

ULUSLARARASI 3B YAZICI TEKNOLOJİLERİ
VE DİJİTAL ENDÜSTRİ DERGİSİ

INTERNATIONAL JOURNAL OF 3D PRINTING
TECHNOLOGIES AND DIGITAL INDUSTRY

ISSN:2602-3350 (Online)

URL: <https://dergipark.org.tr/ij3dptdi>

KOMPOZİT CYSZ KAPLAMANIN DEĞİŞEN YÜKLER ALTINDA AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF WEAR BEHAVIOR OF
COMPOSITE CYSZ COATING UNDER DIFFERENT
LOADS

Yazarlar (Authors): Ali AVCI^{id}, Muhammet KARABAŞ^{id}



Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Avcı A., Karabaş M., "Kompozit CYSZ Kaplamanın Değişen Yükler Altında Aşınma Davranışının İncelenmesi" *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 8(3): 387-398, (2024).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1546843

Araştırma Makale/ Research Article

Erişim Linki: (To link to this article): <https://dergipark.org.tr/en/pub/ij3dptdi/archive>

KOMPOZİT CYSZ KAPLAMANIN DEĞİŞEN YÜKLER ALTINDA AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Ali AVCI^{a,*} , Muhammet KARABAŞ^b 

^aHakkari Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Türkiye

^bKırklareli Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Fakültesi, Türkiye

* Sorumlu Yazar: aliavci@hakkari.edu.tr

(Geliş/Received: 16.08.24; Düzeltme/Revised: 26.09.24; Kabul/Accepted: 01.10.24)

ÖZ

Bu çalışmada, CeO₂-Y₂O₃ stabilize ZrO₂ (CYSZ) seramik kaplamalar, Al₂O₃ ve TiO₂ eklenmiş olarak, plazma püskürtme yöntemi ile bağ katmanlı AISI304 paslanmak çelik altlıklar üzerine biriktirilmiştir. Al₂O₃ ve TiO₂ ilavesinin CYSZ kaplamanın aşınma davranışına etkisi araştırılmıştır. Aşınma testi öncesinde kaplamaların ortalama yüzey pürüzlülüğünün 0.2 µm'den az olmasını sağlamak amacıyla zımparalama ve parlatma işlemleri yapılmıştır. ASTM G99-04'e göre aşınma testi, pin-on-disk cihazında 30 mm s⁻¹ hızında gerçekleştirilmiştir. Test, minimum 8000 döngü ile kuru bir durumda yapılmıştır. Aşınma testinde 4N ve 8N değişken yükler ve 6 mm çaplı Al₂O₃ bilyalar kullanılmıştır. Kaplamaların yüzey özellikleri ve aşınma özellikleri, kaplama ve aşınma testleri yapıldıktan sonra taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) kullanılarak analiz edilmiştir. Numunelerin aşınma oranı mekanik profilometri kullanılarak değerlendirildi. Malzemelerin mikro sertliğini değerlendirmek için mikro Vickers test ekipmanı kullanılmıştır. CYSZ içerisine ilave edilen bileşikler sertlik değerinin artmasına neden olmuştur. Al₂O₃ 'ün seryum-itriya stabilize zirkonyaya (CYSZ) dahil edilmesinin aşınma direncinde bir artışa yol açtığını, ancak TiO₂'nin dahil edilmesinin aşınma direncinde dikkate değer değişime neden olmadığı bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: CYSZ, Kompozit Kaplama, Aşınma, Yükün Etkisi.

INVESTIGATION OF WEAR BEHAVIOR OF COMPOSITE CYSZ COATING UNDER DIFFERENT LOADS

ABSTRACT

In this study, CeO₂-Y₂O₃ stabilized ZrO₂ (CYSZ) ceramic coatings, with Al₂O₃ and TiO₂ added, were deposited on bond layer coated AISI304 stainless steel substrates by plasma spraying method. The effect of Al₂O₃ and TiO₂ additions on the wear behavior of CYSZ coating was investigated. An investigation was conducted to examine the impact of incorporating aluminum oxides (Al₂O₃) and titanium dioxide into YSZ coating on its wear characteristics. Prior to conducting the wear test, the coatings underwent sanding and polishing procedures to verify that the average surface roughness was below 0.2 µm. A pin-on-disk device was subjected to wear testing in accordance with ASTM G99-04, with a rotational speed of 30 mms⁻¹. The testing was conducted under dry conditions, with a minimum of 8000 cycles. The wear test utilised varied loads of 4N and 8N, with 6 mm diameter Al₂O₃ balls. After conducting the coating and wear tests, the surface properties and wear characteristics of the coatings were examined using scanning electron microscopy and energy-dispersive X-ray spectroscopy. The wear rate of the samples was assessed using mechanical profilometry. The microhardness of the materials was assessed using Micro Vickers testing equipment. The compounds added into CYSZ caused an increase in the hardness value. The results demonstrated that the addition of Al₂O₃ to cerium-yttria stabilized zirconia (CYSZ) resulted in enhanced wear resistance, while the addition of TiO₂ significantly reduced wear resistance.

Keywords: CYSZ, Composite Coating, Wear, Applying Load.

1. GİRİŞ

Aşınma makine parçalarının kullanım ömürlerini kısıtlayan en önemli hasar mekanizmalarından birisidir. Aşınma hasarları yüzey mühendisliği teknolojileri kullanılarak azaltılabilir. Bu teknolojilerden en öne çıkan ise parçaları aşınmaya dayanıklı malzemeler ile kaplamaktır. Fiziksel ve kimyasal buhar biriktirme, lazer kaplama [1-2], ısı püskürtme [3] ve elektrokimyasal kaplama [4] işlemleri ile aşınmaya dayanıklı kaplamalar üretilebilir. WC-Co, Al₂O₃ gibi aşınmaya, korozyona dayanıklı metal-seramik kaplamalar termal püskürtme teknolojileri ile başarılı şekilde üretilmektedir[5], [6]. Bu kaplamalar endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Termal püskürtme ile üretilen kaplamalar sıklıkla gaz türbin motorlarına uygulanır [7], [8]. Gaz türbin motorları hava [9] ve deniz [10], [11] taşıtlarında, enerji santrallerinde [12], yaygın olarak kullanılmaktadır. Atmosferden emilen hava yanma odasında yakıt ile karışır. Motordaki panellere bağlı olan shaft yüksek hızlarda döndürülerek aracın hareketi için gerekli olan itki kuvveti elde edilir. Yanma odasında sıcaklık 1200 °C'lere kadar yükselir[13]. Motorun bu bölümündeki parçalar genelde Ni esaslı süper alaşımlardan üretilir. Fakat Ni esaslı süper alaşımlar tek başına kullanılmaz. Ni esaslı süper alaşımlardan üretilmiş parçaların sürünme dayanımını arttırmak ve korozyondan korumak için termal bariyer kaplama (TBK) adı verilen seramikler ile kaplanır. TBK sistemi bağ katman, seramik üst katman ve termal olarak büyüyen oksit tabakası (TGO) olmak üzere üç farklı katmandan oluşur. TGO bağ katman ile seramik üst katman arasında servis şartlarında oluşan bir tabakadır. Bağ katmanda alüminyumun oksijen ile reaksiyonu sonucu oluşur. Kritik kalınlığa kadar (<10µm)[14] oksijen bariyeri görevi görür. Fakat kritik kalınlığı geçtikten sonra bağ katman-seramik üst katman arasında termal genleşme uyumsuzluğu nedeniyle gerilmeler meydana gelir [15]. Böylece seramik üst katman bağ katmandan ayrılır. Bağ katman genellikle Ni veya Co esaslı metalik malzemelerden üretilir. Temel görevi altlığı oksidasyondan korumak, termal genleşme uyumsuzluklarını tolere etmektir. Seramik üst katman ise yüksek sıcaklık faz kararlılığı, yüksek sinterlenme direnci, düşük termal iletkenlik, iyi kırılma tokluğu gibi özellikler gösteren seramiklerden üretilir. En yaygın termal bariyer kaplama malzemesi itriya ile

stabilize edilmiş zirkonyadır (YSZ)[16]. YSZ Ni esaslı süper alaşımlar ile uyumlu termal genleşme katsayısı, düşük termal iletkenlik gibi termo-fiziksel özellikleri ile en uygun malzeme olarak değerlendirilebilir [17]. Fakat 1200 °C ve üzeri sıcaklıklarda YSZ de tetragonal-monoklinik faz dönüşümleri olur [18]. Bu faz dönüşümleri sonucu bir hacim genleşmesi meydana gelir. Kaplamalar erken hasara uğrar. YSZ' ye CeO₂ eklentisi bazı termo fiziksel özellikleri geliştirerek yüksek sıcaklık altında tetragonal-monoklinik faz dönüşümlerini durdurur [19-20]. İlave, YSZ' nin termal genleşme katsayısını metalik altlık malzeme ile daha uyumlu hale getirir. Böylece TBK'ların servis ömrü arttırılır[21]. Ayrıca CeO₂ yağlayıcı özelliğe de sahiptir. YSZ ye CeO₂ katkısı TBK'ların aşınma davranışına da olumlu etki edebilir [22].

