

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**6082 KALİTE ALUMİNYUM ALAŞIMININ  
MİKRO ARK OKSİDASYONU YÖNTEMİYLE  
YÜZEY MODİFİKASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Salih ÇAKICI**

**Anabilim Dalı : Metalurji ve Malzeme Müh.**

**Programı : Malzeme Mühendisliği**

**HAZİRAN 2009**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**6082 KALİTE ALUMİNYUM ALAŞIMININ  
MİKRO ARK OKSİDASYONU YÖNTEMİYLE  
YÜZEY MODİFİKASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Salih ÇAKICI  
506071431**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 04 Mayıs 2009**

**Tezin Savunulduğu Tarih : 01 Haziran 2009**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENOĞLU (İTÜ)  
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Eyüp Sabri KAYALI (İTÜ)  
Prof. Dr. Mehmet KOZ (MÜ)**

**HAZİRAN 2009**



## **ÖNSÖZ**

Yüksek lisans eğitimim boyunca yaptığım çalışmalarda hoşgörüsü ve anlayışı ile hiçbir yardımı esirgemeyen tüm bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşarak karşılaştığım bütün zorlukları çözümleneme yardımcı olan ve bana her konuda destek olan tez danışman hocalarım Sn. Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENOĞLU ve Sn. Yrd. Doç. Dr. Murat BAYDOĞAN'a, çalışmalarım sırasında tecrübelerini ve desteklerini benden esirgemeyen Sn. Araş. Gör. Özgür ÇELİK'e, Sn. Araş. Gör. Mert GÜNYÜZ'e, Sn. Rıza KARADAŞ ve Sn. Çiğdem ÇAKIR KONAK' a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Bu çalışmanın sonuçları 107M038 nolu proje kapsamında gerçekleşen çalışmaların bir bölümünü oluşturmaktadır. Sağladığı destekten dolayı Tübitak'a teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmalarım boyunca yardımlarını benden esirgemeyen değerli arkadaşlarım Sn. İsa Metin ÖZKARA' ya, Sn. Samet Serkan BOZKUŞ' a, Sn. Tolga ŞİŞMANOĞLU' na ve tüm Mekanik Metalurji Laboratuvarı mensuplarına teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca benimle birlikte koşturup benden her koşulda desteğini ve yardımlarını esirgemeyen çok değerli arkadaşım Merve PER'e teşekkür ederim.

Son olarak hayatım boyunca beni her şartta destekleyen, her zaman yanımda olan ve bu günlere gelmemi sağlayan aileme en içten dileklerle teşekkür ederim. Aileme ve üzerimde emeği olan herkese sonsuz teşekkürler.

**Mayıs 2009**

**Salih ÇAKICI**

Metalurji ve Malzeme Mühendisi



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ.....	iii
KISALTMALAR .....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
SEMBOL LİSTESİ .....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY .....	xvii
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. ALUMİNYUM ve ALUMİNYUM ALAŞIMLARI.....</b>	<b>3</b>
2.1 Aluminyumun Genel Özellikleri .....	3
2.2 Aluminyum Alaşımları.....	3
<b>3. MİKRO ARK OKSİDASYON İŞLEMİ .....</b>	<b>5</b>
3.1 Mikro Ark Oksidasyon İşleminin Tarihçesi.....	5
3.2 Mikro Ark Oksidasyona İşleminin Uygulama Alanları .....	6
3.3 Mikro Ark Oksidasyon İşleminin Avantaj ve Dezavantajları .....	7
3.4 Mikro Ark Oksidasyon Donanımı ve Prosesi .....	9
3.4.1 MAO akım-voltaj karakteristikleri.....	11
3.4.2 MAO’da kullanılan güç kaynakları.....	12
3.4.2.1 Doğru akım güç kaynakları.....	13
3.4.2.2 Titreşimli doğru akım güç kaynakları .....	13
3.4.2.3 Dengelenmemiş alternatif akım güç kaynakları.....	13
3.4.3 MAO için elektrolit seçimi .....	13
3.4.4 MAO ile kaplanabilen malzemeler.....	15
3.5 Tespit işlemi .....	17
<b>4. ALUMİNYUMUN MİKRO ARK OKSİDASYON İŞLEMİ.....</b>	<b>19</b>
<b>5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....</b>	<b>27</b>
4.1 Mikro Ark Oksidasyon İşlemi.....	27
4.2 Karakterizasyon Testleri.....	28
<b>6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA .....</b>	<b>31</b>
6.1 Yüzey İncelemeri .....	31
6.2 X-Işını Difraksiyon (XRD) Çalışmaları .....	41
6.3 İslanabilirlik Çalışmaları .....	44
6.4 Rockwell C Yapışma Deneyleri .....	46
6.5 Sertlik Deneyleri .....	48
6.6 Aşınma Deneyleri.....	53
6.7 Korozyon Deneyleri .....	60
<b>7. GENEL SONUÇLAR .....</b>	<b>63</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>67</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>71</b>



## **KISALTMALAR**

<b>MAO</b>	: Mikro Ark Oksidasyon
<b>PEO</b>	: Plazma Elektrolitik Oksidasyon
<b>SEM</b>	: Taramalı Elektron Mikroskobu
<b>CVD</b>	: Kimyasal Buhar Biriktirme
<b>PVD</b>	: Fiziksel Buhar Biriktirme
<b>T(+)</b>	: Pozitif Voltaj Uygulama Süresi
<b>T(-)</b>	: Negatif Voltaj Uygulama Süresi



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

<b>Çizelge 2.1</b> : Alüminyum Birliği'nin dövme alüminyum alaşımlarını sınıflandırma sistemi .....	4
<b>Çizelge 2.2</b> : 6082 Alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi.....	4
<b>Çizelge 4.1</b> : MAO kaplı Al alaşımının sertlik ve aşınma dirençleri.....	23
<b>Çizelge 6.1</b> : Voltaj kontrollü MAO işlemi uygulanan numunelerin yüzeylerinin makro görüntüleri.....	31
<b>Çizelge 6.2</b> : Akım kontrollü MAO işlemi uygulanan numunelerin yüzeylerinin makro görüntüleri.....	32
<b>Çizelge 6.3</b> : Voltaj kontrollü MAO işlemi uygulanan numunelerin yüzeylerinin taramalı elektron mikroskopu görüntüleri.....	34
<b>Çizelge 6.4</b> : Akım kontrollü MAO işlemi uygulanan numunelerin yüzeylerinin taramalı elektron mikroskopu görüntüleri.....	34
<b>Çizelge 6.5</b> : Voltaj kontrollü MAO işlemi uygulanan numunelerin Rockwell C deneyine ait optik mikroskop görüntüleri .....	46
<b>Çizelge 6.6</b> : Akım kontrollü MAO işlemi uygulanan numunelerin Rockwell C deneyine ait optik mikroskop görüntüleri .....	47
<b>Çizelge 6.7</b> : Voltaj kontrollü mikro ark oksidasyon işlemi uygulanan numunelerin yüzeylerinin voltaj uygulama süresine göre değişimi (1000x) .....	49
<b>Çizelge 6.8</b> : Farklı bekleme süreleri uygulanarak elde edilen farklı kalınlıklardaki kaplamaların kesit SEM görüntüleri (1000x).....	50
<b>Çizelge 6.9</b> : Ortalama aşınma izi genişliği, ortalama aşınma izi derinliği ve aşınma alanı değerlerinin numunelere göre değerşimi .....	54
<b>Çizelge 6.10</b> : Pozitif voltaj uygulama süresi sabitken negatif voltaj uygulama süresinin değerşimine göre elde edilen kaplamalara ait aşınma izlerinin optik mikroskop ve SEM görüntüleri .....	55
<b>Çizelge 6.11</b> : Negatif voltaj uygulama süresi sabitken pozitif voltaj uygulama süresinin değerşimine göre elde edilen kaplamalara ait aşınma izlerinin optik mikroskop ve SEM görüntüleri .....	56



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 3.1 : MAO işleminde kullanılan donanım .....	9
Şekil 3.2 : MAO işlem basamakları.....	11
Şekil 3.3 : Elektrot yüzeyindeki dielektrik filmde gerçekleşen akım-voltaj değişimi .....	12
Şekil 3.4 : Alüminyumun MAO işlemi için kullanılan çeşitli elektrolitlerin $I=f(U)$ .....	14
Şekil 3.5 : Yüzey işlemlerine bağlı olarak mühendislik malzemelerin sertliklerinde meydana gelen değişimler.....	16
Şekil 3.6 : MAO kaplı AM50 Mg alaşımından üretilmiş parçalar .....	17
Şekil 4.1 : MAO prosesinde oksit tabakası oluşumu .....	19
Şekil 4.2 : MAO işlem süresine göre oluşandeşarj kanallarının sayısı.....	20
Şekil 4.3 : MAO prosesinde zamana bağlı olarakdeşarj kanallarındaki değişimin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.....	20
Şekil 4.4 : Deşarj kanallarının yüksek büyütmedeki görünümü.....	21
Şekil 4.5 : Voltaj değerine bağlı olarak yüzey görünümünün değişimi .....	24
Şekil 4.6 : 480V altında 200Hz, 400Hz ve 600Hz frekans değerlerinde yüzey morfolojisinde görülen değişim .....	25
Şekil 4.7 : Pozitif ve negatif voltaj çevriminin şematik gösterimi .....	25
Şekil 4.8 : Vuruş oranı değerlerinin yüzey morfolojisine etkisi.....	26
Şekil 5.1 : Mikro Ark Oksidasyon Cihazı .....	28
Şekil 5.2 : Aşınma izi genişliğinin ve derinliğinin şematik olarak gösterimi.....	29
Şekil 6.1 : Uygulanan voltajın değiştirilmesiyle farklı faz yapılarının oluşması .....	33
Şekil 6.2 : Ortalama yüzey pürüzlülüğünün pozitif voltaja ve pozitif akıma bağlı olarak değişimi .....	36
Şekil 6.3 : Oksit tabakası kalınlığının pozitif voltaja ve pozitif akıma bağlı olarak değişimi .....	37
Şekil 6.4 : V(+):500V, V(-):100V değerlerinde uygulama süresi değişiminin oksit tabakası kalınlığına etkisi .....	39
Şekil 6.5 : V(+):500V, V(-):100V değerlerinde uygulama süresi değişiminin yüzey pürüzlülüğüne etkisi .....	40
Şekil 6.6 : Pozitif voltaj 500V iken negatif voltaj 100V ve 200V uygulandığında oluşan faz yapılarındaki değişim.....	42
Şekil 6.7 : V(+):500V, V(-):100V değerlerinde pozitif voltaj uygulama süresi 1000µs, negatif uygulama süresi 5000µs olan kaplamaya ait XRD paterni .....	43
Şekil 6.8 : İslatma açısının pozitif voltaja ve pozitif akıma bağlı olarak değişimi... 45	
Şekil 6.9 : V(+):500V, V(-):100V değerlerinde uygulama süresi değişiminin oksit tabakası sertliğine etkisi .....	51
Şekil 6.10: Oksit tabakası kalınlığına bağlı olarak ortalama sertlik değerinin değişimi.....	52
Şekil 6.11: V(+):500V, V(-):100V değerlerinde uygulama süresi değişiminin aşınma iz alanına etkisi .....	57

<b>Şekil 6.12:</b> Pozitif/negatif voltaj süresinin değişimine göre relatif aşınma oranları .....	58
<b>Şekil 6.13:</b> Oksit tabakası kalınlığına bağlı olarak relatif aşınma oranının değişimi .....	59
<b>Şekil 6.14:</b> Ortalama sertlik değerine bağlı olarak relatif aşınma oranının değişimi .....	59
<b>Şekil 6.15:</b> Korozyon testi yapılan numunelerin zamana bağlı olarak ağırlıklarındaki değişim.....	61
<b>Şekil 6.16:</b> Korozyon miktarının tespit işlemsiz ve tespit işlemine göre değişimi .....	62

## SEMBOL LİSTESİ

<b>V</b>	: Voltaj
<b>V(+)</b>	: Pozitif Voltaj
<b>V(-)</b>	: Negatif Voltaj
<b>A</b>	: Akım
<b>I(+)</b>	: Pozitif Akım
<b>I(-)</b>	: Negatif Akım
<b><math>\mu</math>l</b>	: Mikrolitre
<b><math>\mu</math>s</b>	: Mikrosaniye
<b>Ra</b>	: Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü
<b><math>\mu</math>m</b>	: Mikrometre



## 6082 KALİTE ALUMİNYUM ALAŞIMININ MİKRO ARK OKSİDASYONU YÖNTEMİYLE YÜZEY MODİFİKASYONU

### ÖZET

Son yıllarda özellikle otomotiv ve uzay endüstrisinde alüminyum gibi hafif metallerin ve alaşımlarının kullanımı önemli ölçüde artış göstermiştir. Bu artışın başlıca sebepleri hafif metallerin iyi mekanik özelliklere sahip olması, kolay şekillenebilmeleri ve geri dönüştürülebilir olmalarıdır. Tasarımlardaki ağırlığın azaltılmasıyla yakıt tasarrufu sağlanmakta ve bunun sonucunda havaya bırakılan egzoz gazı miktarı azalmaktadır.

Alüminyum alaşımları, bunun gibi iyi özelliklerinden dolayı geniş bir alanda kullanılmaktadır. Fakat düşük yüzey sertliği ve aşınma dirençleri gibi dezavantajları alüminyum alaşımlarından yapılan parçaların kullanım ömrünü azaltmakta ve kullanım alanını kısıtlamaktadır.

Yüzey modifikasyonları ile bu dezavantajların giderilmesi mümkün olmaktadır. Mikro ark oksidasyon (MAO) olarak adlandırılan yeni bir yüzey işlemi tekniğiyle alüminyum gibi hafif metaller, kalın ve sert alüminyum oksit ( $Al_2O_3$ ) seramik tabakasıyla kaplanarak aşınma dirençleri arttırılmaktadır.

Anodik oksidasyon prensibine dayanan mikro ark oksidasyon (MAO) tekniği, son 10 yıl içerisinde çok yaygın bir şekilde uygulama alanı bulmuştur. Bir elektrolit çözeltisi içerisine yerleştirilen anot numuneye yüksek değerlerde voltaj verildiğinde malzeme yüzeyinde oksit tabakası oluşumu başlar. Bu geleneksel bir anodik oksidasyon işlemidir. Yükselen voltaj ile birlikte kritik bir voltaj değerine ulaşılır. "Dielectric breakdown" olarak adlandırılan bu kritik esik değeri aşıldığında malzeme yüzeyinde mikro boyutlarda arklar oluşmaya başlar. Bu işlem mikro ark oksidasyon işlemi olarak tanımlanır. Diğer kaplama yöntemlerine göre oluşturduğu oksit tabakasının kalınlığı, yüksek yapışma kuvveti, porozite miktarı, düşük maliyeti ve çevre dostu olması ile avantajlı bir görünüm sergilemektedir.

Bu çalışmada mikro ark oksidasyon yöntemiyle 6082 alüminyum alaşımı üzerinde oluşturulan oksit tabakasının yapısı ve mikro ark oksidasyon işlem parametrelerinin değiştirilmesinin kaplama yapısına etkisi araştırılarak uygulanan farklı voltajlar, akım yoğunlukları, bekleme süreleri ve zamanın etkisiyle oksit tabakasındaki morfolojik ve mekaniksel değişim incelenmiştir. Elde edilen oksit tabakasının özellikleri taramalı elektron mikroskobu incelemeleri, kalınlık, pürüzlülük, ıslatma açısı, XRD analizi, sertlik, aşınma ve korozyon testleriyle incelenmiştir.



## **SURFACE MODIFICATION OF 6082 QUALITY ALUMINUM ALLOY BY THE MICRO ARC OXIDATION PROCESS**

### **SUMMARY**

In recent years, use of light metals and their alloys are becoming increasingly important, especially in the automotive and aerospace industries. Reasons of that increase are light metal's good mechanical properties, good ductility and recycling. Reduction of weight in designs causes fuel economy so that amount of exhaust gas decreases.

Because of the this kind of good properties aluminum alloys are used widely. However, the poor surface hardness and wear resistance of aluminum, reducing lifetime of components that produced from aluminum, limits its use in applications.

This kind of disadvantages can be eliminate with surface modifications. With a new surface treatment technique called "Micro arc oxidation (MAO)", wear resistance of light metals like aluminum is increased by coated with thick and hard aluminum oxide ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ceramic layer.

Micro arc oxidation (MAO), which basen on anodic oxidation, is used very common in last 10 years. When high voltage is applied to the anode in an electrolytic solution, an oxide layer starts to form on the specimen surface. This is an conventional anodic oxidation process. With the increasing voltage, approached to a critical voltage. When this critical voltage degree called "dielectric breakdown" is exceeded, micro arcs started to ocur on the surface of the material. This process is defined as micro arc oxidation process. According to other coating technologies, this process shows some advantages as high layer thickness, high adhesion strength, porosity structure, low cost and friendly to the enviroment.

In this study, the effect of micro arc oxidation process and the variation of the parameters on the surface parameters 6082 aluminum alloys specimens coated with micro arc oxidation process and the composition and microstructure of the aluminum oxide coating were investigated. Micro arc oxidation process is carried out in different voltage values, different current density, different duty cycle and different time durations. Properties of oxidized and untreated specimens are observed with scanning electron microscope examinations, thickness, roughness, contact angle, XRD analysis, hardness, wear and corrosion tests.



## 1. GİRİŞ

Aluminyum alaşımları yüksek mukavemet, düşük yoğunluk, iyi fiziksel ve kimyasal performanslarından dolayı en çok ilgi çeken malzemelerden birisidir [1]. Hafif malzemelere olan talep artışından dolayı aluminyum ve alaşımları daha geniş alanda kullanılmaktadır [2].

Aluminyum hafif metaller gurubuna giren ve teknik alanda çok kullanılan bir metaldir. Aluminyum, düşük özgül ağırlığının ( $2.7 \text{ g/cm}^3$ ) yanı sıra, yüksek elektrik ve ısı iletkenlik, atmosferik korozyona direnç, kolay üretilebilirlik ve diğer metallerle çekme dayanımı yüksek alaşım oluşturabilme gibi özelliklere sahiptir [3].

Aluminyumun oksijene karşı olan yüksek afinitesi nedeni ile, yüzeyde metalin havayla temas etmesi sonucu, ince fakat yoğun bir oksit tabakası ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) oluşmaktadır. Bu tabaka aluminyumu pek çok ortamda korozif etkilerden korur, ancak bazı asit, baz ve tuz çözeltileri bu koruyucu oksit tabakasının yapısını bozmaktadır [4].

Bu problemin azaltılması için çeşitli yüzey modifikasyonları uygulanarak özelliklerinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Uygulanan yüzey modifikasyonunun etkili yollarından birisi, yüzeyde kromat iyonları oluşturacak bir ön işleme mümkündür. Ancak bu yöntemde kullanılan kimyasallar yüksek derecede zehirli olduğundan ve çevreye olan zararlarından dolayı uygulanması sakıncalıdır [5,6]. Dolayısıyla, bu yöntemin yerini dolduracak yeni bir tekniğin kullanımı son yıllarda yaygınlaşmıştır. Anodik oksidasyon prensibine dayanan Mikro Ark Oksidasyon (MAO) tekniği yeni bir yüzey kaplama işlemi olarak son 10 yıl içerisinde çok yaygın bir şekilde araştırma ve uygulama alanı bulmuştur [7-10].

Çevre dostu bir kaplama yöntemi olan MAO, çok farklı mekanik ve fiziksel yapıya sahip kaplamaların özellikle Mg, Ti, Al gibi malzemeler ve bunların alaşımlarının yüzeylerinde oluşturulmasına imkan tanımaktadır.

Bu yöntem bir elektrolit içerisinde daldırılan söz konusu malzeme ve alaşımların plazma kimyası ve elektrokimyasal reaksiyonların sinerjistik etkisi ile oluşan plazma boşalmaları sayesinde yüzeyin kalın, sert, aşınmaya ve korozyona karşı dirençli bir tabaka ile kaplanması esasına dayanmaktadır.

MAO prosesinin bir diğer avantajı karmaşık yüzey geometrisine sahip parçaların tüm yüzeylerinin aynı kalınlık ve özelliklere sahip sert, aşınma ve korozyona dirençli filmler ile kaplanmasına imkan tanınmasıdır. Bu sayede yüzeyin sadece belli bir kısmını hedef göstererek kaplama yapan tekniklere üstünlük sağlar [10,11].

Bu çalışmada 6082 kalite alüminyum alaşımına alkali esaslı bir çözelti içinde (1g/l KOH+3g/l Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>), voltaj ve akım kontrollü mikro ark oksidasyon işlemi uygulanarak oluşan oksit film tabakasının özellikleri incelenmiştir. Oluşan kaplamanın yüzey morfolojisi ve mikro yapısı incelenerek; süre, akım/voltaj değişimi, pozitif/negatif vuruş süresi (uygulama/bekleme süresi), vb. gibi mikro ark oksidasyon parametrelerinin oluşan oksit film tabakası yapısına etkileri gözlemlenmiştir.

## 2. ALUMİNYUM VE ALUMİNYUM ALAŞIMLARI

### 2.1 Alüminyumun Genel Özellikleri

Alüminyum hafif metaller grubuna giren ve teknik alanda çok kullanılan bir metaldir. Hafif metal terimi, özgül ağırlığı  $3.8 \text{ g/cm}^3$ 'den küçük olan metaller için kullanılmaktadır ve bu sınıfın içinde, alüminyum, magnezyum, potasyum, lityum ve berilyum bulunmaktadır. Bunlar arasında özellikle alüminyum ve magnezyum en yaygın kullanılan metallere aittir. Alüminyum, düşük özgül ağırlığının ( $2.7 \text{ g/cm}^3$ ) yanı sıra, yüksek elektrik ve ısı iletkenlik, atmosferik korozyona direnç, kolay üretilirlik ve diğer metallerle çekme dayanımı yüksek alaşım oluşturabilme gibi özelliklere sahiptir [3].

Alüminyumun oksijene karşı olan yüksek afinitesi nedeni ile, yüzeyde metalin havayla temas etmesi sonucu, ince fakat yoğun bir oksit tabakası ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) oluşmaktadır. Bu tabaka alüminyumı pek çok ortamda korozyon etkilerinden korur, ancak bazı asit, baz ve tuz çözeltileri bu koruyucu oksit tabakasının yapısını bozmaktadır [4].

### 2.2 Alüminyum Alaşımaları

Alüminyum alaşımaları döküm ve dövme olmak üzere iki grupta sınıflandırılmaktadır. Dövme alüminyum alaşımaları, Çizelge 2.1'de görüldüğü gibi, Alüminyum Birliği'nin (*Aluminum Association*) sınıflandırmasına göre 4 rakamlı bir simgeyle tanımlanmaktadır. Burada ilk rakam bileşimdeki ana elementi, ikinci rakam ise orijinal alaşımdaki oranından daha farklı bir oranda bulunan element sayısını belirtmektedir. Dolayısıyla, ikinci rakamın 0 olması, serinin orijinal alaşımını göstermektedir. Son iki rakamın ise 1XXX serisinin dışındaki alaşımlarda özel bir önemi olmayıp, alaşımı o dizinin diğer alaşımlardan ayırmak için kullanılmaktadır. 1XXX serisi ise, saf alüminyumı temsil ettiğinden, son iki rakam, alüminyumun saflık derecesinin bir ölçüsü olarak, % 99'dan sonraki rakamları göstermektedir [3].

**Çizelge 2.1:** Alüminyum Birliği'nin dövme alüminyum alaşımlarını sınıflandırma sistemi [3].

Simge	Ana alaşım elementi
1XXX	% 99.00 veya daha fazla alüminyum
2XXX	Cu
3XXX	Mn
4XXX	Si ve Cu ve/veya Mg
5XXX	Mg
6XXX	Mg ve Si
7XXX	Zn
8XXX	Diğer elementler
9XXX	Yaygın olarak kullanılmayan seriler

Bu alaşımlardan 6XXX grubuna ait olan 6082 alaşımın kimyasal bileşimi Çizelge 2.2'de gösterilmiştir. Öte yandan, alüminyum döküm alaşımları daha yaygın olarak 3 rakamlı bir simge ile tanımlanır. Bu sınıflandırma sisteminde de ilk harf dövme alaşımlardakine benzer şekilde, malzeme içindeki ana alaşım elementini göstermektedir.

Alüminyum alaşımlarından, 2XXX, 6XXX ve 7XXX grubu alaşımlara çökeltme sertleşmesi adı verilen bir ısıl işlem uygulanabilir ve bu yolla alaşımın sertlik ve dayanımı önemli ölçüde arttırılabilir. Alüminyum alaşımlarındaki alaşım elementlerinin en önemli işlevlerinden biri, saf alüminyumun süneklik ve korozyon direncini olumsuz yönde etkilemeden saf alüminyumun düşük akma sınırını yükseltmektir. Bu özelliği kazandıran elementler, manganez, magnezyum, silisyum, bakır ve çinko olup, düşük miktarlarda bile kaymaya karşı direnci arttırarak akma dayanımını yükseltirler; şekil değiştirme kabiliyeti ise etkilenmez. Bu elementlerin oranlarının daha yüksek olması halinde, sert, kırılđan intermetalik bileşikler oluşur. Böylelikle dayanım daha da yükselir ancak şekil değiştirme kabiliyeti kaybolur. Bu nedenlerle dövme alaşımları, az alaşım ihtiva ederler.

**Çizelge 2.2:** 6082 Alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi (%) [12].

6082	Zn	Mg	Cu	Cr	Mn	Fe	Si	Ti	Al
Kimyasal Bileşim Aralığı	0,2	0,6 - 1,2	0,1	0,25	0,4 - 1	0,5	≤ 1,3	0,1	Kalan

### 3. MİKRO ARK OKSİDASYON İŞLEMİ

#### 3.1 Mikro Ark Oksidasyon İşleminin Tarihçesi

Mikro ark oksidasyon işlemi malzeme yüzeyinde poroz, kısmen kaba ve sağlam yapışmış bir oksit tabakası oluşturulmasını sağlayan henüz gelişmekte olan bir tekniktir. Bu işlem çözünmüş tuzlar içeren elektrolitik bir banyo içerisinde elektrokimyasal oksidasyon ile yüksek voltaj akım davranışını birleştirir [13].

Mikro ark oksidasyon (MAO) işlemi, yaklaşık 40 yıl önce Sovyetler Birliği'nde, önceleri akademik, sonraki yıllarda ise denizaltı parçalarının üretimi çerçevesinde askeri uygulamalarda kullanılmaya başlanmış ileri bir yüzey işlemidir. Amerika'da 1970'li yıllarda, 1980'lerin sonunda ise tüm dünyaya tanınan mikro ark oksidasyon, günümüzde halen güncel ve yaygın çalışılan bir araştırma konusudur.

Mikro ark oksidasyon işlemini tanımlamak için pek çok terim kullanılmaktadır. Bunlar arasında kıvılcımlı anodik oksidasyon (spark anodizing), anodik kıvılcımlı biriktirme (anodic spark deposition), mikro ark anodik oksidasyon (micro arc anodizing, "mao"), mikro plazma anodik oksidasyon (microplasma anodizing), mikro plazma oksidasyon (mikro plazma oxidation), plazma elektrolitik oksidasyon (plasma electrolytic oxidation, "peo") ve elektroplazma oksidasyon (elektroplasma oxidation) sayılabilir [14,15].

Amerika'daki pek çok patentli işleme ek olarak Avrupa Keronite, Kepla-Coat, Tagnite, Anomag, EC<sup>2</sup> adları altında, İsrail ise Almag-Al adıyla kendi mikro ark oksidasyon teknolojilerini geliştirmişlerdir. Bu ülkelerin yanı sıra, Çin, Japonya ve Avustralya da mikro ark oksidasyon teknolojisi uygulamalarına katılmışlardır [13,16].

### 3.2 Mikro Ark Oksidasyon İşleminin Uygulama Alanları

Mikro ark oksidasyon işlemi, otomotiv endüstrisi, uzay endüstrisi, askeri alanda, vs. gösterdiği avantajlardan dolayı pek çok uygulama alanı bulabilmektedir. Bu yöntemle üretilen kaplamalar kalın seramik kaplama istenen uygulamalarda kullanılabilirler. Ayrıca geleneksel anodik oksidasyon işlemleriyle kaplanamayan yüksek silisyum içeren alüminyum alaşımları ve magnezyum alaşımları bu teknikle kaplanabilirler. Mikro ark oksidasyon işlemi ile üretilen seramik kaplamalar boyalara karşı gösterdikleri kuvvetli eğilim ile mükemmel bir boya tabanı görevi görebilirler.

