

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ORCID : - - -

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :
ORCID : - - -

Trabzon

ÖNSÖZ

“Al 5052 Alaşımının Mikro Ark Oksidasyon Yöntemiyle Farklı Katkı Maddeleri İlave Edilerek Kaplanması ve Yüksek Sıcaklıkta Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programı’nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca hiçbir desteğini esirgemeyen, kıymetli bilgileri ve tecrübesiyle yolumu aydınlatan, çalışmalarım boyunca göstermiş olduğu sabır ve özverisiyle beni destekleyen saygı değer hocam Sayın Prof. Dr. Bülent ÖZTÜRK’e, bilgi ve birikimlerini benimle paylaşan, çalışmalarım sırasında büyük emeği geçen Sayın Doç. Dr. Ebru Emine ŞÜKÜROĞLU’na ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Süleyman ŞÜKÜROĞLU’na teşekkürlerimi sunarım.

Önerileri ve deneyimleriyle tezime büyük katkıları olan Sayın Dr. Zafer GÖLBAŞI’na teşekkür ederim. Ayrıca yapmış olduğum sürtünme ve aşınma deneylerindeki yardımları için Sayın Prof. Dr. Gençaga PÜRÇEK’e ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Yaşar SERT’e teşekkürlerimi iletirim.

Tüm eğitim hayatım boyunca desteklerini hiç esirgemeyen, her zaman yanımda olduklarını hissettiren, bu günlere gelebilmem için ellerinden gelen herşeyi hiç düşünmeden yapan, emeklerini boşa çıkarmamaya çalıştığım değerli annem Şaziye İPEK ve değerli babam Ekrem İPEK başta olmak üzere ağabeylerim Uğur İPEK’e ve Olgun İPEK’e teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her anında olduğu gibi tez çalışmamın da her anında yanımda olan, sıkıntılarımı ve mutluluğumu paylaştığım, her zaman bana destek olan, yol arkadaşım, kıymetli eşim Gamze İPEK ile yaşama kaynağım biricik evlatlarım Umut Eymen İPEK’e ve Emirhan İPEK’e sevgi, sabır ve desteklerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Faruk İPEK

Trabzon 2023

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Al 5052 Alaşımının Mikro Ark Oksidasyon Yöntemiyle Farklı Katkı Maddeleri İlave Edilerek Kaplanması ve Yüksek Sıcaklıkta Tribolojik Özelliklerinin 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.

09/11/2023

Faruk İPEK

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY.....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Alüminyum ve Alüminyum Alaşımlarının Genel Özellikleri	2
1.2.1. Alüminyum Alaşımları.....	3
1.2.2. 5XXX Serisi Alüminyum Alaşımları	4
1.3. Mikro Ark Oksidasyon	4
1.3.1. Mikro Ark Oksidasyon Yönteminin Tarihçesi.....	5
1.3.2. Mikro Ark Oksidasyon Prosesi ve Düzenneği	5
1.3.3. Mikro Ark Oksidasyon Yönteminde Akım-Voltaj Karakteristikleri	8
1.3.4. Mikro Ark Oksidasyon Yönteminde Deşarj Oluşumu	9
1.3.5. Mikro Ark Oksidasyon Yönteminde Elektrolit Etkisi.....	10
1.3.6. Mikro Ark Oksidasyon Kaplamaların Özellikleri	12
1.3.7. Mikro Ark Oksidasyon Yönteminin Uygulama Alanları	12
1.3.8. Mikro Ark Oksidasyon Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları	13
1.4. Alüminyum Alaşımlarının Mikro Ark Oksidasyonu	14
1.5. Mikro Ark Oksidasyon Yönteminde Kullanılan Katkılar.....	15
1.5.1. Grafit	15
1.5.2. Hegzagonal Bor Nitrür	16
1.5.3. Çinko Oksit.....	17
1.6. Sürtünme	18
1.7. Aşınma	20

1.7.1. Aşınma Türleri	21
1.8. Literatür Özeti.....	25
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	31
2.1. Numune Hazırlama	31
2.2. Mikro Ark Oksidasyon İşlemi	31
2.3. Karakterizasyon İşlemleri	33
2.3.1. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü	33
2.3.2. Kaplama Kalınlığı Ölçümü	34
2.3.3. XRD Analizleri.....	35
2.3.4. SEM Analizleri.....	35
2.3.5. Mikro Sertlik Deneyleri.....	35
2.3.6. Tribolojik Deneyler	36
3. BULGULAR VE İRDELEME.....	40
3.1. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm sonuçları	40
3.2. Kaplama Kalınlığı Ölçüm Sonuçları.....	41
3.3. XRD Analizi Sonuçları.....	44
3.4. SEM Analizi Sonuçları	45
3.5. Mikro Sertlik Deney Sonuçları	54
3.6. Tribolojik Deney Sonuçları.....	55
4. SONUÇLAR.....	77
5. ÖNERİLER	79
6. KAYNAKLAR.....	80
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

Al 5052 ALAŞIMININ MİKRO ARK OKSİDASYON YÖNTEMİYLE FARKLI KATKI MADDELERİ İLAVE EDİLEREK KAPLANMASI VE YÜKSEK SICAKLIKTAKİ TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Faruk İPEK

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Bülent ÖZTÜRK
2023, 85 Sayfa

Bu çalışmada, Al 5052 alaşımın yüzeyine mikro ark oksidasyon yöntemi ile kaplama işlemi uygulanmıştır. Alkali elektrolit başta olmak üzere mevcut elektrolit içerisine grafit, hegzagonal bor nitrür, çinko oksit partikülleri katılarak dört farklı elektrolit çözeltisi hazırlanmıştır. Kaplama sonrası numunelerin yüzey özellikleri ve yüksek sıcaklıklardaki tribolojik davranışları incelenmiştir.

Numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri kaplama sonrası artmış olup, en düşük grafit katkılı numunede 8,82 μm olarak elde edilmiştir. Kaplama kalınlık değerleri farklı elektrolit türleri ile değişiklik göstermiş olup en yüksek 230,1 μm olarak çinko oksit katkılı numunede, en düşük ise 118,5 μm olarak grafit katkılı numunede bulunmuştur. Numunelerin XRD analizlerinden, yapılarında Al, $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$, grafit, h-BN ve ZnO fazları tespit edilmiştir. Ortalama por boyutu ve por sayısı en az grafit katkılı numunede görülmüştür. Oda sıcaklığı (25 °C) ve yüksek sıcaklıklarda (90, 150 ve 250 °C) yapılan sürtünme ve aşınma deneylerinde numunelerin ortalama sürtünme katsayıları artan sıcaklıkla azalmış, özgül aşınma oranları ise artmıştır. Tüm sıcaklıklarda en düşük sürtünme katsayısı ve aşınma oranı grafit katkılı numunede meydana gelmiş olup, bu değerlerin sırasıyla 0,25 - 0,35 ve $1,495 \times 10^{-2}$ - $2,185 \times 10^{-2}$ $\text{mm}^3/(\text{N.m})$ aralıklarında olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Mikro ark oksidasyon, Al 5052, Grafit, h-BN, ZnO, Aşınma

Master Thesis

SUMMARY

COATING OF Al 5052 ALLOY BY ADDING DIFFERENT ADDITIVES BY MICRO ARC OXIDATION METHOD AND INVESTIGATION OF TRIBOLOGICAL PROPERTIES AT HIGH TEMPERATURE

Faruk İPEK

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Metallurgical and Materials Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Bülent ÖZTÜRK
2023, 85 Pages

In this study, coating process was applied to the surface of Al 5052 alloy by micro arc oxidation method. Four different electrolyte solutions were prepared by adding graphite, hexagonal boron nitride, zinc oxide particles to the existing electrolyte, especially the alkaline electrolyte. The surface properties of the samples after coating and their tribological behavior at high temperatures were studied.

The surface roughness values of the samples increased after coating and were obtained as 8,82 μm in the lowest graphite doped sample. The coating thickness values varied with different electrolyte types and the highest was found in the zinc oxide doped sample as 230,1 μm and the lowest was found in the graphite doped sample as 118,5 μm . From the XRD analysis of the samples Al, $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ and $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ phases were detected in addition to the existing contributions in the structure. The average por size and por number were observed in the least graphite-doped sample. In friction and wear experiments conducted at room temperature (25 °C) and high temperatures (90, 150 and 250 °C), the average friction coefficients of the samples decreased with increasing temperature, and the specific wear rates increased. The lowest coefficient of friction and wear rate at all temperatures occurred in the graphite doped sample, these values were determined in the ranges of 0,25-0,35 and $1,495 \times 10^{-2}$ - $2,185 \times 10^{-2}$ $\text{mm}^3/(\text{N.m})$ respectively.

Key Words: Micro arc oxidation, Al 5052, Graphite, h-BN, ZnO, Wear

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Mikro ark oksidasyon düzeneğinin şematik gösterimi.....	6
Şekil 2. Mikro ark oksidasyon işleminin adımları (Snizhko vd., 2004).	7
Şekil 3. Elektroliz prosesi (Demirci, 2014).	8
Şekil 4. MAO prosesinde gözlenen akım-voltaj eğrileri (Yerokhin vd., 1999).	8
Şekil 5. Deşarj kanallarının oluşum modelleri (Guidong & Jiong, 2007).	10
Şekil 6. Farklı elektrolitlerde alüminyumun $I=f(U)$ fonksiyonu (Yerokhin vd., 1999)..	11
Şekil 7. Kesit mikroyapı görünümü (Polat, 2009).	12
Şekil 8. Al numune üzerinde oksit tabaka oluşumu (Peterhouse, 2005).	14
Şekil 9. Grafitin kimyasal yapısı	16
Şekil 10. Hegzagonal bor nitrürün kristal yapısı	17
Şekil 11. Çinko oksitin kristal yapısı	18
Şekil 12. Sürtünme direncinin tanımlanmasında kullanılan fiziksel model	19
Şekil 13. Aşınmayı meydana getiren unsurlar (Karl-Heinz vd., 1987).	21
Şekil 14. İki cisimli abrazyon aşınması	22
Şekil 15. Üç cisimli abrazyon aşınması	22
Şekil 16. Adhezif aşınmanın oluşumu	23
Şekil 17. Yorulma aşınması (Yıldız & Gür, 2006).	24
Şekil 18. Korozyon aşınması (Bağcı, 2010).	24
Şekil 19. Erozyon aşınması (Arslan vd., 2009).	25
Şekil 20. MAO kaplama ünitesi	32
Şekil 21. Yüzey pürüzlülüğü ölçer test cihazı	34
Şekil 22. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)	34
Şekil 23. X ışını difraktometre (XRD) cihazı	35
Şekil 24. Mikro Sertlik Ölçüm Cihazı	36
Şekil 25. Ball-on-disc sürtünme ve aşınma test cihazı	36
Şekil 26. Aşınma iz genişliği ve derinliğinin şematik gösterimi	38
Şekil 27. 3D Yüzey profilometre cihazı	39
Şekil 28. NAC, GAC, BAC ve ZAC numunelerin kaplama kalınlığı değerleri	41
Şekil 29. NAC kodlu numunenin kaplama kalınlığı	42

Şekil 30.	GAC kodlu numunenin kaplama kalınlığı.....	42
Şekil 31.	BAC kodlu numunenin kaplama kalınlığı.....	43
Şekil 32.	ZAC kodlu numunenin kaplama kalınlığı.....	43
Şekil 33.	(a) NAC, (b) GAC, (c) BAC ve (d) ZAC kodlu numunelerin XRD paterni	44
Şekil 34.	NAC kodlu numunenin SEM görüntüsü	46
Şekil 35.	GAC kodlu numunenin SEM görüntüsü	46
Şekil 36.	BAC kodlu numunenin SEM görüntüsü	47
Şekil 37.	ZAC kodlu numunenin SEM görüntüsü.....	47
Şekil 38.	NAC kodlu numunede oluşan mikro çatlakların SEM görüntüsü.....	48
Şekil 39.	GAC kodlu numunede oluşan mikro çatlakların SEM görüntüsü.....	49
Şekil 40.	BAC kodlu numunede oluşan mikro çatlakların SEM görüntüsü.....	49
Şekil 41.	ZAC kodlu numunede oluşan mikro çatlakların SEM görüntüsü	50
Şekil 42.	NAC, GAC, BAC, ZAC kodlu numunelerin ortalama gözenek boyutu	51
Şekil 43.	NAC kodlu numunede meydana gelen por boyutlarının SEM görüntüsü.....	52
Şekil 44.	GAC kodlu numunede meydana gelen por boyutlarının SEM görüntüsü.....	52
Şekil 45.	BAC kodlu numunede meydana gelen por boyutlarının SEM görüntüsü.....	53
Şekil 46.	ZAC kodlu numunede meydana gelen por boyutlarının SEM görüntüsü	53
Şekil 47.	Numunelerin mikro sertliklerinin sıcaklıkla değişimi.....	54
Şekil 48.	Numunenin iz derinliği ve genişliğin ölçüldüğü kısımlar	55
Şekil 49.	D ₁ bölgesinin aşınma iz genişliği ve derinliği.....	56
Şekil 50.	D ₂ bölgesinin aşınma iz genişliği ve derinliği.....	56
Şekil 51.	D ₃ bölgesinin aşınma iz genişliği ve derinliği.....	57
Şekil 52.	D ₄ bölgesinin aşınma iz genişliği ve derinliği.....	57
Şekil 53.	Numunelerin 25 °C'deki iz derinliği ve genişliği değişimi	58
Şekil 54.	Numunelerin 25 °C'deki sürtünme katsayısının kayma mesafesi ile değişimi. 60	
Şekil 55.	Numunelerin 90 °C'deki sürtünme katsayısının kayma mesafesi ile değişimi. 61	
Şekil 56.	Numunelerin 150 °C'deki sürtünme katsayısının kayma mesafesi ile değişimi 62	
Şekil 57.	Numunelerin 250 °C'deki sürtünme katsayısının kayma mesafesi ile değişimi 63	
Şekil 58.	Numunelerin ortalama sürtünme katsayılarının sıcaklıkla değişimi	64
Şekil 59.	Numunelerin farklı sıcaklıklardaki aşınma oranları.....	67
Şekil 60.	25 °C'de numunelerin aşınma izleri a) NAC b) GAC c) BAC d) ZAC	68
Şekil 61.	90 °C'de numunelerin aşınma izleri a) NAC b) GAC c) BAC d) ZAC	70

Şekil 62. 150 °C’de numunelerin aşınma izleri a) NAC b) GAC c) BAC d) ZAC 72

Şekil 63. 250 °C’de numunelerin aşınma izleri a) NAC b) GAC c) BAC d) ZAC 74



TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Alüminyumun bazı fiziksel ve mekanik özellikleri	2
Tablo 2. Alüminyum dövme alaşımlarının sınıflandırılması.....	3
Tablo 3. Al 5052 alaşımın kimyasal bileşimi (% ağırlık).....	31
Tablo 4. MAO’da kullanılan parametreler	32
Tablo 5. MAO yönteminde kullanılan elektrolitik çözeltiler ve oranları	33
Tablo 6. Aşınma deneyinde kullanılan parametreler	37
Tablo 7. NAC, GAC, BAC ve ZAG kodlu numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri	40
Tablo 8. NAC kodlu numunenin farklı sıcaklıklardaki aşınma iz hacim değerleri	65
Tablo 9. GAC kodlu numunenin farklı sıcaklıklardaki aşınma iz hacim değerleri	65
Tablo 10. BAC kodlu numunenin farklı sıcaklıklardaki aşınma iz hacim değerleri	65
Tablo 11. ZAC kodlu numunenin farklı sıcaklıklardaki aşınma iz hacim değerleri	66

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

μm	:Mikrometre
cm^3	:Santimetre Küp
mm	:Milimetre
$^{\circ}\text{C}$	:Santigrat Derece
A	:Amper
Al_2O_3	:Alüminyum oksit
h-BN	:Hegzagonal bor nitrür
kw	:Kilowatt
MAO	:Mikro Ark Oksidasyon
Mg	:Magnezyum
N	:Newton
SEM	:Taramalı elektron mikroskobu
T	:Sıcaklık
XRD	:X-ışınları difraktometresi
V	:Volt
ZnO	:Çinko oksit

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Alüminyum ve alüminyum alaşımları özgül mukavemetleri, düşük yoğunlukları ve sergiledikleri birçok özellikleri nedeniyle çok geniş kullanım alanına sahiptir. Alüminyumun yerkabuğunda en çok bulunan elementlerden birisi olması, onu en ilgi çekici malzemelerden birisi haline getirmiştir. Günümüzde endüstrilerde kullanılan havacılık, otomobil, yüksek hızlı tren vb. endüstriyel alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının yumuşak olması, düşük aşınma direnci ve yüksek sürtünme katsayısı gibi özellikleri tribolojik uygulamalarını sınırlı hale getirir (Zhu & Zhou, 2007). Alüminyum yüzeyine uygulanan çeşitli yüzey işlemleri ile bu dezavantajları azaltmak veya ortadan kaldırmak mümkündür.

Genel olarak kullanılan kaplama işlemlerinden bazıları; PVD, CVD, fiziksel buhar biriktirme, kimyasal buhar biriktirme, mikro ark oksidasyon (MAO), sol-gel, termal sprey yöntemleridir. Bu yöntemlerden plazma elektrolitik oksidasyon (PEO) yöntemi olarak da bilinen mikro ark oksidasyon (MAO) kaplama yöntemi son yıllarda alüminyum ve alaşımlarının yüzey problemlerinin iyileştirilmesinde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. MAO kaplama yönteminin özellikle çevre dostu ve ekonomik olmasının yanı sıra kaplamanın adhesif özelliğinin oldukça iyi olması ve kaplama bileşimlerinin değiştirilebilir olması Mg, Al, Ti içeren metaller için en önemli kaplama tekniklerinden birisi haline gelmiştir (Huang & Han, 2004).

Elektrokimyasal kaplama yöntemi olarak bilinen MAO, elektrolit içine daldırılan ve güç devresine anot olarak bağlanan numuneye yüksek voltajlar verilerek numune yüzeyinde oksit tabakası oluşturması prensibine dayanır. MAO kaplama tekniği ile hafif metaller üzerinde meydana gelen oksit tabakaların kalın, sert ve pürüzlü olmasının yanı sıra altlık malzeme ile son derece kuvvetli bağ yaparak aşınmaya karşı dirençli olabilme kabiliyetine sahiptir.

MAO işleminde kullanılan temel silikat esaslı elektrolitler malzemeye istenilen düzeyde mekanik ve tribolojik özellikler kazandırmada yetersiz kalmaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalara bakılarak elektrolit çözelti içerisine katkı maddeleri katılarak istenilen düzeyde mekanik ve tribolojik özellikler elde etmenin mümkün olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada elektrolit çözelti içerisine farklı katkıları ilave edilerek Al 5052 alaşımı üzerinde MAO yöntemi ile oksit tabakası oluşturulduktan sonra yüksek sıcaklıklarda tribolojik özellikleri incelenmiştir.

1.2. Alüminyum ve Alüminyum Alaşımlarının Genel Özellikleri

Alüminyum elementi yer kabuğunda %8,07 oranında bulunmaktadır ve demir metaline göre oldukça yumuşak ve hafiftir. Yer kabuğunda alüminyum elementinden daha fazla bulunan sadece oksijen ve silisyumun olduğu bilinmektedir (Jacobs, 1999).

Hafif metaller grubunda bulunan alüminyum, teknik alanda oldukça fazla kullanılan bir metaldir. Alüminyum ve magnezyum hafif metaller arasında en yaygın kullanılan metallerdir. Alüminyumun $2,7 \text{ g/cm}^3$ değerindeki özgül ağırlığı, çelikle kıyaslandığında yaklaşık üçte biridir ($7,83 \text{ g/cm}^3$). Alüminyumun düşük özgül ağırlığı ile birlikte yüksek dayanımı birleştiğinde, bazı alüminyum alaşımlarının kullanımı uzay ve hava araçlarında oldukça büyük avantaj haline gelmektedir (Shi-Gang & Li-Xin, 2006).

Tablo 1. Alüminyumun bazı fiziksel ve mekanik özellikleri

Akma Dayanımı (MPa)	10-30
Çekme Dayanımı (MPa)	40-80
Elastiklik Modülü (GPa)	71
Ergime Noktası (°C)	660
Yoğunluk (g/cm^3)	2,7
Kopma Uzaması (%)	30-38
Kristal Yapısı	Yüzey merkezli kübik
Yeniden Kristalleşme Sıcaklığı (°C)	250-300

Alüminyum, oldukça iyi elektrik iletkenliği ve ısı iletkenliğine sahipken, bazı alaşımları ise yüksek elektrik direncine sahiptir. Alüminyumun elektrik iletkenliğinin, bakırın yaklaşık iki katı olması alüminyumun tercih sebepleri arasındadır (Davis, 2001).

Alüminyumun oksijene karşı olan duyarlılığının yüksek olması, metalin havayla temas etmesinden dolayı ince ve oldukça yoğun bir oksit tabakası (Al_2O_3) oluşmaktadır.

Meydana gelen bu tabaka alüminyumun korozyon direncini artırır. Alüminyumun bu özelliği neticesinde farklı korozif alanlarda kullanılabilir. Fakat bazı asit, baz ve tuz çözeltileri bu oluşturulan oksit tabakayı olumsuz olarak etkilemektedir (Nie & Matthews, 2000).

1.2.1. Alüminyum Alaşımları

Alüminyum alaşımları, üretim yöntemlerine göre döküm alaşımları ve dövme alaşımları olarak üzere iki gruba ayrılır. Dövme alüminyum alaşımları, Alüminyum Birliği'nin gruplandırmasına göre dört rakamlı sembollerle adlandırılır. Alaşımdaki ana elementi ilk rakam gösterirken, farklı oranda bulunan bileşen sayısını ise ikinci rakam gösterir. Dolayısıyla ikinci rakamının sıfır olması, o serinin orijinal alaşımını göstermektedir. Üçüncü ve dördüncü rakam ise 1XXX serisinin dışındaki alaşımlarda herhangi bir öneme sahip olmayıp, sadece söz konusu alaşımı diğer alaşımlardan ayırabilmek için gösterilmektedir (Shi-Gang & Li-Xin, 2006).

Tablo 2. Alüminyum dövme alaşımlarının sınıflandırılması

Simge	Ana alaşım elementi
1XXX	En az %99 Alüminyum
2XXX	Bakır (Cu)
3XXX	Mangan (Mn)
4XXX	Silisyum (Si)
5XXX	Magnezyum (Mg)
6XXX	Magnezyum (Mg) ve Silisyum (Si)
7XXX	Çinko (Zn)
8XXX	Diğer Elementler
9XXX	Yaygın Olarak Kullanılmayan Seriler

1.2.2. 5XXX Serisi Alüminyum Alaşımları

Ana alaşım elementi Mg olan 5XXX serisi Al alaşımlarında, magnezyum oranı arttıkça sertlik ve mukavemet değerleri artmakta ayrıca süneklik değeri azalmaktadır. Bu serideki alaşımlar yüksek çekme dayanımı, sertlik, yüksek korozyon direnci ve iyi kaynak edilebilme gibi oldukça önemli özelliklere sahiptirler (Çetin, 2005).

