İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINA UYGULANAN MİKROARK OKSİDASYON VE ANODİK OKSİDASYON İŞLEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Merih ÖVÜNDÜR

Metaluri ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

MAYIS 2014

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINA UYGULANAN MİKROARK OKSİDASYON VE ANODİK OKSİDASYON İŞLEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Merih ÖVÜNDÜR
(506111420)

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENOĞLU

MAYIS 2014

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 506111420 numaralı Yüksek Lisans / Doktora Öğrencisi **Merih ÖVÜNDÜR**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **"ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINA UYGULANAN MİKROARK OKSİDASYON VE ANODİK OKSİDASYON İŞLEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI"** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENOĞLU** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Prof. Dr. Adı SOYADI** …... Üniversitesi	.....
	Prof. Dr. Adı SOYADI ….. Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi : 05.05.2014
Savunma Tarihi :

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca yaptığım çalışmalarda ve araştırmalarda bütün bilgi ve deneyimini benimle paylaşan, ve bana her konuda destek, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşarak bana yol gösteren ve desteklerini esirgemeyen tez danışmanım Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar çalışmalarımda bana yardımını esirgemeyen, deneyimlerini benimle paylaşan Araş. Gör. Yük. Müh. Faiz MUHAFFEL'E sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Mekanik Metalurji Laboratuvarında çalışan tüm araştırma görevlilerine ve arkadaşlarıma yardımlarından ve desteklerinden dolayı teşekkürü bir borç bilirim.

Eğitim hayatım boyunca ilgisini ve desteğini benden esirgemeyen, maddi manevi her zaman yanımda olan ve bugünlere gelmemi sağlayan aileme çok teşekkür ederim.

Haziran 2014

Merih Övündür
Metalurji ve Malzeme Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **v**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
KISALTMALAR ..... **ix**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xi**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xiiiiii**
SEMBOL LİSTESİ ..... **xiii**
ÖZET ..... **xvii**
SUMMARY ..... **xix**
1. GİRİŞ **1**
2. ALÜMİNYUM **3**
2.1 Genel Özellikleri 3
2.2 Alüminyum Alaşımları 4
3. ALÜMİNYUMA UYGULANAN GELENEKSEL KAPLAMALAR **7**
3.1 Anodik Oksidasyon 7
3.1.1 Genel özellikleri 7
3.1.2 Proses parametreleri 8
3.1.3 Sert anodizasyon 10
3.2 Krom Kaplama 11
3.2.1 Alüminyum üzeri zinkatlama 12
3.3 Plazma Sprey Kaplama 13
3.4 Kataforez Kaplama 16
3.5 Elektrostatik Toz Boya 18
3.5.1 Elektrostatik toz boya uygulama yöntemleri 18
3.5.1.1 Akışkan yatak 18
3.5.1.2 Püskürtme yöntemi 19
4. MİKRO ARK OKSİDASYON PROSESİ **21**
4.1 Enerji ve Geleceğe Yönelik Tahminler 21
4.2 Mikro Ark Oksidasyon'un Gelişimi 22
4.3 MAO Yönteminin Esasları 23
4.3.1 Gerekli donanımlar 23
4.3.1.1 Doğru akım güç üniteleri 24
4.3.1.2 Titreşimli doğru akım güç üniteleri 24
4.3.1.3 Titreşimli alternatif akım güç üniteleri 24
4.3.2 Kaplamanın oluşum mekanizması 25
4.3.2.1 Akım-Voltaj ilişkisi 26
4.3.3 Alüminyumun MAO prosesinde kullanılan elektrolitler 28
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR **31**
5.1 Deneylerde Kullanılan Alüminyum Alaşımları 31
5.2 Anodik Oksidasyon İşlemleri 32
5.3 Mikroark Oksidasyon İşlemleri 32
5.4 Anodik Oksidasyon ve MAO İşlem Parametreleri 33

5.5 Karakterizasyon Çalışmaları 35
6. DENEYSEL SONUÇLAR ve İRDELEME 37
6.1 Voltaj Kontrollü MAO ile Ticari Parametrelerle Eloksalın Karşılaştırılması.. 37
6.1.1 Voltaj kontrollü MAO işleminin alaşımların yüzey özelliklerine etkisi ... 37
6.1.2 Ticari parametrelerle eloksalın alaşımların yüzey özelliklerine etkisi 42
6.1.3 Dövme alaşımları için üç nokta eğme testi sonuçları 44
6.1.4 MAO numuneleri ile ticari eloksal numunelerin aşınma testi sonuçları ... 45
6.2 Akım Kontrollü MAO ile Özel Parametrelerle Eloksalın Karşılaştırılması 49
6.2.1 Akım kontrollü MAO işleminin alaşımların yüzey özellikerine etkisi 49
6.2.2 Özel parametrelerle eloksalın alaşımların yüzey özelliklerine etkisi 50
6.2.3 MAO ile özel parametrelerle eloksalın aşınma testi sonuçları 52
7. GENEL SONUÇLAR 57
KAYNAKLAR 59
EKLER 63
ÖZGEÇMİŞ 65

KISALTMALAR

AOİ	**:** Anodik oksidasyon işlemi
KTL	**:** Kataforez kaplama
MAO	**:** Mikro ark oksidasyon
ELOKSAL	**:** Anodik oksidasyon

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Alüminyum döküm alaşımlarının Alüminyum Standartlar Birliği'ne göre ticari sınıflandırılması…….. 5
Çizelge 2.2 : Alüminyum işleme (dövme) alaşımlarının Alüminyum Standartlar Birliği'ne göre ticari sınıflandırılması…….. 6
Çizelge 3.1 : Anodik oksidasyon işleminde kullanılan elektrolitler ve buna bağlı olarak değişen parametreler……..... 9
Çizelge 3.2 : Endüstride kullanılan krom kaplama ideal banyo terkibi……... 11
Çizelge 4.1 : Alüminyumun mikro ark oksidasyonunda kullanılan elektrolitlerin yapısı ve örnekleri…….. 28
Çizelge 5.1 : Çalışmada kullanılan Alüminyum alaşımları...…… 31
Çizelge 5.2 : Çalışmada kullanılan MAO ve Eloksal parametreleri...…….. 34
Çizelge 6.1 : MAO yönteminde voltaj-süre kontrollü AlSiCu – AlMg numunelerinin yüzey morfolojieri(SEM 3000x)…….…… 40
Çizelge 6.2 : MAO yönteminde voltaj-süre değişimlerinin AlSiCu – AlMg numunelerinin kaplama kalınlıklarına etkileri (SEM 2000x)……. 41
Çizelge 6.3 : Ticari parametrelerle elde edilmiş eloksal kaplama numunelerinin yüzey morfolojilerleri ve kesit görüntüleri……. 43
Çizelge 6.4 : Ticari parametrelerle elde edilmiş AlMg eloksal kaplama yüzeyinde tespit edilen mikro çatlaklar…… 44
Çizelge 6.5 : Üç nokta eğme testi sonrası numunelerin yüzey görüntüleri……... 44
Çizelge 6.6 : Ticari eloksal ve voltaj kontrollü MAO uygulanmış AlSiCu ve AlMg numunelerin aşınma testi sonrası yüzey görüntüleri……... 46
Çizelge 6.7 : Akım kontrollü MAO sonrası AlSiCu ve AlMg alaşımlarının yüzey ve kesit görüntüleri……. 50
Çizelge 6.8 : Özel parametrelerle elde edilmiş eloksal kaplama numunelerinin yüzey morfolojilerleri ve kesit görüntüleri.…… 51
Çizelge 6.9 : Özel parametrelerle eloksal ve akım kontrollü MAO için AlSiCu-AlMg numunelerin aşınma testi sonrası yüzey görüntüleri.…… 53

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Alüminyum – Silisyum ikili faz diyagramı……..... 4
Şekil 3.1 : Anodizasyon işleminin şematik görünümü…….. 7
Şekil 3.2 : Alüminyum anodik oksidasyon sonucu oluşan yüzey kesitinin şematik görünümü…… 8
Şekil 3.3 : Plazma sprey kaplama yönteminin şematik görüntüsü…….. 15
Şekil 3.4 : Tipik bir plazma sprey kaplamaya ait mikroyapının şematik olarak gösterilişi…… 15
Şekil 3.5 : Kataforez kaplama genel iş akış şeması……. 17
Şekil 3.6 : Püskürtme yöntemiyle elektrostatik toz boyanın uygulamasının şematik gösterimi……. 19
Şekil 4.1 : Dünya'da enerji fiyatlarının 2035 yılına kadar tahmini artışı (rakamlar % bazında artışları göstermektedir)…… 21
Şekil 4.2 : Yüzey işlemlerine bağlı olarak mühendislik malzemelerinin yüzey sertliklerinin değişimi……. 23
Şekil 4.3 : MAO yöntemi için gerekli donanımın şematik görünümü……. 24
Şekil 4.4 : MAO yönteminin işlem adımları……..... 25
Şekil 4.5 : MAO yönteminde akım-voltaj ilişkisinin şematik görünümü……..... 26
Şekil 4.6 : Kare dalga seklinde pozitif ve negatif voltaj degerleri ile voltaj uygulama süresinin sematik gösterimi...…… 27
Şekil 4.7 : Alüminyumun MAO işlemi için kullanılan çeşitli elektrolitler ve bunların akım yoğunluğuna bağlı olarak karakteristikleri……. 28
Şekil 4.8 : 2024 kalite alüminyumun MAO sonucu yüzey mikroyapısının SEM görüntüsü; a) NaF katkısız, b) NaF katkılı…… 29
Şekil 4.9 : MAO kaplı 2024 alüminyum altlığa ait kesit SEM görüntüsü; a) NaF katkısız, b) NaF katkılı…….. 30
Şekil 5.1 : Mikro ark oksidasyon sistemi ve proses sırasında bir numune yüzeyinde oluşan kıvılcımların fotoğrafı……. 33
Şekil 6.1 : AlSiCu döküm alaşımının voltaj kontrollü MAO sonrası kaplama kalınlıkları……. 37
Şekil 6.2 : AlMg dövme alaşımının voltaj kontrollü MAO sonrası kaplama kalınlıkları……. 38
Şekil 6.3 : AlSiCu ve AlMg alaşımlarının voltaj kontrollü MAO sonrası yüzey pürüzlülüklerinin karşılaştırılması…… 39
Şekil 6.4 : Ticari parametrelerle kaplanmış AlSiCu ve Al alaşımlarının kaplama kalınlığı ve yüzey pürüzlülükleri…….. 42
Şekil 6.5 : Aşınma testi için seçilen 4 numuneye ait XRD analizi....……. 45
Şekil 6.6 : Voltaj kontrollü MAO ve ticari eloksal kaplama numunelerinin relatif aşınma dirençleri…….. 47
Şekil 6.7 : Aşınma testi sırasında MAO ve Eloksal kaplama yüzeylerinde elde edilen spesifik sürtünme katsayılarının kıyaslanması…….. 48

Şekil 6.8 : AlSiCu ve Al alaşımlarının akım kontrollü MAO sonrası kaplama kalınlıkları ve yüzey pürüzlülükleri…… 49
Şekil 6.9 : Özel parametrelerle kaplanmış AlSiCu ve AlMg alaşımlarının kaplama kalınlığı ve yüzey pürüzlülükleri…… 51
Şekil 6.10 : Benzer kaplama kalınlıklarına sahip numunelerinin relatif aşınma dirençleri..…… 54
Şekil 6.11 : Benzer kaplama kalınlıklarına sahip numunelerin spesifik sürtünme katsayılarının kıyaslanması...…… 54

SEMBOL LİSTESİ

V **:** Voltaj
µm **:** Mikrometre
A **:** Amper
dk **:** Dakika
e^- **:** Elektron

ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINA UYGULANAN MİKRO ARK OKSİDASYON VE ANODİK OKSİDASYON İŞLEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

ÖZET

Aluminyum alaşımları hafif metal olusu ile tanınmaktadır ve başta otomotiv, inşaat, uzay, havacılık vb. pek çok sektörde uygulama alanı bulan ve oldukça ilgi çeken bir mühendislik malzemesidir. Düşük yoğunluğuna rağmen iyi bir korozyon direnci, yüksek termal ve elektriksel direnç gösterirler. Bu özelliklerine karşın; düşük aşınma direnci ve sertliğe sahip olması; alüminyum alaşımlarının endüstride daha yaygın bir şekilde kullanılmasının önüne geçmektedir.

Bu doğrultuda geleneksel anodik oksidasyon işlemi geliştirilmiş ve alüminyum alaşımları için alternatif bir yüzey modifikasyon tekniği olarak dikkatleri çekmiştir. Geleneksel anodik oksidasyon ile nispeten yüksek bir kaplama sertliği ve aşınma direnci elde edilmiş olsa da; halen endüstriyel uygulamalardaki beklentilerin çok altında bir aşınma direncine sahip olunmuş ve yöntem yetersiz kalmıştır.

Mikroark oksidasyon yöntemi ise hafif metallerin üzerinde daha kalın bir oksit kaplamasının elde edilebilmesi adına geliştirilmiş ve anodik oksidasyon mantığına dayanan elektrokimyasal bir proses olarak öne çıkmıştır. Buna karşın alüminyum alaşımlarının mikroark oksidasyonu; anodik oksidasyona kıyasla halen endüstriyel uygulamalarda sınırlı bir kullanım alanına sahiptir.

Bu çalışmada AlSi9Cu3(Fe) döküm alaşımı ve AlMg3 (5754 kalite) dövme alaşımı üzerine ; ticari bir firmada endüstriyel ve özel parametreler ile yaptırılan anodik oksidasyon işlemi sonucu elde edilen oksit tabakası ile laboratuvar koşullarında üretilmiş mikroark oksidasyon yöntemine ait oksit tabakalarının morfolojileri ve tribolojik performansları karşılaştırılmıştır. Mikroark oksidasyon yönteminde voltaj kontrolü, akım kontrolü ve işlem süresinde değişiklikler yapılarak farklı kalınlık ve morfolojilerde oksit tabakaları elde edilmiştir.

Tedarikçi firmada kaplanan malzemeler ile laboratuvar ortamında kaplanan mikroark oksidasyon numunelerinin yüzey incelemeleri, kesit incelemeleri, x-ışınları analizi, yüzey pürüzlülüğü tespiti, üç nokta eğme testi yapılmış, akabinde tribolojik performansların karşılaştırılması adına karsıt hareketli aşınma cihazı ile kuru ortamda aşınma testleri gerçekleştirilmiştir.Yapılan deneyler ve testler doğrultusunda; günümüz endüstrisinin en yaygın uygulamalarından biri olan alüminyum ve alaşımlarının anodik oksidasyon yöntemi ; gelişmekte olan mikroark okdisayonu yöntemi ile karşılaştırılmıştır.

Deney sonuçları değerlendirildiğinde ; alüminyum döküm ve dövme alaşımlarının ticari ve özel eloksal parametreleri sonucunda yüzeyde amorf bir oksit tabakası elde edildiği tespit edilirken mikroark oksidasyonu ile kalın bir kristalin oksit tabakası elde edildiği sonucuna varılmıştır.

Aşınma testlerinin sonuçları incelendiğinde ; hem alüminyum döküm hem de alüminyum dövme alaşımları için mikroark okdisayon yöntemi ile anodik oksidasyon yöntemine göre çok daha yüksek aşınma direncine sahip bir koruyucu oksit film tabakasının malzemelerin yüzeyinde oluşturulduğu görülmüştür.

COMPARISON BETWEEN MICRO ARC OXIDATION AND ANODIC OXIDIZING TECHNICHS ON ALUMINIUM ALLOYS

SUMMARY

Aluminium alloys are very attractive engineering materials for many applications and had been found many application due to their low density, good corrosion resistance, enhanced specific strength, high thermal and electrical conductivities. Hundreds of alloys and tempers make aluminium alloys useful for a very wide variety of applications from aircraft, aerospace, automotive, and shipbuilding to household products including pots, pans, and cooking utensils. Newer applications, such as drive shafts, radiators, cylinder heads, and suspension systems have proven to be most advantageous when dealing with weight vs strength vs cost consideration Despite these attractive properties ; the low wear resistance and relativelty low hardness limit alumunium alloy's more extensive use in the wear industry.

In this respect, anodic oxidizing process which is an electro-chemical coating process appeared as an attractive surface modification technique in industry for over years. Although slight increase in hardness and wear resistance are achieved by anodic oxidizing process, the enhancements in surface properties are still far from the requirements of the wear related applications.

On the other hand, the wear resistance of aluminium alloys had been studied to improve with different chemical, thermal and painting processes. Plasma spray coating which is a thermal barier coating , chrome coating, cataphoresis coating, electrostatic powder painting and etc. were several methods among those trials to develop properties of aluminium and also to raise of wear resistance which is normally not high-level in aluminium and its alloys.

Recently, micro arc oxidation, which generates thick and hard oxide layers on light metals, appeared as an alternative electrochemical process against anodic oxidation process. Anodic oxidation emloys electrolytic cell which consists of anode, cathode, electrolite and power supply.

Basic electrolites are used in the electrolytic cells of the anodic oxidation process. The anode material applied oxidation is attached to the positive electrode while the cathode material (generally stainless steel) is stuck to the negative electrode. As a result of voltage applied, sparks are appeared on the surface of the anode when the voltage reach the breakdown voltage.

These sparks can instantaneous raise to high temperatures and are beginning of the micro arc oxidation process. In the next part of the process, oxidation occurs on the surface of the anode due to the electrochemical reactions between anode and cathode. During the existance of oxide layer process, sample molten material coming from discharge channels freezes on layer, so oxide layer gets thicker as time passes. Also the porous structure is also appeared with a better visuality. For power source of coating system, pulsed AC power unit has been used during processes.

However, micro arc oxidation process has limited applications in aluminium industry as compared to anodic oxidation.There are various factors such electrolite, voltage, current density, impact rate, waiting and treatment time that changed surface properties of the material during the micro arc oxidation process.These factors give advantage to change surface properties easily and obtain product as required.

This study was initiated to compare the tribological and morphological properties of AlSi9Cu3(Fe) casting alloy and 5754 quality AlMg3 wrought alloy after anodic oxidation and micro arc oxidation processes. Anodic oxidation process was applied in a commercial workshop with the customized process parameters and general commercial parameters to have a comparison between micro arc oxidated samples which have been produced in laboratory conditions. Micro arc oxidation process parameters as voltage controlled, current controlled and process time have been changed to realize the changes in morphology and tribological performance of selected alloys.

After anodizing of samples at commercial supplier and micro arc oxidation in laboratory conditions; surface morphology and microstructure of the samples were examined by an energy dispersive spectrometer (EDS, Oxford Instruments) equipped scanning electron microscope (SEM, Hitachi TM-1000, JEOL JSM 6335F FEG and Philips XL 30 SFEG). Qualitative phase analysis of the coatings was carried out by an X-ray diffractometer (XRD). Mean surface roughness (Ra) of the samples was measured by using a surface profilometer (Veeco Dektak, 6M). Cross sectional microstructure of the samples was examined by a scanning electron microscope (SEM, Hitachi, TM-1000) and three point flexural tests have been performed on Shimadzu bending test device with until 90^0 bending.

After surface characterization tests, the results showed that of the anodized alloys have an amorphous oxide layer where a crystalline thick oxide layer have been occured by micro arc oxidation process on selected aluminium alloys.

On the other hand, with micro arc oxidation process; a more porous oxide layer have been occured on both aluminium casting alloys and aluminium wrought alloys compare to anodized surfaces.

In micro arc oxidation, the increasing voltage and increasing process time were providing a thicker oxide layer for aluminium casting alloys where also the roughness of surface were increasing from 1μm to almost 5μm values. On the other hand; the increasing time were more effective to thickness change of aluminium wrought alloys. For both samples; the dimension of micro pores were improved as determined by surface SEM photos under various of zoom in between 1000x to 10000x.

Following the surface characterization tests, tribological performances of anodizing and micro arc oxidized samples were compared on a reciprocating wear tester under dry sliding conditions. The dry sliding wear tests showed that the relative wear resistance of the oxide layers which generated by voltage-controlled micro arc oxidation is remarkably higher than that of the anodized alloys with commercial parameters.

Tribological performance of current-controlled micro arc oxidation samples were also tested by comparing them with anodizing process within special parameters.. The only difference of specific parameters were process time compare to commercial parameters. The process times were increased for casting alloys (from 50 minutes to 60 minutes) and decreased for wrought alloys (from 30 minutes to 25 minutes) to have an equal coating thicknesses to compare the oxide layers obtained by micro arc oxidation and anodizing under objective circumstances. Even the process time increased for casting alloy's anodizing process, the maximum layer thickness were 10μm eventually. Therefore, each sample for wrought alloy and casting alloy which produced by anodizing and micro arc oxidation process were manuelly linished with 2500 mesh grinding paper under water solution. The results were also similar to "voltage-controlled MAO" and had higher relative wear resistance values than to anodizing samples with specific coating parameters. Micro arc oxidation of aluminium wrought alloy showed the greatest relative wear resistance among all other samples.

Three point flextural tests have been made on aluminium wrought alloy, 1 micro arc oxidation applied sample and 1 commercial anodizing applied sample have been tested. For micro arc oxidation process; Positive voltage has been chosen as 440V and negative voltage value was 88V while the process time 10 minutes.On the other hand, the commercial anodizing parameters were constant voltage as 15V and 30 minutes as process time. Three point flexural test results showed that the coating bound obtained with micro arc oxidation process on selected wrought alloy were much more stronger than layer occured by anodizing process. Under stereo microscope; the scrathes and cracks were highly appeared on anodizing surface. The bending test were only made on wrought alloys because of the good elastical properties of aluminium wrought alloys compare to aluminium casting alloys.

1. GİRİŞ

Endüstriyel uygulamalarda, gün geçtikçe malzemelere dair beklentiler değişmekte ve malzemelere çeşitli yeni özellikler kazandırma arzusu her geçen gün artmaktadır. Geliştirilmek istenen unsurlar; kimi zaman malzemenin mekanik karakteristiği , kimi zaman ise sadece dekoratif özellikleridir.

Günümüz endüstrisinin vazgeçilmez malzemeleri haline gelen alüminyum ve alüminyum alaşımları da; her yeni gün farklı bir kullanım alanında kendilerine yer bulmaktadırlar. Buna karşın, düşük aşınma mukavemetleri; alüminyum ve alaşımlarının uygulama alanlarını limitler hale gelmektedir. Bu dezavantajı minimize etmek için alasımlandırma, ısıl islemler ve yüzey kaplama gibi islemler uygulanmaktadır. [1]

Toz boya, krom kaplama, kataforez boya, geleneksel anodik oksidasyon (eloksal) vb. uygulamalar ile alüminyum alaşımlarının mekanik ve korozif özellikleri, yıllar boyunca geliştirilmeye çalışılmıştır.

Öte yandan mikro ark okdisasyon (MAO) yöntemi ise, son yıllarda araştırmacıların ilgi odağı haline gelmiş olup, diğer tüm yöntemlere göre çok daha mükemmel bir ultra-sert seramik kaplaması üretimine imkan vermektedir. Bu teknik sayesinde, alüminyum alaşımlarının yüzeylerinde meydana gelen özellikle aşınma direncindeki artış ve diğer mekanik özelliklerideki olumlu yönde değişim, MAO yöntemine olan ilgiyi ve prosese yönelik araştırmaları arttırmaktadır. [1]

Bu çalışmada; mikro ark oksidasyon (MAO) yöntemi ile alüminyum alaşımlarının kaplanması; malzemeleri korozyondan korumak, yüksek mikro sertlik ve yüksek aşınma direncine sahip bir yüzey kaplamasının elde edilmesi amaçlanmıştır.

MAO yönteminin uygulandığı malzemeler, alüminyum döküm ve dövme (hadde – işleme) alaşımlarından örneklerdir. Özellikle silisyumun pek çok uygulamada ana alaşım elementi olduğu alüminyum döküm alaşımlarının, bir elektrokimyasal proses olan mikro ark oksidasyon yöntemine uygunluğu gözlemlenmiştir.

Görselliğin ön planda olduğu çeşitli projelerde de, bu kaplama yöntemi ile üretilecek malzemelerin, talep edilebilecek görsel yüzey kalitesine de sahip olduğu, özellikle dekoratif amaçla yapılan kaplamalara da bir alternatif olabileceği görülmüştür.

2. ALÜMİNYUM

2.1 Genel Özellikler

Alüminyum yeryüzünde oksijen ve silisyumdan sonra en çok bulunan üçüncü elementtir. Buna rağmen endüstriyel çapta üretimi 1886 yılında Charles Martin Hall ve Fransa'da Paul T. Heroult'un birbirlerinden habersiz olarak uyguladıkları elektroliz yöntemi ile başlamıştır. Bu uygulama, günümüzde de halen kullanılan yöntem olduğundan 1886 yılı alüminyum endüstrisinin başlangıç yılı olarak kabul edilir. [2]

Endüstrinin pek çok kolunda milyonlarca farklı ürünün yapımında kullanılmakta olan alüminyumun dünya ekonomisi içinde çok önemli bir yeri vardır. Alüminyumdan üretilmiş yapısal bileşenler uzay ve havacılık sanayii için vazgeçilmezdir. Hafiflik ve yüksek dayanım özellikleri gerektiren taşımacılık ve inşaat sanayinde de geniş kullanım alanı bulunmaktadırlar. [3].