TBK'ların tek hasar mekanizması faz dönüşümleri değildir. Servis şartlarında erozyon, aşınma, sürtünme kaynaklı mekanik hasarlar da alabilir [23]. Atmosferden motor içerisine emilen hava ile birlikte uçan partiküllerde emilir. Bu partiküllerden bazıları yanma odasındaki TBK'lar üzerinde camsı eriyik olarak birikir. Korozyona sebep olur. Bazı partiküller ise TBK'lara yapışmaz. Kaplamaya çarparak kumlama etkisi gösterir. Bu yabancı partiküller zamanla kaplamayı aşındırır. Bu nedenle TBK'ların aşınma dirençlerinin geliştirilmesi önemlidir. YSZ'ye Al₂O₃, TiO₂ gibi katkıların eklenmesi sinterlenme direnci, yüksek sıcaklık faz kararlılığı, camsı eriyik ve sıcak korozyon dayanımını geliştirir. Plazma püskürtmeli YSZ ağırlıkça (ağ.) %10-20 [24] oranında porozite içerir. Poroziteler erozyon aşınma için olduğu gibi camsı eriyik ve sıcak korozyon dayanımı için dezavantajdır. Al₂O₃, TiO₂ gibi katkılar YSZ'nin porozite yüzdesini düşürür. Camsı eriyik ve sıcak korozyon tuzlarının kaplama içlerine doğru geçmesini engeller. Böylece plazma püskürtmeli YSZ'nin korozyon direnci geliştirilmiş olur. Benzer iyileştirme etkisi plazma püskürtmeli CYSZ için de gözlemlenmiştir [25].

Shin at al. [26] plazma püskürtme ile üretilmiş YSZ kaplamanın porozite miktarının artması ile erozyon davranışının zayıfladığını rapor etmiştir. Chen at al. [27] ise YSZ+Al₂O₃-40TiO₂ ve YSZ+ ağ. %92 Al₂O₃ -ağ. 40% TiO₂ kompozit kaplamaları plazma püskürtme ile

üretmiş ve aşınma testleri sonucunda kompozit kaplamaların aşınma dayanımlarının daha iyi olduğunu bildirmişlerdir. Bu gelişmeyi ise porozite oranının düşmesi ve YSZ ile Al_2O_3 - 40% TiO_2 reaksiyonu sonucu oluşan ara fazlara bağlamışlardır. Fakat YSZ'ye bu kadar yüksek oranlarda yapılan katkılar termal iletkenliği artırır ve termal şok-çevrim ömrünü azaltır. Bu nedenle bu katkıların oranı sınırlı olmalıdır [28]. Srikanth ve Bolleddu [29] grafen oksit ilaveli alümina-titanyum oksit kompozit kaplamaların mikro yapı ve aşınma dayanımı özelliklerini incelemişlerdir. Kompozit kaplama içerisindeki grafen oksit ilavesi arttıkça daha düşük sürtünme katsayısı ve aşınma dayanımının arttığını bildirmişlerdir. Mehar ve Sapate[30] Al_2O_3 -3 TiO_2 kompozit kaplamanın içerisine ağırlık %10, %20 ve %30 olmak üzere 3 farklı oranda YSZ ilave edilip aşınma dayanımı üzerine etkilerini incelemişlerdir. Yapılan çalışmada, YSZ oranı arttıkça sürtünme katsayısı düşmüştür. Tüm çalışma koşullarında Al_2O_3 -3 TiO_2 kaplamaya nazaran ağırlık %30 YSZ içeren kaplamada aşındırıcı aşınma oranında yaklaşık iki kat azalma olduğu bulunmuştur. Franco ve arkadaşları [31] YSZ termal bariyer kaplamanın aşınma dayanımını oda sıcaklığı, 500 °C ve 750 °C gibi değişen sıcaklıklarda test etmişlerdir. Yapılan çalışmada, aşınma mekanizması olarak 25 °C'de sünek deformasyon, 500 ve 750 °C'de kırılma deformasyonu ve 1000 °C'de yine sünek deformasyon oluştuğunu bulmuşlardır. Değerlendirilen tüm numunelerdeki bu davranış, termal gerilimlerle ve kristalografik fazları nedeniyle mekanik özelliklerindeki değişikliklerle doğrudan bağlantılı olduğu tespit edilmiştir. ZrO_2 - Y_2O_3 kaplamalarda 750 °C'ye kadar aşınma testlerinden önce ve sonra sertliklerinde önemli bir farklılık göstermemiştir. Ancak, 1000 °C'de yapılan testler sırasında tetragonal- ZrO_2 fazının amorf faz pahasına artması, kaplamaların sertliğinin ve dolayısıyla aşınma performanslarının artması teşvik edilmiştir. Bai ve arkadaşları [32] YSZ kaplamanın Si_3N_4 ve Al_2O_3 aşındırıcıya karşı 25 ile 800°C arasında değişen sıcaklıklardaki aşınma davranışını incelemişlerdir. Test sıcaklığı arttıkça aşınmış yüzeydeki monoklinik- ZrO_2 'nin tane boyutu ve molar fraksiyonu tüm durumlarda azaldığı görülmüştür. Ana aşınma özellikleri, tüm sürtünmeli kayma testleri için yüzeye yakın kırılma ve parçalanmayı içeriyordu. İki tip tribo çifti arasındaki aşınma mekanizmalarındaki

fark, tribo kaynaklı etkileşimlerden kaynaklandığı bulunmuştur. Al_2O_3 aşındırıcı kayma ile karşılaştırıldığında, mekanik olarak karıştırılmış katman içerisinde amorf bir yapının önemli ölçüde oluşmasına neden olmuştur. YSZ kaplamanın Si_3N_4 aşındırıcı karşısında daha iyi bir aşınma direnci sergilediği gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada alternatif bir seramik kaplama malzemesi olan serya-itriya ile stabilize edilmiş zirkonya kaplamalar Al_2O_3 - TiO_2 gibi ilave edilen kompozit karışımlar plazma püskürtme ile üretilmiştir. Üretilen kaplamaların farklı yükler altında aşınma davranışları araştırılmıştır.

2. MALZEME VE YÖNTEM

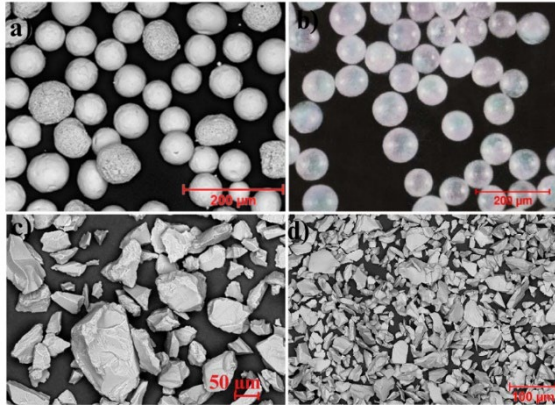
2.1. Malzemeler

Çalışmada, altlık olarak lazer kesim yöntemi ile 25.4 mm çapında kesilen AISI 304 östenitik paslanmaz çelikler kullanılmıştır. Bağlama katmanının mekanik yapışmasını geliştirmek için altlık kuponlarının yüzeyleri 200 grit alümina adı verilen ince bir aşındırıcı malzeme ile kumlanmıştır. Kumlama işlemi 30 cm mesafeden, 1 dk boyunca numunelerin tek yüzeyine uygulanmıştır. Zımparalama işleminden sonra paslanmaz çeliğin yüzey pürüzlülüğü Veeco WYKO NT1100 mekanik profilometre kullanılarak ölçülmüş olup, kumlama işleminin ardından pürüzsüzlükte dikkate değer bir artış sağlanmıştır. Altlık malzemesi, yüzey pürüzlülüğü açısından 358.68 nm'lik bir Ra değeri sergilerken, kum püskürtme sonrasında altlık malzemesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü 2.7 µm civarında ölçülmüştür. Bağ tabakanın üretiminde Sulzer Metco AMDRY 997 (Ni 23Co 20Cr 8.5Al 4Ta 0.6Y) ticari tozu, seramik üst katmanda ise Sulzer Metco'nun ticari olarak sunduğu CYSZ ($205 NS$, ZrO_2 24CeO₂ 2.5Y₂O₃), yine Sulzer Metco firmasından 105 NS ticari Al_2O_3 (2 ağırlık.% SiO_2 -98 ağırlık.% Al_2O_3) ve TiO_2 tozları kullanılmıştır. Şekil 1 tozların SEM görüntülerini gösterilmiştir. Üretilen kompozit kaplamaların karışım oranları Çizelge 1'de verilmiştir. Bağ katman üretimi yüksek hızlı oksijen-yakıt (HVOF) yöntemi ile kaplama işleminde Metco'nun DJ-2600 tabancası kullanılarak, Çizelge 2'de belirtilen parametreler göz önünde tutularak yapılmıştır. Kaplama işleminde kullanılan tabanca, 3 eksenli CNC makinesinin merkezi eksenli boyunca konumlandırılmıştır. Altlık malzemeler

