

AZ91 Magnezyum Alaşımının PEO ve PVD Dublex Kaplama Yöntemleriyle CrN/NbN Kaplanarak Korozyon Özelliklerinin İyileştirilmesi

Oktay YİĞİT^{1*}, Taha Çağrı ŞENOCAK²

¹ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

² Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye

*¹ oktayyigit2561@gmail.com, ² tcsenocak@gmail.com

(Geliş/Received: 08/11/2021;

Kabul/Accepted: 01/01/2022)

Öz: Son yıllardaki çalışmalar, otomobil, havacılık ve uzay endüstrilerinde kullanılan geleneksel mühendislik malzemelerinin geliştirilmesine ve yeni fonksiyonel malzemeler üretilmesine odaklanmıştır. Yüksek özgül mukavemete sahip magnezyum alaşımları, özellikle ileri mühendislik uygulamalarında düşük ağırlıklı tasarımların üretilmesine imkan tanımıştır. Ancak magnezyum alaşımlarının kimyasal reaksiyon eğilimi, bu malzemelerin korozyon özelliklerini sınırlandırmaktadır. Fiziksel buhar biriktirme (PVD) ve plazma elektrolitik oksidasyon (PEO) kaplama yöntemleriyle yapılan çalışmalar, metalik malzemelerin korozyon özelliklerini iyileştirme ve geliştirmeye yöneliktir. Bu çalışmada, PEO yöntemi ile AZ91 magnezyum alaşımlarının yüzeylerine MgAl₂O₄ kaplama yapılmıştır. Daha sonra RF-PVD sisteminde iki farklı magnetron (niyobyum ve krom hedef) kullanılarak çok katmanlı CrN/NbN tabakaları büyütülmüştür. Taban malzeme yüzeyinde elde edilen PEO ve PEO+CrN/NbN kaplamalarının korozyon davranışları, % 3,5 NaCl çözeltisi içerisinde potansiyodinamik polarizasyon testiyle incelenmiştir. Elde edilen PEO kaplaması ve PEO kaplaması yüzeyinde büyütülen CrN/NbN çok katmanlı kaplamasının, AZ91 magnezyum alaşımına göre sırasıyla 17 ve 2 kat daha yüksek korozyon direncine sahip olduğu belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: AZ91 Magnezyum Alaşımı, Kaplamalar, Fiziksel Buhar Biriktirme, Plazma Elektrolitik Oksidasyon, Korozyon.

Improving the Corrosion Properties of AZ91 Magnesium Alloy by Coating CrN/NbN with PEO and PVD Duplex Coating Methods

Abstract: Studies in recent years have focused on the development of traditional engineering materials used in the automobile, aerospace, and aeronautic industries and on the production of new functional materials. Magnesium alloys with high specific strength have allowed the production of low-weight designs, especially in advanced engineering applications. However, the chemical reaction tendency of magnesium alloys limits the corrosion properties of these materials. Studies with physical vapor deposition (PVD) and plasma electrolytic oxidation (PEO) coating methods are aimed at improving the corrosion properties of metallic materials. In this study, MgAl₂O₄ coating was applied to the surfaces of AZ91 magnesium alloys with the PEO method. Then, multilayer CrN/NbN layers were grown using two different magnetrons (niobium and chromium target) in the RF-PVD system. The corrosion behavior of PEO and PEO+CrN/NbN coatings obtained on the substrate surface were investigated by a potentiodynamic polarization test in a 3.5% NaCl solution. It was determined that the obtained PEO coating and the CrN/NbN multilayer coating grown on the surface of the PEO coating had 17 and 2 times higher corrosion resistance than the AZ91 magnesium alloy, respectively.

Key words: AZ91 Magnesium Alloy, Coatings, Physical Vapor Deposition, Plasma Electrolytic Oxidation, Corrosion.

1. Giriş

Son yıllarda, özellikle ileri mühendislik uygulamalarında düşük ağırlıklı tasarımlar üretmek amacıyla yüksek mukavemet-ağırlık oranına sahip malzemeler ön plana çıkmıştır. Magnezyum, bu malzemeler arasında mukavemet-ağırlık oranı açısından önemli bir yere sahiptir. Magnezyum (Mg), 1,74 g/cm³ yoğunluğu ile tüm yapısal metallerin en hafif olanıdır. Mg, çoğunlukla mukavemet artırıcı ve korozyon direncini geliştirici bir alaşım elementi olarak birçok ticari uygulamada başarıyla kullanılmaktadır. 1940'lı yıllardan günümüze, uçak bileşenlerinden kara araçlarına kadar geniş bir askeri uygulama yelpazesi bulmuştur. Ancak magnezyumun düşük korozyon direnci ve alevlenebilirlik gibi bazı karakteristik özellikleri, günümüz teknolojisinde kullanım alanını sınırlandırmaktadır [1–3].

Magnezyum, otomotiv ve havacılık uygulamalarına özgü döküm ve dövme alaşımları olarak iki ayrı kategoride değerlendirilir. Döküm alaşımları arasında en çok kullanılan magnezyum alaşımı AZ91'dir. Bu alaşım,

* Sorumlu yazar: oktayyigit2561@gmail.com. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-5904-5129, ² 0000-0002-0043-5253

otomotiv ve havacılık uygulamalarında kullanılır ve çoğunlukla saf magnezyum ile karşılaştırıldığında mükemmel dökülebilirlik ve üstün korozyon direnci özelliklerine sahiptir. Diğer magnezyum alaşımlarına göre maliyeti düşük olduğu için otomotiv ve havacılık uygulamalarında tercih edilmektedir. Uzay endüstrisinde özel olarak kullanılan alaşımlar arasında AZ91 en çok tercih edilen Mg alaşımıdır. Bu alaşım askeri Falcon GAR-1 stabilizatör paletlerinde [1] kullanılmış, uçak bağlantılarında ise kullanılması planlanmıştır [4]. Ayrıca yolcu taşıma uçaklarından sıklıkla tercih edilen Boeing 727, yaklaşık 1200 adet magnezyum alaşımından elde edilmiş parçalardan (uçak şanzımanı, kanat parçaları, gövde kaplamaları, kapılar, tekerlekler, şasi, gösterge panelleri ve koltuk bileşenleri gibi) oluşmaktadır [4]. Günümüzde uzay endüstrisi, özellikle yapısal hafif malzemelerin yüzey özelliklerini iyileştirerek korozyona karşı direncini artırmaya yönelik çalışmaktadır [5]. Magnezyumun diğer yapı metallere göre anodik olması, korozyon problemleriyle karşı karşıya kalmasına neden olmaktadır. Yüksek saflıkta magnezyum alaşımlarının geliştirilmesi, yüzey korozyon direncini artırmış olsa da, özellikle otomotiv, havacılık ve savunma sanayii parçalarında daha fazla korumaya ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle ilgili alanlarda magnezyum ve alaşımlarının yüzey özelliklerini iyileştirmek için koruyucu kaplamaların geliştirilmesi için çalışmalar devam etmektedir [5,6].

