu kapsamda CMAS korozyon tozlarının hazırlanması için %99 saflıkta ticari olarak elde edilen %30 CaO, %5 MgO, %16 Al₂O₃ ve %49 SiO₂ tozları tartılarak karıştırılmıştır. El yardımıyla kabaca karıştırılan tozların tamamen homojen olmasını sağlamak için metalurji ve malzeme mühendisliği bölümündeki manyetik karıştırıcı içerisine saf su ile birlikte konularak yaklaşık 1 saat boyunca karıştırılmıştır. Manyetik karıştırıcıda karıştırılan tozlar daha sonra saf suyun buharlaşması için 120°C'lik etüv fırın içerisine konulmuştur. Yaklaşık olarak 72 saat suyun tamamen buharlaşması için etüv içerisinde bekletilmiştir. Kuru hale gelen homojen toz karışımlarının boyutlarının küçültülmesi ve mekanik olarak aralarında alaşım yapması için toplamda 2 saat 30'ar dakikalık 4 çevrim boyunca 500 rpm dönüş hızında FRITSCH markalı bilyalı değirmende öğütülmüştür. 30'ar dakikalık toplamda 2 saatlik mekanik alaşım işlemine tabii tutulan CMAS toz karışımlarının mekanik aktivasyon öncesinde ve sonrasında SEM (Tescan MIAI3 XMU), XRD (Rigaku SmartLabTM), EDS (Oxford, Xmax 50), partikül boyut

dağılımı (Malvern Mastersizer 3000) ve TGA/DTA (Hitachi STA 7300) analizleri gerçekleştirilmiştir.

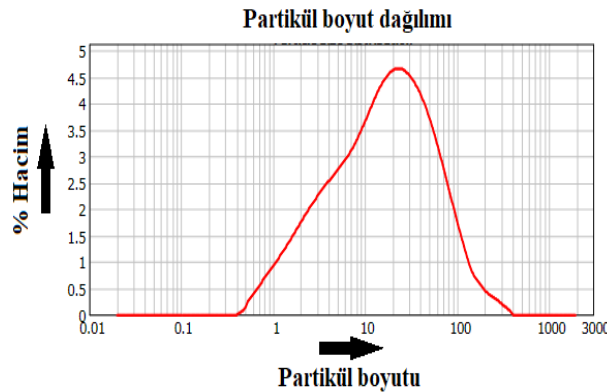
3. Bulgular

3.1. CMAS korozyon tozlarının partikül boyut dağılımı analizi

Mekanik aktivasyon işleminden önce ve sonra partiküllerin boyut dağılımı analizi gerçekleştirilmiştir. Analizlerin sonucuna göre mekanik aktivasyon işleminden önce karışım içerisindeki en küçük partikülün boyutu 7,60 µm, en büyük partikülün boyutu 49,961 µm ve ortalama boyut dağılımı ise yaklaşık olarak 21,535 µm olarak ölçülmüştür. Mekanik aktivasyon işleminden sonra ise en küçük partikülün boyutu 2,239 µm, en büyük partikülün boyutu 73,073 µm ve ortalama boyut dağılımı ise 16,505 µm olarak analiz edilmiştir. Şekil 3'de ve Şekil 4'te ise, yapılan analiz sonuçları gösterilmiştir. Mekanik aktivasyon işlemi sonrasında ortalama boyut dağılımında ve en küçük partikül boyutunda düşüş görülürken en büyük partikül boyutunda ise bazı tanelerin birbirine bağlanmasından dolayı artış görülmüştür. Bu işlemin gerçekleştirilme amacı CMAS camı yapısının oluşmasına katışı sağlamaktır.