ise 16 adet numune tutucuya sahip bir döner tablaya bağlanmıştır. Böylece tabancanın hareketi ve numunelerin hızının hassas kontrolü, gerekli kalınlıklarda kaplamaların elde edilmesine olanak sağlamaktadır.

Çizelge 1. Kompozit kaplamalarda kullanılan tozların ağırlıkça karışım miktarları

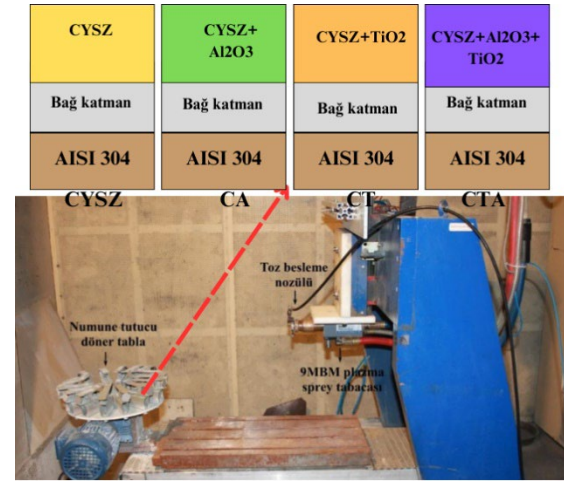
Numune Adı	Hammadde tozları		
	CYSZ	Al ₂ O ₃	TiO ₂
CYSZ	100	-	-
CA	83	17	
CT	97		3
CTA	80	17	3



Şekil 1. Biriktirilen tozların mikro yapısı a) Bağ katman, b) YSZ, c) YYSZ, d) Al₂O₃ tozu

Yüksek hızlı alev jeti hava-propan gazı karışımının oksijenle yanmasından elde edildi. HVOF yöntemi ile 85 ± 15 µm'lik gerekli bağ tabakası kalınlığını elde etmek için metal

yüzeyde 12 pasoda biriktirilmiştir. Seramik üst katmanın kaplanmasında kullanılan birincil ve ikincil gazlar ve üretim parametreleri Çizelge 3'te verilmektedir. Kaplama öncesinde YSZ, alümina ve titanyum dioksit kompozit tozları bir karıştırıcıda (turbula) alkol içerisinde 4 saat karıştırıldı. Sonrasında etüvde kurutulan tozlar, Sulzer Metco 9 MB plazma tabancası kullanılarak bir plazma sprej katmanı üzerinde başarılı bir şekilde kaplanmıştır. Kaplama işleminde kullanılan tabanca, 3 eksenli CNC makinesinin merkezi eksenli boyunca konumlandırılmış olup, hareketli tabanca, numunelerin döner tabla üzerine eşit şekilde kaplanmasını kolaylaştırmıştır. Şekil 2'te kaplamaların üretimini gösteren resim verilmektedir.



Şekil 2. Kaplamaların üretim adımları

Çizelge 2. HVOF işlem parametreleri

Malzemeler	Basınç (Bar)	Akış oranı (SCFH)					İşlem parametreleri		
		Oksijen	Propan	Hava	Oksijen	Propan	Hava	Sprej mesafesi (mm)	Toz besleme (g/s)
Amdry 997	10.3	6.2	7.2	24	40	50	250	50	90

Çizelge 3. APS kaplama parametreleri

Parametreler							
Akım (A)	Birincil Gaz, Ar(scfh)	İkincil Gaz, H ₂ (scfh)	Taşıyıcı Gaz, Ar(scfh)	Sprej Mesafesi (mm)	Tabanca Hızı (mm/s)	Dönme Hızı(Hz) rpm	Voltaj (V)
500	90	15	13.5	75	200	40	60

Mikro yapısal İncelemeler

Üretilen kaplamaların yüzeyi ve kesitleri elektron mikroskobu ile incelenmiştir. Bu amaçla kaplamalara öncelikle metalografik taşlama ve parlatma işlemleri uygulanmıştır. Kesitlerin incelenmesi için kaplamalar elmas kesici ile kesilip sonra parlatma işlemi uygulandı. Numunelerin mikro yapı testleri farklı boyutlarda opsiyonel EDS Phenom XL SEM cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Aşınmış parçalar SEM ile de incelenmiştir. SEM çalışmalarında aşınma tipinin özelliklerini anlamak için farklı dedektörler kullanılmıştır. EDS analizleri aşınma izleri için haritalama yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

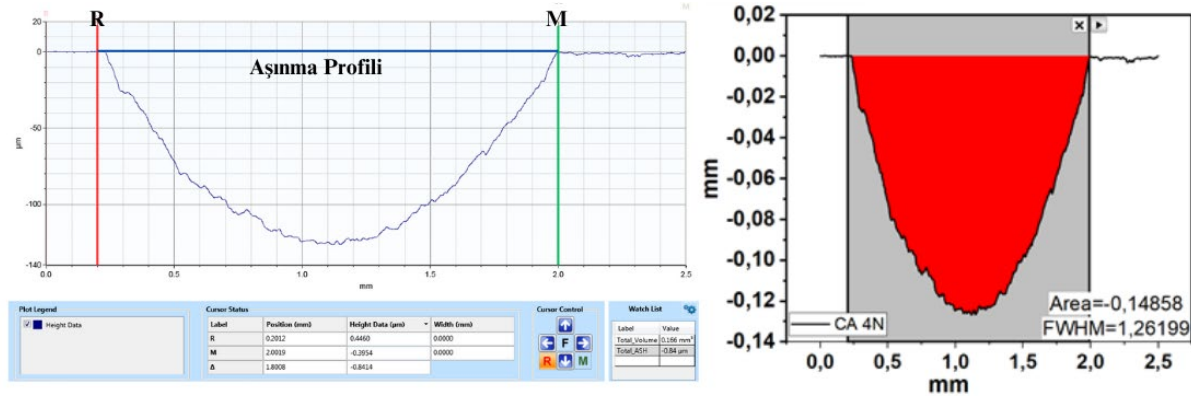
2.2. Aşınma ve Sertlik

Yüzeyin durumu, kaplamaların tribolojik özelliklerine etki eden başlıca faktördür. Numunelerin kaplama sonrası yüzey pürüzlülüğü değerleri 1.5 ila 2.4 µm arasında değiştiği ölçülmüştür. Aşınma testi öncesi kaplamaların ortalama yüzey pürüzlülük değerleri Ra 0.2'den küçük eşit olması için zımparalama ve parlatma işlemleri uygulandı. Yüzey pürüzlülüğü, 5 µm yarıçap kullanılarak yüzey üzerinde en az beş farklı yerden ölçümler alınarak hesaplanmıştır. Daha sonra numune yüzeyleri, yağların veya istenmeyen kalıntıların giderilmesi için aseton kullanılarak iyice temizlenip kurutulmuştur. Aşınma testi kaplamalara, ASTM 99-04'e göre 6000 mm alümina aşındırıcı bilya ile 8000 çevrim uygulanmıştır. Aşınma testi kuru bir ortamda 30 mm s⁻¹ hızında çalışan bir pin-on-disk cihazı (Tribo Tester, Fransa) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 3, mekanik profilometreden alınan aşınma izinin 2 boyutlu profilini göstermektedir. Aşınan hacmin

bulunabilmesi için ilk olarak profilometreden elde edilen aşınma grafiği OriginLab Pro yazılımı yardımıyla tekrardan çizilerek eğrinin altında kalan alan hesaplanmıştır. Sonrasında elde edilen alan aşınan çevre ile çarpılarak hacim değerine ulaşılmıştır. Aşağıdaki Denklem (1) yardımıyla aşınma miktarı bulunmuştur.