Diğer metallere göre kendisini avantıjlı kılan ;

- Hafifliği,
- Tekrar defalarca kullanılabilirliği (yeniden ergitme ile geri dönüşümü)
- Yüksek korozyon direnci,
- Çekilebilirliği,
- Şekillendirilebilirliği,
- Dövülebilirliği,
- İşlenebilirliği,
- Yüksek ısı ve elektriksel iletkenliği
- Işık ve ısı yansıtıcılığı

gibi özelliklerin, alüminyumun sektördeki kullanım alanının artmasında etkili olduğu söylenebilir. [3,4]

2.2 Alüminyum Alaşımları

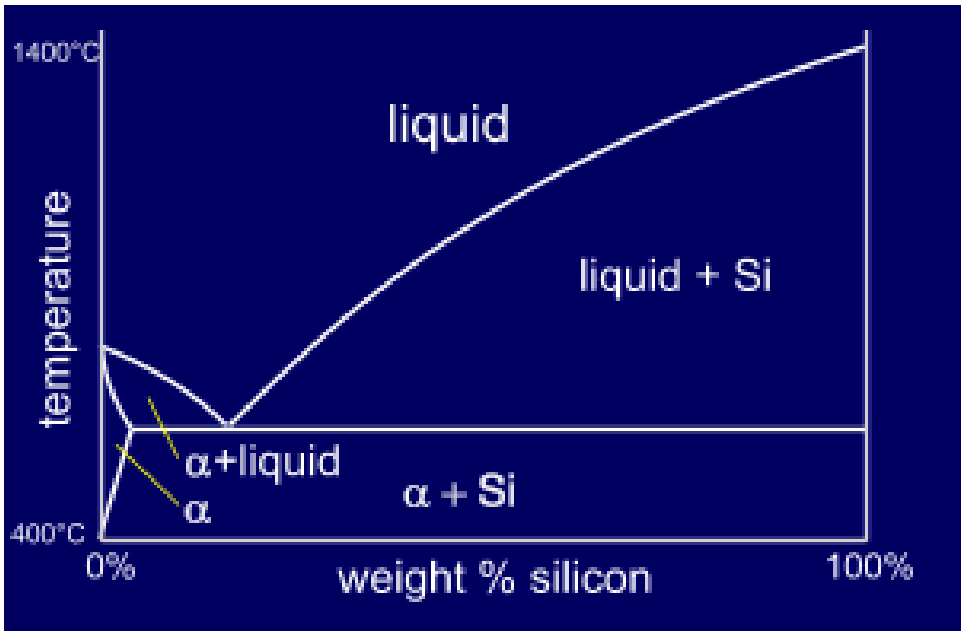
Alüminyum alaşımları, alaşım elementlerinin çok farklı etkileri dolayısı ile birbirinden çok farklı özeliklere sahiptirler ve bunlar genellikle döküm ve dövme(hadde) alüminyum alaşımları olmak üzere iki ana gruba ayrılırlar. [5]

- Döküm alaşımları (casting alloys), nihai ürünün; kum kalıba döküm, kokil kalıba(metal kalıba) döküm ya da metal enjeksyion döküm gibi yöntemlerle üretilmesinde kullanılan alüminyum alaşımlarıdır. [6]

Döküm alaşımlarından genel olarak iyi bir akışkanlığa sahip olmaları, düşük ergime sıcaklığı, katı hale geçiş süresinin kısa olması ve bu sayede çevrim süresinin az olması, soğuma sırasında sıcak yırtılmalar ve çatlamaların oluşmaması ve döküm sonrası parçanın fiziksel ve kimyasal olarak stabil olması beklenir. [7]

Döküm alaşımları, döküm yöntemine bağlı olarak, kompleks şekilli tasarıma sahip parçaların herhangi bir ek işleme gerek kalmadan üretilmesinde kullanılmaktadırlar. Bu alaşımlar; döküm prosesine uygunluk ve dökülebilirlik adına yüksek miktarlarda silisyum(Si) elementini ihtiva ederler. [8]

Şekil 2.1'de görüleceği gibi, alüminyumun %11,6 Silisyum ile yaptığı alaşım; ikili faz diyagramında ötektik noktaya denk gelmektedir ve bu alaşımın dökülebilirliği mükemmeldir. Ancak silisyum iğnesel tane morfolojisine sahip olduğundan, döküm parçasının mukavemetinde düşüşe sebebiyet verir. [7]



Şekil 2.1 : Alüminyum – Silisyum ikili faz diyagramı [9]

- Dövme (İşlem,hadde) alaşımları (wrought alloys), genel olarak ingot ya da billetler halinde dökülmelerinin ardından çeşitli sıcak ya da soğuk mekanik işlemler ile istenilen form ve şekillere getirilen malzemelerdir. Bu yöntemler;
    - Haddeleme
    - Ekstrüzyon;
    - Tel Çekme
    - Dövme

şeklinde sınıflandırılmaktadır.

Dövme alaşımlarının, plastik deformasyon kabiliyeti iyi olup kolayca şekillendirilebilirler. Alüminyum dövme alaşımlarından çeşitli profiller, yuvarlak kesitli parçalar, tel, boru, vb. ürünler ile saç, levha ve folyo gibi yassı ürünler üretilebilmektedir. [6]

Döküm ve dövme alaşımlarının sınıflandırılması ve isimlendirilmesi kimyasal kompozisyonlarına göre yapılmaktadır. Alüminyum alaşımların sınıflandırılmasında uluslararası olarak kabul edilen isimlendirme U.S. Aluminium Association (Alüminyum Standartlar Birliği) tarafından 2 yöntem kullanılarak yapılmaktadır;

Döküme göre isimlendirme; 3 tane rakam ve virgülden sonra 1 tane daha rakam kullanılarak nümerik dizilim ile yapılmaktadır. [8]

Çizelge 2.1 : Alüminyum döküm alaşımlarının Alüminyum Standartlar Birliği'ne göre ticari sınıflandırılması [8]

Sınıflandırma	**Temel Alaşım Elementi**
1xx.x	Alaşımlandırılmamış Alüminyum (% 99,0 veya daha yüksek safiyet)
2xx.x	Bakır
3xx.x	Silis ile Magnezyum ve/veya Bakır
4xx.x	Silisyum
5xx.x	Magnezyum
6xx.x	Kullanılmayan seri
7xx.x	Çinko
8xx.x	Kalay
9xx.x	Diğer elementler

Bu dizilime göre çizelge 2.1'de görülebileceği üzere ilk rakam grup içerisindeki ana alaşımlandırma elementini ifade etmektedir. Örneğin; A356.0 olarak adlandırılan döküm alaşımı; 3.seriye ait bir döküm alaşımıdır. [8]

Dövme alaşımları için de; 4 haneli rakam sistemi kullanılarak nümerik dizilim ile yapılmaktadır[8]. İşleme (dövme) alüminyum alaşımları da, içerdiği ana alaşım elemanına göre 8 gruba ayrılmıştır ve 4 rakam içermektedirler. Örneğin; Xxxx olarak endüstride bilinen ve kabul gören 1000 serisi,2000 serisi... vb. şekilde tanımlanırlar. Dövme alaşımlarının bir bölümü; ısıl işleme uygun olup,yaşlandırma kabiliyetine sahiptirler. Bu sayede plaka ya da profilden beklenen mukavette artış sağlanabilir.[10]

Çizelge 2.2 : Alüminyum işleme (dövme) alaşımlarının Alüminyum Standartlar Birliği'ne göre ticari sınıflandırılması [10]

Sınıflandırma	**Temel Alaşım Elementi**	**Isıl İşleme Uygunluk**
1xxx	Ticari saflıkta Al (>%99 Al)	Yaşlandırılamaz
2xxx	Al-Cu ve Al-Cu-Li	Yaşlandırılabilir
3xxx	Al – Mn	Yaşlandırılamaz
4xxx	Al-Si ve Al-Mg-Si	Mg içeriyorsa yaşlandırılabilir
5xxx	Al-Mg	Yaşlandırılamaz
6xxx	Al-Mg-Si	Yaşlandırılabilir
7xxx	Al-Mg-Zn	Yaşlandırılabilir
8xxx	Al-Li , Sn , Zr veya B	Yaşlandırılabilir

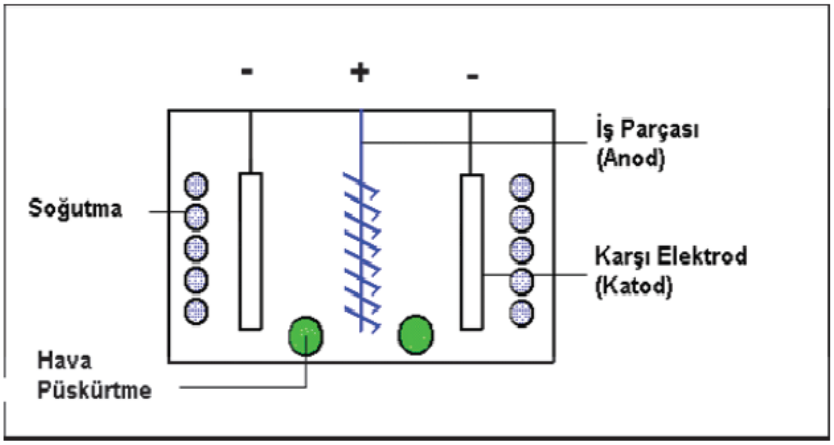
Isıl işleme uygun olmayan dövme alaşımlarına ise şekil değişimi gibi mekanik işlemlerle mukavemet kazandırılmaktadır.

3. ALÜMİNYUMA UYGULANAN GELENEKSEL KAPLAMALAR

3.1 Anodik Oksidasyon İşlemi

3.1.1 Genel özellikleri

Anodik oksidasyon işlemi (AOİ) ; aluminyum, magnezyum, titanyum, zirkonyum gibi malzemelerin; elektrolitik hücre içerisinde anot malzemeyi oluşturduğu ve işlem sırasında malzeme yüzeyinde oksit tabakasının meydana geldiği bir elektrokimyasal prosestir. Bu proseste kaplanacak parçalar anod ve katod olarak birbirlerine elektriksel olarak bağlanırlar. [11]



Şekil 3.1 : Anodizasyon işleminin şematik görünümü [2]

Endüstride bilinen diğer adıyla "**eloksal kaplama**"; Almanca bir tabir olan (Elektrolytische Oxidation des Aluminums) yani aluminyumun anodik oksidasyonu kelimelerinin baş harfleri birleştirilerek türetilmiştir. Uluslararası terminolojide "Anodic Oxidation (Anodik Oksidasyon)" veya "Anodising / Anodizing (Anodizasyon / Anodize)" olarak tanımlanır. [12]

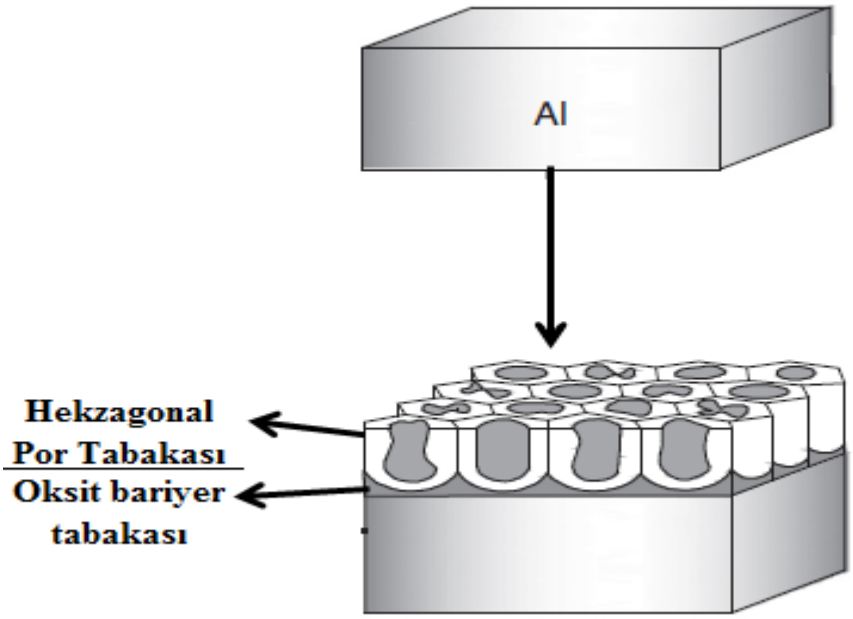
AOİ teknolojisi yaklaşık 80 yıl önce geliştirilmiştir ve ilk olarak 1930"lu yıllarda pencere iskeletleri için uygulanmaya başlanmıştır. 1950 ve 1960 yılları arasında gözle görülür şekilde anodik oksidasyon endüstrisi ilerlemiştir. Günümüzle karşılaştırma yapıldığında çok az bir oranda yapılarda kullanılmaya devam edilse de,

mimari uygulamalarda hala en sağlam bitirme işlemi olma özelliğini sürdürmektedir. [11]

Alüminyum ve alaşımları, AOİ'nin endüstriyel uygulamalarında en büyük pay sahibidir. Titanyum, magnezyum vb. malzemelerin yanında aluminyumun bu denli eşsiz bir yere sahip olması, asidik elektrolit içerisinde ince oksit tabakası ve yüksek yoğunlukta mikroskobik por oluşturmasındandır. [11]

3.1.2 Proses parametreleri

Eloksal kaplama prosesi sonucu malzeminin yüzeyinde oluşturulan koyurucu tabaka; metalik yüzeyin üzerindeki ince oksit film tabakası ve onun üzerinde dik bir şekilde oluşup büyüyen hekzagonal formda porlardan meydana gelmektedir. [13]



Şekil 3.2 : Alüminyum anodik oksidasyon sonucu oluşan yüzey kesitinin şematik görünümü [14]

Oluşan porosiz yapıdaki koruyucu film tabakasının bağlı olduğu parametreler;

- Akım yoğunluğu (A/dm^2)
- Voltaj (V)
- Elektrolit Konsantrasyonu
- Alüminyum Komposizyonu
- Sıcaklık

şeklinde sınıflandırılabilir. [13]

Endüstriyel uygulamalarda elektrolit olarak sıklıkla 160 ile 200 g/l arasında değişen konsantrasyonlarda sülfürik asit çözeltileri kullanılır. Ortam sıcaklığı 18-22 ^{0}C ve uygun akım yoğunluğu 1,4 ile 1,8 A/dm^2 'dir. İşlem sırasında oluşan ısının ortamdan uzaklaştırılması için soğutma ve elektrolit içine hava püskürtme gereklidir. Alüminyum ve alaşımları için genelde 3000 saniye (50 dk) ve üzeri proses zamanı belirlenmiştir [2,15]

Proses parametrelerine göre oluşan tabakının özellikleri sürekli olarak değişebilmektedir. Örneğin;

1. Sabit voltaj altında sıcaklık artışı; akım yoğunluğunun artmasını sağlar. Bu durum kaplamadaki porların büyümesine ve oksit tabakasının kalınlaşmasını yardımcı olur.
2. Sabit voltaj altında, sülfirik asit çözeltisinin konsantrasyonundaki artış; akım yoğunluğunun artmasına, porozite miktarının artışı ve porların büyümesine sebep olur.
3. Sabit sıcaklıkta artan voltaj ile; akım yoğunluğu artar ve kaplamanın kalınlığı ile porların boyutunda da artış görülür. Buna karşın kaplamadaki porozite miktarı azalmaktadır. [13]

AOİ birçok kimyasal çözeltilerde uygulanabilmektedir ancak bunlardan bazılarının ticari uygulamaları ve endüstrilerde kullanımları mevcuttur. Mevcut olarak uygulanan elektrolitler ve bu elektrolitlerin parametrelere etkisi Çizelge 3.1' de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 : Anodik oksidasyon işleminde kullanılan elektrolitler ve buna bağlı olarak değişen parametreler[11]

Elektrolit Türü	**Konsantrasyon (g/l)**	**Sıcaklık (^{0}C)**	**Voltaj (V)**	**Tabaka Kalınlığı µm**
Sülfirik Asit	150 - 200	18 - 20	12 - 22	5 - 100
Sülfirik Asit / Okzalik Asit	160 - 180	10 - 20	12 - 25	5 - 35
Kromik Asit	30 - 100	25 - 55	30 - 70	2 - 8
Fosforik Asit	120 - 250	20 - 30	30 - 120	1 - 30
Borik Asit	40 - 50	70 - 100	50 - 5000	maks. 0,5
Tartarik Asit	20 - 40	70 - 80	120 - 150	maks. 0,16

Sülfirik asit; ticari uygulamalarda en genel kullanılan AOİ çözeltisidir. % 15-% 20 oranında sülfürik asit, 18 ^{o}C ile 20 ^{o}C arası bir sıcaklıkta, 12 V ile 22 V değerleri arasındaki voltajlarda uygulanmaktadır. AOİ sonucu tabaka kalınlığı 5 μm- 100 μm arasında değişmektedir. Aluminyumun içerdiği alaşım elementlerine ve oksit tabaka kalınlığına bağlı olarak, sarımsı, grimsi veya taba rengi almaktadır [11]

3.1.3 Sert anodizasyon

Bu tip anodik kaplamalar genellikle normal anodizasyon standartlarından daha kalındır ve özel anodizasyon kosullarında olusturulurlar. Kaplama kalınlıgı 25-250 μm arasındadır. Sert anodik oksidayonun (hard anodizing) ticari kaplama parametrelerden en büyük farkı ise; kaplama süresindeki artıştır. Kaplanacak parçaya göre ortalama 240 dakikaya kadar elektrokimyasal proses sürdürülür. Kaplama işlemi ile alüminyum üzerinde oluşacak kalınlıktan dolayı sert eloksal yapılacak parçalarda, özellikle ölçüsel olarak hassas parçalarda ölçü toleransları hesaba katılmalıdır. Sert Eloksal; tekstil, silah ve medikal alanlarında tercih edilmektedir. [2,15,16]

Sert anodizasyon tekniğinde kullanılan kaplama parametreleri genelde ;

- Elektrolit konsantrasyonu : 5-15 % (hacimsel) sülfürik asit
- Akım yogunlugu : 2-10 A/dm2 (DC ve darbeli)
- Voltaj : 23-120 volt
- Sıcaklık : -5 ile +5 0C arası.
- Süre; maksimum 240 dakika [2,15]

Proses zamanının artmasına bağlı olarak kaplama kalınlığındaki artış, mikro-porların büyümesine ve por derinliklerinin artmasında da etkili olmaktadır. Bu durum, doğrudan kaplamanın ıslatma açısı (**contact angle**) üzerinde önemli rol oynar. Jing ve arkadaşlarının (2011) yürüttüğü deneysel çalışmalarda, ticari bir kaplama parametresi ile proses edilmiş malzemelerin ıslatma açıları 96^{0} iken (hidrofobik; su geçirmez); sert anodizasyon sonucu elde edilen yüzeyde 152^{0}'ye kadar ıslatma açılarının elde edildiği görülmüştür edilmiştir. Bu durum, kaplamanın sızdırmazlık özelliklerinin gelişmesinde de önemli pay sahibidir. Endüstriyel uygulamalarda sızdırmazlık özelliğinin iyi olması, kaplamala uygulamalarının temel amaçlarından da biridir. [16]

3.2 Krom Kaplama

Krom kaplama tekniği, alüminyum alaşımları başta olmak üzere çinko ve çelik malzemelere yıllardan beri uygulanan, ticari açıdan geçmişi 1930'lu yıllara kadar dayanan geleneksel bir kaplama yöntemidir.

Krom kaplama genellikle 3 ana kullanım alanına sahiptir;

- Nikel kaplama üzerine yapılan, dekoratif amaçlı, parlak ve kararmayan kaplama elde etmek için,
- Aşınmış metal yüzeyleri, metal işleme takımları veya döküm yüzeyleri gibi çok sert olması gerekli yüzeylerin kaplanması için,
- Özellikle motor silindirlerinin iç yüzeyleri, mil yatakları gibi, aşınmaya maruz kalan ve bu nedenle sert ve gözenekli yapıda olması gereken yüzeylerde kullanılır. Gözenekli yapı yağın gözeneklerde tutunup motor ömrünün uzun olmasını sağlar. [17,18]

Teknik uzun yıllardır endüstride kabul görmüş bir uygulama olmasına karşın özellikle kromik asitin (**Krom-VI-oksit;Cr^{+6}**) toksik özelliklerinden dolayı çevreci bir proses olmadığı bilinmektedir. Bu sebepten bazı ülkelerde uygulamaları yasaklanmıştır. Ancak özellikle 2000'li yıllardan itibaren geliştirilen Cr^{+3} oksik kullanımı (**trivalent chromium coating**) , tekniği daha çevreci hale getirmiş ve uygulama alanlarını da arttırmıştır. [17]

Krom kaplama için çok ve çeşitli banyo terkipleri vardır. Ticari uygulamalarda kullanılan en uygun banyo terkipleri ise çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2 : Endüstride kullanılan krom kaplama ideal banyo terkibi [19]

	Eksi (Klasik) Method	**İdeal Krom Banyo Terkibi**
Kromik asit	280 - 320 gr/lt (Cr^{+6})	280 - 320 gr/lt (Cr^{+3})
Sülfürik asit	2,8 - 3,0 gr/lt	1,4 - 1,6 gr/lt
H_2SO_4 / Cr_2O_3	1/100	%0,5
Katalist-KS	yok	%3
Sıcaklık	32 - 42 ^{0}C	32 - 42 ^{0}C
Akım yoğunluğu	8 - 10 A/dm^2	10 - 20 A/dm^2
Faydalanılabilen akın oranı	%7 - 10	%27 - 28

Katalist-KS (toz); florür ihtiva eden, faydalanılabilen akım verimini ve kaplama hızını % 50-60 artıran üçlü bir komponenttir. Kaplama hızı dakikada 1-1,2 mikrondur. Kullanım oranı ilk hazırlama ve takviyelerde kromik asidin %3'ü oranındadır. Katalist-KS gerek kaplama yapılacak banyonun yeni kuruluşunda, gerekse takviyelerde; katılacak kromik asidin % 3' ü oranında olmalıdır.

Krom kaplamada anot ve katotta oluşan kimyasal reaksiyonlar;

- Anotta iki reaksiyon (tepkime) oluşur

$$4OH + 2\,é \rightarrow O_{2(gaz)} + H_2O \qquad \textbf{(3.1)}$$

$$Cr^{+3} + 4\,H_2O - 5\,é \rightarrow H_2CrO_4 + 6\,H^+ \qquad \textbf{(3.2)}$$

Birinci reaksiyonda O_2 gazı çıkar. İkinci reaksiyonda (+3) değerlikli krom tuzundan H_2CrO_4 (**kromik asit**) meydana gelir.