Şekil 3. CMAS toz karışımının mekanik aktivasyondan önceki partikül boyut dağılımı analizi



Şekil 4. 2 saat süreyle mekanik aktivasyon uygulanan CMAS toz karışımının partikül boyut dağılımı analizi

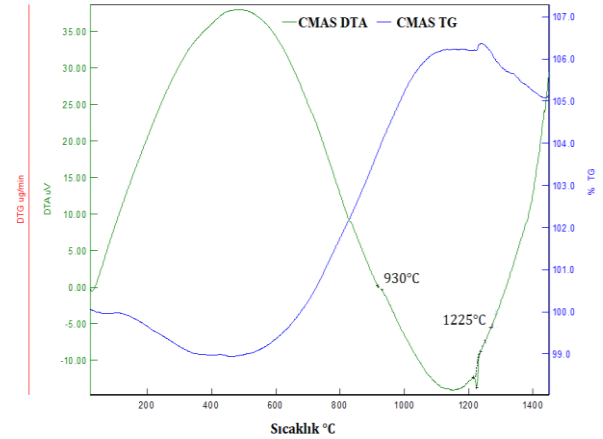
3.2. CMAS korozyon tozlarının TGA/DTA analizleri

CMAS korozyon tozları hassas terazi ile tartılarak yaklaşık 100 mg'lık peletler oluşturmak için 150 Mpa basınç altında preslenmişlerdir. Preslenen tozlar 1200°C sıcaklık altında atmosfere açık koşullarda 2 saat boyunca sinterleme işlemine tabii tutulmuşlardır. Pelet haline getirilen ve sinterlenen CMAS tozlarının makro görüntüleri Şekil 5' de verilmiştir.



Şekil 5. Pelet haline getirilen CMAS tozlarının görüntüsü a) Sinterleme öncesi b) Sinterleme sonrası üst, c) Sinterleme sonrası alt elde edilen görüntü

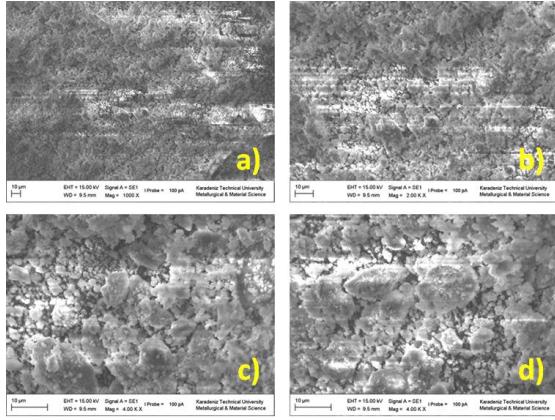
Sinterleme işleminin ardından ise, CMAS peletlerinin ergime ve camı geçiş sıcaklığının belirlenmesi için TGA/DTA analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, CMAS korozyon peletlerinin camı geçiş sıcaklığının yaklaşık 930°C iken ergime sıcaklığının ise yaklaşık 1225°C olduğu tespit edilmiştir. Gerçekleştirilen analiz sonuçları Şekil 6' da gösterilmektedir.



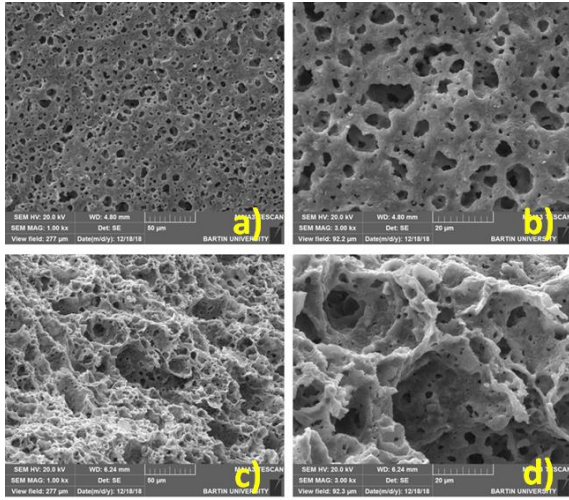
Şekil 6. CMAS korozyon tozlarının TGA/DTA analiz sonuçları

