

CrN KAPLANAN SAF TİTANYUMUN YAPISAL VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

İlhan ÇELİK *

Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Gümüşhane Üniversitesi, 29100, Gümüşhane

ÖZET

Temas halinde çalışan makine elemanlarının bulunduğu uygulamalarda veya korozif ortamlarda kullanılan mühendislik malzemelerinin kullanım ömürlerini uzatmak için genellikle yüzey kaplama yöntemlerinden yararlanılmaktadır. Bu kaplama yöntemlerinin en önemlilerinden bir tanesi PVD kaplama işlemidir. PVD kaplama, birçok mühendislik uygulamalarında kullanılan makine elemanlarının yüzey özelliklerini iyileştirmek için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu çalışmada, sahip olduğu mükemmel korozyon direnci, yüksek dayanım/ağırlık oranı ve biyoyoumluluk gibi üstün özelliklerine karşın zayıf aşınma direnci nedeniyle kullanım alanları kısıtlanmakta olan saf titanyumun (Kalite 2) yüzeyine PVD yöntemi kullanılarak CrN kaplanmıştır. Kaplanmış ve kaplanmamış numunelerin aşınma davranışları tribolojik uygulamalar için incelenmiştir. CrN kaplanmış numunelerin yüzey morfolojisi ve mikroyapısı XRD ve SEM cihazları yardımıyla incelenmiştir. Aşınma deneyleri pin-on-disk cihazında yapılmıştır. Çalışma sonucunda, CrN kaplanmış numunelerin kaplanmamış numunelere göre daha yüksek yüzey sertliğine ve daha iyi aşınma direncine sahip olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Titanyum, Aşınma, CrN kaplama

INVESTIGATION OF STRUCTURAL AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF CrN COATED PURE TITANIUM

ABSTRACT

Surface treatments and coatings are the practical applications used to extend the lifetime of engineering materials especially used in corrosive and friction/contact applications. PVD coatings are one of the most wear resistance coatings widely used in many practical mechanical applications. In the present study, the surface of commercial pure (Grade 2) titanium was coated with CrN by physical vapor deposition (PVD). The friction and wear properties of the CrN coated samples were investigated for tribological applications. Surface morphology and microstructure of the CrN coated samples were analyzed by X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM). In addition, tribological properties were investigated using pin-on-disc tribometer. It was observed that the wear resistance and surface hardness values of coated samples were higher than the uncoated samples values.

Keywords: Titanium, Wear, CrN coating

1. GİRİŞ

İnsan vücudundaki canlı dokularının kaybolan işlevlerini yerine getirmek, hasarlı dokuların kendilerini onarmalarına katkı sağlamak veya eksik kalan fonksiyonları desteklemek amacıyla kullanılan malzemelere biyomalzeme denilmektedir. Doğal veya sentetik malzemelerden imal edilen biyomalzemeler, sürekli olarak veya belli aralıklarla vücut akışkanlarıyla (örneğin kan) temas eden malzemelerdir [1]. Canlı bir dokuyla temas halinde olacak şekilde kullanılacak bir malzemenin, kas hareketleri ve vücut ağırlığı gibi mekanik etkilere, sıcaklık ve radyasyona, korozyon ve parçalanma gibi kimyasal etkilere karşı dayanıklı olması istenir; ayrıca dokularla uyumluluk içerisinde ve toksik etki yapmadan (osteointegrasyon) çalışması beklenir [2].

