T.C.

TRAKYA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AZ91 MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ HOMOJENİZASYONU İLE MİKRO ARK OKSİDASYON KAPLAMA ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

BATURHAN TATAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Tez Danışmanı: Yrd.Dç.Dr. Cenk MISIRLI

EDİRNE – 2015

T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü onayı

Prof.Dr. Mustafa ÖZCAN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak gerekli şartları sağladığını onaylarım.

Prof.Dr. Taner TIMARCI
Anabilim Dalı Başkanı

Bu tez tarafımca okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Yrd.Doç.Dr. Cenk MISIRLI
Tez Danışmanı

Bu tez, tarafımızca okunmuş, kapsam ve niteliği açısından Makine Mühendisliği Anabilim Dalında bir Yüksek Lisans tezi olarak oy birliği ile kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	İmza
Prof. Dr. Yılmaz ÇAN	
Yrd. Doç. Dr. Olcay EKŞİ	
Yrd. Doç. Dr. Cenk MISIRLI	

Tarih: 02/07/2015

T.Ü. FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI
DOĞRULUK BEYANI

İlgili tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin kaynak gösterilerek ilgili tezde yer aldığını beyan ederim.

02/07/2015

Baturhan TATAR



Yüksek Lisans Tezi
Baturhan TATAR
T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

ÖZET

Tez çalışmasının amacı; homojenizasyon ve Mikro-Ark Oksidasyonu (MAO) ile kaplama süreçlerinin, AZ91 Magnezyum alaşımı numunelerin metalürjik özelliklerine olan etkilerini araştırmaktır. Bu çalışma için (Ø 35 mm x 10 mm) boyutlarında AZ91 Magnezyum alaşımı numuneler hazırlanmıştır. Numunelerin yarısı 5 saat süre ile 410°C sıcaklık değerindeki fırında homojenizasyon ısıl işlemine tabi tutulmuştur. Daha sonra bu homojenizasyon işlemi uygulanan ve uygulanmayan numuneler, yüzeylerinde sırasıyla 30 µm, 75 µm ve 100 µm kalınlık değerinde kaplama dokusu oluşturulmak maksadıyla, sabit voltaj değeri altında Mikro-Ark Oksidasyonu ile kaplama işlemine tabi tutulmuştur.

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizi ile numuneler üzerinde oluşturulan kaplama yüzeyinin karakteristiği incelenmiştir. SEM analizi sonuçları kaplama dokusunun kalitesi ve numune yüzeyine birleşme oranı hakkında fikir vermektedir. Çalışma sonuçları, homojenizasyon ısıl işleminin Mikro-Ark Oksidasyonu ile yüzey kaplama uygulamasına etkileri hakkında fikir vermektedir.

Yıl : 2015
Sayfa Sayısı : 47
Anahtar Kelimeler : Mikro-Ark Oksidasyonu (MAO), Magnezyum, Homojenizasyon

Master Thesis
Baturhan TATAR
Trakya University Institute of Natural Sciences
Mechanical Engineering Department

ABSTRACT

The purpose of the study is to examine the effects of homogenization and Micro-Arc Oxidation (MAO) coating processes on metallurgical properties of AZ91 Magnesium Alloy. (Ø 35 mm x 10 mm) AZ91 Mg-alloy samples were prepared for this study. Half of the samples were homogenized in the furnace for 5 hours at 410°C. Thence, the homogenized and the non-homogenized samples were coated with the use of Micro-Arc Oxidation (MAO) technique at fixed voltage degree to obtain 30 μm, 75 μm and 100 μm thickness in order.

The surface characteristics of the coated samples were examined by using scanning electron microscope (SEM). SEM analyzes demonstrated the attachment degree of the coating and the Magnesium samples. Results were examined to perceive effect of homogenization on MAO processes.

Year : 2015
Number of Pages : 47
Keywords : Micro-Arc Oxidation (MAO), Magnesium, Homogenization

TEŞEKKÜRLER

Araştırma konumun belirlenmesinden tezimin yayımlanmasına kadar geçen tüm süre içerisinde, hiçbir konuda varlığını esirgemeyen çok değerli hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Cenk MISIRLI'ya; akademik hayatımın başlamasına büyük ölçüde vesile olan sevgili ağabeyim Yrd. Doç. Dr. Volkan TATAR'a; yazım sürecindeki yardımlarından dolayı değerli arkadaşlarım M. Gökhan GÜNAY, Çiğdem DÖNERTAŞ ve Ahmet TATLI'ya; hayatımın hiçbir anında benden sevgilerini esirgemeyen annem Güler TATAR, babam Ramazan TATAR, ablam Yeşim Sultan TATAR'a ve öğrenim hayatımın en zor dönemlerinde bana aile olan Gül KÜÇÜKCAN ile Haydar KÜÇÜKCAN'a sonsuz teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Tez aşamasına gelinceye kadarki süreçte emeklerini asla esirgemeyen tüm hocalarıma; araştırma, deneyler ve basım aşamalarında doğrudan veya dolaylı olarak emeği geçen herkese teşekkürlerimi sunarım.

Baturhan TATAR

İÇİNDEKİLER

ÖZET i
ABSTRACT ii
TEŞEKKÜRLER iii
ŞEKİLLER LİSTESİ vi
TABLOLAR LİSTESİ vii
1. GİRİŞ 1
1.1. Magnezyum ve Magnezyum Alaşımları 3
1.1.1. Magnezyumun Genel Özellikleri 3
1.1.2. Magnezyum Alaşımları 5
1.1.2.1. Döküm Alaşımları 9
1.1.2.2. Şekillendirilen Alaşımlar 9
2. MAGNEZYUM ALAŞIMLARINA UYGULANAN ISIL İŞLEMLER 10
2.1. Magnezyum Alaşımlarına Uygulanan Isıl İşlemler 12
2.1.1. Tavlama (Annealing) İşlemi 13
2.1.2. Gerinim Giderme Tavlaması (Stress Relieving) 13
2.1.3. Solüsyona Alma Isıl İşlemi (Solution) 14
2.1.4. Su Verme (Quenching) 15
2.1.5. Doğal Yaşlandırma İşlemi (Natural Aging) 16
2.1.6. Suni Yaşlandırma İşlemi (Artificial Aging) 16
2.1.7. Stabilizasyon İşlemi 17
2.2. Isıl İşlemler İçin Ana Değişkenler ve Etkileri 18
2.2.1. Kesit Ölçüleri ve Isıl İşlem Süresi 18
2.2.2. Isıl İşlem Süresi ve Sıcaklık Değeri 18
2.2.3. Koruyucu Atmosfer Etkisi 19
2.2. Magnezyum Alaşımlarının Isıl İşlemleri İçin Ekipmanlar ve Süreç 19
2.3. Isıl İşlemlerde Ortaya Çıkabilecek Problemler ve Önlenmesi 21
2.3.1. Oksitlenme (Oxidation) 21
2.3.2. Çarpılmaların Oluşması (Warpage) 22

2.3.3. Birleşme Çizgileri (Fusion Voids) 22
2.3.4. Pürüzlenme (Germination) 22
2.3.5. Tutarsızlık Problemleri (Inconsistent Properties) 22
2.4. Magnezyum Alevi ve Önlenmesi 23
3. MİKRO-ARK OKSİDASYON TEKNİĞİ 25
3.1. Mikro-Ark Oksidasyon Tekniğinin Tarihçesi 25
3.2. Mikro Ark Oksidasyon Tekniğinin Uygulama Alanları 26
3.3. Mikro Ark Oksidasyon İşleminin Avantaj ve Dezavantajları 28
3.4. Donanım ve Yüzey Oluşumu 31
3.4.1. Elektrokimyasal Karakteristikler 33
3.4.2. Deşarj Karakteristiği 34
3.4.3. Kaplama Yüzeyinin Kalınlaşması Esnasında Faz Oluşumu 35
3.4.4. Kullanılan Güç Kaynakları 35
3.4.4.1. Doğru Akım Sağlayan Güç Kaynakları 36
3.4.4.2. Titreşimli Doğru Akım Sağlayan Güç Kaynakları 36
3.4.4.3. Dengelenmemiş Alternatif Akım Sağlayan Güç Kaynakları 37
3.4.4.4. Heteropolar Titreşimli Akım Sağlayan Güç Kaynakları 37
3.4.3. Elektrolitik Kompozisyonunun MAO Üzerine Etkileri 37
3.4.4. Kaplama İşleminin Uygulanabileceği Malzemeler 38
3.5. Yüzey Kaplamada Tespit İşlemi 39
3.5.1. Sıcak Uygulanan Tespit İşlemi (Hidrotermal) 39
3.5.2. Soğuk Uygulanan Tespit İşlemi (Emprenye) 39
4. DENEYSEL SÜREÇ 41
4.1 Giriş 41
4.2 Deney Süreci 41
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA 46
KAYNAKLAR 48
ÖZGEÇMİŞ 51

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil-3.1	MAO İşleminde Kullanılan Donanım	**32**
Şekil-3.2	Elektrot Yüzeyindeki Dielektrik Filminde Gerçekleşen Akım-Voltaj Değişimi	**34**
Şekil-4.1	Deney İçin Hazırlanan AZ91 Magnezyum Alaşımı Numunelerin Teknik Resmi	**41**
Şekil-4.2	Homojenizasyon İşlemi İçin Kullanılan Fırın	**42**
Şekil-4.3	Mikro Ark Oksidasyonu İçin Hazırlanan Banyo ve Ünite Rezistansı	**43**
Şekil-4.4	Homojenize Edilmemiş Halde MAO Sürecine Tabi Tutulan AZ91 Magnezyum Alaşımı Numuneler	**43**
Şekil-4.5	Homojenize Edilen ve Daha Sonra MAO Sürecine Tabi Tutulan AZ91 Magnezyum Alaşımı Numuneler	**44**

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo-1.1	Magnezyumun Fiziksel Ve Mekanik Özellikleri	**4**
Tablo-1.2	Magnezyum Alaşımlarında Yer Alan Elementlerin Harf Kodları	**6**
Tablo-1.3	Magnezyum Alaşımlarının Tabi Tutulduğu İşlemler ve Kodları	**8**
Tablo-1.4	AZ91 Magnezyum Alaşımının Kimyasal Bileşimi	**9**
Tablo-4.1	SEM Analizi Sonuçları	**45**

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Yaygın olarak kullanılan metaller içerisinde açık şekilde en hafifi olan magnezyum (1,738 g/cm^3), öz kütlesinin düşük olmasına rağmen özellikle alaşımlarıyla birlikte iyi seviyede dayanıklılık değerlerine sahip olmakta ve çok iyi seviyede işlenebilirlik özellikleri göstermektedir. Ses absorbsiyonu ve darbe emici karakteristiği yine magnezyumun öne çıkan özelliklerindendir. Bu özellikleriyle son derece dikkat çekici hale gelen magnezyum alaşımları; otomotiv, uzay ve iletişim teknolojilerinin yükselen ve vazgeçilmez bir hammaddesi olarak karşımıza çıkmaktadır. [1,2] Özellikle otomotiv endüstrisinde magnezyum alaşımlarının kullanım alanı hızla genişlemektedir ve bu alaşımların mukavemet değerlerini artırmaya olan gereksinim birçok çalışmayı beraberinde getirmektedir. Örneğin düşük sürünme direnci kısıtlayıcı bir faktör olarak karşımıza çıkmaktadır. [3] Homojenizasyon süreci ile magnezyum alaşımlarının metalürjik ve mekanik özelliklerinde iyileşme sağlanması amaçlanmaktadır.

Magnezyumun korozyona karşı hassasiyeti ise, magnezyum alaşımlarının yüzey kaplama işlemlerine tabi tutulmasını şart koşmaktadır. Şimdiye kadar magnezyum alaşımlarının korunması amacıyla birçok yüzey modifikasyon tekniği uygulanmıştır. Bunlardan geleneksel Anodik Oksidasyon tekniğini temel alarak Alüminyum, Titanyum ve Magnezyum gibi metal malzemelerin yüzeylerinde seramik bir kaplama oluşturan Mikro-Ark Oksidasyon (MAO) tekniği; diğer bir adıyla Plazma Elektrolitik Oksidasyon (PEO) veya Anodik Kıvılcımlı Çökertme (ASD), yeni ve son derece ilham verici bir yüzey modifikasyonu olarak karşımıza çıkmaktadır. MAO tekniğinin kullanılmasıyla, magnezyum alaşımlarının abrazyon ve korozyon dayanımı ile mikrosertliği gibi yüzey özellikleri son derece geliştirilebilir. [4]

MAO, geleneksel Anodik Oksidasyon tekniğinin temel alındığı, hafif metallerde seramik kaplama yüzeyleri oluşturmak için anodik voltajı uygun bir elektrolitik çözelti içerisinde deşarj uygulamalarıyla yükseltmek suretiyle yapılan bir yüzey kaplama

tekniğidir. Bu yöntem; oksit film oluşumu, dielektrik dayanımın kırılması, oluşan geçici filmin bozunması ve anodik gaz döngüsü gibi ardışık uygulamaların sentezlenmesini gerektirdiğinden karmaşık bir süreçtir. Dolayısıyla elde edilen başarılı bir kaplama, tüm bu alt süreçlerdeki kısmı başarılara son derece bağımlıdır. Numune metalin doğası, elektrolitik çözeltinin bileşenleri ve derişikliği, uygulanan akımın yoğunlu gibi faktörler süreç için kritik değişkenlerdir. Enerji yönünden ise MAO süreci, mikro-ark deşarj kanallarında meydana gelen plazma – kimyasal, elektrokimyasal ve termokimyasal reaksiyonları barındıran yüksek enerji sarfiyatlı bir uygulanmadır. Mikro düzeyde bir bölgede anlık sıcaklığın çok yüksek seviyelere çıkmasıyla, oksit dokunun noktasal düzeyde ergimiş metal yüzeyine tutunması sonucu MAO süreci sonuçlanmış olur. Bu şartlar altında katılaşmış seramik benzeri doku, doğrudan metal yüzeyiyle bütünleşmiştir. [5]

Magnezyum alaşımlarının yüzey niteliklerini geliştirmek için, elektokimyasal kaplama, anodlama, fiziksel buhar biriktirme (PVD) ve kimyasal buhar çökeltme (CVD) vb. gibi daha birçok yöntem bulunmaktadır. [6] Tüm bu yöntemler arasında Mikro-Ark Oksidasyon tekniği (MAO), magnezyum alaşımları için en umut verici yüzey modifikasyonu olarak kabul görmektedir. Bu yöntemle oluşturulan kaplamalar yüksek direnç ve sertlik göstermektedirler. Fakat uygulama için uygun çözelti karakteristiği belirlenmez ve uygun numune yüzeyi hazırlanmaz ise, kaplama dokusu kolayca çatlamakta ve yüzeyden ayrılmaktadır. Bu hadiseler de magnezyum alaşımını korunmasız hale getirmektedir. Kaplama dokusunun numune metalden farklı olması nedeniyle, numune metale homojenizasyon uygulanması daha uygun bir zemin yaratmakta ve daha yüksek bağlanma sağlanabilmektedir. [7]

Bu çalışmada homojenizasyon ve Mikro-Ark Oksidasyon kaplama yöntemleri uygulanarak, AZ91 Magnezyum alaşımının en verimli şekilde kaplanması sağlanmaya çalışılmıştır.