Mikro ark oksidasyon işlemi ile üretilmiş kaplamalar yüksek sıcaklık dayanımları ile uzay araçlarında ve roketlerde koruyucu olarak kullanılabilir ki, bu tür kaplamaların mükemmel dielektrik özelliğinden faydalanarak yalıtkan ortamlarda kullanılması da mümkündür. Bunlara ek olarak mikro ark oksidasyon işlemi ile üretilen kaplamaların değişik renkleri de, bu yöntemle üretilen malzemelerin mimari uygulamalarda kullanılabilceğini gösterir [13].

Mükemmel dielektrik özellik göstermesi nedeniyle, ısıya dayanıklı kaplamalar, füzelerin ve uzay mekiklerinin koruyucu kaplamalarının üretiminde değer kazanır. Diğer yandan, MAO teknolojisi farklı alaşımların kaplanması sonucu ortaya çıkan değişik renklere bağlı olarak mimari alanlarda da uygulama alanları bulabilir [17].

Diğer uygulamalar, kimyasal, mekanik, termal, elektrik-elektronik ve bu dördünün kombinasyonunu gerektiren ortamlar olarak sayılabilir. Aşağıda mikro ark oksidasyon işlemiyle üretilen oksit kaplamaların, bu gibi uygulama alanlarında kullanımı mümkün kılan özellikleri sıralanmıştır:

1. Kimyasal uygulamalar: Orta seviyeli sıcaklıklara, güçlü asit ve bazlara karşı dirençlidir. Bu sebeple kimya ve gıda endüstrilerinde kullanılabilir.
2. Mekanik uygulamalar: Oksit tabakasının sertliği  $1300 \text{ kg/mm}^2$ 'den yüksektir. Bu yüksek sertlik, kayma, abrasif ve erozif aşınma direncini arttıran bir faktördür. Ayrıca, sürtünme katsayısının düşük olması, sınır yağlama koşullarında kullanımı da mümkün kılmaktadır.
3. Termal uygulamalar: Oksit tabakasının ısı iletkenliği, diğer metallerle göre daha düşüktür. Bu nedenle, sıcaklığın eşit dağılımını sağlamak ve termal şok direncini arttırmak için kullanılabilirler.

4. Elektrik ve elektronik uygulamalar: Oksit tabakasının yalıtkan bir film olarak elektrik ve elektronik bileşenler üzerinde kullanılırlar. Mikro ark oksidasyon işlemi, iç yüzeylerin sert kaplanması (oyuk, silindirik ve konik bölgeler) için uygundur [18].

### 3.3 Mikro Ark Oksidasyon İşleminin Avantaj ve Dezavantajları

Mikro ark oksidasyon teknolojisi henüz gelişmekte olan bir teknoloji olduğundan, malzeme yüzeyinde gelişen seramik filmin oluşum ve gelişim mekanizması ile oluşan seramik filmin özelliklerinin tam olarak anlaşılabilmesi için pek çok çalışmanın yapılması gerekmektedir. Fakat bugüne kadar yapılan çalışmalar temel alındığında, mikro ark oksidasyon teknolojisinin pek çok avantajı olduğu yalnız bunun yanında bazı dezavantajları da beraberinde getirdiği gözlenmiştir.

Mikro ark oksidasyon teknolojisinde işlem öncesi numune hazırlama işlemi diğer teknolojilere göre daha az önem arz eder. Bu durum üretim sürecinin daha hızlı işlenmesini ve işlem öncesi numune hazırlamada kullanılacak çözeltilerin çevresel etkilerinin en aza indirilmesini sağlar. Mikro ark oksidasyon teknolojisinin diğer bir avantajı ise alüminyum, magnezyum, titanyum, niyobyum, zirkonyum gibi geniş bir malzeme grubuna uygulanabilmesi ve geleneksel anodik oksidasyon yöntemi ile kaplanması zor olan yüksek bakır içeren alüminyum alaşımlarının, yüksek silisyum içeren döküm malzemelerin bu yöntem ile 300µm kalınlığa kadar kaplanabilmesidir [13,19].

MAO teknolojisi çevreye karşı duyarlı, zehirli atıklar içermeyen bir kaplama yöntemi olarak hafif metallerin geleneksel yöntemlerle kaplanmasına alternatif olmaktadır. Sağladığı benzersiz aşınma ve korozyon direnci sayesinde özellikle otomotiv sanayinde kullanılan çelik esaslı parçaların yerine Al, Ti, Mg, vb. hafif alaşımların kullanılmasına imkan tanımaktadır [20].

MAO prosesinin belli başlı avantajları şöyledir:

- Ön veya son yüzey işlemleri gerekli değildir.
- Çevreye karşı duyarlı ve pahalı olmayan elektrolitler kullanılır.
- Kaplama rengi değiştirilerek dekoratif amaçlı kullanılabilir.
- Yüksek sertliğe sahip (Al için 2000 HV) kaplamalar elde edilmektedir.

- Düşük sürtünme katsayılı yüzeyler oluşturulur ( $f = 0,005-0,01$ ).
- Yüksek aşınma direncine sahiptir.
- Yüksek sıcaklık dayanımı özelliğinden dolayı termal bariyer kaplama olarak kullanılmaktadır.
- Dielektrik dayanımı 10-20V/Mikron' dur.
- Çeşitli ortamlarda korozyona karşı dayanıklıdır.

MAO prosesinde kontrol edilebilen karakteristikler akım yoğunluğu, voltaj, elektrolit bileşimi, sıcaklık, vb. değiştirilerek farklı yapı ve özelliklere sahip kaplamalar üretilmektedir. Üretilen kaplamanın yüzeyi mikro seviyede pürüzlülüğe sahip olduğundan dekoratif veya işlevsel amaçlı ikincil kaplamaların yüzeylerine uygulanmasına imkan vermektedir. Bu açıdan polimerler, seramikler ve metaller değişik yöntemlerle SOL-GEL CVD, PVD, Akımsız Ni kaplama, vb. kaplama yüzeyine uygulanabilmektedir [19].

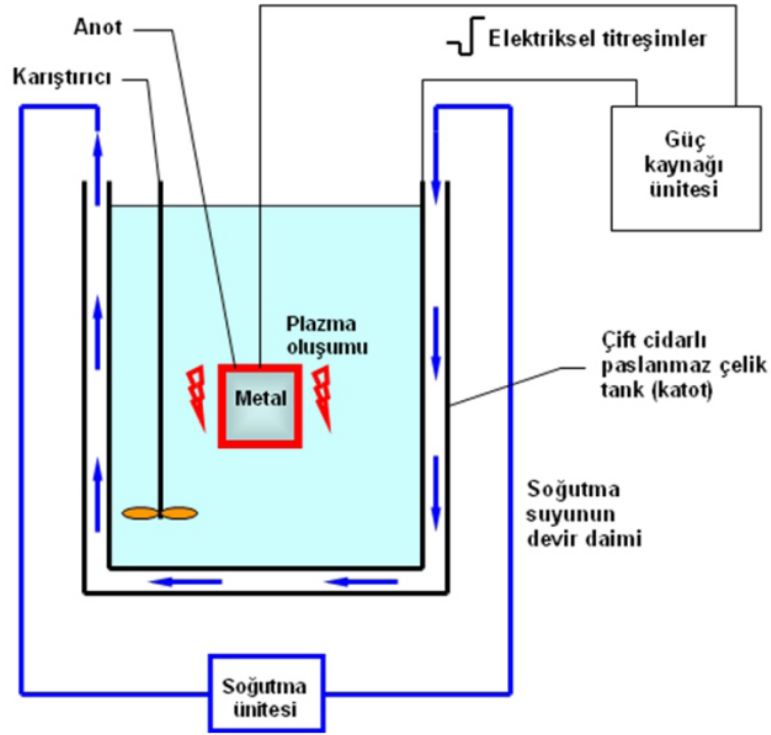
Bu avantajları mikro ark oksidasyonun geleneksel anodik oksidasyon yöntemlerine göre tercih edilir olmasını sağlamaktadır. Mikro ark oksidasyon işleminde de diğer işlemlerde olduğu gibi bazı sınırlamalar ve olumsuzluklar mevcuttur.

Mikro ark oksidasyon işlemi seçilen parametrelere bağlı olarak 1000 V değerine kadar (ve yaklaşık kapasite olarak 1 MW) enerji sağlayabilecek bir güç kaynağına ihtiyaç duymaktadır. Bu yüksek enerji parça türü ve boyutuna bağlı olarak tehlikeli bir üretim süreci oluşturur. Kullanılan enerji miktarı göz önüne alındığında mikro ark oksidasyon işleminde üretim maliyetinin geleneksel anodik oksidasyon yöntemlerine göre fazla olduğu göze çarpar. Ayrıca malzeme yüzeyinde oluşan yüksek sıcaklık nedeni ile de işleminde kullanılan çözeltilerin soğutulması için yüksek kapasiteli bir soğutucuya ihtiyaç duyulacaktır. İşlem sonucu oluşan seramik kaplama pürüzlü ve oldukça kırılıgandır, bu nedenle en dış yüzeyde aşınma direnci oldukça düşüktür.

Seramik kaplamanın iç katmanları ise tam tersi bir özellik gösterir. Bu katmanlar oldukça sert ve aşınma dayanımı yüksek bölgelerdir. Fakat malzeme yüzeyinde oluşan bu seramik kaplamanın üst katmanının kaldırılması hem maliyet açısından hem de üretim açısından verimli değildir. Mikro ark oksidasyonun pek çok avantajının yanında yukarıda belirtilen dezavantajları, bu teknolojinin kullanım alanlarını kısıtlamaktadır [13].

### 3.4 Mikro Ark Oksidasyon Donanımı ve Prosesi

Proseste kullanılan sistem basit olarak Şekil 3.1’de görülmektedir. Hava ortamındayken yüzeyinde kararlı bir oksit filmi oluşturan metal, güç kaynağına anot olarak bağlanır. Genellikle paslanmaz çelikten imal edilen tank devreyi tamamlamak üzere katot görevi görür. Sulu çözelti içerisinde homojenliği sağlamak üzere karıştırıcı kullanılmaktadır. Metal yüzeyinde plazma oluşumu nedeniyle sulu çözeltideki sıcaklık artışlarını azaltmak için soğutma suyu çift cidarlı tank içerisinde dolaştırılarak sistemin daima optimum sıcaklıkta çalışması sağlanır. Eğer sıcaklık artışlarını önlemek için direkt olarak çözeltiyi ayrı bir soğutma ünitesinden geçirilmesi düşünülürse filtreleme işlemi yapılmak zorundadır. [19].



Şekil 3.1: MAO işleminde kullanılan donanım [19].

Mikro ark oksidasyon işlemi, elektrolit çözelti içerisinde daldırılmış anot numuneye negatif voltaj, katoda ise pozitif voltaj verilmesi ile anot üzerinde ark oluşturulması ve numunenin yüzeyinin oksit kaplanması olarak tanımlanabilir.

MAO işleminde kullanılan elektrolitler karboksilik asit, vanadat, permanganat, polimer ve dispersant, vb. katışkılar içeren silikat, aluminat, metafosfat, borat ve hidroksitleri içerirler [13]. Bunların yanında kaplama yapısını modifiye etmek için

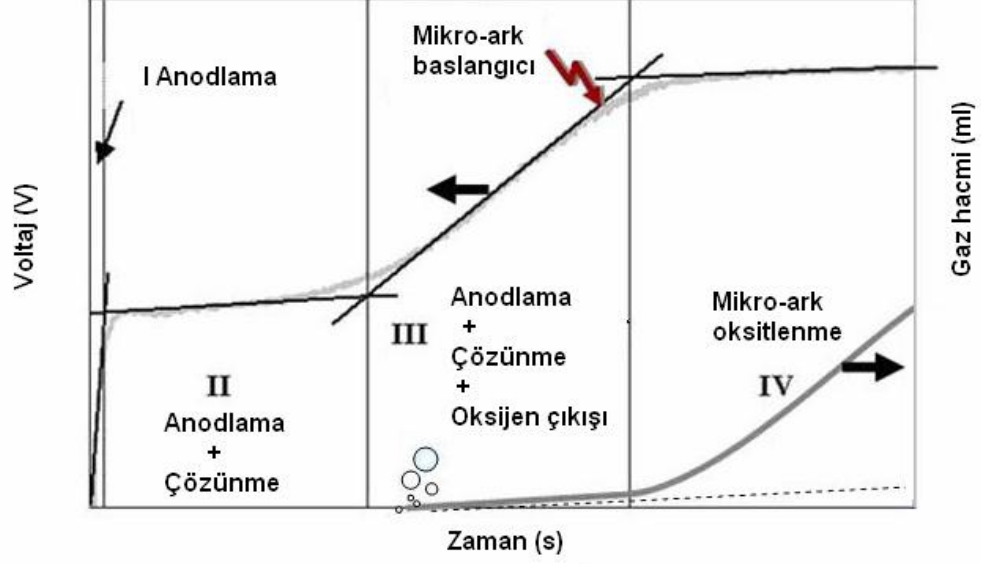
elektrolit içerisine grafit ve MoS<sub>2</sub> gibi katı yağlayıcılar ve teflon (PTFE) da ilave edilebilir [16].

Elektrot sıcaklığı, 10 – 60°C aralığında kontrol edilmektedir. Mikro ark oksidasyon işleminde, yüksek voltaj ve akım değerlerine ulaşıldığından, banyo sıcaklığının belirli bir aralıkta tutulabilmesi için bir soğutma ünitesine de gerek duyulmaktadır.

Anot olan numuneye negatif voltaj uygulanması ile malzeme yüzeyinde oksit filmi oluşumu başlamaktadır. Bu aşama klasik anodik oksidasyon işlemidir. Ancak, uygulanan voltaj belli bir kritik değeri aştığında, malzeme yüzeyinde ark oluşumu ile mikro ark oksidasyon süreci başlamaktadır. Malzeme yüzeyinde bu mikro boyuttaki arkların oluştuğu voltaj değeri, bozunum voltajı (dielectric breakdown) olarak tanımlanmaktadır. Bozunum voltajı değerinde, malzeme yüzeyinde metal iyonları ile hidroksil iyonları zıt yönlere hareket ederek oksit oluşumunu başlatırlar [21].

Malzeme yüzeyinde ark oluşumu için gerekli kritik potansiyel, esasen elektrodun kutupsallığına, elektrot malzemesi ve elektrolit bileşimine bağlıdır ancak sıcaklık, elektrolit konsantrasyonu ve yüzey geriliminden etkilenmez. Yapılan teorik çalışmalar, malzeme yüzeyindeki kıvılcım noktalarındaki yerel geçici sıcaklığın neredeyse güneşin merkezindeki sıcaklığa yaklaşarak birkaç bin Kelvin'e ulaşabildiğini belirtmektedir [13].

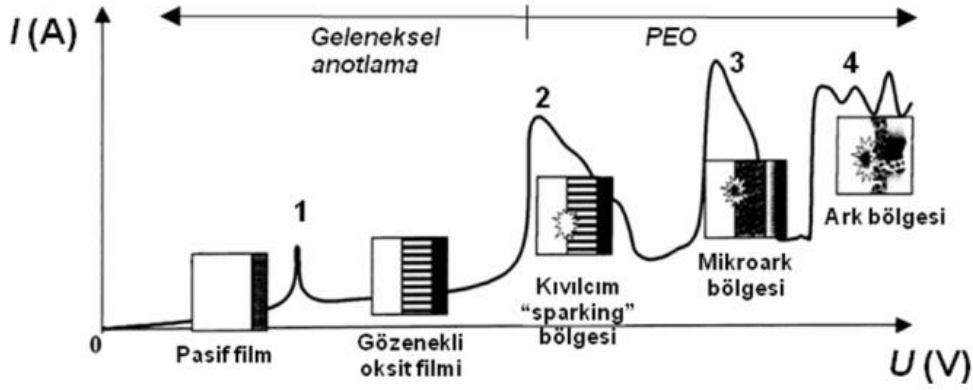
Snizhko ve arkadaşları [22], MAO işleminin fiziksel ve kimyasal temellerini araştırmış ve MAO' nun 4 değişik basamakta gerçekleştiği sonucuna varmışlardır. Bu basamaklar Şekil 3.2'de gösterildiği gibi i) anodlama, ii) anodlama ve anodik çözünme iii) anodlama, anodik çözünme ve oksijen çıkışı ve son olarak da iv) mikro ark oluşumu olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.2: MAO işlem basamakları [22].

### 3.4.1 MAO akım-voltaj karakteristikleri

Şekil 3.3'te genel olarak işlem süresince akım-voltaj değişimi görülmektedir. Normal koşullarda metal yüzeyinde var olan pasif film tabakası 1 noktasına kadar ohm kuralına uygun davranış gösterir ve bu noktadan sonra çözünmeye başlar. Pratikte bu değer malzemenin korozyon potansiyeline denk gelmektedir. 1-2 aralığında yeniden pasifleşme ile gözenekli oksit filmi oluşur ve voltaj düşüşünün büyük çoğunluğu bu arada meydana gelir. 2 noktasında oksit filmi içerisindeki elektrik alan kuvveti kritik değeri aşar ve bu değer in ötesinde darbe veya tünelleme iyonlaşması sonucunda film kırılır. Bu durumda oksit filmi yüzeyinde hızlıca hareket eden parlak kıvılcımlar gözlenir ve bu olay büyümeye yardımcı olur. 3 noktasında darbe iyonlaşması termal iyonlaşma prosesleri ile desteklenerek daha yavaş fakat daha büyük ark-deşarjları ortaya çıkar. 3-4 aralığında kalınlaşan oksit filminin çoğunluğunda negatif yük artışıyla termal iyonlaşma engellenir. 4. bölgede ise mikro-arkların gücü artar ve metal içerisine ilerleyerek filmin termal olarak kırılmasına ve hasara sebep olabilirler. 2 noktasından önceki voltaj değerleri geleneksel anotlamayı temsil eder ve MAO prosesi bu voltaj değerlerinden daha yüksek voltajlarda gerçekleştirilir [23].



**Şekil 3.3:** Elektrot yüzeyindeki dielektrik filmde gerçekleşen akım-voltaj değişimi[23].

Yerokhin ve arkadaşları [24], oksitlenme reaksiyonlarının aşama aşama tam olarak anlaşılmasının ve açıklanmasının metal-elektrolit ara yüzeyinde oluşacak olan filmin karakteristiği açısından önemli olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca diğer bir çalışmada dijital video görüntüleme sistemi ve istatistiksel yaklaşımlar kullanarak alüminyum altlık üzerindeki kaplamada oluşan fazların ve kaplama yapısının tekli ve çoklu arklara bağlı olarak nasıl değiştiğini göstermişlerdir [25].

### 3.4.2 MAO' da kullanılan güç kaynakları

MAO yönteminde değişik tip güç kaynakları kullanılmaktadır. Bunlar doğru akım, titreşimli doğru akım, dengelenmemiş alternatif akım ve heteropolar titreşimli akım tiplerinde güç kaynaklarıdır. Doğru akım tip güç kaynağı galvanostatik ve potansiyostatik olarak akım rejimlerinin uygulanmasını sağlar. Fakat yüzey deşarj karakteristiklerinin düzenlenmesindeki zorluklardan dolayı MAO sürecinin kontrolü sınırlandırılmıştır. Belirli sebeplerden dolayı doğru akım güç kaynakları basit şekilli numunelerde ve ince kaplamalarda kullanılır [22,26,27].

Elde edilen sonuçlara göre sabit akım yoğunluğu hem işlem zamanı hem de oksitlenme işleminin kontrolü açısından kaplamada bir avantaj sağlamaktadır [23,24,28]. Uygulanan akımın sabit olmasının bir dezavantajı ise kaplamaların gözenekli bir yapıda olmasını sonucunu çıkarmaktadır. Bu ise özellikle korozyon dayanımı açısından istenmeyen bir özelliktir. Bu gözenekli yapıdan kurtulmak için bazı farklı alternatif akım dalga formlarından yararlanılan çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda gözeneksiz, korozyon ve aşınma dayanımı yüksek kaplamalar elde edilmiştir [29,30].

### **3.4.2.1 Doğru akım güç kaynakları**

Normalde bir köprü devresine dayanan sistem, doğru akımın galvanostatik ve potansiyostatik rejimlerinin uygulanmasına imkan verir. Bununla birlikte yüzey deşarj karakteristiklerinin ayarlanması zor olduğundan prosesin kontrol edilebilme imkanı sınırlandırılmıştır. Doğru akım güç kaynakları bu nedenle sadece basit şekilli parçalar ve ince kaplamalar için kullanılmaktadır [23].

### **3.4.2.2 Titreşimli doğru akım güç kaynakları**

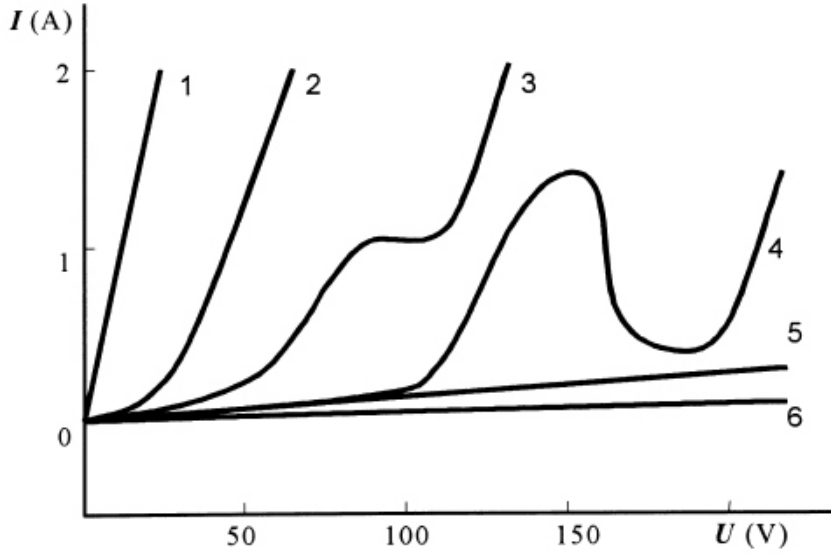
Titreşimli doğru akım kullanımı prosesin kontrollü olarak kesilmesine ve bu nedenle arkin yüzeyde kalma süresinin ayarlanmasına imkan tanır. Aynı zamanda titreşim şekli de değiştirilebilir. Bütün bu özellikler işlem sırasında ısı değişimlerin kontrol edilmesine imkan verir ve kaplama kompozisyonu ile yapısı değişir. Bununla birlikte titreşimli akım kullanımı, elektriksel olarak yüklü bir çift tabakanın oluşumu nedeniyle elektrot yüzeyinin ilave polarizasyonuna yol açabilir. Bu durumda istenilen akım değerine ulaşabilmek için yüksek voltaj (<1000 V) gerekebilir [23].

### **3.4.2.3 Dengelenmemiş alternatif akım güç kaynakları**

Elektrotun ilave polarizasyonu alternatif akım güç kaynağı kullanılarak engellenebilir ve bu arada ark kesilmesi yoluyla ileri proses kontrolü aynı şekilde devam ettirilir. Ayrıca farklı genliklerde pozitif ve negatif alternatif akım uygulanması, kontrol edilebilen kaplama çökmesi aralığının genişletilmesine imkan verir [23].

### **3.4.3 MAO için elektrolit seçimi**

MAO prosesinin pratikte gerçekleştirilebilmesi, metal-elektrolit ikili seçiminin dikkatli şekilde yapılmasını gerektirir. Bunun için genellikle metal pasifleşmesi için kullanılan polarizasyon test verileri esas alınabilir. Şekil 3.4'te alüminyum alaşımları üzerinde oksit kaplaması üretmek için kullanılan elektrolitler 6 gruba ayrılmıştır.



**Şekil 3.4:** Alüminyumun MAO işlemi için kullanılan çeşitli elektrolitlerin  $I=f(U)$  fonksiyonu. Anodik polarizasyon, (1) hızlı metal çözünmesi (2) yavaş metal çözünmesi (3) dar voltaj aralığında metal pasifleşmesi (4) geniş bir pasifleşme aralığıyla kompleks davranış (5) zayıf ve (6) güçlü metal pasifleşmesine öncülük edebilir [23].

Bu 6 elektrolit şunlardır:

1. Alüminyumun hızlı çözünmesini sağlayan tuz çözeltileri, NaCl, NaClO<sub>3</sub>, NaOH, HCl, NaNO<sub>3</sub> ;
2. Yavaş metal çözünmesini sağlayanlar, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ;
3. Dar bir voltaj aralığında metal pasifleşmesini sağlayan elektrolitler, soydum asetat, fosforik asit;
4. Kompleks davranış gösteren florür elektrolitler, KF, NaF;
5. Metalin zayıfça pasifleşmesini destekleyen elektrolitler;
6. Metalin güçlü bir şekilde pasifleşmesini sağlayan elektrolitler, borik asit, fosforik ve karbonil asit, inorganik polimerler (silikatlar, alüminatlar, tungstat, molibdat)

Şekil 3.4’de görüldüğü gibi (4)-(6) gruplarındaki elektrolitler, kıvılcım oluşum voltajına ulaşılmasını kolaylaştırdığından MAO yöntemiyle kaplama üretimi için en avantajlı olanlardır. Bu elektrolitler kaplama kompozisyonuna olan katkılardan dolayı 4 sınıfa ayrılırlar:

- a) Kaplamaya sadece oksijen katan çözeltiler,
- b) Kaplamaya diğer elementleri katan anyonik bileşenler içeren elektrolitler,
- c) Kaplamaya diğer elementleri katan katyonik bileşenler içeren elektrolitler,
- d) Makro parçaçıkların kaplama kompozisyonuna katılmasını sağlayan süspansiyonlar.

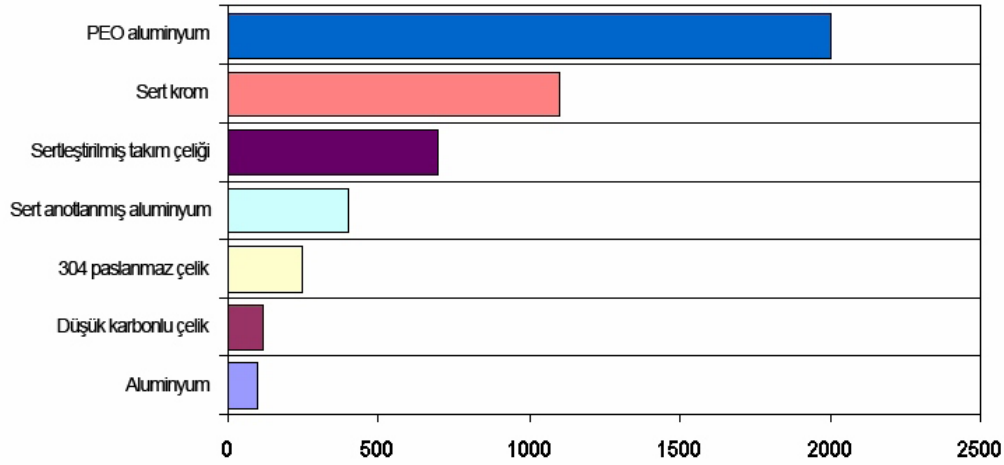
(2) ve (3) grubundaki elektrolitler kullanılarak, hem altlığın oksitlenmesi hem de elektrolit içerisindeki maddelerin altlık yüzeyine çökmesi ile kaplama oluşturulur. Bu gruptaki elektrolitler geniş bir aralıkta kaplama kompozisyonunun ve özelliklerinin değiştirilmesine imkan tanıdığından en umut verici grup olarak tanımlanır. Silikat esaslı çok bileşenli elektrolitler gibi sodyum ve potasyum silikat koloidal çözeltileri de MAO prosesinde genişçe kullanılmaktadır. Silikatların yanı sıra çözelti, elektrolit iletkenliğini arttırmak amaçlı bazı maddeler içerebilir [NaF (0.5-20 g/l), NaOH veya KOH (1-50 g/l)]. Aynı zamanda stabilize edici maddeler [ $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  (40 g/l), gliserin (10 g/l),  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  veya  $\text{K}_2\text{CO}_3$  ( $\leq 500$  g/l)], modifiye edici maddeler de [ $\text{NaAlO}_2$  (2-20 g/l),  $\text{Na}_6\text{P}_6\text{O}_{18}$  ( $\leq 150$  g/l)] içerebilir. Ayrıca belirli amaçlar için renklendirici maddeler, yüksek ergime noktasına sahip sert toz malzemeler ve/veya kuru yağlayıcılar elektrolit içerisine dahil edilebilirler [23].