* Sorumlu Yazar: ilhancelik@gumushane.edu.tr

Biyomedikal uygulamalarda biyomalzeme olarak metalik malzemeler yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Günümüzde en çok kullanılan metalik biyomalzemeler ise titanyum ve alaşımları, paslanmaz çelikler, kobalt ve alaşımlarıdır. Bunların içerisinde titanyum; bir biyomalzemedeki beklenen özellikleri diğerlerine göre daha iyi oranda karşıladığından dolayı medikal uygulamalar için en uygun malzemedir [3]. Ayrıca titanyum, osteointegrasyon vasıtasıyla kemikle kalıcı bir bağ oluşturma yeteneğinden dolayı protezlerde sıklıkla kullanılmaktadır [4]. Bu olumlu özelliklerine rağmen titanyumun zayıf aşınma direnci nedeniyle sürtünme ve temasın olduğu uygulamalardaki kullanımı kısıtlanmaktadır [5]. Titanyum ve alaşımlarının düşük özgül ağırlığa, mükemmel korozyon dayanımına ve yüksek mukavemetine rağmen zayıf tribolojik özellikleri nedeniyle kısıtlı kullanım alanına sahip olması birçok araştırmacının titanyumun zayıf aşınma direncini iyileştirmeye yönelik çalışmalar yapmasına zemin hazırlamıştır. Literatürde titanyum ve alaşımlarının aşınma direncini iyileştirmek için pek çok çalışma mevcuttur [6-11]. Bu çalışmada, biyomalzeme olarak kullanılabilen saf titanyumun zayıf tribolojik özelliklerinin iyileştirilmesi için Ark PVD kaplama yöntemi ile malzeme yüzeyine CrN kaplanarak yapısal, mekanik ve tribolojik özelliklerindeki değişimler incelenmiştir. Yüzey işlemi uygulandıktan sonra mekanik özelliklerin tespit edilebilmesi için mikro-sertlik ölçümleri ve tribolojik özelliklerin belirlenebilmesi için ise aşınma deneyleri yapılmıştır. Ayrıca SEM ve XRD cihazları kullanılarak yapısal analizler yapılmıştır.

2. MALZEME ve YÖNTEM

Bu çalışmada, deney malzemesi olarak ticari saflıktaki titanyum (Kalite 2) kullanılmıştır. Boyutları 15x15x5mm olan ve kimyasal bileşimi Tablo 1’de verilen saf titanyum numuneler, sırasıyla 60, 400, 800, 1200 SiC zımparalar ile parlatılmış ve her bir ara safhada etil alkol ile durulama yapılmıştır. Parlatma işleminin ardından ortalama pürüzlülük değeri (Ra) yaklaşık 0.1 µm olan yüzeyler elde edilmiştir. Numuneler, sıcak hava fanıyla kurutulduktan sonra kaplama işlemleri için hazır hale getirilmiştir.

Tablo 1. Saf titanyum (Kalite 2) (%) kimyasal bileşimleri

Deney Malzemesi	Kimyasal Bileşim (%)					
	O	H	N	Fe	C	Ti
Saf Titanyum (Kalite 2)	0.25	0.015	0.03	0.3	0.1	Geri Kalan

Saf titanyum numunelerin yüzeylerine uygulanan PVD yöntemi İstanbul’da faaliyet gösteren Barlok PVD Kaplama şirketi tarafından yapılmıştır. PVD yöntemi kullanılarak kaplanan CrN kaplama parametreleri Tablo 2’de verilmiştir:

Tablo 2. PVD kaplama işlemi parametreleri

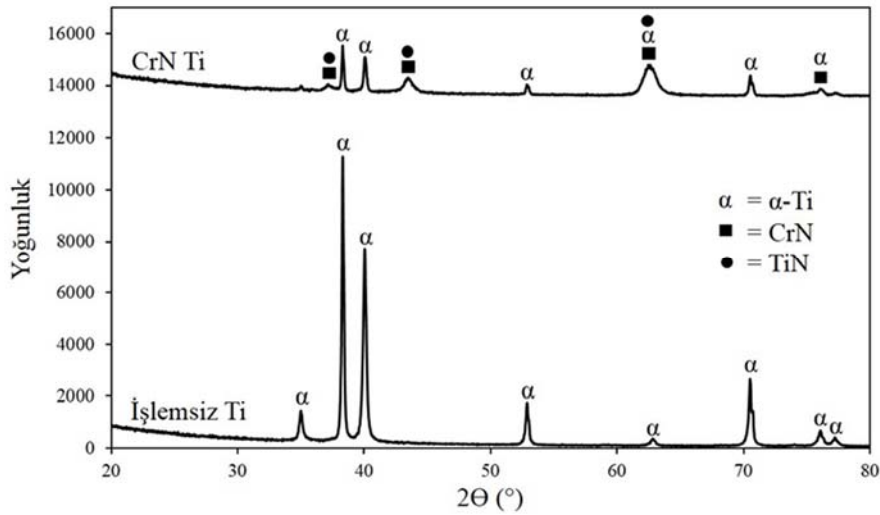
Parametreler	
Taban Malzeme Bias (-V)	DC 100 V
Çalışma Basıncı (Pa)	0.33 ± 0.03 Pa
Çalışma Sıcaklığı (°C)	300 – 350 C°
Gaz Akışı (%)	% 40
Gaz Oranı	(N) 70 – 75 ps
Kaplama Süresi	60 dakika
Hedef Malzemeler	CrN
GLOW SÜRESİ	40 dk
GLOW AŞAMALARI	20dk 240V pulse 20 dk 280V
GLOW GAZ DEGERLERİ	2.0 ps Ar
ÖN ısıtma süresi	60 dk.