1.3. Mikro Ark Oksidasyon

Son yıllarda Al, Mg, Ti ve Zr gibi hafif metaller, enerji tasarrufundan dolayı otomotiv ve havacılık sektörlerinde oldukça önem arz etmektedir. Bu sebep, hafif metallerin birçok sektördeki kullanım talebinin artmasında etkili olmaya yeterlidir. Ancak bu metallerin aşınma dirençleri oldukça düşüktür. Alüminyum, çelikten sonra en fazla tercih edilen metal olmasına rağmen, düşük akma mukavemeti, düşük aşınma direnci, düşük yüzey sertliği ve korozyona karşı olan hassasiyeti bir çok alanda kullanımını olumsuz olarak etkilemektedir. Zaman kaybı ve maliyet olarak büyük zararlara sebebiyet veren bu durumu ortadan kaldırmak için bazı yüzey modifikasyon işlemleri uygulanmaktadır. Alüminyum alaşımlarına, yüksek mukavemet gereksinimi olan alanlarda yüzey sertliği kazandırmak için sert anodizasyon, termal sprey, PVD gibi teknikler uygulanır. Fakat Al alaşımları, uygulanan bu tekniklerle mekanik yüklemeler altında istenilen performansı verememektedir (Nie vd., 1999)

Mikro ark oksidasyon (MAO) yöntemi elektrokimyasal bir işlem olup, numunenin elektrolitik çözelti içerisine batırıldığı ve güç kaynağına anot olarak bağlanmış numuneye negatif voltaj, katoda ise pozitif voltaj verilerek numune yüzeyinin oksit kaplanması olarak bilinmektedir. MAO tekniği ile hızlı ve oldukça etkili yüzey özellikleri elde edilerek hafif metallerin daha fazla yüklemelerde çalışmasına imkan tanınmaktadır. Bu yöntem sayesinde hafif metallerin kısıtlanmış olan birçok alanlardaki kullanımı aktif hale gelmektedir.

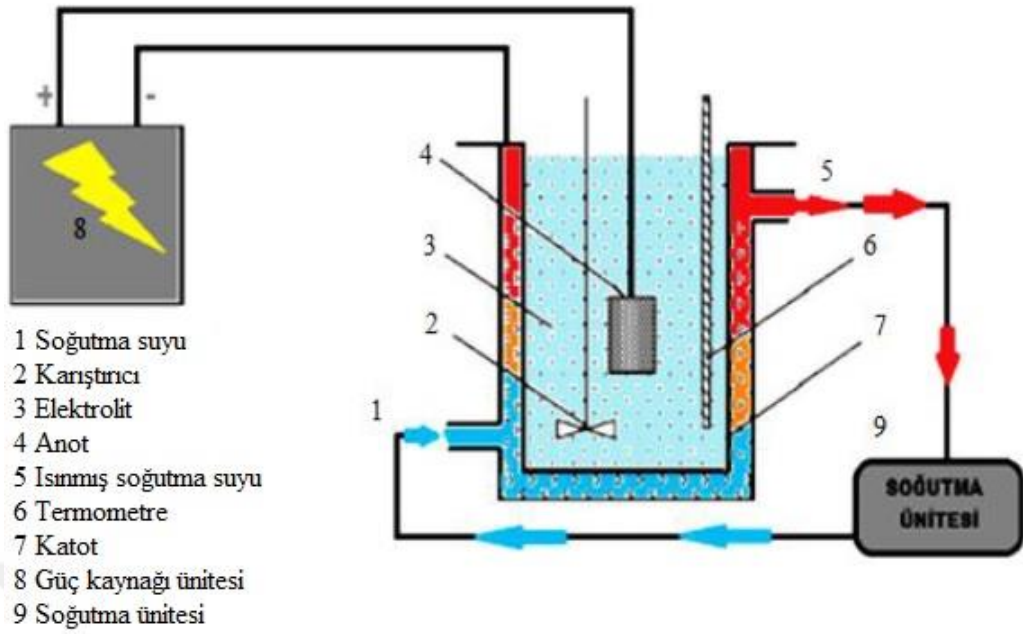
MAO tekniği, basit ve toksik etkileri olmadığından dolayı oldukça ön plana çıkmaktadır. Ayrıca her şekilde parçaya kolaylıkla uygulanabilmektedir. Bu yöntemle hafif yapısal metaller üzerinde oluşturulan kaplamalar, mükemmel aşınma ve korozyon özellikleri taşımaktadırlar.

1.3.1. Mikro Ark Oksidasyon Yönteminin Tarihçesi

MAO işlemi, ilk olarak yaklaşık 40 yıl önce Sovyetler Birliği'nde, akademik uygulamalarda kullanılmış ve daha sonraki yıllarda ise askeri alanlarda denizaltı parçalarının üretimi için kullanılmıştır. Amerika'da 1970'li yıllarda ve sonraki yıllarda ise tüm dünyaya yayılan MAO kaplama yöntemi, günümüzde hala güncel ve yaygın çalışılan bir araştırma konusu olmaya devam etmektedir. MAO işlemini tanımlamak için literatürlerde bir çok farklı terimler bulunmaktadır (Yerokhin & Snizhko, 2003; Wang, 2006).

1.3.2. Mikro Ark Oksidasyon Prosesi ve Düzenegi

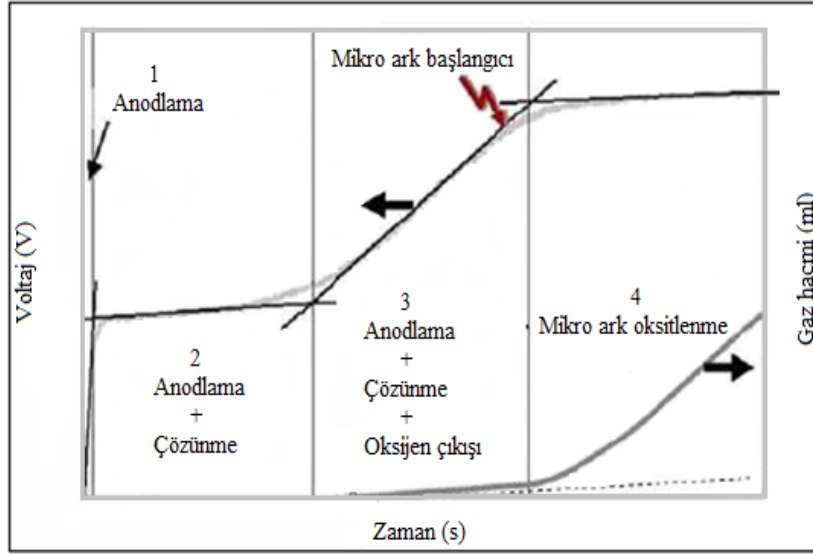
MAO yöntemi ile kaplama elde etmek için oluşturulan düzenek en basit haliyle anot, katot, güç kaynağı, elektrolitik çözelti ve soğutma sisteminden meydana gelmektedir. MAO düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 1'de verilmiştir. MAO tekniğinde, kaplanmış numune (hava ortamında) anot olarak kullanılmaktadır. Genellikle paslanmaz çelikten elde edilen elektrolit havuzu ise katot görevini üstlenmektedir. Elektrolitik çözeltinin homojen olması için karıştırıcılardan yararlanılmaktadır. MAO tekniğinde genel olarak bazik karaktere sahip elektrolitler kullanılmaktadır. Kaplama işlemi sırasında anot metalinin çevresinde yüksek sıcaklık meydana gelir ve bu sıcaklık elektrolit çözeltinin ısınmasına sebep olmaktadır. Bu durumun kaplama kalitesini olumsuz etkilememesi için soğutma sistemleri kullanılarak elektrolitik çözeltinin sıcaklığının işlem boyunca 10-60 °C aralığında tutulması sağlanmaktadır.



Şekil 1. Mikro ark oksidasyon düzeneğinin şematik gösterimi

MAO tekniği, elektrolit banyo içine daldırılmış olan anot numuneye negatif voltaj, katot numuneye ise pozitif voltaj verilerek anot numune yüzeyinde ark meydana getirilmesidir (Günyüz, 2007). Malzeme üzerinde oksit filmi oluşması, anot numuneye negatif voltajın uygulanması ile başlamaktadır. Uygulanan voltajın belirli bir kritik değeri aşması sonucunda malzeme yüzeyinde ark oluşur. Mikro boyuttaki bu ark oluşumunun gerçekleştiği voltaj değeri, bozunum voltajı olarak adlandırılmaktadır. Bozunum voltajına ulaşıldığında, numune yüzeyinde farklı yönlerde doğru hareket eden metal iyonları ile hidroksil iyonları oksit oluşumunu meydana getirirler (Sundararajan, & Rama, 2003)

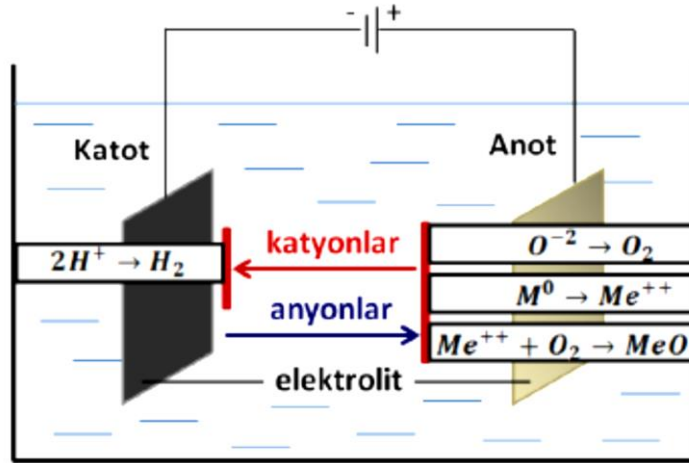
MAO yönteminin fiziksel ve kimyasal temelleri araştırılmış olup dört farklı basamakta meydana geldiği bulunmuştur.



Şekil 2. Mikro ark oksidasyon işleminin adımları (Snizhko vd., 2004)

MAO işlemi, elektrik gücünün kullanıldığı bir kaplama tekniğidir. Sisteme ilk voltaj uygulandığında, numune yüzeyinde nanometre düzeylerinde pasifize edilmiş bir oksit film oluşur. Ardından oldukça düşük bir anot potansiyeli uygulandığında, bu pasif film büyümeye başlar. Voltajın artması ile birlikte, kaplama kalınlığı da aynı oranda artar. Kaplamanın büyümesi iki yönlü bir mekanizma tarafından gerçekleştirilir. Sert oksit kaplamanın oluşmaya başlaması, kaplamanın mekanik özelliklerinin gelişmesini sağlar (Alcala, 2002).

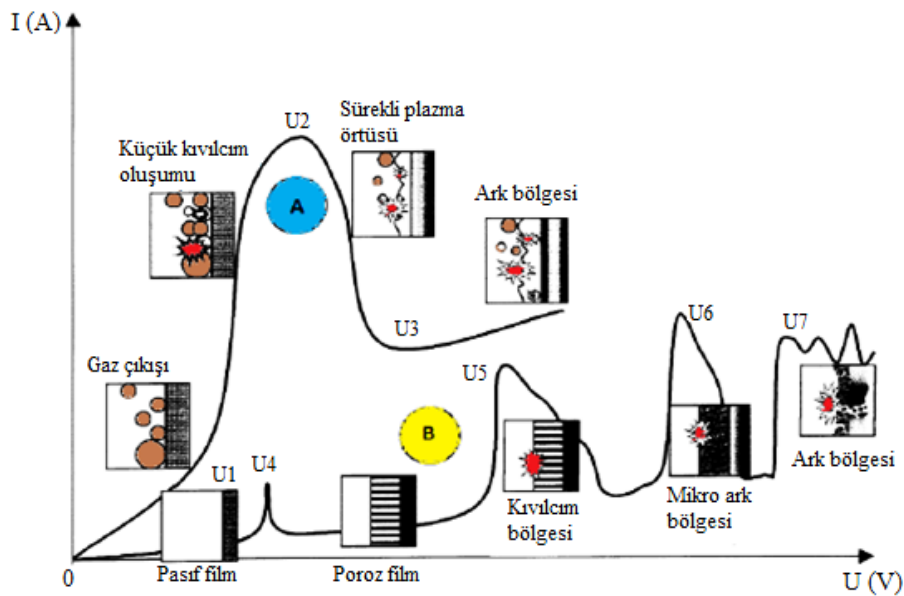
MAO tekniğinin oluşum mekanizması iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşama, elektrolitik çözelti içerisinde meydana gelen elektroliz olayıdır. Anodik iş parçası yüzeyinde elektriksel deşarjların oluşması için uygulanan potansiyel fark ise ikinci aşamayı oluşturur (Yerokhin vd., 1999). Şekil 3'de elektrolitik banyo içinde gerçekleşen reaksiyonlar gösterilmiştir.



Şekil 3. Elektroliz prosesi (Demirci, 2014)

1.3.3. Mikro Ark Oksidasyon Yönteminde Akım-Voltaj Karakteristikleri

MAO yönteminde genellikle A tipi ve B tipi olarak iki farklı akım-voltaj eğrisi oluşmaktadır. Bu eğriler, elektrokimyasal bir işlem sırasında meydana gelen reaksiyonların özelliklerini gösterir. Şekil 4’de A tipi ve B tipi akım-voltaj eğrileri verilmiştir. A tipi bir akım-voltaj eğrisi, genellikle anodik veya katodik yüzeyde gaz oluşumuyla ilişkilendirilen metal-elektrolit sisteminin gösterildiği bir eğridir. B tipi bir akım-voltaj eğrisinde ise oksit tabakanın oluşumu gösterilmektedir.



Şekil 4. MAO prosesinde gözlenen akım-voltaj eğrileri (Yerokhin vd., 1999)

Sisteme verilen düşük voltaj ($<U_1$), A ve B için elektrolit hücresinin akım-potansiyel karakteristiğini Ohm kanunlarına göre değiştirir. Dolayısıyla voltajdaki herhangi bir artış, A tipinde $0-U_1$ ve B tipinde $0-U_4$ alanlarında akımda aynı oranda bir yükselişe neden olur. Voltajda en küçük bir yükselişin meydana gelmesi kritik voltaj değerini aşmadığı sürece önemli bir farklılığa sebebiyet vermeyecektir.

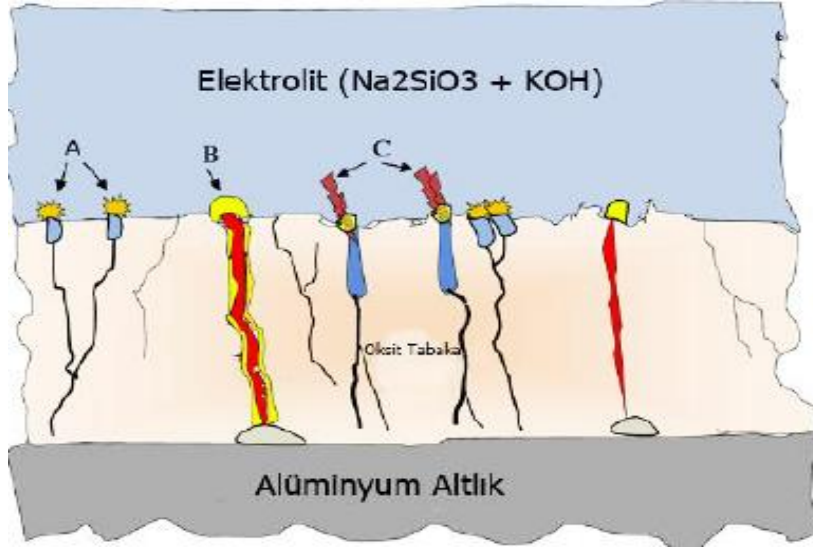
A tipi eğride, U_1-U_2 alanlarında oluşan potansiyel artış, akım değerinde dalgalanmalara neden olur. Bu akım artışı, O_2 ve H_2 gazlarının açığa çıkmasına yol açar. Akım U_2 'ye geldiğinde elektrot yüzeyi, düşük elektrik iletkenliğine sahip bir gaz buharı plazması tarafından kuşatılır. Elektrik alan kuvveti (E), iyonizasyonun başlaması için gerekli olan değere gelir ve iyonizasyon, karmaşık gaz kabarcıkları içinde ani kıvılcımlar halinde meydana gelir.

B tipi eğri durumunda, başlangıçta daha önce oluşturulmuş pasif film tabakası U_4 bölgesinde çözünme sürecine girer. Potansiyelin U_4-U_5 arasında daha da arttığında, pasifleşme yeniden meydana gelir ve oksit film büyümeye başlar. U_5 aşamasında, elektrik alan kuvveti kritik bir değere gelir ve meydana gelen film kırılır. Sonuç olarak, hızlı bir şekilde hareket eden küçük kıvılcımlar gözlemlenir ve böylece tabaka büyümeye devam eder. Akımın U_6 değerine ulaşmasıyla küçük kıvılcımlar giderek büyür. U_6-U_7 bölgesinde termal iyonlaşma, altlık malzemenin bozulmasına sebebiyet verir. U_7 aşamasında ise, oluşan arklar alt tabaka içine girer ve tahrip edici etkilere sebep verebilecek güçlü arklara dönüşür. MAO prosesi U_5 aşamasından daha yüksek voltaj değerlerinde gerçekleşmektedir (Yerokhin vd., 1999).

MAO tekniğinin ilk aşamalarındadeşarj kanalları homojen olarak dağılmış bir şekilde görülmektedir. Ancak kaplama kalınlığının artması iledeşarj kanal sayıları azalmakta ve boyutları büyümektedir. Bu nedenle de homojen yapı gözlenmemekle birlikte yüzey pürüzlülüğü artmaktadır (Yerokhin vd., 2003).

1.3.4. Mikro Ark Oksidasyon Yönteminde Deşarj Oluşumu

Yapılan çalışmalarda, kaplama büyüme mekanizmasını etkileyen üç farklıdeşarj türünden bahsedilmiştir. Bu üç farklıdeşarj türü Şekil 5'te şematik olarak gösterilmiştir.

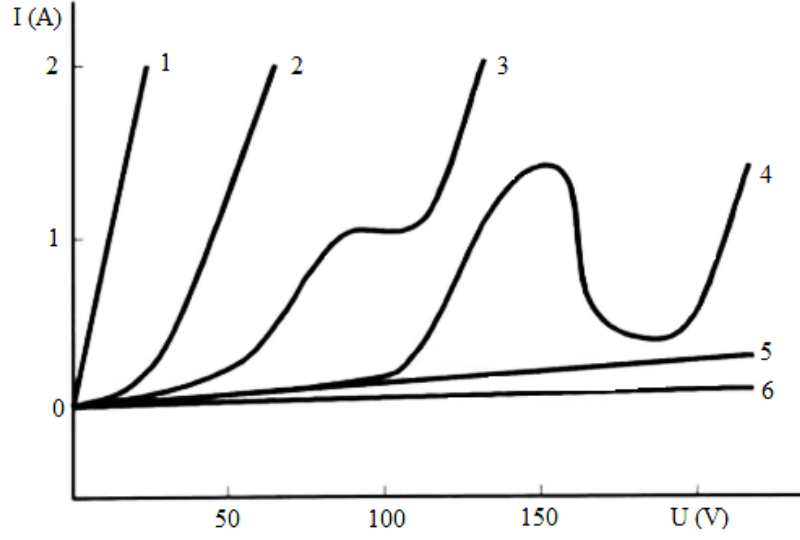


Şekil 5. Deşarj kanallarının oluşum modelleri (Guidong & Jiong, 2007)

Deşarj kanalları, yüksek elektriksel alanda oksit filmini bozarak oluşur. A ve C tipi deşarjlar, kaplama esnasında mikro gözenekler içinde meydana gelirken, B tipi deşarjlar ise yüksek elektrik alan şiddeti ile tüm kaplamayı bir dielektrik gibi bozar. Dolayısıyla B tipi deşarjlar kaplamanın içe doğru büyümesine neden olabilir. A tipi, yüzeye yakın küçük gözenekler içinde meydana gelen deşarj, C tipi ise yüzeye yakın olmayan gözeneklerde oluşan deşarj tipidir. B tipi deşarjlar metalin oksitini içe doğru büyütürken, A ve C tipi deşarjlar ise oluşan oksitleri dışarı doğru büyütülmektedir. (Hussein vd., 2010) (Hussein vd., 2013).

1.3.5. Mikro Ark Oksidasyon Yönteminde Elektrolit Etkisi

Numunelerin kullanıldığı elektrolitin bileşimi, istenen kaplamanın niteliklerine ve altlık olarak kullanılacak alaşımına uyumlu olarak hazırlanmalıdır. Elektrolit çözelti içindeki bileşenler, oksidasyonun oluşması için gerekli iletkenliği sağlama yeteneklerine sahip olmalıdır. Kaplama işleminde kullanılacak altlık ile elektrolitin uyumu, en önemli parametrelerden biridir. Al, Mg, Ti ve alaşımlarının MAO ile kaplanması esnasında kullanılan elektrolitlerin akım-voltaj eğrileri Şekil 6'da gruplara ayrılmıştır (Sundararajan & Rama, 2003).



Şekil 6. Farklı elektrolitlerde alüminyumun $I=f(U)$ fonksiyonu (Yerokhin vd., 1999)

Bu elektrolitler şu şekildedir:

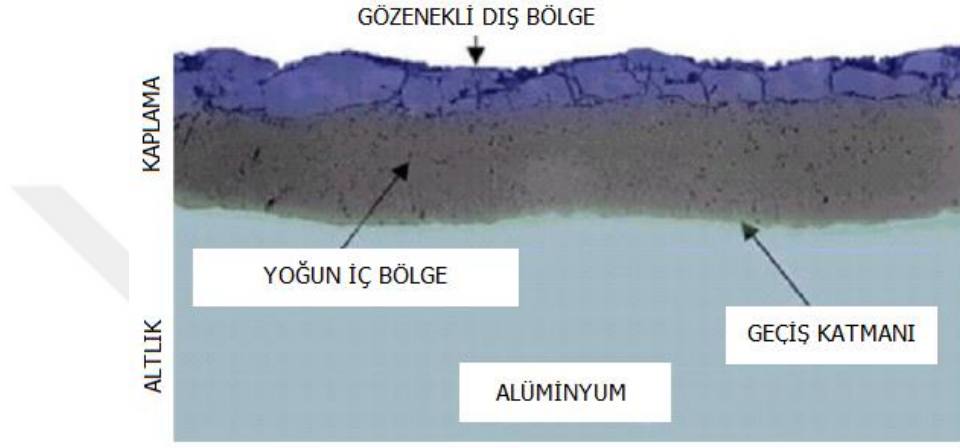
- 1- Metalin hızlı bir şekilde çözünmesi için tuz çözeltileri,
- 2- Metalin yavaş olarak çözünmesi için çözeltiler,
- 3- Metalin pasifleşmesi için çözeltiler,
- 4- Florid çözeltiler,
- 5- Metalin zayıf pasifleşmesi için çözeltiler,
- 6- Metalin güçlü pasifleşmesi için çözeltilerdir.

