

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**MİKRO ARK OKSİDASYON İŞLEMİNDE GRAFİT İLAVESİNİN AA-2024
ALÜMİNYUM ALAŞIMININ YÜZEY ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ VE AŞINMA
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Metalurji ve Malzeme Müh. Ali Oktay GÜL

**HAZİRAN 2020
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

MİKRO ARK OKSİDASYON İŞLEMİNDE GRAFİT İLAVESİNİN AA-2024
ALÜMİNYUM ALAŞIMININ YÜZEY ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ VE AŞINMA
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Ali Oktay GÜL

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
“METALURJİ VE MALZEME YÜKSEK MÜHENDİSİ”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 05/05/2020

Tezin Savunma Tarihi : 04/06/2020

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Bülent ÖZTÜRK

ÖNSÖZ

Gelişen teknoloji çerçevesinde mühendislik malzemelerin geliştirilmesi çok büyük önem kazanmıştır. Özellikle maliyet açısından, malzemelere uygulanan kaplama teknikleri ile malzemelerin performansları arttırılmaya çalışılmaktadır. Bu kaplama tekniklerinden biri olan mikro ark oksidasyon yönteminin diğer yöntemlere kıyasla birçok avantaja sahip olması bu yöntemi ön plana çıkarmaktadır. Bu çalışmada, grafit katkılı ve katkısız olmak üzere iki farklı elektrolitik çözeltide AA-2024 alaşımı yüzeyine mikro ark oksidasyon yöntemi ile kaplama işlemi gerçekleştirilmiş olup, malzemenin yüzey modifikasyonu ve tribolojik davranışı incelenmiştir.

Yüksek lisans çalışmam boyunca tüm bilgi ve birikimini benimle paylaşan, yaşadığım her olayda desteğini hiç esirgemeyen, eşsiz fikirleriyle yol gösteren saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Bülent ÖZTÜRK'e ve bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan çalışmalarım sırasında büyük emeği geçen Doç. Dr. Ebru Emine ŞÜKÜROĞLU'na teşekkürlerimi bir borç bilirim. Ayrıca laboratuvar çalışmalarında yardımcı olan Dr. Öğr. Üyesi Ali GÜNEN'e, Arş. Gör. Zafer GÖLBAŞI'na ve sevgili arkadaşım Yavuz Selim KILIÇARSLAN'a sonsuz teşekkür ederim.

Ayrıca tüm eğitim hayatım süresince desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, her zaman yanımda olan değerli babam Ali GÜL'e, değerli annem Figen GÜL'e, çok kıymetli kardeşlerim olan Bahar Çağla HALİMİOĞLU ve Süleyman GÜL'e ve sevgili eniştem Eser HALİMİOĞLU'na sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FBA-2018-7437 numaralı proje ile desteklenmiştir. Maddi desteklerinden dolayı Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

Ali Oktay GÜL
Trabzon, 2020

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Mikro Ark Oksidasyon İşleminde Grafit İlavesinin AA-2024 Alüminyum Alaşımının Yüzey Özelliklerine Etkisi Ve Aşınma Davranışının İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Bülent ÖZTÜRK’ün sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 04/06/2020

Ali Oktay GÜL

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	VIII
SUMMARY.....	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	X
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
KISALTMALAR (SEMBOLLER) DİZİNİ.....	XIV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Alüminyum ve Alüminyum Alaşımlarının Genel Özellikleri.....	3
1.2.1. Saf Alüminyum Üretimi ve Özellikleri.....	3
1.2.2. Alüminyum Alaşımları.....	4
1.2.2.1. 1XXX Serisi Alüminyum Alaşımları.....	4
1.2.2.2. 2XXX Serisi Alüminyum Alaşımları.....	4
1.2.2.3. 3XXX Serisi Alüminyum Alaşımları.....	5
1.2.2.4. 4XXX Serisi Alüminyum Alaşımları.....	5
1.2.2.5. 5XXX Serisi Alüminyum Alaşımları.....	5
1.2.2.6. 6XXX Serisi Alüminyum Alaşımları.....	6
1.2.2.7. 7XXX Serisi Alüminyum Alaşımları.....	6
1.2.2.8. 8XXX Serisi Alüminyum Alaşımları.....	6
1.3. Mikro Ark Oksidasyon.....	6
1.3.1. Mikro Ark Oksidasyon İşleminin Tarihçesi.....	7
1.3.2. Mikro Ark Oksidasyon Mekanizması.....	8
1.3.3. Mikro Ark Oksidasyon Yönteminde Kaplama Oluşumu.....	9
1.3.4. Mikro Ark Oksidasyon Yönteminde Deşarj Oluşumu.....	12
1.3.5. Mikro Ark Oksidasyon Yönteminde Elektrolit Etkisi.....	13
1.3.6. Mikro Ark Oksidasyon Yönteminin Uygulama Alanları.....	14
1.3.7. Mikro Ark Oksidasyon Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları.....	15
1.4. Alüminyum Alaşımlarının Mikro Ark Oksidasyonu.....	16

1.5.	Grafit	17
1.5.1.	Grafitin Mekanik Özellikleri	18
1.5.2.	Grafitin Kullanım Alanları	19
1.6.	Aşınma	19
1.6.1.	Aşınma Türleri	20
1.6.1.1.	Adezyon Aşınması	21
1.6.1.2.	Abrazyon Aşınması	22
1.6.1.3.	Korozyon Aşınması	23
1.6.1.4.	Yorulma Aşınması	24
1.6.1.5.	Erozyon Aşınması	24
1.7.	Literatür Özeti	25
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR	34
2.1.	Altlık Malzeme ve Kaplama Öncesi Hazırlıklar	34
2.2.	Mikro Ark Oksidasyon İşlemi	35
2.3.	Karakterizasyon İşlemleri	36
2.3.1.	Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü	36
2.3.2.	Kaplama Kalınlığı Ölçümü	37
2.3.3.	X-Işını Difraksiyon (XRD) Analizi	38
2.3.4.	SEM Analizi	39
2.3.5.	Mikro Sertlik Deneyleri	39
2.3.6.	Aşınma Deneyleri	39
3.	BULGULAR	42
3.1.	Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Değerleri	42
3.2.	Kaplama Kalınlığı Ölçüm Değerleri	42
3.3.	X-Işını Difraksiyon (XRD) Analizi Sonuçları	45
3.4.	SEM Analizi Sonuçları	46
3.5.	Mikro Sertlik Deneyleri Sonuçları	51
3.6.	Aşınma Deneyleri Sonuçları	52
4.	İRDELEME	69
4.1.	Mikro Ark Oksidasyon ile Kaplamanın Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi	69
4.2.	Mikro Ark Oksidasyon ile Kaplamanın Kaplama Kalınlığına Etkisi	69
4.3.	Mikro Ark Oksidasyon ile Kaplamanın Faz Kompozisyonuna Etkisi	70
4.4.	Mikro Ark Oksidasyon ile Kaplamanın Yüzey Morfolojisine Etkisi	71

4.5.	Mikro Ark Oksidasyon ile Kaplamanın Mikro Sertlik Üzerine Etkisi.....	72
4.6.	Mikro Ark Oksidasyon ile Kaplamanın Aşınma Davranışına Etkisi	72
5.	SONUÇLAR	75
6.	ÖNERİLER.....	77
7.	KAYNAKLAR.....	78

ÖZGEÇMİŞ



Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

MİKRO ARK OKSİDASYON İŞLEMİNDE GRAFİT İLAVESİNİN AA-2024
ALÜMİNYUM ALAŞIMININ YÜZEY ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ VE AŞINMA
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Ali Oktay GÜL

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Bülent ÖZTÜRK
2020, 85 Sayfa

Bu çalışmada, AA-2024 alüminyum alaşımı yüzeyine mikro ark oksidasyon yöntemi ile kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Temel alkali elektrolit ve bu elektrolit içerisine grafit partikülleri eklenerek iki farklı elektrolit hazırlanmıştır. Numune yüzeyinde oluşan oksit tabakanın, yüzey özelliklerine ve tribolojik davranışa grafitin etkisi incelenmiştir. Kaplanmış numunelerin yüzey pürüzlülükleri, kaplama kalınlıkları, faz kompozisyonları ve aşınma davranışları incelenmiştir.

Grafit partiküllerinin ilavesi ile bozunum voltajının düştüğü görülmüştür. Mikro ark oksidasyon yöntemi ile kaplama sonrası yüzey pürüzlülüğünün belirgin bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Ancak grafit partiküllerinin ilavesi ile yüzey pürüzlülüğünün iyileştiği gözlemlenmiştir. Grafit katkılı ve grafit katkısız kaplanmış numunelerin kaplama kalınlık değerlerinde çok bir değişiklik olmadığı görülmüştür. Hem grafit katkısız kaplamalı hem de grafit katkılı kaplamalı numunelerde hâkim fazların α -Al₂O₃ ve γ -Al₂O₃ fazı olduğu gözlemlenmiştir. Grafit partiküllerinin ilavesi ile kaplama yüzeyinde oluşan gözenek sayısının düştüğü görülmüştür. Ayrıca, altlık malzemedan yoğun ara tabakaya gidildikçe numune sertliği artmış, yoğun ara tabakadan dış tabakaya doğru gidildikçe ise sertlik azalmıştır. Kaplama işlemi sonrası AA-2024 alaşımının aşınma direncinin belirgin bir şekilde arttığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Mikro ark oksidasyon, Grafit, AA-2024, Aşınma direnci

Master Thesis

SUMMARY

THE EFFECTS OF GRAPHITE ADDITIVE ON THE SURFACE PROPERTIES
AND INVESTIGATION OF THE WEAR BEHAVIOR OF AA-2024
ALUMINUM ALLOY IN MICRO ARC OXIDATION PROCESS

Ali Oktay GÜL

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Metallurgical and Materials Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Bülent ÖZTÜRK
2020, 85 Pages

In this study, coating process was carried out on the surface of AA-2024 aluminum alloy by micro arc oxidation method. Two different electrolytes were prepared basic alkaline electrolyte and by adding graphite particles into this electrolyte. The effect of graphite on the surface properties and tribological behavior of the oxide layer formed on the sample surface was investigated. The surface roughness, coating thickness, phase composition and wear behavior of the coated samples were examined.

The results show that the breakdown voltage was decreased with the addition of graphite particles. It has been observed that surface roughness increases significantly after coating with micro arc oxidation method. However, The surface roughness improves with the addition of graphite particles. It was observed that there was not much change in the coating thickness values of the coated samples with graphite additive and non-graphite additive. The results show that the dominant phases were α -Al₂O₃ and γ -Al₂O₃ phase in both coated samples with graphite additive and non-graphite additive. In addition to this, the number of pores formed on the coating surface were decreased with the addition of graphite particles. Besides, the hardness of the sample from the substrat material to the dense intermediate layer increased and from dense intermediate layer to the outer layer decreased. As a result of the investigation, the wear resistance of AA-2024 alloy were increased significantly after coating.

Key Words: Micro arc oxidation, Graphite, AA-2024, Wear resistance

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. MAO işleminde kullanılan donanım	8
Şekil 2. MAO işlem basamakları [28]	9
Şekil 3. Elektroliz sırasında gerçekleşen işlemler [29].	10
Şekil 4. MAO prosesinde gözlenen akım-voltaj eğrileri [28].	11
Şekil 5. Deşarj kanallarının oluşum modelleri [34]	12
Şekil 6. Çeşitli elektrolitlerde MAO yöntemi ile kaplanan alüminyum için I=f(U).....	13
Şekil 7. MAO işleminde Al numunede oksit tabaka oluşumu [44]	16
Şekil 8. Grafit tozunun görüntüsü.....	17
Şekil 9. Grafitin kimyasal yapısı.....	18
Şekil 10. Aşınma olayını oluşturan unsurlar [6]	20
Şekil 11. Adezyon aşınması	21
Şekil 12. Abrasyon aşınması.....	22
Şekil 13. Korozyon aşınması	23
Şekil 14. Yorulma aşınmasında çatlak oluşumu ve ilerlemesi [47].	24
Şekil 15. Erozyon aşınması	25
Şekil 16. MAO ünitesi	35
Şekil 17. Yüzey pürüzlülüğü ölçer test cihazı	37
Şekil 18. ZEISS EVO LS10 marka taramalı elektron mikroskobu (SEM).....	38
Şekil 19. PANalytical X'pert ³ Powder model XRD cihazı	38
Şekil 20. Mikro sertlik ölçüm cihazı	39
Şekil 21. Blok-halka (Ball-on disc) aşınma test cihazı	40
Şekil 22. Aşınma iz genişliği ile aşınma iz derinliğinin şematik gösterimi	41

Şekil 23.	3 boyutlu yüzey profilometresi	41
Şekil 24.	Grafit katkısız kaplamalı ve grafit katkılı kaplamalı numunelerde	43
Şekil 25.	Grafit katkısız kaplamalı numunenin kaplama kalınlığı.....	44
Şekil 26.	Grafit katkılı kaplamalı numunenin kaplama kalınlığı.....	44
Şekil 27.	(a): Kaplanmamış numunenin XRD paterni, (b): Grafit katkısız kaplamalı numunenin XRD paterni, (c): Grafit katkılı kaplamalı numunenin XRD paterni.....	45
Şekil 28.	Grafit katkısız kaplamalı numunenin 100X büyütmede SEM görüntüsü	46
Şekil 29.	Grafit katkılı kaplamalı numunenin 100X büyütmede SEM görüntüsü	47
Şekil 30.	Grafit katkısız kaplamalı numunede meydana gelen kırılma ve mikro çatlak oluşumunun 750X büyütmede SEM görüntüsü.....	47
Şekil 31.	Grafit katkılı kaplamalı numunede meydana gelen kırılma ve mikro çatlak oluşumunun 750X büyütmede SEM görüntüsü	48
Şekil 32.	Grafit katkısız kaplamalı numune yüzeyinde oluşan krater görünümlü çukurlar.....	48
Şekil 33.	Grafit katkılı kaplamalı numune yüzeyinde oluşan krater görünümlü çukurlar.....	49
Şekil 34.	Grafit katkısız kaplamalı numunede meydana gelen por boyutları	50
Şekil 35.	Grafit katkılı kaplamalı numunede meydana gelen por boyutları	50
Şekil 36.	Grafit katkısız kaplamalı numunenin oksit tabaka kalınlığına göre mikro sertlik değişimi	51
Şekil 37.	Grafit katkılı kaplamalı numunenin oksit tabaka kalınlığına göre mikro sertlik değişimi	52
Şekil 38.	Numune yüzeyinin aşınan kısmın yüzey profilometresi tarafından iz derinliği ve genişliğin ölçüldüğü kısımlar	53
Şekil 39.	D1 bölgesinin iz derinliği ve genişliği	53
Şekil 40.	D2 bölgesinin iz derinliği ve genişliği	54
Şekil 41.	D3 bölgesinin iz derinliği ve genişliği	54
Şekil 42.	D4 bölgesinin iz derinliği ve genişliği	55
Şekil 43.	2N yük altında meydana gelen sürtünme katsayısı-süre ilişkisi.....	55

Şekil 44.	5N yük altında meydana gelen sürtünme katsayısı-süre ilişkisi.....	56
Şekil 45.	10N yük altında meydana gelen sürtünme katsayısı-süre ilişkisi.....	56
Şekil 46.	15N yük altında meydana gelen sürtünme katsayısı-süre ilişkisi.....	57
Şekil 47.	Uygulanan yüke bağlı olarak ortalama sürtünme katsayısı grafiği.....	58
Şekil 48.	Kaplamasız, grafit katkısız kaplamalı ve grafit katkılı numunelerin farklı yükler altında elde edilen aşınma iz hacimleri.....	60
Şekil 49.	Kaplamasız, grafit katkısız kaplamalı ve grafit katkılı numunelerin farklı yükler altında elde edilen aşınma oranları.....	61
Şekil 50.	2N yük altında numunelerin SEM görüntüleri a) kaplamasız b) grafit katkısız kaplamalı c) grafit katkılı kaplamalı (sol taraf düşük büyütme; sağ taraf yüksek büyütme).....	62
Şekil 51.	5N yük altında numunelerin SEM görüntüleri a) kaplamasız b) grafit katkısız kaplamalı c) grafit katkılı kaplamalı (sol taraf düşük büyütme; sağ taraf yüksek büyütme).....	63
Şekil 52.	10N yük altında numunelerin SEM görüntüleri a) kaplamasız b) grafit katkısız kaplamalı c) grafit katkılı kaplamalı (sol taraf düşük büyütme; sağ taraf yüksek büyütme).....	64
Şekil 53.	15N yük altında numunelerin SEM görüntüleri a) kaplamasız b) grafit katkısız kaplamalı c) grafit katkılı kaplamalı (sol taraf düşük büyütme; sağ taraf yüksek büyütme).....	65
Şekil 54.	Kaplamasız numunede farklı yükler altında elde edilen aşınma izlerinin 3 boyutlu gösterimi a)2N b)5N c)10N d)15N.....	66
Şekil 55.	Grafit katkısız kaplamalı numunede farklı yükler altında elde edilen aşınma izlerinin 3 boyutlu gösterimi a)2N b)5N c)10N d)15N.....	67
Şekil 56.	Grafit katkılı kaplamalı numunede farklı yükler altında elde edilen aşınma izlerinin 3 boyutlu gösterimi a)2N b)5N c)10N d)15N.....	68

TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Alüminyumun bazı fiziksel ve mekanik özellikleri [8-10].....	3
Tablo 2. AA-2024 kalite alaşımın kimyasal bileşimi (%).....	34
Tablo 3. MAO yönteminde kullanılan elektrolitik çözeltilerin kimyasal bileşimleri	35
Tablo 4. MAO yöntemi için uygulanan kaplama parametreleri	36
Tablo 5. Aşınma deneyinde kullanılan parametreler ve deney şartları.....	40
Tablo 6. Kaplamasız, grafit katkısız kaplamalı ve grafit katkılı kaplamalı numunelerin ortalama yüzey pürüzlülükleri.....	42
Tablo 7. Kaplamasız numune için ortalama genişlik, ortalama derinlik ve aşınma iz hacim değerleri	59
Tablo 8. Grafit katkısız kaplamalı numune için ortalama genişlik, ortalama derinlik ve aşınma iz hacim değerleri.....	59
Tablo 9. Grafit katkılı kaplamalı numune için ortalama genişlik, ortalama derinlik ve aşınma iz hacim değerleri.....	59

KISALTMALAR (SEMBOLLER) DİZİNİ

AA-2024 : Alüminyum 2024 kalite alaşımı

Al : Alüminyum

Al₂O₃ : Alüminyum oksit

Mg : Magnezyum

MAO : Mikro ark oksidasyon

SEM : Taramalı elektron mikroskobu

XRD : X-ışınları difraktometresi

µm : Mikrometre

kw : Kilowatt

Hz : Hertz

N : Newton

V : Volt

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Alüminyum (Al), birçok karakteristik özelliğinden dolayı yaygın bir şekilde kullanılan, hafif metaller grubunda yer alan bir metaldir. Özgül ağırlığı $2,7 \text{ g/cm}^3$ olan Al atmosferik korozyon direnci, elektrik ve ısı iletkenliği, şekillendirilebilme kabiliyeti, mekanik özellikleri vb. gibi birçok uygun parametreye sahip olması sebebiyle özellikle uçak, uzay, tekstil, otomotiv gibi pek çok uygulamada tercih konusu olmuştur. Ancak Al yüzeyi değişik ortamlarda korozyona, aşınmaya vb. gibi olumsuz davranışlar sergilemektedir. Bu nedenle, Al bazı kaplama yöntemleri ile kaplanarak daha uygun çalışma şartlarına getirilmektedir. Uygulanan kaplama yöntemlerine örnek olarak mikro ark oksidasyon (MAO), fiziksel buhar biriktirme, kimyasal buhar biriktirme, sol-gel yöntemleri verilebilir. Kaplama yöntemlerinden biri olan MAO elektrokimyasal bir yöntem olup malzeme yüzeyinde meydana gelen yüzey modifikasyonu işlemidir.

MAO ile kaplama yönteminin özellikle çevre dostu ve ekonomik olması sebebiyle diğer kaplama yöntemlerine kıyasla tercih konusu olmuştur. MAO tekniği, elektrolitik çözelti içerisine daldırılmış ve güç kaynağına anot olarak bağlanmış numuneye negatif voltaj, katoda ise pozitif voltaj verilmesi ile anot numune yüzeyinde ark oluşturulması ve numune yüzeyinin oksit kaplanması olarak tanımlanabilir [1]. Bunun sonucunda da anot malzeme yüzeyinin nispeten kalın, sert, aşınmaya ve korozyona karşı dirençli bir katman ile kaplanması sağlanmaktadır [2,3]. MAO ile kaplama yönteminin diğer kaplama yöntemlerine karşı en önemli üstünlükleri oksit tabakasının kalınlığı, yapışma kuvveti, maliyet ve çevreye olan duyarlılığı söylenebilir.

MAO yöntemi ile kaplanan numune için kullanılan temel elektrolitik çözeltisi tam olarak istenen mekanik, fiziksel vb. gibi özellikleri sağlayamamaktadır. Bu yüzden çalışmalar gün geçtikçe katkılı elektrolit kullanımı çerçevesinde genişlemektedir. İstenilen şartlarda özellikler sağlanması amacıyla elektrolit içerisine MoO_2 , TiO_2 , grafen partikülleri, ZrO_2 vb. gibi birçok katkıları kullanılmaktadır. Literatürde katkılı elektrolitler üzerine yapılmış farklı çalışmalar mevcuttur.

Grafit hekzagonal kristal yapıya sahip olup periyodik tabloda 4A grubunda yer alan karbonun allotropudur. Yaklaşık olarak yoğunluğu 2 g/cm^3 olup sıvı hale geçmeden direk

gaz haline dönüşebilmektedir. Grafit 2 boyutlu düzlemde karbon atomlarının katmanlar oluşturacak şekilde birbirine bağlanması ile oluşur. Bu katmanların birbirlerinin üzerinden rahat bir şekilde kayması grafitin en önemli özelliği olan yağlayıcı olma özelliğini sağlamaktadır. Çok iyi ısı iletkenliği, çok iyi elektrik iletkenliği ve ısıya karşı dayanıklılığı grafitin önemli karakteristik özellikleridir. Ayrıca grafit, sıcaklığının yükselmesi ile mekanik özelliklerini iyileştiren tek maddedir. Kaygan, yumuşak ve yapışma kabiliyetinden dolayı sürtünmeyi azaltmak amacıyla makine araç ve gereçlerde yağlayıcı olarak kullanılmaktadır [4,5].

Aşınma, triboloji biliminin bir konusudur. Malzemelerin birbirine temas etmesi ve birbirilerine göre izafi hareket yapması sonucu sürtünme etkisiyle oluşan malzeme kaybına aşınma denir. Aşınma olayı kontrol edilebilir ve kontrol edilemeyen etkiler olmak üzere birçok parametreye bağlıdır. Bu nedenle günümüzde hala detaylı bir şekilde çalışılan araştırma konusudur. Malzemeler aşınmaya maruz kalarak yüzeyleri, şekil ve boyutları, mekanik ve fiziksel özellikleri vb. gibi yeteneklerini kaybederek kullanılmaz hale gelebilirler. Bunu önlemek için malzemelerin aşınma sebeplerini ve aşınma mekanizmalarının iyi bilinmesi gerekir. Aşınan ve aşındırıcı malzeme, yağlama olayı ve uygulanan yük durumu vb. gibi parametreler aşınma olayını etkileyen ana faktörlerdir. Aşınma mekanizmalarına ise adezyon, abrazyon, yorulma, korozyon ve erozyon aşınması örnek olarak verilebilir. Ayrıca bir malzemedeki birden fazla aşınma mekanizması gerçekleşebilir.

Bu çalışmada grafit katkılı ve katkısız olmak üzere iki farklı elektrolit çözelti hazırlanarak, AA-2024 kalite alaşımına MAO işlemi uygulanmış ve altlık malzeme üzerinde oluşan oksit filmine, grafit katkısının yüzey ve mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. MAO proses süresince uygulanan voltaj, akım, frekans, işlem süresi vb. gibi parametreler sabit tutulmuş olup elektrolit içerisindeki grafit katkısının yüzey incelemeleri, kaplama kalınlığı ölçümleri, pürüzlülük ölçümleri, X-ışınları analizi ve aşınma testleri üzerinde nasıl bir etki oluşturduğu gözlemlenmiştir.

1.2. Alüminyum ve Alüminyum Alaşımlarının Genel Özellikleri

1.2.1. Saf Alüminyum Üretimi ve Özellikleri

Oksijen ve silisyumdan sonra yeryüzünde en fazla bulunan element Al olmasına rağmen endüstriyel olarak üretimi, Charles Martin Hall ve Paul T. Heroult'un 1886 yılında elektroliz tekniği ile birbirinden habersiz olarak başlamıştır. Şu an bile uygulanmakta olan bu yöntem Al üretiminin başlangıcı olarak kabul edilmektedir. 1892 yılında K. J. Bayer'in boksitten Al_2O_3 yani alümina üreten Bayer Prosesini geliştirmesi, Al'un endüstriyel olarak üretilmesini kolaylaştırmıştır. Böylece Al, demir-çelikten sonra yeryüzünde en yüksek çapta kullanılan ikinci metal olmuştur ve 19. yüzyıldan beri aynı teknik ile üretimi gerçekleştirilmektedir [6].

Özgül ağırlığı $3,8 \text{ g/cm}^3$ 'ten küçük olan metaller hafif metaller olarak adlandırılırlar. Özgül ağırlığı $2,7 \text{ g/cm}^3$ olan Al, hafif metaller grubunda en yüksek kullanım alanına sahip olan metaldir. Ayrıca Al metalinin elektrik ve ısı iletkenliğinin yüksek olması, üretilebilirliği ve şekillendirilebilmesinin kolay olması, atmosferik korozyona karşı doğal olarak bir direnç oluşturması ve metaller ile birleşerek uygun mekanik özellikleri içeren alaşım oluşturma özelliğine sahip olması Al metalinin birçok metalden daha yaygın bir uygulama alanına sahip olmasını sağlamaktadır [7]. Tablo 1'de Al'un bazı fiziksel ve mekanik özellikleri verilmiştir.

Tablo 1. Alüminyumun bazı fiziksel ve mekanik özellikleri [8-10]

Atom numarası	13
Atom ağırlığı (g/mol)	26,97
Kristal yapısı	Yüzey merkezli kübik
Çekme Dayanımı (MPa)	40-90
Akma Dayanımı (MPa)	10-30
Kopma Uzaması (%)	30-40
Sertlik HV2.5	12-20
Ergime Noktası (°C)	660
Yoğunluğu (g/cm^3)	2,7

Al metalinin oksijene karşı ilgisinin yüksek olması, en önemli karakteristik özelliklerinden biridir. Al'un yüksek oranda oksijen anfinitesinin olması, yüzeyinin hava ile teması sağlanması sonucunda, ince ancak yoğun bir oksit tabakası (Al_2O_3) meydana gelmektedir. Bu tabakanın meydana gelişi ile Al metali birçok korozif etkiden korunmaktadır ancak oluşan bu oksit tabakanın yapısı asit, baz, tuz solüsyonları tarafından etkilenerek bozulabilmektedir [8].

1.2.2. Alüminyum Alaşımaları

Al alaşımları, döküm ve dövme alaşımları olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Alüminyum Birliği'nin gruplandırmasına göre dövme Al alaşımları dört rakamlı simge ile adlandırılmaktadır. İlk rakam alaşımdaki ana elementi belirtirken ikinci rakam ise orijinal alaşım içerisindeki oranına göre farklı bir oranda bulunmakta olan bileşen sayısını göstermektedir. Bundan dolayı ikinci rakam sıfır olması sonucu o serinin orijinal alaşımının gösterildiği anlaşılmaktadır. Üçüncü ve dördüncü rakam ise 1XXX alaşımın dışında kalan diğer alaşımlarda önemsiz olup, sadece bahsedilen alaşımı diğer alaşımlardan ayırmak için gösterilmektedir. 1XXX alaşımında son iki rakam göz önüne alındığında ise, saflık seviyesinin bir ölçüsüdür yani %99'dan sonraki rakamlar belirtilmektedir [8].

1.2.2.1. 1XXX Serisi Alüminyum Alaşımları

En sık kullanılan 1100, 1050, 1350, 1175 serisi Al alaşımları ticari saflıkta kullanılmaktadır. Folyo ve şerit paketleme, tanker gövdesi, kamyon gövdesi, mutfak araç ve gereçleri, kimyasal ekipmanlar vb. gibi genellikle korozyon dayanımı ve elektriksel iletkenlik gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır.

1.2.2.2. 2XXX Serisi Alüminyum Alaşımları

Ana alaşım bileşeni Cu olan 2XXX serisi Al alaşımları, ısıtma işlemi ile sertleştirilmesi sonucu çekme mukavemeti artmakta ve kolay işlenebilirlik özelliğine sahiptir. Çekme mukavemeti yaklaşık 490 MPa'ya kadar ulaşmaktadır. Ancak, bu serinin Al alaşımlarının korozyon dayanımı düşüktür. Isıtma işlemi uygulandığında 2XXX serisinin alaşımlarının

mekanik özellikleri, döküm çeliklerinin mekanik özelliklerinden daha iyi olabilmektedir. Suni yaşlandırma ile mekanik özellikler daha da iyileştirilmektedir [11,12].

Ayrıca AA-2024 alaşımı en yaygın kullanılan alaşımıdır. AA-2024 alaşımının başlıca kullanım alanlarına uçak sanayi, askeri ekipman, otomotiv sanayi, genel mühendislik uygulamaları, perçin ve kamyon tekerlekleri örnek olarak verilebilir.

1.2.2.3. 3XXX Serisi Alüminyum Alaşımaları

3XXX serisi Al alaşımalarının ana bileşeni Mn olup, az miktarda Fe ve Si da içerebilirler. Bu serinin alaşımalarının kolay işlenebilmesi ve kaynak kabiliyetlerinin iyi olması en önemli özelliğidir. Ancak bu alaşımalar ısıl işlem için pek uygun değildir [11]. Uygulama alanları ise; 3560 alaşımı ile vites kutuları elde edilmektedir. Ayrıca 3570 alaşımı otomobil parçalarının üretiminde kullanılmaktadır [13].

1.2.2.4. 4XXX Serisi Alüminyum Alaşımaları

Ana alaşım bileşeni Si olan 4XXX serisi Al alaşımalarının, düşük ergime sıcaklığı, esneklik ve dekoratif görünümüne sahip olması en önemli özelliğidir. Gerekli miktarda Si içermesi halinde 4XXX serisi Al alaşımaları anodik oksidasyon uygulanması sonucu koyu gri renge sahip olurlar, bu sebepten dolayı mimari alanda tercih edilebilirler. Ayrıca Si sayesinde bu alaşımaların korozyon dayanımı da yüksektir [11].

1.2.2.5. 5XXX Serisi Alüminyum Alaşımaları

Ana alaşım bileşeni Mg olan 5XXX serisi Al alaşımaları; yüksek çekme mukavemeti, yüksek sertlik, iyi kaynak kabiliyeti, aşınma ve deniz atmosferine karşı yüksek korozyon direncine sahip olması en önemli özelliğidir. Ayrıca bu alaşımalar özel konstrüksiyonlar için kullanılmaktadır. 5XXX serisi Al alaşımalarının içerdiği magnezyumdan (Mg) dolayı döküm kabiliyetleri zordur [11,12]. Yüksek korozyon direncine sahip olması ve aynı zamanda kolay işlenebilirliğe sahip olması nedeniyle pişirme kaplarında, uçak araç ve gereçlerinde kullanılmaktadır [13].

1.2.2.6. 6XXX Serisi Alüminyum Alaşımaları

6XXX serisi Al alaşımlarının ana alaşım bileşenleri Mg ve Si' dir. Bu alaşımlara (6061, 6063) ısıtma işlemi uygulanabilmektedir. 2XXX ve 7XXX alaşımları kadar dayanıklı olmamalarına rağmen, 6XXX serisi alaşımları iyi şekillendirilme kabiliyeti, iyi kaynak kabiliyeti, işlenebilirlik ve nispeten iyi korozyon direncine sahiptir [14].

1.2.2.7. 7XXX Serisi Alüminyum Alaşımaları

7XXX serisi Al alaşımlarının ana alaşım bileşeni Zn' dir. Zn oranının %8'den fazla olan yüksek alaşımlı 7XXX serisi Al alaşımları gerilmeli korozyona uğramasına rağmen, bazı alaşım elementlerini içererek dayanımı belirgin şekilde artmaktadır. Zn oranı %3' ten düşük olması durumunda Zn'nun önemli bir etkisi gözlenmez [11]. Mutfak araç ve gereçleri, bahçe araç ve gereçleri, maden ekipmanları vb. uygulama alanlarına örnek verilebilir [13].

1.2.2.8. 8XXX Serisi Alüminyum Alaşımaları

Ana alaşım bileşeni Li olan 8XXX serisi Al alaşımlarının hafiflik, çekme ve akma mukavemetlerinin yüksek olması en önemli özelliğidir. Bu alaşımlar uzay ve havacılık endüstrisinde geniş bir kullanım alanına sahiptir [11-13].

