



**Makale / Research Paper**

**ZrO<sub>2</sub>-5%CaO Termal Bariyer Kaplama (TBC) Sisteminin Sıcak Korozyon Direnci**

**Kadir Mert DÖLEKER\***

Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 55139  
Samsun/TÜRKİYE

<sup>a</sup>[mertdoleker@gmail.com](mailto:mertdoleker@gmail.com)

**Received/Geliş:** 10.02.2020

**Accepted/Kabul:** 11.05.2020

**Öz:** Termal bariyer kaplamalar (TBCs), yüksek sıcaklık koşullarında metalik altlık malzemeleri termal ve korozyon koruma sağlamaktadır. İş parçalarının sıcak bölüm bileşenlerine uygulanan TBC sistemleri oksidasyon ve sıcak korozyon hasarlarına maruz kalmaktadır. Özellikle sıcak korozyon, oksidasyona nazaran daha erken yıpratıcı hasarlara neden olmaktadır. Bu çalışmada, NiCoCrAlY tozları, yüksek hız oksijen yakıtı (HVOF) tekniği kullanılarak 316L paslanmaz çelik altlık malzeme üzerine püskürtülmüştür. Kalsiyum ile stabilize zirkonya (ZrO<sub>2</sub>-5% CaO, CSZ), bağ kaplaması üretilmiş altlıklar üzerine üst kaplama malzemesi olarak atmosferik plazma sprey tekniği (APS) ile biriktirilmiştir. Üretilen TBC sistemi, 900 ° C' de % 50 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>- %50 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> karışımı ile 25 saatlik çevrimli sıcak korozyon testlerine tabi tutulmuştur. Sıcak korozyon testlerinin sonunda, CaO' nun sıcak korozyon tuzları ile reaksiyona girmesi sonucu üst kaplamada faz dönüşümü meydana gelmiştir. Ergiyik korozyon tuzlarının üst kaplama boyunca penetre olduğu fakat kaplamaya bu test koşullarında henüz ciddi bir zarar vermediği görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** Sıcak korozyon; Termal bariyer kaplama (TBC); CaO-ZrO<sub>2</sub>; V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; Ergimiş tuz

**Hot Corrosion Resistance of ZrO<sub>2</sub>-5%CaO Thermal Barrier Coating (TBC) System**

**Abstract:** Thermal barrier coatings (TBCs) provide thermal and corrosive protection to metallic substrate materials under high temperature conditions. TBC systems applied to hot part components of workpieces are exposed to oxidation and hot corrosion damage. Hot corrosion, in particular, causes destructive damage earlier than oxidation. In this study, NiCoCrAlY powders were sprayed on 316L stainless steel substrate material using High Velocity Oxygen Fuel (HVOF) technique. Calcium-stabilized zirconia (ZrO<sub>2</sub>-5% CaO, CSZ) was deposited as a top coating material by the atmospheric plasma spray technique (APS) on the substrate with the bond coat. The produced TBC system was subjected to 25 hours cyclic hot corrosion tests with a mixture of 50% V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>- 50% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> at 900 °C. At the end of the hot corrosion tests, as a result of the reaction of CaO with hot corrosion salts, phase transformation has occurred in the top coating. It has been found that the molten corrosion salts penetrate through the top coating, but have not yet seriously damaged the coating under these test conditions.

**Keywords:** Hot corrosion; Thermal barrier coating (TBC); CaO-ZrO<sub>2</sub>; V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; Molten salt.

**1. Giriş**

Yüksek sıcaklık altında çalışan metalik malzemeler hızlı şekilde oksidasyona ve korozyona uğramaktadırlar. Yüksek sıcaklık etkisini ve bu koşullarda meydana gelecek korozyona karşı önlem amacıyla termal bariyer kaplamalar (TBC) kullanılmaktadır [1].

*Bu makaleye atıf yapmak için*

Döleker, K. M. "ZrO<sub>2</sub>-5%CaO Termal Bariyer Kaplama (TBC) Sisteminin Sıcak Korozyon Direnci" El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi 2020, 7 (2); 628-638

*How to cite this article*

Döleker, K. M. "Hot Corrosion Resistance of ZrO<sub>2</sub>-5%CaO Thermal Barrier Coating (TBC) System" El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2020, 7 (2); 628-638.

Bir termal bariyer kaplama sistemi üç farklı tabakadan meydana gelmektedir. İlk tabaka altlık malzemedir. Altlık malzeme olarak kullanım koşullarına göre farklı grup alaşımlar seçilebilir. Yaygın olarak gaz türbinlerinde TBC sistemleri kullanıldıklarından dolayı, burada hem mekanik hem de üstün korozif özellikleri açısından nikel esaslı süper alaşımlar özellikle tercih edilmektedir [2]. Bunun yanında yüksek sıcaklık korozif ortamında çalışan paslanmaz çelik malzeme grupları da tercih edilmektedir [3]. İkinci tabaka metalik bağ kaplamadan oluşmaktadır. Bağ kaplama TBC sisteminde büyük önem arz etmektedir. Çünkü bu tabaka atlıktan önce oksitlenmekte ve penetre olan korozyon ürünlerine karşı direnç göstermelidir. Bunun yanında üst kaplama ve altlık arasındaki adezyon ve termal genleşme uyumsuzluğunu da yine bu tabaka minimize etmektedir. Bu kapsamda en yaygın kullanılan bağ kaplama malzemesi MCrAlY (M= Ni, Co veya ikili kombinasyonları) tipi tozlardır. Seçici olarak alüminyumun oksitlenmesi ile alümina oluşumu sağlamasından ötürü özellikle tercih edilmektedir. Üçüncü tabaka ise üst seramik kaplama tabakasıdır. Burada çok yaygın şekilde (itriya, magnezya, kalsiya vb. oksitlerle) stabilize edilmiş zirkonya malzeme grubu tercih edilmektedir. Çünkü bu malzeme gruplarının kırılma toklukları yüksek, ısıl iletkenlikleri düşük ve termal genleşme katsayı değerleri diğer seramiklere nazaran oldukça yüksektir [4-6].