Yüzey işlemleri uygulanmış saf titanyumun tribolojik özelliklerini belirlemek amacıyla Turkey PODTW&RWT pin-on-disk aşınma cihazı kullanılmıştır. Numuneler, 6 mm çapındaki alümina bilyeye karşı kuru sürtünme şartlarında aşındırılmıştır. Aşınma deneyleri 22 ± 2 °C sıcaklık ve $\% 49 \pm 3$ nem oranına sahip laboratuvar şartlarında yapılmıştır. Deneyler 2 N normal yük altında, 120 dev/dk devir sayısında ve 141 metre aşınma mesafesinde gerçekleştirilmiştir. Aşınma oranı $V = W/FL$ denklemi kullanılarak hesaplanmıştır. Burada, V aşınma oranını (mm^3/Nm), W aşınma hacmini (mm^3), F normal yükü (N) ve L aşınma mesafesini (m) göstermektedir. Numunelerin aşınmış yüzeyleri SEM cihazı kullanılarak incelenmiştir. Saf titanyum numunelerin yüzey sertlikleri Buehler Micromet 2001 mikrosertlik cihazında ölçülmüştür. Batıcı uç olarak 136° tepe açısına sahip Vickers uç kullanılmıştır. Ölçümler, 100gr'lık yükte ve 15sn boyunca gerçekleştirilmiştir. Numunelerin XRD ölçümleri; $\lambda = 1.5405 \text{ \AA}$ dalga boyunda, $\text{CuK}\alpha$ radyasyon kaynaklı Rigaku-2200D/Max marka geniş aralıklı difraktometre cihazı ile yapılmıştır. XRD ölçümleri, $2\theta = 20-80^\circ$ tarama açısında ve 1 derece/dakika tarama hızında gerçekleştirilmiştir.

3. BULGULAR ve TARTIŞMA

3.1. XRD Analizi

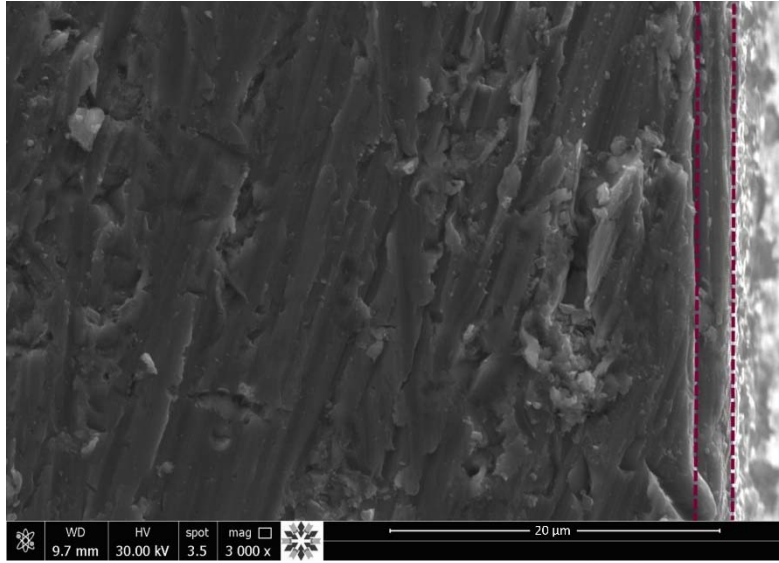
İşlemsiz ve CrN kaplanmış saf titanyum numunelerin XRD grafikleri Şekil 1'de verilmiştir. Grafikten de anlaşılacağı üzere saf titanyumun yapısal olarak tamamen hegzagonal α -Ti fazından oluştuğu görülmektedir [12]. CrN kaplanmış titanyumun XRD spektrumuna bakıldığında ise taban malzemeden yansıyan α -Ti fazının yanı sıra CrN fazının da mevcut olduğu görülmektedir. Ayrıca ICDD 00-002-12212 numaralı karttan $\Theta = 37.19^\circ$, $2\Theta = 43.45^\circ$ ve $2\Theta = 62.52^\circ$ açılarında TiN fazının oluştuğu tespit edilmiştir. Kaplanmış yüzeyin XRD spektrumunda taban malzemeden gelen piklerin de var olması, saf titanyumun yüzeyinde elde edilen kaplamanın ince film şeklinde oluştuğunu göstermektedir.