- Katotta ise üç reaksiyon oluşur :

H+ iyonu elektron (é) alır ve gaz haline geçer;

$$2\,H^+ + 2\,é \rightarrow H_2\,(gaz) \qquad \textbf{(3.3)}$$

Kromik asitten metalik krom ayrışır;

$$H_2CrO_4 + 6\,H^+ + 6\,é \rightarrow Cr\,° + 4\,H_2O \qquad \textbf{(3.4)}$$

(+3) değerlikli krom tuzu redüklenir.

$$H_2CrO_4 + 6\,H^+ + 3\,é \rightarrow Cr^{+3} + 4\,H_2O \qquad \textbf{(3.5)}$$

3.2.1 Alüminyum üzeri zinkatlama

Alüminyum alaşımlarını direkt olarak başka bir metalle kaplamak oldukça zordur. Yüzeyinde var olan oksit tabakasından dolayı kaplanacak metalin kolayca yapışamaması, proses solüsyonu ile reaksiyon vermesi, alaşım bileşenlerine bağlı olarak farklı elektrokimyasal özellik göstermeleri gibi sebepler kaplamayı güçleştiren sebeplerdir. Bu yüzden alüminyumun kaplama öncesindeki en önemli önişlemi **zinkatlama prosesidir**. Bu yöntem ile doğal oksit tabakası uzaklaşır ve alüminyumun yüzeyi aktiflenir. Yüzeyde ince bir iletken ara tabaka akımsız olarak birikir. Bu da yüzeyin kaplama banyolarına girene kadar tekrar okside olmasını engeller ve ayrıca iyi bir yapışma olmasını da sağlar. Silisyum oranı % 1-2 olan alüminyum alaşımları için sık kullanılmakta olan bir işlemdir [20]

Prosesin genel akışı;

1. Yağ Alma: Düşük alkalinitede sıvı daldırma temizleme, pH: 7-10, 50-60˚C, 3-15 dk, polisaj atıklarını temizler.
2. Aşındırma: Yüzeydeki oksidi uzaklaştırmak için yüksek alkali çözelti, pH>13, 50-60˚C, 0,5-5 dk.
3. Oluşan pas tabakasının alınması: 2. adımda oluşan kalıntının asidik bir çözelti ile alınması, 15-30˚C, 1-5 dk. Genellikle 20-40% nitrik asit kullanılmaktadır.
4. Zinkatlama: Oda sıcaklığında, 0,5-5 dk, karıştırma verilerek çalışılmalıdır. Zor alüminyum alaşımlarında veya yüksek kalite talepleri doğrultusunda zinkatlama işlemi iki defa üst üste uygulanabilmektedir. Bu işlemin yapılabilmesi için ilk zinkat tabakası nitrik asit banyosunda uzaklaştırılır ve sonra tekrar zinkat çözeltisine daldırılır. İkinci zinkat tabakası çok daha iyi bir yapışma sağlayacaktır. [20]

Prosesin son adımı olan zinkatlama işlemi için gerekli zinkatlama çözeltisi; sodyum hidroksit, çinko oksit, kompleksleme ajanı, metal tuzları (demir, nikel, bakır gibi)'ndan oluşur. Alüminyum parçaların oldukça yüksek alkalinitedeki zinkat çözeltisine daldırılması ile akım akışı olmaksızın yüzeyde şeffaf bir zinkat tabakası oluşur. Zinkat işleminden sonraki durulamada pH 7-11 arasında tutulmalıdır. Çünkü daha düşük veya yüksek alkalinitedeki durulama banyosu değerleri alüminyuma atak yapabilmektedir. Ayrıca yüzeyde oluşabilecek kalsiyum hidroksit tabakasını önlemek için deiyonize su kullanılması önerilmektedir. Bu ön kaplama işlemi sonra malzeme nikel, bakır ya da krom kaplanabilecektir. [20]

3.3 Plazma Sprey Kaplama

Metaller üzerine yapılan kaplamalar, kaplama ile metal arasında bir **difüzyon bağı oluşturarak** ve **bir difüzyon bağı oluşturmaksızın** kaplama ile altlık arasında mekanik bir yapışma şeklinde iki türlü yapılır. Difüzyonlu kaplamalarda altlık ile kaplama arasındaki bağın özellikleri malzeme bileşimiyle doğrudan ilişkilidir. Plazma sprey yöntemi gibi difüzyonsuz kaplamalarda ise altlık ve kaplama arasındaki mekanik yapışma tamamen kaplama prosesi şartlarına bağlıdır. [21]

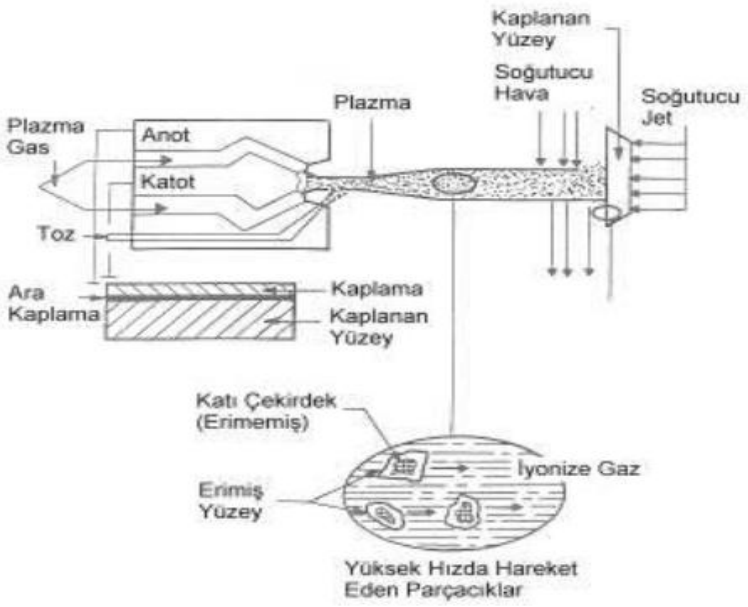
Plazma sprey kaplamalarda bağlanma mukavemetini arttırmak için kaplama öncesi altlık yüzeyinin pürüzlendirilmesi zorunludur. Kaplama uygulanacak yüzeye ergitilmiş partiküller hızla püskürtülür ve yüzeye çarpan partiküller hızla soğuyarak katılaşır. Altlık yüzeyindeki partiküller, ergimiş partiküllerin katılaşması sırasında gerilmelerin yoğunluk kazandığı bölgelerdir. Bu bölgesel gerilme noktaları yüzeye çarpan partiküllerin yüzeye tutunmasını sağlar. Plazma sprey kaplamaların yapısı yüzeye paralel tabakalar şeklindedir. Yüzeye dik bağlama kuvvetini artırmak için altlık yüzeyi pürüzlendirilir. Böylece kaplama işlemi sonucu yüzeye tamamen paralel tabakalar yerine dalgalı tabakalar oluşturulur. [21]

Bu yöntem; etkili bir yüzey mühendislik tekniği olup, malzeme yüzeyine termal şok direnci, yüksek sertlik ve aşınma direnci kazandırması sebebi ile başta havacılık endüstrisinde olmak üzere pek çok alanda yaygın şekilde kullanılan bir tekniktir. Proses, iyonize olmuş bir gaz içinde ergimiş olan toz malzemenin kaplanacak yüzeye çok hızlı bir şekilde püskürtülmesi şeklinde uygulanmaktadır. Alternatif yöntemlerdeki gibi çeşitli kimyasal hesaplamalara ve formulasyonlara gerek olmaksızın tamamen girdi-çıktı ilişkisi ile kontrol edilebilen bir prosestir. [22]

Endüstriyel uygulamalarda plazma sprey işleminin gerçekleştirildiği sistemlerde yöntemin başlıca bileşenleri;

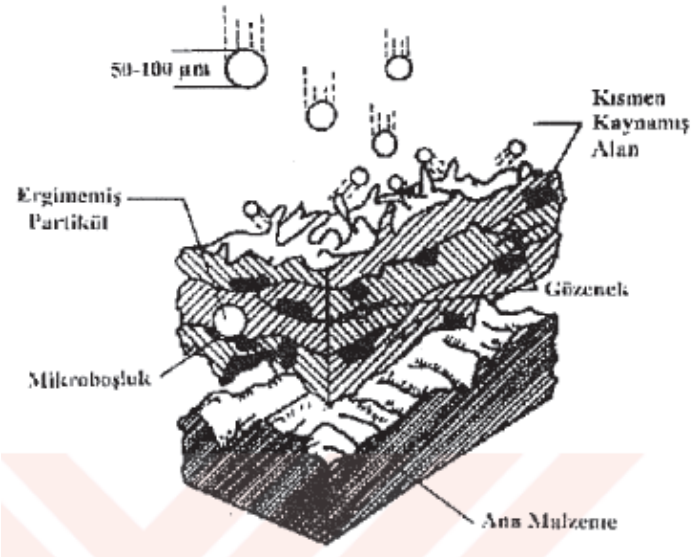
- Güç ünitesi
- Gaz ünitesi (Ar, N_2, He veya H_2)
- Toz besleme ünitesi
- Soğutma sistemi
- Püskürtme tabancası
- Kontrol ünitesidir.

Bu ana bileşenler, kaplama yönteminin özelliklerine etki eden ana parametrelerdir. Özellikle soğutma sistemi prosesin uygulanabilirliğinde önemli pay sahibidir. Kaplanacak yüzeyler yeterli derecede soğutulmak şartıyla her türlü malzeme üzerine plazma sprey kaplama uygulanabilir. Örneğin iyi bir soğutma ile kağıt üzerine alümina bile kaplanabilir. [23] Şekil 3.3'te plazma sprey kaplama yöntemi; şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.3 : Plazma sprey kaplama yönteminin şematik görüntüsü [24]

Plazma alevinde eriyerek iyonize gaz haline geçen partiküller, sıvı damlacıklar halinde ana malzeme yüzeyine çarptığı anda katılaşarak lamelli bir kaplama tabakası meydana getirirler. Katı hale geçme hızı 10^6 ^{0}C/sn şeklinde hızlı bir şekilde gerçekleşir ve soğuma hızına bağlı olarak kristalin veya amorf yapılarda katılaşma olur. Kaplamaların yapısı heterojen olup, yarı kararlıdır ve genellikle birbirlerine yapışmış halde bulunan farklı boyutlu tanelerden meydana gelir. Erimiş partiküllerin oluşturduğu kaplamalar , tabakalı bir yapıyla karakterize edilir. [23]



Şekil 3.4 : Tipik bir plazma sprey kaplamaya ait mikroyapının şematik olarak gösterilişi [23]

Şekil 3.4'te gösterildiği gibi, bir kaplama tabakasında proses şartlarınabağlı olarak ergimemiş partiküller, inklüzyonlar, mikro boşluklar, oksitler ve porözite bulunabilir. Plazma sprey kaplamalarda; kullanılan kaplama tozuna bağlı olarak 200 – 1500 HV sertlik değerleri elde edilebilir. Kaplama tabakalarının sertliği; porözite, tabakanın heterojen yapısı ve uygulanan yük değeri ile farklılık arz eder.

3.4 Kataforez Kaplama

Kataforez kaplama (KTL) prosesi; malzemenin bir boya banyosuna daldırılarak ve bu banyodan bir elektrik akımı geçirilerek yüzeyde mikron mertebesinde bir kaplamanın meydana getirildiği, elektrokimya prensiplerine göre çalışan bir kaplama yöntemidir. [25]

Kataforez boya sisteminin diğer boya sistemlerine göre üstünlükleri;

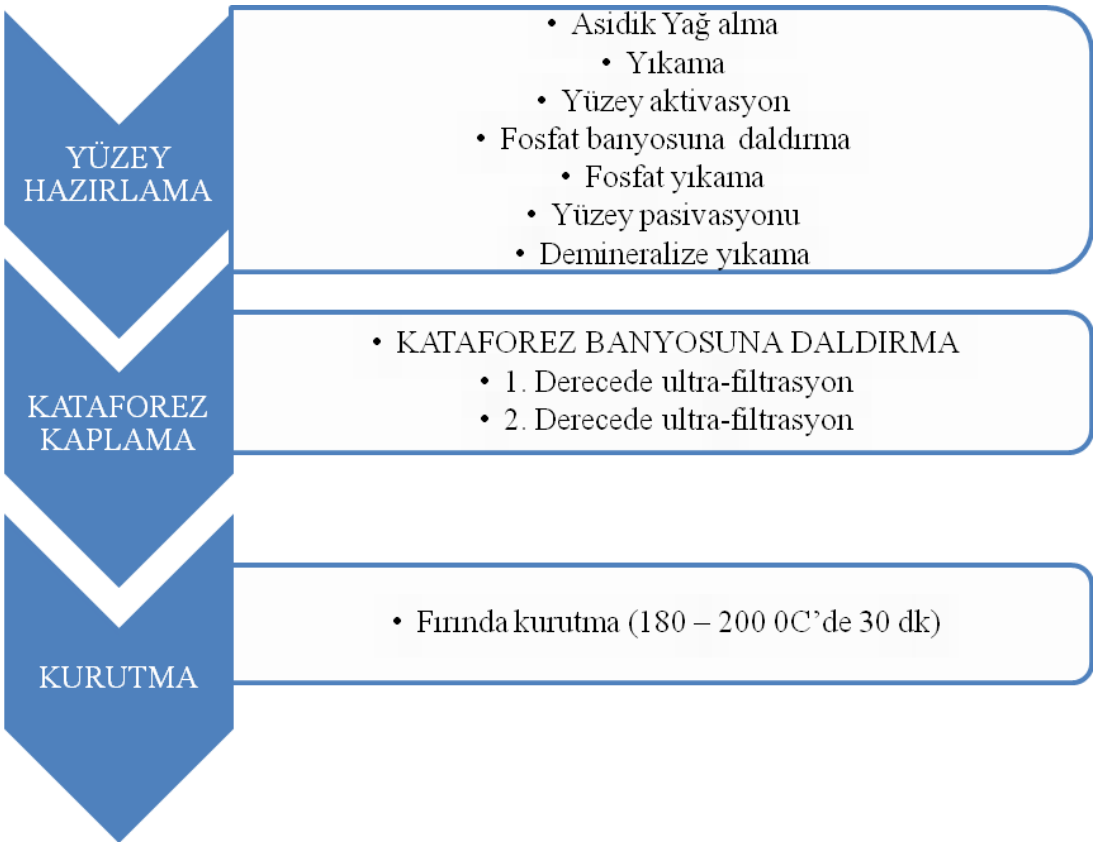
- Tüm yüzey üzerinde boya kalınlığının eşit olması
- Malzemenin iç kısımları, kenar ve köşelerinin kaplanabilmesi
- Sistemin su bazlı oluşunun çevre kirliliğini asgariye indirmesi
- Korozyon direncinin en yüksek seviyede olması (toz boya uygulamalarına kıyasla)

şeklinde sıralanabilir. [26]

Kaplanacak parçalar, bir ön yüzey hazırlamanın ardından KTL banyosuna daldırma ve fırında kurutma işleminden geçirilerek bitmiş ürün haline gelmektedirler. Proses sonucu elde edilen bir parçanın görüntüsü ve genel iş akış şeması şekil 3.5'deki gibidir.

Yüzeyde oluşan ince boya tabakası; kaplanacak malzemeye göre değişmekte olup genellikle 12 – 18 mikron arasında değişebilmektedir. Kaplama sırasında elde edilen homojen ve ince tabaka sayesinde, ölçüsel hassasiyetin yüksek olduğu tasarımlarda, parça boyutsal olarak tolerans dışına çıkmadan kaplanabilir.

Özellikle otomotiv sektörüne hizmet veren metalik sac ve plakalar başta olmak üzere, galvaniz çelik saclar, çinko, bakır alaşımları, alüminyum ekstrüzyon ve hadde profilleri, alüminyum döküm parçaları gibi pek çok malzemeye uygulabilen özel bir prosestir. Karmaşık şekilli, elektrostatik toz boyaya müsait olmayan tasarımlara sahip, boyutsal hassasiyetinin önemli olduğu parçalarda rahatça uygulanabilir.



Şekil 3.5 : Kataforez kaplama genel iş akış şeması [25]

KTL kaplama prosesi; endüstriyel uygulamalarda sık kullanılmasına karşın, getirdiği yüksek yatırım maliyeti ve enerji tüketimi ile yatırımcılar tarafından ikinci planda kalan bir kaplama iş kolu halindedir. Kataforez banyosu ve tesisin ilk kurulumu oldukça maliyetlidir. Ayrıca kataforez banyosu aktif olduğu andan itibaren kesinlikle kapatılamaz. Banyonun 24 saat boyunca açık olması gerekmektedir. Tesis, kaplama yapmasa bile hattın 24 saat boyunca aktif olması, enerji ve çalışan maliyetini de arttırmaktadır. Ayrıca KTL banyosu endüstriyel uygulamalarda tek renk hizmeti sunabilmektedir. Yaygın olarak kullanılan boya rengi epoxy polyster siyah boyadır. Alternatif bir boya rengi için tamamen farklı bir banyo hattında o renge ait bir kaplama banyosu kurulması gerekmektedir.

3.5 Elektrostatik Toz Boya

Elektrostatik boyama, farklı elektrikle yüklenmiş cisimlerin birbirini çekmesi prensibine dayanır. Alüminyum alaşımlarının korozyon dayanımı, elektrostatik toz boya tekniği ile geliştirilebilmektedir. Bu sayede hem görselliğin ön planda olduğu kozmetik uygulamalarda, hem de korozyon direncinin gerekli olduğu nemli ortamlarda; elektrostatik toz boya uygulaması kullanılabilmektedir. [27]

Yöntem oldukça çevre dostu bir prosestir ve yüksek kalınlıkta , homojen bir kaplama yapılmasına imkan verir. Elektrostatik toz boya tekniğinin en büyük avantajı, yüzeye yapılacak kaplamanın neredeyse sonsuz denebilecek bir renk seçeneğiniyle, müşterinin isteklerine sunulabilmesidir. [27]

Toz boya teknolojinin diğer avantajları ise;

- Enerji tasarrufunun yüksekliği
- Yüksek üretim verimliliği
- Çevre dostu olması
- İşçi ve iş sağlığı açısından güvenli
- Tesis yatırım maliyeti düşük
- Metalik olmayan yüzeylerin de boyanabilmesi

şeklinde sıralanabilir. Öte yandan en büyük dezavantajı, ince film elde etmenin zor olmasıdır. Toz boyalı bir yüzeyde oluşan kaplamanın kalınlığı minimum 40-50 mikron civarında olup 300µm'ye kadar çıkabilir. Ayrıca toz boyalar, değişik renkler elde etmek adına karıştırılamazlar [28]

3.5.1 Elektrostatik toz boya uygulama yöntemleri

3.5.1.1 Akışkan yatak

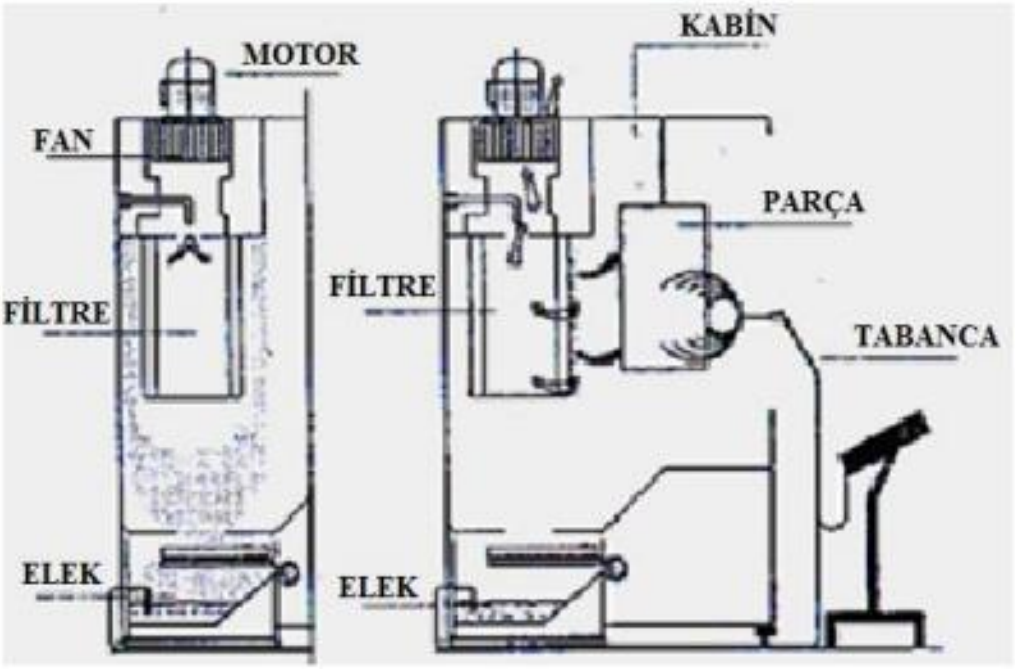
Akışkan yatak ilk olarak termoplastik toz boyaların uygulanması için geliştirilmiş, ve hala bu tür toz boyaların uygulanmasında en çok kullanılan yöntemdir. Termoset toz boyalarda ise kullanımı özellikle tek bir uygulamada çok kalın (250-300µ) bir film istenen durumlarla sınırlıdır. Bu tür parçalara örnek olarak su ve gaz boru hatlarında kullanılan vanalar gibi sağlam, uzun ömürlü ve yüksek korozyon dayanımlı bir kaplama gerektiren parçalar verilebilir.

Akışkan yatak esas olarak dibinde bulunan esnek, büyük delikli bir elekten kontrollu olarak hava üflenen bir toz boya kazanından ibarettir. Bu hava toz boyayı akışkanlaştırıp, ona sıvı gibi bir hal kazandırarak içine daldırılan parçaya direnç göstermemesini ve düzgün bir boya film kalınlığı elde edilmesini sağlar. Boyanacak parça kazana daldırılmadan önce, toz boyanın erime sıcaklığına kadar ısıtılır. Parça üzerindeki boya film kalınlığı daldırma süresi ve parçanın ön ısıtma sıcaklığı ile kontrol edilir. [29]

3.5.1.2 Püskürtme yöntemi

Bu boyama sistemi solvent kullanılmadan yapılan bir uygulamadır. Boya deposundan emilen toz boya, hortumdan tabancaya taşınır. Elektrostatik püskürtme ekipmanları (tabanca, nozzle), toz taneciklerini (negatif) yükler. Bu tanecikler pozitif (+) topraklanmış olan parçayı sarar. Daha sonra fırınlama (120-200°C) pişme safhasına geçilir. Bu safhada, fırın ısısı toz boyanın erimesini ve malzeme üzerine yapışmasını sağlar. Sonuçta çok dayanıklı, ekonomik ve parlak bir yüzey boyaması yapılmış olur.

Toz boyamada fazla atılan boya geri dönüşüm sistemi ile yeniden kullanılır. Bu nedenden ötürü toz boya kullanım verimi %100'e yakındır. Şekil 3.6'da püskürtme yöntemiyle yapılan toz boyanın çalışma prensibi verilmiştir. [29]



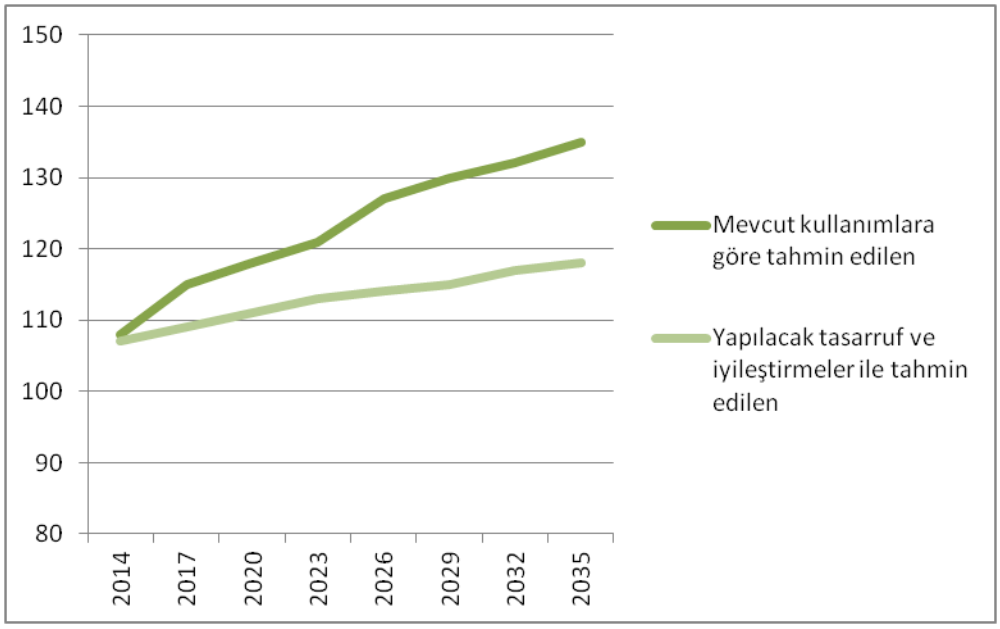
Şekil 3.6 : Püskürtme yöntemiyle elektrostatik toz boyanın uygulamasının şematik gösterimi [29]

Toz boyada boya partikülleri genel olarak 2 şekilde parçaya yüklenir. Bunlar **Corona** (iyonlaşma) ve **Tribo** (elektro-kinetik) metotlarıdır. Corona yönteminde yükleme; tabancanın içerisindeki kaskattan namlu ucundaki iğneye yüksek voltajın, havanın nötral durumunu bozarak, oluşturduğu eksi iyonların toz partiküllerine tutunması ile yüklenir. Tribo yönteminde ise yükleme; hareketli toz tanelerinin tabancanın özel yapılmış yükleme yollarına sürtünmesi ile yüklenir. [29]

4. MİKRO ARK OKSİDASYON PROSESİ

4.1 Enerji ve Geleceğe Yönelik Tahminler

Günümüz endüstrisinin ve geleceğin merkezinde "enerji" kavramı yer alır. Enerji kavramı; günden güne tüm global ekonomilerin endeksli olduğu bir güç haline gelmektedir. Geleceğin dünyasını şekillendirecek haberleşme, ulaşım, sağlık vb. alanlarda meydana gelebilecek devrimler ve gelişmelerin merkezinde yine enerji yatmaktadır. Çizelge 4.1'de; dünya enerji fiyatlarının geleceğe yönelik olarak yüzde bazında fiyat artışlarına dair tahminler verilmiştir.[30]



Şekil 4.1 : Dünya'da enerji fiyatlarının 2035 yılına kadar tahmini artışı (rakamlar % bazında artışları göstermektedir) [30]

Alınabilecek önlemlerin ve yapılacak tasarrufların dahi enerji fiyatlarının artışına engel olamayacağı ancak azaltabileceği yönünde tahminler kuvvetlidir. Hal bu iken; enerjinin yoğun şekilde ihtiyaç duyulduğu otomotiv, havacılık, sağlık gibi sektörlerde alternatif çözümler üretilmesi, bu sayede maliyet kalemlerinin azaltılması çok büyük bir önem arz etmektedir.

