

## Yüzey İşlemi Uygulanmış AZ31 Mg Alaşımının Yapısal Özelliklerinin ve Aşınma Davranışının İncelenmesi

### *Investigation of Structural Properties and Wear Behavior of Surface Treated AZ31 Mg Alloy*

İlhan ÇELİK\*

Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 29100, Gümüşhane

• Geliş tarihi / Received: 11.02.2018 • Düzeltilerek geliş tarihi / Received in revised form: 18.06.2018 • Kabul tarihi / Accepted: 03.07.2018

#### Öz

Magnezyum (Mg) ve alaşımları; hafiflikleri, sahip oldukları özgül dayanım ve biyouyumluluk gibi özellikleri sayesinde özellikle otomotiv, havacılık ve biyomedikal sektörlerinde yaygın olarak kullanılabilir potansiyeli vardır. Mg ve alaşımları, sahip oldukları zayıf aşınma direnci ve korozyon direnci nedeniyle sınırlı kullanım alanlarına sahiptir. Bu durum, yüksek dayanım/ağırlık oranına rağmen, Mg alaşımlarının herhangi bir yüzey koruması uygulanmadan kullanılmalarına engel olmaktadır. Bu çalışmada, AZ31 Mg alaşımının aşınma direncini artırmak amacıyla Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) yöntemi ile CrN kaplamalar başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Yüzey işlemi uygulanmış numunelerin yapısal özellikleri X-Işınlı Difraksiyonu (XRD) ve Taramalı Elektron Mikroskopisi (SEM) yöntemleri ile incelenmiştir. Pin-disk aşınma cihazı kullanılarak yapılan deneyler sonucunda numunelerin tribolojik özellikleri belirlenmiştir. Çalışma sonucunda, uygulanan CrN kaplama sonrasında AZ31 Mg alaşımının daha üstün mekanik özellikler sergilediği tespit edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** AZ31 Mg, Aşınma, SEM/XRD

#### Abstract

Magnesium (Mg) and its alloys have a low density. For this reason, they are recognized as light metallic materials. Magnesium and its alloys have the potential capability to be widely used especially in the automotive, aviation and biomedical applications. However, their wear and corrosion resistance are very poor, so their area of usage is limited. This situation may adversely affect their usage without surface treatment despite their relatively well mechanical properties. Arc PVD technique was used to increase the wear resistance of AZ31 Mg alloy in this study. The surface coating process was applied to AZ31 Mg specimens as desired. Microstructural and morphological studies were done with XRD and SEM appliances. Pin-on-disc wear tests were performed to determine tribological properties. Through this study it was determined that AZ31 Mg alloy showed superior mechanical properties after applied CrN coating.

**Keywords:** AZ31 Mg, Wear, SEM/XRD

\* İlhan ÇELİK; ilh.celik@gmail.com; Tel: (0456) 233 10 00 (dâhili: 1607); orcid.org/0000-0001-6757-834X

## 1. Giriş

Magnezyum ve alaşımları, 1.74–1.85 g/cm<sup>3</sup> aralığında düşük yoğunluğa sahip olan hafif mühendislik malzemeleridir (Lei vd., 2007; Hakamada vd., 2007). İyi işlenebilirlik, yüksek ısı iletkenlik ve yüksek mukavemet/ağırlık oranı gibi özelliklerinden dolayı endüstriyel uygulamalar için büyük potansiyele sahiptirler (Lv vd., 2009; Kubatik vd., 2017). Ancak, sahip oldukları zayıf aşınma direnci ve korozyon direnci nedeniyle endüstriyel uygulamalardaki kullanımları kısıtlı kalmıştır (Chen vd., 2018; Wu vd., 2010). Magnezyum ve alaşımlarının zayıf aşınma direncini artırmak için birçok yüzey modifikasyon işlemi yapılmıştır. Bunlar; akımsız kaplama (Correa vd., 2013), plazma elektrolitik oksidasyon (Srinivasan vd., 2010), PVD kaplama (Hoche vd., 2011) ve termal spreyleme (Weisheit vd., 1997) olarak sayılabilir.