1.1. Magnezyum ve Magnezyum Alaşımları

1.1.1. Magnezyumun Genel Özellikleri

İçerisinde alüminyum, potasyum, lityum, titanyum, magnezyum ve berilyum vb. metallerini bulunduran; özgül ağırlıkları 3.8 g/cm^3'den küçük olan metal grubu, "hafif metaller" terimiyle ifade edilmektedir. Bu metaller, iletişim sektöründen otomotiv endüstrisine ve uzay teknolojisine kadar teknik alanda çok geniş bir yelpazede kullanım alanı bulmaktadır. Hafif metallerden özellikle alüminyum ve magnezyum günümüz endüstrisinde dikkat çekici bir yere sahiptir ve önemleri her geçen gün artmaktadır. Magnezyum ise bu metaller içerisinde 1,738 g/cm^3'lük öz kütlesi ile en hafif yapısal metal olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu değerdeki özgül ağırlığı ile magnezyum; alüminyumdan % 36, çelikten ise % 78 oranında hafiflik avantajı sağlamaktadır. [8,9]

Magnezyum ve magnezyum alaşımlarının günümüz endüstrisine sağladığı avantajları ve dezavantajlı yönlerini şu şekilde sıralayabiliriz. Magnezyum alaşımlarının avantaj sağlayan yönleri:

- Yüksek seviyede spesifik dayanım kapasitesi,
- İyi dökülebilirlik, yüksek basınçlı kalıp dökümlere uygunluk,
- Yüksek hızlarda torna ve frezede işlenilebilirlik,
- Kontrollü atmosfer şartlarında iyi kaynak yapılabilirlik,
- Yüksek saflık derecesindeki magnezyum kullanılarak çok iyi korozyon direnci elde edilebilir,
- Kolay elde edilebilirlik,
- Ses absorbsiyon özelliği,
- Polimer malzemelerle kıyaslandığında ise;
    - Daha iyi mekanik özellikler,
    - Yaşlanmaya karşı direnç,
    - Daha iyi elektriksel ve termal iletkenlik,
    - Geri dönüştürebilirlik,

Magnezyum ve alaşımlarını günümüz teknolojisinde göz alıcı hale getiren avantajları bir yana, kullanım alanlarını kısıtlayan dezavantajları da aşağıdaki maddelerle sıralanabilir:

- Düşük elastisite modülü,
- Sertlik ve düşük soğuk işlenebilirlik,
- Yüksek sıcaklıklarda düşük yükleme kapasitesi ve sürünme direnci,
- Katılaşma sürecinde yüksek büzülme oranı,
- Yüksek kimyasal reaktivite,
- Bazı uygulamalarda düşük korozyon direnci,

Magnezyum elementi, manyetik özellik göstermez ve hegzagonal sıkı paket halinde kafes yapıya sahiptir. Ergime sıcaklığının düşük olması (649 °C) bu kafes yapısından kaynaklanmaktadır. [9] Magnezyumun fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo–1.1'de sunulmuştur.

Tablo – 1.1. Magnezyumun Fiziksel Ve Mekanik Özellikleri [10]

Özellik	**Değeri**
Kristal Yapısı	HCP
Ergime Sıcaklığı (°C)	649
Kaynama Sıcaklığı (°C)	1090
20 °C'de Elektriksel Özdirenci (Mω.Cm)	4.2
Isıl Elektromotif Kuvvet (0 – 100 °C) / Mv	0.44
Standart Redüksiyon Potansiyeli / Mv	-2.37
Sertlik (HV)	30 – 45 (Yumuşak-sert)
Gerilme Direnci (Mpa)	185 – 232 (Yumuşak-sert)
Akma Dayanımı (Mpa)	69 – 100 (Yumuşak-sert)
Poisson Oranı	0.291
Gerilme Modülü (Gpa)	44.7
Lineer Genleşme Katsayısı 0 – 100 °C'de (1/K)	26×10^{-6}
Özısısı 25 °C'de (J/K.Kg)	1020
Isıl İletkenlik (W/m.K)	156

1.1.2. Magnezyum Alaşımları

Magnezyum alaşımlarından üretilen malzemeler genel olarak dökme ve şekillendirilmiş (profil, sac, vb.) alaşımlar olarak sınıflandırılmaktadır. Magnezyum alaşımları en geçerli haliyle "ASTM (American Society for Testing and Materiels)" normlarına göre isimlendirilmektedir. ASTM dışında "Dow Chemical Company" ve "Alcoa (Aluminum Company of America)"nın öngördüğü adlandırmalar genellikle ASTM işaretlemesinin yanında gösterilir. Dowmetal, dow alaşımlarının hepsine verilen addır ve bu bileşimler bir dizi harfle gösterilir. Alcoa'da ise; dökme alaşımları nitelemek için bir dizi rakam, şekillendirilmiş alaşımlar için de bir dizi rakamın başında "S" harfi kullanılır. Alcoa alaşımları isimlendirilirken "AM" öntakısına yer verilir. Şekillendirilmiş alaşımlarda saflığı bozan elementlere ait özellikle kontrollü sınırları belirtmek için, Dow sisteminde "1" sontakısı kullanılır. Alcoa sisteminde ise "C" harfi, "AM" öntakısından sonra araya eklenerek bu elementler belirtilir.

ASTM sisteminde saf magnezyum elementi ifade edilirken, asgari safiyeti ifade eden rakamlara yer verilir ve bu rakamlar belirtilirken ondalık ifadesi virgül veya nokta kullanılmaz. Bu sistemde rastgele seçilmiş bir harf, değişik saflık gereksinimlerine bağlı olan aynı saflıktaki dereceleri ayırmak için eklenir. Örnek olarak % 99.8 saflıktaki Mg, 9980 A ile gösterilmektedir.

Magnezyum alaşımlarının ASTM gösterilişinde magnezyumla alaşım oluşturan elementlerinden büyük miktarlarda yer alanları, iki harf kullanılarak temsil edilirler. Bu harfler yüzde oranlarına, eşit yüzdelerde ise alfabetik sıraya göre isimlendirmede yer bulurlar. Bu harfleri sırası ile tam sayıya yuvarlanmış yüzde oranı rakamlar izlemektedir. Alaşım içerisinde yer alan bir metalin yalnızca bir harf ile gösterilebilmesi için, yine ASTM tarafından bir kod tablosu oluşturulmuştur. Bu kod tablosunda elementi temsil eden harf, o elementin periyodik cetvelde kullanılan kimyasal kısaltmasından farklı olmaktadır. Örneğin "kadmiyum" elementinin kimyasal kısaltması "Cd" olarak bilinir; fakat alaşım içersinde bir harf ile temsil edilirken, "D" harfi kullanılır. ASTM tarafından belirlenen bu kısaltmalar Tablo–1.2'de sunulmuştur:

Tablo – 1.2. Magnezyum Alaşımlarında Yer Alan Elementlerin Harf Kodları

Element Adı	Mg Alaşımlamasındaki Kodu
Alüminyum (Al)	A
Bizmut (Bi)	B
Bakır(Cu)	C
Kadmiyum (Cd)	D
Nadir Bulunan Toprak Metalleri	E
Demir (Fe)	F
Toryum (Th)	H
Zirkonyum (Zr)	K
Berilyum (Be)	L
Manganez (Mn)	M
Nikel (Ni)	N
Kuşun (Bb)	P
Arsenik (As)	Q
Krom (Cr)	R
Silisyum (Si)	S
Kalay (Sn)	T
Çinko (Zn)	Z

Bu yol izlenerek isimlendirme işlemi yapıldığında iki farklı alaşım için aynı kodlama sonucuna varıldığında ise, alfabetik sıraya uygun olarak keyfi bir harf sona eklenir. Dowmetal H'nin bileşimi ve isimlendirmesi örnek olarak verilebilir: Bu alaşım % 6 Al ve % 3 Zn elementlerini büyük oranlarda içermektedir ve geriye kalan magnezyumun saflığını az bir Mn, minimum ölçüde bozmaktadır. Sonuç olarak bu alaşım AZ 63 A olarak isimlendirilmektedir. Aynı şekilde Dowmetal FS1'in örneklenmesi, sontakıları kullanmanın örneklenmesi açısından faydalı olacaktır: Bu alaşım % 3 Al ve % 1 Zn elementleri içermektedir. Bu alaşımda yer alan magnezyumun saflığını bozan çok az ölçüde manganez ve küçük bir sınır ile belirlenmiş kalsiyum elementleri bulunmaktadır. Sonuç olarak alaşım AZ 31 A şeklinde kodlanmıştır. "A"

sontakısın kullanımı bu alaşımı, aynı bileşimi içeren fakat kalsiyum için belirtilmiş bir sınır faktörü bulunmayan diğer bir AZ 31 B alaşımından ayırmayı sağlamaktadır.

Magnezyum elementi temel alınarak alaşım elde edilirken, muhakkak ki alaşımlama elementlerinin etkileri titiz biçimde incelenmelidir. Beklentiler doğrultusunda alaşım içerisindeki kütle oranlarının hesaplanması ikinci aşamada önem kazanmaktadır. Genel etkileri itibariyle alaşım elementlerinin özellikleri şu hatlarla sıralanabilir:

Alüminyum: Alaşım elementleri içerisinde en önemli yer hiç şüphesiz, yine bir hafif metal olan alüminyum elementidir. Alüminyum, magnezyum alaşımında yer aldığı zaman dökülebilirliği iyileştirici etki yapar ve katı eriyik içerisinde sertleştirici olarak yer alır. Diğer bir olumlu etkisi ise magnezyum alaşımında yer alan alüminyumun, alaşımın donma aralığını uzatarak dökülebilirliğini kolaylaştırmasıdır. Alüminyumun kütle oranı % 6 seviyelerinde en verimli etkileri sağlamaktadır ve nadiren % 10'un üzerinde alaşımlama yapılmaktadır.

Çinko: Diğer bir önemli element olan çinko ise ergimiş alaşımın akışkanlığını artırır ve çökelme sertleşmesi esnasında malzemenin dayanımını artırmaktadır. Çinko aynı zamanda magnezyum alaşımlarında, demir ve nikel safsızlığından kaynaklanan korozyonun önüne geçebilmektedir.

Zirkonyum: Zirkonyum elementi etkili bir tane inceltici olarak görev yapar ve çekme mukavemet değerlerini artırır. Fakat zirkonyum, alüminyum ve manganeze karşı hassas olduğundan bu elementleri içeren alaşımlamalarda kullanılamaz.

Kalsiyum: Kalsiyum elementi yine etkili bir tane incelticidir ve ergimiş haldeki alaşımın oksidasyonunu önlemektedir. Kalsiyum magnezyumun sürünme dayanımını iyileştirmektedir. Fakat kalsiyum çok hassas ölçülerde eklenebilir ve genellikle % 0.3 seviyesini geçmez.

Toryum: Toryum elementi alaşımlamada yer aldığında mikroporoziteyi önlemektedir, ayrıca yüksek sıcaklıklarda sürünme ve çekme değerlerinde iyileştirici rol oynamaktadır.

Silisyum: Silisyum elementi dökülebilirliği artırmakta ve sürünme dayanımını iyileştirmektedir. Fakat demir içeren alaşımlamalarda korozyon dayanımını azaltmaktadır.

Gümüş: Gümüş, yüksek sıcaklık değerlerinde sürünme ve çekme dayanımlarını artırmaktadır. Yaşlandırma ısıl işleminin etkilerine büyük katkı sağlamaktadır.

Demir: Magnezyum alaşımlarında korozyon açısından en zararlı etkilere sahip metallerdendir. % 0.005 seviyesi tavsiye edilen en yüksek orandır.

Nadir bulunan elementler: Yüksek sıcaklıklarda kullanım için, nadir bulunan metallerin magnezyum alaşımlarına eklenmesi mukavemet artırıcı etki göstermektedir. Ayrıca kaynaklamada çatlamaları azaltıcı etki göstermektedir ve poroziteyi azaltmaktadır.

Magnezyum alaşımlarının ifadesinde, alaşıma uygulanan ısıl işlemler de çeşitli harf ve rakamlarla sembolize edilir ve bu kodlamalar bir "tire (–)" işareti ile alaşım gösterilişinden ayrılır. Bu işlemler ve kodları örneklem olarak Tablo–1.3'de sıralanmaktadır:

Tablo – 1.3. Magnezyum Alaşımlarının Tabi Tutulduğu İşlemler ve Kodları

Simge	**Alaşıma uygulanan işlem**
F	İmalâttan çıktığı gibi
T2	Stabilize (homojenize edilmiş) veya tavlanmış
T4	Eriyik ısıl işlemi görmüş
T5	Yaşlandırılmış
T6	Eriyik işlemi ve yapay yaşlandırma görmüş
O	Tavlanmış (sadece şekillendirilmiş ürünler için)
H24	Sert haddelenmiş saç

"F" ifadesi; haddelenmiş, dökülmüş, çekilmiş, vb. gibi imalat sonrası direkt sunulan ürünleri ifade etmek için kullanılır. Ürün bu işlemlerden başka bir uygulamaya tabi tutulmamış ise bu işaret genellikle kullanılmaz. [11,12] Tez çalışmasında incelenecek olan Magnezyum alaşımının kimyasal içeriği Tablo–1.4'de sunulmuştur:

Tablo – 1.4. AZ91 Magnezyum Alaşımının Kimyasal Bileşimi [13]

Al (%)	Zn (%)	Mn (%)	Cu (%)	Fe (%)	Pb (%)	Ni (%)
7.8	0.78	0.3	0.017	0.04	0.007	0.017

1.1.2.1. Döküm Alaşımları

İyi döküm özellikleri sergileyen, yüksek mukavemet değerlerine sahip ve 95°C'ye kadar stabil mekanik özellikler sergileyen birinci grup alaşımlar, alaşım elementi olarak alüminyum ve çinko içermektedirler.

Mükemmel basınç sızdırmazlığı sağlayan dökümler içinse, nadir toprak metalleri ve zirkonyum içeren alaşımlar kullanılmalıdır. Bu alaşımlar 260°C'ye kadar iyi seviyede sürünme direnci gösterirler.

İyi bir basınç sızdırmazlığının yanı sıra, mükemmel kaynak edilebilme imkanı sağlayan magnezyum alaşımları için, zirkonyum ve çinko elementlerinin kullanılması gerekmektedir.

1.1.2.2. Şekillendirilen Alaşımlar

Şekillendirilen magnezyum alaşımları; tel, boru, profil veya çubuk olarak çekilebilirler. Sac veya levha elde etmek amacıyla haddeleme işlemi yapılabilir. Bu alaşımlar 200 – 370°C sıcaklık aralığında kolaylıkla şekillendirilebilirler. Pres veya şahmerdanla bu magnezyum alaşımları rahatlıkla dövülebilmektedir. [11, 12]

BÖLÜM 2

MAGNEZYUM ALAŞIMLARINA UYGULANAN ISIL İŞLEMLER

Magnezyum alaşımlarının hafifliklerine oranla vaat ettikleri iyi seviyedeki mekanik özellikleri, bu alaşımlara otomotiv sektöründen uzay teknolojisine çok geniş bir alanda kullanım olanağı sağlamaktadır. Hafif metaller içerisindeki yakın rakibi alüminyum ile kıyaslandığı zaman, magnezyum alaşımlarının dayanımları alüminyum alaşımlarına göre düşük seviyelerde kalmaktadır. Fakat "özgül dayanım (dayanım/kütle)" söz konusu olduğunda, magnezyum alaşımları daha yüksek oranlara sahip olabilmektedir. [14]

Magnezyumun hafifliğini temel olan olumlu yönleri her ne kadar göz doldursa da, kullanım alanını kısıtlayan dezavantajlı yönlerini irdelemek ve iyileştirme çalışmalarını araştırmak gerekmektedir. Magnezyum alaşımlarının tüm teknolojik alanlarda kullanımını kısıtlayan faktörler, başlıca üç temel sebebe dayandırılabilir: Birinci sebep magnezyumun temel kafes yapısından kaynaklanmaktadır. Sıkı paket hegzagonal kafes yapısına sahip olan magnezyum atomları, bu yapı sebebiyle düşük ergime sıcaklığını haiz olmaktadır. Aynı şekilde kısıtlı süneklik, sertlik ve sürünme direnci vaat edebilmektedir. İkinci sebep olan magnezyumun düşük korozyon direnci yine kısıtlayıcı bir faktör olarak kullanım alanlarını daraltmaktadır. Korunma sağlanmamış magnezyum alaşımları, sulu çözeltilerde çabucak çözülebilmektedir. Üçüncü kısıtlayıcı faktör ise ekonomik sebeplere dayanmaktadır. Pahalı bir metal olmasa bile alüminyum ve polimer malzemeler gibi ikamesi malzemelerle kıyaslandığında, hala daha yüksek maliyetlerle karşılaşılmaktadır. [10]

Magnezyum elementinin saf olarak kullanımı çok kısıtlıdır ve alaşımlama yoluyla mekanik ve metalürjik özelliklerinde büyük oranda iyileşme sağlanmaktadır. Magnezyum alaşımlarının dayanım özelliklerinin artırılmasında diğer öne çıkan işlemler ise tane boyutunun küçültülmesi, pekleşme gibi işlemlerdir. Alaşımlama çok olumlu etkiler gösterir, fakat alaşımlama yoluyla iyileştirilen mekanik özellikleri yine de

magnezyumu soğuk şekillendirmeye elverişli hale getirmez. Magnezyum alaşımlarına uygulanabilecek soğuk şekillendirme çok sınırlı boyutlarda kalabildiğinden dolayı, ısıl işlemler bu alaşımlar için kaçınılmaz hale gelmektedir.