Bu gruplar içerisinde 4-6 numaralı çözeltiler, kaplama işlemi sırasında kritik bozunum voltajına kolay ulaşılmayı sağladıkları için, en kullanışlı elektrolitler arasındadırlar.

Elektrolit sıcaklığı, MAO tekniğinde oldukça önemli parametrelerden biridir. Yüksek voltaj ve akım değerlerinin kullanıldığı bu süreçte, elektrolit sıcaklığı bir soğutma ünitesi tarafından kontrol altında tutulur. Elektrolitin sıcak olması, aktif bileşenlerin daha hızlı etki etmesine neden olur ve bu da çözeltinin daha kısa sürede tükenmesine yol açabilir. Bu nedenle, çözelti sıcaklığının 10-60 °C arasında bir sıcaklıkta tutulması, soğutma sistemleri ile tercih edilir (Sundararajan & Rama, 2003).

1.3.6. Mikro Ark Oksidasyon Kaplamaların Özellikleri

MAO yöntemi ile elde edilen kaplamaların, farklı katmanlardan meydana geldiği gözlemlenmiştir. Genellikle kaplama, yüksek poroziteye sahip bir dış bölge ile daha az poroziteye sahip ve yoğun bir iç bölgeden meydana gelir. Altlık malzeme ile yoğun kaplama arasında oldukça ince bir tabaka vardır.



Şekil 7. Kesit mikroyapı görünümü (Polat, 2009)

MAO sonucu meydana gelen kaplamalar, altlıklarda mukavemet artışına neden olabilirler. Bu mukavemetteki artışı, altlık malzemesinin ve oksit tabakanın kalınlığına bağlıdır. Kaplama bölgesinden dış bölgeye doğru ilerledikçe kaplamanın sertliği artar ve bir noktada zirveye ulaştıktan sonra azalmaya başlar (Yerokhin vd., 1999).

1.3.7. Mikro Ark Oksidasyon Yönteminin Uygulama Alanları

MAO tekniği ile üretilen kaplamalar, otomotiv ve uzay endüstrileri başta olmak üzere, makine imalat sanayi, motor sanayi ve hidrolik sanayisi gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

Geleneksel anodik oksidasyon yöntemiyle kaplanması mümkün olmayan alaşımların bu yöntemle kaplanması mümkündür. MAO yöntemi ile üretilen seramik kaplamaların, boyalara karşı yüksek bir yapışma gücü sergilemesi, boya kullanılacak alanlardaki kullanımını yaygın hale getirmiştir. Bu kaplamaların sıcaklığa karşı dayanımının iyi olmasından dolayı uzay araçları ve roketler gibi uygulamalarda kullanılabilir. Elde edilen

kaplamaların iyi dielektrik özellikleri nedeniyle yalıtkan alanlarda da kullanılabilir (Günyüz, 2007).

Aşağıda MAO işlemi ile elde edilen kaplamaların, bu tür uygulamalarda kullanılmasını mümkün kılan özellikleri verilmiştir (Özkara, 2009).

- Mekanik uygulamalar: Oksit tabakasının sertliği 1300 kg/mm^2 'den fazladır. Gösterdikleri yüksek sertlik değerlerinde, bu kaplamaların kayma direnci, erozyon ve abrazyon aşınma dirençleri artar.
- Kimyasal uygulamalar: Orta derecede yüksek sıcaklıklara ve güçlü asitlere veya bazlara karşı oldukça direnç sağlarlar.
- Termal uygulamalar: MAO tekniği ile oluşturulan oksit tabakasının ısı iletimi, diğer metallerle kıyaslandığında oldukça düşüktür.
- Elektrik ve elektronik uygulamalar: Oksit tabakası, bu uygulama alanlarında yalıtkan bir film olarak kullanılır (Malayoğlu & Çakmak, 2008).

1.3.8. Mikro Ark Oksidasyon Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları

Yapılan çalışmalarda, MAO tekniğinin birçok üstünlük sağladığı ancak aynı zamanda bazı dezavantajlarının da olduğu tespit edilmiştir.

Bu teknikte numune hazırlama işlemi diğer tekniklerle kıyaslandığında daha az kritik avantaja sahiptir. MAO tekniğinin diğer bir avantajı bütün valf metalleri grubuna uygulanabilmesidir. Ayrıca, kaplanması güç olan alüminyum alaşımları bu yöntem ile $300 \text{ }\mu\text{m}$ kalınlık değerlerine kadar kaplanabilirler. MAO tekniği, diğer yöntemlerle kıyaslandığında çevreye daha duyarlı, toksik atıklar içermeyen bir kaplama yöntemi olarak hafif metallerin geleneksel yöntemlerle kaplanmasına alternatif sunar (Günyüz, 2007; Xin & Song, 2006).

MAO prosesinin önemli avantajları şöyledir:

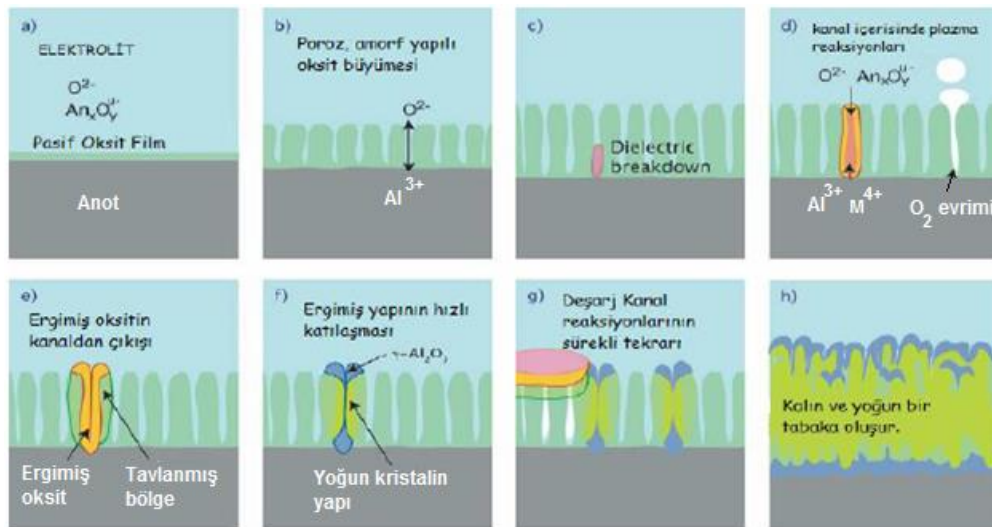
- Çevreye duyarlı ve ekonomik elektrolitler kullanılır.
- Dekoratif olarak kullanılabilir.
- Sertliği yüksek kaplamalar elde edilebilir.
- Sürtünme katsayısı düşük yüzeyler oluşturulabilir.
- Yüksek aşınma direncine sahip kaplamalar elde edilebilir.
- Çeşitli ortamlarda korozyona karşı üstün dayanıklılık gösterir.

Yukarıda verilen bu avantajlar, MAO'nun tercih edilme sebepleridir. Fakat bu tekniğin avantajlarının yanında dezavantajları da bulunmaktadır.

- MAO yöntemi için yüksek enerji elde edebilmek için bir güç kaynağı gereklidir ve bu durum üretim maliyetini önemli derecede artıracak bir etkidir. Ayrıca MAO sırasında meydana gelen yüksek enerji, tehlikeli ve dikkat edilmesi gereken önemli bir husustur.
- Proses esnasında çözeltide meydana gelen yüksek sıcaklık artışının azaltılması için soğutucuya ihtiyaç duyulmaktadır.
- MAO işlemi sonrasında meydana gelen kaplama, dış yüzeyde oldukça pürüzlü bir yapıya sahip olduğu için aşınma direnci çok düşüktür. Bununla birlikte, iç katmanlar oldukça serttir. Yüzeyindeki porozlu tabakanın kaldırılması için ekstra bir maliyete ihtiyaç duyulmaktadır (Günyüz, 2007).

1.4. Alüminyum Alaşımlarının Mikro Ark Oksidasyonu

MAO tekniği ile istenilen kalınlıkta oksit tabakası alüminyum alaşımları üzerinde oluşturulabilir. MAO işlemi sırasında altlık ile kaplama arasında meydana gelen bağlar zayıf değil, oldukça güçlüdür (Krishna, 2006).



Şekil 8. Al numune üzerinde oksit tabaka oluşumu (Peterhouse, 2005)

İlk aşamada, dielektrik stabilitenin kaybolması sonucu oluşan deşarj kanallarındaki sıcaklık ve basınç artmaktadır. Bu bölgelerde oluşan güçlü elektrik alan nedeniyle elektrolitten gelen iyonlar deşarj kanalına girer ve burada oksitlenir. Daha sonra, oksit katılaşır ve kaplama kalınlığı artar (Fanya & Honghui, 2006).

1.5. Mikro Ark Oksidasyon Yönteminde Kullanılan Katkılar

Mikro ark oksidasyon yönteminde elektrolit içerisine partikül katkıları ilave edilerek kaplama üzerinde farklı etkiler elde edilebilmektedir. Bu etkilerin en önemlilerinden biri por karakteristiği üzerinedir. Yapılan çalışmalar arasında partikül katkısının kaplama yüzey gözenekliliğini azalttığı yönündeki ifadeler mevcuttur.

Genel olarak, grafit, Al_2O_3 , TiO_2 , Cr_2O_3 , ZrO_2 , SiO_2 , B_4C , TiC , ZnO , h-BN, C partikülleri MAO yönteminde kullanılan elektrolitler içerisinde kullanılmaktadır.

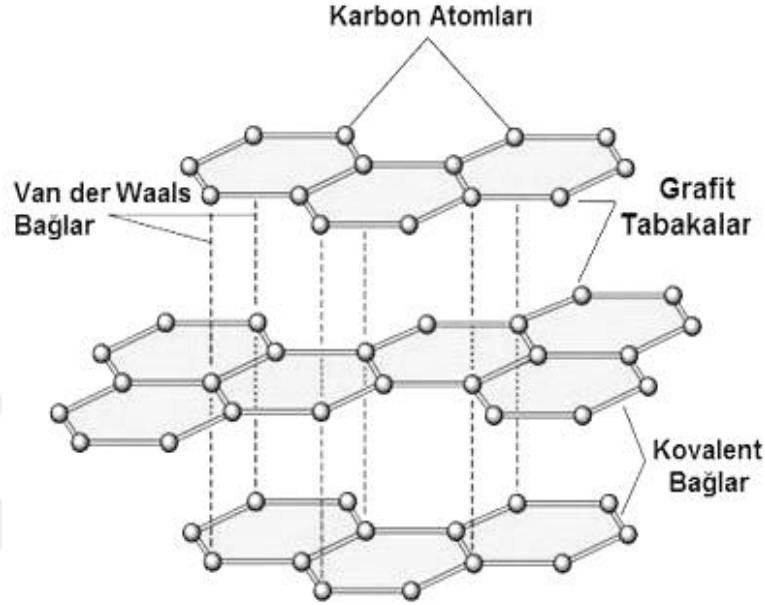
1.5.1. Grafit

Grafit, gri siyah arasında değişen tonlarda bir renge sahiptir. Normal hava ortamlarında $3500\text{ }^{\circ}C$ 'ye kadar yanmayan, oksijenli ortamda $600-670\text{ }^{\circ}C$ 'de yanan grafitin erime derecesi $3927\text{ }^{\circ}C$ 'dir. Grafit kimyasal bozulmaya karşı dayanıklılık gösterir ve kararlıdır. İyi bir yağlayıcı olmasının yanı sıra mükemmel ısı ve elektrik iletimine sahiptir (Çuhadaroglu & Kara, 2018).

Periyodik tablo içinde bulunan karbonun iki farklı allotropu vardır: elmas ve grafit. Grafit, elmas ile karşılaştırıldığında farklı özelliklere sahiptir. Hegzagonal kristal yapısına sahip grafit, karbon atomlarının geniş ve yassı levhalar halinde üst üste yığıldığı bir yapıya sahiptir. Bu levhalar arasındaki kayganlık, grafitin iyi bir yağlayıcı olma özelliğini gösterir. Grafitte karbon atomları düzlem içinde güçlü bağlar oluştururken, düzlemler arası bağlar daha zayıftır. Bu nedenle grafit kaygan bir davranış gösterir (Çuhadaroglu & Kara, 2018).

Grafit, sıcaklığının artması sonucu mekanik özelliklerinde iyileşme görülen tek maddedir. İki boyutlu düzlemde, karbon atomları arasında güçlü kovalent bağlar bulunurken, katmanlar arasında ise zayıf Van Der Waals bağları vardır. Elmas güçlü karbon-karbon bağlarına sahipken, grafit ise Sigma ve Pi bağları olmak üzere iki farklı bağ

türüne sahiptir. Bu nedenle elmas iyi bir aşındırıcıdır, ancak grafit tam aksine çok iyi bir yağlayıcı maddedir (Uysal, 2019).



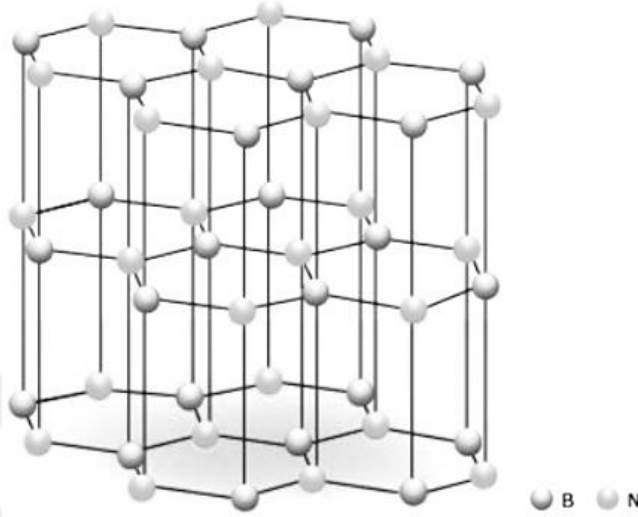
Şekil 9. Grafitin kimyasal yapısı

Grafit, birçok özelliğinden dolayı oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptir. Elektrik iletkenliğinin iyi olmasından dolayı motor fırçaları, elektrot, fren astarları, pil tozları vb. gibi alanlarda kullanılmaktadır. Grafit yağlayıcılık özelliğinden dolayı motor gömlekleri, deniz araçları, motor silindirleri, bilyeli yataklar vb. gibi alanlarda kullanılmaktadır. Ayrıca yumuşak olmasından dolayı kurşun kalem yapımında kullanılmaktadır. Grafitin refrakterlik özelliği döküm boyaları, potalar, yatay fırınlar, tuğlalar ve elektrot gibi alanlarda kullanımını tercih sebebi yapmaktadır. Herhangi bir yüzeye sürülen grafitin silinebilir olması nedeniyle sertliği farklı olan kurşun kalem üretiminde kullanılmaktadır (Cuhadaroğlu vd., 2018).

1.5.2. Hegzagonal Bor Nitrür

Hegzagonal bor nitrür (h-BN), genellikle beyaz grafit veya beyaz karbon olarak adlandırılır. Bu yapay bir malzemedir ve doğada doğal olarak bulunmaz. Hegzagonal bor nitrür bor ve azotun bir araya getirilmesiyle üretilir.

Şekil 10’da gösterilen hegzagonal bor nitrürün kristal yapısı gösterilmiştir. Hegzagonal bor nitrürün grafitten farkı ise beyaz rengi ve yüksek elektrik dirence sahip olmasıdır. Saf h-BN saydamdır, grafit ise siyahtır (Aydın, 2018).

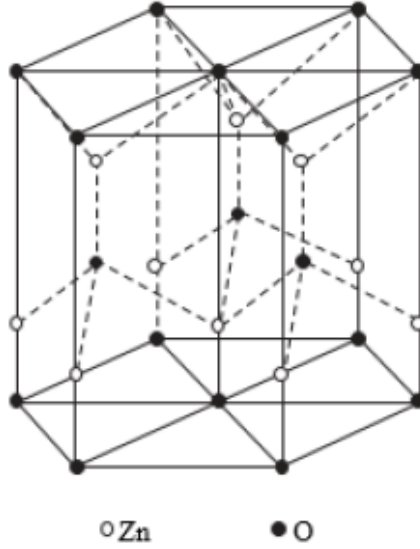


Şekil 10. Hegzagonal bor nitrürün kristal yapısı

Hegzagonal bor nitrür, günlük yaşamın ve sanayinin çeşitli sahalarına girmiş olup, kullanım alanları ve kapasitesi gün geçtikçe artmaktadır. Hegzagonal bor nitrür, yüksek sıcaklıklarda refrakter özellikler, yüksek termal şok direnci, yüksek ısı iletkenliği, elektriksel yalıtkanlık, kimyasal kararlılık, yağlayıcılık ve kolay işlenebilirliğe sahip bir malzeme olduğu için, metalurjide yüksek sıcaklığa dayanıklı uygulamalarda, yüksek sıcaklık kalıplarında yağlayıcı olarak ve elektrik-elektronik endüstrisinde yalıtkan malzeme olarak kullanılmaktadır (Aydın, 2018). Ayrıca uzay ve havacılık sanayi, makine sanayi, plastik sanayi, otomobil sanayi, seramik sanayi, kimya sanayi vb. gibi birçok alanlarda oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır.

1.5.3. Çinko Oksit

Çinko bileşikleri arasında çinko oksitin teknik ve ekonomik değeri oldukça fazla öneme sahiptir. Çinko oksit (ZnO) mükemmel optik, elektriksel ve mekanik özelliklerinin yanında yüksek miktarda elektron hareketliliğine sahiptir (Ong vd., 2018). Metal oksit olarak kabul edilen çinko oksit, beyaz toz formatlı, 1975°C’de erime ve 2360°C’de kaynama noktasına sahiptir. Şekil 11’de çinko oksitin kristal yapısı gösterilmiştir.



Şekil 11. Çinko oksit kristal yapısı

Her tetrahedral çinko atomu dört tane oksijen atomu ile çevrili ya da merkezde bulunan bir oksijen atomu dört tane çinko atomu ile komşu pozisyonda bulunmaktadır (Barros, 2006).

ZnO kauçuk, plastik, cam, çimento, merhem, boya, yapıştırıcı ve balatalar gibi birçok farklı kullanım alanlarına sahiptir. <https://www.askimya.com/urunler/cinko-oksit-46.html>. (2023 Temmuz 21).

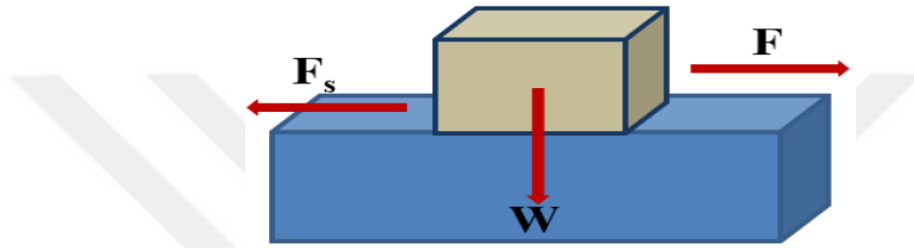
1.6. Sürtünme

Sürtünme, temas halinde ve birbirlerine göre bağıl hareket yapan elemanlar arasında harekete karşı meydana gelen direnç olarak tanımlanmaktadır. Sürtünme, doğrudan bir malzeme özelliği değil, en az iki gövdenin birbirleriyle temas ederek gerçekleştirdiği ve çevreleriyle etkileşime girdiği bir tribolojik olaydır. Kuru ve sıvı sürtünme olmak üzere iki ana türü vardır. Kuru koşullar altında temas esnasında kuru sürtünme meydana gelirken, yağlama koşulları altında temas sırasında sıvı sürtünme meydana gelmektedir (Ağdacı, 2019).

Sürtünme, hareketli mekanizmalarda meydana gelen enerji kaybının büyük bir bölümünü oluşturmaktadır. Örnek verilecek olursa Amerika Birleşik Devletleri'nde toplam yağ tüketiminin neredeyse %10'u sürtünmeyi azaltmak ve ortadan kaldırmak için kullanılmaktadır (Ceviz, 2021).

Birbiri üzerinde kayan yüzeylerde aşınmaya neden olan sürtünme oldukça önem arz etmektedir. Önceki yıllarda yapılan deneysel çalışmalarda katı cisimlerin sürtünmesiyle ilgili sürtünme kanunları ortaya konmuştur ve bu kanunlar 1985 yılında Coulomb tarafından kendi ismiyle formüle edilmiştir.

Bir cismi hareket ettirmek için gerekli olan kuvvet cismin hareketini sürdürmek için gerekli olan kuvvetten daima daha büyüktür (Ceviz, 2021). Sürtünme direncinin tanımlanmasında kullanılan fiziksel model Şekil 12’de gösterilmiştir.



Şekil 12. Sürtünme direncinin tanımlanmasında kullanılan fiziksel model

Sürtünme kuvveti ile sürtünme katsayısının birbirlerine eşit olduğu Denklem 1’de, sürtünme kuvveti ile sürtünme katsayısı arasındaki bağıntı ise Denklem 2’de gösterilmiştir.

$$F = F_s \quad (1)$$

$$F_s = \mu \times W \quad (2)$$

μ : Sürtünme katsayısı

F_s : Sürtünme kuvveti

W : Normal kuvvet

Kuru sürtünme tam anlamıyla yalnızca vakum şartlarında gerçekleşir. Sürtünmenin meydana geldiği çevre ve ortam sürtünmeyi son derece etkiler. Atmosferik ortamda birbiri üzerinde çalışan sürtünme yüzeyleri aşırı bir şekilde temiz olsalar bile yüzeyler üzerinde mikron seviyesinde oksit tabakası oluşur. Sürtünme yüzeyleri üzerinde oluşan bu oksit tabakası sürtünen yüzeylerin tribolojik özelliklerini büyük ölçüde etkilemektedir. Yabancı maddelerden tamamen arındırılmış sürtünme yüzeylerinin atmosferik şartlar altında oluşan sürtünme şekli ideal kuru sürtünme olarak kabul edilmektedir (Ceviz, 2021).

