

**MİKRO ARK OKSİDASYON (MAO)
YÖNTEMİ İLE KAPLANMIŞ AZ91
MAGNEZYUM ALAŞIMININ KOROZYON
DAVRANIŞININ ARAŞTIRILMASI**

Muhammet YÜCE

**Yüksek Lisans Tezi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Konstrüksiyon ve İmalat Bilim Dalı
Prof. Dr. Mehmet GAVGALI**

2014

Her hakkı saklıdır

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**MİKRO ARK OKSİDASYON (MAO) YÖNTEMİ İLE KAPLANMIŞ
AZ91 MAGNEZYUM ALAŞIMININ KOROZYON DAVRANIŞININ
ARAŞTIRILMASI**

Muhammet YÜCE

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Konstrüksiyon ve İmalat Bilim Dalı**

**ERZURUM
2014**

Her hakkı saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

MİKRO ARK OKSİDASYON (MAO) YÖNTEMİ İLE KAPLANMIŞ AZ91
MAGNEZYUM ALAŞIMININ KOROZYON DAVRANIŞININ
ARAŞTIRILMASI

Prof. Dr. Mehmet GAVGALI danışmanlığında, Muhammet YÜCE tarafından hazırlanan bu çalışma 24/07/2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makina Mühendisliği Anabilim Dalı – Konstrüksiyon ve İmalat Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak ~~oybirliği/oy çokluğu (.../...)~~ ile kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. Mehmet GAVGALI

İmza:

Üye: Prof. Dr. Yaşar TOTİK

İmza:

Üye: Yrd. Doç. Dr. Hakan TEMUR

İmza:

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu 07/08/2014 tarih ve 81/978 nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. İhsan EFEOĞLU
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

MİKRO ARK OKSİDASYON (MAO) YÖNTEMİ İLE KAPLANMIŞ AZ91 MAGNEZYUM ALAŞIMININ KOROZYON DAVRANIŞININ ARAŞTIRILMASI

Muhammet YÜCE

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Konstrüksiyon ve İmalat Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mehmet GAVGALI

Magnezyum ve alaşımları sahip oldukları yüksek mukavemet ve oldukça düşük ağırlıkları nedeniyle havacılık sanayisi başta olmak üzere, otomotiv sanayi, savunma sanayi ve biyomedikal gibi alanlarda kullanılmaktadır. Ancak kimyasal reaktifliğinden dolayı agresif ortamlarda korozyona karşı düşük direnç sergilemektedirler. Magnezyum alaşımlarının bu özelliğinin geliştirilmesi amacıyla yüzey iyileştirme çalışmaları yapılmaktadır.

Bu çalışmada son yıllarda kullanımı gittikçe artan Mikro ark oksidasyon (MAO) yöntemi kullanılarak Magnezyum AZ91 alaşımı kaplanmıştır. Kaplama süreci sonrasında, darbe süresinin (duty time) ve işlem süresinin kaplamanın yüzey morfolojisi, korozyon direnci ve faz yapısı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Kaplamaların mikro yapısını ve kalınlık değerlerini incelemek için tarayıcı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır, bunun yanı sıra kaplama faz yapısını incelemek için X-ray kırınımı (XRD) kullanılmıştır. Korozyon deneyleri %3,5 NaCl çözeltisi içerisinde Versastat3 Potansiyostat test cihazı kullanılarak gerçekleştirildi. Potansiyodinamik polarizasyon testleri korozyon analizi için kullanılmıştır.

Sonuç olarak; Darbe süresinin kaplamanın faz yapısı üzerindeki etkileri işlem süresinin artmasıyla ortaya çıkmıştır. Darbe süresinin artması kaplamanın yüzey morfolojisinde büyük gözeneklerin ve çatlakların oluşmasına neden olmuş ve bu durum aynı zamanda kaplamanın korozyon direncinin düşmesine sebep olmuştur. İşlem süresinin artması korozyon direncini geliştirmiştir. En iyi korozyon direnci 50 µs darbe süresinde ve 15 dakika işlem süresine sahip R4 kaplamasında gözlemlenmiştir.

2014, 48 sayfa

Anahtar Kelimeler: MAO, AZ91, Magnezyum, Korozyon.

ABSTRACT

Master Thesis

THE INVESTIGATION OF CORROSION BEHAVIOR OF AZ91 MAGNESIUM COATED WITH MICRO ARC OXIDATION (MAO) METHOD

Muhammet YÜCE

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Science
Department of Mechanical Engineering
Construction and Fabrication Science

Supervisor: Prof. Dr. Mehmet GAVGALI

Magnesium and its alloys are used in the fields such as biomedicine, automobile industry, defense industry and mainly in the aviation industry by the reason of having high strength and extremely low weight. However, it demonstrates low resistance to corrosion in aggressive environments because of chemical reactivity. Therefore the surface treatment is performed by the aim of improving this property of magnesium alloys.

In this study, AZ91 magnesium alloy is coated by the using of micro-arc oxidation (MAO) method which has recently increased. Following the coating process, the effects of pulse duration (duty time) and processing time on the surface morphology, corrosion resistance and phase structure of the coating were examined. To investigate the thickness values and microstructure of the coating, scanning electron microscope (SEM) was used, beside this to investigate coating phase structure X-ray diffraction (XRD) was used. Corrosion tests were performed in 3.5 % NaCl solution by using of VersaSTAT3 Potentiostat test equipment. Potentiodynamic polarization tests were used for corrosion analysis.

As a result; the effects of the pulse duration (duty time) on the phase structure of the coating has appeared by the increasing of processing time. The increase of duty time has caused large pores and cracks in the surface morphology of the coating and at the same time this has caused a decrease in corrosion resistance of the coating. The increase of the processing time has improved corrosion resistance. The best corrosion resistance has been observed in R4 coating which has 50 μ s pulse duration and 15 minutes processing time.

2014, 48 pages

Keywords: Magnesium, AZ91, MAO, Corrosion.

TEŞEKKÜR

Tezimin hazırlanmasında yardımından, tecrübesinden ve bilgisinden her daim istifade ettiğim, değerli tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Mehmet GAVGALI'ya teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarındaki deney sisteminin kurulmasında, yüzey kaplamalarının gerçekleştirilmesinde ve deneysel verilerin değerlendirilmesinde yardım ve desteklerini esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Yaşar TOTİK, Sayın Doç. Dr. Ersin ARSLAN'a ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Ebru Emine DEMİRCİ ŞÜKÜROĞLU'na teşekkür ederim. Çalışmalarım sırasında dostlarım, Hossein AHMAD AGHDAM'a, Hamed FARZI'ya ve Sueyla TİKİCİ'ye, sonsuz teşekkür ederim.

Ayrıca tez yazımı sırasındaki yardımlarından dolayı Esat YÜCE'ye, Fatma YÜCE'ye, Alper ÖZDEMİR'e ve Sercan YILMAZ'a, teşekkür ederim.

Tüm okul hayatım boyunca gösterdikleri sabır, anlayış ve her türlü desteklerinden dolayı annem, babam ve tüm aile ferlerine çok teşekkür ederim.

Muhammet YÜCE

Temmuz, 2014

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	7
2.1. Magnezyum Malzemeler.....	7
2.2. Mikro Ark Oksidasyon (MAO) Yöntemi.....	12
2.2. Korozyon.....	20
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	30
3.1. Taban Malzemesi ve Kaplama Öncesi Yüzey Hazırlıkları	30
3.2. MAO Yöntemi ile AZ91 Magnezyum Alaşımı Numunelerin Kaplanması	30
3.3. Yapısal Analizler.....	32
3.4. SEM Analizleri.....	33
3.5. Korozyon Deneyleri	33
4. ARAŞTIRMA ve BULGULAR.....	35
4.1. Yüzey Karakteristiği.....	35
4.2. Kaplama Kalınlığı Analizi.....	37
4.3. Faz Analizi	40
4.4. Korozyon Analizi	41
5. SONUÇLAR.....	46
KAYNAKLAR	47
ÖZGEÇMİŞ	49

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

$^{\circ}\text{C}$	Santigrat Derece
A	Akım Birimi, Amper
A°	Angstrom
cal	Kalori
E_{kor}	Korozyon Potansiyeli
Hz	Frekans Birimi, Herz
\dot{I}_{kor}	Korozyon Akımı
Mpa	Megapaskal
$^{\circ}\text{K}$	Kelvin Derece
V	Gerilim birimi, Volt
θ	Kırınım Açısı
Λ	Dalga boyu
Ω	Ohm

Kısaltmalar

AC	Alternatif Akım
ASTM	American Society for Testing Materials
MAO	Mikro Ark Oksidasyon
SEM	Scanning Electron Microscopy / Taramalı Elektron Mikroskop
XRD	X-Ray Difraktometre / X Işını Kırınım ölçer

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Kare kesitli magnezyum örnekleri.....	8
Şekil 2.2. Mg alaşımdan yapılmış a) dişli kutusu, b) 12 silindirli bir motorun basınçlı kalıp dökümle imal edilmiş emme manifoldu.....	12
Şekil 2.3. MAO sistem ünitesinin şematik gösterimi	14
Şekil 2.4. Plazma elektrolizi için akım-voltaj diyagramı.....	15
Şekil 2.5. Alüminyum için MAO prosesinde oksit tabakası oluşumu	16
Şekil 2.6. Elektrolit ve altlık iyonlarının hareketinin şematik gösterimi	17
Şekil 2.7. MAO yöntemiyle oluşturulan kaplamanın şematik gösterimi.....	18
Şekil 2.8. MAO kaplı AM50 Mg alaşımından üretilmiş (A) kompresör rotorları (B) hidrolik silindir (C) MAO kaplı AZ91 Mg Alaşımından üretilmiş motor bisiklet jantı.....	19
Şekil 2.9. Korozyon reaksiyonu oluşumu.	22
Şekil 2.10. Farklı metaller arasında oluşan galvanik korozyon	24
Şekil 2.11. Metalde çatlak korozyonun oluşumu ve çatlak	24
Şekil 2.12. Oyuklanma korozyonu ve oluşumu	25
Şekil 2.13. Borunun dış ve iç görünümü ile erozyon korozyonu.	26
Şekil 2.14. Kaplama hatası nedeniyle kaplama altında oluşmuş korozyon	27
Şekil 2.15. Çatlak korozyonunun görünümü	27
Şekil 2.16. Kavite oluşumunun sebep olduğu korozyon görünümü	28
Şekil 2.17. Cıvatanın sebep olduğu aralık korozyonu	29
Şekil 3.1. Kare dalga modelinin dalga formunun şematik gösterimi.....	31
Şekil 3.2. MAO işleminde kullanılan sistemin gösterimi	32
Şekil 3.3. X Işını difraktometresi (XRD).....	32
Şekil 3.4. Tarama elektron mikroskopları (SEM).....	33
Şekil 3.5. Korozyon deney sistemi	34
Şekil 4.1. MAO işlemine tabi tutulmuş numunelerin SEM görüntüleri	36
Şekil 4.2. MAO işlemi ile kaplanmış numunelerin kesit görüntüleri.	39
Şekil 4.3. MAO işlemi uygulanmış numunelerin XRD grafikleri.....	41
Şekil 4.4. MAO işlemine tabi tutulmuş numunelerin ve kaplamasız magnezyum	

alaşımının 5 dk işlem sürelerine göre potasyodinamik grafiklerinin karşılaştırılması.....	42
Şekil 4.5. MAO işlemine tabi tutulmuş numunelerin ve kaplamasız magnezyum alaşımının 15 dk işlem sürelerine göre potasyodinamik grafiklerinin karşılaştırılması.....	43
Şekil 4.6. MAO işlemine tabi tutulmuş numunelerin pozitif darbe sürelerine göre potasyodinamik grafiklerinin karşılaştırılması	45

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Magnezyuma katılan alaşım elementleri ve kısaltmaları.....	10
Çizelge 2.2. Mg alaşımlarının standartları ve bileşimleri (ASTM B 93/B 93M ve ASTM B94).....	11
Çizelge 3.1. AZ91 magnezyum alaşımının kimyasal bileşimi	30
Çizelge 3.2. MAO kaplama işlem parametreleri (sabit voltaj: 400 V, sabit frekans frekans: 250 Hz).....	31
Çizelge 4.1. Kaplamanın kesit morfolojisi kalınlık ölçümleri.....	38

1. GİRİŞ

Magnezyum ve alaşımları düşük yoğunluk, yüksek spesifik mukavemet, geri dönüşüm yeteneği, yüksek sönümlenme kapasitesi vb. özelliklere sahiptir. Bu özellikleri sayesinde otomotiv, bilgisayar, havacılık, iletişim gibi alanlarda kullanılmakta ve kullanım alanı genişletilmektedir. Ancak magnezyum ve alaşımlarının iyi özelliklerinin yanında kötü özellikleri vardır. Yüksek kimyasal reaktivesi, kötü korozyon ve aşınma direnci onların kullanım alanlarını kısıtlamaktadır. Bu kötü özelliklerin iyileştirilmesi için kimyasal dönüşüm kaplamaları, elektro kaplama, anotlama, fiziksel buhar biriktirme, solgel yöntemi dâhil olmak üzere buna benzer yüzey modifikasyon teknikleri magnezyum üzerinde uygulanmaktadır ve bu alanda araştırmalar devam etmektedir. En popüler tekniklerden bir olan mikro ark oksidasyon son yıllarda magnezyum alaşımları için başarılı bir şekilde uygulanmaktadır (Duan *et al.* 2006; Yue and Hua 2010; Durdu *et al.* 2011; Hui-xia *et al.* 2012).

Mikro ark oksidasyon (MAO) sulu çözelti içinde ve yüksek gerilim altında plazma deşarjı ile magnezyum alt tabaka üzerinde kalın oksit kaplama oluşturmak için kullanılan nispeten yeni ve gelecek vaat eden bir yüzey işleme yöntemidir. MAO kaplamanın kalitesi; elektrolit bileşimleri, elektrolit, sıcaklık, muamele süresi, gerilim, anodik akım yoğunluğu, vb. parametreler tarafından kontrol edilebilir (Yue and Hua 2010).

MAO işlemi numune üzerinde sert ve korozyona dayanıklı kaplamalar oluşturabilir. Ancak MAO işleminin doğası gereği kaplama yüzeyinde gözenekler ve çatlaklar bulunmaktadır (Demirci *et al.* 2013). Bu gözenekler ve çatlaklar işlem parametreleri değiştirilerek iyileştirilebilmektedir. Çatlakların ve gözeneklerin iyileştirilmesi kaplama kalitesini etkilemektedir.

MAO işlemiyle yapılan çalışmalar son yıllarda hızla gelişmektedir. Literatürdeki çalışmalar ise aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

Demirci *et al.* (2013) yaptığı çalışmada, fosfat-silikat ve potasyum stanet olan iki farklı elektrolit çözeltisi içinde, farklı çözücülerin etkilerini karşılaştırmak ve açıklamak amacıyla, AZ91 Mg alaşımı üzerinde MAO kaplama büyütmüşlerdir. Farklı çözeltilerin direkt olarak yüzey morfolojisini etkilediğini tespit etmişlerdir. Buna ek olarak en iyi yüzey morfolojisinin stanet iyonları içeren çözeltide kaplanan numunede oluştuğunu fark etmişlerdir. Ayrıca yapılan çalışmada, aşınmaya dayanıklı en yüksek değeri, tribokorozyona dayanıklı en yüksek değeri ve korozyon akımının en düşük değerini stanet iyonları içeren çözeltide oluşturulmuş kaplamada elde etmişlerdir.

Wang and Xia (2013) yaptığı çalışmada, silikat (Na_2SiO_3) ve alüminat (NaAlO_2) dan oluşan ikili elektrolit çözeltisi ve çözeltinin yanı sıra $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, NaOH , $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$ ve $\text{C}_6\text{H}_5\text{Na}_3\text{O}_7$ katkı maddelerini, sabit akım modunda AZ91D magnezyum alaşımı üzerinde iyi korozyon direncine sahip kaplama geliştirmek için kullanmışlardır. 15 g/L Na_2SiO_3 , 9 g/L NaAlO_2 , 2 g/L $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, 3 g/L NaOH , 5 mL/L $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$ ve 7 g/L $\text{C}_6\text{H}_5\text{Na}_3\text{O}_7$ içeren iyileştirilmiş elektrolit geliştirmişlerdir. Kaplanan malzemelerin yüzeylerinde mikro çatlaklar ile gözeneklerin olduğunu tespit etmişlerdir. Ancak iyileştirilmiş kaplamanın mikro gözeneklerinin genişliği ve mikro çatlaklarının büyüklüğü diğer kaplamalara nazaran daha küçük olduğunu fark etmişlerdir. Ayrıca, iyileştirilmiş kaplamanın öncelikle Mg, Al, O ve Si elementleri içerdiğini ve özellikle MgO , Mg_2SiO_4 ve MgAl_2O_4 bileşiklerinden oluştuğunu belirtmişlerdir. Bunlara ek olarak da kaplamanın korozyon direncinin temel olarak iç yoğun tabaka ile sağlandığını belirtmişlerdir.

Lee *et al.* (2012) yaptığı çalışmada, magnezyum oksit tabakası içine TiO_2 ve ZrO_2 parçacıklarını dahil ederek uyguladıkları Plazma elektrolitik oksidasyon (PEO) işleminde, oksit tabakası içinde ZrO_2 partiküllerin varlığını SEM görüntüleri ve XRD analiziyle teyit edilmişlerdir. Ancak, TiO_2 parçacıkları PEO sürecinde erimesi nedeniyle SEM görüntüleri ve XRD analizinde gözlemleyememişlerdir. Bu nedenle ark plazma sıcaklığı, TiO_2 erime sıcaklığı üstünde ve ZrO_2 erime sıcaklığı altında olduğunun varsayılabilceğini belirtmişler ve 2116-2643°K aralığında olduğu kanısına varmışlardır.