1.3. Mikro Ark Oksidasyon

Al, Mg, Ti, Ta, Zr, Zn, W, Hf vb. gibi metaller ve alaşımları uygulama alanlarına bağlı olarak yüzeyleri hasara uğrayarak kullanılmaz hale gelir ve bunun sonucunda da yenisi ile değiştirilir. Bu olay gerek ekonomik gerekse de zaman kaybına yol açarak büyük zararlar verdiğinden dolayı istenmeyen bir durumdur. Bu istenmeyen durumları ortadan kaldırmak için bazı yüzey işlemleri uygulanmaktadır. Özellikle son yıllarda önem verilen ve olumlu sonuçlar alınan en önemli yüzey işlemlerinden biri mikro ark oksidasyon (MAO) yöntemidir. MAO tekniği elektrolitik çözelti içerisine daldırılmış ve güç kaynağına anot olarak bağlanmış numuneye negatif voltaj, katoda ise pozitif voltaj verilmesi ile anot numune yüzeyinde ark oluşturulması ve numune yüzeyinin oksit kaplanması olarak

tanımlanabilir [1]. Bu yöntem sonucunda valf metaller olarak adlandırdığımız bu metallerin ve alaşımların üzerine elektrokimyasal etkileşim sonucu seramik kaplamalar elde edilmektedir.

MAO işlemi, malzeme yüzeyinde yapışmış bir oksit tabakası oluşumunu sağlayan bir yüzey modifikasyonu işlemidir. Bu işlem genellikle bazik tuzlar içeren elektrolitik bir banyo içerisinde oksidasyon ile yüksek voltaj-akım davranışını ilişkilendirir [15]. MAO yöntemi ile kaplama, bir elektrolitik çözelti içerisine daldırılan altlık malzemenin, elektrokimyasal etkileşimler sonucu meydana gelen plazma boşalmaları yardımı ile malzeme yüzeyinin nispeten kalın, sert, aşınmaya ve aynı zamanda korozyona karşı dirençli bir katman ile kaplanması esasına dayanmaktadır. [2,3].

MAO yöntemi aynı zamanda birçok terim ile tanımlanmaktadır. Bunlar arasında, kıvılcımlı anodik oksidasyon (spark anodizing), anodik kıvılcımlı biriktirme (anodic spark deposition), mikro ark anodik oksidasyon (micro arc anodizing), mikro plazma anodik oksidasyon (micro plasma anodizing), mikro plazma oksidasyon (micro plasma oxidation), plazma elektrolitik oksidasyon (plasma electrolytic oxidation) ve elektroplazma oksidasyon (electroplasma oxidation) sayılabilir [16,17].

1.3.1. Mikro Ark Oksidasyon İşleminin Tarihçesi

MAO tekniği, yaklaşık 70 yıl önce Sovyetler Birliği'nde başlangıçta bilimsel olarak, daha sonraki zamanlarda ise askeri alanlarda kaplama amacıyla kullanılmıştır. 1970'li yıllara gelindiğinde Amerika'da, daha sonra ise tüm dünyada kullanılan MAO tekniği günümüzde güncel ve yaygın bir şekilde çalışılan araştırma konusu olmuştur.

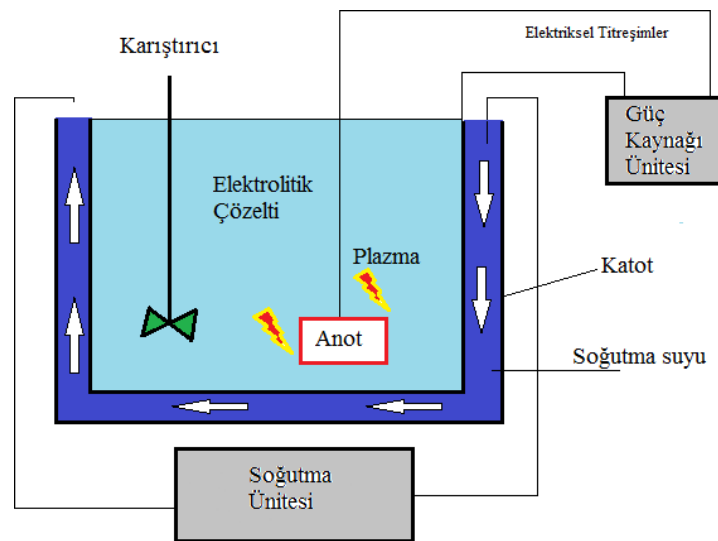
MAO ile kaplama üzerine ilk sistemli çalışma 1950 ile 1960'lı yılları arasında McNeil ve Gruss tarafından gerçekleştirilmiştir [18,19]. 1930'lu yıllarda Günterschultze ve Beltz, Mg'un anodizasyonu esnasında anodik kıvılcımlar ve gaz çıkışları ile karşılaşmalarına rağmen meydana gelen bu deşarjların numuneye hasar verebilir düşüncesiyle uzak durulması gerektiğini düşünmüşlerdir [20]. Ancak 1955 yılında Evangelides, Günterschultze ve Beltz'in düşüncelerinden faydalanarak Mg ve alaşımlarının MAO yöntemiyle kaplanabilirliği patentini almıştır. Altlık malzemesi olarak Al kullanılması ise ilk kez 1976 yılında Markov tarafından başarılı bir şekilde oluşturulmuştur. 1980'li yıllara gelindiğinde hem Markov hem de çalışma arkadaşları bazı

metallerin bu yöntem ile oksit kaplanması üzerine çalışmalar yapmıştır [21-23]. Ayrıca alkali elektrot kullanımı da yine bu yıllarda kullanılmaya başladığı görülmektedir [24].

Avrupa’da KEPLA-COAT, İsrail’de ALMAG-AL ve Amerika’da birçok firma MAO kaplama yöntemi ile ilgili patentleri mevcuttur. Bununla birlikte Avustralya, Çin ve Japonya’da farklı firmalar da mevcuttur [15,25].

1.3.2. Mikro Ark Oksidasyon Mekanizması

MAO tekniği ile kaplama işlemi yapılması için oluşturulan mekanizma en basit haliyle bir güç kaynağı, elektrolitik banyo, katot, anot ve soğutma sisteminden meydana gelmektedir. Düzenegin şematik gösterimi Şekil 1’de gösterilmektedir. MAO tekniği ile kaplanılacak numune yüzeyinde, kararlı bir oksit katman meydana getirebilecek metaller tercih edilir. Bu metaller genellikle Al, Mg, Ti, Ta, Zr, Zn, W, Hf vb. gibi valf metaller ve alaşımlarıdır. Tercih edilen bu metaller düzenekteki güç kaynağına anot olacak bir şekilde bağlanırlar. Genellikle katot görevini ise paslanmaz çelikten imal edilen elektrolit havuzu üstlenmektedir. Paslanmaz çelikten imal edilen elektrolit havuzu içerisine elektrolitik çözelti konulur. Ayrıca çözelti homojenliğinin sağlanması amacıyla karıştırma işlemi yapılır. Akım ve voltaj etkisi ile anot metalin etrafında yüksek sıcaklık oluşur ve bu sıcaklık çözeltinin ısınmasına yol açarak kaplamanın verimini düşürmektedir. Bu yüzden elektrolit havuzu içerisinde daima soğutma suyu dolaştırılır [26].



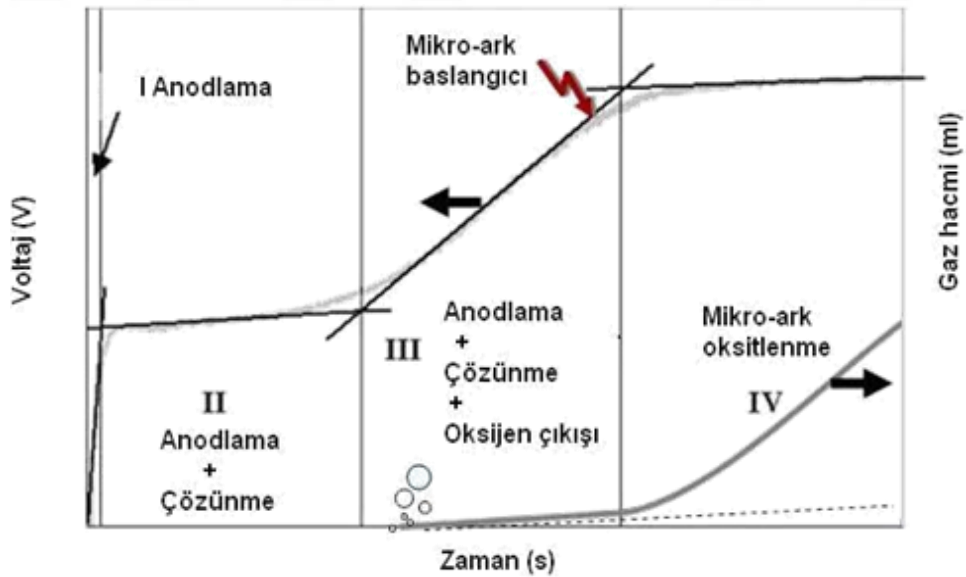
Şekil 1. MAO işleminde kullanılan donanım

1.3.3. Mikro Ark Oksidasyon Yönteminde Kaplama Oluşumu

MAO prosesi klasik anodik oksidasyon aşaması ile başlamaktadır. Bu aşamada güç kaynağına anot olarak bağlanan numuneye negatif voltaj uygulanması sonucu numune yüzeyinde oksit oluşumu gerçekleşmektedir. Uygulanan voltaj değeri belirli bir kritik değeri aşması durumunda numune yüzeyinde ark oluşur. Numune yüzeyinde meydana gelen mikro boyutlardaki arkların oluştuğu bu voltaj değeri, bozunum voltajı (dielectric breakdown) olarak tanımlanmaktadır. Bozunum voltajına erişildiğinde numune yüzeyinde zıt yönlerde hareket eden metal iyonları ile hidroksil iyonları oksit oluşumunu gerçekleştirir [27].

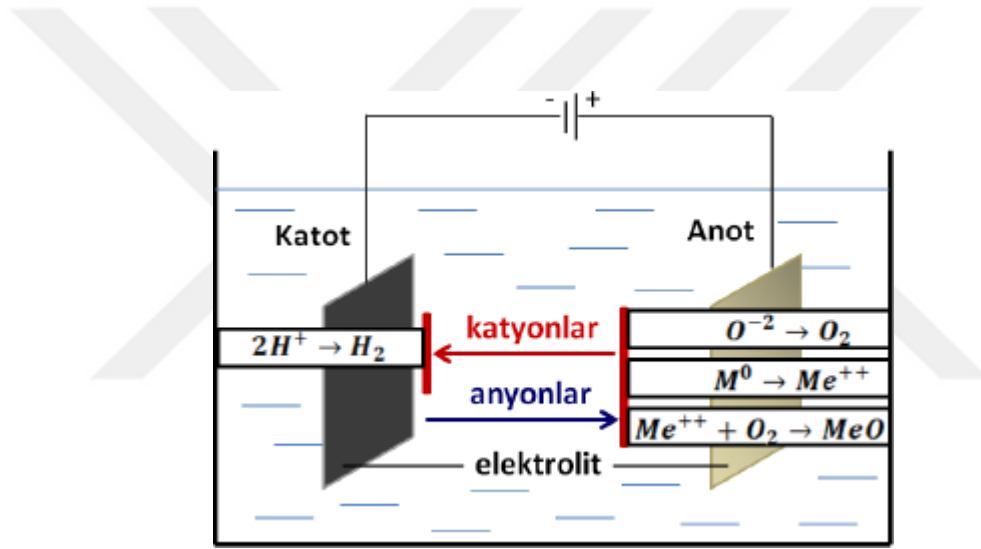
Snizhko ve arkadaşları, MAO tekniğinin fiziksel ve kimyasal temellerini araştırarak, MAO'nun 4 farklı aşamada gerçekleştiği sonucuna varmışlardır [28]. Bu aşamalar Şekil 2'de gösterilmektedir.

1. Anodlama,
2. Anodlama ve çözünme
3. Anodlama, çözünme ve oksijen çıkışı
4. Mikro ark oksitlenme



Şekil 2. MAO işlem basamakları [28].

MAO tekniği kullanılarak yapılan kaplama ise temel olarak 2 aşamada gerçekleşir. Birinci aşamada elektrolitik çözelti içerisinde elektroliz durumu meydana gelir. İkinci aşamada ise metal numune etrafındaki elektriksel deşarjlar sonucunda numunenin oksit tabakası ile kaplanmasıdır. Elektroliz aşamasında uygulanan voltajın etkisi ile bir elektrik alan meydana gelir. Bunun sonucunda solüsyon içerisinde pozitif olarak yüklenmiş iyonlar elektrik alan ile aynı yönde hareket ederken, negatif yüklü iyonlar ise elektrik alana zıt yönde hareket etmektedir. Böylece oksijen gaz halinde serbest hale geçmektedir. Bunun sonucunda anot numune üzerinde oksidasyon meydana gelmektedir. Aynı zamanda gaz halinde bulunan hidrojenin serbest hale geçmesi ile katodik yüzeyde katyon indirgenmesi meydana gelmektedir. Şekil 3'te çözelti içerisinde gerçekleşen reaksiyonlar verilmiştir [28].

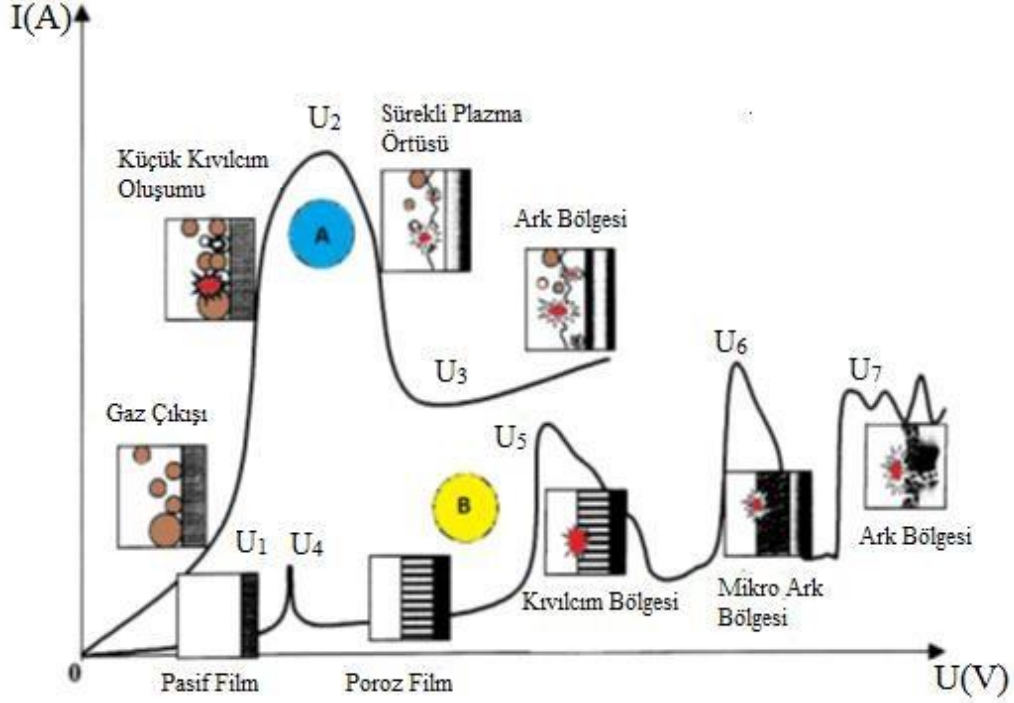


Şekil 3. Elektroliz sırasında gerçekleşen işlemler [29].

MAO tekniğinde A tipi ve B tipi olmak üzere iki farklı akım-voltaj eğrisi meydana gelmektedir. Şekil 4'te A ve B tipi akım-voltaj eğrileri gösterilmiştir. A tipi akım-voltaj eğrisinde, numune yüzeyinde gaz oluşumu ile gerçekleşen metal-elektrolit sistemi gösterilmektedir. B tipi akım-voltaj eğrisinde ise oksit tabakanın oluştuğu sistem görülmektedir.

A tipi akım-voltaj eğrisinde; U_1 - U_2 bölgesinde elektrot ve elektrolit teması sonucu akım ve voltaj hızlı bir şekilde artmaktadır. Böylece elektrolitte yerel sıcaklık artışı olur. Akım U_2 'ye çıktığında ise elektrot, gaz buhar plazması ile sarılır. Bu aşamada hemen hemen tüm voltaj, bu elektrot üstü bölgeye düşer. Daha sonra hidrodinamik kararlılıktan

dolayı U_2 - U_3 bölgesinde akım düşer. U_3 noktası aşıldıktan sonra ise deşarjlar yerine kuvvetli kıvılcımlar meydana gelir [28].



Şekil 4. MAO prosesinde gözlenen akım-voltaj eğrileri [28].

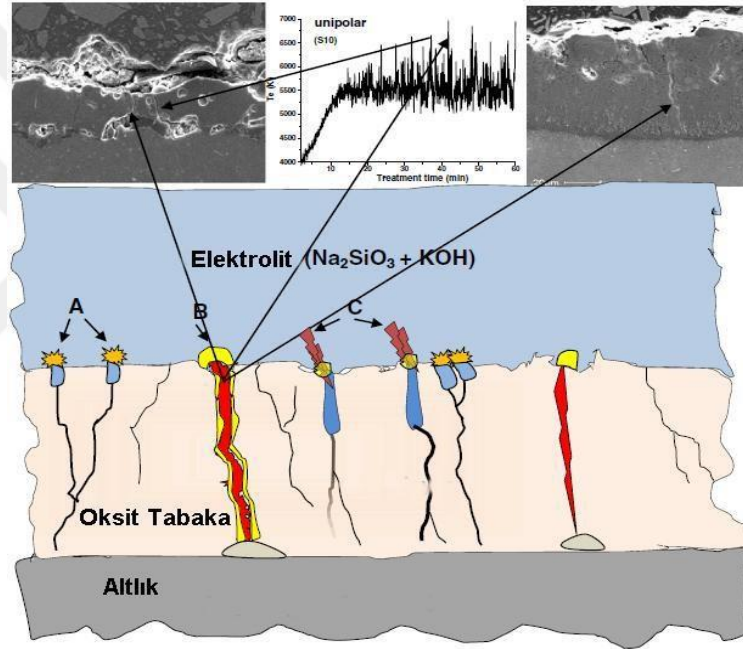
B tipi akım-voltaj eğrisinde; U_4 noktasında, önceden oluşan ve pasif olan film tabakası çözmeye başlamaktadır. Şekil 4'te görüldüğü üzere U_4 - U_5 aralığında poroz katman oluşmaktadır. Akım U_5 değerine çıktığında oluşan kıvılcımlar ile poroz katman bozulur. Akımın U_6 değerine ulaşması ile küçük kıvılcımlar giderek büyür ve bunun sonucunda mikro arkların oluşumu gözlenmektedir. Kısmen düşük güç ile meydana gelen mikro-deşarj işlemi "mikro ark" olarak tanımlanır [30]. U_6 - U_7 arasındaki bölgede, mikro arkların güçlenerek büyümesiyle film katmanı ergir ve bu ergiyen katman ile çözelti karışmaya başlar. Son olarak U_7 bölgesinde porozlu katmandan numune yüzeyine doğru mikro ark boşalmaları meydana gelir ve kıvılcımlar daha yüksek derecede şiddetlenir [28].

MAO prosesinin başlangıcında numune yüzeyinde çok sayıda gözenekten oluşan film katmanı oluşur. Uygulanan voltaj değeri kritik voltaj değerini aştığında oksit katmandaki gözenekler kırılır ve kıvılcım boşalmaları gerçekleşir. Bu anda ki anlık sıcaklık değeri $2000^{\circ}C$ civarına ulaşır.

1.3.4. Mikro Ark Oksidasyon Yönteminde Deşarj Oluşumu

Şu zamana kadar yapılan araştırmalarda üç farklı deşarj oluşum modeli ortaya konulmuştur. Bu modeller ile ilgili şematik gösterim Şekil 5'te verilmiştir.

Birinci model; Albella ve arkadaşlarının yapmış olduğu (Şekil 5,B) çalışmasıdır. Bu çalışmada oksit katmanın elektriksel alanda kırılması ile deşarj kanallarının oluştuğunu gözlemlemişlerdir [31]. MAO işlemi esnasında oksit katman içerisindeki elektriksel alan, belirli bir eşik değere eriştiğinde yerel ergime kanallarında plazma reaksiyonları meydana gelmektedir. Bu elektriksel alan kuvveti daha sonra azalmaya başlamaktadır [32,33].



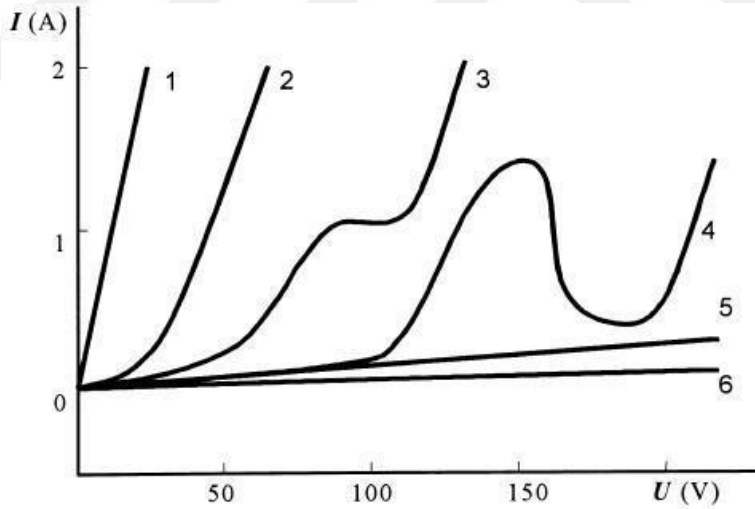
Şekil 5. Deşarj kanallarının oluşum modelleri [34].

İkinci modelde, mikro gözeneklerin altındaki oksit katmanının kırılması ile meydana gelen gaz deşarjıyla deşarj kanallarının oluştuğunu ortaya koymuşlardır. Üçüncü modelde ise deşarj kanallarının, oksit katmanının ani sıcaklık değişimleriyle birlikte gaz sisteminde meydana gelen serbest elektronlar vasıtasıyla oluştuğunu belirtmişlerdir [32-35]. Şekil 5'te gösterildiği gibi, yüzeye yakın bölgelerdeki gözenekler içerisinde meydana gelen deşarj A tipi olarak, yüzeyin daha ileri noktalarındaki gözenekler içerisinde meydana gelen deşarj ise C tipi olarak gösterilmiştir [36].

1.3.5. Mikro Ark Oksidasyon Yönteminde Elektrolit Etkisi

MAO prosesinde en önemli parametrelerden biri kaplanılması istenen numune ile elektrolitik çözeltinin birbirine uyumlu olmasıdır. Elektrolitik çözelti içerisindeki bir grup kimyasallar, gerekli miktarda iletkenlik meydana getirerek çözeltinin davranışını ve aynı zamanda çözeltinin pH seviyesini ayarlamaktadır. Depozisyon oranını artıran bir başka kimyasallar ise gözenekli bir yapıya sebebiyet vermektedir. Bunun sonucunda ise kaplama kalınlığı düşmektedir. Bazı kimyasallar ise meydana gelen kaplamanın sertliğini ve yüzey düzgünlüğünü sağlamaktadır [37].

Literatürdeki çalışmalarda; MAO işleminde kullanılan elektrolitler karboksilik asit, vanadat, permanganat, polimer, dispersant silikat, alüminat, metafosfat, borat ve hidroksitleri içerebilmektedir [15]. Ayrıca; elektrolit içerisine grafit ve MoS₂ gibi katı yağlayıcılar veya teflon (PTFE) eklenerek kaplamanın yapısı modifiye edilebilmektedir [38].



Şekil 6. Çeşitli elektrolitlerde MAO yöntemi ile kaplanan alüminyum için $I=f(U)$ fonksiyonu [28].

1 numaralı eğri, numunenin hızlı bir şekilde çözünmesini sağlayan tuz çözeltileridir. Bunlar NaCl, NaClO₃, NaOH, HCl, NaNO₃'tür. 2 numaralı eğri ise numunenin yavaş bir şekilde çözünmesini sağlayan çözeltilerdir. Bunlar ise H₂SO₄, (NH₄)₂S₂O₈, Na₂SO₄'tür. 3 numaralı eğri, voltajın dar olması sonucunda numunenin pasif hale geçmesini sağlayan çözeltilerdir. Bunlar sodyum asetat, fosforik asittir. 4 numaralı eğri, KF, NaF gibi

kompleks davranış sergileyen fosforik çözeltilerdir. 5 numaralı eğri, metalin zayıfça pasifleşmesini sağlayan çözeltiler iken 6 numaralı eğri ise numunenin güçlü pasifleşmesini sağlayan çözeltilerdir [39-40].

Elektrolitik çözelti, anyonik ve katodik solüsyon bileşenlerinin, altlık olarak kullanılan metal üzerine çökmesini sağlar. Ayrıca MAO prosesinde sodyum silikat ve potasyum silikat solüsyonları da sık bir şekilde kullanılmaktadır. Tüm bunlara ilaveten, çözelti iletkenliğinin yükselmesi için NaF (0,5-20 g/l), NaOH veya KOH (1-50 g/l) vb. gibi farklı bileşenler eklenebilir. Meydana gelen oksit tabakayı kararlı hale getirmek için $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (40 g/l), Gliserin (10 g/l), Na_2CO_3 veya K_2CO_3 (≤ 500 g/l) vb. gibi farklı bileşenler kullanılabilir. Modifiye edici bileşik olarak Na_2AlO_2 (2-20 g/l), $\text{Na}_2\text{P}_6\text{O}_{18}$ (≤ 150 g/l) gibi bileşenler de kullanılabilir [39-40].

1.3.6. Mikro Ark Oksidasyon Yönteminin Uygulama Alanları

MAO yöntemi sonucunda meydana gelen kaplamalar, asit ve bazlara karşı yüksek oranda direnç göstermeleri ve belirli bir sıcaklık değerine kadar göstermiş oldukları dayanıklılıktan dolayı birçok kimyasal uygulamalarda kullanılmaktadır. Ayrıca oluşturulan kaplamaların sertliği, aşınma direnci, korozyon dayanımı yüksek olduğundan dolayı birçok mekanik uygulamalarda kullanılmaktadır.

Kaplamaların ısı iletkenliği düşük olması sebebiyle ani ısınma ve soğumalara karşı termal şok dayanımları iyidir. Bu nedenle birçok ısı uygulamalar gerektiren yerlerde kullanılmaktadır [41].

MAO yöntemi ile kaplanmış parçalar, başta otomotiv, tekstil, uzay sanayi ve askeri uygulamalar olmak üzere pek çok alanda sıkça kullanılmaktadır. Parçaların yüzeyindeki seramik kaplama sayesinde üstün dielektrik özellik gösterebilir ve elektriksel yalıtkanlığın istenildiği ortamlarda kullanılabilir. Aynı şekilde yüksek sıcaklığa dayanıklı bir kaplama olmasından dolayı uzay sanayisinde de sıklıkla tercih edilebilmektedir [15]. Ayrıca elektrolitik çözeltiye eklenen ilaveler sayesinde farklı renklerde kaplamalar yapılabilmektedir. Böylece kaplanan malzemelerin mimari alanlarda ve estetik amaçlı olarak kullanılabilmesi sağlanmaktadır [42].

1.3.7. Mikro Ark Oksidasyon Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları

MAO yöntemi ile kaplamanın tercih edilmesinin başlıca nedeni, metal üzerinde oluşan kalın seramik tabakadır. Anodlama ile kaplanamayan silisyumca zengin Al alaşımları MAO yöntemi ile kaplanabilmektedir. Ayrıca bu yöntem ile kaplanan parçaların yüzeyleri, boya tutma özelliği sayesinde rahatlıkla boyanabilmektedir.

MAO tekniğinde numune hazırlama vb. gibi işlem öncesi hazırlıklar diğer yöntemlere kıyasla daha az önem teşkil eder. Böylece üretim süreci daha hızlı işler ve numune hazırlama sürecinde kullanılan solüsyonların çevresel zararları minimuma indirilmesi sağlanır. Ayrıca MAO yöntemi, geleneksel anodik oksidasyon tekniği ile kaplanması zor ve sorunlu olan yüksek oranda bakır içeren Al alaşımlarının ve yüksek oranda silisyum içeren döküm malzemelerinin de kaplanabilmesine olanak sağlar. Tüm bunların yanında, valf metaller olarak adlandırdığımız Al, Mg, Ti, Nb, Zr vb. gibi geniş malzeme grubuna uygulanması bir avantaj olarak değerlendirilmektedir [15,26].

MAO yöntemi, geleneksel anodik oksidasyon yöntemlerine kıyasla çevreye karşı daha duyarlıdır. Ayrıca zehirli katkıları içermeyecek bir şekilde kaplama meydana gelmektedir. Yüksek oranda aşınma ve korozyon dayanımı sağlamaktadır. Bu nedenle, çelik parçalar yerine hafif alaşımların kullanılmasına olanak tanır. Özellikle otomotiv endüstrisinde yaygın bir kullanım alanına sahiptir [43].

MAO tekniğinin en önemli avantajları şöyle sıralanabilir;

- İşlem öncesi hazırlıklar çok büyük bir önem teşkil etmemektedir.
- Çevre dostu ve ucuz elektrolit kullanılmaktadır.
- Dekoratif amaçlı kullanılmak isteniyorsa, kaplamaların rengi değiştirilebilir.
- Numune sertliği yüksek oranda arttırılmaktadır.
- Yüksek aşınma ve korozyon dayanımına sahiptir.
- Termal şok direnci bakımından, istenilen uygulamalarda kullanılabilir.

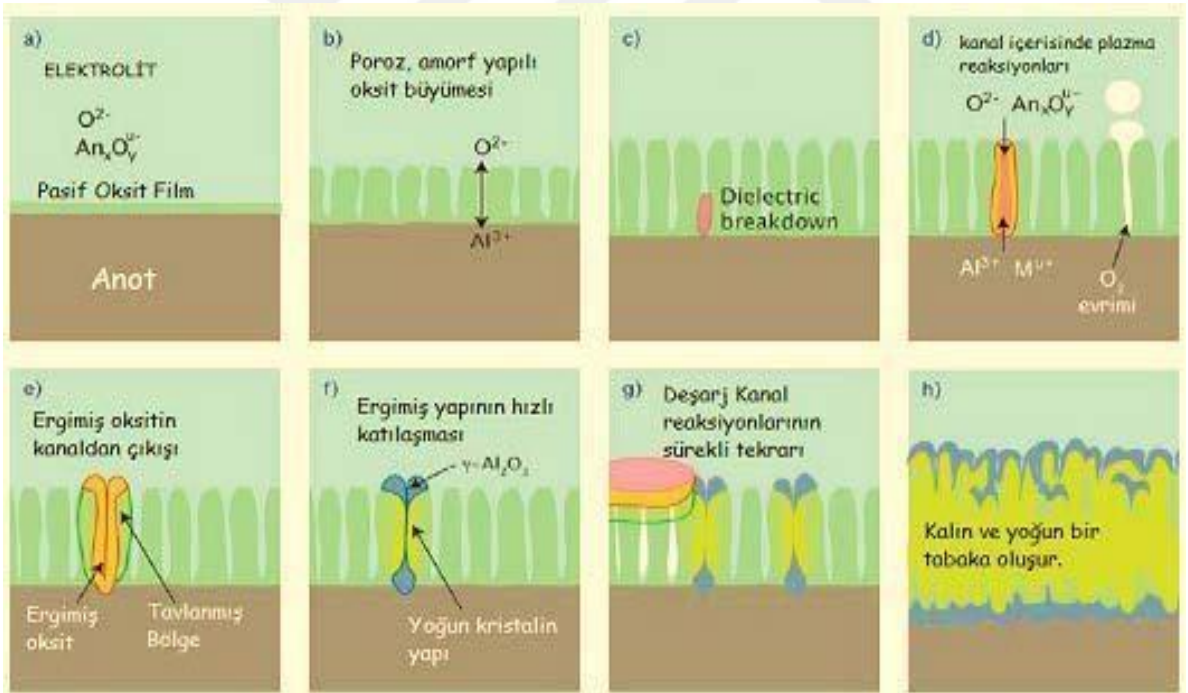
MAO yöntemi ile elde edilen kaplamaların bu özelliklere sahip olması birçok konuda avantaj sağlamaktadır. Fakat, MAO yönteminin kullanılmasını sınırlayan bazı dezavantaj durumlarda mevcuttur.

Kaplamanın meydana gelmesi için parçanın boyut ve şekli göz önüne alınarak enerji sağlayabilecek bir güç kaynağına gereksinim vardır. Bu nedenle üretim maliyetinin yüksek olması bir dezavantaj olarak söylenebilir. Kaplama sırasında numune yüzeyindeki yüksek sıcaklıklardan dolayı elektrolitik çözeltide ısınacağından, kapasitesi yüksek olan bir

soğutucuya ihtiyaç vardır. Soğutucunun görevi ise elektrolitik çözeltiyi soğutmaktır. Meydana gelen kaplama pürüzlü olmakta aynı zamanda dış kısımları yüksek oranda porozite içerebileceğinden, dış kaplamanın aşınma direnci düşüktür [15].

1.4. Alüminyum Alaşımlarının Mikro Ark Oksidasyonu

Al ve alaşımlarının MAO yöntemi ile kaplama olayı, dielektrik bozunum voltajının aşılması ile oluşan mikro arkların, deşarj kanallarını oluşturması sonucu o bölgenin sıcaklık ve basıncının artması ile gerçekleşir. Daha sonra bu bölgede güçlü elektrik alanının etkisiyle iyonlar, deşarj kanallarına girer. Bu safhada artan sıcaklık ve basıncın etkisiyle Al oksitlenir ve kaplama gerçekleşir. Oluşan oksitler (Al_2O_3) nispeten daha soğuk elektrolit ile reaksiyona girerek katılaşır ve bunun sonucunda da kaplama kalınlığı artarak devam eder [44]. Şekil 7'de Al ve alaşımlarının kaplama süreci gösterilmektedir.