1.7. Aşınma

Günümüzde sanayilerde oldukça yaygın olarak kullanılan tribolojik sistemlerdeki sık karşılaşılan üç büyük problemten bir tanesi aşınmadır. Diğerleri ise yorulma ve korozyondur. Aşınma, her ne kadar teknik olsa da ekonomik bir problemdir. Yapılan araştırmalar gelişmiş sanayi ülkelerinin aşınma mekanizmalarından kaynaklanan malzeme kayıplarının yıllık mali değerinin çok fazla göstermektedir (Atamert, 1988).

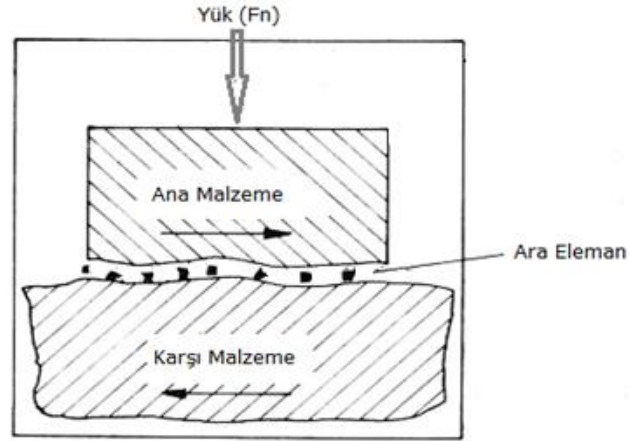
Aşınma, birbirleriyle temas halinde bulunan cisimlerin yüzeyleri arasında kimyasal, fiziksel ve mekanik olaylar sonucunda mikroskobik boyutta parçacıkların yüzeyinden kopup uzaklaşmasıyla oluşan istenmeyen malzeme kaybıdır. Aşınma, makine elemanlarının çalışma verimini ciddi anlamda olumsuz etkileyerek yüksek maliyetler meydana getirebilmektedir.

Malzeme yüzeyinde meydana gelen bozunum veya malzeme kaybının aşınma olarak tanımlanabilmesi için bir takım şartların sağlanması gerekmektedir (Gök, 2008).

Bunlar;

- Kimyasal, fiziksel ve mekanik bir etkinin varlığı,
- Sürtünme hali,
- Yavaş bir şekilde ve sürekli olması,
- Malzemelerin yüzeylerinde değişikliklere yol açması,
- İstemsizce ortaya çıkması.

Aşınmada beş temel parametre vardır. Bu parametreler; ana malzeme (aşınan), karşı malzeme (aşındıran), ara malzeme, hareket ve yük olarak sıralanabilir. Ayrıca sıcaklık da altıncı parametre olarak kabul edilebilir. Aşındıran ve aşınan malzemelerin bir araya geldiği durumda, bu bileşime aşınma çift denir. Aşınma çifti sert parçacıklar, sıvılar, gazlar ve buharlar gibi farklı ara malzemelerinin bir kombinasyonu ile meydana gelir. Bu kombinasyona da genellikle “aşınma kombinasyonu” adı verilir. Ayrıca, aşınma sonucunda oluşan parçacıklar da aktif bir şekilde aşınma olayına dahil olabilirler (Karabaşoğlu, 2008). Şekil 13’de aşınmayı meydana getiren unsurlar verilmiştir.



Şekil 13. Aşınmayı meydana getiren unsurlar (Karl-Heinz vd., 1987)

1.7.1. Aşınma Türleri

Aşınmayı meydana getiren unsurların birbirleriyle değişik etkileri, farklı aşınma türlerinin meydana gelmesine sebep olmaktadır. Aşınma, malzemenin türü, yağlayıcı tipi, sıcaklık, malzemenin şekli, yük ve sertlik gibi parametrelerden büyük ölçüde etkilenebilir. (Eyre, 1991). Aşağıda yaygın olarak kullanılan aşınma türleri verilmiştir.

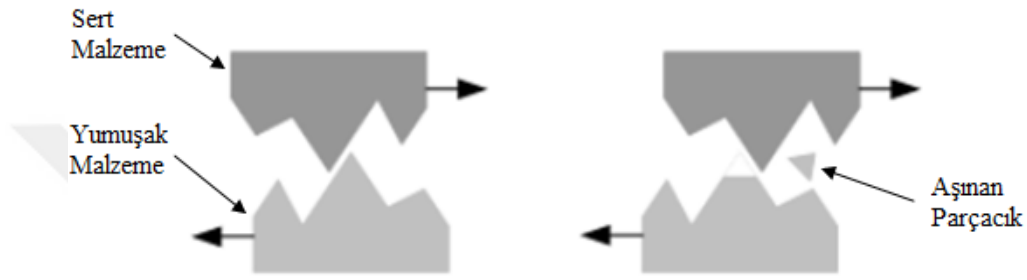
- Abrazyon Aşınması
- Adezyon Aşınması
- Yorulma Aşınması
- Korozyon Aşınması
- Erozyon Aşınması

a) Abrazyon Aşınması

Abrazif aşınma, sürtünen yüzeylerden sert olanın daha yumuşak olanı aşındırması sonucu oluşan malzeme kaybı olarak tanımlanabilir. Hareket halindeki bu iki katı yüzey arasına yerleşmiş sert parçacıklar tarafından ya da diğer yüzey boyunca belirli bir hız ile kayan karşı yüzeyde var olan sert çıkıntılar tarafından malzeme koparıldığı aşınma türüdür. Bu iki yüzey arasındaki sert parçacıklar sisteme dışarıdan girebileceği gibi sistemin içinde de oluşabilmektedirler. Aşınma sırasında kopan parçacıklar aktif biçimde aşınmaya katılırlar. Abrazif aşınmayı etkileyen temel faktörler sertlik, aşındırıcı, tane boyutu ve şekli, uygulanan yük ve kayma hızı şeklinde sıralanabilir (Karaoğlu, 2006). Abrazyon

aşınmasının önlenmesi için sürtünme yüzeyleri uygun tekniklerle sertleştirilmeli ve sürtünen yüzeyler arasına herhangi bir sert maddenin girmesi engellenmelidir.

Abrazif aşınma; iki cisimli abrazyon aşınma ve üç cisimli abrazyon aşınma olmak üzere iki farklı şekilde olduğu bilinmektedir. İki cisimli abrazyon aşınması, yüzeyi pürüzlü olan yüzeyin hareketi ile birlikte yumuşak yüzeyden malzemenin kazınması sonucu meydana gelen malzeme kaybı olarak tanımlanabilir. Üç cisimli abrazyon aşınmada, taneler sabit değildir ve yüzey üzerinde serbest olarak kayarlar (Stachowiak & Batchelor, 2011).



Şekil 14. İki cisimli abrazyon aşınması

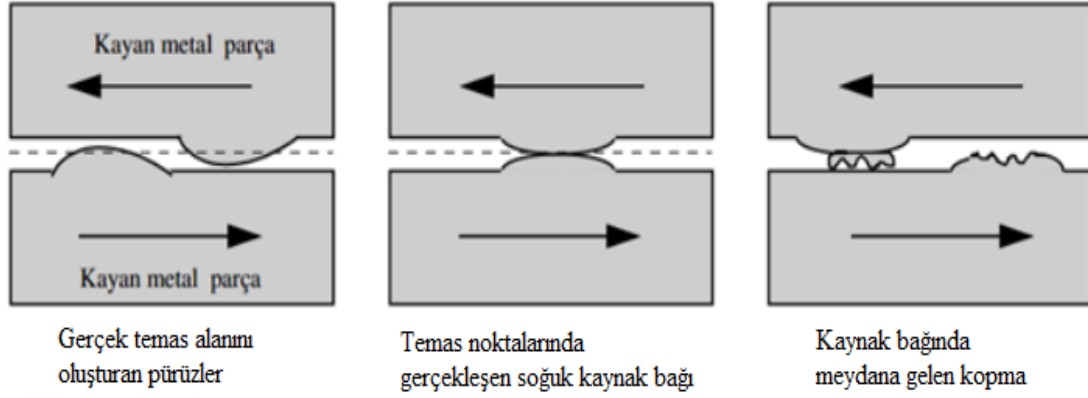


Şekil 15. Üç cisimli abrazyon aşınması

b) Adezyon Aşınması

Adhezif aşınma genellikle aşındırıcı parçacıklar olmadan iki metalik bileşen arasındaki kayma hareketinden meydana gelen bir aşınma türüdür. Birbirleri ile temas durumundaki bağlı hareketi yağlamasız metal yüzeylerinde gerçekleşir. Yüzeyler arasında hareket esnasında temas noktalarında soğuk kaynak bağları oluşur. Hareketin etkisiyle temas noktaları parçalandığında kopan parçacıklar aşınma ürünlerini meydana getirir. Kopma genellikle düşük mukavemetli metallerde meydana gelir. Temas noktalarında kopma oluştuğunda, aşınan bölge kopan parçanın yardımıyla daha hızlı bir şekilde

aşınabilir. Kopan parçacıklar ya serbestçe düşebilirler ya da yüzeyler arasında sıkışarak abrazif aşınmaya neden olabilirler (Karaoğlu, 2006).

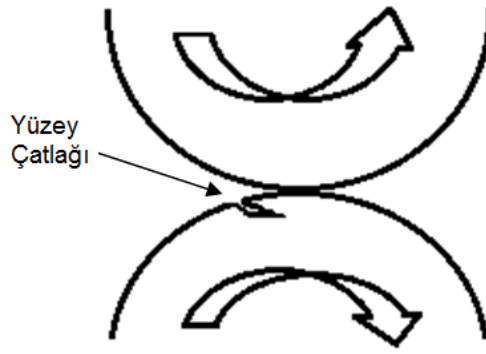


Şekil 16. Adhezif aşınmanın oluşumu

Yüzeyler sürtünme halindeyken uygulanan yükün fazla ve sıcaklığın oldukça yüksek olması kaynak bağlarının oluşumunu kolaylaştırmaktadır. Malzeme yüzeyinin temiz olması kaynak bağı oluşumunu kolay hale getirmektedir. Absorbe gazlar, rutubet ve yağlayıcı maddelerin sistemde oluşu bağ kuvvetini azaltır. Böylece yüzeyler arasındaki aşınma da azalacaktır (Karaoğlu, 2006).

c) Yorulma Aşınması

Temas eden yüzeylere tekrarlı yüklemeler uygulanması sonucu meydana gelen aşınma hasarı olarak tanımlanmaktadır. Birbirleri ile temas halinde bulunan iki yüzey, sürekli yük altında periyodik olarak birbirine temas ettiğinde, sadece adhezif aşınma meydana gelmekle kalmaz, aynı zamanda yorulma aşınması da oluşabilir. Bu süreç, malzeme yüzeyinde çatlakların oluşmasıyla başlar, ardından çukur ve oyukların meydana gelmesiyle devam eder. Sonunda ise yüzeyden parçacıkların kopmasıyla hasar oluşur. Yorulma aşınması genellikle yuvarlanma hareketi yapan rulmanlı yataklar, dişli çarklar, krank milleri ve kam milleri gibi makine parçalarında yaygın olarak görülmektedir (TMMOB, 2003). Şekil 17’de yorulma aşınması ve çatlak oluşumu gösterilmiştir.

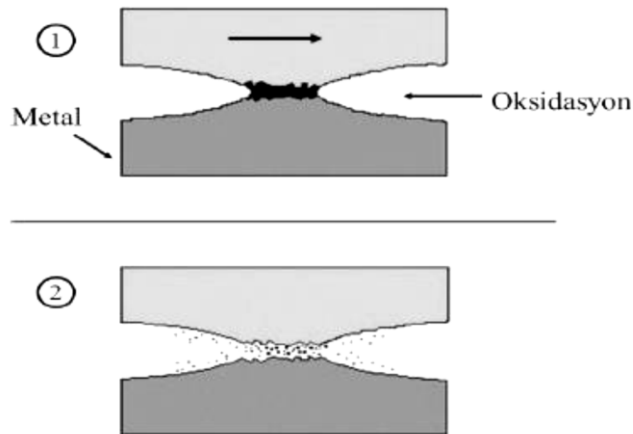


Şekil 17. Yorulma aşınması (Yıldız & Gür, 2006)

d) Korozyon Aşınması

Kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyonların sonucunda meydana gelen ve özellikle metaller üzerinde etkili olan bir aşınma türüdür. Korozyon aşınma genellikle hafif bir aşınma türü olmasına rağmen sıcaklık ve nem artığında oldukça etkili bir aşınma türü haline gelebilir. Özellikle demir esaslı malzemelerde daha sık görülen bir korozyon türü ise oksidasyondur (Soydan & Ulukan, 2003).

Malzeme yüzeyine uygulanan kaplamalar ve malzeme yüzeyinde kullanılan yağlayıcılar korozyon aşınmasını önlemek ya da azaltmak için uygulanabilen tekniklerdir.

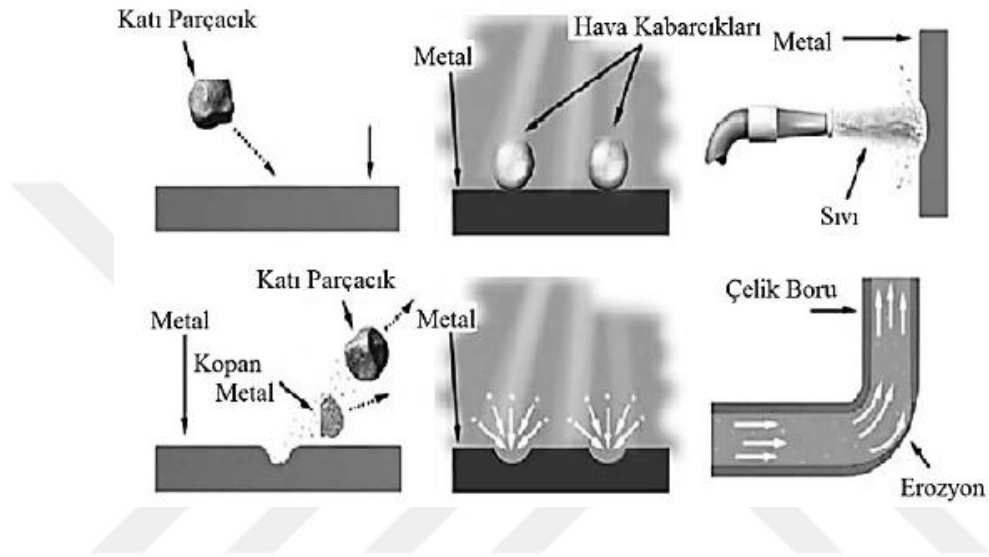


Şekil 18. Korozyon aşınması (Bağcı, 2010)

e) Erozyon Aşınması

Erozyon aşınması katı, sıvı ve gaz taşıyıcılarının içerisinde bulunan parçacıkların malzeme yüzeyine çarpması sonucu yüzeyden parçacık kopartarak meydana gelen bir

aşınma türüdür. Eroziv aşınma, abrasif aşınmayla benzerlikler gösterir. Farklılığı ise eroziv aşınmanın sert partiküllerin yüzeyi kazımadan çarpması sonucu meydana gelmesidir. Sert parçacıkların bağıl hareketleri yüzeye paralel olduğunda, bu tür aşınmaya abrasif erozyon denir. Sert parçacıkların bağıl hareketleri yüzeye dik olduğunda, bu tür aşınmaya ise, çarpma erozyonu adı verilir (Halling, 1976). Şekil 19’da erozyon aşınmasının şematik görüntüsü verilmiştir.



Şekil 19. Erozyon aşınması (Arslan vd., 2009)

1.8. Literatür Özeti

Günümüzde MAO kaplama yöntemi hala gelişmekte olmakla birlikte bu yöntemle ilgili literatürde birçok çalışma mevcuttur. Fakat yapılan kaplamaların, kullanıldıkları yerlerde istenilen özellikleri yetersiz olduğundan dolayı elektrolit çözelti içerisinde farklı tür katkı malzemeleri katılarak istenilen özellikler elde edilmektedir. Bunun sonucu olarak gelişmekte olan bu yöntemle ilgili birçok yeni bilgiler gün ışığına çıkmaktadır. Mikro ark oksidasyon kaplama yöntemi ile ilgili yapılmış olan bir takım çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Arslan vd. yaptıkları çalışmalarında, yüksek sıcaklık pin-on-disk tribo test cihazı ve alümina bilyeleri karşı yüzey olarak kullanarak farklı sıcaklıklarda alüminyum oksit tabakalarının yüksek sıcaklık aşınma davranışını değerlendirmişlerdir. Alüminyum oksit katmanları, AC mikro ark oksidasyonu (MAO) ile üretilmiştir. Katmanların yapısal analizleri XRD ve SEM teknikleri kullanılarak yapılmıştır. Sertlik mikrosertlik test cihazı

kullanılarak ölçülmüştür. Artan aşınma test sıcaklığı ile aşınma oranları ve sürtünme katsayısı azalmıştır. En düşük aşınma oranı ve sürtünme katsayısı, dar ve düzgün aşınma izleri 200 °C’de elde edildiği gözlenmiştir (Arslan vd., 2009).

Yang ve bir grup araştırmacı, 7075 Al-Zn-Mg-Cu altlık malzemeler kullanılarak mikro ark oksidasyon (MAO) kaplama yapmışlardır. Aşınma test sırasında ZrO₂ seramik bilyeye karşı MAO kaplamanın yüksek sıcaklık tribolojik özellikleri 25, 150 ve 300 °C’de değerlendirilmiştir. Yapılan test sonrasında sürtünme katsayıları ve aşınma oranları belirlenmiştir. ZrO₂ top üzerinde yüzey morfolojisi ve aşınma izleri gözlenmiştir. Ayrıca, üç farklı sıcaklıktaki aşınma mekanizmaları tartışılmıştır. MAO kaplamanın, yüksek sıcaklıktaki bir ortamda düşük bir aşınma hızı ve sabit bir aşınma performansını koruyabildiği bulunmuştur. 300 °C’de MAO kaplamanın aşınma oranı, 7075 alüminyum alaşımlı alt tabakanın yalnızca 1/11’i kadardır. Sonuç olarak 300 °C’deki 7075 alüminyum alaşımlı alt tabakanın aşınma oranı, MAO kaplamanın aşınma oranının 11 katı olarak belirlenerek yüksek sıcaklıktaki MAO kaplamanın aşınmaya karşı ne kadar fazla dirençli olduğu gözlenmiştir (Yang vd., 2019).

Liu ve arkadaşları, 2219 alüminyum alaşımı üzerine MAO işlemi uygulayarak tribolojik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Tribotestler 25, 80, 120 ve 160 °C’de gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, MAO örneğinin sürtünme katsayısının sıcaklığın artmasıyla azaldığını, MAO örneğinin aşınma oranının sıcaklık artışıyla arttığını ve sıcaklık arttıkça MAO kaplamanın yük taşıma kapasitesinin azaldığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, kaplanmamış numune ile karşılaştırıldığında, MAO numunesinin aşınma oranı 160 °C’de % 60 oranında azalmıştır (Liu vd., 2018).

Muhaffel vd. çalışmalarında, yüksek sıcaklıklarda bozulmaya karşı alüminyum alaşımları üzerine üretilen mikro ark oksidasyon kaplamalarının başarısını artırmayı planlamışlardır. Bu amaçla, 7075 Al alaşımı, monoklinik ZrO₂ parçacıkları eklenerek veya eklenmeden alüminat bazlı bir elektrolit içinde mikro ark oksitlenmiştir. Mikroyapısal analizler, ZrO₂ katkılı elektrolitte sentezlenen kaplamanın, Al₂O₃ esaslı dış katmana katılan bir ZrO₂ parçacıklarından ve ZrO₂ içermeyen alüminat esaslı olarak sentezlenenle benzer özellikler sergileyen Al₂O₃ esaslı bir iç katmandan oluştuğunu ortaya çıkarılmıştır. Ayrıca, ZrO₂ katkılı elektrolitte üretilen kaplama, oda sıcaklığında yapılan aşınma testlerinde gelişmiş aşınma direnci sergilemiş ve 300 °C’de yapılan testlerde daha yüksek dayanıklılık göstermiştir. Oda sıcaklığında 100 m toplam kayma mesafesi için uygulanan kuru kayma aşınma testleri, hem MAO hem de MAO-Zr kaplamaların özelliklerini koruduğunu ortaya

koymuştur. 10 N kadar yüksek test yükleri altında ancak MAO-Zr kaplamanın aşınma kaybı MAO kaplama ile karşılaştırıldığında oldukça düşük olduğu gözlenmiştir. 300 °C'de yapılan aşınması deneylerinde, MAO ve MAO-Zr kaplamaları, deney yüküne bağlı olarak belirli bir kayma mesafesinden sonra yüzeyden ayrılma eğilimi göstermiştir. Genel olarak MAO-Zr kaplama, MAO kaplamaya kıyasla hem daha yüksek dayanıklılığa hem de daha uzun bir kayma mesafesine sahiptir. Bu çalışmada kullanılan 1 N en düşük aşınma test yükünde, MAO-Zr kaplama 1000 m toplam kayma mesafesi için stabilitesini korurken, MAO kaplama yaklaşık 60 m kayma mesafesinden sonra kaldırılmıştır (Muhaffel vd., 2021).

Yang ve bir grup araştırmacı, 7075 Al alaşımı için 25-200 °C'de 25-250 N arası yükler altında aşınma testleri yapmışlardır. Çeşitli test koşulları altında aşınma davranışları ve mekanizmaları araştırılmıştır. 25-200 °C'de yükteki bir artışla hafiften şiddetliye bir aşınma geçişinin meydana geldiği fark edilmiştir. Sıcaklığın artmasıyla, 50 N'den düşük düşük yük altında aşınma kaybı sürekli olarak azaldığı gözlenmiştir. 7075 Al alaşımının, yüksek ortam sıcaklığı ve düşük yük altında yüksek aşınma direnci gösterdiği belirlenmiştir. 7075 Al alaşımı, yükün artmasıyla hafiften şiddetliye bir aşınma geçişi göstermiş ve ortam sıcaklığının artmasıyla kritik yük önemli ölçüde azalmıştır. 7075 Al alaşımı, 25 N altında 150 ve 200 °C'de 25 ve 100 °C'ye göre daha yüksek aşınma direnci göstermiştir. Yüksek sıcaklık ve düşük yük altında daha yüksek aşınma direnci gözlenmiştir (Yang vd., 2015).