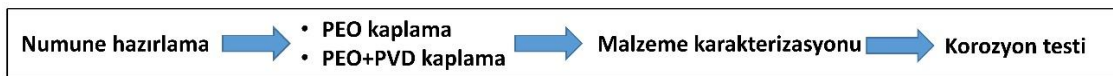
Anodizasyon, plazma elektrolitik oksidasyon, termal-soğuk sprey kaplama ve fiziksel buhar biriktirme gibi çeşitli yöntemler sayesinde magnezyum ve alaşımlarının yüzey özellikleri iyileştirilmektedir [7]. Plazma elektrolitik oksidasyon yöntemi ile, bir elektrolit içerisinde yüksek voltaj altında ark oluşturarak hafif metallerin yüzeyinde oksit bileşiklerini oluşturmak mümkündür [8]. Bu yöntem, Al, Mg, Ti, Zr gibi çeşitli hafif metaller üzerine seramik oksit katmanlarının geliştirilmesi esasına dayanan bir kaplama işlemidir. PEO işlemi, CVD, PVD ve termal püskürtme işlemi ile karşılaştırıldığında; ucuz, çevre dostu ve karmaşık geometrili büyük boyutlu parçaların kaplanması için kullanışlı bir prosestir. PEO işlemi ile mükemmel yapışma, yüksek sertlik, iyi elektrik direnci, yüksek aşınma ve iyi korozyon direncine sahip yüksek kaliteli kaplamalar elde edilmektedir. Bu kaplamalar, esas olarak havacılık, biyomedikal, optoelektronik ve enerji endüstrisi uygulamaları gibi özel ürünler gerektiren endüstrilerde kullanılmaktadır [9–17].

Bir diğer kritik kaplama teknolojisi olan fiziksel buhar biriktirme (PVD) teknolojisiyle ise diğer geleneksel yüzey işleme yöntemleri ile ulaşılamayan stabil ve kaliteli kaplamalar elde edilmektedir [18]. Bu yöntem sayesinde metal, alaşım, seramik ve polimer kaplamalar kolaylıkla kaplanabilmektedir. İnce film kaplama işlemi olarak bilinen Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) işlemleri, katı veya sıvı kaynaklardan atomik veya moleküler biçimde buharlaştırılan veya püskürtülen maddelerin altlık üzerine atomik olarak biriktirilmesi olarak bilinmektedir [19]. PVD işlemlerinin tamamı çok yüksek vakum veya düşük gaz basıncı ortamında gerçekleştirilmektedir. Bu durum sayesinde, hedef ile altlık malzemesi arasındaki çarpışmanın ortalama serbest yolu artmaktadır. Çevresel kirlenmelerin azalmasıyla kaplamanın kalitesi de artmaktadır [20,21]. Fiziksel buhar biriktirme tekniği, çok çeşitli malzemelerin kullanım alanlarını artırmaktadır. PVD yöntemi ile altlık malzeme yüzeyine kolaylıkla kaplanabilen geçiş metallerinin (Ti, Cr, V, Ni vb.) nitrürleri, kaplamalara iyi mekanik özellikler, yüksek kaynama noktası, kimyasal ve termal kararlılık özelliklerini kazandırmaktadır. Bu kaplamalar, sert kaplamalardan elektromanyetik radyasyon dedektörlerine kadar geniş bir uygulamada yer bulmaktadır [22].

Bu çalışmada, AZ91 magnezyum alaşımının korozyon direncini artırmak için ilk olarak PEO yöntemi, ikinci olarak ise PVD sistemi kullanılmıştır. Taban malzeme olarak kullanılan AZ91 numunelerinin yüzeyinde, öncelikle PEO sistemi kullanılarak $MgAl_2O_4$ içeren kaplamalar, ardından PVD sistemi kullanılarak çok katmanlı CrN/NbN ince filmler büyütülmüştür. Bu kaplamanın korozyon davranışı üzerindeki etkisi %3,5 NaCl çözeltisinde araştırılmıştır. Böyle kaplamalar literatürde genel olarak tek proses kullanılarak gerçekleştirilmektedir. İki farklı kaplama yöntemi kullanılarak büyütülen kaplamalar sayesinde her iki prosesin kendine özgü avantajlarından faydalanılması amaçlanmıştır. Bu bağlamda elde edilen veriler, yeni kompozit kaplamaların elde edilmesi ve incelenmesi açısından önem arz etmektedir.

2. 2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada AZ91 magnezyum alaşımının üzerine PEO+CrN/NbN çok katmanlı kaplamalar büyütülerek korozyon özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Yapılan işlemler ve analizler başlıklar halinde detaylarıyla verilmiştir. Gerçekleştirilen deneysel çalışmanın adımları Şekil 1'de gösterilmiştir.