Korozyon malzemelerin çevre koşullarına bağlı olarak tükenmesine sebep olan ve kaçınılmaz olan bir kimyasal hasardır [7,8]. Yüksek sıcaklık uygulamalarında ise sıcak korozyon etkin olarak karşılaşılan bir hasar türüdür. Sıcak korozyona karşı alınan en önemli tedbirlerden biride termal bariyer kaplama kullanımınıdır. Çünkü sıcak korozyon metalik malzemeler hızlı şekilde etkileşime girerek metalik malzemede ciddi kütle kaybına sebep olmaktadır. Sıcak korozyonda genellikle Na, K, S, Cl ve V gibi yakıt kirlilikleri veya çalışma ortamından kaynaklı bulunabilen bu elementlerin bileşiklerinin etkileşimi ile meydana gelmektedir. Sıcak korozyon tip 1 ve tip 2 olarak iki şekilde incelenmektedir. Tip 1 sıcak korozyonu yüksek sıcaklık korozyonu olarak adlandırılırken yaklaşık 850-900 °C ve üzerindeki sıcaklıklarda meydana gelmektedir. Tip 2 sıcak korozyonu ise düşük sıcaklık korozyonu olarak adlandırılmakta ve yaklaşık 600-750 °C civarlarında meydana gelmektedir [9,10]. Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> gibi bileşiklerin reaksiyonu neticesinde NaVO<sub>3</sub> fazı oluşarak daha düşük ergime sıcaklıklı (yaklaşık 610 °C) bir bileşik meydana gelmektedir. Meydana gelen bu bileşik eriyerek mevcut oksitlerle reaksiyona girerek malzemenin korozyonuna sebep olmaktadır [11]. Literatürde yapılan çalışmalarda NaVO<sub>3</sub>ileitriya ile stabilize zirkonya (YSZ) ve Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>reaksiyona girerek YVO<sub>4</sub>ve GdVO<sub>4</sub> gibi korozyon ürünleri meydana getirmiş ve bunun neticesinde kaplamalarda hasarlar meydana gelmiştir [12-14].

Bu çalışmada kalsiyum oksit ile kısmi stabilize edilmiş zirkonyanın (CSZ) sıcak korozyon davranışı 900 °C sıcaklıkta 5' er saatlik çevrimlerle toplam 25 saat sodyum sülfat ve vanadyum pentaoksit tuzları kaplama yüzeyine tatbik edilerek incelenmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda üçüncü çevrimden sonra mevcut kalsiyum oksitlerin reaksiyona girdiği ve zirkonyum-vanadyum esaslı oksitlerin korozyon ürünü olarak meydana geldiği tespit edilmiştir.

## 2. Deneysel Çalışma

Üretilen TBC sistemlerinde altlık malzeme olarak ticari olarak temin edilmiş 25 mm çapında ve 5 mm kalınlığında silindirik 316L paslanmaz çelik malzeme dörde bölünerek tek parçası kullanılmıştır. Altlık malzeme yaklaşık 40 µm çaplı alümina bilyelerle, 2,5 barlık bir basınçla kumlama işlemine tabi tutularak yüzeydeki mevcut kirlilikler ve oksitlerin uzaklaştırılması amaçlanmış bunun yanında metalik bağ kaplama işlemi öncesi numune altlık yüzey alanı pürüzlendirilerek artırılmıştır. Kumlama işlemi tamamlanmış numuneler üzerine 5-45 µm ebatlarında Amdry 365-1 marka ticari NiCoCrAlY tozları, HVOF tekniği ile püskürtülmüştür. Termal bariyer kaplama olarak ise Metco 201NS marka ZrO<sub>2</sub>-%5CaO (CSZ) tozları ise Metco MCN marka kontrol üniteli atmosferik plasma sprey (APS) tekniği kullanılarak biriktirilmiştir. Kaplama üretim parametreleri Tablo 1' de verilmiştir.

Tablo 1. Bağ ve üst kaplama üretim parametreleri

Kaplama	Yanma gazları		Toz taşıyıcı gaz	Toz besleme oranı		Kaplama mesafesi	
NiCoCrAlY	O <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub>		N <sub>2</sub>	12,5 l/dk		250 mm	
Kaplama	Güç	Akım	Toz besleme oranı	Gaz akış oranı	Ar basıncı	H <sub>2</sub> basıncı	Kaplama mesafesi
CSZ	40 kW	650 A	20 g/dk	4,25 l/dk	80 psi	15 psi	120 mm

Üretilen numuneler sıcak korozyon testlerine tabi tutulmuştur. Sıcak korozyon tuzu olarak %99 üzerinde saflıkta ağırlıkça %50 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve %50 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, yaklaşık olarak 2 saat mekanik olarak karıştırılmıştır. Hazırlanan karışım numunenin kenarlarından yaklaşık 2-3 mm uzaklıkta olacak şekilde üst yüzeyine 10 mg/cm<sup>2</sup>lik birimle serilmiştir. Sıcak korozyon testleri Protherm PLF130/20 marka elektrik fırında 900 °C’ de 5 saatlik çevrimlerle toplamda 5 çevrim yani 25 saat olarak gerçekleştirilmiştir. Sürenin 5 çevrim olması altlıkta meydana gelecek ileri oksidasyon veya üst kaplamada %10 un üzerinde görsel bir çatlak oluşması baz alınarak belirlenmiştir. Testleri sonrası üst kaplamada ufak çatlamlar oluşsa da testin bu sürede sonlandırılma sebebi altlık malzemenin fazla oksitlenmesinden kaynaklıdır.

Sıcak korozyon testleri sonrası numunelerin üst yüzey görüntüleri Nikon Shuttle Pix P-400R marka stereo mikroskop cihazı ile alınmıştır. Sıcak korozyon testi öncesi ve her çevrim sonrası numunelerin faz analizleri için Rigaku Dmax 2200 PC marka cihaz yardımı ile XRD (X-ışını kırınımı) paternleri alınmıştır. Ayrıca her çevrim sonrası numune üst yüzeylerinden ve son çevrim sonrası da hem üst hem de enine kesit yüzeyinden Tescan, MAIA3 XMU marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile görüntüleri alınmıştır. Ayrıca yine her çevrim sonrası üst yüzeylerden enerji dağılımlı spektrum (EDS) ve enine kesitlerden de elementel haritalama görüntüleri SEM cihazında alınarak malzemeler korozyon testi öncesi ve sonrası karakterizasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir.