Lee vd. çalışmalarında, kalın alümina kaplamaları, farklı işlem sürelerinde mikro ark oksidasyon (MAO) işlemi ile hacimce A356/20 % SiCp kompozitleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. MAO kaplı katman -alümina, alümina ve mullitten oluşur ve sertlik değeri ara yüzden uzaklaştıkça artmış ve daha sonra keskin bir şekilde azalmıştır. Aşınma testleri, yüzey kaplamalı ve kaplamasız A356/20 hacimce SiCp kompozitleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Numuneler, 25-180 °C sıcaklık aralığında farklı uygulanan yük ve kayma hızı ile disk üzerinde pim aşınma test ekipmanı ile test edilmiştir. Aşınmış yüzeyin, aşınma kalıntılarının ve sürtünme katsayısının değişimi incelenmiştir. MAO kaplamanın A356/20 hacimce % SiCp kompozitlerinin aşınmaya karşı direncini geliştirdiği ortaya çıkmıştır. Kaplamalı ve kaplamasız numuneler, hafif aşınma bölgeleri için benzer aşınma oranı sonuçları gösterirken, kaplanmış numune malzemelerin hafif-şiddetli aşınma geçişini geciktirerek A356/SiCp kompozitleri için şiddetli aşınma koşullarında aşınmaya karşı çok daha iyi direnç gösterdiği gözlenmiştir (Lee vd. 2007).

Yi ve bir grup araştırmacı yaptıkları çalışmalarında, 2618 alüminyum alaşımlı yüzey üzerinde oluşturulan oksitlenmiş katmanı, mikro ark oksidasyonu (MAO) işlemi ve ultrasonik soğuk dövme teknolojisinin (UCFT) ön işlemi olarak iki aşamalı bir yöntemle hazırlamışlardır. Numunelerin tribolojik özellikleri, MST-400 yüksek sıcaklık tribometresi ile 25, 80, 160 ve 200 °C'de incelenmiştir. MAO + UCFT alüminyum alaşımlarının aşınma performansı değerlendirilmiştir. Morfolojiler ve mikro yapılar taramalı elektron mikroskobu ve optik mikroskop ile ölçülmüştür. Sonuçlar, UCFT işleminin α -Al₂O₃ fazının oluşumunu desteklediğini, mikro gözeneklerin sayısını azalttığını ve MAO kaplamalarının sertliğini iyileştirdiğini göstermiştir. İşlenmemiş ve UCFT numunelerin hem sürtünme katsayıları hem de aşınma oranları sıcaklığın artmasıyla artmış, ancak UCFT numunelerindeki aynı sıcaklıkta daha düşük olduğu gözlenmiştir. MAO ve MAO + UCFT numunelerin sürtünme katsayıları ve aşınma oranları sıcaklığın artmasıyla azalmış, ancak MAO + UCFT numunelerindeki aynı sıcaklıkta daha düşük olduğu belirlenmiştir (Yi vd., 2017).

Jin ve arkadaşları, altlık malzemesi olarak Mg alaşımı üzerine MAO tekniği ile kaplama işlemi uygulamışlardır. Bu kaplama işlemi için sodyum silikat, sodyum fosfat ve sodyum hidroksitten meydana gelen üç farklı elektrolitik çözeltiyi hazır hale getirmişlerdir. Kaplama işlemi yapılmış Mg alaşımının beş farklı sıcaklıktaki (25, 75, 100, 125 ve 150 °C) tribolojik davranışı gözlenmiştir. XRD sonuçları irdelendiğinde, numune kaplama yüzeyinde MgO fazı ile Mg₂SiO₄ fazlarının meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Ortam sıcaklığının, kaplamada oluşan fazları etkilemediği anlaşılmıştır. SEM görüntüleri incelendiğinde kaplama yüzeyinin gözenekli ve oldukça kaba bir yapıya sahip olduğunu belirtmişlerdir. Kaplanmış bölgelerin yoğun iç tabaka ve yumuşak dış tabaka olmak üzere iki farklı katmandan meydana geldiğini açıklamışlardır. Sürtünme katsayısının 100 °C'ye kadar arttığını daha sonra ise azaldığını belirtmişlerdir. Sürtünme katsayısının 100 °C'de en yüksek 0,90 olduğu tespit etmişlerdir. Kaplama işlemi sonrası aşınma dirençlerinin net olarak arttığını açıklamışlardır. Ayrıca sıcaklığın artması ile birlikte aşınma oranının azaldığını tespit etmişlerdir. Böylece sıcaklık arttıkça aşınma direncinin de arttığı gözlenmiştir (Jin vd., 2017).

Li ve diğerleri, 2024 alüminyum alaşımı üzerine bir PEO (Plazma Elektrolitik Oksidasyon) işlemi gerçekleştirmişlerdir. İşlem sırasında belirli katodik voltajlarda 30 ile 33 µm kalınlığında benzer kaplamalar elde edilmiştir. Kaplama sonrası yapılan incelemeler, akım yoğunluğunun düşme hızının, kaplama büyüme hızı ile güçlü bir ilişkisi

olduğunu göstermiştir. İşlem sonrası 0 ve 40 V ile yapılan kaplamalarda büyük çukurların ve yüksek pürüzlülüğün olduğu gözlenirken 90, 140 ve 190 V ile gerçekleştirilen işlemlerde oluşturulan kaplamaların gözenekli dış tabaka ve kompakt iç tabakadan oluşan çift katmanlı bir yapıya sahip olduğu görülmüştür. Katodik voltajın artmasıyla birlikte iç katmanın kalınlaştığı, yüzey pürüzlülüğünün azaldığı ve gözenekli dış katmanın daha ince hale geldiği tespit edilmiştir (Liv d., 2014).

Wang ve diğerleri, 6061 Al alaşımını kullanarak farklı bileşenlere sahip Na_2AlO_2 , Na_2SiO_3 , Na_2SiF_6 ve NaOH elektrolit karışımları ile MAO tekniğini kullanarak kaplama işlemi gerçekleştirmişlerdir. Oda sıcaklığında 5 dakika süren bir işlemle 200 V AC ve 260 V DC hibrid voltaj aralığında çalışmışlardır. İncelenen kaplama yüzeyleri, pankek benzeri mikroyapının tüm yüzeye yayıldığını göstermektedir. Alüminat bazlı elektrolitlerle yapılan işlemlerde yüzeylerin silikat bazlı elektrolitlere kıyasla daha pürüzsüz olduğu belirlenmiştir. Tüm oksit tabakalarında ana fazlar $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ve $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ olmuş, özellikle silikat bazlı elektrolitlerle gerçekleştirilen işlemlerde plazma deşarj kanalları etrafında mullit partikülleri oluşmuştur (Wang vd., 2009).

Özcan çalışmasında, alüminyum (Al 7075) altlık malzemeyi kaplamak için MAO yöntemi kullanılmıştır. İki aşamalı bir kaplama işlemi uygulamıştır. İlk aşamada, potasyum hidroksit (KOH), sodyum alüminat (NaAlO_2) ve sodyum fosfat (Na_3PO_4) solüsyonu karışımı kullanarak alüminyum oksit (Al_2O_3) kaplanmıştır. İkinci aşamada, aynı solüsyona 0,8 gr/l oranında titanyum (Ti) tozu eklenerek kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Kaplama sonuçlarını incelemek amacıyla önce deney parametrelerinin ve Ti ilavesinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi ölçülmüştür. Ti ilavesinin kaplamanın kalınlığını artırdığını ve aynı şekilde yüzey pürüzlülüğünü de artırdığı belirlenmiştir (Özcan, 2014).

Wei ve bir grup araştırmacı, 2024 alüminyum alaşımına MAO işlemi uygulamışlardır. Yapılan kaplamaların mikro yapısı, sürtünme, darbe dayanımı, aşınma ve korozyon özellikleri incelenmiştir. Yüzeye dökülen yağlayıcı maddesinden dolayı aşınma direnci arttırılmıştır. Araştırmacılar MAO sisteminin korozyon ve aşınma problemlerinin önemli bir çözüm olduğunu belirtmişlerdir (Wei vd., 2005).

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte mühendislik malzemelerinin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Özellikle maliyet açısından, malzemenin performansını artırmak için birçok kaplama teknikleri uygulanmaktadır. Ancak yapılan bazı kaplamalar kullanılmak istenen alanlarda performans ve maliyet açısından yetersiz gelebilmektedir. MAO yöntemi, diğer yöntemlere kıyasla oldukça avantajlı olmasıyla öne çıkmaktadır. Bu tez çalışmasında

farklı elektrolitlerle Al 5052 alaşımı yüzeyinde MAO yöntemi ile oksit tabakası oluşturulmuştur. Kaplanmış numunelerin yapısal özellikleri incelenmiş ve yüksek sıcaklıkta sürtünme ve aşınma deneyleri yapılmıştır. Bu çalışmanın amacı elektrolit içerisine farklı ilaveler katılarak oluşturulan kaplamaların yüksek sıcaklıktaki tribolojik davranışlarının iyileştirilmesi hedeflenmektedir.



2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, Al 5052 alaşımları yüzeyine MAO tekniği kullanılarak kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca elektrolit çözelti içerisine katkı olarak grafit, hegzagonal bor nitrür, çinko oksit katılarak ve katkı katılmadan elde edilen oksit kaplamaların tribolojik özellikleri incelenmiştir.

2.1. Numune Hazırlama

25 mm x 25 mm x 2 mm boyutlarında Al 5052 alaşımı numuneleri sırasıyla 200, 400, 600, 800 ve 1200 nolu SiC zımparalar ile zımparalanmış ve daha sonra etil alkol ile yıkayıp kurutulmuştur. Böylelikle numuneler MAO tekniği için uygun hale getirilmiştir.

Tablo 3. Al 5052 alaşımının kimyasal bileşimi (% ağırlık)

Mg	Cr	Cu	Fe	Mn	Si	Zn	Al
2,4	0,19	0,1	0,3	0,1	0,23	0,1	96,58

2.2. Mikro Ark Oksidasyon İşlemi

Hazırlanmış olan Al 5052 alüminyum alaşımları numunelerinin MAO yöntemi ile kaplanmasında kullanılan cihaz Şekil 20’de gösterilmiştir.



Şekil 20. MAO kaplama ünitesi

MAO tekniğinde kullanılan bu cihaz 30 kW kapasiteli alternatif akım (AC) güç kaynağına sahiptir. Al 5052 alaşımları anot altlık malzemeler olarak kullanılırken MAO ünitesinin içerisinde bulunan banyo duvarları olan paslanmaz çelik katot malzemesi olarak kullanılmıştır. Tablo 4’de MAO yönteminde uygulanan parametreler ve değerleri verilmiştir. Tablo 5’te ise MAO yönteminde kullanılan elektrolitik çözeltiler ve oranları verilmiştir. Bu çalışmada katkısız kaplamalı, grafit katkılı kaplamalı, hegzagonal bor nitrür katkılı kaplamalı, çinko oksit katkılı kaplamalı numuneler sırasıyla NAC, GAC, BAC, ZAC olarak kodlanmıştır.

Tablo 4. MAO’da kullanılan parametreler

Parametreler	Değerler
Pozitif voltaj (V)	600
Negatif voltaj (V)	60
Pozitif vuruş oranı (%)	20
Negatif vuruş oranı (%)	5
İşlem süresi (dk)	15
Frekans (Hz)	250

Tablo 5. MAO yönteminde kullanılan elektrolitik çözeltiler ve oranları

Numune Kodu	Elektrolit Çözeltiler (g/l)					
	Na ₂ SiO ₃	KOH	NaAlO ₂	Grafit	h-BN	ZnO
NAC	4	2	6	-	-	-
GAC	4	2	6	1,5	-	-
BAC	4	2	6	-	1,5	-
ZAC	4	2	6	-	-	1,5

2.3. Karakterizasyon İşlemleri

Mikro ark oksidasyon kaplama işleminden sonra numunelere, makro ve mikro olarak karakterizasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Makro incelemeler gözle, mikro incelemeler ise NAC, GAC, BAC ve ZAC kodlu numunelerin yüzey pürüzlülük ölçümleri, kaplama kalınlığı ölçümleri, SEM analizleri, XRD analizleri, sertlik deneyleri, sürtünme ve aşınma testleri ile gerçekleştirilmiştir.

2.3.1. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü

Numunelerin yüzey pürüzlülük ölçümleri, Mitutoyo SJ-301 marka profilmetre ile gerçekleştirilmiştir. Bu cihaz ile y koordinatlarının mutlak değerlerinin aritmetik ortalama değeri (R_a), kuadratik ortalama değeri (R_q) ve en yüksek profil tepesi ile en düşük nokta arasındaki dikey mesafeyi veren değeri (R_z) elde edilmiştir. Yüzey pürüzlülük değerlerini belirlemek için her numunenin 5 farklı bölgesinden R_a , R_q ve R_z değerleri alınarak aritmetik ortalamaları hesaplanmıştır. Şekil 21’de kaplama işlemi tamamlanmış numunelerin yüzey pürüzlülüklerini belirlemek için kullanılan cihaz gösterilmiştir.



Şekil 21. Yüzey pürüzlülüğü ölçer test cihazı

2.3.2. Kaplama Kalınlığı Ölçümü

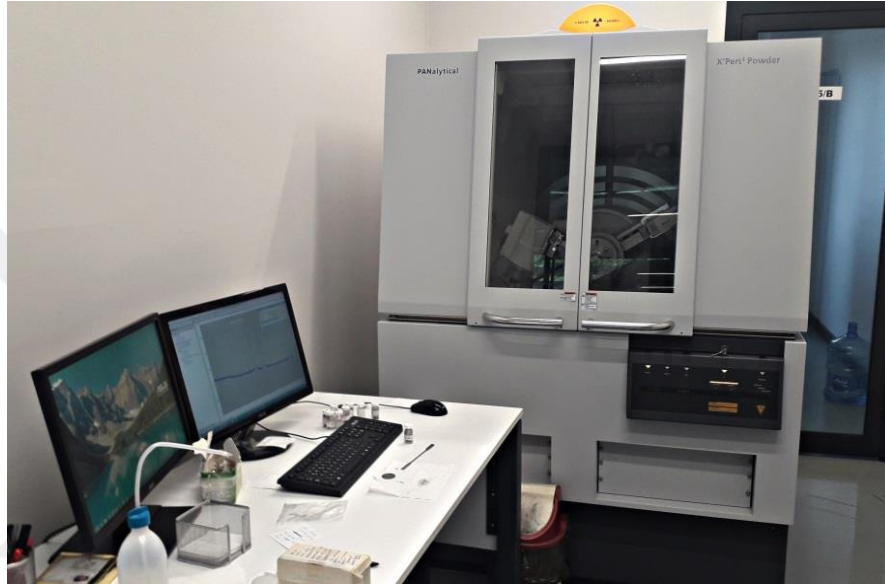
NAC, GAC, BAC ve ZAC kodlu numunelerin kesitlerinden kaplama kalınlık değerleri ölçülmüştür. Numunelerin kaplama kalınlıkları Şekil 22’de gösterilen ZEISS EVO LS10 marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak ölçülmüştür.



Şekil 22. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

2.3.3. XRD Analizleri

MAO kaplama yöntemi ile kaplanmış numunelerin yapılarında mevcut bulunan fazlar Şekil 23’de gösterilen PANalytical X’pert3 Powder model XRD cihazı ile belirlenmiştir. XRD ölçümleri 10-90° tarama aralığında, 0,019 derece/s tarama hızında ve 0,1 derece tarama adımında tamamlanmıştır.



Şekil 23. X ışını difraktometre (XRD) cihazı

2.3.4. SEM Analizleri

MAO kaplama yöntemi ile kaplanmış ve kaplanmamış olan numunelerinin yüzey morfoloji yapıları ve aşınma izlerinin analizleri Şekil 22’de verilmiş olan SEM ile incelenmiştir.

2.3.5. Mikro Sertlik Deneyleri

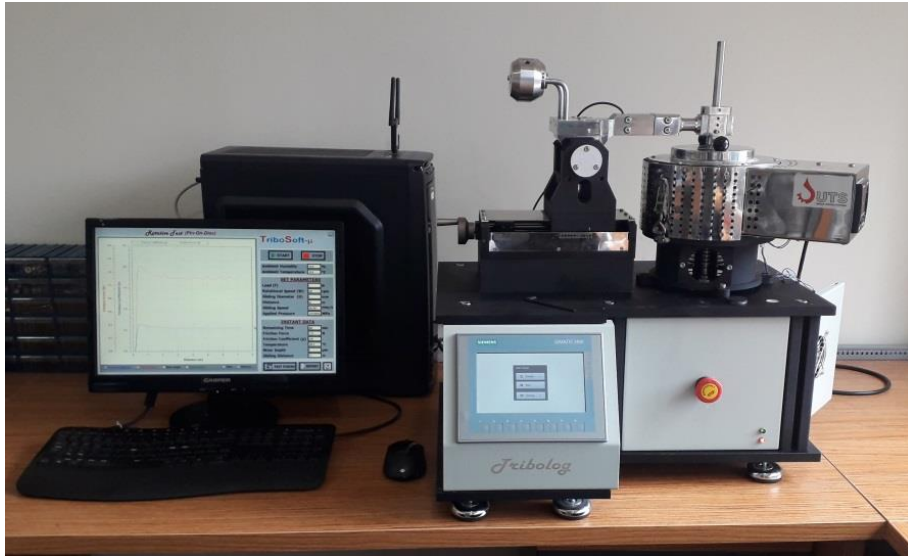
Kaplanan numunelerin mikro sertlik değerleri Şekil 24’de verilen mikrosertlik cihazı ile tespit edilmiştir. Numunelerin sertlik ölçümlerinde yük değeri 10 g olup batma süresi 30 s olarak alınmıştır. Sertlik değerleri, her numune yüzeyinin 5 farklı noktasından ölçüm alınarak bu değerlerin aritmetik ortalaması hesaplanarak belirlenmiştir.



Şekil 24. Mikro Sertlik Ölçüm Cihazı

2.3.6. Tribolojik Deneyler

Numunelerin sürtünme-aşınma deneyleri Şekil 25'te gösterilen ball on disc aşınma test cihazında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 25. Ball-on-disc sürtünme ve aşınma test cihazı

Triboloji testleri; NAC, GAC, BAC ve ZAC kodlu numunelerin her biri kuru ortamda oda sıcaklığına (25 °C) ve farklı yüksek sıcaklıklara (90, 150 ve 250 °C) maruz bırakılarak gerçekleştirilmiştir. Sürtünme ve aşınma deneylerinde aşındırıcı olarak, 6 mm çapında olan alümina seramik bilya kullanılmıştır. Tablo 6’da aşınma deney parametreleri ve değerleri verilmiştir.

Tablo 6. Aşınma deneyinde kullanılan parametreler

Parametreler	Değerler
Uygulanan Yük (N)	2
Kayma Hızı (mm/s)	104,6
Devir Sayısı (d/dk)	250
Sıcaklık (°C)	25, 90, 150 ve 250
İz Çapı (mm)	8
Bilya Çapı (mm)	6
Bilya	Al ₂ O ₃
Toplam Kayma Mesafesi (m)	50
Süre (s)	475
Ortam	Atmosfer

Aşınma deneyi sonrası numunelerin sürtünme katsayısı aşağıdaki denklemle (Denklem 3) hesaplanmıştır.

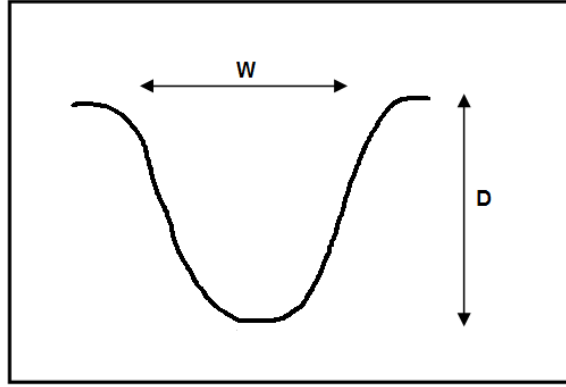
$$\mu = F_S / F_N \quad (3)$$

μ : Sürtünme katsayısı

F_S : Sürtünme kuvveti (N)

F_N : Uygulanan kuvvet (N)

Aşınma iz hacimleri (mm³) ve aşınma oranları sırasıyla Denklem 4 ve Denklem 5 ile hesaplanmıştır (Wei vd., 2005).



Şekil 26. Aşınma iz genişliği ve derinliğinin şematik gösterimi

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

V : Aşınma hacmi

W : Aşınma iz genişliği

L : Aşınma iz uzunluğu

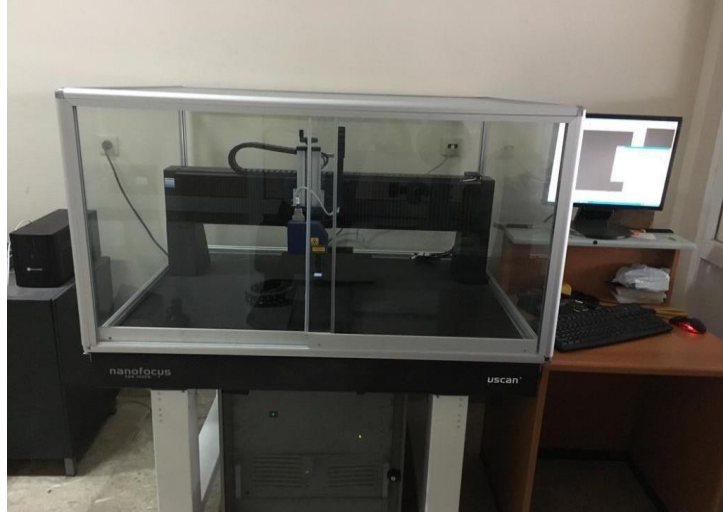
D : Aşınma iz derinliği

$$\text{Aşınma Oranı} = V/(F.S) \quad (5)$$

F : Uygulanan yük (N)

S : Toplam kayma mesafesi (m)

Aşınma iz genişliği ve derinliğini Şekil 27’de gösterilen 3 boyutlu yüzey profilometre cihazı tarafından ölçülmüştür. Sürtünme aşınma deneyleri sonrası numunelerin aşınma yüzeyleri SEM ile incelenmiştir.



Şekil 27. 3D Yüzey profilometre cihazı

3. BULGULAR VE İRDELEME

3.1. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm sonuçları

MAO yöntemi sonrası genelde pürüzlü bir kaplama yüzeyi elde edilmektedir. Bu pürüzlülüğün nedeni, proses esnasında meydana gelendeşarj kanallarının oluşumu ve ardından bu kanallar etrafında amorf bir katılaşmanın oluşmasıdır. Yüzey pürüzlülüğü ölçümü yapılırken karşılaşılan R_a parametresi aritmetik ortalama sapma, R_q parametresi aritmetik ortalama sapmaların karekökü ve R_z parametresi ise beş tane en yüksek ve en alçak noktanın ortalaması anlamına gelmektedir.

Kaplama işlemi sonrası numunelerin yüzey pürüzlülüklerinin arttığı belirlenmiştir. NAC, GAC, BAC ve ZAC kodlu numunelerin R_a değerleri sırasıyla 12,79 μm , 8,82 μm , 10,87 μm ve 13,34 μm 'dir. NAC, GAC, BAC ve ZAC kodlu numuneler birbirleri ile karşılaştırıldığında GAC kodlu numune en düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip iken ZAC kodlu numune ise en yüksek yüzey pürüzlülüğüne sahip olduğu tespit edilmiştir. MAO tekniğinde elektrolit içerisine katılan grafit partiküllerinin, diğer katkılara göre yüzey pürüzlülüğü üzerine olumlu etkisi olmuştur.

Tablo 7. NAC, GAC, BAC ve ZAG kodlu numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri

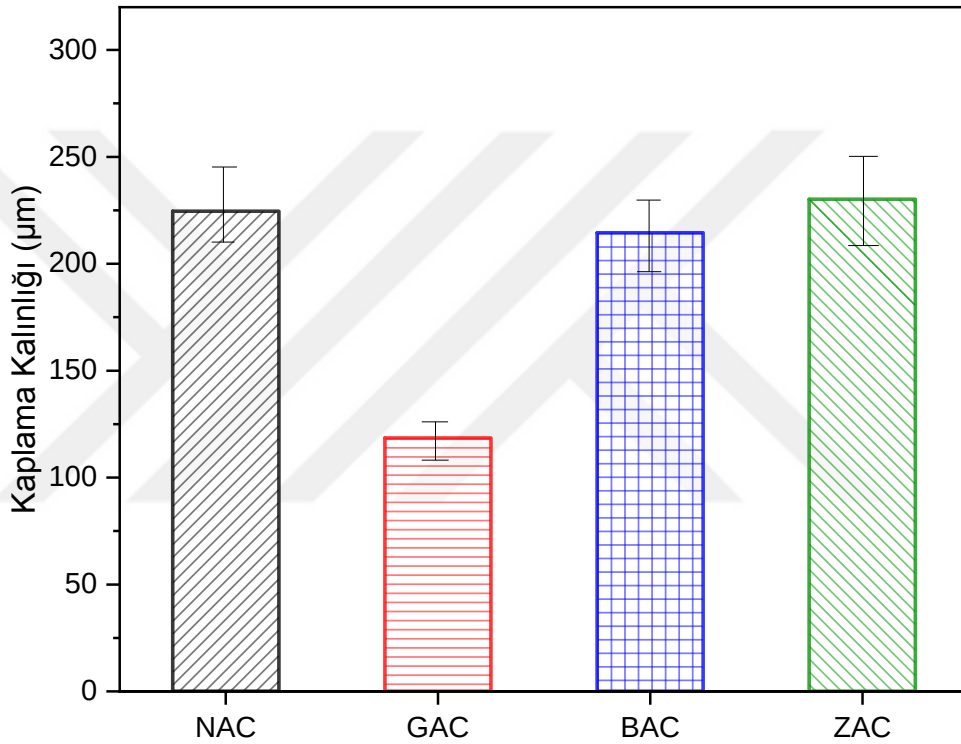
Numune Kodu	R_a (μm)	R_q (μm)	R_z (μm)
NAC	12,79	15,78	68,26
GAC	8,82	10,65	46,38
BAC	10,87	13,42	59,37
ZAC	13,34	16,05	68,36

MAO tekniği ile yüzeyde küçük boyutlarda arkların meydana gelmesi ve mikro boyutlara sahip kanalların oluşması ile yüzeye malzeme taşınımı gerçekleşmektedir. Malzemelerin yüzeye taşınmasıyla yüzey pürüzlülüğü artmaktadır (Hussein, 2010). MAO kaplamalarının yüzey pürüzlülüğü sahip oldukları mikro yapıları ve özellikle sünger

benzeri porozlu yapı çıkıntıları tarafından belirlenir. Sünger benzeri çıkıntılar arttıkça pürüzlülük miktarı da artmaktadır (Liv vd., 2017).

3.2. Kaplama Kalınlığı Ölçüm Sonuçları

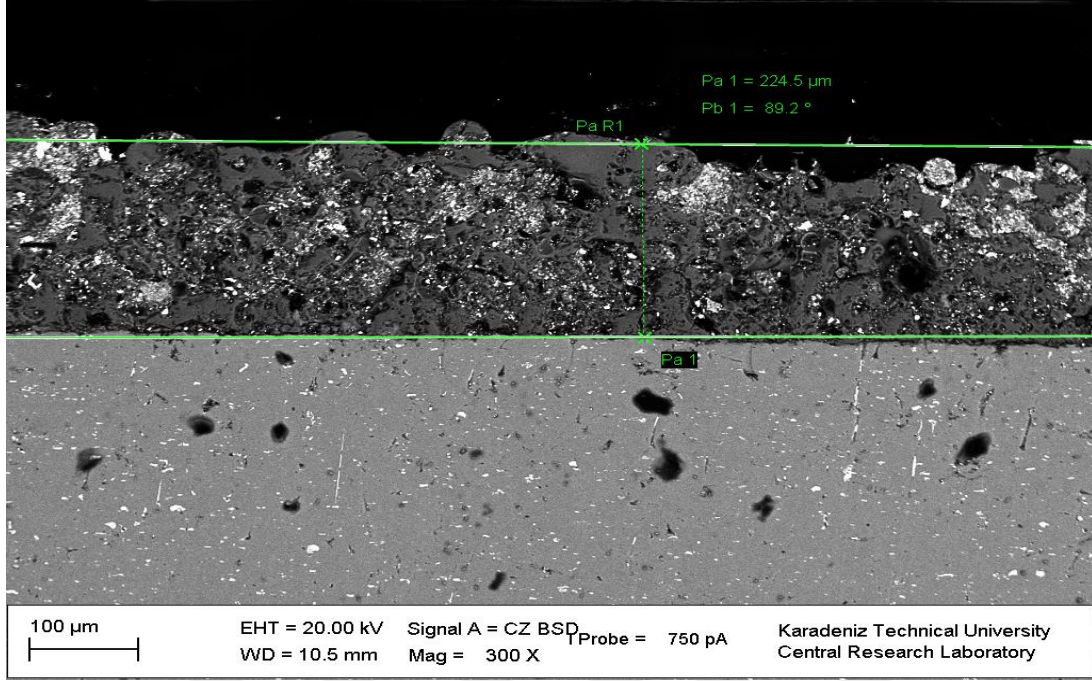
NAC, GAC, BAC ve ZAC kodlu numunelerin MAO işlemi sonrası birbirlerinden farklı oluşan kaplama kalınlık değerleri verilen grafik Şekil 28’de verilmiştir.



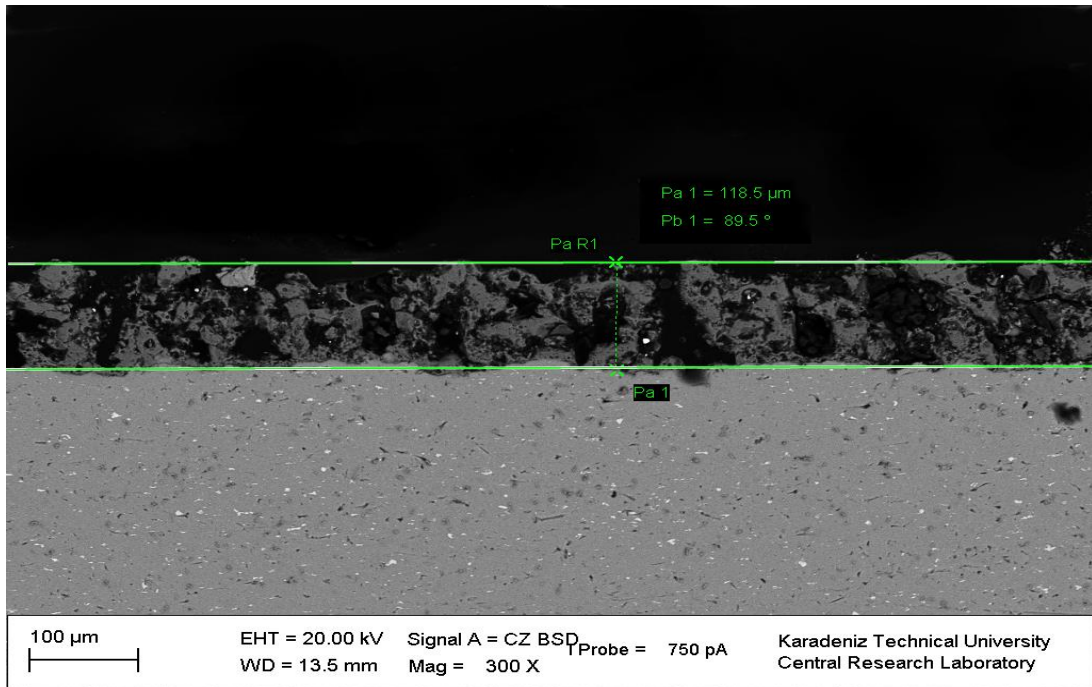
Şekil 28. NAC, GAC, BAC ve ZAC numunelerin kaplama kalınlığı değerleri

MAO yöntemi ile kaplama sonrası NAC, GAC, BAC ve ZAC kodlu numunelerin yüzeylerinde meydana gelen kaplamaların kalınlık değerleri sırasıyla 224,5 µm, 118,5 µm, 214,5 µm ve 230,1 µm olarak ölçülmüştür. En düşük kaplama kalınlık değeri GAC kodlu numunede ölçülürken en yüksek kaplama kalınlık değeri ise ZAC kodlu numunede ölçülmüştür. NAC, GAC, BAC ve ZAC kodlu numunelerin literatürde belirtildiği gibi kaplama kalınlıkları arttıkça yüzey pürüzlülüklerinin de arttığı açıkça görülmektedir (Fanya, 2006).

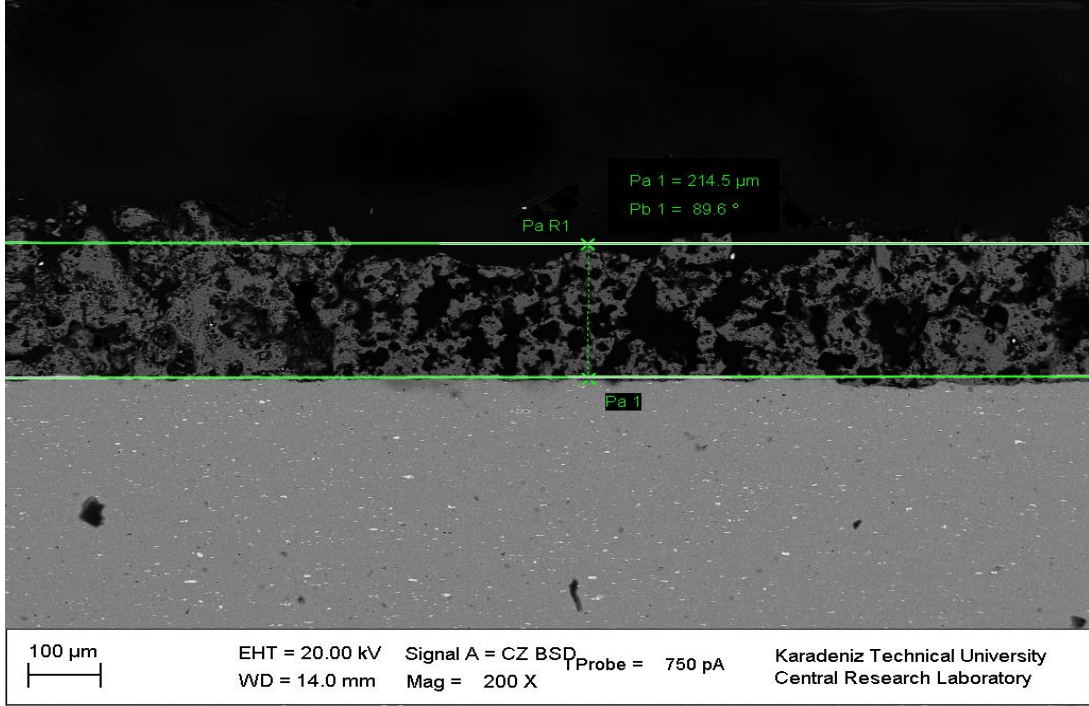
NAC, GAC, BAC ve ZAC kodlu numunelerin kaplama kalınlıklarının SEM görüntüsü sırasıyla Şekil 29-32’de verilmiştir.



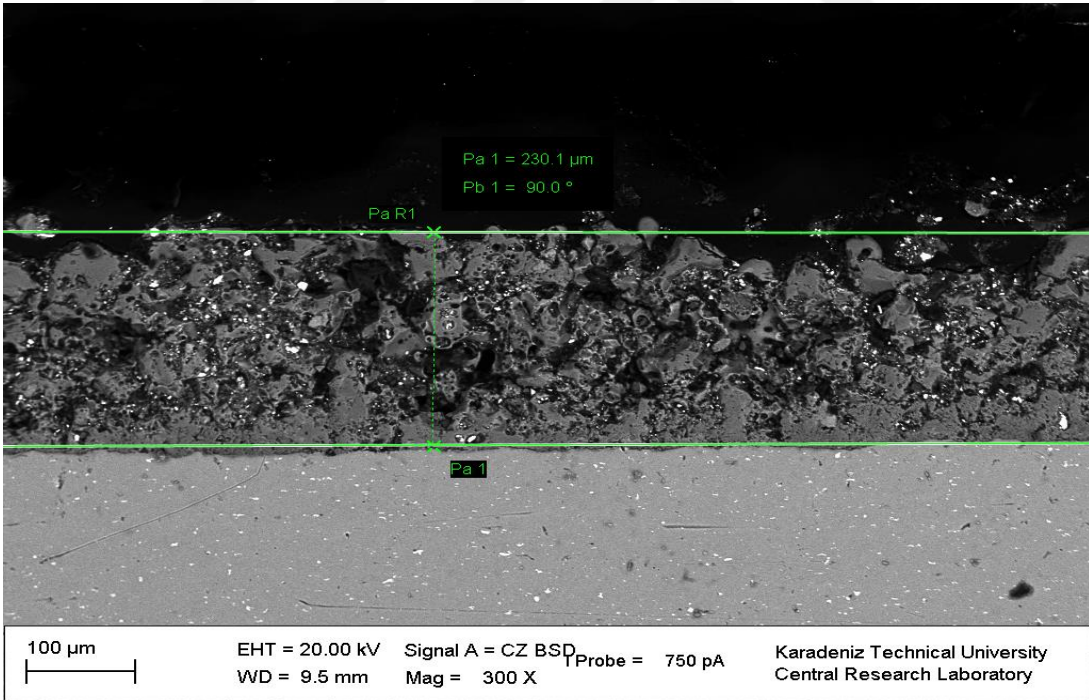
Şekil 29. NAC kodlu numunenin kaplama kalınlığı



Şekil 30. GAC kodlu numunenin kaplama kalınlığı



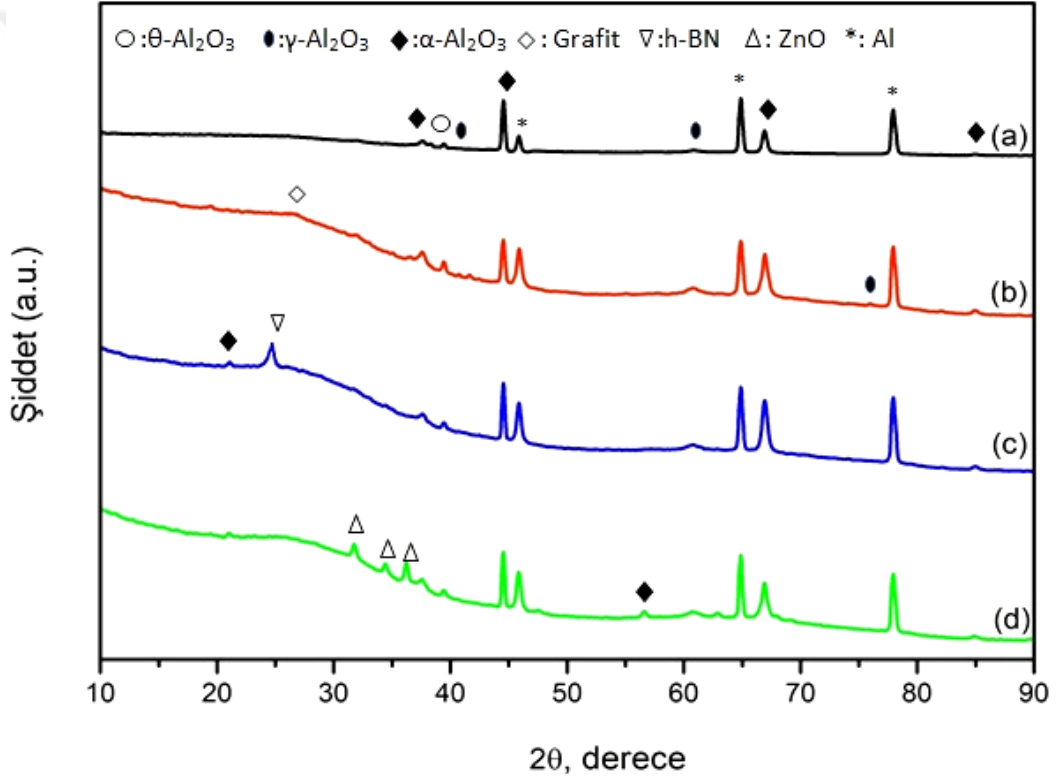
Şekil 31. BAC kodlu numunenin kaplama kalınlığı



Şekil 32. ZAC kodlu numunenin kaplama kalınlığı

3.3. XRD Analizi Sonuçları

MAO ile farklı elektrolitler içerisinde kaplanmış numunelerin XRD spektrumları Şekil 33'de verilmiştir. Numune yüzeylerinde oluşturulan kaplamaların mekanik ve tribolojik özelliklerini belirlemek için faz kompozisyonunun bilinmesi önem arz etmektedir. Kaplamaların XRD verileri incelendiğinde NAC, GAC, BAC ve ZAC kodlu numunelerde α - Al_2O_3 ve γ - Al_2O_3 fazlarının baskın olduğu görülmektedir. Meydana gelen bu fazların yanı sıra GAC, BAC ve ZAC kodlu numunelerde sırasıyla grafit, h-BN ve ZnO fazları oluşmuştur.



Şekil 33. (a) NAC, (b) GAC, (c) BAC ve (d) ZAC kodlu numunelerin XRD paterni

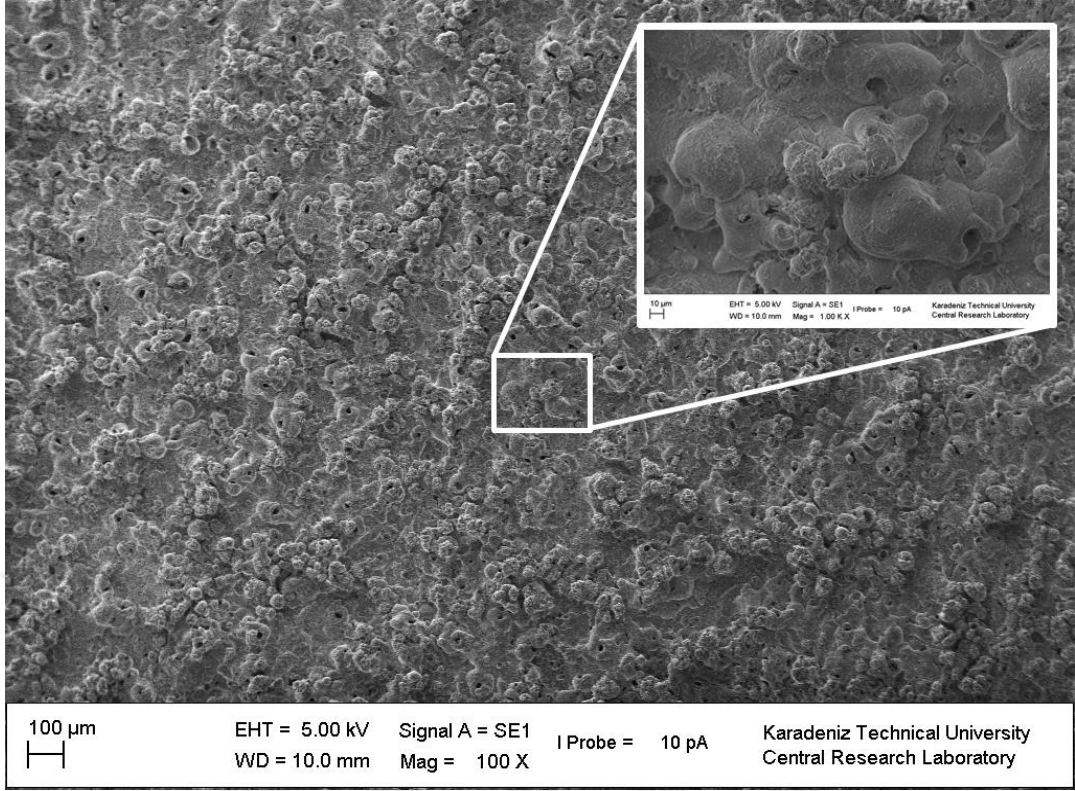
Katkı maddeleri içermeyen kaplamanın ana fazları, MAO'nun tipik faz bileşimleri olan α - Al_2O_3 ve γ - Al_2O_3 'tür (Magniez, 2023). Güçlü Al kırınım pikleri de tespit edilmiştir. Bu durumun yüzeyde bulunan gözenekler ve kusurlar içeren MAO kaplamaya X ışınlarının kolayca nüfuz edebiliyor olmasından kaynaklanmaktadır (Zefei, 2021). Katkı maddelerinin kaplama matrisi veya elektrolit ile yeni fazlar oluşturmak üzere reaksiyona girmediği tespit edilmiştir. Ayrıca; γ - Al_2O_3 , θ - Al_2O_3 ve α - Al_2O_3 'ün oluşumundaki ara aşamalar olduğu

bilinmektedir (Levin, 1998). Katkı maddesi içermeyen NAC kodlu numunede bu fazların tespit edilmiş olması yeterli dönüşüm enerjisi ve difüzyon süresinin bulunduğunu göstermektedir (Zefei , 2021). Ayrıca dış katmanda soğuma hızının yüksek olması zayıf ve kırılğan γ - Al_2O_3 fazını meydana getirirken, iç katmanda ise soğuma hızının düşük olması α - Al_2O_3 fazını meydana getirmektedir (Wenbin, 1998). Katkı malzemesi ilaveli tüm kaplamalar, katkısız kaplamayla karşılaştırıldığında, kaplamalardaki α - Al_2O_3 piklerinin göreceli yoğunluğu tespit edilmiştir. Bu durumun elektrolite ilave edilen katkı maddelerinin kaplama başlangıç voltajını düşürmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir (Li, 2013).