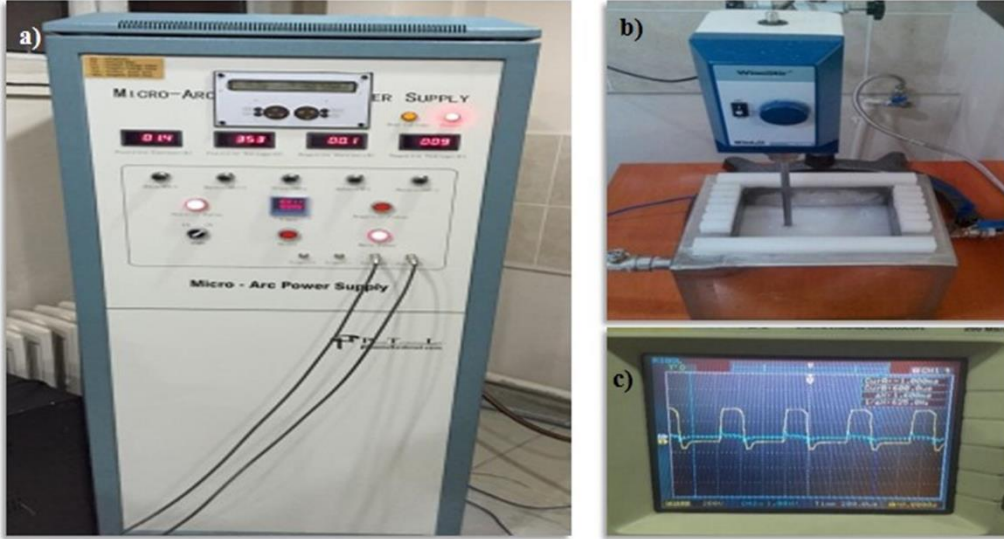


Şekil 1. Deneysel çalışma adımları

Bu çalışma kapsamında AZ91 (%8,35 Al, %0,68 Zn, %0,30 Mn, %0,015 Si, %0,001 Cu, %0,001 Fe) magnezyum alaşımı kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan AZ91 alaşımları 20x20x5 mm boyutlarına sahiptir. Kaplama işlemleri öncesinde numuneler 180, 240, 400, 600, 800 ve 1200 tane boyutlu SiC zımparalarda aşındırılmış ve elmas pasta ile parlatılmıştır. İşlem sonrası yüzey pürüzlülük değeri minimuma ($R_a \cong 0,64 \mu\text{m}$) indirilen numuneler, ultrasonik temizleyici, saf su ve aseton ile oluşabilecek kirliliklerden arındırıldıktan sonra kaplama işlemine hazır hale getirilmiştir.

2.1. PEO – PVD Kaplanması

PEO ve PVD sistemlerinde kaplama işlemleri için kullanılacak parametreler, ön çalışmalarla optimize edildikten sonra, çalışma için belirlenen test parametreleri Tablo 1'de gösterilmiştir. PEO kaplama işleminde bipolar akım modu seçilmiştir. Sodyum alüminat (NaAl_2O_3), sodyum hidroksit (NaOH) ve saf su kullanılarak pH değeri 11 olan bir elektrolit PEO kaplama işleminde kullanılmıştır. PEO kaplamalar, 420 V pozitif gerilim, -100 V negatif gerilimde, %30 görev döngüsünde, 1000 Hz frekansta, 10 dk sürede gerçekleştirilmiştir. PEO kaplama işlemi Şekil 2'de gösterilen sistemde gerçekleştirilmiştir. Kaplama sırasında elektrolit 20 dev/dk hızda karıştırılarak elektrolitin homojenizasyonu sağlanmıştır. İşlem sırasında oluşan arklar sebebiyle elektrolitin ısınması banyo cidarından şebeke suyu geçirilerek engellenmiştir.

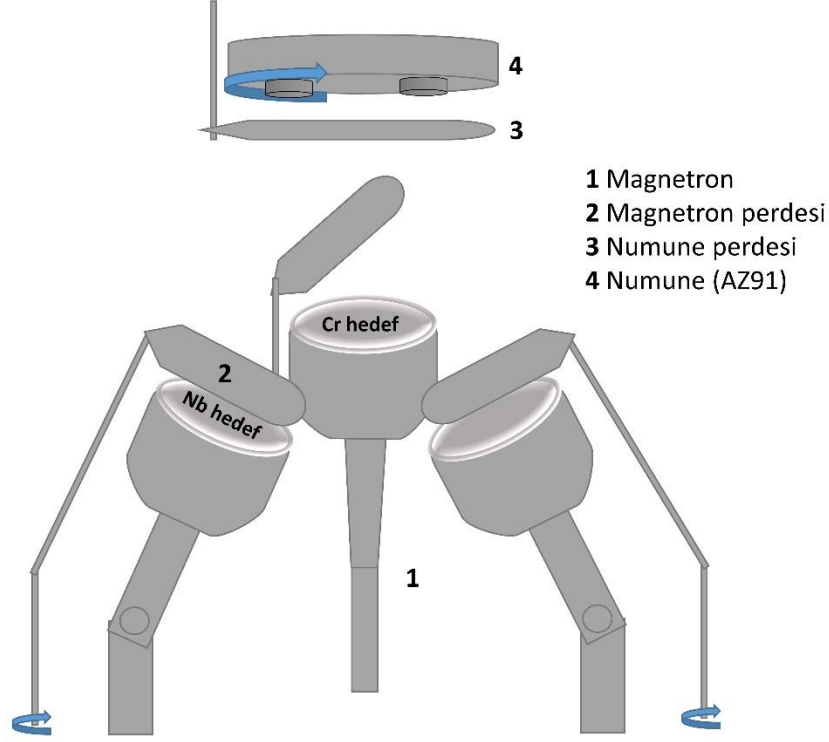


Şekil 2. PEO kaplama ünitesi a) güç kaynağı b) paslanmaz çelik banyo c) osiloskop

PVD kaplama işleminde ise iki farklı magnetron kullanılmış, magnetronlar 30° açıda 6 cm uzaklıkta numuneleri görece şekilde ayarlanmıştır. 1 nolu magnetrona %99,95 saflıkta niyobyum, 2 nolu magnetrona %99,95 saflıkta krom hedef takılmıştır. Kaplama sistemi 5×10^{-6} Torr basınca gelene kadar vakum işlemine tabi tutulmuş, ortamda bulunan diğer atomlar uzaklaştırılmıştır. Plazma oluşturabilmek için azot gazı 30 sccm, nitrür oluşturabilmek için 6 sccm azot gazı sisteme verilmiştir. Gaz basıncı 3 mTorr basınç değerinde, magnetronlara verilen güç 200 watt gerilimde sabitlenmiştir. Kaplamanın adezyonunun artırılması amacıyla alttaş sıcaklığı 300°C 'de tutulmuştur. Numunelerin tüm yüzeyinin homojen bir şekilde kaplanabilmesi için alttaş 10 dev/dk hızda kaplama süresince döndürülmüştür. Toplamda 120 dakika kaplama işlemi gerçekleştirilmiş, her bir magnetronun kapama perdesi 10'ar dakika açık kalarak CrN ve NbN kaplamaları katman katman büyütülmüştür. Kaplama işlemi sonrası numunelerin herhangi bir komplikasyona uğramaması için vakum ortamında soğuma sağlandıktan sonra çıkarılarak analiz işlemleri gerçekleştirilmiştir. Kaplama işlemleri Şekil 3'de şematığı gösterilen kaplama cihazında gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. PEO ve PVD kaplama yöntemleri için kaplama parametreleri.