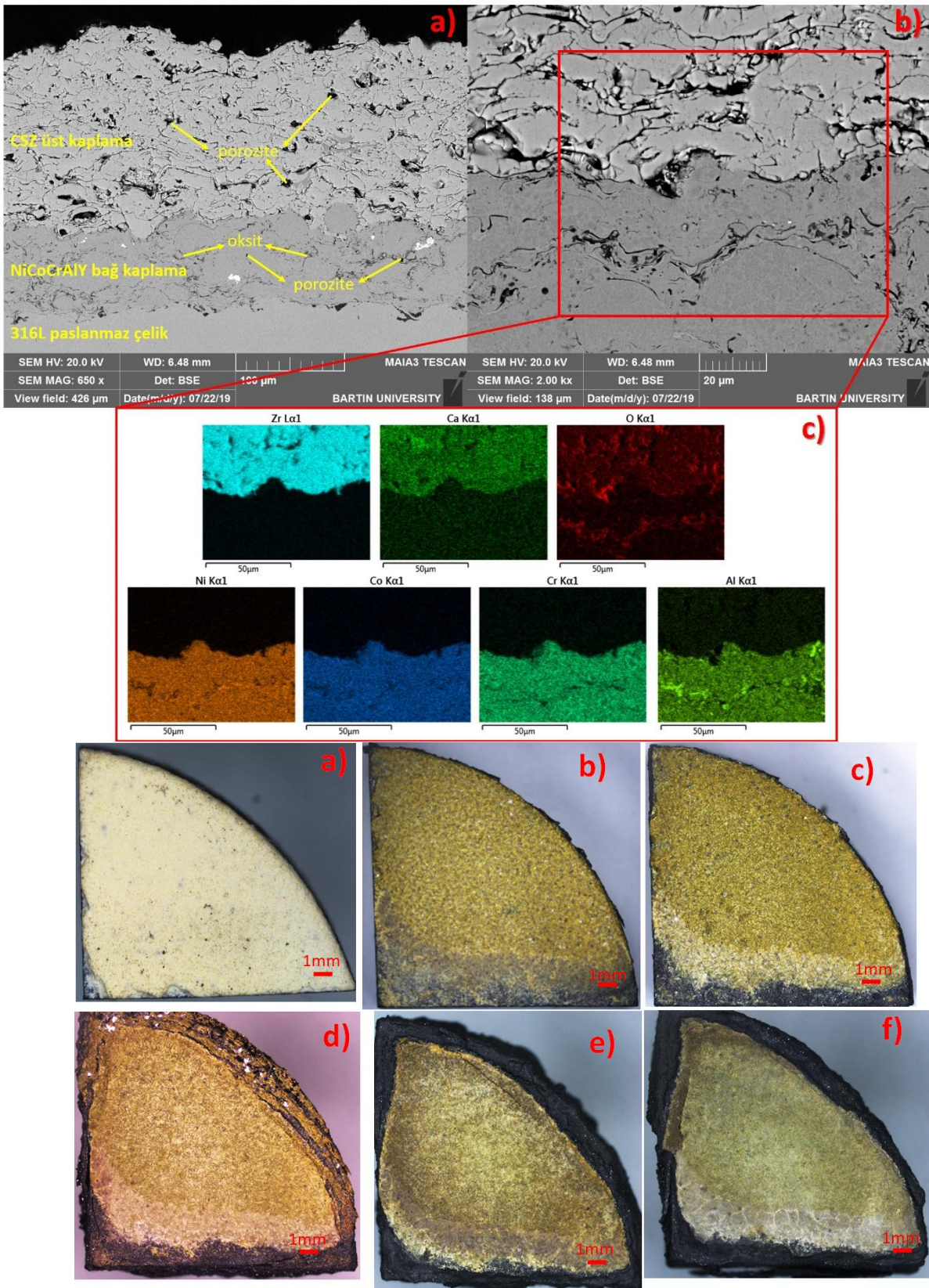
### 3. Bulgular ve Tartışma

Şekil 1’ de sıcak korozyon testi öncesi ve her çevrim sonrası üst yüzey makro görüntüleri bulunmaktadır. Şekilde görüldüğü üzere numunelerde korozyon tuzları etkisiyle sararma meydana gelmiştir. Ayrıca numunelerin alt yüzeylerinde kırılma ve ayrılmaların meydana geldiği görülmektedir. Korozyon tuzları iç kesimlere serilerek testler yapılmış olsa da bu ayrılmalar kenar etkisinden kaynaklanmaktadır [15,16]. İlerleyen süreçte malzemede renk değişimlerinin yanı sıra yan yüzeylerinde altlık malzemenin fazla oksitlenmesinden ötürü şekilsiz büyümelerin meydana geldiği görülmektedir. Buralarda reaksiyonlar neticesinde açığa çıkan SO<sub>2</sub> ve SO<sub>3</sub> gibi gazların da etkisinin olabileceği düşünülmektedir.

Şekil 2’ de üretilen TBC sistemine ait enine kesit SEM ve elementel haritalama görüntüsü bulunmaktadır. Bağ kaplamanın yaklaşık 80-100 µm kalınlığa sahip olduğu görülürken, üst kaplamanın ise 250 µm dolaylarında kalınlığa sahiptir. Bağ kaplamada üretim prosesi kaynaklı dahili oksitlerin meydana geldiği görülürken, üst kaplamada da yine proses kaynaklı süresiz açıklıklar ve porozitelerin meydana geldiği görülmektedir. Elementel haritalama görüntüsünde bağ kaplama ve üst kaplama elementlerinin homojen olarak yapı içerisinde dağıldığı anlaşılırken, oksijen izleri takip edildiğinde bağ kaplamada dahili oksit oluşumlarının baskın olarak alüminadan oluştuğu anlaşılmaktadır.

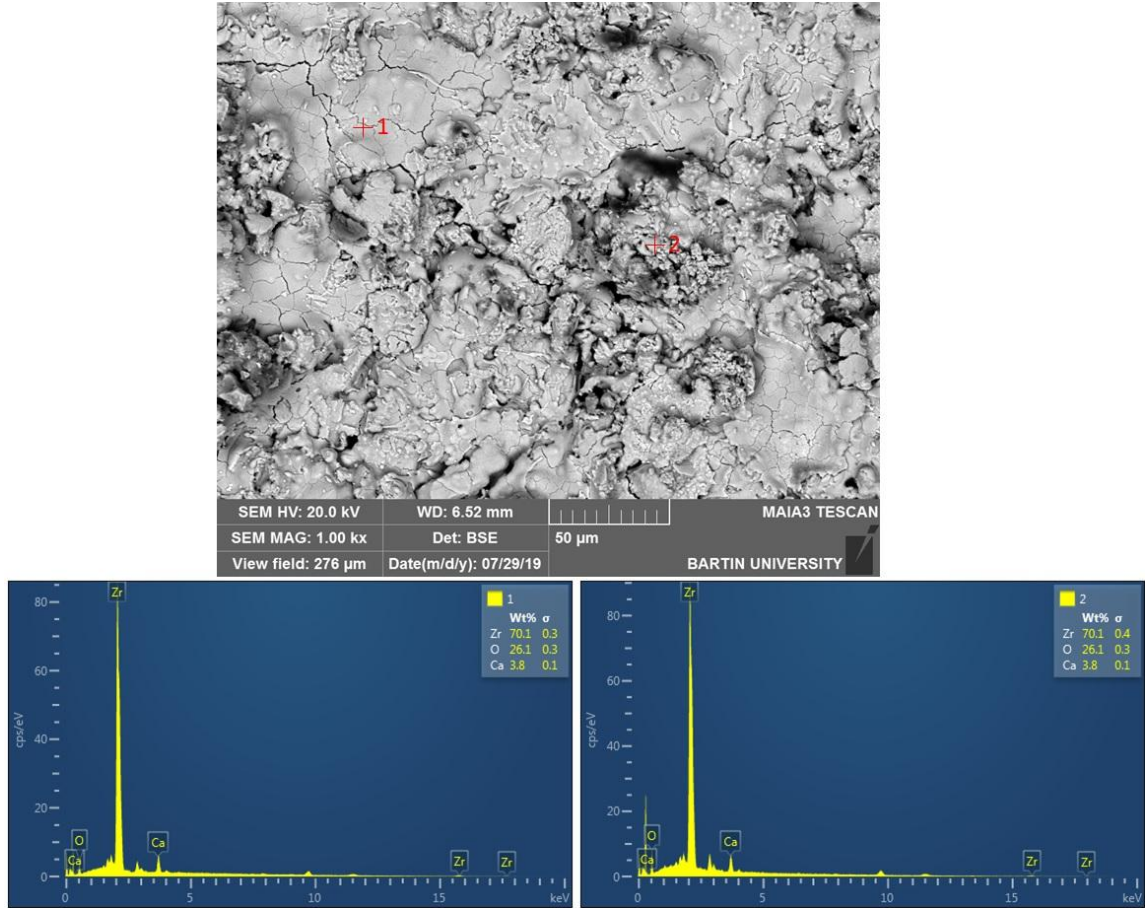
Şekil 2. Üretilmiş TBC sistemine ait a) enine kesit SEM, b) büyütülmüş bağ/üst kaplama ara yüzey SEM ve c) ara yüzeyden alınan elementel haritalama görüntüsü Şekil 3’ te üretilen TBC sisteminin üst yüzeyinden alınan SEM görüntüsü ve EDS analiz sonuçları verilmiştir.