Hwang *et al.* (2012) yaptıkları çalışmada, MAO kullanılarak Mg alaşımı üzerinde 120 saniyede ve 2000 Hz ila 60 Hz arasında frekanslar kullanarak oluşturulan kaplamanın elektrokimyasal davranışlarını incelemişlerdir. Mevcut frekans arttıkça kaplama içeriğinde MgO bileşiğinin arttığını ve yoğun kaplama yapısı nedeniyle korozyon direncinin önemli ölçüde geliştirdiğini tespit etmişlerdir.

Hui-xia *et al.* (2012) yaptığı çalışmada, AZ91D üzerinde MAO kaplamayı silikat bazlı elektrolit içinde darbeli AC güç kaynağı kullanarak büyütmüşlerdir. AZ91D üzerindeki MAO kaplamanın elektrokimyasal korozyon davranışını ve anti-korozyonun özelliğini doğal olarak havalandırılan nötr NaCl çözeltilerinin farklı konsantrasyonlarda sistemik olarak incelenmiştir. MAO kaplamanın korozyon hasarı için; yüksek konsantre NaCl çözeltilerinde (%1,0, %3,5 ve %5,0) genel korozyona, seyreltilmiş NaCl çözeltisinde (%0,1 ve %0,5) çukur korozyona sebep olduğunu elektrokimyasal korozyon testleri kullanarak gözlemlemişlerdir. Ayrıca MAO kaplamanın bozulmasının yarı kararlı çukurların oluşumu ve çukurların büyümesi şeklinde oluştuğunu tespit etmişlerdir.

Lin-rong *et al.* (2011) yaptığı çalışmada, MAO kaplamayı alternatif bir kare dalga güç kaynağı kullanarak AZ91D alaşımı üzerinde büyütmüşlerdir. Görev döngüsünün uygulanan gerilim ile aynı etki eğiliminde olduğunu belirtmişlerdir. Görev döngüsü 0,1 olduğu zaman, kaplama pürüzsüz ve düzgün, ancak ince olduğunu, 0,9 olduğu zaman, kaplama çok büyük gözeneklere sahip ve pürüzlü olduğunu tespit etmişlerdir. Görev döngüsü, 0,4 veya 0,6 olduğunda kaplama morfolojileri birbirlerine benzer olduğunu ve 0,1 olandan daha pürüzsüz ve düzgün olduğunu belirtmişlerdir. Sonuçta; Görev döngüsü 0,4 'ten daha düşük olduğu zaman, anodik kaplamanın kalınlığı alaşımli magnezyum alt-tabakaya etkili koruma sağlamak için çok ince, görev döngüsü 0,4-0,6 arasında ise en ideal kaplamayı sağlamakta olduğunu tespit etmişlerdir.

Durdu *et al.* (2011) yaptığı çalışmada, ticari saf magnezyumu Na_2SiO_3 ve Na_3PO_4 içeren farklı çözeltilerde MAO yöntemi kullanılarak kaplama işlemine tabi tutmuşlardır. Mg_2SiO_4 ihtiva eden kaplama $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$ ihtiva eden kaplamadan korozyon direnci olarak daha dayanıklı olduğunu, ağırlıkça %3,5 NaCl sulu solüsyonu içinde yapılan

korozyon deneyleri ile tespit etmişlerdir. Fosfat çözeltisi içerisinde üretilen kaplamalar aynı akım yoğunluğunda silikat çözeltisinde üretilen kaplamalardan daha kalın olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca silikat çözeltisinde oluşan düşük elektrik akımı sayesinde, silikat çözeltisinde büyütülmüş kaplamanın fosfat çözeltisinde büyütülen kaplamaya göre daha küçük gözenekler ve daha az mikro çatlaklara sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Hussein *et al.* (2011) yaptığı çalışmada, AJ62 magnezyum alaşımı üzerinde MAO kaplamayı büyütmüşlerdir. Unipolar ve bipolar modlarda çalışmışlar ve kaplama esnasında anlık sıcaklık değerlerini tespit etmişlerdir. Pozitif ve negatif darbe sürelerinin sıcaklık etkilerini ve bu etkinin yüzey morfolojilerine yansımalarını incelemişlerdir. Güçlü deşarjların kontrolü veya azaltılması kaplama tabakasının kalitesi ve özelliklerine önemli etkileri olduğunu tespit etmişlerdir.

Yue and Hua (2010) yaptığı çalışmada, korozyon direnci üzerinde akım yoğunluğunun etkilerini incelemek için magnezyum alaşımları üzerinde MAO kaplamayı büyütmüşlerdir. Akım yoğunluğunun MAO kaplamaların korozyon direnci üzerinde güçlü bir etkisi olduğu sonucunu ortaya koymuşlardır.

Chen *et al.* (2010) yaptıkları çalışmada, AZ31 magnezyum alaşımını plazma elektrolitik oksidasyon yöntemi ile kaplamışlardır. Farklı oranlara sahip silikat içerikli (fosfat (PO_4^{3-}) ve florit (F^-) ilave edilmiş) elektrolitler kullanarak kaplama işlemini gerçekleştirmişlerdir. Silikat içerikli çözeltilerdeki kaplamanın temel bileşiklerinin Mg_2SiO_4 ve MgO olduğunu tespit edilmişlerdir. Fakat Na_3PO_4 ve NaF eklenmesinin $Mg_3(PO_4)_2$ ve MgF_2 oluşmasına neden olduğunu gözlemlemişlerdir. MgF_2 yoğun mikro yapıya sahip olduğundan dolayı F-filmin, diğer kaplama filmlerine göre en iyi korozyon direncine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, her ne kadar kalınlığı daha az olsa da Si-filmin, geçirgen ve gevşek P-film'den daha iyi korozyon direncine sahip olduğu sonucuna varmışlardır.

Tang *et al.* (2010) yaptığı çalışmada, AZ31B üzerinde bipolar darbe akımı kullanarak 600 Hz frekansta MAO kaplamayı büyütmişlerdir. Görev döngüsünü %10 ile %40 arasında değiştirmişlerdir. Görev döngüsünün artması gözenekliliği arttırdığını ve gözenek çapını küçülttüğünü ayrıca kaplama kalınlığına etki ettiğini tespit etmişlerdir.

Bai and Chen (2009) yaptığı çalışmada, AZ91D alaşımı üzerine MAO ile oksit kaplama yöntemini, 3 farklı elektrolit çözeltisinde, heksametilentetramin ve sodyum borat katkı maddeleri kullanarak alçak gerilimle uygulamıştır. Alkali fosfat elektrolitte oluşturulan P-film, alkali silikat elektrolitte oluşturulan Si-film ve alkali silikat fosfat elektrolitte oluşturulan Si-P-film üzerinde incelemeler yapmışlardır. Alkali silikat fosfat elektrolitin, uygulanan gerilimi zayıflattığını ve oksit kaplamayı iyileştirdiğini kaplamanın daha iyi anti korozyon etkisi gösterdiğini tespit etmişlerdir. Alkalın fosfat elektrolitin alkali silikat fosfat elektrolit ile değiştirilmesi daha düşük kırılma gerilimi (break down) oluşturduğunu bunun sonucu olarak küçük gözenekli ve daha az çatlaklı oksit kaplamalar oluştuğunu belirtmişlerdir. Heksametilentetraminin oksit kaplamada gözenek boyutunu azaltan ve çatlakların giderilmesini sağlayan yararlı bir katkı maddesi olduğunu keşfetmişlerdir. Başka bir katkı maddesi olan sodyum boratın, AZ91D üzerindeki oksit kaplama bileşiminin Na içeriğini değiştirdiğini belirtmişlerdir. Ancak oksit kaplama morfolojisi ve pürüzlülük değerini etkilememiş fakat anti korozyon özelliğinin gözeneklerdeki Na içeriğinin artışı ile arttığını belirtmiştir. Ayrıca alkali silikat fosfat elektrolit içinde iki katkı maddesinin kullanımı, daha az çatlak, düşük gözeneklilik, küçük gözenekler ve böylece daha iyi anti-korozyon yeteneğine sahip bir oksit kaplama ile sonuçlandığını bulmuşlardır.

Wei-ling *et al.* (2008) yaptıkları çalışmada, AZ91D magnezyum alaşımını MAO yöntemi kullanarak silikat elektrolit içinde büyütüştür. MAO kaplamaların gerilim artış oranının kaplamanın aşınma direnci ve korozyon direncine etkisini araştırmışlardır. Artan gerilim oranının MAO kaplamanın kalınlığını ve bağ kuvvetini önce arttırabileceğini, sonra azaltabileceğini tespit etmişlerdir.

Duan *et al.* (2006) yaptığı çalışmada, MAO filmin gözeneklerini kapatmak için etkili bir sızdırmazlık yöntemi olan kompozit kaplama işlemini MAO kaplamalı magnezyum alaşımı üzerinde geliştirmeyi amaçlamışlardır. Kompozit kaplamayı organik bir sızdırmazlık tabakası ve çoklu daldırma tekniği kullanarak düşük basınç altında MAO kaplama üzerinde uygulamışlardır. MAO filmiyle bütünleşmiş sızdırmazlık tabakası sadece yüzeyi kaplamadığını, aynı zamanda MAO filmin doğası gereği oluşan gözeneklerin ve mikro çatlakların içine nüfuz etmiş olduğunu tespit etmişlerdir. Uygun kalınlıkta sızdırmazlık tabakası ile mikro kusurların ortadan kaldırılabileceği ve MAO filmin sağlam seramik benzeri özelliklerini koruyacağı kanısına varmışlardır.

Guo and An (2005) yaptıkları çalışmada, sodyum alüminat ve potasyum florür içeren elektrolitlerde AZ91D magnezyum alaşımlarını MAO yöntemi ile sabit akım yoğunlukları uygulanarak kaplamışlardır. Uygulanan akım yoğunluklarının, konsantrasyonun, elektrolit bileşenlerinin ve MAO işlem süresinin etkisini sırasıyla araştırmışlardır. Kırılma gerilimi, plazma oluşma süresi, elektrolit konsantrasyonu ve çözelti bileşenlerinin uygulanan akım yoğunluğuna bağımlı olduğunu, uygulanan akım yoğunluğunun artması plazma oluşma süresi azalması ile sonuçlanırken kırılma gerilimi üzerinde hiçbir etkisi olmadığını gözlemlemişlerdir. Gözenek çapı MAO işlem süresinin uzatılmasıyla artarken gözenek sayısının azalmakta olduğunu tespit etmişlerdir. İşlem süresinin 10 ila 40 dk arasında değiştirilmesi seramik kaplamaların faz yapısında belirgin bir fark ortaya çıkardığını, oluşan seramik kaplamaların Cl içeren ortam için etkili korozyon koruyucu özellik sağladığını gözlemlemişlerdir.

Bu tez çalışmasında ise farklı pozitif darbe süresi (pozitive duty time) değerlerinde Mg alaşımları MAO yöntemiyle kaplanmıştır. Literatürde Mg alaşımı üzerine MAO kaplama işlemine ait sınırlı sayıda çalışma olması bu tez konusunun gerçekleştirilmesi adına büyük bir önem arz etmiştir. Çalışma sonunda darbe süresinin (duty time) ve işlem süresinin kaplama üzerindeki etkileri ve bunun %3,5 NaCl çözeltisi içerisinde korozyon davranışına yansımaları incelenmiştir. Sonuçlar; darbe süresinin kaplama kalınlığına, kaplama mikro yapısına, gözeneklere ve mikro çatlaklara oldukça etki ettiğini göstermiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Magnezyum Malzemeler

Magnezyum (Mg), gümüş beyazlığında parlak bir metaldir. Genellikle başka metallerle karıştırılarak alaşım elementi olarak kullanılmaktadır. Kimyasal simgesi *Mg* ve atom numarası 12'dir. En hafif metallerden biri olması sebebiyle önem kazanmıştır. Aktif metal olması nedeniyle toz halindeki magnezyum oksijenle tepkimeye girerek kolayca tutuşabilmekte ve parlak bir alevle yanabilmektedir.

1755 yılında İngiltere'de Joseph Black tarafından keşfedilmiştir. 1808 yılında Humphrey Davey tarafından saf olarak izole edilmiştir. Yerkabuğunun %2,7'sinde ve okyanusların %0,13'ünde bulunur. Periyodik Tabloda 2A grubunda bulunan toprak alkali metaldir. Magnezyumun özellikleri aşağıda verilmiştir (Kuşdemir 2008).

- ❖ Atom numarası: 12
- ❖ Atom ağırlığı: 24,312 g/mol
- ❖ İyon değeri: +2
- ❖ Yoğunluk: 1,738 g/cm³
- ❖ Ergime noktası: 650°C
- ❖ Kaynama noktası: 1090°C
- ❖ Kaynama ısısı: 32,517 kcal/atomgram
- ❖ Isıl iletkenliği: 156 W/(m·K)
- ❖ Kristal yapısı: Hexagonal sıkı paket
- ❖ Elektron dizilimi: 3s²
- ❖ Çekme dayanımı: 80-180 Mpa
- ❖ Young modülü: 45 Gpa
- ❖ Özgül ısısı: 0,25 cal/gr°C
- ❖ Atom hacmi: 14,0 (atom ağırlığı/yoğunluk)
- ❖ Elektrik iletkenliği: 22,4 m/(Ω mm²) (oda sıcaklığı)

Yoğunluğu $1,738 \text{ g/cm}^3$ olan magnezyum mühendislik metallerinin en hafifidir. Alüminyumla kıyaslandığında yoğunluğu %35 daha hafif olmakla beraber daha düşük sıcaklıklarda eriyebilmektedir. Alüminyum kadar yüksek dayanıma sahip değildir. Ancak özgül dayanım (dayanım/ağırlık) oranı alüminyumdan daha yüksektir. Bu sebeple hafifliğin önemli olduğu durumlarda özellikle havacılık sanayisi, otomotiv sanayisi ve el aletlerinde kullanım alanı bulmaktadır (Kandemir ve Can 2003).



Şekil 2.1. Kare kesitli magnezyum örnekleri

Magnezyumun ve alaşımları alüminyuma göre pahalıdır, ergimiş halde havayla temas ettiği zaman yandığı için döküm esnasında örtü eritkeni kullanılması gerekmektedir. Sıkı düzen hekzagonal kristal yapıya sahiptir. Üç kayma düzlemi vardır ve oda sıcaklığında şekil değiştirmesi zordur. Soğuk şekil vermedeki zorluk nedeniyle kullanılan magnezyum alaşımlarının çoğu dökümle elde edilebilmektedir (Smith 2001). Saf olarak kullanıldığında dayanımı düşük ve soğuk şekil değiştirme kabiliyetinin az olması saf olarak kullanımını kısıtlamıştır, alaşımlarıyla daha çok kullanılmaktadır. Magnezyumun için en çok kullanılan alaşım elementleri, alüminyum ve çinkodur. Bu elementlerin magnezyum içindeki çözünebilirliği sıcaklıkla doğru orantılı olarak artar ve böylece çökeltme sertleştirme işlemine tabi tutulabilir (Kandemir ve Can 2003). Bu sertleşme ile $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ çökeltisi oluşturmaktadır. Ayrıca magnezyum için çökelti oluşturabilen toryum ve zirkonyum alaşımları 470°C 'ye kadar yüksek sıcaklıklarda magnezyumların kullanımını sağlamaktadır (Smith 2001).

Sürünme direnci ve korozyon direnci magnezyum için kısıtlayıcı sebeplerdendir. Sürünme direnci, korozyon direnci ve soğuk şekil değiştirme kabiliyetini geliştirebilmek ve yeni şekillendirme teknikleri uygulayabilmek için magnezyum ve alaşımları üzerinde çalışmalara hız verilmiştir. Yapılan çalışmalarda ve araştırmalarda maliyetler ön planda tutulmaktadır. En yaygın kullanılan ve geliştirmek için üzerinde çalışılan alaşım Mg-Zn-Al üçlü alaşım gurubudur. Bu grup içerisinde de en yaygın olarak kullanılan alaşım AZ91'dir (Öztürk ve Kaçar 2012).

Magnezyum ve alaşımlarının hafifliği mühendislik uygulamalarında kullanımının en önemli sebebidir. Hafiflik enerji tasarrufu ve yakıt tüketimi açısından önemli bir etkidir. Günümüz teknolojileri verimliliği artırmak için enerji tasarrufu ve yakıt tüketimini önemsemektedir. Diğer ağır metaller yerine magnezyum ve alaşımları kullanabilmek verimliliği artırabilecek bir etkidir. Ayrıca kara ve demir yolu taşımacılığında CO₂ yayılımının azalmasıyla çevre kirlenmesinin azaltılması istenmektedir. Ağırlık azaltılması CO₂ yayılımını azaltacağı için çevreyi korumanın etkili yollarından biridir. Bu sebeple Avrupa ve Kuzey Amerika otomobil üreticileri 2010 yılın itibariyle yakıt tüketimini %25 azaltmayı amaçlamış ve yayınımda %30'luk bir azalmayı hedeflemişlerdir (Kandemir ve Can 2003).