3.3. CMAS korozyon tozlarının SEM görüntüleri

Mekanik aktivasyon işlemine tabii tutulan CMAS tozlarının sinterleme işlemine tabii tutulmadan önce ve sonra SEM görüntüleri alınmıştır. Farklı büyütme oranlarında alınan SEM görüntüleri Şekil 7'de ve Şekil 8'de verilmiştir. Sinterleme yapılmadan önce tamamen birbirinden ayrı ve bağımsız olarak görünen CMAS tozları, sinterleme sonrasında birbirine bağlandığı görülmektedir. Tozların aralarındaki boşlukların kapandığı ve toz tanelerinin boyun vererek birbirine tutunduğu şekillerden açık bir şekilde görülmektedir. Sinterleme işleminin ardından korozyon tozlarının yoğunluğunun arttığı da düşünülmektedir.



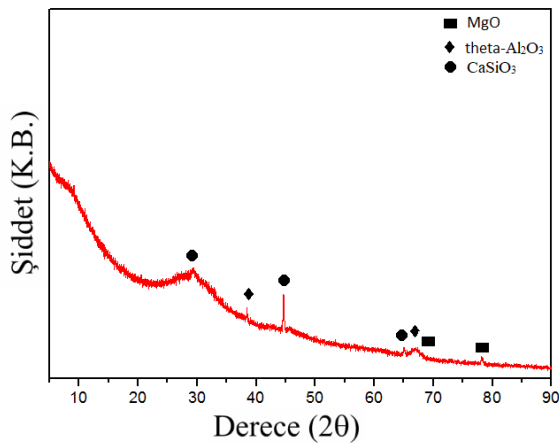
Şekil 7. Mekanik aktivasyon işlemine tabii tutulan CMAS tozlarının SEM görüntüsü



Şekil 8. Mekanik aktivasyon sonrası peletlenerek 1200 °C de sinterlenen CMAS tozlarının SEM görüntüsü

3.4. Mekanik aktivasyon işlemine tabii tutulan CMAS korozyon tozlarının XRD analizi

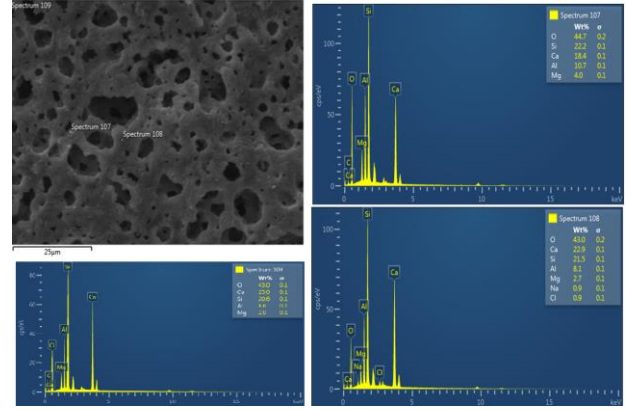
Bu işlem sürecinin ardından elde edilen toz numuneden alınan XRD sonucu Şekil 9’ da verilmiştir. Alınan sonuca göre yapı içerisinde bulunan tozlardan CaO ve SiO₂ CaSiO₃’e dönüşürken theta-Al₂O₃ ve MgO fazlarına rastlanmıştır. Ayrıca camsı yapının XRD analizinden açık bir şekilde görülmektedir.



Şekil 9. Mekanik alaşımlama işleminin ardından CMAS tozlarından elde edilen XRD sonuçları