Şekil 7. MAO işleminde Al numunedeki oksit tabaka oluşumu [44].

Alüminyumun hızlı katılaşması sonucu yarı kararlı $\gamma-Al_2O_3$ fazı oluşmaktadır. Kaplanan yüzey ile elektrolit teması kaplama süresince daima olacağından dolayı hızlı soğuma gerçekleşerek dış yüzey $\gamma-Al_2O_3$ fazı içermektedir. Ancak alüminyumun düşük ısı

iletkenliğinden dolayı iç katman yüksek sıcaklığını korur ve bunun sonucunda da γ - Al_2O_3 fazından α - Al_2O_3 fazına dönüşüm gerçekleşir. Ayrıca α - Al_2O_3 fazı γ - Al_2O_3 fazından daha sert bir faz olduğundan dolayı iç katman, dış katmana kıyasla daha sert ve daha yoğun bir kaplamaya sahiptir [7].

1.5. Grafit

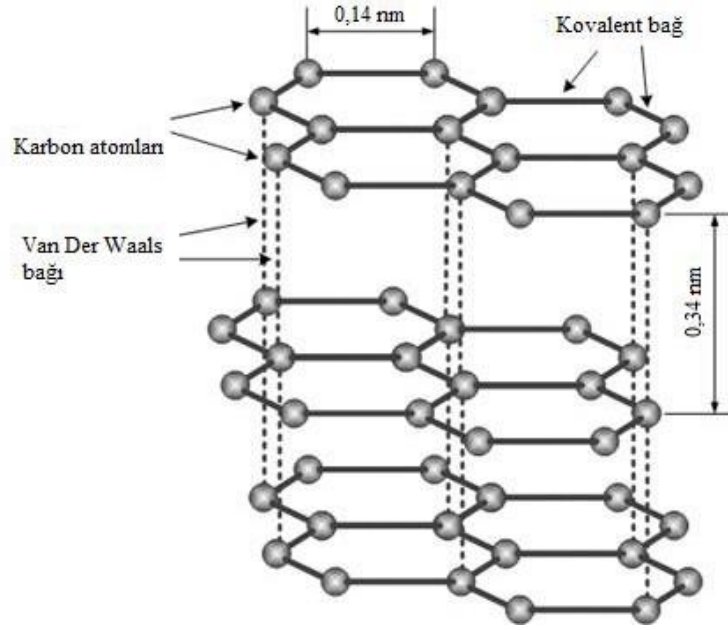
1789 yılında Alman minereolog WERNER tarafından ismi konulan ‘‘Grafit’’ aynı zamanda Yunan dilinde yazmak anlamına gelen ‘‘graphein’’ fiilinden türetilmiştir. Gri ile siyah arasındaki değişen tonlara sahip olan grafit genellikle kül rengindedir. Yaklaşık olarak yoğunluğu 2 g/cm^3 olup yumuşak, yağsı dokunumlu ve levha şeklinde iken bükülebilme yeteneğine sahiptir. Ortam oksijenli ise yanma sıcaklığı yaklaşık olarak 600 - $670 \text{ }^\circ\text{C}$, atmosferik ortamda ise yaklaşık olarak 3500°C 'dir. Ayrıca grafitin ergime sıcaklığı $3927 \text{ }^\circ\text{C}$ olup bu sıcaklığa erişildiğinde ise sıvı hale geçmeden direk gaz haline dönüşmektedir [4].



Şekil 8. Grafit tozunun görüntüsü

Periyodik tabloda 4A grubunda yer alan karbonun elmas ve grafit olmak üzere 2 allotropu vardır. Grafit hekzagonal kristal yapıya sahip olup 2 boyutlu düzlemde karbon atomlarının düzgün altıgen olarak üst üste katmanlar oluşturacak şekilde birbirine

bağlanması ile meydana gelmektedir. Şekil 9’da grafitin kimyasal yapısı gösterilmektedir. Karbon atomlarından oluşan levhaların birbirlerinin üzerinden çok rahat bir şekilde kayması grafitin en önemli karakteristik özelliklerinden biri olan yağlayıcı olma özelliğini sağlamaktadır [4]. Grafit, sıcaklığının yükselmesi ile mekanik özelliklerini iyileştiren tek maddedir. 2 boyutlu düzlemde karbon atomlarının arasındaki bağ oldukça kuvvetli kovalent bağ olmasına rağmen katmanlar arasındaki bağ ise oldukça zayıf Van Der Waals bağıdır. Bu sebepten dolayı grafit, elmas kadar sert olmayıp yumuşak bir madde olma özelliğine sahiptir. Elmas kuvvetli karbon-karbon bağ kuvvetine sahipken grafit ise Sigma ve Pi olmak üzere 2 tür bağa sahiptir [5]. Bu nedenle elmas çok iyi aşındırıcı bir malzeme olarak kullanılırken grafit ise tam aksine çok iyi yağlayıcı maddedir.



Şekil 9. Grafitin kimyasal yapısı

1.5.1. Grafitin Mekanik Özellikleri

Avrupa Birliği (AB) doğal kaynakların önemini anlamak amacıyla birçok çalışma yapmaktadır. En önemli çalışmalardan biri olan “AB için Kritik Hammadeler” başlığı altında hazırlanan risk listeleri içerisinde grafit 14 kritik hammadde içerisinde yer almıştır. Grafitin bu kadar önemli ve aynı zamanda stratejik bir madde olmasının en önemli nedenleri; çok iyi ısı iletkenliği, çok iyi elektrik iletkenliği (bakırdan 20 kat fazla) ve ısıya

karşı dayanıklılığıdır. Ergime sıcaklığının yüksek olmasının yanı sıra genleşme sabitinin düşük olması, yüklemeye ve kimyasal etkileşime dirençli olması, ani sıcaklık değişimlerine karşı dayanıklı olması gibi özelliklerinden dolayı termal şok gerektiren yerlerde kullanılabilir. Kaygan, yumuşak ve yapışma kabiliyetinden dolayı sürtünmeyi azaltmak amacıyla makine araç ve gereçlerde yağlayıcı olarak kullanılmaktadır. Yağlayıcı olarak kullanılan grafitin minimum %95 karbona sahip olması ama kuvars gibi safsızlıkları içermemesi istenmektedir [4].

1.5.2. Grafitin Kullanım Alanları

Birçok karakteristik özelliğinden dolayı grafit, çok geniş bir kullanım alanına sahiptir. Çelik ve elektrometalürji sanayiinde, pil ve bataryalarda, genellikle saf grafit tercih edilmektedir. Ayrıca refrakter kaplamalarda ve macunlarda, boyacılık ve gres yağlarında kullanılmaktadır. Grafit yumuşak olmasından dolayı kurşun kalem yapımında, yağlayıcı özelliğinden dolayı metal aksamlarda, ateş ve aside karşı dayanıklı olmasından dolayı ateşe dayanıklı boyalar, dökümcülük ve refrakter endüstrisinde, pota malzemelerinin imalinde kullanılmaktadır. Mükemmel elektrik iletkenliğinden dolayı elektrot, motor fırçaları, elektronik araç ve gereçler vb. gibi kullanım alanları da mevcuttur. Ayrıca otomotiv endüstrisinde fren balataların üretiminde kullanılmaktadır. Grafit yağlayıcı olarak kullanım yerine göre kuru veya yağ yağlayıcı olarak kullanılmaktadır. Deniz araçlarında ve motor silindirleri gibi yerlerde kuru yağlayıcı olarak kullanılırken, bilyeli yataklarda ise yağ yağlayıcı olarak kullanılmaktadır. Mükemmel elektrik iletkenliği ve yüksek sıcaklıklara dayanımı sebebiyle çamaşır makinesi, elektrik motor fırçalarında kullanımı mevcuttur. Son yıllarda kuru pil yapımında pul grafit kullanımı önemli derecede artmıştır. Bir yüzeye sürülen grafitin silinebilir olması sebebiyle farklı sertlikte kurşun kalem yapımında kullanılmaktadır. Bunların yanında, spor araç ve gereçleri, olta kamışında uçak yapımında, uzay araç ve gereçlerde kullanılmaktadır [4].

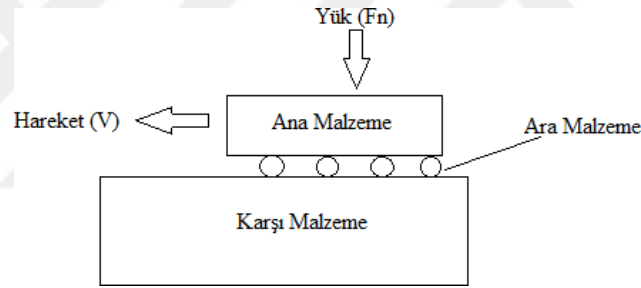
1.6. Aşınma

Aşınma birbiriyle temas halinde bulunan elemanların mekanik, fiziksel ve kimyasal etkileşimler sonucu meydana gelen istenmeyen malzeme kaybı olarak tanımlanmaktadır. Böylece aşınma, zamanla makine elemanlarında çalışma verimini düşürmektedir [6].

Malzeme yüzeyinde meydana gelen hasarın aşınma olarak sayılabilmesi için aşağıdaki şartların gerçekleşmiş olması gerekir [45].

- Mekanik, fiziksel veya kimyasal etkileşim
- Sürtünme
- Sürekli
- Malzeme yüzeyinde hasar/bozunma
- İstemsiz olarak

Aşınmayı oluşturan iki farklı malzeme aşınma çifti olarak adlandırılır. Belirli bir yük altında hareket olması şartıyla aşınan malzeme ile aşındırılan malzeme arasında bir ara malzeme olması durumunda aşınma olayı meydana gelmektedir. Ayrıca aşınma esnasında kopan parçacıklarda ara malzeme olarak aşınma olayına katılabilmektedir. Şekil 10'da aşınma olayını oluşturan unsurlar gösterilmektedir [6].



Şekil 10. Aşınma olayını oluşturan unsurlar [6]

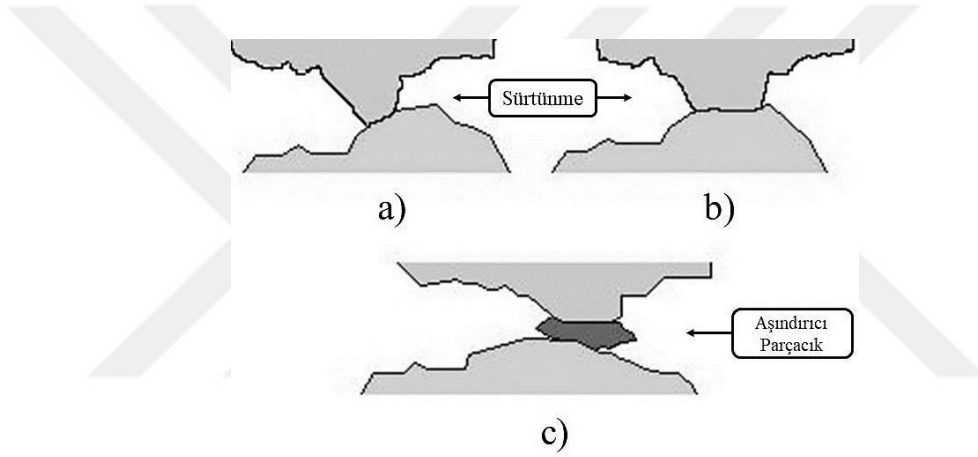
1.6.1. Aşınma Türleri

Aşınma; malzeme cinsi, yağlayıcı, sıcaklık, nem, uygulanan yük ve malzemelerin sertliği gibi birçok parametreden etkilenmektedir [46]. Aşınma olayını oluşturan unsurlara bağlı olarak farklı aşınma türleri meydana gelmektedir. En sık kullanılan aşınma türleri aşağıda gösterilmektedir [47].

- Adezyon Aşınması
- Abrasyon Aşınması
- Korozyon Aşınması
- Yorulma Aşınması
- Erozyon Aşınması

1.6.1.1. Adezyon Aşınması

Adezyon aşınması aynı zamanda kayma aşınması olarak adlandırılmaktadır. Temas halinde ve birbirine göre bağıl hareket yapan iki malzeme arasında kuru ortamda meydana gelen aşınma türüdür. Aşınma, kayma yüzeyinde iki malzeme arasında kaynak oluşumu şeklinde gerçekleşmektedir. Temas halinde bulunan bölge tamamen veya kısmen parçalanması durumunda kopan parçalar düşebilir veya abrazif aşınmaya sebebiyet verebilir. Temas noktalarında sıcaklık veya yüksek basınç olması kaynak oluşumunu hızlandırarak aşınma oluşumunu kolaylaştırır [6]. Şekil 11’de adezyon aşınmanın şematik görüntüsü gösterilmektedir [48].



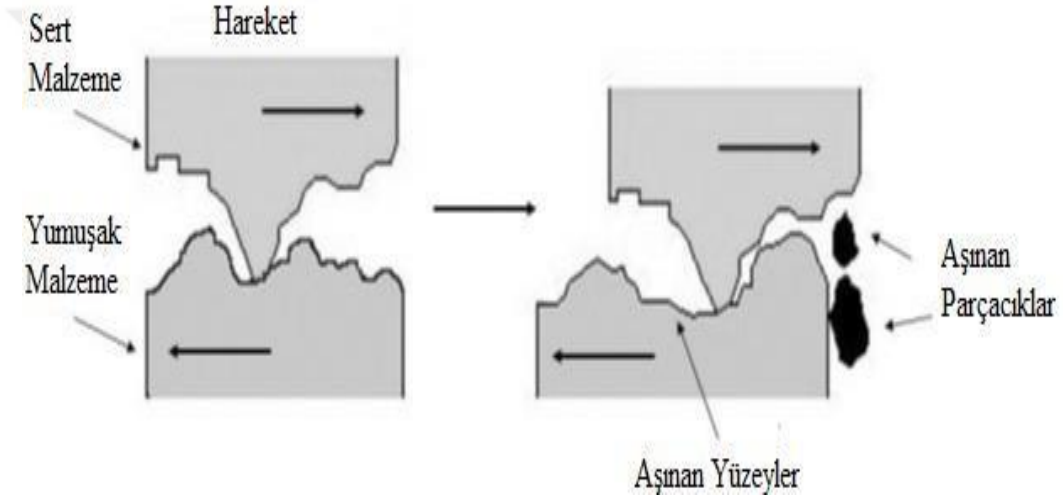
Şekil 11. Adezyon aşınması

Adezyon aşınmasını engellemek ya da azaltmak amacıyla aşağıdaki işlemler uygulanabilir [49].

- Malzemelerin kolay alaşım oluşturmayacak şekilde seçilmesi,
- Malzeme yüzeyinde kaplama yapılması,
- Birbiri içerisinde çözünmeyen iki metal seçilmesi,
- Yağlama yöntemlerinin uygulanması,
- Isı oluşumunun azaltılması,
- Sıcaklığın azaltılması,

1.6.1.2. Abrazyon Aşınması

Sert yüzey ile yumuşak yüzey arasında meydana gelen bir aşınma türüdür. Abrazif aşınmayı meydana getiren sert partiküller dışardan geldiği gibi adezyon aşınma sonucu olarak sistemin içinde de meydana gelebilir. Sert partiküller kesici takım işlevi yaparak kendisinden yumuşak olan malzemedan parça koparır. Kopan malzemeler yabancı bir malzeme gibi aşınma olayına katılır ve aktif rol oynar. Abrazyon aşınmasında önemli rol oynayan temel unsurlar; parçacık boyutu, sertlik, parçacık şekli, uygulanan yük, kayma hızı ve aşındırıcı sıralanabilir. Şekil 12’de abrazyon aşınmasının görüntüsü verilmektedir [6].



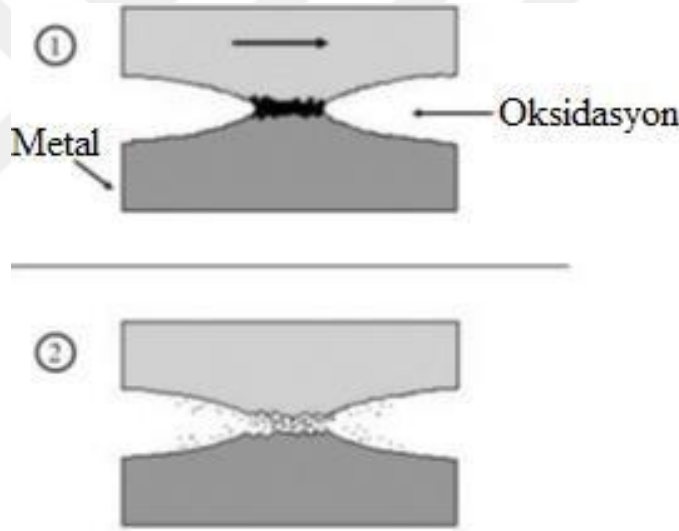
Şekil 12. Abrazyon aşınması

Abrazyon aşınmasını engellemek ya da azaltmak amacıyla aşağıdaki işlemler uygulanabilir [49].

- Malzeme yüzeylerine ısıtım işlem yapılması,
- Kaplama yapılması,
- Temas halinde bulunan bölgeye dışardan yabancı cisimlerin girmesini önlemek,
- Aşınmaya maruz kalabilecek parçaların değişiminin kolay yapılabilmesini sağlamak amacıyla tasarım yapılması,

1.6.1.3. Korozyon Aşınması

Kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyonların birlikte gerçekleşmesi sonucu oluşan ve genellikle metallerde meydana gelen bir aşınma türüdür. Kimyasal korozyon, elektrokimyasal korozyon ve sürtünme oksidasyonu olarak farklı şekillerde meydana gelmektedir. Korozif aşınma normalde çok ciddi bir aşınma olmamasına rağmen yüksek sıcaklık ve nem ile gerçekleşince çok ciddi bir aşınma türü olarak karşımıza çıkabilmektedir. Oksitlenmenin gaz ortamında meydana gelmesi kimyasal korozyon olarak adlandırılırken, çözelti ortamında meydana gelmesi ise elektrokimyasal korozyon olarak adlandırılmaktadır. Demir esaslı malzemelerde ise genellikle sürtünme oksidasyonu olarak meydana gelmektedir. Sürtünme oksidasyonu, mekanik ve korozif etkileşimin bir arada meydana gelmesi ile oluşan korozyon türü olarak adlandırılmaktadır [6].



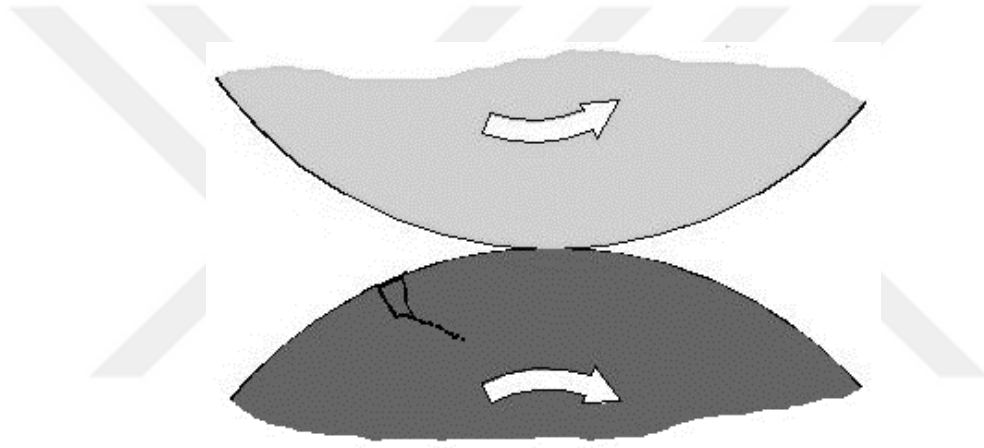
Şekil 13. Korozyon aşınması

Malzemeler arasında meydana gelen pas, korozif aşınmanın en önemli nedenlerinden birisidir. Şekil 13'te korozyon aşınmasının şematik görüntüsü verilmektedir. Malzeme yüzeylerinin arasında oluşan pas, okside sebebiyet vermektedir. Korozyon aşınmasını engellemek ya da azaltmak amacıyla aşağıdaki işlemler uygulanabilir [49].

- Yüzey kaplama yapılması,
- Yağlayıcı kullanılması,
- Birbiri ile reaksiyona giremeyecek şekilde malzeme seçilmesi,

1.6.1.4. Yorulma Aşınması

Malzemelerin farklı ve sürekli yükler altında olması sonucu meydana gelen bir aşınma türüdür. Yorulma aşınması, tekrar eden gerilmelerin çok sayıda yükleme periyodundan sonra meydana gelmektedir. Malzemelerin değişken yüklerle maruz kalması sonucu, malzeme yüzeyinin hemen altında mikro çatlak oluşumu ile başlamaktadır. Daha sonra oluşan bu mikro çatlaklar malzeme yüzeyine doğru ilerler ve pulcuk kalkması meydana gelir. Böylece yüzeyde çukur ve/veya oyuklar oluşur. Özellikle dişli çarklarda, raylarda, rulmanlı yataklarda ve haddeme işlemleri esnasında meydana gelmektedir [6]. Şekil 14'te yorulma aşınmasında çatlak oluşumu ve ilerlemesinin şematik görüntüsü verilmektedir.



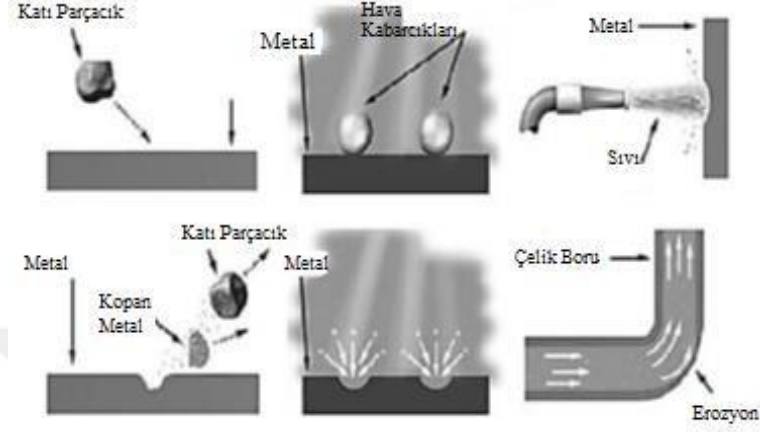
Şekil 14. Yorulma aşınmasında çatlak oluşumu ve ilerlemesi [47].

1.6.1.5. Erozyon Aşınması

Katı ve sıvı içerisindeki parçacıkların malzeme yüzeyine çarpması sonucu meydana gelen malzeme kaybı erozyon aşınması olarak tanımlanmaktadır. ASTM G76-95 standardında erozyon aşınması, belirli bir ivmeye sahip olmak şartıyla aşındırıcı parçacıkların bir yüzeye temas etmesi sonucu yüzeyde gerçekleşen malzeme kaybı olarak tanımlanmaktadır [49].

Erozyon aşınması ile abrazyon aşınması birçok yönden birbirine benzemektedir. Abrazyon aşınmasında sert partiküllerin yüzeyi kazınması şeklinde gerçekleşirken, erozyon aşınması ise sert partiküllerin malzeme yüzeyine çarpması sonucu meydana gelmektedir. Erozyon aşınmasında sert partiküllerin bağıl hareketleri yüzeye dik

olabilmektedir. Bu aşınma çarpma erozyonu olarak adlandırılabilir [6]. Erozyon aşınması; katı parçacık, sıvı ve çamur erozyon aşınması şeklinde meydana gelebilir. Bu erozyon aşınma türlerinin şematik görüntüsü Şekil 15'te gösterilmektedir [47].



Şekil 15. Erozyon aşınması

1.7. Literatür Özeti

Valf metallerin ve alaşımlarının MAO yöntemi ile kaplanması üzerine literatürde birçok çalışma mevcuttur. Ancak yapılan kaplamaların, malzemelerde istenilen bazı özellikleri sağlayamadığından dolayı elektrolit çözeltisi içerisine farklı tür katkı malzemeleri katılarak (katkılı elektrolit) istenilen özellikler sağlanmaya çalışılmaktadır. Metaller üzerine MAO yöntemi ile kaplama yapılmış çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Mosab Kaseem ve arkadaşları, elektrolit çözelti içerisine MoO_2 ve ZrO_2 katkıları katarak, 7075 Al alaşımı yüzeyine MAO yöntemi ile kaplama gerçekleştirmişlerdir. Böylece, katkıların oksit filmin yapısına ve korozyon davranışına etkisini incelemişlerdir. Bu amaçla banyo A ve banyo B olmak üzere iki farklı çözelti hazırlanmış ve katkı elektrolit ile katkısız elektrolit sonucunda meydana gelen kaplamaları incelemişlerdir. A banyosu 6 g/l KOH + 4 g/l Na_2SiO_3 buna karşın B banyosu ise 6 g/l KOH + 4 g/l Na_2SiO_3 + 3 g/l Na_2MoO_4 + 2 g/l ZrO_2 olarak oluşturmuşlardır. A banyosunda oluşan oksit filmlerdeki mikro gözeneklerin yaklaşık olarak ortalama boyutu, B banyosunda oluşan mikro gözeneklerin yaklaşık olarak ortalama boyutundan daha büyük olduğunu gözlemlemişlerdir. Katkılı elektrolit olarak MoO_2 ve ZrO_2 kullanıldığında numunelerin korozyon dirençlerinin arttığını belirtmişlerdir [50].

Quanzhi Chen ve diğeri, grafen partiküllerinin kaplama özelliklerine etkisini incelemek amacıyla elektrolit çözeltisi içerisinde farklı oranlarda grafen partikülleri katarak, 6063 Al alaşımı üzerine MAO yöntemi ile kaplama gerçekleştirmişlerdir. Temel elektrolit olarak 10 g/l Na_2SiO_3 + 3 g/l NaF + 2 g/l $\text{Na}(\text{PO}_3)_6$ + 1 g/l NaOH kullanılmış olup, elektrolit içerisinde 0 g/l, 0,1 g/l, 0,15 g/l, 0,2 g/l konsantrasyona sahip grafen parçacıkları ekleyerek 4 farklı elektrolit havuzu hazırlamışlardır. Grafen parçacıklarının dielektrik bozunma (dielectric breakdown) voltajını düşürdüğü böylece reaksiyon hızını arttırdığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca elektrolit içerisinde grafen parçacıklarının eklenmesi sonucunda kaplama kalınlığının ve alaşımın sertliğinin arttığını belirtmişlerdir. Elektrolit içerisinde grafen parçacıklarının konsantrasyonu 0,15 g/l'den fazla olduğu zaman kaplama yüzeyindeki gözenek sayısının azaldığını gözlemlemişlerdir. Konsantrasyonun 0,2 g/l olması durumunda çatlakların belirgin bir şekilde ortaya çıktığını belirtmişlerdir. Korozyon testleri sonucunda ise MAO yöntemi ile kaplanmış numunelerin korozyon direnci, grafen partiküllerinin eklenmesi sonucunda önemli derecede arttığını ve 0,15 g/l grafen içeriğine sahip kaplamanın en iyi korozyon direnci sergilediğini tespit etmişlerdir [51].

Bir grup araştırmacı, 6063 Al alaşımlarını silikat, borat ve alümina çözeltileri içerisinde nano katkı maddesi olarak TiO_2 veya Al_2O_3 eklenmesi sonucu, kaplamaların mikro yapılarını ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Bunun için temel elektrolit olarak 10 g/l Na_2SiO_3 + 3 g/l KOH, 10 g/l $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ + 3 g/l KOH ve 10 g/l Na_2AlO_2 + 3 g/l KOH olarak 3 farklı elektrolitik çözelti hazırlamışlardır. Ayrıca her bir elektrolite ayrı ayrı 3,2 g/l TiO_2 ve 3,2 g/l Al_2O_3 eklemişlerdir. Tüm nano katkı maddeleri yaklaşık 10 nm'lik bir boyuta sahip olup ve çözeltilere eşit olarak dağıtmışlardır. Katkılı kaplamaların, katkısız kaplamalara oranla daha az gözeneklere sahip olduğunu açıklamışlardır. Aynı şekilde katkılı kaplamaların, katkısız kaplamalara kıyasla daha fazla oksit içerdiğini belirtmişlerdir. Mekanik özellikleri belirlemek için yapılan testler sonucunda ise katkı maddesi olarak Al_2O_3 kullanıldığında diğer elektrolit banyolarında işlem görmüş kaplamalara kıyasla daha yüksek mikro sertlik değerleri elde edildiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca katkılı kaplamaların aşınma dirençlerinin, katkısız kaplamaların aşınma dirençlerine kıyasla belirgin bir şekilde daha iyi olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, borat bazlı kaplamalar sonucu elde edilen numunelerin aşınma direnci, silikat ve alüminat bazlı kaplamalar sonucunda elde edilen numunelere kıyasla daha düşük olduğunu gözlemlemişlerdir [52].

Ren-gua Song ve takım arkadaşları, farklı konsantrasyonlarda TiO₂ nano katkı maddesi kullanarak farklı çözeltiler hazırlamış ve 6063 Al alaşımı üzerine kaplama işlemi gerçekleştirmişlerdir. Nano katkı maddesi içermeden oluşan elektrolit bileşimi 1 g/l KOH + 10 g/l Na₂SiO₃ olup daha sonra 10 nm büyüklüğündeki TiO₂ sırasıyla 0,8 g/l, 0,16 g/l, 2,4 g/l, 3,2 g/l ve 4 g/l konsantrasyonlarda olmak üzere çözeltilere eşit olarak dağıtmışlardır. Elektrolitlerdeki TiO₂ konsantrasyonunun artmasına bağlı olarak kaplama yüzeyinin daha yoğun ve pürüzsüz hale geldiğini ve gözenek sayısının azaldığını gözlemlemişlerdir. Nano katkı maddesi kullanılmadan elde edilen kaplamanın sertlik değeri 1356,5 HV olmasına karşın nano katkı maddesi kullanılması sonucunda ise bu değerin arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca 3,2 g/l konsantrasyona kadar, TiO₂ konsantrasyonunun artması ile sertlik değerinin de arttığını gözlemlemişlerdir. Nano katkı madde konsantrasyonu arttıkça yapışma değerleri artmış olup en yüksek yapışma değeri 3,2 g/l TiO₂ konsantrasyonuna sahip kaplamada meydana geldiğini açıklamışlardır [53].

Yapılan bir çalışmada, Al alaşımının mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla elektrolit içerisine katkı olarak amonyum demir (III) oksalat hidrat (C₆H₁₂FeN₃O₁₂.3H₂O) eklenmiştir. Amonyum demir (III) oksalat hidrat arttıkça kıvılcım voltajının düştüğü ayrıca oksit tabakadaki gözenek sayısının düştüğü belirtilmiştir. Elektrolit içerisindeki demirin katman içerisinde bağlayıcı olarak kullanıldığı bunun sonucunda da korozyon direncinin arttığı gözlemlenmiştir. 4 ve 5 g/l'lik amonyum demir (III) oksalat hidrat konsantrasyonunda en küçük yüzey pürüzlülüğü (Ra=0,5 µm) elde edilmiştir. Amonyum demir (III) oksalat hidratın konsantrasyonu 5 g/l'nin üzerinde olduğunda ise gözenek miktarı azalsa da gözenek boyutu artmış ve yüzey pürüzlülüğünün hızla arttığı gözlemlenmiştir. 5 g/l'lik amonyum demir (III) oksalat hidrat konsantrasyonundan elde edilen sertlik değeri, saf Al alaşımının sertliğinden 10 kat fazla olduğu belirtilmiştir. Fakat, amonyum demir (III) oksalat hidrat konsantrasyonu 5 g/l'nin üzerinde olduğunda sertliğin yavaş yavaş azaldığı belirtilmiştir. Ayrıca, amonyum demir (III) oksalat hidrat konsantrasyonu içeren tüm kaplamaların yüksek bir korozyon direnci sergilediği açıklanmıştır [54].

Stojadinovic ve diğerleri, sodyum tungstat elektrolitik çözeltisi içerisine saf Al daldırarak kaplama işlemi gerçekleştirmişlerdir. İşlem süresinin artması sonucu gözenek sayısının azaldığını ancak gözenek boyutlarının arttığını belirtmişlerdir. Kaplamaların kalınlığı arttıkça deşarj oluşumu için gereken enerjinin artacağını ve bu enerji artışına bağlı olarak deşarj kanallarının boyutunun arttığını belirtmişlerdir. İşlemin ilk aşamalarına

bakıldığında deşarj kanallarının homojen dağılımlı ve küçük olduğu ancak işlem süresi arttıkça deşarj kanallarının düzensiz ve büyük olduğu belirtilmiş ayrıca bu düzensizlikten dolayı yüzey pürüzlülüğünün arttığını açıklamışlardır [55].

Lee ve arkadaşları, 7075 Al alaşımının oksit yapısını ve korozyon direncini iyileştirmek amacıyla elektrolit içerisine çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) eklemişlerdir. Ortalama 30 nm çapa sahip MWCNT'ler kullanmışlardır. Katkılı elektrolitik çözeltinin dielektrik bozunma voltaj değerini düşürdüğünü gözlemlemişlerdir. Dielektrik bozunum voltaj değerlerinin sırasıyla katkısız ve katkılı elektrolitler için yaklaşık olarak 275 V ve 225 V olduğunu belirtilmişlerdir. Böylece MWCNT katkılı elektrolit banyosunda yapılan kaplamalarda reaksiyon hızının daha hızlı gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Ayrıca MWCNT katkılı elektrolit ile oluşan kaplamanın katkısız elektrolit ile oluşan kaplamaya kıyasla daha az gözenek içerdiğini tespit etmişlerdir [56].