Magnezyum ve magnezyum alaşımlarının avantajları özetlenecek olursa;

- ❖ Metalik yapısal malzemelerin tümünden daha az yoğunluktadır,
- ❖ Yüksek özgül (spesifik) dayanıma sahiptir,
- ❖ İyi dökülebilirlik, yüksek basınçlı kalıp döküme uygundur,
- ❖ Yüksek hızlarda torna ve freze ile işlenebilir
- ❖ Kontrol altındaki atmosferde iyi kaynak edilebilir,
- ❖ Korozyon direnci iyileştirilebilir,
- ❖ Kolay üretilebilir,
- ❖ Polimer malzemelerle karşılaştırıldığında daha iyi mekanik özelliklere sahiptir,
- ❖ Zamanla gevrekleşme özelliği daha düşüktür,
- ❖ Daha iyi elektriksel ve ısı iletkenlik özelliği,

- ❖ Geri kazanımlıdır (Kandemir ve Can 2003).

Magnezyumun sahip olduğu dezavantajlarını özetlenecek olursak;

- ❖ Elastisite modülü düşüktür,
- ❖ Soğuk şekillendirilebilirlik ve tokluğu sınırlıdır,
- ❖ Yüksek sıcaklıklarda dayanım ve sürünme direnci sınırlıdır,
- ❖ Katılma esnasında yüksek miktarda çekme olur,
- ❖ Yüksek kimyasal aktiviteye sahiptir,
- ❖ Bazı uygulamalarda korozyon direnci sınırlıdır (Kandemir ve Can 2003).

Magnezyum ve magnezyum alaşımlarının sınıflandırılması; Genellikle iki büyük harfi izleyen iki haneli rakamlarla ile kodlanmaktadır. Harfler iki ana alaşım elementine karşılık gelir. Birinci harf en yüksek yüzdeye sahip alaşım elementini, ikinci harf ise ondan sonra gelen en yüksek yüzdeye sahip diğer alaşım elementini simgelemektedir. Sonrasında gelen rakamlar sırasıyla alaşım elementlerinin en yakın tamsayıya yuvarlanmış yüzdelerini belirtmektedir.

Çizelge 2.1. Magnezyuma katılan alaşım elementleri ve kısaltmaları

Harf	A	B	C	D	E	H	J	K	L	M	Q	S	W	X	Z
Element	Al	Bi	Cu	Cd	RE	Tr	Sr	Zr	Li	Mn	Ag	Si	Yi	Ca	Zn

Örneğin; AZ31B magnezyum alaşımında ağırlıkça %3 alüminyum ve ağırlıkça %1 çinko içerdiğini gösterir.

(Smith 2001; Öztürk ve Kaçar 2012).

Çizelge 2.2. Mg alaşımlarının standartları ve bileşimleri (ASTM B 93/B 93M ve ASTM B94)

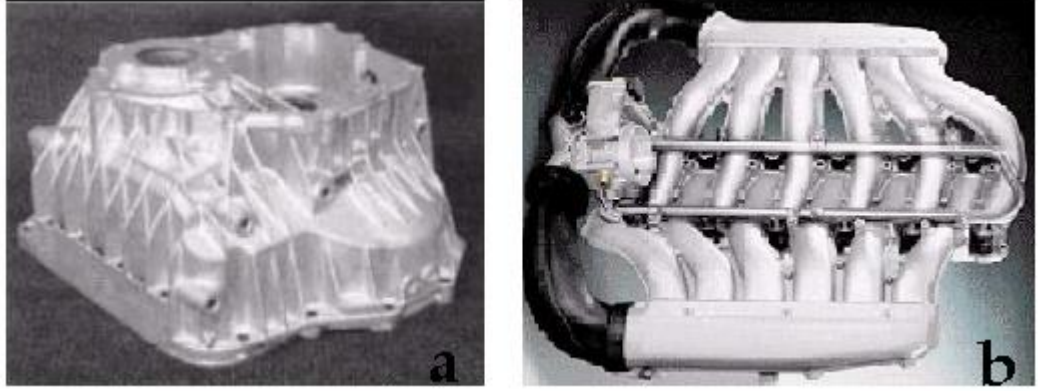
Alaşım Elementi	Mg Alaşımları								
	AM50	AM60	AS21	AS41	AZ31	AZ80	AZ91	ZE10	ZK60
Al	4,5-5,3	5,6-6,4	1,9-2,5	3,7-4,8	2,5-3,5	7,8-9,2	8,5-9,5	0,05	0,05
Zn	0,20	0,20	0,15-	0,10	0,7-1,3	0,2-0,8	0,45-	1,0-1,5	4,8-6,2
Mn	0,28-	0,26-	0,20	0,35-	0,20	0,15-	0,17-	0,1	0,1
Si (max)	0,05	0,05	0,70-	0,60-	0,05	0,10	0,05	0,05	0,05
Fe (max)	0,004	0,004	0,004	0,0035	0,005	0,05	0,004	0,03	0,03
Cu	0,008	0,008	0,008	0,015	0,05	0,05	0,025	0,025	0,05
Ni (max)	0,001	0,001	0,001	0,001	0,005	0,005	0,001	0,005	0,005
Be	-	-	-	-	-	0,002	-	0,002	0,002
Ce	-	-	-	-	-	-	-	0,12-	-
Zr	-	-	-	-	-	-	-	-	0,3-0,9
Diğer	0,01	0,01	0,01	0,01	-	-	0,01	-	-
Mg	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan

Magnezyum ve magnezyum alaşımlarının kullanım alanları; Magnezyum ve alaşımları bazı üstün özellikleri sayesinde endüstride, sanayide, havacılıkta vb. alanlarda kullanılmaktadır.

Havacılık sanayinde kullanılan metallerde aranan en önemli özellikler; metalin hafif, dayanıklı, şok-titreşim ve korozyona karşı dirençli olmasıdır. Özellikle hafiflik havacılık sektörü için önemli özelliktir. Hafifliğin sağlanabilmesi için düşük yoğunluklu malzeme seçimine dikkat edilmektedir. Magnezyum mühendislik malzemeleri içinde en hafif metal olması ve spesifik mukavemetinin yüksek olması havacılık sektörü için onu cazip kılmaktadır. Ancak hafifliğin yanında bazı kötü özellikleri onun kullanımını kısıtlar. Özellikle saf olarak kullanıldığında düşük mukavemete sahip olmaları istenilen şartları sağlamamaktadır. Günümüzde magnezyum ve alaşımları havacılıkta kullanımını arttırmak için çalışmalar yapılmaktadır ve yük binmeyen parçalarda, hidrolik depolar, yakıt depoları vs. kullanılmaktadır (Öztürk ve Kaçar 2012).

Otomobil üreticileri de üstün ve tercih edilebilir özelliklerinden dolayı magnezyum alaşımlarını ürünlerinde kullanmaya başlamışlardır. Günümüzde yakıt tasarrufuna verilen önem düşük yoğunluklu malzemelerin kullanımını arttırmıştır. Magnezyum üzerindeki çalışmaların artması otomotivde kullanılan bazı parçaların magnezyum ve

alaşımaları ile ikamesine imkân verebilmektedir. Ayrıca çevre kirliliğini önlemek amacıyla CO₂ yayılımının azaltılması istenmektedir. Bunu yapabilmenin en iyi yöntemlerinden biriside araçlardaki ağırlığın azaltılmasıdır (Öztürk ve Kaçar 2012).



Şekil 2.2. Mg alaşımdan yapılmış a) dişli kutusu, b) 12 silindirli bir motorun basınçlı kalıp dökümle imal edilmiş emme manifoldu (Kandemir ve Can 2003).

Magnezyum metal olarak kullanımının yanında kolaylıkla tutuşabilen bir malzeme olması sebebiyle savunma sanayisinde mühimmatlarda, radar donanımlarında, portatif yer donanımlarında alevlendirme amaçlı kullanılmaktadır. Ayrıca Mg yandığında beyaz ışık ve yoğun ısı ortaya çıkarmasından dolayı tehlike işareti ve aydınlatma amaçlı kullanılmaktadır (Öztürk ve Kaçar 2012).

2.2. Mikro Ark Oksidasyon (MAO) Yöntemi

Mikro ark oksidasyon (MAO) alanında yapılan çalışmaların başlangıç noktası, 19 yüzyılın sonunda Rus bilim adamı Sluginov'un elektrolit esnasında kıvılcım görmesi olmuştur. Sluginov yaptığı çalışmalarla ilk olarak alüminyum üzerinde anodik oksit tabakası oluşturmuş ve bu olayı anodizasyon olarak adlandırmıştır. Bu işlem alüminyum ve alaşımlarının yüzeylerinin iyileştirmesinde kullanılacak kaplama teknolojileri için başlangıç olmuştur (Polat 2009).

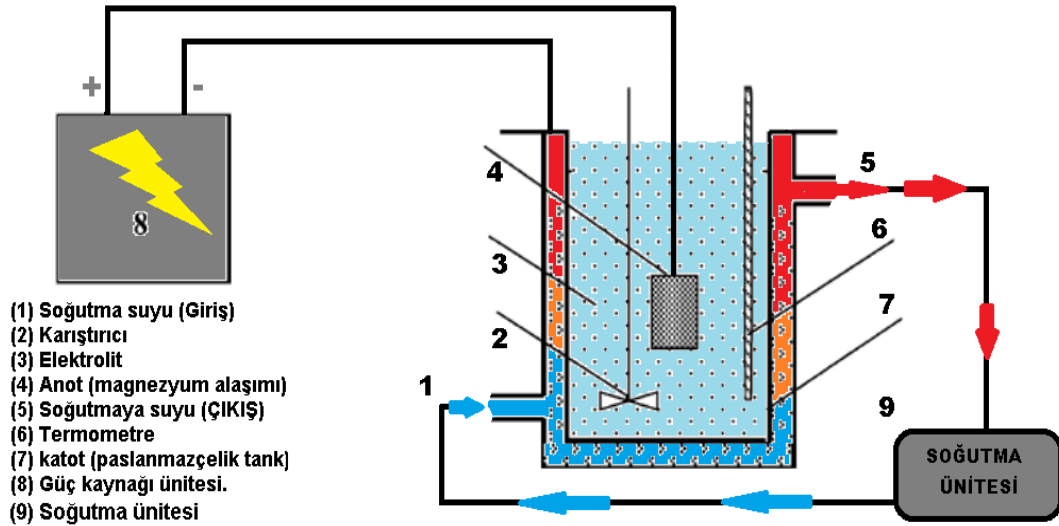
İkinci olarak Alman araştırmacıları Günterschultze ve Betz 1930 yılında bu alanda araştırmalar yapmıştır (Polat 2009). McNeill ve Gruss 1960'larda yapmış olduğu çalışmalarda esas pratik faydayı keşfetmiştir (Altay 2012). Sovyetler birliğinde 45 yıl önce MAO üzerinde akademik çalışmalar yapılmış ve sonraki yıllarda bazı deniz altı parçalarının üretiminde kullanılmıştır. Rusya ve Almanya'dan sonra 1970'li yıllarda Amerika'da, 1980'lerin sonunda ise dünyada yaygınlaşan mikro ark günümüzde halen araştırma konusudur (akıcı 2009; Altay 2012).

Son yıllarda Mg, Al, Ti, Zr gibi hafif metallerin otomotiv, havacılık, savunma sanayi gibi endüstriyel alanlarda kullanımının artması bu metaller üzerine ilgiyi artırmaktadır. Bu metallerin kullanımlarının artıran etkenler hafiflik, özgül dayanım, iyi dökülebilir olmaları, çok iyi mekanik özelliklere sahip olmaları, kolay işlenebilir ve geri dönüştürülebilir olmalarıdır. Ancak hafif metaller aşınma ve korozyon etkilerinde dolayı kullanıldıkları alanlarda istenilen servis ömürlerini verememektedir. Bu metallerin servis ömürleri bir takım yüzey modifikasyonları kullanılarak artırılmak istenmektedir (Malayoğlu vd 2008). Yüzey modifikasyonları arasında anodik oksidasyon çok popüler yöntemlerden biridir. MAO ise anodik oksidasyona dayalı kaplama yöntemidir (Duan *et al.* 2006). Bu yöntem yüksek gerilim altında, sulu çözelti içinde plazma deşarjı ile hafif metallerin yüzeyinde kalın oksit kaplama oluşturmak için kullanılan, nispeten yeni ve gelecek vaat eden yüzey kaplama yöntemidir (Yue and Hua 2010). Son zamanlarda, Ti, Al, Mg ve Nb gibi birçok metalin, yüzey modifikasyonu için kullanılmaktadır. MAO işlemi genel anodizasyon yöntemleri ile karşılaştırıldığında kaplama sonrasında aşınma direnci, korozyon direnci ve kaplama ile taban malzeme arasındaki yapışma özelliği gibi metallerin yüzey özelliklerini oldukça artırılabilir (Duan *et al.* 2006). Ayrıca kullanılan elektrolitlerin çevreye zararsız elektrolitler olması sebebiyle evre dostu bir yöntemdir (Altay 2012).

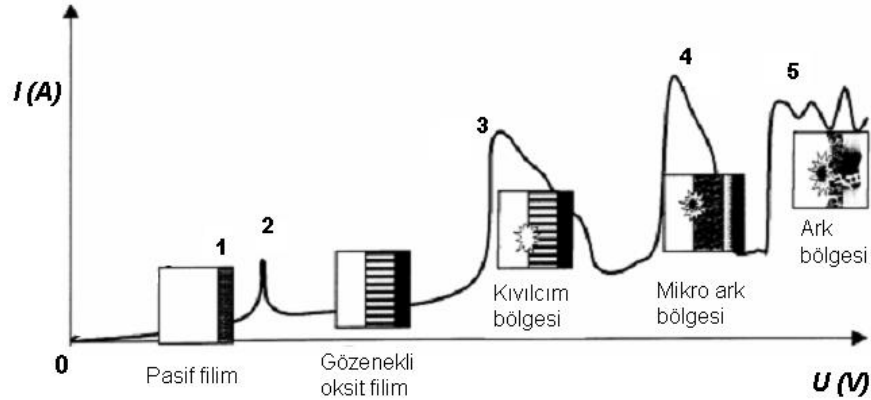
Mikro ark oksidasyon işlemi kıvılcımlı anodik oksidasyon (spark anodizing), anodik kıvılcımlı biriktirme (anodic spark deposition), mikro ark anodik oksidasyon (micro arc anodizing, "MAO"), mikro plazma anodik oksidasyon (micro plasma anodizing), mikro plazma oksidasyon (mikro plazma oxidation), plazma elektrolitik oksidasyon (plasma

electrolytic oxidation, “PEO”) ve elektro plazma oksidasyon (elektro plazma oxidation) olarak da adlandırılmaktadır (Çakıcı 2009).

MAO Prosesi; Temel olarak güç kaynağı, elektrolit, soğutma sistemi, paslanmaz çelik tank ve karıştırıcıdan oluşmaktadır. Genel olarak bazik karakterli elektrolit kullanılır. Kaplanması istenilen metal elektrolit içine yerleştirilir ve güç kaynağına anot olarak bağlanır. Elektrolit çift cidarlı paslanmaz çelikten imal edilmiş tankın içinde bulunur. Paslanmaz çelik tankın cidarları devreyi tamamlamak için güç kaynağına katot olarak bağlanır. Anot ve katot arası voltaj yada akım uygulanması numune üzerinde oksit oluşumunu başlatır. Oksit oluşurken uygulanan voltaj kritik bir değeri aştığında numune yüzeyinde arklar oluşur. Karıştırıcı sulu çözelti içerisinde homojenliği sağlamaktadır. Soğutma sistemi çözelti içinde ark oluşumu sırasında çözeltinin sıcaklığını uygun sıcaklıkta tutar ve sabitler. Bu işlemi çift cidarlı tank içerisinde soğutma suyunu dolaştırarak yapar. MAO yöntemi için kullanılan güç kaynakları; Doğru akım, titreşimli doğru akım, dengelenmiş alternatif akım ve heteropolar titreşimli akım tiplerinde değişik güç kaynaklarıdır. MAO işleminde kullanılan donanımın şematik gösterimi Şekil 2.2’de gösterilmiştir (Malayoğlu vd 2008; Özkara ve Baydoğan 2009).