Şekil 1. İşlemsiz ve CrN kaplanmış saf titanyum numunelerin XRD grafikleri

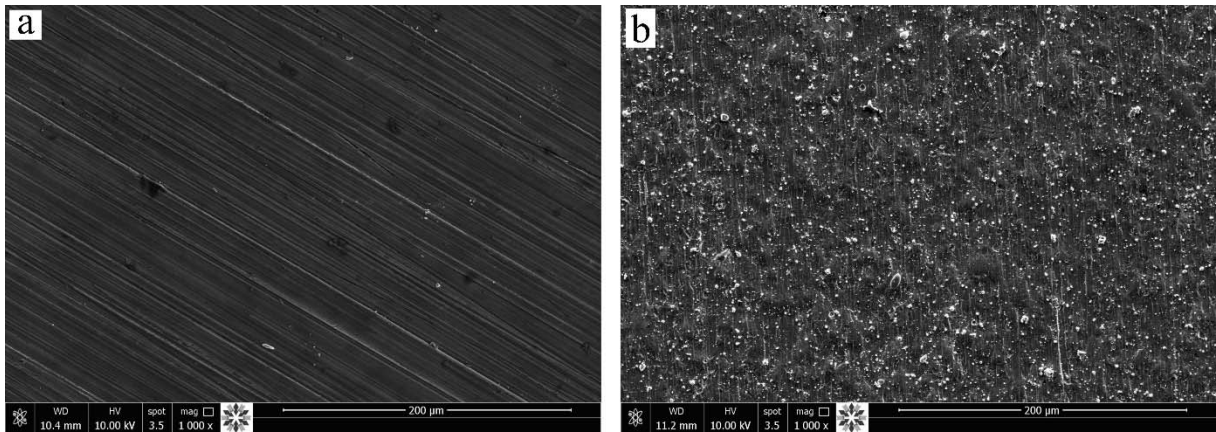
3.2. SEM Analizi

Saf titanyumun yüzeyine kaplanan CrN filmlerin kesit görüntüsü Şekil 2'de verilmiştir. Yaklaşık olarak 2-3 μm kalınlığında kaplama tabakası elde edildiği şekilden görülmektedir.