Yapısal metaller içerisinde hafifliği ile ön plana çıkan magnezyum alaşımları, bu özellikleri nedeniyle otomotiv, havacılık ve uzay sanayisi ile ilgili uygulamalarda tasarımcıların ilgisini çekmektedir (Nam vd., 2018). Otomotiv sektöründe; jant, debriyaj gövdesi, iç kapı kolları, kapı kilidi gövdesi, silindir kapağı ve yanma odaları gibi parçaların imalatında kullanılan magnezyum ve alaşımları, havacılık sektöründe ise üzerine yük binmeyen parçaların (hidrolik deposu ve yakıt deposu gibi) üretiminde ayrıca helikopterlerde vites kutusu, koltuk iskeleti ve pedal gibi parçaların imalatında kullanılmaktadır. Bununla birlikte magnezyumun kemiğin elastisite modülüne diğer metalik implant malzemelere

nazaran daha yakın elastisite modülüne sahip olması, araştırmacıları bu yönde çalışmalara itmiştir. Yapılan çalışmalarda, AZ31 Mg alaşımının zayıf aşınma ve korozyon direncinin biyomedikal uygulamalardaki kullanımını zorlaştığı görülmüştür (Çatar, 2013). Diğer PVD tekniklerinin aksine ark PVD tekniğinde intermetalik fazlar oluşabilmektedir. Bu nedenle kaplama işleminin ardından kaplanmış numunelere ısı işlem uygulamaya ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu durum, ark PVD tekniğinin teknolojik uygulamalara adapte edilmesini kolaylaştırmakta ve tercih edilmesini sağlamaktadır (Sönmezoglu vd., 2012). Bu çalışmada, ark PVD kaplama yöntemi kullanılarak AZ31 Mg alaşımının zayıf aşınma direncini iyileştirmek için numune yüzeylerine krom nitrür kaplanmıştır. AZ31 Mg alaşımının yüzey işlemi sonrasındaki aşınma davranışı ve yapısal özelliklerindeki değişimler incelenmiştir. Kaplanmamış ve kaplanmış numunelerin tribolojik özelliklerini tespit etmek için aşınma deneyleri yapılmıştır. Yapısal analizler için ise XRD ve SEM cihazlarından yararlanılmıştır.

## 2. Deneysel Çalışmalar

Deneylerde, 5mm kalınlığında ve 15mm çapındaki AZ31 Mg alaşımı numuneler kullanılmıştır. Deney malzemesinin kimyasal bileşimi Tablo 1’de verilmiştir. Numunelerin yüzeyleri, kaplama işleminden önce zımparalama ve alümina ile parlatma işlemlerine tabi tutulmuştur. Parlatılan numune yüzeyleri etanol ile yıkanarak sıcak hava fanı yardımıyla kurutulmuştur.

**Tablo 1:** AZ31 Mg alaşımının kimyasal bileşimi

Element	Al	Zn	Fe	Cu	Si	Mn	Mg
% Ağırlık Oranı	3.069	1.133	0.019	0.001	0.131	0.486	Geri kalan

Kaplama işlemine hazır hale getirilen numunelerin yüzeylerine ark PVD yöntemiyle krom nitrür kaplanmıştır. Kaplama işlemi, Barlok PVD Kaplama (İstanbul) tarafından gerçekleştirilmiştir. Kaplama işleminin parametreleri Tablo 2’de verilmiştir. Turkeyus PODTW&RWT marka aşınma test cihazı kullanılarak işlemsiz ve CrN kaplanmış AZ31 Mg alaşımlarının aşınma davranışı incelenmiştir. Deney numuneleri, kuru sürtünme şartlarında çapı 6mm olan alümina bilye ile aşındırılmıştır. 2N normal yük altında gerçekleştirilen aşınma deneylerinde aşınma mesafesi 141 metre olarak