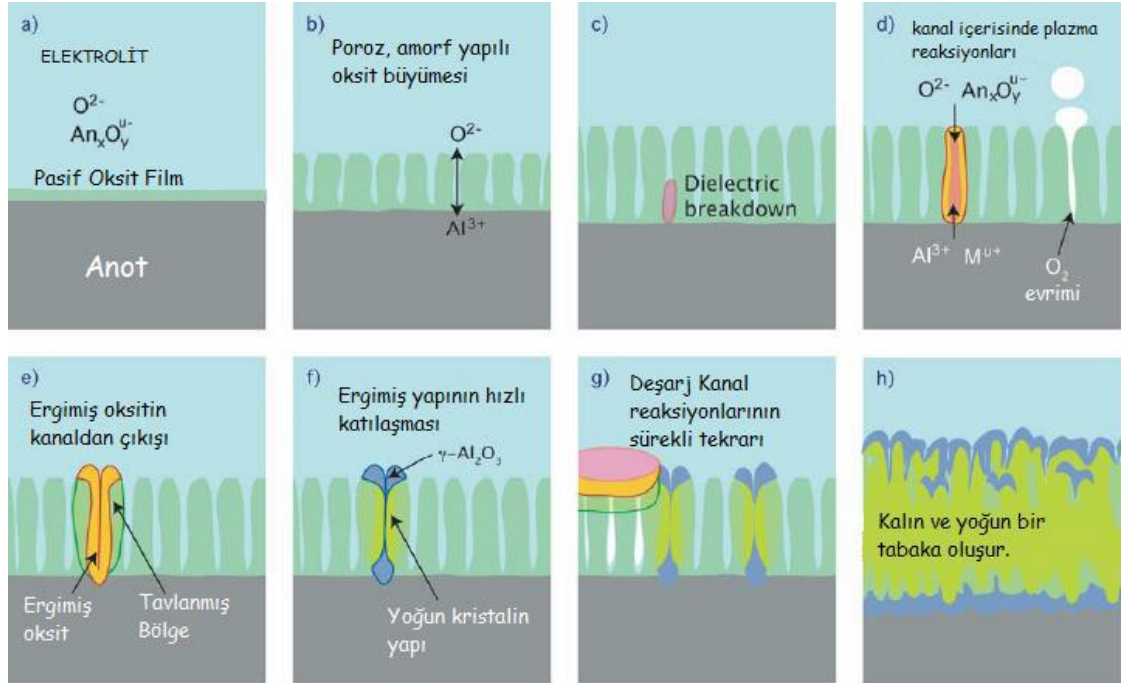


Şekil 2.3. MAO sistem ünitesinin şematik gösterimi



Şekil 2.4. Plazma elektrolizi için akım-voltaj diyagramı (Polat 2009)

Numuneye elektrolit içerisinde düşük potansiyel uygulandığı zaman malzemeler valf metal olduğu için pasif hale gelerek metal üzerinde yalıtkan bir film oluşur. Oluşan bu film pratikte malzemenin korozyon potansiyeline denk gelir. Potansiyel arttıkça yalıtkan film üzerinde yüksek gerilimden dolayı tahliye kanalları oluşur (Şekil 2.4 0-2 noktası). Potansiyel daha arttıkça tekrar pasifleşme oluşur (2-3 noktası). Yüzeyde oluşan yalıtkan film gerilimin yükselmesi ile kritik bir gerilim olan bozunma gerilimini (dielectric breakdown) aşar ve mikro ark oluşarak film bozunur (4 noktası). Dielektrik stabilitenin kaybı ile film yüzeyinde kıvılcımlar oluşur (5 noktası). Zaman zaman güçlü arklar kaplamanın zarar görmesine neden olabileceğinden güçlü ark tespit edildiğinde proses sonlandırılır. Bu kıvılcımlar elektronların çarpışmasından dolayı 800 ile 10000°K arasında değişen bir sıcaklık oluşturur. Anyonlu bileşikler, elektrik alanının varlığı nedeniyle elektrolit içine yayılır. Aynı zamanda, erimiş magnezyum yüksek sıcaklık nedeniyle boşaltma kanalı içine girer ve yüzeyde plazma kanalı oluşur. Sonra plazma kanallarında basınç artar ve plazma kanalları basıncı dengelemek için uzar. Bu bölgede altlık malzeme kanallar içerisinde oksitlenir. Elektrolitten gelen iyonlarda kanallar içine girerek oksit tabakasını modifiye eder. Son olarak tahliye kanalları kanal duvarları yüzeyindeki elektrolit tarafından soğutulur. Bu sürecin devamı oksit tabakanın kalınlığının artmasında etkilidir. Şekil 2.5’de alüminyum altlık malzemesi için MAO prosesi oksit tabakanın oluşumu verilmiştir (Çakıcı 2009; Polat 2009; Yue and Hua 2010; Durdu *et al.* 2011).

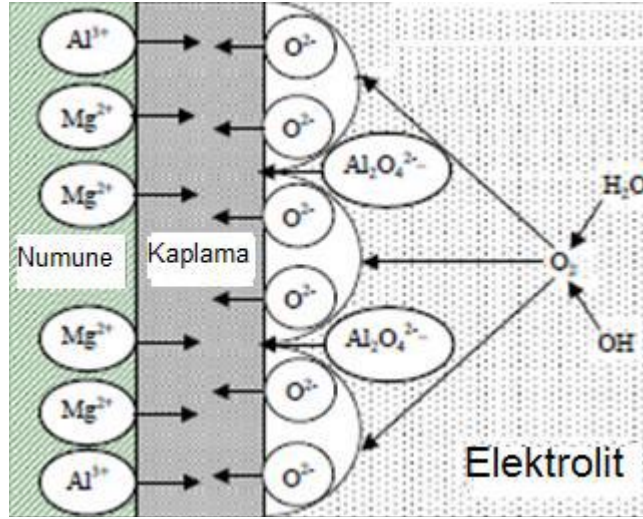


Şekil 2.5. Alüminyum için MAO prosesinde oksit tabakası oluşumu (Çakıcı 2009)

MAO işleminde oluşan deşarjlar malzeme yüzeyinde kimyasal tepkimeler oluştururken ani sıcaklık, basınç artışları ve buhar gaz kabarcıklarının patlaması nedeniyle çukurcukları da oluşturur. Çukurcuklar mikro gözeneklerdir ve oluşumu MAO işleminin doğası gereğidir (Polat 2009). MAO sürecinde erimiş oksit ve gaz kabarcıklarının dışarı atılması nedeniyle oluşan mikro gözeneklerin büyüklüğü ve elektrolit içerisinde erimiş oksidin hızlı katılaşması nedeniyle oluşan termal stresin sonucu olarak mikro çatlakların ortaya çıkması, kaplama kalitesini önemli ölçüde etkiler. Erimiş oksit içerisinde farklı boyutta gözenekler ve bileşenler rastgele filmde dağıtılmış, sıcaklık nedeniyle kompakt birbirine yapışmış haldedir (Duan *et al.* 2006; Hui-xia *et al.* 2012).

Oluşan gözeneklerin büyüklüğü ve termal stres sonucu oluşan mikro çatlakların varlığı MAO kaplamanın kalitesini belirleyen en önemli etmenlerdir. Bu nedenle, kaplama morfolojisi ve yapısı oksitleme işlemine oldukça bağlıdır. Oksitleme işlemi, elektrolit bileşimleri, elektrolit, sıcaklık, muamele süresi, gerilim, anodik akım yoğunluğu vb. parametreler tarafından kontrol edilebilir (Yue and Hua 2010).

Karmaşık işlemlerden oluşan MAO'nun dış etkenleri; elektrolit içeriği, elektrolit sıcaklığı ve konsantrasyonu, MAO modu (frekans, duty time, voltaj, akım yoğunluğu, işlem zamanı vb.) gibi parametreler, iç etmenleri ise alaşım kompozisyonu ve yapısı, alaşımın ısıl işlemi, yüzey pürüzlülüğü, yüzey gözenekliliği gibi parametrelerdir. Faz oluşumları ve yapı dönüşümleri termal etkinin bir sonucudur. Bu termal etki ve elektrolit içeriği kimyasal reaksiyonları, kristal yapıları belirlemektedir. Anlaşılacağı üzere MAO işlemi birçok parametrenin etkilerine bağlı komplike bir olaydır (Polat 2009).

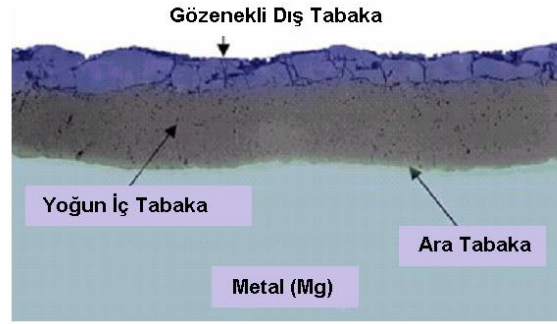


Şekil 2.6. Elektrolit ve altlık iyonlarının hareketinin şematik gösterimi (Altay 2012)

Şekil 2.6'da görüldüğü gibi numuneden gelen Mg²⁺ ve Al³⁺ iyonları, elektrolitten gelen O²⁻ ve Al₂O₄²⁻ gibi iyonlarla birleşmesi sonucu kaplamayı oluşturmuşlardır (Altay 2012).

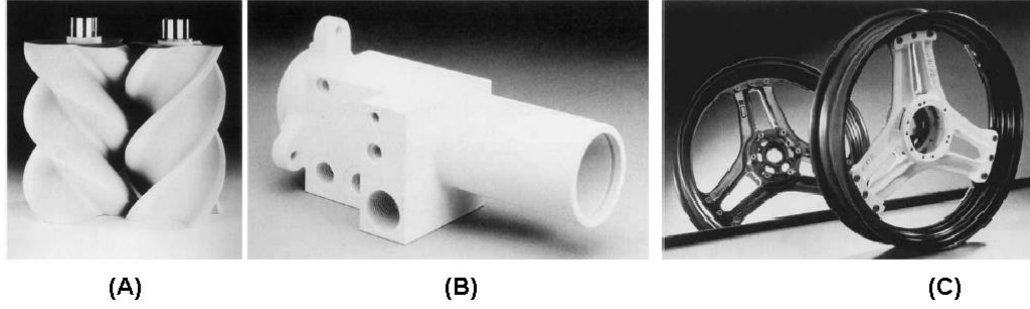
MAO yöntemi ile üretilen metallerin yüzeyinde kalın, sert, yoğun, koruyucu ve taban malzeme ile güçlü bağlar oluşturan seramik kaplamalar genellikle Şekil 2.7'de görüldüğü gibi; gözenekli dış tabaka ve yoğun iç tabaka olarak adlandırılan iki farklı bölgeden oluşur. Bazen yoğun iç tabakanın altında ara tabakada oluşur. Metal ile kaplama arasındaki oluşan ara tabaka gözenekliliğin olmadığı bir tabakadır. Gözenekli dış tabaka düşük sıcaklıkta oluşmuş fazları ve amorf yapıları içerir. Yoğun iç tabaka

yüksek sıcaklıkta oluşmuş değişimleri kapsar, taban malzeme bileşimleri elektrolit içeriği işlem parametreleri bu tabakayı daha çok etkiler. Yoğun iç tabaka korozyon direncini dış tabakaya göre daha fazla etkilerken bu bölgenin yoğunluğu korozyon direncini arttırır. Dış ve iç tabaka birlikte anti korozyon özellik sergilerler (Polat 2009; Altay 2012).



Şekil 2.7. MAO yöntemiyle oluşturulan kaplamanın şematik gösterimi (Polat 2009)

Uygulama Alanları; Otomotiv endüstrisinde piston, silindir bloklarında, kayıcı yataklarda, silindir gömleğinde, yakıt pompasında, şanzıman kutusunda, süspansiyon elemanlarında, motor bloğu şaft mil vb. parçalarda, uzay endüstrisinde; uzay mekiği, dişliler, yapı elemanları, yataklar vb. parçalarda, tekstil endüstrisinde; dişli dokuma tezgâhları, iplik kılavuzu, sürgüler, bükme makineleri vb. parçalarda, denizcilikte; pervane, çıkırık vinçleri, zincir ve gemi bölmeleri bağlama elemanları parçalarında, mutfak elemanları; tavalarda, kulplu tencereler, bıçak bileyicileri vb. parçalarda, tıp alanında; kemik protezleri, turbo moleküler pompalar vb. parçalarda, yağ gaz ve kimya endüstrisinde; supap, pompa, hidrolik ve pinomatik sistemlerin parçalarda, hava ve savunma sanayisinde; uçak ve helikopter parçalarında kullanım alanı bulmakta ve üzerine yapılan çalışmalarla bu alanlar genişlemektedir (Çakıcı 2009).



Şekil 2.8. MAO kaplı AM50 Mg alaşımından üretilmiş (A) kompresör rotorları (B) hidrolik silindir (C) MAO kaplı AZ91 Mg Alaşımından üretilmiş motor bisiklet jantı (Malayoğlu vd 2008)

Proses Avantajları ve Dezavantajlar; MAO teknolojisinde işleme başlamadan önce ön hazırlık daha az önemlidir. Bu sayede MAO işlemi daha kolay daha hızlı şekilde yapılabilmektedir. Ayrıca işlem öncesi hazırlık için kullanılacak çözeltilerin çevreye etkilerini en aza indirme imkânı vardır. Diğer avantajlar aşağıda verilmiştir.

- Alüminyum, magnezyum, titanyum, niyobyum, zirkonyum gibi hafif metallere uygulanabilmesi MAO'nun bir diğer avantajıdır.
- MAO da kullanılan elektrolitler çevreye zararsız olmakla kolay hazırlanabilen ve insan sağlığını tehdit etmeyen ucuz karışımlardır.
- Zehirli gazlar, tehlikeli atıkların olmaması MAO'nun çevre dostu olmasını sağlar.
- MAO tekniği ekonomiktir ve genellikle bazik elektrolitler kullanılması asitler ve asidik malzemelerin zararlarını ortadan kaldırır.
- MAO teknolojisinin sayesinde yüzeyleri yüksek sertliğe sahip Mg, Al vb. hafif alaşımlar üretilebilir. Bu alaşımların korozyon ve aşınma dirençleri oldukça iyileştirilebilir. Bu sayede çeşitli uygulama alanlarında ağır metallerin ikamesine olanak sağlar.
- MAO prosesini karmaşık yüzeylere sahip malzemelerin her yüzeyinde homojen ve aynı kalınlığa sahip sert seramik kaplamalar elde edebilir (Gözüaçık 2012).

MAO işleminin bazı sınırlamaları, olumsuzlukları ve dezavantajları bulunmaktadır. Bunlar kısaca şöyledir;

- MAO parametrelere göre 1000 V ve 1 MW değerine kadar enerji sağlayabilecek bir güç kaynağına ihtiyaç duyar. Bu yüksek enerji, parça türü ve boyutuna bağlı olarak tehlike oluşturmaktadır.
- Sistemde oluşan yüksek sıcaklık nedeniyle elektrolitin ısınmasını engelleyen yüksek soğutma kapasiteli bir soğutucuya ihtiyaç vardır.
- Kullanılan enerji göz önüne alındığında maliyet diğer anodik oksidasyon yöntemlerine göre daha fazladır (Gözüaçık 2012).

2.2. Korozyon

Korozyon genellikle metallerin ve alaşımlarının çevreleri ile olan kimyasal ve elektrokimyasal tepkime sonucu bozunmaları olarak bilinmektedir. Ancak metal olmayan malzemelerinde çevreden etkilendikleri fark edilmiştir. Bu durum gösteriyor ki korozyon kavramı sadece metalleri değil diğer yapı malzemelerini de kapsamaktadır. Halk arasında bilinen en iyi örnek demirin korozyonu olan pas terimidir.

Korozyon genellikle kuru ve yaş korozyon olarak ortamına göre ikiye ayrılır. Kimyasal korozyon olarak adlandırılan kuru korozyon, metal alaşımlarının gaz ortamı içinde oksitlenmesidir. Yaş korozyon ise elektrokimyasal korozyon diye adlandırılmakla birlikte, metal ve alaşımlarının sulu ortamlarda uğradığı oksitlenmedir. Ancak gerçekte her iki korozyonda elektrokimyasal ilkelere dayanarak oluşur. Temelde bazı farklılıklar böyle bir ayırımın oluşmasına sebep olmuştur (Doruk 1982).

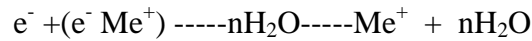
Korozyon metal malzemelerin dayanımını ve rijit sürekliliğini bozduğu için önlenmesi veya takip edilmesi önemli olan bir olaydır. Korozyon, ekonomik olarak, iş gücü kaybına sebep olur. Korozyonun önlenmesi açısından yapılan çalışmalar ise bu alanın ne kadar önemli olduğunu ortaya koymaktadır. Bu sebepten dolayı korozyon üzerinde birçok çalışma yapılmakta ve bu çalışmalar ekonomik bir külfet oluşturmaktadır. Korozyon özellikle çalışma ortamının etkisiyle malzeme kaybına yol açmaktadır. Korozyon, metallerin aktifliklerinden dolayı depolanmasını engeller veya özel şartlar oluşturularak depolanmalarını gerektirir. Korozyon ürünlerinin malzeme yüzeylerinde

yığılması, ısı ve elektriksel iletkenliği azaltarak çeşitli işlemlerde servis verimini düşürmektedir. Korozyon emniyet faktörüne de etki etmektedir ve özellikle bu durum yüksek basınçlı kazanlarda aşırı önem arz etmektedir. Bunlara benzer sebepler korozyon olayının engellenmesi veya kontrol altına alınması adına önem arz etmektedir (Doruk 1982).

Metaller tabiatta mineral olarak bulunurlar. Buldukları halleri o elementin en kararlı halleri olduğu için bütün metaller mineral hale dönmek isterler. Tabiatta bulunan bu mineraller enerji harcanarak ve çeşitli yöntemler kullanılarak metal haline dönüştürülürler. Fakat metaller element halinde kararlı olmadıkları için gerekli koşulları bulduğunda enerji vererek doğada buldukları hale geri dönerler. Bu durum metallerin bozunması yani korozyonu olarak adlandırılırken metallerin serbest enerji değişimi onların korozyon eğilimlerini belirler (Anonim 2009).

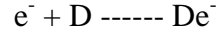
Korozyon olayı elektrokimyasal tepkimelerin bir sonucudur. Yüzeyde kimyasal indirgenmenin olduğu elektrot anot, kimyasal oksitlenme yolu ile çözümlenen elektrot da katottur. Bu işlem anodik (elektron veren-yükseltgenme) reaksiyonlar ile katodik (elektron alan-indirgenme) reaksiyonları birlikte oluşması meydana gelir (Anonim 2009).

Anodik reaksiyon metal elementlerinin elektron vererek pozitif iyonlara dönüşmesidir. Başlangıçta yüksek enerjili olan metal iyonları belirli sayıda su molekülü ile bağ kurarak alçak enerjili duruma geçer ve kararlılık kazanır. Anodik olay aşağıdaki reaksiyon sonucudur.