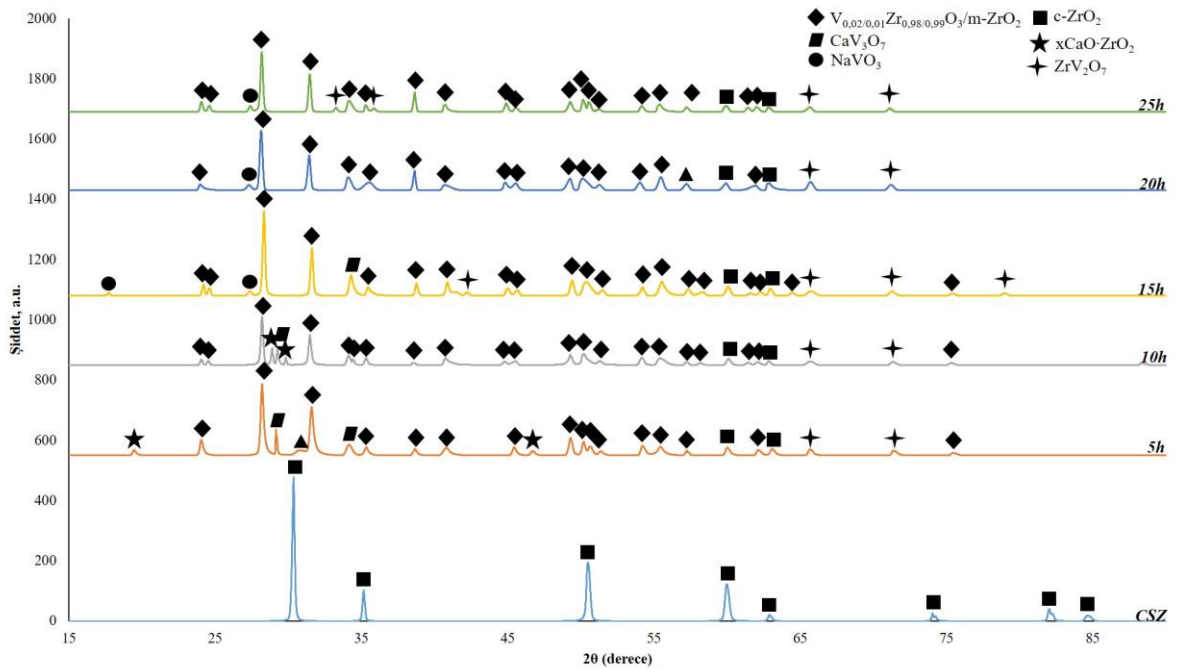
Şekil 1. Numunelerin a) sıcak korozyon testi öncesi, b)5 c)10, d)15, e)20 ve f)25 saat sıcak korozyon çevrimleri sonrası 20x büyütmede üst yüzey makroskobik stereo mikroskop görüntüleri

Alınan birinci spektrum bölgesinde ergimenin tam meydana geldiği ve Zr, Ca ve O elementlerinden meydana geldiği görülürken, ikinci spektrum bölgesinde aynı elementlere rastlanmış ve bu bölgeler tam ergimenin olmadığı yerler olarak tanımlanabilir.



Şekil 3. TBC sisteminin üst yüzey bölgesinden alınan SEM görüntüsü ve EDS analizleri

Sıcak korozyon testlerinin ardından alınan XRD analizleri her çevrim için ayrı ayrı Şekil 4’ te üst üste verilmiştir. İşlem görmemiş numune tamamıyla kübik (c)-ZrO<sub>2</sub> fazından meydana geldiği anlaşılmaktadır. Bu faz kübik florit yapılıdır ve normalde oda koşullarında monoklinik yapı da olan zirkonyanın bu formda olmasını az miktarda CaO ilavesi sağlamıştır [17].