Magnezyum alaşımlarına uygulanan ısıl işlemler, malzeme üzerine ASTM B – 7 komitesi tarafından belirlenen standart harf – rakam kodlarına uygun olarak belirtilirler. Magnezyum alaşımları için belirtilen bu ısıl ve mekanik işlemler, alüminyum alaşımlar için kullanılan kodlara büyük ölçüde benzerlik göstermektedirler.

Bu kodlar;

F: Üretildiği haliyle

O: Tavlanmış, yeniden kristalleştirilmiş (yalnızca dövme ürünler)

H: Gerinim sertleştirmesi uygulanmış

H kodunun alt işlemleri:

H1: Sadece gerinim sertleştirmesi uygulanmış

H2: Gerinim sertleştirmesi uygulanmış ve kısmen tavlanmış

H3: Gerinim sertleşmesi uygulanmış ve kararlı hale getirilmiş

W: Solüsyona alma ısıl işlemi ve kararsız temperleme

T: Kararlı temper bir yapı sağlamak için yapılan F, O veya H uygulamalarından farklı termal işlemleri gösterir.

T 1: Soğutulmuş ve doğal olarak yaşlandırılmış.

T 2: Tavlanmış (yalnızca döküm ürünler)

T 3: Solüsyona alma ısıl işlemi yapılmış ve soğuk işlenmiş

T 4: Solüsyona alma ısıl işlemi yapılmış

T 5: Soğutulmuş ve suni olarak yaşlandırılmış.

T 6: Solüsyona alma ısıl işlemi uygulanmış ve suni olarak yaşlandırılmış.

T 7: Solüsyona alma ısıl işlemi uygulanmış ve kararlı hale getirilmiş.

T 8: Solüsyona alma ısıl işlemi uygulanmış, ardından soğuk işlenmiş ve suni olarak yaşlandırılmış.

T 9: Solüsyona alma ısıl işlemi uygulanmış, ardından suni olarak yaşlandırılmış ve sonra soğuk işlenmiş

T 10: Soğutulmuş, daha sonra suni olarak yaşlandırılmış ve soğuk işlenmiş [11]

2.1. Magnezyum Alaşımlarına Uygulanan Isıl İşlemler

Magnezyum alaşımlarının ısıl diyagramları incelendiği zaman, magnezyum elementi yönünden zengin ve element yaygınlığı sıcaklık ile doğru orantılı bir eriyik karakteristiği ile karşılaşılmaktadır. Dolayısıyla su verme işlemi ve içyapısal çökelme ile alaşımın özelliklerini iyileştirme olanağı ön plana çıkmaktadır. Magnezyum alaşımlarına uygulanan termal işlemler; ötektik sıcaklığın biraz altındaki sıcaklıklarda solüsyona alma, su verme işlemi ve doğal veya suni yaşlandırma prosedürlerinden biri veya birkaçının birlikte uygulanmasını kapsamaktadır. Fakat magnezyum alaşımlarına uygulanan bu ısıl işlemler, alüminyum esaslı alaşımlara uygulandıklarında gösterdikleri etkinliği tam anlamıyla gösterememektedirler. Bu yüzden magnezyum alaşımlarının ısıl işlemleri daha az genelleşmişlerdir. Yaygın olarak kullanılan Mg – Al ve daha yaygın olarak kullanım olanağı bulan Mg – Al – Zn alaşımları, aşağıda belirtilen kriterler ölçüsünde ısıl işlemlerden verim alabilmektedirler.

Mg – Al alaşımları için: % 7 < Al kütlesi < % 12

Mg – Al – Zn alaşımları için:% 7 < Al + Zn kütle toplamı < % 13 ve Al kütlesi ≥ % 5 [12]

Bir Mg – Al alaşımında oluşan kristal yapıların tam anlamıyla katı eriyik fazına geçmesini sağlamak amacıyla, gereken derecede yüksek bir sıcaklık değerinde uzunca bir süre ısıtılmasının ardından hava ortamında soğutulma sağlanırsa; soğuma hızı kararlı halde kalan homojen fazla doymuş katı eriyiği oda sıcaklığında tutabilmek için çoğunlukla yeterli olur. Alaşım için "homojenize – stabil durumdadır" ifadesi kullanılır. Bu işlem sonucunda, yorulma sınırında yükselme ve elastik sınır ile sertlik değerlerinde hafif bir artış söz konusu olur. Magnezyum alaşımlarının ısıl işlemlere tepkisi genel olarak bu kaidelere göre gerçekleşmektedir ve alaşımlara uygulanan ısıl işlemleri sırasıyla incelemekte fayda vardır:

2.1.1. Tavlama (Annealing) İşlemi

Öncesinde soğuk işlem uygulanmış olan parçalarda gerinim sertleşmelerini yumuşatmak veya ısıl işlemlere tabi tutulan parçalarda oluşan gerilimi almak, parçaların mekanik özelliklerini ve parça boyutlarını stabil hale getirmek amacıyla uygulanan ısıl işlemdir. Dövme magnezyum alaşımları bir veya birkaç saat süreyle 250 – 400 °C sıcaklık değerleri arasında tavlama işlemine tabii tutulurlar.

Homojenize edilmiş ve stabil hale gelmiş olan magnezyum alaşımları 150 °C civarı bir sıcaklıkta uzun süreli bir meneviş işlemine tabi tutulurlar. Bu işlem malzeme içerisindeki katı eriyiğin ayrışmasına neden olur ve aşırı doymuş halde bulunan bileşim bölgesinin içyapısal çökmesi gerçekleşir. Bu uygulama sonucunda alaşım tavlanmış olur. Tavlama bir tamamlayıcı işlem olarak parçanın kopma mukavemeti, sertliği ve elastik sınırı üzerinde artırıcı etki yaratır. Bu olumlu etkilerine karşın kopma uzaması ve yorulma sınırını azaltır. Hatta bazı durumlarda dökme parçaların bu özelliklerini, dökümden çıkmış hallerinin altına bile çekebilir.

Homojenize edilme ve stabilizasyon işlemleri genellikle döküm parçalara uygulanmaktadır. Nadiren tamamlayıcı tav işlemine başvurulur. Şekillendirilmiş ürünlerde ise genelde bir yeniden kristalleştirme ve gerinim giderme tavlaması işlemleri uygulanır.

2.1.2. Gerinim Giderme Tavlaması (Stress Relieving)

Sıcak veya soğuk işlemeyle, şekillendirmeyle, doğrultma veya kaynaklama gibi her türlü üretim yöntemiyle dövme magnezyumdan elde edilen malzemelerde gerinim giderme tavlaması, işlem sonucu parça içerisinde mevcut kalan artık gerilmeleri gidermeyi veya asgari seviyelere indirgemeyi sağlamaktadır. 150 – 350 °C sıcaklık aralığında maksimum 2 saat süreyle dövme magnezyum alaşımlara gerinim giderme tavlaması uygulanmaktadır.

Dökme alaşımlarda ise boyut ölçülerine hassas şekilde bağlı kalmak, distorsiyonun ve çarpılmaların önüne geçmek ve kaynaklama magnezyum – alüminyum alaşımlarında korozyon çatlaklarına sebebiyet vermemek amaçlarıyla gerinim giderme tavlaması kaçınılmaz hale gelmektedir. Aslında dökme magnezyum alaşımlarında yüksek seviyelerde artık gerilme gözlenmemektedir. Fakat magnezyum alaşımlarının

düşük elastisite modülünden dolayı, küçük gerilmeler bile göze batar hale gelebilmektedir. Dökme alaşımlar için gerinim giderme tavlaması 250 – 350 °C sıcaklık aralığında maksimum 2 saat süreyle tatbik edilmektedir.

2.1.3. Solüsyona Alma Isıl İşlemi (Solution)

Solüsyona alma ısıl işlemi neticesinde magnezyum alaşımlarının dayanımları artmakta, maksimum sertlik ve darbe dayanımı değerlerine erişilebilmektedir. Solüsyona alma ısıl işlemi, ergime ve istenmeyen yeniden kristalleşme sürecine mahal vermeden alaşım içerisinde yer alan elementleri tamamen katı fazda çözeltiye almayı amaçlamaktadır. Bu işlem solvus eğrisi değerlerinin üzerindeki bir sıcaklıktan, hadde ya da ekstrüzyon işlemi esnasında alaşımın çok hızlı bir şekilde soğutulmasıyla veya diğer bir fırın içerisinde sonradan solüsyona alma işlemi uygulanarak yapılır. Solüsyona alma işlemi solvus ve solidus değerleri arasında büyük farklar olan malzemeler için uygunluk göstermektedir. Magnezyum alaşımları için solüsyona alma işleminde sıcaklık aralığı 340 °C – 560 °C değerleri arasında değişim göstermektedir. Uygulama için sahih sıcaklık değerinin tespit edilmesi, alaşımın metalürjik yapısına ve malzeme için arzu edilen özelliklere bağlıdır. Solüsyona alma ısıl işleminin uygulama süresi ise 16 ila 24 saat arasında değişmektedir.

Solüsyona alma ısıl işleminin pratik uygulamaları incelendiğinde, mükemmel mekanik özelliklere erişilemediği fakat istenilen yüksek seviyelerin elde edildiği görülmektedir. Mükemmel teorik değerleri, bu işlem esnasında karşılaşılan tane büyümesi ve yeniden kristalleşme hadiseleri engellemektedir. Isıl işlem uygulanabilen magnezyum alaşımlarından bu istenilen değerleri elde edebilmek ve solüsyona alma işlemini optimum ölçüde uygulayabilmek için, diğer biz dizi ısıl ve mekanik uygulamanın titiz bir biçimde takip edilmesi gerekmektedir. Tüm bu süreç ile amaçlanan, alaşımlamaya bağlı olarak meydana gelen çeşitli çökeltilerin dağılımlarını ve boyutlarını kontrol edebilmektir. Bu sayede alaşım malzemesindeki çözünebilen çökeltiler tekrar kontrolsüz olarak oluşmadan katı eriyik içersine alınabilmektedir.

2.1.4. Su Verme (Quenching)

Su verme ısıl işlemi adını, alaşımlama ile üretilen parçaların mümkün olan en kısa sürede soğutulmasını amaçlayan sıvı içerisine daldırma prosesinden almaktadır. Solüsyona alma işlemine tabi tutulan parçaların mümkün olan en kısa zamanda istenmeyen kısmi çökelmeler katı eriyik içerisinde oluşmadan fırından alınarak su verme tanklarına batırılması gerekmektedir. Su verme işlemi, ani olarak soğutulma sayesinde alaşım elementlerinin parça içerisinde kontrolsüz olarak çökelmesini engeller veya en azından geciktirir. Bu işlem sayesinde alaşım elementlerinin homojen halde katı eriyikte kalması sağlanmış olur. Eğer bu etki sağlanamaz ve kontrolsüz çökelmelere mahal verilirse, parçanın mekanik özellikleri ve korozyona karşı direnci olumsuz etkilenir.

Dövme alaşımların genelinde su verme işlemi, parçanın tamamının suya daldırılması yoluyla yapılır ve bu işlem için çoğunlukla 40 °C'nin altındaki sıcaklıklar tercih edilir. Fakat bazı metaller, özellikle hafif metal alaşımları için 60 – 100 °C sıcaklık aralığında sıcak suya daldırma işlemi tercih edilebilir. Su verme tankı için yapılan bu tercih, soğuk suyun seçiminde meydana gelebilecek olan aşırı çarpılmayı azaltabilir ve malzemenin iç gerilimini minimum seviyelere çeker. Magnezyum alaşımlarında daldırma işlemi için eğer sıvı kullanılacaksa, 60 °C'lik daldırma suyu sıcaklığı çoğunlukla tercih edilir. Fakat magnezyum alaşımlarını diğer hafif metal alaşımlarından ayıran belirgin bir ısıl özellik söz konusudur: Magnezyum alaşımlarının difüzyon süreleri uzundur ve dolayısıyla faz dönüşümleri de yavaş gerçekleşir. Bu sebeple magnezyum alaşımları için genellikle havada soğutma süreci tercih edilir. Sıvı kullanılmadan yapılan bu işlem sonucunda parçalar sertleştirilmeden pekleştirilebilirler. Magnezyum alaşımlarında çoğu alaşım dökümleri, bu hava ortamında soğutma işlemine tabi tutulurlar.

Su verme ısıl işlemi sürecinde ve sonrasında, parçadan istenen özellikler doğrultusunda birçok ayrıntıya dikkat etmek gerekmektedir. İşleme tabi tutulan parça üniform yapısal özellik taşımayabilir ve bu yüzden su verme işlemi, parça üzerinde belirli noktalarda çatlamalara sebep olabilecek artık gerilmelere yol açabilir. Bunun önüne geçebilmek için tank içerisinde sıcak su kullanılmalıdır. Parçanın mekanik özellikleri yanı sıra görünüm olarak da iyi seviyede olması isteniyor ise, su verme

sıvısının kalitesine sürekli dikkat etmek gerekmektedir. Kirli veya sert su, tortulara ve lekelere sebep olabilir. Su verme işleminden sonra parça temiz su ile de yıkanabilir ve kurutulur.

2.1.5. Doğal Yaşlandırma İşlemi (Natural Aging)

Yaşlandırma işlemi, magnezyum alaşımlarının mekanik ve metalürjik özelliklerinde diğer bir hafif metal olan alüminyum alaşımlarına göre çok daha kısıtlı bir etki yaratmaktadır. Doğal yaşlandırma işlemi magnezyum alaşımlarının niteliklerinde ve içyapısında değişim yaratmayabilir.

Magnezyum alaşımlarından T4 koşulunu sağlayan alaşımlar çok yavaş bir yaşlandırma sürecine oda sıcaklığında maruz bırakılabilirler. Örnek olarak AZ63 – T4 alaşımının 5 yıl süren ve 22 - 32 °C sıcaklık değerleri arasında seyreden doğal yaşlandırma süreci incelendiği zaman; akma mukavemetinin % 68, çekme değerinin % 14 ve Brinell sertliğinin de % 22 oranlarında arttığı görülmektedir. Bu süreç sonucunda sünekliği % 32 civarında ve darbe dayanımı % 57 oranında azalmıştır.

2.1.6. Suni Yaşlandırma İşlemi (Artificial Aging)

Magnezyum alaşımlarının sertleştirilme işlemi esnasında ısıl etkiyle, fazla doymuş bir katı eriyik elde edilmektedir. Homojenizasyonun ve su verme işlemlerinin ürünü olan bu eriyik içerisinde ise dağılmış halde partiküller bulunmaktadır. Alaşım içerisinde yer alan bu partiküller yani pekiştirici fazlar, tane sınırından itibaren arzu edilen şekilde yaşlandırma işlemiyle çökertilebilmektedir. Magnezyum alaşımlarının difüzyon özelliğinin yavaş olmasından dolayı, suni yaşlandırma işlemi için 16 – 24 saat gibi uzun bir süre söz konusu olmaktadır. Döküm magnezyum alaşımlarında azami seviyede bir mukavemet artışı elde edebilmek için malzemelere 150 – 260 °C sıcaklık aralığında suni yaşlandırma uygulanmaktadır.

Suni yaşlandırma işlemi parçanın uzama değerlerini azaltırken, mukavemet değerlerini artırmaktadır. Partiküllerin çökelmesi devam ettikçe alaşımın mukavemeti gittikçe artar ve bir maksimum değere ulaşır. Bu maksimum değerin elde edildiği noktadan itibaren sürece devam edilirse, parçanın mukavemet değerinde kademeli

olarak bir azalma olduğu gözlenecektir. Dolayısıyla yaşlandırma süresi ve sıcaklık değeri için, suni yaşlandırma işleminin iki önemli değişkeni denebilir. Malzeme üzerinde nasıl bir etki bırakılmak isteniyorsa, o değerlere uygun olarak bir sıcaklık ve zaman değişkeni tayin edilmelidir. Eğer parça yüksek sıcaklıklara maruz bırakılarak işlem süresi kısaltılır ise, yüksek akma mukavemeti ve düşük uzama sağlanmış olur. Sıcaklık değeri daha düşük seviyelerde tutulur ise, daha büyük uzama ve az daha düşük seviyelerde akma değerleri elde edilmiş olur. Yaşlandırma sürecinden verim alabilmek için yükün süratli bir şekilde ısıtılması önem arz etmektedir. Çünkü yaşlandırma süreci, parça ısıtılmaya başlandıktan itibaren malzeme bünyesindeki en düşük noktanın sıcaklığı istenilen sıcaklığa 20 °C den daha fazla yaklaştığı andan itibaren etkilerini göstermeye başlamaktadır.