Kaplama Türü	Malzemeler	Kaplama Şartları	Süre
Plasma Elektrolitik Oksidasyon (PEO)	NaAl ₂ O ₃ , NaOH elektrolit	+420V, -100V, %30 D.C., 1000 Hz	10 dk.
Fiziksel Buhar Çöktürme (PVD)	Cr hedef, Nb hedef	3 mTorr, 200 Watt, 30 sccm Ar, 6 sccm N ₂	120 dk.



Şekil 3. Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) kaplama cihazının şematik çizimi.

2.2. Malzeme Karakterizasyonu

Üretilen kaplamalar Atatürk Üniversitesi Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Araştırma Merkezinde (DAYTAM) karakterize edilmiştir. Yapısal analizler, enerji dağılımlı spektroskopi (EDS, Inca sistemi) ile donatılmış alan emisyon taramalı elektron mikroskobu (SEM, JSM-7001F, Jeol) kullanılarak 15 kV ile incelenmiştir. Kaplamaların faz incelemesi, X-ışını kırınımı (XRD, PANalytical Empyrean) 40 kV, 40 mA, Cu-K α radyasyonu ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$), 0,5° geliş açısı, ve 20 ila 90° arasında, 0,02°/s'de tarama hızı koşulları altında incelenmiştir. XRD tepe noktaları, X'Pert high score yazılımında JCPDS kartlarına göre analiz edilmiştir.

2.3. Potansiyodinamik Korozyon Testleri

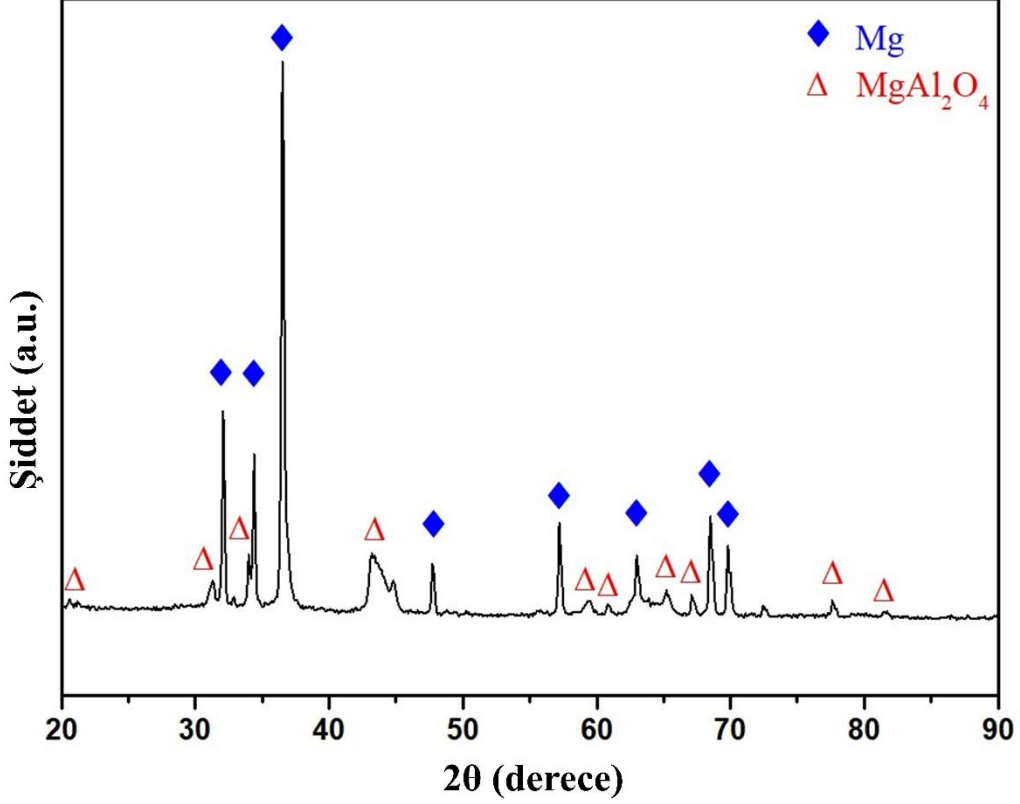
Numunelerin korozyon testleri, potansiyostat-galvanostat cihazı (AMETEK Versastat 3) ile referans elektrot (RE-0,222 Volt) olarak Ag/AgCl/KCl, karşıt elektrot (CE) olarak grafit ve çalışma elektrotu (WE) olarak ise taban malzeme ve kaplamalar kullanılarak üç elektrot tekniğine göre gerçekleştirilmiştir. Testler %3,5 NaCl çözeltisi içerisinde 25°C sabit sıcaklıkta tamamlanmıştır.

3. Sonuçlar ve Tartışma

3.1. XRD Analizleri

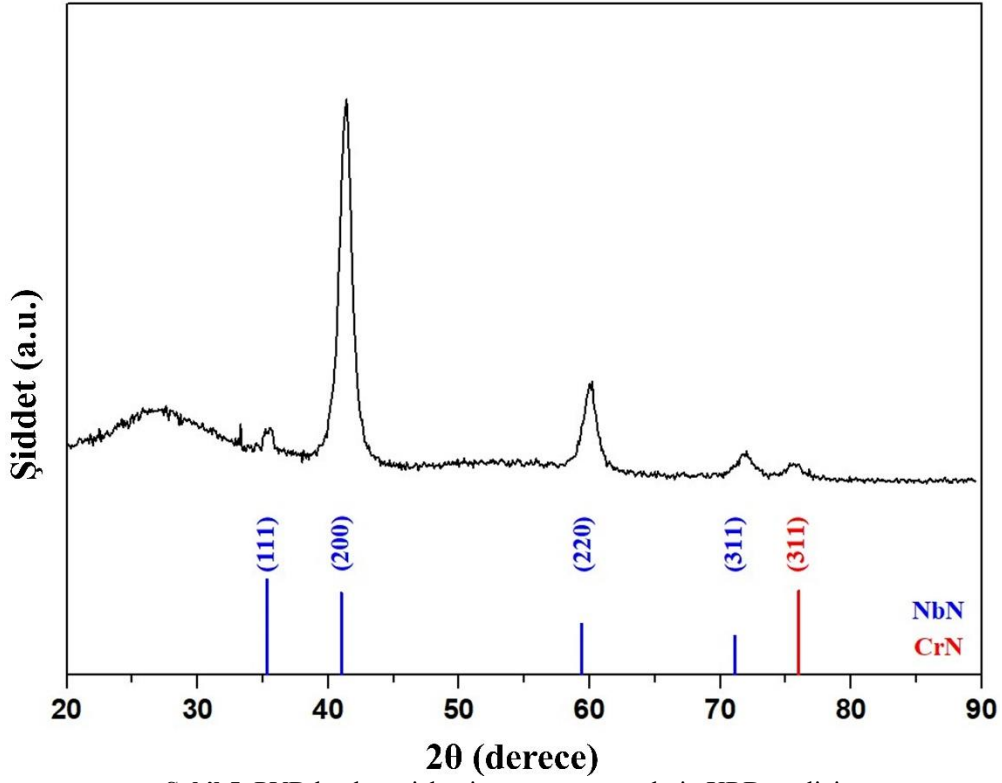
CrN ve NbN fazlarının kübik kristal yapıya sahip olması nedeniyle hegzagonal kristal sisteme sahip Mg'da meydana gelebilecek kristal kafes uyumsuzluğunu bertaraf etmek amacıyla PEO yöntemi ile kübik kristal sisteme