4.2 Mikro Ark Oksidasyon'un Gelişimi

Dünya ekomisinde önemli bir paya sahip olan otomotiv sektöründe; enerji projeksiyonu göz önünde bulundurularak; kullanılan malzemelerde, hafiflik, sağlamlık, uzun servis ömrü, korozyon direnci gibi beklentiler her geçen gün daha da artmaktadır. Bu sebepten çelik ve alaşımları, yerini giderek alüminyum, magnezyum gibi hafif metal malzemelere bırakmaktadırlar. Ancak bahsi geçen hafif malzemelerin doğal koşullarında korozyon ve mekanik dayanımları nispeten düşüktür. [31]

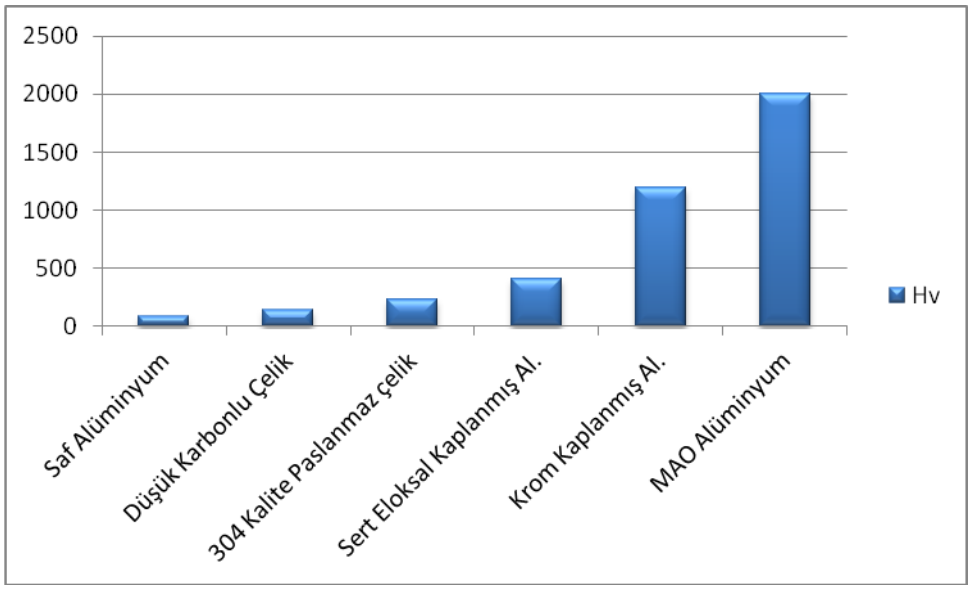
Endüstrideki bu gelişmelere bağlı olarak, anodik oksitleme prensibine dayanan Mikro Ark Oksidasyon (MAO) yöntemi; yeni bir yüzey kaplama işlemi olarak son 10 yıl içerisinde çok yaygın bir şekilde araştırma ve uygulama alanı bulmuştur. Çevre dostu bir kaplama yöntemi olan MAO; çok farklı mekanik ve fiziksel yapıya sahip kaplamaların özellikle Al, Mg, Ti gibi malzemeler ve bunların alaşımlarının yüzeylerinde oluşturulmasına imkan tanımaktadır. Yöntem; Dünya'da farklı isimlerler de bilinmektedir;

- ABD ve Japonya'da; ASD; Anodic spark deposition
- Almanya'da; ANOF; Anodishe oxidation an funkenanladung
- Rusya'da; PEO; Plasma electrolytic oxidation
- Ayrıca literatürde; Arc discharge oxidizing, Spark anodizing, Micro plasmic process

bu isimler arasındadır [23,32]

Valf metaller olarak bilinen Al, Mg, Ti, Zr vb. ve alaşımlarının yüzeylerindeki kararlı oksit filmin dielektrik bariyer tabakası olarak direnç yaratması ve bu sayede anotlamaya imkan tanıması bu malzemeleri; MAO prosesine uygun hale getirmektedir. Çelik ve benzeri malzemelerin mikro ark oksitleme ile kaplanamaması bu sebeptendir. [32].

Şekil 4.2'de saf alüminyumum çeşitli endüstriyel kaplamaları sonucu elde edilen sertlik değerleri, MAO uygulanmış alüminyum yüzeyin sertliği ile kıyaslanmıştır. Yüzey modifikasyonları sayesinde oluşturulan sert film tabakaları, çelik malzemelerden bile daha mukavemetlidir.



Şekil 4.2 : Yüzey işlemlerine bağlı olarak mühendislik malzemelerinin yüzey sertliklerinin değişimi [32]

4.3 MAO yönteminin esasları

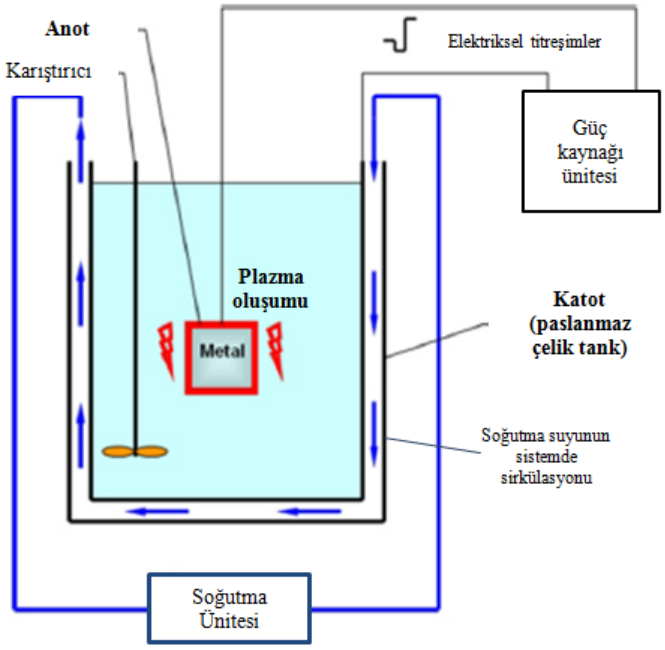
4.3.1 Gerekli donanımlar

MAO prosesi, elektrolitik bir hücre (güç kaynagı, elektrolit banyosu, anot, katot ve sogutma sistemi) kullanılarak gerçeklestirilen bir yüzey islemidir. Genellikle, bazik karakterli elektrolitlerin kullanıldıgı islemde, güç kaynagının pozitif kutbuna; yüzeyine koruyucu seramik tabakası kaplanacak olan iş parçası negatif kutbuna ise katot olarak kullanılacak malzeme (genellikle paslanmaz çelik) baglanır ve anot ile katot arasına voltaj ya da akım uygulanması sonucu numune yüzeyinde oksit olusumu baslar.

Kaplama için kullanılacak çözeltinin proses sırasında homojenliğini koruması adına karıştırıcı kullanılmalıdır. Metal yüzeyinde plazma oluşumu nedeniyle sulu çözeltideki sıcaklık artışını azaltmak için de sistemde soğutma suyu dolaştırılması gerekir.

Şekil 4.3'te MAO prosesi için gerekli donanımın şematik olarak bir örneği verilmiştir. [32,33].

Güç kaynağı ünitesi olarak farklı kaynaklar; ark oksidasyonuna uygundur. Bu kaynaklar; sağladıkları elektriksel rejime göre 3 grupta incelenmektedirler. [34]



Şekil 4.3 : MAO yöntemi için gerekli donanımın şematik görünümü [32]

4.3.1.1 DC (doğru akım) güç üniteleri

Doğru akımlı güç üniteleri; galvanostatik ve potansiyostatik rejimlerin uygulanmasını sağlar. DC güç kaynaklarının MAO proseslerinde kullanımı sınırlıdır. Bunun en temel sebebi kaplama yüzeyinin deşarj karakteristiğini ayarlamada ki zorluktur. Bu yüzden bu tip güç kaynakları ancak ince kaplamalar ve nispeten kaplanması basit parçalar için uygundur. [34]

4.3.1.2 Darbeli (titreşimli) doğru akım güç üniteleri

Darbeli akım kullanımı; prosesin kontrollü bir şekilde bölünerek, yüzeyde meydana gelen arkın yüzeyde kalma süresinin ayarlanmasına imkan verir. Buna ek olarak akımın darbe şekli değiştirilebilir. Bu sayede kaplamanın kontrolü, morfolojisi, komposizyonu ve banyo içerisindeki ısıl değişimler kontrol edilebilir. Titreşimli doğru akım üniteleri MAO proseslerinde özellikle gerekli voltaj değerinin 450V ve altında olduğu koşullarda geniş kullanım alanına sahiptirler. [34]

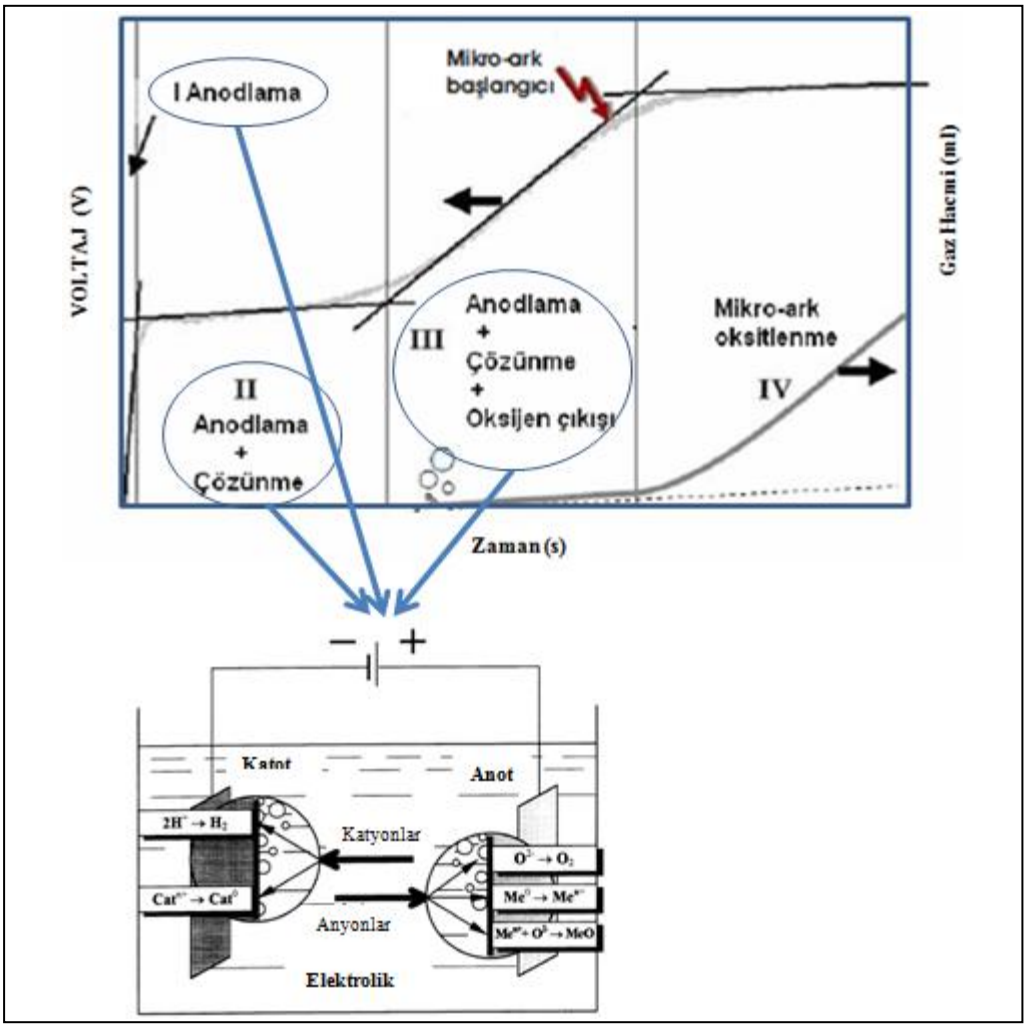
4.3.1.3 Titreşimli (pulsed) AC (alternatif akım) güç üniteleri

Elektrodun ilave polarizasyon etkisi; alternatif akımlı güç üniteleri kullanılarak önlenebilmektedir. Ayrıca bu güç kaynakları; farklı genliklere sahip pozitif ve negatif alternatif akım uygulayabilmesi ile kaplama miktarının kontrol edilebilmesine imkan verir. Ancak bu güç kaynaklarının maksimum 10kW'lık bir

güce sahip olması; endüstriyel alanlarda kullanımından çok laboratuvar ortamına uygun küçük ölçekli kaplamaların elde edilmesine imkan tanımaktadır. [34]

4.3.2 Kaplamanın oluşum mekanizması

MAO işlemi temel olarak 4 basamakta gerçekleşen bir prosestir ve bu adımlar sırasıyla şekil 4.4'te verilmiştir. [34]

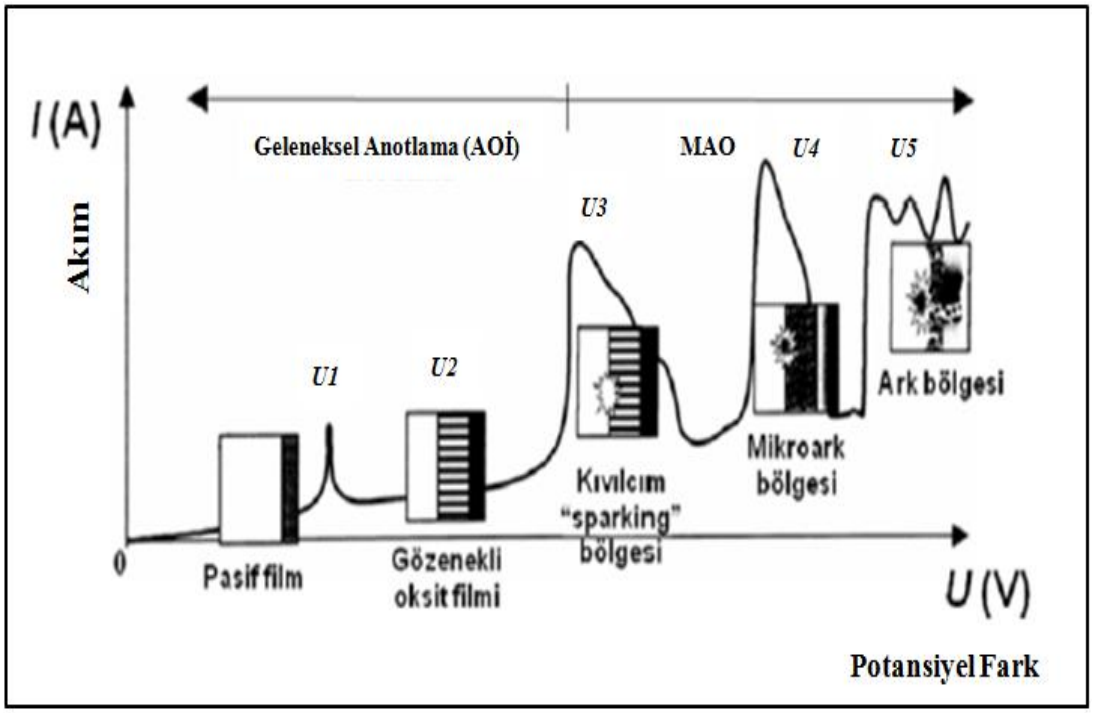


Şekil 4.4 : MAO yönteminin işlem adımları [32,34]

I,II ve III nolu işlem adımları temelde standart bir "elektroliz" olayını özetler niteliktedir. Sıvı solüsyondaki bu elektroliz olayı birkaç elektrot prosesiyle gerçeklesir. Gaz halinde oksijenin serbest kalması ve metal oksidasyonu anodik yüzeyde olusur. Elektrolitin kimyasal aktivitesine baglı olarak oksidasyon prosesi yüzeyde çözülmelere veya oksit film tabakası olusumuna neden olur. Gaz halinde hidrojenin serbest kalması ve/veya katyon redüksiyonu ise katodik yüzeyde olusmaktadır. Oksit filmi içerisindeki elektriksel desarjların kritik bir değeri aşması sonucu ise ark başlangıçı ve oksitlenme meydana gelir. [2,32,34]

4.3.2.1 Akım – voltaj ilişkisi

Şekil 4.5'te mikro ark oksidasyonu ile ilgili akım-voltaj ilişkisini anlatan bir diyagram görülmektedir.

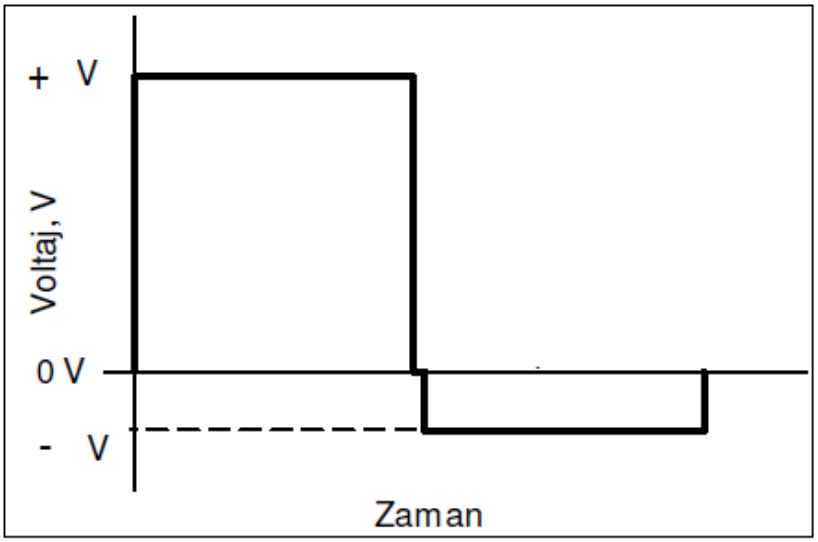


Şekil 4.5 : MAO yönteminde akım-voltaj ilişkisinin şematik görünümü [34]

Geleneksel bir anodik oksidasyon prosesinde; alüminyum, magnezyum ya da titanyum gibi yüzeylerinde pasif oksit film tabakası olan malzemeler, belirli bir akım ve voltaj altında "U_1" noktasına kadar ohm kuralına göre davranış gösterirler. Akım artışı, elektrot yüzeyinde olusan gaz reaksiyonu ürünlerinin (O_2 veya H_2) kısmi koruyucu etkisi ile sınırlıdır. [32,34]

U2 noktasında; akımın artmasıyla yüzeydeki mevcut pasif film tabakası çözünmeye başlar ve poröz bir film tabakası gelişir. [34]

U3 bölgesinde; MAO prosesine özgü "kare dalga" şeklinde uygulanan pozitif-negatif voltaj değerleri ile voltaj aplikasyonu sonucu oksit film içerisindeki elektrik alan kuvveti kritik değeri aşar ve film tabakası kırılır. Şekil 4.6'da pozitif-negatif voltaj uygulamasına dair örnek bir grafik görülmektedir.



Şekil 4.6 : Kare dalga seklinde pozitif ve negatif voltaj degerleri ile voltaj uygulama süresinin sematik gösterimi [33]

Kritik değerin aşılması sonucu film tabakası yüzeyinde hızlıca hareket eden parlak arklar (kıvılcımlar) gözlenir. Bu kıvılcımlar kırılan oksit film tabakasının büyümesine yardımcı olur.

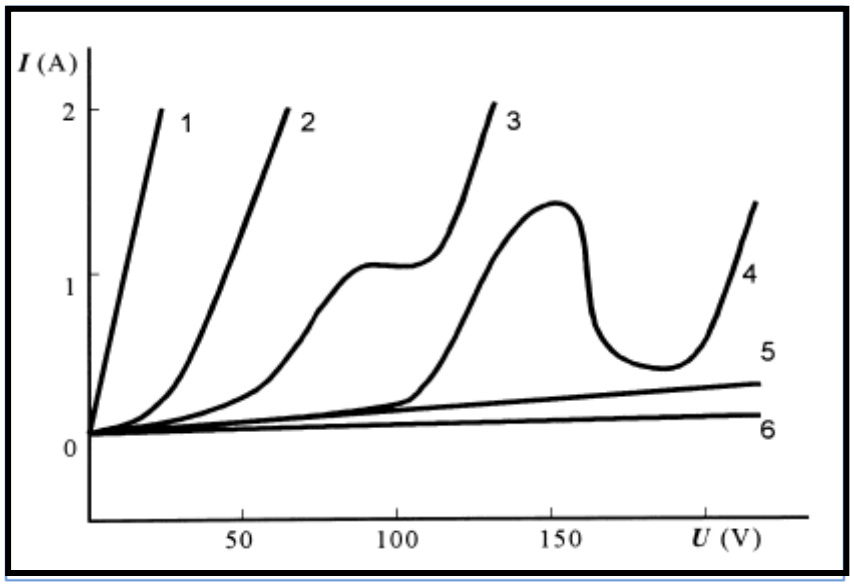
U4 noktasında darbe iyonlaşması ve sıcaklığında artmasıyla ısıl iyonizasyon meydana gelir. Bu sayede daha yavaş ve nispeten daha büyük kıvılcım deşarjları ortaya çıkar [34]

U5 bölgesinde ise mikro kıvılcımların gücü artarak metalik yüzeye doğru difuze olurlar ve bu noktada mikro ark boşalmaları olur. Bu güçlü deşarj hali kaplamada çatlaklara ve hasarlara sebep olabilir. [34]

Literatürde alüminyumun mikro ark oksidasyonu ile ilgili pek çok bilimsel çalışma vardır. Tian ve arkadaşlarının yürüttüğü bir çalışmada 2024 kalite alüminyum dövme (hadde) alaşımına MAO yöntemi ile seramik oksit tabakası oluşturulmuştur. Proses sırasında MAO yönteminin işlem adımlarına göre kritik voltaj değeri aşıldığında oksit tabakasının gözeneklerinde mikro kırılmalar ve ark boşalmaları meydana gelmiştir. Yüzeyde oluşan plazma bölgesinde sıcaklığın 2000 ^{0}C'ye kadar yükseldiği görülmüştür. Kaplama sistemi soğutma kontrollü olduğundan banyo içerisinde kaplamanın dış yüzeyi daha çabuk soğurken metalin hemen üzeri olan iç kısımlarda soğuma daha yavaş gerçekleşmiştir. Kaplama incelendiğinde, proses sırasında çabuk soğuyan bölgelerde γ -Al_2O_3 oranı yüksek iken daha yavaş soğuyan iç bölgelerde ise α-Al_2O_3 miktarı yüksektir. [35]

4.3.3 Alüminyum'un MAO prosesinde kullanılan elektrolitler

Mikro ark oksidasyon yönteminde kullanılacak metal-elektrolit çifti dikkatli şekilde seçilmelidir. Prosesin uygulanabilirliği için en önemli şartlardan biri budur. Şekil 4.7'de alüminyum alaşımlarının yüzeylerinde oksit kaplamak için kullanılan elektrolitler gruplanmış ve gerekli akım-voltaj ilişkileri kıyaslanmıştır [32,34]



Şekil 4.7 : Alüminyumun MAO işlemi için kullanılan çeşitli elektrolitler ve bunların akım yoğunluğuna bağlı olarak karakteristikleri [34]

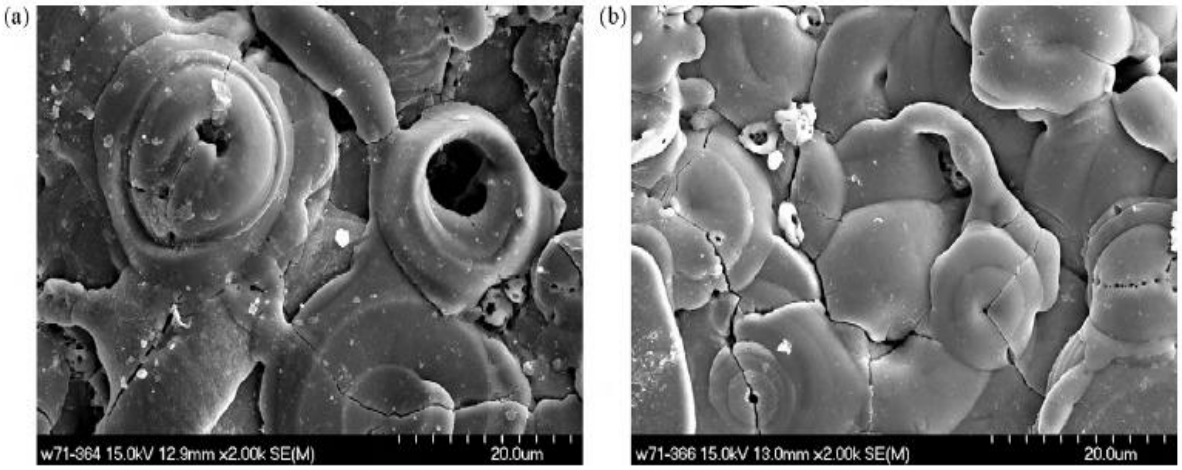
Buna göre bu 6 gruba ait elektrolitlerin karakteristiği ve gruplara ait örnekler, çizelge 4.1'de kategorize edilmiştir.