Suni yaşlandırma işleminin, magnezyum alaşımlarının ısıl işlem tablosu incelendiği zaman "T5" işleminden itibaren uygulama alanı bulduğu görülmektedir. T5 işlemi soğutma işlemini müteakip suni yaşlandırma işlemini öngörürken, T6 işlemi solüsyona alma sürecini takip eden bir suni yaşlandırma işlemini belirtmektedir ve yüksek akma mukavemeti ile yüksek sertlik değerleri vaat etmektedir. Dolayısı ile T6 işlemi büyük ölçülerde yüklenmiş alaşım dökümlerine uygun olmaktadır.

2.1.7. Stabilizasyon İşlemi

Stabilizasyon, yani kararlı hale getirme ısıl işlemin asıl amacı yüksek sıcaklıklarda kullanım sağlaması gereken magnezyum alaşımı parçaların şişmesini önlemek veya asgari seviyelere çekebilmektir. Aynı zamanda alaşımlar için gerilim giderme işlemi sağlamaktadır ve sürünme direncini artırıcı etki göstermektedir. Şişme veya uzama esas itibariyle, alaşımlamada kullanılan çökelmiş bileşiklerin katı eriyikte birleşmesinden kaynaklanan hacim değişimidir. Stabilizasyon işlemi ise bu birleşme sürecinin büyük bölümünü, parça yüksek sıcaklıklarda kullanıma başlamadan önce gerçekleştirdiği için parça kullanıma sunulduğunda minimum bir şişme meydana gelmektedir.

Döküm parçalara stabilizasyon işlemi, F veya T4 işlemlerinden herhangi bir tanesi uygulanmış haldeyken yapılabilir. Bu işlem genellikle parçaları 4 saat süren bir ısıtma işleminden ibarettir. Bu uygulamanın, F kategorisindeki malzemelerin mekanik

özelliklerinde çok küçük bir etkisi bulunmaktadır. Fakat solüsyona alma ısıl işleminden sonra, T6 konumunda çok olumlu etkileri bulunmaktadır.

2.2. Isıl İşlemler İçin Ana Değişkenler ve Etkileri

Tüm metal alaşımları için döküm hacmi ve kesit kalınlıkları, döküm hacminin kullanılan fırının toplam hacmine oranı, malzemenin fırın içerisindeki tertibi gibi konular, ısıl işlem sürecini etkileyen ve hesaplanması gereken değişkenleri oluşturmaktadır.

2.2.1. Kesit Ölçüleri ve Isıl İşlem Süresi

Magnezyum alaşımlarında birim kesit hacim için uygulanacak ısıl işlem süresini hesaplamaya yönelik genel bir kural bulunmamaktadır. Fakat magnezyumun ısıya olan yüksek duyarlılığı, düşük özgül ısı kapasitesiyle birleştiği zaman parçaların daldırma sıcaklığına çabuk ulaştığı her zaman göz önünde bulundurulmalıdır. Magnezyum alaşımları için genel prosedür, malzemenin fırına yüklendikten sonra işlem göreceği sıcaklığa kadar fırının ısıtılmasıdır. Yani fırın ve parçaların birlikte ısıtılmasıdır.

Parçanın kesit kalınlığı ısıl işlem süresini direkt olarak etkilemektedir. Çoğu magnezyum alaşımında parça kesiti 25 mm civarı bir değerden 50 mm civarı bir değere çıktığı zaman, ısıl işlem süresi de 10 – 11 saat aralığından 19 – 20 saat aralığına yükselmektedir. Alaşım parçalar için optimum solüsyona alma ısıl işlem süresini tespit edebilmek adına en uygun yol, hurda bir malzemenin kesit kalınlığı en fazla olan bölümünden kesit alarak merkezini incelemektir. Merkezdeki bileşme oranına göre rahatça hesaplamalar yapılabilir.

2.2.2. Isıl İşlem Süresi ve Sıcaklık Değeri

Magnezyum alaşımlarında ısıl işlem süresi ve sıcaklık değeri tamamen parçadan istenen mekanik ve metalürjik özelliklere göre değişmektedir. Bir alaşım için aynı sıcaklık değerinde yapılan 4 saatlik bir solüsyona alma ısıl işlemi neticesinde maksimum mekanik özellikler elde edilirken, aynı sıcaklık değerinde 8 saatlik bir ısıl

işlem neticesinde daha az çarpılma olduğu görülebilmektedir. Yüksek sıcaklıklarda dahi, yeni başlayan ergime eğilimleri saptanabilmektedir.

2.2.3. Koruyucu Atmosfer Etkisi

Magnezyum alaşımlarının hava ortamında solüsyona alınabilmesine rağmen, hemen hemen her ısıl işlem uygulamasında korucu atmosfer şartları sağlanmaktadır. Koruyucu atmosfer şartlarının sağlanması iki amaca hizmet etmektedir: Öncelikle koruyucu atmosfer yüzey oksidasyonunu engellemektedir; yüzey oksidasyonu ciddi seviyelere ulaştığında malzemenin dayanımını azaltmaktadır. Diğer bir faydası ise fırın içerisinde sıcaklığın arzu edilen seviyeyi aşması durumunda aktif yanmanın önüne geçebilmesidir. Magnezyum alaşımları için normal şartlarda üç çeşit gaz kullanılmaktadır: Sülfür hegzaflorid, sülfür dioksit ve karbon dioksit. Alaşımlama türüne göre bu gazlardan biri ısıl işlem seçilir. İnert gazların kullanılması da süreç açısından uygundur, fakat maliyeti üst seviyelere çektiğinden dolayı tercih edilmemektedir.

2.2. Magnezyum Alaşımlarının Isıl İşlemleri İçin Ekipmanlar ve Süreç

Magnezyum alaşımlarının solüsyona alınma ve suni yaşlandırma işlemleri için elektrikli veya gazlı fırınlar standart olarak kullanılmaktadır. Bu fırınlarda ısının homojen dağılabilmesi için yüksek hızlı fanları veya aynı işlevi görebilecek, atmosfer sirkülasyonu sağlayan sistemleri ihtiva etmesi gerekmektedir. Fakat solüsyona alma ısıl işleminde bazen, sülfür dioksit ağırlıklı bir atmosfer söz konusu olabildiğinden kullanılan fırınların gaz kaçırmaz özellikte olması önem arz etmektedir. Bu fırınlar içeriye sürekli olarak temiz hava sağlayabilen girişler bulundurmalıdır. Isınan elementlerin arasından hava sirkülasyonu hızlı oranlarda seyredebilmelidir ki bu sayede yük içerisinde ısı dağılımı üniform özellik gösterebilsin. Sirkülasyon oranı doğal olarak fırın yapısına ve kapasitesine göre değişim göstermektedir. Fakat dakikada % 45 seviyesinde hava değişim oranı solüsyona alma işlemi için tavsiye edilmektedir.

Fırınlarda yükleme malzemesinin özellikleri, ısıl işlemler için çok önemli bir ayrıntıyı ifade etmektedir. Yükleme malzemeleri kesinlikle tozdan, talaştan ve diğer

işlem sonrası artıklardan arındırılmış olmalıdır. Bu konu özellikle yüksek sıcaklıklarda gerçekleşen solüsyona alma işlemlerinde daha da önem kazanmaktadır. Bir solüsyona alma uygulamasında kullanılacak yük sadece bir çeşit alaşım ihtiva etmelidir. Çünkü farklı alaşımlar, farklı sıcaklık değerlerinde birleşme noktalarına sahiptirler ve uygulamanın sağlığı açısından bu farka mahal verilmemelidir. Parçalar da fırın içerisine düzgün ve titiz bir şekilde yerleştirilmelidir ki hava sirkülasyonunu engelleyici bir durum oluşturmasın. Aksi halde farklı noktalarda düzensiz ısı artışları görülebilir.

Magnezyum alaşımlarının ısıl işlemi söz konusu olduğunda, ısıl hassasiyetten dolayı üst seviyede bir sıcaklık kontrol mekanizması gerekmektedir. Solüsyona alma ısıl işlemi için maksimum ± 6 °C'lik bir sıcaklık değişim toleransı tanınmaktadır. Magnezyum alaşımlarının solüsyona alınması ve çökertmesi için kullanılan fırınlarda en güvenli ve uygun şekilde ısı kontrolü sağlayabilen üç çeşit sistem mevcuttur. Birinci sistem yanma odasının ısı seviyesini kontrol eden, yani ısıtma sisteminin kaynağını kontrol altında tutarak istenilen sıcaklığın sabit tutulmasını sağlayan kontrol mekanizmasıdır. İkinci kontrol sistemi ise ısıl işlem için fırınlanan yükün sıcaklık seviyesini kontrol ederek aşırı ısınmayı önleyen düzenektir. Bu sistem yüksek sıcaklıklarda işlem yapılacaksa ve özellikle yükün hacmi fırının toplam hacmine oranla çok küçükse ideal bir kontrol mekanizması sağlayacaktır. Üçüncü kontrol sisteminde, yükün sıcaklığındaki ciddi seviyelerdeki artışı ve olası magnezyum ateşini önleyen sensörler ve cihazlar kullanılmaktadır. Bu sistemde fırının tavanına yerleştirilen cihazlar vasıtasıyla olası bir yanma ve aşırı ısınma durumunda fırının ısı beslemesi tamamen kapatılmaktadır.

Magnezyum alaşımlarının su verme ortamı ile ilgili de çeşitli ilkeler mevcuttur. Magnezyum alaşımlarının genelinde daldırma işlemi için hava ortamı kullanılmaktadır. Durgun hava genellikle yeterli olmaktadır, fakat özellikle yoğun ve kalın kesitli parçalar için güçlü hava akımı kullanımı tavsiye edilmektedir. Magnezyum alaşımlarından sınırlı sayıda olanları glikol, yağ veya suya batırma işlemine tabii tutulabilmektedir. Bu işlem için sıvı sıcaklığı yüksek (65 °C civarı) tutulmalıdır.

Magnezyum alaşımlarının ısıl işlemlerinde dikkat edilmesi gereken son konu, çarpılma ve eğilmelerin önlenmesidir. Magnezyumun dayanımı, yüksek sıcaklılarda son derece düşmektedir ve bu azalma döküm mamullerin gerinim gidermesi sırasında kendi

ağırlıklarından dahi eğilmelerine neden olabilmektedir. Bu çarpılmaların ve eğilmelerin önüne geçebilmek için, ısıl işlem sırasında kullanılabilen ve sıcaklıktan etkilenmeyen uzunlamasına yerleştirilen barlar ve sabitleme aparatları üretilmiştir. Bu malzemelerin kullanılması için işleme tabi tutulan parçanın mekanik hesaplarının titiz biçimde yapılması gerekmektedir. Çünkü bu aparatların gereksiz kullanımı fırın içerisinde ısı sirkülasyonunu olumsuz etkileyebilmektedir.

2.3. Isıl İşlemlerde Ortaya Çıkabilecek Problemler ve Önlenmesi

95 °C sıcaklığa kadar olan kullanım koşullarında, tüm magnezyum alaşımları mükemmel boyutsal stabilite sergilemektedir ve boyutsal değişimlerden yoksun kabul edilebilirler. Bazı Mg–Al–Mn ve Mg–Al–Zn alaşımlarında ise, 95 °C'nin üzerindeki sıcaklıklara uzun süre maruz kaldıklarında küçük boyutlarda kalıcı uzamalar gözlenmektedir. Bu uzamalar azımsanabilir derecelerde olsa da daha büyük problemlerin oluşmasına katkıda bulunmaktadır. Bu alaşımlara karşın nadir toprak metalleri ve zirkonyum içeren magnezyum alaşımları ise, yüksek sıcaklılara maruz bırakıldığı zaman küçülme eğilimi göstermektedir.

Magnezyum alaşımlarına uygulanan ısıl işlemlerde yaygın olarak beş çeşit yapısal problem ile karşılaşılmaktadır. Bunlar; oksitlenme, birleşme çizgileri, çarpılma, pürüzlenme ve tutarsızlık problemleridir:

2.3.1. Oksitlenme (Oxidation)

Fırın içerisinde koruyucu veya inert atmosferin sağlanmadığı durumlarda, malzeme üzerinde lokal zayıflıkların oluşumu ve bu bölgelerin oksitlenmesi söz konusu olmaktadır. Magnezyum alaşımının hassasiyetine göre yükün yanmasıyla bile karşılaşılabilmektedir. Bu problemlerle karşılaşılmaması için koruyucu atmosfer sağlanmasının yanı sıra, fırın içerisinin nemden ve kirden tamamen arınmış olması önem arz etmektedir.

2.3.2. Çarpılmaların Oluşması (Warpage)

Döküm magnezyum alaşımı yüklerin ısıl işlemi sırasında çarpılmalara karşı destek elemanlarının kullanılması gerekmektedir. Çarpılmaların bir diğer sebebi de ısının eşit dağılımının sağlamamasından dolayı aşırı ısınan bölgelerde çökmelerin meydana gelmesidir. Çarpılmaların önüne geçmek için hava sirkülasyonunun iyi sağlanması ve bu amaçla yükün fırın içerisinde düzgün dağılımının sağlanması gerekmektedir.

2.3.3. Birleşme Çizgileri (Fusion Voids)

Mg–Al–Zn alaşımlarının sıcaklıklarının ısıl işlem esnasında 260°C'den 370°C'ye kontrolsüz biçimde yükselmesi, bu alaşımlar ile çinko ve nadir toprak metalleri içeren alaşımların uygun görülen sıcaklık değerlerini aşması, birleşim çizgilerinin oluşmasına neden olmaktadır. Bu birleşme bölgeleri normalde Magnezyum–Zirkonyum alaşımlarının solidus sıcaklığını aşması durumlarında görülmektedir. Çizgiler özünde, tane sınırları boyunca oluşan uzun ve dar ayrılmaları göstermektedir. Çizgilerin önüne geçebilmek için önce yükün 260 °C'ye kadar ısıtılması ve daha sonra istenilen ısıl işlem sıcaklığına kademeli olarak 2 saat gibi bir sürede yükseltilmesi gerekmektedir. Hiçbir koşulda işleme sıcaklığının 6 °C'den fazla aşılmaması önemlidir.

2.3.4. Pürüzlenme (Germination)

Bazı magnezyum alaşımlarının solüsyona alma süreci sonunda, tane büyümesi sebebiyle yüzeylerinde pürüzlerin oluşması durumudur. Bu hadise sınırlı sayıdaki alaşımlarda önüne geçilemez bir durumdur ve pürüzlerin giderilmesi için ilave ısıl işlemlere başvurulması gerekmektedir (Antigermination heat treatments).

2.3.5. Tutarsızlık Problemleri (Inconsistent Properties)

Yetersiz veya aşırı ısınma, fırın içerisinde ısının yetersiz sirkülasyonu, ısı kontrolünde aksamalar, solüsyona alma işleminden sonra yavaş soğutma, büyük yükler

için yetersiz solüsyona alma işlem süreci gibi öngörülen sağlıklı süreçten her türlü sapma tutarsızlık problemlerini oluşturmaktadır. Homojenizasyon sürecinin sağlığı açısından da bu ayrıntılara azami seviyede dikkat etmek gerekmektedir. [9,12,15]

2.4. Magnezyum Alevi ve Önlenmesi

Magnezyum ve magnezyum alaşımları, oksijene karşı son derece aktiftir ve yüksek sıcaklıklara maruz kaldıklarında hızlı bir şekilde oksitlenerek ($Mg + ½ O_2 \rightarrow MgO$) yanma reaksiyonu gerçekleştirirler. Bu yanma reaksiyonu son derece parlak beyaz bir alevlenmeye neden olur. Hatta bu alevlenme, elektrikli düzeneklerden önce fotoğrafçılıkta flaş ışığı olarak kullanılmıştır. [5,16]

Magnezyumun ısıl işlem sürecinde kontrolsüz ısınması, sadece deforme oluşumlara sebebiyet vermez, malzemenin tehlikeli biçimde yanmasına da sebep olabilmektedir. Bu yüzden sadece son derece kuru ve temiz yükler fırınlamaya tabii tutulmalıdır. Fırınlama işleminden önce, yük üzerindeki yağ artıkları ve talaş gibi kalıntı maddeler titiz biçimde temizlenmelidir. Aynı şekilde fırının kendisi de tüm kalıntılardan ve sudan ayrıntılı olarak temizlenmelidir. Diğer bir önemli husus ise; bir fırınlama işleminde sadece bir çeşit alaşımın işleme tabii tutulmasıdır ve bu alaşımın özelliklerine yönelik olarak süreç sıkı kontrol altında ilerlemelidir.