$$\text{Hacimsel aşınma miktarı} \frac{\text{mm}^3}{\text{Nm}} = \frac{\text{Hacim (mm}^3\text{)}}{\text{Aşınan yol (m) x uygulanan yük (N)}} \quad (1)$$

APS teknolojisinde üretilen kaplamalar, püskürtme hızı arttıkça giderek daha sert hale gelmektedir. Kaplamadaki oksitlerin varlığı çoğu zaman sertliğini artırırken yapışma mukavemetini azaltmaktadır. Kaplama katmanlarının sertliği gözeneklilik, katmanın heterojen yapısı, uygulanan gerilim değerleri gibi faktörlere bağlı olarak dalgalanmaktadır. Sertlik ölçümleri, Bulut Makina'nın Türkiye'de ürettiği HVS1000 mikro Vickers cihazı kullanılarak kaplamaların yüzeyinden elde edilmiştir. 300 gramlık bir kütle için yükleme süresi 15 saniye olarak belirlenmiştir. Sonuç, numunenin yüzeyinde 12 farklı noktada rastgele test edilen 10 sertlik değerinin aritmetik ortalamasının hesaplanmasıyla elde edilmiştir. Bu hesaplamada en yüksek ve en küçük ölçüm değerleri dikkate alınmamıştır. Ölçüm, kenarlarda gerilim oluşmasına ve kayan uç numuneye temas ettiğinde uygulanan yükün eşit olmayan bir şekilde dağılmasına yol açabilecek hataları önlemek için kenarlardan asgari 3 mm uzak bir mesafede gerçekleştirilmiştir.

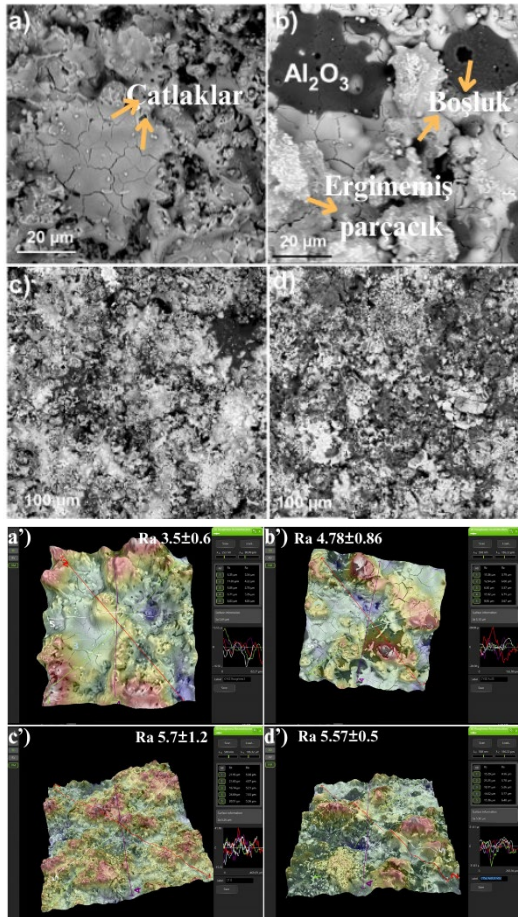


Şekil 3. Profilometre grafikleri

3. DENEYSSEL BULGULAR

3.1. Mikro yapı İncelemeleri

Şekil 4'de kaplama sonrasında çekilen SEM mikro yapı resimleri gösterilmektedir. Resimler incelendiğinde APS yönteminin karakteristik özellikleri olan yarı ergimiş veya ergimemiş parçacıklar, boşluklar ve çatlaklar görülmektedir. Şekil 4a'da özellikle çamur çatlakları çok fazla olduğu görülmektedir. Alümina ilave edilen şekil 4b numunesinde siyah bölge sert ve yoğun olan Al_2O_3 'tür. Şekil 4c ağ. %3 TiO_2 ilave edilmiş CYSZ'nin yüzey resmine ait olup boşluklu bir mikro yapı görülmektedir. Şekil 4 d'de tüm tozların karışımı olan CTA kompozit numunesinin yüzey SEM resmi verilmiştir.



Şekil. 4 Yüzey elektron mikroskobu görüntüleri; a)CYSZ, b) CA, c)CT, d)CTA, a')CYSZ yüzey pürüzlülük mikro resmi, b')CA yüzey pürüzlülük mikro resmi, c')CT yüzey pürüzlülük mikro resmi, d') CTA yüzey pürüzlülük mikro resmi

Genel olarak kaplamaların yüzey SEM resimler benzerlik göstermektedir. Şekil 4a'-d' ise aynı kaplamaların ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri ve yüzey pürüzlülüğü resimleri verilmektedir. CYSZ'nin yüzey pürüzlülüğü

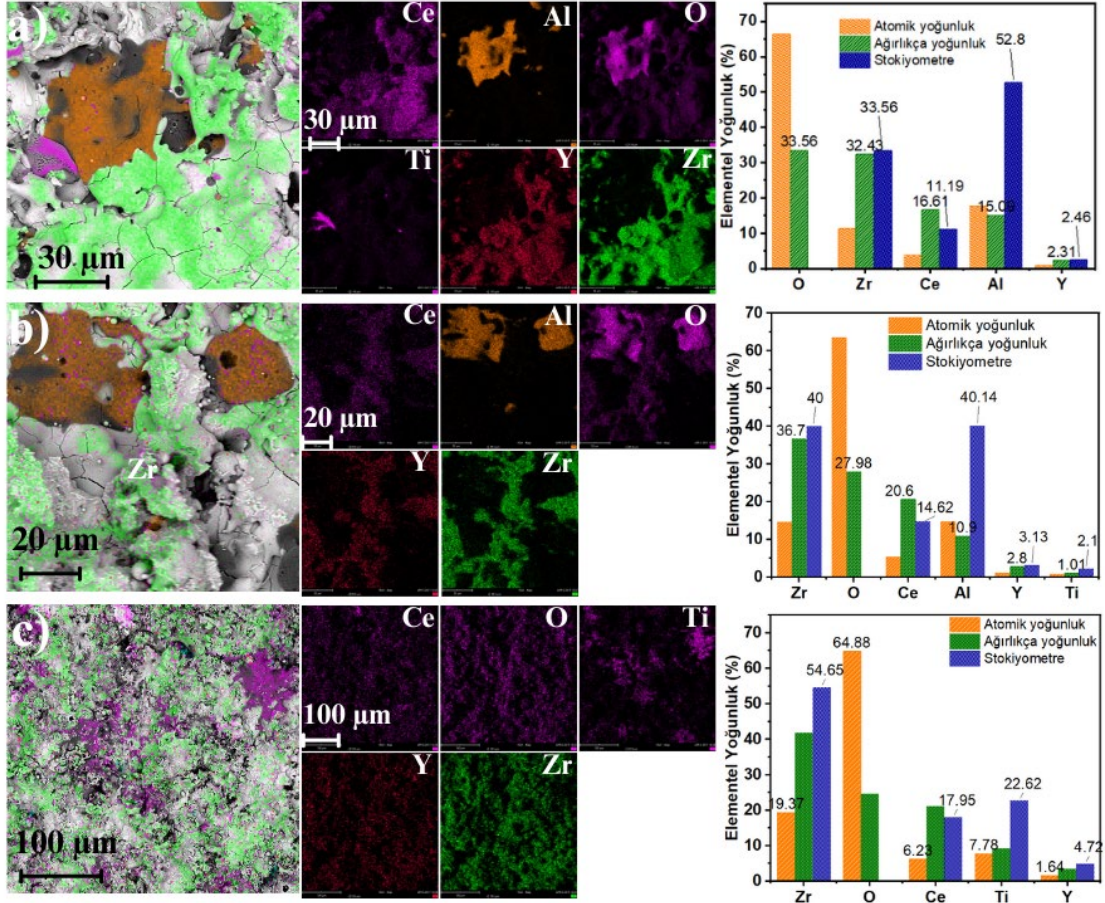
değeri $3.5 \mu m$ iken kompozit kaplamaların yüzey pürüzlülükleri artmıştır. Al_2O_3 ilavesi ile CYSZ'nin yüzey pürüzlülüğü %35 artarken TiO_2 ve $Al_2O_3 - TiO_2$ ilavesi ise yaklaşık %60 oranında artışa neden olmuştur.