Çizelge 4.1 : Alüminyumun mikro ark oksidasyonunda kullanılan elektrolitlerin yapısı ve örnekleri [34]

Elektrolit	Karakteristiği	Örnekler
1	Hızlı çözünme sağlayan tuz çözeltileri	NaCl, NaClO3, NaOH, HCl, NaNO3
2	Yavaş çözünme sağlayan tuz çözeltileri	H2SO4, (NH4)2S2O8, Na2SO4
3	Dar voltaj aralığında metal pasifleşmesini sağlayanlar	Sodyum asetat, fosforik asit
4	Kompleks karakteristikli florürler	KF, NaF
5	Metalin zayıf şekilde pasifize eden elektrolitler	
6	Metalin güçlü şekilde pasifleşmesini sağlayan elektrolitler	Borik asit, fosforik asit, inorganiz polimerler (tunstat, alüminat,silikatlar), alkali metal fostaflar

Şekil 4.7’de ki örnek elektrolitik karakterler ışığında MAO prosesine en uygun ve avantajlı olanlar 4 ve 6 grubuna ait elektrolitlerdir. Özellikle 4 grubuna ait potasyum florür ve sodyum florür elektrolitleri; şekil 4.5’ teki mikro kıvılcım oluşum diyagrımını temsil eden ve benzer bir eğriye sahip olan elektrolitler olarak göze çarpmaktadır. [34]

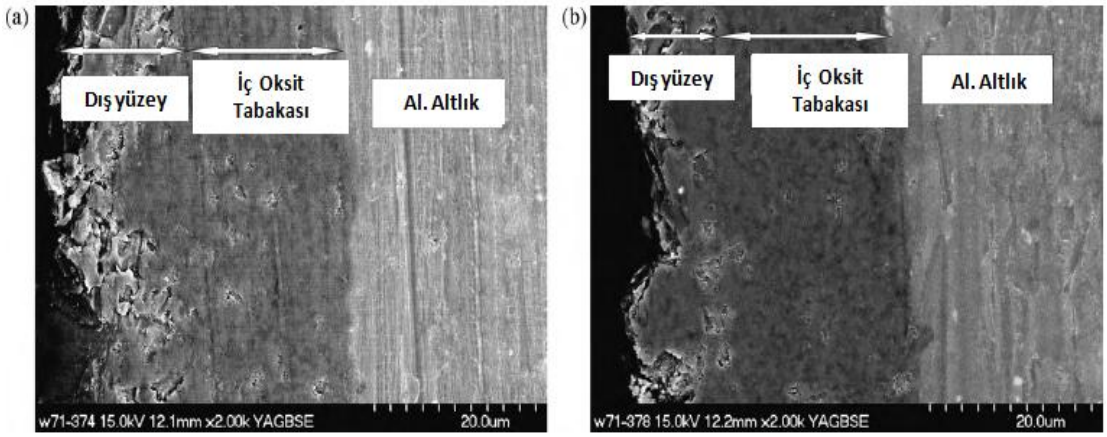
Florür; mikro ark oksidasyonunda; kaplamanın yapısı ve özellikleri üzerinde etkin bir rol oynar. Wang ve arkadaşlarının yürüttüğü bir çalışmada, 2024 kalite alüminyum dövme alaşımının MAO prosesi sırasında çözeltiye 2g/l NaF katarak ve başka bir çözeltide ise NaF katkısı olmadan kaplama prosedürüne başlanmıştır. NaF katkılı ve NaF katkısız çözeltilerde kaplanan numunelerin yüzey morfolojileri ve kesit görüntüleri karşılaştırıldığında; florürün olumlu etkilerin görülmektedir. [36]. Şekil 4.8’de yüzey SEM fotoğrafları sayesinde kaplamaların yüzey morfolojileri karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.8 : 2024 kalite alüminyumun MAO sonucu yüzey mikroyapısının SEM görüntüsü; a) NaF katkısız, b) NaF katkılı[36]

Florür katkısız çözeltide MAO kaplanan numunenin yüzey morfolojisi incelendiğinde mikro deşarjlardan kaynaklı çatlaklar görülmektedir. Bu durum aynı zamanda kaplamanın pürüzlülük değerlerini de arttırmaktadır. Ayrıca kaplama daha çok küçük adacıklar şeklinde dağılmış poröz seramik oksit tabaksına sahiptir. Öte yandan florür katkılı yapı, daha homojen, pürüzlülük ve porözite miktarı düşük bir yapıya sahiptir. [36]

NaF katkısı olmadan elde edilen kaplamanın yüzeyindeki mikro çatlaklar, Şekil 4.9’daki kesit SEM fotoğraflarında da açıkça görülmektedir.



Şekil 4.9 : MAO kaplı 2024 alüminyum altlığa ait kesit SEM görüntüsü; a) NaF katkısız, b) NaF katkılı[36]

Mikroyapılara ait kesit görüntüleri incelendiğinde, her iki kaplamanın da benzer kalınlıklara sahip olduğu söylenebilir. Ancak NaF katkısında üretilmiş olan seramik kaplamanın daha kompak, yüzeydeki oksit tabakalarının daha az mikro çatlaklar içerdiği görülmektedir.[36]

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1 Deneylerde Kullanılan Alüminyum Alaşımları

Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere seçilen alüminyum alaşımları ve kompozisyonları; çizelge 5.1'de verilmiştir. Döküm ve dövme alaşımlarının kendi aralarında da kıyaslanabilmesi ve incelenebilmesi adına numunelerin biri alüminyum döküm diğeri de alüminyum dövme alaşımı olarak seçilmiştir.

Çizelge 5.1: Çalışmada kullanılan Alüminyum alaşımları

Alüminyum Alaşımı	**Tanımı**	**Kompozisyon**					Çalışmada Kullanılan Kısaltmalar
		Fe	Si	Cu	Mn	Mg	
Döküm	EN AC **Al Si**9 **Cu**3(Fe)	1,30 max	**8,0-11,0**	**2,00-4,00**	0,55 max	0,05-0,55	**AlSiCu**
Hadde(dövme)	**AlMg**3(5754)	0,4	0,4	0,1	0,5	**2,6-3,6**	**AlMg**

Döküm alaşımı için seçilen, ana alaşım elementi olarak %9 Si ve %2-4 Cu içeren AlSi9Cu3(Fe) alaşımı, özellikle alüminyum enjeksiyon döküm uygulamalarında yaygın olarak kullanılan, dökülebilirliği iyi, nispeten düşük Si içeriği ile de işlenebilirliği kolay bir döküm alaşımıdır. Çalışmada kullanılan bu alaşım; Arslan Makine Döküm San. Ve Tic. Ltd. Şti tarafından dökülen, "Gehause NO1" isimli; bir metal enjeksiyon döküm parçası olup, orijinal boyutları 10x25x20mm sahiptir ve laboratuar ortamında kesilerek çalışmada kullanılan numune boyutlarına getirilmiştir.

Dövme alaşımı ise 5754 kalite alüminyum hadde alaşımından üretilen plakalardan kesilerek kaplama numuneleri haline getirilmiştir. Ana alaşım elementi olarak %3 civarı Mg içermektedir.

MAO ve anodik oksidasyon uygulamaları için kaplanacak numuneler; 2mmx10mmx20mm boyutlarına getirilip, yüzeyleri 1000 meş SiC zımpara ile zımparalanmıştır.

5.2 Anodik Oksidasyon İşlemleri

Çalışmada kullanılan anodik oksidasyon numuneleri, İstanbul Ümraniye'de faaliyet gösteren "Huglu Krom Kaplama San.Ltd.Şti" firmasında kaplanmışlardır. Tedarikçi firmada gerçekleştirilen anodik oksidasyonu (eloksal) için; voltaj kontrollü sistemde islem süresi degistirilerek farklı kaplama kalınlıklarında numuneler elde edilmiştir.

Alüminyum döküm alaşımları; yüksek silisyum içeriği ve bakır,demir gibi diğer alaşım elementlerine sahip olması sebebi ile ticari uygulamalarda anodik oksidasyonu zor olan malzemelerdir. Tedarikçi firmada

Kaplanacak alüminyum alaşımlarına göre farklı parametreler seçilmiş olmasına karşın, "ön temizleme" ve "kullanılan kaplama çözeltisi" aynıdır. Kaplanacak numuneler, çeşitli asidik yağ alma banyolarından geçerek durulanmış ve kaplamaya hazır hale getirilmiştir. Çözelti ise; 160-240g/L H_2SO_4 (sülfirik asit) , 20-30g/l Okzalik asit, 5-15 g/L Al^{+3} kullanılarak hazırlanmıştır.

Numuneler, tesisteki banyolarda özel olarak kaplanmamış olup, firma aktif haldeyken, banyolarda başka müşterilere ait döküm ve dövme alüminyum parçaları kaplandığı sırada, çalışmada kullanılan numuneler de kaplanmıştır.

Döküm ve dövme alaşımları için kullanılan kaplama parametreleri; çizelge 5.2'de verilmiş olup bölüm 5.4'te anlatılacaktır.

5.3 Mikroark Oksidasyon İşlemleri

Numunelerin mikro ark oksidasyonu için 30 kW kapasiteli güç kaynagına sahip bir mikro ark oksidasyon ünitesi kullanılmıstır. Mikro ark oksidasyon cihazında, pozitif-negatif voltaj, akım ve uygulanma süreleri degistirilebilmektedir. Şekil 5.1'de MAO kaplama sistemi ve MAO sırasında bir numuneye ait spark oluşumunun fotoğrafları birlikte verilmiştir.

Kaplanacak numuneler; istenilen boyutlara getirildikten sonra ultrasonik banyoda saf su ve aseton ile yıkanarak temizlenmis ve isleme hazır hale getirilmistir.

Mikro ark oksidasyonu çalışmaları için yapılan tüm kaplama denemelerinde aynı çözelti hazırlanıp kullanılmıştır. Çözeltiyi hazırlamak için; 15g/l $Na_2Al_2O_4$ (Sodyum

Alüminat Oksit) ve 2 g/l KOH (Potasyum Hidroksit); 2 litre saf suya katılarak 15 dakika boyunca karıştırılmıştır.



Şekil 5.1 : Mikro ark oksidasyon sistemi ve proses sırasında bir numune yüzeyinde oluşan kıvılcımların fotoğrafı

Çalışmada kullanılan MAO parametreleri çizelge 5.2'de verilmiş olup bölüm 5.4'te anlatılacaktır.

5.4 Anodik Oksidasyon ve MAO İşlem Parametreleri

Çalışmada kullanılan işlem parametreleri, anodik oksidasyon (eloksal) ve MAO için çizelge 5.2'de birlite verilmiştir.

Eloksal kaplama işleminde, tedarikçi firmanın kapladığı tüm numunelerde işlem voltaj kontrollü gerçekleşmiştir. Ancak talep edilen kaplama kalınlıkları doğrultusunda proses süreleri arttırılmış olup AlSiCu döküm ve AlMg dövme alaşımı istenilen oksit tabakası kalınlıkları elde edilmiştir.

Standart koşullarda (ticari uygulamalarda) firmanın alüminyum döküm alaşımları için sağladığı parametreler 30V sabit voltaj ve 50 dakika (3000sn) uygulama süresi , dövme alaşımları için ise 15V sabit voltaj ve 30 dakika (1800sn) uygulama süresidir.

Çalışmada standart ticari parametreler ile kaplanmış döküm ve dövme alaşımımları kullanılmış olup bunun yanında özel uygulama sürelerinde de kaplama yaptırılmıştır. Döküm alaşımının farklı kalınlıklardaki eloksal kaplama tabakasının aşınma davranışının tespiti amacıyla proses süresi 60 dakikaya çıkarıltılmış ve bu şekilde

10μm'yi aşkın bir eloksal tabakası elde edilebilmiştir. Dövme numuneleri için ise yine farklı kalınlıklarda aşınma davranışının incelenmesi adına, ticari uygulama süresi 30 dakika iken 25 dakikada biten proses ile farklı kaplama kalınlıklarında numuneler elde edilmiştir.

MAO yöntemi için ise voltaj ve akım kontrolünün kaplama morfolojilerine etkilerini incelemek adına, döküm ve dövme alaşımı numunelerinin bir bölümü voltaj kontrollü sistemde kaplanmış iken bir bölümü akım kontrollü olarak prosese sokulmuştur.

Çizelge 5.2: Çalışmada kullanılan MAO ve Eloksal parametreleri

Yöntem	**Malzeme**		**Voltaj(v) (+/-)**	**Akım (A) (+/-)**	**Süre (dk)**	**Numune Kodu**
Eloksal	**AlSiCu**	Voltaj kontrollü	30V sabit	serbest	50	E-AlSiCu-30-50 (ticari)
Eloksal	**AlMg**	Voltaj kontrollü	15V sabit	serbest	30	E-AlMg-15-30 (ticari)
Eloksal	**AlSiCu**	Voltaj kontrollü	30V sabit	Serbest	60	E-AlSiCu-30-60 (özel)
Eloksal	**AlMg**	Voltaj kontrollü	15V sabit	Serbest	25	E-AlMg-15-25 (özel)
MAO	**AlSiCu**	Voltaj kontrollü	400(+)/80(-)	serbest	5	M-AlSiCu-400-5
MAO	**AlSiCu**	Voltaj kontrollü	400(+)/80(-)	serbest	10	M-AlSiCu-400-10
MAO	**AlSiCu**	Voltaj kontrollü	440(+)/88(-)	serbest	5	M-AlSiCu-440-5
MAO	**AlSiCu**	Voltaj kontrollü	440(+)/88(-)	serbest	10	M-AlSiCu-440-10
MAO	**AlSiCu**	Voltaj kontrollü	480(+)/96(-)	serbest	5	M-AlSiCu-480-5
MAO	**AlSiCu**	Voltaj kontrollü	480(+)/96(-)	serbest	10	M-AlSiCu-480-10
MAO	**AlMg**	Voltaj kontrollü	400(+)/80(-)	serbest	5	M-AlMg-400-5
MAO	**AlMg**	Voltaj kontrollü	400(+)/80(-)	serbest	10	M-AlMg-400-10
MAO	**AlMg**	Voltaj kontrollü	440(+)/88(-)	serbest	5	M-AlMg-440-5
MAO	**AlMg**	Voltaj kontrollü	440(+)/88(-)	serbest	10	M-AlMg-440-10
MAO	**AlMg**	Voltaj kontrollü	480(+)/96(-)	serbest	5	M-AlMg-480-5
MAO	**AlMg**	Voltaj kontrollü	480(+)/96(-)	serbest	10	M-AlMg-480-10
MAO	**AlSiCu**	Akım kontrollü	Serbest	10/3	5	M-AlSiCu-10-5
MAO	**AlMg**	Akım kontrollü	Serbest	10/3	3	M-AlMg-10-3

Çalışmada kullanılan numuneler; çizelge 5.2'de gösterildiği gibi numune kodları ile tanımlanmıştır. Kodlamalar genel olarak, "kaplama türü – malzeme kodu – uygulanan voltaj – işlem süresi" şeklinde yapılmıştır.

Eloksal kaplama numuneleri için örnek bir kodlama şekli; E-AlSiCu-30-50;

- E; eloksal kapmalanın baş harfi
- AlSiCu; kaplanan alaşımın kısaltması
- 30; kaplama için uygulanan voltaj değer
- 50; işlem süresi(dk)

şeklindedir.

Mikroark oksidasyon numuneleri için ise; voltaj kontrollü numunelerde; pozitif(+) voltaj değeri , akım kontrollü numunelerde ise pozitif(+) akım değeri kullanılmıştır.

Voltaj kontrollü MAO numuneleri için örnek kodlama şekli; M-AlMg-440-10;

- M; mikroark oksidasyonun baş harfi
- AlMg; kaplanan alaşımın kısaltması
- 440; pozitif(+) voltaj değeri
- 10; işlem süresi(dk)

şeklindedir.

Akım kontrollü MAO numeneleri için örnek kodlama şekli; M-AlSiCu-10-5;

- M; mikroark oksidasyonun baş harfi
- AlSiCu; kaplanan alaşımın kısaltması
- 10; pozitif(+) akım değeri
- 5; işlem süresi(dk)

şeklindedir.

5.5 Karakterizasyon Çalışmaları

Mikro ark oksidasyon islemleri ve tedarikçide eloksal kaplama sonrasında numune yüzeylerinin karakterizasyonu, makro ve mikro yüzey incelemeleri, kesit incelemeleri, X ısınları analizi, yüzey pürüzlülügü ölçümleri, aşınma testleri ve 3 nokta eğme testleri yapılmıstır.

Mikro yüzey ve kesit incelemeleri, EDS donanımlı HITACHI TM-1000 marka taramalı electron mikroskobunda (SEM) yapılmıstır. X–ısını difraksiyonu (XRD) incelemeleri, GBC MMA 027 model X-ısınları cihazında 28.8 mA, 35 kV güç degerlerinde CuKα tüp kullanılarak, 10 – 90º arasında 0.02°’ lik artıslar ile taranarak gerçeklestirilmistir.

Yüzey pürüzlülügü ölçümleri, Veeco Dectac 6M marka profilometrede 5 mg yük altında, numune yüzeylerinde 2000 μm mesafede tarama yapılarak gerçeklestirilmistir.

Yüzeyde olusturulan filmlerin asınma deneyleri, karsıt hareketli (reciprocating) Tribotech asınma cihazı ile kuru ortamda yapılmıstır. Deney öncesi numunelerin yüzey pürüzlülükleri metalografik yöntemlerle azaltılmıştır. Asındırıcı malzeme olarak 6 mm çapında Si_3N_4 bilye kullanılmıstır. İlk grup için asınma deneyleri 4N yük altında, 6 mm/s kayma hızıyla çizik olusturularak yapılmıstır. Toplam kayma mesafesi 80000 mm'dir. İkinci grup ise; 3N yük altında 10mm/s kayma hızıyla çizik oluşturularak yapılmıştır. Toplam kayma mesafesi 40000mm'dir. Asınma deneylerinin sonrasında numunelerin asınma yüzeyleri optik mikroskopta ve taramalı elektron mikroskobunda incelenmistir. Numunelerin asınma iz genislik ve derinligi Veeco marka profilometre ile ölçülerek aşınma miktarları ve relatif aşınma dirençleri tespit edilmiştir.

Eğme testi için 10x20x2mm boyutlarında numuneler hazırlanmış, 3 nokta eğme testleri; Shimadzu marka cihaz ile, 90^0 'ye kadar eğilmiştir. Eğme sonrası makro yüzey incelemeleri Leica marka stereo mikroskopunda incelenmiştir.

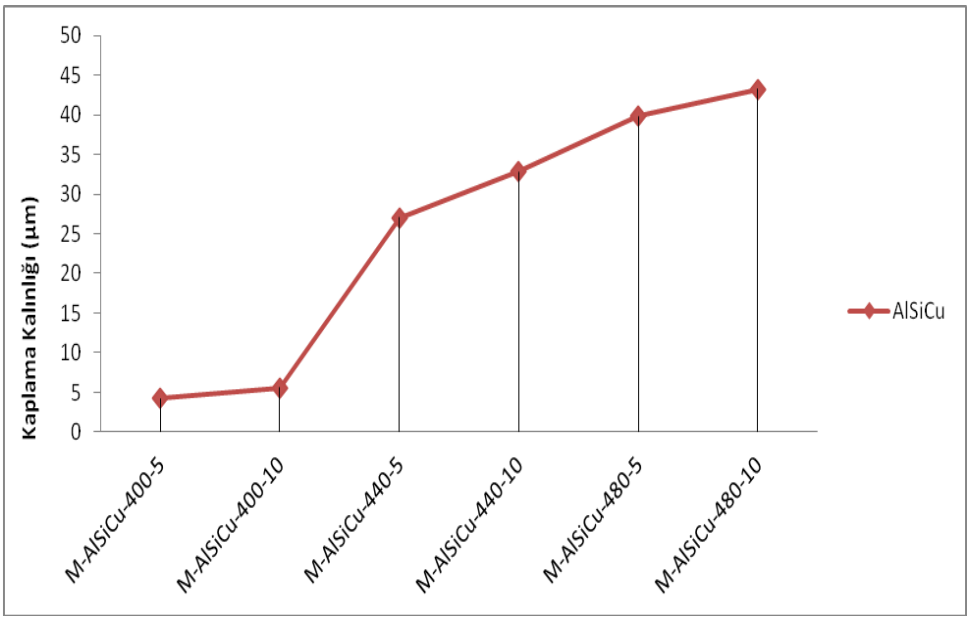
6. DENEYSEL SONUÇLAR ve İRDELEME

6.1 Voltaj Kontrollü MAO İle Ticari Parametrelerle Eloksalın Karşılaştırılması

6.1.1 Voltaj kontrollü MAO İle Ticari Parametrelerle Eloksalın Karşılaştırılması

Bu bölümde AlSiCu ve AlMg alasımlarına uygulanan farklı parametrelerde ki MAO işleminin kaplama özelliklerine etkisi irdelenmistir. MAO için **voltaj kontrollü** sistemde; pozitif voltaj 400V-480V, negatif voltaj ise 80V-96V arasında kullanılmıştır. Proses süreleri 5 ve 10 dakikalık uygulamalar halinde olup sabit frekans altında olusan oksit film tabakasının morfolojisindeki degisim gözlemlenmistir.

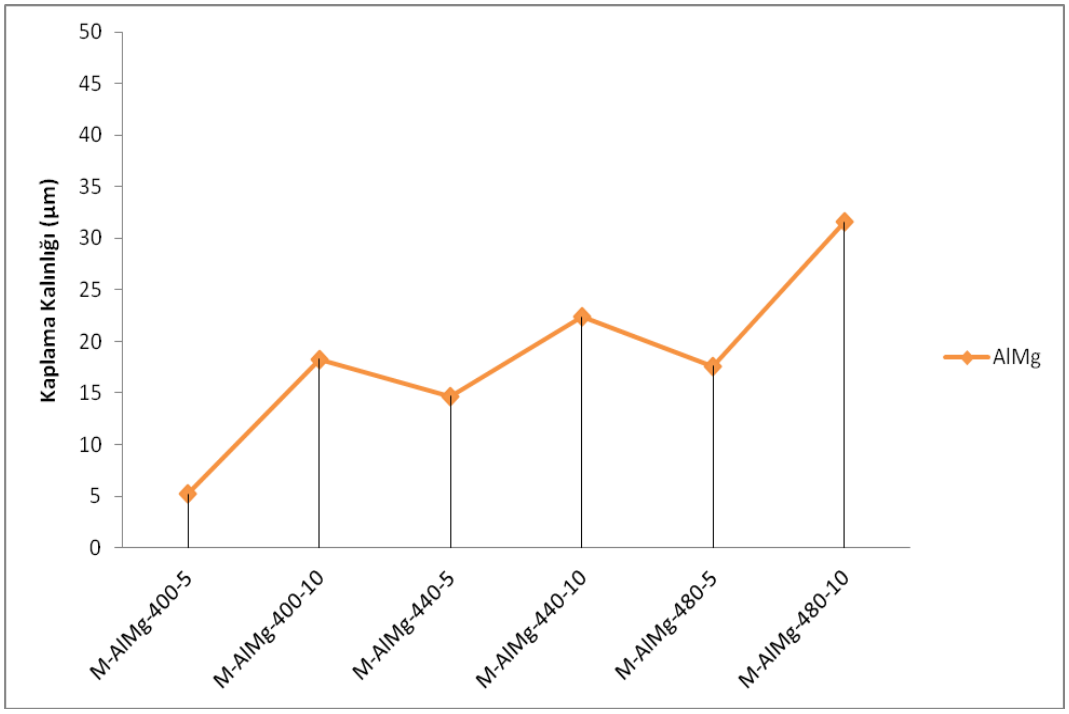
AlSiCu döküm alaşımı için MAO yönteminde şekil 6.1'de de görüleceği gibi voltaj ve uyguluma süresinin artışı, kaplamanın kalınlığını arttırmaktadır. Döküm alaşımının MAO yönteminde kritik voltaj değerinin 400V'un üzerinde olduğu söylenebilir. Özellikle uygulanan pozitif voltaj 440V'a çıktığında kaplama kalınlığı 5 kata kadar artmıştır.



Şekil 6.1 : AlSiCu döküm alaşımının voltaj kontrollü MAO sonrası kaplama kalınlıkları

Bu durum; bölüm 4.3'de anlatılan Yerokhin ve arkadaşlarının (34) bahsettiği; voltaj artışı ile oksit film içerisindeki elektrik alan kuvvetinin kritik değeri aşması, buna bağlı olarak film tabakasının kırılarak yüzeyde meydana gelen arkların hızlıca hareket etmesi ve kırılan oksit film tabakasının büyümesine yardımcı olduğunun bir göstergesidir.

AlMg dövme alaşımlarında ise kaplama kalınlığının artışı; uygulanan proses süresi ile doğru orantılıdır. Reaksiyon süresinin artışı, kaplama kalınlığını arttırmaktadır. Şekil 6.2'de bu durum; grafikten de anlaşılabilmektedir.