belirlenmiştir. Aşınma oranının hesaplanması  $U = K/PL$  denklemi yardımıyla yapılmıştır. Bu denklemde, P normal yükü (N), U aşınma oranını (mm<sup>3</sup>/Nm), L aşınma mesafesini (m) ve K aşınma hacmini (mm<sup>3</sup>) göstermektedir. Aşınma deneyleri sonucunda oluşan aşınmış yüzeyler SEM cihazı yardımıyla incelenmiştir. XRD analizleri; dalga boyu  $\lambda = 1.5405 \text{ \AA}$  ve radyasyon kaynağı CuK $\alpha$  olan Rigaku-2200D/Max marka cihaz ile yapılmıştır. XRD ölçümleri, 1 derece/dakika tarama hızında ve  $2\theta = 20-80^\circ$  tarama açısında gerçekleştirilmiştir.

**Tablo 2:** Kaplama parametreleri

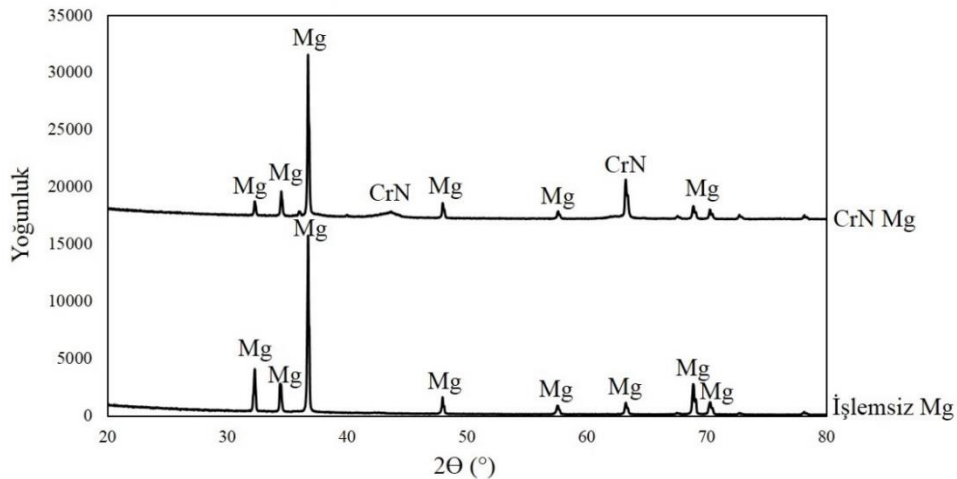
<b>Kaplama Parametreleri</b>	
<b>Taban Malzeme Bias</b>	DC 100 V
<b>Çalışma Basıncı</b>	2.20 - 002 PTR
<b>Çalışma Sıcaklığı</b>	300 - 350 °C
<b>Gaz Akışı</b>	% 40
<b>Gaz Oranı</b>	(N) 70 – 75 ps
<b>Kaplama İşlem Süresi</b>	60 dk.
<b>Hedef Malzemeler</b>	CrN
<b>Glow (Parıltı) Süresi</b>	40 dk.
<b>Glow Aşamaları</b>	20 dk. 240V pulse 20 dk. 280V
<b>Glow Gaz Değerleri</b>	2.0 ps Ar 1.6 H
<b>Ön Isıtma Süresi</b>	60 dk.

### 3. Bulgular

#### 3.1. Yapısal Analiz

Sahip olduğu kristal kafes yapısı sıkı paket hegzagonal (SPH) olan magnezyum ve alaşımlarının, oda sıcaklığı gibi sıcaklık değerlerinde sınırlı sayıda bağımsız kayma sistemi vardır (Xu vd., 2013). Magnezyumdaki bazal düzlem, sadece iki kayma sisteminin aktif olmasını sağlarken; bazal olmayan kaymalar Von Mises Kriterinin şartlarını karşılamakta zorlanırlar. Bu nedenle Magnezyum ve alaşımları genellikle şekillendirme kabiliyeti zayıf malzemeler olarak anılırlar (Huang vd., 2015). Buna rağmen magnezyum ve alaşımları, sahip