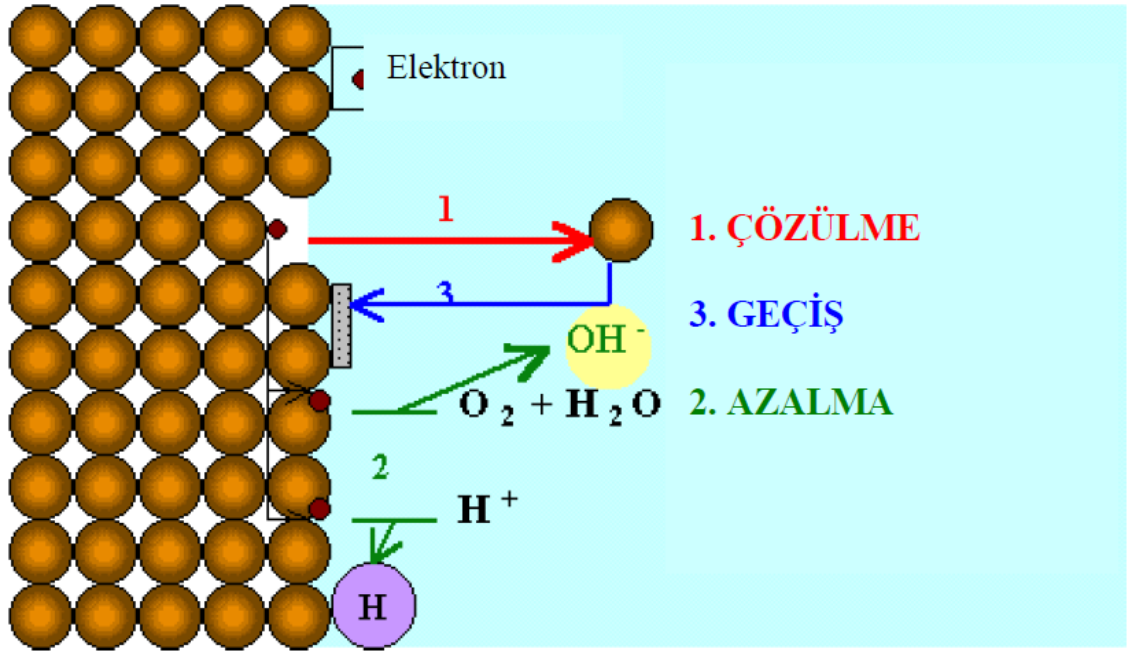


Anodik olay elektron üretir. Üretilen elektronlar metal yüzeyinden uzaklaşmazsa anodik olay yavaşlar veya durur. Katodik reaksiyon, anodik reaksiyonda üretilen elektronları harcar. Bu reaksiyon oluşabilmesi için elektron alan yani indirgenebilen

iyon veya moleküle ihtiyaç vardır. Elektron içinde indirgenen iyon ve moleküllerin simgesi D ise katodik olay aşağıdaki reaksiyon sonucudur.



Elektrokimyasal korozyon anodik ve katodik reaksiyonların karşılıklı gerçekleşmesi ile oluşur (Doruk 1982).



Şekil 2.9. Korozyon reaksiyonu oluşumu.

Bir metalin korozyona uğrayıp uğramayacağı o metalin aktifliği ile alakalıdır. Ancak krom, nikel, titanyum, alüminyum, magnezyum gibi bazı metaller yüzeylerinde korozyon ürünlerinden bir film oluştururlar. Oluşturulan bu filmin bazılarında göre üç boyutlu oksit tabaka bazılarında göre oksijen atom veya moleküllerinin tek katlı bir tabaka olduğu iddia edilse de bu film metali saldırgan ortamlardan koruyan koruyucu bir örtü niteliğindedir. Bu durumda o metal pasifleşmiş olur. Anlaşılacağı üzere bir metal bulunduğu elektrolit içerisinde yüzeyinde dayanıklı oksitle oksitlenirse bu metal

pasifleşmiş olur. Böylece metalin dış yüzeyinde pasif film oluşturularak korozyon özelliği iyileştirilebilir (Doruk 1982).

Korozyon hızı ilk olarak ağırlık kaybı yöntemiyle bulunurdu. Bu yöntemde korozyona uğrayacak metal korozif ortamda belli süre bekletilerek ağırlığındaki kayıp hesaplanarak bulunurdu. Bu uygulamanın iki sakıncası vardır. Bunlar korozyon sonuçları için uzunca bir süre beklemek gerekmekte ve elde edilen sonuç korozyon hızını değil de ortalama bir değeri vermekteydi. Elektrokimyasal tekniklerin gelişmesi ile birlikte korozyon hızı tayininde polarizasyon eğrileri kullanılmaya başlanmıştır

Korozyon hızının elektrokimyasal ölçümleri sırasında karşılaşılan en önemli sorun korozyon potansiyelindeki akımın ölçülememesidir. Çünkü potansiyelde dışarıdan herhangi bir ölçüm cihazı tarafından ölçülecek akım olmaz. Sonuç olarak korozyon akımını ölçmek korozyon potansiyeli dışındaki akımları ölçerek gerçekleşir. Böylece korozyon akımı yaklaşık olarak tahmin edilebilir ya da hesaplanabilir (Kuşdemir 2008).

Akım yoğunluğu hesabında bize en yardımcı olacak Tafel eğimidir. Tafel eğimleri bize akım yoğunluğunu bulmamızı sağlar (Doruk 1982).

15 tip korozyon çeşidi vardır. Bunlar kısaca aşağıda verilmiştir.

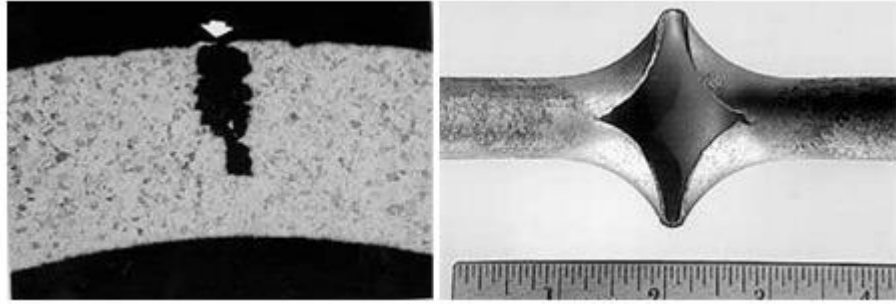
Homojen (Uniform) Korozyon: Metal yüzeyinde her yerde eşit şiddetle oluşan korozyon türüdür. Metal kalınlığı her yerde aynıdır. Atmosfer ortamında herhangi bir dış etkiden etkilenmemiş aynı cins malzemedan üretilmiş olan metaller homojen korozyona uğrar (Anonim 2009).

Galvanik Korozyon: Birbiriyle temas halinde olan farklı potansiyellere sahip iki metalin oluşturmuş olduğu korozyon türüdür. Temas halindeki metallere aktif olan anot, daha soy metal ise katot görevi görür ve aktif metal korozyona uğrar. Örneğin, bakır ile çeliğin temas etmesi durumunda bakırdan dolayı çelik korozyonuna uğrayacaktır (Anonim 2009).



Şekil 2.10. Farklı metaller arasında oluşan galvanik korozyon (Anonim 2009)

Çatlak Korozyonu: Metal yüzeyinde bulunan çatlaklar üzerinde oluşan korozyon çeşidine verilen addır. Çatlağın içi ile çevre elektrolit arasında oksijen konsantrasyonunun yada metal iyonunun farklı olması bu korozyonun sebebidir. Çatlaktaki dış kısımlar katottur, bu sebeple dış yüzeydeki çatlak korozyon oluşmaz fakat çatlak ucunda korozyon cereyan eder.



Şekil 2.11. Metalde çatlak korozyonun oluşumu ve çatlak (Anonim 2009)

Oyuklanma (çukurcuk) Korozyonu: Korozyonun çok dar bölgelerde yoğunlaşması ile meydana gelen korozyondur. Korozyon bölgelerinde çukurcuklar oluşturur. Çukurların derinliği ile çapı yaklaşık olarak aynıdır. Çukurcuklar korozyon ürünleri ile doludur. Korozyona uğrayan malzeme diğer homojen korozyona uğrayan malzemelere göre daha az olsa da bozucu etkisi yaygınlığı ve kontrolündeki güçlükler nedeniyle en korkulan korozyon türüdür. Oyuklar çekirdeklenme ve ilerleme aşaması olmak üzere iki aşamadan meydana gelir (Anonim 2009).



Şekil 2.12. Oyuklanma korozyonu ve oluşumu (Anonim 2009)

Taneler Arası Korozyon: Malzemelerin tane sınırları arasında oluşan korozyon türüdür. Taneler arası sınır çizgilerinde meydana gelir. Alaşımların tane sınırlarında biri diğerine göre daha düşük konsantrasyonda bulunması sınır çizgileri korozyon için elverişli olmasını sağlar. En önemli özelliği malzemede ağırlık kaybının çok az olmasına karşın korozyon hızının tane sınırlarında çok yüksek değerlere ulaşmasıdır. Bu durum malzeme dayanımını düşürür. Paslanmaz çelikte kaynak yapılan bölgede bu tip taneler arası korozyon meydana gelir. Örneğin, Ostenitik çelikler (%18 Cr +%8 Ni) 7400–900°C arasına çıkarıldığında veya soğuma esnasında bu sınırlar arasını geçerken tane sınırlarında karmaşık bir karbür çökmesi olur (Anonim 2009).

Tabaklaşma Korozyonu: Taneler arası korozyonun ekstrüzyon yada hadde yüzeyinde paralel olarak oluşmasıdır. Alüminyum ve alaşımında görülür. Korozyon hadde yönünde uzamış tane sınırlarında meydana gelmektedir. Korozyona uğrayan metal tabaka tabaka malzemeden ayrılır. Korozyon ürünlerinde malzemenin tabaka tabaka birbirinden ayrılmasına neden olur (Anonim 2009).

Seçimli Korozyon: Alaşımlarda belirli metal veya faz üzerinde yoğunlaşarak öncelikle o metalin çözünmesiyle oluşan korozyondur. Aktiviteleri arasında fark olan elementlerin oluşturduğu alaşımlar seçimli korozyona uğrar. Örneğin, %70 Cu+%30 Zn'den oluşan pirinç içinde bulunan Zn kolayca korozyona uğrayabilir. Korozyon sonucu alaşım yüzeyinde Zn konsantrasyonu azalır ve normalde sarı olan rengi, bakır kırmızısına dönüşür (Anonim 2009).

Erozyon Korozyonu: Malzeme yüzeyi ve ortam arasında bağıl hızın yüksek olduğu durumlarda görülür. Özellikle boru sistemlerinde ve limanlarda çokça rastlanır. Bu korozyon metal ile ortam arasındaki bağıl hız nedeniyle metal yüzeyinde delikler, oluklar ve hendekler oluşturarak erozyona sebep olur. Özellikle borulama sistemlerinde görülür. Üzerinde gelen basıncı karşılayamayan malzeme çatlayarak görevini yapamayacak duruma gelir (Anonim 2009).



Şekil 2.13. Borunun dış ve iç görünümü ile erozyon korozyonu (Anonim 2009).

Biyolojik Korozyon: Bazı topraklarda bulunan bakterilerin veya metali kimyasal ve elektrokimyasal olarak etkilemesiyle oluşan korozyon türüdür (Anonim 2009).

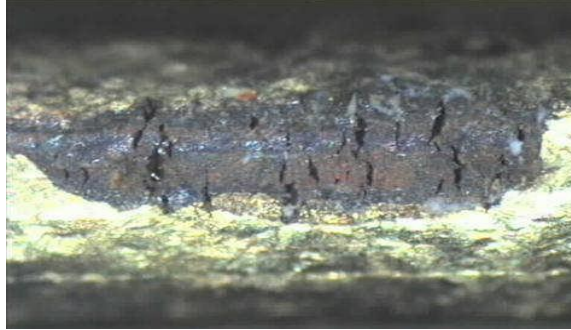
Kaçak Akım Korozyonu: Tren, tramvay, metro gibi yer altında çalışan raylı taşıtların kaçak akımları yer altı borularında çok şiddetli ve hızlı korozyona sebep olur (Anonim 2009).

Kaplama Bozukluğu Korozyonu: İşçilik hataları nedeniyle kaplamaların bazı bölgelerinin bozunması veya delinmesi ile bozunan veya delinen kaplamanın altı anot bölgeleri oluşturur. Bu bölgelerde korozyon olayı görülmezse kaplama altı korozyonu olarak tanımlanır. Bu tip korozyon, metal yüzeyinde çok küçük bölgelerde yoğunlaşan bir korozyondur (Anonim 2009).



Şekil 2.14. Kaplama hatası nedeniyle kaplama altında oluşmuş korozyon (Anonim 2009)

Gerilim Korozyonu: Aynı zamanda rastlanan korozif ve mekanik etmenlerin bir sonucudur. Çekme gerilmesine maruz parçalarda ve saldırgan ortamda bulunan korozyona duyarlı malzeme çekme gerilmesine dik bölgesel çatlaklar oluşturarak hasara uğrar.



Şekil 2.15. Çatlak korozyonunun görünümü (Anonim 2009)

Kavitasyon Korozyonu: Hızlı su akışının oluştuğu borulama sistemlerinde boru yüzeylerinde oluşan kavitasyon sonucu oluşan korozyon çeşididir. Oluşan anlık yüksek basınçlar (şok dalgaları) yüzeye çarparak malzemeyi örten tabakayı veya malzeme yüzeyini tahrip eder. Metal korozyona uğrar. Bu tür yüzeylerde kaba ve delikli oyuklar petek görünümü verir (Anonim 2009).



Şekil 2.16. Kavitasyonun sebep olduğu korozyon görünümü (Anonim 2009)

Bıçak Çizgisi Korozyon: Stabilize edilmiş paslanmaz çelikler (Ti ve Nb'lu çelikler) genellikle kaynak sırasında, 1100°C'ye kadar ısıtılırsa Ti ve Nb karbürler çözünür. Hızla soğutulduğunda çözelti içinde kalırlar. Daha sonra metal krom karbür çökeltme sıcaklığına ısıtıldığı zaman Ti ve Nb karbür oluşturmaz ve alaşım sanki stabil olmamış gibi davranır. Korozyon hasarı kaynağa komşu çok dar bir bölgede meydana gelir (Anonim 2009).

Aralık Korozyonu: Perçin, cıvata, conta gibi altı örtülü yüzeylerde ve aralıklarda meydana gelir. Bu korozyonun oluşabilmesi için çözeltinin aralığın çözelti gerebilecek kadar geniş çözeltinin çıkamayacağı kadar dar olması gerekir. Aralık içinde bulunan çözelti doymun olduğu için gerekli oksijen kısa zamanda tükenir. Böylece aralığın içi ve dışı arasında oksijen iyonu konsantrasyonu farkı, aralık korozyonuna sebep olur. Bunun önlenmesi için dar bölge oluşturacak tasarımlardan kaçınılmalı ve mümkünse perçin cıvata yerine kaynak dikişi kullanılmalıdır (Anonim 2009).



Şekil 2.17. Cıvatanın sebep olduğu aralık korozyonu (Anonim 2009)

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Taban Malzemesi ve Kaplama Öncesi Yüzey Hazırlıkları

Bu çalışmada, kare kesitli 30x30x3 mm boyutlara sahip AZ91 magnezyum alaşımlı numuneler altlık materyali olarak kullanılmıştır. Numuneler sırasıyla 400, 800, ve 1000 gritlik su geçirmez, SiC zımparalar ile zımparalanarak parlatma işlemine tabi tutulmuştur. Alkol ile temizlenmiş, sıcak hava ile kurutulmuştur.

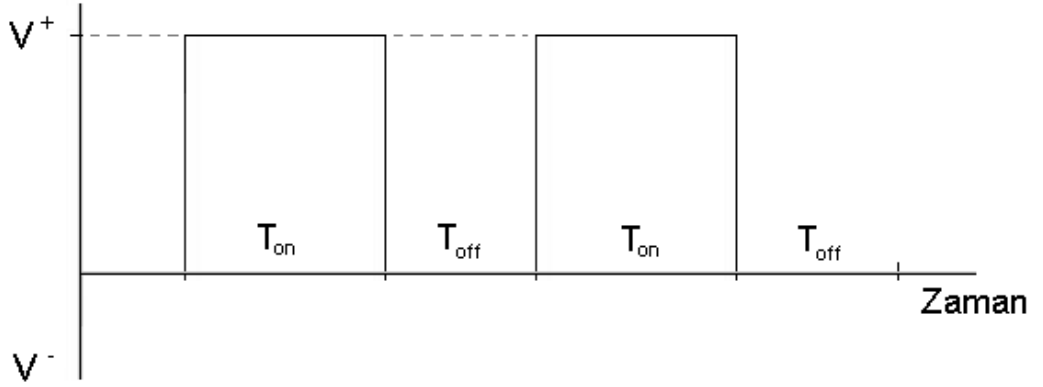
Çizelge 3.1. AZ91 magnezyum alaşımının kimyasal bileşimi

BİLEŞİM ELEMENTİ	Al	Zn	Mn	Fe	Si	Ni	Cu
YÜZDE AĞIRLIK ORANI	%9,1	%0,85	%0,27	%0,002	0,005	0,001	0,004

3.2. MAO Yöntemi ile AZ91 Magnezyum Alaşımı Numunelerin Kaplanması

AZ91 magnezyum alaşımının kaplama işlemi için Plasma Technology Ltd tarafından üretilen mikro ark oksidasyon cihazı kullanılmıştır. İşlemler 1 g/L potasyum hidroksit, 4 g/L sodyum fosfat, 3 g/L sodyum alümine, sulu çözeltisi içerisinde gerçekleştirilmiştir. Çizelge 3.2’de gösterildiği gibi; 400 V sabit gerilimde ve 250 Hz sabit frekansta çalışılmıştır. Değişken parametre olarak pozitif darbe süresi (pozitive duty) ve işlem süresi seçilmiştir. Pozitif darbe süreleri (pozitive duty) 50 μ s, 200 μ s ve 300 μ s olup, 5’er dakikalık ve 15’er dakikalık kaplama sürelerinde bipolar modda kare dalga modeli ile AC güç kaynağı kullanılarak uygulanmıştır. Kare dalga modelinin dalga formunun şematik gösterimi Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Yapılan deneylerde magnezyum numune anot, solüsyonun bulunduğu paslanmaz çelik tank ise katot olarak kullanılmıştır.