Magnezyumun alevlenmesi; üretim kalitesizliği, ısıl işlem sürecinde dikkatsizlik veya operatör hatalarından kaynaklanabilmektedir. Yanmanın tespiti, fırın içerisine girdi olmadan sıcaklığın ani biçimde artmasından ve fırından dışarıya anormal biçimde parlak bir duman sızmasından sağlanabilmektedir.

Dikkat edilmesi gereken çok önemli bir diğer husus ise magnezyum ateşine hiçbir şekilde su ile müdahale edilmemesi gerektiğidir. Alevlenmenin gerçekleştiği durumlarda hemen gücün, yakıtın ve koruyucu atmosfer beslemesinin kesilmesi gerekmektedir. Bazı durumlarda eğer alevlenme küçük seviyede ise, özellikle dar fırınlarda ateş oksijensizlikten kendi kendine sönmektedir. Eğer kendi kendine sönme gerçekleşmez ise çeşitli söndürme yollarına başvurmak gerekmektedir. Alevlenme küçük ve yanan parça ulaşılabilir durumda ise parçanın fırından alınarak çelik bir hazneye kapatılması ve ardından magnezyum ateşine karşı etkili ticari yangın söndürme tozlarına boğulması uygun bir seçenektir. Eğer yanan parçaya emniyetli biçimde

ulaşmak mümkün değil ise söndürme tozunun fırın içerisine pompalanarak alevin boğulmasına çalışılmalıdır. Eğer bu metotlar emniyetli şekilde uygulanamayacak ise diğer bir seçenek Boron Triflorid (BF_3) veya Boron Triklorid (BCl_3) gazlarının kullanımıyla yangının söndürülmesidir. Bu gazlar pratik olarak fırın içerisine teflon bir boru yardımıyla pompalanabilir ve fırın içerisindeki yangın sönüp iç sıcaklık 370^oC'ye düşene kadar işlem sürdürülmelidir. Boron Trikloridin yangın söndürücü olarak kullanılması, Boron Trifloridden tarih olarak öncelere dayanmaktadır. Fakat Boron Triflorid, gerek daha düşük konsantrasyonlarda etkimesi gerekse daha az sağlığı tehdit edici özellik göstermesi sebebiyle daha çok tercih görmektedir. Boron Trikloridin dumanı tahriş edicidir ve bu bileşik asidik seviye olarak hidroklorik asitle eşdeğerdir.

Daha büyük çaplı magnezyum yangınlarında ise kuru demir talaşı ve ağır hidrokarbonlarla birleştirilmiş grafit tozları söndürücü olarak kullanılabilir. Bu malzemelerin kullanımında temel mantık, yükü tamamen kaplayarak alevlerin fırın içerisindeki oksijenle temasını önlemektir.

Tüm magnezyum ateşi söndürme işlemlerinde dikkat edilmesi gereken diğer bir konu ise görevli personelin mutlaka koruyucu renkli gözlük kullanmasıdır. Magnezyumun karakteristik beyaz parlak ateşi, çıplak gözde kalıcı hasarlar oluşturabilir. [11]

BÖLÜM 3

MİKRO-ARK OKSİDASYON TEKNİĞİ

3.1. Mikro-Ark Oksidasyon Tekniğinin Tarihçesi

Hafif metallerin yüzey dayanım özelliklerini iyileştirmek maksadıyla uzun zamandır malzemeler üzerinde seramik doku oluşturmayı amaçlayan çalışmalar yapılmaktadır. Ark-Deşarj plazma tekniği, gaz alev spreyi, vakum çökeltme tekniği ve yüksek sıcaklıklarda cam ergitme işlemi gibi kalın ve dayanıklı seramik doku oluşturmayı amaçlayan çalışmaların hepsi seramik dokunun sağlam bağlanabilmesi için işlenen yüzeyin çok yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılmasını gerektiriyordu. Bu tekniklerin ardından Mikro-Ark Oksidasyon tekniği, diğer adıyla Plazma Elektrolitik Oksidasyon tekniği, umut verici bir uygulama olarak kullanıma sunulmuştur ve Alüminyum, Magnezyum, Titanyum gibi hafif metaller ve alaşımları üzerinde çok dayanıklı bir seramik yüzey kaplama imkanı sağlamıştır.

Mikro-Ark Oksidasyon tekniğinin karakteristiğini deşarj kanalları içerisinde oluşan 10^3 ila 10^4 K derecelerindeki yüksek sıcaklık ve 10^2 ila 10^3 MPa seviyesindeki yüksek basınç değerleri belirlemektedir. Mikro-Ark Oksidasyon işlemi, elektrokimyasal oksidasyon ile sulu elektrolitik içeren banyolarda gerçekleşen yüksek voltaj kıvılcımlamasını birleştirerek, elektrolitik görevindeki silikatlar gibi tuz çözeltilerinin malzeme üzerine çökertmesini sağlayan bir yüzey kaplama prosesidir. Banyo ortamı bazik özellik göstermektedir. Oksitlenecek yani yüzey kaplama işlemine tabii tutulacak malzeme anoda (pozitif kutup), genellikle paslanmaz çelikten yapılmış olan katot ise negatif kutba bağlanarak güç kaynağı aktif hale getirilir. Akım etkisiyle malzeme yüzeyinde oksitlenme süreci başlar. Metallerin ve alaşım yüzeylerinin Mikro-Ark Oksidasyon işlemi sayesinde sert bir seramik tabaka ile kaplanması; korozyon ve aşınma dirençlerini, kimyasal kararlılıklarını, mekanik dayanımlarını ve elektriksel yalıtkanlıklarını son derece artırmaktadır. Bu yüzey işlemi neticesinde de hafif metaller, uzay endüstrisinden tıp sektörüne çok geniş bir yelpazede kullanım alanlarını genişletebilmektedir. [17,18]

Mikro-Ark Oksidasyon (MAO) işleminin tarihçesi 50 sene kadar öncesine, Sovyet Rusya'ya dayanmaktadır. Bu ileri seviye yüzey kaplama tekniği başlangıçta akademik alanda uygulanma imkanı bulmuş, son derece göz alıcı etkileri neticesinde de kısa zamanda denizaltı parçalarında kullanılmaya başlanmıştır. Deniz suyu ortamında üst düzey koruyucu etkisini gösteren Mikro-Ark Oksidasyon işlemi; 1970'lerde Amerika Birleşik Devletleri, 80'lerde ise tüm dünya tarafından tanınmıştır. Birçok değişkenin yer aldığı bu yüzey kaplama prosesinde doğal olarak çalışmalar hızla devam ettirilmiş ve günümüzde halen endüstrinin her alanında geliştirme çalışmalarına önem verilmektedir.

Mikro-Ark Oksidasyonu ile yüzey kaplama tekniği, birçok farklı terimle de ifade edilmektedir. Bu alternatif isimlendirmelere değinilecek olunursa; "spark anodizing" (kıvılcımlama anodik oksidasyon), "anodic spark deposition: ASD" (anodik kıvılcımlı çökertme), "micro-arc anodizing" (mikro-ark anodik oksidasyonu), "micro-ark discharge oxidation" (mikro-ark deşarj oksidasyonu), "microplasma anodizing" (mikro plazma anodik oksidasyonu), "mikro plazma oxidation" (mikro plazma oksidasyonu), "plasma electrolytic oxidation" (plazma elektrolitik oksidasyon: PEO) ve "elektroplasma oxidation" (elektroplazma oksidasyon) şeklinde örnekler verilebilir. [19]

3.2. Mikro-Ark Oksidasyon Tekniğinin Uygulama Alanları

Hafif metal kaplamalarının gelişim süreci incelendiğinde, Mikro-Ark Oksidasyon tekniğinin devrim niteliğinde olduğu göze çarpmaktadır ve kullanımının son derece geniş endüstri dallarına yayılması doğal karşılanmalıdır. Örneğin mekanik özellikleriyle ilgi çekici olan ve değeri yarım yüzyıldır azalmayan titanyum alaşımları, en verimli yüzey kaplama uygulamasını MAO tekniğinde bulmuştur; hatta bu teknik sayesinde titanyum alaşımlarının kullanım olanağı artmıştır. [20] Mikro-Ark Oksidasyon tekniği, otomotiv ve denizcilik endüstrisi ile uzay teknolojileri başta olmak üzere, hidrolik sanayi, makine ve motor imalat sanayi, tekstil endüstrisi ve iletişim sektörü gibi birçok alanda kullanım olanağı sunmaktadır. Yani kullanılan malzemeden sıvı ortamlarda ve yüksek sıcaklık değerlerinde dahi korozyona karşı direnç, yüksek aşınma dayanımı ve sertlik beklenen her koşulda MAO tekniği uygulama alanı

bulmaktadır. MAO tekniği estetik açıdan da çeşitli avantajlar sağlamaktadır. Bu teknik yardımıyla imal edilen seramik yüzeyler, boyaya karşı sergiledikleri yüksek tutuculuk özelliğiyle üstün bir boya astarı görevi üstlenirler. Diğer bir kimyevi avantajı ise elektrolitik çözeltinin içeriğinde yapılabilecek değişiklikler ile malzeme üzerinde oluşacak oksit tabakanın karakteristiğinin değiştirilebilmesidir. Yani dielektrik özelliği sayesinde kullanılan farklı kimyasallar, değişik renklerde üretim yapılmasını mümkün kılmaktadır.

Mikro-Ark Oksidasyon işleminin uzay teknolojilerinde kullanılması ise son derece hayati özellikler sağlamaktadır. MAO tekniği ile imal edilen kaplamalar, uzay araçlarının her türlü ısıl ortamda dayanım göstermesini sağlamaktadır ve özellikle roketlerde koruyucu olarak kullanılmak suretiyle, termokimyasal avantajlarından faydalanılmaktadır.

MAO ile yüzey kaplama tekniğinin uygulama alanları; mekanik, termal, kimyasal, elektriksel olarak ve bu alanların çeşitli birleşimleri şeklinde sınıflandırılabilir:

Mekanik alanda uygulamalar: MAO ile oluşturulan oksit yüzey, 1300 kg/mm^2'den daha yüksek bir sertlik değeri sergilemektedir. Bu sayede yüksek abrazyon ve arozif aşınma dayanımına sahiptir. Aynı zamanda bu sert yüzeyin sürtünme katsayısı düşüktür ve sınır yağlama koşullarında dahi kullanım sağlamaktadır.

Termal alanda uygulamalar: Malzeme yüzeyinde oluşturulan oksit tabaka, metallere oranla daha düşük ısıl iletkenlik değerine sahiptir. Bu sayede termal şoklara karşı dirençlidir ve ısının homojen dağılmasını sağlayabilmektedir.

Kimyasal alanda uygulamalar: Çok yüksek sıcaklıklar söz konusu olmadıktan sonra asidik ve bazik ortamlarda korozyona karşı dirençli bir yüzey oluşturur. Bu sayede gıda endüstrisi ile tıp sektöründe kullanım olanağı bulmaktadır.

Elektrik–Elektronik alanında uygulamalar: Seramik yüzey kaplamasının yalıtkan olması sebebiyle elektronik alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. [15]

3.3. Mikro–Ark Oksidasyon İşleminin Avantaj ve Dezavantajları

Mikro-Ark Oksidasyon tekniği görece yeni bir yüzey iyileştirme prosesi olduğundan dolayı, üzerinde yapılan çalışmalar on yıllardır hızla devam etmektedir. Güç kaynağı, elektrolitik banyo, uygulanacak malzeme, uygulama süresi, uygulama voltajı vb. gibi birçok değişkeni içeren bu yüzey kaplama tekniği haliyle son derece ayrıntılı çalışmalara gebe vaziyettedir. Oksidasyon sonucu oluşan seramik filmin gerek kendi kimyasal ve fiziksel özelliklerini, gerekse taban malzemeyle uyumunu inceleyen çok sayıda deney yapılmıştır.

Mikro-Ark Oksidasyon tekniği ilk kez kullanıma başlandığı yıllarda, diğer tüm yüzey kaplama işlemlerine göre son derece dikkat çekici üstünlükleriyle umut vaat ediyordu. Fakat dünyanın her bölgesinde günümüze kadar icra edilen deneyler ve çalışmalar gösteriyor ki; Mikro-Ark Oksidasyon tekniğinin avantajlarını bastıramayacak seviyede de olsa, istenilen kullanıma göre dezavantajları da bulunmaktadır.

Mikro-Ark Oksidasyon tekniğinde süreç, avantajlı yönlerini hazırlık aşamasında göstermeye başlamaktadır. Bu yüzey kaplama prosesinde numune hazırlamak için özel bir çalışma gerekmemektedir ve bu sayede tüm sürecin daha hızlı gelişmesi söz konusu olmaktadır. Diğer yüzey kaplama uygulamalarına göre numune hazırlanması daha az önem arz eden MAO işlemi, uygulamada kullanılacak elektrolitik solüsyonun çevre etkilerinden daha az seviyede etkilenmesi sağlanmaktadır. Mikro-Ark Oksidasyon uygulamalarının diğer bir avantajı ise, alüminyum, titanyum, zirkonyum, magnezyum ve niyobyum gibi birçok hafif metale uygulanabilmesi ve bu metallere diğer yüzey işlemlerinin uygulanmasını kısıtlayan çoğu faktörden etkilenmemesidir. Örneğin yüksek oranda bakır ihtiva eden alüminyum alaşımlarına geleneksel Anodik Oksitleme yöntemi ile yüzey iyileştirmesinin uygulanması zordur. Fakat MAO işlemi için hiçbir istisnai özellik göstermemektedir. Aynı şekilde yüksek oranda silisyum içeren alaşımlar da en verimli şekilde MAO tekniği ile kaplanabilmektedir.

Bilindiği üzere, günümüzde uygulanan tüm endüstriyel işlemlerde dikkat edilmesi gereken önemli bir husus da çevreye olan etkileridir. Mikro-Ark Oksidasyon tekniği işlem sonucunda zehirli atık bırakmayan çevreye duyarlı bir elektrokimyasal uygulama olarak da avantaj sağlamaktadır. Kullanıma başlandığı ilk yıllarda geleneksel yüzey

kaplama yöntemlerine alternatif olarak sunulan Mikro-Ark Oksidasyon işlemi, uygulama sonucunda elde edilen mükemmel sertlik ve dayanımdaki seramik kaplama sayesinde tüm yöntemlerin önüne geçmiş; hatta hafif metal yüzeylerine sağladığı iyileştirici etki sayesinde çelik esaslı malzemelerin kullanım oranlarını düşürmüştür. Çelik alaşımların yerini hafif metallere bırakması, konstrüksiyonda büyük ağırlık avantajı sağlamaktadır.

Mikro-Ark Oksidasyon süreci ile yüzey iyileştirmenin avantajları şu şekilde maddeler halinde özetlenebilir:

- MAO işlemi bütün bir prosestir. Ön işlem veya son yüzey düzeltme işlemlerine gerek kalmamaktadır.
- Çevreye duyarlı ve ekonomik açıdan görece avantajlı elektrolitikler banyo ortamında kullanılır.
- Elektrolitiklerin kimyevi bileşenleri değiştirilerek dekoratif renkler elde edilebilir.
- Kaplamalarda çok yüksek seviyelerde sertlik değeri elde edilebilmektedir.
- Kaplamaların sürtünme katsayısı son derece düşüktür. (f = 0,005 - 0,01).
- Yüksek seviyede abrazyon direncine sahip yüzeyler oluşturur.
- Oluşturulan seramik dokunun ısıyı homojen dağıtabilen ve yüksek sıcaklılara dayanıklı yapısından dolayı, kaplama termal bariyer olarak kullanılmaktadır. 10 ila 20 V/Mikron aralığında dielektrik katsayısına sahiptir.
- Sulu ortamlarda dahi korozyona dayanıklıdır.