Şekil 5'de APS yöntemi ile üretilen kaplamaların yüzeylerinden alınan EDS haritalama sonuçları verilmiştir. EDS haritalama sonuçlarında CYSZ içerisine ilave edilen tozların dağılımları ve varlıkları kontrol edildi. Şekil 5a'da CTA kompozit numunesine ait resimler yakından incelendiğinde; turuncu ile gösterilen bölgelerin alümina, mor bölgenin ise TiO_2 olduğu anlaşılmaktadır. Şekilde Alümina tozunun yaklaşık $30 \mu m$ genişliğinde olduğu görülmektedir. Kaplamayı oluşturan diğer elementlerin yapıdaki ağırlıkça yüzde yoğunlukları; oksijen 33.56, zirkonyum 32.4, seryum 16.6, alüminyum 15.09 ve itriyum 2.31 civarında olduğu bulunmuştur. İncelenen bölgede oksijen ile en fazla bağ yapan elementin %52.8 oranla alüminyum olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 5b'de CYSZ içerisine %17 oranında alümina ilave edilen kompozit kaplamaların yüzey EDS sonuçları görülmektedir. Benzer şekilde oksijen ile en yüksek oranda bağ yapan elementin alüminyum (%40.4) olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 5c'de CYSZ içerisine ağ. %3 TiO_2 ilave edilmiş kompozit kaplamaların EDS haritalama sonuçları incelendiğinde; TiO_2 'nin dağılımı daha net ortaya çıkmaktadır. Genel olarak kompozit kaplamalarda tüm elementlerin varlıkları ispatlanmış olup dağılımlarının homojen olduğu bulunmuştur.

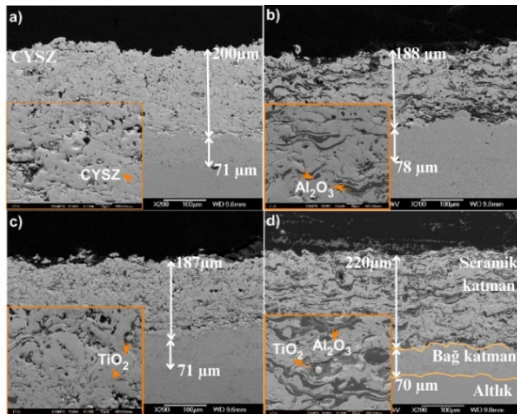
Şekil 6'te üretilen kaplamaların kesit SEM resimleri verilmiştir. Şekil 6a'da CYSZ kaplamasının kesit resminde seramik üst katmanın yaklaşık $200 \mu m$ bağ katmanının ise $70 \mu m$ civarında olduğu görülmektedir. Ayrıca CYSZ kaplamasının detay resminde yatay ve dikey çatlaklar ve boşluklar görülmektedir. Şekil 6b'de alümina ilave edilmiş kaplamasının kesit SEM resminde siyah bölgeler alümina olduğu anlaşılmaktadır. Alüminanın CYSZ ile homojen şekilde dağılım gösterdiği söylenebilir. Detay SEM resminde kaplamaların yatay şekilde uzandığı görülmektedir. Şekilden kompozit kaplamaların kalınlığının yaklaşık $188 \mu m$ bağ katmanının kalınlığının ise $78 \mu m$ olduğu ölçülmüştür. Şekil 6c'de az miktarda (ağ. %3) CYSZ içerisine ilave edilen TiO_2 'nin küçük gri bölgeler oluşturduğu ve

topaklanmadan dağılım gösterdiği görülmektedir. Seramik üst kaplamanın tabaka kalınlığı 187 μm iken bağ katmanın kalınlığı yaklaşık 70 μm olarak ölçülmüştür. Şekil 6d’de kaplamayı oluşturan tabakalar detaylı şekilde verilmiştir. Şekilde bağ katman kalınlığı 70 μm , kompozit seramik katman kalınlığı ise 220 μm olarak bulunmuştur. Şekil 6d incelendiğinde Al_2O_3 ve TiO_2 ’nin CYSZ içerisinde dağılarak

başarılı bir şekilde biriktiği söylenebilir. Tüm kesit SEM resimlerinde bağ katman üzerinde termal olarak büyüyen herhangi bir oksit tabakası görülmemiştir. Önceki çalışmamızda [33] elde ettiğimiz APS kaplamaların SEM resimlerine benzer şekilde, bu çalışmamızda da lamelar mikro yapı ve poroziteler içeren, yarı ergimiş yapılar elde edilmiştir.

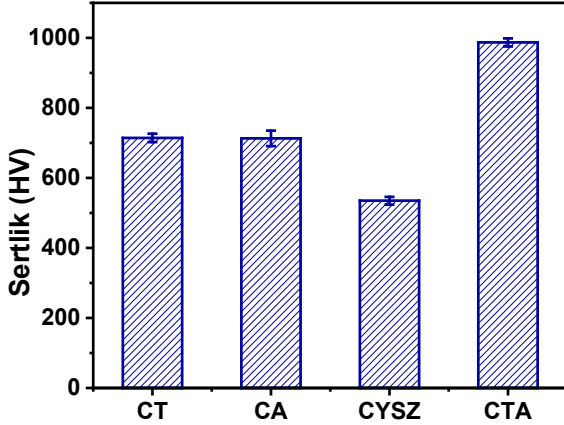


Şekil 5. EDS haritalama sonuçları; a)CTA kaplama b) CA kaplama, c) CT kaplama



Şekil 6. Kesit SEM resimleri; a) CYSZ kaplama, b)CA kaplama, c) CT kaplama, d)CTA kaplama

Şekil 7’de kaplamaların sertlik değerleri verilmektedir. CYSZ kaplamanın sertlik değeri 535 ± 11 HV iken alümina ve TiO_2 ilavesi sertlik değerinde yaklaşık %33’lük bir artışa neden olmuştur. Yapılan çalışmada [34], APS ile kaplanan alüminanın tek başına sertlik değeri 1491 HV bulunmuştur. Alüminanın sert ve yoğun yapısından dolayı CYSZ içerisine ilavesi sertlik değerini artırması beklenen bir durumdur. CTA numunesinin sertlik değeri ise 987 ± 11.5 HV olarak ölçülmüştür.

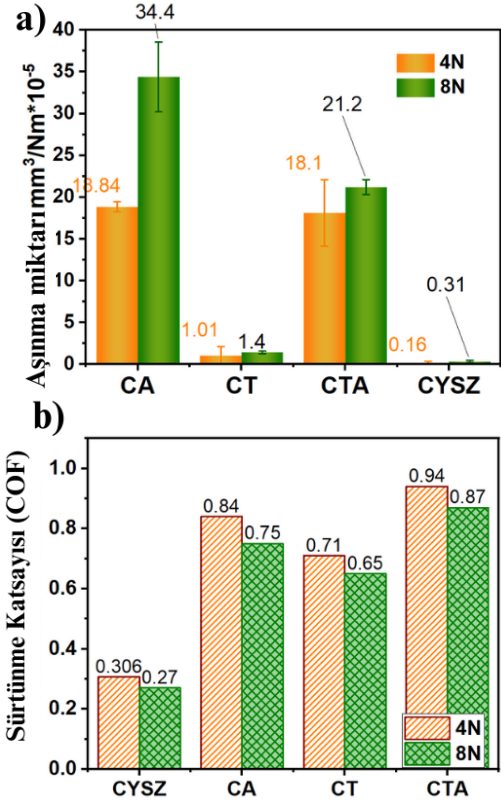


Şekil 7. Kaplamaların Vickers sertlik sonuçları

Şekil 8 a'da 4 N ve 8N yük uygulanan numunelerin profilometreden alınan aşınma oranları sonuçları verilmektedir. Her iki yük içinde en az aşınan numune CYSZ olmuştur. CYSZ 4 N yük altında yaklaşık $0.16 \text{ mm}^3 \text{ Nm}^{-5}$ aşınırken yük 8N olduğunda $0.31 \text{ mm}^3 \text{ Nm}^{-5}$ 'lik bir aşınma sonucu vermiştir. CYSZ'nin sertlik değerinin düşük olmasına rağmen aşınma miktarının da düşük olması CeO_2 yağlayıcı etkisi ile açıklanabilir. CeO_2 yapısı gereği yağlayıcı etkiye sahip olması aşınma sırasında yüzeyin kaygan davranmasına neden olmuştur. Nitekim, Şekil 8b'deki sürtünme katsayısı sonuçları bu durumu desteklemektedir. Tüm numuneler için aynı yük altında sürtünme katsayısı ile aşınma katsayısı arasında ters bir ilişki bulunmaktadır. Aynı numune için 4N yük altında sürtünme katsayısı yüksek 8N altındaki numunelerin sürtünme katsayısına kıyasla daha yüksek olduğu bulunmuştur. Sürtünme katsayısından alınan sonuçların aksine, 4N yük altındaki numunelerin aşınma miktarı 8N yük altındaki numunelere kıyasla daha az aşındığı hesaplanmıştır.