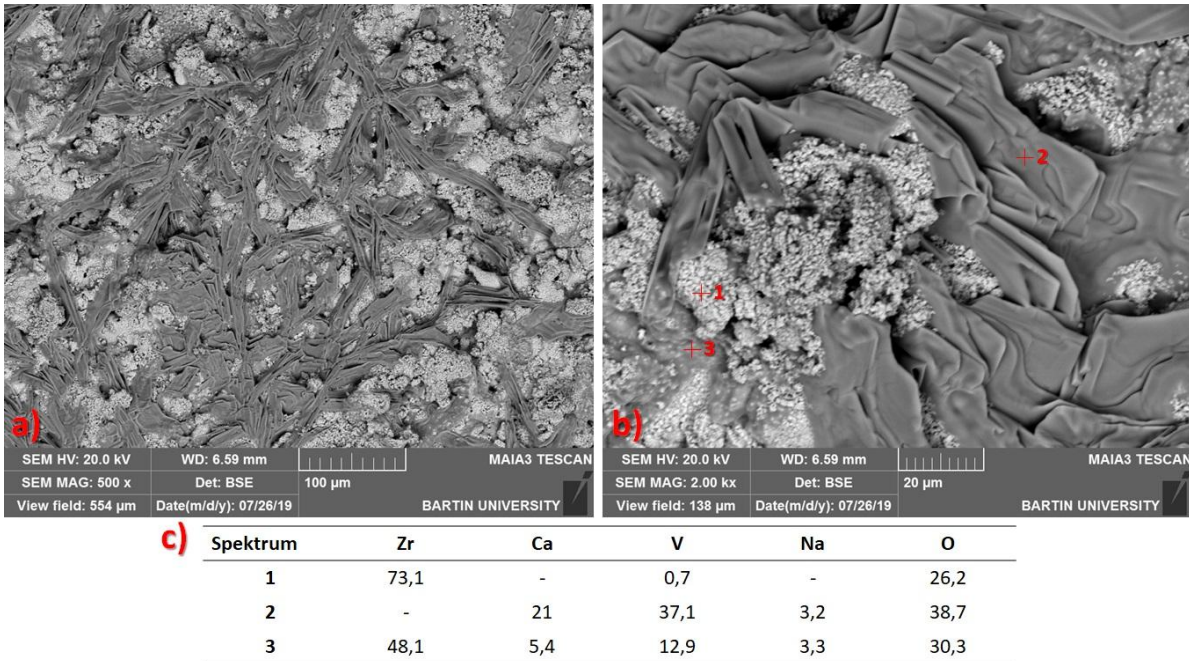


Şekil 4. Sıcak korozyon testi öncesi ve sonrası alınan XRD paternleri



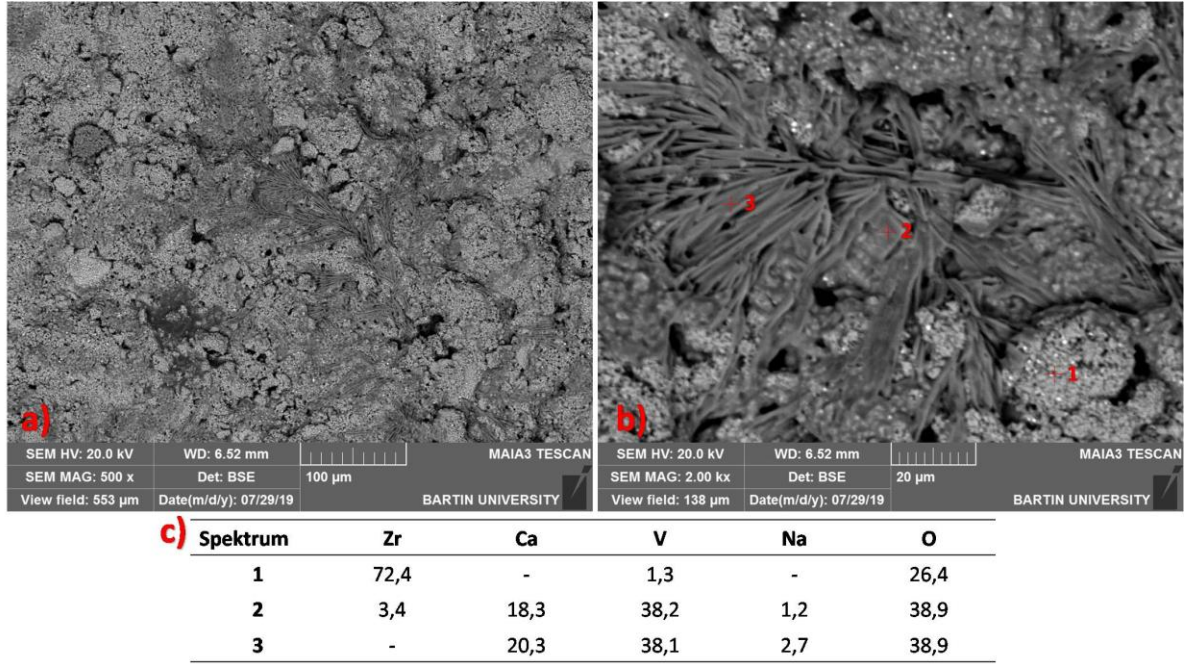
Sıcak korozyon çevrimleri sonrası ise c-ZrO<sub>2</sub> fazlarının m-ZrO<sub>2</sub> fazına dönüştüğü veya sodyum vanadat (NaVO<sub>3</sub>) tuzu ile girdiği reaksiyon neticesinde yine monoklinik yapıları V<sub>0,02/0,01</sub>Zr<sub>0,98/0,99</sub>O<sub>7</sub> fazlarının oluştuğu anlaşılmaktadır. Burada oluşan fazların ayırımı yapmak oldukça zordur, o nedenle XRD analiz sonucunda 3 farklı fazında oluşmuş olabileceği pik sembollerinde gösterilmiştir. Artan çevrim sayısı ile Ca içerikli ürünlerin azaldığı Zr ve V içerikli piklerin arttığı görülmektedir. Bu durum zamanla yüzeyde bulunan mevcut CaO içeriğinin tükendiğini göstermektedir. Elde edilen XRD analiz sonuçlarından, CaO'nun NaVO<sub>3</sub> ile reaksiyonu sonrası oluşabilecek fazın CaV<sub>3</sub>O<sub>7</sub> olduğu anlaşılmaktadır. ZrO<sub>2</sub> ve V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> in reaksiyonu neticesinde ise ZrV<sub>2</sub>O<sub>7</sub> fazlarının oluşmuş olabileceği tespit edilmiştir.

Şekil 5' te 2 çevrim sonrası yani 10 saatlik sıcak korozyon çevrimi sonrası üst yüzeyden alınan SEM görüntü ve EDS analiz sonuçları verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi koyu renkli yapı içerisinde dağılım gösteren yassı çubuksu yapıların korozyon ürünü olduğu anlaşılmaktadır. Açık gri renkli bölgelerin V<sub>0,02/0,01</sub>Zr<sub>0,98/0,99</sub>O<sub>7</sub> veya m-ZrO<sub>2</sub> fazlarının olacağını anlaşılırken, siyah renkli yerler ise poroziteleri temsil etmektedir. Daha yüksek büyütmede alınan görüntüde yapının katmanlı olarak büyüme gösterdiği anlaşılmaktadır. Alınan EDS analizine göre ise katmanlı büyüyen bu korozyon ürün yapısının CaO-NaVO<sub>3</sub> etkileşimi ile meydana gelmiş bir faz olduğu anlaşılmaktadır. XRD analiz sonuçlarına göre bu fazın CaV<sub>3</sub>O<sub>7</sub> fazı olabileceği tahmin edilmektedir. Üçüncü spektrumun olduğu bölgede ergimiş bir yapının olduğu görülmektedir. Bu fazında ZrV<sub>2</sub>O<sub>7</sub> fazı olması muhtemeldir.