#### **3.4.4 MAO ile kaplanabilen malzemeler**

Metal yüzeyindeki kararlı oksit filmin dielektrik bariyer tabakası olarak direnç yaratması ve bu sayede anotlamaya imkan tanınması açısından valf metaller olarak gruplandırılan Al, Ti, Mg, Zr, vb. ve alaşımları MAO yöntemiyle kaplanabilmektedir. Bu gruptaki metallerin kendi oluşturdukları oksitler açık devre şartlarında (korozyon potansiyeli) kararlıdır ve korozyona uğramaları zordur. Metale akım uygulanarak metal elektrodun potansiyeli pozitif doğrultuda arttırılırsa devreden geçen akımın neredeyse tamamı yüzeydeki oksit filmin büyümesi ile tüketilecektir. Ayrıca

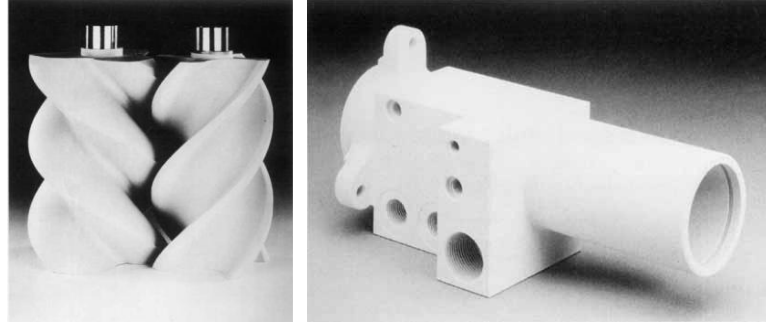
paslanmaz çelik gibi bu yöntemle kaplanamayan metallerin yüzeylerinin çeşitli işlemlerle modifikasyonu sonucu kaplanması mümkün olmaktadır.

Aşınma direncini arttırmak amacıyla malzemelere uygulanan değişik yüzey işlemleriyle elde edilen sertlik değerleri Şekil 3.5’ te gösterilmiştir. Grafikten de görüldüğü gibi MAO yöntemiyle kaplanan alüminyumun sertlik değeri ~2000 HV’e kadar yükselmektedir. Aynı yöntemle kaplanan Mg alaşımlarında ise elde edilen sertlik değeri ~600 HV’e kadar ulaşmaktadır.



**Şekil 3.5:** Yüzey işlemlerine bağlı olarak mühendislik malzemelerin sertliklerinde meydana gelen değişimler [20].

Kaplanan metallerin yüzeylerinde oluşan seramik oksit filmi genelde mattır. Fakat proses sırasında oluşacak oksit miktarları ve fazların değişimiyle birlikte elde edilen kaplamaların dekoratif amaçlı olarak renklendirilebilmesi mümkündür. MAO işlemiyle kaplanan magnezyum alaşımından yapılmış bazı otomotiv parçaları Şekil 3.6’ da gösterilmiştir.



(a)

(b)



(c)

**Şekil 3.6:** MAO kaplı AM50 Mg alaşımından üretilmiş parçalar (a) kompresör rotorları (b) hidrolik silindir (c) MAO kaplı AZ91 Mg alaşımından üretilmiş motor [31].

### 3.5 Tespit İşlemi

Tespit işlemi, yüzeyde bulunan oksit tabakası içindeki porların kapanmasını sağlayan bir işlemdir. Anodik oksidasyon uygulanmış malzeme, kaynama derecesindeki su içerisinde yaklaşık olarak 15-20 dakika arasında tutulur. Eşitlik 3.1’ de görüldüğü gibi, işlem sırasında alüminyum oksit kaynama derecesindeki su ile reaksiyona girerek bohemit-alümina ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$ ) yapısını oluşturmaktadır [32].



Bohemit alümina (  $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$  ) sert ve saydam bir yapıdır ve alüminyum okside nazır hacimce daha büyüktür. Bohemit yapısının oluşması esnasında hacim büyümesinden dolayı porlar kapanmaktadır [32, 33].

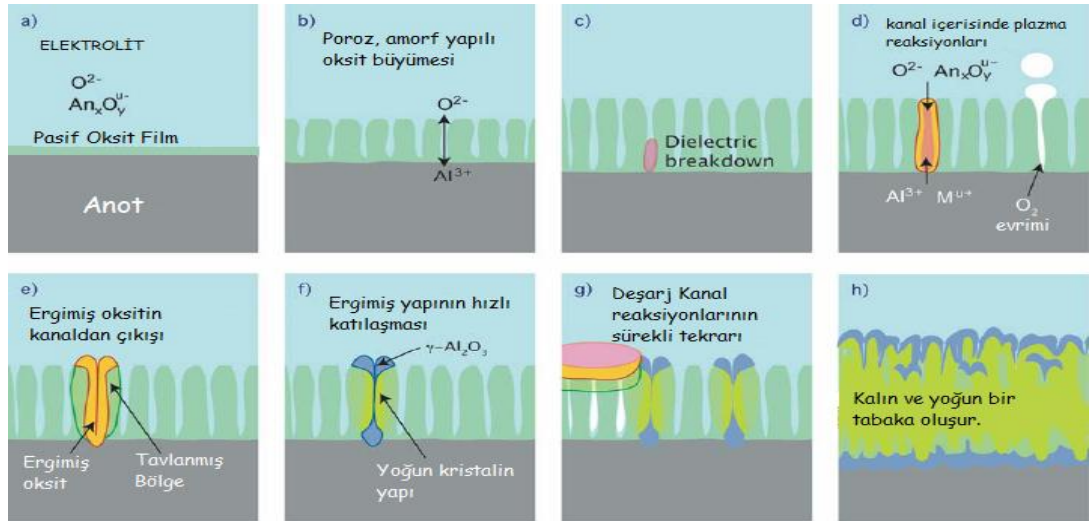
Anodik oksidasyona uğramış yüzeylerin kimyasal korozyona dirençleri, tespit işleminin etkinliğine çok bağlıdır [34, 35]. Tespit işlemi kısa sürede gerçekleşirse, porlar yeterince kapanamaz ve korozyona karşı direnç azalır. Korozyon üzerine yapılan çalışmalara göre, anodize olmuş alüminyum yüzeylerin tespit işlemi 15 dakika veya daha fazla olduğu durumlarda  $\text{H}^+$  and  $\text{Cl}^-$  iyonların sebep olduğu

oyuklanma korozyonuna karşı direnç artmaktadır. Tespit işlemi 2 farklı yöntemle yapılmaktadır [32, 33, 36].

- 1. Sıcak (Hidrotermal) tespit işlemi:** Kaynama derecesindeki deiyonize içerisinde uygulanır. İşlem sırasında suyun pH değeri 5,5 - 6,5 arasında kalması gerekmektedir. Anodik oksit tabaka kalınlığının her bir mikronu için 2 dakika beklenmelidir [35]. Hidrotermal tespit işlemi sonrasında oksit tabakasının yüzeyinde beyaz bir toz tabakası oluşmaktadır. [36, 37].
- 2. Soğuk (Emprenye) tespit işlemi:** Deiyonize su ile beraber nikel florür veya nikel sülfat çözeltisi içerisinde uygulanır. İşlem sıcaklığı 20°C ile 30°C arasında değişmekle beraber oksit tabaka kalınlığının her bir mikronu için 1 dakika beklenmelidir. Tespit işlemi için kullanılan çözeltinin kirleticilere karşı korunması gereklidir. Bu kirletici moleküller için solüsyon filtreleri geliştirilmiştir. Genel olarak tespit işlemi sonrası yüzeyler kara bir görüntüdedir. Bu karartının derecesi alaşımdan alaşımı farklılık göstermesinin yanında, pH, su saflığı, tespit süresi ve diğer faktörlere bağlı olarak değişmektedir. Silme işlemiyle bu kara görüntü uzaklaştırabilmektedir [36, 37].

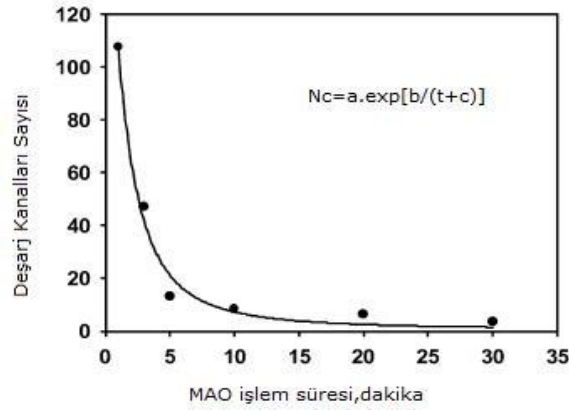
#### 4. ALUMİNYUMUN MİKRO ARK OKSİDASYONU

Mikro ark oksidasyon işlem süreci şu şekilde gelişmektedir: İlk aşamada, yüksek voltaj nedeniyle dielektrik stabilitenin kaybolması sonucu deşarj kanalları oluşur. Deşarj kanallarındaki sıcaklık  $10^4$  K seviyesine kadar çıkabilir [38] ve bu bölgelerdeki güçlü elektrik alandan dolayı elektrolitten gelen iyonlar kanala girer. Yüksek sıcaklık nedeniyle, altlık malzemedan gelen alüminyum deşarj kanalları içinde oksitlenir, elektrolitten gelen iyonlar da bu oksit yapısının içine girerek oksit yapısını modifiye eder. Daha sonra, daha soğuk elektrolit ile temas eden oksit katılaşır ve bu süreç devam ederek kaplama kalınlığı artar [39]. Bu olay Şekil 4.1’de şematik olarak gösterilmiştir.



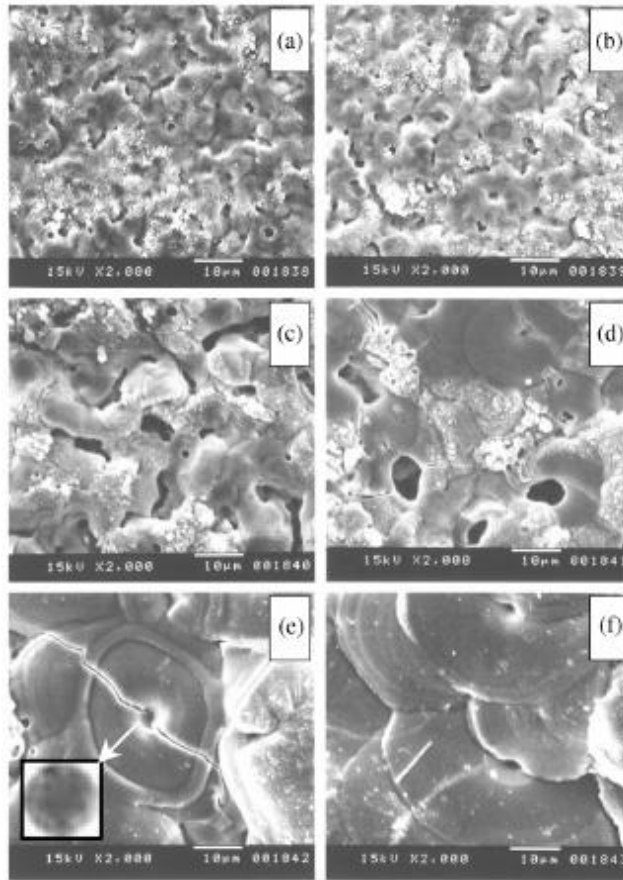
Şekil 4.1: MAO prosesinde oksit tabakası oluşumu [40].

Kaplama karakteristiğini belirleyen en önemli unsurun deşarj kanalları olduğu açıkça görülmektedir. Şekil 4.2’de deşarj kanallarının yoğunluğunun değişimi kaplama süresinin bir fonksiyonu olarak gösterilmektedir. Artan kaplama süresiyle deşarj kanallarının yoğunluğu artmaktadır.

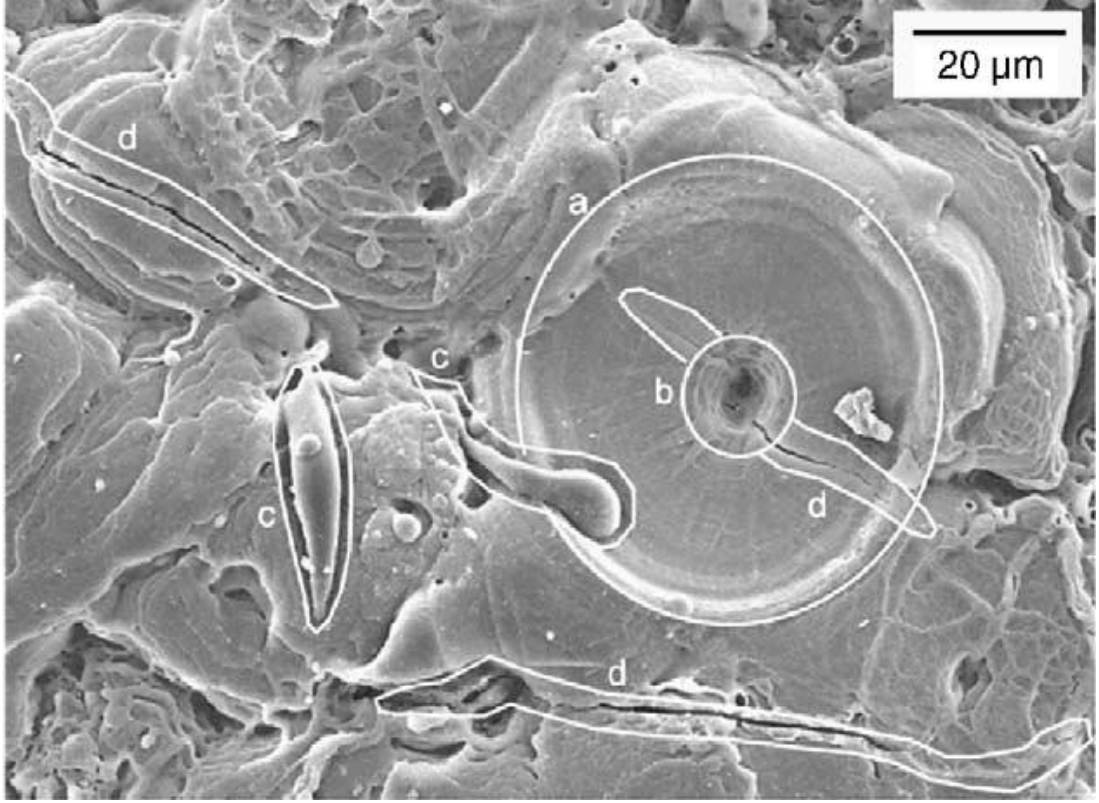


**Şekil 4.2:** MAO işlem süresine göre oluşan deşarj kanallarının sayısı [21].

Mikro ark oksidasyon prosesinde, gözlemlenen lineer birikme kinetiği basitçe Faraday elektroliz kanunlarına bağlanabilir. İşlem süresince deşarj kanallarının, mevcut reaksiyonların oluşmasıyla elektrolit ile sürekli etkileşim halinde olduğu Şekil 4.3 deki taramalı elektron mikroskop görüntülerinden anlaşılmaktadır. Şekil 4.4'te de deşarj kanalları yüksek büyütmede görülmektedir.



**Şekil 4.3:** MAO prosesinde zamana bağlı olarak deşarj kanallarındaki değişimin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri [21].



**Şekil 4.4:** Deşarj kanallarının yüksek büyütmedeki görünümü [41]

Şekil 4.3'den görüldüğü gibi, deşarj kanalları sınırlı ömre sahiptirler. Bu nedenle, deşarj kanalları kaplama prosesi boyunca sürekli oluşmakta ve kapanmaktadır.

Katılaştıran yapının çapı ve kalınlığı (kanal çapı düzeni), kaplama süresinin artması ile artar. Kaplama pürüzlülüğündeki lineer artışlar doğrudan deşarj kanalının çapı ve kaplama zamanının artışı ile ilgilidir. Deşarj kanalının ve çevresinde oluşan yapının çapının artması, deşarj kanallarının yoğunluğundaki azalmayla dengelenir, böylece MAO işlemi, lineer şekilde ilerleyen bir süreç olarak devam eder.

Alüminanın hızlı katılaştıması yarı kararlı  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  fazı oluşumuna neden olmaktadır [42]. MAO kaplamanın yüzeyi, her zaman elektrolitle temasta olduğundan, hızlı soğuma gerçekleşir ve dış yüzey katmanları  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  içermektedir. Ama alüminanın düşük ısı iletkenliği nedeniyle kaplamaların temel katmanı sıcak kalır (kanallarda meydana gelen ve kolaylıkla atılamayan ısıdan dolayı) ve yeterli yüksek sıcaklıktan dolayı,  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 'den  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 'e dönüşüm meydana gelir. Böylece beklenen  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  oranı kaplama-altlık arayüzüne kadar artarak devam eder. Sonuç olarak  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 'den sert olduğu için, arayüze yakın pik (maksimum) sertliğin nedeni olarak bu bölgelerdeki artan  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  fazından kaynaklandığı anlaşılmaktadır [3].

Farklı Al-alaşım altlıklar üzerine MAO prosesi ile elde edilen oksit kaplamaların birikme karakteristikleri incelendiği gibi tribolojik özellikleri de incelenmiştir. Örneğin elektrolitin Si içeriğinde bir artış MAO kaplamaların büyüme hızını arttırmakta, ayrıca kaplamada daha yumuşak olan aluminasilikat fazının (Al-Si-O) oluşumunu desteklemekte, böylece kaplama sertliğinin düşmesine neden olmaktadır [43]. Elektrolite inorganik tuz ( $\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) ilavesi, kaplama birikme hızını düşürürken toplam kaplama kalınlığının iç yoğun tabaka kalınlığına oranını marjinal olarak arttırmaktadır. Aksine, elektrolite SiC tozu ilavesi toplam kaplamanın yoğun tabakasının oranını düşürmektedir. Bununla beraber, SiC fazı tamamen kaplamanın dış poroz tabakasında bulunur, böylece MAO kaplamanın aşınma direncini, geliştirmez [44,45].

İşlem süresi, mikro ark oksidasyon ile üretilen kaplamalarda oksit film tabaka kalınlığını etkileyen önemli parametrelerden birisidir. İşlem süresi arttıkça altlık yüzeyde oluşan film tabakasının kalınlığı artmaktadır. Çünkü oluşan akım yoğunluğu da işlem süresiyle doğru orantılı olarak artmaktadır. Ayrıca işlem süresinin artırılması oksit film tabakasında mevcut olan yoğun fazın miktarının da artmasını sağlamaktadır.  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  olarak bilinen bu fazın miktarının fazla olması kaplama kalitesini artırmaktadır. Çünkü mevcut fazın miktarı, kaplamanın sertliğini, korozyon ve aşınmaya karşı direncini artırmaktadır. Kaplama süresinin artışı ile yüzey pürüzlülüğündeki lineer artış, kaplama süresinin artmasıyla deşarj kanallarının çapının lineer artmasına bağlanabilir. Kısaca işlem süresi arttıkça daha kalın oksit film tabakaları elde edilebilmektedir.

MAO prosesini etkileyen diğer bir önemli parametre ise kullanılan altlık malzemedir. Bilinmektedir ki alüminyum alaşımları 8 sınıfa ayrılmaktadır ve mikro ark oksidasyon çalışmalarında genellikle bunlardan 3 tanesi üzerinde (2XXX, 6XXX ve 7XXX) araştırmalar yapılmaktadır. Çizelge 4.1'de ise MAO kaplanmış alüminyum alaşımlarının sertlik ve relatif aşınma dirençleri verilmektedir [46].

**Çizelge 4.1:** MAO kaplanmış Al alaşımların sertlik ve aşınma dirençleri [47].

Alaşım Grubu	Seriler	Mikrosertlik	Yaklaşık aşınma direnci
Al-Cu-Mg	2024, 2014	1400-2000	1.0
Al-Mg-Si	6061, 6463	1300-1800	1.23
Al-Mg Al-Mg-Zn	5056 2003	1200-1500	1.37
Al-Zn-Mg	7075, 7175	1200-1600	1.45
Al-Si-Cu	A.319.0 1.305.0	800-1200	1.93

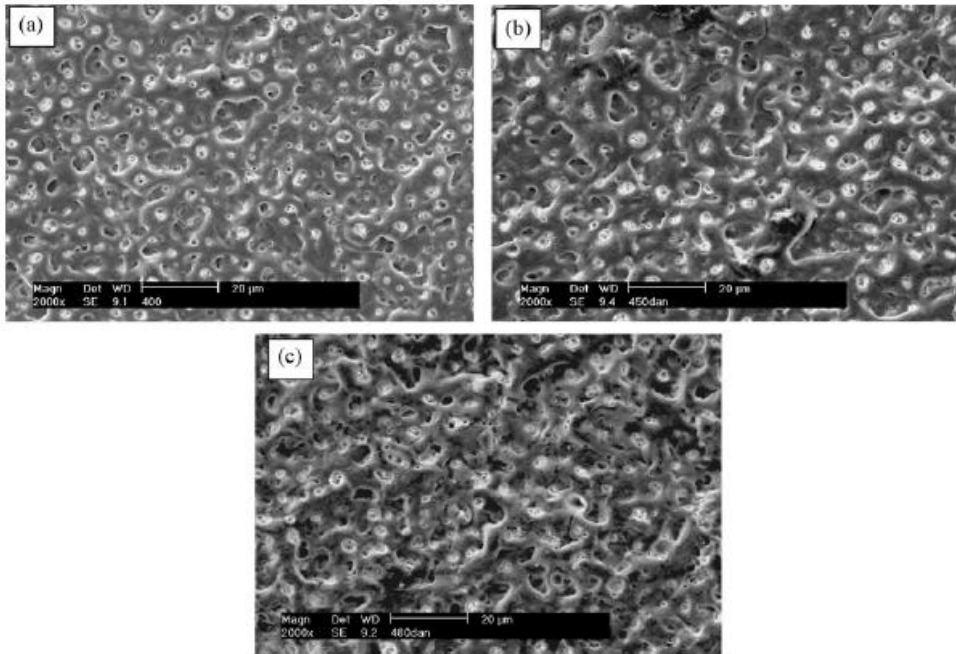
İşlem sırasında uygulanan akım yoğunluğuna bağlı olarak plazma deşarj sınırının aşılmasıyla oluşan deşarj kanalları sayesinde altlık ve elektrolitik çözelti arasında oluşan kimyasal reaksiyonlar sebebiyle oluşan kaplamanın faz yapısı değişebilmektedir. Çünkü sözkonusu kimyasal reaksiyonlar sonucu oluşan hekzagonal bağ yapısı farklılaşmaktadır. Elde edilen kaplama XRD yöntemiyle incelendiğinde mevcut yapıda empüriteler görülebilir. İşte bu emprüteler altlık malzemeden gelmektedir. MAO kaplama sadece  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriğine sahiptir. Burada kaplamanın kalitesini görmek amacıyla  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> miktarlarına bakılmalıdır. Kısaca diğer işlem parametrelerinin etkisi de göz önünde bulundurulduğunda alaşım yapısı kaplama oluşum kinetiğini etkilemektedir.

Elektrolitin sıcaklığı proses boyunca sabit tutulmalıdır. Çünkü mikro ark oksidasyon işlemi sırasında kaplama ile çözelti etkileşimi sonucu oluşan, kaplamayı sağlayan reaksiyonlar termokimyasal reaksiyonlardır. Yani sıcaklığın artması ya da azalması, mevcut reaksiyonlar sonucu oluşan yapıları farklılaştırabilir.

Oksit yapısında iki ayrı faz mevcuttur. Bunlar  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'dir. İşlem sırasında, kaplama yapısında sürekli oluşumu gözlenen deşarj kanallarındaki yüksek sıcaklık, çözeltideki ısısal değişimden etkilenebilmektedir. Çözelti sıcaklığındaki büyük değişimler oluşan bu faz yapılarının kinetiğini etkileyerek kaplama yapısını ve özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilmektedir.

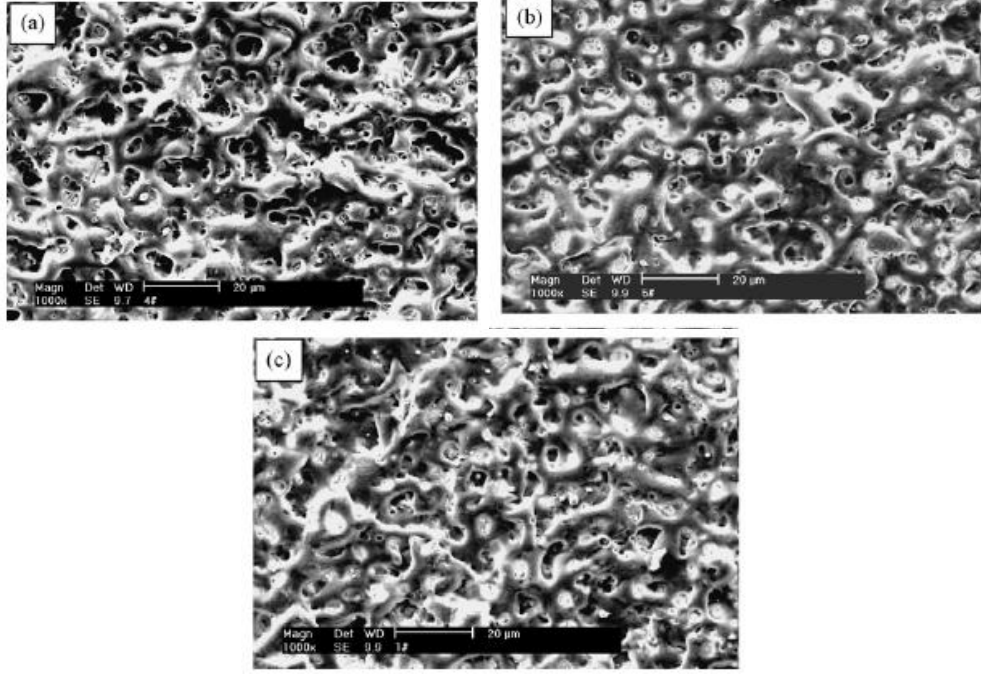
Bununla birlikte MAO düzeneğinde mevcut bulunan soğutma sistemi de sıcaklığa etki etmekte ve dolayısıyla soğutma hızını etkilemektedir, örneğin plazma deşarj anında yarı erimiş alumina düşük soğutma hızında  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  ve yüksek soğutma hızında  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 'ye dönüşmektedir. Sonuç olarak kaplama kalitesi sertlik, aşınma direnci ve korozif direnç bakımından etkilenmektedir.

İşlem voltajı ve anodik akım yoğunluğu mikro ark oksidasyon parametrelerinden en önemli olanlarıdır. Çünkü bu parametrelerin değişimi kaplamanın özelliklerini istenildiği gibi belirlemeye imkan tanımaktadırlar. Kullanılan voltaj ve akım değerleri ile anodik akım yoğunluğu aslında birbirine paraleldir. Çünkü işlem sırasında uygulanan akım/voltaj değerleri ve anot malzemenin yüzey alanı sayesinde, uygulanan anodik akım yoğunluğu hesaplanabilmektedir. Genellikle yapılan araştırmalarda da voltaj/akım değerleri yerine kullanılan anodik akım yoğunluğu üzerinden sonuçlar yorumlanmaktadır. Uygulanan voltaj ne kadar çok olursa anodik akım yoğunluğu o kadar artmaktadır. Dolayısıyla kaplamanın yapısı ve yüzey morfolojisi değişmektedir. Yapılan araştırmalar göstermektedir ki voltaj arttığı sürece kaplama daha çok porozite içermektedir. Ayrıca yüzey pürüzlülüğü de o ölçüde artmaktadır (Şekil 4.5).