oldukları yüksek dayanım/ağırlık oranı sayesinde bilim insanlarının üzerinde yoğun bir şekilde çalıştığı önemli bir hafif metaldir. Ayrıca yüzey özellikleri de yeterli seviyede olmadığı için birçok yüzey işlemi uygulanarak incelenmiştir (Lou vd., 2017; Liu vd., 2017; Ma vd., 2017). Şekil 1’de, işlemsiz ve krom nitrür kaplanmış AZ31 Mg alaşımı numunelerin XRD grafikleri verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere işlemsiz numunedan elde edilen pikler Mg pikleridir (Nam vd., 2018; Wu vd., 2018; Lou vd., 2017). Krom nitrür kaplanan AZ31 Mg alaşımının XRD spektrumu incelendiğinde taban malzemedan yansıyan piklerin varlığı görülmektedir. Ayrıca yüzey yapısında CrN fazının da oluştuğu anlaşılmaktadır.



**Şekil 1:** İşlemsiz ve CrN kaplanmış numunelerin XRD grafiği

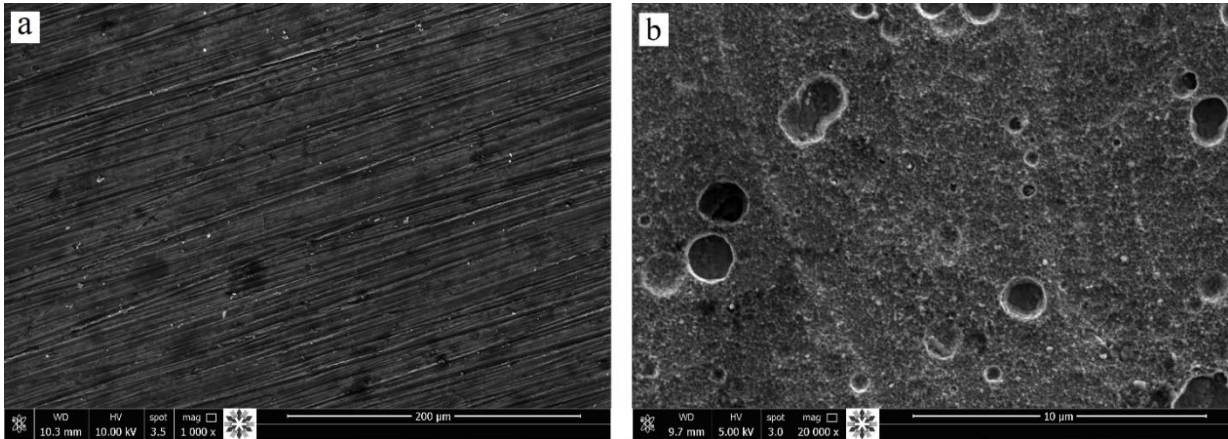
Magnezyum elementi gümüş beyazı bir renge sahiptir (Oğuz, 1990). İçeriğine katılan alaşım elementleriyle rengi griden kahverengiye kadar

değişebilmektedir. CrN kaplanan AZ31 Mg alaşımının sahip olduğu yüzeyin rengi ise grinin egemen olduğu bir görünümdeydir. AZ31 Mg