CYSZ numunede uygulanan yük arttığında sürtünme katsayısının düşmesi de yağlanmış bir ortam oluştuğunu desteklemektedir. CYSZ içerisine ağırlık %3 TiO_2 ilave edildiğinde aşınma miktarının 4N yük altında $1.01 \text{ mm}^3 \text{ Nm}^{-5}$ olduğu, yük arttığında aşınma miktarının artarak $1.4 \text{ mm}^3 \text{ Nm}^{-5}$ hesaplandığı görülmektedir. Alümina ilavesi sonrasında elde edilen CA ve CTA kaplamalarının aşınma miktarlarında önemli bir artış gözlemlenmiştir. CA kaplamasının aşınma miktarı 4N yük altında $18.8 \text{ mm}^3 \text{ Nm}^{-5}$ iken yük 8N arttığında yaklaşık %90 oranında artarak $34.4 \text{ mm}^3 \text{ Nm}^{-5}$ olarak hesaplanmıştır. Sert alümina ilavesinin hem aşınma miktarını hem de sürtünme katsayısını artırması CYSZ'ye göre aşınma mekanizmasının değiştiğini

göstermektedir. 4N yük altında CA numunesinin sürtünme katsayısı 0.84 iken yük arttığında 0.75 olarak bulunmuştur. CA içerisine ağırlık %3 TiO_2 ilave edilmiş numunede ise aşınma miktarı 4 N yük altında $18.1 \text{ mm}^3 \text{ Nm}^{-5}$ iken 8N yük altında bu değer $21.2 \text{ mm}^3 \text{ Nm}^{-5}$ olarak bulunmuştur. CA ve CTA numunelerinde 4N yük altında aşınma miktarları birbirine çok yakın çıkmışken 8N yük altında TiO_2 ilaveli numunenin aşınma miktarı daha düşük çıkmıştır. Tek başına CYSZ içerisine TiO_2 ilavesi aşınma miktarını düşürmezken alümina ile birlikte kaplandığında 8N yük altında aşınma miktarını yaklaşık %40 iyileştirdiği söylenebilir. Her ne kadar CYSZ'nin aşınma miktarı düşük olsa da Al_2O_3 ve TiO_2 ilavesi sertlik değerini önemli oranda artırmıştır.

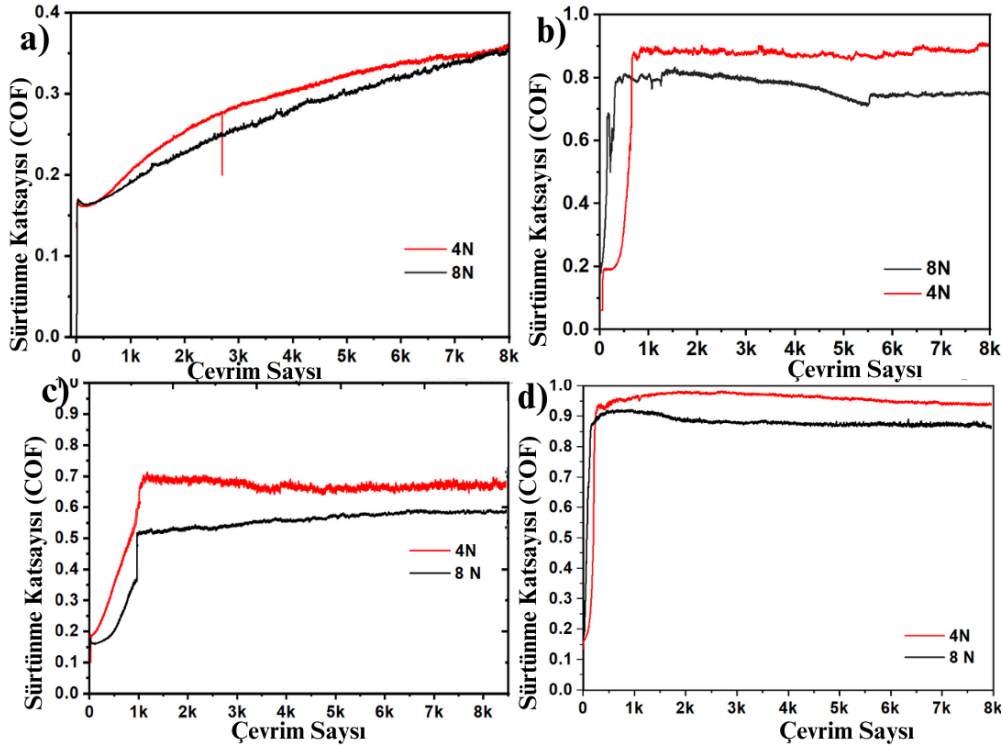


Şekil 8 Kaplamaların farklı yükler altındaki; a) Aşınma miktarı, b) Sürtünme katsayısı

Şekil 9'da kaplamaların farklı yükler altında 8000 çevrim sonrasında elde edilen sürtünme katsayısı grafikleri görülmektedir. CYSZ'nin sürtünme katsayısı her iki yük içinde yaklaşık 200 çevrimden sonra bir azalma gösterip sonrasında tekrar artmaya devam etmiştir (Şekil 9a). Sürtünme katsayısı yaklaşık 1000 çevrimden sonra yavaş yavaş kararlı hale geldi ve önemli bir değişim gözlemlenmedi (Şekil 9

b-c). Bu kararlı aşınma aşaması olarak da bilinen ikinci sürtünme ve aşınma aşaması olarak bilinmektedir [35]. Yaklaşık 500-800 çevrim arasında 4 N yük uygulanan numune ile 8 N yük uygulanan numunenin grafikleri arasındaki mesafe açılmıştır. Her iki yük için CYSZ'nin sürtünme katsayısı grafiği 8000 çevrimde üst üste gelmiştir. Al₂O₃ ilave edilmiş CYSZ numunenin sürtünme katsayısı grafiklerine bakıldığında (Şekil 9b), 4N yük altında yaklaşık 1000 çevrimden sonra kararlı hale gelmiştir. 8N yük altındaki numunede 5520. çevrim de belirgin bir iniş ve ani bir çıkış görülmektedir. Bunun muhtemel nedeni kopan bir parçacığın hareketinden olabilir. CT numunesi her iki farklı yük için 1000 çevrim sonrası kararlı hale gelmiştir. CTA numunesi de yaklaşık 500 çevrim sonrasında uygulanan her

iki yük için kararlı hale gelmiştir. Uygulanan yükün artmasıyla yüksek temas basıncı ve sürtünme ısıyla tribo-oksit oluşumu gözlenir ve bu durum sürtünme katsayısının azalmasına ve aşınma kaybının artmasına neden olmuştur [36]. Artan yük ile birlikte yüzeyde oluşan tribo-oksit tabakası deforme olursa kompozit kaplamanın yük taşıma oranı düşerek abrasif aşınmaya bağlı yüzey hasarları meydana gelmiştir. Hem ilave edilen sert TiO₂, Al₂O₃ partikülleri, hem de aşınarak kopan partiküller aşınma oranının ve sürtünme katsayısının değişmesine neden olmuştur. Diğer bir ifadeyle sert kalıntılar aşındırıcı parçacıklar gibi davranarak sürtünme katsayısının artmasına neden olmuştur [37].