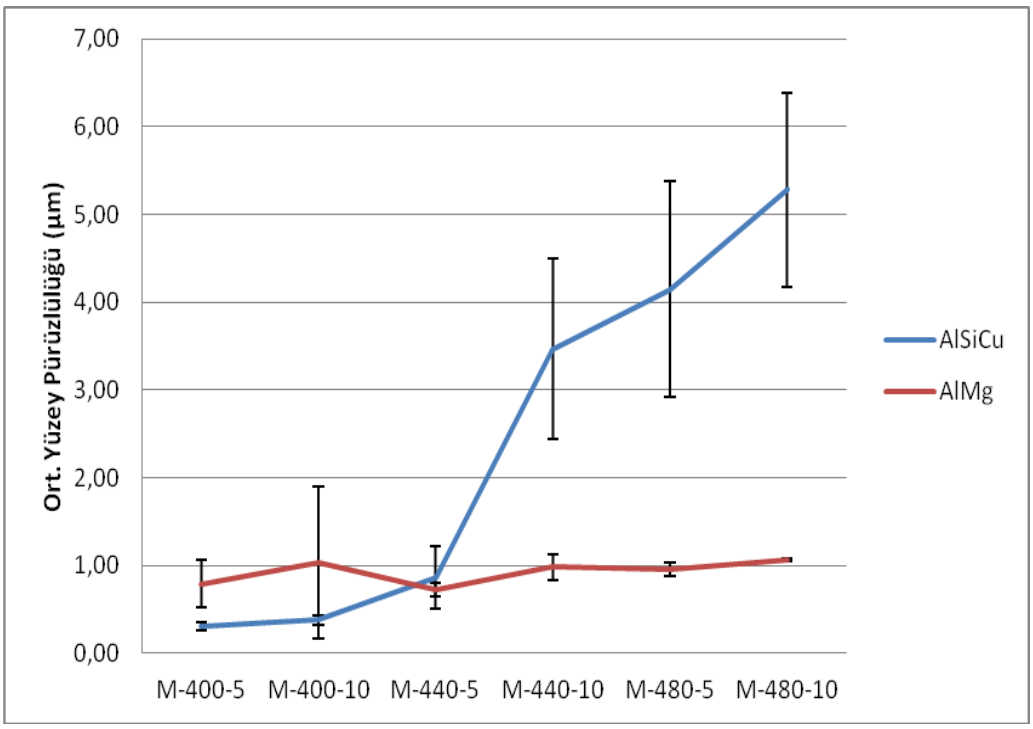


Şekil 6.2 : AlMg dövme alaşımının voltaj kontrollü MAO sonrası kaplama kalınlıkları

Şekil 6.3'de kaplamaların yüzey pürüzlülükleri; AlSiCu döküm ve AlMg dövme alaşımları için birlikte verilmiştir. Döküm alaşımlarının yüzey pürüzlülük değerleri, dövme alaşımlarına göre daha fazladır ve uygulanan kare dalga voltaj ile proses süresinin artışı kaplama pürüzlülüğünü arttırmaktadır.

Grafikteki çizgilerin hareketine dikkat edilirse, AlSiCu döküm alaşımının pürüzlülüğü, şekil 6.1'de verilen kaplama kalınlığı değişiminde olduğu gibi bir "artış" gösterirken, AlMg dövme alaşımının pürüzlülüğü, şekil 6.2'de verilen grafiğe benzer şekilde, kaplama kalınlığı arttıkça artarken düştüğü noktada düşmektedir. Tian ve arkadaşlarının(35) yaptığı çalışmalar sonucu elde ettikleri sonuçlara benzer

şekilde; numunelerin MAO sonrası yüzey pürüzlülüğü; kaplama kalınlığı arttıkça artmaktadır.



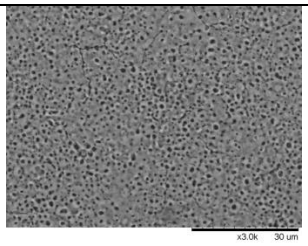
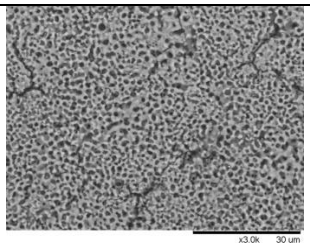
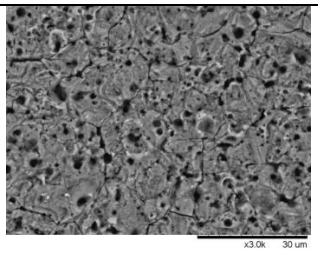
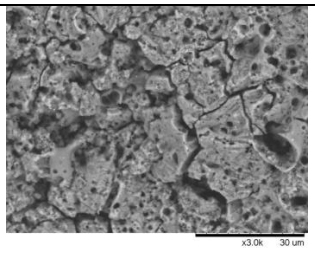
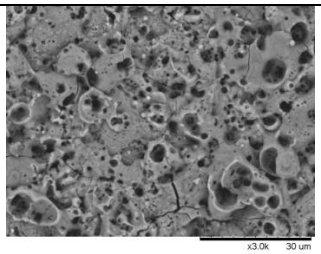
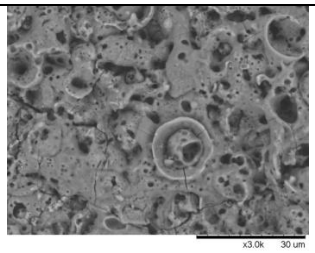
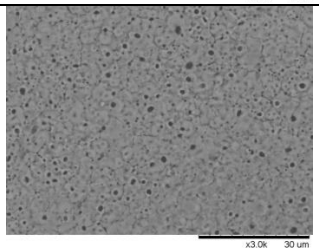
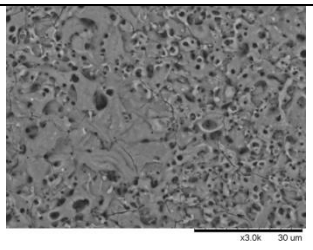
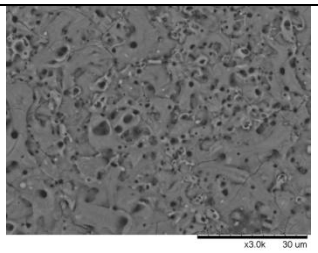
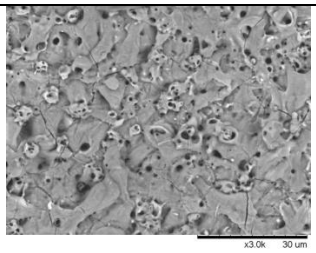
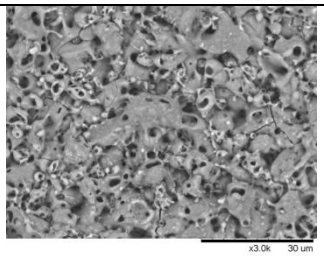
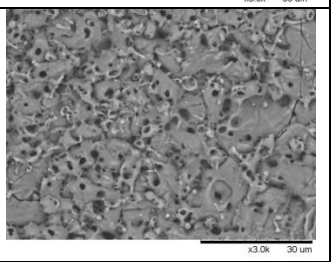
Şekil 6.3 : AlSiCu ve AlMg alaşımlarının voltaj kontrollü MAO sonrası yüzey pürüzlülüklerinin karşılaştırılması

Çizelge 6.1 ve çizelge 6.2'te; mikro ark oksidasyon için; çizelge 5.1 verilen voltaj-süre parametreleri kullanılarak oksitlenen farklı kaplama kalınlıkları ve pürüzlülük değerlerine sahip AlSiCu ve AlMg numunelerinin yüzey ve kesit morfolojileri, taramalı elektron mikroskobuyla (SEM) incelenip sunulmuştur.

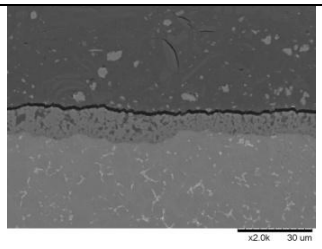
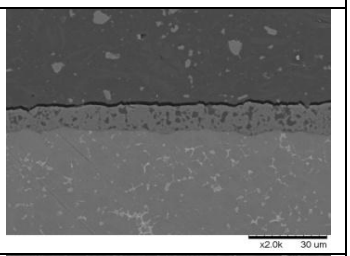
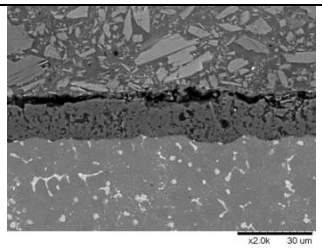
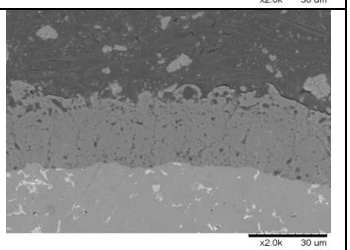
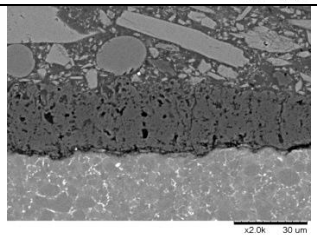
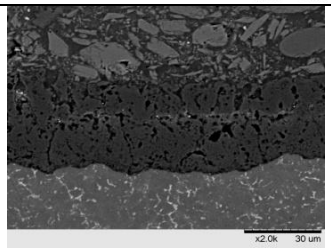
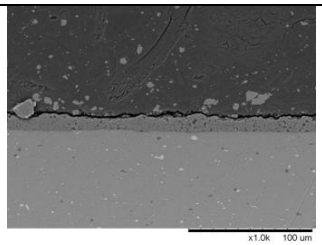
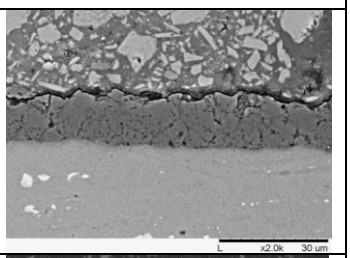
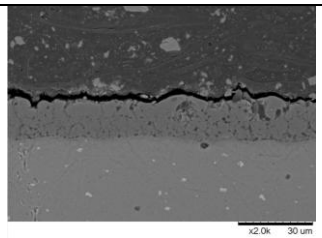
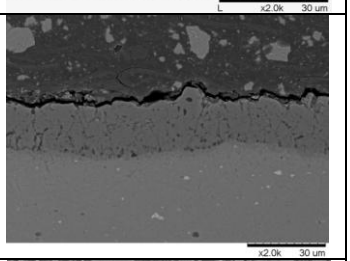
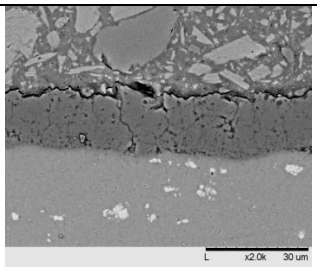
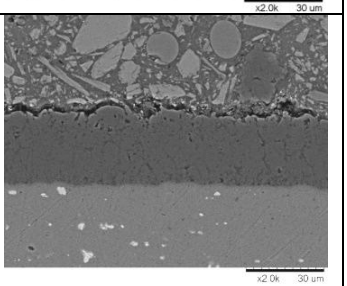
Mikro ark oksidasyon ile birlikte pürüzlü porlar içeren bir oksit tabakası oluşturulmuş, por boyutu ve yüzeyin genel morfolojisi, uygulanan voltaj ve süre degerlerine bağlı olarak degişmiştir.

Hem AlSiCu hem de AlMg numuneleri için; mikro ark oksidasyon sırasında; proses süresinin artışı, oksit tabakasının por miktarını arttırmaktadır. Voltajın artmasıyla birlikte; yüksek sıcaklık ve basınç sonucunda kuvvetli arklar ile oluşan boşalım kanallarının büyük delikler oluşturduğu ve tabakanın kısmi deformasyona uğradığı gözlemlenmiştir. Bu deformasyonlar, aynı voltaj değerinde, proses süresinin 5 dakikadan 10 dakikaya çıkartılması sonucunda da görülmektedir.

Çizelge 6.1 : MAO yönteminde voltaj-süre kontrollü AlSiCu-AlMg numunelerinin yüzey morfolojileri (SEM 3000x)

NUMUNE	Voltaj (V)	5 dakika	10 dakika
M-AlSiCu	400(+) / 80(-)		
M-AlSiCu	440(+) / 88(-)		
M-AlSiCu	480(+) / 96(-)		
M-AlMg	400(+) / 80(-)		
M-AlMg	440(+) / 88(-)		
M-AlMg	480(+) / 96(-)		

Çizelge 6.2 : MAO yönteminde voltaj-süre kontrollü AlSiCu – AlMg numunelerinin kaplama kalınlıkları (SEM 2000x)

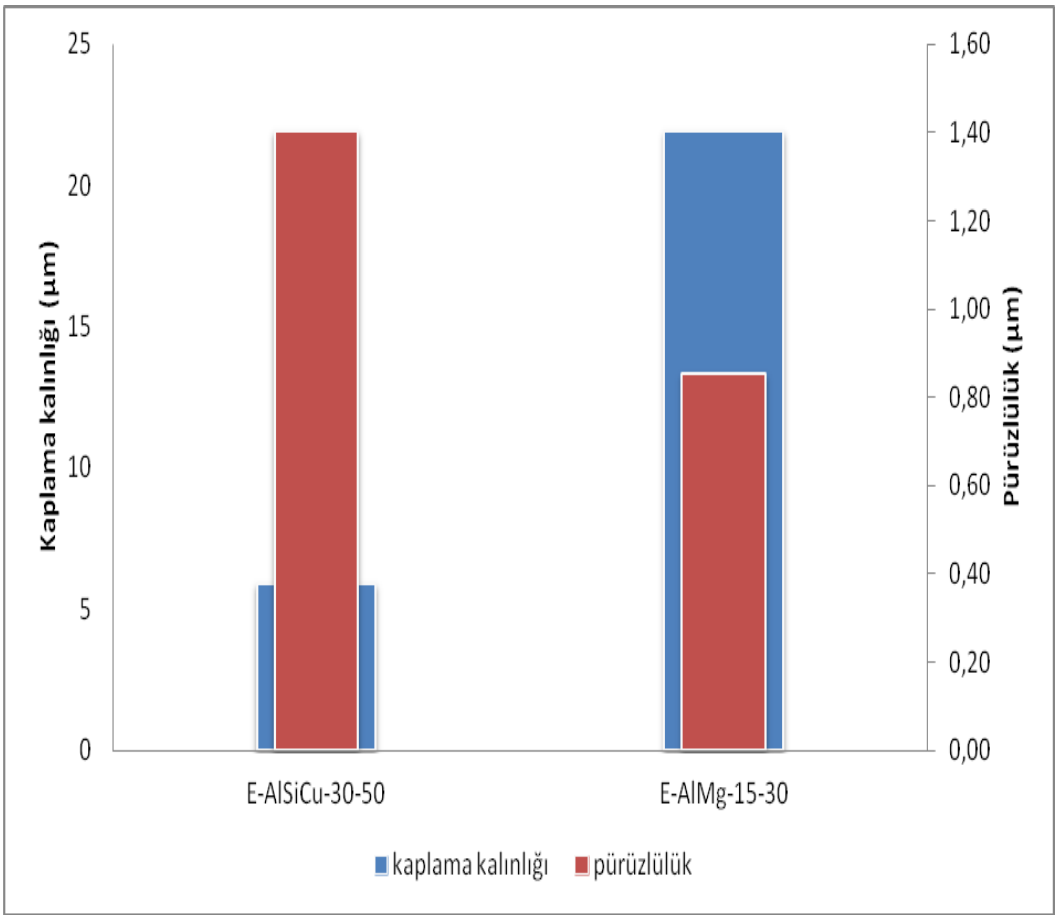
NUMUNE	Voltaj (V)	5 dakika	10 dakika
M-AlSiCu	400(+) / 80(-)		
M-AlSiCu	440(+) / 88(-)		
M-AlSiCu	480(+) / 96(-)		
M-AlMg	400(+) / 80(-)		
M-AlMg	440(+) / 88(-)		
M-AlMg	480(+) / 96(-)		

Kaplanan yüzeylerin kalınlıklarındaki değişim voltaj artışı ile daha güçlü boşalımlarla daha fazla seramik tabaka oluşturarak yükseliş göstermektedir. AlSiCu alaşımına

kıyasla, AlMg alaşımı için proses süresinin artışı , bu boşalımlar üzerinde daha etkin rol oynayarak kaplama kalınlığının artmasında etkin rol oynamaktadır.

6.1.2 Ticari parametrelerle eloksalın alaşımların yüzey özelliklerine etkisi

Tedarikçi firmada standart ticari parametreler ile kaplanan AlSiCu ve AlMg alaşımlarına ait kaplama kalınlığı ve yüzey pürüzlülük değerleri şekil 6.4'te verilmiştir.

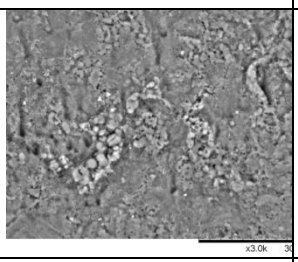
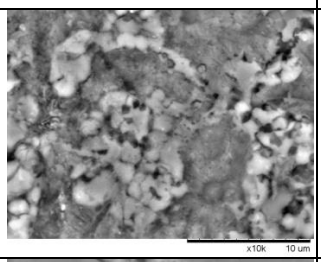
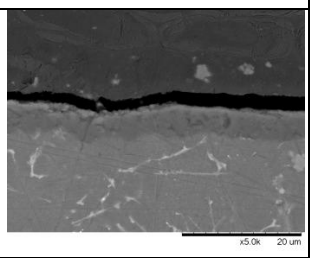
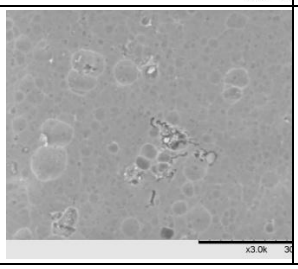
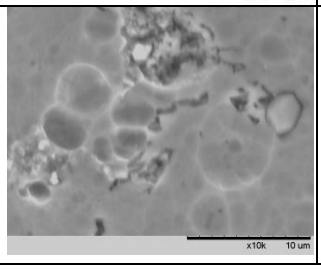
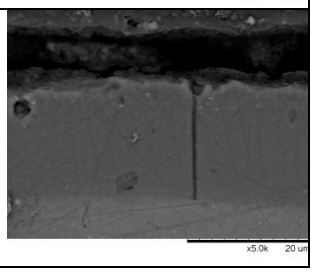


Şekil 6.4 : Ticari parametrelerle kaplanmış AlSiCu ve AlMg alaşımlarının kaplama kalınlığı ve yüzey pürüzlülükleri

AlSiCu alaşımları için kaplama kalınlığı 30V altında 50 dakika sonrasında 6µm civarında kalırken AlMg dövme alaşımı için 15V altın 30 dakika uygulama süresi sonunda 20 mikronu aşkın bir oksit tabakası elde edilmiştir. Bununla birlikte MAO numunelerinde olduğu gibi, AlSiCu döküm alaşımı üzerinde oluşan kaplamanın yüzey pürüzlülüğü, AlMg dövme alaşımına göre fazladır.

Ticari parametreler ile farklı kaplama kalınlıkları ve pürüzlülük değerlerine sahip AlSiCu ve AlMg numunelerinin eloksal kaplama yüzey ve kesit morfolojileri, taramalı elektron mikroskobuyla (SEM) incelenip çizelge 6.3'te sunulmuştur.

Çizelge 6.3 : Ticari parametrelerle elde edilmiş eloksal kaplama numunelerinin yüzey morfolojilerleri ve kesit görüntüleri

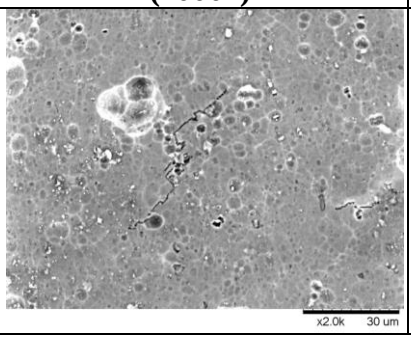
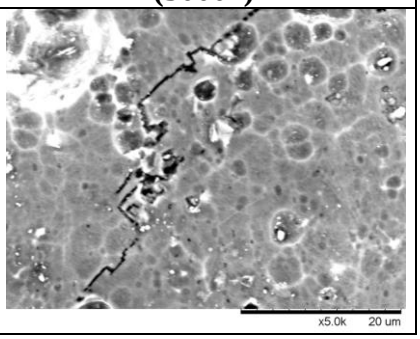
Numune Kodu	Yüzey SEM (3000x)	Yüzey SEM (10000x)	Kesit SEM (5000x)
E-AlSiCu-30-50			
E-AlMg-15-30			

Anodik oksidasyon (eloksal) işlemi sonrası hem AlSiCu döküm hem de AlMg dövme alaşımlarının yüzeylerinde amof bir oksit tabakası elde edilmiştir. Döküm alaşımı üzerinde elde edilen oksit tabakasının dövme üzerindeki tabakaya göre daha poröz bir yapıya sahip olduğu görülmüştür.

AlMg dövme alaşımının kesit SEM görüntüsünde (E-AlMg-15-30) görülebileceği gibi, henüz hiçbir teste tabi tutulmamış olmasına rağmen, AlMg alaşımının geleneksel anodik oksidasyonunda, derin ve kaplama boyunca mikro çatlaklar görülmektedir. Kaplama 20 mikronun üzerinde bir kalınlığa sahip olmasına karşın numune hazırlama aşamasında mikro çatlaklar, yüzeyden altlık malzemeye doğru ilerlemiştir.

Çizelge 6.4'te yer alan yüzey SEM görüntülerinde de görüleceği gibi; AlMg alaşımının yüzeyinde hiçbir işlem yapılmamış olmasın karşın kendiliğinden oluşan derin çatlaklar; kaplamanın gevrekliğinin bir göstergesi olarak düşünülmektedir.

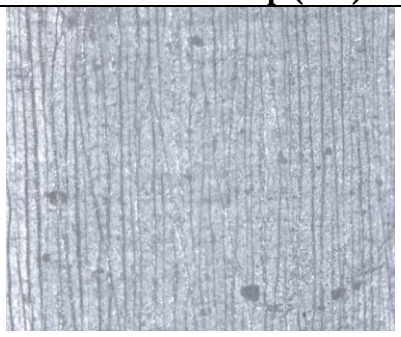
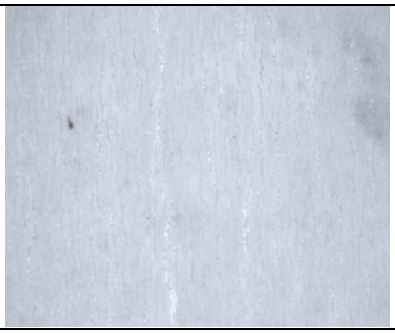
Çizelge 6.4 : Ticari parametrelerle elde edilmiş AlMg eloksal kaplama yüzeyinde tespit edilen mikro çatlaklar

Numune Kodu	Yüzey SEM (2000x)	Yüzey SEM (5000x)
E-AlMg-15-30		

6.1.3 Dövme alaşımları için üç nokta eğme testi sonuçları

AlMg dövme alaşımları, döküm alaşımlarına göre daha iyi şekil değiştirme kabiliyetine sahip olduğundan, bu çalışmada AlMg dövme alaşımları kullanılmıştır. Ticari parametreler ile eloksal kaplananan E-AlMg-15-30 kodlu numune(21,9 μm) ile M-AlMg-440-10 kodlu AlMg MAO numunesi (22,4μm); birbirine çok yakın kaplama kalınlıklarına sahiptir. Benzer kaplama kalınlıklarına sahip bu numuneler 3 nokta eğme testine sokulmuş ve test sonrası yüzey görüntüleri stereo mikroskop yardımı ile incelenmiştir.

Çizelge 6.5 : Üç nokta eğme testi sonrası numunelerin yüzey görüntüleri

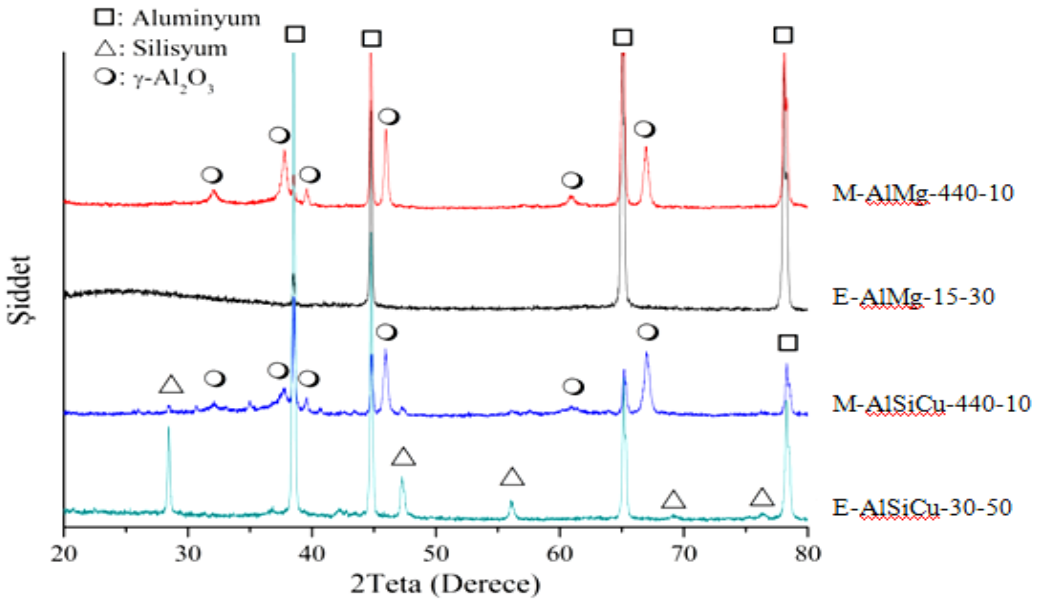
Numune kodu	Stereo Mikroskop (10x)	Stereo Mikroskop (60x)
E-AlMg-15-30		
M-AlMg-440-10		

Ticari parametre ile eloksal kaplanmış AlMg numunesinin 3 nokta eğme testi sonrası eğilen bölgede gözle görülür şekilde ciddi çatlaklar vardır. Kaplamada meydana gelen bu çatlaklar, 60X yaklaştırma ile daha net şekilde görülürken çatlakların kaplama boyunca boydan boya meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu durum, eloksal kaplama yüzeyinin altlık malzemeye iyi yapışmadığının bir göstergesidir.