sahip $MgAl_2O_4$ fazı AZ91 taban malzeme yüzeyinde büyütülmüştür. PEO işlemi sonrasında PVD yöntemi ile CrN/NbN çoklu tabakası büyütülmüştür. Şekil 4'te PEO yöntemi ile büyütülen kaplamanın XRD analizi sonuçları verilmiştir. Mg alaşımı üzerine sodyum alüminat elektrolit kullanılarak büyütülen kaplama içeriğinde $MgAl_2O_4$ fazının başarılı bir şekilde oluştuğu XRD analizi ile gösterilmiştir. Taban malzeme olarak kullanılan AZ91'den gelen Mg'un pikleri XRD deseninde görülmektedir. XRD desenlerinin belirlenmesinde α -Mg için JCPDS 35-0821 [23], $MgAl_2O_4$ için JCPDS 01-073-2210 [24] PDF kartları kullanılmıştır.



Şekil 4. PEO kaplaması sonrası numunlerin XRD analizi

Şekil 5'te ise taban malzemeden gelebilecek tepe noktalarını bertaraf etmek amacıyla AZ91 taban malzemelerle aynı anda PVD sistemi içerisinde kaplanan Si wafer yüzeyinden XRD analizleri alınmıştır. XRD desenlerinin analiz edilmesinde NbN için JCPDS 38-1155 [25] CrN içinde JCPDS 11-0065 [26] PDF kartları kullanılmıştır.

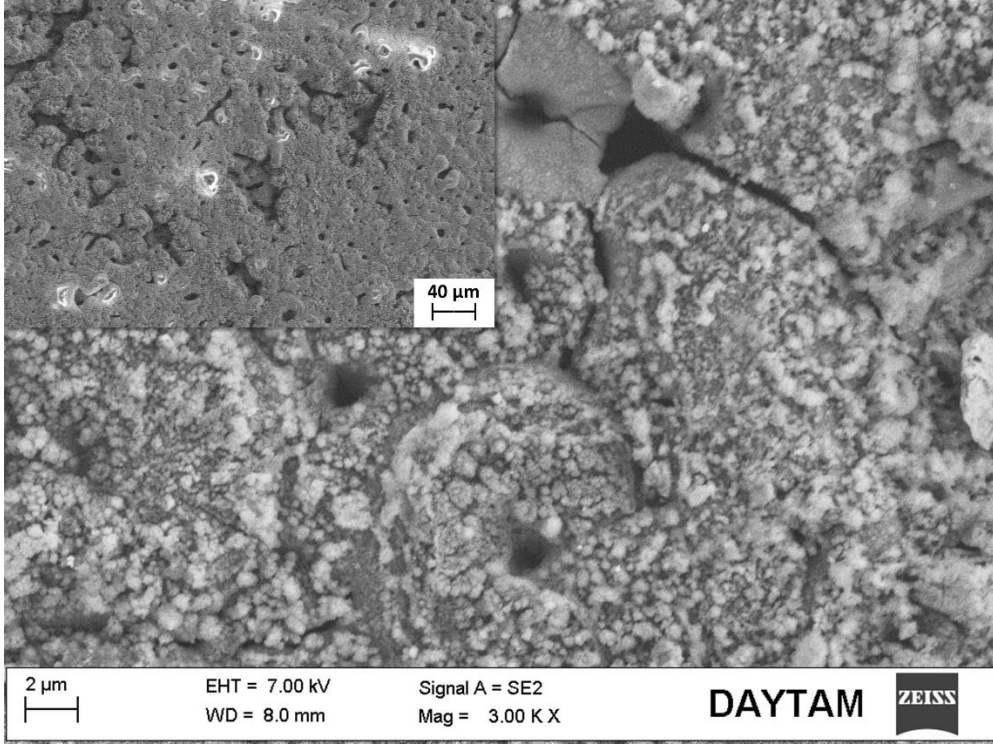


Şekil 5. PVD kaplama işlemi sonrası numunelerin XRD analizi

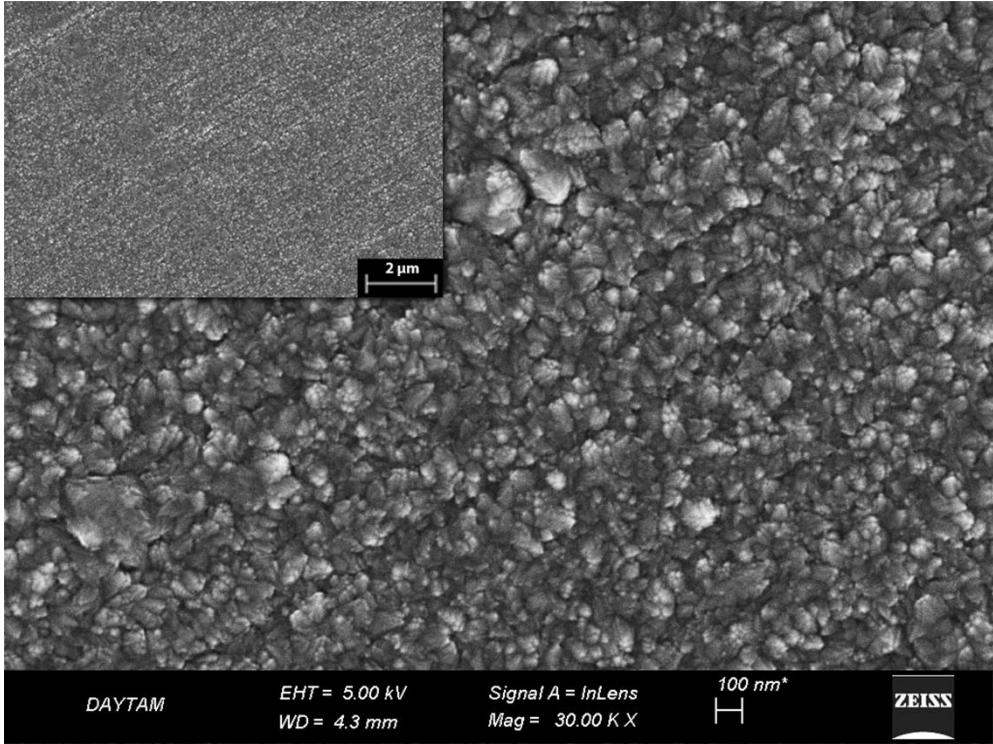
CrN ün sadece (311) piki gözlenmiştir. Düşük pik şiddetlerinin sebebi çoklu kaplamaların son kaplamasının NbN ile bitmesi ve XRD analizinin düşük açılı ince film modunda gerçekleştirilmiş olmasından kaynaklanmaktadır. Oluşan NbN kaplaması genel olarak (200) kristal yönelimine sahip olarak büyümüştür. 20°-30° aralığında kaplama yapısının amorf olarak büyüdüğü belirlenmiştir. MgAl₂O₄+CrN/NbN çok katmanlı kaplamalar, PEO ve PVD işlemleri kullanılarak kaplanmıştır. Taban malzemedan, kaplama yüzeyine kadar uyumlu kristal yapıya sahip olması, kaplamanın adezyonu açısından kritik öneme sahiptir. Çok katmanlı kaplamalar, kübik MgAl₂O₄ ve kübik CrN/NbN yapılarından oluşmaktadır [27].