3.5. CMAS korozyon tozlarının EDS analizi

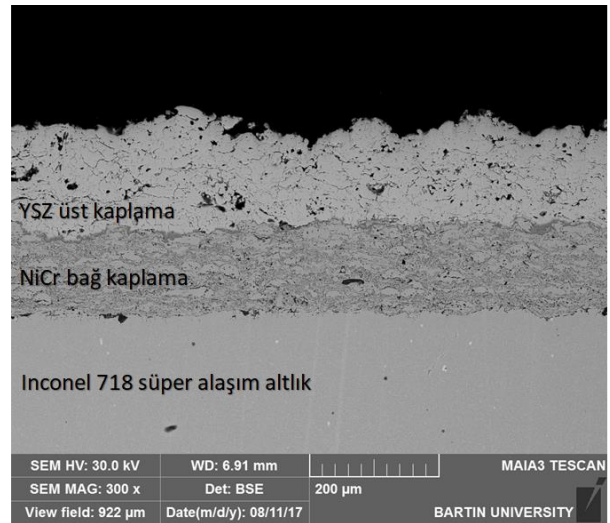
CMAS korozyon tozlarından elde edilen veriler Şekil 10’da verilmiştir. Yapılan nokta analizi ve alan analizlerinden tozların yapılarında değişiklik olduğu görülmüştür. Dahası EDS analizleri XRD analizleriyle desteklendiğinde faz yapılarının değiştiği görülmüştür.



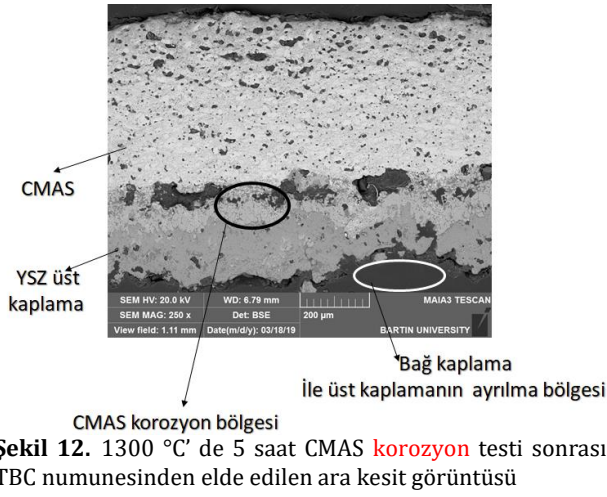
Şekil 10. Sinterleme sonrası CMAS tozlarından elde edilen EDS analizi sonuçları

3.6. CMAS korozyon testleri öncesinde ve sonrasında TBC numunelerinden alınan SEM ve elementel haritalama analizleri

CMAS korozyon tozları TBC numunelerinin üst yüzeyine koyularak yaklaşık olarak 1300°C’de 5 saatlik süre ile fırına verilmiştir. CMAS korozyon testinden önce elde edilen SEM ara yüzey görüntüsü Şekil 11’de verilmiştir. CMAS korozyon testinden sonra elde edilen SEM ara yüzey görüntüsü ise, Şekil 12’ de verilmiştir. Korozyon testinden sonra kaplama ara yüzeyinden belirgin bir şekilde ayrılma başlangıçlarının olduğu görülmektedir. Elementel dağılımı belirlemek için gerçekleştirilen korozyon testi öncesi gerçekleştirilen haritalama analizi Şekil 13’te, korozyon testi sonrası gerçekleştirilen haritalama analizi ise Şekil 14’te verilmiştir.

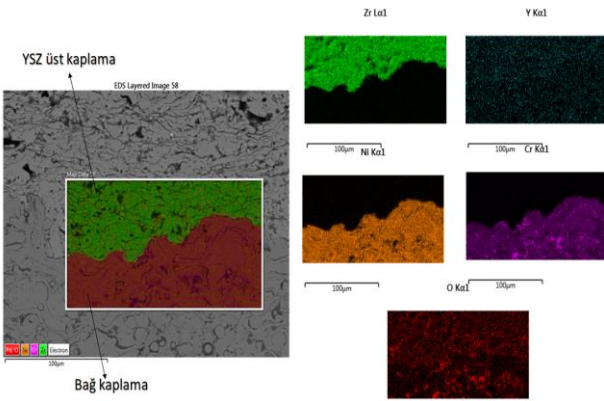


Şekil 11. TBC numunesine ait CMAS korozyon testi öncesi kesit görüntüsü

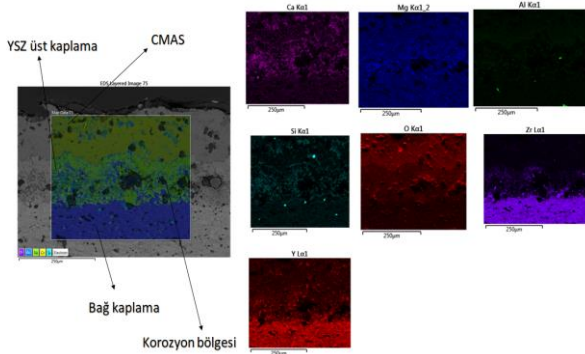


Şekil 12. 1300 °C' de 5 saat CMAS korozyon testi sonrası TBC numunesinden elde edilen ara kesit görüntüsü