Şekil 9. 4N ve 8N yük altında oluşan sürtünme katsayısı grafikleri a) CYSZ kaplama, b) CA kaplama, c) CT kaplama, d) CTA kaplama

Benzer bir çalışmada Ji ve arkadaşları [38] aşınan parçacıklarının tekrardan sıvanarak sürtünme katsayısını artırdığını bildirmişlerdir. Şekil 10'da aşınma sonrası 4N ve 8N yük altında oluşan aşınma izleri ve izlerin EDS sonuçları görülmektedir. Şekil 10 a-d) 4N yük altında CYSZ, CA ve CT, CTA numunelerine ait aşınma SEM resimleri ve hemen üstünde EDS sonuçları detay resmi olarak verilmiştir. Her bir SEM resimlerinde plastik deformasyon ve yorulma çatlakları belirgin bir şekilde

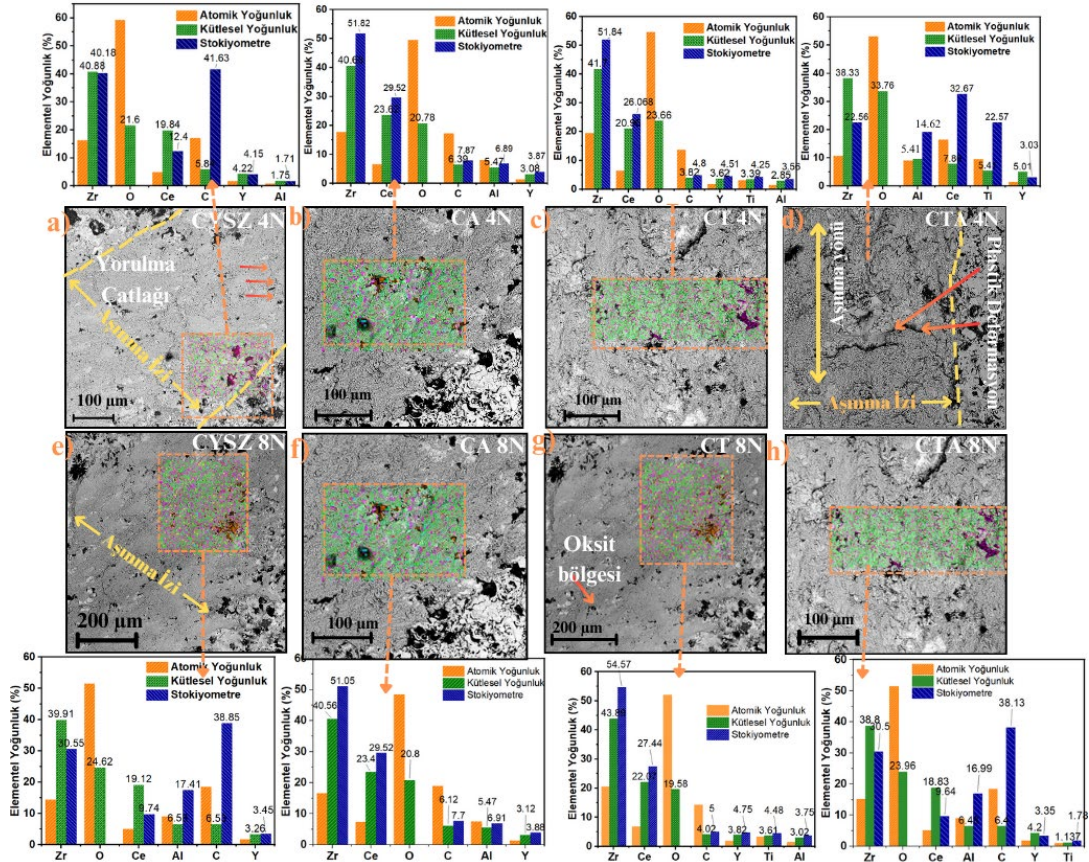
görülmüştür. Ayrıca, 4N yük altındaki her bir kaplamanın EDS sonuçlarında Al elementine rastlanmıştır. Şekil 11 d-h) 8N yük altında CYSZ, CA, CT ve CTA kaplamalarına ait aşınma SEM resimleri ve hemen altında EDS sonuçları verilmiştir. Uygulanan yük 4N'dan 8N'a çıkarıldığında alümina oranının arttığı tespit edilmiştir. Bu durum aşındırıcıdan kaplama yüzeyine alümina geçişi olduğunu göstermektedir. Çünkü adeziv aşınma, malzemelerin birbirine temas ettiği ve

birbirleriyle sürtündükleri durumlarda ortaya çıkan bir aşınma şeklidir. Bu sürtünme sonucunda, malzemelerin yüzeylerindeki atomlar arasında çeşitli etkileşimler meydana gelir ve malzemelerin yüzeylerinde hasarlar oluşabilir. Özellikle 4N yük altında adezif aşınmadan söz etmek daha doğru olacaktır. İki malzeme arasındaki yapışma ve sürtünme kuvvetleri ne kadar yüksekse, aşınma da o kadar belirgin olmuştur. Yük 8N'a artırıldığında adezif aşınmanın yanı sıra abrezif aşınma da meydana gelmiştir. Zira SEM resimlerinde bazı kopan parçacıkların varlığından söz etmek mümkündür.

4. SONUÇ

CYSZ, CYSZ/ Al₂O₃, CYSZ/ TiO₂ ve CYSZ/Al₂O₃/TiO₂ kaplamalar paslanmaz çelik üzerine atmosferik plazma spreyleme yöntemi ile başarıyla kaplanmıştır. Kaplamanın mikro yapısal ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Yapılan EDS analizlerinde kaplamaları oluşturan tozların başarılı bir şekilde dağılım gösterdiğini ispatlamıştır. Yüzey ve kesit SEM

resimleri de kaplamanın bağ katman ile tutunmasının sıkı olduğunu herhangi bir oksitlenme olmadığını göstermiştir. Üretilen 4 farklı kompozit kaplamanın sertlik değerlerini CYSZ içeresine ilave edilen TiO₂ ve Al₂O₃ sert parçacıkların artırdığı gözlemlenmiştir. En yüksek sertlik değeri CTA adlı numune de elde edilmiştir. Kompozit kaplamalar iki farklı yük altında kuru aşınma deneyine tabii tutulmuştur. 4N yük altında sürtünme katsayısı tüm numuneler için yüksek çıkarken yük 8N' artırıldığında sürtünme katsayısı düşmüştür. 4N ve 8N yük için aşınma kaybı incelendiğinde, Al₂O₃ ihtiva eden numunelerin daha fazla aşındığı görülmüştür. Ayrıca, yük arttığında aşınma miktarının arttığı bulunmuştur. Yükün 8N'a çıkarılmasıyla tribo-oksitlerin parçalanarak ara yüzeye aktarılması adezif aşınmanın yanı sıra abrazif aşınmaya sebep olmuş ve kaplamanın aşınma miktarı artarken, sürtünme katsayısının azaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 10. Aşınma izleri ve EDS sonuçları; a) CYSZ 4N yük altında aşınma izi ve EDS sonuçları, b) CA 4N yük altında aşınma izi ve EDS sonuçları, c) CT 4N yük altında aşınma izi ve EDS sonuçları, d) CTA 4N yük altında aşınma izi ve EDS sonuçları, e) CYSZ 8N yük altında aşınma izi ve EDS sonuçları, f) CA 8N yük altında aşınma izi ve EDS sonuçları, g) CT 8N yük altında aşınma izi ve EDS sonuçları, h) CTA 8N yük altında aşınma izi ve EDS sonuçları