Yürektürk Y., 10 mm x 10 mm x 4 mm ebatlarında Al-6082 alaşımı için farklı oranlarda MWCNT kullanarak 3 farklı elektrolit hazırlamış ve daha sonra bu elektrolitlerde MAO yöntemi ile kaplama gerçekleştirmiştir. İlk elektrolit temel olarak KOH, NaAlO₂ ve saf su karışımından meydana gelirken ikinci elektrolite katkı olarak 2 g/l MWCNT, üçüncü elektrolite ise katkı olarak 4 g/l MWCNT ekleyerek farklı voltaj ve sürelerde kaplama işlemini gerçekleştirmiştir. 300V ve 400V olmak üzere iki farklı voltajda ve 1, 2, 5 ve 10 dakikalık işlem süreleri uygulayarak sonuç almıştır. Aynı şartlar altında tüm kaplamalarda artan süreyle birlikte kaplama kalınlığının arttığını açıklamıştır. Aynı voltaj altında, artan süreyle ve MWCNT ilavesiyle genel olarak pürüzlülük değerlerinin arttığını gözlemlemiştir. Yapılan mikro sertlik ölçümleri incelendiğinde 2 g/l MWCNT katkılı kaplamada artan voltajla birlikte mikro sertlik değerinin de arttığını belirtmiştir. 300V ve 400V uygulanarak yapılan tüm kaplamalarda aşınma dirençleri yaklaşık olarak aynı olduğunu açıklamıştır [57].

Tarakçı M., Al-Mg alaşımının MAO yöntemi ile kaplanması sonucu Mg'un etkisini araştırmayı amaçlamıştır. Bu sebeple %0,5, 1, 2, 4, 7, 15 Mg bileşimine sahip Al-Mg alaşımları kullanmıştır. Numunelerin 12 g/l NaOH, 2 g/l KOH elektrolitik çözelti içerisinde, işlem süresi 2 dk olacak şekilde kaplama işlemlerini gerçekleştirmiştir. Kaplamaların morfolojisi incelendiğinde 3 tabaka meydana geldiğini gözlemlemiştir. İlk olarak ince bariyer tabaka, daha sonra içerisinde sert α -Al₂O₃ fazı içeren yoğun ara tabaka ve γ -Al₂O₃ fazı içeren kırılğan dış tabaka olduğunu tespit etmiştir. Alaşımın Mg içeriği arttıkça kaplama kalınlığının da arttığını belirtmiştir. %2'den düşük Mg içeren

kaplamalarda yüzey pürüzlülüğünün düştüğünü, %2'den yüksek Mg içeren kaplamalarda ise yüzey pürüzlülüğünün arttığını belirtmiştir. Mg oranı arttıkça kaplamaların gözenekliliğinin arttığını açıklamıştır. Mg miktarı arttıkça α - Al_2O_3 fazının azaldığını gözlemlemiştir. Bunun sonucunda da kaplama sertliğinde azalma olduğunu belirtmiştir [58].

Bir grup araştırmacı, 20 mm x 20 mm x 0,3 mm ebatlarında saf Al üzerine MAO yöntemi ile kaplama işlemi gerçekleştirmişlerdir. Temel olarak kullanılan elektrolitik çözelti içerisine katkı olarak sırasıyla 70, 30 ve 10 μm boyutlara sahip grafit partikülleri eklemiştir. Kaplamaların yüzey morfolojisi ve korozyon performansı üzerinde grafit partikül boyutunun önemli bir etkisi olduğunu açıklamışlardır. Grafit partikül boyutu küçüldükçe kaplama yüzeyine daha uygun bir şekilde emildiğini gözlemlemiştir. Ayrıca grafit partiküllerinin boyutu azaldıkça gözenek sayısının azaldığını ve daha kompakt bir yapının oluştuğunu açıklamışlardır. Bu duruma bağlı olarak grafit partikül boyutunun azalması ile malzemenin korozyon direncinin arttığını belirtmişlerdir [59].

Yapılan bir çalışmada, alüminat esaslı elektrolitik çözelti hazırlanarak sinterlenmiş NdFeB mıknatısları üzerine MAO yöntemi ile kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Numune yüzeyinde Al_2O_3 fazına ek olarak H_2O , OH, Fe_2O_3 ve Nd_2O_3 amorf fazlarının oluştuğu belirtilmiştir. Uygulanan voltajın artırılması ile kaplamaların yüzey pürüzlülüğünün arttığı gözlemlenmiştir. NdFeB numunelerin korozyon direncinin artan kaplama voltajı ile iyileştirildiği ve 420 V değerinden sonra numunelerin korozyon dirençlerinin düştüğü belirtilmiştir [60].

Shixiong He ve takım grubu, berilyum (Be) numunesi üzerine MAO yöntemi ile kaplama gerçekleştirmişlerdir. Bu amaçla kullanılan elektrolit bileşimi Na_2CO_3 bileşiği olup akım yoğunluğunu ise 10 mA/cm^2 olarak uygulamışlardır. Voltajın 220 V'un üzerine çıkması durumunda dielektrik bozunum olayının oluştuğunu ifade etmişlerdir. Uygulanan voltajın 325 V'dan daha yüksek bir değere çıkarılması durumunda kaplama morfolojisinde daha büyük gözenek ve daha fazla mikro çatlak oluştuğunu belirtmişlerdir. Kaplamaların, iç tabaka ve dış gözenekli tabaka olmak üzere iki tabakadan meydana geldiğini açıklamışlardır. Bu kaplamalar sayesinde numunenin korozyon direncinin arttığını ve yalıtım özelliklerinin geliştiğini belirtmişlerdir [61].

Durdu S. ve Usta M., ticari saf Mg yüzeyine MAO yöntemi ile kaplama işlemi uygulamışlardır. Sodyum silikat ve sodyum fosfat içeren iki farklı elektrolit çözelti hazırlamışlardır. MAO prosesini 0,060 A/cm^2 , 0,085 A/cm^2 ve 0,140 A/cm^2 olarak üç

farklı akım yoğunluğunda ve 30 dakika süre ile uygulamışlardır. Ortalama kaplama kalınlığını sodyum silikat çözeltisi için 27 µm ile 48 µm ve sodyum fosfat çözeltisi için 45 µm ile 75 µm arasında değiştiğini açıklamışlardır. Sodyum silikat çözeltisinde oluşan kaplamada baskın fazlar olarak Mg_2SiO_4 (Forsterite) ve MgO (Periclase) oluştuğunu, sodyum fosfat çözeltisinde oluşan kaplamada ise $Mg_3(PO_4)_2$ (Farringtonite) ve MgO (Periclase) fazlarının oluştuğunu belirtmişlerdir. Kaplamaların ortalama sertliklerinin, sodyum silikat çözeltisi için 260 HV ile 470 HV aralığında değiştiğini, sodyum fosfat çözeltisi için 175 HV ile 260 HV aralığında değiştiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca sodyum silikat çözeltisinde elde edilen kaplamaların yapılaşma dayanımlarının ve aşınma dirençlerinin, sodyum fosfat çözeltisinde elde edilen kaplamalardan daha iyi olduğunu açıklamışlardır. Bunun nedenini ise sodyum silikat çözeltisinde meydana gelen kaplamaların yüksek kaplama sertliğine sahip olmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir [62].

Yapılan bir çalışmada, saf Ti numunesi yüzeyine kaplama işlemi gerçekleştirmek amacıyla sodyum fosfat (Na_3PO_4), sodyum alüminat ($NaAlO_2$), sodyum silikat (Na_2SiO_3) ve 3 elektroliti birleştirip tek bir elektrolit ($Na_3PO_4 + NaAlO_2 + Na_2SiO_3$) oluşturarak 4 farklı elektrolitik çözelti hazırlanmıştır. Sodyum fosfat ve birleştirilmiş elektrolit ile elde edilen kaplamalarda daha küçük ve homojen olarak dağılmış gözenekler gözlemlenmiştir. Ayrıca korozyon direncinin elektrolit değişimine bağlı olarak değiştiği görülmüştür. Birleştirilmiş elektrolitte oluşan kaplamanın korozyon direncinin diğer kaplamalara kıyasla daha iyi olduğu belirtilmiştir [63].

Babak Haghghat-Shishavan ve arkadaşları, AA 7075-T651 Al alaşımını altlık malzemesi olarak kullanarak MAO yöntemi ile kaplama işlemi gerçekleştirmişlerdir. $H_2O_2 + KOH$ içerisine 6, 9 ve 14 g/l konsantrasyonlarında $NaAlO_2$ ekleyerek 3 farklı elektrolitik çözelti hazırlamışlardır. Hazırlanan bu 3 farklı elektrolitik çözelti içerisine 0,5 g/l yoğunluğunda ortalama çapı 1 ila 20 µm boyutunda grafit partikül katkısı yapmışlardır. 14 g/l $NaAlO_2$ konsantrasyona sahip alaşımın en yüksek mikro-sertlik değeri, en kalın kaplama tabakası, en iyi korozyon direnci ve en iyi aşınma direnci sergilediğini belirtmişlerdir. Ancak yüzey pürüzlülüğünün önemli derecede arttığını gözlemlemişlerdir. Grafit katkılı kaplanmış numunelerin, grafit katkısı içermeyen kaplamalara kıyasla yüzey pürüzlülüğünün yaklaşık 1/3 oranında etkili bir şekilde azaldığını belirtmişlerdir. Ayrıca grafit tozlarının gözeneklere nüfuz etmesi ile grafit katkılı kaplanmış numunelerin aşınma davranışında önemli bir iyileşme olduğunu açıklamışlardır.

Kaplamaların esas olarak yapılarında α -Al₂O₃ ve γ -Al₂O₃ fazlarından oluştuğunu açıklamışlardır [64].

Bir grup araştırmacı, ticari Al alaşımı üzerine MAO yöntemi ile kaplama işlemi uygulamışlardır. Öncelikle temel alkali elektrolitik çözelti hazırlanmış daha sonra ise bu alkali elektrolitik çözelti içerisine ayrı ayrı Na₂WO₄.2H₂O ve SiC tozu eklenerek 3 farklı solüsyon hazırlamışlardır. Tüm kaplamalarda yoğun iç katman ve porozlu dış katman olmak üzere iki katman meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. Na₂WO₄.2H₂O katkılı kaplamada elde edilen yoğun kaplama oranının (%53,3), SiC tozu katkılı kaplamada elde edilen yoğun kaplama oranından (%38,9) daha yüksek olduğunu açıklamışlardır. SiC tozu ve Na₂WO₄.2H₂O katkılı kaplamalarda elde edilen sertlik değerlerinin birbirine yakın olduğunu gözlemlemişlerdir. Ancak katkısız elektrolit ile elde edilen kaplamanın sertlik değerinin daha yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. Katkılı kaplanmış numunelerin katkısız kaplanmış numunelere kıyasla daha iyi aşınma direncine sahip olduğunu belirtmişlerdir. En iyi aşınma direncinin Na₂WO₄.2H₂O katkılı elektrolitik çözelti ile oluşturulan kaplamada meydana geldiğini açıklamışlardır. Ayrıca, katkısız kaplanmış numuneler ile Na₂WO₄.2H₂O katkılı kaplanmış numunelerin ortalama sürtünme katsayılarının birbirine yakın olduğunu gözlemlemişlerdir. Fakat SiC katkılı kaplamada elde edilen ortalama sürtünme katsayısının daha yüksek olduğunu açıklamışlardır [65].

Yapılan bir çalışmada, zirkonyum numunesinin yüzey özelliklerini iyileştirmek amacıyla 3 farklı elektrolitik çözelti içerisinde MAO yöntemi ile kaplama işlemi yapılmıştır. İlk çözelti sodyum silikat bileşiklerinden oluşmuş olup ikinci çözelti ise sodyum silikat solüsyonun içerisine gümüş asetat eklenmiştir. Son olarak sodyum silikat çözeltisi içerisine yitrium asetat eklenmiştir. En yüksek kaplama kalınlığının yitrium asetat katkılı kaplamada meydana geldiği gözlemlenmiştir. Yapılan kaplamalar sonucunda yüzey pürüzlülüğünün önemli bir oranda arttığı görülmüştür. Zirkonyumun biyo-uyumlu ve biyo-aktif bir malzeme olması istendiği için bu durumun olumlu bir gelişme olduğu belirtilmiştir. Gümüş asetat katkılı kaplamalı numunenin anti bakteriyel özellik kazandığı ve tüm bakterilerin öldüğü açıklanmıştır. Ayrıca kaplama sonrası ıslatma açısının önemli oranda düştüğü gözlemlenmiştir [66].

Jin Jie ve arkadaşları, altlık malzemesi olarak 50 mm x 20 mm boyutunda Mg alaşımına MAO yöntemi ile kaplama işlemi gerçekleştirmişlerdir. Bu amaçla sodyum silikat, sodyum fosfat ve sodyum hidroksitten oluşan 3 farklı elektrolitik çözelti hazırlamışlardır. Kaplanmış Mg alaşımının faz bileşimini, yüzey yapısını ve 5 farklı

sıcaklıkta (25, 75, 100, 125 ve 150°C) tribolojik davranışını incelemişlerdir. XRD verileri incelendiğinde, kaplama yüzeyinde esas olarak MgO fazı ile Mg₂SiO₄ fazlarının oluştuğunu açıklamışlardır. Ayrıca ortam sıcaklığının, kaplamada oluşan fazlar üzerinde belirgin bir etkisi olmadığını gözlemlemişlerdir. SEM görüntülerinden ise kaplama yüzey morfolojisinin kaba ve gözenekli bir yapıda olduğunu açıklamışlardır. Kaplanmış bölgenin az kusurlu-yoğun iç katman ve fazla kusurlu-gevşek dış katman olmak üzere iki farklı katmandan oluştuğunu belirtmişlerdir, Aşınma test sonuçları incelendiğinde, 100°C'ye kadar sürtünme katsayısının arttığını daha sonra ise düştüğünü gözlemlemişlerdir. En yüksek sürtünme katsayısının 100°C'de 0,90 μ olarak elde edildiğini açıklamışlardır. Sonuç olarak; Mg numunelerinin kaplama sonrası aşınma dirençlerinin belirgin bir şekilde arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca sıcaklığın artmasıyla aşınma oranının düştüğünü gözlemlemişlerdir. Böylece sıcaklık arttıkça aşınma direncinin de belirgin şekilde arttığını belirtmişlerdir [67].

Yapılan bir çalışmada, ağırlıkça %5, %8 ve %11 Si içerikli 3 tane Al alaşımına plazma elektrolitik oksidasyon (PEO) yöntemi ile kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Kaplanmamış Al alaşımında Si artışının ve kaplanmış Al alaşımındaki Si artışının aşınma davranışı üzerinde nasıl bir etki oluşturduğu incelenmiştir. Kaplamasız alaşımlarda Si miktarı arttıkça aşınma direncinin arttığı belirtilmiştir. Ancak, PEO yöntemi ile kaplanmış alaşımlarda Si miktarı arttıkça aşınma direncinin azaldığı gözlemlenmiştir. Kaplamasız alaşımlarda Si miktarının artmasına bağlı olarak mikro sertlik değerinin arttığını buna paralel olarak aşınma direncinde bir artış meydana geldiği belirtilmiştir. Kaplanmış alaşımlarda ise Si miktarı arttıkça kaplanmış bölgede alümina silikat arttığı böylece aşınma direncinin azaldığı belirtilmiştir. Ayrıca PEO ile kaplanmış alaşımların, kaplanmamış alaşımlara kıyasla aşınma direncinin en az 30 kat arttığı böylece PEO yönteminin aşınma davranışı üzerinde iyileştirici bir etki oluşturduğu tespit edilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde, PEO yöntemi ile kaplanmış alaşımlarda Si miktarı arttıkça, kaplanmış bölgenin daha gözenekli bir yapıdan meydana geldiğini belirtilmiştir [68].

Güleç A.E., yapay vücut sıvısı içerisinde, biyomalzeme olarak kullanılan Mg'un çözünme direncini arttırmayı amaçlamıştır. Bu amaçla, saf Mg, Mg-Sn-Ca, Mg-Sn-Mn alaşımlarını, Na₃PO₄ + KOH elektrolitik çözelti içerisinde MAO yöntemi ile kaplama işlemi gerçekleştirmiştir. Saf Mg'u, Mn veya Ca ile alaşımlandırmak çözünme direncinde olumlu bir etki yapmadığını belirtmiştir. Ancak alaşımlara MAO yöntemi ile kaplama yapılması, çözünme direncinde önemli bir iyileştirici etkinin oluştuğunu gözlemlemiştir.

Ayrıca, Mg-Sn-Ca alaşımında elde edilen kaplama kalınlığının, Mg-Sn-Mn alaşımında elde edilen kaplama kalınlığına kıyasla daha kalın olduğunu belirtmiştir. Kaplanmış bölgenin dış kısmı elektrolitik çözülden gelen Na, P, K ve O bileşenleri açısından yoğun iken iç kısım ise Ca, Mn, Sn, Mg bileşenleri açısından yoğun olduğunu açıklamıştır [69].



2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, 2024 kalite Al alaşımlarına MAO işlemi uygulanmış olup ayrıca elektrolit içerisine katkı olarak kullanılan grafit partiküllerinin etkisi incelenmiştir.

MAO yöntemi ile kaplama işlemi; pozitif voltaj, negatif voltaj, pozitif vuruş oranı (%), negatif vuruş oranı (%), frekans, işlem süresi vb. gibi parametreler sabit tutularak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca temel bazal elektrolit içerisine 5-10 µm boyutlarında grafit katkısı yapılarak grafitin etkileri gözlemlenmiştir. Oluşan kaplamaların pürüzlülük, kaplama kalınlıkları, yüzey incelemeleri, XRD analizi ve aşınma davranışları incelenmiştir.

2.1. Altlık Malzeme ve Kaplama Öncesi Hazırlıklar

25 mm x 25 mm x 2 mm boyutlarında 2024 kalite Al alaşımları anot altlık malzemeler olarak kullanılmıştır. Kullanılan AA-2024 alaşımların kimyasal bileşimi (%) Tablo 2’de verilmiştir. Numuneler sırasıyla 200, 400, 600, 800, 1200 nolu SiC zımparalar ile zımparalanmış ve daha sonra sırasıyla saf su ve etil alkol ile yıkandıktan sonra kurutularak MAO işlemine hazır hale getirilmiştir. Ayrıca MAO ünitesinin içerisinde bulunan paslanmaz çelik katot malzemesi olarak kullanılmıştır.

Tablo 2. AA-2024 kalite alaşımın kimyasal bileşimi (%)

Fe	Si	Cu	Cr	Mn	Mg	Zn	Zi+Ti	Diğer	Al
0,5	0,5	3,8-4,9	0,1	0,3-0,9	1,2-1,8	0,25	0,15	0,15	Kalan

MAO işlemini gerçekleştirmeden önce bir alkali çözelti ve bu alkali çözelti içerisine grafit partikülleri katılarak iki farklı elektrolitik çözelti hazırlanmıştır. Hazırlanan ilk çözelti 8 g/l Na_2SiO_3 + 2 g/l KOH + 6 g/l NaAlO_2 bileşenlerinden oluşturulmuştur. Diğer çözelti ise bu üç bileşene katkı olarak 6 g/l yoğunluğunda ve 5-10 µm boyutlarında grafit partikülleri eklenmesi ile oluşturulmuştur. Hazırlanan elektrolitik çözeltilerin kimyasal bileşimleri Tablo 3’te gösterilmektedir.

Tablo 3. MAO yönteminde kullanılan elektrolitik çözeltilerin kimyasal bileşimleri

Elektrolitik Çözelti	Na ₂ SiO ₃	KOH	NaAlO ₂	Grafit
Çözelti 1 (Grafit Katkısız Kaplamalı)	8 g/l	2 g/l	6 g/l	—
Çözelti 2 (Grafit Katkılı Kaplamalı)	8 g/l	2 g/l	6 g/l	6 g/l

2.2. Mikro Ark Oksidasyon İşlemi

Al esaslı AA-2024 numunelerin MAO yöntemi ile kaplanmasında kullanılan cihazın fotoğrafı Şekil 16'da verilmiştir.



Şekil 16. MAO ünitesi

MAO cihazı 30 kW kapasiteli AC güç kaynağına sahiptir. MAO işleminde kullanılan grafit partiküllerinin boyutu 5 ile 10 µm arasında olup yoğunluğu 6 g/l olarak çözelti

içerisine eklenmiştir. Tüm numuneler için MAO işleminde pozitif voltaj, negatif voltaj, pozitif vuruş oranı (%), negatif vuruş oranı (%), frekans ve işlem süresi sabit tutulmuş, alkali elektrolitik çözelti içerisinde grafit varlığının etkisi incelenmiştir. MAO işleminde, Tablo 4'te gösterildiği gibi pozitif voltaj 450 V, negatif voltaj 50 V, frekans 250 Hz, pozitif vuruş oranı %10, negatif vuruş oranı %5 ve işlem süresi 20 dakika olarak optimum parametreler kullanılarak kaplama işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4. MAO yöntemi için uygulanan kaplama parametreleri

PARAMETRELER	DENEY ŞARTLARI
Pozitif voltaj (V)	450
Negatif voltaj (V)	50
Frekans (Hz)	250
Pozitif vuruş oranı (%)	10
Negatif vuruş oranı (%)	5
İşlem süresi (dk)	20

MAO işlemi sonrası kaplanmış numuneler 100°C'de etüve konularak kurutulmuş ve böylece mekanik ve karakterizasyon deneylerini uygulayabilmek için hazır hale getirilmiştir.

2.3. Karakterizasyon İşlemleri

MAO yöntemi ile kaplama işlemi gerçekleştirildikten sonra numunelere, yapısal ve mekanik olarak karakterizasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Kaplamasız, grafit katkısız kaplamalı ve grafit katkılı kaplamalı numunelere yüzey pürüzlülük ölçümleri, kaplama kalınlığı ölçümleri, X-ışınları analizi, yüzey incelemeleri, sertlik deneyleri ve aşınma testleri uygulanarak karakterizasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir.

2.3.1. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü

Numunelerin yüzey pürüzlülük ölçümleri, DIN EN ISO 4287 standardında, ölçme kuvveti 0,75 mN, ölçme uzunluğu 12,5 mm, ölçme hızı 0,25 mm/s ve 2 µm elmas çapa

sahip olan Şekil 17'de gösterilen Mitutoyo SJ-301 marka profilometre ile gerçekleştirilmiştir. Yüzey pürüzlülük ölçer test cihazı ile y koordinatlarının mutlak değerlerinin aritmetik ortalaması olarak R_a değerini, kuadratik ortalama değeri olarak R_q değerini ve en yüksek profil tepesi ile en derin nokta arasındaki dikey mesafeyi veren R_z değerleri elde edilmiştir. Yüzey pürüzlülük değerlerini ölçmek amacıyla her numunenin farklı bölgelerinden 5 farklı R_a , R_q ve R_z değerleri alınarak aritmetik ortalamaları hesaplanmıştır.



Şekil 17. Yüzey pürüzlülüğü ölçer test cihazı

2.3.2. Kaplama Kalınlığı Ölçümü

Grafit katkısız kaplamalı ve grafit katkılı kaplamalı numunelerin uygun bölgelerinden kesit alınarak kaplama kalınlıkları ölçülmüştür. Numunelerin kaplama kalınlıklarını ölçmek için Şekil 18'de gösterilen ZEISS EVO LS10 marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır.



Şekil 18. ZEISS EVO LS10 marka taramalı elektron mikroskobu (SEM)

2.3.3. X-Işını Difraksiyon (XRD) Analizi

Kaplamasız ve kaplanmış numunelerin yapısında meydana gelen fazların iç yapısını belirlemek ve mevcut fazlarda gerçekleşen faz değişimlerini incelemek amacıyla XRD cihazı kullanılmıştır. Numunelerin XRD ölçümleri Şekil 19'da gösterilen $\lambda=1,5418 \text{ \AA}$ dalga boyuna sahip 40 mA ve 46 kW güç değerlerinde Cu-K α ışınımı ile PANalytical X'pert³ Powder model cihazda gerçekleştirilmiştir. Ölçüm değerleri oda sıcaklığında $3 \leq 2\theta \leq 120$ tarama aralığında, 0,017 derece/s tarama hızında ve 0,1 derece tarama adımlar ile taranarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 19. PANalytical X'pert³ Powder model XRD cihazı

2.3.4. SEM Analizi

Kaplamasız, grafit katkısız kaplamalı ve grafit katkılı kaplamalı numunelerin por boyutlarını ve morfoloji yapılarını incelemek amacıyla yüzey incelemeleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan elektron mikroskobun görüntüsü Şekil 18’de verilmiştir.

2.3.5. Mikro Sertlik Deneyleri

Grafit katkısız kaplamalı ve grafit katkılı kaplamalı numunelerin mikro sertlik değerleri, Şekil 20’de gösterilen mikro sertlik cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Numunelerin sertlik değerlerinin ölçümünde yük değeri 50 g olup batma süresi 10 s olarak alınmıştır. Sertlik ölçümleri oksit tabaka kalınlığına bağlı olarak her noktadan 5 farklı ölçüm alınmış olup bu değerlerin ortalaması sertlik değeri olarak verilmiştir.

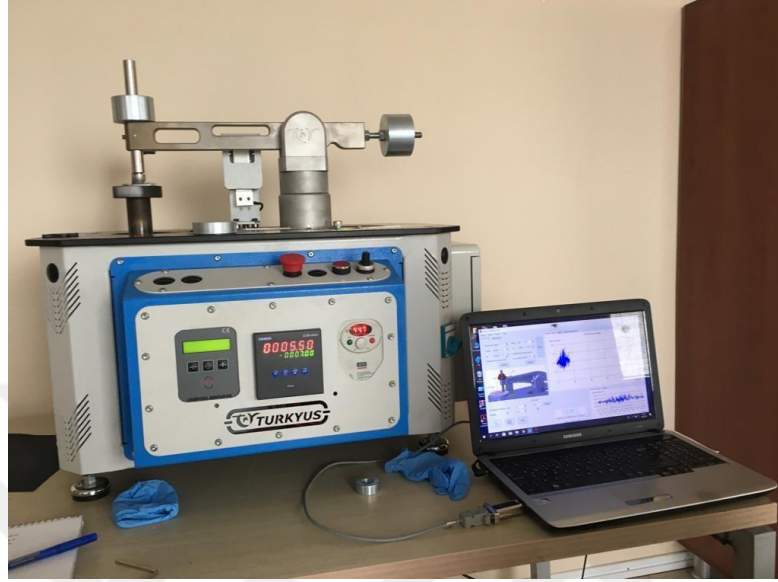


Şekil 20. Mikro sertlik ölçüm cihazı

2.3.6. Aşınma Deneyleri

Kaplamasız, grafit katkısız kaplamalı ve grafit katkılı kaplamalı numunelerin tribolojik performanslarını incelemek amacıyla Şekil 21’de gösterilen blok-halka disk

(block-on disc) aşınma test cihazı kullanılmıştır. Kuru ortamda ve oda sıcaklığında gerçekleştirilen aşınma deney parametreleri Tablo 5'te verilmiştir.



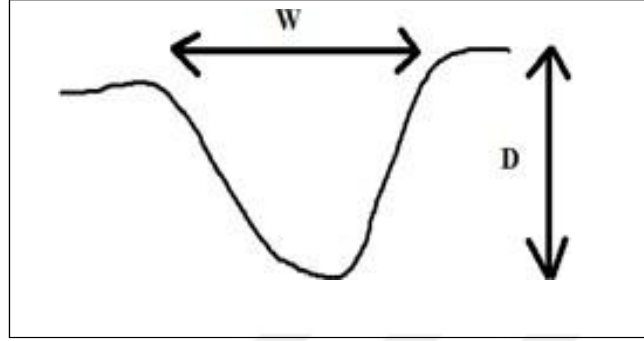
Şekil 21. Blok-halka (Ball-on disc) aşınma test cihazı

Tablo 5. Aşınma deneyinde kullanılan parametreler ve deney şartları

PARAMETRELER	DENEY ŞARTLARI
Uygulanan Yük, (N)	2, 5, 10 ve 15
Kayma hızı, (mm/s)	250
İz çapı, (mm)	10
Ortam	Atmosfer
Sıcaklık, (°C)	25
Süre, (s)	400
Küre çapı ve türü	6 mm'lik WC bilye
Toplam kayma mesafesi (m)	100

Aşınma deneyleri 2N, 5N, 10N ve 15N olmak üzere 4 farklı yükte gerçekleştirilmiştir. Farklı yükler altında kaplamasız ve kaplanmış numunelerin sürtünme katsayıları ve aşınma değerleri gösterilmiştir. Aşınma test cihazı tarafından otomatik olarak numunelerin sürtünme katsayısı (μ)–süre grafikleri verilmiştir. Aşınma izlerinin görüntüleri ise SEM ile incelenmiştir. Aşınma iz derinliği ve genişliğini belirlemek için

Şekil 23'te gösterilen 3 boyutlu yüzey profilometre cihazından faydalanılmıştır. Bu cihaz sayesinde aşınma izinin genişlik ve derinlik değerleri ölçülmüştür. Ayrıca aşınma iz hacimleri (mm^3) ve aşınma oranları sırasıyla Eşitlik 2.1 ve Eşitlik 2.2 ile hesaplanmıştır [70].



Şekil 22. Aşınma iz genişliği ile aşınma iz derinliğinin şematik gösterimi

$$V=(\pi/4) \times L \times D \times W \quad (2.1)$$

Burada V; Aşınma iz hacmi (mm^3), L: Aşınma iz uzunluğu (mm), D: Aşınma iz derinliği (mm) ve W: Aşınma iz genişliği (mm)' dir.

$$\text{Aşınma Oranı} = V / (F \times S) \quad (2.2)$$

Burada F: Uygulanan Yük (N), S: Toplam Kayma Mesafesi (m)



Şekil 23. 3 boyutlu yüzey profilometresi

3. BULGULAR

3.1. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Değerleri

Kaplamasız, grafit katkısız kaplamalı ve grafit katkılı kaplamalı numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri (R_a , R_q ve R_z) Tablo 6'da verilmiştir.

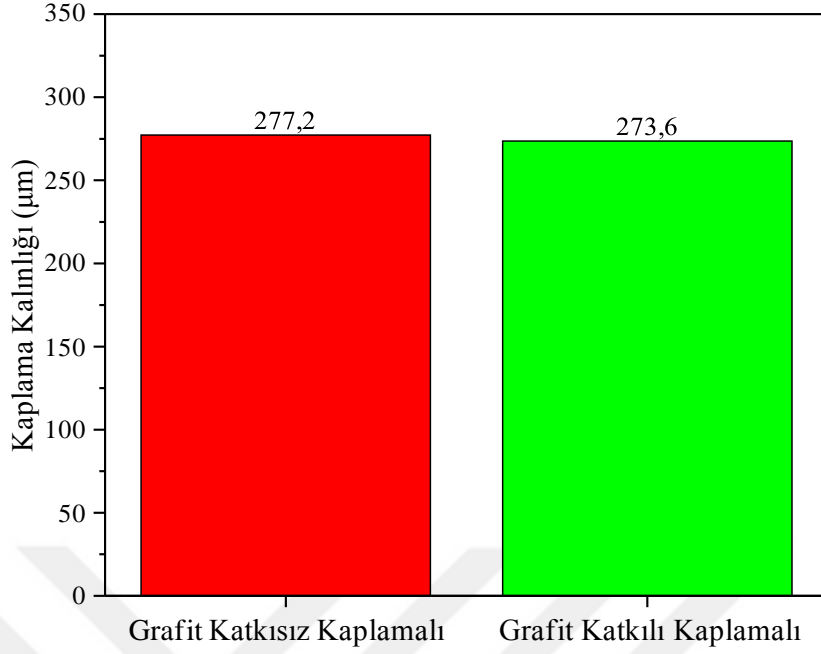
Tablo 6. Kaplamasız, grafit katkısız kaplamalı ve grafit katkılı kaplamalı numunelerin ortalama yüzey pürüzlülükleri

Numune	R_a (μm)	R_q (μm)	R_z (μm)
Kaplamasız	0,35	0,45	2,6
Grafit katkısız Kaplamalı	16,75	20,19	82,71
Grafit katkılı kaplamalı	10,79	13,09	56,73

Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri incelendiğinde, MAO işlemi uygulanması sonucunda yüzey pürüzlülüğü belirgin bir şekilde artmıştır. Ancak grafit katkılı kaplamalı numunenin, grafit katkısız kaplamalı numuneye kıyasla yüzey pürüzlülük değerleri daha düşük çıkmıştır. Grafit katkısız kaplamalı numunenin R_a değeri 16,75 μm , R_q değeri 20,19 μm ve R_z değeri 82,71 μm iken grafit katkılı kaplamalı numunenin R_a değeri 10,79 μm , R_q değeri 13,09 μm ve R_z değeri 56,73 μm olarak ölçülmüştür.