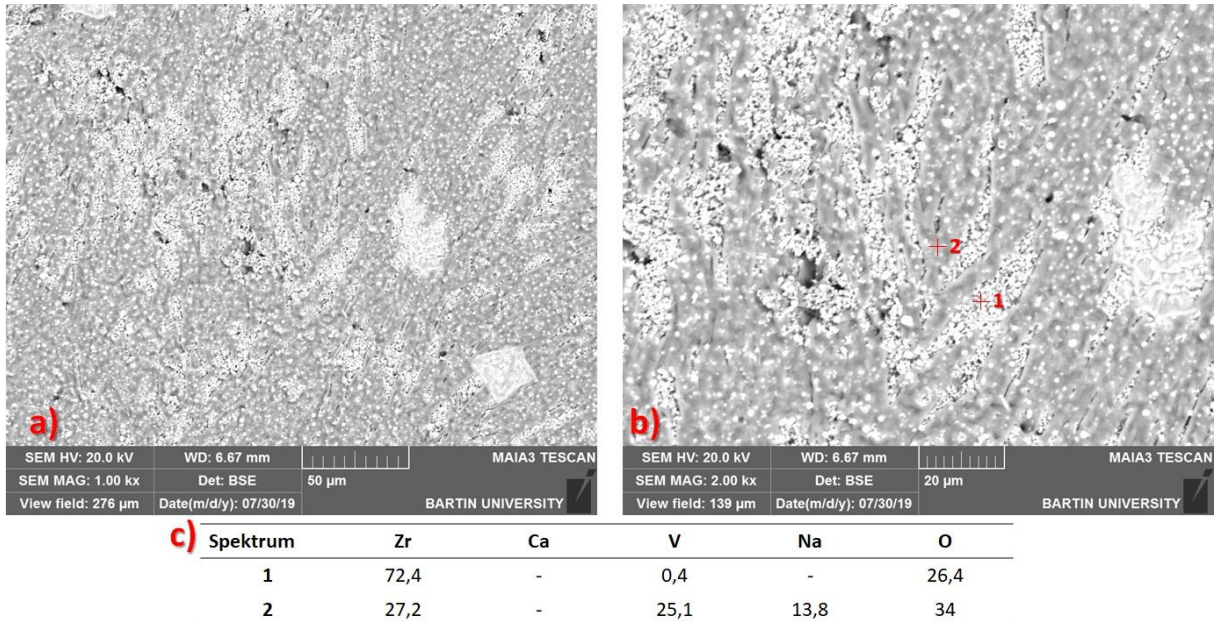
Şekil 5. 10 saatlik sıcak korozyon çevrim sonrası a) 500x SEM görüntüsü, b) 2kx SEM görüntüsü ve c) 2kx büyütme SEM görüntüsünden alınan EDS sonuçları

Üçüncü çevrim sonunda alınan SEM ve EDS analiz sonuçları Şekil 6' da verilmiştir. Çubuksu yassı oluşan tabakalarda ciddi bir azalmanın olduğu görülürken, ayrıca oluşan bu yapıların inceltme dağılımlarında seyrelme olduğu anlaşılmaktadır. EDS ve XRD analizlerinin sonuçları doğrultusunda birinci spektrum yine V<sub>0,02/0,01</sub>Zr<sub>0,98/0,99</sub>O<sub>7</sub> veya m-ZrO<sub>2</sub> fazını temsil ettiği, ikinci spektrumun ergimiş formulu CaV<sub>3</sub>O<sub>7</sub> ve üçüncü spektrumun ise CaV<sub>3</sub>O<sub>7</sub> korozyon ürünü olduğu düşünülmektedir.



Şekil 6. 15 saatlik sıcak korozyon çevrim sonrası a) 500x SEM görüntüsü, b) 2kx SEM görüntüsü ve c) 2kx büyütme SEM görüntüsünden alınan EDS sonuçları

20 saatlik yani dördüncü sıcak korozyon çevrimi sonunda alınan SEM görüntüleri ve EDS analizleri Şekil 7' de verilmiştir. Daha önceki çevrim görüntülerinin aksine artık yassı çubuksu morfolojiye sahip yapıların oluşmadığı gözlenmiştir. XRD analiz sonuçları da incelendiğinde Ca içerikli herhangi bir fazın meydana gelmediği görülmektedir. Şekilde açık renkli yapıların m-ZrO<sub>2</sub> fazları olduğu, koyu renkli yapıların ise ergimiş formda NaVO<sub>3</sub> ve ZrV<sub>2</sub>O<sub>7</sub> gibi korozyon ürünleri olduğu düşünülmektedir.

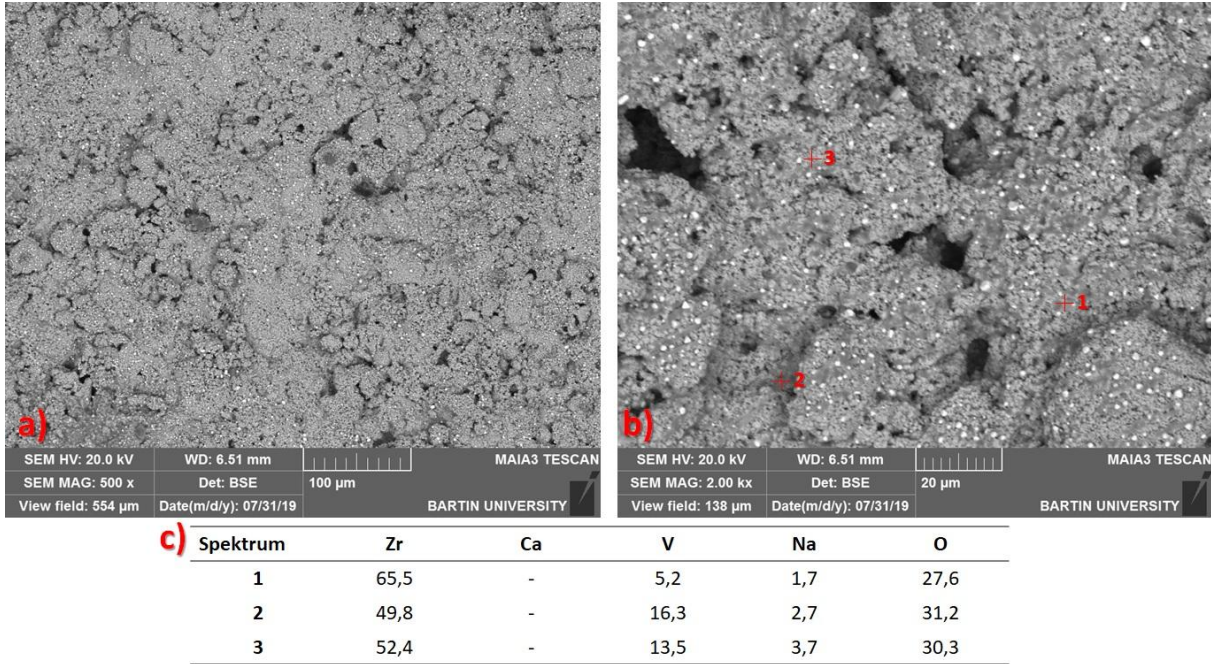


Şekil 7. 20 saatlik sıcak korozyon çevrim sonrası a) 500x SEM görüntüsü, b) 2kx SEM görüntüsü ve c) 2kx büyütme SEM görüntüsünden alınan EDS sonuçları

Son beş saatlik sıcak korozyon çevrimine ait SEM ve EDS analiz resimleri Şekil 8' de verilmiştir. Elde edilen bulgulara göre üst bölgelerde yine Ca içerikli herhangi bir fazın oluşmadığı üretim sonrası biriken partiküller arası boşluklarda ergimiş formu yapıların sızmış olduğu anlaşılmaktadır. Koyu siyah bölgelerde poroziteleri temsil etmektedir. Elde edilen spektrum sonuçları ve XRD



analizleri neticesinde dördüncü çevrime benzer fazların olduğu yani az miktarda  $\text{NaVO}_3$ ' ün yanında  $\text{V}_{0,02/0,01}\text{Zr}_{0,98/0,99}\text{O}_7$  veya  $\text{m-ZrO}_2$  fazları ve  $\text{ZrV}_2\text{O}_7$  fazlarının kaplama üst yüzeyinde olduğu anlaşılmaktadır.