Kaplama işlemi boyunca elektrolitin sıcaklığının 30°C'nin altında kalması için çift cidarlı paslanmaz çelik tankın cidarları arasından şebeke suyu geçirilerek soğutma işlemi yapılmıştır. Karıştırıcı ünite kullanılarak elektrolitin homojenliği sağlanmış ve MAO işleminden sonra örnekler alkol ile yıkanıp sıcak hava ile kurutulmuştur.



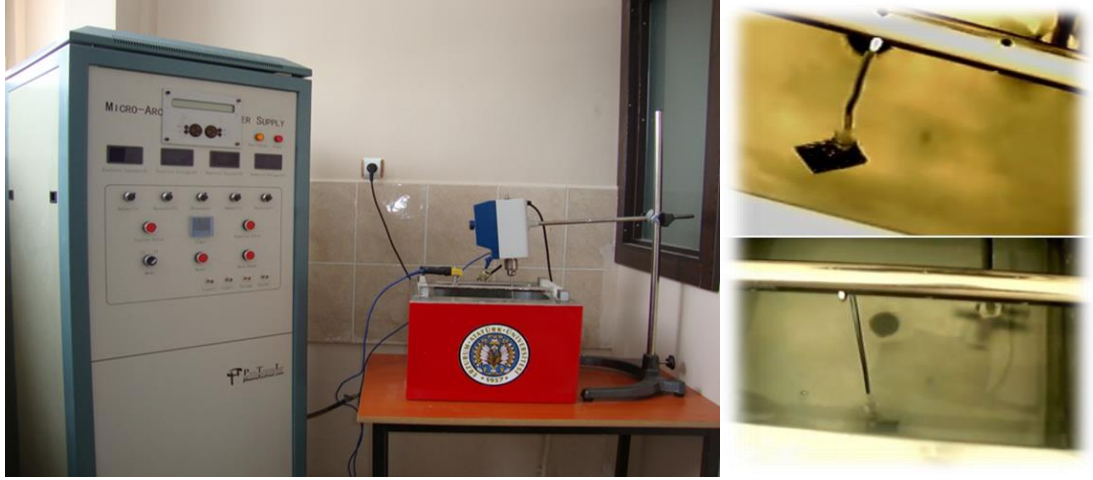
Şekil 3.1. Kare dalga modelinin dalga formunun şematik gösterimi

Kaplama işlemleri için kısaltma olarak R harfi kullanılmış, Çizelge 3.2'de işlem parametreleri verilmiştir.

Çizelge 3.2. MAO kaplama işlem parametreleri (sabit voltaj: 400 V, sabit frekans frekans: 250 Hz)

Kaplama İşlem	<i>R1</i>	<i>R2</i>	<i>R3</i>	<i>R4</i>	<i>R5</i>	<i>R6</i>
Pozitif Darbe Süresi (Pozitif Duty) T_{on} μ s	50	200	300	50	200	300
İşlem Süresi dk	5	5	5	15	15	15

Plazma Technology Ltd. tarafından üretilen PEO-15 sistemi ve AZ91 Magnezyum alaşımı üzerinde kaplamayı oluşturan proses sisteminin resmi Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. MAO işleminde kullanılan sistemin gösterimi

3.3. Yapısal Analizler

6 adet farklı parametrelerde kaplanmış numunelerin yapı içinde bulunan fazların tespiti ve karşılaştırılmasını araştırmak için X ışınım kırınımı (XRD) kullanılmıştır. Kaplamalı numuneler üzerindeki oksit tabakanın ölçümlerini $\lambda=1,5404 \text{ \AA}$ dalga boyunda Cu-K α kaynaklı Rigaku-2200D/Maxdifraktometre cihazı ile 20–100° tarama aralığında yapılmıştır. XRD prosesi Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3. X Işını difraktometresi (XRD)

3.4. SEM Analizleri

Mikro ark oksidasyon ile kaplanmış AZ91 magnezyum alaşımlarının yüzey morfolojisini gözlemek için taramalı elektron mikroskobu (SEM Jeol-6400) kullanılmıştır.

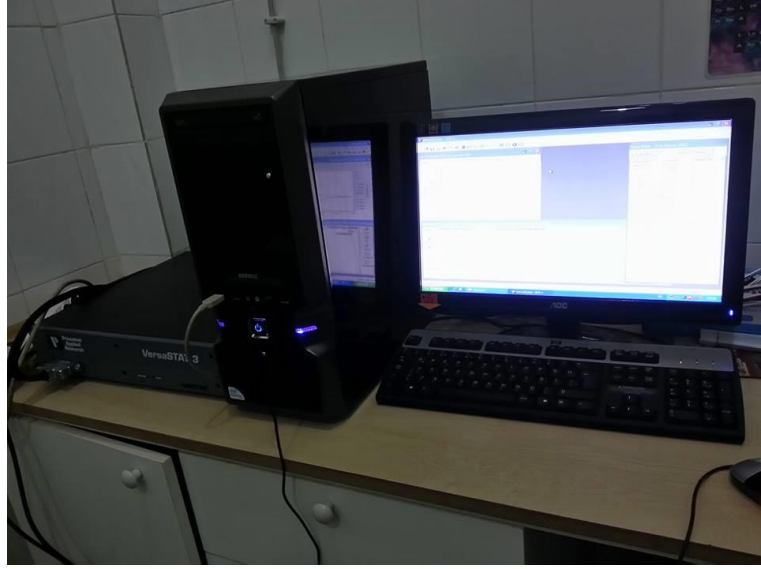


Şekil 3.4. Tarama elektron mikroskopları (SEM)

Ayrıca kaplamalara ait kalınlık belirlenmesi için kesit görüntüleri yine SEM ile gerçekleştirilmiştir. Taramalı elektron mikroskobu Şekil 3.4'te gösterilmektedir.

3.5. Korozyon Deneyleri

MAO kaplamalı magnezyum alaşımları yüzeylerinde yaklaşık 1 cm^2 alan açıkta kalacak şekilde bakalite alınmıştır. Korozyon deneyleri ağırlıkça %3,5'lük NaCl çözeltisi içerisinde gerçekleştirilmiştir. Elektrokimyasal deneyler geleneksel 3 elektrotlu hücre kullanılarak yapılmıştır. Elektrokimyasal hücre; çalışma elektrotu olarak, numuneler (we), referans elektrotu olarak standart Ag/AgCl referans elektrot (RE), ve karşı elektrot olarak platin elektrot (CE) oluşmaktadır. Elektrokimyasal polarizasyon deneyleri bilgisayar kontrollü Versastat3 Potansiyostat test cihazında gerçekleştirilmiştir. Numune açık devre potansiyeline erişinceye kadar yaklaşık 3 saat çözelti içerisinde bekletilmiştir. Daha sonra numuneler $-1000/950 \text{ mV}$ potansiyel aralığı içinde 1 mV/sn 'lik tarama hızında potansiyodinamik olarak polarize edilmiştir. Elde edilen potansiyodinamik grafiklere tafel yöntemi uygulanmıştır.



Şekil 3.5. Korozyon deney sistemi

4. ARAŞTIRMA ve BULGULAR

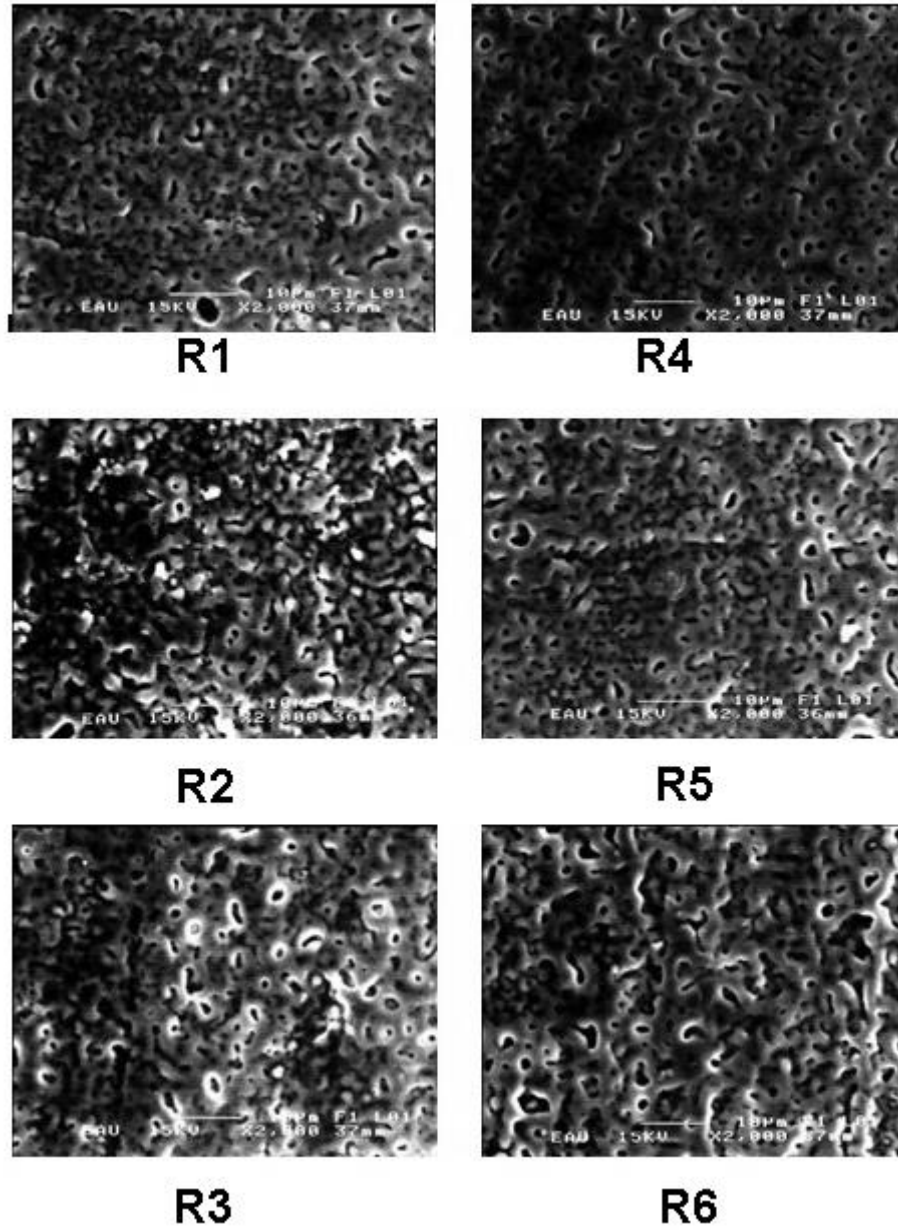
4.1. Yüzey Karakteristiği

MAO işlemine tabi tutulan numunelerin SEM görüntüleri Şekil 4.1’de verilmiştir. Kaplama işleminde kullanılan parametreler Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Bilindiği üzere, MAO kaplama esnasında erimiş oksit ve gaz kabarcıklarının dışarı atılması nedeniyle kaplamada gözenekler oluşur (Bai and Chen 2009). Oksit ve gaz baloncukları tahliye kanallarından dışarı doğru atılırken gözenekler sabit kalır (Chen *et al.* 2010). Bu nedenle kaplama yüzeyinde, mikro ark oksidasyonun doğası gereği mikro boyutta gözeneklilik gözlenmektedir (Demirci *et al.* 2013). Gözenekli yapının yanı sıra, numune yüzeyindeki erimiş oksidin elektrolite temas ederek hızlı katılaşması nedeniyle oluşan termal stres, mikro çatlakları ortaya çıkabilmektedir. Gözenekli oksit yapı, dış yüzey ile malzeme arasında bariyer görevi görebilmektedir. Ancak üzerinde mikro çatlaklar oluşmuşsa bu bariyerin direnci azalır (Duan *et al.* 2006). Gözeneklerin büyüklüğü veya çatlakların oluşup oluşmaması yüzey üzerinde oluşan enerji ile alakalıdır (Hussein *et al.* 2011). Bu enerji işlem parametreleri ile kontrol edilebilmektedir. Çeşitli parametreler denenerek daha iyi kaplama yüzeyi elde edilebilir

R1, R2, R3, R4, R5 ve R6’ya ait kaplama işlemlerinin parametreleri Çizelge 3.2’de ve Şekil 4.1’de SEM görüntüleri verilmiştir. Görüntülerde R3 ve R6 işlemi için mikro çatlaklar gözlenmiştir. Bu çatlaklar termal stres sonucu oluşmuş olabilirler. R1, R2 ve R3 (5’er dakikalık işleme tabi tutulmuş numuneler) kendi aralarında incelendiğinde R2 ve R3 ait görüntülerde gözeneklerin çapı R1 e göre daha büyüktür. R4, R5 ve R6’ya (15’er dakikalık işleme tabi tutulmuş numuneler) ait görüntüler kendi aralarında incelendiğinde ise R4 ve R5’de gözeneler R6 ya göre küçük ve sayıca fazladır. MAO sırasında oluşan mikro kıvılcımların yüzeye yayılmasıyla gözenekliliğin arttığı ve gözeneklerin küçüldüğü gözlenmiştir (Yue and Hua 2010). Pozitif darbe süresinin

artması kıvılcım yayılımını etkilemiştir. Bu durumun yüzeydeki anlık sıcaklığı ve basıncı değiştirmesiyle gözenekleri büyüttüğü düşünülmektedir (Hussein *et al.* 2011).



Şekil 4.1. MAO işlemine tabi tutulmuş numunelerin SEM görüntüleri

Aynı parametrelerde ve farklı sürelerde kaplanan numuneler incelendiğinde; R1 ve R4 işlemine ait SEM görüntülerinde gözeneklerin küçük olduğu açıkça gösterilmektedir. R2 ve R5 işlemine ait SEM görüntülerinde ise gözeneklerin daha büyük olduğu

gösterilmektedir. R3 ve R6 işlemine ait SEM görüntülerinde ise gözenekler oldukça büyüktür. Darbe süresinin artması yüzeyde oluşan enerji miktarının artmasına neden olmuştur. Yüzeyde oluşan yüksek enerji mikro arkları karakterize edebilir (Hussein *et al.* 2011). Yüksek enerjiye sahip mikro arklar, yüzeyde oluşmuş gözenekleri büyütmüş veya işlem sırasında oluşan gaz kabarcıklarının arttırmış olabilirler. Bu durumun R3 ve R6 işleminde mikro çatlakların oluşmasına ve gözeneklerin büyük olmasına sebep olduğu düşünülmektedir.

5 dakikalık işlem süresi için R1 ve R2 yüzey morfolojileri incelendiğinde R1 ve R2'nin birbirine benzer olduğunu ancak R2'de daha büyük gözeneklerin varlığı gözlenmiştir. R3'ün ise yüzey morfolojinde çok daha büyük gözeneklerin olduğu SEM görüntülerinden tespit edilmiştir. 15'dakikalık işlem süresi için ise R4 ve R5 yüzey morfolojileri birbirine benzemekle beraber R5 de büyük gözenekler R6 da ise daha büyük gözenekler vardır. Bu durumda 50 μ s'de büyütülmüş kaplama içerisinde oluşan deşarjların enerji dengeleri yüzey morfolojilerinde sık ve küçük gözenekliliğe sebep olmuştur.

Tüm bu görüntüler incelendiğinde diyebiliriz ki; gözeneklerin büyüklüğü darbe süreleri ile oldukça alakalıdır. Darbe süreleri ne kadar büyürse numune yüzeyine verilen enerji o derece artar. Numune yüzeyindeki enerji artışı numunenin morfolojisini doğrudan etkiler.

4.2. Kaplama Kalınlığı Analizi

Şekil 4.3'te MAO kullanılarak kaplanmış AZ91 magnezyum alaşımının kesit görüntüleri verilmektedir. Kalınlık ölçümleri ise Çizelge 4.1'de verilmiştir.

5 dakikalık (R1, R2 ve R3 işlemi) işlem sürelerinde oluşturulmuş numuneler kendi arasında kıyaslandığında R3 kaplama kalınlığı R2 ve R1 den daha büyüktür. 5 dakikalık kaplama işlemleri için kalınlık ölçümleri büyükten küçüğe doğru, 300 μ s pozitif darbe

süresinde büyütülmüş R3 kaplaması, 200 μ s pozitif darbe süresinde büyütülmüş R2 kaplaması, 50 μ s pozitif darbe süresinde büyütülmüş R1 kaplaması şeklinde sıralanmıştır. 15 dakikalık kaplama işlemleri için ise kalınlık ölçüleri büyükten küçüğe doğru 300 μ s pozitif darbe süresinde büyütülmüş R6 kaplaması, 200 μ s pozitif darbe süresinde büyütülmüş R5 kaplaması, 50 μ s pozitif darbe süresinde büyütülmüş R4 kaplaması şeklinde sıralanmıştır. 5 ve 15 dakikalık işlemler içinde aynı parametrelere sahip numunelerin kalınlıkları kendi aralarında karşılaştırıldığında R4, R1'den, R5, R2'den ve R6, R3'den daha büyüktür.