3.2. SEM-EDS Analizi

Üretilen malzemelerin yüzey morfolojileri ve elementel analizleri SEM ve SEM üzerine adapte edilmiş EDS sistemleri ile karakterize edilmiştir. PEO kaplı AZ91 numunesinin SEM görüntüsü Şekil 6, PEO+CrN/NbN kaplamasının SEM görüntüleri Şekil 7 ve CrN/NbN kaplamasının kesit görüntüsü ve EDS analizi ise Şekil 8'de gösterilmektedir.



Şekil 6. PEO kaplı AZ91 numunesinin SEM görüntüsü

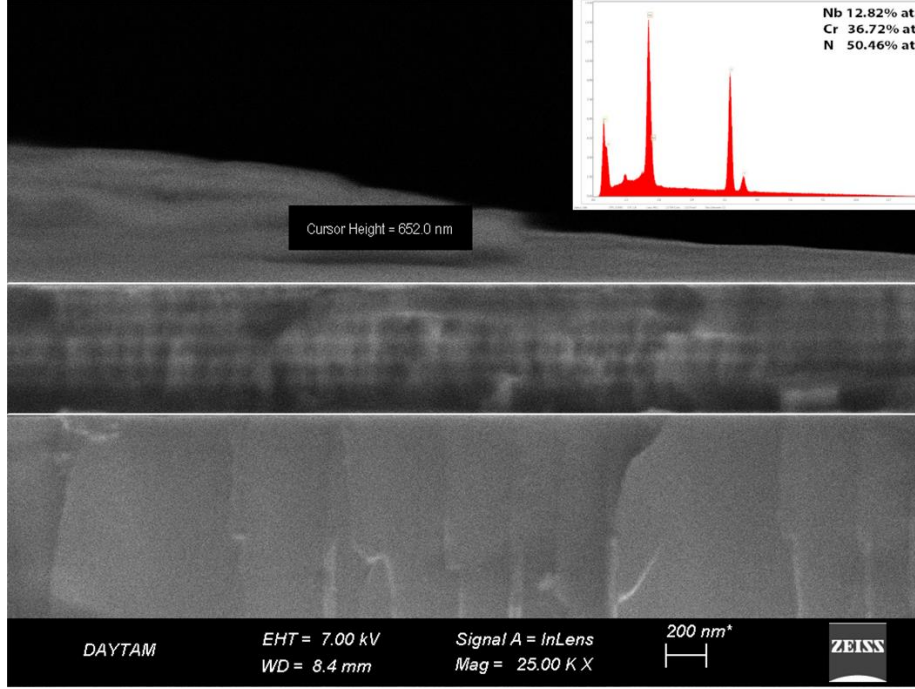


Şekil 7. PEO+CrN/NbN kaplamasının SEM görüntüleri

PEO işleminin doğası gereği meydana gelen gaz çıkışlarının ve arkların bir sonucu olarak gözenekli ve pürüzlü bir kaplama morfolojisi meydana gelmektedir. Şekil 6'da görülen yüzey PEO kaplamalarının genel yüzey

morfolojisini göstermektedir. Bu morfolojiye sıcaklık, basınç ve elektrolit bileşimi gibi parametreler etki etmektedir. Yüzey üzerinde görülen mikro çatlaklar belirtilen etkilerin sonucunda doğal olarak oluşmaktadır [13].