Bu sonuçlara bakıldığında CMAS korozyonu için hazırlanmış olan toz karışımları ergiyerek TBC numunesinin üst yüzeyinde bulunan YSZ içerikli seramik üst kaplama ile reaksiyon oluşturmuş ve alt kısımlara doğru kaplama yüzeyindeki boşluklardan içeri sızmıştır.



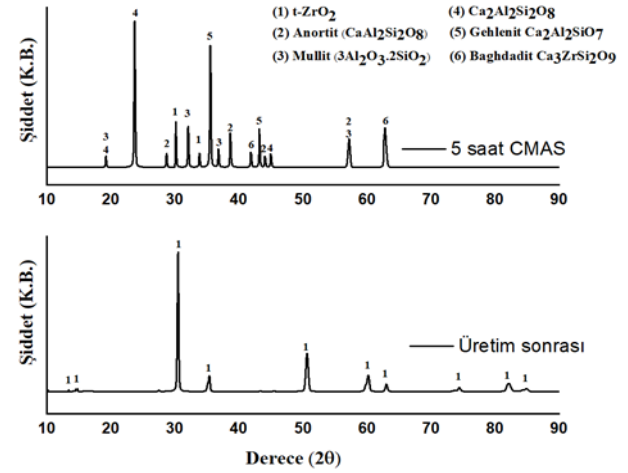
Şekil 13. TBC numunesine ait CMAS korozyon testi öncesi elementel haritalama analizi görüntüsü



Şekil 14. 1300 °C' de 5 saat CMAS testi sonrası TBC numunesinden elde edilen ara elementel haritalama analizi görüntüsü

CMAS korozyon testleri öncesinde ve sonrasında gerçekleştirilmiş olan XRD analizlerinin sonuçları Şekil 15' te verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, CMAS korozyon testi öncesinde tamamen tetragonal fazda stabil olan TBC sisteminde, CMAS korozyon testi

sonrasında anortit, mullit, Ca₂Al₂Si₂O₈, gehlenit ve bagdadit fazları görülmüştür [31,32].



Şekil 15. CMAS testi öncesi ve sonrasında TBC numunesinden elde edilen XRD analizi

4. Tartışma ve Sonuç

Uçak motorlarının verimliliğini arttırmak ve yakıt tüketimini azaltmak için türbinlerin çalışma sıcaklığını arttırmaya yönelik birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Schulz ve Braue [33] laboratuvar ortamında %33,2 CaO, %6,5 MgO, %11,8 Al₂O₃ ve %48,5 SiO₂ içeren yapay CMAS korozyon tozu ve İzlanda volkanik külü etkisi altında 1260 °C'de, farklı nadir toprak elementlerini içeren TBC numuneleri üzerinde meydana gelen hasar mekanizmasını incelemişlerdir. 2 saat boyunca devam eden testlerde incelenen tüm zirkonyum esaslı kaplamaların kolonsal boşlukları ergimiş tortular tarafından doldurulurken zirkonatlarla tam olarak tıkanmayı önleyen kristalli reaksiyon ürünleri oluşturmuştur. Benzer etkiler bizim çalışmamızda da görülmüştür. Mercer ve diğerleri [34] CMAS'ın nüfuz ettiği tabakaların özelliklerini incelemiş ve TBC'lerin bozulmalarının yüzeye bağlantılı olan dikey çatlaklar tarafından başladığını, ergimiş CMAS'ın sistem içerisine tamamen sızdığını ve TBC'ler de ki dökülmelerin ani soğumalardan meydana geldiğini anlamışlardır. Sistem soğuduktan sonra, CMAS katılarak düzlem içinde sert bir tabaka meydana getirmiştir. Bu nedenle yüzeye yakın bu bölgelerde büyük çekme gerilmeleri meydana gelmiştir. Çekme gerilmeleri ise yüzeye paralel uzanan dökülmelerde açığa çıkmıştır. Dökülmelerin oluşturduğu çatlaklar ise, CMAS'ın ergime sıcaklığının üzerindeki koşullarda tekrar CMAS eriyiği tarafından doldurulmuştur. Bu çalışmada, Inconel 718 süper alaşım altlık malzeme üzerine APS yöntemi kullanılarak NiCr bağ ve YSZ üst kaplamaların üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen TBC numunelerinin CMAS testlerinin gerçekleştirilebilmesi için laboratuvar ortamında içeriği CaO, MgO, Al₂O₃ ve SiO₂ olan tozlar farklı oranlarda karıştırılarak mekanik alaşım işlemine tabi tutulmuştur. CMAS camı yapısı oluşturularak