Şekil 2. CrN kaplanmış saf titanyumun kesitten çekilmiş SEM görüntüsü

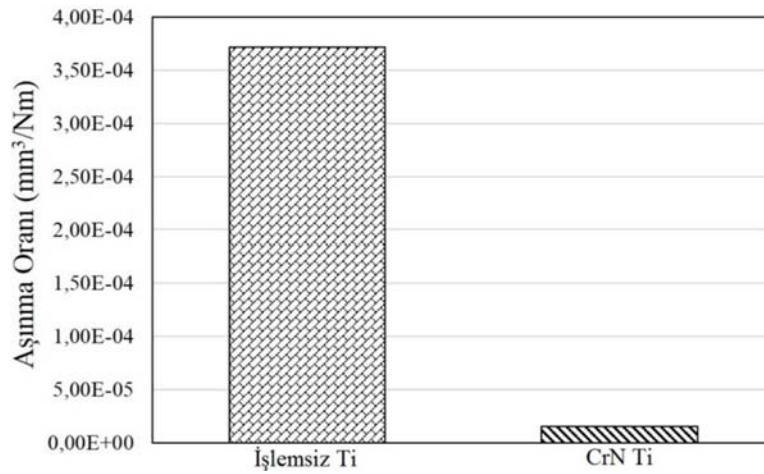
İşlemsiz saf titanyum, mat-gri renge sahip bir metaldir. CrN kaplandıktan sonra elde edilen yüzey ise yine grimsi renk tonunun hâkim olduğu bir görünüm kazanmıştır. İşlemsiz ve CrN kaplanmış saf titanyum numunelerin yüzeylerinin SEM görüntüleri Şekil 3'te verilmiştir. İşlemsiz saf titanyumun yüzey pürüzlülük değeri (Ra) ortalama 0.1 µm, CrN kaplama sonrası oluşan yüzeyin pürüzlülük değeri (Ra) ise ortalama 0.33 µm olarak ölçülmüştür. 2-3 µm kalınlığında kaplama elde edilmiş yüzeyler, PVD yöntemiyle üretilmiş CrN kaplamaların tipik bir morfolojisine sahiptir [13]. Yüzeyde farklı boyutlara sahip damlacık şeklinde oluşumlar meydana gelmiştir [14-17]. Ark PVD uygulamalarında, katot olarak kullanılan malzemenin yeterli seviyede soğutulmaması gibi durumlarda yüzeyde damlacık şeklinde sıvı kütleleri oluşmaktadır ve bu damlacıklar kaplanacak malzemenin üzerine yapışmaktadır [18]. Malzeme yüzeyinde oluşan bu sıvı damlacıklar, kaplama kalitesini birçok açıdan olumsuz etkileyebilmektedir [19]. Nitekim yüzeydeki bu düzensizlikler nedeniyle, CrN kaplanmış saf titanyumun Ra değerinin, işlemsiz saf titanyumun Ra değerine nazaran daha yüksek değerlere sahip olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 3. Numune yüzeylerinin SEM görüntüsü: (a) İşlemsiz ve (b) CrN kaplanmış saf titanyum

3.3. Aşınma Davranışı

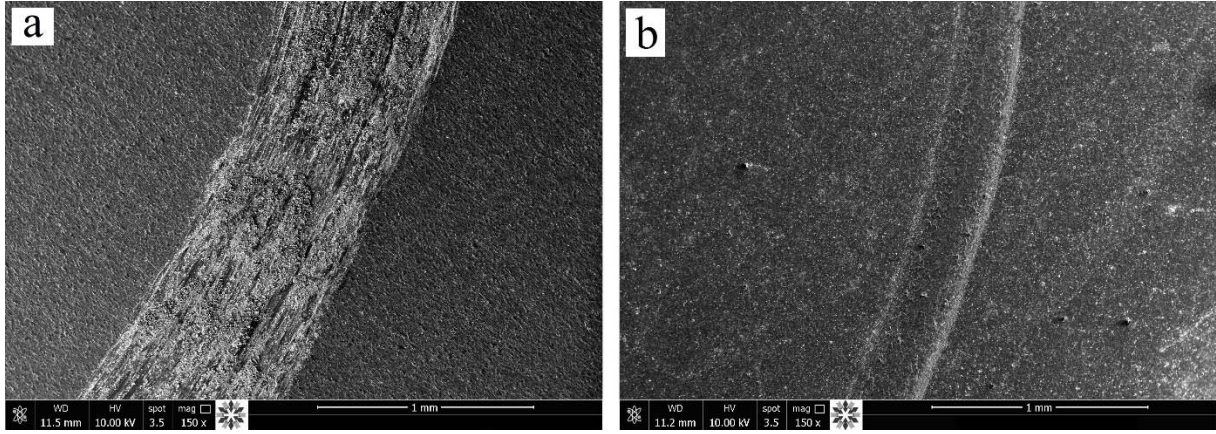
Aşınma deneyleri sonucunda, işlemsiz saf titanyumun sürtünme katsayısı değeri yaklaşık 0.55 iken CrN kaplanmış saf titanyumun sürtünme katsayısı değeri ise yaklaşık 0.65 mertebelerinde olduğu tespit edilmiştir. İşlemsiz numunelerdeki yüksek sürtünme katsayısının sebebi, aşınma sırasında alümina top ile malzeme yüzeyi arasındaki aşınma kalıntılarının abrasif etki yapması olabilir. Aşınma deneyleri sırasında temas eden yüzeyler arasındaki malzeme transferi ve tribokimyasal reaksiyonlar, işlemsiz saf titanyumun kuru aşınma şartlarındaki davranışını etkileyebilmektedir [20]. Bununla birlikte nispeten düşük kesme mukavemetine sahip SPH kristal kafes yapıları saf titanyum, daha yüksek mukavemet değerlerine sahip diğer malzemelere nazaran daha yüksek sürtünme katsayısı sergiler [20]. Ayrıca titanyumun yüzeyinde oda sıcaklığında bile oluşan oksit tabakasının bu etkiye katkı sağladığı düşünülmektedir [6]. İşlemsiz ve CrN kaplanmış saf titanyum numunelerin aşınma oranlarını gösteren grafik Şekil 4'te verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere CrN kaplanmış numunelerin aşınma oranları, işlemsiz numunelere göre önemli derecede azalmıştır. Kaplama işlemiyle birlikte numunelerin yüzey sertlik değerlerinde meydana gelen artış, aşınma direncinde iyileşmeye neden olmuştur. Nitekim işlemsiz saf titanyumun sertlik değeri $200 \pm 15 \mu\text{m}$ iken CrN kaplanmış saf titanyumun sertlik değeri $350 \pm 15 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür. Ayrıca, malzeme yüzeyinin pürüzlülük değeri arttıkça sürtünme katsayısı değeri de artmaktadır [21]. Bu durum yüzey pürüzlülüğünün sürtünme ve aşınma açısından önem arz ettiğini göstermektedir. Bu çalışmada elde edilen verilere göre CrN kaplanan malzemelerin Ra değeri, işlemsiz numunelerinkine nazaran daha yüksek değerlere sahiptir. Kaplama esnasında oluşan krater şeklindeki damlacıkların sebep olduğu bu sonuç, kaplanmış numunelerin sürtünme katsayısının işlemsiz numunelere göre daha yüksek çıkmasını da açıklamaktadır. Her ne kadar kaplanmış numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri ve sürtünme katsayıları daha yüksek olsa da, sert ve yağlayıcılık etkisi ile daha iyi tribolojik özellikler sergilediği tespit edilmiştir.