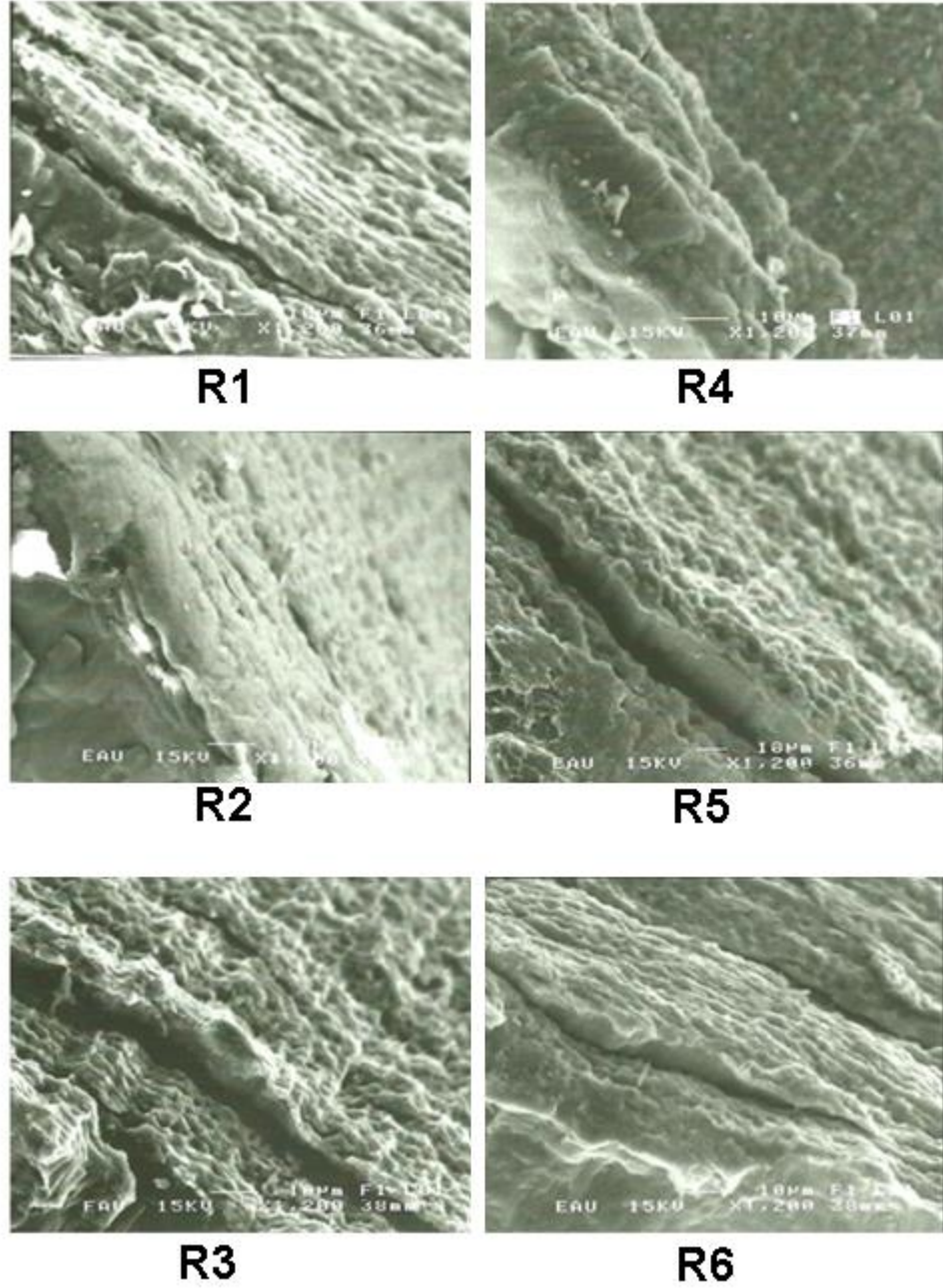
Çizelge 4.1. Kaplamanın kesit morfolojisi kalınlık ölçümleri

Kaplama İşlem	R1	R2	R3	R4	R5	R6
Ortalama Kalınlık (Mikrometre)	3,5	5	7	5,5	9	11

R1, R2 ve R3 ele alındığında R3 (300 μ s)'nin en yüksek kaplama kalınlığına sahip olmasının sebebini, işlem sırasındaki akım yoğunluğuna ve 300 μ s sahip pozitif darbe süresindeki görev döngüsünden kaynaklandığı düşünülmektedir. R4, R5 ve R6 ele alındığında aynı durum R6 (300 μ s) için de geçerlidir. Çünkü kaplama kalınlığı akım yoğunluğu ile değişmektedir. Elektrolit direncinin azalması akım yoğunluğunu değiştirerek oksit filimin daha hızlı büyümesine neden olmaktadır. Bu durum tahliye kanallarını büyütmede ve sayısını azaltmaktadır (Durdy *et al.* 2011). Ayrıca darbe süresinin düşük olduğu şartlarda, anodik kaplamanın kalınlığı ince olmakla birlikte, büyük olduğunda ise deşarj enerjileri kaplamaya zarar verebilmektedir (Lin-rong *et al.* 2011). Buna ilaveten düşük darbe sürelerinde gözenekler çok daha küçük çaplara sahiptir.

Aynı işlem sürelerine bakıldığında pozitif darbe süresi artarken kaplama kalınlığının arttığı gözlenmiştir.

Kaplama/elektrolit arasındaki mesafenin artması sonucu deşarj kanalları oluşması için enerji ihtiyacı artar ve artan enerji miktarının ani ısı artışlarına sebebiyet vererek mikro çatlaklar oluşumuna sebep olmaktadır. Bu durumda kaplama yüzeyinden kopmalar oluşmasına neden olur (Altay 2012).



Şekil 4.2. MAO işlemi ile kaplanmış numunelerin kesit görüntüleri

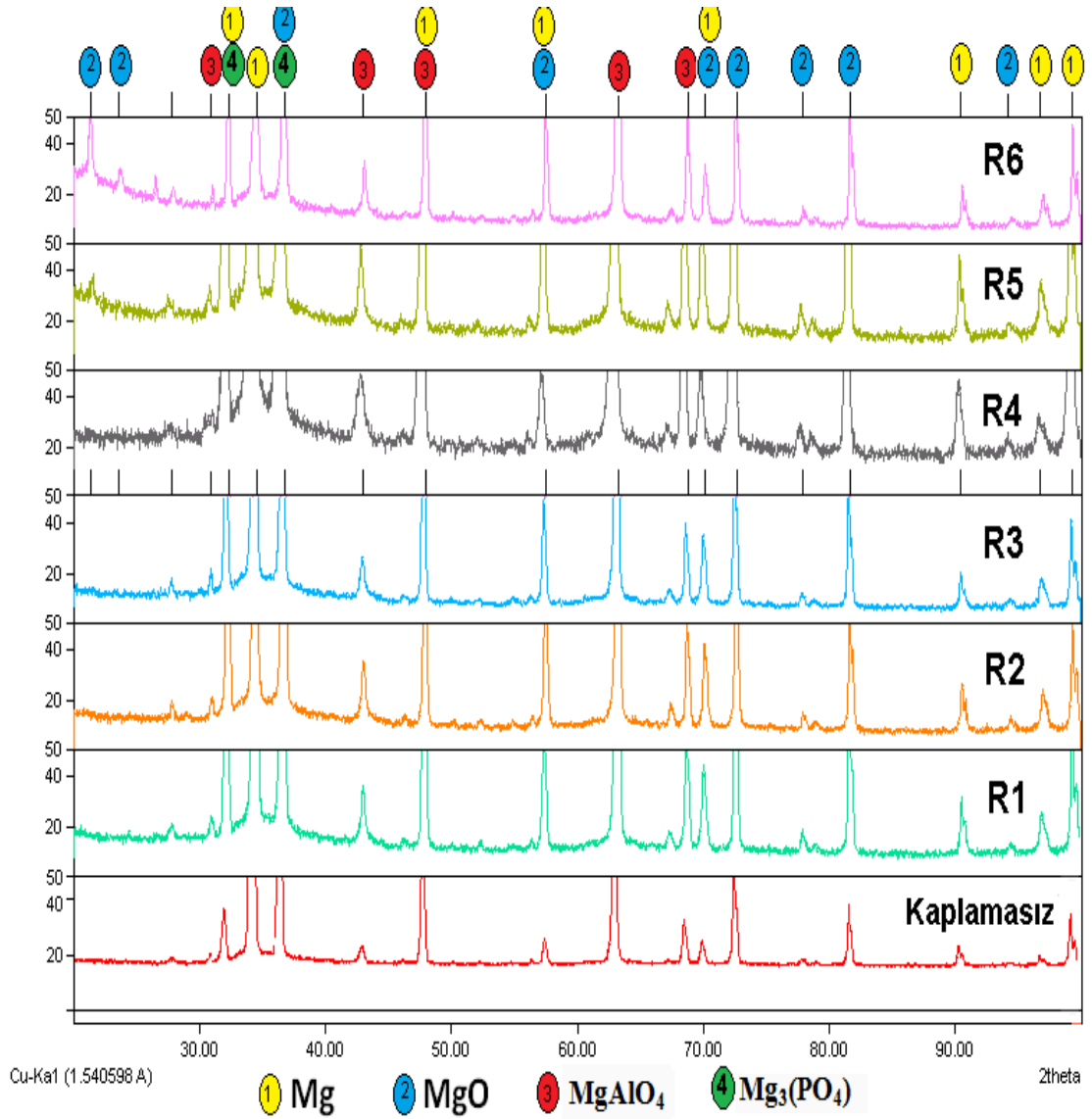
Aynı darbe sürelerinde kalınlıklar kıyaslama yapıldığında; R1 ve R4, R2 ve R5 ile R3 ve R6, işlem süresinin artmasıyla kaplama kalınlığının artması genel kanısına uymaktadır

4.3. Faz Analizi

Numunelerin yüzeylerinde bulunan kompozisyona göre XRD grafikleri Şekil 4.4'te verilmiştir. İncelediğimiz birçok literatürdeki çalışmada magnezyum üzerinde oluşan kaplamadaki temel fazın MgO olduğu belirtilmiştir (Bai and Chen 2009; Chen *et al.* 2010; Durdu *et al.* 2011; Hui-xia *et al.* 2012; Demirci *et al.* 2013). Deneyler sırasında oluşan yüksek sıcaklık bu fazın oluşumuna yardımcı olduğu düşünülmektedir. Ayrıca MAO ile kaplanmış numunelerin XRD analizinde KOH, Na₂HPO₄ ve NaAlO₂, NaAl(OH)₄ sulu çözeltisi içerisindeki kimyasallardan kaynaklanan MgAlO₄ ve Mg(PO₄) fazları da gözlenmiştir. Diğer pikler ise malzeme içeriğinden kaynaklanan pikler olabilir.

5 dakikalık işlem süresine tabi tutulmuş numunelerin XRD pikleri kendi arasında kıyaslandığında, R1, R2 ve R3 için pikler hemen hemen aynıdır. Bu durumdan pozitif darbe süreleri 5 dakikalık işlemlerde kaplamanın bileşimine herhangi bir etki yapmadığı anlaşılmaktadır. 15 er dakikalık işlemler için ise R4'e ait pikler R1, R2 ve R3 ile benzerdir. Ancak R5 ve R6 da 20° ile 30° arasında MgO fazının yeni pikleri olduğu görülmektedir. Farklı piklerin MAO kaplamada işlem süresinin artmasından kaynaklandığı açıktır.

Darbe süresinin etkisi R1, R2 ve R3 için kayda değer değildir. Ancak işlem süresi arttırıldığında darbe süresinin etkisi ortaya çıkmıştır. R4, R5 ve R6 ya ait XRD pikleri incelendiğinde darbe süresinin artması MgO fazının yeni pikleri oluşmasına neden olmuştur. Bu durum bize, MAO kaplamanın faz yapısında darbe süresinin etkisinin işlem süresinin artmasıyla ortaya çıktığını göstermektedir.

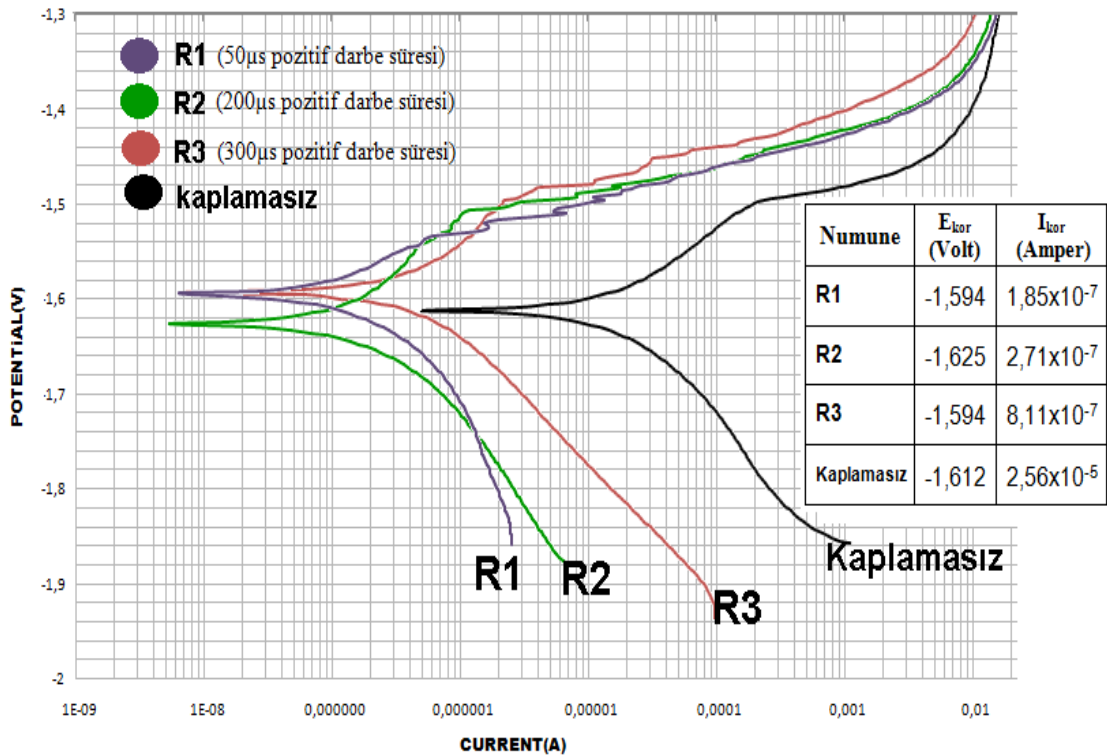


Şekil 4.3. MAO işlemi uygulanmış numunelerin XRD grafikleri

4.4. Korozyon Analizi

Kaplama işlemi uygulanmamış ve MAO yöntemiyle kaplama işlemi uygulanmış AZ91 magnezyum alaşımlarının polarizasyon eğrileri Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da gösterilmiştir. MAO işlemi ile kaplanmış numunelerin kaplanmamış örneklere kıyasla korozyon dirençlerinde artış gözlenmiştir.

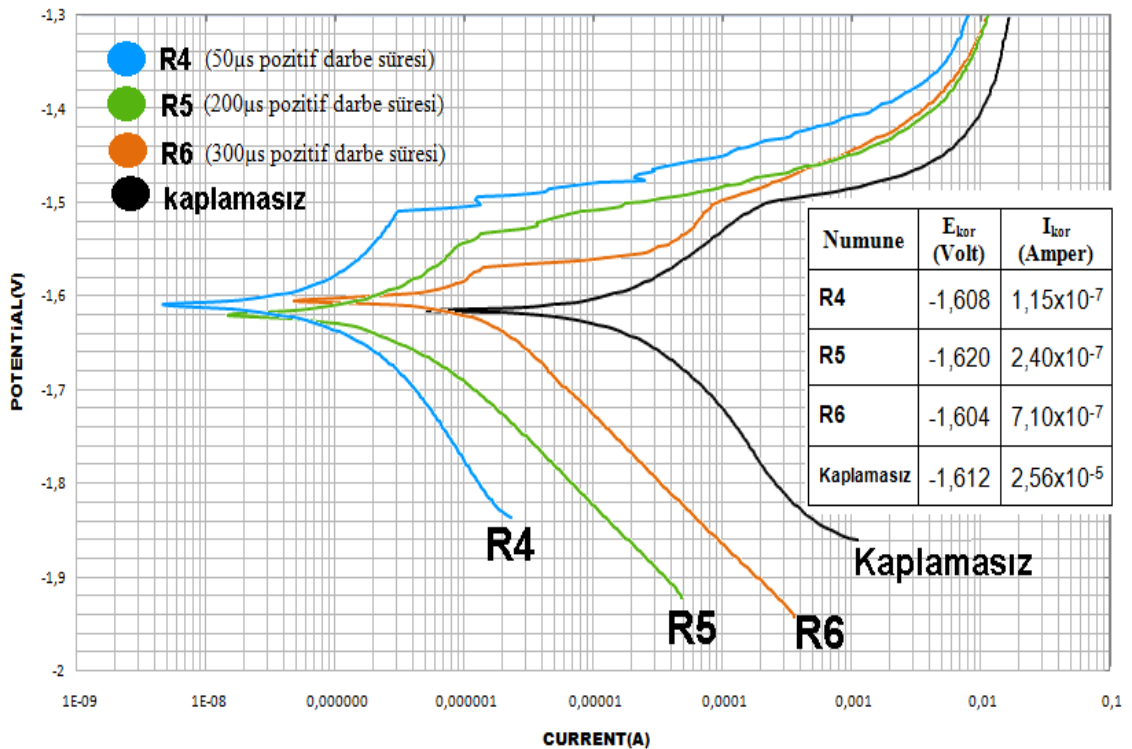
Bilindiği gibi MAO işlemi esnasında ilk önce uygulanan gerilim, filmin kırılma gerilimini aşar ve çok sayıda ince beyaz kıvılcıklar taban malzeme yüzeyinde görünmeye başlar. İşlem devam ettikçe kıvılcım miktarı azalır. Fakat bu defa da kıvılcıklar malzeme yüzeyinde ark olarak görünmeye başlar. Oluşan arklar da kaplamanın gözenekli olmasına neden olmaktadır. MAO film üzerinde birçok mikro gözenekler ve çatlaklar MAO'nun doğası gereği bulunmaktadır (Duan *et al.* 2006; Bai and Chen 2009; Chen *et al.* 2010; Durdu *et al.* 2011; Hui-xia *et al.* 2012; Demirci *et al.* 2013). MAO işlemi sonrası; şayet yüzeyde gözenek miktarı sayısı azalır, gözeneklerin boyutu artar. Gözenekli yapı elektrolitin o bölgede daha uzun süre kalmasına neden olur ve böylelikle korozyon direncinde azalmalar gözlenmeye başlar. Zaten literatürde MAO kaplamaların korozyon performansı kaplama kalınlığından çok yüzey morfolojisi ile ilgili olduğu birçok çalışma ile tespit edilmiştir (Blawert *et al.* 2005).