MAO uygulanmış numunede ise; test sonrası gözle görülür çatlaklar saptanamamakla birlikte 60X yaklaştırma ile görüntülenen fotoğraflarda çok küçük mikro çatlakların olduğu tespit edilmiş ancak bunlar, eloksal kaplamada meydana gelenler ile kıyaslandığında oldukça küçük olduğu görülmüştür.

6.1.4 MAO numuneleri ile ticari eloksal numunelerinin aşınma testi sonuçları

Bu çalışmada amaç; ticari parametrelerle elde edilmiş döküm ve dövme eloksal kaplama numunelerinin, seçilen MAO alaşımları ile aşınma direnci açısından karşılaştırılması ve relatif aşınma direncinin tespit edilmesidir. Bu karşılaştırma amacı ile seçilen 2 MAO numunesi de aynı şartlarda voltaj kontrollü sistemde kaplanmış olup, uygulanan kare dalga voltaj; 440+/88- volt, proses süresi 10 dakika olarak belirlenmiştir. Çalışmada ayrıca kaplamasız AlSiCu ve AlMg alaşımları da aşınma testine tabi tutulmuştur. Test öncesi, eloksal ve MAO yöntemleri ile numune yüzeylerinde elde edilen oksit tabakalarına ait X-ışını difraksiyon analizleri (XRD) ise şekil 6.5'de verilmiştir.

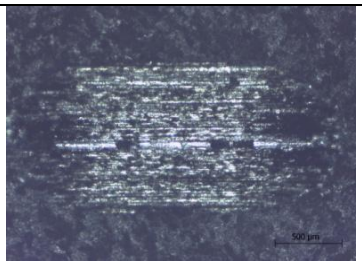
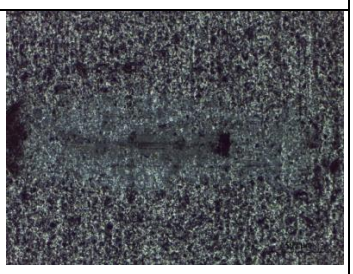
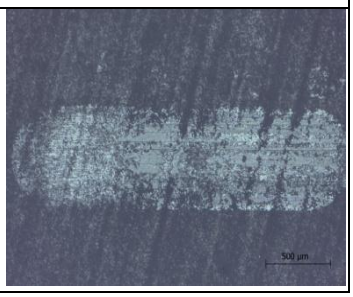


Şekil 6.5 : Aşınma testi için seçilen 4 numuneye ait XRD analizi

AlSiCu alaşımının içerdiği Si oranı sayesinde, hem eloksal hem de MAO işlemi sonrası kaplama yüzeyinde Si pikleri görülmüştür. Bunun yanında AlSiCu döküm alaşımının MAO işlemi sonrası daha kalın bir oksit tabakasına sahip olması sebebi ile alüminyum piklerinin daha büyük pikler halinde olduğu görülmüştür. Eloksal kaplama yönteminde kaplama sırasında yüksek sıcaklık ve basınç değerlerine çıkılmadığından yüzeyde sadece alüminyum ve silisyum pikleri görülürken MAO yönteminde γ-Al_2O_3 meydana gelerek pikleri oluşturmuştur.

Aşınma testi sonucunda numunelere ait aşınma izi görüntüleri optik mikroskop ve SEM yardımı ile incelenmiştir. Aşınma testi sonrası; ticari parametreler ile eloksal işlemine tabi tutulmuş E-AlSiCu-30-50 kodlu AlSiCu alaşımı ve kaplamasız AlSiCu ile Al numunelerinin EDS sonuçlarında; yüzeyde yüksek miktarda silisyum elementi saptanmıştır. Bu durum adhezif aşınmayla bilyeden yüzeye malzeme geçtiğinin bir göstergesidir.

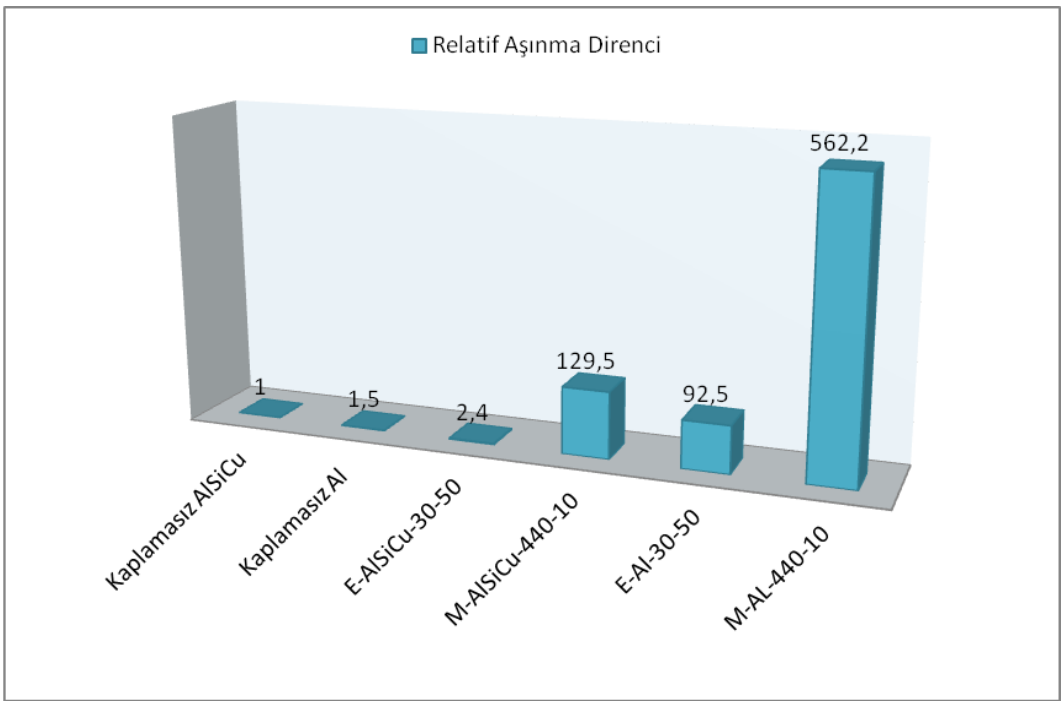
Çizelge 6.6 : Ticari eloksal ve voltaj kontrollü MAO uygulanmış AlSiCu ve AlMg numunelerin aşınma testi sonrası yüzey görüntüleri

Numune kodu	**Optik Mikroskop (50x)**	**Numune kodu**	**Optik Mikroskop (50x)**
E-AlSiCu-30-50		**E-AlMg-15-30**	
M-AlSiCu-440-10		**M-AlMg-440-10**	

MAO kaplı numuneler için aşındırıcı bilyenin yüzeyde bıraktığı iz derinliği AlSiCu döküm alaşımı için 2µm civarı iken Al dövme alaşımı için 0,58 µm'yi geçmemektedir. Bu durumdan yola çıkarak Si_3N_4 bilyenin yüzeyi süpürdüğü ve herhangi bir tahribata sebep olmadığı görüşü hakimdir.

Seçilen 4 numunenin aşınma testi sonrası aşınan yüzey miktarlarından yola çıkılarak kaplamaların relatif olarak aşınmaya karşı dirençleri tespit edilmiştir. (Ek A)

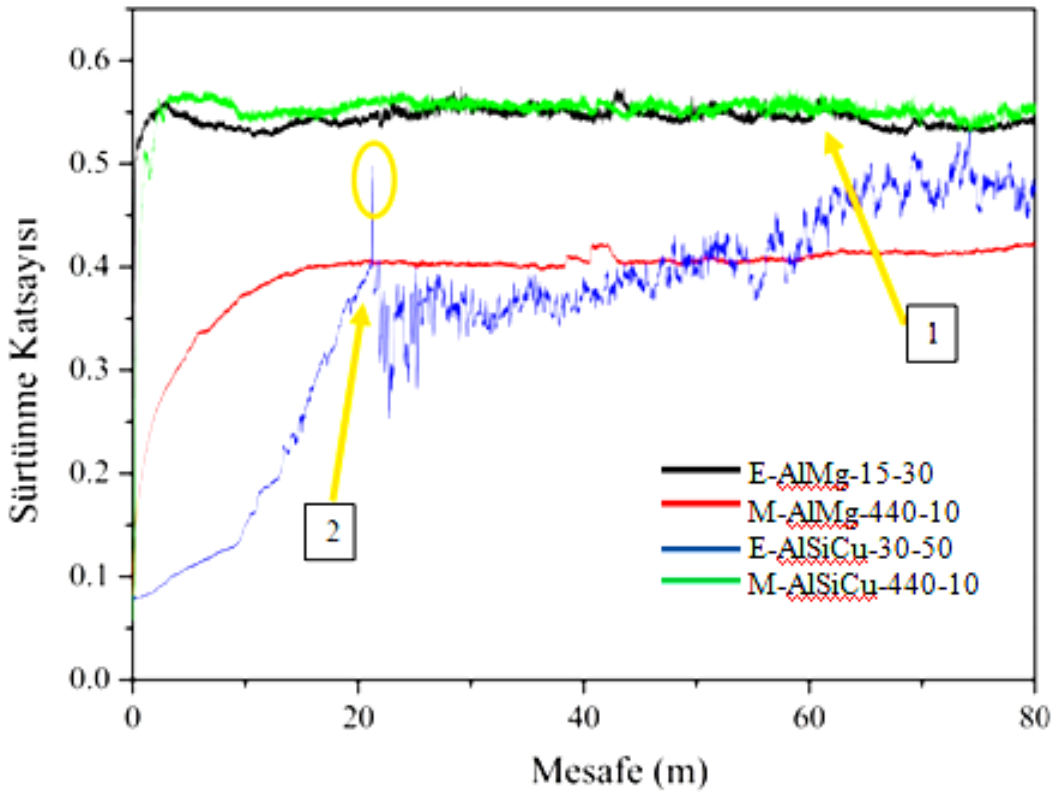
Şekil 6.6'da görüldüğü gibi, MAO yöntemi ile kaplanan AlSiCu ve Al numunelerinin aşınma dirençleri, eloksal kaplamaya göre oldukça yüksektir. Bu grafik doğrultusunda AlSiCu döküm alaşımının eloksal uygulamasında elde edilen oksit tabakasının aşınma direnci yetersiz olup, aşındırıcı bilyenin oksit tabakasını aşarak altlık metale ulaştığı anlaşılmaktadır.



Şekil 6.6 : Voltaj kontrollü MAO ve ticari eloksal kaplama numunelerinin relatif aşınma dirençleri

Şekil 6.7'te aşınma testi verilerinden elde edilerek oluşturulan, kaplama yüzeyindeki sürtünme katsayısının aşınma sırasında değişimi görülmektedir. Grafikten görüleceği gibi, aşındırıcı bilyenin aldığı mesafenin artmasına karşın, MAO uygulanmış AlMg dövme alaşımının yüzeyi; AlMg eloksal kaplamaya göre daha rijittir. M-AlMg-440-10 kodu numune için sürtünme katsayısı bilyenin aldığı mesafe boyunca ilk 20m'ye kadar yükselmiş ardından stabil bir çizgide kalmıştır. Bu durum; Tian ve arkadaşlarının bahsettiği(x); dış γ-Al_2O_3 bölgesinde meydana gelen, sürtünme katyasının düşük olmasına bağlı olarak aşınma direncinin nispeten az olduğu bölgedir. Öte yandan siyah renkle gösterilen AlMg eloksal numunesinin yüzeyinde, dalgalı bir sürtünme katsayısı çizgisi görülmüştür. Bu durum, eloksal kaplamanın amorf oluşu, yüzeyde her noktada aynı kaplama kalınlığı ve karakteristiğinin

olmamasına bağlı olarak farklı noktalarda değişen bir aşınma direncine sahip kaplamanın varlığına işarettir. Özellikle 60. metreden itibaren [1 noktası] sürtünme katsayısındaki azalış, yüzeyin aşınmaya başladığının bir göstergesidir.



Şekil 6.7 : Aşınma testi sırasında MAO ve Eloksal kaplama yüzeylerinde elde edilen spesifik sürtünme katsayılarının kıyaslanması

Döküm alaşımlarına göz atıldığında; AlSiCu eloksal numunesinin [2 noktası] 20. metreye kadar artan bir sürtünme katsayısına sahip oluşu, oksit tabakasının bu noktaya kadar varlığına işarettir. Bu noktadan itibaren grafikte görülen pik, oksit tabakasının aşınarak silindiğine ve bilyenin 20. metreden itibaren alüminyum altlık yüzeyi ile kontak halinde olduğunun ve altlığı aşındırmaya başladığının göstergesidir. İnişli çıkışlı sürtünme katsayısı çizgisi, alüminyum altlığın karakteristiğine bağlı olarak metal yüzeyindeki aşınmaya gösterir ve adhezif bir aşınmaya örnektir. MAO uygulanmış döküm alaşımı ise; dövme alaşımının MAO yüzeyinden farklı olarak, daha dalgalı bir sürtünme katyası çizgisine sahiptir. Bunun en temel sebebi, bilyenin aşındırıcı hareketine bağlı olarak aşınma paterni boyunca mikro porlarla karşılaşması ve buna bağlı olarak stabil bir çizgi yerine nispeten inişli çıkışlı bir karakter göstermesine sebep olmuştur.

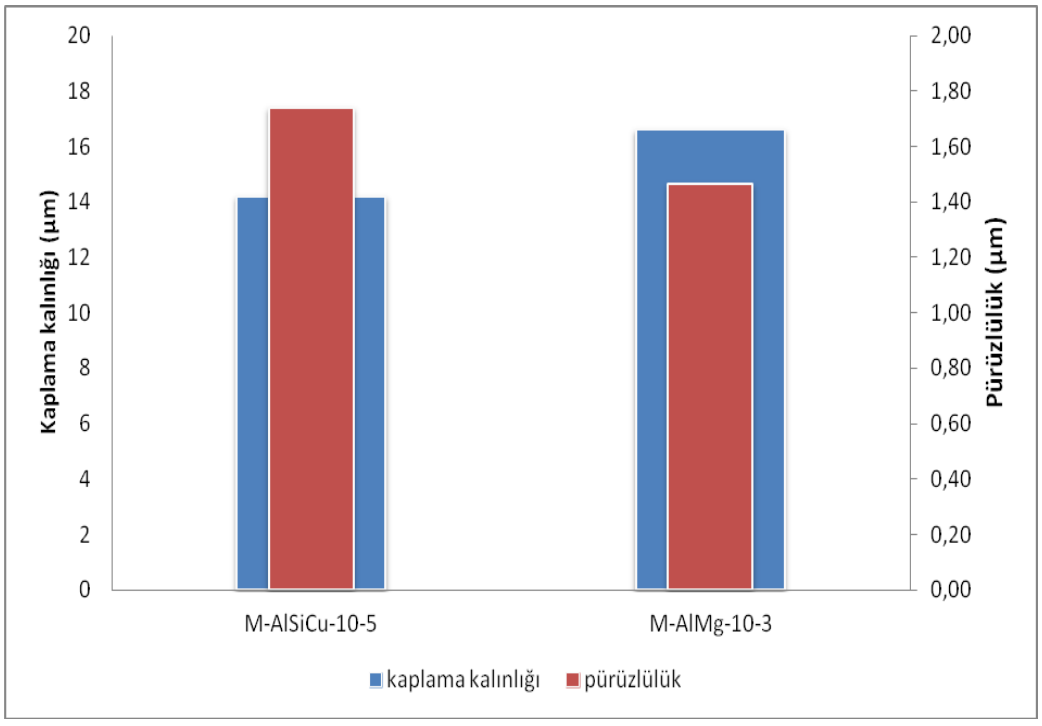
6.2 Akım Kontrollü MAO İşlemine ile Özel Parametrelerle Eloksalın Karşılaştırılması

Bu bölümde; bölüm 6.1'de anlatılandan farklı olarak; yine AlSiCu ve AlMg numuneleri üzerinde, benzer parametrelerde ki MAO işlemleri ile birbirine yakın kalınlıktaki kaplamalar elde edilmeye çalışılmış, özel parametrelerle eşit kaplama kalınlıklarına sahip eloksal kaplama numuneleri ile daha objektif bir kıyaslama yapılması amaçlanmıştır. Yapılan kaplamalar sonucu tüm numunelerin benzer kaplama kalınlıklarına sahip olması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, elde edilen en küçük kaplama kalınlığına sahip numune için diğer tüm numunelerde o kalınlığa yakın kaplamalar elde edilmeye çalışılmıştır.

6.2.1 Akım kontrollü MAO işleminin alaşımların yüzey özelliklerine etkisi

MAO için **akım kontrollü** sistemde; pozitif akım 10A, negatif akım ise 3A olarak kullanılmıştır. Proses süreleri AlSiCu döküm alaşımı için 5 dakika, AlMg dövme alaşımı için 3 dakika olarak belirlenmiştir.

Şekil 6.8'de akım kontrollü sistemde elde edilen kaplamaların kalınlık ve pürüzlülük değerleri birlikte verilmiştir.

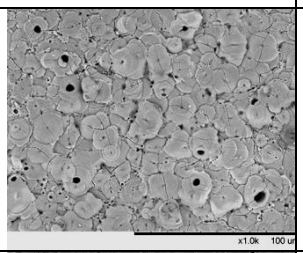
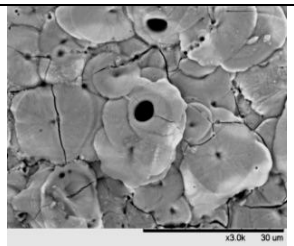
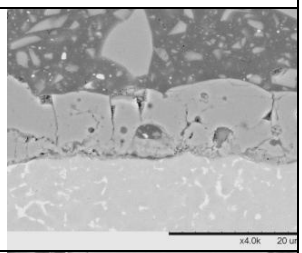
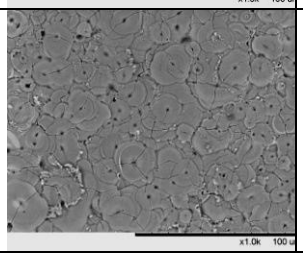
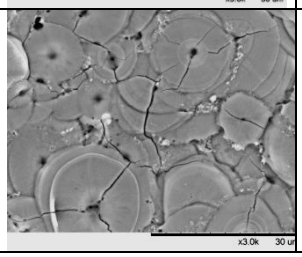
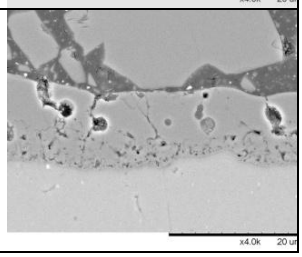


Şekil 6.8 : AlSiCu ve AlMg alaşımlarının akım kontrollü MAO sonrası kaplama kalınlıkları ve yüzey pürüzlülükleri

Birbirine yakın kaplama kalınlığı elde etmek adına yapılan çalışma sonrası numunelerin yüzeylerinde meydana gelen oksit tabakası kalınlığı birbirine yakın iken aynı zamanda kaplamaların pürüzlülük değerleri de benzer çıkmıştır.

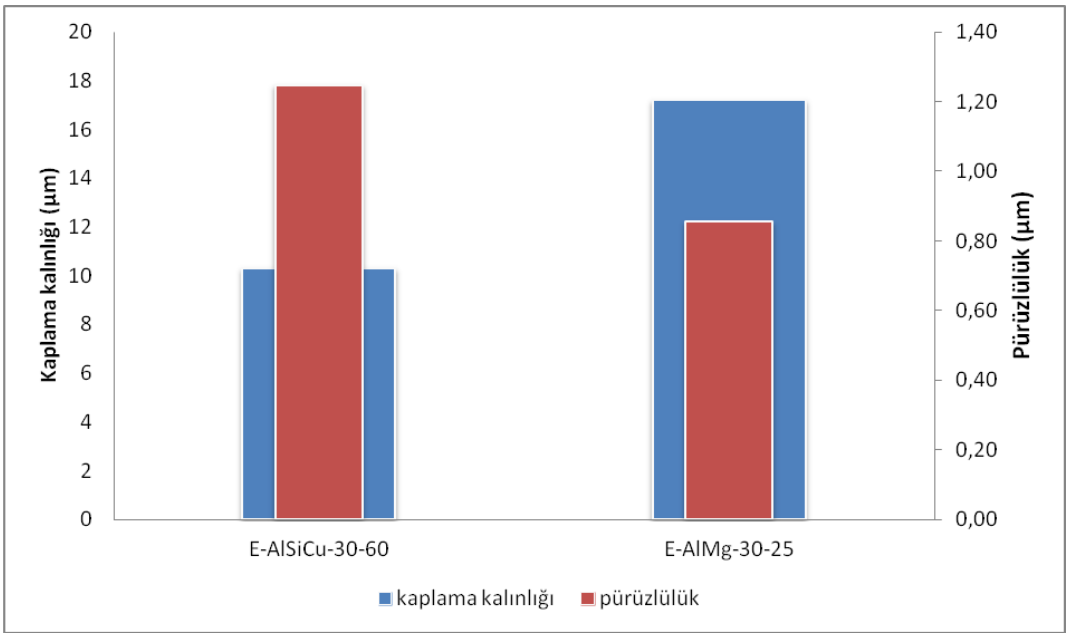
Numunelerin yüzey morfolojileri ve kesit görüntüleri SEM ile incelendiğinde; kaplama morfolojilerinin de birbirine yakın olduğu görülmüştür. Elde edilen kaplamaların, voltaj kontrollü sistemde yürütülen MAO işleminde olduğu gibi poröz ve katmanlı bir yapıya sahip olduğu bulgusuna varılmıştır.

Çizelge 6.7 : Akım kontrollü MAO sonrası AlSiCu ve AlMg alaşımlarının yüzey ve kesit görüntüleri

Numune Kodu	Yüzey SEM (1000x)	Yüzey SEM (3000x)	Kesit SEM (4000x)
M-AlSiCu-10-5			
M-AlMg-10-3			

6.2.2 Özel parametrelerle eloksalın alaşımların yüzey özelliklerine etkisi

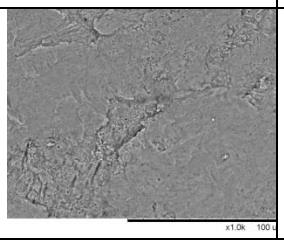
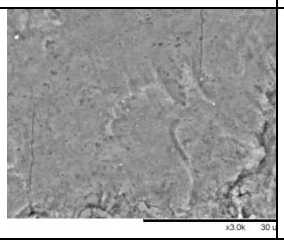
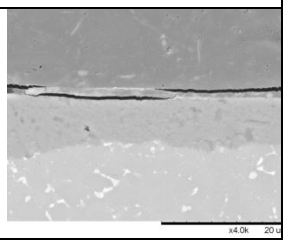
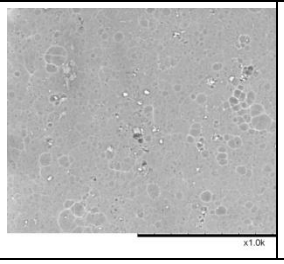
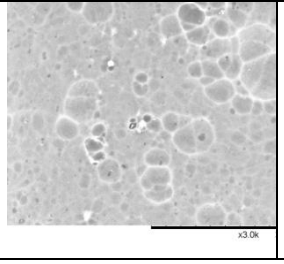
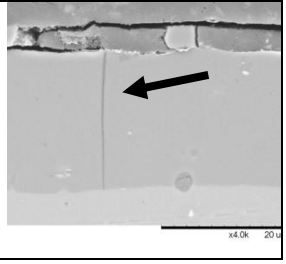
Ticari prosedürlerden farklı olarak üretilen eloksal kaplama numuneleri, yine voltaj kontrollü sistemde kaplanmış olup, kaplama kalınklarının talep edilen değerlere ulaştırılması için proses süreleri özel olarak değiştirilmiştir. AlSiCu döküm alaşımı için 30V sabit voltaj altında proses süresi 60 dakika olarak belirlenmiş iken Al dövme alaşımlarında bu değerler "15V sabit voltaj / 25 dakika" şeklindedir. Bu sayede birbirine yakın kaplama kalınlığındaki AlSiCu ve AlMg eloksal numuneleri elde edilmiştir. Şekil 6.9'da özel parametrelerle üretilen kaplamalara ait kalınlık ve pürüzlülük değerleri birlikte verilmiş olup çizelge 6.8'de yer alan yüzey ve kesit SEM görüntüleri ile kaplama morfolojisi incelenmiştir.