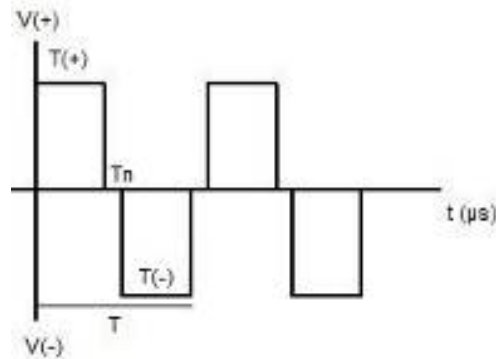
**Şekil 4.5:** Voltaj değerine bağlı olarak yüzey görünümünün değişimi (a) 400V, (b) 440V, (c) 480V [48].

Öte yandan, işlem frekansı kaplama morfolojisini önemli ölçüde etkilemektedir. Şekil 4.6'dan görüldüğü gibi, 200 Hz'de oluşan porozite miktarı, 600 Hz işlem frekansında oluşan poroziteden çok daha fazladır.



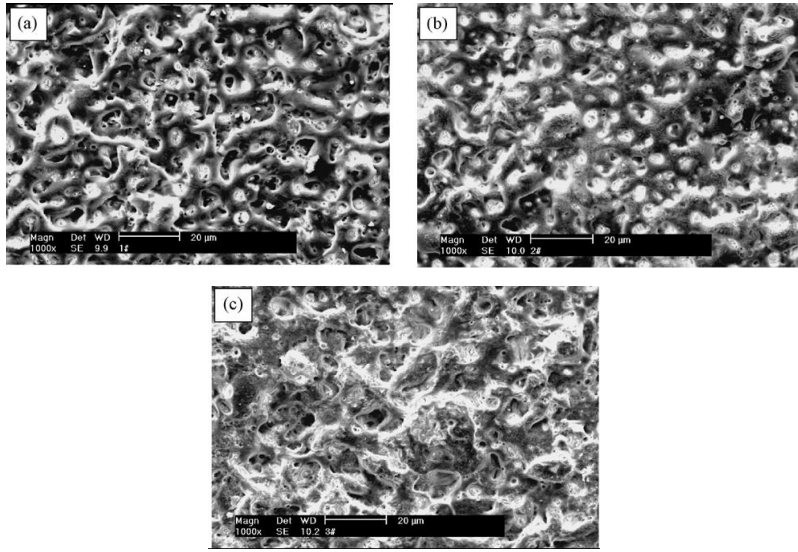
**Şekil 4.6:** 480V altında (a) 200Hz (b) 400Hz (c) 600 Hz frekans değerlerinde yüzey morfolojisinde görülen değişim [48].

Yapılan araştırmalarda elektriksel parametrelerde önemli bir yere sahip olan vuruş oranının (duty cycle) etkisinin oksidasyon işleminde önemli bir yere sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle çift kutup prensibiyle çalışabilen sistemlerde bu parametrenin etkisi önemlidir. Bu parametre, kare dalga akım prensibine göre çalışan oksidasyon sistemlerinde, Şekil 4.7'de görülmektedir.



**Şekil 4.7:** Pozitif ve negatif voltaj çevriminin şematik gösterimi.

Yüksek pozitif vuruş oranı değeri, elektrolit sıcaklığının artmasına, porozitenin artmasına ve işlem süresinin uzamasına sebep olmaktadır. Bu da kaplama morfolojisini etkilemektedir. Oksidasyonu etkileyen elektriksel parametreler, kaplamanın kullanılması istenen yer ve amaca göre değişebilir. Örneğin kaplama kalınlığının önemli olduğu uygulamalarda önem sırası öncelikle uygulanan voltaj ve anodik akım yoğunluğudur. Korozyon direncinin önemli olduğu durumlarda ise öncelik sırası uygulanan voltaj, frekans ve vuruş oranıdır. Düşük vuruş oranı, daha yoğun bir kaplama elde edilmesini sağlamaktadır.



**Şekil 4.8:** (a) %15, (b) %25 (c) %35 vuruş oranı değerlerinin yüzey morfolojisine etkisi [48].

Mikro ark oksidasyon işlemini geleneksel anodizasyon işlemlerinden ayıran en önemli ve en gerekli özellik, MAO'da uygulanan voltajın, kritik bozunma voltajı (dielectric breakdown) değerini aşması şartıdır. İşlem sırasında mikro ark deşarjlarının sayısı ve şiddeti, anodik ve katodik akım yoğunluğu şiddetlerinin birbirine yakınlığı ile orantılıdır. Bu da kaplama büyüme hızını etkilemektedir. Anodik akım yoğunluğunun değişmesiyle, alüminyum alaşımlarında MAO kaplamaların bileşimini, mikroyapısını hatta mekaniksel ve korozyon direnç özellikleri değiştirmektedir. Kaplama oluşurken yüksek anodik akım yoğunluğunda  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ , düşük anodik akım yoğunluğunda ise  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  oluşmaktadır. Ayrıca yapıdaki porozite miktarı ve yoğunluk, anodik akım yoğunluğuna bağlıdır. Çünkü yüksek akım yoğunluğu her zaman için MAO kaplamalarda yüksek oranda  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  içeriğini sağlamaktadır. Bu da kaplamanın sertliğini önemli ölçüde artırmaktadır [21].

## **5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR**

Bu çalışmada 6082 kalite alüminyum alaşımına mikro ark oksidasyon işlemi uygulanmış ve bu yöntemle üretilen oksit tabakasının özelliklerine işlem parametrelerinin etkisi incelenmiştir.

Mikro ark oksidasyon işleminde, voltaj, akım, işlem süresi gibi değişken parametreler kullanılmış, daha sonra kaplamanın yapısal, mekanik ve korozyon özelliklerini belirlemeye yönelik deneylerle, optimum özelliklere sahip mikro ark oksidasyon işlem koşulları belirlenmiştir. İzleyen bölümlerde, deneysel çalışmaların detayları verilmektedir.

### **5.1 Mikro Ark Oksidasyon İşlemi**

Mikro ark oksidasyon işlemlerinde, 30 kW kapasiteli güç kaynağına sahip bir mikro ark oksidasyon cihazı kullanılmıştır. Şekil 5.1’de bu cihaz görülmektedir. Mikro ark oksidasyon cihazının maksimum pozitif voltaj değeri 700 volt, maksimum negatif voltaj değeri 300 volt, maksimum negatif ve pozitif akım değerleri ise 50 amperdir. Mikro ark oksidasyon cihazında pozitif ve negatif voltaj, pozitif ve negatif akım, işlem süresi, pozitif ve negatif vuruş süresi gibi parametreler değiştirilebilmektedir.

İşlem öncesi, 30 mm x 10 mm x 10 mm ebatlarında hazırlanan numuneler, 240 – 2500 meş arasındaki SiC zımparalarla zımparalanmış, daha sonra ultrasonik banyoda saf su ve aseton ile yıkanarak temizlenmiş ve işleme hazır hale getirilmiştir.

Mikro ark oksidasyon işlemleri, alkali esaslı bir çözelti içinde (1g/l KOH+3g/l Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>), farklı pozitif/negatif voltaj ve akım değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen kaplama karakterizasyonu sonuçlarına göre yukarıda bahsedilen işlem parametreleri değiştirilerek yeni kaplamalar üretilmiş ve optimum mikro ark oksidasyon parametreleri belirlenmiştir.



**Şekil 5.1:** Mikro Ark Oksidasyon Cihazı.

## 5.2 Karakterizasyon Çalışmaları

Mikro ark oksidasyon işlemleri sonrasında numune yüzeylerinin karakterizasyonu, makro ve mikro yüzey incelemeleri, kesit incelemeleri, X ışınları analizi, yüzey pürüzlülüğü ölçümleri, ıslanabilirlik testleri, sertlik ölçümleri, yapışma testleri, aşınma testleri ve korozyon testleri ile yapılmıştır.

Makro ve mikro yüzey incelemeleri, çıplak gözle, optik ve tarama elektron mikroskobu kullanılarak yapılmıştır. Kesit incelemeleri Leica optik mikroskopta, yüzey incelemeleri ise EDS donanımlı JEOL JSM-7000F ya da Hitachi marka taramalı elektron mikroskobunda (SEM) yapılmıştır. X-ışını difraksiyonu (XRD) incelemeleri, GBC MMA 027 model X-ışınları cihazında 28.8 mA, 25 kV güç değerlerinde CuK $\alpha$  tüp kullanılarak, 20 – 120° arasında 0.2° lik artışlar ile taranarak gerçekleştirilmiştir.

Islanabilirlik (temas açısı) deneyleri, KSV Cam 200 cihazında hava ortamında ve saf su ile yapılmıştır. Bu deneylerde numune üzerine damlatılan saf su miktarı 5  $\mu$ l

olarak sabit tutulmuştur. Bu yöntem ile su damlasının oksit kaplanmış yüzeyinin ıslatma kabiliyeti belirlenmiştir.

Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri, Veeco Dectac 6M marka profilometrede 5 mg yük altında, numune yüzeylerinde 5000 µm mesafede tarama yapılarak gerçekleştirilmiştir.

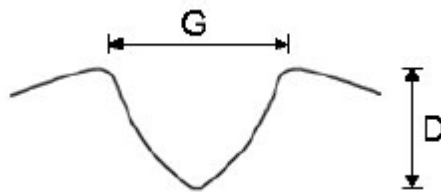
Mikro ark oksidasyon işlemi uygulanmış numune yüzeylerine Rockwell C yapışma deneyi, Zwick Rockwell sertlik cihazında 150 kg yük ile yapılmış ve izler Leica optik mikroskop ile incelenmiştir.

Sertlik deneyleri, CSM marka Ultra Mikro Sertlik cihazında, numunelerin kesitleri üzerine 50 g yükü Vickers uç batırılarak ölçülmüştür. Oksit tabakası içinde farklı yerlerden sertlik alınarak, ortalama sertlik değeri ile maksimum ve minimum sertlik aralığı belirlenmiştir.

Yüzeyde oluşturulan filmlerin aşınma deneyleri, karşıt hareketli (reciprocating) Tribotech aşınma cihazı ile kuru ortamda yapılmıştır. Deney öncesi numunelerin yüzey pürüzlülüğü uygun parlatma diskleri ile 0.5 µm değerine indirilmiştir. Aşındırıcı malzeme olarak 6 mm çapında alumina top kullanılmıştır. Aşınma deneyleri 5N yük altında, 5 mm/s kayma hızıyla 5 mm uzunluğunda çizik oluşturularak yapılmıştır. Toplam kayma mesafesi 45000 mm'dir. Aşınma deneylerinin sonrasında numunelerin aşınma yüzeyleri ve bilya yüzeyleri optik mikroskopta ve taramalı elektron mikroskobunda incelenmiştir. Numunelerin aşınma iz alanları (A), iz genişlik (G) ve derinliği (D) Veeco marka profilometre ile ölçüldükten sonra Eşitlik (5.1) ile hesaplanmıştır.

$$A=(\pi/4).G.D \quad (5.1)$$

Burada A aşınma alanı, G aşınma izinin genişliği ve D aşınma izinin derinliği olarak tanımlanmıştır (Şekil 5.2). Aşınma deneyleri sonrasında numunelerin aşınma yüzeyleri optik mikroskopta ve taramalı elektron mikroskobunda incelenmiştir.



**Şekil 5.2:** Aşınma izi derinliğinin ve genişliğinin şematik olarak gösterimi.

Kaplamaların korozyon deneyleri, 30 g/l NaCl + 10 ml/l HCl çözeltisi hazırlanarak yapılmıştır. Numunelerin tüm yüzeyleri 0.2 µm pürüzlülüğe sahip olacak şekilde hazırlanmıştır. Korozyon deneyi, hem MAO sonrası tespit işlemi uygulanmış, hem de tespit işlemi uygulanmamış numunelere uygulanmıştır. Tespit işlemi oksit tabaka kalınlığının her 1 mikronu için 2 dakika kaynamış deiyonize su içerisinde beklenmesiyle uygulanmıştır. Deney öncesinde ve deney sırasında 24 saat aralıklarla numune ağırlıkları ölçülüp, yüzey incelemeleri optik mikroskopla yapılmış ve zamana göre numunelerin yüzeylerindeki ve ağırlıklarındaki değişimler incelenmiştir.

## 6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA







Bu bölümde 6082 alüminyum alaşımına uygulanan mikro ark oksidasyon işlemiyle üretilen kaplamaların fiziksel ve mekanik özellikleri ile Bölüm 4’de anlatılan işlem parametrelerindeki değişimin kaplama özelliklerine etkisi değerlendirilmiştir.

Yapılan deneysel çalışmalarda yüzeyde oluşan oksit tabakasının karakteristiğini incelemek amacıyla akım kontrollü ve voltaj kontrollü mikro ark oksidasyon işlemleri uygulanmıştır. Voltaj kontrollü deneylerde uygulanan pozitif voltaj 300V-500V, negatif voltaj ise 100V-200V arasındadır. Akım kontrollü deneylerde ise uygulanan pozitif akım 4A-10A, negatif akım ise 1A-2A arasında değişmektedir. İşlemler 10 dakikalık prosesler şeklinde gerçekleştirilerek zamana bağlı olarak yüzeyde oluşan oksit tabakasının morfolojisindeki değişim gözlemlenmiştir.







### 6.1 Yüzey İncelemeleri

Uygulanan mikro ark oksidasyon işleminde farklı voltaj ve akımlarda yüzeyde bir oksit tabakası oluştuğu gözlemlenmiştir. Voltaj ve akım kontrollü deneylere ait numunelerin makro görüntüleri Çizelge 6.1 ve 6.2’de verilmektedir.

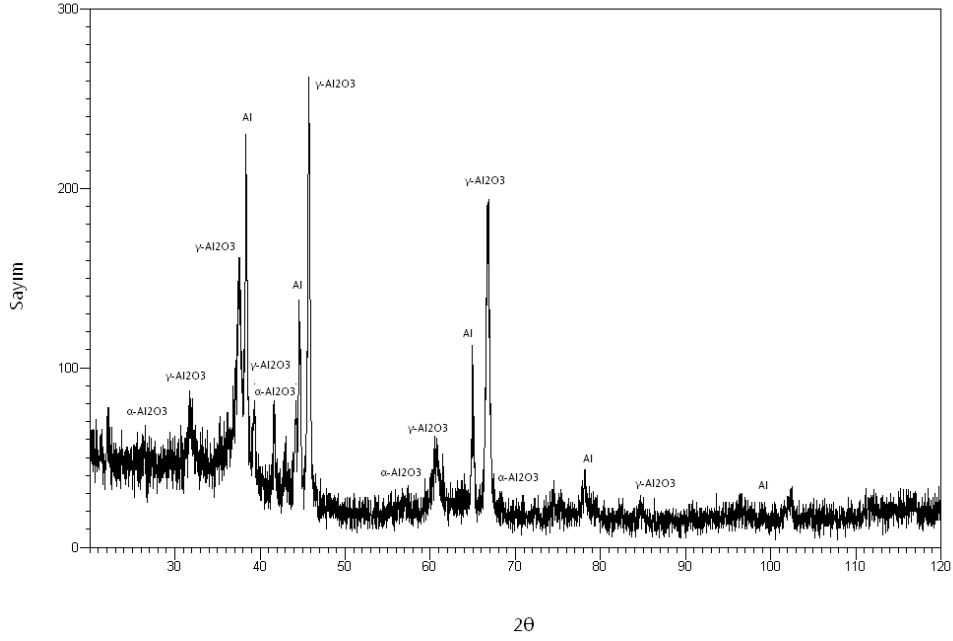
**Çizelge 6.1:** Voltaj kontrollü MAO işlemi uygulanan numunelerin yüzeylerinin makro görüntüleri.

V(+/-) = 300V-100V	V(+/-) = 400V-100V	V(+/-) = 500V-100V
		
V(+/-) = 300V-200V	V(+/-) = 400V-200V	V(+/-) = 500V-200V
		

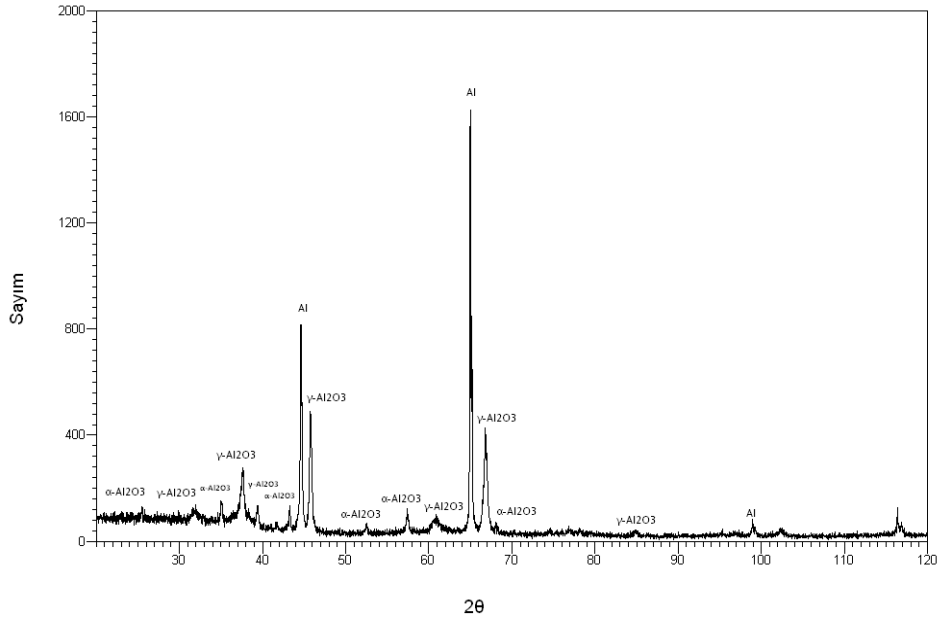
**Çizelge 6.2:** Akım kontrollü MAO işlemi uygulanan numunelerin yüzeylerinin makro görüntüleri.

$I(+/-) = 4A-1A$	$I(+/-) = 6A-1A$	$I(+/-) = 10A-1A$
		
$I(+/-) = 4A-2A$	$I(+/-) = 6A-2A$	$I(+/-) = 10A-2A$
		

Çizelge 6.1 ve 6.2'den görüldüğü gibi 300 ve 400V pozitif voltaj değerlerinde negatif voltaj 100V iken hiç kaplama olmamış, 200V negatif voltajda ise malzeme yüzeyinde nokta şeklinde bölgesel kaplamalar olmuştur. Pozitif voltajın 500V olması durumunda ise her iki negatif voltaj değerinde de (100 ve 200V) kaplama meydana gelmiştir. Akım kontrollü kaplamalarda ise 10A da kaplama olmazken 4 ve 6A değerlerinde kaplama olmuştur. Negatif voltajları sabitken (200V) farklı pozitif voltaj değerlerinde mikro ark oksidasyon uygulanan numunelerin X-ışınları difraksiyon paterni Şekil 6.1'de verilmiştir. Buna göre, yüzeyde beklendiği gibi bir oksit tabakası oluştuğu, bu oksit tabakasının ana olarak iki ayrı faz içerdiği görülmektedir. Bunlar  $\alpha$ - $Al_2O_3$  ve  $\gamma$ - $Al_2O_3$  fazlarıdır.



(a)



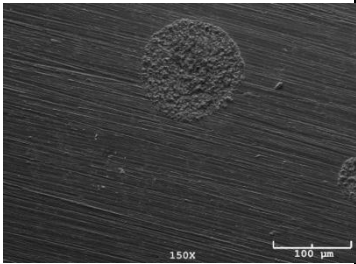
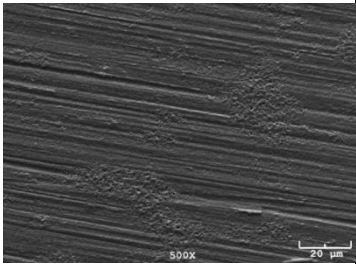
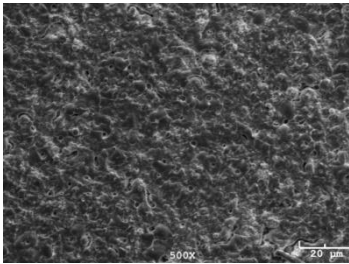
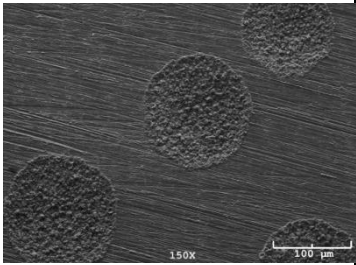
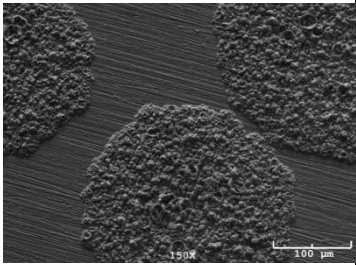
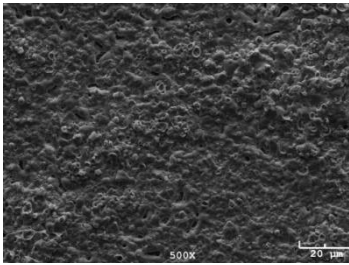
(b)

**Şekil 6.1:** Uygulanan voltajın değiştirilmesiyle farklı faz yapılarının oluşması (a) 300V-200V (b)400V-200V.

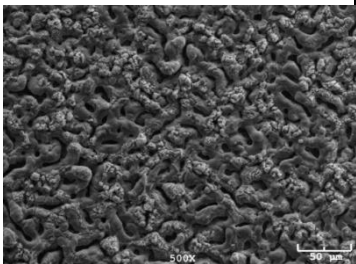
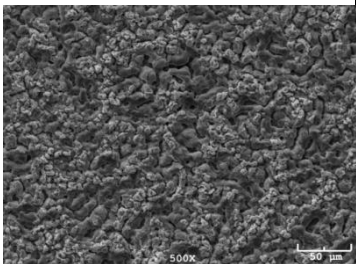
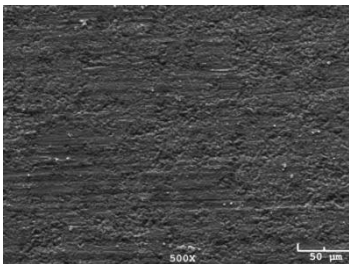
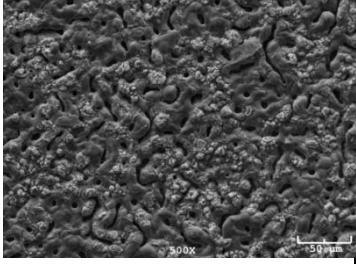
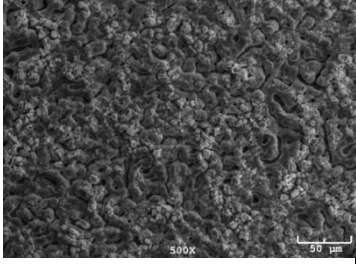
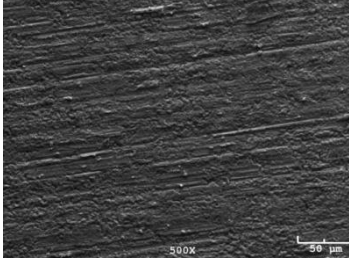
Çizelge 6.1 ve 6.2’de belirtilen voltaj ve akımlar uygulanarak oksitlenen numunelerin yüzey morfolojileri, taramalı elektron mikroskopuyla (SEM) incelenmiştir. Farklı voltaj ve akım değerlerindeki numunelere ait görüntüler Çizelge 6.3 ve 6.4’de görülmektedir. MAO işlemi sonrası oluşan tipik görüntü, pürüzlü,

gözenekler içeren bir morfolojidir. Bu gözenekler, deşarj kanalları olarak adlandırılmaktadır. Gözenek boyutu ve yüzeyin genel morfolojisi, uygulanan voltaj ve akım değerlerine bağlı olarak değişebilmektedir.

**Çizelge 6.3:** Voltaj kontrollü MAO işlemi uygulanan numunelerin yüzeylerinin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.

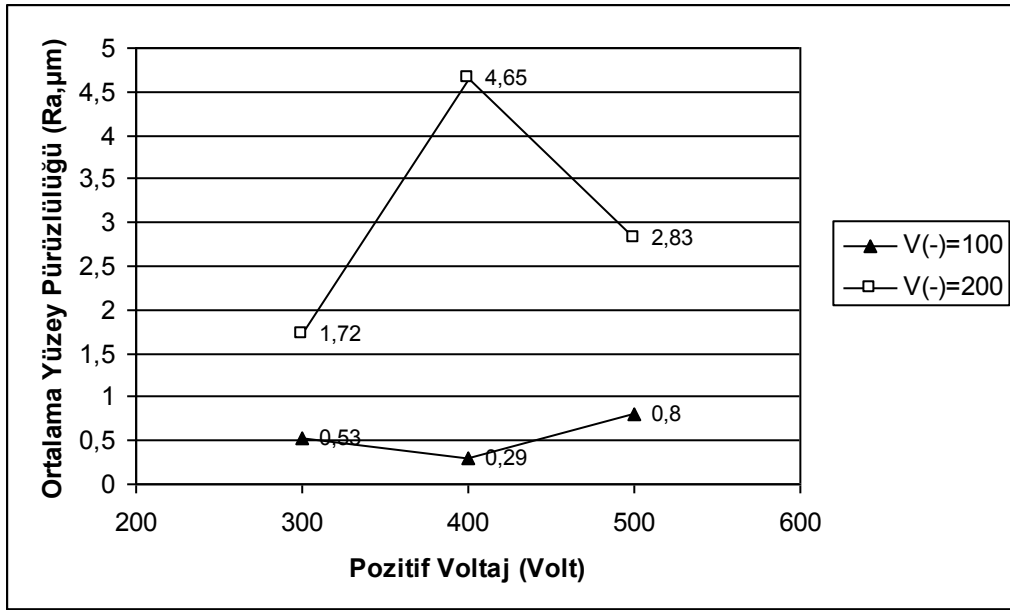
$V(+/-) = 300V-100V$	$V(+/-) = 400V-100V$	$V(+/-) = 500V-100V$
		
$V(+/-) = 300V-200V$	$V(+/-) = 400V-200V$	$V(+/-) = 500V-200V$
		

**Çizelge 6.4:** Akım kontrollü MAO işlemi uygulanan numunelerin yüzeylerinin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.

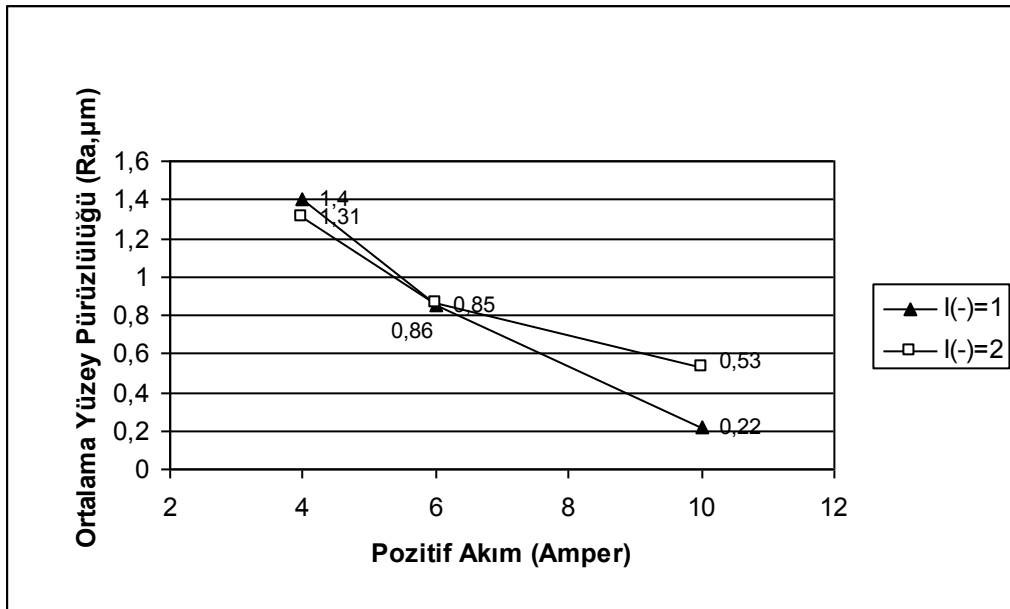
$I(+/-) = 4A-1A$	$I(+/-) = 6A-1A$	$I(+/-) = 10A-1A$
		
$I(+/-) = 4A-2A$	$I(+/-) = 6A-2A$	$I(+/-) = 10A-2A$
		

Çizelge 6.3 ve 6.4’de görüldüğü gibi voltaj kontrollü yapılan mikro ark oksidasyon işlemleri uygulanan voltaj değeri arttıkça daha gözenekli bir oksit katmanı elde edilmektedir. Akım kontrollüde ise 4A’dan 6A’ya çıktığında gözenekli yapı artmış fakat 10A’da kaplama olmadığından böyle bir durum söz konusu değildir.