Şekil 4.4. MAO işlemine tabi tutulmuş numunelerin ve kaplamasız magnezyum alaşımının 5 dk işlem sürelerine göre potansiyodinamik grafiklerinin karşılaştırılması

NaCl çözeltisi içerisindeki magnezyum alaşımlarının ana korozyon formu çukurcuk korozyonu olması nedeniyle kaplama üzerindeki mikro gözeneklerin korozyon performansı üzerinde olumsuz etkileri vardır. Büyük gözenekler solüsyon içindeki korozif maddenin temas alanının artmasına sebep olur (Yue and Hua 2010). Böylece, polarizasyon sırasında anodik potansiyeline sahip, korozif madde (Cl^-) gözenekli dış katmandan iç bariyer katmanına hızla ulaşabilir ve korozyon akımı artırır. Polarizasyon akım belirli bir değere ulaştığı zaman, MAO kaplaması tepki verir ve çukurlar oluşur (Duan *et al.* 2006).

Kaplanmış numunelerin korozyon potansiyeli ve korozyon akım yoğunluğun genellikle kaplamanın korozyon direncini karakterize etmek için kullanılır. Yüksek korozyon potansiyeli ve düşük korozyon akım yoğunluğu kaplamanın iyi bir korozyon direnci sergilediğini göstermektedir (Demirci *et al.* 2013)



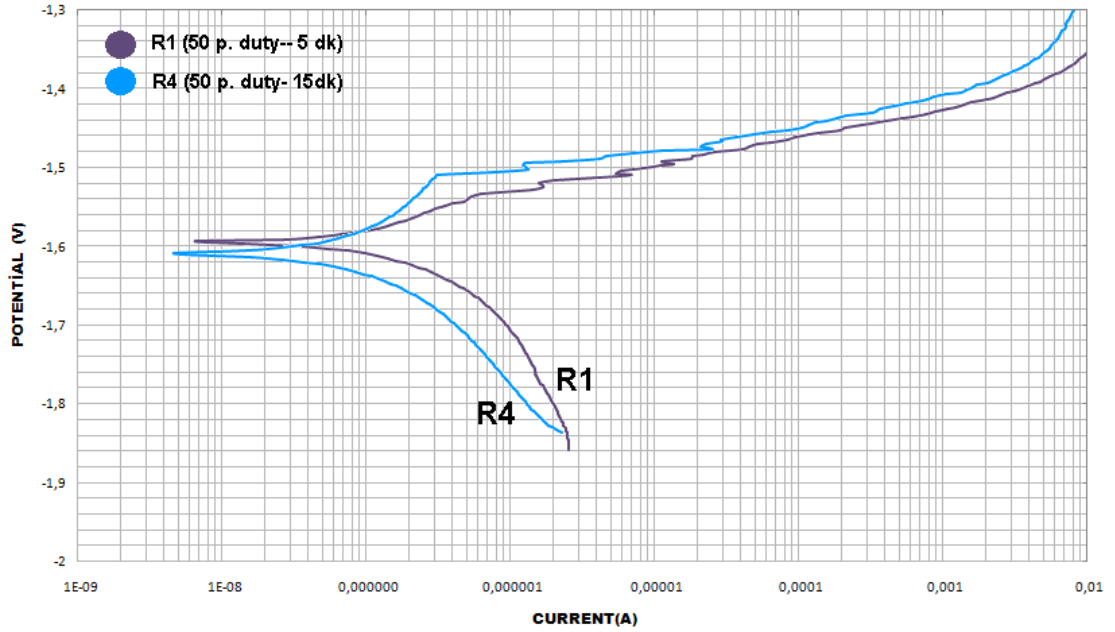
Şekil 4.5. MAO işlemine tabi tutulmuş numunelerin ve kaplamasız magnezyum alaşımının 15 dk işlem sürelerine göre potansiyodinamik grafiklerinin karşılaştırılması

Kaplamanın korozyona karşı mükemmel direnci mikro ark işlemi sırasındaki iç ve dış etkenlere, dolayısıyla düzgün ve kompakt mikro yapı yanı sıra kararlı kimyasal termodinamik bileşimlere bağlıdır (Bai and Chen 2009; Demirci *et al.* 2013; WANG and XIA 2013). Ayrıca kaplama kalınlığıda korozyon değerleri üzerinde etkilidir.

Şekil 4.4 ve Şekil 4.5 'da verilen I_{kor} ve E_{kor} değerleri incelendiğinde R1, R2, R3, kaplama işlemleri için en iyi korozyon direncini R1 göstermiştir. Yüzey görüntülerine bağlı olarak R1 yüzeyinin R2 ve R3'e göre nispeten düzgün ve küçük gözenekliğe sahip olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca Chen *et al.* (2010) yaptığı çalışmada bu sonuçlarımızı desteklemektedir (Lin-rong *et al.* 2011). Pozitif darbe süresinin artması yüzeyde oluşan enerji miktarını artırmıştır. Artan enerji miktarı ise yüzey özelliklerinin değişimine sebep olmaktadır. Yüzeyde oluşan por miktarları ve çapları; artan darbe süresiyle arttığı Şekil 4.1'de açıkça gösterilmiştir. Cl^- iyonlarının artan ve genişleyen çaplardan taban malzemeye ulaşması hızlandığı için kaplamanın korozyon dirençlerindeki azalmaları, darbe sürelerinin artmasıyla açıklanabilir. Yüzeydeki gözeneklerin büyüklüğü korozyon direncinde etkili olduğu literatürle uyumaktadır (Lin-rong *et al.* 2011).

R4, R5, R6 (15 dakikalık işlem süresinde) kendi arasında incelendiğinde ise en iyi korozyon direnci R4'e (p.duty time 50 μs) sahip kaplamadır. R5'ün korozyon direnci R6'dan daha büyük olmasının sebebi yüzey görüntülerinde görülen çatlaklara veya R6 işleminin yüzey morfolojisine bağlayabiliriz.

Bütün kaplamaların korozyon dirençlerine yorumlandığında; işlem süresinin artmasıyla korozyon direncinin arttığı görülmektedir. Bu durumunun kaplama kalınlığındaki artıştan kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca; fonksiyonel iç tabakanın kaplama yüzeyindeki enerji dağılımının dengeli olması nedeniyle daha küçük gözenekliğe sahip ve nispeten daha kompakt yapısından dolayı daha iyi korozyon direnci göstermesine atfedilebilir (Tang *et al.* 2010).



Şekil 4.6. MAO işlemine tabi tutulmuş numunelerin pozitif darbe sürelerine göre potasyodinamik grafiklerinin karşılaştırılması

R4 ün tüm işlemlerde en iyi korozyon direncini sağlaması işlem süresinin kaplama üzerindeki olumlu etkisine, yapılan deney şartlarında 50 μ s darbe süresindeki küçük gözenekliliğe sahip yüzey morfolojisine ve yüzeyde oluşan deşarjların dengeli olarak yayılmasına atfedilebilmektedir. Bu durum Tang *et al.* (2010) yapmış olduğu çalışmaya ve Hussein *et al.* (2011) yapmış olduğu çalışmayla benzer bir sonuç oluşturmaktadır.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada; Mikro ark oksidasyon yöntemi kare dalga güç kaynağı kullanılarak pozitif voltaj uygulamasında unipolar modda magnezyum AZ91 alaşımı üzerinde uygulanmış, pozitif darbe süresinin (pozitif duty time) ve kaplama işlem süresinin etkisi incelenmiştir.

- Numunelerin yüzey görüntüleri SEM kullanılarak incelendiğinde pozitif darbe süresinin, yüzey morfolojisinde oldukça etkili olduğu fark edilmiştir.
- Kaplama kalınlığının aynı işlem süreleri için pozitif darbe süresinin artmasıyla artmıştır. Aynı pozitif darbe süreleri için de işlem süresinin artmasıyla artmıştır.
- Oksit kaplama faz yapısında MgO olduğu, Ancak elektrolite bulunan kimyasallardan ötürü $MgAlO_4$ ve $Mg(PO_4)$ fazlarının oluştuğu tespit edilmiştir.
- Pozitif darbe süresi ve MAO kaplama süresi arttıkça oluşan oksit piklerinin yoğunluklarında değişimler olduğu gözlenmiştir. İşlem süresi arttırıldığında darbe süresinin etkisi ortaya çıkmıştır.
- Pozitif voltaj süresi 50 μs iken yüzeyde oluşan düzgün ve küçük çaplı kaplamalar, taban malzemeyi korozyonun zararlı etkilerinden korumuştur.
- MAO kaplamaların korozyon performansı kaplama kalınlığından çok yüzey morfolojisi ile ilgili olduğu tespit edilmiştir.
- Yüzey morfolojisinde bağlı olarak, korozyon direnci en yüksek 50 μs pozitif darbe süresine sahip olan kaplama işlemlerinde tespit edilmiştir.
- İşlem süresinin artmasıyla korozyon direncinin genel olarak arttığı gözlenmiştir.

KAYNAKLAR

- Altay, M., 2012. AZ91 Magnezyum Alaşımının Mikro Ark Oksidasyon İşleminde Elektriksel Parametrelerin Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Anonim 2009. Korozyon Ve Katodik Koruma. T.C. Millî Eğitim Bakanlığı (Mesleki Eğitim Ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi), 56, Ankara.
- Bai, A. And Chen, Z., 2009. Effect of electrolyte additives on anti-corrosionability of micro-arc oxide coatings formed on magnesium alloy AZ91D. *Surface & Coatings Technology*, 203, 1956–1963.
- Blawert, C., Heitmann, V., Dietzel, W., Nykyforchyn, H.M. and Klapkiv, M.D., 2005. Influence of process parameters on the corrosion properties of electrolytic conversion plasma coated magnesium alloys, *Surf. Coat. Technol.*, 200, 68
- Chen, H., Lv, G., Zhang, G., Pang, H., Wang, X., Lee, H., Yang, S., 2010. Corrosion performance of plasma electrolytic oxidized AZ31 magnesium alloy in silicate solutions with different additives. *Surface & Coatings Technology*, 205, S32–S35.
- Çakıcı, S., 2009. 6082 Kalite Alüminyum Alaşımının Mikro Ark Oksidasyonu Yöntemiyle Yüzey Modifikasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Demirci, E.E., Arslan, E., Ezirmik, K.V., Baran, Ö., Totik, Y., Efeoglu, İ., 2013. Investigation of wear, corrosion and tribocorrosion properties of AZ91 Mg alloy coated by micro arc oxidation process in the different electrolyte solutions. *Thin Solid Films*, 528, 116–122.
- Doruk, M., 1982. Korozyon ve Önlenmesi. ODTÜ Yayınları, SS, Ankara.
- Duan, H., Du, K., Yan, C., Wang, F., 2006. Electrochemical corrosion behavior of composite coatings of sealed MAO film on magnesium alloy AZ91D. *Electrochimica Acta*, 51, 2898–2908.
- Durdu, S., Aytac, A., Usta, M., 2011. Characterization and corrosion behavior of ceramic coating on magnesium by micro-arc oxidation. *Journal of Alloys and Compounds*, 509, 8601–8606.
- Gözüaçık, N.K., 2012. AZ91 Magnezyum Alaşımının Mikro Ark Oksidasyon İşleminde Elektrolit Bileşiminin Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Guo, H.F. and An, M.Z., 2005. Growth of ceramic coatings on AZ91D magnesium alloys by micro-arc oxidation in aluminate-fluoride solutions and evaluation of corrosion resistance. *Applied Surface Science*, 246, 229–238.
- Hui-xia, G., Ying, M., Jing-song, W., Yu-shun, W., Hai-rong, D., Yuan, H., 2012. Corrosion behavior of micro-arc oxidation coating on AZ91D magnesium alloy in NaCl solutions with different concentrations. *Transaction of Nonferrous Metals Society of China*, 22, 1786-1793
- Hussein, R.O., Zhang, P., Nie, X., Xia, Y., Northwood, D.O., 2011. The effect of current mode and discharge type on the corrosion resistance of plasma electrolytic oxidation (PEO) coated magnesium alloy AJ62. *Surface & Coatings Technology*, 206, 1990–1997.

- Hwang, I.J., Hwang, D.Y., Ko, Y.G., Shin, D.H., 2012. Correlation between current frequency and electrochemical properties of Mg alloy coated by micro arc oxidation. *Surface & Coatings Technology*, 206, 3360–3365.
- Kandemir, K. ve Can, A.Ç., 2003. Otomotiv Endüstrisi İçin Magnezyum Alaşımlarının Kullanım Potansiyeli. *Mühendislik Bilimleri Dergisi (Journal of Engineering Sciences)*, 9 (1), 37-45.
- Kuşdemir, H., 2008. AZ91 Magnezyum Alaşımının Korozyon Davranışları Üzerine İlave Alaşım Elementlerinin Etkisi. *Bilim Uzmanlığı Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük üniversitesi, Karabük.*
- Lee, K.M., Lee, B.U., Yoon, S.I., Lee, E.S., Yoo, B., Shin, D.H., 2012. Evaluation of plasma temperature during plasma oxidation processing of AZ91 Mg alloy through analysis of the melting behavior of incorporated particles. *Electrochimica Acta*, 67, 6– 11.
- Lin-rong, C., Fa-he, C., Jing-shun, C., Wen-juan, L., Zhao, Z., Jian-qing, Z., 2011. Influence of electric parameters on MAO of AZ91D magnesium alloy using alternative square-wave power source. *Transaction of Nonferrous Metals Society of China*, 21, 307-316.
- Malayoğlu, U., Tekin, K.C., Çakmak, E., 2008. Plazma Elektrolitik Oksitlenme Yöntemiyle Hafif Metallerin Kaplanması, *Mühendis ve Makina*, 49 (582), 3-9.
- Özkara, I. M. ve Baydoğan M., 2009. Mikro ark oksidasyon işleminde voltaj uygulama süresinin 2024 kalite alüminyum alaşımının morfolojik özelliklerine ve aşınma direncine etkisi. 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, Karabük Üniversitesi, Karabük, Türkiye.
- Öztürk, F. ve Kaçar, İ., 2012. Magnezyum Alaşımları ve Kullanım Alanlarının İncelenmesi. *Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 1 (1), 12-20.
- Polat, A., 2009. 2017A, 6061 Ve 7039 Alüminyum Alaşımlarının Mikroark Oksidasyon Yüzey Kaplama Yöntemi İle Sert Seramik Kaplanması. *Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli.*
- Smith, W. F., 2001. *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, Literatür Yayıncılık, İstanbul, Türkiye.*
- Tang, Y., Zhao, X., Jiang, K., Chen, J., Zuo, Y., 2010. The influences of duty cycle on the bonding strength of AZ31B magnesium alloy by micro arc oxidation treatment. *Surface & Coatings Technology*, 205, 1789–1792.
- WANG, S. and XIA, Y., 2013. Micro arc oxidation coating fabricated on AZ91D Mg alloy in an optimized dual electrolyte. *Transaction of Nonferrous Metals Society of China*, 23, 412-419.
- Wei-ling, L., Ti-jun, C., Ying, M., Wei-jun, X., Jian, Y., Yuan, H., 2008. Effects of increase extent of voltage on wear and corrosion resistance of micro-arc oxidation coatings on AZ91D alloy. *Transaction of Nonferrous Metals Society of China*, 18, s354-s360.
- Yue, Y. and Hua, W., 2010. Effect of current density on corrosion resistance of micro-arc oxide coatings on magnesium alloy. *Transaction of Nonferrous Metals Society of China*, 20, s668-s692.

ÖZGEÇMİŞ

1989 yılında Samsun'da doğdu. İlköğrenimini Hasan Uğurlu İlköğretim Okulu'nda tamamladıktan sonra, 2003 yılında Çarşamba Anadolu Lisesi'ni kazandı ve okudu. 2007 yılında Harran Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünü kazandı. Makine Mühendisliğini bitirdikten sonra 2011 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Konstrüksiyon ve İmalat Bilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı.