



**MİKRO ARK VE SERT ANOTLAMA İLE KAPLANMIŞ ALÜMİNYUM
7075 ALAŞIMININ KARAKTERİZASYONU VE AŞINMA
ÖZELLİKLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI**

Gamze YAZBAHAR

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

EYLÜL 2021

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Gamze YAZBAHAR

23/09/2021

MİKRO ARK VE SERT ANOTLAMA İLE KAPLANMIŞ ALÜMİNYUM 7075
ALAŞIMININ KARAKTERİZASYONU VE AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN

KARŞILAŞTIRILMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Gamze YAZBAHAR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Eylül 2021

ÖZET

Alüminyum ve alaşımları özgül ağırlıkları, şekillenebilirlik, iyi seviyede kimyasal ve fiziksel gibi önemli özellikleri ile ön plana çıkmaktadırlar. Alüminyumun bu üstün özelliklerine karşın düşük aşınma, nispeten düşük sertlik ve implant uygulamalarında istenilmeyen toksin ve olumsuz korozyon etkileşimine sahiptir. Bu istenilmeyen özellikleri gidermek adına pek çok metalik malzemenin özel ve teknik uygulamaları için, yüzey modifikasyon tekniklerinin kullanımına yönelik çalışmalar devam etmektedir. Bu kaplama yöntemlerinden biri olan Mikro ark oksidasyon (MAO), teknolojinin ilerlemesi ile birlikte, yüksek aşınma ve sertlik direncine sahip seramik yüzeylerin elde edilebildiği elektrokimyasal bir kaplama yöntemidir. Alt tabakaya iyi yapışması ile birlikte uygulanan kaplama işlemi esnasında bileşikler ve elementlerle zenginleştirilebilen homojen oksit kaplamaların elde edilmesine imkan sağlar. Bu çalışma da ticari olarak satın alınan 7075-T6 alüminyum alaşımına deneysel tüm testler için numuneler hazırlanmıştır. Standartlara uygun numuneler Mikro Ark Oksidasyon (MAO) ve Sert Anotlama (HA) yöntemi ile kaplama yapılmıştır. Aşınma testi için numuneler hassas kesme cihazı ile 10x10x5 mm ebatlarında kesilmiştir. Hazırlanan numunelerin taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile kaplama kalınlıkları ölçülmüştür. İki farklı kaplamanın yüzey sertlikleri (HV 0,3) ve aşınma test sonuçları kıyaslanmıştır. Yüzeyden 2 µm mikro ark oksidasyon kaplanan numunelerin mikro sertlik değeri 272,50 (HV 0,3) ölçülmüştür. Sırasıyla 20, 50, 100 µm sert anotlama yapılan numunelerin mikro sertlik değerleri 252,8-194,5-141,2 (HV 0,3) ölçülmüştür. Aşınma test sonucuna göre ise mikro ark oksidasyon (MAO) ile kaplanan numunelerin ağırlık kaybı sert anotlama 20µm, 50µm, 100µm ile kaplanan numunelere kıyasla daha az olduğu gözlemlenmiştir.

Bilim Kodu : 91515
Anahtar Kelimeler : Mikro ark oksidasyon, sert anotlama, 7075 alüminyum alaşımı
Sayfa Adedi : 67
Danışman : Prof. Dr. Bülent BOSTAN

COMPARISON OF CHARACTERIZATION AND WEAR PROPERTIES OF ALUMINUM 7075 ALLOY COATED WITH MICRO ARC AND HARD ANODIZING

(M. Sc. Thesis)

Gamze YAZBAHAR

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

September 2021

ABSTRACT

Aluminum and alloys stand out with their important properties such as specific gravity, formability, good chemical and physical properties. Despite these superior properties of aluminum, it has low wear, relatively low hardness and undesirable toxin and negative corrosion interaction in implant applications. In order to eliminate these undesirable properties, studies on the use of surface modification techniques are continuing for special and technical applications of many metallic materials. Micro arc oxidation (MAO), one of these coating methods, is an electrochemical coating method in which ceramic surfaces with high wear and hardness resistance can be obtained with the advancement of technology. With its good adhesion to the substrate, it allows obtaining homogeneous oxide coatings that can be enriched with compounds and elements during the coating process. In this study, samples were prepared for all experimental tests on the commercially purchased 7075-T6 aluminum alloy. The samples conforming to the standards were coated with Micro Arc Oxidation (MAO) and Hard Anodizing (HA) methods. For the wear test, the samples were cut with a precision cutting device in 10x10x5 mm dimensions. Coating thickness of the prepared samples was measured by scanning electron microscope (SEM). Surface hardness (HV 0.3) and wear test results of two different coatings were compared. The microhardness value of 2 µm micro arc oxidation coated samples from the surface was measured as 272.50 (HV 0.3). Microhardness values of 252.8-194.5-141.2 (HV 0.3) were measured, respectively, of 20, 50, 100 µm hard anodized samples. According to the wear test results, it was observed that the weight loss of the samples coated with micro arc oxidation (MAO) was less compared to the samples coated with hard anodizing 20µm, 50µm, 100µm.

Science Code : 91515
Key Words : Micro arc oxidation, hard anodizing, 7075 aluminum alloy
Page Number : 67
Supervisor : Prof. Dr. Bülent BOSTAN

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca, çalışmalarım ve araştırmalarım tüm deneyim ve bilgisini benimle paylaşan, yol gösteren ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen tez danışmanım Prof. Dr. Bülent BOSTAN'a gösterdiği sabır ve emekten dolayı sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarına verdikleri destekten dolayı Prof. Dr. Serdar SALMAN'a ve Dr. Barış ÇAL' a teşekkür ederim. Ayrıca teorik ve deneysel çalışmalarım boyunca yanımda olan Doç. Dr. Hakan GÖKMEŞE'ye, Öğr. Gör. Dr. Onur ALTUNTAŞ'a ve Arş. Gör. Taha Alper YILMAZ'a tezime katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca bilgi ve tecrübeleri ile bana hep destek olan Öğr. Gör. Gözde ALTUNTAŞ'a teşekkür ederim.

Ayrıca maddi ve manevi yardımlarını hiçbir zaman eksik etmeyen aileme teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. ALÜMİNYUM.....	3
2.1. Tarihçesi ve Genel Özellikleri.....	3
2.2. Alüminyum 7075 Alaşımı	8
2.3. Alüminyuma Uygulanan Isıl İşlemler	9
2.4. Kullanım Alanları.....	11
3. YÜZEY KAPLAMA YÖNTEMLERİ.....	13
3.1. Buhar Depolama Yöntemleri.....	13
3.2. Isıl Püskürtme Kaplamaları	14
3.3. Anotlama Çeşitleri.....	15
4. TEZ ÇALIŞMASININ LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	27
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	33
5.1. Malzeme	33
5.2. Sert Anotlama İşlemi	33
5.3. Mikro Ark Oksidasyon İşlemi	34
5.4. Aşınma Testi.....	35

	Sayfa
5.5. Mikrosertlik Testi	36
5.6. Mikroyapı Analizleri	37
5.7. Optik Mikroskop	37
5.8. XRD Analizleri.....	38
5.9. Taramalı Elektron Mikroskopi (SEM)	39
5.10. Vakum Desikatör.....	40
6. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	41
6.1. Aşınma Testi Sonuçları	41
6.2. Mikrosertlik Sonuçları.....	49
6.3. XRD Sonuçları	50
6.4. SEM Mikroyapı Sonuçları.....	50
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	57
7.1. Sonuçlar	57
7.2. Öneriler.....	58
KAYNAKLAR	59
ÖZGEÇMİŞ	67

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. 7XXX serisi alüminyum alaşımlarının kimyasal kompozisyonu	6
Çizelge 2.2. Dövme alüminyum alaşımları	7
Çizelge 2.3. Döküm alüminyum alaşımları	8
Çizelge 2.4. Al 7075 alaşımının ısıtılma işleme göre mekanik özellikleri	9
Çizelge 2.5. 7075 Al alaşımının kimyasal bileşimi	9
Çizelge 2.6. Alüminyum alaşımlarının ısıtılma işlem kod gösterimleri	10
Çizelge 2.7. Bazı alüminyum alaşımlarının kimyasal bileşimleri, mekanik özellikleri ve kullanım yerlerine ait örnekler (a: Geriye kalan alüminyum)	12
Çizelge 5.1. Al 7075 kalite alüminyumun kimyasal bileşimi (% ağırlık)	33
Çizelge 5.2. Aşınma testine tabi tutulan numunelerin parametreleri.....	35
Çizelge 6.1. Aşınma testi ağırlık kaybı sonuçları	42
Çizelge 6.2. Numunelerin mikrosertlik sonuçları.....	49

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Snizhko ve arkadaşlarının 4 basamakla gerçekleştirdiği MAO prosesi	18
Şekil 3.2. MAO işleminde kullanılan donanım	19
Şekil 3.3. Elektrot süreçler elektroliz arasında, sulu çözeltiler	20
Şekil 3.4. Elektrot yüzeyindeki dielektrik filminde gerçekleşen akım-voltaj değişimi..	20
Şekil 3.5. Deşarj kanallarının kesitten şematik görünümü	22
Şekil 3.6. Alüminyumun MAO işlemi için kullanılan çeşitli elektrolitlerin $I=f(U)$ fonksiyonu, anodik polarizasyon, (1) Hızlı metal çözünmesi, (2) Yavaş metal çözünmesi, (3) Dar voltaj aralığında metal pasifleşmesi, (4) Geniş bir pasifleşme aralığıyla komple kompleks davranış, (5) Zayıf ve (6) Güçlü metal pasifleşmesine öncülük edebilir	23
Şekil 4.1. 7050 Al alaşımları üzerindeki Sert anotlama (a) ve Mikro ark oksidasyon (b) kaplamalarının X-ışını kırınım (XRD) modelleri	28
Şekil 6.1. MAO kaplamalı numunelerin aşınma yüzeyi Ağırlık kaybı/Mesafe ve SEM görüntüsü gösterilmektedir a) MAO 2µm 5N, b) MAO 2µm 10N, c) MAO 2µm 15N d) MAO 2µm 5N SEM görüntü	43
Şekil 6.2. HA kaplamalı numunelerin aşınma yüzeyi Ağırlık kaybı/Mesafe ve SEM görüntüsü gösterilmektedir a) HA 20µm 5N, b) HA 20µm 10N, c) HA 20µm 15N, d) HA 20µm 15N SEM görüntüsü	44
Şekil 6.3. HA kaplamalı numunelerin aşınma yüzeyi Ağırlık kaybı/Mesafe ve SEM görüntüsü gösterilmektedir a) HA 50µm 5N, b) HA 50µm 10N, c) HA 50µm 15N, d) HA 50µm 15N SEM görüntüsü	45
Şekil 6.4. HA kaplamalı numunelerin aşınma yüzeyi Ağırlık kaybı/Mesafe ve SEM görüntüsü gösterilmektedir a) HA 100µm 5N, b) HA 100µm 10N, c) HA 100µm 15N, d) HA 100µm 15N	46
Şekil 6.5. Numunelerin sürtünme katsayısı-zaman grafikleri a) MAO 2 µm kaplama, b) HA 20 µm kaplama, c) HA 50 µm kaplama, d) HA 100 µm kaplama	48
Şekil 6.6. Mikrosertlik grafik sonuçları.....	49
Şekil 6.7. Numunelerin XRD test sonuçları a) MAO 2µm kaplama, b) HA 20µm kaplama, c) HA 50µm kaplama, d) HA 100 µm kaplama	50

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. (a) Çapı yaklaşık 15 cm olan, (b) bir turbo moleküler pompanın rotoru	25
Resim 3.2. Uluslararası uzay istasyonu ISS'deki EXPOSE deneyi a), bir ısı emici (b), optik döküm bileşeni (c) ve osteosentez için bir plaka (d).....	25
Resim 4.1. Al7075 alaşımının MAO işleminden sonra SEM ile elde edilen yüzey morfolojileri (a) Sam-200 Hz, (b) Sam-300 Hz, (c) Sam-400 Hz.....	29
Resim 4.2. Farklı katodik voltajda oluşan MAO kaplamaların kesit morfolojileri ve element dağılımı	31
Resim 5.1. Kaplama işlemin de kullanılan MAO cihazı	34
Resim 5.2. Aşınma Testi uygulamasında kullanılan cihaz görünümü.....	36
Resim 5.3. Shimadzu marka mikrosertlik cihazı	36
Resim 5.4. Metalografik çalışmalarda kullanılan Zımparalama- Parlatma cihazları	37
Resim 5.5. Leica DMI5000 M yazılımı ile ters çevrilmiş araştırma mikroskobu	38
Resim 5.6. Bruker Marka D8 Advanced XRD cihazı	39
Resim 5.7. Taramalı elektron mikroskobu (SEM).....	40
Resim 5.8. Numunelerin muhafazasında kullanılan vakum desikatör	40
Resim 6.1. 2 µm mikro ark oksidasyon kaplama işlemi uygulanmış 7075-T6 alüminyum alaşımının SEM görüntüsü	51
Resim 6.2. 20 µm ile sert anotlama kaplama işlemi uygulanmış 7075-T6 alüminyum alaşımının SEM görüntüsü	52
Resim 6.3. 50 µm sert anotlama ile kaplama işlemi uygulanmış 7075-T6 alüminyum alaşımının SEM görüntüsü	53
Resim 6.4. 100 µm sert anotlama ile kaplama işlemi uygulanmış 7075-T6 alüminyum alaşımının SEM görüntüsü	54

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat derece
Al_2O_3	Alüminyum Oksit
T6	Yapay Yaşlandırma
T651	Gerilim Giderilme ve Yapay Yaşlandırma Isıl İşlemi
Kısaltmalar	Açıklamalar
μm	Mikrometre
HA	Sert Anotlama
HA 100μ	Sert Anotlama 100 μ kaplama kalınlığı
HA 20μ	Sert Anotlama 20 μ kaplama kalınlığı
HA 50μ	Sert Anotlama 50 μ kaplama kalınlığı
Hv	Vickers sertlik değeri
MAO	Mikro Ark Oksidasyon
MAO 2μ	Mikro Ark Oksidasyon 2 μ kaplama kalınlığı
Max	Maksimum
mm	Milimetre
MPa	Megapaskal
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu

1. GİRİŞ

Alüminyum ve alaşımları, hafif ve şekillenebilir olması, iyi korozyon direnci yüksek mukavemet gibi üstün özelliklerinden dolayı inşaat, otomotiv, havacılık endüstrisinde, özellikle ticari uzay ve askeri savaş uçaklarında geniş kullanım alanlarına sahiptir. Günümüzde endüstrinin önemli malzemeleri haline gelen alüminyum bu üstün özelliklere rağmen, düşük aşınma direnci ve nispeten düşük sertlik, hizmet sürelerini kısaltır ve bu nedenle endüstrideki yaygın kullanımlarını sınırlar. Bu alaşımların kitlesel olarak sahip olmadığı nitelikleri yüzeyine kazandırmak, daha ucuz ve daha kolay üretilen bir malzemenin yüzeyinin özelliklerini alüminyum yüzey özelliklerini iyileştirmek için çeşitli kaplama yöntemleri uygulanmaya başlanmıştır. Yüzey kaplama yöntemi ile malzemenin aşınma ve korozyon direncini artırmak, sertlik sağlamak, boya uygulaması öncesi boyanın tutunabileceği yüzey oluşturmak, malzemenin ısı, manyetik özelliklerini modifiye etmek, dekoratif özelliklerini değiştirmek gibi üstün özellikler sağlamaktadır. Bu sürece istinaden alüminyum anotlama işleminin ortaya çıkması 19. yüzyıla kadar uzanmaktadır. İlk olarak oksit tabakası kalınlaştırma fikri 1857 yılında Buff tarafından gündeme gelmiştir.

Bu kapsam da sert anotlama, alüminyum ve alaşımlarının aşınma ve korozyon direncini arttırmak için amorf bir oksit tabakası oluşturan çekici bir yüzey kaplama tekniği olarak ortaya çıkmıştır. Sert anotlamanın (Hard Anodizing) geleneksel anotlamadan farkı, güç kaynağının voltajının çok daha yüksek olmasıdır, bu da daha kalın daha derin bir kaplama yüzeyi oluşturur. Sert anotlama ile sertlik ve aşınma direncinde hafif bir artış elde edilmesine rağmen, yüzey özelliklerindeki gelişmeler aşınmayla ilgili uygulamaların gereksinimlerinden hala uzaktır. Dahası, kuvvetli asitlerin kullanılması ve bunların bertaraf edilmesinin geri dönüştürülmesi gibi sert anotlama süreci ile ilgili ciddi endişeler, endüstride alternatif bir yüzey modifikasyon süreci arayışına yol açmaktadır. 7075-T6 alüminyum alaşımının çizilmeye, aşınmaya, kesilmeye, delinmeye olan direncinin iyileştirilmesi için ultra-sert ve korozyona dirençli oksit seramik kaplamalar biriktirebilen yeni bir teknik olarak yüzey kaplama yöntemlerinden sert anotlama ve sert anotlamanın dezavantajlarına teknik bir çözüm olarak, sert ve sıkıca yapışmış kalın alümina (Al_2O_3) bazlı kaplama oluşturan mikro ark oksidasyon (MAO) işlemi uygulanmıştır. Al, Mg, Ti ve alaşımları için yeni bir yüzey işleme tekniği olan mikro ark oksidasyonu (MAO) ile kaplama, bir elektrolit içerisine daldırılan altlık malzemenin elektrokimyasal reaksiyonların etkisi ile oluşan plazma boşalmaları sayesinde korozyona ve aşınmaya karşı daha dirençli yüzeyi kalın, sert bir

tabaka oluşmaktadır. Bunun yanı sıra farklı malzemelerde birçok araştırma yapılmış ve bunlardan bir rneği olan Zhang ve arkadaşları, sıcak daldırma ve ardından mikro ark oksidasyonu ile yüksek fosforlu dökme demir yüzeyinde kompozit film hazırlamış ve görev döngüsünün kompozit kaplamanın büyüme davranışı ve aşınma direnci üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Seramik kaplamaların özellikleri esas olarak elektrolit bileşimi, akım yoğunluğu, görev döngüsü ve elektrolit bileşiminin ana faktör olduğu diğer faktörlerden etkilenmektedir.

Bu çalışmada özellikle havacılık ve uzay taşımacılık sektöründe önemli yere sahip olan 7075-T6 alüminyum alaşımına mikro ark oksidasyon ve sert anotlama ile kaplama işlemi uygulanarak aşınma direnci incelenmiştir.

2. ALÜMİNYUM

2.1. Tarihçesi ve Genel Özellikleri

Antik Yunanlılar ve Romalılar alüminyum (İngilizce aluminum) “alum” olarak isimlendirerek tıpta ve boyacılıkta kullanmışlardır. 1761’de Morveau alum yerine “alumine” ismini önermiştir. 1807’de, Davy “aluminium” ismini önermiş ve daha sonra “aluminum” olarak değiştirilmesi kabul edilmiştir [1].

Daha sonra 1886 tarihinde yüksek ölçekli elektrik gücü üretimi yapabilen ekipmanların keşfi ile, Fransa’da Paul Héroult ve İngiltere’de Charles Hall, birbirlerinden habersiz şekilde alüminanın direkt elektrolitik dekompozisyonu için bir proses geliştirmişlerdir. Proses; bir elektrik akımını, 980-1000 °C’de eriyik kriyolit içeren çözünmüş alüminadan geçirerek, ergiyik alüminyumun katotta ve karbon dioksitin anotta birikmesini sağlamaktadır. Bu işlem, 1888 yılında, Karl Josef Bayer tarafından, alümina üretimi için keşfedilen Bayer Prosesi ile birlikte günümüz alüminyum üretim prosesini oluşturmaktadır [1,2].

Alüminyum 2,7 g/cm³ yoğunluğu, 13 atom numarası ile Periyodik Tablonun III A Grubunda yer alır. Yerkürenin ana kütlelerinin %8’den fazlasını kaplamakla dünyada oksijen ve silisyumdan sonra en fazla bulunan elementtir [3].

Alüminyum ve alaşımları yoğunluk değeriyle, çeliğin sahip olduğu 7,9 g/cm³ mertebesindeki yoğunluğa göre çok daha hafif, ısıl ve elektriksel iletkenlikleri yüksek, atmosferik şartlardaki korozyona daha dirençli malzemeler olarak tanımlanır. Bu alaşımların çoğu yüksek süneklik özelliği nedeniyle, kolayca şekillendirilebilir, hatta saf alüminyum haddelenerek çok ince folyo haline bile getirilebilir. Ymk kristal yapısından dolayı alüminyum sünekliğini çok düşük sıcaklıklarda bile koruyabilir. Alüminyumun en önemli dezavantajı 660 °C gibi düşük sayılabilecek bir ergime noktasına sahip olduğundan, yüksek sıcaklık uygulamalarında yararlanılmamasıdır [4].

Alüminyum, yumuşak ve hafif bir metal olup mat gümüşümsü renktedir. Bu renk, havaya maruz kaldığında üzerinde oluşan ince oksit tabakasından ileri gelir. Alüminyum, zehirleyici ve manyetik değildir. Kıvılcım çıkarmaz. Saf alüminyumun çekme dayanımı yaklaşık 49 (MPa) iken alaşımlandırıldığında bu değer 700 MPa’a çıkmaktadır. Yoğunluğu, çeliğin veya

bakırın yaklaşık üçte biri kadardır. Kolaylıkla dövülebilmekte, makine de işlenebilmekte ve dökülebilmektedir. Üstün korozyon özelliklerine sahip olması, üzerinde oluşan oksit tabakasının koruyucu olmasındandır [5].

Alüminyumun ve alüminyum alaşımlarının sahip olduğu, korozyon direnci, hafifliği, geri dönüştürülebilir oluşu, elektrik ve ısı iletkenliği, parlamama ve alev almama özelliği, iyi yüzey işlenebilirliği, yüksek mukavemeti, zehirleyici olmaması, dekoratif görünüme sahip olması yüksek sünekliği ve aşınma direnci gibi mekanik özellikleri alüminyumu mühendislik uygulamaları ve sosyal yaşama damga vuran bir metal yapmıştır [6].

Alüminyum endüstrisindeki artan hızlı büyüme metalin üstün özellik kombinasyonuna atfedilmektedir. Bu özellikler alüminyumu çok yönlü yapı ve mühendislik malzemelerinden biri yapmaktadır. Alüminyum ağırlıkça hafiftir ve alaşımları yapı çeliklerinden daha fazla mukavemetlendirilebilmiştir. Alüminyum iyi elektriksel ve ısı iletkenliğe ve yüksek bir ısı ve ışık yansıtmasının her ikisine de sahiptir [7].

Alüminyum alaşımlarında magnezyum, çinko, silika vb. sınıflarda olmak üzere çeşitli derecelerde çeşitli alaşım elementleri vardır. Spesifik elementlerin bu karışımı, bu kalitelere daha yüksek tokluk, daha gelişmiş mekanik mukavemet, çok iyi aşınma, korozyon direnci ve üstün şekillendirilebilirlik özellikleri sağlar. Her alüminyum alaşım sınıfı, her alaşımın kendine özel mekanik direnci vardır. Bu iyileştirilmiş özellikler, kompozitlerdeki alaşımları seramik malzemeleri güçlendirerek dönüştürerek ve kompozitleri özel üretim teknikleriyle veya herhangi bir yığın modifikasyonu ve yüzey modifikasyon teknikleri kullanarak imal edilebilir [8,9].

Alüminyum alaşımlarını farklı kullanım alanları amacıyla farklı mukavemet değerlerini sağlamak için, diğer elementler ile alaşımlandırılabilir. Sınıflandıran alüminyum alaşımlarının içerikleri verilmiştir [10].

1XXX Serisi Alüminyum Alaşımlar: Saf alüminyumdur. Genellikle kimya ve elektrik endüstrisinde kullanılmaktadır [11,12].

2XXX Serisi Alüminyum Alaşımlar: Ağırlıkça en fazla bakır (Cu) elementi içermektedir. Sertleştirmeye uygun olduğundan dolayı, yüksek mukavemet değerleri sağlamaktadır [10].

2024 alaşımı ise bu grupta en çok bilinen, otomotiv ve havacılık sektöründe sıklıkla kullanılan alüminyum alaşımıdır [11].

3XXX Serisi Alüminyum Alaşımlar: Ağırlıkça en fazla manganez (Mn) elementi içermektedir ve soğuk işlem için uygun olan alüminyum alaşımıdır. Alaşım da düşük oranlarda manganez dayanımı arttırmaktadır. Bu serideki 3003, 3004 ve 3105 alaşımlarının, korozyon direnci ve işlenebilirliği yüksektir. 3XXX serisi alaşımlar, yaygın olarak konstrüksiyon ve mimari alanlarda kullanılır [12].

4XXX Serisi Alüminyum Alaşımlar: Ağırlıkça en fazla silisyum (Si) elementi içeren alüminyum alaşımıdır. Bu serideki alaşımlara, silisyum ilave edilerek, kaynak ve lehimleme işlemlerinde ergime noktası düşürülerek alaşımın kaynak ve lehimleme kabiliyeti iyileştirilmektedir. Silisyum, alaşımın akıcılık özelliği arttırması nedeniyle, döküm teknolojisinde, geometrisi karmaşık şekillerin retilabilmektedir [11].

5XXX Serisi Alüminyum Alaşımlar: Ağırlıkça en fazla magnezyum (Mg) elementi içermektedir. Soğuk işlem yoluyla sertleştirilerek yüksek mukavemet değerleri sağlamaktadır. Gemi iskeletleri ve diğer denizcilik uygulamalarında, kaynak tellerinde kullanılır. Bu serideki alaşımların dayanımı, magnezyum miktarının oranına bağlı olarak değişir [11].

6XXX Serisi Alüminyum Alaşımlar: Bu alaşımlar, belirli oranlarda magnezyum (Mg) ve silisyum (Si) içermesi nedeni ile Mg_2Si eltisi oluşturmaktadır. İyi derecede dayanım ve korozyon direncine sahiptir. 6061 alaşımı ise, düşük karbon çelikleri ile kıyaslanabilecek akma dayanımına sahiptir ve yaygın kullanılan alaşımlardan biridir [13].

7XXX Serisi Alüminyum Alaşımlar: Alüminyum alaşımlarından 7XXX serisi, genellikle düşük yoğunluk, düşük dayanım, süneklik, tokluk ve yorulmaya karşı direncinden dolayı yapısal uygulamalarda, uzay ve havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılan malzemedir [14,15].

Ağırlıkça en fazla inko (Zn) elementi içermektedir. ekleme sertleşmesi yapılabildiğinden, alüminyum alaşımları arasında en yüksek sertlik ve mukavemet değerlerini sağlayabilir. Bu

serinin en yüksek mukavemet ve sertlik değerlerinden birisine sahip olan alaşım 7075 kalite alüminyum alaşımıdır. Yorulma dayanımı yüksektir [12].

7XXX serisi alüminyum alaşımlarının kimyasal bileşiminde % 4-8 Zn, % 1-3 Mg ve % 2 Cu bulunmaktadır. Çinko (Zn) ve magnezyum (Mg) alüminyumda yüksek oranda katı çözünürlüğe sahip olmasından dolayı, bu alaşımların üstün mekanik dayanımı çökelti sertleştirilmesi ile sağlanmaktadır [16]. Bakır (Cu) içermeyen işlenmiş 7XXX alaşımlarının genel korozyon direnci, işlenmiş 3XXX, 5XXX ve 6XXX alaşımlarının korozyon direncine yaklaşmaktadır. 7XXX serisinin, 7049, 7050, 7075 ve 7178 gibi bakır (Cu) içeren alaşımları, aynı korozyona sahip bakır içermeyenlere göre genel korozyona karşı daha düşük direnç gösterir [17]. Çizelge 2.1’de 7XXX serisi alüminyum alaşımlarının kimyasal kompozisyonu verilmiştir.

Çizelge 2.1. 7XXX serisi alüminyum alaşımlarının kimyasal kompozisyonu [17]

7XXX Serisi	Mg	Zn	Cu	Fe	Mn	Si	Al
7020	1,0-1,4	4,0-4,5	0,2	0,4	0,05-0,5	0,35	Kalan
7022	2,6-3,7	4,3-5,2	0,5-1,0	0,5	0,1	0,4	Kalan
7050	2,25	6,2	2,3	≤15	2,3	≤12	Kalan
7075	2,1-2,9	5,2-6,2	1,2-2	0,5	0,3	0,4	Kalan
7150	1,9-2,6	5,6-6,8	1,9-2,5	0,15	0,1	0,12	Kalan
7475	1,7-2-8	5,2-6,2	1,2-1,9	0,12	0,06	0,1	Kalan

Dövme alüminyum alaşımları, metalleri normal olarak sıcak koşullarda mekanik olarak işleyen veya şekillendirmeye yarayan bir imalat yöntemidir. Mekanik şekillendirme işlemi, ardı ardına gerçekleştiren vuruşlar ya da sürekli basınç uygulamak suretiyle sıkıştırılarak gerçekleştirilir. Dövme işlemi, açık veya kapalı kalıpta dövme olarak sınıflandırılır. Kapalı kalıpta dövmede kuvvet, çoğunlukla iki veya bazı durumlarda daha fazla parçadan oluşan kalıplar vasıtasıyla uygulanır. İki kalıp arasında parça geometrisine sahip bir boşlukta ezilen metal boşluğun şeklini alır. Açık kalıpta dövmede, basit şekilli veya düz kalıp çiftleri arasındaki metal ezilerek şekillendirilebilir. Genellikle açık kalıpla dövme, büyük parçaların kademeli olarak dövülmesinde kullanılır. Dövülmüş parçalar, çok üstün tane yapısına ve mekanik özelliklerin en iyi kombinasyonuna sahip olur [4].

Alüminyum ve alaşımları çoğunlukla, yaklaşık %75-80' i haddelenmiş sac, folyo, boru, çubuk ve tel olarak kullanılmaktadır [18]. Kütük veya külçe halinde üretilen alaşımlardır. Bu alaşımlar çekme, ekstrüzyon, dövme veya diğer metal işleme prosesi gibi birçok türden işlemlerden herhangi birisiyle daha sonrasında nihai kullanım ürünleri için kullanılan yarı mamullerin üretilmesi için herhangi bir yöntem kullanılarak işlenmiştir [19,20].

Dört basamaklı sayısal bir tasarım sistemi dövme alüminyum ve dövme alüminyum alaşımlarını belirlemek için kullanılır. Son iki basamak alüminyum alaşımını veya alüminyumun saflığını gösterir. İkinci basamak orijinal alaşımın modifikasyonunu veya imprute sınırlarını gösterir. Dövme alüminyum alaşımları Çizelge 2. 2' de gösterilmiştir [7].

Çizelge 2.2. Dövme alüminyum alaşımları [7]

Dövme Alaşımları		Isıl işlem uygulanabilirliği
Saf alüminyum	1xxx	Isıl işlem uygulanmaz
Bakır	2xxx	Isıl işlem uygulanır
Mangan	3xxx	Isıl işlem uygulanmaz
Silisyum	4xxx	Mg içeriyorsa ısıtıl işlem uygulanır
Magnezyum	5xxx	Isıl işlem uygulanmaz
Magnezyum, Silisyum	6xxx	Isıl işlem uygulanır
Çinko	7xxx	Isıl işlem uygulanır

Döküm alüminyum alaşımları, metalin istenen geometride boşluğa sahip olan bir kalıp içine dökülmesi ve buradaki katılaştırılmasıyla gerçekleştirilir. Katılaşma sonrasında parça kalıbın şeklini alır ve hacmi de kalıp boşluğuna göre bir miktar küçülür. Döküm yöntemleri genellikle parça çok büyük veya çok karmaşık bir geometriye sahipse, alaşım sıcak veya soğuk şekillendirilemeyecek kadar düşük bir süneklik özelliğine sahipse ve diğer imalat yöntemlerine göre daha ekonomik şartlar sunuyorsa tercih edilir. Ayrıca sünek malzemelerde bile, ince tane yapısı elde etmek amacıyla, son aşama olarak döküm uygulamasından yararlanır. Döküm parçaların çoğu ayrıca bir imalat işlemi gerektirmez [4]. Uzun yıllar boyunca, çok farklı şekillerde alüminyum parçalar döküm yolu ile kolayca elde edilebilse bile, porozite ve diğer hataları içermeyen parçalar üretmek her zaman zorlu olmuştur. Zaman içerisinde alüminyumun, ergime sıcaklığının çok fazla üzerine ısıtılmaması gerektiğinin anlaşılması ve günümüz teknolojisi ile birlikte, alüminyum dökümünde porozite hala sorun oluştursa da minimize edilmiş durumdadır [9].

Genel olarak nihai veya yarı nihai formuna dökülen parçalar ve bu dökümlerin yapıldığı külçe için kullanılan alaşımlar anlamına gelir. Dökme alaşım bileşimleri, daha sonra haddeleme, ekstrüzyon, dövme veya diğer metal şekillendirme işlemleri için kullanılmaz [19].

Dört basamaklı sayısal bir tasarım sistemi, alüminyum ve alüminyum alaşımlarını dökülmüş ve dökümhane ingotu belirlemede kullanılır. İlk basamak alaşım grubunu gösterir. Son basamak ürünün biçimini örneğin dökümler veya ingotu gösterir. Orijinal alaşım ve imprute sınırlarının bir modifikasyonu sayısal tasarımdan önce bir seri harfle gösterilir. Döküm alüminyum alaşımları Çizelge 2.3’ de gösterilmiştir [7].

Çizelge 2.3. Döküm alüminyum alaşımları [7]

Döküm Alaşımları		Isıl işlem Uygulanabilirliği
Saf alüminyum maksimum %99	1xxx	Isıl işlem uygulanmaz
Bakır	2xxx	Isıl işlem uygulanabilen
Bakır ve/veya Silisyum ve/veya Manganez	3xxx	Hem ısıtıl işlem uygulanır hem uygulanmaz
Silisyum	4xxx	Isıl işlem uygulanmaz
Magnezyum	5xxx	Isıl işlem uygulanmaz
Magnezyum ve Silisyum	6xxx	Isıl işlem uygulanabilen
Çinko	7xxx	Isıl işlem uygulanabilen
Diğer elementler	8xxx	Isıl işlem uygulanabilen

2.2. Alüminyum 7075 Alaşımı

Hafif metaller grubu içerisinde yer alan 7075-T6 alüminyum alaşımı, sahip olduğu düşük yoğunluk, yüksek sertlik, mukavemet ve termal özellikler nedeniyle, özellikle havacılık, otomotiv ve savunma sanayisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu alüminyum alaşımının işlenebilirliği, aynı grup içinde bulunan magnezyum ve titanyum alaşımlarına kıyasla daha kolaydır [21-23].

7XXX serisi alüminyum alaşımları düşük yoğunluk, yüksek dayanım, tokluk ve yorulma dayanımı gibi üstün özellikleri nedeniyle yüksek gerilim altında çalışan uçak bağlantı elemanları, dişli çark ve şaft gibi yapısal parçaların üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır [23-25].

Endüstriyel uygulamalarda birçok ısıt işlemler uygulanabilir, bunlardan en yaygın olanları 7075-T6, 7075-T73, 7075-T651'dir [4]. Alüminyum alaşımlarının ısıt işleme göre mekanik özellikleri Çizelge 2.4'te gösterilmiştir [26].

Çizelge 2.4. Al 7075 alaşımlarının ısıt işleme göre mekanik özellikleri [26]

7075 Alüminyum Alaşımlarının Mekanik Özellikleri				
Temper	Akma Mukavemeti (MPa) min-max	Çekme Mukavemeti (MPa) min-max	Uzama (%50) min-max	Sertlik (Brinell) min-max
0	105	225	17	60
T- 6	460-505	530-570	10	140-160
T- 651	375-448	465-515	6	100-120

7075-T6 alüminyum alaşımı mühendislikte yaygın olarak kullanılmaktadır [27]. 7075-T6 alüminyum alaşımlarının kimyasal bileşimi Çizelge 2.5'de gösterilmiştir [28].

Çizelge 2.5. 7075 Al alaşımlarının kimyasal bileşimi [28]

Al	Cr	Cu	Fe (max)	Mg	Mn (max)	Si (max)	Ti (max)	Zn	Diğer
87,1-91,4	0,18-0,28	1,2-2,0	0,5	2,1-2,9	0,3	0,4	0,2	5,1-6,1	0,15

7075 alüminyum alaşımı yaklaşık % 5.6 Çinko (Zn) ve % 2.5 Magnezyum (Mg) içerir. Bu iki alaşım elementi, yaşanan ısıt işlemler sonucunda yapı içinde $MgZn_2$ intermetalik fazın oluşumu ile bu alaşımların mukavemetinde artışa neden olmaktadır. Öte yandan, alaşımların yapısı içinde daha düşük oranlarda bulunan Bakır(Cu), Silisyum(Si) ve Demir(Fe) gibi elementler, diğer bazı metaller arası yapıların oluşumuyla da gücünü artırır [29].

2.3. Alüminyuma Uygulanan Isıt İşlemler

Alaşımların sertlik ve mukavemeti, soğuk deformasyon veya uygun ısıt işlemlerle artırılabilir. Demir içermeyen alaşımların sertlik ve mukavemetini artırmak için uygulanan yöntemlerin başında yaşlandırma veya çökelme sertleşmesi gelir. Söz konusu ısıt işlemler, kısmi katı çözünürlük gösteren yani solvus eğrisi içeren ve katı çözünürlüğü artan sıcaklıkla artan veya azalan sıcaklıkla azalan alaşım sistemlerine uygulanır. Bu sistem sıvı durumda birbiri içerisinde her oranda, katı durumda ise kısmen çözünen metallerin oluşturduğu

sistemdir. Söz konusu alaşım sistemlerine ait denge diyagramları ötektik nokta içerirler. Duralümin (Al-%4Cu) bu alaşımlara iyi bir örnek olarak verilebilir [30].

Günümüzde, yüksek mukavemet ve ağırlık oranına, yüksek özgül modülüne, düşük ısıl genleşme katsayısına, iyi aşınma direncine, düşük yoğunluğa ve iyi ısıl iletkenliğe sahip malzemeler için teknolojik talepler sürekli artmaktadır. Alüminyum, bu tür çekici özelliklerin kombinasyonları için bir cevap sunar [31].

Yaşlandırma işlemi, ya oda sıcaklığında veya oda sıcaklığı ile solvus çizgisi arasındaki bir sıcaklıkta gerçekleştirilir. Oda sıcaklığında yapılan yaşlandırmaya doğal yaşlandırma, oda sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda yapılan yaşlandırmaya ise yapay yaşlandırma denilir [30]. Alüminyum alaşımlarının ısıl işlem kod gösterimleri Çizelge 2.6 de gösterilmiştir [32].

Çizelge 2.6. Alüminyum alaşımlarının ısıl işlem kod gösterimleri [32]

T	Isıl işleme tabi tutulmuş (Yaşlandırılmış)
T1	Sıcak şekillendirme işleminden sonra soğutulmuş ve tabii yaşlandırmaya bırakılmış
T2	Sıcak şekillendirme işleminden sonra soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve tabii yaşlandırmaya bırakılmış
T3	Çözeltiye alma işlemi yapılmış, soğuk şekillendirilmiş ve tabii yaşlanmaya bırakılmış
T4	Çözeltiye alma işlemi yapılmış ve tabii yaşlandırmaya bırakılmış
T5	Sıcak şekillendirme işleminden sonra soğutulmuş ve suni yaşlandırma yapılmış
T6	Çözeltiye alma işlemi yapılmış ve suni yaşlandırma yapılmış
T7	Çözeltiye alma işlemi yapılmış ve aşırı yaşlandırma yapılmış, kararlı hale getirilmiş
T8	Çözeltiye alma işlemi yapılmış, soğuk şekillendirilmiş ve suni yaşlandırma yapılmış
T9	Çözeltiye alma işlemi yapılmış, suni yaşlandırma yapılmış ve soğuk şekillendirilmiş
T10	Sıcak şekillendirme işleminden sonra soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve suni yaşlandırma yapılmış

Alüminyum alaşımları genel olarak ısıl işlem uygulanabilen ve ısıl işlem görmeyen türler olarak sınıflandırılır. Isıl işleme yanıt veren alüminyum alaşımları ısıl işleme tabi tutulabilir olarak bilinirler ve dayanımları yaşlandırma sertleştirilmesi yapılırken değiştirilebilirken ısıl

işlem görmeyen alüminyum alaşımları gerinim sertleşmesine maruz bırakılarak mukavemetlerini artırabilir. Al-Zn içeren alüminyum serisi 7XXX serisi sürekli olarak zorlu çalışma koşullarına maruz kaldıkları uçak yapıları için yüksek mukavemetli 7XXX serisi Al-Zn-Mg-Cu alaşımları yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu uygulamalar için dikkate alınması gereken önemli özellikler, mukavemet, korozyon, süneklik ve hasar toleransıdır (Örn. Kırılma tokluğu ve yorulma direnci). Yukarıda belirtilen özelliklerin çoğunun uygun alaşımlama, işleme veya bir karışımı yoluyla kontrol edilebilir [33].

2.4. Kullanım Alanları

Alüminyum ve alüminyum alaşımları, çeşitli sektörlerde farklı endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Alüminyumun en önemli kullanım alanlarına inşaat sektörü, kimya, gıda sektörü, metal sanayi, ulaşım, elektrik-elektronik, makina ve teçhizat imalatı üretimi sektörleri örnek olabilmektedir [34].

Alüminyum alaşımları, ulaşım sektöründe taşıt araçlarının üretiminde kullanılan en önemli malzemelerden birisidir. Alüminyum kullanımının yaklaşık % 25'i taşıt araçlarının üretimine aittir. Taşıt araçları ne kadar hafif olur ise, bu araçların hareket etmeleri için gereken normale göre daha az enerjiye gerek duyulduğundan üretiminde alüminyum ve alüminyum alaşımları kullanılan otomobilin daha az yakıt harcadığı anlaşılmıştır. Özellikle otobüs, tren, kamyon gibi büyük araçlar da alüminyum alaşımı kullanımı ciddi derecede yakıt tasarrufuna imkan sağlamaktadır. Alüminyum alaşımlarının hafifliğinin yanı sıra sağlamlığı tekne, gemi, uçak, uydu sistemi, uzay araçları vb. malzemelerin üretimindeki kullanımını artırmıştır [35].

Gıda sektörü, kimya, ve ilaç sanayi gibi çeşitli alanlar da geniş kullanımı olan alüminyum ve alüminyum alaşımları, plastik ve sentetik malzeme, kağıt, gübre, patlayıcı madde, karbonat ve kükürt üretiminde de çokça kullanılmaktadır [25]. Bazı alüminyum alaşımlarının kimyasal bileşimleri, mekanik özellikleri ve kullanım yerlerine ait örnekler Çizelge 2.7'de gösterilmiştir [4].

Çizelge 2.7. Bazı alüminyum alaşımlarının kimyasal bileşimleri, mekanik özellikleri ve kullanım yerlerine ait örnekler (a: Geriye kalan alüminyum) [4]

ABD Alüminyum Birliği Numarası	UNS Numarası	Bileşim (ağ%) ^a	Durumu (Temper Şartı)	Çekme Dayanımı (MPa)	50 mm ölçü boyu için % Kopma Uzaması Cinsinden Sünekliği	Örnek Uygulamaları ve Özellikler
1100	A91100	0,12 Cu	Tavlanmış(O)	90	35-45	Gıda ve kimyasal madde saklama kapları, ısı değiştiricileri, Işık yansıtıcıları
3003	A93003	0,12 Cu, 1,12Mn, 0,1 Zn	Tavlanmış(O)	110	30-40	Mutfak Eşyaları
5052	A95052	2,5Mg 0,25Cr	Soğuk şekil verilmiş (H32)	230	12-18	Uçaklar için yağ ve yakıt boruları, yakıt tankları, perçinler, teller
2024	A92024	4,4Cu 1,5Mg 0,6Mn	Doğal yaşlandırılmış (T4)	470	20	Uçak gövde parçaları, kamyon jantları, civatalar
6061	A96061	1,0Mg 0,6Si 0,30Cu 0,20Cr	Doğal yaşlandırılmış (T4)	240	22-25	Kamyon şasileri, tekneler, raylı taşıt araçları, mobilya parçaları
7075	A97075		Yapay yaşlandırılmış (T6)	570	11	Uçak gövde parçaları, yüksek gerilme altında çalışan diğer parçalar

Alüminyum önemli derece de iletken bir metal olması nedeni ile elektrik ve elektronik sektörün de tercih edilmektedir. Yüksek voltajlı elektrik nakil hatları, yer altı kabloları, elektrik boruları, motor bobin sarımın da ayrıca elektronik cihaz kasaları, şase, transistör soğutucuları ve veri kayıt disklerinde yaygın şekilde kullanılır [35].

3. YÜZEY KAPLAMA YÖNTEMLERİ

Dünya üzerindeki her malzeme zaman ilerledikçe korozyon nedeniyle veya kullanım ortamına bağlı olarak aşınmaya uğramaktadır. Bu meydana gelen aşınmayı engellemek için ya bulunması ve işlenmesi zor olan özel üretilmiş pahalı malzemeler kullanılmış, ya da aşınma sonucunda malzeme değişimine gidilmiştir. Bu da büyük oranda üretimin durması, sonuç olarak da maliyetlerin artması anlamına gelmektedir. Bunu engellemek adına bu dezavantajları avantaja çevirmek için malzemeleri kaplama fikri ortaya çıkmıştır [36].

Çeşitli malzeme gruplarının korozyon direncini, aşınma direncini artırmak, sertlik sağlamak, boya uygulaması öncesi boyanın tutunabileceği astar oluşturmak, malzemenin ısı ve elektriksel iletkenlik, yalıtkanlık ve manyetik özelliklerini modifiye etmek, görünüm özelliklerini değiştirmek gibi sebeplerle birçok yüzey kaplama yöntemi geliştirilmektedir [37].

3.1. Buhar Depolama Yöntemleri

Endüstriyel uygulamalar incelendiğinde yaygın kullanım alanlarına sahip iki tür buhar biriktirme yöntemi bulunmaktadır. Bunlar: Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) ve Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) kaplama metotlarıdır. İnce seramik film kaplamalar, gelişmiş teknolojik malzeme ürün imalatında, kol saatinden başlayarak kesici takımlara kadar geniş kullanım alanın da yoğun ilginin odağındaki konulardan birisidir. Bu kaplamalar, sert ve tok yapısıyla sürtünme ve aşınma özellikleri gelişmiş malzeme üretimini desteklediği gibi malzemeye dekoratif özellikler de kazandırmaktadır. Her iki kaplama yöntemi de taban malzeme üzerine 0,01µm-10µm arasında atomik düzeyde kaplama yapılmasına imkan vermekle birlikte, PVD yöntemi, CVD kaplamaların işlem sıcaklığına bağlı olarak (850-1250 °C) taban malzemenin mikroyapısında meydana getirdiği olumsuz etkileri de ortadan kaldırmıştır [38]. Buhar biriktirme yöntemleri fiziksel buhar biriktirme ve kimyasal buhar biriktirme olarak 2'ye ayrılmaktadır.

Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) yöntemleri kullanılarak üretilen ince seramik film kaplamalar, malzemenin aşınmaya karşı dayanımını yükselten etkili bir yöntem olmasının yanı sıra uygun kaplama parametreleri seçildiğinde taban malzemenin kullanım ömrünü ve ticari değerini önemli ölçüde etkilemektedir [38,39].

Fiziksel buhar biriktirme (PVD) ile metalik kaplama, katı veya sıvı bir kaynaktan atomlar veya moleküller halinde buharlaşan kaplama malzemesinin, vakum veya düşük basınçlı gaz veya plazma ortamında, buhar halde kaplanacak yüzeye taşınarak orada yoğunlaştığı atomik bir buharlaştırma prosesidir [38,40]. Kaplama prosesi temel olarak üç adımda gerçekleşmektedir:

1. Kaplama malzemesinin buhar fazda oluşturulması; Kaplama malzemesinin buharlaştırılabilmesi için evaporasyon(buharlaştırma) ve püskürtme(moleküler seviyede buharlaştırma) uygulanabilmektedir. Metalik kaplamalarda evaporasyon tercih edilmektedir.
2. Kaplama malzemesinin kaynağından kaplanacak yüzeye taşınması; Buhar fazdaki malzemenin, buharlaşma kaynağından kaplanacak yüzeye doğru taşınması, doğrusal bir yol izleyerek veya moleküler akış koşulları sayesinde gerçekleşmektedir. Gaz fazdaki metal buharının ve proses haznesinde bulunan diğer gazların kısmi buhar basınçlarının yeterince yüksek olması, ayrıca bazı gazların iyonlaşarak plazma oluşturmaları nedeniyle kaplama malzemesinin kaplanacak yüzeye taşınması sırasında gaz fazda birçok çarpışma olmaktadır.
3. Kaplanacak yüzey üzerinde film büyümesi; Film, kaplanacak yüzey üzerinde nükleasyon ve büyüme prosesleri sonucunda oluşmaktadır. Filmin bileşimi ve mikroyapısı, büyüyen filmin, iyonlar yardımıyla bombardıman edilmesiyle modifiye edilebilmektedir [40].

Kimyasal buhar biriktirme (CVD) tipik olarak vakum altında yüksek kaliteli, yüksek performanslı katı malzemeler üretmek için kullanılan bir biriktirme yöntemidir. CVD, altlık üzerinde uçucu olmayan katı ince filmler üretmek için biriktirilecek organometalik veya halojenür bileşikler ile diğer gazlar arasında meydana gelen kimyasal reaksiyonları içeren işlemdir. CVD' nin temel ayırt edici özelliği, malzemenin altlık üzerine çökertilmesinin çok yönlü bir biriktirme türü olmasıdır [38,41].

3.2. Isıl Püskürtme Kaplamaları

Isıl püskürtme, kaplama tabakası elde etmek amacıyla önceden hazırlanmış olan esas metale çok ince metalik veya metalik olmayan malzemeleri çökeltten bir grup yöntemi tanımlamak için kullanılan bir terimdir. Kaplama malzemesi; toz, çubuk veya tel biçiminde olabilir. Isıl

püskürtme tabancası, kaplama malzemesini eritmek için gerekli olan ısıyı bir plazma arkı, yanıcı gazlar ya da bir elektrik arkı ile elde eder. Ergiyen kaplama malzemesi yöntemde kullanılan gazlar sayesinde yüzeye geçilir. Yüzeye çarpan partiküller, ince bir tabaka oluşturur ve bir bağlanma sağlar. Kaplama soğuyarak lamelli bir yapı oluşur [42,43].

Isıl püskürtme yöntemleri;

- Alevle püskürtme,
- Elektrik arkı ile püskürtme,
- Patlamalı püskürtme,
- Plazma ile püskürtme,
- Yüksek hızlı oksı-yakıt püskürtme olmak üzere beş grupta incelenebilir [42,43].

3.3. Anotlama Çeşitleri

Anotlama ya da anodik oksidasyon; Bir oksit film tabakası oluşturmak için gerçekleştirilen elektrokimyasal dönüştürme işlemidir [44,45]. Anotlama işlemi, kaplanacak olan numuneyi anot olarak uygun bir elektrolitik sıvı içine asılı halde daldırmak suretiyle anotun elektrolitik sıvıdaki oksijen ile yüzeyde oksit tabakası oluşturması sürecidir [46]. Yaygın olarak alüminyumda uygulanmasına karşın titanyum, çinko, magnezyum, niyobyum da uygulanabilmektedir [45,47]. Başlıca kullanılan anotlama yöntemleri kromik asit, sülfürik asit, mikro ark oksidasyon, sert anotlama, siyah anotlamadır.

Anotlama; eloksaj ya da eloksallama olarak da isimlendirilmektedir.

Sert Anotlama kaplamalar; Sert eloksal, alüminyum oksidin doğasıyla yakından ilgili temel koruyucu ve korozyon direnci özelliklerine ek olarak, alüminyum alaşımlarına, iyi bir mikro sertlik ve aşınma direnci gibi önemli yüksek yüzey mekanik özellikleri kazandırabilen kullanışlı bir işlemi temsil eder [45,48].

Anotlama işlemi sırasında bulunan ana zorluklar genellikle, birkaç intermetalik çökeltinin oluşumu ile mekanik mukavemetteki artışın garanti edildiği ısıl işlem görmüş alaşımlarda (7075-T6 Alüminyum alaşımı gibi) daha da vurgulanan alüminyum alaşımlarının bileşimsel heterojenliği ile ilgilidir [49].

Metallerin aşınma, yorulma ve korozyona karşı yüksek direnci, termal işlemin yanı sıra mekanik, termokimyasal ve kaplama işlemleri gibi birkaç farklı işlemle sağlanabilir. Sert anotlama, çeşitli uygulamalar belirtilen özelliklerin çoğu için temel bir gerekliliktir. Örneğin, yerleştirme mekanizması bileşenleri, uçak şasi ayakları, deniz şarjörü mühimmat kılavuzları ve hidrolik dişliler için kullanılır [45,50].

Sert anotlama, daha düşük elektrolit sıcaklıkları ve daha yüksek akım yoğunlukları kullanma anlamında normal anotlamadan farklıdır. Bununla birlikte, her iki işlem için de, anodik kaplamanın oluşumunun ve büyümesinin temel mekanizmaları aynıdır ve neredeyse alaşım üretiminin metalurjik geçmişi ile birleşmiştir [51].

Sert anotlama işlemi, alüminyum alaşımlarının (2024, 6061 ve 7075 gibi) sertliğini ve aşınma direncini artırmanın iyi yollarından biridir [52,53]. Sert anotlama işleminde, elektrolit konsantrasyonu ve uygulanan voltaj genel olarak normal anotlamadan daha yüksektir ve alaşım yüzeyinde kalın (50-115µm), sert ve aşınmaya dayanıklı bir oksit tabakası oluşur [54]. Bu oksit tabakası, ince ve kompakt bir bariyer tabakası (gözeneksiz) ve kalın ve gözenekli bir dış tabakadan oluşan ikili bir yapıya sahiptir [52].

Mikro ark oksidasyon kaplamalar; Yaygın olarak "plazma elektrolitik oksidasyon (PEO)" olarak da adlandırılan ve geleneksel olarak "mikro ark oksidasyonu (MAO)" olarak isimlendirilen nispeten yeni bir yüzey modifikasyon tekniğidir. Korozyon ve aşınma direnç özelliklerini sağlamak amacıyla hafif alaşımlar üzerinde seramik kaplamaların imalatına ilgi artmaktadır. MAO kaplamalar, Al, Mg, Ti ve bunların alaşımlarının yüzeyinde başarıyla üretilmektedir [55-57].

Elektrolizle ilişkili deşarj olgusu bir asırdan daha önceleri Sluginov tarafından keşfedilmiş ve 1930'larda Günterschultze ve Betz tarafından pratik faydalarından ilk olarak yalnızca 1960'larda yararlanılarak ayrıntılı olarak incelenmiştir. 1970'lerde, bir ark deşarj koşulu altında bir alüminyum anot üzerinde oksit birikimi de geliştirildi ve Markov ve arkadaşları tarafından incelendi. Daha sonra bu teknik geliştirildi "mikro ark oksidasyonu" olarak adlandırıldı. Süreçle ilgili nispeten seyrek bilgi nedeniyle, esasen aynı teknik için çalışmaların çoğunda farklı (ve her zaman fiziksel olarak doğru olmayan) terminoloji kullanılmıştır. "Mikro-plazma oksidasyonu", "anot kıvılcım elektroliz", "plazma elektrolitik

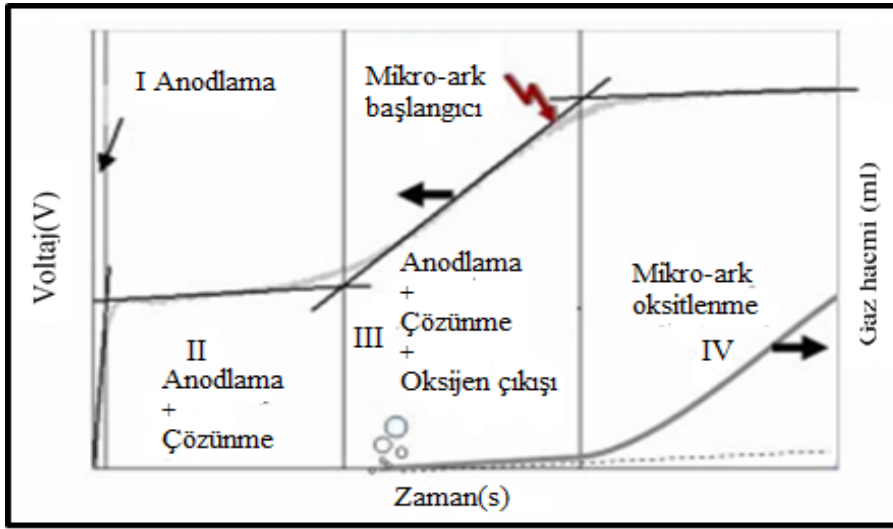
anot muamelesi”, “plazma elektrolitik oksidasyonu (PEO)” için ortak olan tipik tanım örnekleridir [56,57].

Bu gelişmelere paralel olarak, sıvı elektrolitlerdeki yüzeysel deşarjların ısınma etkileri Lazarenko ve çalışma arkadaşları tarafından gözlemlenmiş ve metal ısıtma işlemi amacıyla kullanılmıştır. Bu teknik, “elektrolitik plazmada ısıtma” olarak adlandırılmıştır. Ayrıca Duradzhy ve arkadaşları, plazma elektrolitik ısıtma sırasında termal difüzyon etkilerini ve burada elektrot yüzeyine elektrolit elemental difüzyon olgusunu da incelemişlerdir [55].

Mikro ark oksidasyon (MAO) uygulanan Al alaşımları yaygın olarak anotlanmış metaldir ve kaplamanın sunduğu ek korumadan en çok yararlanan metaldir. Geleneksel anotlama hatta ‘sert anotlama’ bile, sadece birkaç yüz vickers sertliğe sahip amorf bir alümina yüzey tabakası oluşturur. Bu, alüminyuma göre önemli bir gelişme olsa da, yine de çelikler, kum, cam ve diğer birçok tipik aşınma emsallerinden daha da yumuşaktır. Sadece 30µm kalınlığında bir MAO tabakası ile işlenen bu aynı bileşenler o kadar dayanıklı hale gelir ki neredeyse on yıldır değiştirilmeye gerek kalmadan çalışmaktadırlar. Bunun nedeni, plazmadan ekstra enerji enjeksiyonunun amorf alüminayı çok sert bir korundum (α -Al₂O₃) fazına kristalleştirmesidir [58,59].

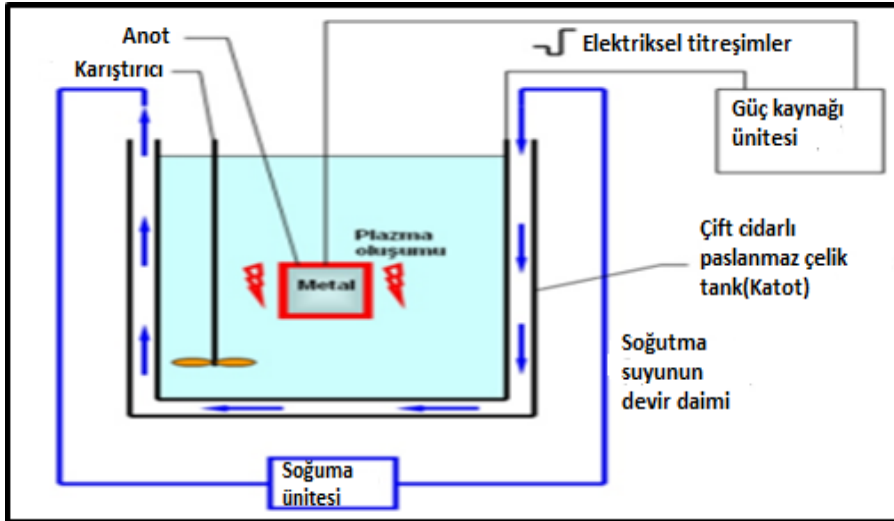
Mikro ark oksidasyon prosesinde kullanıldığı sektöre bağlı olarak hafif metaller ve alaşımlarından yapılan parçaların servis ömründe aşınma ve korozyon nedeniyle kısalmalar kaçınılmazdır. Bu problemlerin azaltılması için hafif metallere çeşitli yüzey modifikasyonları uygulanarak özelliklerinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Uygulanan yüzey modifikasyonunun en etkili yollarından birisi yüzeyde kromat iyonları oluşturacak bir ön işlemle mümkündür. Ancak bu yöntemde kullanılan kimyasallar yüksek derecede zehirli olduğundan ve çevreye olan zararlarından dolayı uygulanması sakıncalıdır [58,59]. Dolayısıyla bu yöntemin yerini dolduracak yeni bir tekniğin son yıllarda kullanımı yaygınlaşmıştır. Anodik oksitlenme prensibine dayanan Mikro ark oksidasyon tekniği yeni bir yüzey kaplama işlemi olarak son yıllarda çok yaygın bir şekilde araştırma ve uygulama alanı bulmuştur [60,61]. Çevre dostu olan MAO ile kaplama yöntemi, çok farklı mekanik ve fiziksel yapıya sahip kaplamaların özellikle Mg, Ti, Al gibi malzemeler ve bunların alaşımlarının yüzeylerinde oluşturulmasına imkân tanımaktadır [62].

Snizhko ve arkadaşları [49,55] MAO işleminin fiziksel ve kimyasal temellerini araştırmış ve MAO'nun dört değişik basamakta gerçekleştiği sonucuna varmışlardır. Bu basamaklar Şekil 3.1'de gösterildiği gibi i)anodlama, ii)anodlama ve anodik çözünme, iii)anodlama, anodik çözünme ve oksijen çıkışı ve son olarak da iv)mikro ark oluşumu olarak gösterilmiştir. Snizhko ve arkadaşlarının 4 basamakla gerçekleştirdiği MAO prosesi gösterilmiştir [63].



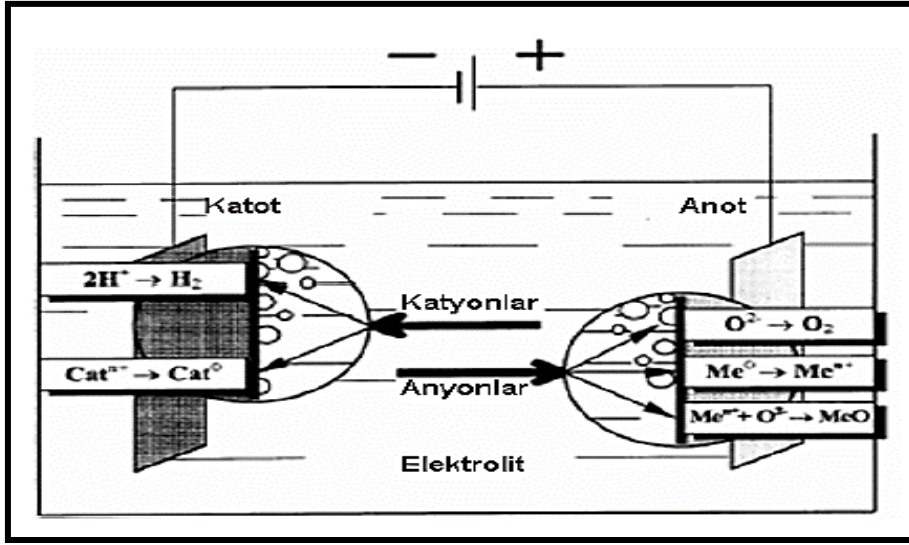
Şekil 3.1. Snizhko ve arkadaşlarının 4 basamakla gerçekleştirdiği MAO prosesi [63]

Hava ortamındayken yüzey de kararlı bir oksit filmi oluşturan metal, güç kaynağına anot olarak bağlanır. Genellikle paslanmaz çelikten üretilen tank devreyi tamamlamak üzere katot görevi görür. Sulu çözelti içerisinde homojenliği sağlamak için karıştırıcı kullanılmaktadır. Metal yüzeyinde plazma oluşumu nedeniyle sulu çözeltideki sıcaklık artışlarını azaltmak için soğutma suyu çift cidarlı tank içerisinde dolaştırılarak sistemin daima optimum sıcaklıkta çalışması sağlanır. Sıcaklık artışlarını önlemek için direk olarak çözeltinin ayrı bir soğutma ünitesinden geçirilmesi düşünülürse filtreleme işlemi yapılmak zorundadır. Proseste kullanılan sistem basit olarak Şekil 3.2'de görülmektedir [63].



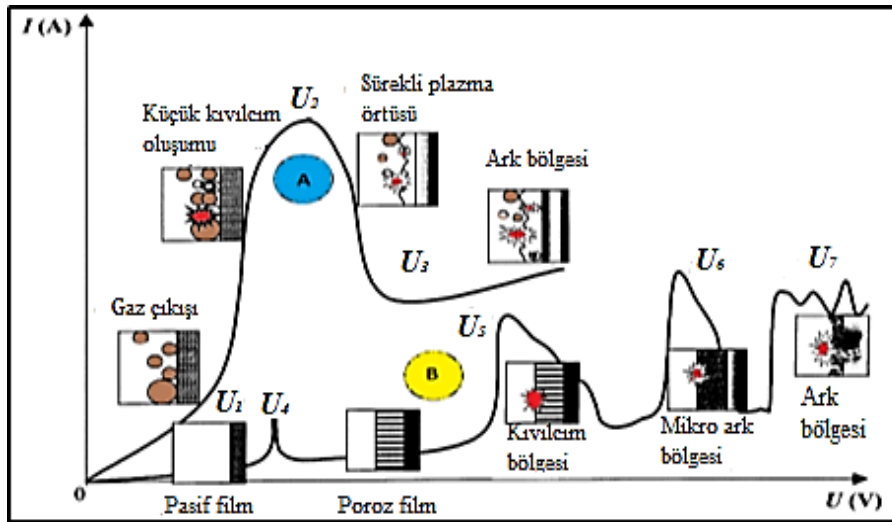
Şekil 3.2. MAO işleminde kullanılan donanım [63]

Uygulanan gerilim belli bir kritik değeri aştığı zaman deşarj metal/elektrolit ara yüzeyinde oluşmaktadır. Elektrolit çözelti içerisinde bulunan iki elektrot arasına potansiyel bir fark uygulandığı zaman meydana gelen elektrik alan ile çözeltideki pozitif iyonlar elektrik alanın olduğu yönde, negatif iyonlar zıt yönde hareket eder. Gaz halindeki oksijenin serbest hale geçmesiyle birlikte metal oksidasyonun anodik yüzeyde oluşmasını sağlar. Ayrıca elektrolitin kimyasal aktivitesiyle oksidasyon prosesinin yüzeyde çözölmelere veya oksit film tabakası oluşumuna neden olduğu ve gaz halindeki hidrojenin serbest kalmasıyla veya katyon redüksiyonu ile katodik yüzeyde oluştuğu görülmektedir. Elektrolit çözeltiyle elektrolit kombinasyonuna ve polarizasyon parametrelerine bağlı olarak elektrotun çözelti içerisinde bulunan tamamı çevresinde, sürekli ve uniform bir parıltı meydana gelir. Bu parıltı zamana bağlı olarak değişerek kısa süreli mikro boşalmalara dönüşür. Şekil 3.3’de kaplama esnasındaki elektroliz prosesi verilmiştir [55,63,64].



Şekil 3.3. Elektrot süreçler elektroliz arasında, sulu çözeltiler [55]

Yukarıda bahsedilen süreçler elektrokimyasal sistemin karakteristik akım-gerilim profilini etkiler. Bir “Tip-a” akım-voltaj grafiği, anot veya katot yüzeyinde temelde gaz salınımı olan bir metal-elektrolit sistemini temsil eder. “Tip-b”, oksit film oluşumunun meydana geldiği bir sistemi temsil eder. Nispeten düşük voltajlarda, her iki sistem için elektrot işlemlerinin kinetiği Faraday yasalarına uygundur ve hücrenin akım-voltaj özellikleri Ohm yasasına göre değişir. Bu nedenle, voltajdaki bir artış akımda orantılı bir artışa yol açar. Bununla birlikte, belirli bir kritik voltajın ötesinde, belirli bir sistemin davranışı önemli ölçüde değişebilir. Şekil 3.4’de elektrot yüzeyindeki dielektrik filmde gerçekleşen akım-voltaj değişimi gösterilmektedir [55].

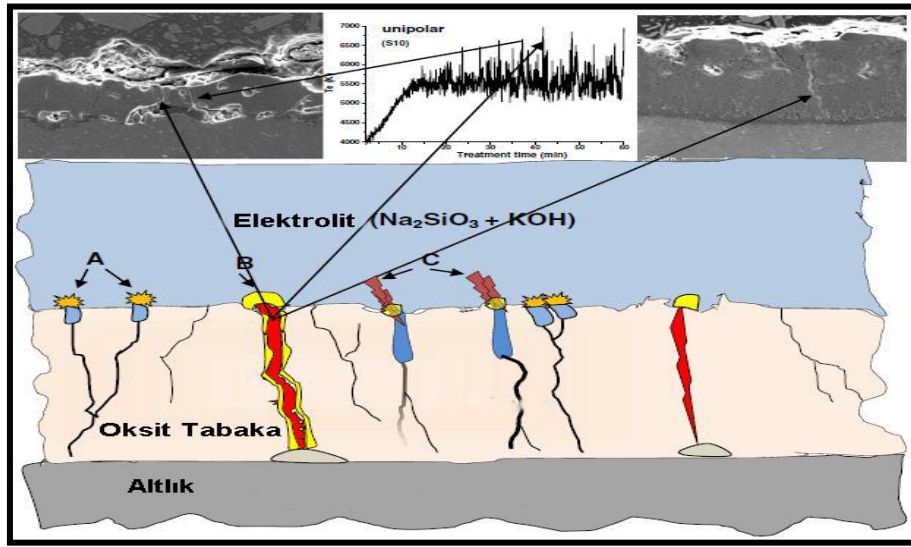


Şekil 3.4. Elektrot yüzeyindeki dielektrik filmde gerçekleşen akım-voltaj değişimi [55]

Akım artışı, gaz halindeki reaksiyon ürünlerinin (O_2 veya H_2) elektrot yüzeyi üzerindeki kısmi koruyucu etkisi ile sınırlıdır. Bununla birlikte, elektrotun elektrot ile temas halinde kaldığı alanlarda, akım yoğunluğu artmaya devam eder ve elektrotta bitişik elektrolitin lokal kaynamasına (ebullition) neden olur. Bu aralık da korozyon potansiyeline gelir ve malzemeyi koruyan pasif tabakanın çözünmesiyle devam eder. U_2 noktasına ilerledikten sonra elektrot, düşük elektrik iletkenliğine sahip sürekli bir gaz halindeki buharlı plazma kılıfıyla örtülür. Bölgedeki elektrik alan kuvveti E , bu nedenle, buhar örtüsünde iyonizasyon işlemlerinin başlatılması için yeterli olan 10^6 ile 10^8 V/m arasında bir değere ulaşır. İyonizasyon olayı başlangıçta dağınık gaz kabarcıklarında hızlı bir kıvılcım olarak görünür ve daha sonra buhar kılıfı boyunca dağılan tek tip bir parıltıya dönüşür. İyonizasyon olayı başlangıçta dağınık gaz kabarcıklarında hızlı bir kıvılcım olarak görünür ve daha sonra buhar kılıfı boyunca dağılan tek tip bir parıltıya dönüşür. Buhar zarfının U_2 - U_3 bölgesindeki hidrodinamik stabilizasyonu nedeniyle, akım düşer ve U_3 noktasının ötesinde, kızdırma deşarjı, karakteristik bir düşük frekanslı akustik emisyonun eşlik ettiği yoğun arklara dönüşür [55,62-65].