Voltaj kontrollü deneylerde özellikle süre sabit tutulmak şartı ile uygulanan voltaj değerleri 300V ile 500 V arasında değişmektedir. Bu değişimin sonuçları incelendiğinde (Çizelge 6.3), artan voltaj değeri ile birlikte, MAO’ya özgü kritik bozunum voltajı (dielectric breakdown) değerinin aşılmasıyla, yüzeyde oksitlenmenin gerçekleştiği açıkça görülmektedir. Bu görüşü destekleyen bulgular, 300V’da işlem gören numunelerin yüzeyinde - yüzeyde herhangi bir oksit tabakası olmamasından dolayı - hala zımpara çiziklerinin görünmesi, 500V’da işlem gören numunelerde ise, yüzeyin oksitle kaplanması sonucu tipik MAO morfolojisinin gözlenmesidir. SEM fotoğraflarından da anlaşılacağı gibi uygulanan akım ve voltaj değerlerinin artmasıyla oluşan kaplama daha gözenekli bir yapıya dönüşmektedir. Bunun nedeni, Bölüm 4’de anlatıldığı gibi uygulanan anodik akım yoğunluğunun artmasıyla proses sırasında oluşan deşarj kanallarının sayısının artması ve sonuç olarak bu kanallar etrafında yüksek ısı değişimi sebebiyle amorf bir katılaşmanın gerçekleşmesidir. Proses devam ettiği sürece bu kinetik olay kendini sürekli tekrarlamaktadır. Dolayısıyla açılan deşarj kanalları sayesinde altlık malzemedan gelen iyonlar, elektrolit çözeltisiyle reaksiyona girerek yeni katmanları oluşturmaktadır. Yüzey morfolojisi incelendiği zaman, bu durum daha pürüzlü bir yapı oluştuğunu göstermektedir. Şekil 6.2 a ve b’de uygulanan pozitif voltaj ve akım değişimine göre yüzey pürüzlülüğündeki değişim görülmektedir.



(a)



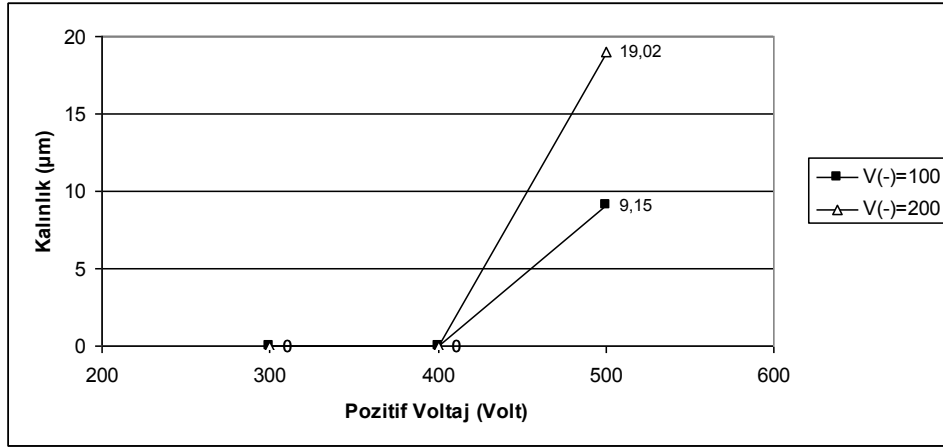
(b)

**Şekil 6.2:** Ortalama yüzey pürüzlülüğünün (a) negatif voltaj sabitken pozitif voltaja, (b) negatif akım sabitken pozitif akıma bağlı olarak değişimi.

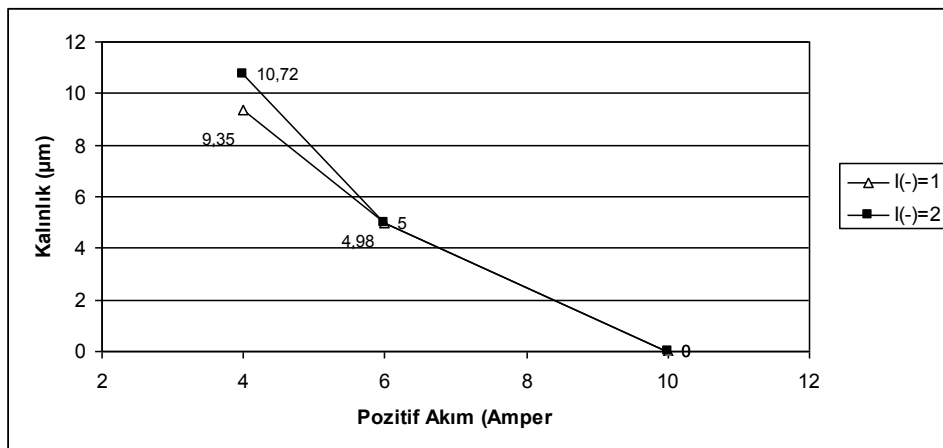
Şekil 6.2'den görüldüğü gibi, uygulanan pozitif voltaj değerinin artmasıyla her iki negatif voltaj değerinde de (100 ve 200V) - 400V pozitif voltaj değerinde bir sapma gösterse de - genel olarak yüzey pürüzlülüğü artmakta ve 500V pozitif voltajda maksimum değerine ulaşmaktadır. Akım kontrollü kaplamalarda ise tam tersi durum mevcuttur. Sabit 2 negatif akım değerinde de (1 ve 2A) pozitif akımın artmasıyla yüzey pürüzlülüğü azalmaktadır.

Jin ve arkadaşları [49], 2.6–3.2% Cu, 2.0–2.4% Mg, 0.45–0.7%Mn bileşimine sahip LY2 alüminyum alaşımına uyguladıkları MAO oksidasyon ile yüzey özelliklerini ve porozite yapısını geliştirmeyi amaçlamışlardır. Bu amaçla yaptıkları çalışmada kullandıkları elektrolit çözeltisine demir ilavesiyle oluşan film tabakasındaki değişimi incelemişlerdir. Elde edilen kaplamalar karakterize edildiğinde ince kaplamaların daha az pürüzlülüğe sahip olduğunu ve kaplama kalınlığı arttıkça yüzey pürüzlülüğünün arttığını gözlemlemişlerdir.

Öte yandan uygulanan pozitif voltaj ya da akıma bağlı olarak oksit tabaka kalınlığının değişimi, Şekil 6.3’de verilmiştir. Uygulanan pozitif voltajın artmasıyla yüzeyde biriken oksit tabakasının kademeli olarak artarken pozitif akımın artması durumunda ise oksit tabakası kalınlığının azaldığı görülmüştür.



(a)



(b)

**Şekil 6.3:** Oksit tabakası kalınlığının (a) negatif voltaj sabitken pozitif voltaja, (b) negatif akım sabitken pozitif akıma bağlı olarak değişimi.

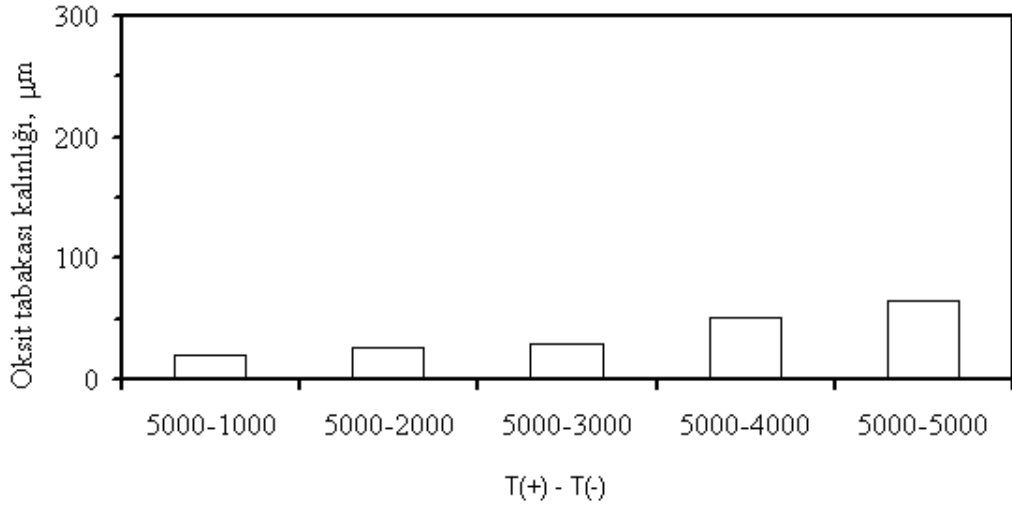
Sundararajan ve arkadaşları [21], 7075 alüminyum alaşımına mikro ark oksidasyon yöntemiyle elde ettikleri kaplamalarda, kaplama kalınlığı elde etmek için gerekli oluşum mekanizmasını incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada öncelikle mikro ark oksidasyonu etkileyen parametrelerden, zamanın etkisini incelemişler ve 1,3,5,20,20,30 dakikalık sürelerle oksidasyon yapmışlardır. Artan işlem süresi ile oluşan oksit film tabakası ilişkisi incelendiğinde, işlem süresiyle kaplama kalınlığının lineer bir artışta olduğu gözlemlenmiştir.

Yüzey morfolojisi incelendiğinde ise artan kaplama kalınlığı ile yüzey pürüzlülüğünün arttığı ve daha ince kaplamaların daha az pürüzlülüğe sahip olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca yüzey pürüzlülüğüne etki eden diğer bir faktör de Bölüm 4’de anlatılan ve bu çalışmada önemli bir yere sahip olan vuruş (uygulama/bekleme)süresi (duty cycle) etkisidir.

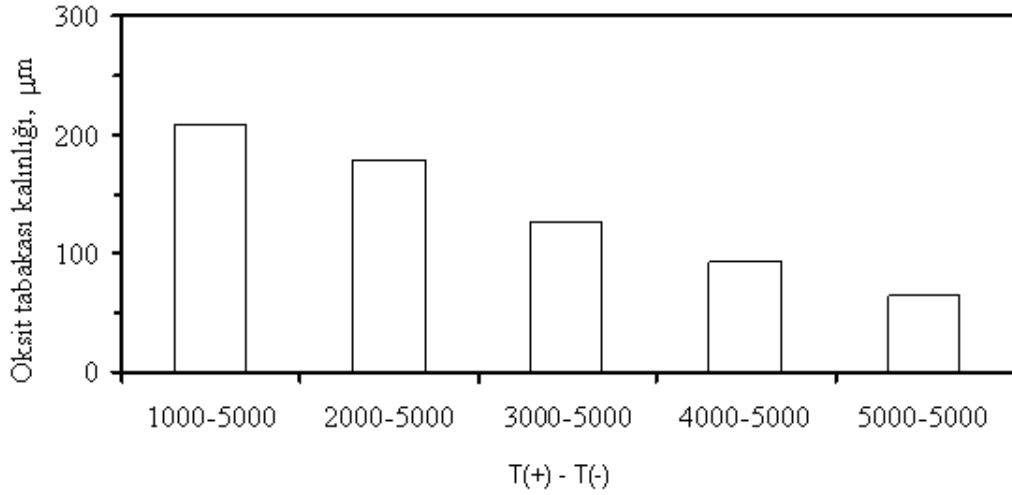
Bu parametresinin tam anlamıyla etkisini görebilmek için uygulanan pozitif ve negatif voltaj sabit tutularak, pozitif ve negatif uygulama süresi değerleri değiştirilerek oksidasyon yapılmıştır.

Voltaj uygulama süresine bağlı olarak kaplama kalınlığının değişimi, Şekil 6.4’de, yüzey pürüzlülüğünün değişimi, Şekil 6.5’de verilmiştir. Buna göre, sabit pozitif voltaj uygulama süresinde, negatif voltaj uygulama süresinin artması oksit tabaka kalınlığını arttırmakta, sabit negatif voltaj uygulama süresi altında, pozitif voltaj uygulama süresinin artması ise oksit tabaka kalınlığını azaltmaktadır. Buna bağlı olarak da deşarj kanallarının sayısı ve etraflarında oluşan katı eriyik yoğunluğu azaldığından pürüzlülük oranı da azalmaktadır.

Bu çalışmalarda en kalın oksit tabakası (~200 µm) pozitif voltaj bekleme süresinin 1000 µs, negatif voltaj bekleme süresinin ise 5000 µs uygulandığı mikro ark oksidasyon işlemiyle elde edilmiştir (Şekil 6.4).



(a)



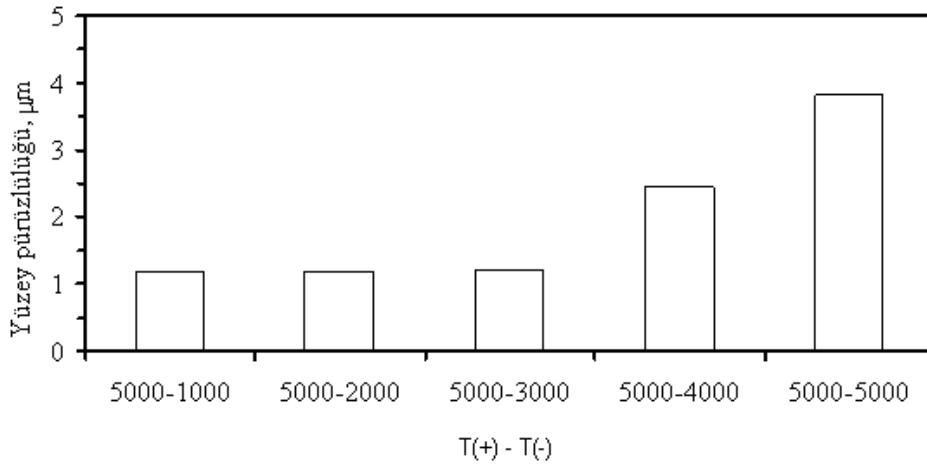
(b)

**Şekil 6.4:** V(+): 500V, V(-): 100V değerlerinde (a) sabit pozitif voltaj uygulama süresi altında, negatif voltaj süresinin ve (b) sabit negatif voltaj uygulama süresi altında, pozitif voltaj süresinin değişiminin oksit tabakası kalınlığına etkisi.

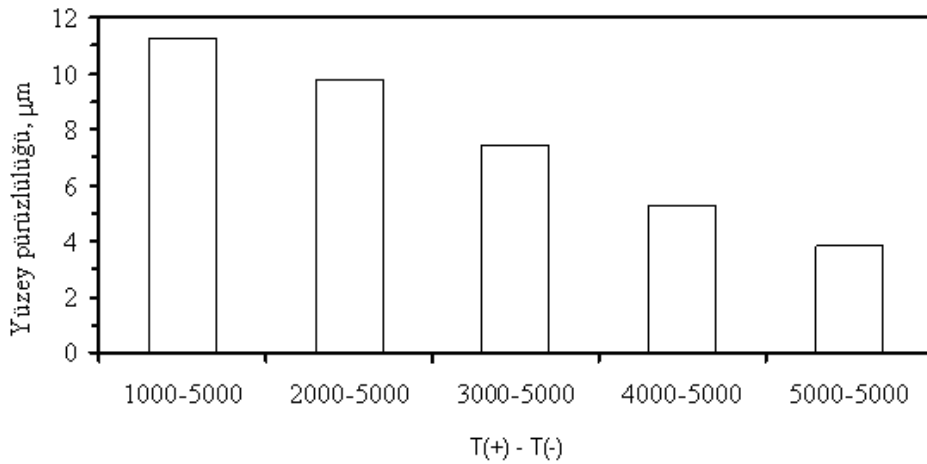
Zhang ve arkadaşları [48], elektriksel parametrelerin mikro ark oksidasyona etkilerini incelemek amaçlı yaptıkları çalışmada, uygulama süresi etkisinin ancak uygulanan voltaj değeri, kritik bozunum voltajı değerini aştığında, yani yeteri kadar yüksek voltajda fark edilir derecede olduğunu bulmuşlardır. Bu etkiyi görebilmek için  $20\text{A}/\text{dm}^2$  anodik akım yoğunluğu altında 480V'luk potansiyel enerjide, uygulama süresinin değiştirilmesiyle elde edilen oksit filmlerin yüzeylerinde gözle

görülür bir değişim fark edilmiştir. Özellikle uygulama süresinin miktarı artırıldıkça yüzey pürüzlülüğünde ve porozite miktarında önemli oranda bir artış mevcuttur.

Oksit tabakasının yüzey pürüzlülüğü de kalınlık değişimine paralel bir davranış göstermekte, sabit pozitif voltaj uygulama süresi altında negatif voltaj uygulama süresinin artmasıyla artmaktadır. Negatif voltaj uygulama süresi sabit tutulduğunda ise, pozitif voltaj değerinin artmasıyla yüzey pürüzlülüğü azalmaktadır (Şekil 6.5). En yüksek pürüzlülük (~11 µm), pozitif voltaj bekleme süresinin 1000 µs, negatif voltaj bekleme süresinin ise 5000 µs uygulandığı en kalın kaplamada oluşmuştur.



(a)



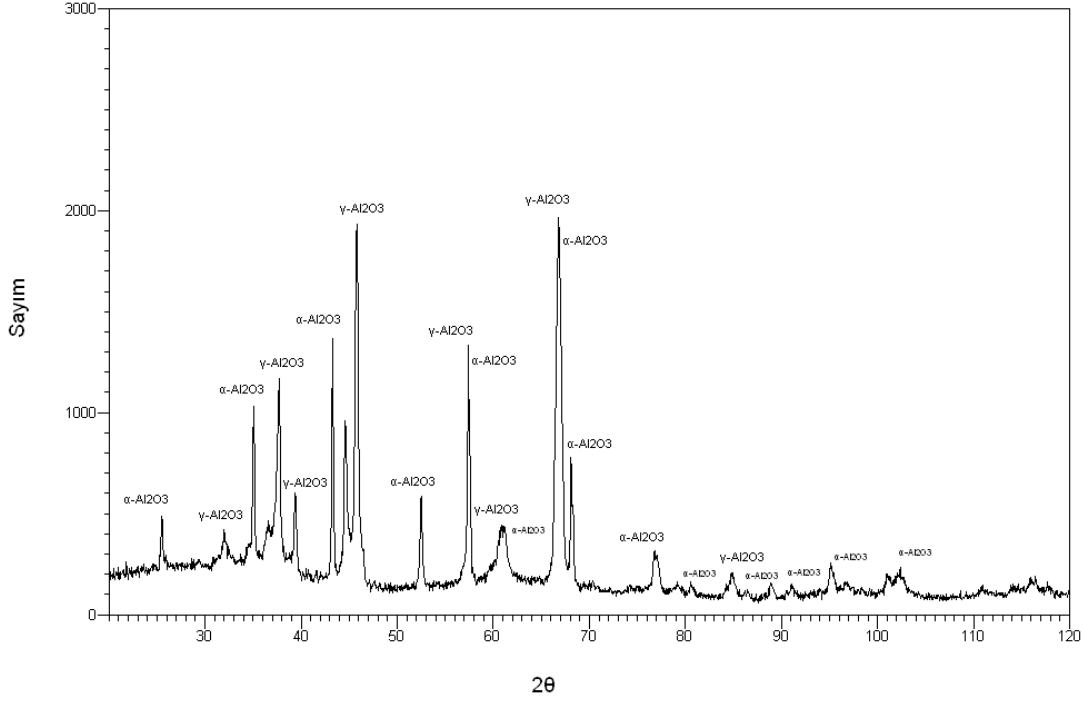
(b)

**Şekil 6.5:** V(+): 500 V, V(-): 100V değerlerinde (a) sabit pozitif voltaj uygulama süresi altında, negatif voltaj süresinin ve (b) sabit negatif voltaj uygulama süresi altında, pozitif voltaj süresinin değişiminin yüzey pürüzlülüğüne etkisi.

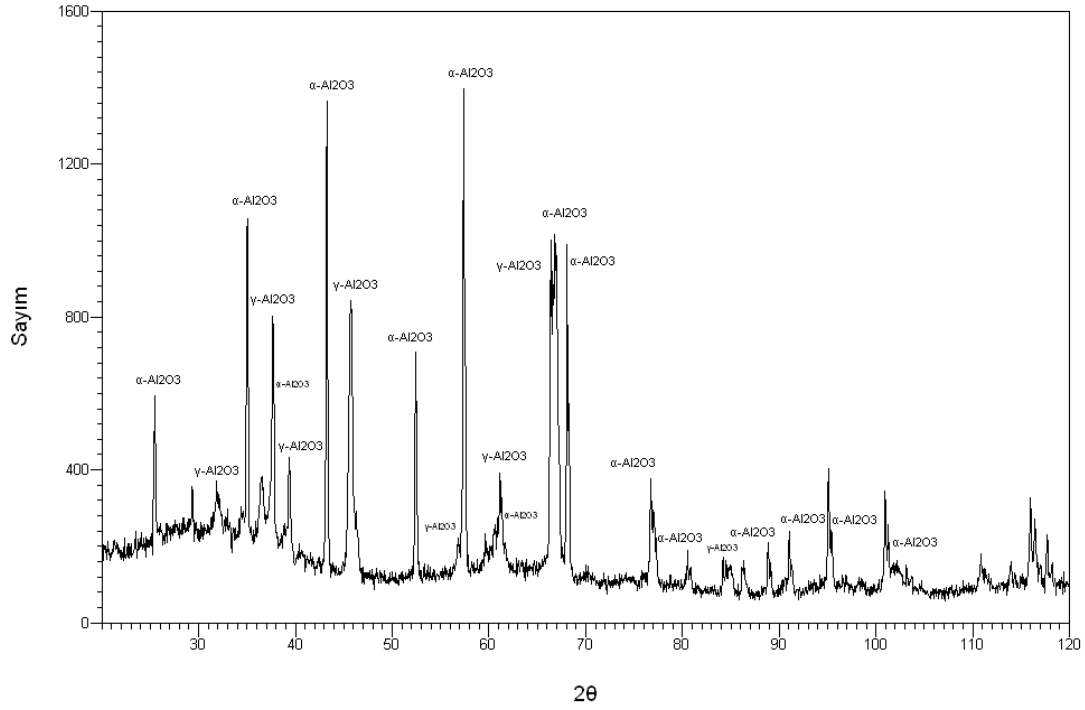
## 6.2. X-Işını Difraksiyon (XRD) Çalışmaları

Seçilen voltaj ve akım değerlerine göre uygulanan MAO işlemi sonucunda alüminyum altlık üzerinde bir oksit film tabakası oluştuğu ve bu filmin amorf yapılı ve hegzagonal sistemli  $Al_2O_3$  olduğu daha önce belirtilmişti. Yapılan XRD incelemelerinde uygulanan farklı voltaj ve akım değerlerine göre farklı faz yapılarının oluştuğu gözlemlenmektedir. Genel olarak oluşan oksit film tabakasına hakim fazlar  $\alpha-Al_2O_3$  ve  $\gamma-Al_2O_3$ 'dır. İşlem parametrelerinin değiştirilmesiyle fazların oranları oksit tabakasında değişiklik göstermektedir.

Uygulanan voltaj değerlerinin artırılmasıyla yüzeyde oluşan oksit film tabakasındaki kalınlık artışı ve yüzey pürüzlülüğündeki artış da işlem süresince voltaj vb. gibi değerlerin değişmesiyle elde edilen fazların oluşması veya mevcut fazların miktarının artmasından kaynaklanmaktadır. Örneğin uygulanan pozitif voltaj 500V değeri sabit tutulup, uygulanan negatif voltaj değeri değiştirildiğinde (100 ve 200V) aynı işlem süresi içerisinde oluşan fazların miktarlarında artış mevcuttur. Bu durum Şekil 6.6 a ve b' de açıkça görülmektedir.



(a)



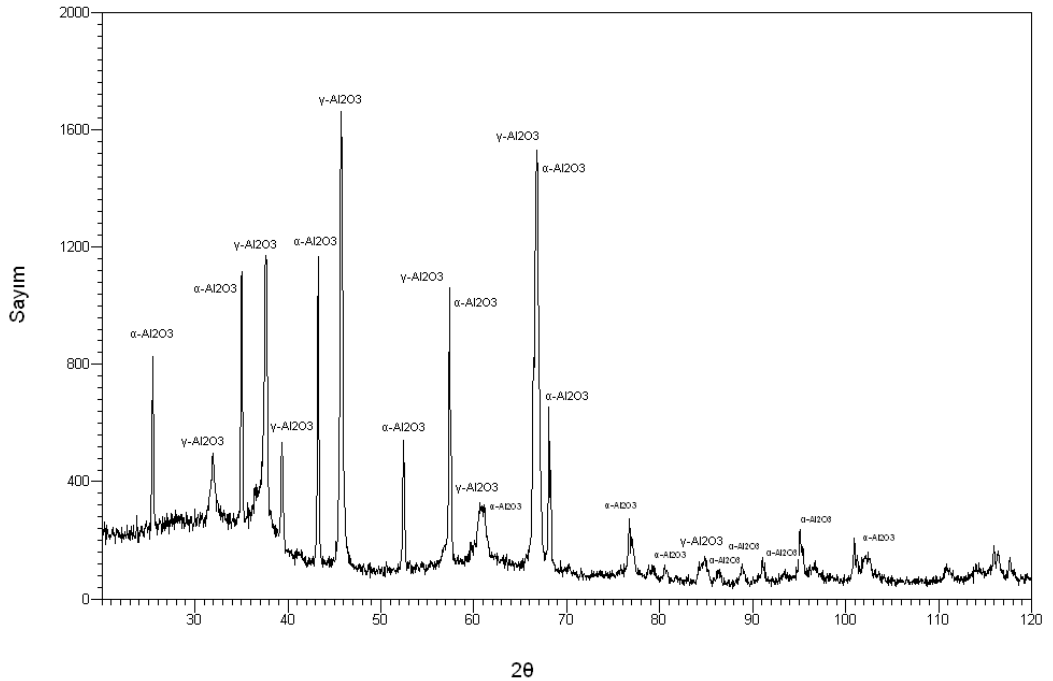
(b)

**Şekil 6.6:** Pozitif voltaj 500V iken negatif voltaj (a) 100V (b) 200V uygulandığında oluşan faz yapılarındaki değişim.

Yapılan bu X-ışınları analizinde belirtildiği gibi pozitif voltaj sabit tutularak aynı işlem süresinde, artan negatif voltaj ile birlikte oluşan  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  fazının miktarında artış bunun yanında  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  fazında bir azalma olduğu açıkça görülmektedir.

Daha önceden de bahsedildiği gibi oksit film tabakasını oluşturan iki ayrı faz mevcuttur ve bu fazlar  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  ile  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 'dir. Bir kaplamada  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  oranının yüksek olması o kaplamanın kalitesini de artırmaktadır. Çünkü  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  fazına göre çok daha yüksek sertlik gibi mekaniksel özelliklere sahip bir fazdır. Ayrıca  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 'ün ergime sıcaklığının  $2000^\circ\text{C}$ 'nin üzerinde olduğu düşünüldüğünde oksidasyon sırasında deşarj kanalları çevresinde gerçekleşen reaksiyonun ne derece şiddetli olduğu kolayca anlaşılabilir.

Daha önce belirtildiği gibi voltaj uygulama süresinin değiştirilmesiyle elde edilen kalın kaplamalar incelendiğinde, yukarıda bahsedilen  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  fazında görülen artış ispatlanabilmektedir. Örneğin pozitif uygulama süresi  $1000 \mu\text{s}$ , negatif uygulama süresi  $5000 \mu\text{s}$  olan bir kaplamada elde edilen  $200 \mu\text{m}$ 'lik bir kaplamaya ait X-ışınları sonucu Şekil 6.7'de verilmiştir.



**Şekil 6.7:** V(+):  $500 \text{ V}$ , V(-):  $100\text{V}$  değerlerinde pozitif voltaj uygulama süresi  $1000 \mu\text{s}$ , negatif uygulama süresi  $5000 \mu\text{s}$  olan kaplamaya ait XRD paterni.

Şekil 6.7’de de görüldüğü gibi artan uygulama süresiyle elde edilen yüksek kalınlıktaki kaplamada  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fazlarına ait pikler mevcuttur.