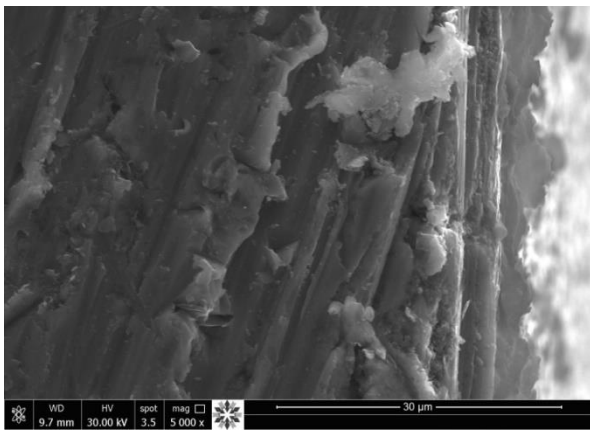
alaşımı numunelerin yüzeylerini gösteren SEM resimleri, işlemsiz numune için Şekil 2a'da ve krom nitrür kaplanmış numune için Şekil 2b'de verilmiştir. Şekil 2b'de görülen krom nitrür kaplanmış yüzeye ait SEM görüntüsünden, CrN kaplanmış yüzeylerin farklı boyutlarda damlacık şeklindeki kraterlerden meydana gelen bir morfolojiye sahip olduğu anlaşılmaktadır (Petrogalli vd., 2014). Ark PVD yönteminde katot yüzeyinde çok küçük bir bölge ergimekte ve burada hatırı sayılır derecede güçlü bir elektron yayını ve buharlaşma oluşmaktadır. Ergiyen yüzeyin küçük bir bölümünde, katot ile elektrik alanının ters istikametine yönelen elektronlar bulunmaktadır. Ayrıca malzemede meydana gelen çok yüksek termoelastik gerilmeler nedeniyle ark spotuna yakın bölgelerde çok yüksek sıcaklıklar oluşmaktadır. Bu nedenle yüzeyde ergime gerçekleştiğinden sıvı metal damlacıkları yüzeyden kopmaktadır. Böylece damlacık kraterleri oluşmaktadır (Kalkan, 2008). PVD yöntemiyle elde edilen filmlerin özellikleri, bu filmleri elde etmek için geniş bir aralıkta hazırlanan kaplama parametrelerine son derece

duyarlıdır. Pürüzlülük, sertlik, kristal oryantasyon ve noktasal kusurların yoğunluğu gibi taban malzemenin yüzey koşulları ile yüzeydeki diğer kir-pas gibi etkenler de filmlerin özelliklerine etki eden diğer parametrelerdir. PVD işleminin düşük sıcaklık şartlarında yapılması durumunda ortaya çıkan sınırlı orandaki yüzeye tutunmuş atom değişkenliği nedeniyle, elde edilen filmler taban malzeme yüzeyindeki kirletici maddelerin varlığına daha duyarlı hale gelebilmektedir (Abela, 2011).

Krom nitrür kaplanmış AZ31 Mg alaşımına ait kesit görüntüsü Şekil 3'te verilmiştir. Kaplama işlemi sonrasında elde edilen kaplama kalınlığı yaklaşık 3 µm mertebelerindedir. Sertliği deney numunesinden daha yüksek olan kaplama, ince bir film şeklinde elde edildiği için XRD analizlerinde taban malzemeden piklerin yansımalarına neden olmuştur. Nitekim krom nitrür kaplanmış yüzeylere ait XRD spektrumuna bakıldığında taban malzemeden yansıyan piklerin de mevcut olduğu görülmektedir (Şekil 1).



Şekil 2: Numunelerin yüzeylerine ait SEM resimleri: (a) İşlemsiz ve (b) CrN kaplanmış



Şekil 3: CrN kaplanmış numunelerin yüzeylerinin kesit görüntüsü

### 3.2. Tribolojik Analiz

Aşınma ve mikrosertlik deneylerinden elde edilen sonuçlar Tablo 3'de verilmiştir. Kaplanmış numunedeki aşınma oranının daha az olduğu ve mikrosertlik değerinin ise arttığı görülmektedir. Mikrosertlik deneyleri 100g yük altında ve 15 saniye boyunca gerçekleştirilmiştir. Literatüre bakıldığında AZ31 Mg alaşımının yüzeyine farklı kaplamalar uygulandığı görülmektedir. Chen ve arkadaşları, uyguladıkları mikroark oksidasyon işleminden sonra AZ31 Mg alaşımının yüzey sertliğini 76-98 HV olarak elde etmişlerdir (Chen vd., 2017). Bu çalışmada, CrN kaplama sonrasında elde edilen yüzey sertliği değeri ise