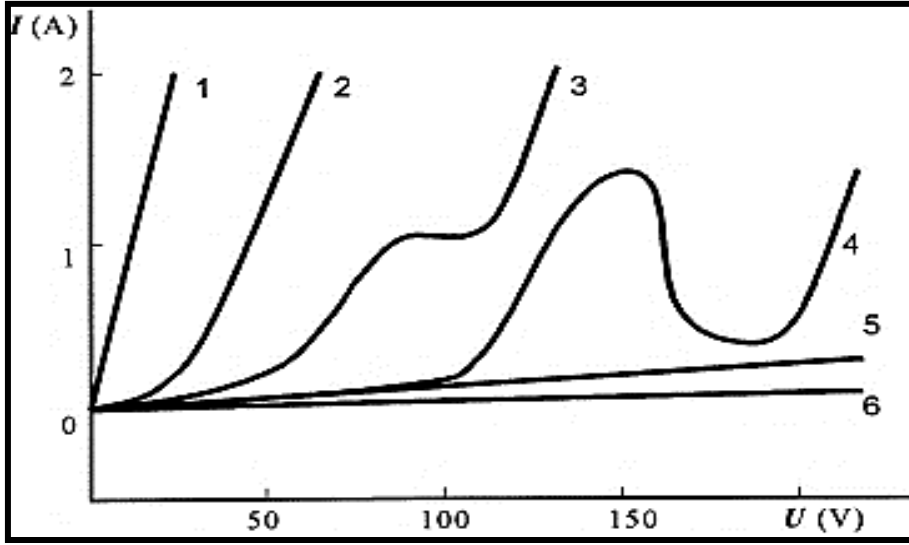
B tipi sistemlerin davranışı daha komplekstir. İlk olarak, önceden oluşturulmuş olan pasif film, pratikte malzemenin korozyon potansiyeline karşılık gelen U_4 noktasında çözünmeye başlar. Daha sonra, yeniden pasivizasyon U_4 - U_5 bölgesinde, gerilim düşüşünün çoğunun şimdi meydana geldiği gözenekli bir oksit filmi büyür. U_5 noktasında, oksit filmdeki elektrik alan kuvveti, çarpma veya tünel iyonizasyonu nedeniyle filmin ötesinde kırıldığı kritik bir değere ulaşır. Bu durumda, küçük ısıldayan kıvılcımların, oksit filmin yüzeyi boyunca hızla hareket ettiği ve büyümesinin devam etmesini kolaylaştırdığı gözlenir. U_6 noktasında, darbe iyonizasyon mekanizması, termal iyonizasyon işlemlerinin başlamasıyla desteklenir ve daha yavaş, daha büyük ark deşarjları ortaya çıkar. U_6 - U_7 bölgesinde termal iyonizasyon, kalınlaşan oksit filmin büyük kısmındaki negatif yük oluşumu tarafından kısmen engellenir ve bu da substratın boşalma-bozunma kısılmasına neden olur. Bu etki, ortaya çıkan ark deşarjlarının nispeten düşük gücünü ve süresini belirler, yani mikro deşarjlar, bunlar "mikro arklar" olarak adlandırılır. Bu "mikro ark" sayesinde, film kademeli olarak eritilir ve elektrolitin içerdiği elementlerle alaşımlanır. U_7 noktasının yukarısında, film boyunca meydana gelen ark mikro deşarjları alt tabakaya nüfuz eder ve (negatif yük bloke edici etkiler artık oluşamayacağından) filmin termal çatlaması gibi tahrip edici etkilere neden olabilecek güçlü, yaylara dönüşür. Pratikte, elektrot yüzeyinin bitişik alanları üzerinde yukarıdaki elektrot işlemlerinden birkaçı eş zamanlı olarak gerçekleşebilir. Normalde

geleneksel elektrolizde karşılaşılan basit iki fazlı elektrot elektrolit modeli, bu nedenle, bir dizi olası faz sınırına sahip daha karmaşık dört fazlı bir sistem (metal-dielektrik-gaz-elektrolit) ile değiştirilmelidir ve özellikle elektrokimyasal sistemler kritik seviyenin üzerinde çalışırken U_1 ve U_5 voltajları dikkate alınır. Ana voltaj düşüşünün yoğunlaştığı iki düşük iletkenlik fazı (yani dielektrik ve gaz) oluşur. Bu nedenle, elektrokimyasal sistemlerin iki türe ayrılması farklı değildir [55,62]. Ayrıca bugüne kadar yapılan çalışmalarda üç farklı deşarj oluşum modelinden bahsedilmiştir. Bu modellere ilişkin şematik gösterim Şekil 3.5'te gösterilmiştir [66].



Şekil 3.5. Deşarj kanallarının kesitten şematik görünümü [66]

Şekil 3.5'de gösterilen deşarjlar A, B, C olarak tanımlanmıştır. B tipi deşarjlar proses sırasında oluşan bölgesel yüksek elektrik alan şiddetinden dolayı tüm kaplamanın dielektrik olarak bozunmasıyla meydana gelmektedir ve A ve C tipi deşarjlar ise yüzeyde yer alan mikro gözenekler içinde gaz deşarjı olarak meydana gelmektedir. Dolayısıyla B tipi deşarjların etkisiyle kaplamanın içe doğru büyüdüğü ileri sürülmektedir ve volkan tipi gözeneklerin oluştuğu belirtilmektedir. A ve C tipi deşarjlar ise yüzeye yakın (A tipi) ve derin (C tipi) mikro gözeneklerde meydana geldiğinden ve B tipi deşarjlara göre daha düşük enerjiye sahip olduklarından dolayı yüzeyde küçük ve büyük gözenekler meydana getirmektedir. B tipi deşarjlar ana metalin oksitlenmesi sonucu metalin kendi oksiti içine doğru büyürken, A ve C tipi deşarjlarda elektrolit bileşenleri ile var olan oksit ve ergiyik metal reaksiyona girdiği için elektrolit bileşenlerini içeren oksitler dışarı doğru büyümektedir [65-69].



Şekil 3.6. Alüminyumun MAO işlemi için kullanılan çeşitli elektrolitlerin $I=f(U)$ fonksiyonu, anodik polarizasyon, (1) Hızlı metal çözünmesi, (2) Yavaş metal çözünmesi, (3) Dar voltaj aralığında metal pasifleşmesi, (4) Geniş bir pasifleşme aralığıyla komple kompleks davranış, (5) Zayıf ve (6) Güçlü metal pasifleşmesine öncülük edebilir [55]

Alüminyumun Şekil 3.6' da MAO işlemi için kullanılan çeşitli elektrolitlerin $I=f(U)$ fonksiyonu, anodik polarizasyon gösterilmiştir. MAO prosesinin pratikte gerçekleştirilebilmesi, metal-elektrolit ikili seçiminin dikkatli şekilde yapılmasını gerektirir. Bunun için genellikle metal pasifleşmesi için kullanılan polarizasyon test verileri esas alınabilir. Şekil 6' da alüminyum alaşımları üzerinde oksit kaplaması üretmek için kullanılan elektrolitler 6 gruba ayrılmıştır. [55,63]

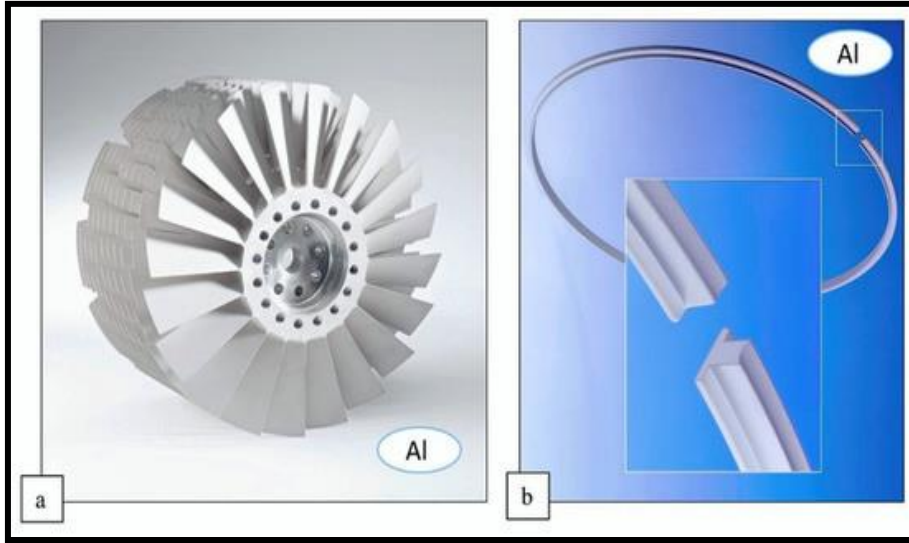
1. Alüminyumun hızlı çözünmesini sağlayan tuz çözeltileri NaCl, NaClO₃, NaOH, HCl, NaNO₃
2. Yavaş metal çözünmesi sağlayanlar, H₂SO₄, (NH₄)₂S₂O₈, Na₂SO₄
3. Dar bir voltaj aralığında metal pasifleşmesi sağlayan elektrolitler, sodyum asetat, fosforik asit;
4. Kompleks davranış gösteren florür elektrolitler, KF, NaF;
5. Metalin zayıfça pasifleşmesini destekleyen elektrolitler;
6. Metalin güçlü şekilde pasifleşmesini destekleyen elektrolitler, borik asit, fosforik ve karbonik asit, inorganik polimerler (silikatlar, alüminatlar, tungstat, molibdat) ve alkali metal fosfatlar [55,63].

Şekil 3.6 'de görüldüğü gibi (4)-(6) gruplarındaki elektrolitler, kıvılcım oluşum voltajına ulaşılmasını kolaylaştırdığından MAO yöntemiyle kaplama üretimi için en avantajlı olanlardır [55,63].

Son yıllarda, çeşitli yüzey modifikasyon teknikleri yoluyla mükemmel yüzey özelliklerine sahip metalik malzemelerin geliştirilmesine uzun süredir önemli araştırmalar ayrılmıştır. Neyse ki, mikro ark oksidasyon (MAO) tekniği de dahil olmak üzere yüzey modifikasyon prosedürleri kullanılarak bu sorunlar çözülebilir. Üniform, kalın, sert, aşınmaya ve korozyona dirençli ve oldukça yapışkan kaplamalar üretilebilir. Anahtar faktör olarak, MAO prosedürlerinde farklı çözümlerin kullanılması kaplamalarda yapı, bileşim ve farklı özelliklerle sonuçlanabilir. MAO prosedürlerinin faydalarından biri, solüsyonlara çeşitli katkı maddeleri eklemek ve uygun özelliklere sahip kaplamalar oluşturmaktır. Karbon nanotüpler, grafit, elmas ve grafen gibi karbon allotroplarının önemli özelliklerinden dolayı, MAO kaplamaların özelliklerini artırmak için uygun bir seçenek olabilirler. Bu katkı maddeleri, MAO kaplamalarda bu katkı maddelerine katkıda bulunarak ve bunları emerek ve sonuç olarak çatlak veya gözeneklerin sayısını ve boyutunu azaltarak ve kaplamaların kalınlığını ve yoğunluğunu artırarak aşındırıcı iyonların kaplamalara penetrasyonunu ve oranını azaltabilir ve böylece korozyon korumasını artırabilir. Aşınma açısından bakıldığında, bu katkı maddeleri nedeniyle kaplamaların yoğunluğunu ve sertliğini artırmak veya bazı durumlarda katkı maddelerinin kendi kendini yağlama özellikleri aşınma direncini geliştirir [55,70,71].

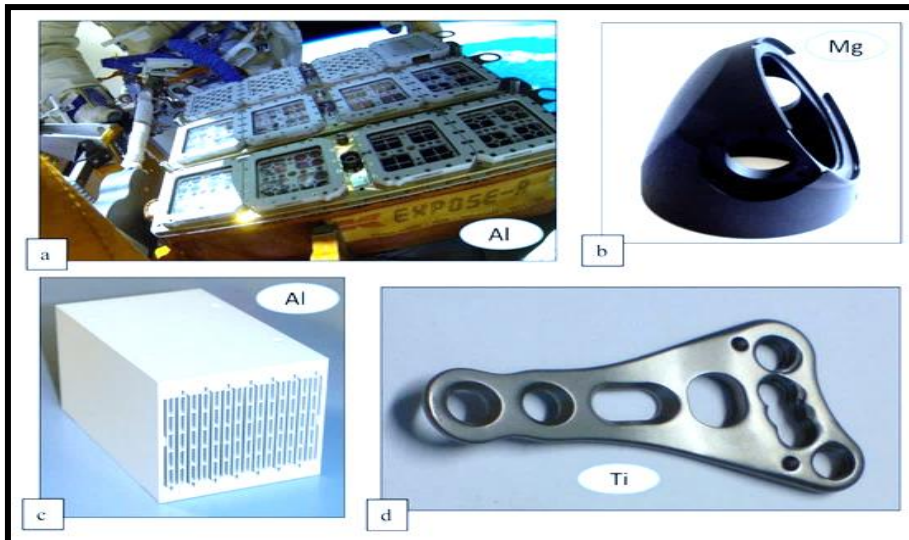
MAO teknolojisi henüz gelişmekte olan bir teknoloji olduğundan, malzeme yüzeyinde gelişen seramik filmin oluşum ve gelişim mekanizması ile oluşan seramik filmin özelliklerinin tam olarak anlaşılabilmesi için pek çok çalışmanın yapılması gerekmektedir. Fakat bugüne kadar yapılan çalışmalar temel alındığında, MAO teknolojisinin pek çok avantajı olduğu yalnız bunun yanında bazı dezavantajları da beraberinde getirdiği gözlenmiştir [72].

MAO kaplı alüminyum, düşük yoğunluğu ve yüksek aşınma ve korozyon direncine bağlı olarak, atmosferlerle karşı karşıya kalan hızlı hareket eden parçalar için yaygın olarak kullanılmaktadır. Resim 3.1' de bir turbo moleküler pompanın rotorunu ve bir merkezleme halkası göstermektedir. Bileşenler gazları taşımak ve plazma aşındırma işlemleri için kullanılmakta ve yaklaşık 10.000 dak^{-1} dönme hızlarında çalışmaktadır [73,74].



Resim 3.1. (a) Çapı yaklaşık 15 cm olan, (b) bir turbo moleküler pompanın rotoru [73]

Ayrıca, MAO kaplı cihazlar uzay mühendisliği uygulamaları için ilgi çekicidir. Katmanlar, iyi malzemeye bağlanmaları nedeniyle mükemmel ısıl döngü direncine sahiptir. Bu nedenle, MAO katmanlarında pullanma olmaksızın değişen ışınlama ve gölgeleme sonucunda uzayda meydana gelen muazzam sıcaklık dalgalanmalarına dayanırlar. Bunun bir örneği Resim 3.2'de gösterilmektedir. Fotoğraf, uluslararası uzay istasyonu ISS' deki EXPOSE deneyinin yakından görünüşünü göstermektedir [73,74].



Resim 3.2. Uluslararası uzay istasyonu ISS'deki EXPOSE deneyi a), bir ısı emici (b), optik döküm bileşeni (c) ve osteosentez için bir plaka (d) [73]

MAO'nun başka bir uygulama alanı, diş ve ortopedik implantlar için bütünleştirici kaplamaların üretimi gibi tıp mühendisliğidir. İmplant materyalleri, biyouyumluluk, toksisite olmaması, kimyasal stabilite ve korozyon direnci gibi belirli gereksinimleri karşılamalıdır. Orta yoğunlukta ve iyi bir özgül dayanıklılıkla titanyum implantlar için tercih edilen bir malzemedir [73].

Bu durumda, yüzey işleme teknolojisi kimyasal ve mekanik özelliklerin daha da iyileştirilmesinde kilit rol oynayacaktır. Seramik kaplama ile çelik alt tabaka arasındaki bağlanma mukavemeti yüksektir [75].

Seramik kaplama, yüksek sıcaklık direnci, yüksek sertliği, güçlü korozyon direnci, kararlı kimyasal özellikleri ve Al alaşımlı yüzeylere yüksek bağlama kuvveti nedeniyle Al alaşımlarının korozyon direncini iyileştirmek için umut verici kaplama malzemeleri olarak kabul edilmiştir [76].

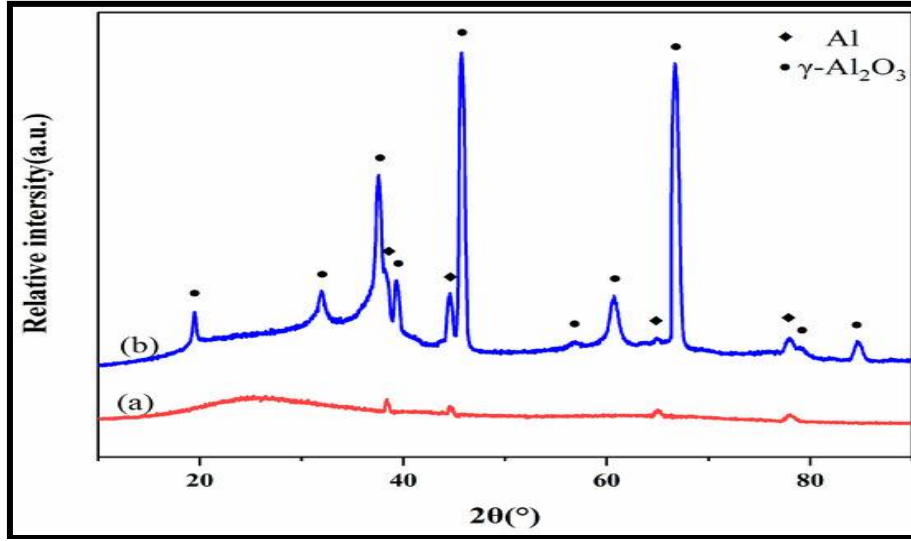
4. TEZ ÇALIŞMASININ LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Teknolojik olarak kullanılan malzemelerin pek çoğuna uygulanan mukavemet arttırma mekanizmaları ile yeni gelişmiş ürünler elde etmek mümkündür. Bu amaçla mukavemet arttırma mekanizmalarından bir ya da birkaçı kullanılarak malzemeleri daha fonksiyonel çevresel koşullara adapte olabilen fonksiyonel malzemeler haline getirme çalışmaları devam etmektedir. İşte bu amaçlı kullanılan alüminyum 7075 serisi farklı kaplama metotları uygulanarak gelişmiş ürün profiline sahip yeni teknolojik ürünler olarak karşımıza çıkmaktadır bu çalışmada kullanılan alüminyum serisine geçmişten günümüze kadar uygulanan bazı çalışma örnekleri aşağıdaki gibidir.

Mikro ark oksidasyonu Markov ve çalışma arkadaşları 1970'lerde, bir ark deşarj koşulu altında bir alüminyum anot üzerinde oksit birikmesi de tarafından geliştirildi, incelendi ve daha sonra bu teknik geliştirilmiştir [55].

Sert anotlama tarihinde ilk sülfürik asit ile eloksal işlemi 1927'de Gower ve O'Brien tarafından patentlenmiştir [48].

Shao ve arkadaşları; 7050 alüminyum alaşımına uygulanan MAO kaplaması, sert anotlama kaplamasından daha iyi korozyon direncine sahip olduğunu elektrokimyasal testlerle teyit etmiştir. MAO kaplamasının çok daha üstün koruması, kristalli bileşimlerden ve güçlü arayüzey yapışmasından kaynaklanır. Ayrıca, MAO kaplamadaki kusurlar, korozif iyonların yolunu karmaşık hale getirdi ve kompakt iç katman, korozif iyonların difüzyonu için daha sağlam bir bariyer sağladığını göstermişlerdir. 7050 Al alaşımları üzerindeki Sert anotlama (a) ve Mikro ark oksidasyon (b) kaplamalarının X-ışını kırınım (XRD) modelleri Şekil 4.1' de gösterilmiştir [77].



Şekil 4.1. 7050 Al alaşımları üzerindeki Sert anotlama (a) ve Mikro ark oksidasyon (b) kaplamalarının X-ışını kırınım (XRD) modelleri [77]

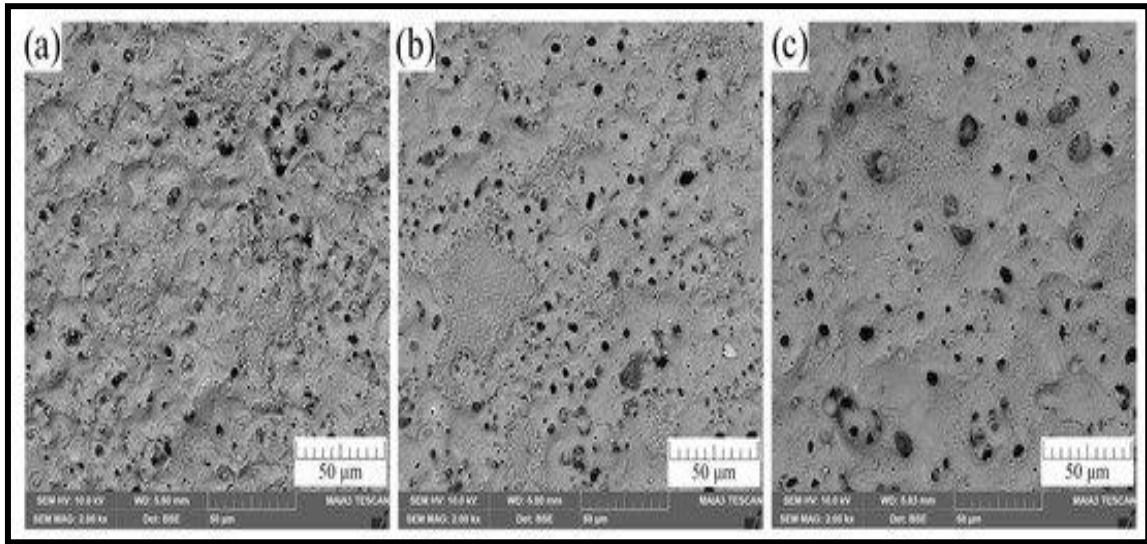
7075 alüminyum alaşımına mikro ark oksidasyon (MAO) uygulanan bir çalışmada; MAO ile işlem görmüş olan tüm numuneler, alt tabakaya kıyasla daha iyi korozyon ve aşınma direnci gösterdiği görülmüştür [78].

MAO, işlenmiş 5754 alüminyum alaşımı üzerinde sert ve kristal alümina tabakası oluştururken, nispeten yumuşak ve amorf tabaka sert anotlama ile geliştirilmiştir. MAO kaplama, daha yüksek aşınma direnci ve daha düşük sürtünme katsayısı açısından sert anotlama kaplamaya göre üstün tribolojik performans sergilediği bulunmuştur [79].