Şekil 6.9 : Özel parametrelerle kaplanmış AlSiCu ve AlMg alaşımlarının kaplama kalınlığı ve yüzey pürüzlülükleri

AlSiCu döküm alaşımı için, proses süresi 60 dakika ile sınırlı kalmıştır. Bu süreden itibaren yüzeyde meydana gelen pasif oksit tabakasının deşarjı olmamakta ve kaplama kalınlığı proses süresi 60 dakikadan fazla da olsa 10µm civarında kalmaktadır. Bu sebepten AlMg dövme alaşımının proses süresi azaltılmış ve daha ince bir oksit tabakası elde edilmesi adına 25 dakikalık bir uygulama süresi seçilmiştir. Bu doğrultuda elde edilen kaplama kalınlığı 16µm civarındadır.

Çizelge 6.8 : Özel parametrelerle elde edilmiş eloksal kaplama numunelerinin yüzey morfolojilerleri ve kesit görüntüleri

Numune Kodu	Yüzey SEM (1000x)	Yüzey SEM (3000x)	Kesit SEM (4000x)
E-AlSiCu-30-60			
E-AlMg-15-25			

Çizelge 6.3'te verilen E-AlMg-15-30 kodlu ticari eloksal kaplama numunesinde olduğu gibi E-AlMg-15-25 kodlu numunenin kesitinde de herhangi bir test yapılmamış olmasına karşın kaplama boyunca mikro çatlaklar tespit edilmiştir.

Özel parametreler ile elde edilen kaplamalar incelendiğinde; genel olarak hem AlSiCu döküm alaşımı hem de AlMg dövme alaşımı için ticari parametreler ile elde edilen kaplamalara benzer morfolojide ancak farklı kaplama kalınlıklarındaki oksit tabakalarının elde edildiği görülmektedir.

6.2.3 MAO ile özel parametrelerle eloksalın aşınma testi sonuçları

Akım kontrollü mikro ark oksidasyon yöntemi ve özel proses süreleri kullanılarak elde edilen eloksal kaplama numuneleri; çalışmanın amacı doğrultusunda birbirine yakın kaplama kalınlıklarına sahiptirler.

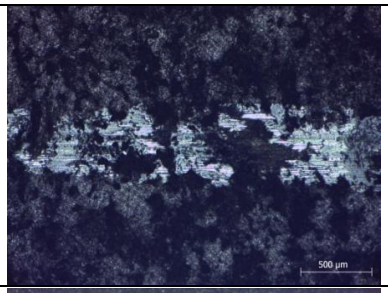
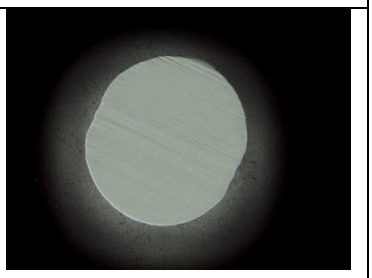
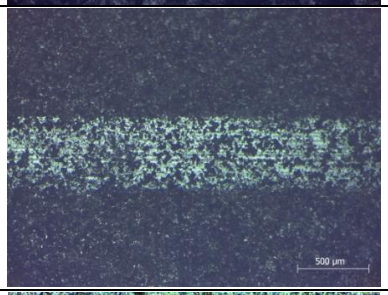
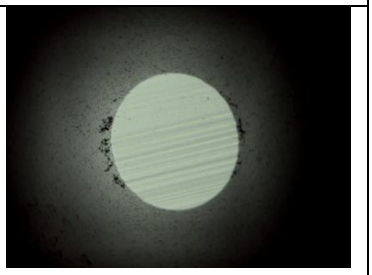
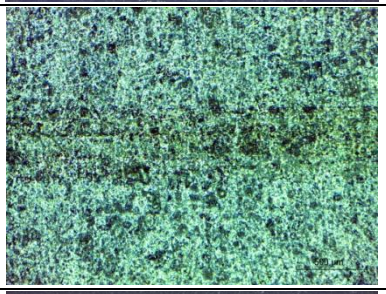
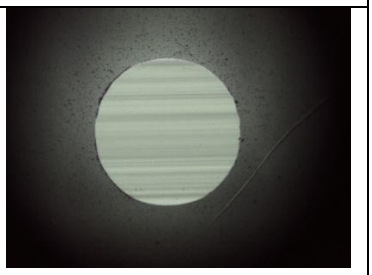
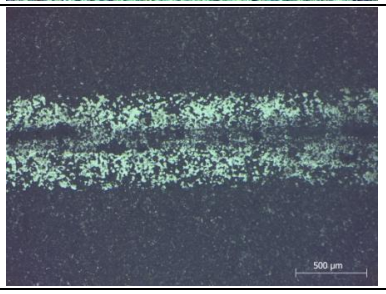
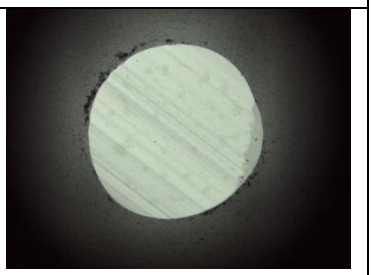
Kaplamaların relatif aşınma dirençlerinin tespiti ve daha objektif bir karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla benzer kaplama kalınlıklarına sahip numuneler; 2500 meş zımpara kullanılarak eşit kaplama kalınlıkları haline getirilmiştir. En düşük kaplama kalınlığı 10μm ile E-AlSiCu-30-60 kodlu AlSiCu döküm alaşımının eloksal uygulamasına ait olduğundan, diğer tüm numuneler bu kalınlığa getirilmiş ve aşınma testine maruz bırakılmıştır.

Çizelge 6.9'da aşınma sonrası numunelerin optik mikroskop ve aşındırıcı bilyelerin görüntüleri verilmiştir. Akım kontrollü mikro ark oksidasyon yöntemi ile 3 dakikada elde edilen M-AlMg-10-3 kodlu kaplama ve 5 dakikada elde edilen M-AlSiCu-10-5 kodlu kaplamanın aşınma çizgileri ve bilyenin fotoğrafları doğrultusunda benzer aşınma davranışı gösterdiği görülmektedir.

M-AlMg-10-3 mikro ark oksidasyon dövme alaşımı numunesine ait aşındırıcı bilyenin çapının, optik mikroskop ile elde edilen görüntülere göz atıldığında; test sonrası belirgin bir şekilde büyüdüğü görülmektedir. Bu durum kaplamanın direncini koruduğunun ve bilyenin daha çok aşındığının bir göstergesidir.

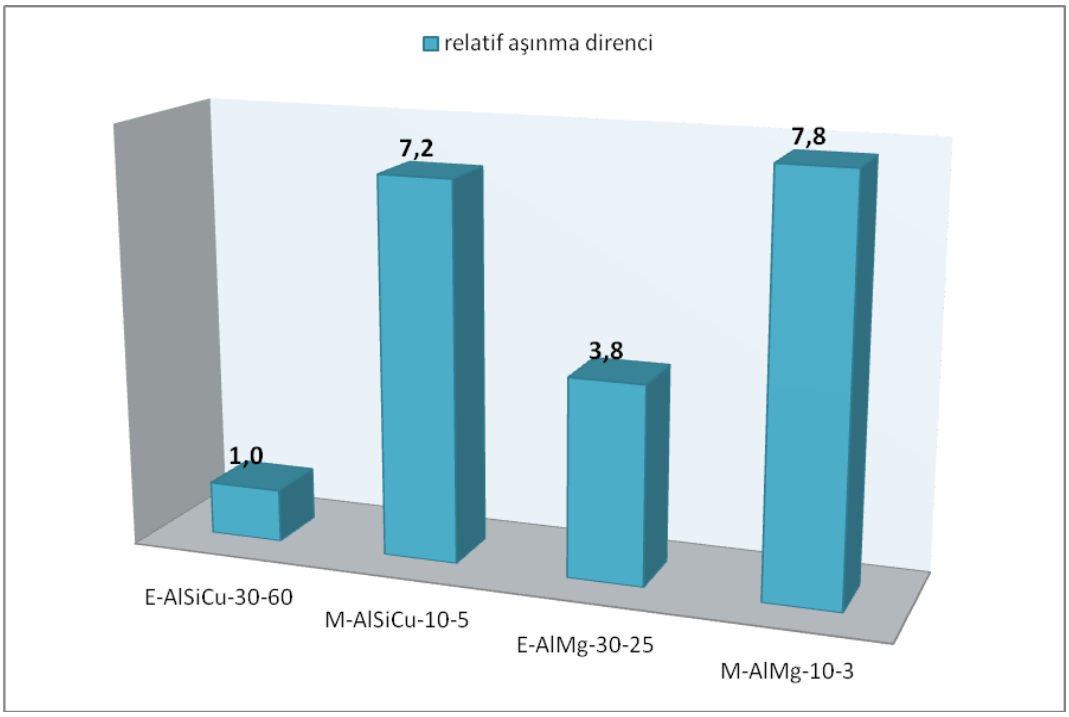
Optik mikroskop görüntülerinden yola çıkarak aşınma izlerinin en az olduğu numunelerin yine MAO numunelerine ait olduğu görülmektedir. Aşınma dirençlerinin karşılaştırılması ayrıca şekil 6.10'da gösterilmiş ve açıklanmıştır.

Çizelge 6.9 : Özel parametrelerle eloksal ve akım kontrollü MAO için AlSiCu-AlMg numunelerin aşınma testi sonrası yüzey görüntüleri

Numune kodu	Optik Mikroskop (50x)	Bilye Görüntüleri (50x)
E-AlSiCu-S-60		
M-AlSiCu-10-5		
E-Al-S-25		
M-Al-10-3		

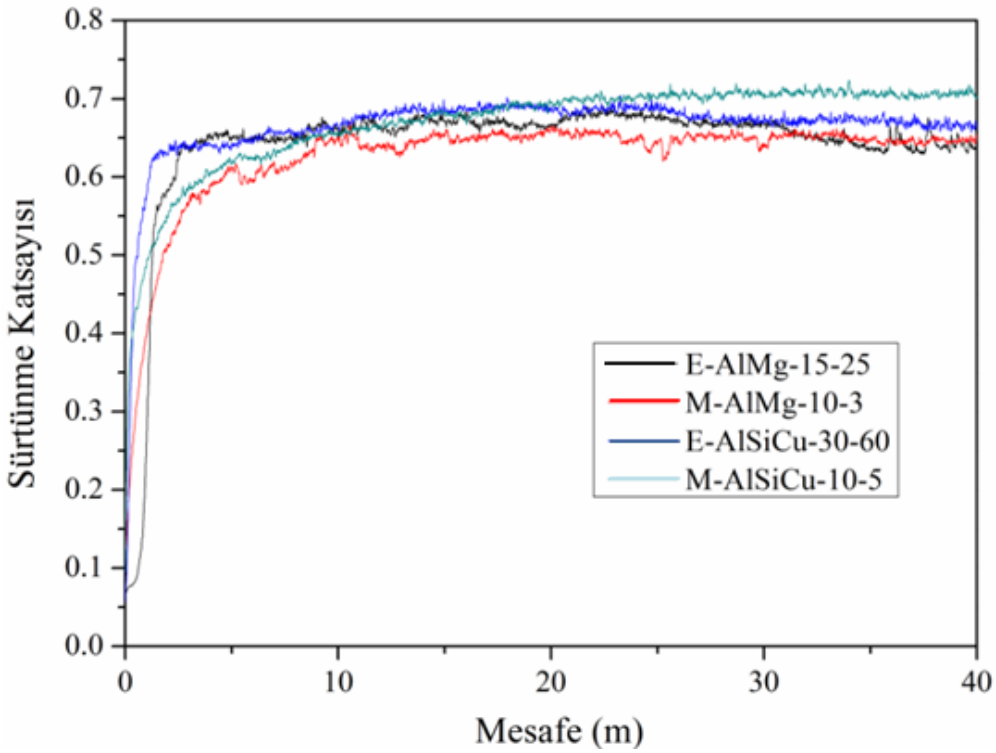
Aşınan yüzeylerin derinlik ve genişlik değerleri incelendiğinde, MAO yöntemi ile elde edilen kaplamaların relatif olarak aşınma direncinin, eloksal kaplamaya göre daha fazla olduğu görülmüştür. Bununla birlikte altlık malzemenin seçimi, kaplamanın mukavemetine de direk olarak etki etmektedir. Birbirine yakın parametrelerle aynı kaplama kalınlıklarına sahip MAO numuneleri için AlSiCu döküm alaşımının aşınma direnci, Al dövme alaşımına göre daha düşüktür.

Eloksal kaplama uygulaması için de benzer yorum yapılabilmektedir. Şekil 6.10'da elde edilen veriler sonrası kaplamaların relatif aşınma dirençleri kıyaslanmıştır.



Şekil 6.10 : Benzer kaplama kalınlıklarına sahip numunelerinin relatif aşınma dirençleri

Hem MAO hem de eloksal yönteminde; AlMg dövme alaşımı üzerinde oluşturulan oksit tabakasının dayanımı, AlSiCu döküm alaşımına göre fazladır.



Şekil 6.11 : Benzer kaplama kalınlıklarına sahip numunelerin spesifik sürtünme katsayılarının kıyaslanması

Şekil 6.11'de verilen sürtünme katyasılarının aşınma testi boyunca değişimine ait grafikte, AlMg dövme alaşımı üzerinde oluşturulan seramik tabakanın daha iyi bir kayma göstererek düşük sürtünme katsayısı değerlerinin elde edildiğini göstermektedir. Ayrıca test sırasında alınan mesafe boyunca sürtünme katsayısı, diğer yöntem ve malzemelere göre daha stabil ve düşük iniş-çıkışlar göstermiştir.

Bununla birlikte mavi ve siyah renkle gösterilen AlSiCu ve AlMg eloksal numunelerine ait sürtünme katyasıları test boyunca birbirine yakın değerler göstermiştir. Eloksal kaplamanın daha az por içermesi ve MAO yöntemine göre nispeten düşük pürüzlülük değerlerine sahip olmasına karşın; bilyenin yüzey üzerindeki hareketinde kaplama düşük kayganlık göstererek aşınmaya açık bir karakter ortaya koymuştur.

7. GENEL SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında $KOH+Na_2SO_4$ çözeltisinde; AlSiCu döküm alaşımı ve AlMg dövme alaşımlarına farklı voltaj,akım ve işlem sürelerinde MAO işlemi yapılmıştır. Tedarikçi firmadan ticari ve özel şartlarda AlSiCu ve AlMg alaşımlarına anodik oksidasyon işlemi yaptırılmış ve bu numuneler ile MAO numuneleri karşılaştırılarak elde edilen sonuçlar sıralanmıştır;

1. AlSiCu döküm ve AlMg dövme alaşımları için voltaj kontrollü çalışmalarda, voltaj ve uygulama süresinin artışı ile oluşan kaplamanın kalınlığının ve pürüzlülüğünün arttığı gözlemlenmiştir. AlSiCu döküm alaşımları için voltaj ve süre artışı aynı anda kaplama kalınlığının ve pürüzlülüğün artmasına etki ederken, AlMg dövme alaşımlarında kaplama kalınlığının artışı için kritik parametrenin proses süresi olduğu görülmüştür.
2. MAO için $KOH+Na_2SO_4$ çözeltisinde; voltaj kontrollü deneylerde farklı voltajlar, akım kontrollü deneyler ve farklı işlem süreleri ile yapılan deneyler sonucunda numune yüzeylerinde farklı özelliklerde oksit tabakası oluştuğu gözlemlenmiştir.
3. Hem MAO hem de eloksal kaplamada pürüzlülük değişiminin altlık malzeme göre değişimi göz önünde bulundurulduğunda; döküm alaşımlarının yüzeyinde daima dövme alaşımlarına göre daha pürüzlü bir oksit tabakasının elde ettiği saptanmıştır.
4. İşlem süresinin artışı ile daha uzun sure reaksiyonlar gerçekleşerek hem AlSiCu hem de AlMg numuneleri için daha kalın bir oksit tabakası elde edilmiştir. Ancak biraz daha pürüzlü ve por boyutları büyük yüzey morfolojisi görülmektedir.
5. Hem ticari hem de özel şartlarda üretilen AlSiCu ve AlMg anodik oksidasyon numunelerinin yüzeylerinde amorf yapıda koruyucu oksit tabakasının oluşturulduğu tespit edilmiştir.
6. Üç nokta eğme testi sonucunda, AlMg dövme alaşımı üzerinde MAO ile oluşan oksit tabakasının yüzeye yapışması ve tutunması, anodik oksidasyon işlemi görmüş AlMg

alaşımının yüzeyindeki oksit tabakasına göre daha iyi olup, kaplamanın tokluğu yüksek ve rijittir.

7. Aşınma testleri sonucunda voltaj kontrollü MAO numunelerinin; ticari parametrelerle üretilmiş anodik oksidasyon numunelerine göre daha yüksek aşınma direncine sahip olduğu tespit edilmiştir.

8. Akım kontrollü MAO numunelerinin özel şartlarda üretilen anodik oksidasyon numunelerine göre aşınma dirençlerinin daha yüksek olduğu saptanmıştır. Aşınma testine sokulan tüm numunelerin kaplama kalınlıkları eşit olmasına karşın, MAO numuneleri, anodik oksidasyon numunelerine göre 2-7 kat arasında daha iyi relatif aşınma direncine sahip olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

[1] **Jun, H.W., Mao, H.D., Zhu H., Jing Y.** (2014). Effects of the ratio of anodic and cathodic currents on thecharacteristics of micro-arc oxidation ceramic coatings on Al alloys. *Applied Surface Science,* **292**, 658-664.

[2] **Tohumcu, S.** (2005). *Plazma Elektrolitik Oksidasyon Yöntemiyle Alüminyum Alaşımlarının Kaplanması*, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa, Türkiye

[3] **Özcömert, M.** (2006). Otomotiv Endüstrisinde Alüminyum*, İstanbul Ticaret Odası Raporu*, İstanbul, Türkiye

[4] http://www.metalurji.org.tr/dergi/dergi137/d137_1445.pdf, Alüminyum Raporu, *TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası*, Alüminyum Komisyonu, (alındığı tarih : 14.11.13)

[5] **ASM Metals Handbook,**(1991). Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials: Properties and Selection, *Introduction to Aluminium and Aluminium Alloys,* **2**, Tenth Edition, USA.

[6] http://aluminium.matter.org.uk/content/html/eng/default.asp?catid=214&pageid=2144417044

(alındığı tarih : 29.03.14)

[7] **Otorawanna, S.** (2011). Casting of Aluminium Alloys, *Fundamentals of Aluminium Metallurgy - Production, Processing and Applications*, A Volume in Woodhead Publishing Series, 141–154

[8] **Demir, E.** (2008). *Alüminyum Alaşımlarında Isıl İşlem Etkilerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir, Türkiye

[9] http://www.southampton.ac.uk/~pasr1/al-si.htm (alındığı tarih : 03.04.14)

[10] **Çoşkun, K.** (2002). *Hadde Alüminyum alaşımlarının Uçaklarda Kullanılması*, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, Türkiye

[11] Şişmanoğlu, T. (2009), *Anodik Oksidasyon Yöntemiyle 2024,6082 ve 7075 Kalite Alüminyum Alaşımlarının Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, Türkiye

[12] http://www.noktametal.com/eloksal.htm (alındığı tarih : 06.04.14)

[13] Tsangaraki, I., Theohari, S., Dimogerontakis T., Wang Y., Hsiang, K., Sheila, K. (2006). Effect of alloy types on the anodizing process of aluminum, *Surface & Coatings Technology*, **200** , 2634 – 2641

[14] Bouchama, L., Azzouz, N., Chopart, J.P., Daltinb, A.L., Bouznit, Y. (2013). Enhancing aluminum corrosion resistance by two-step anodizing process, *Surface & Coatings Technology*, **235**, 676 –684

[15] http://www.huglukaplama.com/tr/eloksal-kaplama/sert-eloksal-kaplama.html

(alındığı tarih : 09.04.14)

[16] Jing, L., Feng, D., Xianli, L., Zhonghao, J., Luquan, R. (2011). Superhydrophobicity of Bionic Alumina Surfaces Fabricated by Hard Anodizing, *Journal of Bionic Engineering*, **8**, 369 –374

[17] Hui-cheng, Y., Bai-zhen, C., Xichang, S., Xiliang, S., Bin, L., (2008). Investigation of the trivalent-chrome coating on 6063 aluminum alloy, *Materials Letters*, **62**, 2828–2831

[18] http://malzemebilgisi.blogspot.com.tr/2009/12/krom-kaplama-nedir.html

(alındığı tarih : 12.04.14)

[19] Vedat, B. (2004). Yüzey İşlemler Teknolojileri, 72-74.

[20] Akyüz, E.(2012). Alüminyum üzeri kaplama, *Yüzey İşlemler*, Sayı 82, Sf. 8-10

[21] Yeşildal, R., Günay, Y. (2007). Plazma Sprey Yöntemi ile Kaplama ve Sprey Karakteristiklerinin İncelenmesi, *Fen ve Mühendislik Dergisi,* DEÜ Mühendislik Fakültesi, Sayı 1, Sf. 59-76

[22] Somak, D., Pratihar, K., Bandyopadhyay, P. (2012). Modeling of input–output relationships for a plasma spray coating process using soft computing tools, *Applied Soft Computing*,**12**, 3356–3368

[23] Kalkancı, H. (2004), *Mikro Ark Oksidasyon Teknolojisi ve Alüminyum Alaşımlı Malzemelere Uygulanması*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya Türkiye

[24]http://www.mmo.org.tr/resimler/dosya_ekler/5c48cce2e2d7fbd_ek.pdf?dergi=19

(alındığı tarih : 12.04.14)

[25] http://www.foresi.it/files/attachments/cationic-electro-deposition-paint-rev05-glb.pdf

(alındığı tarih : 17.04.14)

[26] http://www.lehmannkataforez.com/kataforez_boya_lehmann_kataforez.html

(alındığı tarih : 17.04.14)

[27] Fedrizzi, L., Stenico, M., Deflorian, F., Maschio, S., Bonora, P. (2007). Effect of powder painting procedures on the filiform corrosion of aluminium profiles, *Progress in Organic Coatings*, **59**, 230-238

[28] http://www.boymak.com.tr/tr/_know_how/img/elektrostatik_toz_boya_rehberi.pdf

(alındığı tarih : 06.03.14)

[29] Güngör, G. (2007), Boya Bilgisi, *TMMOB Kimya Mühendisleri Odası*, Ankara, Türkiye

[30] World Trade Organization (2013). Factors shaping the future of world trade, *World Trade Report*, 5-178

[31] Hibbard, J. (2007). Government mandates force rethinking of automotive parts finishing processes: Micro-arc oxidation technology figures prominently in future appplications, *Metal Finishing,* **105**, 50-54

[32] Tekin, C. K., Çakmak, E., Malayoğlu, U. (2008). Plazma elektrolitik oksitlenme yöntemiyle hafif metallerin kaplanması, *Mühendis ve Makina,* Cilt 49, Sayı 582

[33] Özkara, İ., Baydoğan, M., (2009). Mikro ark oksidasyon işleminde voltaj uygulama süresinin 2024 kalite alüminyum alaşımının morfolojik özelliklerine ve aşınma direncine etkisi, 5. Uluslararası Ileri Teknolojiler Sempozyumu, Karabük, Türkiye

[34] Yerokhin, A.L, Nie, X., Leyland, A., Matthews, A., Dowey, S.J. (1999). Plasma electrolysis for surface engineering, *Surface and Coatings Technology*, **122**, 73-93

[35] Tian, J., Luo, Z., Qi, S., Sun, X. (2002). Structure and antiwear behavior of micro-arc oxidized coatings on aluminum alloy, *Surface and Coatings Technology*, **154**, 1-7

[36] Wanga, Z., Wua, L., Caib, W., Shan, A., Jianga, Z. (2010). Effects of fluoride on the structure and properties of microarc oxidation coating on aluminium alloy, *Journal of Alloys and Compounds,* **505**, 188-193

EKLER

EK A : Relatif aşınma direncinin tespiti

EK A

		Aşınma miktarı (μm)
Kaplamasız döküm	genişlik	1752,25
	derinlik	121,00
	aşınma alanı	**212022**
E-C-30-50	genişlik	1326,00
	derinlik	67,06
	aşınma alanı	**88915**
M-C-440-10	genişlik	709,00
	derinlik	2,31
	aşınma alanı	**1634**
kaplamasız dövme	genişlik	1504,75
	derinlik	93,75
	aşınma alanı	**141070**
E-W-30-50	genişlik	749,00
	derinlik	3,06
	aşınma alanı	**2292**
M-W-440-10	genişlik	701,25
	derinlik	0,54
	aşınma alanı	**377**

Çizelge A.1 : Relatif aşınma direncinin tespiti

Aşınma yüzeyinin derinlik ve genişlikleri tespit edilerek bu değerler çarpılmış ve μm^2 cinsinden aşınma alanları tespit edilmiştir. En büyük aşınma alanına sahip numune için relatif aşınma direnci "1" birim alınarak diğer numunelerin aşınma dirençleri, birin katları şeklinde tespit edilmiştir. Bu yöntemle şekil 6.6 ve 6.9'da verilen relatif aşınma direnç grafikleri elde edilmiştir.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Merih Övündür

Doğum Yeri ve Tarihi: İSTANBUL / 28.06.1989

Adres: Adnan Kahveci mah. Zafer cad. Kemen Sitesi. No:3 D:6 Beylikdüzü/İST

E-Posta: merihovundur@hotmail.com

Lisans: İstanbul Üniversitesi

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği (2007 – 2011)