115 HV'dir. Magnezyum alaşımlarının yüzeyinde elde edilmek istenen sert kaplamalar, taban malzemenin yüzeyinde oluşan magnezyum oksit tabakasından olumsuz yönde etkilenmektedir. Kaplama ile taban malzeme arasında zayıf bir bağın oluşmasına neden olan metal-oksit tabakasının, zayıf kaplama adezyonundan da sorumlu olduğu kabul edilmektedir (Abela, 2011). Bu oksit tabakası, taban malzemenin sahip olduğu SPH kristal kafesi ile kübik yapıdaki oksidin kristal kafesi arasındaki uyumsuzluk nedeniyle kararsız bir yapıdadır. Ayrıca magnezyum alaşımının nemli bir atmosfere maruz kalması durumunda, magnezyum oksit, hidroksit oluşturacak şekilde reaksiyona girebilmekte ve bu da kaplamanın taban malzemeye adezyonunu tehlikeye atabilmektedir (Busk, 1987).

**Tablo 3:** AZ31 Mg alaşımının aşınma ve sertlik deneyi sonuçları

	Aşınma Oranı (mm <sup>3</sup> /Nm)	Mikrosertlik Değeri (HV <sub>0.1</sub> )
İşlemsiz	4.65x10 <sup>-4</sup>	42±4
CrN kaplanmış	1.27x10 <sup>-4</sup>	115±6

Magnezyumun yüzeyinde oluşan oksit tabakası, elde edilecek olan kaplamanın kalitesini olumsuz yönde etkilediği gibi yüzey işlemi uygulanmamış magnezyumun da aşınma davranışını olumsuz yönde etkilemektedir. Aşınma deneyleri sonrasında oluşan yüzeylerin SEM resimleri Şekil 4'te verilmiştir. İşlemsiz AZ31 Mg alaşımının aşınma izlerine bakıldığında etkin aşınma mekanizmasının abrazif aşınma olduğu

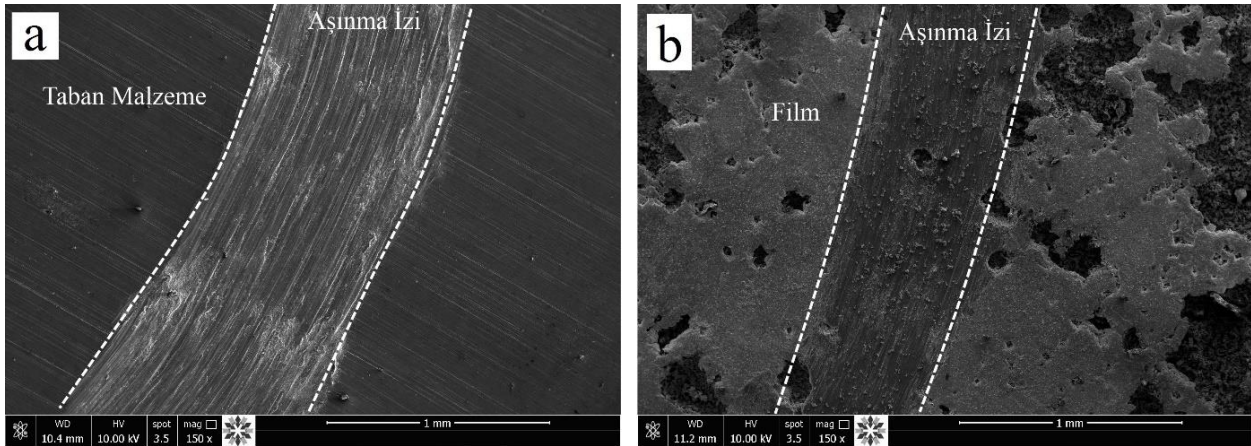
anlaşılmaktadır. Deney esnasında, alümina bilye ile taban malzeme yüzeyi arasında kalan aşınmış parçacıkların abrazif etkisiyle bu durum ortaya çıkmıştır (Şekil 4a). Krom nitrür kaplanan yüzeylerde ise daha az oranda aşınma meydana geldiği görülmektedir (Şekil 4b). Ayrıca aşınma iz genişliğinin de işlemsiz numuneninkine nazaran daha dar olması, yapılan kaplamanın aşınma direncini olumlu yönde etkilediği anlaşılmaktadır.