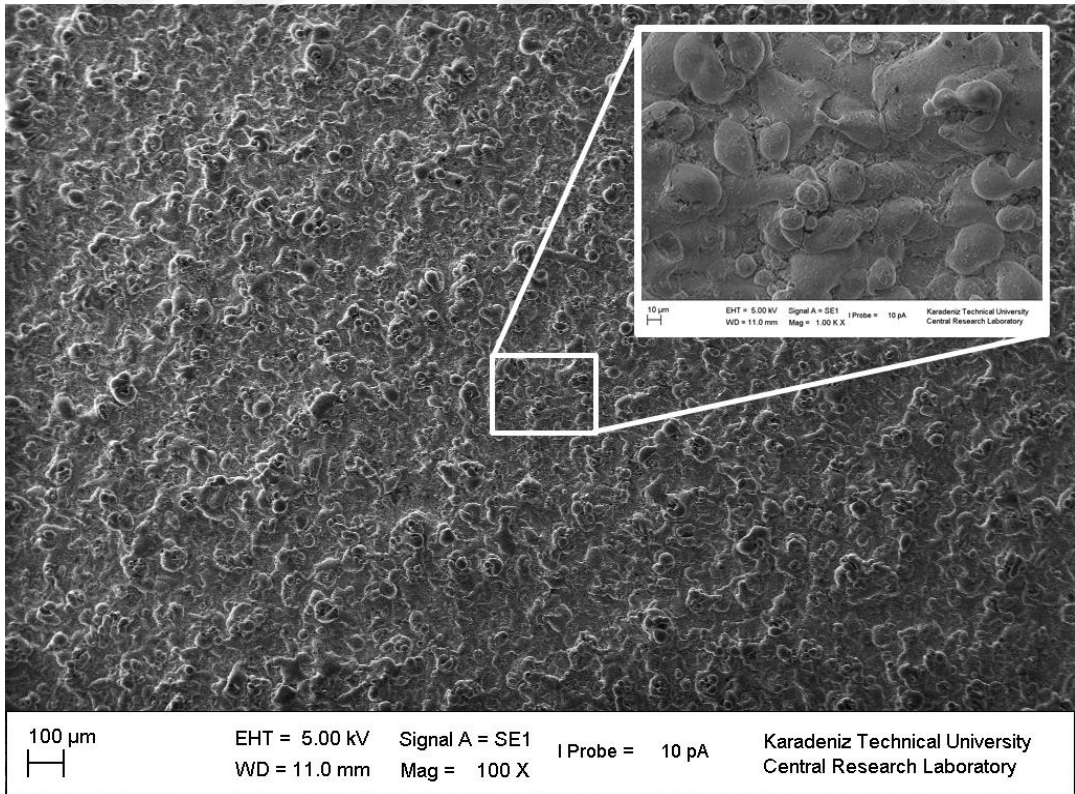
3.4. SEM Analizi Sonuçları

MAO tekniği sonrası numune yüzeylerinde oluşan değişimleri görebilmek için numunelerin farklı büyütmelerde SEM görüntüleri alınmıştır.

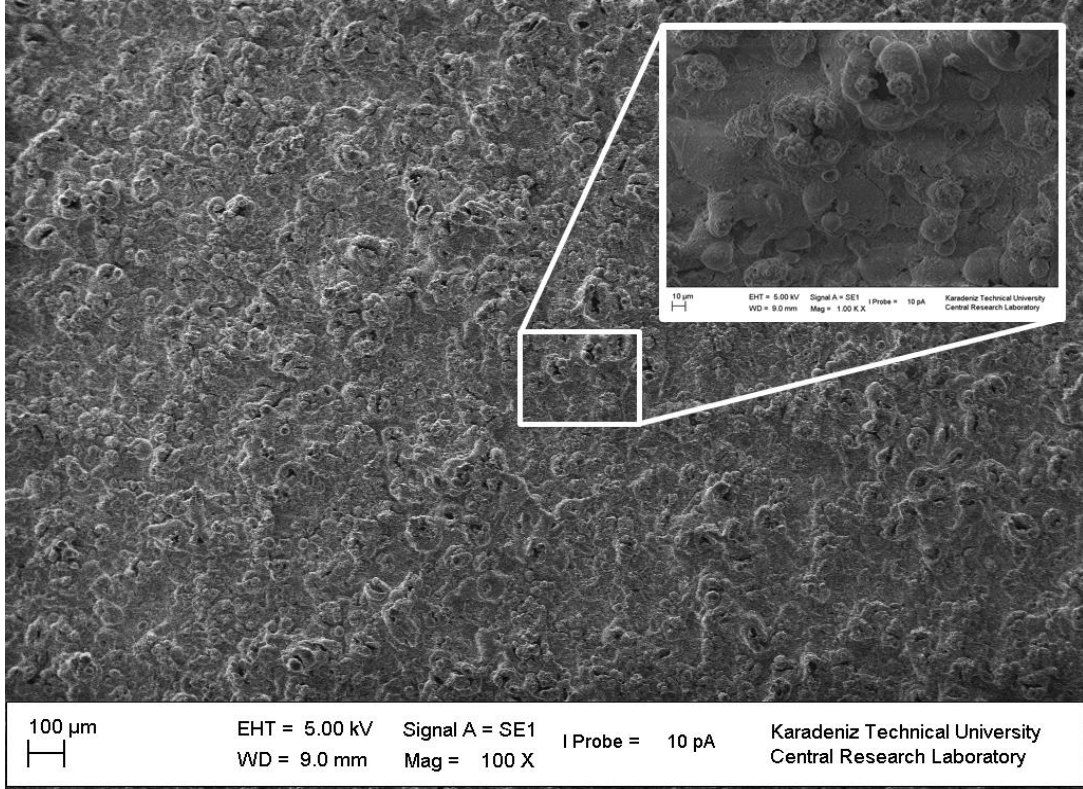
Şekil 34-37’de kaplanmış numune yüzeylerinin düşük (100X) ve yüksek (1000X) büyüme oranlarındaki SEM görüntüleri verilmiştir. Uygulanan voltajın, bozunum voltajına ulaşması sonucu numune yüzeylerinde oksit kaplama oluşmuştur. Al 5052 alaşımı üzerinde oluşturulan bu kaplamaların pürüzlü bir yüzeye ve çok sayıda mikro porlara sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca bütün numunelerin yüzey morfolojilerinde krater görünümlü yapılar mevcut olmasına karşın en az GAC kodlu, en fazla ise ZAC kodlu numunelerde görülmektedir.



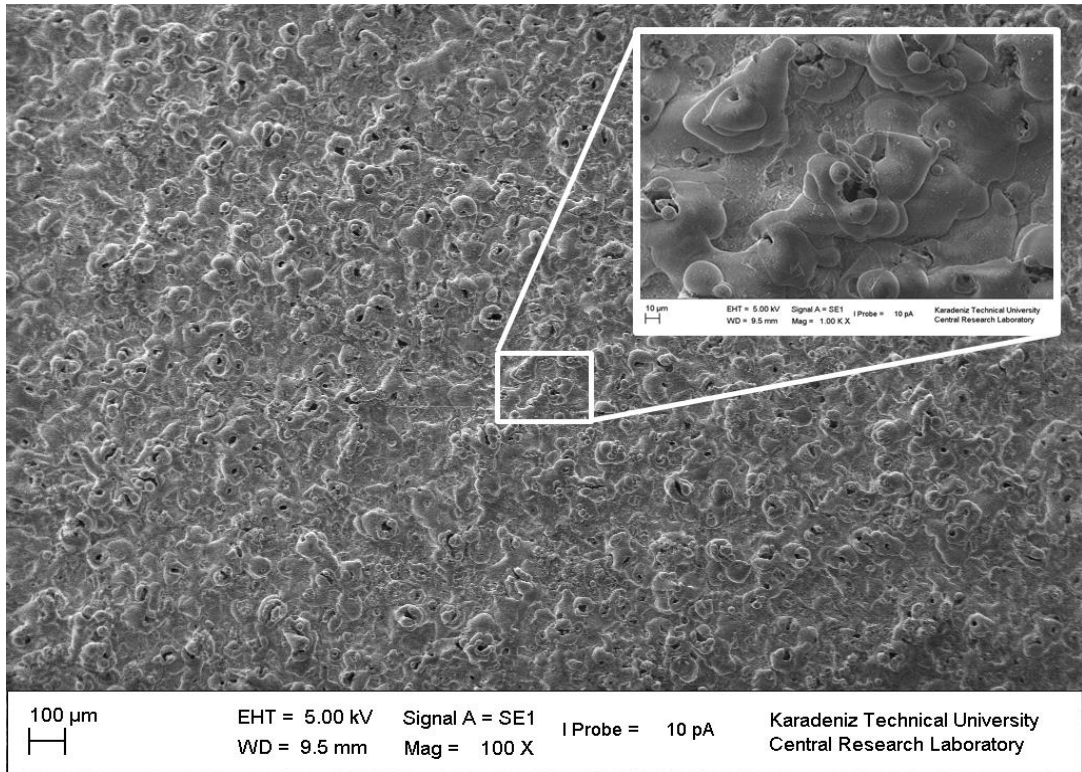
Şekil 34. NAC kodlu numunenin SEM görüntüsü



Şekil 35. GAC kodlu numunenin SEM görüntüsü

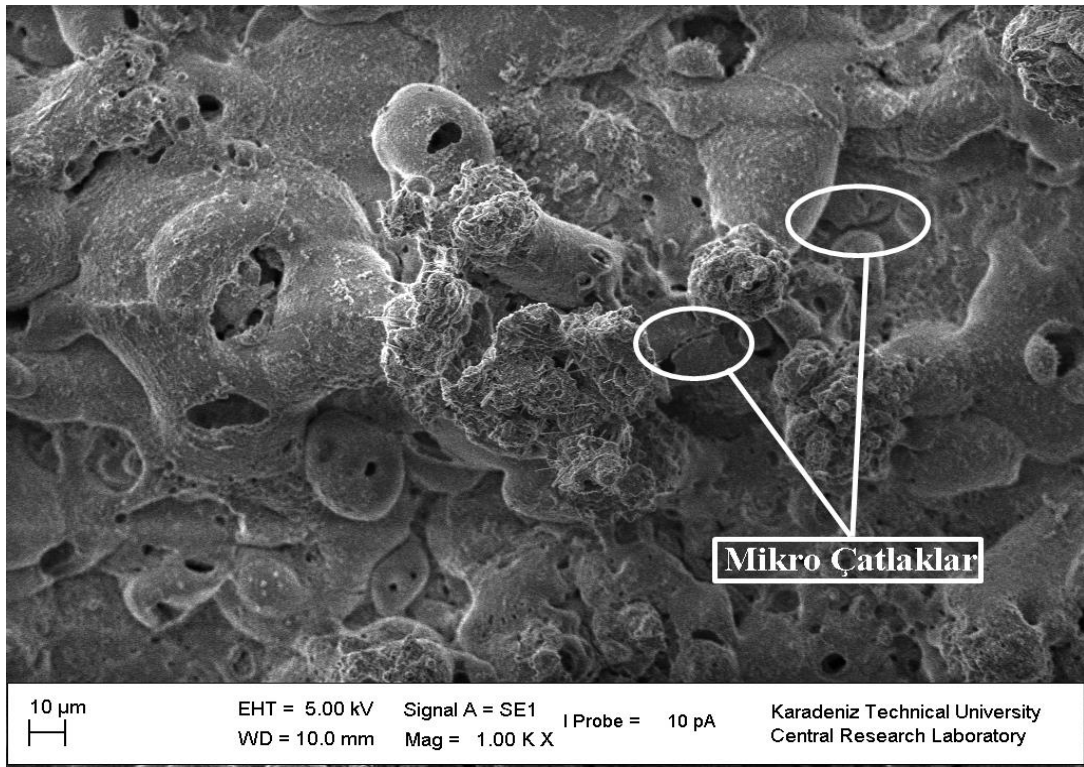


Şekil 36. BAC kodlu numunenin SEM görüntüsü

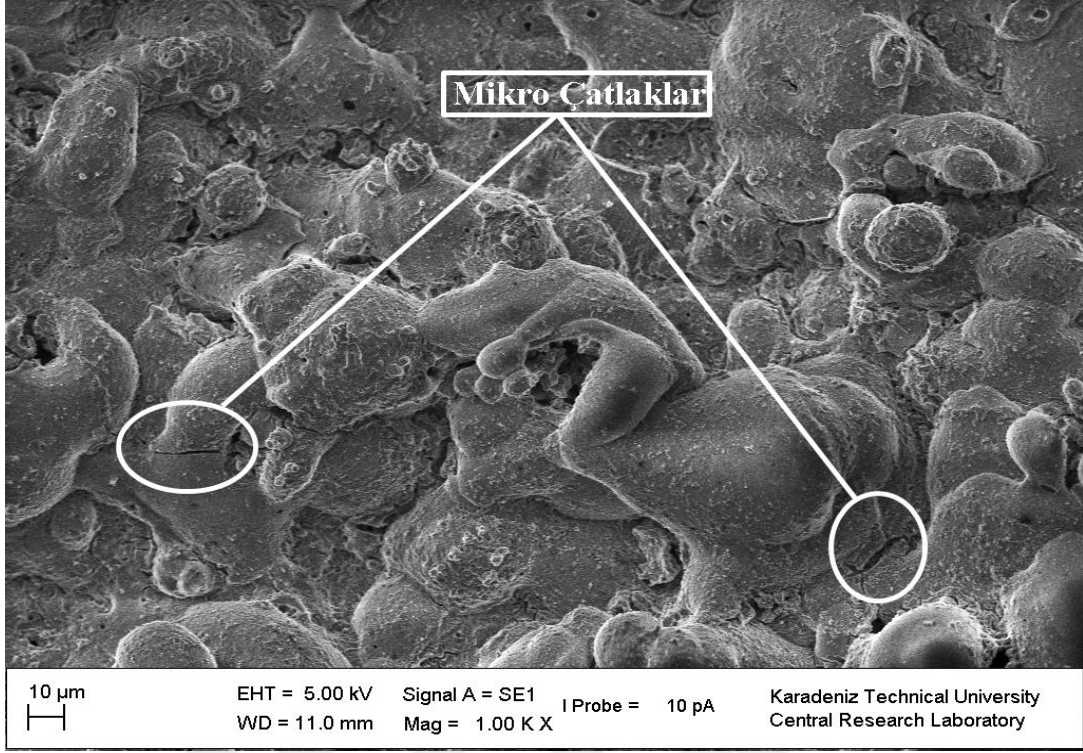


Şekil 37. ZAC kodlu numunenin SEM görüntüsü

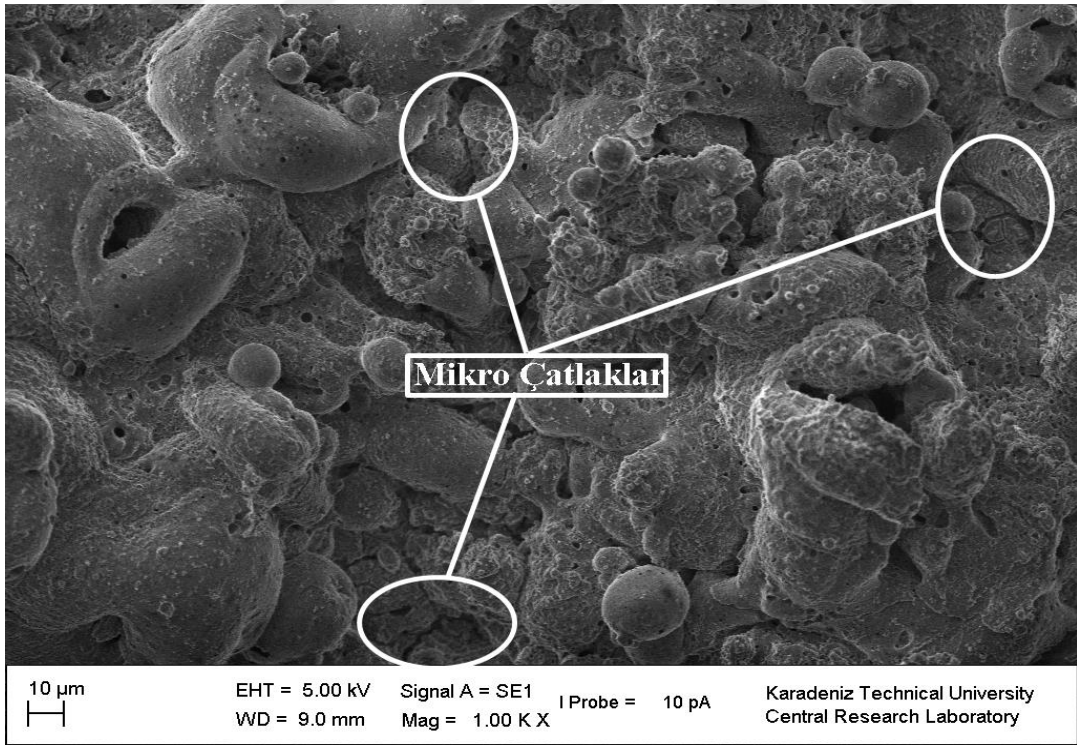
Ergimiş oksit-elektrolit teması sonrası hızlı katılaşma ile mikro çatlakların meydana gelmesi literatürde açıkça belirtilmiştir. Numune yüzeylerinde oluşan mikro çatlakları analiz etmek için 1000X oranında büyütmelerdeki SEM görüntüleri Şekil 38-41’de verilmiştir. GAC kodlu numune yüzeyinde meydana gelen mikro çatlak ve kırılmalar NAC, GAC ve ZAC numunelerin yüzeylerindekiyle kıyasla oldukça azdır. GAC kodlu numunede meydana gelen çatlak ve kırıkların az olmasının nedeni, grafit partiküllerinin kırık ve çatlak bölgelerine emilmesi ve nüfuz etmesidir.



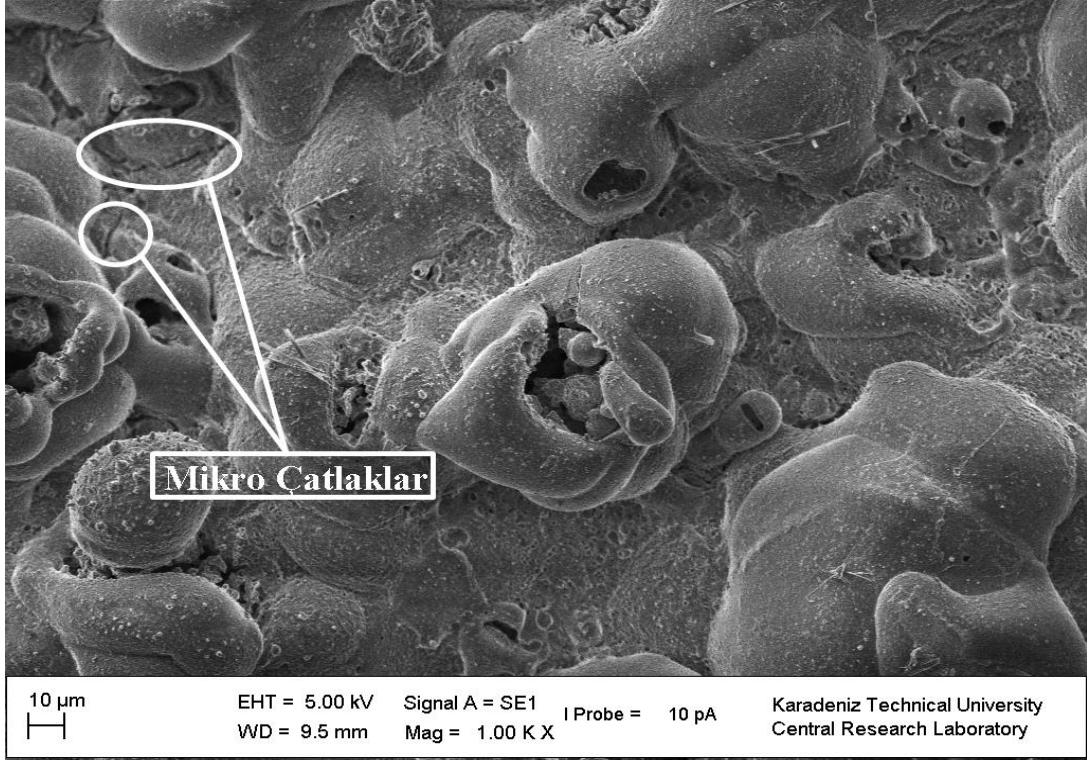
Şekil 38. NAC kodlu numunede oluşan mikro çatlakların SEM görüntüsü



Şekil 39. GAC kodlu numunede oluşan mikro çatlakların SEM görüntüsü



Şekil 40. BAC kodlu numunede oluşan mikro çatlakların SEM görüntüsü

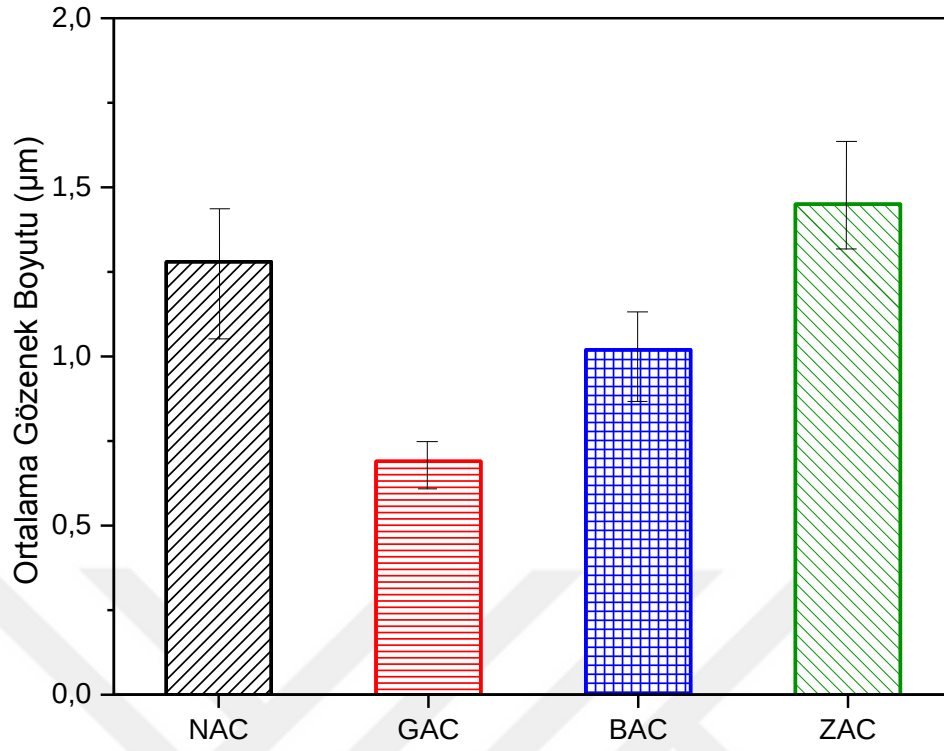


Şekil 41. ZAC kodlu numunede oluşan mikro çatlakların SEM görüntüsü

MAO tekniği için hazırlanan elektrolit çözeltisinin bileşimi, meydana gelen oksit filmin yüzey özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Dolayısıyla farklı elektrolitlerle gerçekleştirilen MAO işlemi sonucu meydana gelen oksit kaplamalar farklı gözenek boyutu ve dağılımlarına sahiptir. Kaplanan bütün numunelerin birbirinden farklı yüzey özelliklerine sahip olması, MAO tekniği esnasında oluşan mikro arkların boyut ve sayılarındaki farklılıklarla ilişkilendirilmektedir (Wanxia vd., 2014).