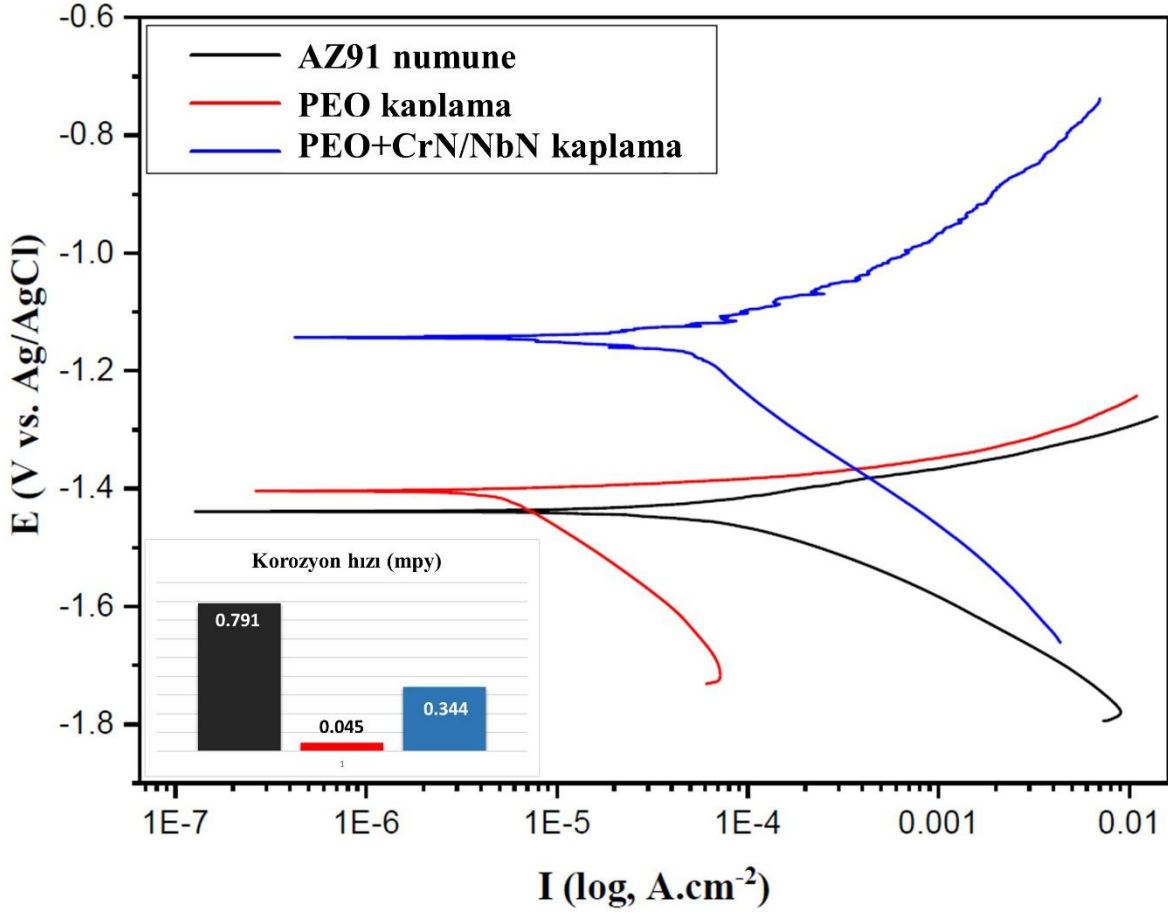
Şekil 8’de görüldüğü üzere kolonsal büyüyen CrN/NbN tabakası Şekil 7’de gösterilen yüzey morfolojisinin oluşmasını sağlamaktadır. Kaplamalar, Thornton bölge modeline göre 2. bölgede büyümüştür [19]. Thornton bölge modeline göre; Bölge 2, $T/T_{erg} > 0,3$ ’te meydana gelmektedir. Bu sebeple yüzey difüzyonu etkin mekanizma olarak görülmektedir. Böylelikle tanelerin büyümesiyle kusurların ortadan kalktığı bir kaplama oluşmaktadır. Oluşan taneler daha büyük ve kolonsal yapıdadır.



Şekil 8. CrN/NbN kaplamasının kesit görüntüsü ve EDS analizi

Şekil 8’de verilen EDS analizine göre %12,82 at. Nb, %36,72 at. Cr ve %50,46 at. N oluşmuştur. Cr’nin atom ağırlığının Nb ye göre düşük olması sebebiyle Cr, Nb’ye göre yaklaşık 2 kat daha fazla sıçratma verimine sahiptir. Bu duruma bağlı olarak kaplama yapısına Cr elementi Nb’ye göre daha fazla katılmıştır. Şekil 8’deki kesit görüntüleri ayrıca incelendiğinde CrN tabakasının NbN tabakasına göre daha kalın olarak biriktiği görülmektedir. Kaplamalara NbN tabakası ile başlayıp yine aynı kaplama ile bitirilmiştir. Elde edilen kaplamalarda NbN/CrN kaplama kalınlığı 652 nm olarak bulunmuştur.

3.3. Korozyon Testleri



Şekil 9. AZ91, PEO ve PEO+CrN/NbN kaplamaların potansiyodinamik polarizasyon eğrisi

Taban malzeme olarak kullanılan kaplanmamış, PEO ile $MgAl_2O_4$ kaplanmış ve PEO+PVD ile CrN/NbN kaplanmış AZ91 alaşımları için aynı şartlarda gerçekleştirilen korozyon testi potansiyodinamik polarizasyon eğrileri Şekil 9'da gösterilmiştir. Potansiyodinamik eğrilere göre, kaplamasız AZ91 ve sadece PEO ile işlem görmüş AZ91, herhangi bir kırılma potansiyeli göstermemektedir. PEO+CrN/NbN kaplamalar $-1,3$ mV'luk bir kırılma potansiyeli göstermiştir. Bu numunelerin AZ91 alaşımına göre PEO kaplamalarda $0,045$ mpy'lik oldukça düşük bir korozyon hızına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Yüzeyde büyütülen oksit tabakası, AZ91 alaşımının yüksek oranda korozyona karşı dirençli olmasını sağlamıştır. PEO+CrN/NbN kaplamalarda ise korozyon hızı $0,344$ mpy olarak belirlenmiştir. Kaplama yapısı kompozisyonunda bulunan Cr ve Nb sebebiyle taneler arasında potansiyel fark meydana gelmiştir. Bu sebeple en üst katmanda bulunan yapının korozyon dayanımı oldukça azalmıştır. Ancak bu yapının korozyon direnci, kaplanmamış AZ91 alaşımına göre 2 kat daha yüksektir. Bu durumun nedeni, Cr ve Nb'nin hem saf formda hem de nitrür bileşiklerinde yüksek korozyon direncine sahip olmasından kaynaklanmaktadır. [1,26,28,29].

4. Sonuç

Bu çalışmada, AZ91 magnezyum alaşımının korozyon direncini artırmak amacıyla PEO($MgAl_2O_4$)+PVD(CrN/NbN) kaplamalarının korozyon davranışına karşı etkisi %3,5'lik NaCl çözeltisinde araştırılmıştır. İlgili sonuçlar aşağıda verilmiştir;

- PEO kaplama yönteminde kullanılan elektrolitin $NaAl_2O_3$ olması, Mg esaslı malzeme yüzeyinde $MgAl_2O_4$ yapılarının kısa sürede büyümesini desteklemiştir.
- PVD kaplama yapıları çoğunlukla kristal olmasına rağmen, amorf fazların varlığı da tespit edilmiştir.
- PEO kaplama yüzeyinde oluşan $MgAl_2O_4$ yapısı, CrN/NbN kaplamanın yüzeyde daha iyi bir performansla kaplanmasını desteklemiş, kafes uyumsuzluğunu ortadan kaldırmıştır.