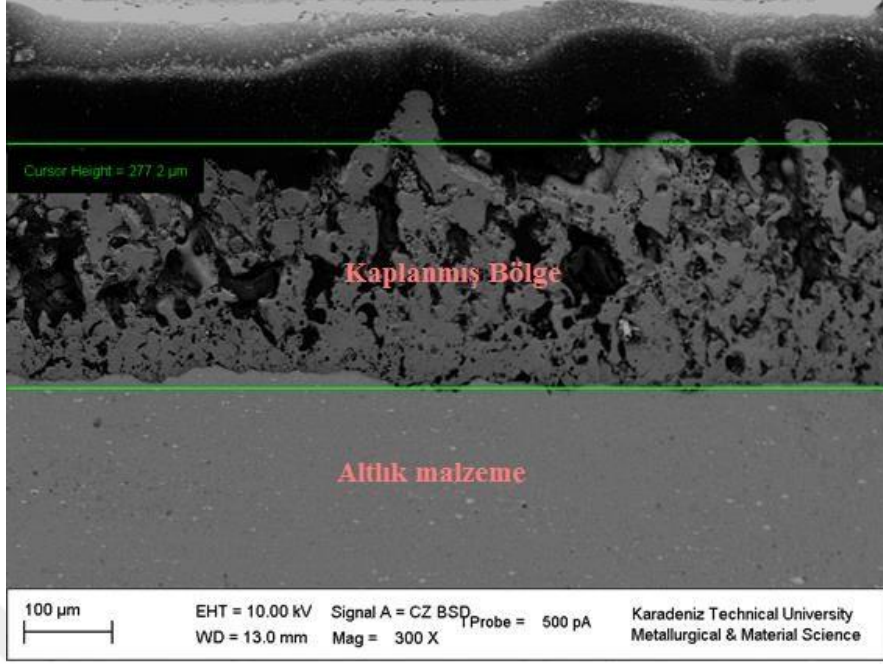
3.2. Kaplama Kalınlığı Ölçüm Değerleri

Grafit katkısız kaplamalı ve grafit katkılı kaplamalı numunelerin kaplama kalınlığı değerleri Şekil 24'te gösterilmiştir.

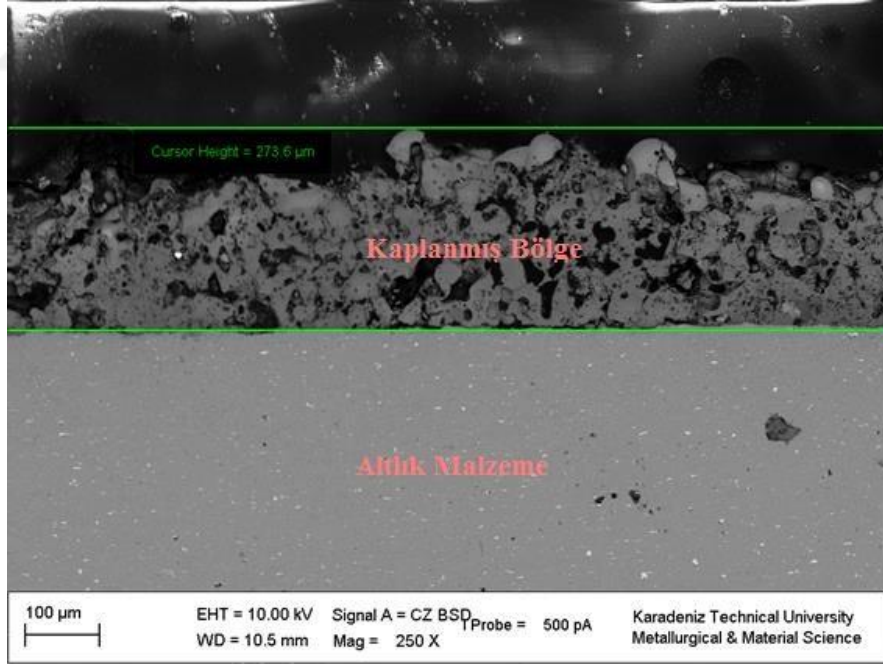


Şekil 24. Grafit katkısız kaplamalı ve grafit katkılı kaplamalı numunelerde meydana gelen kaplama kalınlığı değerleri

Şekil 24'te görüldüğü üzere, MAO yöntemi ile kaplama sonrası AA-2024 numunelerin yüzeyinde belirli bir miktarda oksit tabaka oluşmuştur. Kaplanmış numunelerin kaplama kalınlığında çok fazla bir değişim olmamıştır. Ancak grafit katkılı kaplamalı numunede elde edilen kaplama kalınlığı, grafit katkısız kaplamalı numunede elde edilen kaplama kalınlığından biraz daha düşüktür. Grafit katkılı kaplamalı numunede elde edilen kaplama kalınlığı 273,6 µm iken grafit katkısız kaplamalı numunede elde edilen kaplama kalınlığı 277,2 µm'dir. Şekil 25'te grafit katkısız kaplamalı, Şekil 26'da ise grafit katkılı kaplamalı numunelerin kaplama kalınlıklarının SEM görüntüsü verilmiştir.



Şekil 25. Grafit katkısız kaplamalı numunenin kaplama kalınlığı

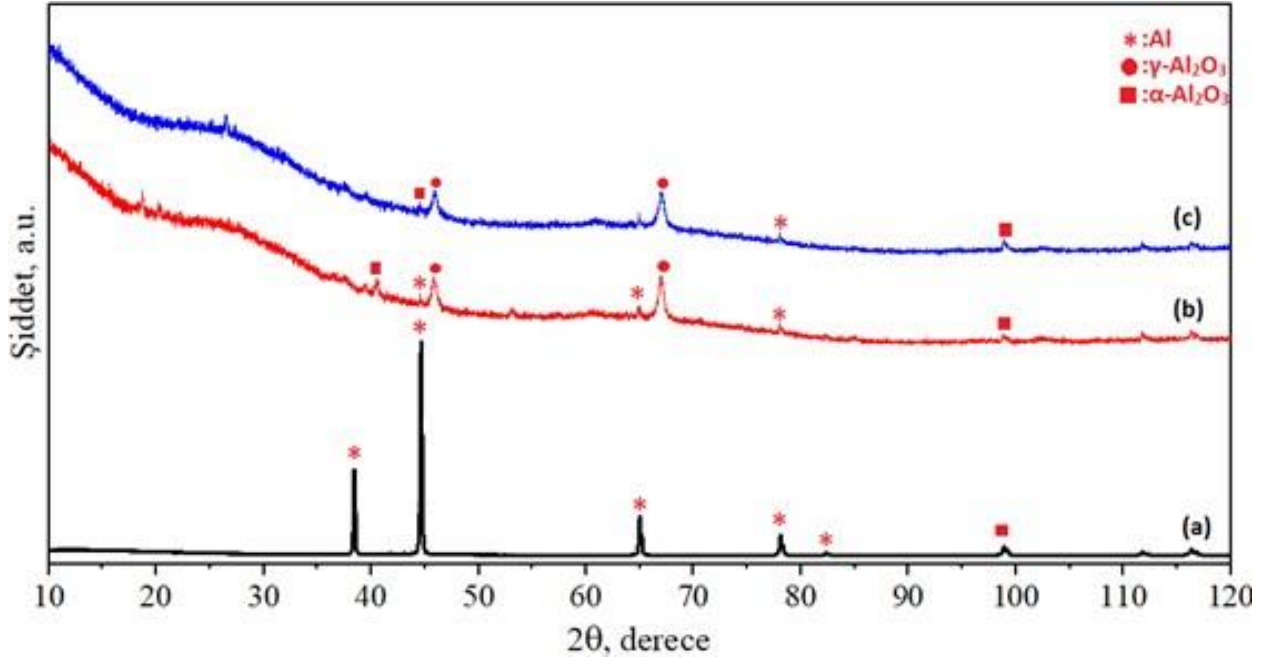


Şekil 26. Grafit katkılı kaplamalı numunenin kaplama kalınlığı

3.3. X-Işını Difraksiyon (XRD) Analizi Sonuçları

Kaplanmış numunenin mekanik ve tribolojik performansını değerlendirmek için numune yüzeyinin faz kompozisyonunun bilinmesi çok önemlidir. Bu bölümde kaplamasız, grafit katkısız kaplamalı ve grafit katkılı kaplamalı numunelerin XRD analizleri yapılmıştır. Bu numunelerin XRD paternleri Şekil 27'de gösterilmiştir.

Şekil 27'de görüldüğü üzere; AA-2024 numunelerin kaplanması ile yüzeyde oluşan baskın faz Al_2O_3 'tir. XRD verileri incelendiğinde hem grafit katkısız kaplamalı hem de grafit katkılı kaplamalı numunelerde hâkim fazlar $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ve $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 'tir.

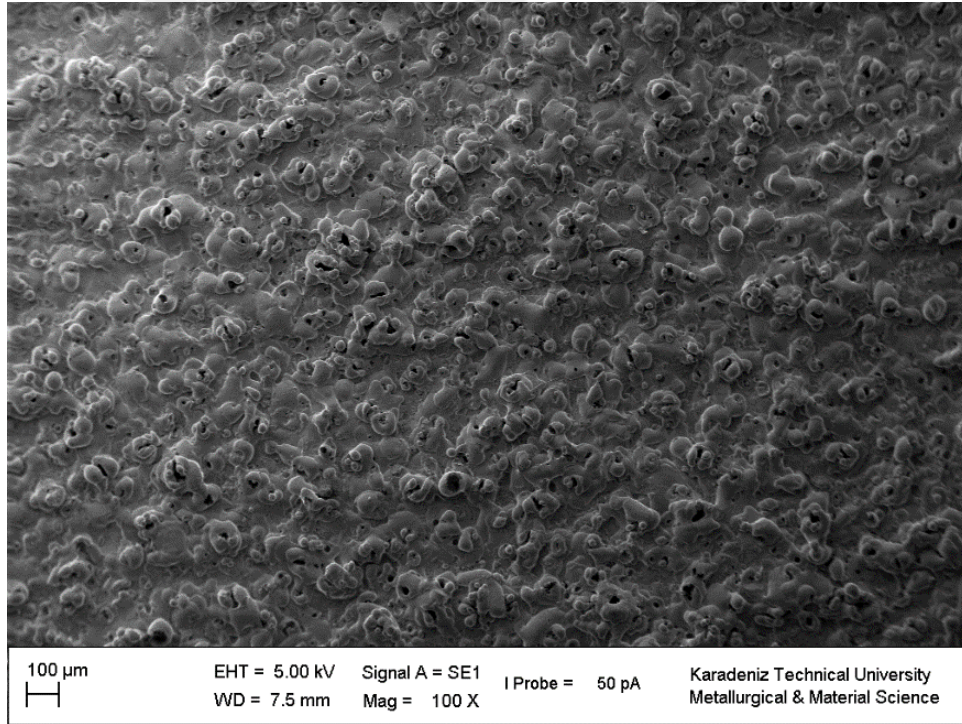


Şekil 27. (a): Kaplanmamış numunenin XRD paterni, (b): Grafit katkısız kaplamalı numunenin XRD paterni, (c): Grafit katkılı kaplamalı numunenin XRD paterni

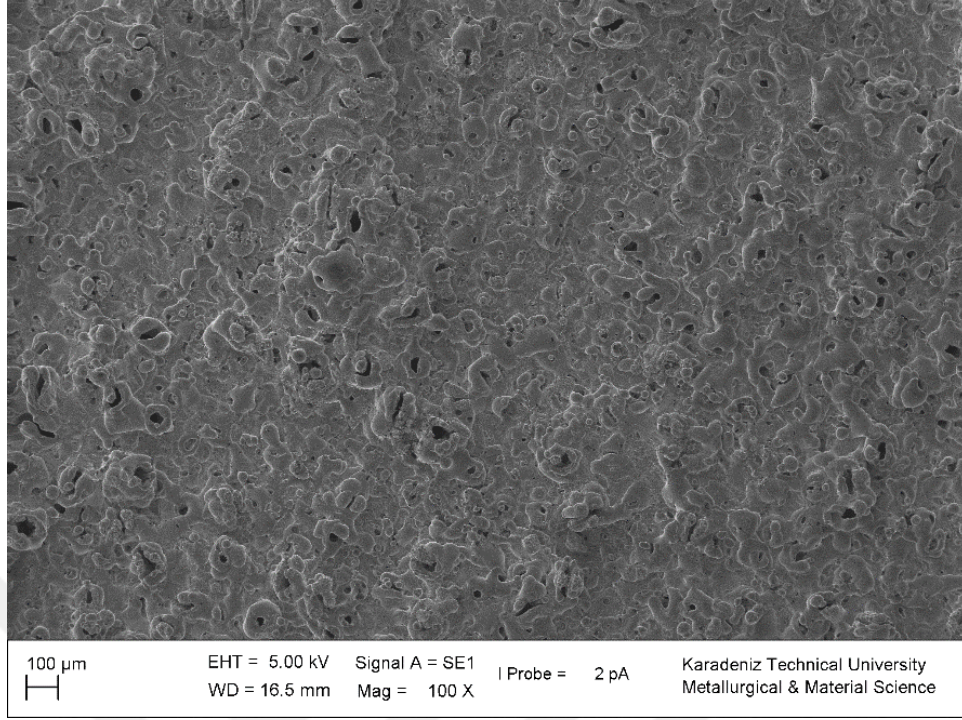
Ayrıca grafit katkısız kaplamalı ile grafit katkılı kaplamalı numunelerin XRD pikleri karşılaştırıldığında, çok fazla bir değişiklik olmadığı ve 40 ila 120 derece arasında oluşan $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ve $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ fazlarının hemen hemen aynı olduğu görülmüştür. Ancak grafit katkılı kaplamalı numunenin XRD pikleri detaylı incelendiğinde, 15 ila 40 derece arasında amorf grafit varlığı açıkça görülmüştür.

3.4. SEM Analizi Sonuçları

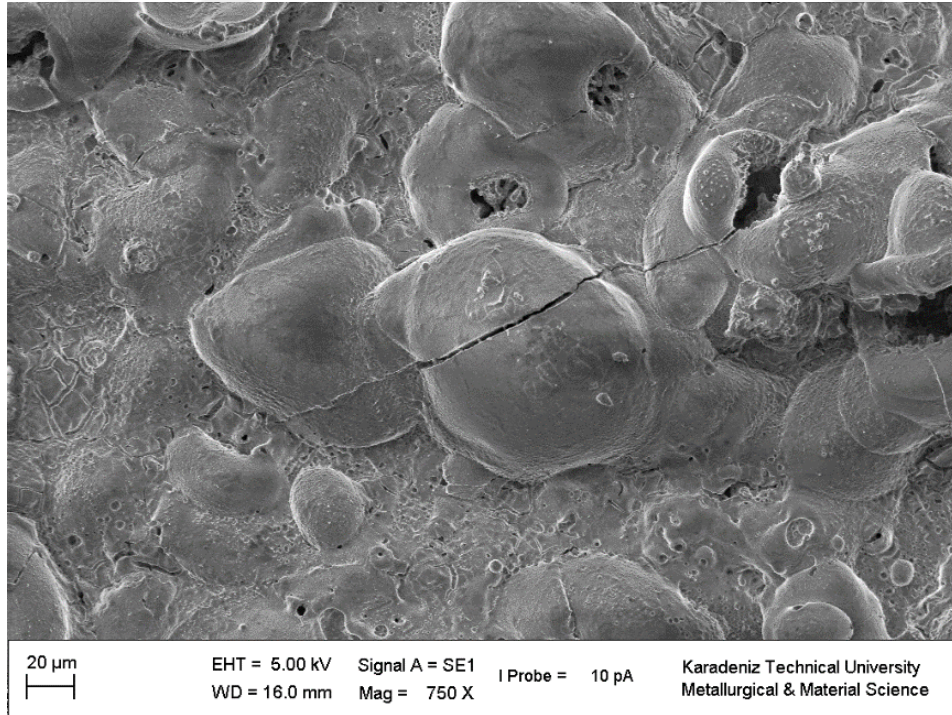
Şekil 28, 29, 30 ve 31’de kaplanmış numunelerin yüzeyleri farklı oranlarda büyütülerek SEM görüntüleri verilmiştir. Açık bir şekilde görüldüğü üzere hem grafit katkısız hem de grafit katkılı elektrolitik çözeltilerde, uygulanan voltaj değerinin bozunum voltajı (dielectric breakdown) değerini aşması ile numune yüzeyinde MAO kaplaması meydana gelmiştir. Grafit katkılı kaplamalı numune yüzeyinde meydana gelen gözenek sayısı, grafit katkısız kaplamalı numune yüzeyinde meydana gelen gözenek sayısına kıyasla daha düşüktür. Aynı şekilde grafit katkısız kaplamalı numunede meydana gelen mikro çatlak ve kırıklar, grafit katkılı kaplamalı numunede meydana gelen mikro çatlak ve kırıklara kıyasla daha belirgindir. Ayrıca Şekil 32 ve Şekil 33’te görüldüğü üzere hem grafit katkısız kaplamalı hem de grafit katkılı kaplamalı numunelerin yüzey morfolojilerinde krater görünümlü yapılar mevcuttur.



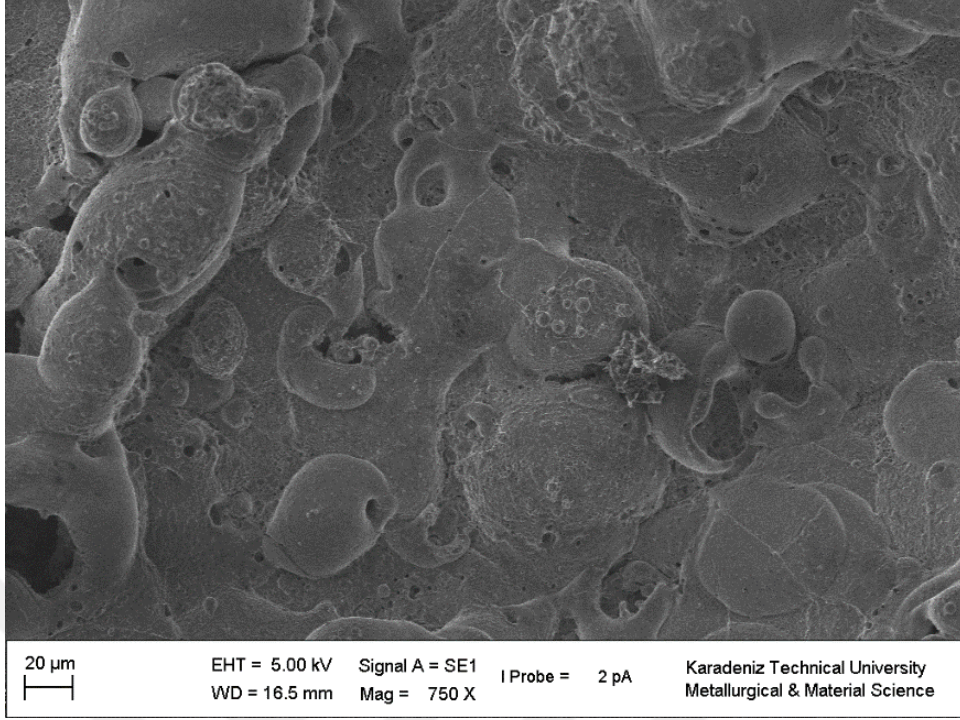
Şekil 28. Grafit katkısız kaplamalı numunenin 100X büyütmede SEM görüntüsü



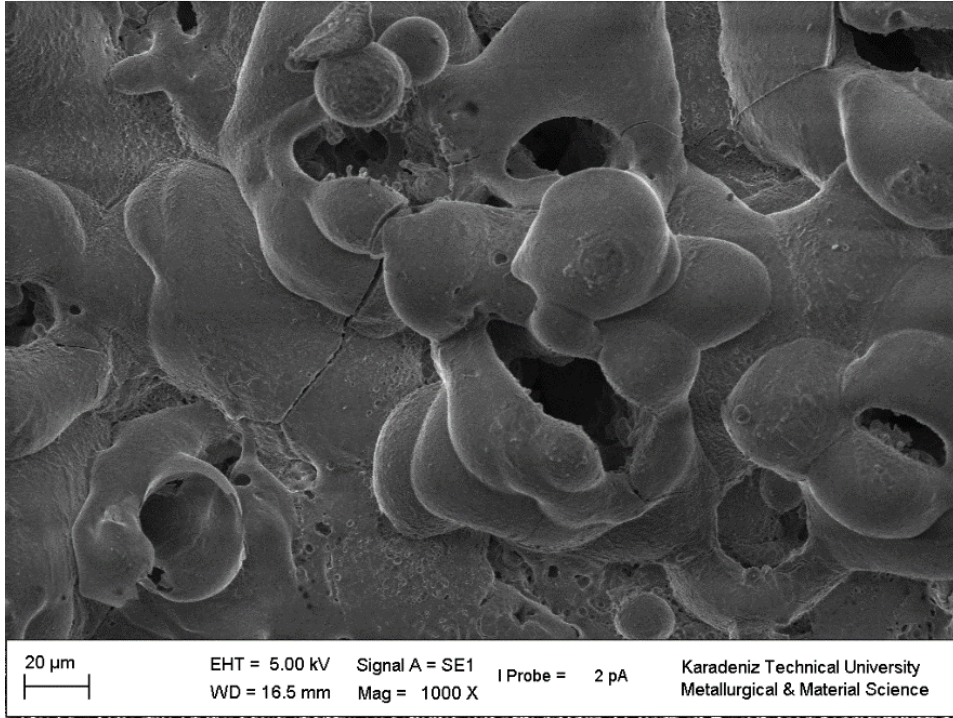
Şekil 29. Grafit katkılı kaplamalı numunenin 100X büyütmede SEM görüntüsü



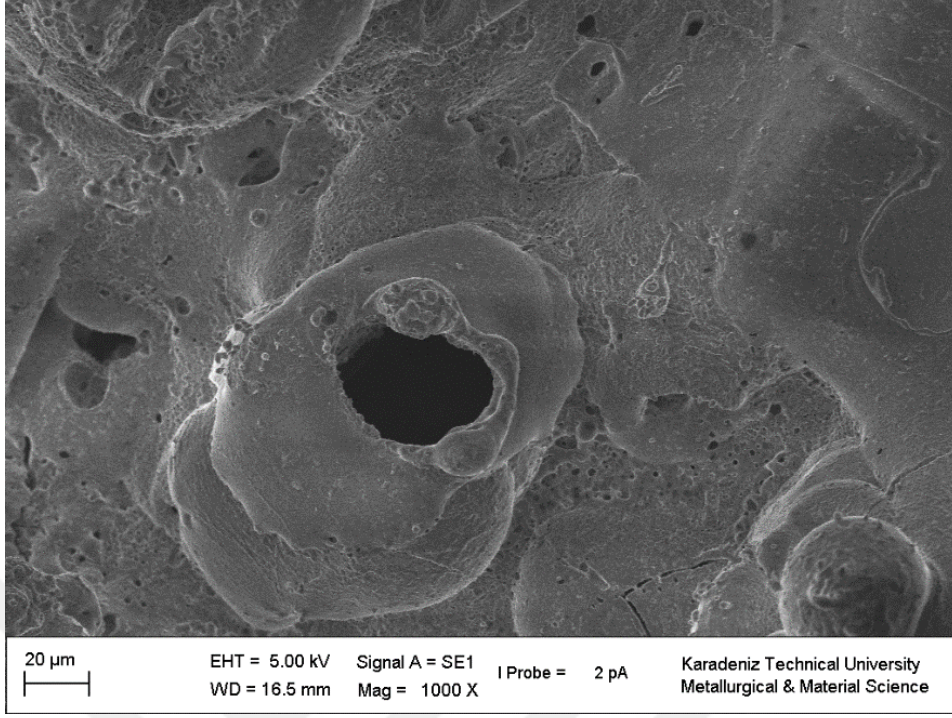
Şekil 30. Grafit katkısız kaplamalı numunedeki meydana gelen kırılma ve mikro çatlak oluşumunun 750X büyütmede SEM görüntüsü



Şekil 31. Grafit katkılı kaplamalı numunedey meydana gelen kırılma ve mikro çatlak oluşumunun 750X büyütmede SEM görüntüsü



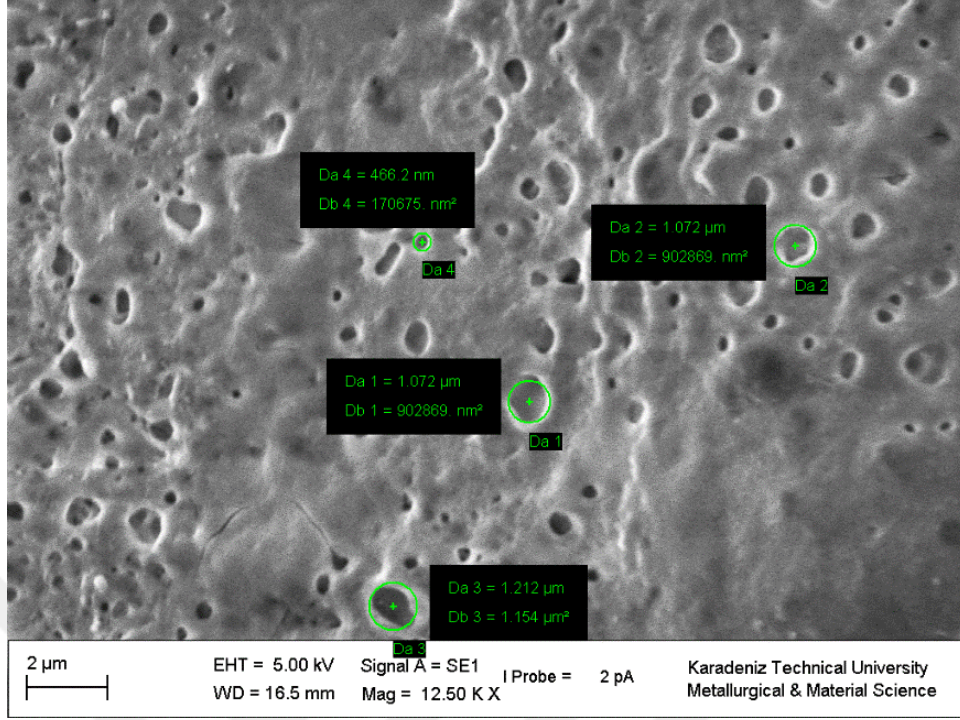
Şekil 32. Grafit katkısız kaplamalı numune yüzeyinde oluşan krater görünümlü çukurlar



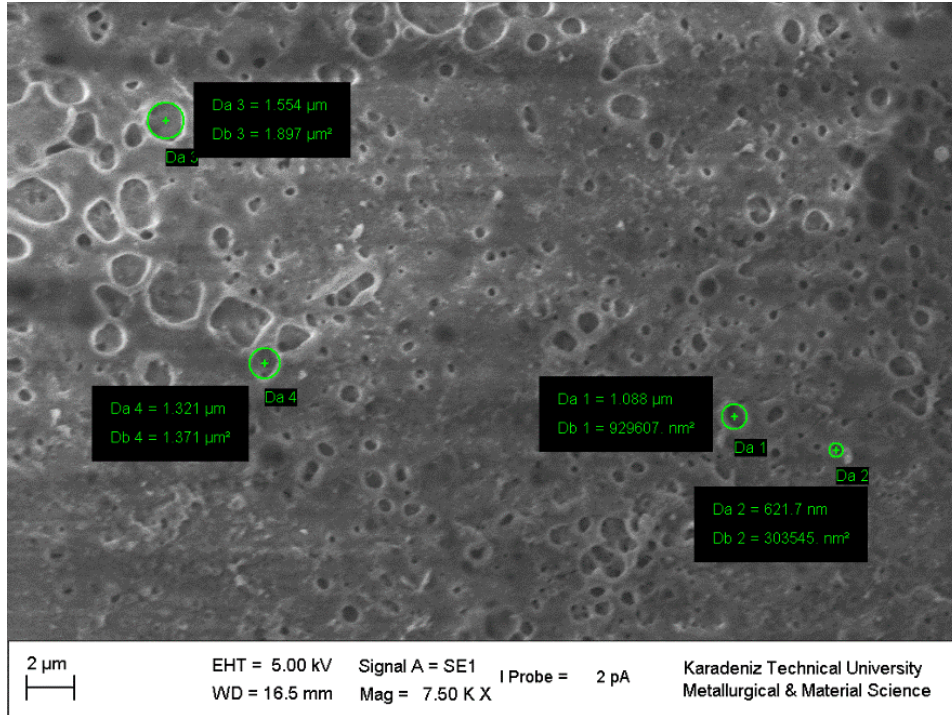
Şekil 33. Grafit katkılı kaplamalı numune yüzeyinde oluşan krater görünümlü çukurlar

MAO işlemi sonrası hem grafit katkısız kaplamalı hem de grafit katkılı kaplamalı numunelerde deşarj kanalları olarak adlandırılan porozlu bir yapı meydana gelmiştir. Grafit katkılı kaplamalı numunenin oksit yapısında oluşan por sayısı, grafit katkısız kaplamalı numuneye kıyasla nispeten daha düşüktür. Ancak grafit katkılı kaplamalı numunenin por boyutu daha büyüktür.

Grafit katkısız kaplamalı numunede meydana gelen ortalama por çapı $0,58 \mu\text{m}$ iken, grafit katkılı kaplamalı numunede meydana gelen ortalama por çapı $1,14 \mu\text{m}$ 'dir. Şekil 34 ve Şekil 35'te grafit katkısız kaplamalı ve grafit katkılı kaplamalı numunelerde meydana gelen por boyutları verilmiştir.



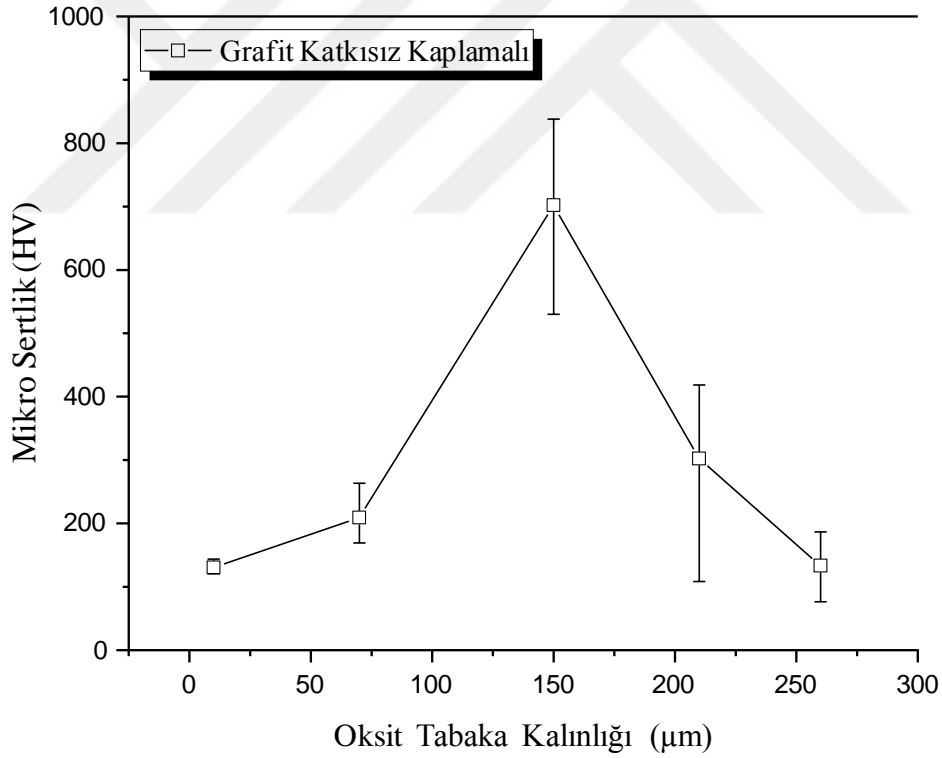
Şekil 34. Grafit katkısız kaplamalı numunedeki meydana gelen por boyutları



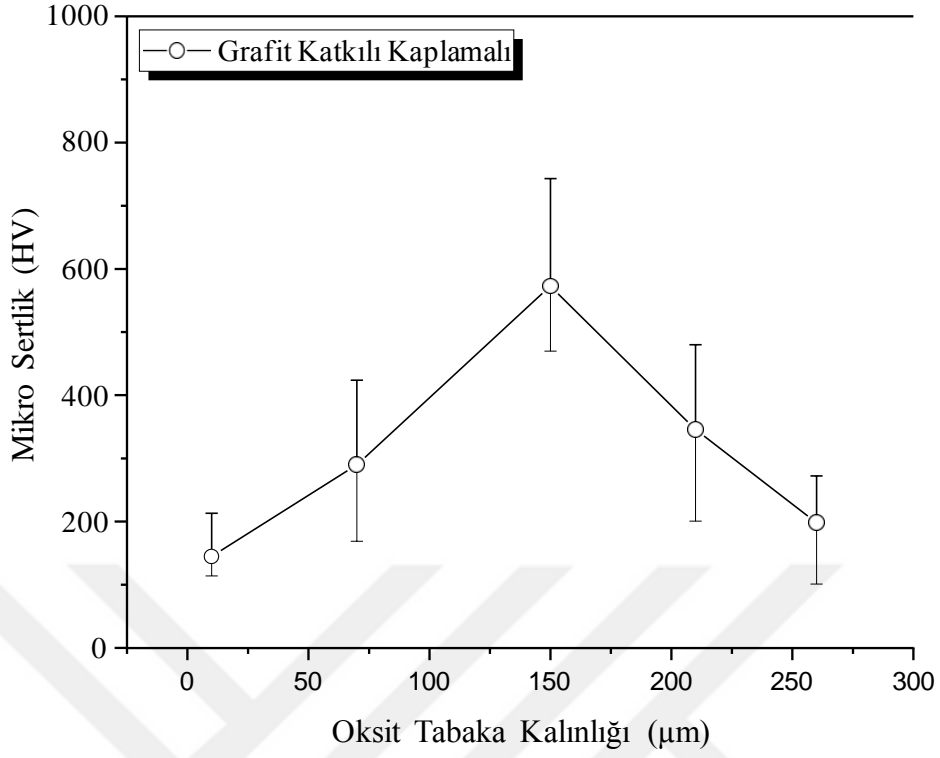
Şekil 35. Grafit katkılı kaplamalı numunedeki meydana gelen por boyutları

3.5. Mikro Sertlik Deneyleri Sonuçları

Şekil 36 ve Şekil 37’de grafit katkıli kaplamalı ve grafit katkısız kaplamalı numunelerin mikro sertlik-oksit tabakası kalınlığı verilmiştir. Numunelerin sertlikleri, altlık malzeme yüzeyine yakın bölgeden başlanarak dış tabakaya doğru ayrı ayrı ölçülmüştür. Kaplamaların en yüksek sertlik değerleri altlık malzemedan yaklaşık olarak 120-150 μm uzaklığındaki oksit katmanda meydana gelmiştir. Ayrıca, grafit katkıli kaplamalı numunenin maksimum sertlik değeri, grafit katkısız kaplamalı numunenin maksimum sertlik değerinden daha düşüktür. Altlık malzeme olan AA-2024 numunesinin sertlik değeri 92 HV olmasına rağmen, grafit katkıli kaplamalı numunenin maksimum sertlik değeri 573 HV ölçülmüştür. Buna karşın grafit katkısız kaplamalı numunenin maksimum sertlik değeri 702 HV ölçülmüştür.