KAYNAKLAR

1. Zhicheng, L., Jiangzheng, S., Chuang, H., Fan, W., Dejun, K., “Effect of laser power on microstructure and tribological performance of WC–10Co4Cr coating”, *International Journal Applied Ceramic Technology*, Vol. 20, Issue 5, Pages 2847–2859, 2023.
2. Zhu, L., Pengsheng X., Qing, L., Guiru, M., Yuan, R., Zhichao, Y., Peihua, X., Zhe, L., “Recent research and development status of laser cladding: A review” *Optics & Laser Technology*, Vol. 138, Pages 106915, 2021.
3. Yuan, J., Zhan, Q., Huang, J., Ding, S., Li, H., “Decarburization mechanisms of WC-Co during thermal spraying: Insights from controlled carbon loss and microstructure characterization”, *Materials Chemical Physis*, Vol. 142, Issue 1, Pages 165–171, 2013.
4. Qi, W., Ding, D., Luo, W., Jin, W., Kou, Q., Ge, C., Xiao, S., “Production of al–mn/wc composite coatings with electrodeposition in AlCl₃–NaCl–KCl–MnCl₂ molten salts”, *Coatings*, Vol. 13, Issue 7, Pages 1246, 2023.
5. Pulsford, J., Venturi, F., Kamnis, S., and Hussain, T., “Sliding wear behaviour of WC-Co reinforced NiCrFeSiB HVOAF thermal spray coatings against WC-Co and Al₂O₃ counterbodies”, *Surfaces and Coatings Technology*, Vol. 386, Pages 125468, 2020.
6. Bang, J., Lee, E., “Enhancing wear resistance of A390 aluminum alloy: A comprehensive evaluation of thermal sprayed WC, CrC, and Al₂O₃ coatings”, *Coatings*, Vol. 14, Issue 7, Pages 853, 2024.
7. Gaur, U.P., Kamari, E., “Applications of thermal spray coatings: A review”, *Journal of Thermal Spray and Engineering*, Vol. 4, Pages 106–114, 2024.
8. Hardwicke, C. U., Lau, Y. C., “Advances in thermal spray coatings for gas turbines and energy generation: A review” *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol. 22, Pages 564-576, 2013.
9. Guo, L., H., Wenting, C., Wenbo, Zhaolu, Jian, X., Yiqian, H., Yang Wu, G., Lihua, G., Dongqing, L., Zhao, Z., Liangliang, W., Yuyi, G., Tiehao, Z. Qianhui, Q., Hongbo G., “Progress on high-temperature protective coatings for aero-engines”, *Surface Science and Technology*, Vol. 1, Issue 1, 2023.
10. Guo, L., Zhang, X., Liu, M., Yang, S., Dai, J. W., “CMAS + sea salt corrosion to thermal barrier coatings”, *Corrosion Science*, Vol. 218, Pages 111172, 2023.
11. Bogdan, M., Peter, I., “A comprehensive understanding of thermal barrier coatings (TBCs): applications, materials, coating design and failure mechanisms”, *Metals*, Vol. 28, Pages 101728, 2024.
12. Konter, M., Bossmann, H. P., “Materials and coatings developments for gas turbine systems and components”, *Modern Gas Turbine Systems: High Efficiency, Low Emission, Fuel Flexible Power Generation*, Peter Jansohn editor, High Efficiency, Low Emission, Fuel Flexible Power Generation, Pages 327–380, Woodhead Publishing Series in Energy, 2013.
13. Roche, J., Alvarado-Orozco, J.M., Gómez, P.A., Cano, I. G., Dosta, S., Toro, A., “Hot corrosion behavior of dense CYSZ/YSZ bilayer coatings deposited by atmospheric plasma spray in Na₂SO₄ + V₂O₅ molten salts”, *Surfaces and Coating Technology*, Vol. 432, Pages 128066, 2022.
14. Avcı, A., Eker, A.A, Eker, B., “Microstructure and oxidation behavior of atmospheric plasma-sprayed thermal barrier coatings”, In *xergetic, Energetic and Environmental Dimensions*, Ibrahim Dincer, C. Ozgur Colpan, Onder Kizilkan editors, Pages 793-814, Elsevier, 2018.
15. Wei, Z. Y., Cai, H. N., Meng, G. H., Tahir, A., Zhang, W., “An innovative model coupling TGO growth and crack propagation for the failure assessment of lamellar structured thermal barrier coatings”, *Ceramic International*, Vol. 46, Issue 2, Pages 1532–1544, 2020.
16. Jun, B., Jonsson, N., Jordan, E. H., Cooper, R. C., “CMAS deposition rate and sequence effects on cyclic life in gradient testing”, *SN Applied Science*, Vol. 5, Issue 5, Pages 138, 2023.
17. Özçelik, A., Akdoğan Eker, A., Karabaş, M., Avcı, A., Küçükyıldırım, B. O. “Enhanced CMAS and hot corrosion degradation of YSZ thermal barrier coating with nano powders”, *Surfaces and Coatings Technology*, Vol. 481, Pages 130624, 2024.
18. Li, B., Wu, J., He, X., Wang, B., Guo, L., “Sc-doped Gd₂Zr₂O₇ coating on YSZ thermal barrier coatings to resist CMAS + molten salt attack”, *Ceramic International*, Vol. 48, Issue 8, Pages 11662–11671, 2022.
19. Akin, I., Yilmaz, E., Sahin, F., Yucel, O., Goller, G., “Effect of CeO₂ addition on densification and microstructure of Al₂O₃-YSZ composites”, *Ceram International*, Vol. 37, Issue 8, Pages 3273–3280, 2011.

20. Rejab, N. A., Azhar, A. Z. A., Ratnam, M. M., Ahmad, Z. A., “The effects of CeO₂ addition on the physical, microstructural and mechanical properties of yttria stabilized zirconia toughened alumina (ZTA)”, *International Journal Refractors Metals Hard Materials*, Vol. 36, Pages 162–166, 2013.
21. Roche, J., Gómez, P. A., Alvarado-Orozco, J. M., Toro, A., “Hot corrosion and thermal shock resistance of Dense-CYSZ/YSZ bilayer thermal barrier coatings systems applied onto Ni-base superalloy”, *Journal European Ceramic Society*, Vol. 40, Issue 15, Pages 5692–5703, 2020.
22. Ali, M. K. A., Xianjun, H., “Exploring the lubrication mechanism of CeO₂ nanoparticles dispersed in engine oil by bis(2-ethylhexyl) phosphate as a novel antiwear additive”, *Tribology International*, Vol. 165, Pages 107321, 2022.
23. Pimenov, D. Y., Silva, L. R. R. Ercetin, A., Mikolajczyk, O.T., Giasin, K., “State-of-the-art review of applications of image processing techniques for tool condition monitoring on conventional machining processes”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.130, Pages 57-85, 2024.
24. Li, B., “Study on Porosity of thermal-sprayed commercially pure aluminum coating”, *Materials*, Vol. 16, Issue, 2023.
25. Bal, E., Karabaş, M., “Effect of molten glass on degradation of stabilized zirconia thermal barrier coatings”, *Journal of the Korean Ceramic Society*, Vol. 60, Issue 2, Pages 331–343, 2023.
26. Shin, D., and Hamed, A., “Influence of micro-structure on erosion resistance of plasma sprayed 7YSZ thermal barrier coating under gas turbine operating conditions”, *Wear*, Vol. 396–397, Pages 34–47, 2018.
27. Chen, K., Song, P., Hua, C., Z., Ying, Huang T., Li, C., Lu, J., “Effect of YSZ-dopant on microstructure and hardness property of the Al₂O₃–40%TiO₂ plasma sprayed coating”, *Material Research Express*, Vol. 5, Issue 8, Pages 086504, 2018.
28. Saral, U., Toplan, N., “Thermal cycle properties of plasma sprayed YSZ/Al₂O₃ thermal barrier coatings”, *Surface Engineering*, Vol. 25, Issue 7, Pages 541–547, 2009.
29. Srikanth, A., Bolleddu, V., “Microstructural, mechanical and tribological characteristics of reduced graphene oxide (rGO) reinforced nanostructured Al₂O₃-13wt. %TiO₂ coatings”, *Journal of the Australian Ceramic Society*, 2024.
30. Mehar, S., Sapate, S.G., “Contact severity maps for plasma sprayed YSZ modified Al₂O₃-3% TiO₂ coatings”, *Ceramic International*, Vol. 50, Issue 8, Pages 13003–13013, 2024.
31. Franco, D., Vargas, F., López, E., and Ageorges, H., “Wear behavior at high temperature of ZrO₂–Y₂O₃ (YSZ) plasma-sprayed coatings”, *Journal of Material Science*, Vol. 59, Issue 1, Pages 20–37, 2024.
32. Bai, L., Zhang, H., Wan, S., Yi, G., Sun, H., “Tailoring wear and tribo-induced interaction of YSZ coating sliding against Si₃N₄ and Al₂O₃ counterparts”, *Wear*, Vol. 518–519, Pages 204628, 2023.
33. Avcı, A., Karabaş, M., Akdoğan Eker, A., Akman, E., Aslan, C., “Hot corrosion and CMAS degradation of laser-glazed YSZ coating with optimum parameter”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, Vol. 237, Issue 11, Pages 2722-2734, 2023.
34. Avcı, A., “Termal bariyer kaplamaların oksidasyon ve sıcaklık korozyonu davranışlarının incelenmesi”, *Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi İstanbul*, 2015.
35. Zhang J., “Effect of WC-12Co content on wear and electrochemical corrosion properties of Ni-Cu/WC-12Co composite coatings deposited by laser cladding”, *Surfaces and Coatings Technology*, Vol. 393, Pages 125807, 2020.
36. Gültekin, D., Duru, E., Akbulut, H., “Effect of heat treatment and applied load on mechanical and tribological properties of Ni-B-CeO₂ composite electroless coating”, *European Journal of Science and Technology*, Issue 34, Pages 573-578, 2022.
37. Zhao, Y., Wang, H., Zhang, L., Xiaofeng L., Guo, Z., Zhang, J., Yi, D., Liu, B., Bai, P., “Study on the microstructure and properties of WC-12Co cemented carbide fabricated by selective laser melting”, *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 20, Pages 3512–3521, 2022.
38. Ji, W., Yuan, Y., Zou, B., Dai, S., and Zhang, H. “Friction and wear behaviour of cemented carbide tool materials sliding against Al₂O₃ and Si₃N₄ ceramics under dry condition”, *Ceramic International*, Vol. 44, Issue 14, Pages 17486–17491, 2018.