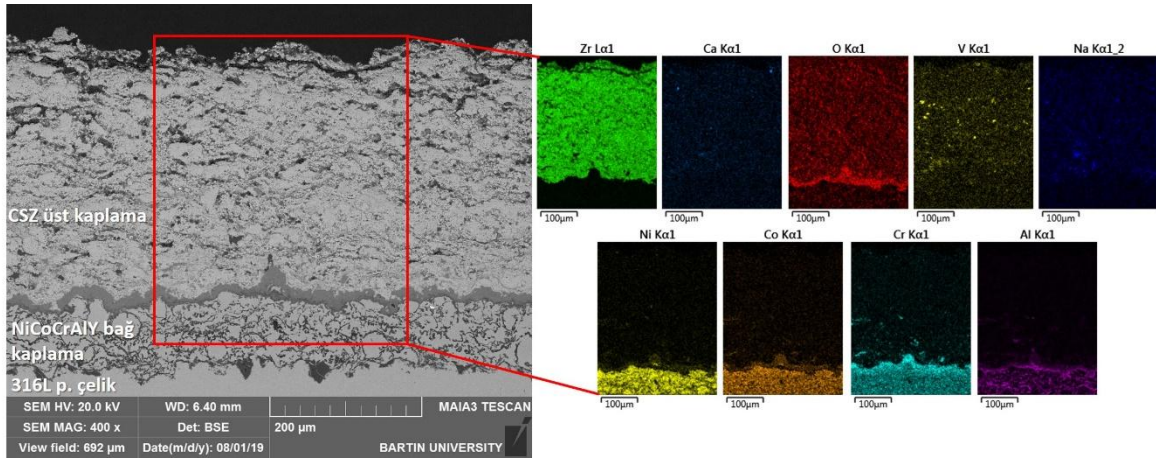


Şekil 8. 25 saatlik sıcak korozyon çevrim sonrası a) 500x SEM görüntüsü, b) 2kx SEM görüntüsü ve c) 2kx büyütme SEM görüntüsünden alınan EDS sonuçları

Son sıcak korozyon çevrim sonrası alınan enine kesit SEM görüntüsü ve elementel dağılım haritalaması Şekil 9' da verilmiştir. Şekil' den görüldüğü gibi kaplamada ciddi bir ayrılmanın olmadığı fakat özellikle yüzeye yakın bölgelerde ayrılmaların meydana geldiği anlaşılmaktadır. Ayrıca kaplamanın üretim sonrası poroziteli olduğu tespit edilmişti fakat sızan korozyon tuzlarının buralarda reaksiyon vererek bu boşlukları doldurduğu anlaşılmaktadır. Na ve V izlerinin üst kaplama içerisinde tamamen dağıldığı görülürken, Ca' nın neredeyse üst kaplama boyunca hiç kalmadığı anlaşılmaktadır. Bağ kaplama yapısında ise ciddi şekilde oksitlenmelerin meydana geldiği görülmektedir. Bağ ve üst kaplama ara yüzeyinde meydana gelen termal olarak büyüyen oksit (TGO) tabakasının ise alümina yerine daha çok  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  ve karışık oksitlerden meydana geldiği anlaşılmaktadır. Alüminyumun bağ kaplama içerisinde dahili olarak özellikle splatlar arası oksitlendiği anlaşılırken TGO tabakasında az miktarda bulunduğu alınan elementel haritalama görüntülerinden anlaşılmaktadır. TGO tabakası TBC sistemlerinde hasar da baskın rol oynayan sebeplerden biridir [18–21]. Fakat elde edilen sonuçlara göre TGO kaynaklı bir çatlama veya ayrılma tespit edilememiştir.

Elde edilen bulgular XRD, SEM ve EDS sonuçlarına göre kalsiyumun her çevrim sonrası azaldığı ve son iki çevrim de ise yapı içerisinde neredeyse hiç kalmadığı görülmüştür. Başlangıçtaki çevrimde  $\text{CaO}$ ' nun,  $\text{NaVO}_3$  ile reaksiyonu sonucu  $\text{CaV}_3\text{O}_7$  korozyon ürününü üretmiştir. Zamanla bu yapının kaplamadan uzaklaşması bu ürünün uçucu olabileceğini veya çevrimler esnasında yeniden reaksiyonlar ile uçucu bir faza dönüşmüş olabileceği, elde edilen XRD ve SEM analizlerinden anlaşılmaktadır. Tüklenen  $\text{CaO}$  ile beraber stabil olan zirkonya kaplamanın stabilitesi bozularak monoklinik yapıli zirkonyaya dönüştüğü, bunun yanında zirkonya ile  $\text{NaVO}_3$  tuzunun reaksiyonu neticelerinde ise yavaş büyüyen  $\text{ZrV}_2\text{O}_7$  fazının [22] ve yine monoklinik formda az V ihtiva eden  $\text{V}_{0,02/0,01}\text{Zr}_{0,98/0,99}\text{O}_7$  fazlarının meydana geldiği tespit edilmiştir. Literatürde itriya ile stabilize edilmiş zirkonyanın bir çok çalışma da sıcak korozyon davranışı incelenmiştir.





Şekil 9. 25 saatlik sıcak korozyon çevrim sonrası 500x büyütmede enine kesit SEM ve elementel haritalama görüntüleri

Çalışmalarda stabilizatör itriyanın NaVO<sub>3</sub> ile reaksiyonu sonucu tetragonal olan zirkonyanın monoklinik zirkonyaya dönüşmesi neticesinde kaplamada meydana gelen hacimsel değişiklerin hasara sebep olduğu belirtilmiştir [23–25]. Mevcut çalışmamızda ise kısmi stabilize edilmiş zirkonya üst kaplamanın stabilizasyonu bozulması sonrası kaplamada ciddi bir hasar etkisine sebebiyet vermemiştir.

#### 4. Sonuçlar

NiCoCrAlY bağ kaplama ve CSZ üst kaplama başarılı şekilde sırasıyla 316L paslanmaz çelik malzeme üzerine biriktirilmiştir. Üretilen numuneler çevrimli sıcak korozyon testleri tabi tutulmuş ve elde edilen sonuçlar aşağıdaki sıralanmıştır.

1. Sıcak korozyon testleri esnasında altlık numune ciddi şekilde oksidasyona maruz kalmış ve beşinci çevrimde test sonlandırılmıştır. Elde edilen görüntülerde üst kaplama da ciddi bir hasarın meydana gelmediği anlaşılmıştır.
2. Sıcak korozyon testlerinin ilk çevrimlerinde korozyon ürünü olarak tabakalı olarak büyüyen CaV<sub>2</sub>O<sub>7</sub> fazları meydana gelmiş, son çevrimlere doğru ise bu fazların ve kalsiyum içerikli herhangi bir fazın izine rastlanmamıştır. Kübik formda olan CSZ yapısının monoklinik bir faza dönüştüğü tespit edilmiştir.
3. Sıcak korozyon testleri sonunda kaplamada herhangi bir ayrılma veya kopmanın olmadığı tespit edilirken, bağ kaplamanın ciddi şekilde oksitlendiği ve korozif tuzların üst kaplama boyunca penetre olduğu anlaşılmıştır.