TBC numunelerine tatbik edilmiştir. Elde edilen sonuçlar maddeler halinde aşağıda sıralanmıştır.

- Geleneksel TBC üretim yöntemlerinden olan APS yöntemi TBC numunelerinin üretiminde başarılı bir şekilde uygulanarak YSZ üst kaplamaya ve NiCr bağ kaplamaya sahip numuneler üretilmiştir.
- Korozyon testi öncesinde TBC numunelerinde APS yönteminin karakteristik özelliği olan laminer yapı görülmektedir.
- 5 saatlik 1300 °C' de gerçekleştirilen CMAS deneyi neticesinde TBC numunesi tamamen termo-mekanik bir hasara uğramış bağ kaplama ve üst kaplama birbirinden ayrılmıştır.
- CMAS korozyon tozları TBC numunesinin üst kaplaması olan YSZ ile reaksiyona girerek üst yüzeyde sintirlenmiş ve gerilmeye sebep olmuştur. Gerçekleştirilen elementel haritalama analizleri CMAS korozyon tozlarının üst kaplama ile etkileşimde olduğu göstermektedir.
- CMAS korozyon testi için kullanılan 1 mg'lık peletler reaksiyonun oluşması için oldukça yeterli bir miktardır.
- CMAS korozyon tozları, APS yöntemindeki laminer ve boşluklu yapıdaki boşlukların arasına sızarak sistemin faz yapısında değişikliğe neden olmuş, tetragonal fazda stabil olan üst kaplamada anortit, mullit, Ca₂Al₂Si₂O₈, gehlenit ve bagdadit fazları TBC'lerin yalıtım özelliklerini ve genim toleransını azaltarak oldukça ciddi hasara sebep olmuştur.

Teşekkür

Bu araştırma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu tarafından (TÜBİTAK) 1919B011803507 başvuru numaralı, 2209-A proje kodu ile mali olarak desteklenmiştir.

Etik Beyanı

Bu çalışmada, "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin "Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler" başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

Kaynakça

- [1] Wu, J., bo Guo, H., zhi Gao, Y., kai Gong, S. 2011. Microstructure and thermo-physical properties of yttria stabilized zirconia coatings with CMAS deposits. Journal of the European Ceramic Society, 31, 1881-1888.
- [2] Gok, M. G., Goller, G. 2017. Microstructural characterization of GZ/CYSZ thermal barrier

coatings after thermal shock and CMAS+hot corrosion test. Journal of the European Ceramic Society, 37, 2501-2508.