Mikro-Ark Oksidasyon sürecinde; voltaj, elektrolitik çözeltinin bileşimi, sıcaklık, akım yoğunluğu gibi özelliklerde yapılan değişiklerle farklı karakteristiklere sahip yüzeyler elde edilebilmektedir. Elde edilen bu yüzey kaplamanın dekoratif son hali olabileceği gibi, mikro düzeyde pürüzlü yapıya sahip olduğundan dolayı ayrıca bir boyaya veya ikinci bir kaplamaya mükemmel bir taban oluşturabilmektedir. Sol-gel, PVD, Akımsız Nikel Kaplama, CVD gibi teknikler ve seramik, metal ve polimer kaplamalar, Mikro-Ark Oksidasyonu ile oluşturulmuş yüzeylere uygulanabilmektedir.

Tüm bu avantajlı ve göz alıcı özellikleri sayesinde Mikro-Ark Oksidasyon tekniği, anodik oksidasyonu baz alan geleneksel yöntemlere göre tercih edilir hale gelmiştir. Fakat olumlu yönlerinin yanı sıra dezavantajlı ve sınırlayıcı taraflarından da bahsetmekte fayda vardır:

Mikro-Ark Oksidasyonu ile oluşturulan yüzeylerin, mekanik olarak ne çeşit yüzeylerle hangi ortamlarda temas halinde olacağına dikkat etmek gerekmektedir. MAO tekniğiyle oluşturulan yüzeyler hafif porozlu hatta pürüzsüzlük hissi veren bir dokuya sahip olsa da, sürtünme katsayısı çoğu metal ve seramik yüzeye göre daha yüksektir. Bu sebeple kuru ortamlarda mekanik olarak metal veya seramik yüzeylerle temas halinde olan kaplama dokular, karşı taraf üzerinde hızlı bir aşındırıcı etki gösterirler. Bu yüzden MAO tekniğiyle kaplanan yüzeyler yağlı veya sıvı ortamlarda uygun yüzeylerle temas halinde olmalıdır. [17]

MAO işlemi, uygulama karakteristiğine bağlı olarak genellikle 1000 V seviyelerinde 1 MW kapasitede enerjiye ihtiyaç duymaktadır. Bu yüksek enerji seviyesi parçanın yapısına ve türüne bağlı olarak, tehlike yaratabilecek bir uygulama süreci oluşturabilmektedir. Yüksek enerji ihtiyacının diğer bir dezavantajı ise, Mikro-Ark Oksidasyonu ile yüzey kaplamanın diğer geleneksel Anodik Oksidasyon tekniklerine göre daha maliyetli hale gelmesidir. Oksidasyon sürecinde yüksek elektrik enerjisi malzeme yüzeyinde ısı enerjisine dönüşmektedir. Yüksek sıcaklık değerlerine ulaşan bu ısınma neticesinde, uygulamada kullanılan solüsyon da ısınmakta ve bu solüsyonun soğutulabilmesi için yoğun kapasiteli soğutucular kullanılmalıdır. Soğutma için kullanılacak enerji yine maliyeti artırmaktadır.

Mikro-Ark Oksidasyonu ile oluşturulan seramik yüzeyin karakteristiği katmanlara göre farklılık göstermektedir. Kaplama işlemiyle oluşturulan, malzemeye en yakın doku, en sağlam özellikleri arz etmektedir ve çok yüksek aşınma direnci göstermektedir. Fakat kaplama neticesinde kalınlaşan dokunun en dış kısımları, kırılgan ve aşınma direnci düşük özellikler sergilemektedir. Dolayısıyla kalın bir seramik yüzey elde etmek için yapılan bir uygulama neticesinde mükemmel özellikler elde etmek için seramik dokunun en üst kısımlarının kaldırılması uygun olacaktır. Bu sayede hem en dayanıklı yüzey açığa çıkartılmış olur, hem de pürüzler ortadan kaldırılarak daha az sürtünme sağlayan bir doku elde edilir. Aynı şekilde estetik açıdan da olumlu sonuçlar

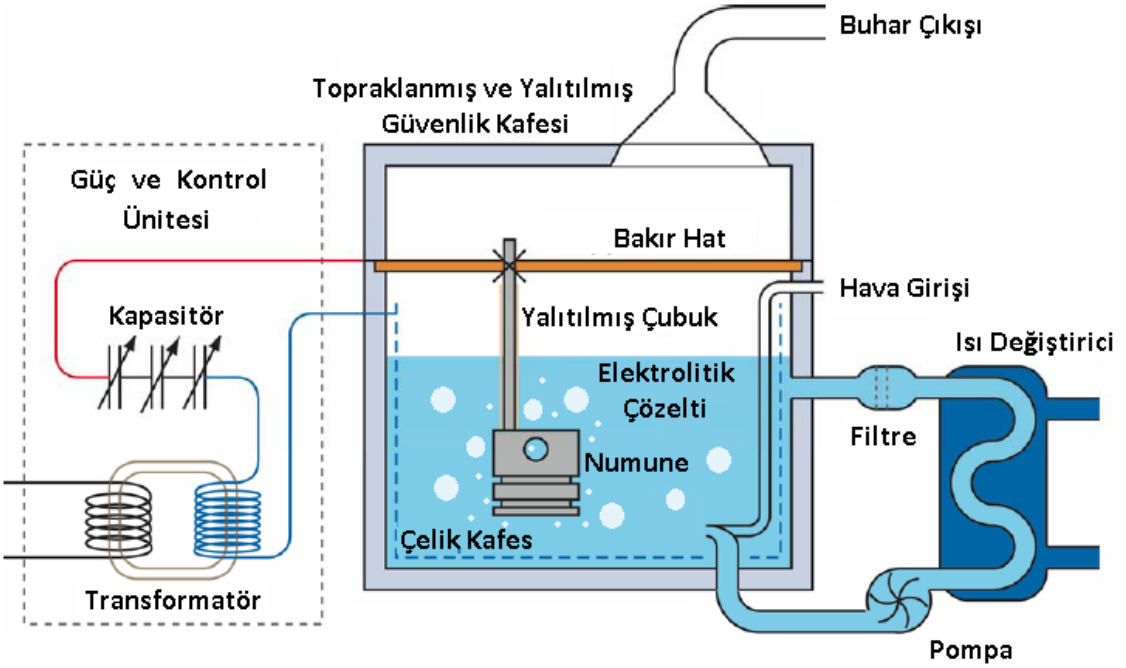
alınır. Fakat bu kaldırma ve işleme işlemlerinin hepsi ek maliyetlere sebep olmaktadır ve üretim açısından uygunluk sağlamamaktadır.

Tüm bu dezavantajlı yönleri de Mikro-Ark Oksidasyon tekniğinin yaygınlığını kısıtlayıcı faktörlerdir.

3.4. Donanım ve Yüzey Oluşumu

Mikro-Ark Oksidasyon süreci; elektrik devresine anot olarak bağlanmış parça üzerine elektrolitik solüsyon içerisinde negatif voltaj, katot olarak bağlanmış cidar üzerine pozitif voltaj verilmesi suretiyle, anot numune üzerinde ark oluşturulması ve numune yüzeyinde oksit seramik bir doku kaplanması şeklinde tanımlanabilir.

Mikro-Ark Oksidasyon sürecinde kullanılan sistem temel hatlarıyla Şekil–3.1'de gösterilmiştir. MAO sürecinin gerçekleşeceği havuz genellikle paslanmaz çelikten, çift cidarlı olarak imal edilmektedir. Bu sayede su tankı hem elektrolitik çözeltiyi barındırır, hem de soğutma suyunun dolaştırılacağı kanalları ihtiva eder. Su tankı aynı zamanda elektrik devresinin katodu olarak görev yağmaktadır. Uygulamaya tabii tutulacak olan metal malzeme yüzeyinde ise, hava ortamında kararlı yapıda bir oksit film oluşturulur. İşlem görecek olan malzeme devre üzerinde anot olacak şekilde güç kaynağına bağlanır. İşlem süresince çözeltinin homojenliğini idame ettirmek amacıyla karıştırıcı kullanılmaktadır. Soğutma suyunun da kanallar içerindeki devridaimi sayesinde bütün sürecin optimum sıcaklık değerinde işlemesi sağlanmaktadır.



Şekil – 3.1. MAO İşleminde Kullanılan Donanım [21]

Sistemi soğutma işlemi için farklı bir yol daha izlenebilmektedir. Soğutma suyu kullanılmadan, yüksek ısıya maruz kalan elektrolitik çözeltinin farklı bir soğutma sisteminden geçirilmesi yöntemiyle de optimum sıcaklık korunmuş olur. Fakat bu yol izlenirse elektrolitik çözelti için filtreleme uygulaması kaçınılmazdır.

MAO işleminde banyo olarak permanganat, karboksilik asit, vanadat, dispersant, polimerler gibi katışıklar içeren aluminat, silikat, borat, meta fosfat ve hidroksitler gibi elektrolitik çözeltiler kullanılmaktadır. Ayrıca kaplama dokusunu iyileştirme amaçlı olarak solüsyon içerisine grafit gibi katı yağlayıcı katışıklar ve PTFE (teflon) da eklenebilir.

Mikro-Ark Oksidasyon sürecinin ilk basamağı geleneksel Anodik Oksidasyon tekniğiyle başlamaktadır. Bu süreç numune üzerine negatif voltaj verilmesi suretiyle parça yüzeyinde oksit bir film oluşma sürecidir. Ancak MAO sürecinin başladığı kritik bir voltaj değeri bulunmaktadır. Uygulanan voltajın bu sınır değeri aşmasından itibaren, numune yüzeyinde ark oluşumu başlar ve Mikro-Ark Oksidasyon süreci bu mikro düzeydeki arklardan ismini almaktadır. MAO sürecinin başladığı bu eşik voltaj değerine "bozunum voltajı (dielectric breakdown)" denilmektedir. Bu voltaj değerinde, numune

yüzeyindeki hidroksil iyonları ile metal iyonları zıt yönlerde hareket ederek oksitlenme başlatmaktadırlar. Bu kritik değeri belirleyen potansiyel, elektrot olarak kullanılan malzemeye, elektrotun kutupsallığına ve elektrolitik bileşime bağlıdır. Bozunma voltajı, elektrolitik konsantrasyonundan, sıcaklıktan ve yüzey geriliminden etkilenmemektedir.

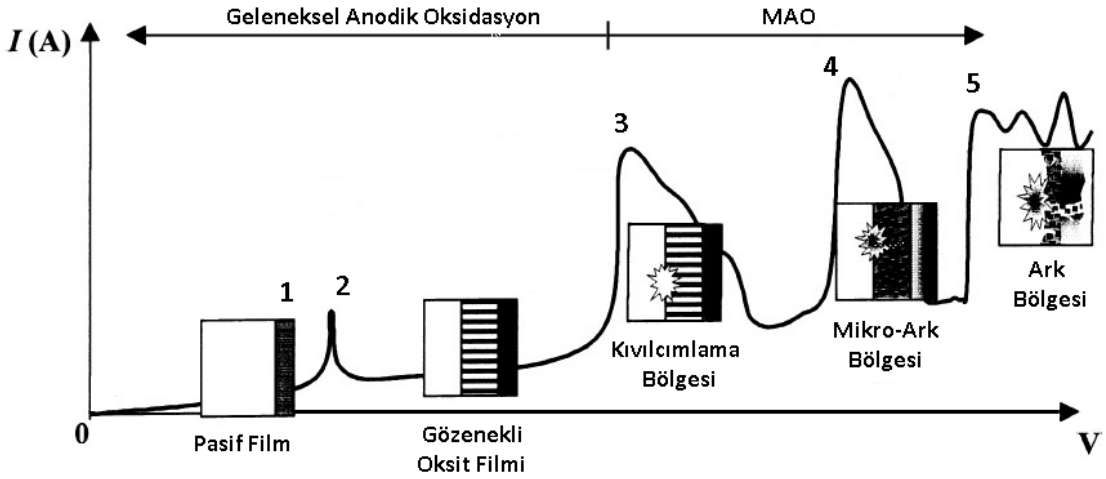
MAO sürecinde elektrot sıcaklık değeri 10 ila 60 °C aralığında tutulmalıdır. Yüksek akım ve voltaj değerlerinin söz konusu olduğu bu süreçte, banyo ünitesinde güçlü bir soğutma sistemi kullanmak kaçınılmaz hale gelmektedir. Mikro arkların meydana geldiği malzeme yüzeyinde kıvılcımlanma noktaları üzerinde yapılan teorik çalışmalar neticesinde geçici yerel sıcaklığın birkaç bin santigrat dereceye ulaştığı bilinmektedir. [22]

3.4.1. Elektrokimyasal Karakteristikler

Oksit yüzey boyunca mikro-arklara bağlı olarak gelişen akım – voltaj şeması Şekil–3.2'de gösterilmiştir. Banyoya daldırılmış numuneye uygulanan 1 bölgesi boyuncaki görece düşük potansiyele bağlı olarak sistem, Fraday kanunlarına uygun olarak işlerlik göstermekte ve elektrolitik hücrenin akım – voltaj karakteristiği Ohm kanunlarına göre değişim göstermektedir. Bu aşamada hafif metaller, yavaş şekilde elektrolitik sıvıyla aralarında bir oksit film oluşturmaya başlarlar. Numune malzemenin korozyon potansiyeli olan 2 noktasında ise pasif oksit film tabakası çözünmeye başlar. 2 noktasıyla 3 noktası arasında ise potansiyelin artmasıyla birlikte yeniden oksit film oluşmaya başlar ve gözenekli yapı açığa çıkar. Bu zamana kadarki süreç geleneksel anodik oksidasyon yöntemidir.

3 noktasına gelindiğinde, uygulanan potansiyelin bozunum sınırını aşmasıyla birlikte darbe iyonlaşması, ayrılma bölgelerinde kırılmalar meydana getirir. Bu esnada gözle görülür kıvılcımlanmalar oluşmaya başlar. Kıvılcımlanmalar film yüzeyi boyunca ilerleyerek büyümeye yardımcı etki gösterir. 3 noktasında oksit filmler için sınır değerler 400 – 600 V aralığındadır. 4 noktasına gelindiğinde ise termal iyonlaşma süreciyle desteklenen darbe iyonlaşması neticesinde büyük çaplı elektron akışları meydana gelir. 4 ve 5 noktaları arasında kalan bölgede oksit film içerisinde düşük güçte ve görece kısa ömürlü mikro-deşarjlar meydana gelir. Bu sayede kalınlık kademeli olarak artmış olur. 5 noktası aşıldığında ise mikro düzeydeki deşarjlar yerini güçlü

arklara bırakır ve yıkıcı özellik gösterebilen bu akımlar kalınlığın artmasını engeller.