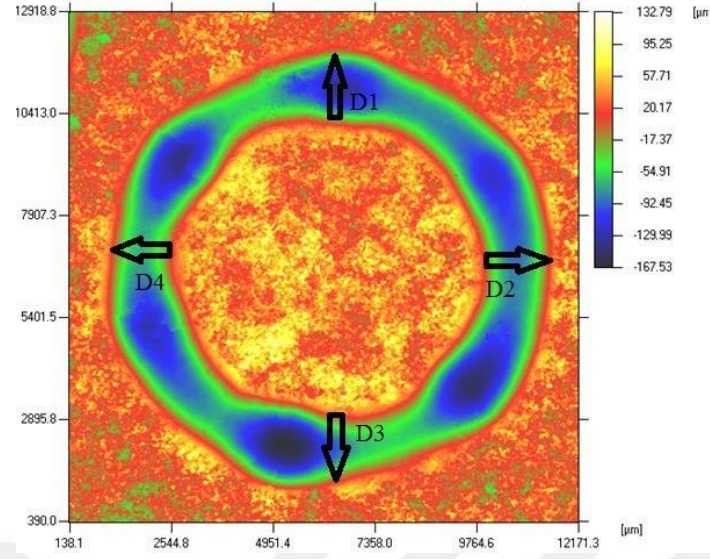
Şekil 36. Grafit katkısız kaplamalı numunenin oksit tabaka kalınlığına göre mikro sertlik değışımi



Şekil 37. Grafit katkılı kaplamalı numunenin oksit tabaka kalınlığına göre mikro sertlik değişimi

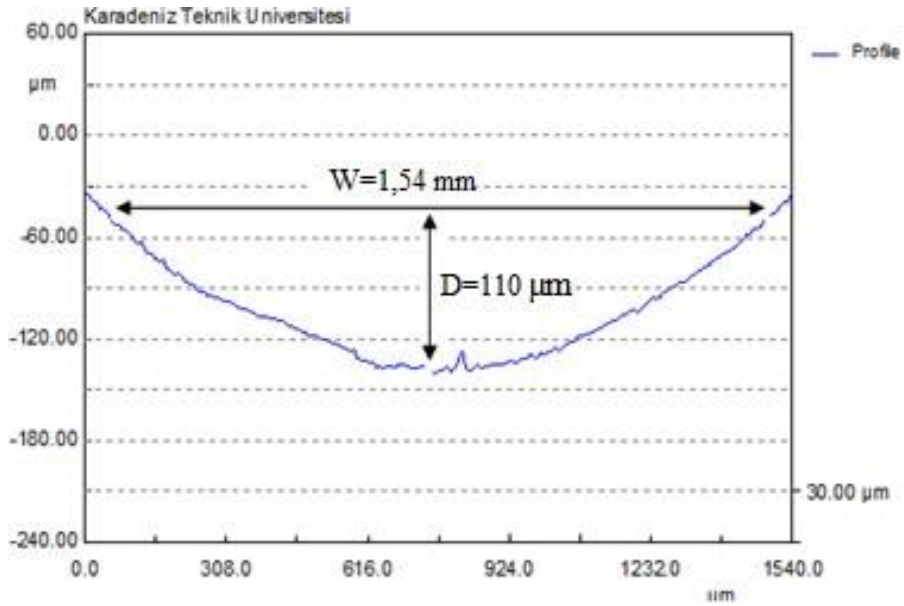
3.6. Aşınma DeneYleri Sonuçları

Aşınma deney parametreleri yapılan çalışmalar kısmında verilmiştir. Aşınma iz uzunluğu aşınan bölgenin yarı çapı olarak alınmış olup değeri 5 mm'dir. Aşınma iz derinliği (D) ve aşınma iz genişliği (W), aşınma izi çevresinin 4 farklı noktasından alınmış ve ortalaması hesaplanmıştır. Şekil 38'de ortalama aşınma iz derinliğinin ve genişliğinin nasıl hesaplandığı örnek olarak gösterilmiştir. Verilen bölgelerin derinlikleri ise profilometre cihazından otomatik olarak hesaplanmış ve örnek olarak Şekil 39, 40, 41 ve 42'de gösterilmiştir. Eşitlik 2.1'de verilen denklem ile numunelerin aşınma hacimleri, Eşitlik 2.2'de verilen denklem ile numunelerin aşınma oranları hesaplanmıştır.

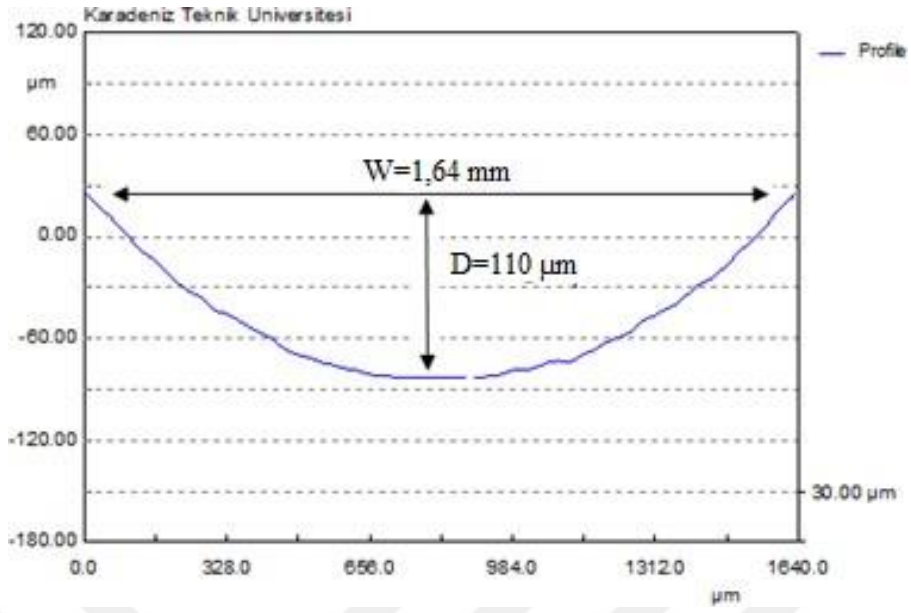


Şekil 38. Numune yüzeyinin aşınan kısmın yüzey profilometresi tarafından iz derinliği ve genişliğin ölçüldüğü kısımlar

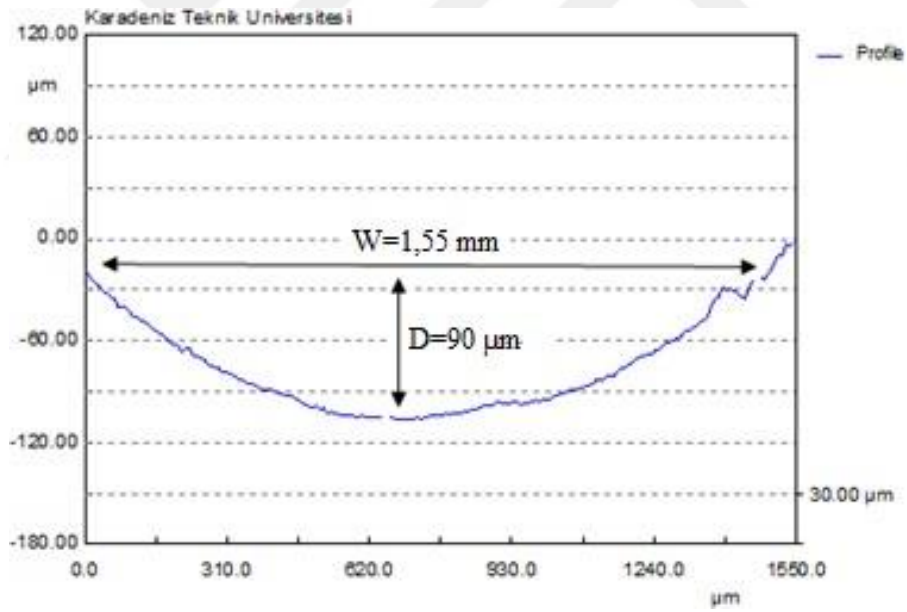
D1=110 μm	W1=1,54 mm	$D = (D1+D2+D3+D4) / 4$
D2=110 μm	W2=1,64 mm	$W = (W1+W2+W3+W4) / 4$
D3=90 μm	W3=1,55 mm	D= 105 μm
D4=110 μm	W4=1,68 mm	W=1,60 mm



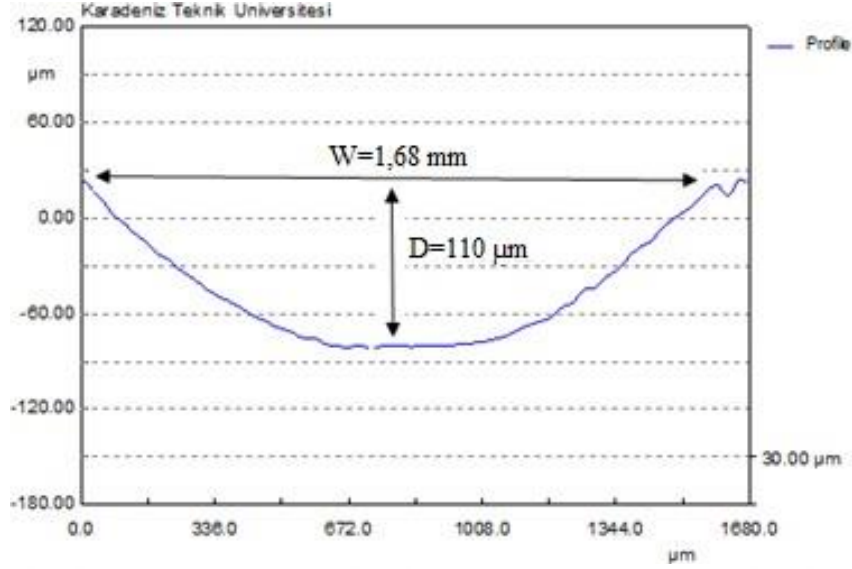
Şekil 39. D1 bölgesinin iz derinliği ve genişliği



Şekil 40. D2 bölgesinin iz derinliği ve genişliği

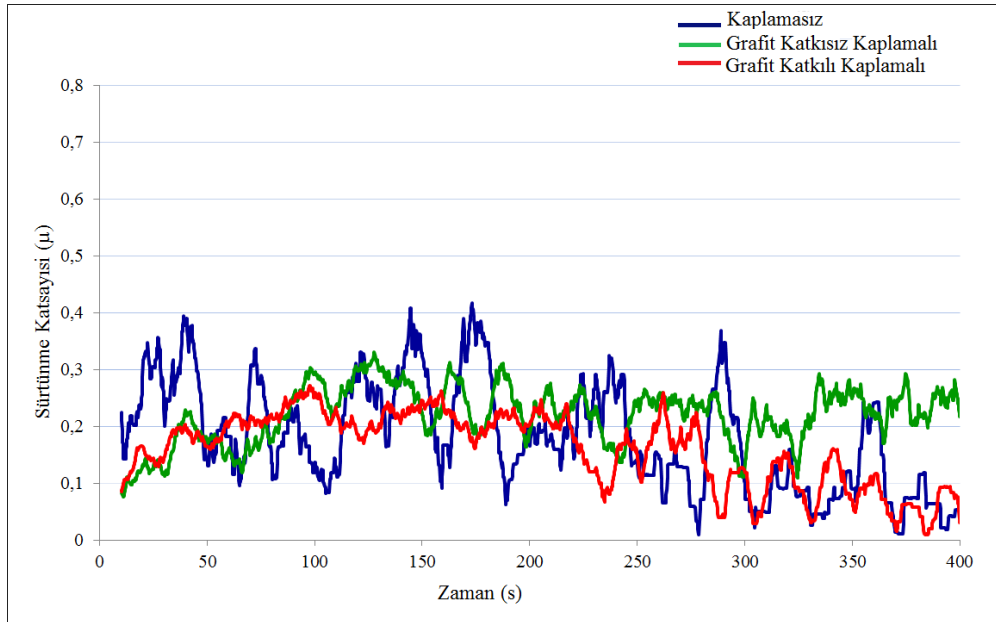


Şekil 41. D3 bölgesinin iz derinliği ve genişliği

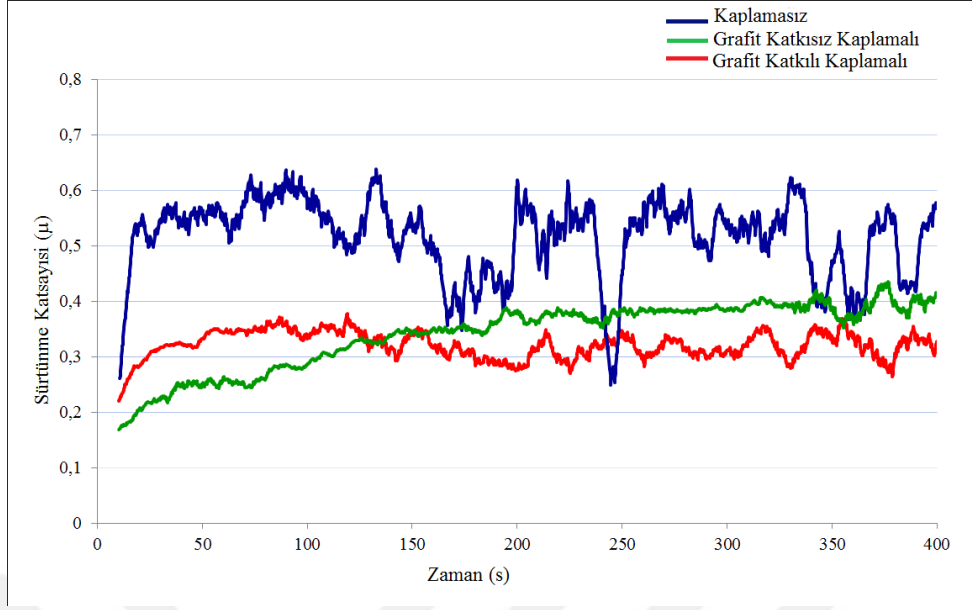


Şekil 42. D4 bölgesinin iz derinliği ve genişliği

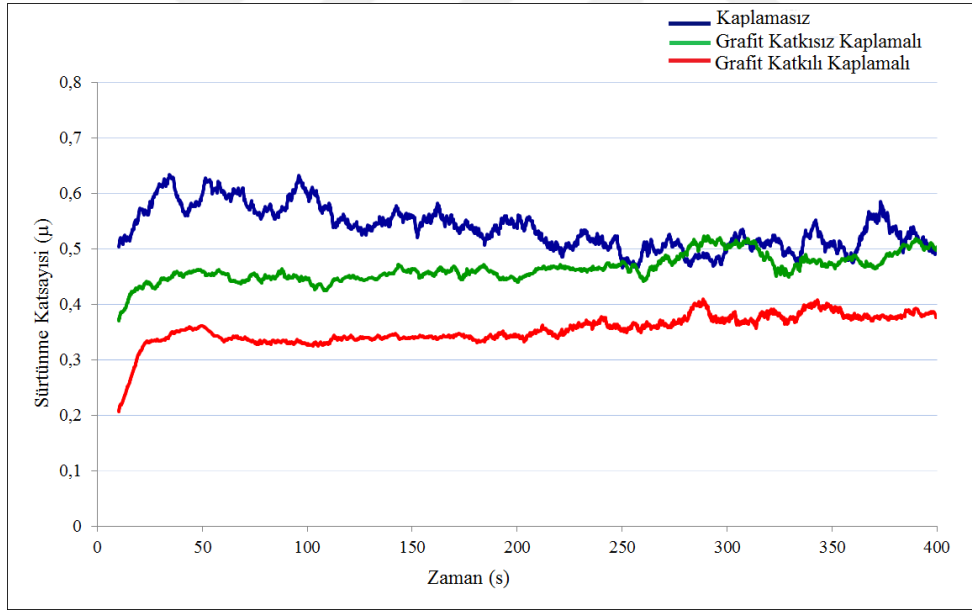
Elde edilen sürtünme katsayısı–süre grafikleri incelendiğinde; deney başlangıcında tüm numunelerin sürtünme katsayıları düşüktür. Ancak daha sonra sürtünme katsayıları hızlı bir şekilde artmıştır. Bir süre sonra ise sürtünme katsayısı stabil olarak devam etmiştir. Ayrıca tüm numunelerin sürtünme katsayısı–süre grafiklerinde ani iniş çıkışlar meydana gelmiştir. Şekil 43, 44, 45 ve 46’da 2, 5, 10 ve 15N yük altında elde edilen sürtünme katsayısı – süre grafikleri verilmiştir.



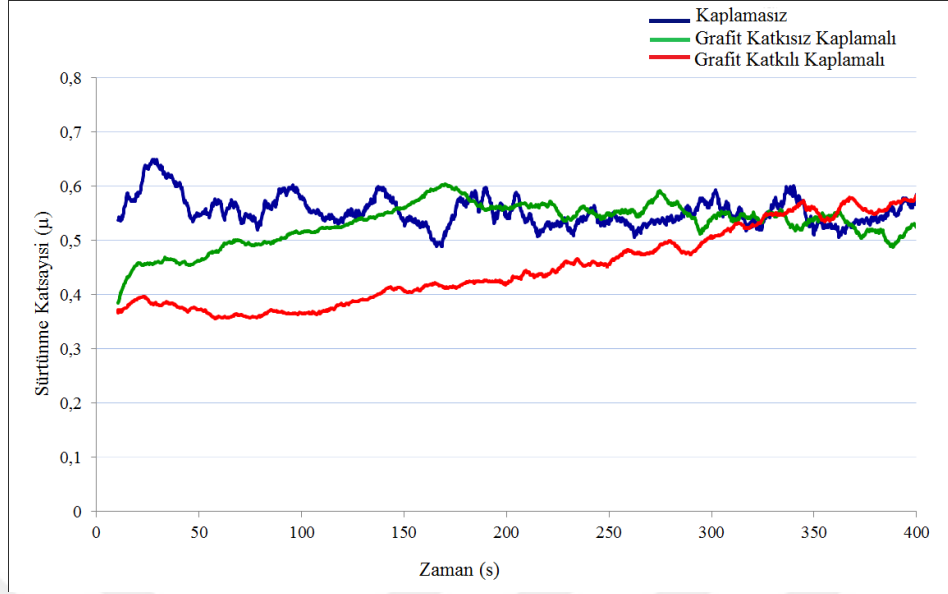
Şekil 43. 2N yük altında meydana gelen sürtünme katsayısı–süre ilişkisi



Şekil 44. 5N yük altında meydana gelen sürtünme katsayısı-süre ilişkisi

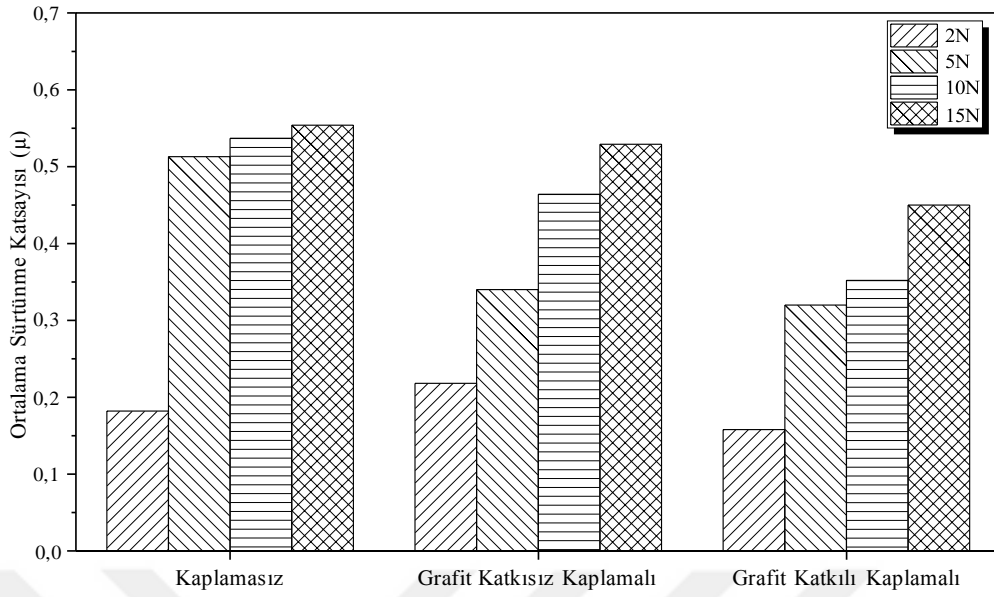


Şekil 45. 10N yük altında meydana gelen sürtünme katsayısı-süre ilişkisi



Şekil 46. 15N yük altında meydana gelen sürtünme katsayısı-süre ilişkisi

2, 5, 10 ve 15N yük altında yapılan aşınma deneylerinde en düşük ortalama sürtünme katsayısı, grafit katkılı kaplamalı numunelerde meydana gelmiştir. Ayrıca genel olarak grafit katkısız kaplamalı numunelerin ortalama sürtünme katsayıları kaplamasız numunelere kıyasla daha düşüktür. 2N yük altında yapılan aşınma deneyinde grafit katkılı kaplamalı, grafit katkısız kaplamalı ve kaplamasız numunelerin ortalama sürtünme katsayıları sırasıyla 0,158 μ , 0,218 μ ve 0,182 μ 'dur. 5N yük altında yapılan aşınma deneyinde grafit katkılı kaplamalı, grafit katkısız kaplamalı ve kaplamasız numunelerin ortalama sürtünme katsayıları sırasıyla 0,32 μ , 0,34 μ ve 0,513 μ 'dur. 10N yük altında yapılan aşınma deneyinde grafit katkılı kaplamalı, grafit katkısız kaplamalı ve kaplamasız numunelerin ortalama sürtünme katsayıları sırasıyla 0,352 μ , 0,464 μ ve 0,537 μ 'dur. 15N yük altında yapılan aşınma deneylerinde ise grafit katkılı kaplamalı, grafit katkısız kaplamalı ve kaplamasız numunelerin ortalama sürtünme katsayıları sırasıyla 0,45 μ , 0,529 μ ve 0,554 μ 'dur. Ayrıca uygulanan yükün artması ile ortalama sürtünme katsayısının arttığı açıkça görülmüştür. Uygulanan yüke bağlı olarak elde edilen ortalama sürtünme katsayıları Şekil 47'de verilmiştir.



Şekil 47. Uygulanan yüke bağlı olarak ortalama sürtünme katsayısı grafiği

2, 5, 10 ve 15N yük altında yapılan aşınma deneylerinde en düşük aşınma iz hacimleri grafit katkılı kaplamalı numunelerde meydana gelmiştir. Ayrıca grafit katkısız kaplamalı numunelerin aşınma iz hacimleri, kaplamasız numunelere kıyasla daha düşüktür. Uygulanan yük arttıkça, numunelerin aşınma iz hacimlerinin arttığı açıkça görülmüştür. 2N yük altında yapılan aşınma deneyinde grafit katkılı kaplamalı, grafit katkısız kaplamalı ve kaplamasız numunelerin aşınma iz hacimleri sırasıyla 1,001 mm³, 1,007 mm³ ve 1,257 mm³'tür. 5N yük altında yapılan aşınma deneyinde grafit katkılı kaplamalı, grafit katkısız kaplamalı ve kaplamasız numunelerin aşınma iz hacimleri sırasıyla 2,207 mm³, 2,312 mm³ ve 2,485 mm³'tür. 10N yük altında yapılan aşınma deneyinde grafit katkılı kaplamalı, grafit katkısız kaplamalı ve kaplamasız numunelerin aşınma iz hacimleri sırasıyla 4,15 mm³, 4,307 mm³ ve 4,528 mm³'tür. 15N yük altında yapılan aşınma deneyinde grafit katkılı kaplamalı, grafit katkısız kaplamalı ve kaplamasız numunelerin aşınma iz hacimleri sırasıyla 5,298 mm³, 7,126 mm³ ve 8,875 mm³ olarak bulunmuştur. Tablo 7, 8 ve 9'de kaplamasız, grafit katkısız kaplamalı ve grafit katkılı kaplamalı numunelerin yüzey profilometresi ile elde edilen genişlik, derinlik ve Eşitlik 2.1 ile hesaplanan aşınma iz hacimleri verilmiştir. Şekil 48'de ise numunelerin aşınma iz hacimleri gösterilmiştir.

Tablo 7. Kaplamasız numune için ortalama genişlik, ortalama derinlik ve aşınma iz hacim değerleri

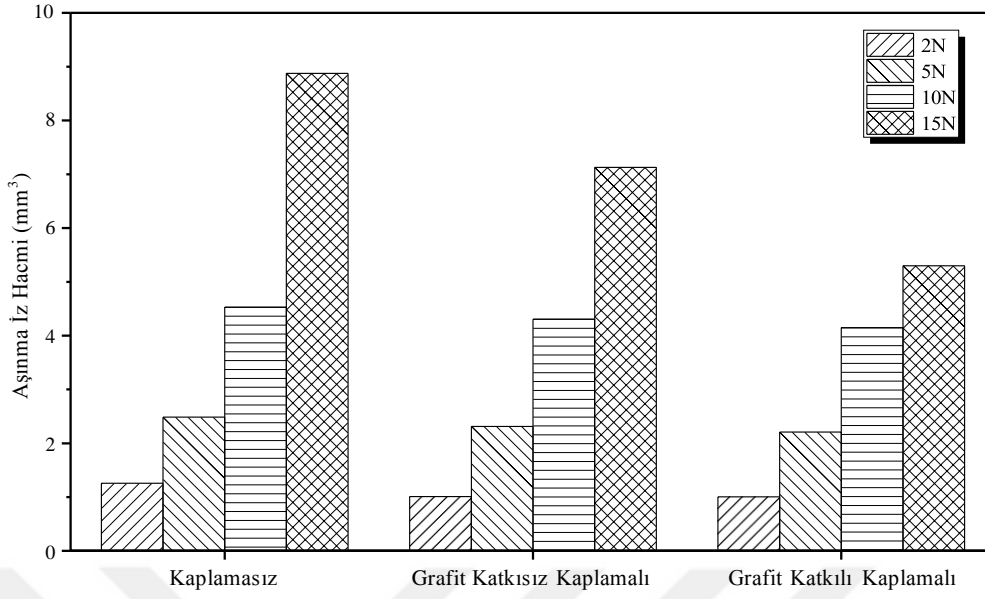
Uygulanan Yük (N)	Ortalama Genişlik (mm)	Ortalama Derinlik (mm)	Aşınma iz hacmi (mm ³)
2N	1,185	0,043	1,257
5N	1,460	0,069	2,485
10N	1,610	0,114	4,528
15N	2,180	0,165	8,875

Tablo 8. Grafit katkısız kaplamalı numune için ortalama genişlik, ortalama derinlik ve aşınma iz hacim değerleri

Uygulanan Yük (N)	Ortalama Genişlik (mm)	Ortalama Derinlik (mm)	Aşınma iz hacmi (mm ³)
2N	1,167	0,035	1,007
5N	1,441	0,065	2,312
10N	1,586	0,110	4,307
15N	2,140	0,135	7,126

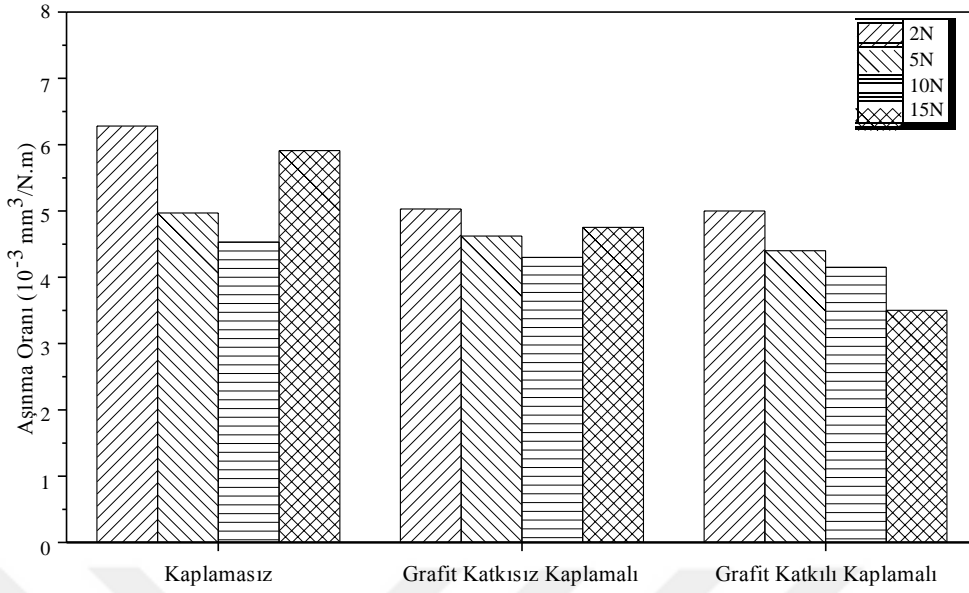
Tablo 9. Grafit katkılı kaplamalı numune için ortalama genişlik, ortalama derinlik ve aşınma iz hacim değerleri

Uygulanan Yük (N)	Ortalama Genişlik (mm)	Ortalama Derinlik (mm)	Aşınma İz Hacmi (mm ³)
2N	1,127	0,036	1,001
5N	1,420	0,063	2,207
10N	1,602	0,105	4,150
15N	1,820	0,118	5,298



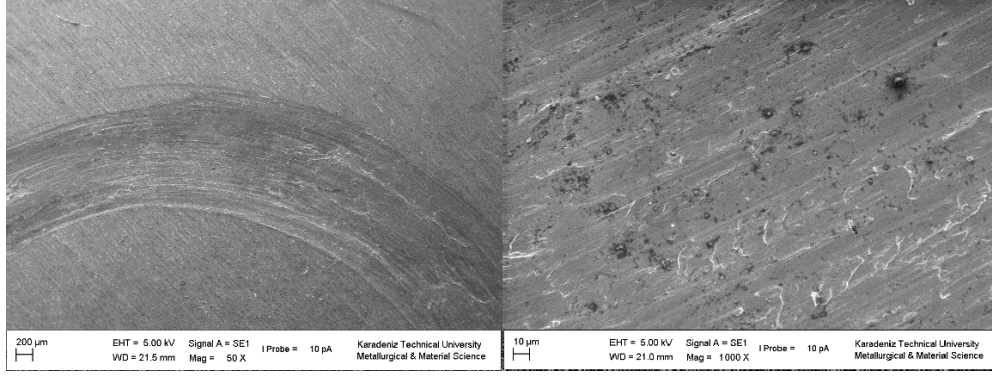
Şekil 48. Kaplamasız, grafit katkısız kaplamalı ve grafit katkılı numunelerin farklı yükler altında elde edilen aşınma iz hacimleri

Şekil 49’da gösterilen aşınma oranları grafiği incelendiğinde ise; en düşük aşınma oranları grafit katkılı kaplamalı numunelerde meydana gelmiştir. Grafit katkısız kaplamalı numunelerin aşınma oranları ise kaplamasız numunelere kıyasla daha düşüktür. Ayrıca grafit katkılı kaplamalı numunelerde yük arttıkça aşınma oranları düşmüştür. 2N yük altında yapılan aşınma deneyinde grafit katkılı kaplamalı, grafit katkısız kaplamalı ve kaplamasız numunelerin aşınma oranları sırasıyla 5×10^{-3} , $5,03 \times 10^{-3}$ ve $6,28 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/(\text{N.m})$ olarak bulunmuştur. 5N yük altında yapılan aşınma deneyinde grafit katkılı kaplamalı, grafit katkısız kaplamalı ve kaplamasız numunelerin aşınma oranları sırasıyla $4,4 \times 10^{-3}$, $4,62 \times 10^{-3}$ ve $4,97 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/(\text{N.m})$ olarak bulunmuştur. 10N yük altında yapılan aşınma deneyinde grafit katkılı kaplamalı, grafit katkısız kaplamalı ve kaplamasız numunelerin aşınma oranları sırasıyla $4,15 \times 10^{-3}$, $4,30 \times 10^{-3}$ ve $4,53 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/(\text{N.m})$ olarak bulunmuştur. 15N yük altında yapılan aşınma deneyinde grafit katkılı kaplamalı, grafit katkısız kaplamalı ve kaplamasız numunelerin aşınma oranları sırasıyla $3,5 \times 10^{-3}$, $4,75 \times 10^{-3}$ ve $5,91 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/(\text{N.m})$ olarak bulunmuştur.