7075 alüminyum alaşımına uygulanan 10 A dm^{-2} altında uygulanan MAO kaplama, nispeten kalın, kompakt ve pürüzsüz bir tabaka olarak optimum mikro yapı ve daha az kusur sergilemiştir. 10 A dm^{-2} altında elde edilen MAO kaplaması, mikro sertlik testi ile iyi tutarlı olan en üstün aşınma önleme özelliğini göstermiştir. MAO kaplamasının kritik yükü, akım yoğunluğunun artmasıyla kademeli olarak azaldığı, ancak yine de yüksek bir seviyede kaldığı, bu da kaplama ile alt tabaka arasında iyi bir bağ olduğunu gösterdiği tespit edilmiştir. 10 A dm^{-2} akım yoğunluğu altında hazırlanan MAO kaplaması en yüksek korozyon direncine sahiptir. 10 A dm^{-2} altında elde edilen kaplamanın, kaplamanın morfolojisi ile doğrudan ilişkili olan en iyi korozyon direncini sergilediğini kanıtlamıştır [80].

Hafif metal (Al, Mg, Ti) alaşımları üzerine uygulanan deneysel koşullar altındaki numuneler, DC anodize filmlere kıyasla MAO (Mikro Ark Oksidasyon) kaplamalarla daha düşük gözeneklilik ve daha yüksek korozyon direnci gösterilmiştir. Korozyon koruması ise, MAO filmin polimer emdirilmesi ile önemli ölçüde artırılabilirdiği gözlemlenmiştir [81].

Bu çalışma da erimiş tuzda gerçekleştirilen Al 7075 alaşımına uygulanan MAO (Mikro Ark Oksidasyon) işleminin araştırılmasına odaklanılmıştır. SEM gözlemiyle, işlemin mevcut frekansındaki artışla yüzey gözenekliliğinin arttığı görülmüştür. MAO akım frekansının morfolojiyi ve bunun sonucunda da korozyon direncini etkilediği belirlenmiştir. Bu nedenle, MAO işleminin mevcut frekansı ne kadar yüksekse, alaşımın korozyon direnci o kadar büyük olur. Al 7075 alaşımının MAO işleminden sonra SEM ile elde edilen yüzey morfolojileri Resim 4.1 de gösterilmiştir [82].



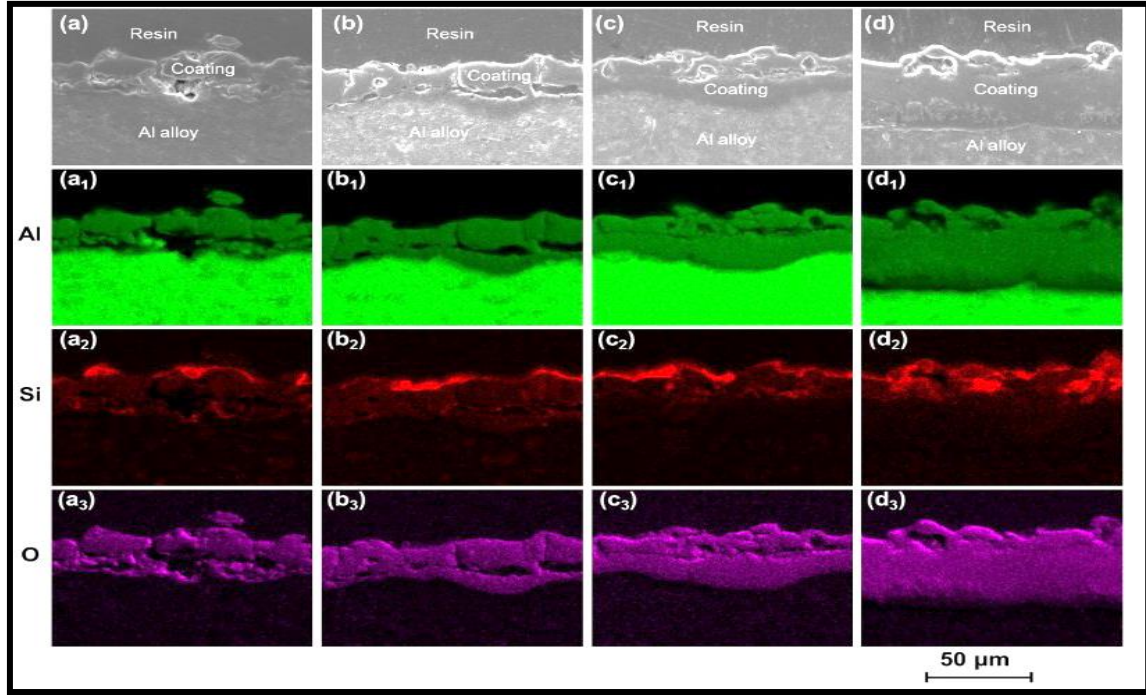
Resim 4.1. Al7075 alaşımının MAO işleminden sonra SEM ile elde edilen yüzey morfolojileri (a) Sam-200 Hz, (b) Sam-300 Hz, (c) Sam-400 Hz [82]

Yapılan bir çalışma da 7075-T7351 Al alaşımının yorulma performansı ve etki faktörleri, kaplanmamış numuneler ve ağırlıkça % 5,0 NaCl sulu çözeltide gözenek sızdırmazlığı yapılan numunelerin epoksi reçineyle gözenek kapatma işlemi sayesinde, elverişsiz termal mikro çatlaklar ve mikro gözenekler dolduruldu. Bu nedenle, gözenek sızdırmazlık işlemi MAO kaplamalı 7075-T7351 Al alaşımının korozyon yorgunluğu performansını da iyileştirebildiği görülmüştür [83].

7075 alüminyum alaşımı numunelerinde mikro ark oksidasyon (MAO) kaplanmış tüm numunelerin, kaplanmamış olanlara kıyasla daha yüksek korozyon direnci ile karakterize edildiğini göstermektedir. Bununla birlikte, partikülsüz veya gümüş partiküllü anotlama ve MAO kaplama, kirlenmeye çok meyillidir ve kaplamasız veya aşındırıcı kumlama alüminyum alaşımına kıyasla daha hızlı kolonize olur. Bakır parçacıkları ile işlenmiş yüzey MAO altında iyi bir kirlenme önleyici etki sergiler ve SVET analizi, parçacıkların varlığının alt tabakada galvanik korozyon oluşturmadığını ortaya koymaktadır [84].

Termal spreyleneş alüminyum (TSA) üzerinde oluşturulan mikro ark oksidasyon (MAO) kaplaması, TSA kaplamasıyla ara yüzeyde yoğun bir iç bariyere sahip üç katmanlı bir yapı sunarak, püskürtülen katmana uygun bir bağlanma mukavemeti gösterdi. TSA kaplamasının tribolojik davranışı, hem kuru hem de tribokorozyon koşullarında daha küçük malzeme kayıpları ve tribokorozyon koşullarında daha düşük sürtünme katsayısı gösteren MAO işlemi ile iyileştirilmiştir. Çalışma sonucunda, MAO tekniğı ile modifiye edilen TSA kaplaması, uzun vadeli korozyon davranışında bir gelişme ve üretilen oksit tabakasının yüksek sertliğı ve seramik doğası nedeniyle aşınma ve sürtünme direncinde bir artış gösterdiği tespit edilmiştir [85].

Al2024 alaşımına farklı katodik gerilimler ile uygulanan mikro ark oksidasyon (MAO) kaplamanın büyüme mekanizması, yapısal özellikleri ve yapışması yakından ilişkilidir ve uygulanan katodik voltajlardan önemli ölçüde etkilenir. Katodik voltaj arttığında, MAO işlemlerinde alt tabakanın oksidasyonu daha baskın hale gelir ve kaplama büyümesi daha çok içe doğru büyüme ile karakterize edilir. Buna göre MAO kaplamaların içe doğru büyümesinin artması, daha kompakt kaplama yapısı ve daha yüksek yapışma mukavemeti elde ettiği sonucuna varılmıştır. Farklı katodik voltajda oluşan MAO kaplamaların kesit morfolojileri ve element dağılımı Resim 4.2 de gösterilmiştir [86].



Resim 4.2. Farklı katodik voltajda oluşan MAO kaplamaların kesit morfolojileri ve element dağılımı [86]

Yapılan bir çalışmada; alüminyum 7075 alaşımlarına uygulanan RRA ısıtılmasıyla 200°C sıcaklıkta yeniden çözeltiye alınıp su verilen ve %5 ön deforme edildikten sonra 120°C'de 24 saat yeniden yaşlandırılan numunelerin %14 den %20'ye kopma uzaması değerinin arttığı gözlemlenmiştir [87].

İncelenen kum püskürtme ve mikro ark oksidasyon (MAO) işlemleri yapılan in vitro ve in vivo olarak incelenen Ti64/SA ve Ti64/7 iyon implantları, tavşanların kaval kemiğine yerleştirilmiştir. Yerleştirilen Ti64/SA ve Ti64/7 (Ca, P, Mg, Zn, Si, Sr ve Mn) iyonlarının implantlar çevresinde yüksek kemik yapışmasına sahip olduğunu gösterdi. Ti-6Al-4V alaşımının MAO aracılığıyla, yedi elementin iyonlarını içeren bir çözelti içinde MAO ile muamelesi, hem gözenekli bir yapının hem de implant yüzeyinde büyüyen oksit tabakasına dahil edilmiş biyoaktif elementlerin faydalarını birleştirdiği için dış implantlarının performansını iyileştirme üzerine etkili bir yaklaşım olacaktır [88].

Alüminyum Köpüklere uygulanan mikroark oksidasyon (MAO) işlemi ile, gözenek boyutunun küçülmesi veya gözenekliliğin artması ile ses yutuculuğu kademeli olarak artar. MAO uygulamasından sonra maksimum ses absorpsiyon katsayısı ~% 5,5 artar. Mikro

gözeneklere ve yüzey ile hava arasındaki sürtünmeyi artırarak ses dalgası kaybını artıran İyileşme pürüzlü yüzeye dayandırılır [89].

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Malzeme

7075-T6 Alüminyum alaşımı, havacılık ve uzay, otomotiv, inşaat vb. bileşenlerinin üretiminde yaygın olarak kullanılan önemli bir metaldir. Uzay sanayide kullanılan en temel yapısal alaşımlardan olması, mikro ark oksidasyonu ve sert anotlama ile kaplama işlemine uygun olması ve kolay temin edilebilirlik avantajından dolayı 7075-T6 alüminyum alaşımı deneysel çalışmalar da tercih edilmiştir. Deneysel çalışmalar da 7075-T6 alüminyum Ami Metals Inc üretimi olan plaka numuneler kullanılmıştır. Standart (TS-EN 573-3) Al 7075 kalite alüminyumun kimyasal bileşimi Çizelge 5.1’de verilmiştir.

7075-T6 alüminyum kalite olan 100x100 mm ebatlarında 5mm kalınlığında olan numuneler öncelikle Mikro ark oksidasyon ve sert anotlama ile kaplama işlemleri için hazır hale getirilmiştir. Al 7075-T6 yüzeyine kaplama işlemi yapıldıktan sonra numuneler 10x10 mm ebatlarında 5 mm kalınlığında kesilerek aşınma testine hazır hale getirilmiştir

Çizelge 5.1. Al 7075 kalite alüminyumun kimyasal bileşimi (% ağırlık)

Standart (TS-EN 573-3)	ELEMENTLER (%)								
	Fe	Si	Mn	Cr	Ti	Cu	Mg	Zn	Al
	0,14	0,063	0,04	0,175	0,021	1,72	2,61	5,7	Kalan

5.2. Sert Anotlama İşlemi

Deneysel çalışmalar da kullanılacak olan 7075-T6 alüminyum alaşımı numuneler Sert Anotlama (HA) ile öncelikle temizlenmiştir. Daha sonra hazırlanan numunelere Mikron Makine A.Ş. tarafından kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Sert anotlama işlemi 7075-T6 alüminyum üzerine MIL-A-8625F standardı Tip III ve Sınıf-1 kriterine göre yapılmıştır. Firma süreçleri doğrultusunda işlem zamanları değiştirilerek 20µm, 50µm ve 100µm kalınlıklarında kaplamalar oluşturularak farklı kaplama kalınlıklarının performansları incelenmiştir.

Sert Anotlama işleminde kullanılmış olan parametreler:

Asit Derişimi: 250 g/l H₂SO₄

Banyo Sıcaklığı:-2/4 °C

Akım Yoğunluğu: 2,7 -3,0 A/dm²

Voltaj Farkı: 30-40 V

Zaman: 50 dk (20 µm), 110 dk (50 µm), 180dk (100 µm)

5.3. Mikro Ark Oksidasyon İşlemi

Deneyisel çalışmalar da kullanılacak olan 7075-T6 alüminyum alaşımı numuneler Mikro ark oksidasyon (MAO) ile kaplama işlemi için öncelikle temizlenmiştir. Mikro ark oksidasyon kaplama işlemi Atatürk Üniversitesinde bulunan Plasma Technology Limited şirketi tarafından üretilen Mikro ark oksidasyon cihazında ortalama 2 µm uygulanmıştır. MAO kaplama için kullanılan kaplama cihazı Resim 5.1' de gösterilmiştir.



Resim 5.1. Kaplama işlemin de kullanılan MAO cihazı

Kaplama işlemi öncesinde MAO işlemi üzerinde etkin olan frekans, voltaj ve zaman parametreleri sabit olarak belirlenmiştir. Mikro ark oksidasyon işleminde frekans değeri 1000 Hz değerinde frekans uygulanmıştır. İşleme uygulanan pozitif ve negatif voltaj sırasıyla 420V ve 100V değerleri üzeri uygulanmış ve pozitif görev döngüsü (Duty Cycle) %20 negatif görev döngüsü %5 değerlerinde çalışılmıştır. Hazırlanan numuneler öncelikle alkol ile temizlenerek daha sonrasında numuneye tutucuya yerleştirilmiş ve kaplama işlemi pH değeri 11 olan içeriği 8gr/L Sodyum Alüminat (NaAlO_2) ve 1,5g/L Potasyum Hidroksit (KOH)'den oluşan sulu çözelti kullanılmıştır. Uygulanan deneysel işlemde 7075-T6 alüminyum alaşımı numunesi anot, paslanmaz çelik banyo duvarı da katot olarak seçilmiştir. Proses boyunca elektrolit karıştırılmış ve 30°C'lik sıcaklığın üzerinde bir sıcaklığa çıkmaması için banyo duvarı içerisinden geçirilen soğutma suyu ile soğutulmuştur. Daha sonra MAO işlemi uygulanan kaplanmış 7075-T6 alüminyum alaşım numuneleri saf su ve alkol ile yıkanarak kurutulmuştur.

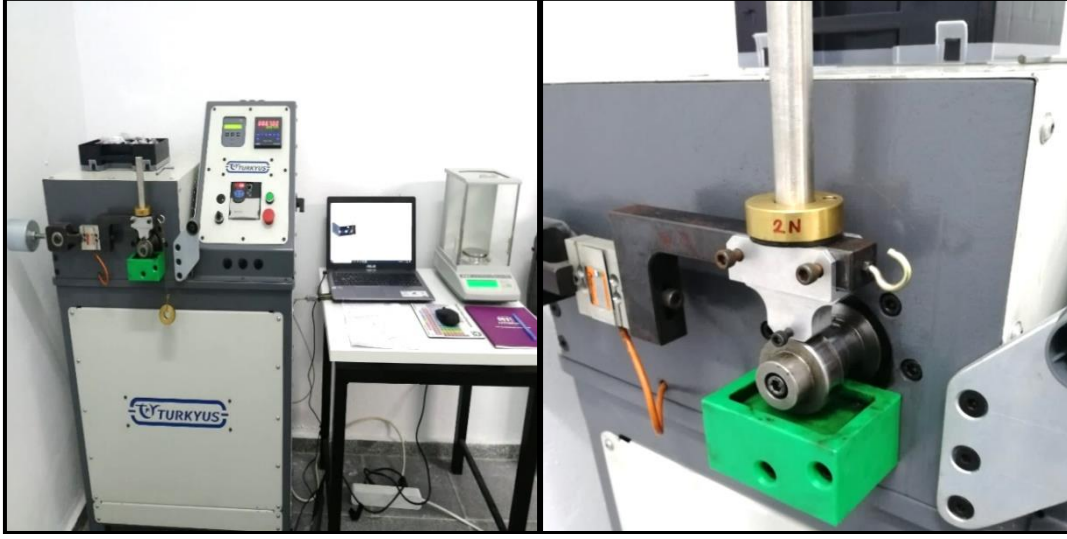
5.4. Aşınma Testi

Deneysel çalışma da Mikro ark kaplama yapılan numuneler en ve boy ebatları 10x10mm ebatlarında numuneler aşınma testine hazır hale getirilmiştir. Deneysel aşınma testi çalışması Necmettin Erbakan Üniversitesi Seydişehir Ahmet Cengiz Mühendislik Fakültesinde bulunan Turkeyus marka Aşınma Test Cihazında yapılmıştır.

7075-T6 alüminyum yüzeyi kaplanan Mikro ark oksidasyon ve Sert anotlama yapılan numunelere 10X10X5 mm boyutlarında kesildikten sonra alkol ile temizlendikten sonra aşınma testine hazır hale getirilmiştir. Hazırlanan mikro ark oksidasyon ve sert anotlama kaplanmış olan numuneler sırası ile 0,5 m/s kayma hızında, 5N, 10N, 15N olacak şekilde farklı yükler seçilerek ve kayma mesafesi 50,100,150m olacak şekilde aşınma testine tabii tutulmuştur. Deneysel çalışma da kullanılan aşınma işlemi parametreleri Çizelge 5.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.2. Aşınma testine tabi tutulan numunelerin parametreleri

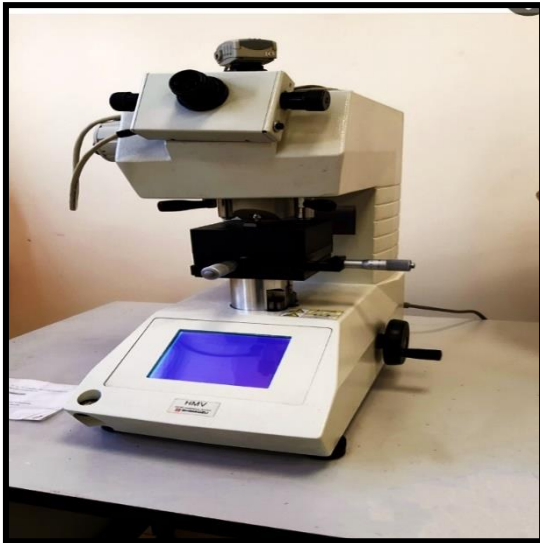
Malzeme	Kayma Hızı	Yük	Kayma mesafesi (Aldığı yol)
Mikro ark 2 μm	0,5m/s	5N/10N/15N	50-100-150m
Sert Anotlama 20 μm	0,5m/s	5N/10N/15N	50-100-150m
Sert Anotlama 50 μm	0,5m/s	5N/10N/15N	50-100-150m
Sert Anotlama 100 μm	0,5m/s	5N/10N/15N	50-100-150m



Resim 5.2. Aşınma Testi uygulamasında kullanılan cihaz görünümü

5.5. Mikrosertlik Testi

Deneysel çalışma da malzeme yüzeyi kaplanmış 7075-T6 alüminyum alaşımı ve kaplanmamış 7075-T6 alüminyum alaşımı numunelere metalografi işlemi uygulandıktan sonra Gazi Üniversitesinde bulunan Shimadzu firması tarafından üretilen mikrosertlik test cihazında sertlik testi ölçümleri yapılmıştır. Kaplanmış malzemelere 0,3 kgf kullanılarak ve her numunenin 5 farklı bölgesinden mikro sertlik (HV0.3) ölçümleri gerçekleştirilerek aritmetik ortalamaları hesaplanmıştır. Mikrosertlik numune ölçümü için kullanılan cihaz Resim 5.3' de gösterilmiştir.



Resim 5.3. Shimadzu marka mikrosertlik cihazı

5.6. Mikroyapı Analizleri

Mikroyapı çalışmaları için metalografik süreçlere göre hazırlanmış mikro ark oksidasyon ve sert anotlama işlemi ile kaplanmış 7075-T6 alüminyum alaşımı ve kaplanmamış 7075-T6 alüminyum alaşımının hazırlanma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde Resim 5.4'de gösterilen cihazlarda zımparalama ve parlatma metalografi işlemleri uygulanmıştır. Zımparalama işlemi 400,600,800,1200 gridlik SiC zımparada yapılmıştır. Nihai polisaj işlemi ile tamamen çiziksiz, net bir mikroyapı elde etmek amacıyla zımparalama işleminden sonrası ile sonra 9 μ m, 3 μ m ve 1 μ m altında (kolloidal silika) elmas pasta ile parlatılarak tamamlanmıştır.



Resim 5.4. Metalografik çalışmalarda kullanılan Zımparalama- Parlatma cihazları

5.7. Optik Mikroskop

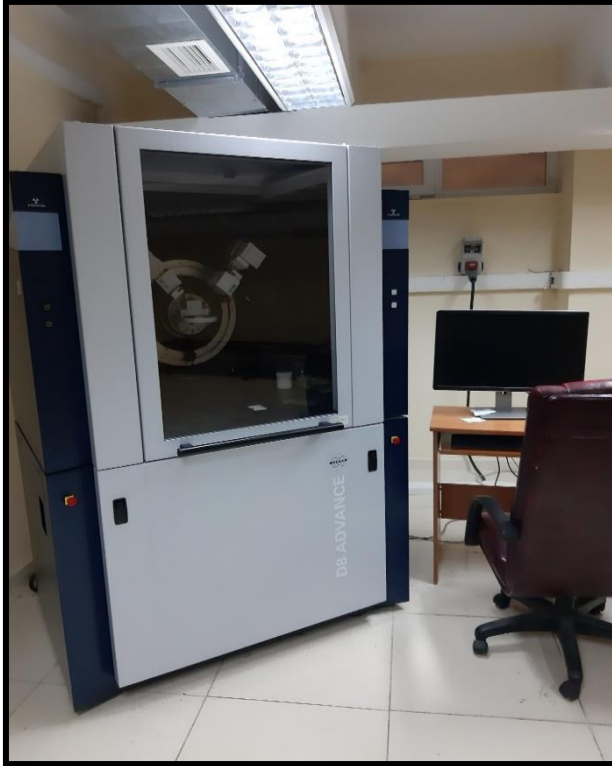
7075-T6 alüminyum ve 7075-T6 alüminyum yüzeyi mikro ark oksidasyon ve sert anotlama ile kaplanmış olan numunelerin optik mikroyapı incelemeleri Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde bulunan ve Resim 5.5'de gösterilen Leica DMI5000 M, Leica LAS yazılımı ile ters çevrilmiş araştırma mikroskopunda gerçekleştirilmiştir.



Resim 5.5. Leica DMI5000 M yazılımı ile ters çevrilmiş araştırma mikroskobu

5.8. XRD Analizleri

7075-T6 Alüminyum alaşımı yüzeyine $2\mu\text{m}$ mikro ark oksidasyon ve $20\mu\text{m}$, $50\mu\text{m}$, $100\mu\text{m}$ sert anotlama kaplama yapılan numunelere X-ışınları kırınımı analizi yapılmıştır. Bu analizler, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde bulunan ve Resim 5.6'da gösterilen Bruker4 Marka D8 Advanced marka cihazda 20 - 100 derece 2θ aralığında 3246 step ve tarama hızı 0,6 s. koşulları altında gerçekleştirilmiştir.



Resim 5.6. Bruker Marka D8 Advanced XRD cihazı

5.9. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Mikroyapı incelemelerinde Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde bulunan JEOL JSM-6060LV marka Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılmıştır (Resim 5.7). SEM incelemeleri için tüm numuneler zımparalama ve parlatma işlemleri sonrası Keller çözeltisi ile 190ml su (5 ml nitrik asit 3 ml klorik asit 2 ml florik asit) dağlanmıştır. Dağlama süresi bütün numunelerde yaklaşık 30 sn olarak belirlenmiş ve bu süreler sonunda numuneler dağlayıcının yüzeyden uzaklaştırılması için su ile yıkanmış ardından etil alkolle kurutulmuştur.