- [3] Peng, H., Wang, L., Guo, L., Miao, W., Guo, H. Gong, S. 2012. Degradation of EB-PVD thermal barrier coatings caused by CMAS deposits. Progress in Natural Science: Materials International, 22, 461-467.
- [4] Karaoglanli, A. C., Altuncu, E., Ozdemir, I., Turk, A. Ustel, F. 2011. Structure and durability evaluation of YSZ+Al₂O₃ composite TBCs with APS and HVOF bond coats under thermal cycling conditions. Surface and Coatings Technology, 205, 369-373.
- [5] Daroonparvar, M. Yajid, M. A. M., Yusof, N. M., Bakhsheshi-Rad, H. R., Hamzah, E., Nazoktabar, M. 2014. Investigation of three steps of hot corrosion process in Y₂O₃ stabilized ZrO₂ coatings including nano zones. Journal of Rare Earths, 32, 989-1002.
- [6] Yugeswaran, S., Kobayashi, A., Ananthapadmanabhan, P. V. 2012. Initial phase hot corrosion mechanism of gas tunnel type plasma sprayed thermal barrier coatings. Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology, 177, 536-542.
- [7] Li, S., Liu, Z. G., Ouyang, J. H. 2013. Growth of YbVO₄ crystals evolved from hot corrosion reactions of Yb₂Zr₂O₇ against V₂O₅ and Na₂SO₄ + V₂O₅. Applied Surface Science, 276, 653-659.
- [8] Karaoglanlı, A. C. 2012. Termal bariyer kaplamalarda bağ tabakasının farklı yöntemlerle üretilmesi ve özelliklere etkisi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- [9] Mobarra, R., Jafari, A. H., Karaminezhad, M. 2006. Hot corrosion behavior of MCrAlY coatings on IN738LC. Surface and Coatings Technology, 201, 2202-2207.
- [10] Young, D. 2015. High Temperature Oxidation and Corrosion of Metals.
- [11] Mifune, N., Harada, Y., Doi, T., Yamasaki, R. 2004. Hot-corrosion behavior of graded thermal barrier coatings formed by plasma-spraying process. Journal of Thermal Spray Technology, 13, 561-569.
- [12] Ozgurluk, Y., Doleker, K. M., Ahlatci, H., Ozkan, D. Karaoglanli, A. C. 2018. The microstructural investigation of vermiculite-infiltrated electron beam physical vapor deposition thermal barrier coatings. Open Chemistry, 16, 1106-1110.
- [13] Huang, X. 2008. Functions of Thermal Barrier Coatings.
- [14] Padmavathi, C., Upadhyaya, A., Agrawal, D. 2007.