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada, AZ31 Mg alaşımlarının yüzeyine PVD yöntemiyle CrN film kaplanmıştır. Kaplama işlemi sonrasında AZ31 Mg alaşımlarının yapısal ve tribolojik özellikleri incelenmiştir. CrN kaplama sonrasında işlemsiz numunelere nazaran aşınma direncinde iyileşme olduğu tespit edilmiştir. Kaplama, her ne kadar bütün yüzeyde homojen bir şekilde elde edilemese de numunelerin tribolojik özelliklerinde iyileşme sağlanmıştır. Kaplama sonrasında oluşan yüzeylerde, literatürde daha önce yapılan çalışmalara benzer bir şekilde damlacık şeklinde kraterlerin oluştuğu gözlemlenmiştir. Uygulanan yüzey işlemi sayesinde AZ31 Mg alaşımının özellikle sürtünmenin olduğu uygulamalarda kullanılabilirliğinin olumlu yönde etkileneceği düşünülmektedir.

#### Bilgi Notu

Bu çalışma 6-8 Nisan 2017 tarihleri arasında Kırıkkale'de düzenlenen 2. Uluslararası Savunma Sanayi Sempozyumu'nda sözlü bildiri olarak sunulduktan sonra genişletilmiş ve yeniden yapılandırılmıştır.



**Şekil 4:** Aşınmış yüzeylere ait SEM resimleri: (a) İşlemsiz ve (b) CrN kaplanmış

**Kaynaklar**

- Abela, S., 2011. Protective Coatings for Magnesium Alloys, Magnesium Alloys - Corrosion and Surface Treatments, Frank Czerwinski (Ed.), ISBN 978-953-307-972-1, InTech, 195-220.
- Busk, R.S., 1987. Magnesium and its alloys, International Magnesium Association, Hilton Head, South Carolina, 497-499.
- Çatar, R., 2013. Magnezyum alaşımlarının farklı ortamlardaki gerilmeli korozyon davranışının incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Chen, D., Wang, R.Q., Huang, Z.Q., Wu, Y.K., Zhang, Y., Wu, G.R., Li, D.L., Guo, C.H., Jiang, G.R., Yu, S.X., Shen, D.J. ve Nash, P., 2018. Evolution processes of the corrosion behavior and structural characteristics of plasma electrolytic oxidation coatings on AZ31 magnesium alloy, Applied Surface Science, 434, 326-335.
- Chen, Y.F., Zhou, J.X., Liu, H.T., Song, X.C., Yang, Y.S., 2017. Overall micro-arc oxidation treatment for AZ31B-6061 magnesium-aluminium dissimilar metal connecting parts, Corrosion Engineering Science and Technology, 52 (6), 470-475.
- Correa, E., Zuleta, A.A., Guerra, L., Gomez, M.A., Castano, J.G., Echeverria, F., Liu, H., Skeldon, P. ve Thompson, G.E., 2013. Tribological behavior of electroless Ni-B coatings on magnesium and AZ91D alloy, Wear, 305 (1-2), 115-123.
- Hakamada, M., Furuta, T., Chino, Y., Chen, Y., Kusuda, H. ve Mabuchi, M., 2007. Life cycle inventory study on magnesium alloy substitution in vehicles, Energy, 32 (8), 1352-1360.
- Hoche, H., Schmidt, J., Gross, S., Trossmann, T. ve Berger, C., 2011. PVD coating and substrate pretreatment concepts for corrosion and wear protection of magnesium alloys, Surface & Coatings Technology, 205, 145-150.
- Huang, X.S., Suzuki, K., Chino, Y. ve Mabuchi, M., 2015. Texture and stretch formability of AZ61 and AM60 magnesium alloy sheets processed by high-temperature rolling, Journal of Alloys and Compounds, 632, 94-102.
- Kalkan, N., 2008. PVD yöntemi ile TiN, CrN ve TiN /CrN kaplanmış soğuk iş takım çeliğinin aşınma performanslarının deneysel incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Kubatik, T.F., Lukac, F., Stoullil, J., Ctibor, P., Prusa, F. ve Stehlikova, K., 2017. Preparation and properties of plasma sprayed NiAl10 and NiAl40 coatings on AZ91 substrate, Surface & Coatings Technology, 319, 145-154.
- Lei, M.K., Li, P., Yang, H.G. ve Zhu, X.M., 2007. Wear and corrosion resistance of Al ion implanted AZ31 magnesium alloy, Surface & Coatings Technology, 201 (9-11), 5182-5185.
- Liu, G.X., Wang, J.Y., Bian, K.K. ve Zhu, P.Z., 2017. Preparation and characterization of nanostructured dibasic calcium phosphate coating on magnesium alloy wire, Materials Letters, 209, 323-326.
- Lou, B.S., Lin, Y.Y., Tseng, C.M., Lu, Y.C., Duh, J.G. ve Lee, J.W., 2017. Plasma electrolytic oxidation coatings on AZ31 magnesium alloys with Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> nanoparticle additives, Surface & Coatings Technology, 332, 358-367.
- Lv, G.H., Chen, H., Li, L., Niu, E.W., Pang, H., Zou, B. ve Yang, S.Z., 2009. Investigation of plasma electrolytic oxidation process on AZ91D magnesium alloy, Current Applied Physics, 9 (1), 126-130.
- Ma, H.J., Gu, Y.H., Liu, S.J., Che, J.T. ve Yang, D.W., 2017. Local corrosion behavior and model of micro-arc oxidation HA coating on AZ31 magnesium alloy, Surface & Coatings Technology, 331, 179-188.
- Nam, D., Lim, D., Kim, S.D., Seo, D., Shim, S.E. ve Baeck, S.H., 2018. The fabrication of a conversion film on AZ31 containing carbonate product and evaluation of its corrosion resistance, Journal of Alloys and Compounds, 737, 597-602.