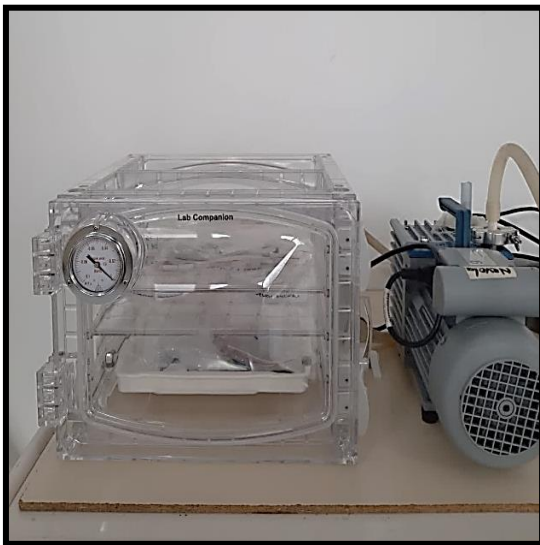
SEM için hazırlanan numunelerin mikro ark kaplama kalınlık ölçümü sonuçları alınmıştır.



Resim 5.7. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

5.10. Vakum Desikatör

Deneysel çalışmalarda kullanılan 7075-T6 alüminyum alaşımı numuneleri açık atmosfer ile bağlantısını en aza indirmek için Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde bulunan ve Resim 5.8'de gösterilen JEIOTECH VDC-21U marka polikarbonat gövdeden yapılmış maksimum 1.13×10^{-4} MPa vakum yapabilen kübik vakum desikatör içerisinde muhafaza edilmişlerdir.



Resim 5.8. Numunelerin muhafazasında kullanılan vakum desikatör

6. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Deneysel çalışmalar da 7075-T6 alüminyum Ami Metals Inc üretimi olan plaka numuneler kullanılmıştır. 7075-T6 alüminyum kalite olan 100x100 mm ebatlarında 5mm kalınlığında olan numuneler, kaplama işlemi yapıldıktan sonra numuneler 10x10 mm ebatlarında 5 mm kalınlığında kesilerek aşınma testine tabi tutulmuştur. Kplama işlemlerinin ardından sertlik, mikroyapı incelemeleri, XRD analizleri ve SEM görüntüleri ile birlikte meydana gelen yapısal farklılıklar araştırılmıştır

6.1. Aşınma Testi Sonuçları

Deneysel çalışmalar için hazırlanan 7075-T6 ısıt işlem uygulanmış alüminyum yüzeyi mikro ark oksidasyon ve sert anotlama ile kaplanmış olan numunelere aşınma testi, mikrosertlik, XRD ve SEM işlemleri uygulanarak tüm sonuçlar ele alınmıştır. Kplama yapılan numunelere aynı şartlarda mikroyapı karakterizasyonunu sağlanabilmesi için deneysel çalışmalar bölümünde açıklandığı gibi metalografi işlem basamakları uygulanmıştır.

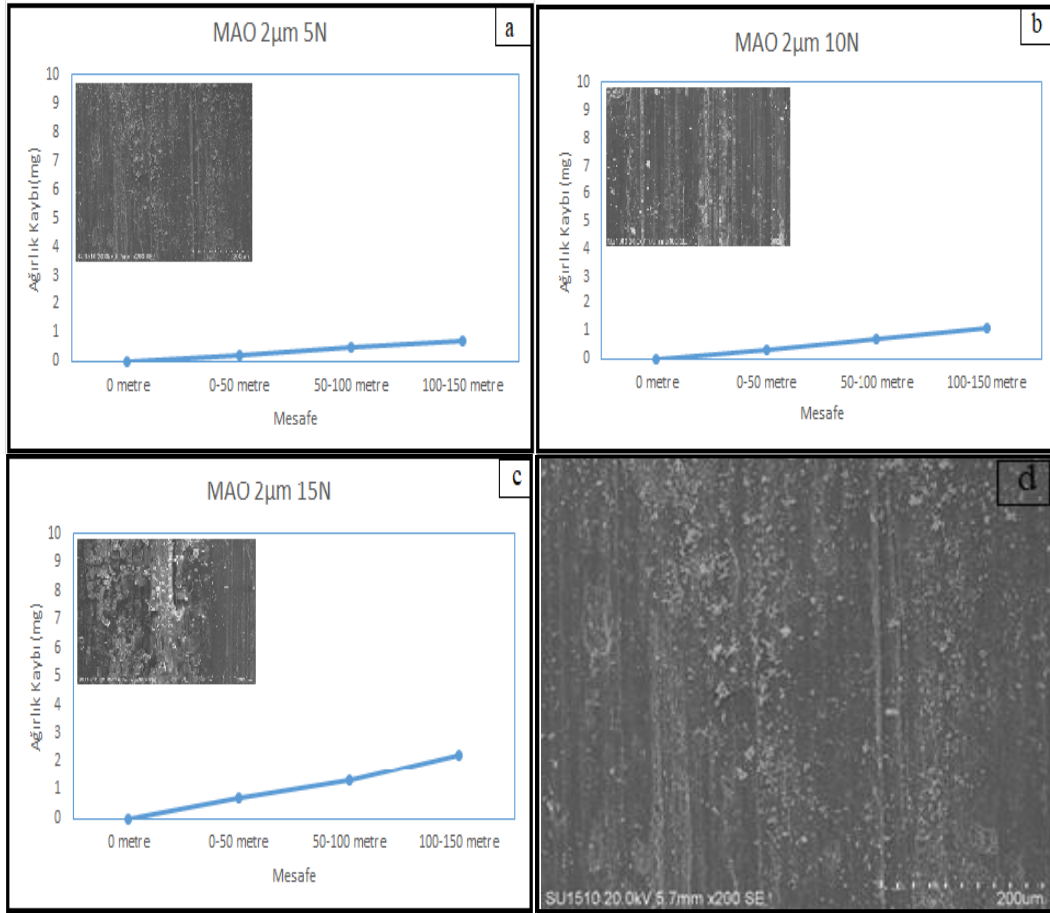
Mikro ark oksidasyon ve sert anotlama ile kaplanan numunelere oda sıcaklığında aşınma performansını ve daha da önemlisi dayanıklılığını belirlemek için aşınma testleri uygulanmıştır. Kaplamaların aşınma performansını belirlemek için yapılan deneyler için test yükü ve toplam kayma mesafesi sırasıyla 5N,10N,15N ve 50-100-150 m olarak seçilmiştir. MAO ve HA uygulanan malzemelerin aşınma testi ağırlık kaybı sonuçları Çizelge 6.1’de ve aşınma yüzeyi Ağırlık kaybı/Mesafe ve SEM görüntüsü Şekil 6.1, Şekil 6.2, Şekil 6.3, Şekil 6.4’de gösterilmektedir.

Çizelge 6.1. Aşınma testi ağırlık kaybı sonuçları

Malzeme	Ağırlık Kaybı			
	0-50 metre Kaybı	50-100 metre	100-150 metre	Toplam Ağırlık
MAO 2 μ m 5N	0,2 mg	0,3 mg	0,2 mg	0,7 mg
MAO 2 μ m 10N	0,3 mg	0,4 mg	0,4 mg	1.1 mg
MAO 2 μ m 15N	0,7 mg	0,6 mg	0,9 mg	2,2 mg
HA 20 μ m 5N	0,3 mg	0,5 mg	0,4 mg	1,2 mg
HA 20 μ m 10N	0,7 mg	0,5 mg	0,6 mg	1,8 mg
HA 20 μ m 15N	1,2 mg	1,3 mg	0,9 mg	3,4 mg
HA 50 μ m 5N	0,3 mg	0,4 mg	0,4 mg	1,1 mg
HA 50 μ m 10N	1,1 mg	1,3 mg	1,3 mg	3,7 mg
HA 50 μ m 15N	2,1 mg	1,8 mg	1,9 mg	5,8 mg
HA 100 μ m 5N	0,8 mg	1,0 mg	1,1 mg	2,9 mg
HA 100 μ m 10N	1,6 mg	2,0 mg	1,9 mg	5,5 mg
HA 100 μ m 15N	3,4mg	3,1 mg	3,3 mg	9,8 mg

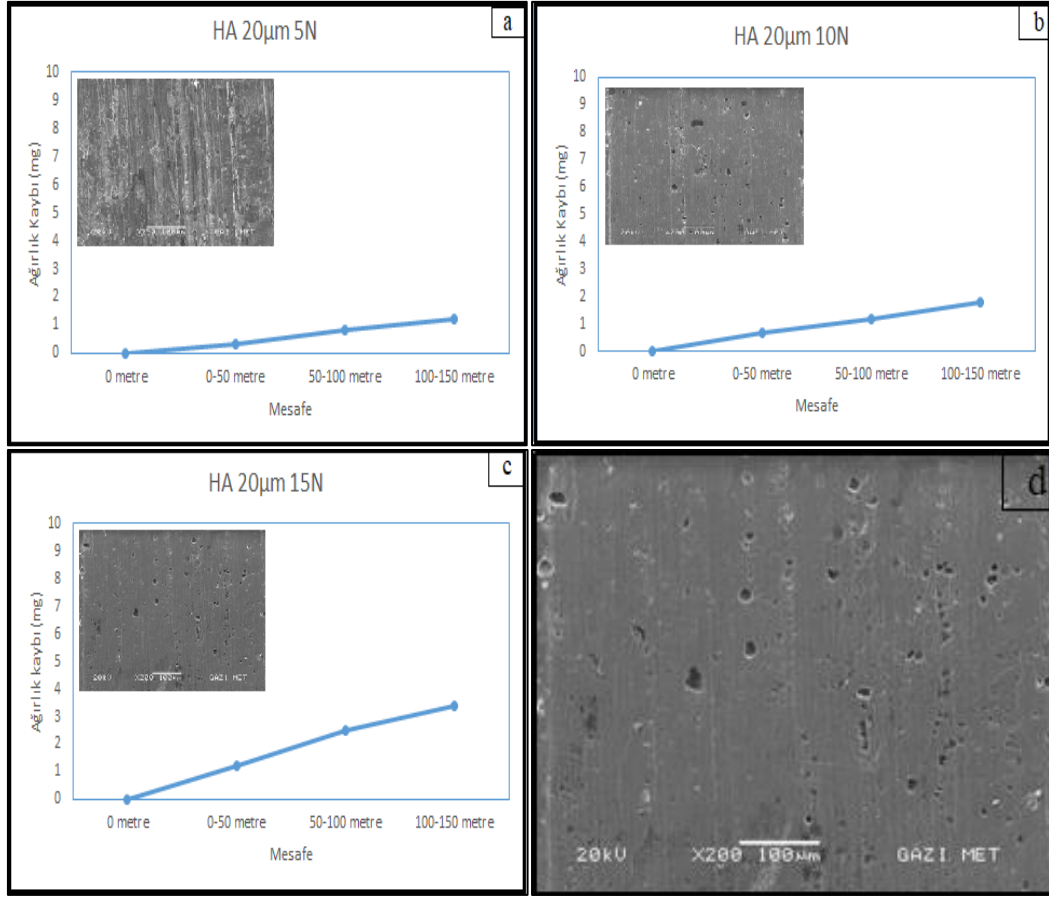
Çizelge 6.1 incelendiğinde birim mesafeye bağlı olarak nispeten homojen bir ağırlık kaybının olduğunu söylemek mümkündür. Ağırlık kayıplarındaki bu homojenlik grafiklerdeki eğiminde doğrusal bir artış olarak yansımıştır. Eğimin dikliğini ise uygulanan kuvvetin artırdığını söyleyebiliriz. Ağırlık kayıpları incelendiğinde sert anotlama 100 μ m kaplı numuneler sert anotlama 50 μ m ve 20 μ m kaplama kalınlığına sahip numunelerin göre ağırlık kaybı daha fazla olması uygulanan yükün artışı ile desteklenerek ara yüzey bağ kuvvetinin zayıf olmasına bağlı olarak daha az aşınma direnci gösterdiği görülmektedir.

Mikro ark kaplamalı 2 μ m kaplama kalınlığına sahip 5N yük uygulanan (Şekil 6.1a) numune diğer kaplamalı numunelere kıyasla ağırlık kaybının en az olmasına bağlı olarak aynı zamanda mesafeler arası değişimin belirginliği ile ara yüzey bağ kuvvetinin daha kuvvetli olmasına bağlanabilir. Buna istinaden mikro ark kaplı 10N ve 15N yük uygulanmış diğer numuneler ise bu sonucu desteklemektedir.



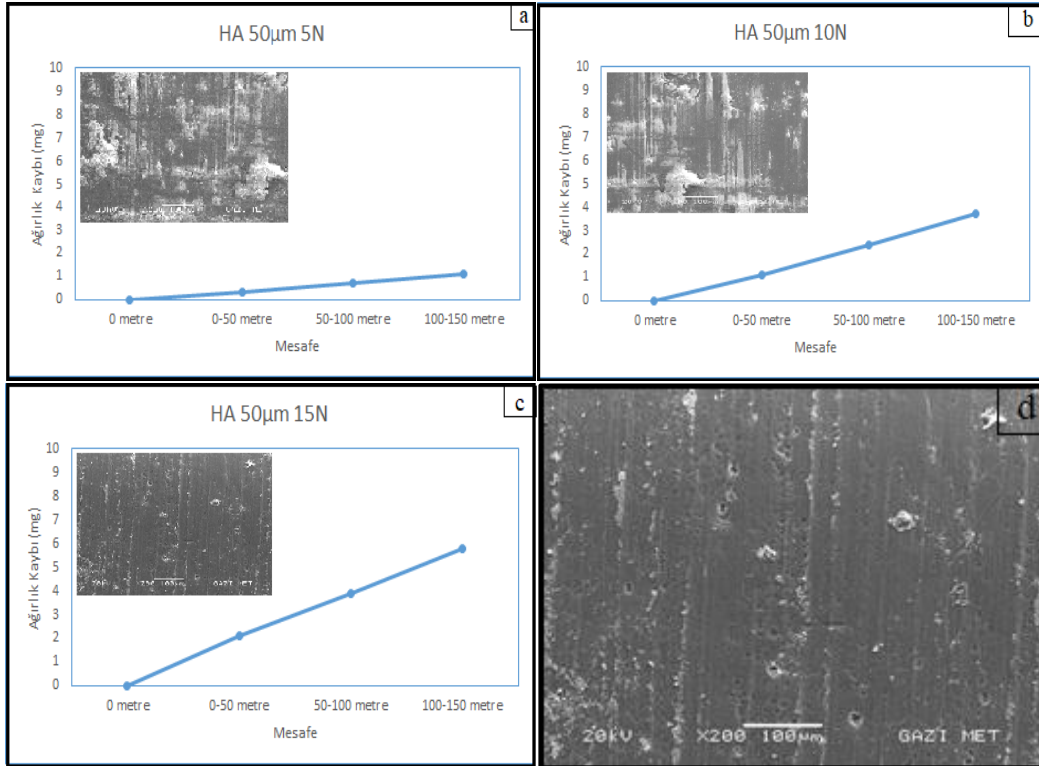
Şekil 6.1. MAO kaplamalı numunelerin aşınma yüzeyi Ağırlık kaybı/Mesafe ve SEM görüntüsü gösterilmektedir a) MAO 2µm 5N, b) MAO 2µm 10N, c) MAO 2µm 15N d) MAO 2µm 5N SEM görüntü

Şekil 6.1d'de 2 mikron kalınlığındaki mikroark oksidasyon işlemine tabii tutulmuş numunenin SEM görüntüsü incelendiğinden uygulanan 5N yükün oluşturmuş olduğu ağırlık kaybı görseli destekler niteliktedir. Oluşan izler incelendiğinde artan ağırlığa bağlı olarak aşınma çizgilerinin belirginleştiği tespit edilmiştir.



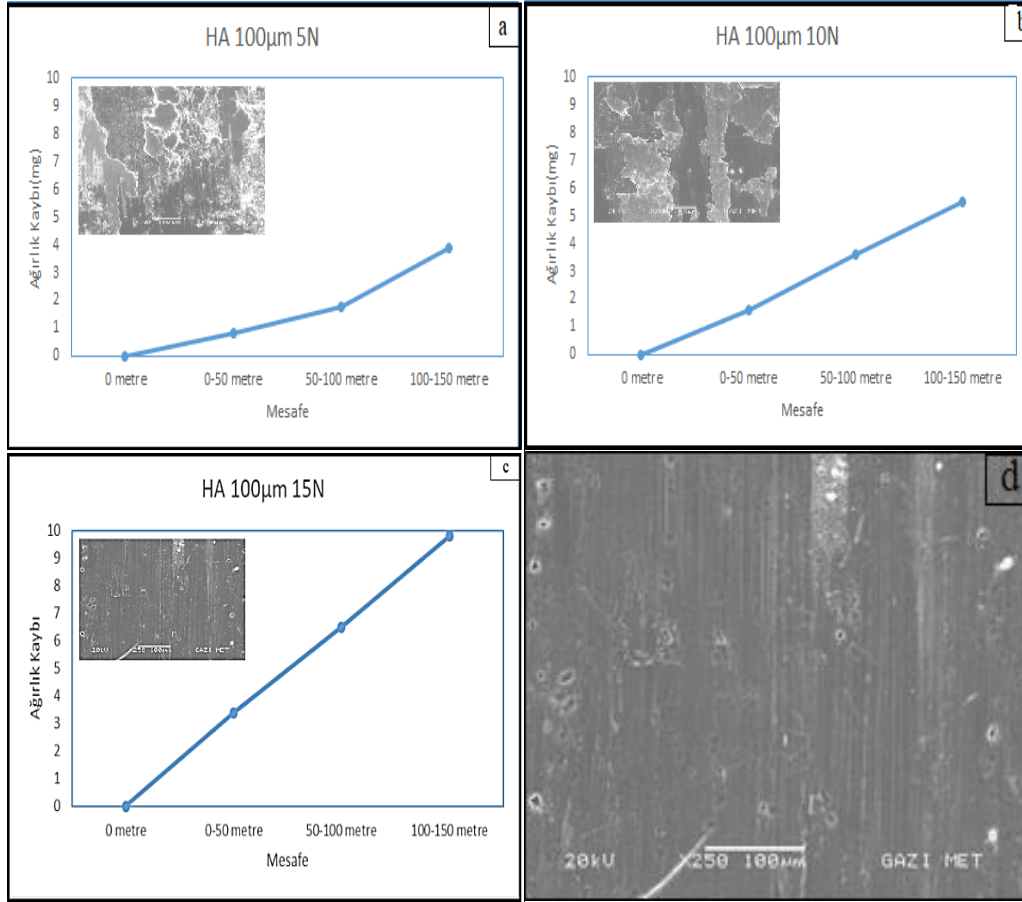
Şekil 6.2. HA kaplamalı numunelerin aşınma yüzeyi Ağırlık kaybı/Mesafe ve SEM görüntüsü gösterilmektedir a) HA 20µm 5N, b) HA 20µm 10N, c) HA 20µm 15N, d) HA 20µm 15N SEM görüntüsü

Şekil 6.2d'de SEM görüntüsü incelendiğinde başlangıç yükü olan 5N da oluşan izlerin kaplama yüzeyinde oluştuğu kanaat oluşmuştur. Artan yüke bağlı olarak (10N ve 15N) kaplamanın tamamen ortadan kalktığı malzemenin altlığı olan alüminyum alaşımında bu aşamadan sonra aşınmanın daha etkin olduğu düşünülmektedir.



Şekil 6.3. HA kaplamalı numunelerin aşınma yüzeyi Ağırlık kaybı/Mesafe ve SEM görüntüsü gösterilmektedir a) HA 50µm 5N, b) HA 50µm 10N, c) HA 50µm 15N, d) HA 50µm 15N SEM görüntüsü

Şekil 6.3d SEM görüntüsü incelendiğinde Şekil 6.1d ve Şekil 6.2d görüntülerini destekler niteliktedir. Ancak artan kaplama kalınlığına bağlı olarak sürecin daha geç gerçekleştiği yani artan kaplama kalınlığının aşınmanın ileri safhalarında tamamen ortadan kalktığı ve buna bağlı olarak da altlıkta oluşan izlerin sürecin ileri aşamalarında gerçekleştiği tespit edilmiştir.



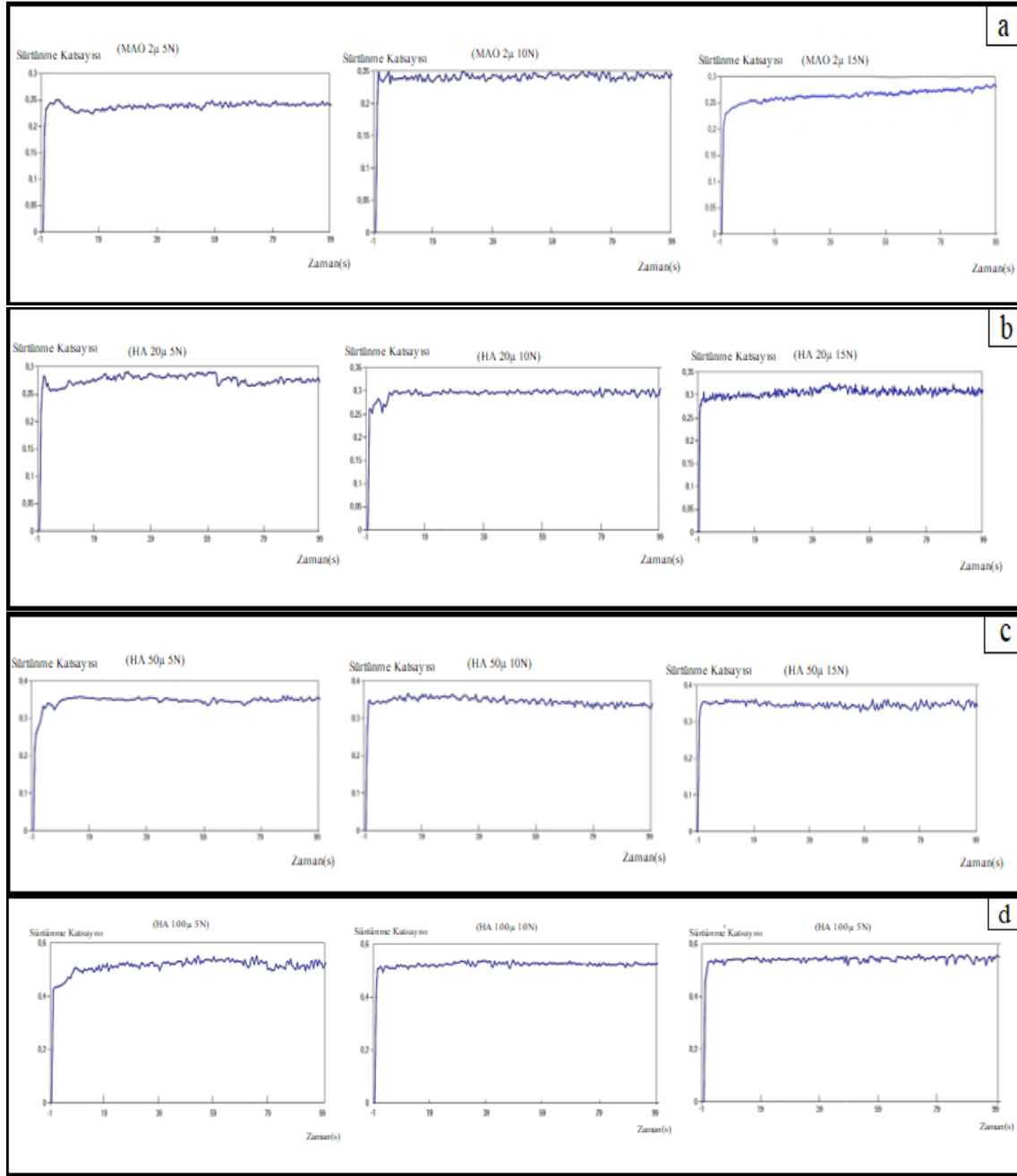
Şekil 6.4. HA kaplamalı numunelerin aşınma yüzeyi Ağırlık kaybı/Mesafe ve SEM görüntüsü gösterilmektedir a) HA 100µm 5N, b) HA 100µm 10N, c) HA 100µm 15N, d) HA 100µm 15N

Şekil 6.4d SEM görüntüsü incelendiğinde hem ağırlık kayıpları noktasında hem de aşınmaya bağlı olarak oluşan görseller tüm oluşan aşınma tavırlarını destekler niteliktedir. Maksimum ağırlık kaybına ulaşılan 15N yükün etkin olduğu bu numunede diğer örneklerle göre en geç kaplamanın tamamen ortadan kalktığı numune olarak tespit edilmiştir. Bu durumu ağırlık kayıpları da destekler niteliktedir.