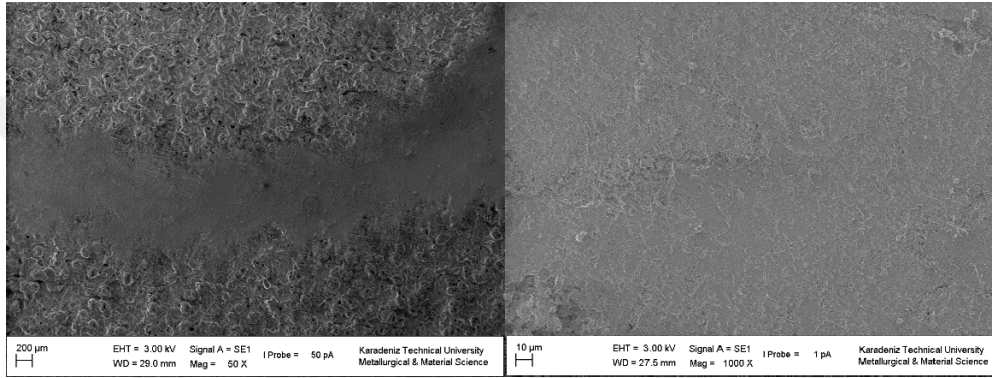


Şekil 49. Kaplamasız, grafit katkısız kaplamalı ve grafit katkılı numunelerin farklı yükler altında elde edilen aşınma oranları

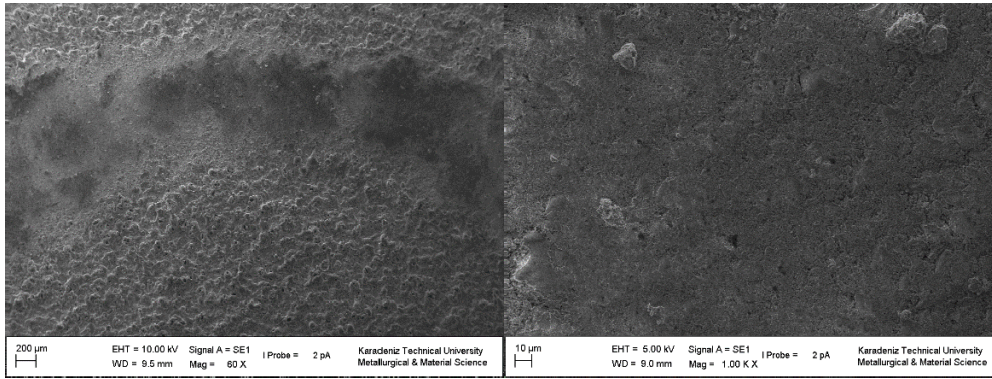
Şekil 50, 51, 52 ve 53'te 2N, 5N, 10N ve 15N yük altında kaplamasız, grafit katkısız kaplamalı ve grafit katkılı kaplamalı numunelerin aşınma izlerinin SEM görüntüleri verilmiştir. Ayrıca Şekil 54, 55 ve 56'da ise kaplamasız, grafit katkısız kaplamalı ve grafit katkılı kaplamalı numunelerin 2N, 5N, 10N ve 15N yük altında aşınma izlerinin 3 boyutlu gösterimi verilmiştir. Grafit katkılı kaplamalı ve grafit katkısız kaplamalı numunelerde dış tabaka aşındıktan sonra camsı parlaklığa sahip tabaka ortaya çıkmıştır. Ayrıca kaplamasız, grafit katkısız kaplamalı ve grafit katkılı kaplamalı numunelerde farklı yüzey morfolojileri meydana gelmiştir. Uygulanan yükler altında kaplanmış numunelerin hiçbirinde kaplama derinliğine kadar inilmemiştir. Görüntülerden de anlaşılacağı gibi abrazyon aşınması meydana gelmiştir. Ayrıca abrazif ürünlerin aşınma izinin çevresinde biriktiği açıkça görülmüştür. Aşınma sonrası tüm numunelerin yüzey morfolojilerinde çatlaklar meydana gelmiştir. Ayrıca grafit katkılı kaplamalı numunelerde grafit katkısız kaplamalı numunelere kıyasla daha fazla çatlak meydana gelmiştir.



a)

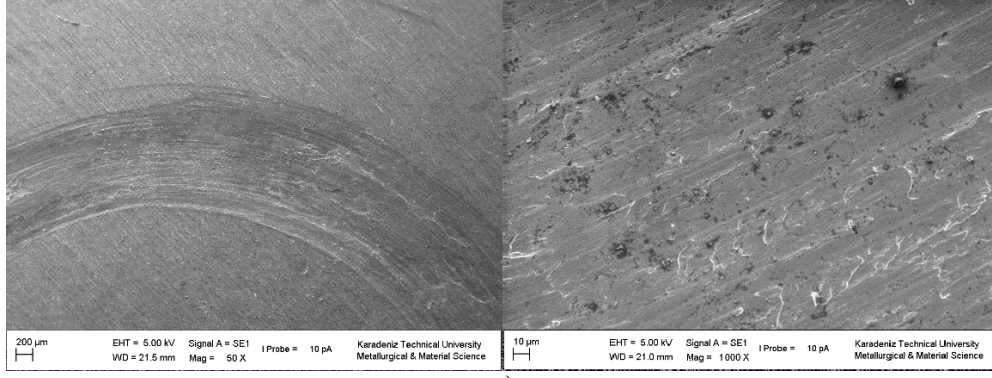


b)

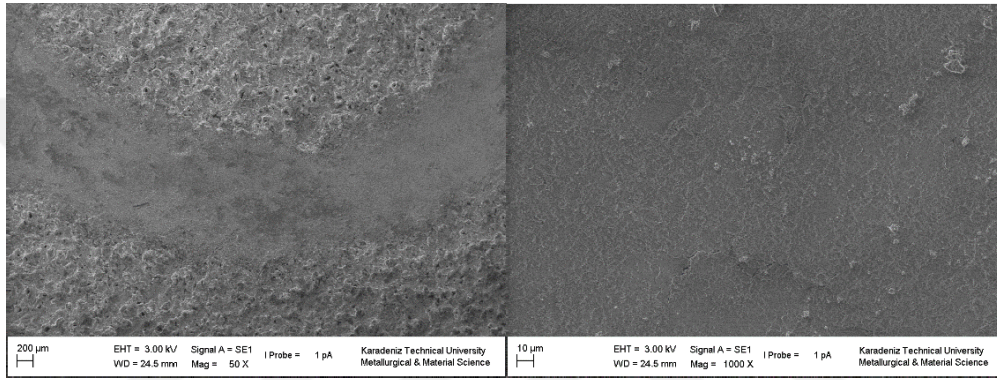


c)

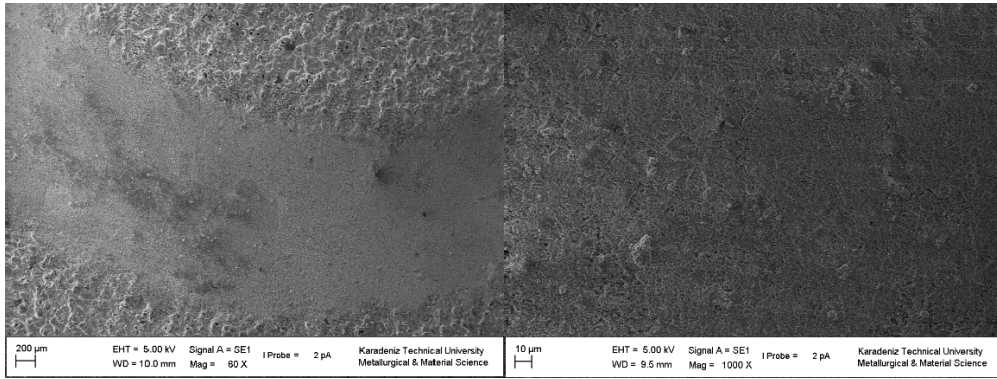
Şekil 50. 2N yük altında numunelerin SEM görüntüleri a) kaplamasız b) grafit katkısız kaplamalı c) grafit katkılı kaplamalı (sol taraf düşük büyütme; sağ taraf yüksek büyütme)



a)

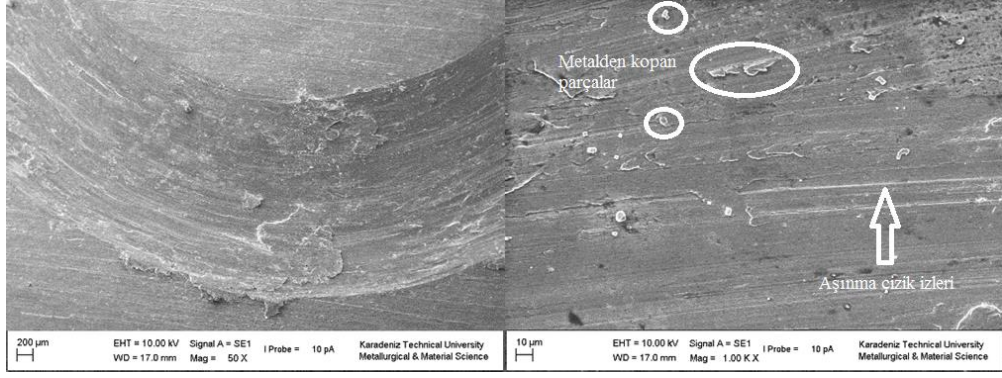


b)

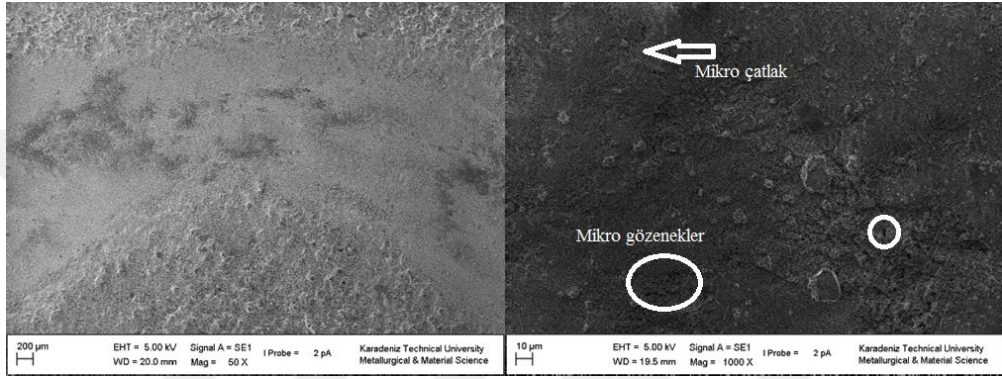


c)

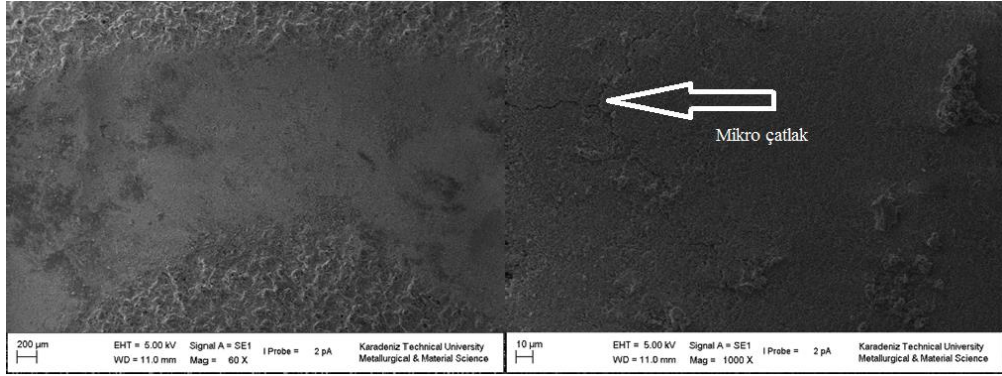
Şekil 51. 5N yük altında numunelerin SEM görüntüleri a) kaplamasız b) grafit katkısız kaplamalı c) grafit katkılı kaplamalı (sol taraf düşük büyütme; sağ taraf yüksek büyütme)



a)

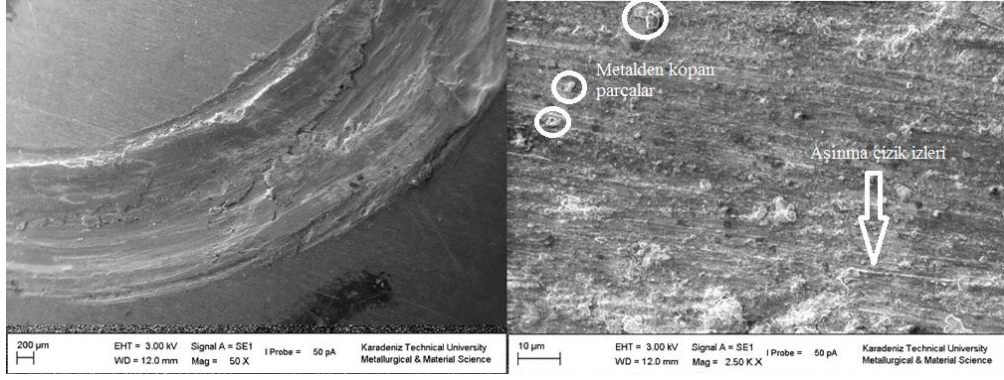


b)

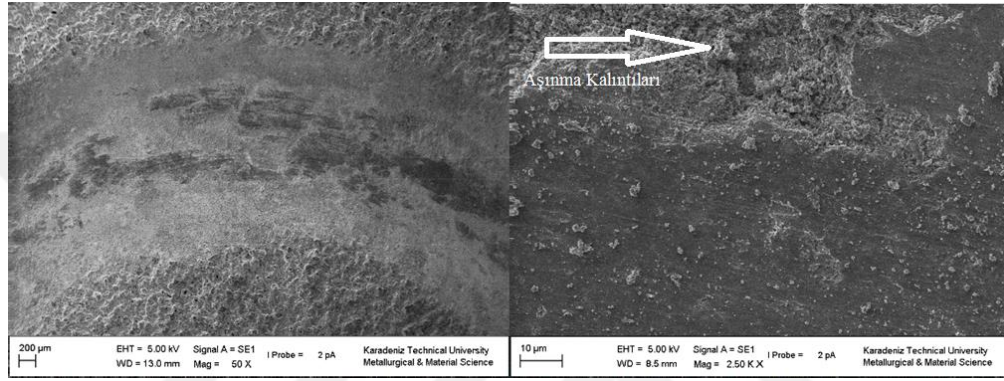


c)

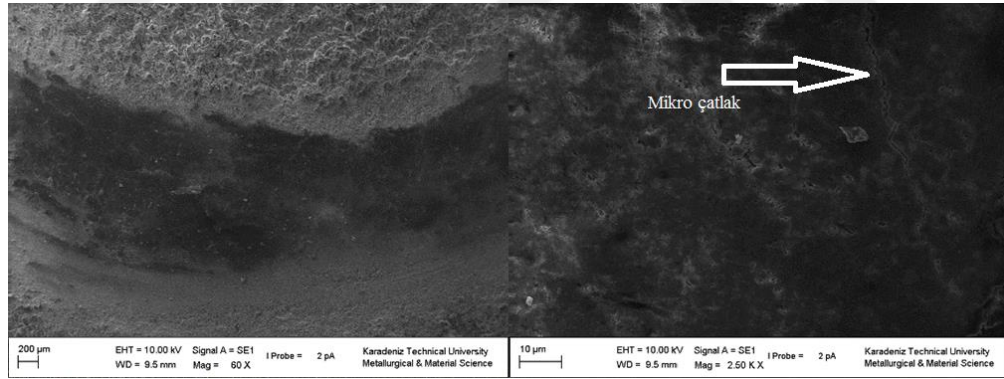
Şekil 52. 10N yük altında numunelerin SEM görüntüleri a) kaplamasız b) grafit katkısız kaplamalı c) grafit katkılı kaplamalı (sol taraf düşük büyütme; sağ taraf yüksek büyütme)



a)

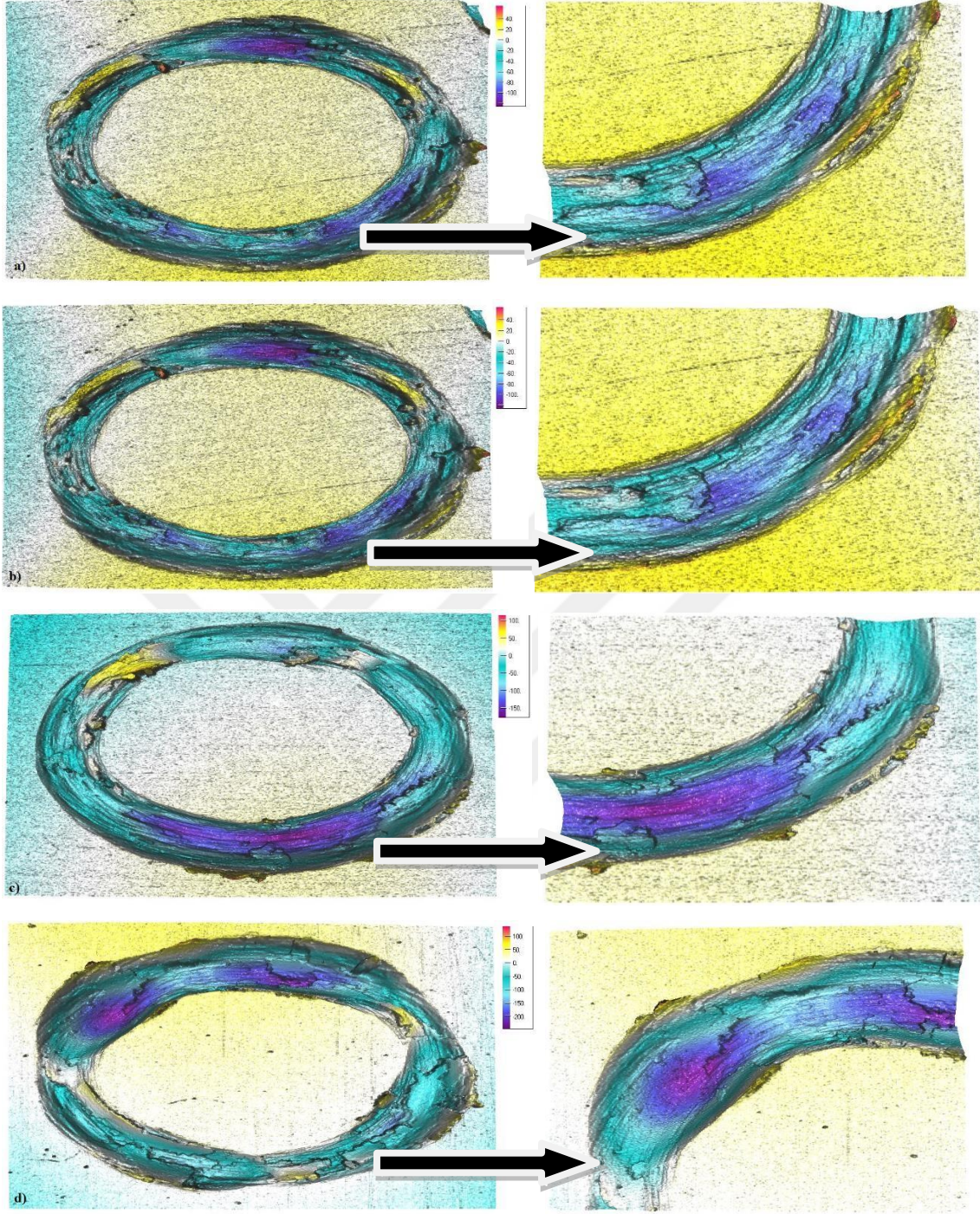


b)

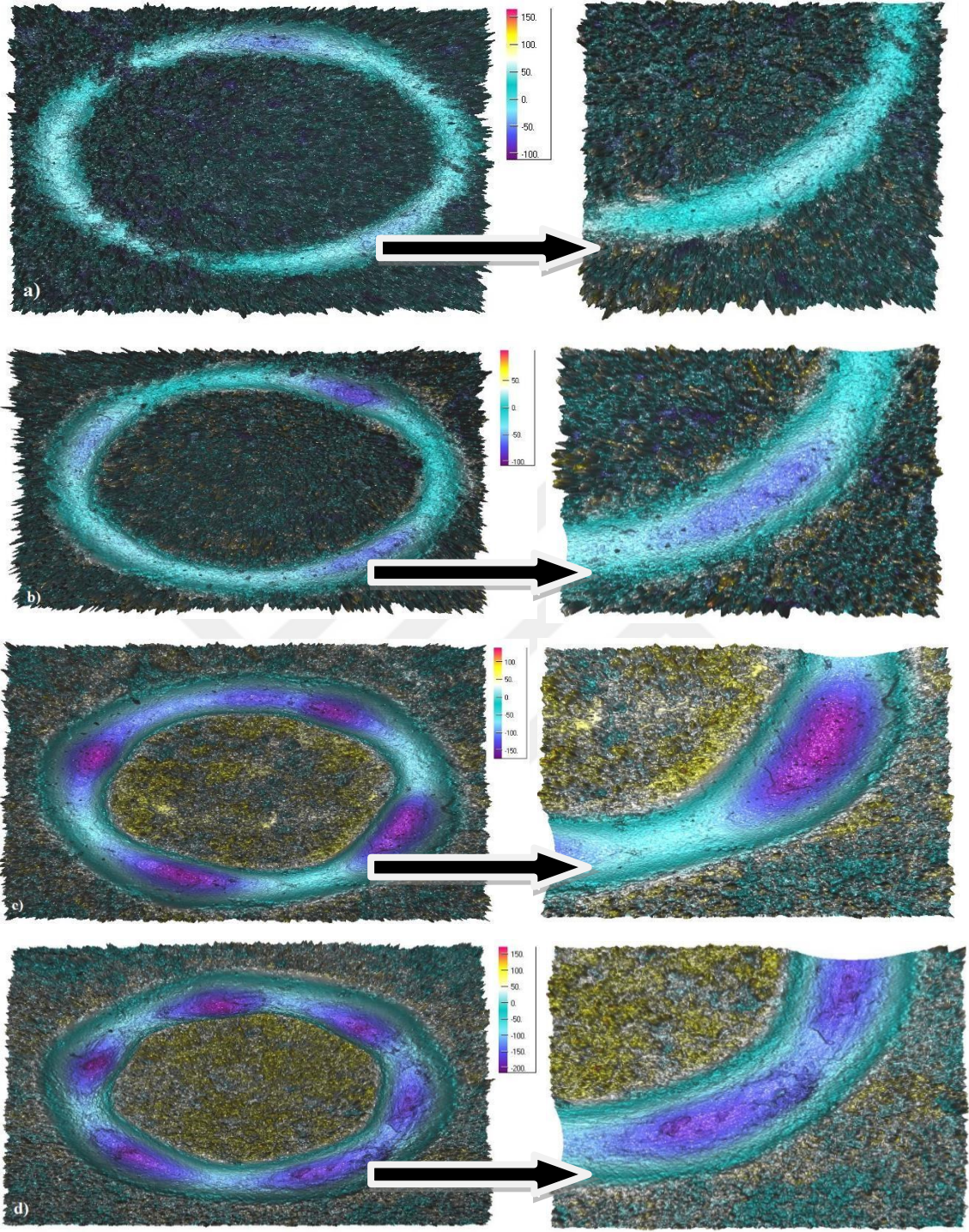


c)

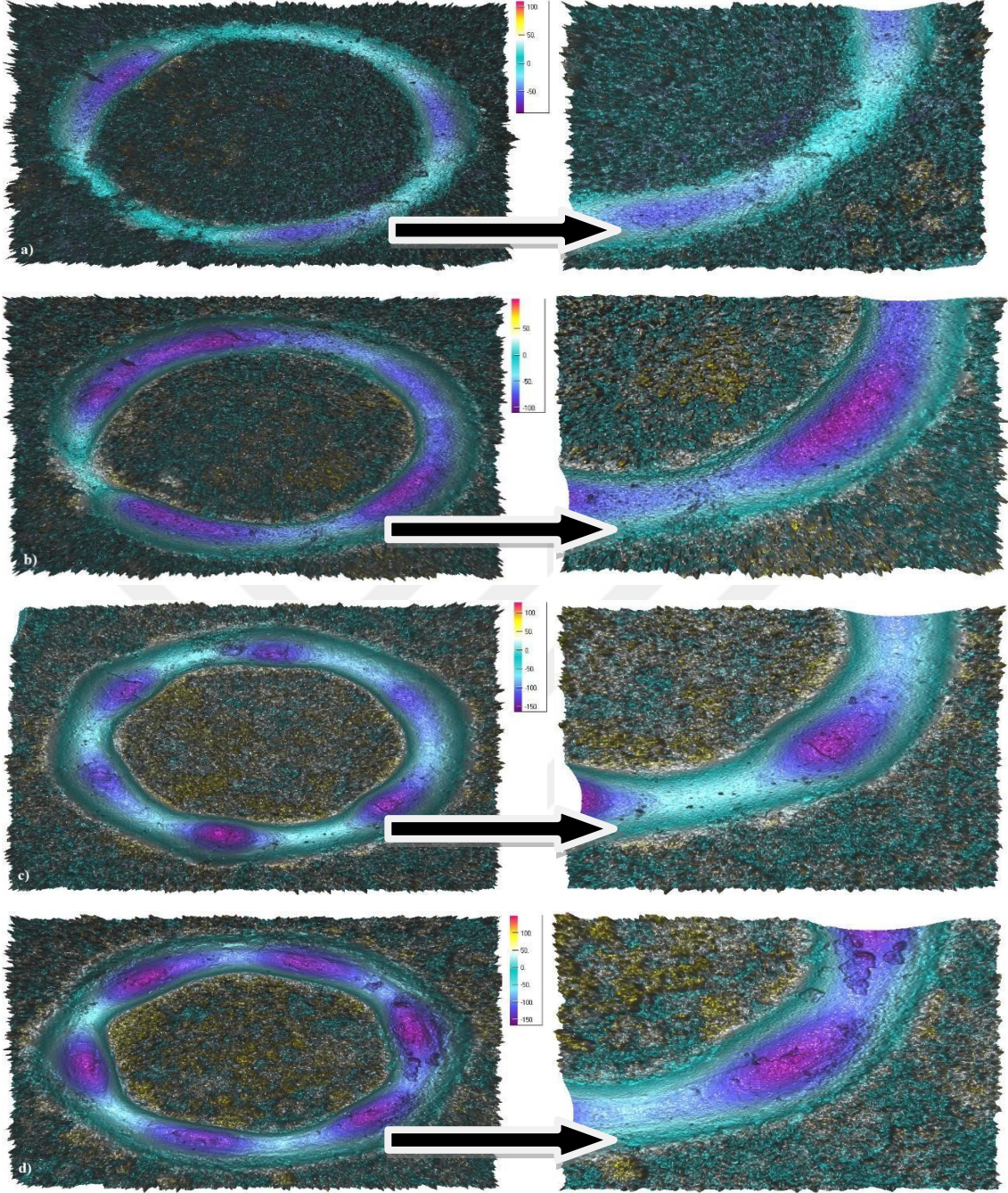
Şekil 53. 15N yük altında numunelerin SEM görüntüleri a) kaplamasız b) grafit katkısız kaplamalı c) grafit katkılı kaplamalı (sol taraf düşük büyütme; sağ taraf yüksek büyütme)



Şekil 54. Kaplamasız numunede farklı yükler altında elde edilen aşınma izlerinin 3 boyutlu gösterimi a)2N b)5N c)10N d)15N



Şekil 55. Grafit katkısız kaplamalı numunede farklı yükler altında elde edilen aşınma izlerinin 3 boyutlu gösterimi a)2N b)5N c)10N d)15N



Şekil 56. Grafit katkıli kaplamalı numunede farklı yükler altında elde edilen aşınma izlerinin 3 boyutlu gösterimi a)2N b)5N c)10N d)15N

4. İRDELEME

4.1. Mikro Ark Oksidasyon ile Kaplamanın Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi

Kaplanmış numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri Tablo 6'da verilmiştir. MAO yöntemi ile kaplama sonra numunelerin yüzey pürüzlülüklerinin arttığı gözlemlenmiştir. Grafit katkılı kaplamalı numunenin Ra değeri 10,79 μm iken grafit katkısız kaplamalı numunenin Ra değeri 16,75 μm 'dir. Böylece elektrolitik çözelti içerisine katkı olarak kullanılan grafit partiküllerinin yüzey pürüzlülüğü üzerine iyileştirici etkisi olmuştur. Yüzey pürüzlülüğünün düşmesinin nedeni; elektrolit içerisindeki grafit partiküllerinin kaplama gözeneklerine nüfuz etmesidir.

Guo-Hua ve arkadaşları Al numunesinin yapısal özelliklerini geliştirmek amacıyla MAO yöntemi ile kaplama gerçekleştirmişlerdir. Grafit katkılı elektrolit çözelti hazırlayarak, grafitin yüzey özelliklerine etkisini irdelemişlerdir. Grafit partiküllerinin kaplama yüzeyindeki gözeneklere nüfuz ettiğini belirtmişlerdir. Böylece daha pürüzsüz bir kaplama yüzeyi elde edildiğini açıklamışlardır [59]. Dolayısıyla elektrolit içerisindeki grafit varlığının yüzey pürüzlülüğünde önemli bir etkisi olmuştur.

4.2. Mikro Ark Oksidasyon ile Kaplamanın Kaplama Kalınlığına Etkisi

Grafit katkılı kaplamalı ve grafit katkısız kaplamalı numunelerin kaplama kalınlıkları Şekil 24'te gösterilmiştir. Grafit katkılı kaplamalı numune ile grafit katkısız kaplamalı numunelerin kaplama kalınlıklarında çok fazla bir değişim olmadığı görülmüştür. Ancak grafit katkısız kaplamalı numunenin kaplama kalınlığı biraz daha yüksektir. Grafit katkılı kaplamalı numunenin kaplama kalınlığı 273,6 μm iken grafit katkısız kaplamalı numunenin kaplama kalınlığı 277,2 μm 'dir. Aynı şekilde literatüre paralel olarak kaplama kalınlığı arttıkça yüzey pürüzlülüğü de artmıştır.

Al alaşımlarının kaplama morfolojilerini incelemek amacıyla elektrolitik çözelti içerisine Fe katkısı yapılmıştır. Sonuç olarak kaplama kalınlığı arttıkça yüzey pürüzlülüğünün de arttığı belirtilmiştir [71]. Ayrıca Gao ve Shao elektrolitik çözelti içerisine 2 g/l yoğunluğunda grafit katkısı yaparak, grafitin yüzey özelliklerine etkisi

incelemişlerdir. Grafit katkılı kaplamalı numunenin grafit katkısız kaplamalı numuneye kıyasla kaplama kalınlığının daha düşük olduğunu belirtmişlerdir [72].

4.3. Mikro Ark Oksidasyon ile Kaplamanın Faz Kompozisyonuna Etkisi

Kaplanan yüzeyin faz kompozisyonu, numune yüzeyinin mekanik ve tribolojik performansının bilinmesi için çok önemli bir parametredir. Kaplamasız, grafit katkısız kaplamalı ve grafit katkılı kaplamalı alaşımlarının XRD analizleri Şekil 27’te gösterilmiştir.

XRD verileri incelendiğinde; literatüre paralel olarak Al numunelerinin MAO yöntemi ile kaplama sonrası esas fazların α -Al₂O₃ ve γ -Al₂O₃ olduğu açıkça görülmektedir. Kaplama esnasında Al alaşımlarının yüzeyinde soğuma hızları farklı olduğundan dolayı α - Al₂O₃ ve γ -Al₂O₃ fazları oluşmaktadır. Ayrıca dış katmanda soğuma hızı yüksek olduğundan dolayı zayıf ve gevşek γ -Al₂O₃ fazı oluşurken, iç katmanda ise soğuma hızı düşük olduğundan dolayı α -Al₂O₃ fazı oluşmaktadır [73].

Kaplanmış numunelerin XRD pikleri karşılaştırıldığında önemli bir değişiklik olmadığı görülmüştür. 40 ila 120 derece arasında α -Al₂O₃ ve γ -Al₂O₃ fazlarının hemen hemen aynı yoğunlukta olduğu görülmektedir. Ancak grafit katkılı kaplamalı numunede 15 ila 40 derece arasında grafit varlığı açıkça görülmektedir. Grafitin 15 ila 40 derece arasında pik olarak görünmemesinin nedeni; grafitin kristal yapıda olmaması yani amorf yapıda olması ve kaplama bölgesinde homojen olarak yayılmamasından kaynaklanmaktadır.

Benzer şekilde, Lv ve arkadaşları elektrolit içerisine grafit katkısı yaparak Al numunesi yüzeyine MAO yöntemi ile kaplama gerçekleştirmişlerdir. Grafit katkılı kaplamalı numunenin XRD analizinde grafit piklerinin mevcut olmadığını ifade etmişlerdir. Bunun nedenini; grafit partiküllerinin oksit katmanda homojen olarak dağılmamasından ve amorf yapıda olmasından kaynakladığını açıklamışlardır [59].

Başka bir çalışmada, Al numunesini kaplamak amacıyla karbon nanotüp katkılı elektrolitik çözelti hazırlanmıştır. Kaplanmış numunenin XRD analizi incelendiğinde karbon piklerine rastlanmadığı açıklanmıştır. Karbon nanotübün amorf yapıda olması ve kaplama içerisinde homojen dağılmamasından dolayı karbon piklerine rastlanmadığı belirtilmiştir [57].