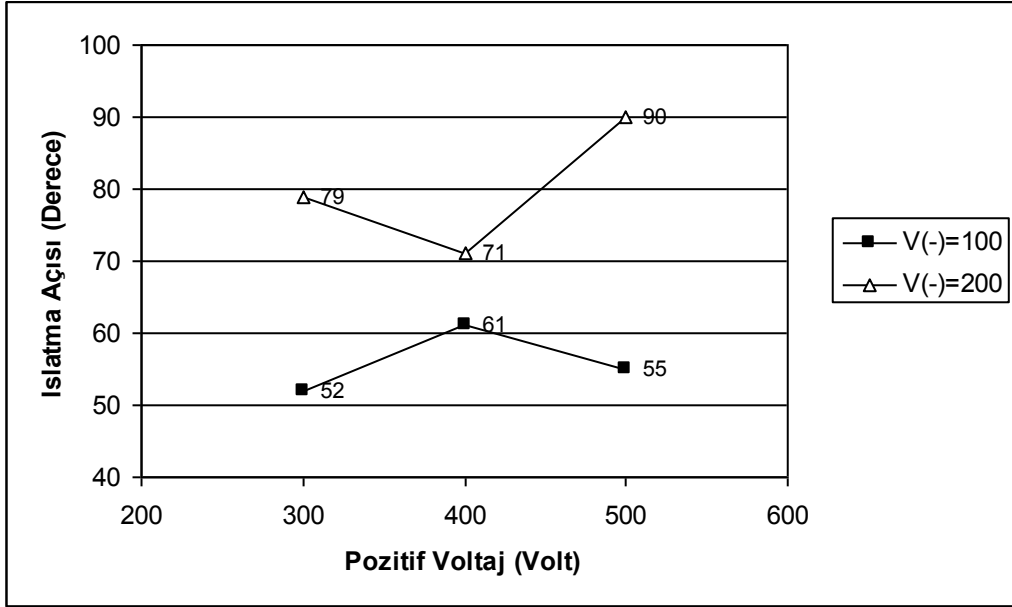
Curran ve arkadaşları [41], 6082 alüminyum alaşımına uyguladıkları MAO işleminde oksit tabakasının termo-fiziksel özelliklerini araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmada pozitif 400V-600V ve negatif 150V-250V arasında değişen voltaj kontrollü deneyler sonucunda elde ettikleri kaplamada yoğun faz olarak tam kararlı  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>’nin olduğunu tespit etmişlerdir. Yarı kararlı  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fazı mevcut tabakanın yaklaşık %30 lık bir kısmını oluşturmaktadır. Oksidasyon işlemi sırasında uygulanan yüksek voltaj sayesinde, yapıda sürekli oluşan  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve amorf fazların, oluşan yüksek sıcaklık sayesinde kararlı  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fazına dönüştüğünü fark etmişlerdir.  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fazının da yüksek oranda olması kaplamanın termo-fiziksel olarak iyi özellikler gösterdiğini açıklamaktadır.

Yang ve arkadaşları [50], yaptıkları çalışmada saf alüminyum numunelere maksimum 1000V değerine kadar, alkali çözelti içerisinde mikro ark oksidasyon işlemi gerçekleştirmişlerdir. Elde ettikleri oksit filmin X-ışını analizi sonucunda mevcut yapıda  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve eser miktarda amorf fazlar olduğunu gözlemlemişlerdir. Özellikle  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fazının tabakada yoğun olarak bulunduğunu fark etmişlerdir. Yaklaşık 240  $\mu$ m’lik kaplamalarında  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fazına uyguladıkları mikrosertlik testleri ile 2600 kg/mm<sup>2</sup> yüksek bir değer elde etmişlerdir. Bu da  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fazının kaplama kalitesini önemli derecede etkilediğini ispatlamaktadır.

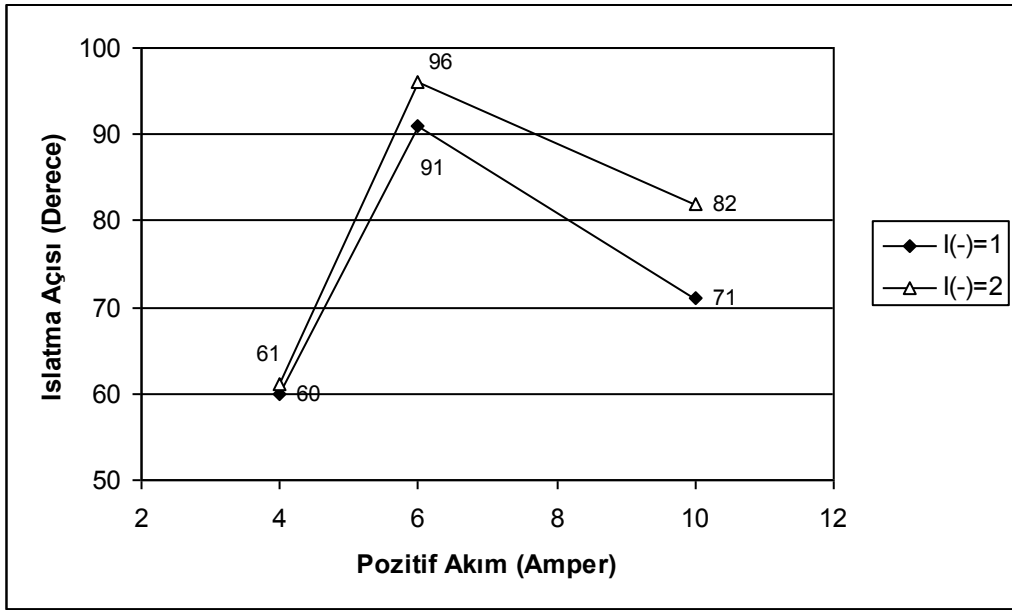
### 6.3. Islanabilirlik Çalışmaları

Islanabilirlik, termal dengede iken damla ile yüzey arasında oluşan temas açısı olarak tanımlanabilir. Damlanın damlatıldığı yüzeye ve kullanılan sıvıya bağlı olarak damla çeşitli şekiller alabilir. Damla ile yüzey arasındaki temas açısının 0 ile 90° arası olması durumunda sıvının yüzeyi ıslatabildiği, temas açısının 90 ile 180° olması durumunda damlanın yüzeyi ıslatamadığı söylenir [13].

MAO işlemi uygulanmış numunelere ait ıslatma açısının sabit negatif voltaj (100 ve 200V) ve akımda (1-2A) uygulanan pozitif voltaj ve akıma bağlı olarak değişimi Şekil 6.8’de verilmiştir.



(a)



(b)

**Şekil 6.8:** Islatma açısının (a) negatif voltaj sabitken pozitif voltaja, (b) negatif akım sabitken pozitif akıma bağlı olarak değişimi.

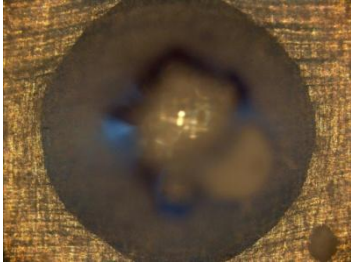
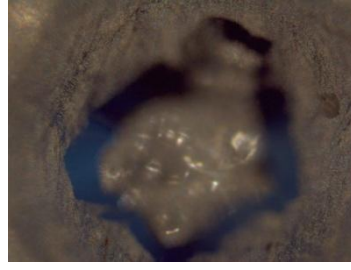
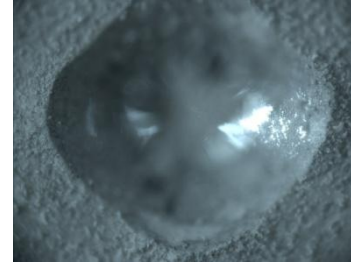
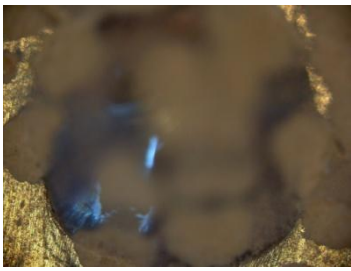


Yukardaki grafikten de görüldüğü gibi uygulanan pozitif voltaj değerinin artmasıyla her iki negatif voltaj değerinde de (100 ve 200V) - 400V pozitif voltaj değerinde bir sapma olsa da - genel olarak ıslatma açısı değeri artmakta ve 500V pozitif voltajda maksimum değerine ulaşmaktadır. Akım kontrollü kaplamalarda da benzer bir durum

mevcuttur. Sabit 2 negatif akım değerinde de (1 ve 2A) pozitif akımın artmasıyla yüzey pürüzlülüğü artmaktadır.

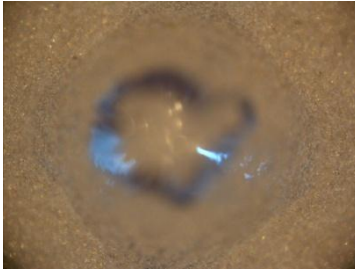

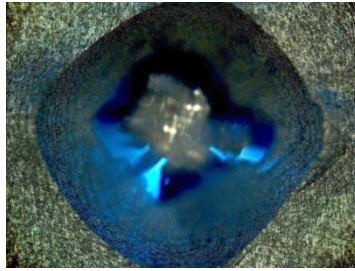

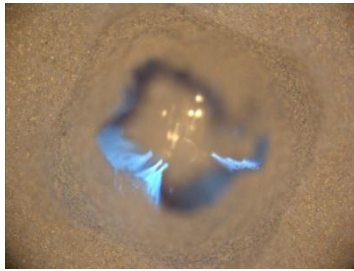
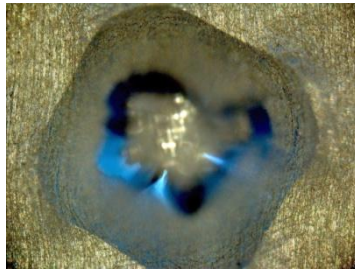
#### 6.4. Rockwell C Yapışma Deneyleri

Rockwell C deneyi, numune yüzeyindeki oksit tabakasına uygulanan 150 kg lık yük ile oluşan izin yapısı optik mikroskopta incelenmesi prensibine dayanmaktadır. Bu sayede oluşan iz detaylı olarak incelenerek, kaplamada meydana gelen deformasyon karakteristikleri gözlenmekte ve kaplamanın kalitesi ve dayanımı test edilmektedir. Çizelge 6.5 ve 6.6'da voltaj ve akım kontrollü deneylere ait numunelerin optik yüzey resimleri gösterilmektedir.

**Çizelge 6.5:** Voltaj kontrollü MAO işleminin uygulanan numunelerin Rockwell C yapışma deneyine ait optik mikroskop görüntüleri (100x).

V(+/-) = 300V-100V	V(+/-) = 400V-100V	V(+/-) = 500V-100V
		
V(+/-) = 300V-200V	V(+/-) = 400V-200V	V(+/-) = 500V-200V
		

**Çizelge 6.6:** Akım kontrollü MAO işlemi uygulanan numunelerin Rockwell C yapışma deneyine ait optik mikroskop görüntüleri (100x).

I(+/-) = 4A-1A	I(+/-) = 6A-1A	I(+/-) = 10A-1A
		
I(+/-) = 4A-2A	I(+/-) = 6A-2A	I(+/-) = 10A-2A
		

Çizelge 6.5 ve 6.6’da verilen optik mikroskop fotoğrafları incelendiğinde, 300V ve 400V pozitif voltaj değerlerinde yapılan kaplamalarda nokta şeklinde bölgesel kaplamalar olup homojen bir oksit tabakasının oluşmadığı görülmektedir. 500V pozitif voltaj değerinde ise homojen bir oksit tabakası oluşmuştur.

500V pozitif voltaj değerinin farklı 2 negatif voltaj değerinde (100V ve 200V) yapılan kaplamaları değerlendirecek olursak, negatif 200V değerinde oluşan homojen oksit tabakası kararlı olmadığından dolayı Rockwell C testi sonrasında malzeme yüzeyinden kolayca uzaklaşmakta ve kaplama atmaktadır. Negatif 100V değerinde ise böyle bir durum söz konusu olmayıp oksit tabakasının altlık alüminyum alaşımı ile yapışması iyidir.

Akım kontrollü kaplamalarda ise, 4A ve 6A pozitif akım değerlerinde homojen oksit tabakası oluşmuş 10A değerinde oluşmamıştır. Bu kaplamaların taramalı elektron görüntüleri MAO için tipik özellikler göstermesine rağmen oksit tabakasının yüzeye yapışmasının zayıf olduğu saptanmıştır. Akım şiddeti 4A olan kaplamada sabit zaman şartında yapılan MAO işleminde, yalıtımsal bozulma sürecini başlatabilecek kadar yeterli akım yoğunluğu elde edilemediği için ince ve zayıf oksit tabakası oluşmuştur.

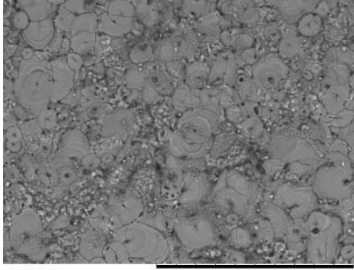
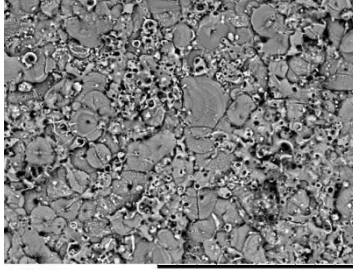
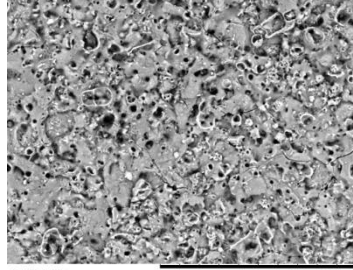
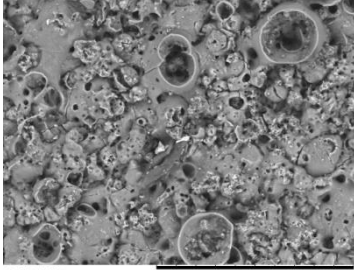
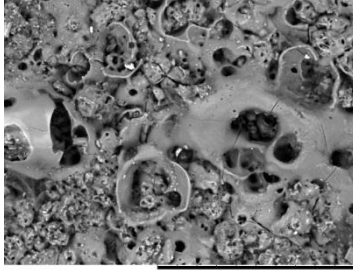
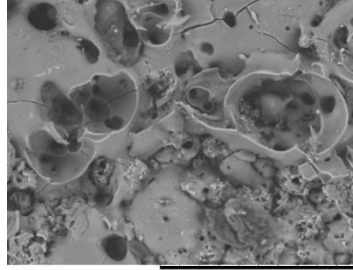
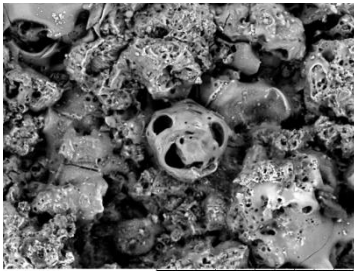
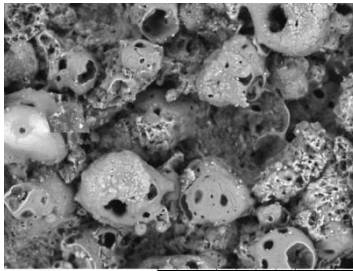
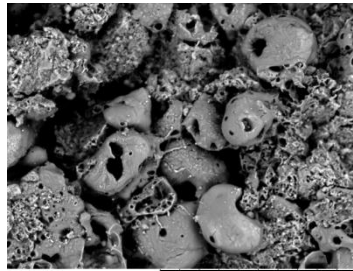
Sonuç olarak oluşan homojen oksit tabakalarını, kaplama kalınlığı ve kaplamanın altlık malzemeyle olan yapışma kabiliyeti açısından değerlendirdiğimizde en iyi özelliklere  $V(+)=500V$ ,  $V(-)=100V$  parametrelerindeki kaplamanın sahip olduğu görülmüştür.

### 6.5. Sertlik Deneyleri

Kaplamaların kesitten ölçülen sertlikleri, CSM Ultra Mikro Sertlik cihazında ve vickers uç kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kesit boyunca oksit tabakasının birkaç yerinden ölçüm alınmış olup, tüm sertlik ölçümleri 50 gr'lık yük altında gerçekleştirilmiştir. Bu araştırma için seçilen pozitif 500V negatif 100V voltaj değerleri uygulanarak elde edilen oksit filmleri kullanılmıştır. Kullanılan numunelerde değişen işlem parametresi uygulanan pozitif/negatif bekleme süreleridir. Yaklaşık olarak kaplama kalınlıkları 20-200  $\mu m$  arasında değişmektedir. Söz konusu numunelere ait SEM görüntüleri Çizelge 6.7'de verilmiştir.

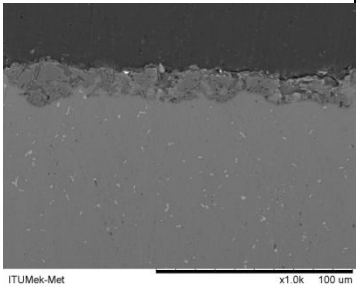
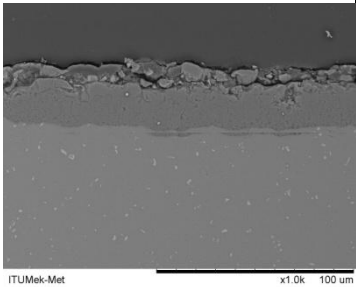
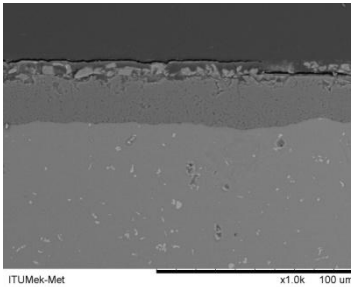
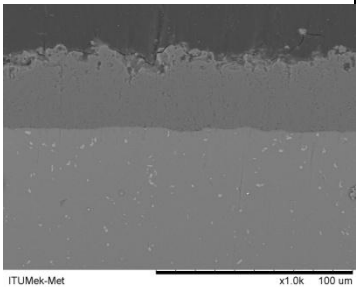
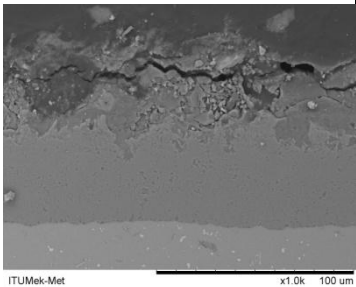
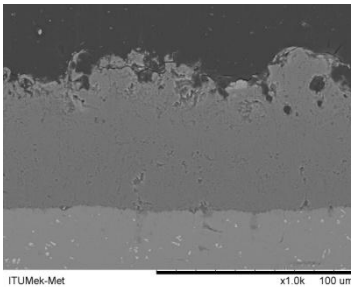
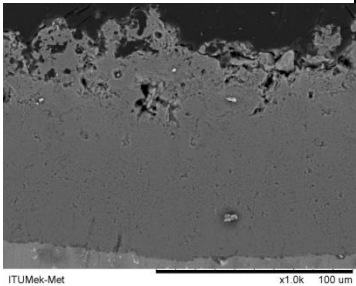
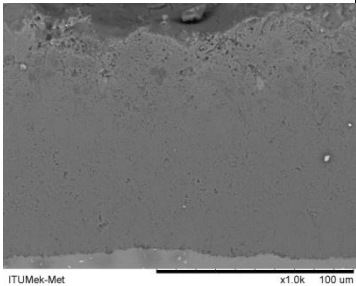
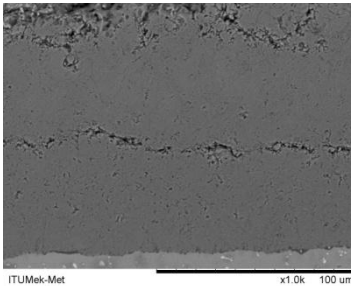
Çizelge 6.7'den görüldüğü gibi bekleme süresindeki değişim yüzey morfolojisini önemli ölçüde etkilemektedir. Özellikle  $T(+/-) = 1000\mu s - 5000\mu s$  bekleme süresine sahip numune en pürüzlü yüzeye sahiptir. Bu sebeplerden ötürü, sertlik ölçümü sağlıklı bir şekilde yüzeyden yapılamamaktadır. Çünkü oksit filmin üst katmanında bulunan ve ölü tabaka olarak adlandırılan yarı kararlı  $\gamma-Al_2O_3$  fazının kolay giderilebilir olması, sertlik ölçümünü engellemektedir. Bu yüzden sertlik testleri numunelerin kesitleri hazırlanarak yapılmıştır.

**Çizelge 6.7:** Voltaj kontrollü mikro ark oksidasyon işlemi uygulanan numunelerin yüzeylerinin voltaj uygulama süresine göre değişimi (1000x).

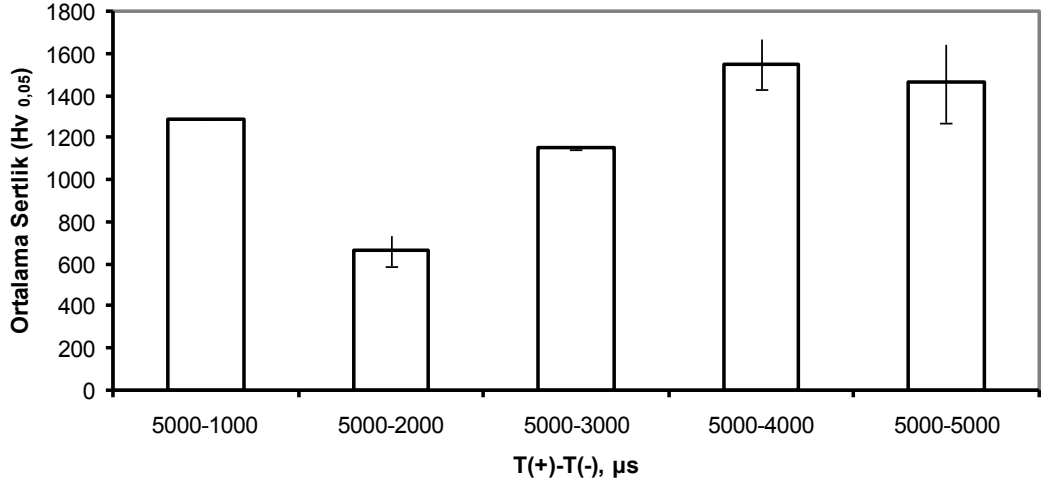
T(+/-) = 5000µs - 1000µs	T(+/-) = 5000µs - 2000µs	T(+/-) = 5000µs - 3000µs
		
T(+/-) = 5000µs - 4000µs	T(+/-) = 5000µs - 5000µs	T(+/-) = 4000µs - 5000µs
		
T(+/-) = 3000µs - 5000µs	T(+/-) = 2000µs - 5000µs	T(+/-) = 1000µs - 5000µs
		

9 farklı bekleme süresi uygulanarak farklı kalınlıklarda oksit tabakaları elde edilmiştir. Uygulanan bekleme süresi farkı sayesinde yüzeyde oluşan oksit tabakasındaki kalınlık farkı Çizelge 6.8’ de görülmektedir.

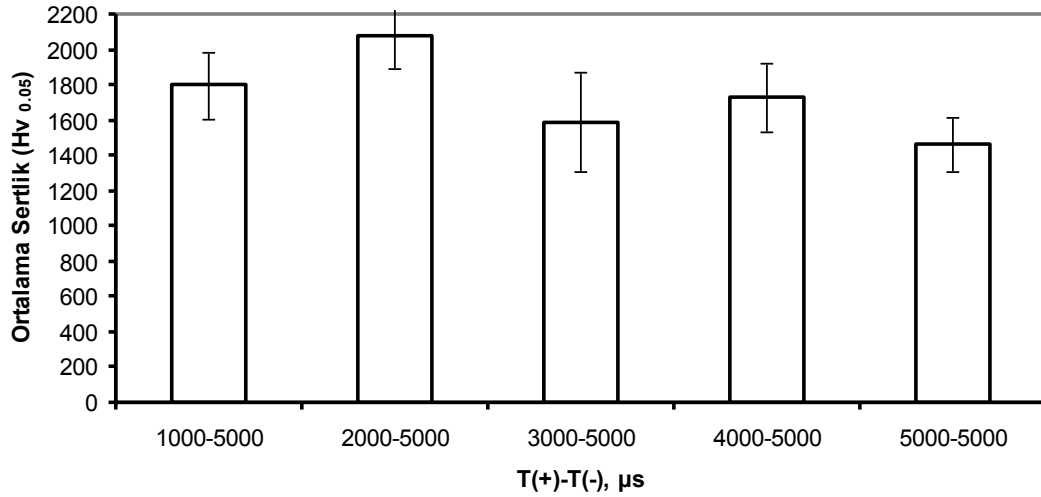
**Çizelge 6.8:** Farklı bekleme süreleri uygulanarak elde edilen farklı kalınlıklardaki kaplamaların kesit SEM görüntüleri (1000x).

$T(+/-) = 5000\mu s - 1000\mu s$	$T(+/-) = 5000\mu s - 2000\mu s$	$T(+/-) = 5000\mu s - 3000\mu s$
		
$T(+/-) = 5000\mu s - 4000\mu s$	$T(+/-) = 5000\mu s - 5000\mu s$	$T(+/-) = 4000\mu s - 5000\mu s$
		
$T(+/-) = 3000\mu s - 5000\mu s$	$T(+/-) = 2000\mu s - 5000\mu s$	$T(+/-) = 1000\mu s - 5000\mu s$
		

Voltaj uygulama süresine bağlı olarak oksit tabakası ortalama sertlik değerinin değişimi Şekil 6.9’ da verilmiştir. Buna göre, sabit pozitif voltaj uygulama süresinde, negatif voltaj uygulama süresinin artmasıyla oksit tabaka sertliği artma eğilimi göstermekte, sabit negatif voltaj uygulama süresinde, pozitif voltaj uygulama süresinin artmasında ise oksit tabaka sertliği azalma eğilimi göstermektedir.



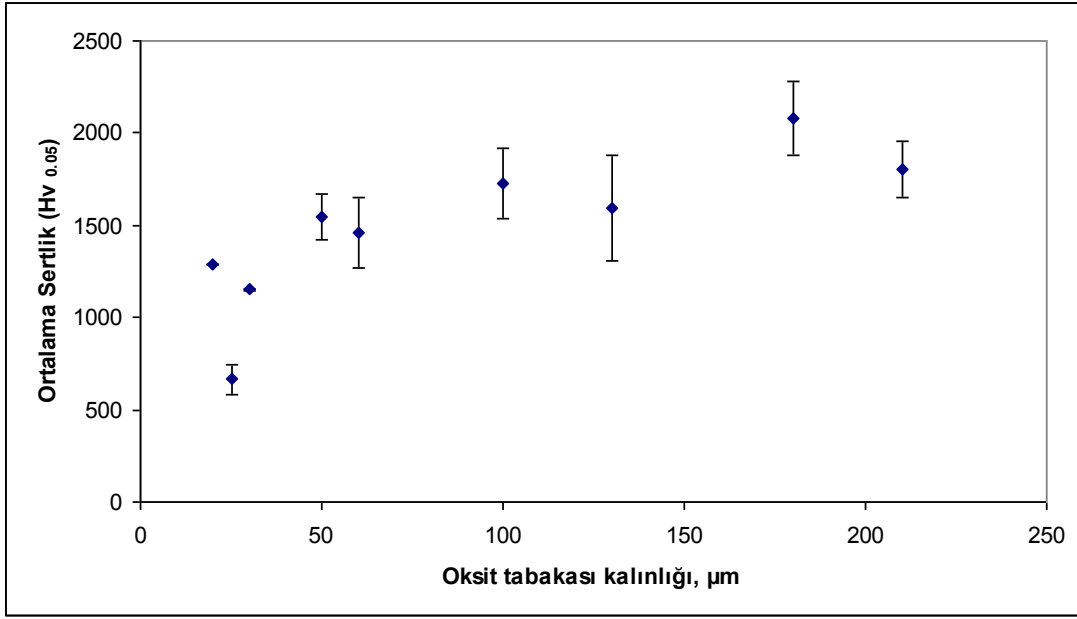
(a)



(b)

**Şekil 6.9:** V(+): 500V, V(-): 100V değerlerinde (a) sabit pozitif voltaj uygulama süresi altında, negatif voltaj süresinin ve (b) sabit negatif voltaj uygulama süresi altında, pozitif voltaj süresinin değişiminin oksit tabakası sertliğine etkisi.