- Corrosion behavior of microwave-sintered austenitic stainless steel composites. *Scripta Materialia*, 57, 651–654.
- [15] Zhou, X., Zou, B., He, L., Xu, Z., Xu, J., Mu, R., Cao, X. 2015. Hot corrosion behaviour of La₂(Zr_{0.7}Ce_{0.3})₂O₇ thermal barrier coating ceramics exposed to molten calcium magnesium aluminosilicate at different temperatures. *Corrosion Science*, 100, 566–578.
- [16] Levi, C. G., Hutchinson, J. W., Vidal-Sétif, M. H., Johnson, C. A. 2012. Environmental degradation of thermal-barrier coatings by molten deposits. *MRS Bulletin*, 37, 932–941.
- [17] Wang, X., Guo, L., Peng, H., Zheng, L., Guo, H. Gong, S. 2015. Hot-corrosion behavior of a La₂Ce₂O₇/YSZ thermal barrier coating exposed to Na₂SO₄+V₂O₅ or V₂O₅ salt at 900 °C. *Ceramics International*, 41, 6604–6609.
- [18] Xie, D., Xiong, X., Wang, F. 2003. Effect of an Enamel Coating on the Oxidation and Hot Corrosion Behavior of an HVOF-Sprayed Co–Ni–Cr–Al–Y Coating. *Oxidation of Metals*, 59, 503–516.
- [19] Jiang, S. M., Li, H. Q., Ma, J., Xu, C. Z., Gong, J., Sun, C. 2010. High temperature corrosion behaviour of a gradient NiCoCrAlYSi coating II: Oxidation and hot corrosion. *Corrosion Science*, 52, 2316–2322.
- [20] Pulci, G., Tirillò, J., Marra, F., Sarasini, F. Bellucci, A., Valente, T., Bartuli, C. 2015. High temperature oxidation of MCrAlY coatings modified by Al₂O₃ PVD overlay. *Surface and Coatings Technology*, 268, 198–204.
- [21] Ahlborg, N. L., Zhu, D. 2013. Calcium-magnesium aluminosilicate (CMAS) reactions and degradation mechanisms of advanced environmental barrier coatings. *Surface and Coatings Technology*, 237, 79–87.
- [22] Gavendová, P., Čížek, J., Čupera, J., Hasegawa, M., Dlouhý, I. 2016. Microstructure Modification of CGDS and HVOF Sprayed CoNiCrAlY Bond Coat Remelted by Electron Beam. *Procedia Materials Science*, 12, 89–94.
- [23] Bonadei, A., Marrocco, T. 2014. Cold sprayed MCrAlY+X coating for gas turbine blades and vanes. *Surface and Coatings Technology*, 242, 200–206.
- [24] Saruhan, B., Schulz, U., Bartsch, M. 2007. Developments in processing of ceramic top coats of EB-PVD thermal barrier coatings. *Key Engineering Materials*, 137–146.
- [25] Smialek, J. L. 1991. The Chemistry of Saudi Arabian Sand: A Deposition Problem on Helicopter Turbine Airfoils.
- [26] Krämer, S., Yang, J., Levi, C.G. 2008. Infiltration-inhibiting reaction of gadolinium zirconate thermal barrier coatings with CMAS melts. *Journal of the American Ceramic Society*, 91, 576–583.
- [27] Krämer, S., Faulhaber, S., Chambers, M., Clarke, D. R., Levi, C. G., Hutchinson, J. W., Evans, A. G. 2008. Mechanisms of cracking and delamination within thick thermal barrier systems in aero-engines subject to calcium-magnesium-alumino-silicate (CMAS) penetration. *Materials Science and Engineering A*, 490, 26–35.
- [28] Li, L., Hitchman, N., Knapp, J. 2010. Failure of thermal barrier coatings subjected to CMAS attack. *Journal of Thermal Spray Technology*, Springer, 148–155.
- [29] Guo, L., Yan, Z., Yu, Y. Yang, J., Li, M. 2019. CMAS resistance characteristics of LaPO₄/YSZ thermal barrier coatings at 1250°C–1350°C. *Corrosion Science*, 154, 111–122.
- [30] Stott, F. H., De Wet, D. J., Taylor, R. 1994. Degradation of Thermal-Barrier Coatings at Very High Temperatures. *MRS Bulletin*, 19, 46–49.
- [31] Ozgurluk, Y., Karaoglanli, A. C., Ahlatci, H. (2021). Comparison of calcium–magnesium–alumina–silicate (CMAS) resistance behavior of produced with electron beam physical vapor deposition (EB-PVD) method YSZ and Gd₂Zr₂O₇/YSZ thermal barrier coatings systems. *Vacuum*, 110576.
- [32] Ozgurluk, Y., Doleker, K. M., Ahlatci, H., Karaoglanli, A. C. (2021). Investigation of calcium–magnesium–alumino–silicate (CMAS) resistance and hot corrosion behavior of YSZ and La₂Zr₂O₇/YSZ thermal barrier coatings (TBCs) produced with CGDS method. *Surface and Coatings Technology*, 411, 126969.
- [33] Schulz, U., Braue, W. 2013. Degradation of La₂Zr₂O₇ and other novel EB-PVD thermal barrier coatings by CMAS (CaO–MgO–Al₂O₃–SiO₂) and volcanic ash deposits. *Surface and Coatings Technology*, 235, 165–173.
- [34] Mercer, C. Faulhaber S., Evans, A. G. Darolia, R. A. 2005. delamination mechanism for thermal barrier coatings subject to calcium-magnesium-alumino-silicate (CMAS) infiltration. *Acta Materialia*, 53, 1029–1039.