#### Teşekkür

10-12 Ekim 2019 tarihlerinde Gaziantep Üniversitesi'nde düzenlenen TICMET19 konferansında sunulan çalışmamın seçilmesinde TICMET19 organizasyon komitesine en derin teşekkürümü sunuyorum.

#### Kaynaklar

- [1]. Doleker, K. M., Ozgurluk, Y., Ahlatci, H., Karaoglanli, A. C., Evaluation of oxidation and thermal cyclic behavior of YSZ, Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> and YSZ/Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> TBCs, Surface And Coatings Technology, 2019, 371, 262–275.

- [2]. Tümer, M., Kerimak, M. Z., Nikel Bazlı Süper Alaşım Inconel 625 ile AISI 304L Paslanmaz Çelik Malzeme Çiftinin Birleştirilmesinde Farklı İlave Metallerin Tokluk ve Mikroyapısal Özelliklere Etkisi. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 2017, 4(1), 116-126.
- [3]. Mindivan, H., Kale, A., Berse, U., Samur, R., A Comparative Study of Thermal Sprayed AISI 316L Stainless Steel Coatings, *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 2017; 4(1): 127-134.
- [4]. Padture, N. P., Thermal Barrier Coatings for Gas-Turbine Engine Applications, *Science*, 2002, 296 (5566), 280–284.
- [5]. Karaoglanli, A. C., Doleker, K. M., Ozgurluk, Y., "State of the art thermal barrier coating (TBC) materials and the failure mechanisms", *Advanced Structured Materials*, Springer, Singapore, 2017, 441–452.
- [6]. Şimşek, İ., Mekanik Alaşım Yöntemi ile Üretilen Farklı Miktarlarda ZrO<sub>2</sub> Takviyeli Al-2Gr Matrisli Kompozit Malzemelerin Aşınma Performanslarının İncelenmesi, *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 2019, 6(3), 605-594.
- [7]. Şeker, A., Gürten, A., Asidik Ortamda Yumuşak Çeliğin Korozyonu Üzerine Melia Azedarach Özütünün İnhibitör Davranışı, *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 2015, 2(3), 1-13.
- [8]. Topçu, İ., Uygunoğlu, T., GFRP Çubukların Özellikleri ve Prefabrik Altyapı Elemanlarında Kullanımı, *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 2020, 7(1), 178-169.
- [9]. Wortman, D. J., Fryxell, R. E., Luthra, K. L., Bergman, P. A., Mechanism of low temperature hot corrosion: Burner rig studies, *Thin Solid Films*, 1979, 64(2), 281–288.
- [10]. Eliaz, N., Shemesh, G., Latanision, R. M., Hot corrosion in gas turbine components, *Engineering Failure Analysis*, 2002, 9(1), 31–43.
- [11]. Hui, Y., Zhao, S., Xu, J., Zou, B., Wang, Y., Cai, X., Zhu, L., Cao, X., High-temperature corrosion behavior of zirconia ceramic in molten Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+NaVO<sub>3</sub> salt mixture, *Ceramics International*, 2016, 42(1), 341–350.
- [12]. Habibi, M. H., Wang, L., Guo, S. M., Evolution of hot corrosion resistance of YSZ, Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, and Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>+YSZ composite thermal barrier coatings in Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> at 1050°C, *Journal of The European Ceramic Society*, 2012, 32(8), 1635–1642.
- [13]. Ozgurluk, Y., Doleker, K. M., Karaoglanli, A. C., Hot corrosion behavior of YSZ, Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> and YSZ/Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> thermal barrier coatings exposed to molten sulfate and vanadate salt, *Applied Surface Science*, 2018, 438, 96–113.
- [14]. Ozgurluk, Y., Doleker, K. M., Karaoglanli, A. C., Investigation of the effect of V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> melted salts on thermal barrier coatings under cyclic conditions, *Anti-Corrosion Methods And Materials*, 2019, 66(5), 644–650.
- [15]. Keyvani, A., Saremi, M., Heydarzadeh Sohi, M., Microstructural stability of zirconia-alumina composite coatings during hot corrosion test at 1050 °C, *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, 506(1), 103–108.
- [16]. Wang, P., Deng, S., He, Y., Liu, C., and Zhang, J., Oxidation and hot corrosion behavior of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/YSZ coatings prepared by cathode plasma electrolytic deposition, *Corrosion Science*, 2016, 109, 13–21.
- [17]. Worrel, W. L., *Solid Electrolytes*, Springer-Verlag, New York, 2006, 143–166.
- [18]. Evans, H. E., Oxidation failure of TBC systems: An assessment of mechanisms, *Surface and Coatings Technology*, 2011, 206(7), 1512–1521.
- [19]. Toscano, J., Naumenko, D., Gil, A., Singheiser, L., Quadackers, W. J., Parameters affecting TGO growth rate and the lifetime of TBC systems with MCrAlY-bondcoats, *Materials and Corrosion*, 2008, 59(6), 501–507.
- [20]. Doleker, K. M., Ozgurluk, Y., Karaoglanli, A. C., Isothermal oxidation and thermal cyclic behaviors of YSZ and double-layered YSZ/La<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> thermal barrier coatings (TBCs), *Surface and Coatings Technology*, 2018, 351, 78–88.

- [21]. Doleker, K. M., Ahlatci, H., Karaoglanli, A. C., Investigation of Isothermal Oxidation Behavior of Thermal Barrier Coatings (TBCs) Consisting of YSZ and Multilayered YSZ/Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> Ceramic Layers, *Oxidation of Metals*, 2017, 88(1–2), 109–119.
- [22]. Liu, Z. G., Ouyang, J. H., Zhou, Y., Xia, X. L., Hot corrosion behavior of V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-coated Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> ceramic in air at 700-850 °C, *Journal of The European Ceramic Society*, 2009, 29(11), 2423–2427.
- [23]. Park, S. Y., Kim, J. H., Kim, M. C., Song, H. S., Park, C. G., Microscopic observation of degradation behavior in yttria and ceria stabilized zirconia thermal barrier coatings under hot corrosion, *Surface and Coatings Technology*, 2005, 190(2–3), 357–365.
- [24]. Afrasiabi, A., Saremi, M., Kobayashi, A., A comparative study on hot corrosion resistance of three types of thermal barrier coatings: YSZ, YSZ+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and YSZ/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>", *Materials Science and Engineering A*, 2008, 478(1–2), 264–269.
- [25]. Ahmadi-Pidani, R., Shoja-Razavi, R., Mozafarinia, R., Jamali, H., Evaluation of hot corrosion behavior of plasma sprayed ceria and yttria stabilized zirconia thermal barrier coatings in the presence of Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> molten salt, *Ceramics International*, 2012, 38(8), 6613–6620.