Şekil 6.10' da ise oksit tabakası kalınlığına bağlı olarak oksit tabakasının ortalama sertlik değerinin değişimi görülmektedir. Artan oksit tabakası kalınlığına paralel olarak ortalama sertlik değeri de artış göstermektedir.



**Şekil 6.10:** Oksit tabakası kalınlığına bağlı olarak ortalama sertlik değerinin değişimi.

Sundararajan ve arkadaşları [21], 7075 alüminyum alaşımına,  $0,3 \text{ A/cm}^2$  akım yoğunluğunda, 3,5,10,20 ve 30 dakikalık sürelerde oksidasyon işlemi gerçekleştirmiş ve maksimum  $90 \text{ µm}$ 'lık kaplama elde etmişlerdir. Mikro sertlik ölçümleri  $0,98 \text{ N}$  yükü Vickers uç kullanılarak gerçekleştirmişlerdir. Test sonuçlarında MAO kaplamaların karakteristik özelliği olan, maksimum sertlik arayüzeyde (altlık/kaplama), minimum sertlik kaplama yüzeyinde kuralının doğruluğunu görmüşlerdir.

Jin ve arkadaşları [49], mikro ark oksidasyon ile üretilmiş kaplamaların mekaniksel özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla, özellikle sertlik değerinin artırmak için yapıdaki porozite miktarının azaltılması gerektiğini, daha sert kaplamalar elde etmek için daha yoğun tabakalar üretilmesi gerektiğini düşünmüştür. Bu amaçla kullandığı LY2 alüminyum alaşımına alkali  $\text{NaWO}_3$ ,  $\text{Na}_3\text{PO}_4+12\text{H}_2\text{O}$  çözeltisinde  $10\text{A/dm}^2$  akım yoğunluğunda mikro ark oksidasyon işlemi uygulamıştır. Prosesi başlatmadan önce çözelti içerisine belli miktarda Fe tanecikleri ilave etmiştir ve  $350\text{V}-400\text{V DC}$  akımla oksidasyon sürecini başlatmıştır. Elde edilen kaplamaların mekaniksel karakteristikleri incelendiğinde Fe ilavesi yapılan kaplamaların, Fe ilavesiz kaplamalara göre oldukça yoğun ve sert bir yapıya sahip olduklarını görmüşlerdir.

Lee ve arkadaşları [51], %20 SiCp içerikli kompozit A356 alüminyum alaşımını,  $15\text{g/l}$  sodyum alüminat +  $3\text{g/l}$  sodyum silikat çözeltisinde, yaklaşık 25-50 dk lık

sürelerde, anodik akım yoğunluğu 2000-2200 A/m<sup>2</sup> değerinde mikro ark oksidasyon işlemine tabi tutmuşlar ve numune yüzeylerinde yaklaşık 50-100 µm'lik kaplamalar elde etmişlerdir. Elde edilen bu kaplamaların mekaniksel özellikleri incelendiğinde, yapılan sertlik testlerinde, sertliğin 600 Hv ile 1700 Hv arasında değiştiğini gözlemlemişlerdir. Kullanılan altlığın sertliği 100 Hv'dir. Altlıktan yüzeye doğru ilerledikçe sertlikte görülen bu değişim, kaplama yapısına bakıldığı zaman fark edilen porozite miktarından ve x ışınları analizi sonucu elde edilen farklı fazların yapıda bulunmasından kaynaklandığını tespit etmişlerdir.

Xue ve arkadaşları [52], SiC takviyeli Al-Cu-Mg alüminyum alaşımına, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (6–10 g/l) ve KOH (1–2 g/l) bileşimli elektrolit çözeltisinde, 400-600 V pozitif aralık ve 200-100V negatif aralıkta yaptıkları oksidasyon işlemiyle elde ettikleri kaplamaların karakterizasyonu yapmışlardır. Mevcut kaplamaların XRD analizinde yoğun faz olarak α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve dış katmanlara doğru γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve mullit (3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO<sub>2</sub>) fazlarının bulunduğunu görmüşlerdir. 50 g yük altında yapılan mikrosertlik testlerinde ise kaplamanın dış kısmından içeri doğru ilerlendiğinde sertlik değerlerinin arttığını fark etmişlerdir. Bu değer altlık malzemedен yaklaşık 15 µm mesafede maksimum 2000 HV'dir. Dış katmandaki yüksek oranlı SiO<sub>2</sub> sertlik değerini düşürmektedir. İç taraftaki yoğun kısımda bulunan mullit, α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fazları da yaklaşık 800 HV'yi aşmaktadır. Bu değer de 2024/SiC kompozit altlığının kendi sertlik değerinden oldukça fazladır.

## 6.6 Aşınma DeneYleri

Aşınma testi için seçilen numuneler, bekleme süresi parametresinin kaplama yapısına etkisini görmek amaçlı oksidasyon yapılan numunelerdir. Aşınma deneyi öncesinde numune yüzeyleri 2500 meş SiC zımpara ile hazırlanmış ve daha önceki bölümlerde bahsedilen ölü tabaka olarak adlandırılan amorf, yarı kararlı γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fazının giderilmesi sağlanmıştır. Bu oran toplam kaplama kalınlığının yaklaşık olarak %30'u civarındadır. Daha sonra yüzey uygun kimyasallar ile parlatma işlemine tabi tutulmuş ve tüm numunelerin yüzey pürüzlülükleri yaklaşık 0.5 µm seviyesine indirilmiştir. Bu işlemler sayesinde amorf ve pürüzlü üst tabakanın aşınma izi ölçümlerine olumsuz etkisi ortadan kaldırılmıştır. Böylece kaplama kalitesini belirlemede önemli bir rol oynayan α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fazının aşınma özellikleri görülebilecektir.

Numuneler hazırlandıktan sonra optimum aşınma deney şartları belirlenmiştir. Yapılan testlerde optimum şartlar 5N yük altında 6 mm çaplı alumina bilya kullanılarak 5mm/s kayma hızında 5mm aşınma izi oluşturacak şekilde, toplam 45000 mm aşınma mesafesi elde edilmek suretiyle bulunmuştur.

Aşınma dirençlerinin hesaplanmasında, 6082 alüminyum alaşımının işlem görmemiş numunesinin aşınma alanı/hacmi referans olarak kabul edilmiştir ve MAO işlemi uygulanmış numunelerin aşınma alanları/hacimleri buna göre kıyaslama yapılmıştır. Aşınma izi genişliği ve aşınma izi derinliği değerleri, aşınma izinin başı, ortası ve sonu olmak üzere 3 farklı noktadan alınarak ortalama olarak verilmiştir. Çizelge 6.9’ da her bir numunenin ortalama aşınma izi genişliği, ortalama aşınma derinliği ve aşınma alanı değerleri verilmiştir.


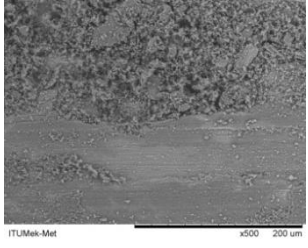

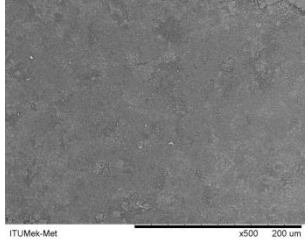

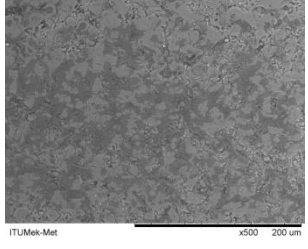

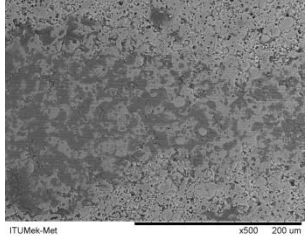
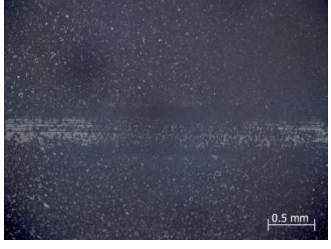
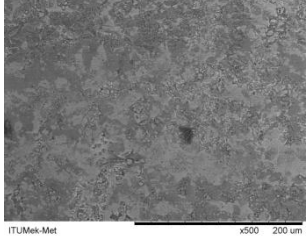
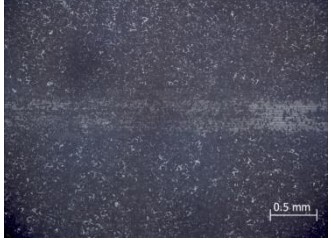
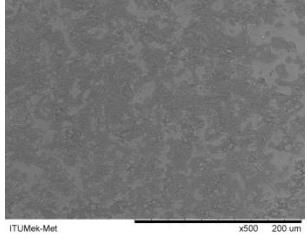
**Çizelge 6.9:** Ortalama aşınma izi genişliği, ortalama aşınma izi derinliği ve aşınma alanı değerlerinin numunelere göre değişimi.

Numune	W Aşınma İzi Genişliği ( $\mu\text{m}$ )	D Aşınma İzi Derinliği ( $\mu\text{m}$ )	A Aşınma Alanı ( $\mu\text{m}^2$ )
İşlemsiz 6082	1575,66	102,53	127750,40
5000 $\mu\text{s}$ - 1000 $\mu\text{s}$	260,66	7,08	1477,83
5000 $\mu\text{s}$ - 2000 $\mu\text{s}$	434	2,79	934,54
5000 $\mu\text{s}$ - 3000 $\mu\text{s}$	211,66	0,88	148,42
5000 $\mu\text{s}$ - 4000 $\mu\text{s}$	498,33	5,66	2247,21
5000 $\mu\text{s}$ - 5000 $\mu\text{s}$	456	5,24	1906,79
4000 $\mu\text{s}$ - 5000 $\mu\text{s}$	586	9,82	4547,27
3000 $\mu\text{s}$ - 5000 $\mu\text{s}$	757	14,62	8661,79
2000 $\mu\text{s}$ - 5000 $\mu\text{s}$	552	12,79	5656,59
1000 $\mu\text{s}$ - 5000 $\mu\text{s}$	441	8,54	2964


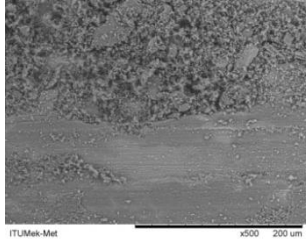

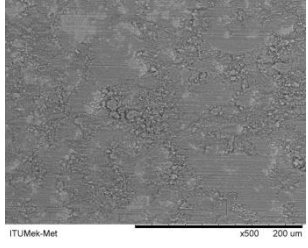

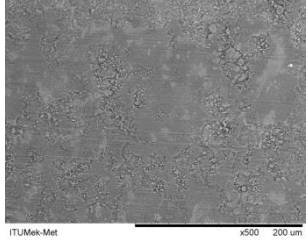
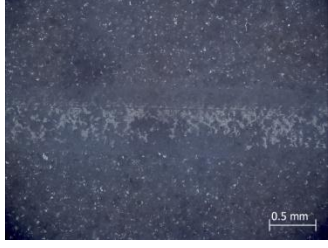
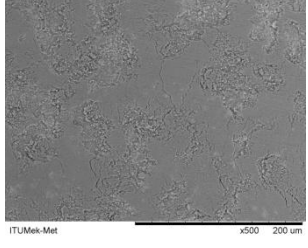

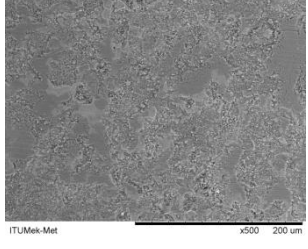
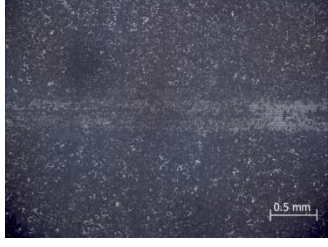
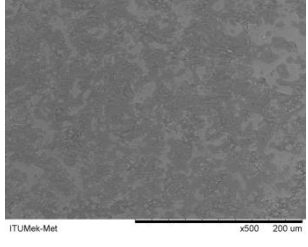
Çizelge 6.9’ dan da görüldüğü gibi MAO işlemi görmüş numunelerin aşınma alanı, işlem görmemiş numunelerin aşınma alanına kıyasla daha düşük değerdedir. Daha düşük aşınma alanı, aşınma direncinin daha yüksek olmasının bir sonucudur. Tüm numunelerin aşınma izi uzunluğu (L) aynı olduğundan, aşınma hacminin yerine aşınma alanı yazılabilir.

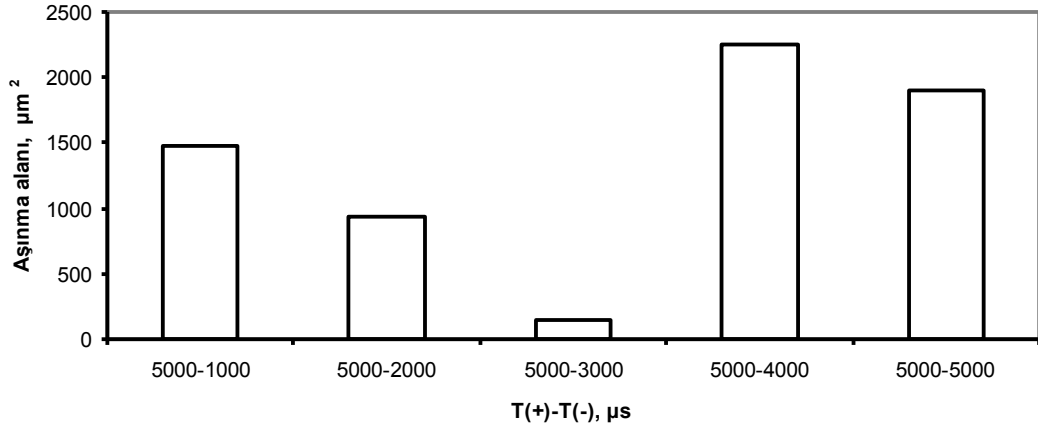
Çizelge 6.10 ve Çizelge 6.11’de pozitif/negatif voltaj uygulama süresi değişimine göre elde edilen kaplamalara ait aşınma izlerinin optik mikroskop ve SEM görüntüleri görülmektedir.

**Çizelge 6.10:** Pozitif voltaj uygulama süresi sabitken negatif voltaj süresinin değişimine göre elde edilen kaplamalara ait aşınma izlerinin optik mikroskop ve SEM görüntüleri.

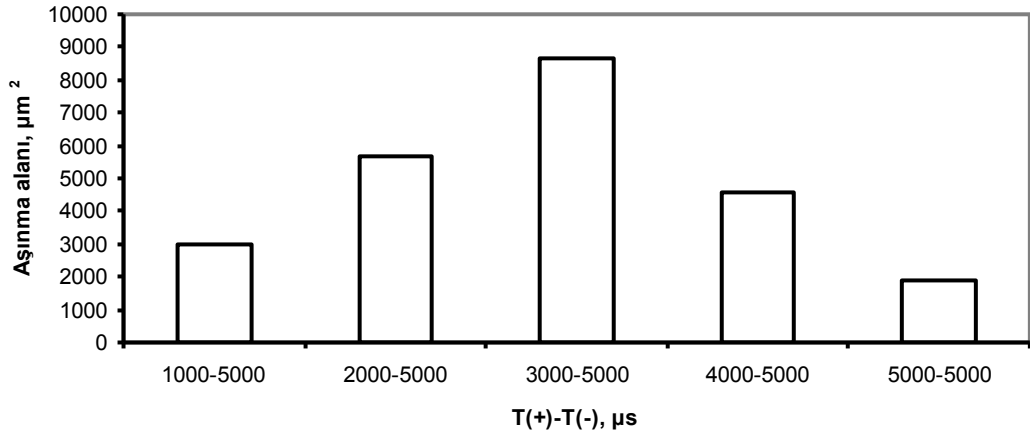
Numune	Optik Mikroskop (50x)	SEM (500x)
Kaplamasız 6082		
5000µs - 1000µs		
5000µs - 2000µs		
5000µs - 3000µs		
5000µs - 4000µs		
5000µs - 5000µs		

**Çizelge 6.11:** Negatif voltaj uygulama süresi sabitken pozitif voltaj süresinin değişimine göre elde edilen kaplamalara ait aşınma izlerinin optik mikroskop ve SEM görüntüleri.

T(+/-), $\mu\text{s}$	Optik Mikroskop (50x)	SEM (500x)
Kaplamasız 6082		
1000 $\mu\text{s}$ - 5000 $\mu\text{s}$		
2000 $\mu\text{s}$ - 5000 $\mu\text{s}$		
3000 $\mu\text{s}$ - 5000 $\mu\text{s}$		
4000 $\mu\text{s}$ - 5000 $\mu\text{s}$		
5000 $\mu\text{s}$ - 5000 $\mu\text{s}$		



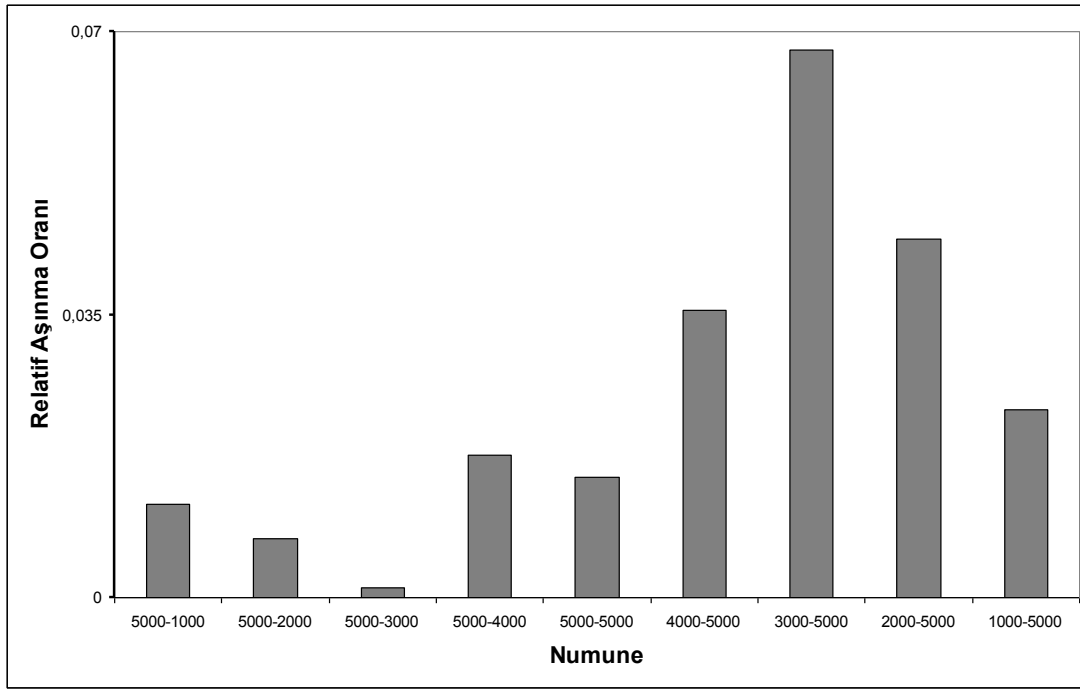
(a)



(b)

**Şekil 6.11:**  $V(+)$ : 500V,  $V(-)$ : 100V değerlerinde (a) sabit pozitif voltaj uygulama süresi altında, negatif voltaj süresinin ve (b) sabit negatif voltaj uygulama süresi altında, pozitif voltaj süresinin değişiminin aşınma iz alanına etkisi.

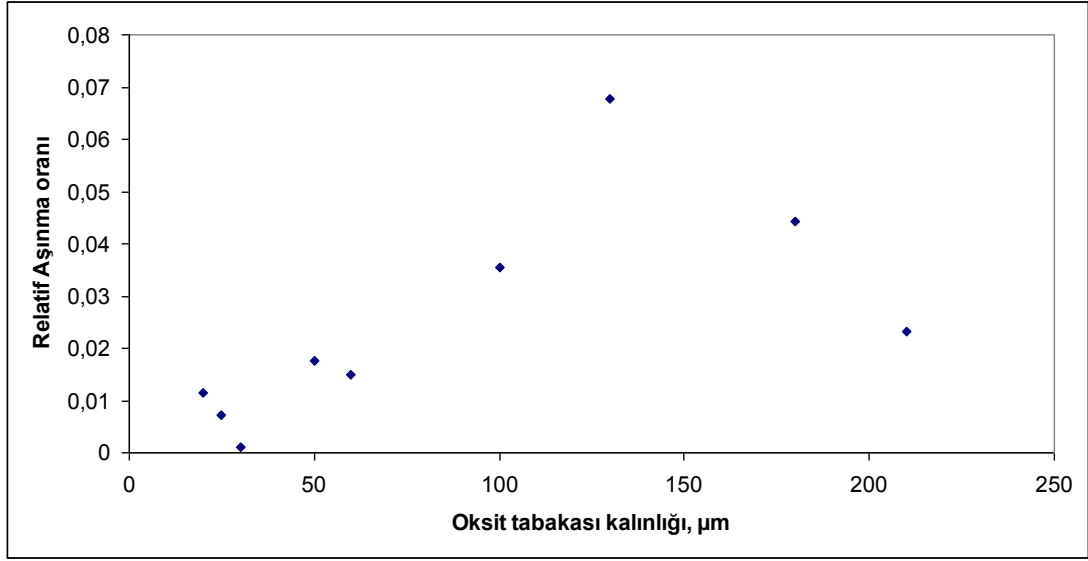
Karşıt hareketli aşınma deneylerinin sonuçları incelendiğinde, genel bir eğilim olarak sabit pozitif voltaj uygulama süresi altında negatif voltaj uygulama süresinin artmasıyla aşınma iz hacmi artmakta, dolayısıyla aşınma direnci azalmaktadır. Negatif voltaj uygulama süresi sabit tutulduğunda ise, pozitif voltaj değerinin artmasıyla aşınma iz hacmi önce artmakta daha sonra düşmektedir. (Şekil 6.11). En düşük aşınma iz hacmi (en yüksek aşınma direnci), pozitif voltaj uygulama süresinin 5000  $\mu s$ , negatif voltaj uygulama süresinin ise 3000  $\mu s$  uygulandığı MAO işlemiyle elde edilmiştir.



**Şekil 6.12:** Pozitif/negatif voltaj süresinin değişimine göre relatif aşınma oranları.

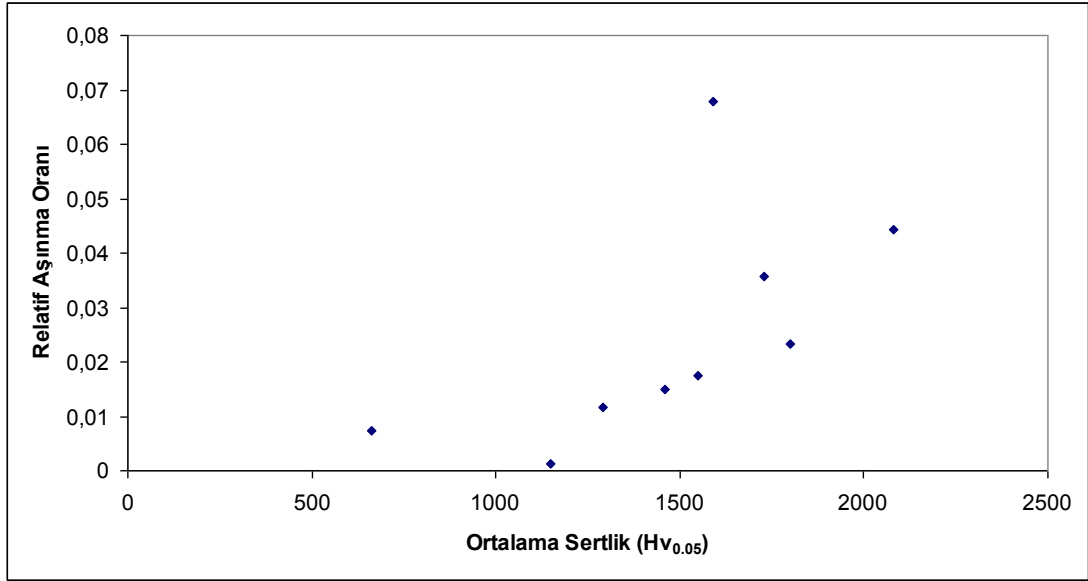
Şekil 6.12’ de relatif aşınma oranlarının pozitif/negatif voltaj uygulama sürelerine göre değişimi görülmektedir. Burada relatif aşınma oranları hesaplanırken işlem görmemiş numunelerin aşınma iz alanı referans olarak alınmış ve işlem görmüş numunelerin aşınma alanları buna göre relatif olarak kıyaslanmıştır. Buna göre, işlemsiz numunenin relatif aşınma direnci 1 olmaktadır. Buradan da tekrar görülebileceği gibi  $T(+/-) = 5000\mu s - 3000\mu s$  parametrelili kaplama en düşük relatif aşınma oranına sahiptir.

Şekil 6.13’ de ise oksit tabakası kalınlığına bağlı olarak relatif aşınma oranının değişimi görülmektedir. Artan oksit tabakası kalınlığına paralel olarak relatif aşınma oranı da belli bir değere kadar artış göstermekte, daha sonra azalmaktadır. Oksit tabakası kalınlığının artmasıyla yapıdaki porozite miktarı artmakta ve dolayısıyla aşınma miktarı ve relatif aşınma oranı artmaktadır. Son iki oksit tabakası kalınlıklarının relatif aşınma oranlarındaki düşüşün sebebi ise tabakaların sertlikleriyle ilgili olduğu düşünülmektedir. Aşındırıcı alumina bilyanın sertliği 2050 Hv civarındadır. Son iki oksit tabakasının sertlikleri ise yaklaşık olarak 2000 Hv’ dir. Aşındırıcı alumina bilya ile oksit tabakalarının sertlikleri birbirine yakın olduğu için alumina bilyanın oksit tabakasını aşındıramadığı düşünülmektedir.



**Şekil 6.13:** Oksit tabakası kalınlığına bağlı olarak relatif aşınma oranının değişimi.

Ortalama sertlik değerinin relatif aşınma oranına değişimi Şekil 6.14’ de görülmektedir. Ortalama sertlik değerinin artmasına paralel olarak relatif aşınma oranı artma eğilimindedir.



**Şekil 6.14:** Ortalama sertlik değerine bağlı olarak relatif aşınma oranının değişimi.

Wang ve arkadaşları [15], ticari Al–Cu–Mg alaşımına uyguladıkları MAO işlemi sonrasında elde ettikleri kaplamanın aşınma direncini incelemişlerdir. Aşınma testini maksimum 1920 MPa lık yük altında, çelik bilya kullanılarak yapmışlardır. Test sonuçları incelendiğinde aşınma sırasında meydana gelen malzeme kaybı oranının ilk başlarda artmakla beraber ,bir müddet sonra azalıp sabit bir değere ulaştığını fark

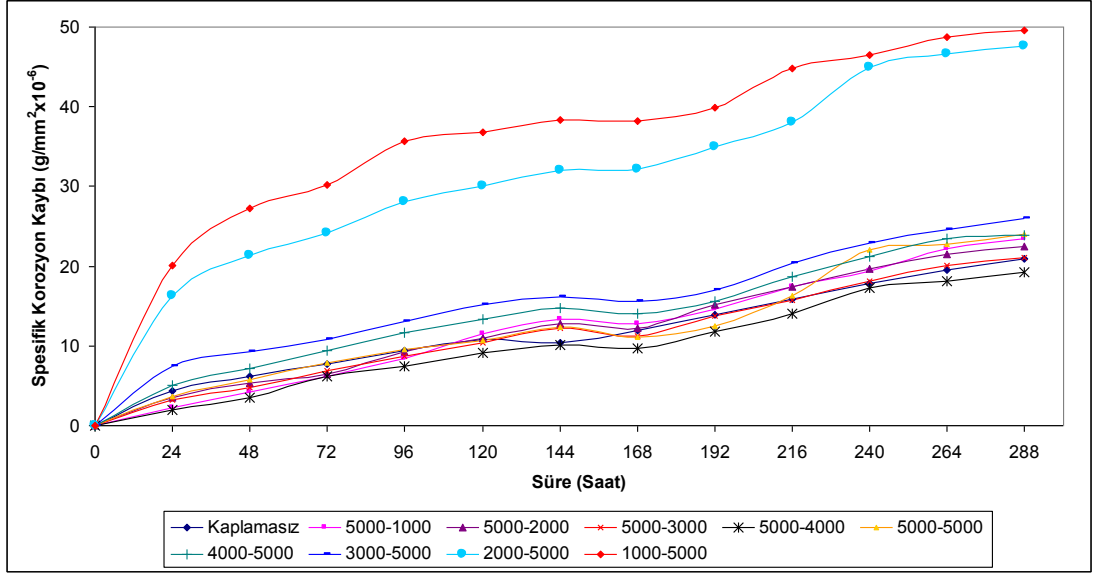
etmişlerdir. Detaylı incelemede bunun sebebinin, kaplama yüzeyinde zayıf bağ yapısına sahip amorf yapıdan kaynaklandığını bulmuşlardır.