Şekil – 3.2. Elektrot Yüzeyindeki Dielektrik Filminde Gerçekleşen Akım – Voltaj Değişimi

Bu teorik öngörülerden farklı olarak MAO sürecinin pratik uygulamaları incelendiğinde ise, mikro-ark zamanı, kıvılcımlanma zamanı ve güçlü arkların oluştuğu zamanlar arasında net geçişlerin tespit edilemediği görülmektedir. Hatta eşzamanlı oluşumlar arasında bile tutarsızlıklar olduğu gözlenmektedir. Pratik uygulamalarda daha karmaşık şekilli yüzey işlemleri söz konusu olduğunda ise, münferit kıvılcımlanmaların ve deşarjların yerini tespit etmek elektro-fiziksel karakteristiklerinden dolayı çok daha meşakkatli hale gelmektedir. Bu yer tespit çalışmaları ancak teorik modeller baz alınarak akım – voltaj karakteristiklerinin ve bölgesel optik radyasyon emiliminin titiz incelenmesi sonucu kıvılcımlanma yerinin tahmin edilmesi şeklinde gerçekleşebilir.[21]

3.4.2. Deşarj Karakteristiği

Mikro-Ark Oksidasyon sürecinde meydana gelen her deşarj olayı aslında bölgesel bazda meydana gelen bir dielektriksel kararlılığın bozunumudur. Bu bozunum etkisi, oluşturulan bariyer film tabakasının kusurlu bölgelerinde meydana gelmektedir. Kusurlu bölgelerde dielektriksel dayanımı sağlayan bozunum voltajı aşılarak, o bölgedeki oksit tabakası içerisine bir elektron çığı akması sağlanır. Bu tespitlerin çoğu dökme materyaller üzerinde direkt gözlemleme yoluyla yapılsa da oluşan deşarjlarla ilgili daha ayrıntılı özelliklerin tespit edilmesi ancak dayanışık tahmin etme yoluyla

gerçekleşebilmektedir. Deşarj bölgelerini inceleyen çalışmalar malzeme yüzeyinde 1 – 10 μm'lik derinlikte sıcaklığın 1 μs kadarlık bir sürede 10^4 K değerlerine çıktığını ve 1000 MPa seviyelerinde bölgesel basıncın oluştuğunu göstermektedir. Bu şartlar altında malzeme yüzeyinde noktasal iyonlaşma meydana gelir ve plazma-kimyasal reaksiyonlara uygun ortam sağlanmış olur. Bu ortamda güçlü elektrik alanı, anyonik bileşenleri elektrolitik sıvı içerisinden işlemi uygulayan tünellere çekerek, numuneden gelen plazma ile birleştirmek suretiyle oksitlenmenin gerçekleşmesini sağlar. [23]

3.4.3. Kaplama Yüzeyinin Kalınlaşması Esnasında Faz Oluşumu

MAO sürecinde her deşarj uygulamasında; metal oksitlerin, silikatların ve diğer katışıkların elektrolitik çözeltiden gelen anyonik bileşikleri numune metal ve alaşım elementleriyle bileştirmesini sağlayan plazma-kimyasal reaksiyonlar meydana gelmektedir. Yani alaşımlanmış bir metalin Mikro-Ark Oksidasyonu ile oluşturulmuş kaplama yüzeyinde, elementin kendisi, alaşımlama elementleri ve oksit katışıklarının hepsi ayrılmaz hale gelmektedir. Birer kıvılcımlama neticesinde oluşan bu fazlar üst üste gelerek kaplamanın kalınlaşmasını sağlamaktadır. Görece ince bir alanda neden fazla sayıda faz oluştuğunu destekleyen bir teorem de, oluşturulan oksit yüzeyin sürekli soğutulan elektrolitik sıvı içerisinde, "çok hızlı bir suya daldırma" işlemine kendiliğinden tabii olmasıdır. Bu sayede numune metalin fazlarına kaplama yüzeyinde yoğun olarak rastlanmaktadır. [24]

3.4.4. Kullanılan Güç Kaynakları

Mikro-Ark Oksidasyon işlemi için yaygın olarak dört çeşit güç kaynağından faydalanılmaktadır. Bunlar:

- Doğru akım
- Titreşimli doğru akım
- Dengelenmiş alternatif akım
- Heteropolar titreşimli akım

tiplerinde akım kaynaklarıdır. Genel kaideler incelendiğinde akım yoğunluğunun sabit olması, hem oksitlenme sürecinin hem de işleme zamanının kontrolü açısından fayda

sağlamaktadır. Sabit akım yoğunluğunun olumsuz tarafı ise oluşturulan yüzeyin porozlu bir karakteristik sergilemesidir. Porozlu ve gözenekli yapının başlıca dezavantajı ise korozyon direncini azaltıcı etkisidir. Bu olumsuzluğu bertaraf edebilmek için alternatif akım kaynaklı dalga rejimi tercih edilebilmektedir. Alternatif akım kullanılarak pürüzsüz, abrazyon ve korozyon direnci yüksek dokular elde edilebilmektedir.

3.4.4.1. Doğru Akım Sağlayan Güç Kaynakları

Doğru akımın birer rejimi olan potansiyostatik ve galvanostatik akımlardan faydalanan, bir devre köprüsüne dayanan sistemiyle kullanım sağlayan güç kaynaklarıdır. Güç kaynaklarının en basit prensiple çalışan çeşidi olan doğru akım güç kaynakları, numune yüzeyinde oluşan deşarj karakteristiklerinin zor ayarlanabilmesi sebebiyle tüm sürecin kontrol altında tutulabilme potansiyelini düşürmektedir. Bu nedenlerle doğru akım güç kaynakları ancak basit şekilli malzemeler ve düz yüzeylerin ince kaplanmasında tercih edilmektedir.

3.4.4.2. Titreşimli Doğru Akım Sağlayan Güç Kaynakları

Doğru akımın titreşimli formda kullanılması, sürecin zaman olarak kontrol altında bulundurulabilmesine, işleminin istenilen zamanda kesilmesine ve arkların numune yüzeyinde uygulanma süresinin ayarlanabilmesine olanak sağlamaktadır. Diğer bir avantajı ise titreşim karakteristiğinin ayarlanabilmesine de imkan tanımasıdır. Bu sayede kaplama dokusunun kompozisyonunda oynamalar yapılabilir. Süreci yüksek seviyede kontrol imkanı, ani ısıl artışların da önlenmesini sağlamaktadır. Titreşimli doğru akım kullanılmasının maliyet yaratan yönü ise arzu edilen akım yoğunluğuna ulaşmak için genellikle 1000 V üzerinde voltaj değeri gerektirmesidir. Bu yüksek voltaj ihtiyacının sebebi, titreşimli akımın numune yüzeyinde elektrik yüklü iki adet tabaka oluşturması ve elektrot yüzeyinde ek polarizasyon sağlanarak bu etkinin giderilebilmesidir.

3.4.4.3. Dengelenmemiş Alternatif Akım Sağlayan Güç Kaynakları

Alternatif akımın farklı genlik değerlerinde pozitif ve negatif formlarda kullanılması, kaplama çökelmesinin kontrol edilebilir aralık değerinde genişletilebilmesine imkan tanımaktadır. Elektrot üzerinde oluşan ilave polarizasyon alternatif akım sağlayan güç kaynağı kullanılarak önlenebilir ve sürecin kontrolü aynı doğrultuda sağlanabilir.

3.4.4.4. Heteropolar Titreşimli Akım Sağlayan Güç Kaynakları

Daha güçlü enerji akımını destekleyebilmek ve daha geniş frekans aralığı elde edebilmek amacıyla heteropolar titreşimli güç kaynakları kullanılmaktadır. Bu güç kaynakları tersinir-transistor veya tersinir-tristör konvertör sistemi temel alınarak üretilmektedir. Tristör sistemli güç kaynakları köşeli ve sinüssel darbe şekilleri yaratabilirken, transistör sistemlerinin kullanılması ile programlanan tüm şekiller istenilen genişlikte ve sıklıkta elde edilebilmektedir.

3.4.3. Elektrolitik Kompozisyonunun MAO Üzerine Etkileri

Mikro-Ark Oksidasyon sürecinin gerçek şartlarda hayata geçirilebilmesi, çok dikkatli şekilde belirlenmiş metal-elektrolitik çözelti eşleşmesine bağlıdır. Bu eşleştirmenin sağlıklı biçimde yapılabilmesi için metal kaplama amacıyla yapılan polarizasyon test verileri kullanılabilmektedir.

MAO işleminde kullanılan elektrolitik çözeltiler, kaplama dokusunun kombinasyonuna yönelik katkıları göz önünde bulundurularak başlıca dört kategoriye ayrılırlar:

a) Kaplama dokusuna yalnızca oksijen katan elektrolitikler.

b) Anyonik katışıklar içeren ve kaplama dokusuna diğer elementleri katan elektrolitikler.

c) Katyonik katışıklar içeren ve kaplama dokusuna diğer elementleri katan elektrolitikler.

d) Makro-partiküllerin kataforez taşınımını ve kaplama dokusuna katılmasını

sağlayan süspansiyonlar.

(b) ve (c) grubuna giren elektrolitik çözeltiler yardımıyla, hem numune yüzeyinin oksitlenmesi hem de banyo çözeltisi içerisindeki katışıkların numune yüzeyine çökeltilmesi suretiyle kaplama oluşturulur. Geniş bir yelpazede kaplama kompozisyonu sunması ve kaplama karakteristiklerinin değiştirilmesine imkan sağlaması bu elektrolitik grupları en istidatlı gruplar olarak bilinmektedir. Sodyum ve potasyum silikatların koloidal çözeltileri, tıpkı çok bileşenli silikat çözeltileri gibi yine MAO sürecinde geniş kullanım olanağı bulan çözeltilerdir. Çözelti içeriğine silikatların yanı sıra, elektrolitik iletkenliği artırmak, kaplama dokusunun kararlılığını artırmak ve ilave özellikler kazandırmak maksatlarıyla da katışıklar eklenebilmektedir. Bu eklentiler sayesinde kaplama yüzeyi istenilen şekilde renklendirilebilir, kataforez etki kazandırılabilir, katı yağlayıcıların eklenmesiyle aşınma dayanımı artırılabilir ve sert toz malzemelerin eklenmesiyle ısıl dayanımı üst seviyelere çıkartılabilir. [23]

3.4.4. Kaplama İşleminin Uygulanabileceği Malzemeler

Numune yüzeyinde oluşan kararlı haldeki oksit filmin, dielektriksel bariyer görevinde direnç meydana getirmesi ve bu işleviyle anotlamaya imkan sunması açısından valf (hafif) metal grubuna giren Alüminyum, Magnezyum, Titanyum, Zirkonyum, Niyobyum ve alaşımları gibi materyallere MAO tekniğiyle kaplama yapılabilmektedir. Bu grupta yer alan metallerin ve alaşımlarının açık devre şartlarında, kendi oluşturdukları oksit tabakanın kararlı olmasından dolayı korozyona uğramaları güçtür. Metal yüzeyine yoğun bir akım uygulanması suretiyle metal elektrotun potansiyelinin pozitif yönde artırılması, devre üzerinden iletilen akımın tamamına yakınının yüzeydeki oksit filmi büyütmeye harcanmasını sağlamaktadır.

MAO tekniğinin direkt uygulanabildiği hafif metal grubunun yanı sıra, diğer metallere de çeşitli yüzey modifikasyonları neticesinde kaplama yapılması sağlanmaktadır. Örneğin paslanmaz çeliklere normal şartlarda MAO tekniğiyle kaplama uygulamazken, çeşitli yüzey işlemleri neticesinde seramik kaplama aynı şekilde sağlanabilmektedir.

MAO tekniğiyle oluşturulan kaplama dokusu normal şartlarda mat bir görünüme sahipken, numune parçadan beklenilen hizmet koşullarına göre kaplama dokusunda da

modifikasyonlara gidilebilir. Bu sayede estetik anlamada dekoratif renkli kaplamalar ve pürüzsüz yüzeyler elde edilebilmektedir.

3.5. Yüzey Kaplamada Tespit İşlemi

Materyal yüzeyinde oluşan oksit tabaka içersindeki porozların kapatılması, tespit işlemiyle sağlanabilmektedir. Tespit işlemi için anodik okisdasyona tabii tutulan materyal, kaynama noktasındaki suya daldırılarak yaklaşık 15 – 20 dakika bekletilir.

Anodik oksidasyon tekniğiyle yüzeyi işlenen materyallerin kimyasal korozyona karşı dayanımları, tespit sürecinin verimliliğine son derece bağımlıdır. Tespit işlemi için ayrılan süre kısa tutulursa, poroz gözenekleri yeterli ölçüde kapanmaz ve yüzeyin korozyon direnci yetersiz seviyelerde kalır. Tespit işlemi için iki ayrı yol izlenebilmektedir.

3.5.1. Sıcak Uygulanan Tespit İşlemi (Hidrotermal)

Yüzey işlemine tabii tutulan numunenin kaynama derecesindeki deiyonize su içerisine daldırılması suretiyle uygulanmaktadır. Uygulama esnasında banyo suyunun pH değerinin 5,5 ila 6,5 seviyeleri arasında sabitlenmesi gerekmektedir. Verimli uygulama süresini belirlemek için anodik oksidasyon tekniğiyle elde edilen kaplama yüzey kalınlığının her mikronuna iki dakika ayırmak gerekmektedir. Hidrotermal tespit işlemi uygulandıktan sonra malzeme yüzeyinde beyaz renkli bir toz tabakası meydana gelmektedir.

3.5.2. Soğuk Uygulanan Tespit İşlemi (Emprenye)

Emprenye tespit işlemi, nikel florür ya da nikel sülfat içeren deiyonize su çözeltisi içinde uygulanmaktadır. Banyo suyu sıcaklığı 20 – 30 °C aralığında değişmektedir ve malzeme yüzeyinde oluşturulan oksit filmin her mikronu için bir dakikalık süre ayrılmalıdır. Soğuk tespit işlemi için hazırlanan solüsyonun işlem esnasında kirleticilerden sakınılması gerekmektedir. Kirletici moleküllerin arındırılması amacıyla geliştirilen çözelti filtreleri bu işlem için kullanılabilir.

Emprenye tespit işlemi neticesinde yüzeylerde genellikle kararmış bir görüntü oluşmaktadır. Kararmışlık derecesi, numune malzemeye ve alaşımlamaya göre faklılık göstermesinin yanı sıra; banyo çözeltisinin saflığına, pH derecesine, tespit süresine ve diğer ortam faktörlerine de bağlı olarak değişim göstermektedir. Basit bir silme işlemi neticesinde bu kararma giderilebilmektedir. [11,15]

BÖLÜM 4

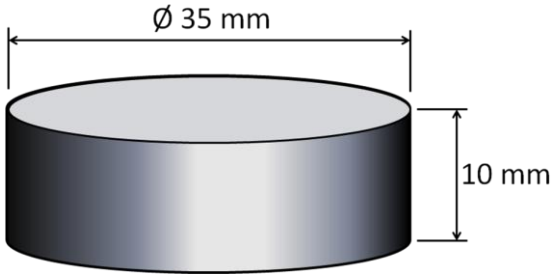
DENEYSEL SÜREÇ

4.1 Giriş

Daha önceki bölümlerde ayrıntılı olarak anlatılan homojenizasyon ısıl işlemi ve Mikro-Ark Oksidasyonu ile yüzey kaplama tekniklerinin, AZ91 Magnezyum alaşımından elde edilen parçalara uygulanması ve kullanılacak numunelerin hazırlanması bu bölümde anlatılmaktadır.

4.2 Deney Süreci

Deneyde kullanılacak olan AZ91 Magnezyum alaşımı numuneler, 35 mm çapında ve 10 mm kalınlıkta silindirik şekilde hazırlanmıştır. Numunelerin teknik resmi Şekil–4.1'de gösterilmiştir. Numuneler, homojenizasyon ışıl işlemine tabi tutulanlar ve tutulmayanlar olmak üzere başlıca iki gruba ayrılmıştır. Daha sonra her iki gruba ait numuneler, Mikro-Ark Oksidasyon tekniği ile sırasıyla kaplama kalınlığı 30 µm, 75 µm ve 100 µm olmak üzere üç değerde kaplamaya tabi tutulmuştur.



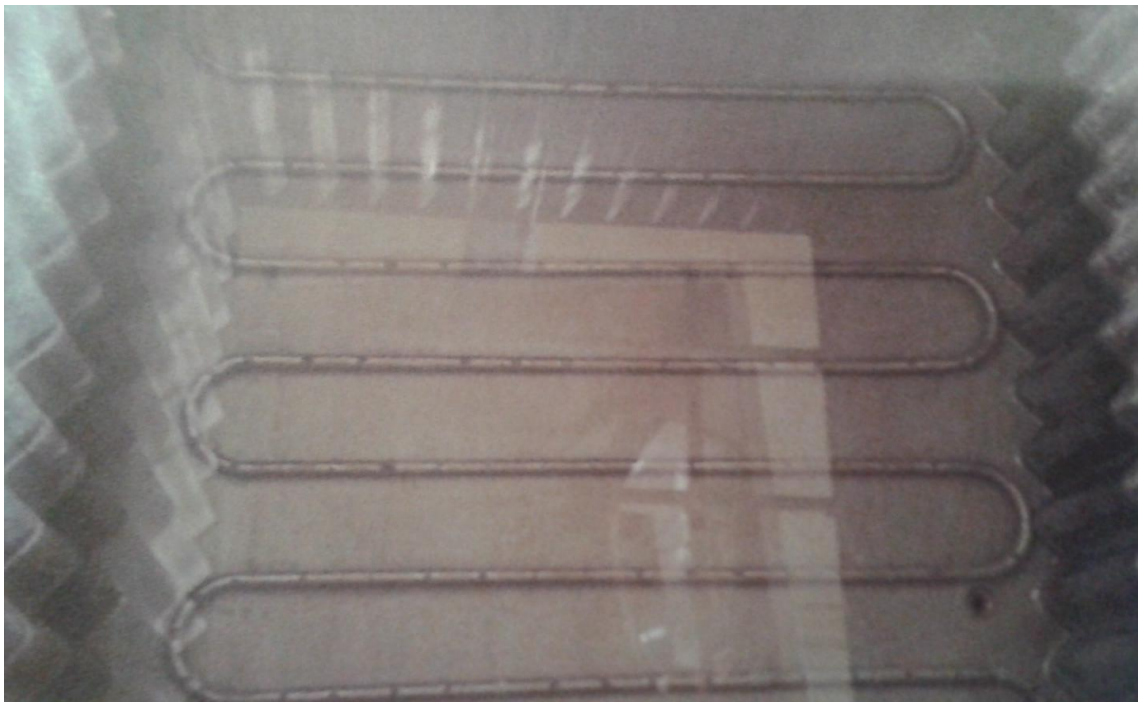
Şekil – 4.1. Deney İçin Hazırlanan AZ91 Magnezyum Alaşımı Numunelerin Teknik Resmi

Homojenizasyon işlemi, Trakya Üniversitesine ait mekanik atölyesinde uygulama imkanı bulmuştur. Homojenize edilecek numuneler, 5 saat süre ile 410°C sıcaklıkta Şekil–4.2'de fotoğrafı sunulmuş olan fırında ısıl işleme tabi tutulmuş ve fırın içerisinde hava ortamında soğumaya bırakılmıştır.