4.4. Mikro Ark Oksidasyon ile Kaplamanın Yüzey Morfolojisine Etkisi

MAO yöntemi ile kaplanmış numunelerin yüzey morfolojilerinin gözenekli bir yapıda olduğu ve ergimiş oksit-elektrolit teması sonrası hızlı katılaşma ile mikro çatlakların oluşumu literatürde açıkça belirtilmiştir. Şekil 28, 29, 30 ve 31’de grafit katkısız kaplamalı ve grafit katkılı kaplamalı numunelerin yüzey morfolojileri farklı oranlarda büyütülerek SEM fotoğrafları verilmiştir. Uygulanan voltajın, bozunum voltajına erişmesi ile numuneler yüzeyinde kaplama meydana gelmiştir. Grafit katkılı kaplamalı numunenin yüzeyindeki gözenek sayısı, grafit katkısız kaplamalı numunenin gözenek sayısından daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeni grafit partiküllerinin oluşan gözeneklere nüfuz etmesi ile gözenekliliği azaltmasıdır. Ayrıca grafit katkılı kaplamalı numunede oluşan mikro çatlak ve kırıkların grafit katkısız kaplamalı numuneye kıyasla daha düşük olduğu görülmektedir. Aynı şekilde grafit partiküllerinin kırık ve çatlak bölgelere emilmesi sonucu numune yüzeyini iyileştirdiği düşünülebilir. Şekil 32 ve Şekil 33’te kaplanmış numunelerin yüzey morfolojilerinde krater görünümlü yapıların mevcudiyeti gözlemlenmiştir. Krater görünümlü yapılar, kaplama esnasında oluşan deşarjların aynı yerde birçok kez meydana gelmesi ile oluşmaktadır.

Kaplanmış numunelerde deşarj kanalları olarak adlandırılan porozlu bir yapı meydana gelmiştir. Bunun nedeni; voltaj ve akıma bağlı olarak deşarj kanallarının oluşması ve bu kanalların çevresinde hızlı katılaşma ile amorf yapı oluşmasıdır. Grafit katkılı kaplamalı numunede oluşan por sayısı, grafit katkısız kaplamalı numune oluşan por sayısından daha düşüktür. Buna karşın grafit katkılı kaplamalı numunelerde oluşan por boyutları daha büyüktür.

Quanzhi Chen ve arkadaşlarının yapmış olduğu araştırmaya göre, MAO yöntemi ile kaplamada grafit partiküllerinin bozunum voltajını düşürdüğünü belirtmişlerdir [51]. Dolayısıyla grafit katkılı kaplamalı numunelerde, grafit katkısız kaplamalı numunelere kıyasla daha düşük voltaj değerinde deşarj kanalları oluşmaya başlamıştır. Böylece grafit katkılı kaplamalı numunelerde daha fazla deşarj kanalları oluşmuştur. Bunun sonucunda da aynı bölgede meydana gelen deşarjlarda artış olduğu ve daha büyük por boyutlarına sahip olduğu düşünülebilir. Şekil 34 ve Şekil 35’te grafit katkısız kaplamalı ve grafit katkılı kaplamalı numunede meydana gelen por boyutları verilmiştir.

4.5. Mikro Ark Oksidasyon ile Kaplamanın Mikro Sertlik Üzerine Etkisi

Grafit katkısız kaplamalı ve grafit katkılı kaplamalı numunelerin oksit tabaka kalınlığına göre mikro sertlik değişimi Şekil 36 ve Şekil 37’de gösterilmiştir. MAO yöntemi ile kaplamada soğuma hızlarının farklılığından dolayı iç tabaka ve dış tabaka farklı fazlar içerebilmektedir. Bu nedenle kaplamanın mekanik ve fiziksel özellikleri her bölgede aynı olmamaktadır. MAO kaplamaların dış katmanında yumuşak ve gevşek bir faz olan $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, iç katmanda ise sert ve yoğunluğu yüksek bir faz olan $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ fazı mevcuttur. Bu yüzden numunelerin sertlikleri, altlık malzeme yüzeyine yakın bölgeden başlanarak dış tabakaya doğru ayrı ayrı ölçülmüştür.

MAO yöntemi ile kaplanmış numunelerin sertliği kaplamasız numuneye kıyasla çok yüksek olduğu görülmektedir. Kaplamasız numunenin sertliği 92 HV iken grafit katkılı kaplamalı numunenin sertliği 573 HV’a, grafit katkısız kaplamalı numunenin sertliği ise 702 HV’a kadar çıkmaktadır. Hem grafit katkısız kaplamalı hem de grafit katkılı kaplamalı her iki numune incelendiğinde, altlık malzemedan yoğun ara tabakaya gidildikçe sertlik artmaktadır. Ancak yoğun ara tabakadan dış tabakaya doğru gidildikçe ise sertlik düşmektedir. Böylece yoğun ara tabakada daha sert olan $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ fazı yüksek oradan mevcut iken, dış tabakaya doğru gidildikçe $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ fazı mevcuttur.

Sundarajan ve diğerleri MAO yöntemi ile 7075 Al numunesi yüzeyine kaplama gerçekleştirmişlerdir. Benzer şekilde, kaplamada meydana gelen sertliğin yoğun ara tabakada yüksek olduğunu dış tabakaya doğru gidildikçe ise düştüğünü belirtmişlerdir [27]. Ayrıca Chen ve arkadaşları, elektrolitik çözelti içerisine grafit partikülleri ekleyerek 6063 Al alaşımı yüzeyine kaplama gerçekleştirmişlerdir. 6063 Al alaşımının sertliği yaklaşık 59.17 HV olmasına karşın kaplanmış numunenin sertliğinin iki kat daha yüksek ölçüldüğünü belirtmişlerdir [51].

4.6. Mikro Ark Oksidasyon ile Kaplamanın Aşınma Davranışına Etkisi

Bu bölümde, elektrolit içerisindeki grafit katkısının aşınma davranışına olan etkisini incelemek amacıyla; 2, 5, 10 ve 15N olmak üzere 4 farklı yük kullanılarak kaplamasız, grafit katkısız kaplamalı ve grafit katkılı kaplamalı numunelerin tribolojik performansları irdelenmiştir. Şekil 43, 44, 45 ve 46’da 2, 5, 10 ve 15N yük altında elde edilen sürtünme katsayısı-süre grafikleri verilmektedir. Sürtünme katsayısı-süre grafikleri incelendiğinde;

deney başlangıcında tüm numunelerin sürtünme katsayıları hızlı bir şekilde artmaktadır. Bunun nedeni, aşındırıcı bilyenin deney başlangıcında zayıf, gevşek ve gözenekli kayıp tabaka olarak adlandırdığımız dış tabaka ile temas etmesidir. Dış tabaka sertliği düşük ve yüksek oranda $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ fazından oluşmaktadır. Dış tabaka aşındıktan sonra daha sert ve yoğun ara tabaka ortaya çıkmaktadır. Yoğun ara tabaka ise genel olarak $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ fazından oluşmaktadır. Bu sebepten sürtünme katsayısı stabil olarak devam etmektedir. MAO ile kaplama işleminde aşınma hızı önce hızlı bir şekilde artar daha sonra ise kararlı hale gelmektedir [74]. Ayrıca grafiklerin bazı bölgelerinde ani iniş çıkışlar gözlemlenmiştir. Bunun nedeni, aşınma esnasında meydana gelen deformasyon sertleşmesidir [75].

Şekil 47'de aşınma esnasında numunelere uygulanan yük ile ortalama sürtünme katsayısı grafiği verilmektedir. 2, 5, 10 ve 15N yük altında yapılan aşınma deneylerinde en düşük ortalama sürtünme katsayısı grafit katkılı kaplamalı numunelerde, en yüksek ortalama sürtünme katsayısı ise kaplamasız numunelerde meydana geldiği gözlemlenmiştir. Dolayısıyla MAO yöntemi ile kaplama yapılması sonucunda AA-2024 numunesinin sürtünme katsayısının düşmüştür. Ayrıca, elektrolit içerisine grafit katkısı kullanılması halinde sürtünme katsayısının iyileştiği anlaşılmaktadır. Grafit katkısının, sürtünme katsayısını azaltması grafitin yağlayıcı özelliğinden kaynaklanmaktadır [76].

Şekil 48'de numunelerin farklı yükler altında elde edilen aşınma iz hacimleri gösterilmiştir. 2, 5, 10 ve 15N yük altında yapılan aşınma deneylerinde en düşük aşınma iz hacimleri grafit katkılı kaplamalı numunelerde, en yüksek aşınma iz hacimleri ise kaplamasız numunelerde meydana geldiği gözlemlenmiştir. AA-2024 numunelerin yüzeyinin MAO kaplaması ile aşınma direncinin iyileştirildiği açıkça görülmektedir. Ayrıca, elektrolit içerisindeki grafit varlığının aşınma direncini belirgin bir şekilde arttırdığı görülmüştür. Bunun nedeni, grafit partiküllerinin bir katı yağlayıcı olarak davranması ve yüzeyde oluşan mikro boşluklara nüfuz ederek yüzey pürüzlülüğünü düşürmesidir. Ayrıca yüzey pürüzlülüğünün düşmesiyle kaymaya karşı bir direnç oluşmasıdır [74]. Böylece aşınma iz hacimleri düşer ve dolayısıyla aşınma direnci artmaktadır.

Şekil 49'te numunelerin farklı yükler altında elde edilen aşınma oranları gösterilmiştir. 2, 5, 10 ve 15N yük altında yapılan aşınma deneylerinde en düşük aşınma oranı grafit katkılı kaplamalı numunelerde meydana geldiği görülmüştür. Ayrıca grafit katkısız kaplamalı numunelerin aşınma oranı, kaplamasız numunelere kıyasla daha düşük olduğu görülmüştür. Elektrolit içerisindeki grafit varlığının aşınma oranını düşürdüğü

açıkça görülmektedir. Burada grafit, altlık malzeme yüzeyinde yağlayıcı bir yüzey oluşturmakta ve bu yağlayıcı yüzey aşınma oranında önemli bir düşüşe sebebiyet vermektedir [77]. Ayrıca aşınan yüzeylerde oluşan abrazyon ürünleri aşınma oranını önemli derecede etkilemektedir [78].

Şekil 50, 51, 52 ve 53'te numunelerin farklı yükler altında aşınma izlerinin yüzey morfolojilerini gösteren SEM görüntüleri verilmiştir. Ayrıca Şekil 54, 55 ve 56'da numunelerin farklı yükler altında aşınma izlerinin 3 boyutlu gösterimleri verilmiştir. Aşınma izlerinin SEM görüntüleri incelendiğinde; dış tabakada sertliği düşük ve gevşek yapıdaki γ - Al_2O_3 fazının yoğun aşınması ile camsı parlaklığa sahip sert ve yoğun ara tabakanın (α - Al_2O_3 fazı) ortaya çıktığı görülmüştür. Ayrıca aşınma izlerinin yüzey morfolojilerinde çatlaklar meydana gelmiştir. Grafit katkılı kaplamalı numunelerde grafit katkısız kaplamalı numunelere kıyasla daha fazla çatlak meydana geldiği görülmektedir.

Aşınma esnasında hem kaplama yüzeyinde hem de kaplama ile altlık malzemenin yapıştığı bölgede gerilmeler meydana gelmektedir. Bu gerilmelerin numunenin dayanımından daha yüksek olması durumunda çatlak oluşması ve ilerlemesi görülmektedir. Ayrıca kaplama esnasında meydana gelen gerilmelerin homojen bir şekilde olmaması ve kaplama sertliğinin bazı bölgelerde yüksek bazı bölgelerde nispeten daha düşük olması çatlak oluşumunu başlatabilmektedir. Böylece uygulanan yüke bağlı olarak ara yüzeyde homojen bir gerilme olmamasından çatlaklar ve kırıklar meydana gelmektedir. Kaplama kalınlığı ve kaplama sertliği arttıkça kaplanmış numunelerin kırılmaya karşı göstereceği direnç artmaktadır. Bu nedenle, grafit katkılı kaplamalı numunelerde grafit katkısız kaplamalı numunelere kıyasla daha fazla çatlak meydana gelmektedir. MAO proses esnasında, birçok deşarj meydana gelmektedir. Aynı bölgede birden çok deşarj meydana gelerek deşarj kanalları oluşmaktadır. Bu kanallardan çıkan kaplama ürünleri yüzeyde birikerek gevşek, zayıf ve gözenekli bölgeler oluşturmaktadır. Böylece aşınma esnasında bu bölgelerde çatlak meydana gelmektedir [74]. Kaplanmış numunelerde, seramik-metal etkileşimi söz konusu olduğundan dolayı abrazyon aşınma meydana gelmektedir. Ayrıca literatüre paralel olarak, aşınma esnasında abrazyon aşınma ürünlerinin kenarlarda biriktiği görülmüştür [78].

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında grafit katkı ve katkısız elektrolitler ile AA-2024 numunesi yüzeyine MAO yöntemi ile kaplama gerçekleştirilmiş ve grafit katkı ve katkısız olarak kaplanmış alaşımlarda grafitin, yüzey modifikasyonu ve aşınma davranışına olan etkileri aşağıda açıklanmıştır.

1. MAO yöntemi ile kaplama sonrası AA-2024 alaşımı yüzeyinde yüzey pürüzlülüğü arttırmıştır. Ancak grafit katkı kaplamalı numunenin yüzey pürüzlülüğü grafit katkı kaplamalı numuneye kıyasla daha düşüktür.
2. Kaplama kalınlıkları grafit katkı kaplamalı numunede 273,6 µm iken grafit katkı kaplamalı numunede 277,2 µm olarak bulunmuştur.
3. XRD verileri incelendiğinde hem grafit katkı kaplamalı hem de grafit katkı elektrolitik çözeltiler sonucu hazırlanan numunelerde dış katmanda γ -Al₂O₃ fazı, iç katmanda α -Al₂O₃ fazının olduğu görülmüştür. XRD paternlerinde grafit piklerine rastlanmamıştır.
4. MAO yöntemi ile kaplama sonrası hem grafit katkı kaplamalı numunede hem de grafit katkı kaplamalı numune de porozlu bir yapı meydana gelmiştir. Grafit katkı kaplamalı numunedeki gözenek sayısı ve por boyutu, grafit katkı kaplamalı numunedeki gözenek sayısı ve por boyutuna kıyasla daha az oranda meydana gelmiştir. Ayrıca grafit katkı kaplamalı numunede meydana gelen mikro çatlakların grafit katkı kaplamalı numuneye kıyasla daha az oranda olduğu görülmüştür.
5. MAO yöntemi ile kaplama altlık malzemenin sertliğini yüksek oranda arttırmıştır. AA-2024 numunesinin sertlik değeri 92 HV olmasına rağmen, grafit katkı kaplamalı numunenin maksimum sertlik değeri 573 HV ve grafit katkı kaplamalı numunenin maksimum sertlik değeri 702 HV'dir. Hem grafit katkı kaplamalı hem de grafit katkı kaplamalı numune incelendiğinde, altlık malzemedan yoğun ara tabakaya gidildikçe sertlik artmıştır.
6. Farklı yükler altında yapılan aşınma deneylerinde, en düşük ortalama sürtünme katsayısı değerleri grafit katkı kaplamalı numunede meydana gelmiştir. Ayrıca grafit katkı kaplamalı numunede meydana gelen ortalama sürtünme katsayısı kaplamasız numuneye kıyasla daha düşük çıkmıştır.

7. Farklı yükler altında yapılan aşınma deneylerinde, en düşük aşınma iz hacimleri grafit katkıli kaplamalı numunelerde meydana gelmiştir. Grafit katkısiz kaplamalı numunenin aşınma iz hacimleri ise kaplamasız numuneye kıyasla daha düşüktür. Dolayısıyla MAO işlemi, numunelerin aşınma direncini arttırmış ve elektrolit içerisine grafit partiküllerinin ilavesi ile aşınma direnci daha da iyileşmiştir.
8. Farklı yükler altında yapılan aşınma deneylerinde, en düşük aşınma oranları grafit katkıli kaplamalı numunelerde meydana gelmiştir. Grafit katkısiz kaplamalı numunenin aşınma oranları ise kaplamasız numuneye kıyasla daha düşüktür.
9. Farklı yükler altında yapılan aşınma deneylerinde, grafit katkısiz kaplamalı ve grafit katkıli kaplamalı numunelerde kaplama derinliğine kadar inilmemiştir.
10. Aşınma sonrası SEM görüntüleri incelendiğinde, grafit katkıli kaplamalı numunelerde grafit katkısiz kaplamalı numunelere kıyasla biraz daha fazla oranda çatlak meydana gelmiştir.

6. ÖNERİLER

1. Farklı sıcaklıklarda aşınma deneyleri yapılarak tribolojik performans incelenebilir.
2. Farklı kayma hızlarında aşınma deneyleri yapılarak sonuçlar değerlendirilebilir.
3. Temel bazal elektrolitlere farklı konsantrasyonlarda grafit partikülleri katılarak MAO yöntemi ile kaplama gerçekleştirilebilir.
4. Elektrolit içerisine farklı katkıları ekleyerek MAO yöntemi ile kaplama yapılabilir.
5. Aşınma davranışına ek olarak korozyon performansı da incelenebilir.



7. KAYNAKLAR

1. Li, J. F., L. Wan, and J. Y. Feng. "Study on the preparation of titania films for photocatalytic application by micro-arc oxidation." Solar energy materials and solar cells 90,15 (2006) 2449-2455.
2. Huang, P., Zhang, Y., Xu, K. and Han, Y. Surface modification of titanium implant by microarc oxidation and hydrothermal treatment. Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials: An Official Journal of The Society for Biomaterials, The Japanese Society for Biomaterials, and The Australian Society for Biomaterials and the Korean Society for Biomaterials, 70(2), (2004) 187-190.
3. Tang, Guang-xin, et al. "Preparation of porous anatase titania film." Materials Letters 58,12-13 (2004) 1857-186.
4. Cuhadaroğlu, A. Dilek, and Erdal Kara. "Grafit: Bir Genel Değerlendirme." Teknik Bilimler Dergisi 8,1 (2018) 14-33.
5. Uysal N., "Grafit Esash Karbon Nanoakışkan Eldesi ve Isı Değiştirici Sistemlerinde Kullanımının Araştırılması" Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, Türkiye, 2019.
6. Özcan, M.E., "Mikro Ark Oksidasyon Yöntemi İle Kaplanmış Alüminyum Alaşımının Aşınma Davranışının İncelenmesi/Investigation Of Wear Behaviour Of Aluminum Alloy Coated With Micro Arc Oxidation Method." 2014.
7. Xin, Shi-Gang, et al. "Composition and thermal properties of the coating containing mullite and alumina." Materials Chemistry and Physics 97,1 (2006) 132-136.
8. Nie, X., et al. "Deposition of duplex Al₂O₃/DLC coatings on Al alloys for tribological applications using a combined micro-arc oxidation and plasma- immersion ion implantation technique." Surface and Coatings Technology 131,1-3 (2000) 506-513.
9. Gadow, R., D. Scherer, and C. C. Stahr. "Class a Surface Quality for Magnesium Diecastings Using Ceramic Precursor-Based Coatings." Magnesium: Proceedings of the 6th International Conference Magnesium Alloys and Their Applications. Weinheim, FRG: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2003.
10. Gökşahin, E. "Sert Eloksal ile Kaplanmış 6xxx Serisi Alüminyum Alaşımlarının Aşınma Davranışının İncelenmesi." Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Diss. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2007.

11. Deschamps, A., et al. "Process modeling of age-hardening aluminum alloys: from microstructure evolution to mechanical and fracture properties." Proceedings of the James T. Staley honorary Symposium on Aluminum Alloys. 2001.
12. Durmuş, S., S. Akgün ve S. Şahin. "Çökeltme Sertleştirilmesi uygulanmış AA 7012 Alüminyum Alaşımlarında Sertliğin Mikroyapı ile Değişiminin İncelenmesi." IATS (09), Türkiye, 2009.
13. The Aluminium Association, I., Aluminium Alloy, Selection and Applications, in The Aluminium Association, Inc. 1998.
14. <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=aluminumgrades&LN=TR> 10/11/2019.
15. Günyüz, M. "Titanyum ve alaşımlarının mikro ark oksidasyon işlemi ile kaplanması." Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Diss. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2007.
16. Yerokhin, A. L., et al. "Discharge characterization in plasma electrolytic oxidation of aluminium." Journal of Physics D: Applied Physics 36,17 (2003) 2110.
17. Wang, Changzheng, Dong Zhang, and Yongfeng Jiang. "Growth process and wear resistance for ceramic coatings formed on Al-Cu-Mg alloy by micro-arc oxidation." Applied Surface Science 253,2 (2006) 674-678.
18. Lv, Guohua, et al. "Characteristic of ceramic coatings on aluminum by plasma electrolytic oxidation in silicate and phosphate electrolyte." Applied Surface Science 253,5 (2006) 2947-2952.
19. Rakoch, A.G., and I. V. Bardin. "Microarc oxidation of light alloys." Metallurgist 54,5 (2010) 378-383.
20. Guenther-Schulze H. B., "Elektrolyt kondensatoren", Berlin: Krayn.
21. Snezhko, L. "Pulsed Conditions for Production of Silicate Coatings in a Spark Discharge." Protect Metals 16,3 (1981) 287-288.
22. Markov, G. "Structure of anodic films formed by the microarc oxidation of aluminum." Inorganic Mater 19,7 (1983) 1000-1003.
23. Markov, G. A., V. V. Tatarchuk, and M. K. Mironova. "Microarc Oxidation of Aluminum in the Concentrated Sulfuric-Acid." Izvestiya Sibirskogo Otdeleniya Akademii Nauk Sssr Seriya Khimicheskikh Nauk 3 (1983) 34-37.

24. Yerokhin, A. L., et al. "Plasma electrolytic fabrication of oxide ceramic surface layers for tribotechnical purposes on aluminium alloys." Surface and Coatings Technology 110,3 (1998) 140-146.
25. Xue, Wenbin, et al. "Growth regularity of ceramic coatings formed by microarc oxidation on Al-Cu-Mg alloy." Thin solid films 372,1-2 (2000) 114-117.
26. Tekin, K.C., Çakmak, E., ve Malayoğlu, U. Plazma Elektrolitik Oksitlenme Yöntemiyle Hafif Metallerin Kaplanması 2008.
27. Sundararajan, G., and L. Rama Krishna. "Mechanisms underlying the formation of thick alumina coatings through the MAO coating technology." Surface and Coatings Technology 167,2-3 (2003) 269-277.
28. Yerokhin, A. L., et al. "Plasma electrolysis for surface engineering." Surface and coatings technology 122,2-3 (1999) 73-93.
29. Demirci, E.E., "Manyetik Sıçratma (Cfubms) ve Mikro Ark Oksidasyon (MAO) Teknikleri ile Ti6Al4V Alaşımının Dupleks Yüzey Modifikasyonu ", Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 2014.
30. Markov, G. A., V. V. Tatarchuk, and M. K. Mironova. "Microarc Oxidation of Aluminum in the Concentrated Sulfuric-Acid." Izvestiya Sibirskogo Otdeleniya Akademii Nauk Sssr Seriya Khimicheskikh Nauk 3 (1983) 34-37.
31. Albella, J. M., I. Montero, and J. M. Martinez-Duart. "A theory of avalanche breakdown during anodic oxidation." Electrochimica Acta 32,2 (1987) 255-258.
32. Hussein, R. O., et al. "Spectroscopic study of electrolytic plasma and discharging behaviour during the plasma electrolytic oxidation (PEO) process." Journal of Physics D: Applied Physics 43,10 (2010) 105-203.
33. Hussein, R. O., D. O. Northwood, and X. Nie. "Coating growth behavior during the plasma electrolytic oxidation process." Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films 28,4 (2010) 766-773.
34. Guidong, X., and L. I. Jiong. "Power Source Types Effects on the Properties of Oxide Ceramic Coatings on Mg Alloys." Naturel Science and Foundation of China 2007 150-152.
35. Yerokhin, A. L., et al. "Discharge characterization in plasma electrolytic oxidation of aluminium." Journal of Physics D: Applied Physics 36,17 (2003) 2110.

36. Hussein, R. O., X. Nie, and D. O. Northwood. "Influence of process parameters on electrolytic plasma discharging behaviour and aluminum oxide coating microstructure." Surface and Coatings Technology 205,6 (2010) 1659-1667.
37. Özcan, M.E., "Mikro ark oksidasyon yöntemi ile kaplanmış alüminyum alaşımının aşınma davranışının incelenmesi/Investigation of wear behaviour of aluminum alloy coated with micro arc oxidation method." 2014.
38. Hibbard, Joely. "Government mandates force rethinking of automotive parts finishing processes: Micro-arc oxidation technology figures prominently in future applications." Metal Finishing 105,3 (2007) 50-54.
39. Slonova, A. I., et al. "Aspects of the formation of microarc coatings." Soviet electrochemistry 28,9 (1992) 1045-1049.
40. Timoshenko, A. V., et al. "The Effect of silicates in sodium-hydroxide solution on the structure of oxide coatings deposited on a D16T alloy by microarc oxidation." Protection of Metals 30,2 (1994) 149-153.
41. Sun, Xuetong, et al. "Composition and mechanical properties of hard ceramic coating containing α -Al₂O₃ produced by microarc oxidation on Ti-6Al-4V alloy." Thin Solid Films 471,1-2 (2005) 194-199.
42. Gnedenkov, S. V., et al. "Composition and adhesion of protective coatings on aluminum." Surface and Coatings technology 145,1-3 (2001) 146-151.
43. Fukuda, T., and T. Kakuhari. "New Surface Treatment Technology for Light Metals-Keronite." Journal-Surface Finishing Society Of Japan 58,6 (2007) 357.
44. Curran, J.A., "Thermal and mechanical properties of plasma electrolytic oxide coatings." Diss. University of Cambridge, 2006.
45. GÖK, M. S., "Düşük Ve Orta Karbonlu Çeliklerin Yüzeyine TIG Kaynak Metoduyla Kaplanan Ostenitik Paslanmaz Çelik Tozunun Aşınma Direncine Karbür İçeriğinin Etkisinin Araştırılması/Investigation Into The Effect Of Carbide Content On Wear Resistance Of Austenitic Stainless Steel Powder Coated Low And Medium Carbon Steels By TIG Method." 2008.
46. Eyre, T. S. "Friction and wear control in industry." Metals and materials (London) 7,3 (1991) 143-148.

47. Kılıçarslan Y.S., “ Dolgu Malzemesi Ve Oranının Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Katı Parçacık Erozyon Aşınma Davranışına Etkisi” Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2019.
48. Kılınç. Y. “ Yağlı Sürtünme Şartlarında Çelik İnce Zırh Yataklarında Üretim Tekniklerinin Aşınma Etkisinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 1993.
49. Bağcı, M., “Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Erozyon Aşınma Davranışının İncelenmesi”, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2010.
50. Kaseem, Mosab, Yong Hwan Lee, and Young Gun Ko. "Incorporation of MoO₂ and ZrO₂ particles into the oxide film formed on 7075 Al alloy via micro-arc oxidation." Materials Letters 182 (2016) 260-263.
51. Chen, Quanzhi, et al. "Influence of graphene particles on the micro-arc oxidation behaviors of 6063 aluminum alloy and the coating properties." Applied Surface Science 423 (2017) 939-950.
52. Xiang, Nan, et al. "Microstructure and mechanical properties of ceramic coatings formed on 6063 aluminium alloy by micro-arc oxidation." Transactions of Nonferrous Metals Society of China 25.10 (2015): 3323-3328.
53. Li, Hong-xia, Ren-guo Song, and Zhen-guo Ji. "Effects of nano-additive TiO₂ on performance of micro-arc oxidation coatings formed on 6063 aluminum alloy." Transactions of Nonferrous Metals Society of China 23,2 (2013) 406-411.
54. Ji, Shunping, et al. "Excellent corrosion resistance of P and Fe modified micro-arc oxidation coating on Al alloy." Journal of Alloys and Compounds 710 (2017) 452- 459.
55. Stojadinovic, S., et al. "Characterization of the plasma electrolytic oxidation of aluminium in sodium tungstate." Corrosion Science 52,10 (2010) 3258-3265.
56. Lee, Kang Min, Young Gun Ko, and Dong Hyuk Shin. "Incorporation of multi- walled carbon nanotubes into the oxide layer on a 7075 Al alloy coated by plasma electrolytic oxidation: Coating structure and corrosion properties." Current Applied Physics 11,4 (2011) S55-S59.
57. Yürektürk, Y. Al-6082 “Alaşımının Mikro Ark Oksidasyonunda Elektrolit Katkısı Olarak Karbon Nanotüpün Etkileri” Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Diss. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2013.

58. Tarakci, M., "Plasma electrolytic oxidation coating of synthetic Al–Mg binary alloys." Materials characterization 62,12 (2011) 1214-1221.
59. Lv, Guo-Hua, et al. "Effects of graphite additives in electrolytes on the microstructure and corrosion resistance of Alumina PEO coatings." Current Applied Physics 9,2 (2009) 324-328.
60. Xu, J. L., et al. "Microstructure, corrosion resistance and formation mechanism of alumina micro-arc oxidation coatings on sintered NdFeB permanent magnets." Surface and Coatings Technology 309 (2017) 621-627.
61. He, Shixiong, et al. "Ceramic oxide coating formed on beryllium by micro-arc oxidation." Corrosion Science 122 (2017) 108-117.
62. Durdu, S. and Metin U. "Characterization and mechanical properties of coatings on magnesium by micro arc oxidation." Applied Surface Science 261 (2012) 774-782.
63. Jiang, Haitao, Zhongcai Shao, and Benqin Jing. "Effect of electrolyte composition on photocatalytic activity and corrosion resistance of micro-arc oxidation coating on pure titanium." Procedia Earth and Planetary Science 2 (2011) 156-161.
64. Haghghat-Shishavan, Babak, et al. "Improving wear and corrosion properties of alumina coating on AA7075 aluminum by plasma electrolytic oxidation: Effects of graphite absorption." Applied Surface Science 481 (2019) 108-119.
65. Wang, Y. K., et al. "Effects of additives in electrolyte on characteristics of ceramic coatings formed by microarc oxidation." Surface Engineering 15,2 (1999) 109-111.
66. Fidan, S., "Mikro Ark Oksidasyon Yöntemiyle Zirkonyuma Biyo Uyumlu Ve Antibakteriyel Oksit Kaplanması." Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Diss. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye 2016.
67. Jie, Jin, Li Huan, and Li Xiaohan. "Friction and wear behavior of micro arc oxidation coatings on magnesium alloy at high temperature." Rare Metal Materials and Engineering 46,5 (2017) 1202-1206.
68. Tohumcu, S. "Plazma Elektrolitik Oksidasyon Yöntemiyle Alüminyum Alaşımlarının Kaplanması." Diss. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa, Türkiye, 2005.
69. Güleç, A.E., "Biyomalzeme olarak Mg-Sn-X (X=Mn, Ca) Alaşımlarının Üretilmesi, Mikro Ark Oksidasyon Yöntemi İle Kaplanması Ve Biyoçözünürlük Özelliklerinin Araştırılması ", Doktora Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, Türkiye 2019.

70. Akray, S.İ., "Küresel Grafitli Dökme Demirlere Uygulanan Yüzey İşlemlerinin Aşınma Direncine Etkisinin İncelenmesi." Diss. Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007.
71. Jin, Fanya, et al. "Improvement of surface porosity and properties of alumina films by incorporation of Fe micrograins in micro-arc oxidation." Applied Surface Science 253,2 (2006) 863-868.
72. Gao, Long J., and Shao Z.C., "The effects of graphite on ceramic coatings on LY12 aluminium alloys by micro-arc oxidation." Advanced Materials Research. Vol. 454. Trans Tech Publications, 2012.
73. Xue, Wenbin, et al. "Analysis of phase distribution for ceramic coatings formed by microarc oxidation on aluminum alloy." Journal of the American Ceramic Society 81,5 (1998) 1365-1368.
74. Polat, A., 2009. 2017A, 6061 ve 7039 Alüminyum Alaşımlarının Mikro Ark Oksidasyon Yüzey Kaplama Yöntemi İle Sert Seramik Kaplanması. Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 260s, Kocaeli.
75. Gunen, A., et al. "Friction and wear behaviour of borided aisi 304 stainless steel with nano particle and micro particle size of boriding agents." Journal of the Balkan Tribological Association 20,3 (2014) 362-379.
76. Mu, Ming, et al. "Preparation and tribological properties of self-lubricating TiO₂/graphite composite coating on Ti6Al4V alloy." Applied Surface Science 258,22 (2012) 8570-8576.
77. Amanov, Auezhan, and Shinya Sasaki. "A study on the tribological characteristics of duplex-treated Ti-6Al-4V alloy under oil-lubricated sliding conditions." Tribology International 64 (2013) 155-163.
78. Long, Marc, and H. J. Rack. "Titanium alloys in total joint replacement-a materials science perspective." Biomaterials 19,18 (1998) 1621-1639.

ÖZGEÇMİŞ

Ali Oktay GÜL, 1993 yılında Hatay'ın İskenderun ilçesinde doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini İskenderun'da tamamladı. 2012-2013 öğretim döneminde Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünü kazandı. 2016 yılında bu bölümden derece ile bitirerek Metalurji ve Malzeme Mühendisi ünvanı ile mezun oldu. Aynı yıl KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans öğrenimine başladı. İyi derecede İngilizce bilmektedir.