Nie ve arkadaşları [4], duplex  $Al_2O_3$ /alüminyum numunelere uyguladıkları MAO işlemi sonrasında yaptıkları aşınma testlerini işlemsiz ve işlemlili numunelere gerçekleştirmişlerdir. Test sırasında bazı noktalarda işlemlili (kaplamalı) numunedeki aşınma oranının işlemsiz numuneye göre daha fazla olduğunu fark etmişlerdir. Detaylı incelemeler sonucu bu olayın, işlemlili numunelerin yüzeylerinde bulunan ölü tabaka olarak adlandırılan  $\gamma$ -  $Al_2O_3$  fazından kaynaklandığını tespit etmişlerdir. daha yoğun olan iç tabakaya ait yapılan aşınma testlerinde ise elde edilen kaplamanın mükemmel aşınma direnci olduğunu bulmuşlardır.

Wei ve diğerleri [53], alkali silikat çözeltisinde MAO uyguladıkları 2024 alüminyum alaşımında korozyon ve aşınma dayanımı açısından elde ettikleri kaplamayı incelemişlerdir. 160  $\mu m$ 'lik kalınlıktaki kaplama uygulanan metalografik işlemlilerle üst kısımdaki 60  $\mu m$ 'lik ölü tabaka giderilerek aşınma testi yapmışlardır. Aşınma testi kuru ve yağlayıcı ortamda çelik bilye kullanılarak 2,60 m/s hızla 300N-1410N arasında artan yüklerde yapmışlardır. Sonuçlar incelendiğinde özellikle parlatılmış yüzeylerde, yağ ortamında yapılan aşınma testlerinin kuru ortama göre mükemmel sonuçlar verdiğini görmüşlerdir.

## **6.7 Korozyon Deneyleri**

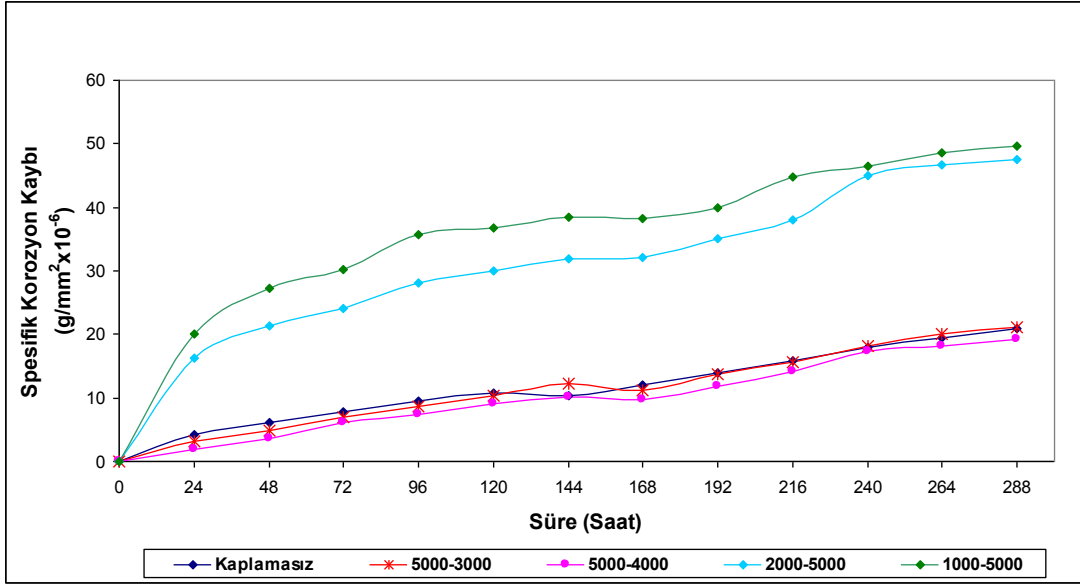
Korozyon deneyleri, farklı pozitif/negatif bekleme süreleriyle elde edilen mikro ark oksidasyon işlemi uygulanmış numunelerle işlem görmemiş 6082 alaşımına yapılmıştır. İşlemsiz numune de dahil olmak üzere 10 numune, hazırlanılan 30 g/l NaCl + 10ml/l HCl korozyon çözeltisine 12 gün süreyle maruz bırakılmıştır. Numunelerin 24 saat aralıklarla ağırlıkları ölçülmüş ve fotoğrafları çekilerek her geçen gün yüzeylerinde meydana gelen değişimler gözlemlenmiştir. 12. günün sonunda meydana gelen ağırlık kayıplarına göre numunelerin korozyon kayıpları hesaplanmıştır.



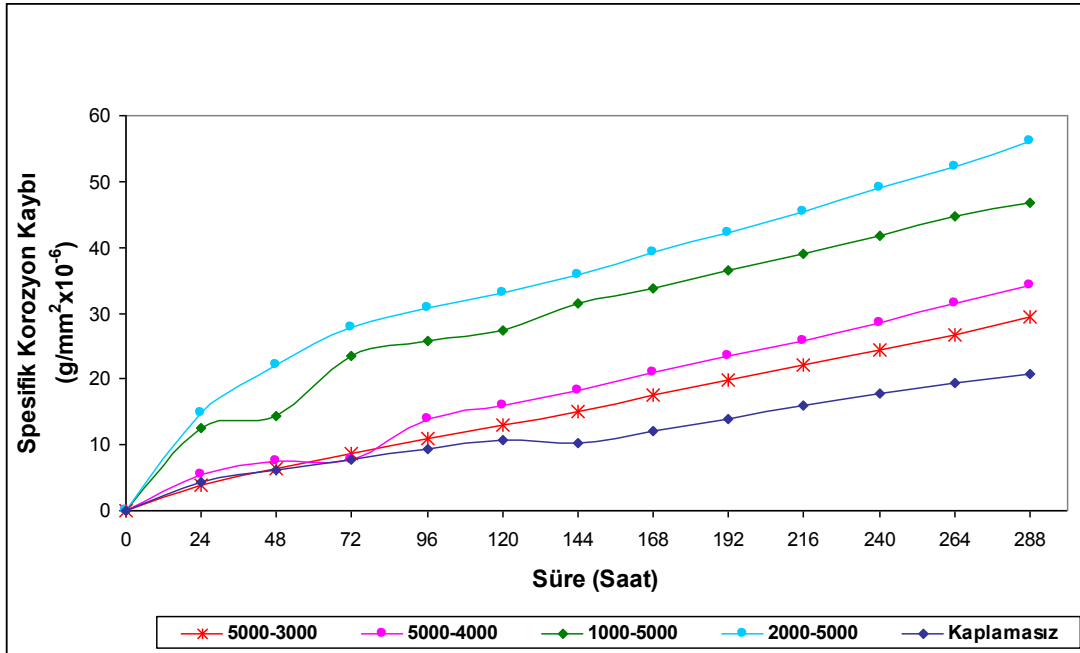
**Şekil 6.15:** Korozyon testi yapılan numunelerin zamana bağlı olarak ağırlıklarındaki değişim.

Şekil 6.15'den görüldüğü gibi en iyi korozyon direncine (en az korozyon kaybına) sahip kaplama,  $T(+)=5000\mu\text{s}-T(-)=4000\mu\text{s}$  uygulama sürelerinde MAO işlemi uygulanan kaplamadır. Kaplama kalınlığının artmasıyla oksit tabakası yapısındaki porozite miktarının da artmasından dolayı korozyon kaybı artarak malzemenin korozyon direnci düşmektedir. Çünkü porozite miktarı arttıkça korozyona maruz kalabilecek yüzey alanı artmakta ve bunun sonucunda korozyon kaybı artmaktadır. Bunu en fazla kalınlığa sahip olan  $T(+)=1000\mu\text{s}-T(-)=5000\mu\text{s}$  parametreleri kaplamadan görmekteyiz. Bundan dolayı MAO işlemi uygulanmamış 6082 alaşımının birçok kaplamadan daha iyi korozyon direnci gösterdiği görülmektedir.

Korozyon deneyi bittikten sonra korozyon direnci iyi olan  $T(+)=5000\mu\text{s}-T(-)=4000\mu\text{s}$  ve  $T(+)=5000\mu\text{s}-T(-)=3000\mu\text{s}$  parametrelili numuneler ile korozyon direnci kötü olan  $T(+)=1000\mu\text{s}-T(-)=5000\mu\text{s}$  ve  $T(+)=2000\mu\text{s}-T(-)=5000\mu\text{s}$  parametrelili kaplamalara korozyon direncini artırıp artırmadığı görmek amacıyla tespit işlemi uygulanmıştır. Şekil 6.16' da tespit işlemi uygulanmış ve uygulanmamış kaplamalara ait korozyon grafikleri görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 6.16: Korozyon miktarının (a) tespit işlemsiz (b) tespit işlemine göre değişimi.

Şekil 6.16' ten görüldüğü gibi tespit işlemi sadece  $T(+)=1000\mu s - T(-)=5000\mu s$  parametrelili korozyon direnci en kötü olan en fazla kalınlıktaki en yüksek poziteye sahip kaplamayı iyi yönde etki ederek korozyon direncini arttırmıştır. Diğer kaplamaları ise kötü yönde etkileyerek korozyon dirençlerini tespit işlemsiz durumdan da daha düşürmüştür.

## 7. GENEL SONUÇLAR

6082 alüminyum alaşımına KOH+Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> çözeltisinde, farklı akım ve voltajlar uygulanarak yapılan MAO işlemi sonucunda elde edilen kaplamanın özellikleri ve işlem parametrelerindeki değişimin kaplama yapısına etkileri aşağıda sıralanmıştır:

1. KOH+Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> çözeltisinde süre sabit tutulmak şartıyla farklı değerlerde voltaj ve akım kontrollü deneyler yapılmış, bu deneyler sonucunda numune yüzeylerinde farklı özelliklerde oksit tabakası oluştuğu görülmüştür.
2. Voltaj kontrollü deneylerin sonuçları incelendiğinde pozitif 300V VE 400V değerlerinde 100V negatif voltajda kaplama oluşmamış, 200V negatif voltaj değerinde ise nokta şeklinde homojen olmayan bölgesel kaplamalar oluşmuştur. Bunun sebebi MAO ya özgü yeterli kritik bozunum voltajı (dielectric breakdown) değerinin aşılmasıdır. 500V pozitif voltaj değerlerinde ise uygulanan 100V ve 200V negatif voltaj değerlerinin her birinde yeterli kritik bozunum voltaj değerinin aşıldığından karakteristik MAO homojen oksit tabakasının oluştuğu görülmüştür.
3. Akım kontrollü deneyler incelendiğinde uygulanan pozitif 4A ve 6A akım değerlerinde, kritik bozunum voltajının aşılmasından dolayı her iki negatif akımda da (1A ve 2A) oksit tabakasının oluştuğu görülmektedir. 10A pozitif akım değerinde ise bu eşiğin aşılamamasından dolayı kaplama oluşmamıştır. Bu kaplamaların taramalı elektron görüntüleri MAO için tipik morfoloji göstermesine rağmen oksit tabakasının yüzeye yapışmasının zayıf olduğu saptanmıştır.
4. Voltaj kontrollü deneylerde sürenin etkisi incelendiğinde, artan oksidasyon süresiyle birlikte yüzeyde oluşan oksit tabakası kalınlığı ve yüzey pürüzlülüğü doğrusal olarak artmıştır.
5. Yapılan ıslatma açısı testlerinde uygulanan voltaj ve akımın artmasıyla ıslatma açısının arttığı görülmüştür.
6. Yapılan XRD analizlerinde, oksit tabakasının  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fazlarından oluştuğu görülmüştür. Çekilen SEM görüntüleri incelendiğinde kaplamanın

farklı yoğunlukta iki bölgeden oluştuğu açıkça görülmüştür. Yapılan araştırmalarda altığa yakın olan yoğun tabakanın  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, yüzeye yakın olan az yoğun ve poroz tabakanın ise  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> olduğu düşünülmektedir.

7. Farklı negatif voltaj değerlerinde elde edilen numunelerin XRD paternleri incelendiğinde, aynı pozitif voltaj voltaj değeri ve artan işlem süresine bağlı olarak oksit yapısındaki  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fazının şiddetinde artış olduğu gözlenmiştir.
8. Yapılan Rockwell C ve kaplama kalınlığı ölçümlerine göre ideal oksit tabakası özelliklerini sağlayan kaplama şartları V(+)=500V, V(-)=100V parametrelerindeki kaplamanın sahip olduğu görülmüştür.
9. Elektriksel parametrelerden birisi olan bekleme süresi etkisini incelemek için farklı değerler kullanılarak işlemler yapılmıştır. Bu işlemler sonucu negatif bekleme süresi sabit tutularak, pozitif bekleme süresinin azaltılması durumunda elde edilen kaplama kalınlığının arttığı gözlemlenmiştir. T(+)=1000 $\mu$ s-T(-)=5000 $\mu$ s değerleri kullanılarak yapılan oksidasyon işleminde elde edilen kaplama kalınlığı 200  $\mu$ m' dir. Pozitif bekleme süresi sabit tutulup, negatif bekleme süresi azaltıldığı zaman ise elde edilen kaplama kalınlığı azaldığı gözlemlenmiştir. T(+)=5000 $\mu$ s-T(-)=1000 $\mu$ s değerleri kullanılarak yapılan oksidasyon işleminde elde edilen kaplama kalınlığı 20  $\mu$ m' dir.
10. Yüzey özelliklerine bekleme süresinin etkisi incelendiğinde pozitif bekleme süresinin azaltılarak yapılan MAO işleminde yüzey pürüzlülüğünün arttığı gözlemlenmiştir. T(+)=1000 $\mu$ s-T(-)=5000 $\mu$ s parametrelerinde yapılan işlemde ölçülen yüzey pürüzlülüğü 11  $\mu$ m' dir. Negatif bekleme süresi azaltılarak yapılan MAO işleminde ise yüzey pürüzlülüğünün azaldığı gözlemlenmiştir. T(+)=5000 $\mu$ s-T(-)=1000 $\mu$ s parametreleri kullanılarak yapılan MAO işleminde ölçülen yüzey pürüzlülüğü 1  $\mu$ m' dir.
11. Farklı pozitif/negatif voltaj uygulama süreleriyle yapılan MAO işlemi sonucunda elde edilen farklı kalınlıktaki kaplamaların mikrosertlik deneylerinde T(+)=2000 $\mu$ s-T(-)=5000 $\mu$ s parametrelili kaplamada maksimum 2080 Hv ortalama sertlik değeri bulunmuştur. Kaplama kalınlığı arttıkça ortalama sertlik değerinin arttığı görülmüştür.
12. Pozitif/negatif voltaj uygulama sürelerinin değişimine göre yapılan MAO işlemi sonucunda elde edilen farklı kalınlıktaki kaplamaların aşınma testlerinde, malzeme üzerinde oluşan oksit filmin iyi derecede aşınmaya

dayanıklı olduğu görülmüştür. Bu kaplamalar karşılaştırıldığında en kalın kaplama elde edilen  $T(+)=1000\mu s-T(-)=5000\mu s$  parametrelili numunenin aşınma direnci, düşük kaplama kalınlığına sahip  $T(+)=5000\mu s-T(-)=3000\mu s$  parametresine sahip numuneden daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Kaplama kalınlığının artmasıyla aşınma hacminin arttığı yani aşınma direncinin azaldığı görülmüştür. Bunun sebebi olarak da artan kaplama kalınlığı ile birlikte yapıda mevcut porozitenin artması olduğu düşünülmektedir.

13. Korozyon deneyleri sonucunda numune yüzeylerinde oluşan oksit filmin  $T(+)=5000\mu s-T(-)=3000\mu s$  ve  $T(+)=5000\mu s-T(-)=4000\mu s$  parametrelili kaplamalar hariç diğer kaplamaların korozyon dirençleri işlemsiz 6082 alaşımından daha kötü bir korozyon direnci gösterdiği belirlenmiştir. Bekleme sürelerinin değişimine göre hazırlanan numunelerde en iyi korozyon direncini  $T(+)=5000\mu s-T(-)=4000\mu s$  parametrelili MAO işlemi uygulanmış numune göstermiştir.
14. Sonuç olarak  $V(+)=500V-V(-)=100V$  değerinde  $T(+)=5000\mu s-T(-)=3000\mu s$  parametrelili optimum şartlarla MAO işlemi uygulanmış kaplamayla  $30\mu m$  kalınlık, 1150Hv ortalama sertlik, korozyon direnci işlemsiz 6082 alaşımı gibi yüksek olan ve aşınma direnci yüksek kaplama elde edilebilir.



## KAYNAKLAR

- [1] **Zhu M.H. and Zhou Z.R.**, 2007. Fretting wear behaviour of ceramic coating prepared by micro-arc oxidation on Al-Si alloy, *Wear*, **263**, 472-480.
- [2] **Nie X. and Matthew A.**, 1999. Thickness effects on the mechanical properties of micro-arc discharge oxide coatings on aluminium alloys, *Surface and Coatings Technology*, **116-119**, 1055-1060.
- [3] **Shi-Gang X. and Li-Xin S.**, 2006. Composition and thermal properties of the coating containing mullite and alumina, *Materials Chemistry and Physics*, **97**, 132-136.
- [4] **Nie X. and Matthews A.**, 2000. Deposition of duplex Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> DLC coatings on Al alloys for tribological applications using a combined micro arc oxidation, *Surface and Coatings Technology*, **121**, 506-513.
- [5] **Zheng W. and Jason L.** 2005. Protection of Mg Alloys Against Galvanic and Other Forms of Corrosion, *Materials Science Forum*, **488-489**, 787-791.
- [6] **Gadow R. and Stahr C.C.**, 2005. Class a Surface Quality for Mg Diecastings Using Ceramic Precursor-Based Coatings, *Proceeding of the 6th International Conference Mg Alloys and Their Applications*, Institut für Werkstoffforschung, Almanya.
- [7] **Khokhryakov E.V., and Mamaev A.L.**, 2002. Protective Coatings-Formation by Microarc Oxidation, *Modern Technique and Technologies*, **6**, 143-145.
- [8] **Patel J.L. and Saka N.**, US Patent 6197178, Feb 4, 1999.
- [9] **Ramakrishna L. and Sundararajan G.**, 2007. Kinetics and Properties of Micro Arc Oxidation Coatings Deposited on Commercial Al Alloys, *Metallurgical and Materials Transactions A*, **38**, 370-378.
- [10] **Huang P. and Han Y.**, 2004. Surface Modification of Titanium Implant by Microarc Oxidation and Hydrothermal Treatment, *Journal of Biomedical Materials*, **70B**, 187-190.
- [11] **Tang G. and Zhu Z.**, 2004. Preparation of Porous Anatase Titania Film, *Materials Letters*, **58**, 1857-1860.
- [12] **Nie X. and Matthews A.**, 2002. Abrasive wear/corrosion properties and TEM analysis of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coatings fabricated using plasma electrolysis, *Surface & Coating Technology*, **149**, 245-251.
- [13] **Günyüz M.**, 2007. Titanyum ve Alaşımlarının Mikro Ark Yöntemiyle Kaplanması, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- [14] **Yerokhin A.L. and Snizhko L.O.**, 2003. Discharge characterization in plasma, *J.Phys.D: Appl. Phys.*, **36**, 2110-2120.
- [15] **Wang C. and Jiang Y.**, 2006. Growth process and wear resistance for ceramic coatings formed on Al-Cu-Mg alloy by micro-arc oxidation, *Applied Surface Science*, **253**, 674-678.
- [16] **Hibbard J.**, 2007. Government mandates force rethinking of automotive parts finishing processes: Micro-arc oxidation technology figures prominently in future applications, *Metal Finishing*, **105**, 50-54.
- [17] **Gnedenkov S. V. and Khrisanfovaa O.A.**, 2001. Composition and adhesion of protective coatings on aluminum, *Surface and Coatings Technology*, **145**, 146-151.
- [18] **Xin S. and Song L.**, 2006. Composition and mechanical properties of hard ceramic coating containing  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> produced by microarc oxidation on Ti-6Al-4V alloy, *Materials Chemistry and Physics*, **97**, 132-136.
- [19] **Malayoğlu U. ve Çakmak E.**, 2008. Plazma Elektrolitik Oksitlenme Yöntemiyle Hafif Metallerin Kaplanması, *Mühendis ve Makina*, **Cilt 49 Sayı 582**, Sayfa 3-9.
- [20] **Fukuda T. and Kakuhari T.**, 2007. New Surface Treatment Technology for Light Metals-Keronite, *Journal of the Surface Finishing Society of Japan*, **58**, 357.
- [21] **Sundararajan G. and Rama K.L.**, 2003. Mechanisms underlying the formation of thick alumina coatings through the MAO coating technology, *Surface and Coatings Technology*, **167**, 269-277.
- [22] **Snizhko L.O. and Matthews A.**, 2004. Anodic Processes in Plasma Electrolytic Oxidation of Aluminium in Alkaline Solutions, *Electrochim. Acta*, **49**, 2085-2095.
- [23] **Yerokhin A.L. and Dowe S.J.**, 1999. Plasma Electrolysis for Surface Engineering, *Surface and Coating Technology*, **122**, 73-93.
- [24] **Yerokhin A.L. and Matthews A.**, 2003. Discharge Characterization in Plasma Electrolytic Oxidation of Aluminium, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **36**, 2110-2120.
- [25] **Yerokhin A.L. and Matthews A.**, 2002. Effect of OH Radicals on the Characteristic of Plasma Electrolytic Oxidation Process and on the Oxide Film Produced, *Abstracts of Int. Conf. Electrochem 2002*, İngiltere.
- [26] **Yerokhin A.L. and Matthews A.**, 2002. An Investigation of Voltage and Current Fluctuations during Plasma Electrolytic Diffusion Treatment of Metals, *Abstracts of Int. Conf. PSE 2002*, Almanya.
- [27] **Yerokhin A.L. and Matthews A.**, 2001. Duplex Surface Treatments Combining Plasma Electrolytic Nitrocarburising and Plasma-Immersion Ion-Assisted Deposition, *Surface and Coating Technology*, **142-144**, 1129-1136.

- [28] **Yerokhin A.L. and Matthews A.**, 2002. Kinetics of Plasma Electrolytic Oxidation of Ti-6Al-4V Alloy in Aluminate based Electrolytes, *Abstracts of Int. Conf. ICMCTF 2002*, ABD.
- [29] **Guidong X. and Jiong L.I.**, 2007. Power Source Types Effects on the Properties of Oxide Ceramic Coatings on Mg Alloys, *Nature Science and Foundation of China 2007*, 150-152.
- [30] **Jin F. and Tong H.**, 2006. Structure and Mechanical Properties of Mg Alloy Treated by Micro-Arc Discharge Oxidation Using Direct Current and High-Frequency Bipolar Pulsing Modes, *Materials Science and Engineering*, **435-436**, 123-126.
- [31] **Kurze P.**, 2004. Ceramic Coatings on Light Metals by Plasmachemical Treatment, *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, **29**, 85-89.
- [32] < <http://nzic.org.nz/ChemProcesses/metals/8E.pdf>>, 23.03.2009.
- [33] **R. C. Furneaux, G. Gantois, X De Buyser**, Anodized aluminium, *The natural finish for designers and architects*, TSC Surface Critical Products Ltd, Warwick, England.
- [34] **Hans Gunther Germscheid, Roland Geisler**, 1972, US Patent, 3, 657, 77.
- [35] **M. Zemanova, M. Chovancova**, May 2006, Combination of sealing methods on anodised aluminium, *Galvanotechnik*, 1100-1103.
- [36] < <http://www.p2pays.org/ref/02/01433.pdf>>, **J. C. Hecker**, Anodizing Aluminium, PFD Directory, 284-293.
- [37] < <http://www.aluminyumsanayi.com/alyuzeyislem.html>>, 09.02.2009.
- [38] **Guanglianga Y. and Xianya L.**, 2002. The effects of current density on the phase composition and microstructure properties of micro-arc, *Journal of Alloys and Compounds*, **345**, 196-200.
- [39] **Fanya J. and Honghui T.**, 2006., Structure and microwave-absorbing properties of Fe-particle containing alumina prepared by micro-arc oxidation, *Surface and Coating Technology*, **201**, 292-295.
- [40] **Peterhouse J.A.C.**, 2005. Thermal and Mechanical Properties of Plasma Electrolytic Oxide Coatings, *Phd Thesis*, University of Cambridge, İngiltere.
- [41] **Curran J.A. and Clyne T.W.**, 2005. Thermo-physical Properties of Plasma Electrolytic Oxide Coatings on Aluminium, *Surf. & Coat. Techn.*, **199**, 168-176.
- [42] **Dearnley P.A. and Gummersbach P.**, 1999. The sliding wear resistance and frictional characteristics of surface, *Wear*, **225**, 127-134.
- [43] **Gnedenkov S.V., Khrisanfova O.A.**, 2000, Production of hard and heat resistant coatings on aluminum using a plasma micro discharge, *Surface and Coatings Technology*, **123**, 24-28.
- [44] **Wenbin X. and Xiaoling W.**, 2006. Anti-corrosion film on 2024 SiC aluminum matrix composite fabricated by microarc oxidation in silicate electrolyte, *Journal of Alloys and Compounds*, **425**, 302-306.

- [45] **Guohua L. and Weichao Gu.**, 2006. Characteristic of ceramic coatings on aluminum by plasma electrolytic oxidation in silicate and phosphate electrolyte, *Applied Surface Science*, **253**, 2947–2952.
- [46] **Krishna L.R.**, 2006. A comparative study of tribological behavior of microarc oxidation and hard-anodized coatings, *Wear*, **261**, 1095–1101.
- [47] **Kalkancı H.**, 2004. Mikro Ark Oksidasyon Teknolojisi ve Alüminyum Alasımlı Malzemelere Uygulanması, *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi, Sakarya.
- [48] **Zhang R.F.**, 2008. Effects of electric parameters on properties of anodic coatings formed on magnesium alloys, journal of materials processing technology, *Materials Chemistry and Physics*, **107**, 356-363.
- [49] **Jin F. and Zhao J.**, 2006. Improvement of surface porosity and properties of alumina films by incorporation of Fe micrograins in micro-arc oxidation, *Applied Surface Science*, **253**, 863-868.
- [50] **Yang G.**, 2000. Characterization of Microarc Oxidation Discharge Process for Depositing Ceramic Coating, *Chin. Phys. Lett.*, **18**, 1141.
- [51] **Lee J. and Han J.**, 2008. Dry sliding wear of MAO-coated A356/20 vol.% SiCp composites in the temperature range 25-180 °C, *Wear*, **264**, 75-85.
- [52] **Xue W. and Zhang T.**, 2002. Effect of microarc discharge surface treatment on the tensile properties of Al-Cu-Mg alloy, *Materials Letters*, **56**, 737-743.
- [53] **Wei T. and Tian J.**, 2005. Characterization and wear- and corrosion-resistance of microarc oxidation ceramic coatings on aluminum alloy, *Journal of Alloys and Compounds*, **389**, 169-176.

## **ÖZGEÇMİŞ**

Salih ÇAKICI 1982 yılında İstanbul'da doğdu. Lise öğrenimini Eminönü Cibali Yabancı Dil Ağırlıklı Lisesi'nde 2000 yılında tamamladı. Ertesi yıl Sakarya Üniversitesi Metalurji Malzeme Mühendisliği Bölümünü kazanıp 2005 yılında mezun oldu. 2006 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Malzeme Mühendisliği Yüksek Lisans Programına başlamıştır.