Şekil – 4.2. Homojenizasyon İşlemi İçin Kullanılan Fırın

Homojenizasyon işlemi uygulanan ve uygulanmayan her iki grup numune, Şekil–4.3'de fotoğrafı sunulan Sodyum Silikat ($Na_2SiO_3 \cdot 5H_2O$) ve Potasyum Hidroksit (KOH) çözeltilerinden oluşan banyo içerisinde sırasıyla 20 dak., 60 dak. ve 80 dakikalık sürelerde; 30 µm, 75 µm ve 100 µm kalınlıklarında Mikro-Ark Oksidasyonu tekniği ile kaplamaya tabi tutulmuştur.



Şekil – 4.3. Mikro-Ark Oksidasyonu İçin Hazırlanan Banyo ve Ünite Rezistansı

Mikro-Ark Oksidasyonu işleminin ardından homojenize edilmiş ve edilmemiş ana numune gruplarından; kaplanmamış ve sırasıyla 30 µm, 75 µm ve 100 µm kalınlıklarda kaplanmış olmak üzere dörder alt grup elde edilmiştir. Homojenizasyon işlemine tabi tutulmayan numunelerin görünümü Şekil–4.4'de sunulmuştur.



Şekil – 4.4. Homojenize Edilmemiş Halde MAO Sürecine Tabi Tutulan AZ91 Magnezyum Alaşımı Numuneler

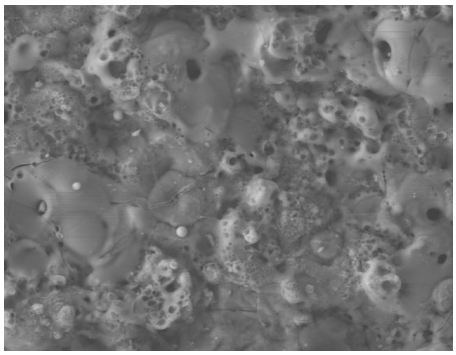
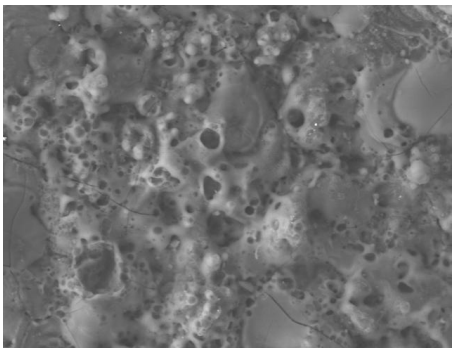
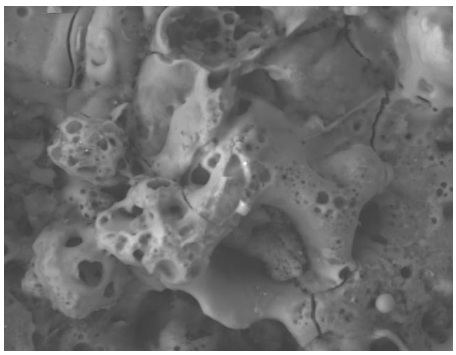
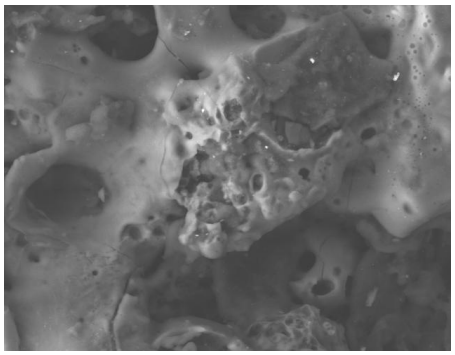
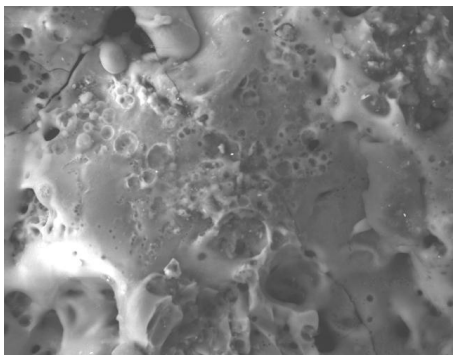
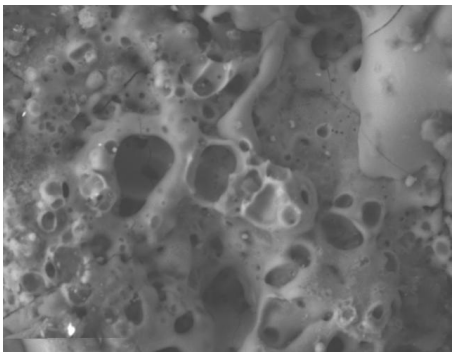
Homojenizasyon ısıl işleminin, Mikro-Ark Oksidasyonu ile yüzey kaplama tekniği üzerindeki etkisinin anlaşılabilmesi için elde edilen ikinci ana grubun görünümü Şekil–4.5'de sunulmuştur. Bu Magnezyum alaşımı numuneler, öncelikle homojenize edilmiş ve daha sonra sırasıyla 30 μm, 75 μm ve 100 μm kalınlıklarında kaplama yüzeyi elde etmek amacıyla MAO sürecine tabi tutulmuştur.



Şekil – 4.5. Homojenize Edilen ve Daha Sonra MAO Sürecine Tabi Tutulan AZ 91 Magnezyum Alaşımı Numuneler

Deney sürecinde elde edilen tüm kaplamaların analizleri, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılarak yapılmıştır. SEM analizi sayesinde kaplama yapılarak oluşturulan yüzeylerin poroziteleri incelenmiş ve kaplamanın numune metalin yüzeyine bağlanması hakkında yorum yapılabilmiştir. SEM analizi sonuçları Tablo–4.1'de sunulmuştur.

Tablo – 4.1. SEM Analizi Sonuçları

	Homojenize Edilmiş	**Homojenize Edilmemiş**
30 µm		
75 µm		
100 µm		

BÖLÜM 5

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Homojenizasyon ısıl işlemine tabi tutulan ve tutulmayan Magnezyum alaşımı parçaların yüzeyinde Mikro-Ark Oksidasyonu ile oluşturulan çeşitli kalınlıklardaki kaplama dokularının malzemeye tutunma oranları bu bölümde değerlendirilmiştir.

SEM analizi neticesinde numune yüzeyi ile kaplama dokusu arasında oluşan sınır bölgenin karakteristiği yorumlanabilmektedir. Bu inceleme sayesinde homojenizasyon işleminin Mikro-Ark Oksidasyonu ile amaçlanan özelliklere katkı sağlayıp sağlamadığı ve hangi kaplama kalınlığının tercih edilmesiyle optimum yüzey özelliklerinin elde edileceği değerlendirilebilmektedir.

Numuneler öncelikle homojenize edilmiş ve edilmemiş olarak iki gruba ayrıldığında, homojenizasyon işlemine tabi tutulan tüm numunelerin homojenize edilmeyen numunelere oranla daha yüksek bağlanma oranlarına ulaştıkları görülmektedir. Bu sonuç homojenizasyon işlemi ile parça yüzeyinin mikro düzeyde daha girintili hale getirilmesinden kaynaklanmaktadır ve bu sayede kaplama dokusu daha verimli tutunma alanı bulabilmektedir.

Kaplama yüzey kalitesi incelendiğinde ise en homojen kaplamaların 30 µm değerindeki ince kaplamalar neticesinde elde edildiği görülmektedir. 30 µm değerindeki kaplamalar homojenize edilen ve edilmeyen numunelerin tamamında en iyi sonuçları vermektedir.

75 µm kalınlığındaki kaplamalar ise, sürecin uzaması neticesinde daha amorf bir karakteristik kazanmıştır. Homojenize edilmiş olan numunelere uygulanan 75 µm'lik kaplamalar homojenizasyona uğramamış parçalara göre daha kararlı bir yapı sergilemektedir.

100 µm değerindeki kaplamalar ise, 75 µm'lik kaplama değerinin elde edilmesi üzerine işlemin sürdürülmesi ile toparlayıcı bir etki göstermiştir. Deney sürecindeki en kalın kaplama dokusunu ifade eden bu değer, 30 µm kalınlığındaki kaplamanın

ardından kalite yönünden ikinci sıradaki yüzeyi belirtmektedir. 75 μm kalınlığındaki kaplamanın amorf özelliği bir miktar kaybedilmiştir.

İncelemeler neticesinde, Magnezyum alaşımı malzeme üzerinde minimum zamanda elde edilen minimum kalınlık değerindeki kaplamanın, en verimli kaplama karakteristiğini sağladığı görülmektedir. Bu sayede hafif metaller içerisinde de en düşük özgül ağırlığa sahip olan magnezyum alaşımı malzemeler, hafifliklerinden ve boyutlarından taviz vermeden beklenilen hizmete uygun olarak son derece dayanıklı biçimde kaplanabilmektedir. Aşınma direncinin uygun olmaması sebebiyle kullanım olanağı bulamadığı alanlarda da, Mikro-Ark Oksidasyonu ile yüzeyinin kaplanması neticesinde söz sahibi olabilmektedir.

KAYNAKLAR

[1] T. A. Leil, ***Development of New Magnesium Alloys for High Temperature Applications***, Clausthal University of Technology, Bethlehem, (2009)

[2] O. A. Lambri, W. Riehemann, Z. Trojanova, ***Mechanical Spectroscopy of Commercial AZ91 Magnesium Alloy***, Scripta Materialia, 45, 1365 – 1371, (2001)

[3] N. D. Saddock. ***Microstructure and Creep Behavior of Mg – Al Alloys Containing Alkaline and Rare Earth Additions***, The University of Michigan, 9 – 30, (2008)

[4] S. Lu, Z. Wang, J. Chen, X. Zhou, ***Optimization of Dual Electrolyte and Characteristic of Micro – Arc Oxidation Coating Fabricated on ZK60 Mg Alloy***, Science Direct, 21, 929 – 935, (2011)

[5] H. F. Guo, M. Z. An, H. B. Huo, S. Xu, L. J. Wu, ***Microstructure Characteristic of Ceramic Coatings Fabricated on Magnesium Alloys by Micro – Arc Oxidation in Alkaline Silicate Solutions***, Applied Surface Science, 252, 7911 – 7916, (2006)

[6] F. Jin, P. K. Chub, G. Xua, J. Zhao, D. Tang, H. Tong, ***Structure and Mechanical Properties of Magnesium Alloy Treated by Micro – Arc Discharge Oxidation Using Direct Current and High-Frequency Bipolar Pulsing Modes***, Materials Science and Engineering, A 435 – 436, 123 – 126, (2006)

[7] F. Liu, Y. Li, J. Gu, Q. Yan, Q. Luo, Q. Cai, ***Preparation and Performance of Coating on Rare-Earth Compounds – Immersed Magnesium Alloy by Micro – Arc Oxidation***, Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 22, 1647 – 1654, (2012)

[8] Ö. Duygulu, O. Yücel, A. A. Kaya, ***Magnezyum Levha Alaşımlarının Üretimi ve Geliştirilmesi***, İtüdergisi, 9, 4, 133 – 138, (2010)

[9] B.L. Mordike, T. Ebert, ***Magnesium Properties – Applications – Potential***, Materials Science and Engineering, A302, 37 – 45, (2001)

[10] I. M. Baghni, Y. Wu, J. LI, ***Mechanical Properties and Mechanical Applications of Magnesium Alloys***, Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 13, 6, 1253 – 1259, (2003)

[11] M. M. Avedesian, H. Baker, ***Magnesium and Magnesium Alloys***, Asm International, The Materials International Society, ABD, (1999)

[12] B. Oguz, ***Demir Dışı Metallerin Kaynağı***, Oerlikon Yayını, İstanbul (1990)

[13] M. Thirumurugan, S. Kumaran, ***Extrusion and Precipitation Hardening Behavior of AZ91 Magnesium Alloy***, Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 23, 1595 − 1601, (2013)

[14] K. Kandemir, A. Ç. Can, ***Otomotiv Endüstrisi İçin Magnezyum Alaşımlarının Kullanım Potansiyeli***, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 9, 1, 37 – 45, (2003)

[15] U. Sözer, ***AA 2014 Alüminyum Alaşımının Plazma Elektrolitik Oksitlenme Yöntemiyle Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesi ve Yorulma Davranışının İncelenmesi***, Trakya Üniversitesi, Edirne, (2011)

[16] R. Schmid – Fetzer, J. Grobner, ***Focused Development of Magnesium Alloys Using the Calphad Approach***, Advanced Engineering Materials, 3: 947 − 961, (2001)

[17] T. Wei, F. Yan, J. Tian, ***Characterization and Wear – and Corrosion – Resistance of Microarc Oxidation Ceramic Coatings on Aluminum Alloy***, Journal of Alloys and Compounds 389, 169 – 176, (2005)

[18] C. Wang, D. Zhang, Y. Jiang, ***Growth Process and Wear Resistance for Ceramic Coatings Formed on Al–Cu–Mg Alloy by Micro – Arc Oxidation***, Applied Surface Science 253: 674 – 678, (2006)

[19] İ. M. Özkara ve M. Baydoğan, ***The Effect Of Pulse Duration In The Micro Arc Oxidation Process On The Morphological Properties And Wear Resistance Of 2024 Aluminium Alloy***, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS), Karabük, Türkiye (2009)

[20] X. Sun, Z. Jiang, S. Xin, Z. Yao, ***Composition and Mechanical Properties of Hard Ceramic Coating Containing a – Al2O3 Produced by Microarc Oxidation on Ti–6Al–4V Alloy***, Thin Solid Films, 471, 194 – 199, (2005)

[21] J.A.Curran, ***Thermal and Mechanical Properties of Plasma Electrolytic Oxide Coatings***, Univercity of Cambridge, Department of Materials Science and Metallurgy, (2005)

[22] K. C. Tekin, E. Çakmak, U. Malayoğlu, ***Plazma Elektrolitik Oksitlenme Yöntemiyle Hafif Metallerin Kaplanması***, Mühendis ve Makina, 49, 582, 3 – 9, (2008)

[23] A.L. Yerokhin, X. Nie, A. Leyland, A. Matthews, S.J. Dowey, ***Plasma Electrolysis for Surface Engineering***, Surface and Coating Technology, 122, 73 - 93, (1999)

[24] W.B. Xue, Z.W. Deng, Y.C. Lai, R.Y. Chen, ***Analysis of Phase Distribution for Ceramic Coatings Formed by Microarc Oxidation on Aluminum Alloy***, J. Amer. Ceram. Soc., 81, 5, 1365 – 1368, (1998)

ÖZGEÇMİŞ

Baturhan TATAR; 13.01.1986 tarihinde Sinop'un Ayancık ilçesinde doğdu. İlk ve orta öğrenimini Antalya ve Mersin'de çeşitli okullarda tamamladıktan sonra, İzmir Maltepe Askeri Lisesinden mezun olmayı müteakip 2004 yılında başladığı Kara Harp Okulundan 2008 yılında Teğmen olarak mezun oldu. İstanbul, Mardin ve Edirne'de subay olarak çeşitli görevlerde hizmet verdi. 2012 yılında Trakya Üniversitesi – Makine Mühendisliği bölümünde yüksek lisans eğitimine başladı. Aslen Kayserilidir. Halen Edirne'de yaşamaktadır.