- Oğuz, B., 1990. Demir Dışı Metallerin Kaynağı, Oerlikon, 1-15.
- Petrogalli, C., Montesano, L., Gelfi, M., La Vecchia, G.M. ve Solazzi, L., 2014. Tribological and corrosion behavior of CrN coatings: Roles of substrate and deposition defects, *Surface & Coatings Technology*, 258, 878-885.
- Sönmezoğlu, S., Koç, M., Akın, S., 2012. İnce film üretim teknikleri, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 28 (5), 389-404.
- Srinivasan, P.B., Liang, J., Blawert, C. ve Dietzel, W., 2010. Dry sliding wear behaviour of magnesium oxide and zirconium oxide plasma electrolytic oxidation coated magnesium alloy, *Applied Surface Science*, 256, 10, 3265-3273.
- Weisheit, A., Lenz, U. ve Mordike, B.L., 1997. Thermal spraying on magnesium alloys to improve the corrosion and wear resistance, *Metall*, 51 (9), 470-474.
- Wu, G.S., Dai, W., Zheng, H. ve Wang, A.Y., 2010. Improving wear resistance and corrosion resistance of AZ31 magnesium alloy by DLC/AlN/Al coating, *Surface & Coatings Technology*, 205 (7), 2067-2073.
- Wu, L., Yang, D.N., Zhang, G., Zhang, Z., Zhang, S., Tang, A.T. ve Pan, F.S., 2018. Fabrication and characterization of Mg-M layered double hydroxide films on anodized magnesium alloy AZ31, *Applied Surface Science*, 431, 177-186.
- Xu, S., Liu, T.M., Chen, H.C., Miao, Z.C., Zhang, Z., Zeng, W., 2013. Reducing the tension-compression yield asymmetry in a hot-rolled Mg-3Al-1Zn alloy via multidirectional pre-compression, *Materials Science and Engineering A*, 565, 96-101.