Sert anotlamanın 100 mikron kaplama kalınlığına sahip 5N yük uygulanan numunesinde (Şekil 6.4a) diğer kaplamalara nazaran hem aşınma oranının artışı hem de mesafeler arası değişimin belirginliği kaplama kalınlığının artmasına ve arayüzey bağ kuvvetlerinin zayıflığına bağlanabilir. Ara yüzey ilişkilerindeki olumsuzluklar aşınma test sonuçlarına bazen azalan bazen de artan etki şeklinde yansıyabilir. Ancak bunlar SEM görüntüleri ile detaylı incelendiğinde yapışmalar ya da derin kopmalar ile izah edilebilir. Mikro ark oksidasyon işlemlerinde aşınma kayıplarındaki artışlarda uygulanan yük etkin olurken sert

anotlama işlemlerinde ise ağırlık kayıpları kaplama kalınlığına ve arayüzey ilişkilerine bağlı olarak değişmiştir.

Uygulanan kaplama ile malzemenin aşınma davranışı, mekanik ve yapısal özelliklerinden doğrudan etkilenir. MAO ve HA kaplamanın geliştirilmiş aşınma direnci sertlik ile de ilgilidir. MAO kaplama, HA kaplamaya kıyasla önemli ölçüde aşınma direnci göstermiştir ve artan test yükü ile birlikte her iki kaplamanın da aşınma oranları artmıştır. Aşınma testi sonuçlarına göre tüm numunelerde 5N test yükü uygulanan numunelerin aşınma izlerinin 10N ve 15N test yükü uygulanan numunelere göre daha az olduğu tespit edilmiştir. Buna istinaden numune SEM sonuçlarına göre test yükünün artışı ile birlikte aşınma izlerinin daha da artmıştır. MAO 2µm 15N yüzeyindeki görünen beyaz renkteki kaplamalar kopan parçaların yeniden yüzeye yapışmış olduğu düşünülmektedir. MAO 2µm ile kaplı numunenin artan test yükleri ile meydana gelen ağırlık kaybının sert anotlama numunelerine kıyasla az olduğu ve böylelikle aşınma direncinin daha yüksek olduğunu göstermektedir. Sert anotlama numunelerinin kaplama kalınlıklarının artmasıyla birlikte ağırlık kaybında arttığı görülmektedir. HA 100 µm kaplama kalınlığının aşınma direnci açısından risk taşıyabilecek bir kaplama kalınlığı olduğu gösterilmektedir [45].



Şekil 6.5. Numunelerin sürtünme katsayısı-zaman grafikleri a) MAO 2 μm kaplama, b) HA 20 μm kaplama, c) HA 50 μm kaplama, d) HA 100 μm kaplama

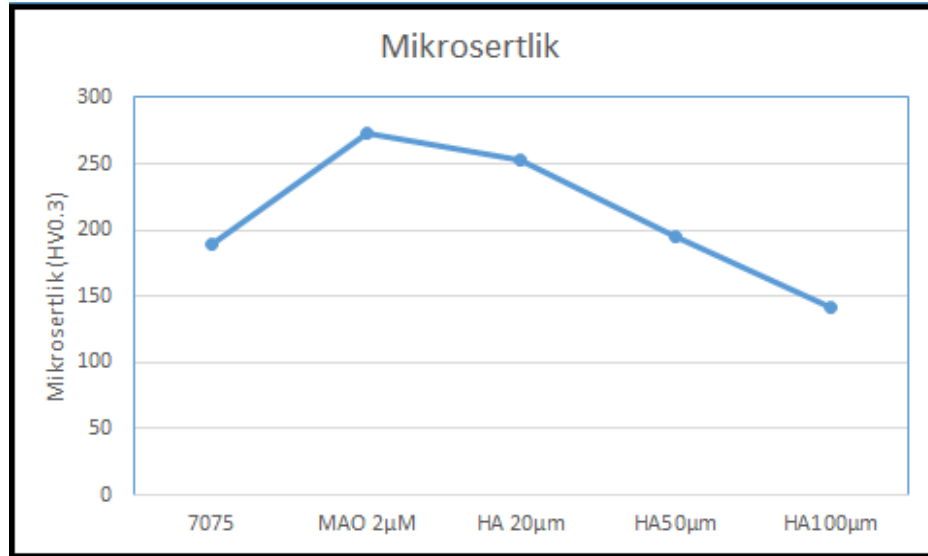
Tüm koşullar için kayma hızı 0,5 m/s olan MAO 2 μm ve HA 20 μm , HA 50 μm , HA 100 μm kaplama yapılan numunelerin sürtünme katsayısı-zaman grafikleri sırasıyla 5N, 10N, 15N test yüküne bağlı olarak Şekil 6.5’de gösterilmiştir. HA 20 μm , HA 50 μm , HA 100 μm kaplı numunelerin sürtünme katsayısı MAO 2 μm kaplı numunelere göre daha yüksektir. Sonuç olarak sürtünme katsayısının artması ile HA kaplı numunelerin aşınma direnci MAO kaplı numunelere göre daha düşük değerler vermiştir.

6.2. Mikrosertlik Sonuçları

Yapılmış olan literatür çalışması ve araştırmalar sonucu sertlik testleri ile elde edilen 7075-T6 alüminyum kaplamasız ve MAO, HA kaplamalı numunelerin kesitlerinden numunelerin 5 farklı noktasından sertlik ölçümlerinden elde edilen verilerin ortalaması HV0.3 mikrosertlik sonuçları Çizelge 6.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.2. Numunelerin mikrosertlik sonuçları

Numune	Numune (HV0,3)					Ortalama (HV0,3)
7075 T6	172,66	182,00	192,35	207,25	191,17	189,9
MAO 2 μ m	274,05	268,85	283,64	265,18	270,66	272,50
HA 20 μ m	243,19	247,11	233,19	272,47	267,96	252,8
HA 50 μ m	198,86	191,33	189,54	199,91	192,87	194,5
HA 100 μ m	128,86	150,27	146,79	144,01	135,87	141,2

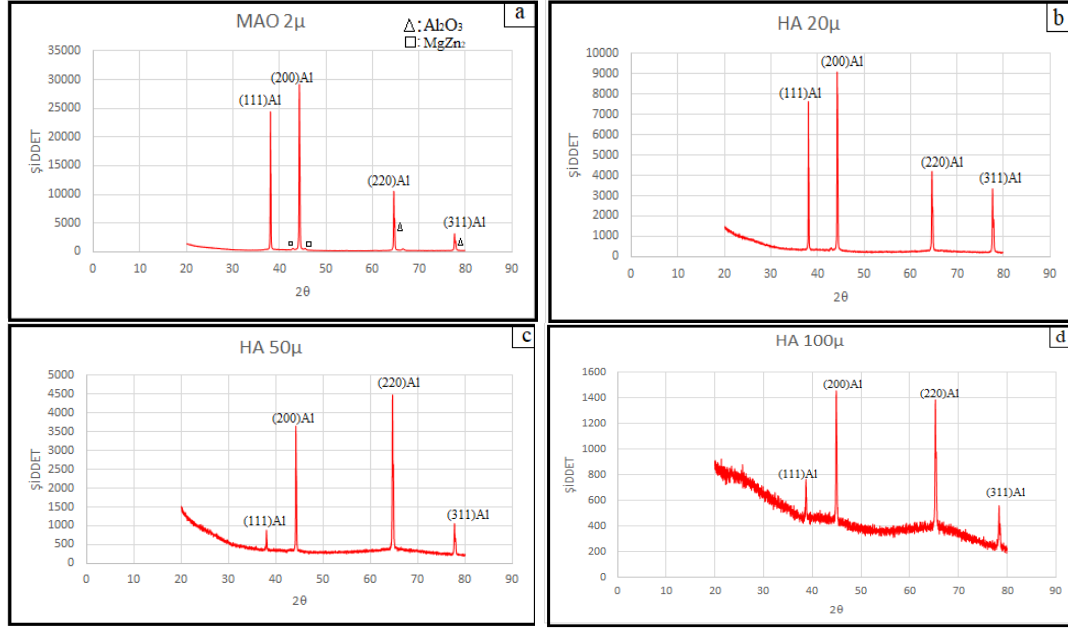


Şekil 6.6. Mikrosertlik grafik sonuçları

Yapılan bu çalışmada 7075-T6 alüminyum alaşımına uygulanan mikro ark oksidasyon ve sert anotlama kaplama karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak yüzeyden 2 μ m mikro ark oksidasyon kaplanan numunelerin mikrosertlik değeri 272,50 (HV 0,3) ölçülmüştür. Sırasıyla 20 μ m, 50 μ m, 100 μ m sert anotlama yapılan numunelerin mikrosertlik değerleri 252,8-194,5-141,2 (HV0,3) ölçülmüştür. Mikro ark oksidasyon kaplanan numuneler daha ince olmasına rağmen daha yüksek sertlik değerleri vermiştir.

6.3. XRD Sonuçları

Şekil 6.6’ da görüldüğü üzere sırasıyla MAO 2µm, HA 20µm, HA 50µm, HA 100µm numunelerinin kaplama özelliklerini görmek için XRD grafikleri gösterilmiştir.



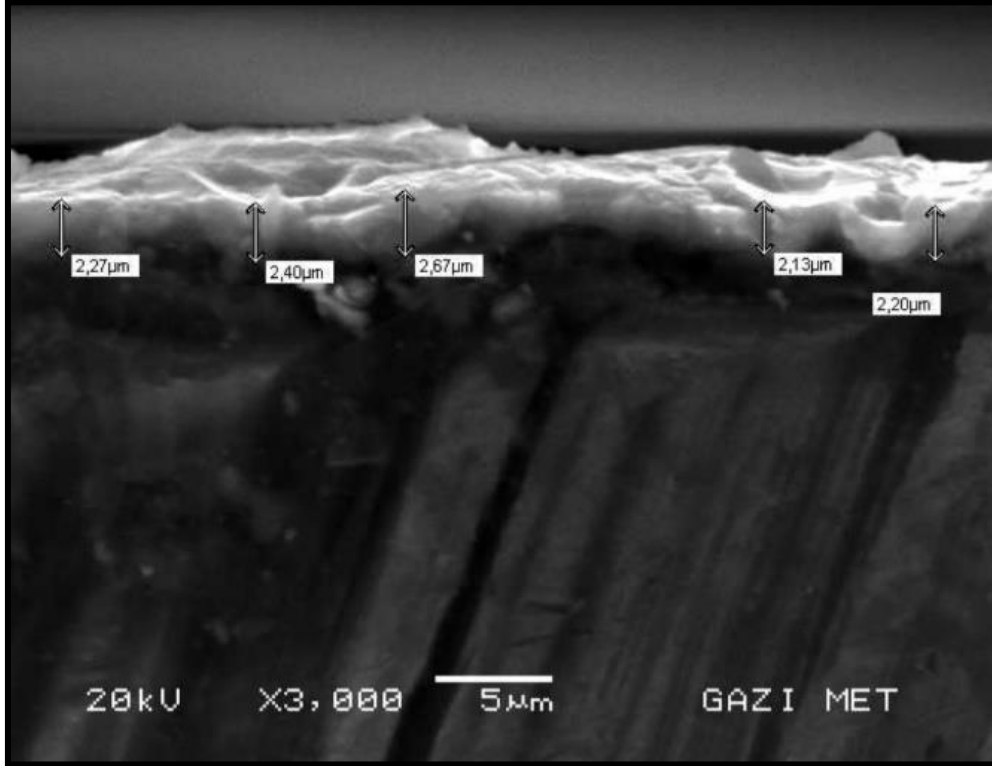
Şekil 6.7. Numunelerin XRD test sonuçları a) MAO 2µm kaplama, b) HA 20µm kaplama, c) HA 50µm kaplama, d) HA 100 µm kaplama

MAO ve HA kaplama yapılan numunelerin XRD grafiklerinde görülen alüminyum pik tepe noktaları, X ışınlarının oksit katmanlarının ötesine nüfuz etmesinden kaynaklanabilir [90]. XRD sonuçlarına göre, MAO numunelerinin yüzeyi kristalli Al_2O_3 (alümina) fazlarından oluşurken, HA numunesinin kaplaması, amorf oksit fazından oluştuğu görülmektedir [79]. HA 100µm olan numunenin HA 20µm ve HA 50µm ile kaplanmış olan numuneye kıyas ile daha fazla amorf yapıya sahip olduğu görülmektedir. Sert anotlanmış (HA) amorf olduğundan, XRD modellerinde kristalli tepeler gözlemlenmedi.

6.4. SEM Mikroyapı Sonuçları

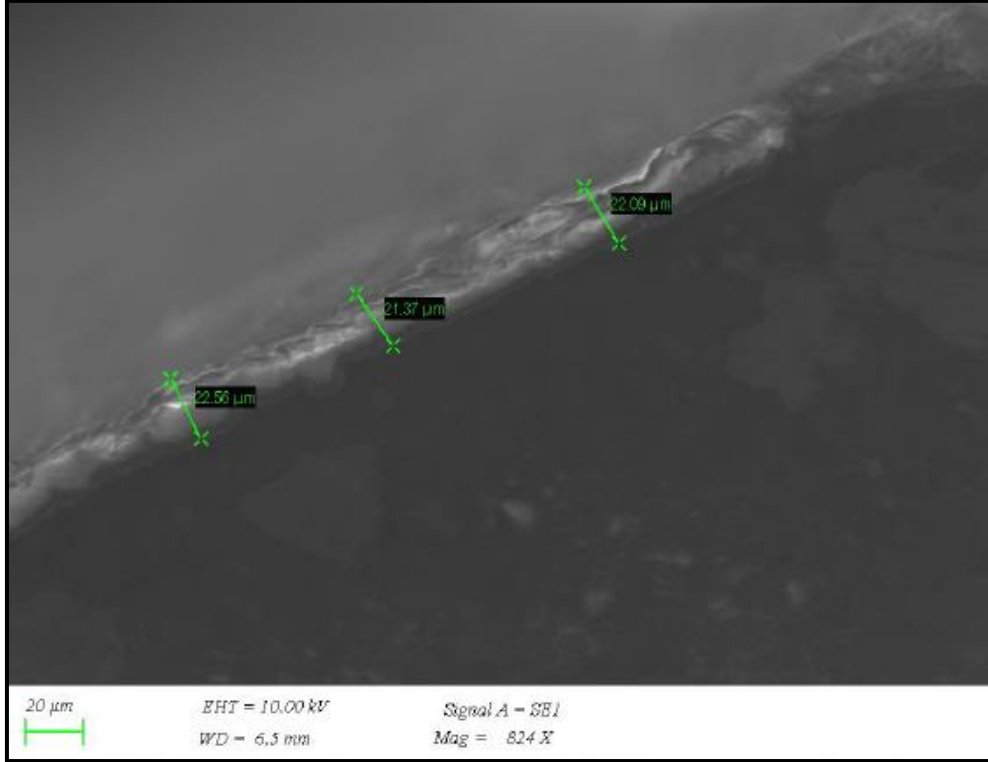
DeneySEL çalışmalar ile mikro ark oksidasyon ve sert anotlama işlemiyle kaplanan 7075-T6 alüminyum alaşımı numunelerinin kaplama kalınlık ölçümü ve numunelerin morfolojik özelliklerini belirlemek amacıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM) cihazı ile kesit

görüntüler alınmıştır. Elde edilen Mikro ark oksidasyon ile kaplama kesiti SEM görüntüsü Resim 6.1 de gösterilmektedir.



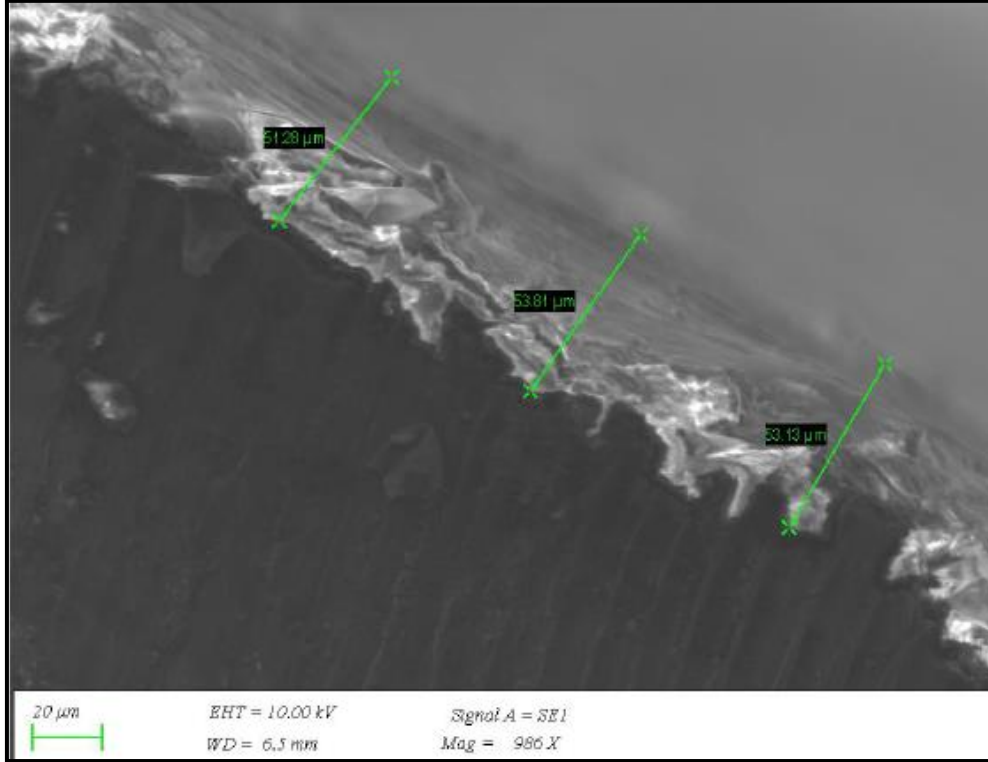
Resim 6.1. 2 µm mikro ark oksidasyon kaplama işlemi uygulanmış 7075-T6 alüminyum alaşımının SEM görüntüsü

Mikro ark oksidasyon kaplanan numunelerin mikroyapısında Resim 6.1’de görüldüğü üzere üst bölgedeki açık renkler kaplamayı göstermektedir. Alt bölgedeki koyu renkler ana malzememizdir. Mikro ark ile 2 µm kaplamanın homojen görünümüne sahip olduğunu görmekteyiz. Numune de açık renkli bölgeler koyu renkli bölgelere göre daha gevrek kırılma sergilemiştir.



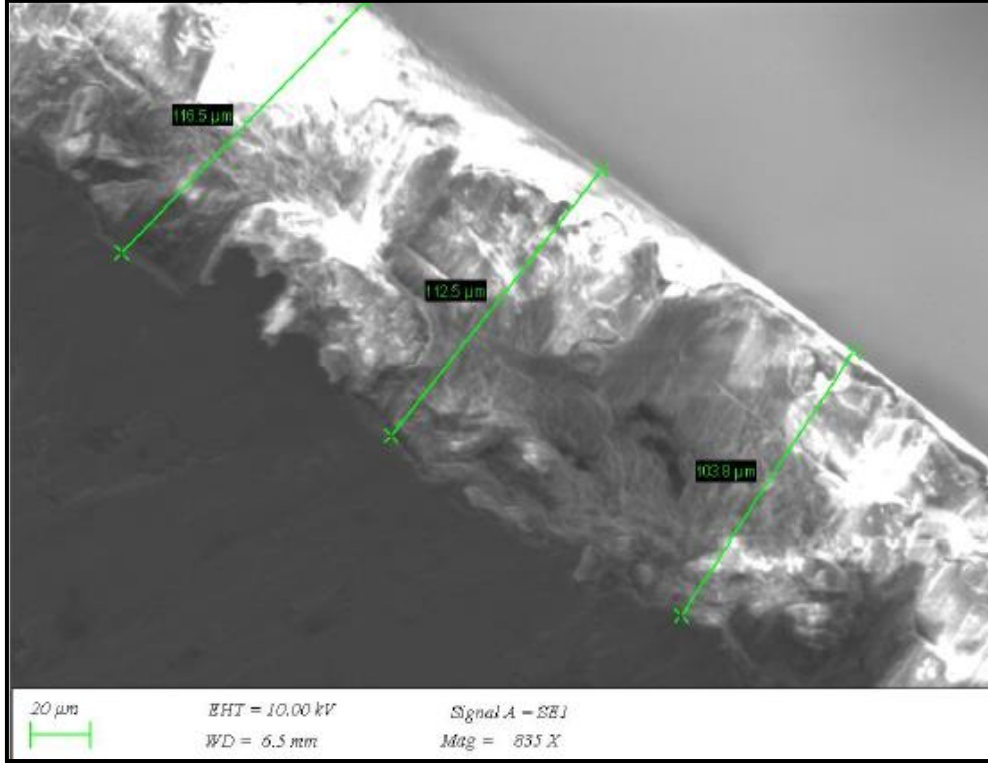
Resim 6.2. 20 μm ile sert anotlama kaplama işlemi uygulanmış 7075-T6 alüminyum alaşıminın SEM görüntüsü

Resim 6. 2 de görüldüğü üzere sert anotlama kaplanan numunenin mikroyapısında şekilde görüldüğü üzere üst bölgedeki açık renkler kaplamayı göstermektedir. 20 μm kaplama tabakasının SEM görüntüsü alınan numunenin oldukça yoğun ve kararlı olduğu görülmektedir. Kaplanmış numunede katmanlı yapı olduğu ve paralel oluşumların yer aldığı görülmüştür. 20 μm ile yapılan kaplamanın mikro ark kaplamaya göre gözeneklerinin daha büyük ve homojen dağılmamış olduğunu görülmektedir [45].



Resim 6.3. 50 μm sert anotlama ile kaplama işlemi uygulanmış 7075-T6 alüminyum alaşımlarının SEM görüntüsü

Resim 6.3’de görüldüğü üzere 50 μm sert anotlama ile kaplama yapılan numunenin üst bölgesinde görülen beyaz parlak kısımlar kaplamayı alt koyu tabaka ise 7075 T6 alüminyum alaşımı ana malzemedir. Kaplama kalınlığının arttıkça açık bölgede de paralel oluşumlarla birlikte dik oluşumlarda başlamıştır. 50 μm ile kaplamanın 20 μm sert anotlama ve 2 μm mikro ark oksidasyon ile yapılan kaplamaya göre daha gözenekli ve homojen olmadığı görülmektedir.



Resim 6.4. 100 μm sert anotlama ile kaplama işlemi uygulanmış 7075-T6 alüminyum alaşımlarının SEM görüntüsü

Resim 6.4’de sert anotlama ile 100 μm kaplanan numunenin SEM görüntüsünde mikroyapısında aynı şekilde görüldüğü üzere üst bölgede ki açık renkler kaplamayı göstermektedir. Kaplama kalınlığı arttıkça açık bölgede de paralel oluşumlarla birlikte dik oluşumlar devam etmektedir.

Tüm yüzey işlemlerinde olduğu gibi özellikle kaplama uygulanan numuneler de kaplama ve malzeme arasındaki arayüzey ilişkisi temeli teşkil eder. Kaplamanın homojenliği, kimyasal kompozisyonu uyumu ve ara yüzeyin temizliği gibi diğer faktörlerle birlikte yapısal duruma etkileyen pek çok faktör vardır. Yüzeyde oluşan kaplamanın kalınlığı, sertliği kimyasal kompozisyonu gibi faktörlerde arayüzey ve mekanik özelliklerde belirleyici unsurlardır.