Şekil 4. 2N yük altında yapılan aşınma deneyleri sonrasında hesaplanan aşınma oranları

Şekil 5'te aşınma deneyleri sonrasında elde edilen aşınmış yüzeylerin SEM görüntüleri verilmiştir. İşlemsiz saf titanyumun aşınma izleri incelendiğinde (Şekil 5a) abrasif aşınmanın etkin aşınma mekanizması olduğu anlaşılmaktadır. Aşınma deneyleri sonucunda işlemsiz saf titanyum numunelerin aşınmış yüzeylerindeki abrasif izlerin sebebi şu şekilde açıklanabilir: Titanyum, oksijene karşı affinitesi yüksek bir malzemedir [22]. Bu özelliği nedeniyle 500°C 'nin üzerindeki sıcaklıklarda hızlı bir şekilde oksidasyona uğramaktadır [23, 24]. Özellikle sürtünme ve temasın yoğun olduğu uygulamalarda, titanyumun yüzeyinde oluşan bu oksit tabakasının kararsız yapıda olması, yüzeyden kopmasına neden olmaktadır. Kopan oksit parçasının altında ortaya çıkan taban malzeme yüzeyinde yeniden oksit tabakası oluşmaktadır. Kopan oksit parçacıklarının temas eden yüzeyler arasında abrasif etki yapması nedeniyle bu kısır döngü sürekli bir şekilde devam etmektedir. Oksidatif aşınma olarak isimlendirilen bu mekanizma, titanyumun zayıf aşınma direncine sahip bir malzeme olmasına neden olmaktadır [25]. CrN