- PEO ile kaplanan magnezyum alaşımlarının PVD gibi ikinci bir kaplama yöntemi ile üretilmesi, korozyon direncini artırmıştır.
- PEO kaplamaların yüzeyinde aynı kristal yapıya sahip PVD kaplamaları başarıyla uygulanabilmiştir. Ayrıca bu kaplamaların birçok uygulama alanında kullanılabilceği düşünölmektedir.
- PEO kaplamaların korozyon hızı 0,045 olarak bulunmuştur. PEO kaplamaları, korozyon hızı 0,791 olan kaplamasız AZ91 alaşımına göre yaklaşık on yedi kat daha yüksek korozyon direncine sahiptir.
- PEO+CrN/NbN kaplamaları için korozyon hızı 0,344 olarak belirlenmiştir. Ayrıca PEO+CrN/NbN kaplamalarının, kaplanmamış AZ91 numunesine göre yaklaşık 2 kat daha yüksek korozyon direncine sahip olduğu görölmüştür.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazar(lar) herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

- [1] Mathaudhu SN, Nyberg EA. Magnesium alloys in U.S. military applications: Past, current, and future solutions. *Magnesium Technology*, Springer, 2010; 27-32.
- [2] Luo AA. Magnesium casting technology for structural applications. *J. Magnes. Alloy*. 2013; 2-22.
- [3] Sillekens WH, Hort N. Magnesium and magnesium alloys. *Structural Materials and Processes in Transportation*. 2013; 113-150.
- [4] Dziubińska A, Gontarz A, Dziubiński M, Barszcz M. The forming of magnesium alloy forgings for aircraft and automotive applications, *Adv. Sci. Technol. Res. J.*, 2016; 158–168.
- [5] Danford MD, Mendrek MJ, Mitchell ML, Torres PD. The corrosion protection of magnesium alloy AZ31B. 1997.
- [6] Kutz M. *Mechanical engineers handbook*. Volume 1: Materials and engineering mechanics. 2015.
- [7] Dong H. *Surface engineering of light alloys: Aluminium, magnesium, and titanium alloys*. 2010.
- [8] Hussein RO, Nie X, Northwood DO. An investigation of ceramic coating growth mechanisms in plasma electrolytic oxidation (PEO) processing, *Electrochim. Acta.*, 2013; 111-119.
- [9] Cheng Y, Wu F, Matykina E, Skeldon P, Thompson GE. The influences of microdischarge types and silicate on the morphologies and phase compositions of plasma electrolytic oxidation coatings on Zircaloy-2, *Corros. Sci.* 2012; 307-315.
- [10] Dwivedi DK. Adhesive wear behaviour of cast aluminium–silicon alloys: Overview. *Materials & Design (1980-2015)* 2010; 2517-2531.
- [11] Dehnavi V, Luan BL, Shoesmith DW, Liu XY, Rohani S. Effect of duty cycle and applied current frequency on plasma electrolytic oxidation (PEO) coating growth behavior. *Surf. Coatings Technol.*, 2013; 100-107.
- [12] Dehnavi V, Prof S, Rohani-Prof S, Shoesmith DW. Surface modification of aluminum alloys by plasma electrolytic oxidation. *Chemical and Biochemical Engineering*. 2014.
- [13] Gupta P, Tenhundfeld G, Daigle EO, Ryabkov D. Electrolytic plasma technology: Science and engineering-An overview. *Surf. Coatings Technol.*, 2007; 8746–8760.
- [14] Blawert C, Bala Srinivasan P. Plasma electrolytic oxidation treatment of magnesium alloys. *Surf. Eng. Light Alloy. Alum. Magnes. Titan. Alloy*, 2010; 155–183.
- [15] Liang CJ. In-situ impedance spectroscopy studies of the plasma electrolytic oxidation coating process. 2013; 234.
- [16] Alshmiri F, Atkinson HV, Hainsworth SV, Haidon C, Lawes SDA. Dry sliding wear of aluminium-high silicon hypereutectic alloys. *Wear*, 2014; 106-116.
- [17] Xu F, Xia Y, Li G. The mechanism of PEO process on Al-Si alloys with the bulk primary silicon, *Appl. Surf. Sci.*, 2009; 9531-9538.
- [18] Hoche H, Groß S, Trořmann T, Schmidt J, Oechsner M. PVD coating and substrate pretreatment concepts for magnesium alloys by multinary coatings based on Ti(X)N. *Surf. Coatings Technol.*, 2013.
- [19] Mattox DMM. *Handbook of physical vapor deposition (PVD) processing film formation, adhesion, surface preparation and contamination control*, 1998.
- [20] Gennardo D. Design, construction, and optimization of a magnetron sputtering system for urania deposition. 2010.
- [21] O'Hanlon JF. *A user's guide to vacuum technology*. John Wiley & Sons, 2005.
- [22] Alfonso JE, Buitrago J, Torres J, Santos B, Marco JF. Crystallographic structure and surface composition of NbN_x thin films grown by RF magnetron sputtering. *Microelectronics J.*, 2008; 1327–1328.
- [23] Martin J, Nominé AV, Stef J, Nominé A, Zou JX, Henrion G, Grosdidier T. The influence of metallurgical state of substrate on the efficiency of plasma electrolytic oxidation (PEO) process on magnesium alloy. *Mater. Des.*, 2019; 107859.
- [24] Hafizi A, Rahimpour MR. Inhibiting Fe–Al spinel formation on a narrowed mesopore-sized MgAl₂O₄ support as a novel catalyst for H₂ production in chemical looping technology. *Catalysts*, 2018; 27.

- [25] Nordin M, Larsson M, Hogmark S. Mechanical and tribological properties of multilayered PVD TiN/CrN, TiN/MoN, TiN/NbN and TiN/TaN coatings on cemented carbide. *Surf. Coatings Technol.*, 1998; 234-241.
- [26] Lamastra FR, Leonardi F, Montanari R, Casadei F, Valente T, Gusmano G. X-ray residual stress analysis on CrN/Cr/CrN multilayer PVD coatings deposited on different steel substrates. *Surf. Coatings Technol.*, 2006; 6172–6175.
- [27] Khlifi K, Ben Cheikh Larbi A. Investigation of adhesion of PVD coatings using various approaches, *Surf. Eng.*, 2013; 555-560.
- [28] Li XY, Akiyama E, Habazaki H, Kawashima A, Asami K, Hashimoto K. An XPS study of passive films on sputter-deposited Cr-Nb alloys in 12 M HCl solution. *Corros. Sci.*, 1998; 821-838.
- [29] Song G, Atrens A, Wu X, Zhang B. Corrosion behaviour of AZ21, AZ501 and AZ91 in Sodium Chloride. *Corros. Sci.*, 1998; 1769-1791.