Bu faktörler ışığında numuneler incelendiğinde, artan kaplama kalınlığının aşınmayı olumsuz etkilerken, mikro ark oksidasyon gibi kimyasal kompozisyonun değişmesiyle birlikte oluşan kaplama türünün de aşınmayı etkilediği gözlemlenmiştir. Literatür ile uyumlu olan aşınma sonuçları SEM görüntülerinde de görüldüğü gibi oluşan kaplama kalınlığının artması ile birlikte arayüzey ilişkisinin farklılaştığını ve bu durumunda aşınma tavrını değiştirdiğini gözlemlenmiştir.

Tüm sonuçları ele alındığında, kaplama kalınlığı, kaplama sertliği ve arayüzey uyumu değerlendirmeleri kullanım alanına uygunluk açısından farklılıklar gösterebilir. Bunun yanı sıra test sonuçlarında kaplama kalınlığının artışı aşınma davranışlarını olumsuz etkilerken korozyif ortamlarda bu durumun farklı sonuçlar doğurabileceği bilinmelidir o açıdan kullanım alanına göre korozyif ortam termal şartlar mekanik uygulamalar gibi farklı performans göstergeleri göz önünde bulundurularak değerlendirme yapmak daha doğru olur.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada 7075-T6 alüminyum alaşımına en uygun parametreler seçilerek yüzey kaplama yöntemlerinden 2µm kalınlığında Mikro ark oksidasyon ve 20 µm,50 µm,100 µm kalınlığında sert anotlama yöntemleri ile kaplama yapılmıştır. Kaplama işlemi yapılan numunelerin 5 ayrı noktasından ölçüm yapılarak aritmetik ortalaması alınarak mikrosertlik sertlik ölçümü yapılmıştır. Ayrıca kaplama işlemi yapılan numunelere aşınma testi ölçümü yapılmıştır. Mikro sertlik ve aşınma testi yapılan numunelerin sertlik ve aşınma direnci özellikleri araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalardan aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

7.1. Sonuçlar

1. Yapılan bu çalışmada 7075-T6 alüminyum alaşımına uygulanan mikro ark oksidasyon ve sert anotlama kaplama karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak yüzeyden 2 µm mikro ark oksidasyon kaplanan numunelerin mikrosertlik değeri 272,50 (HV 0,3) ölçülmüştür. Sırasıyla 20 µm, 50 µm, 100 µm sert anotlama yapılan numunelerin mikrosertlik değerleri 252,8-194,5-141,2 (HV 0,3) ölçülmüştür. Mikro ark oksidasyon kaplanan numuneler daha ince olmasına rağmen daha yüksek sertlik değerleri verdiği tespit edilmiştir.
2. Mikro ark oksidasyonla yapılan kaplama tekniği kullanılarak kaplanan numunelerin sert anotlama ile kaplanan numunelere kıyasla daha sert ve aşınma direnci daha yüksektir.
3. Numunelere uygulanan Taramalı elektron mikroskobu (SEM) mikroyapılarda Mikro ark oksidasyon ile yapılan kaplamanın sert anotlama ile yapılan kaplamaya kıyasla daha homojen yapı göstermektedir.
4. Numunelerin Taramalı elektron mikroskobu (SEM) mikroyapılarda görüldüğü üzere sert anotlama da homojenliğin kaplama kalınlığı arttıkça azaldığı, kaplama bölgesinde paralel oluşumlarla birlikte dik oluşumlarında başladığı görülmüştür.
5. 7075-T6 alüminyum alaşımının mikro ark oksidasyon 2µm ile kaplanan numunelerin ağırlık kaybı sert anotlama 20µm, 50µm, 100µm ile kaplanan numunelere kıyasla daha az olduğu gözlemlenmiştir.
6. Mikro ark oksidasyon (MAO) kaplı numunelerin sürtünme katsayısı aşınma ve sertliğe bağlı olarak HA kaplı numunelere göre düşüktür.
7. XRD grafiklerine göre MAO kaplamaya istinaden HA amorf olduğundan, XRD modellerinde kristalli tepeler gözlemlenmedi.

7.2. Öneriler

1. 7075-T6 alüminyum yüzeyine uygulanan mikro ark oksidasyon ile kaplanan numunenin kaplama kalınlığının daha ince olmasına rağmen sert anotlama ile kaplanan numunelere kıyasla daha iyi aşınma ve sertlik değerleri görülmüştür bu sonuçlara istinaden korozyon direnci test sonuçlarına bakılabilir.
2. 7075-T6 Alüminyum yüzeyine uygulanan mikro ark oksidasyon ile kaplanan numuneler ile farklı kaplama testleri ile yüzey kaplama işlemi uygulanarak aşınma ve korozyon direnci test sonuçlarına bakılabilir.

KAYNAKLAR

1. Sverdlin, A. (2003). *Handbook of aluminum*. (First edition). New York: CRC Press,1-33.
2. Karahan T. (2007). Alüminyum Elektrolizinde İleri Teknoloji Uygulamaları. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 3-5.
3. Davis, J. R. (2001). *Alloying: Understanding the basics*. (First edition). Ohio: ASM International,127-132.
4. Callister, W. D., Rethwisch, D. G. (2011). *Materials science and engineering*. (Ninth edition). New York: John Wiley and Sons. 422,-33.
5. Kadayıfçı, Z. A. (2013). *Benzer ve Farklı Türden Alüminyum Alaşımlarının Sürtünme Karıştırma Kaynağının DeneySEL ve Sayısal Olarak İncelenmesi*, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir,4.
6. William, F.S. and Javad, H. (2009). *Malzeme bilimi ve mühendisliği*. (Fifth edition).New York: Mc Graw Hill Education, 401-416.
7. Askeland, D. R. (1998). *Malzeme bilimi ve mühendislik malzemeleri*, (Çev: Erdoğan, M.). Ankara: Nobel Yayın Dağıtım, 1-348.
8. Bobic, B., Mitrovic, S., Babic, M. and Bobic, I. (2010). Corrosion of metal-matrix composites with aluminium alloy substrate. *Tribology In Industry*, 32, 3-11.
9. Lumley, R. N. (2011). Introduction to aluminum metallurgy. *Production, Processing and Applications*, 1. 1-19.
10. Deschams, A., Dumont, D., Brechet, Y., Sığlı, C. and Dubost, B. (2001), *Process modeling of age-hardening aluminum alloys*. (Third edition). Ohio: ASM International, Materials Park, 298-305.
11. Öz, Ö. (2007). *Yaşlandırma Isıl İşleminin AA 7075 Malzemeli Dikdörtgen Plâğın Burkulma Yüğü Üzerine Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak, 23-25.
12. Tunay, R. F. (2017). *Alüminyum Esaslı Al-25Zn-1Mg Alaşımının Tribolojik Özelliklerinin DeneySEL Olarak İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 7-11.
13. Şendeniz, M. (2006). *Seçilen Bir Al-Mg-Si Alaşımının (AlMgSi0.5:ETİAL 60) Isıl İşlemlerle Özellik Değişimlerinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 78-88.
14. Rendigs, K. H. (1997). Aluminium structures used in aerospace-status and prospects. *Materials Science Forum*. 242, 11-24.
15. Williams, J. C. and Starke Jr, E. A. (2003). Progress in structural materials for aerospace systems. *Acta Materialia*, 51(19), 5775-5799.

16. Oğuz, B. (1990). *Demir dışı metallerin kaynağı*. (First edition), İstanbul: Oerlikon Yayınevi, 20-39.
17. Davis, J. R. (2001). *Aluminum and aluminum alloys*. (Second Edition). Ohio: American Society for Metals, 351-416.
18. Aliofkhazraei, M., Macdonald, D. D., Matykina, E., Parfenov, E. V., Egorkin, V. S., Curran, J. A. and Nabavi, H. F. (2021). Review of plasma electrolytic oxidation of titanium substrates: Mechanism, properties, applications and limitations. *Applied Surface Science Advances*, 5, 1-4.
19. Askeland, D. R., Fulay, P. P. and Wright, W. J. (2010). *The science and engineering of materials*. (Sixth edition). Boston: Cengage Learning Inc, 653-684.
20. Sun, Y. (1998). *Yaşlanabilir Alüminyum Alaşımlarının Aşınma Davranışları*. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2-21.
21. Rotella, G., Dillon Jr, O. W., Umbrello, D., Settineri, L., and Jawahir, I. S. (2013). Finite element modeling of microstructural changes in turning of AA7075-T651 alloy. *Journal of Manufacturing Processes*, 15(1), 87-95.
22. Paturi, U. M. R., Narala, S. K. R., and Pundir, R. S. (2014). Constitutive flow stress formulation, model validation and FE cutting simulation for AA7075-T6 aluminum alloy. *Materials Science and Engineering*, 605, 176-185.
23. Songmene, V., Khettabi, R., Zaghibani, I., Kouam, J. and Djebara, A. (2011). *Machining and machinability of aluminum alloys*. (Fourth edition). Canada: Aluminium Alloys, Theory and Applications, 377-398.
24. Ezatpour, H. R., Parizi, M. T., Sajjadi, S. A., Ebrahimi, G. R. and Chaichi, A. (2016). Microstructure, mechanical analysis and optimal selection of 7075 aluminum alloy based composite reinforced with alumina nanoparticles. *Materials Chemistry and Physics*, 178, 119-127.
25. Naeem, H. T. and Mohammed, K. S. (2015). Effect of Al₂O₃ particulates on the properties of the sintered Al-Zn-Mg-Cu-Ni-Co alloy after T6 and RRA treatments. *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures*, 10(2), 445-454.
26. Özbek, Y. (2020). *Havacılık Ve Uzay Sektöründe Kullanılan 7075 – T651 Alüminyum Alaşımının İşlenmesi İçin Özel İmalat Matkap Uçlarının Deney Tasarımı Yöntemi İle Performansının Optimizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 11-37.
27. Liu, Y., Mol, J. M. C. and Janssen, G. C. A. M. (2016). Combined corrosion and wear of aluminium alloy 7075-T6. *Journal of Bio and Tribo Corrosion*, 2(2), 1-9.
28. Tawakkal, M. I. and Korda, A. A. (2019). Effect of potential on corrosion behavior of tartaric sulphuric acid anodized 7075 T6 aluminum alloys. *Journal of Physics: Conference Series*, 1204, 1-7.

29. Du, Z. W., Sun, Z. M., Shao, B. L., Zhou, T. T. and Chen, C. Q. (2006). Quantitative evaluation of precipitates in an Al–Zn–Mg–Cu alloy after isothermal aging. *Materials Characterization*, 56(2), 121-128.
30. Gündüz, S. (2013). *Metalurjide faz diyagramları*. (2.Baskı). Ankara: Seçkin Yayıncılık, 82-86.
31. Özbek, İ. (2007). A study on the re-solution heat treatment of AA 2618 aluminum alloy. *Materials Characterization*. 58(3), 312-317.
32. Brook, G. B. (1998). *Smithells light metals handbook*. (First edition). Woburn: A division of Reed Educational and Professional Publishing Ltd., 173-178.
33. Vikas, P., Sudhakar, I., MohanaRao, G. and Srinivas, B. (2020). Aging behaviour of hot deformed AA7075 aluminium alloy. *Materials Today*, 41, 1013-1017.
34. Küçük, E., Danacı, D. and Yetiş, Ü. (2017 0). *Waste generation in primary and secondary aluminum sector in Turkey*. 5th International Conference on Sustainable Solid Waste, Atina, Yunanistan 1-9.
35. İnternet: Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü URL: <https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/maden-serisi/img/10Aluminyum.pdf>, Son Erişim Tarihi: 25.09.2020.
36. Dorfman, M. R. (2012). Thermal spray coatings. *Handbook of environmental degradation of materials (Second Edition)*, Oxford: William Andrew Publishing, 569-596.
37. Hanshang, D. (2010). *Surface engineering of light alloys*. Cambridge: Woodhead Publishing, 110-154
38. Aytaç, A. ve Malayoğlu, U. (2018). Fiziksel buhar biriktirme yöntemlerinden PVD ve JVD/DVD ince film kaplamaların karşılaştırılması ve DVD kaplama teknolojisinin endüstriyel uygulamaları üzerine kavramsal, akademik ve teorik bir analiz. *Savunma Bilimleri Dergisi*, 17(1), 131-164.
39. Huang, J. H., Hsu, C. Y., Chen, S. S., and Yu, G. P. (2003). Effect of substrate bias on the structure and properties of ion-plated ZrN on Si and stainless steel substrates. *Materials Chemistry and Physics*, 77(1), 14-21.
40. Bunshatta R.F. (1980). *High rate physical vapour deposition processes*. London: Material Coating Techniques, 21-26.
41. Behera, A., Mallick, P. and Mohapatra, S. S. (2020). (First edition). Amsterdam: *Corrosion Protection at the Nanoscale*. 227-243.
42. Hutchings, I. M. (1992). *Friction and wear of engineering materials*. (Second edition). London: Headline Publishing Group, 78-84.
43. Howes, C. P. (1994). Thermal spraying: processes, preparation, coatings and applications. *Welding Journal*, 73(4), 47-51.

44. İnternet:XINWO URL: <https://www.zjcncmachine.com/what-is-hard-anodizing-difference-between-hard-anodized-and-anodized/>, Son Erişim Tarihi: 21.02.2021.
45. Çal, B. (2018). *Bazı 7000 Serisi Alüminyum Alaşımların Uzay Çalışmalarına Yönelik Olarak Sert Anodlama Yöntemi İle Kaplanması, Mekanik-Çevresel Testleri Ve Karakterizasyonu*. Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 8-179.
46. İnternet:Manufacturing Guide URL: <https://www.manufacturingguide.com/en/hard-anodizing>, Son Erişim Tarihi: 22.02.2021.
47. Vargel, C. (2004). *Corrosion of aluminium*. (Second Edition). Oxford: Elsevier Ltd.399-403.
48. Sheasby, P. G. and Pinner, R. (2001). *The surface treatment and finishing of aluminum and its alloys*. (Fifth edition). Ohio:ASM International Materials Park, Ohio, 92-108.
49. Snizhko, L. O., Yerokhin, A. L., Pilkington, A., Gurevina, N. L., Misnyankin, D. O., Leyland, A., and Matthews, A. (2004). Anodic processes in plasma electrolytic oxidation of aluminium in alkaline solutions. *Electrochimica Acta*, 49(13), 2085-2095.
50. Sharma, A.K. and Bhojaraj, H. (1989). Thermoanalytical studies of anodic oxide coatings on aluminium. *Plating Surface Finish*, 76 (2) ,59-61.
51. Wernick, S. and Pinner, R. (1972), *The surface treatment and finishing of aluminum and its alloys*. (Fourth edition). Teddington: Draper Publishers, 233–290.
52. Kwolek, P. (2017). Hard anodic coatings on aluminum alloys. *Advances in Manufacturing Science and Technology*, 41(3), 35-46.
53. Rajendra, A., Parmar, B. J., Sharma, A. K., Bhojraj, H., Nayak, M. M. and Rajanna, K. (2005). Hard anodisation of aluminium and its application to sensorics. *Surface Engineering*, 21(3), 193-197.
54. Rajasekaran, B., Raman, S. G. S., Krishna, L. R., Joshi, S. V., and Sundararajan, G. (2008). Influence of microarc oxidation and hard anodizing on plain fatigue and fretting fatigue behaviour of Al–Mg–Si alloy. *Surface and Coatings Technology*, 202(8), 1462-1469.
55. Yerokhin, A. L., Nie, X., Leyland, A., Matthews, A. and Dowey, S. J. (1999). Plasma electrolysis for surface engineering. *Surface and Coatings Technology*, 122(2-3), 73-93.
56. Xue, W., Deng, Z., Lai, Y. and Chen, R. (1998). Analysis of phase distribution for ceramic coatings formed by microarc oxidation on aluminum alloy. *Journal of the American Ceramic Society*, 81(5), 1365-1368.
57. Gnedenkov, S. V., Khrisanfova, O. A., Zavidnaya, A. G., Sinebrukhov, S. L., Gordienko, P. S., Iwatsubo, S. and Matsui, A. (2001). Composition and adhesion of protective coatings on aluminum. *Surface and Coatings Technology*, 145(1-3), 146-151.
58. Zheng, W. Y., Derushie, C. and Lo, J. (2005). Protection of Mg alloys against galvanic and other forms of corrosion. *Materials Science Forum*. 488, 787-792.

59. Krishna, L. R., Purnima, A. S. and Sundararajan, G. (2006). A comparative study of tribological behavior of microarc oxidation and hard-anodized coatings. *Wear*, 261(10), 1095-1101.
60. Y. Zhang, C., Yan, F., Wang, H. and Lou, C. (2002). Study on the environmentally friendly anodizing of AZ91D magnesium alloy. *Surface and Coatings Technology*, 161, 36–43
61. Huang, P., Zhang, Y., Xu, K., and Han, Y. (2004). Surface modification of titanium implant by microarc oxidation and hydrothermal treatment. *Journal of Biomedical Materials Research*, 70(2), 187-190.
62. Tekin, K. C., Çakmak, E., ve Malayoğlu, U. (2008). Plazma elektrolitik oksitlenme yöntemiyle hafif metallerin kaplanması. *Mühendis ve Makina*, 49(582), 3-9.
63. Lu, X., Mohedano, M., Blawert, C., Matykina, E., Arrabal, R., Kainer, K. U., and Zheludkevich, M. L. (2016). Plasma electrolytic oxidation coatings with particle additions—A review. *Surface and Coatings Technology*, 307, 1165-1182.
64. Demirci, E. E. (2014). *Manyetik Sıçratma (CFUBMS) Ve Mikro Ark Oksidasyon (MAO) Teknikleri İle Ti6Al4V Alaşımının Dupleks Yüzey Modifikasyonu*. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 96-102.
65. Gündüz, K. (2017). *Alaşım Elementlerinin Magnezyumun Plazma Elektrolitik Oksidasyon Davranışına Olan Etkisi*. Doktora Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 17-37.
66. Guidong, X. and Jiong, L. I. (2007). Power Source Types Effects on the Properties of Oxide Ceramic Coatings on Mg Alloys. *Naturel Science and Foundation of China*, 150-152.
67. Gül, A. O. (2020). *Mikro Ark Oksidasyon İşleminde Grafit İlavesinin AA 2024 Alüminyum Alaşımının Yüzey Özelliklerine Etkisi Ve Aşınma Davranışının İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 6-16.
68. Hussein, R. O., Northwood, D. O. and Nie, X. (2010). Coating growth behavior during the plasma electrolytic oxidation process. *Journal of Vacuum Science and Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 28(4), 766-773.
69. Hussein, R. O., Nie, X. and Northwood, D. O. (2013). An investigation of ceramic coating growth mechanisms in plasma electrolytic oxidation (PEO) processing. *Electrochimica Acta*, 112, 111-119.
70. Kaseem, M. and Ko, Y. G. (2019). Effect of starch on the corrosion behavior of Al-Mg-Si alloy processed by micro arc oxidation from an ecofriendly electrolyte system. *Bioelectrochemistry*, 128, 133-139.
71. Babaei, K., Fattah-alhosseini, A. and Molaei, M. (2020). The effects of carbon-based additives on corrosion and wear properties of plasma electrolytic oxidation (PEO) coatings applied on Aluminum and its alloys: A review. *Surfaces and Interfaces*, 21, 1-17.

72. Çakıcı, S. (2009). *6082 Kalite Alüminyum Alaşımının Mikro Ark Oksidasyonu Yöntemiyle Yüzey Modifikasyonu*. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 5-17
73. İnternet:Innovent URL: <https://www.innovent-jena.de>, Son Erişim Tarihi: 29.06.2020.
74. Simchen, F., Sieber, M., Kopp, A. and Lampke, T. (2020). Introduction to plasma electrolytic oxidation-An overview of the process and applications. *Coatings*, 10(7), 628.
75. Wang, W., Feng, S., Li, Z., Chen, Z. and Zhao, T. (2020). Microstructure and properties of micro-arc oxidation ceramic films on AerMet100 steel. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(3), 6014-6027.
76. Huang, X., Yu, L. and Dong, Y. (2021). Corrosion resistance of a novel ceria doped aluminum phosphate ceramic coating on cast Al-Si alloy by steam-assisted curing. *Corrosion Science*, 182,1-10.
77. Shao, L., Li, H., Jiang, B., Liu, C., Gu, X., and Chen, D. (2018). A comparative study of corrosion behavior of hard anodized and micro-arc oxidation coatings on 7050 aluminum alloy. *Metals*, 8(3), 165.
78. Lv, X., Cao, L., Wan, Y. and Xu, T. (2019). Effect of different electrolytes in micro-arc oxidation on corrosion and tribological performance of 7075 aluminum alloy. *Materials Research Express*, 6(8), 2-10.
79. Ovundur, M., Muhaffel, F. and Cimenoglu, H. (2015). Characterization and Tribological Properties of Hard Anodized and Micro Arc Oxidized 5754 Quality Aluminum Alloy. *Tribology in Industry*, 37(1).55-59.
80. Cao, G. P. and Song, R. G. (2018). Microstructure and properties of ceramic coatings prepared by micro-arc oxidation on 7075 aluminum alloy. *Materials Research Express*, 5(2),3-26.
81. Walsh, F. C., Low, C. T. J., Wood, R. J. K., Stevens, K. T., Archer, J., Poeton, A. R., and Ryder, A. (2009). Plasma electrolytic oxidation (PEO) for production of anodised coatings on lightweight metal (Al, Mg, Ti) alloys. *Transactions of the IMF*, 87(3), 122-135.
82. Sobolev, A., Peretz, T. and Borodianskiy, K. (2020). Fabrication and characterization of ceramic coating on Al7075 Alloy by plasma electrolytic oxidation in molten salt. *Coatings*, 10(10), 993
83. Yang, H. H., Wang, X. S., Wang, Y. M., Wang, Y. L. and Zhang, Z. H. (2017). Microarc oxidation coating combined with surface pore-sealing treatment enhances corrosion fatigue performance of 7075-T7351 Al alloy in different media. *Materials*, 10(6), 609.
84. Cerchier, P., Pezzato, L., Moschin, E., Coelho, L. B., Olivier, M. G. M., Moro, I., and Magrini, M. (2018). Antifouling properties of different plasma electrolytic oxidation coatings on 7075 aluminium alloy. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 133, 70-78.

85. López-Ortega, A., Arana, J. L., Rodríguez, E. and Bayón, R. (2018). Corrosion, wear and tribocorrosion performance of a thermally sprayed aluminum coating modified by plasma electrolytic oxidation technique for offshore submerged components protection. *Corrosion Science*, 143, 258-280.
86. Li, Q. B., Liu, C. C., Yang, W. B. and Liang, J. (2017). Growth mechanism and adhesion of PEO coatings on 2024 Al alloy. *Surface Engineering*, 33(10), 760-766.
87. Altuntaş, G. (2020). *Al 7075 Alaşımına RRA Isıl İşlem Ve Ön Deformasyon Etkilerinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 57-58.
88. Kaseem, M. and Choe, H. C. (2021). Acceleration of bone formation and adhesion ability on dental implant surface via plasma electrolytic oxidation in a solution containing bone ions. *Metals*, 11(1), 106.
89. Jin, W., Liu, J., Wang, Z., Wang, Y., Cao, Z., Liu, Y. and Zhu, X. (2015). Sound absorption characteristics of aluminum foams treated by plasma electrolytic oxidation. *Materials*, 8(11), 7511-7518.
90. Skoneczny, W. (2001). Model of structure of Al₂O₃ layer obtained via hard anodising method. *Surface Engineering*, 17(5), 389-392.



GAZİ GELECEKTİR..