kaplamayla birlikte saf titanyumun yüzeyinin oksijenle teması engellenerek sert ve kararlı bir yüzey tabakası elde edilmiştir. Böylece aşınmaya karşı direnci yüksek bir yüzeyin meydana gelmesi sağlanmıştır. Yüzeyde elde edilen sert ve kararlı yapıdaki kaplama, CrN kaplamanın özellikle abrazyon aşınmaya karşı dirençli olmasını sağlamıştır [19]. Shan et al. [26] yapmış oldukları çalışmada, CrN kapladıkları 316L paslanmaz çeliğinin sertlik değerinin arttığını ve buna bağlı olarak da aşınma direncinde iyileşme tespit ettiklerini belirtmişlerdir. Lorenzo-Martin et al. [27] ise 5N ve 10N'luk yükler altında aşınma testine tabi tuttıkları CrN kaplanmış H-13 çelik numunelerin, kaplanmamış numunelere göre daha iyi aşınma direnci sergilediğini tespit etmişlerdir. Farklı kalınlıklarda elde edilen CrN kaplamaların farklı aşınma direncine sahip olduklarını, elde edilen kaplama kalınlığının değeri arttıkça aşınmaya karşı direncin de o derecede arttığını rapor etmişlerdir.



Şekil 5. Aşınmış yüzeylerin SEM görüntüsü: (a) İşlemsiz ve (b) CrN kaplanmış saf titanyum

4. SONUÇLAR

Ticari saflıktaki titanyumun (Kalite 2) yüzeyine, zayıf aşınma direncini iyileştirmek için PVD yöntemi kullanılarak CrN film başarılı bir şekilde kaplanmış ve uygulanan yüzey işlemi sonrasında saf titanyumun yapısal ve tribolojik özellikleri incelenerek elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

CrN kaplama sonucunda elde edilen yüzeylerde, damlacık (droplet) şeklinde kraterler oluşmuştur. Kaplanmış yüzeyin XRD spektrumunda taban malzemedenden yansıyan pikler de mevcuttur. Bu durum, saf titanyumun yüzeyinde elde edilen kaplamanın ince film şeklinde oluştuğunu göstermektedir. Ayrıca, kaplanmış yüzeylerde, taban malzemedenden yansıyan piklerin yanında CrN fazına ait pikler de tespit edilmiştir. Taban malzeme olan saf titanyumun ortalama yüzey pürüzlülük değeri 0.1 µm iken CrN kaplanmış saf titanyumun ortalama yüzey pürüzlülük değeri 0.33 µm seviyelerine yükselmiştir. CrN kaplama, saf titanyum numune yüzeylerinin sertliğini artırarak aşınma oranlarında önemli azalmalar sağlamıştır. Böylece aşınma direncinde artış elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

[1] Gümüşderelioğlu M. Biyomalzemeler. Bilim ve Teknik Dergisi, 2002; 7: 20–21.

[2] Ceyhan T, Köse N. Ortopedide biyomalzeme kullanımı: Genel bilgiler ve tanımlar. TOTBİD Dergisi, 2011; 10: 79-82,

[3] Lütjering G, Williams. JC. Titanium, Springer Press, Newyork, USA, 2007.

[4] Branemark R, Branemark PI, Rydevik B, Myers RR. Osseointegration in skeletal reconstruction and rehabilitation: A review. Journal of Rehabilitation Research and Development, 2001; 38: 175-181.

- [5] Oliveira V, Chaves RR, Bertazzoli R, Caram R. Preparation and Characterization of Ti-Al-Nb Orthopedic Implants. *Brazilian Journal of Chemical Engineering* 1998; 15: 326-333.
- [6] Celik I, Alsaran A, Purcek G. Effect of different surface oxidation treatments on structural, mechanical and tribological properties of ultrafine-grained titanium. *Surface & Coatings Technology*, 2014; 258: 842-848.
- [7] Celik I, Karakan M. Effect of plasma nitriding treatment on structural, tribological and electrochemical properties of commercially pure titanium. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part H-Journal of Engineering in Medicine*, 2016;230: 145-152.
- [8] Hu CJ, Chiu PH. Wear and Corrosion Resistance of Pure Titanium Subjected to Aluminization and Coated with a Microarc Oxidation Ceramic Coating. *International Journal of Electrochemical Science*, 2015; 10: 4290-4302.
- [9] Pawlak W, Kubiak KJ, Wendler BG, Mathia TG. Wear resistant multilayer nanocomposite WC(1-x)JC coating on Ti-6Al-4V titanium alloy. *Tribology International*, 2015; 82: 400-406.
- [10] Celik I, Karakan M, Bulbul F. Investigation of structural and tribological properties of electroless Ni-B coated pure titanium. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J-Journal of Engineering Tribology*, 2016; 230: 57-63.
- [11] Wu HB, Zhang XY, He XJ, Li M, Huang XB, Hang RQ, Tang B. Wear and corrosion resistance of anti-bacterial Ti-Cu-N coatings on titanium implants. *Applied Surface Science*, 2014;317: 614-621.
- [12] Purcek G, Saray O, Kul O, Karaman I, Yapici GG, Haouaoui M, Maier HJ. Mechanical and wear properties of ultrafine-grained pure Ti produced by multi-pass equal-channel angular extrusion. *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 2009; 517: 97-104.
- [13] Sen Y, Urgan M, Kazmanli K, Cakir AF. Stripping of CrN from CrN-coated high-speed steels. *Surface & Coatings Technology*, 1999; 113: 31-35.
- [14] Petrogalli C, Montesano L, Gelfi M, La Vecchia GM, Solazzi L. Tribological and corrosion behavior of CrN coatings: Roles of substrate and deposition defects. *Surface & Coatings Technology*, 2014; 258: 878-885.
- [15] Tillmann W, Vogli E, Mohapatra S. A new approach to improve SCC resistance of austenitic stainless steel with a thin CrN film, deposited by cathodic vacuum arc deposition technique. *Surface & Coatings Technology*, 2007; 202: 750-754.
- [16] Wang HW, Stack MM, Lyon SB, Hovsepian P, Munz WD. The corrosion behaviour of macroparticle defects in arc bond-sputtered CrN/NbN superlattice coatings. *Surface & Coatings Technology*, 2000; 126: 279-287.
- [17] Wang HW, Stack MM, Lyon SB, Hovsepian P, Munz WD. Wear associated with growth defects in combined cathodic arc/unbalanced magnetron sputtered CrN/NbN superlattice coatings during erosion in alkaline slurry. *Surface & Coatings Technology*, 2000; 135: 82-90.
- [18] Uysal M. CrN, TiN Kaplanmış ve Kaplanmamış AISI 304 Paslanmaz Çeliğinin Korozyon Özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2006.

- [19] Kalkan N. PVD Yöntemi ile TiN, CrN ve TiN /CrN Kaplanmış Soğuk İş Takım Çeliğinin Aşınma Performanslarının Deneysel İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Selçuk Üniversitesi, Konya, 2008.
- [20] Garbacz H, Gradzka-Dahlke M, Kurzydowski KJ. The tribological properties of nano-titanium obtained by hydrostatic extrusion. *Wear*, 2007; 263: 572-578.
- [21] Yetim AF. Biyomalzeme Olarak Kullanılan AISI 316L Paslanmaz Çelik ve Ti6Al4V Alaşımının Plazma ile Nitrüleme Davranışı, Ti-DLC İnce Film Kaplama ile Karşılaştırılması. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, 2009.
- [22] La PQ, Ma JQ, Zhu YT, Yang J, Lu WM, Xue QJ, Valiev RZ. Dry-sliding tribological properties of ultrafine-grained Ti prepared by severe plastic deformation. *Acta Materialia*, 2005; 53: 5167-5173.
- [23] Hirose A, Ueda T, Kobayashi KF. Wear and Oxidation Properties of Titanium Aluminides Formed on Titanium Surface by Laser Alloying. *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 1993;160: 143-153.
- [24] Majumdar JD, Weisheit A, Mordike BL, Manna I. Laser surface alloying of Ti with Si, Al and Si plus Al for an improved oxidation resistance. *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 1999; 266: 123-134.
- [25] Budinski KG. Tribological Properties of Titanium-Alloys. *Wear*, 1991; 151: 203-217.
- [26] Shan L, Zhang Y R, Wang YX, Li JL, Jiang X, Chen JM. Corrosion and wear behaviors of PVD CrN and CrSiN coatings in seawater. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2016; 26: 175-184.
- [27] Lorenzo-Martin C, Ajayi O, Erdemir A, Fenske GR, Wei R. Effect of microstructure and thickness on the friction and wear behavior of CrN coatings. *Wear*, 2013; 302: 963-971.