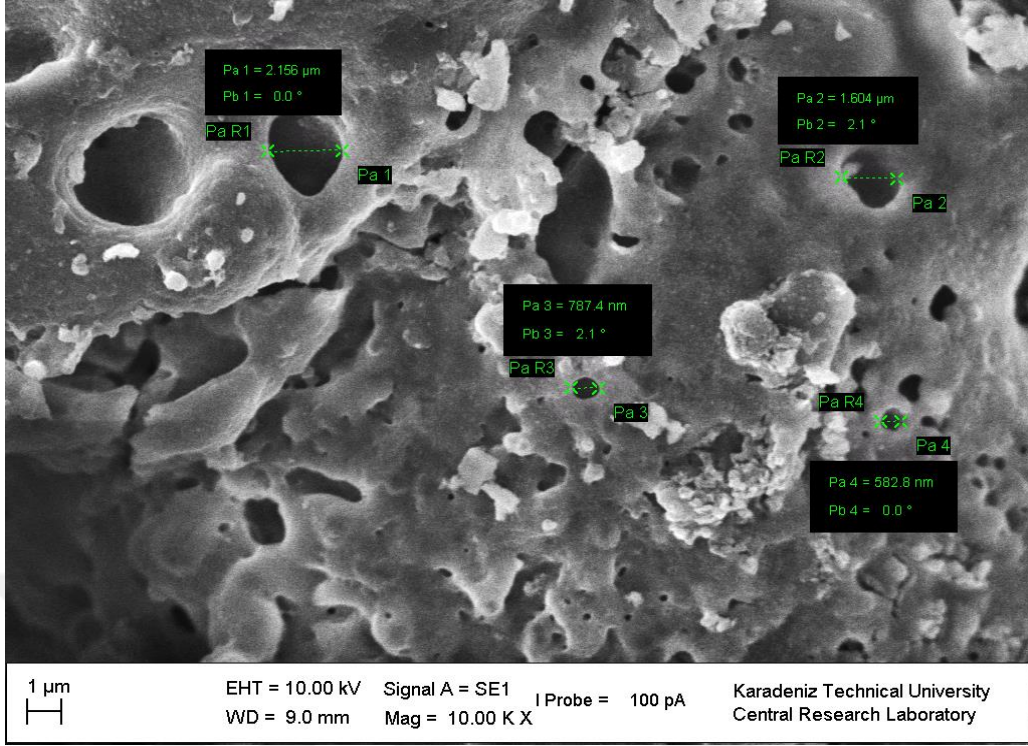
MAO tekniği sonrası kaplama yapılan numunelerin tümünde farklı boyutlarda deşarj kanalları olarak bilinen porozlu yapı oluşmuştur. Bunun sebebi meydana gelen deşarj kanallarının etrafında hızlı katılaşma sonucu amorf bir yapı oluşmasıdır.

Şekil 42’de NAC, GAC, BAC, ZAC kodlu numunelerin ortalama gözenek (por) boyutunu gösteren grafik verilmiştir. Kaplama sonrası NAC, GAC, BAC, ZAC kodlu numunelerde oluşan ortalama por çapı sırasıyla; 1,28 µm, 0,69 µm, 1,02 µm, 1,45 µm’dir. Ortalama por çapı en az GAC kodlu numunede meydana gelirken en fazla ise ZAC kodlu numunede meydana gelmiştir.

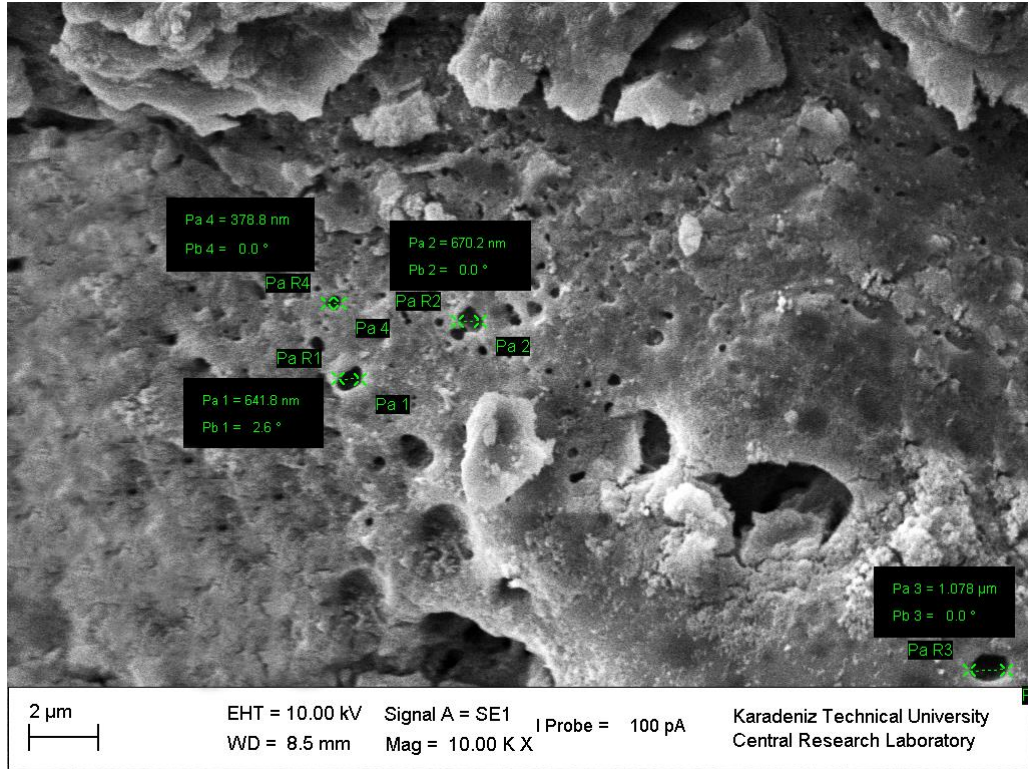


Şekil 42. NAC, GAC, BAC, ZAC kodlu numunelerin ortalama gözenek boyutu

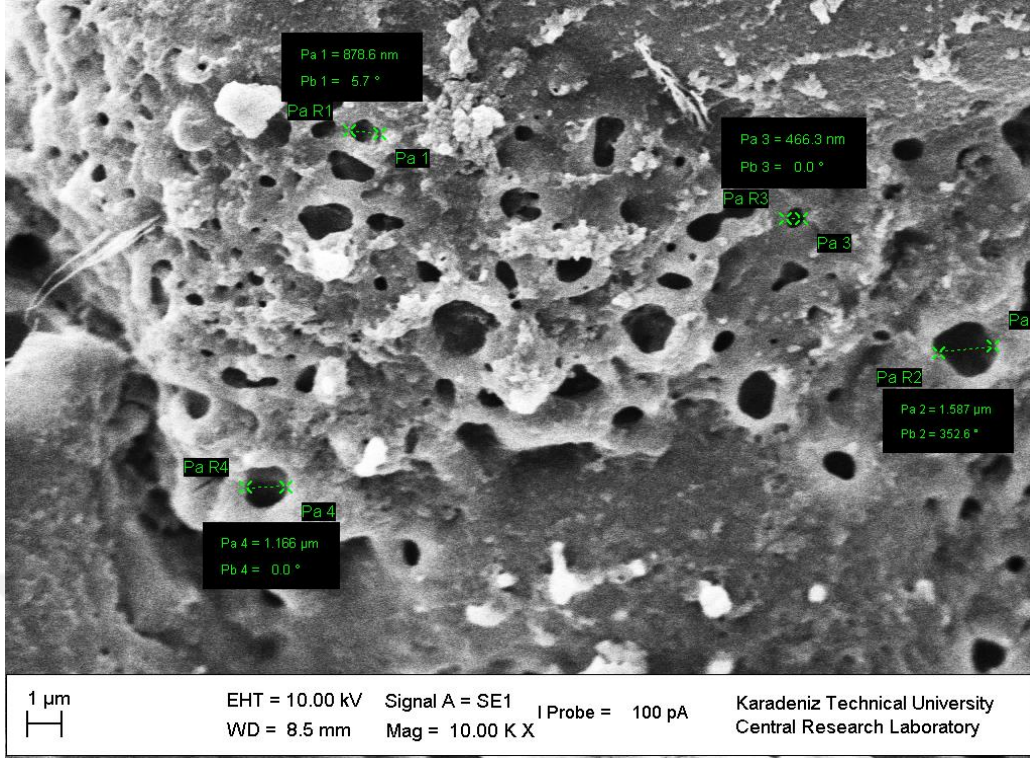
Şekil 43-46’da sırasıyla NAC, GAC, BAC, ZAC kodlu numunelerde meydana gelen por boyutlarının SEM görüntüleri verilmiştir. Kaplanmış numunelerin oksit yapılarında oluşan por sayısı ise en az GAC kodlu numunede olduğu gözlenirken en fazla ise ZAC kodlu numunede olduğu gözlemlenmiştir. GAC kodlu numunede por sayısının az olmasının nedeni grafit partiküllerinin oluşan gözeneklere nüfuz etmesidir.



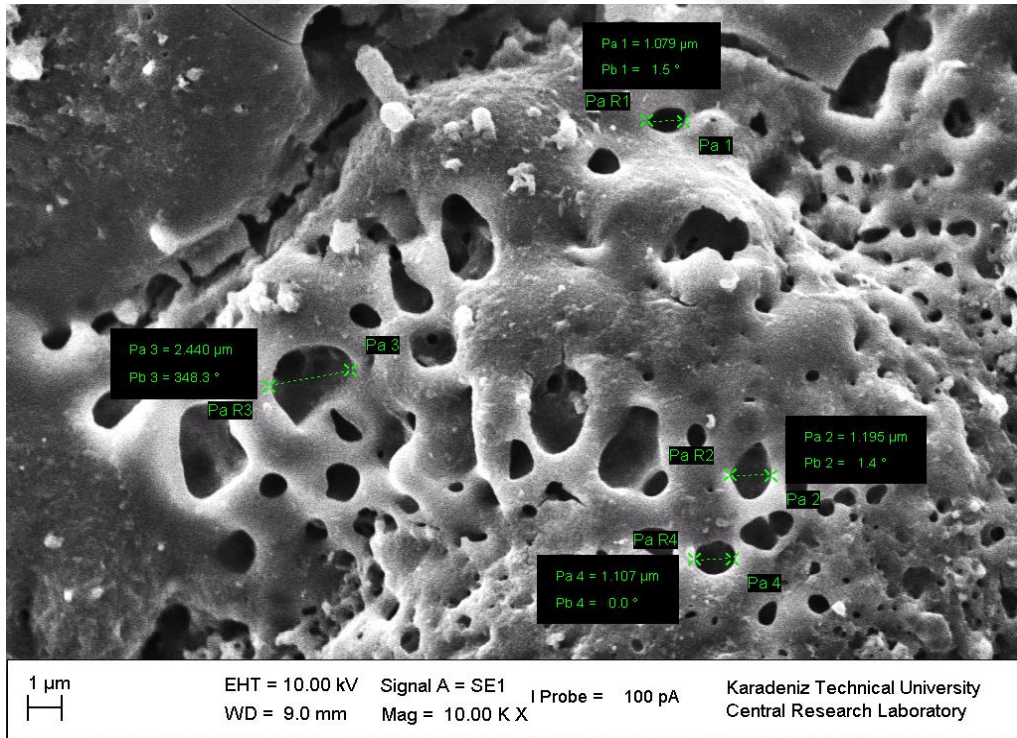
Şekil 43. NAC kodlu numunede meydana gelen por boyutlarının SEM görüntüsü



Şekil 44. GAC kodlu numunede meydana gelen por boyutlarının SEM görüntüsü



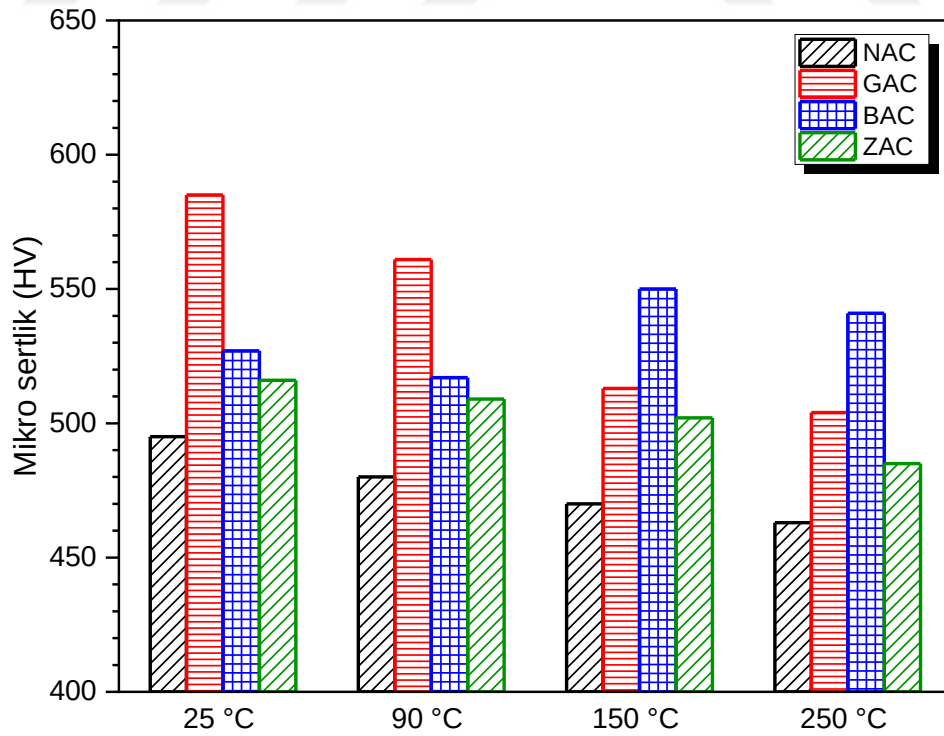
Şekil 45. BAC kodlu numunede meydana gelen por boyutlarının SEM görüntüsü



Şekil 46. ZAC kodlu numunede meydana gelen por boyutlarının SEM görüntüsü

3.5. Mikro Sertlik Deney Sonuçları

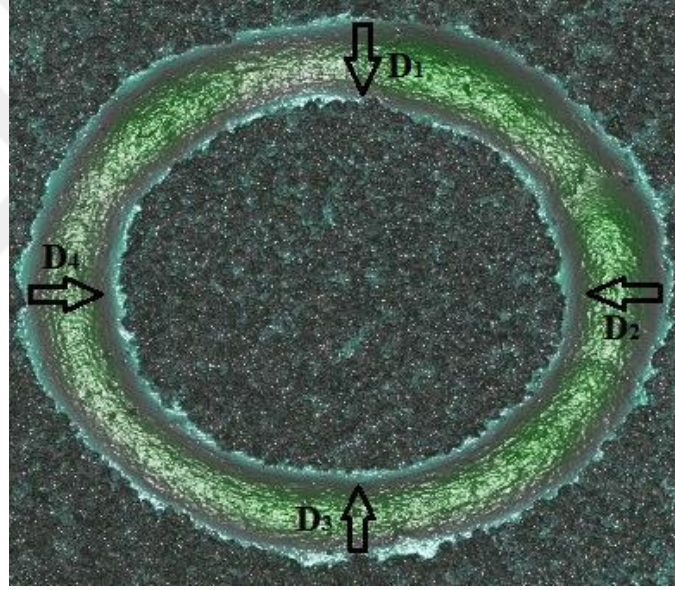
Şekil 47’de numunelerin mikro sertliklerinin sıcaklıkla değişim grafiği verilmiştir. Sertlik değerleri, farklı sıcaklıklarda sürtünme ve aşınma deneyleri gerçekleştirilen numunelerin oksit kaplama kesitleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Numunelerin sertlik değerleri, numune kesitlerinin 5 farklı noktasından ölçülmüş olup ortalamaları alınarak tespit edilmiştir. 25 °C sıcaklığa maruz kalan NAC, GAC, BAC ve ZAC kodlu numunelerin sertlik değerleri sırasıyla 495 HV, 585 HV, 527 HV ve 516 HV olarak ölçülmüştür. 90 °C sıcaklığına maruz kalan NAC, GAC, BAC ve ZAC kodlu numunelerin sertlik değerleri sırasıyla 480 HV, 561 HV, 517 HV ve 509 HV olarak tespit edilmiştir. 150 °C sıcaklığa maruz kalan NAC, GAC, BAC ve ZAC kodlu numunelerin sertlik değerleri sırasıyla 470 HV, 513 HV, 550 HV ve 502 HV olarak ölçülmüştür. 250 °C sıcaklığa maruz kalan NAC, GAC, BAC ve ZAC kodlu numunelerin sertlik değerleri sırasıyla 463 HV, 504 HV, 541 HV ve 485 HV olarak tespit edilmiştir. NAC, GAC ve ZAC kodlu numunelerin sertlik değerleri, sıcaklığın artması ile azaldığı görülmüştür. BAC kodlu numune ise bu durumu sağlamamıştır.



Şekil 47. Numunelerin mikro sertliklerinin sıcaklıkla değişimi

3.6. Tribolojik Deney Sonuçları

MAO tekniği ile kaplanmış numunelerin tribolojik özellikleri incelenmiştir. NAC, GAC, BAC ve ZAC kodlu numunelerin aşınma deneyleri 2N yük altında oda sıcaklığı (25) ve yüksek sıcaklıklarda (90, 150 ve 250 °C) gerçekleştirilmiştir. Diğer aşınma deneyi parametreleri yapılan çalışmalar kısmında verilmiştir. Şekil 48’de ortalama aşınma iz genişliği ve derinliğinin nasıl hesaplanması örnek olarak verilmiştir. Aşınma iz genişliği (W) ve aşınma iz derinliği (D), aşınma izi üzerindeki 4 farklı noktadan alınarak ortalamaları hesaplanmıştır. Verilen bölgelerin iz derinliği ve genişliği yüzey profilometre cihazı ile hesaplanmış olup örnek olarak Şekil 49-52’de gösterilmiştir.



Şekil 48. Numunenin iz derinliği ve genişliğinin ölçüldüğü kısımlar

$$D_1 = 0,095 \text{ mm}$$

$$W_1 = 1,324 \text{ mm}$$

$$D = (D_1 + D_2 + D_3 + D_4) / 4$$

$$D_2 = 0,090 \text{ mm}$$

$$W_2 = 1,536 \text{ mm}$$

$$W = (W_1 + W_2 + W_3 + W_4) / 4$$

$$D_3 = 0,092 \text{ mm}$$

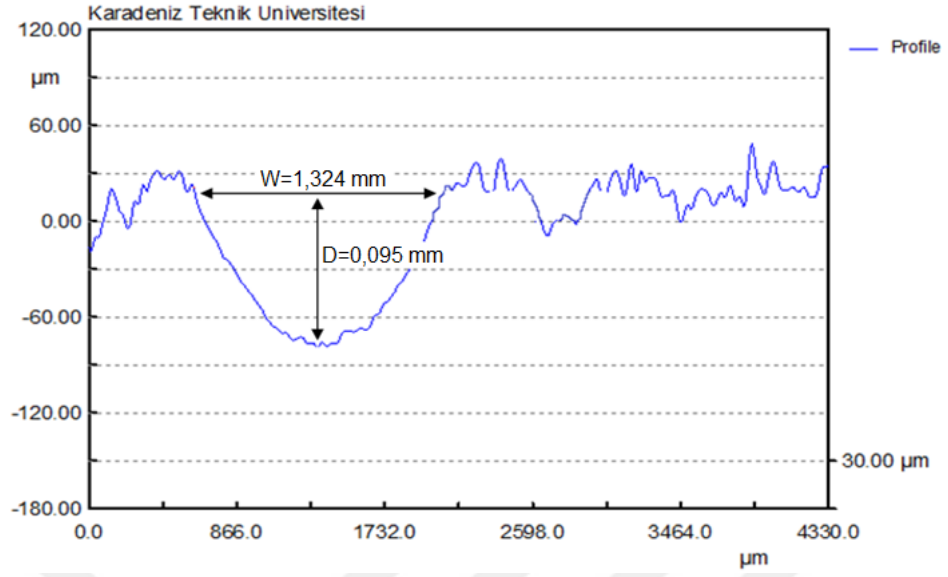
$$W_3 = 1,624 \text{ mm}$$

$$D = 0,095 \text{ mm}$$

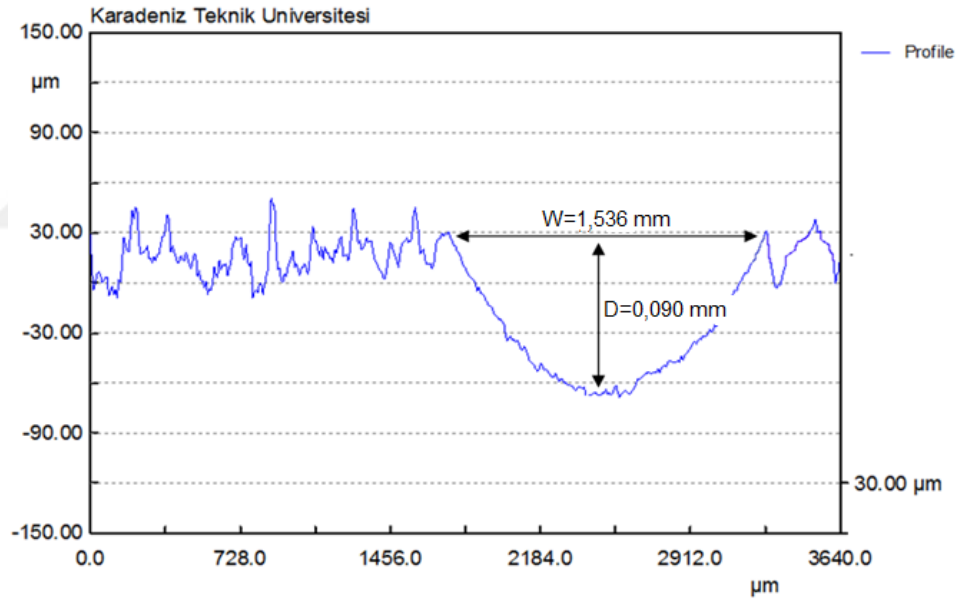
$$D_4 = 0,105 \text{ mm}$$

$$W_4 = 1,653 \text{ mm}$$

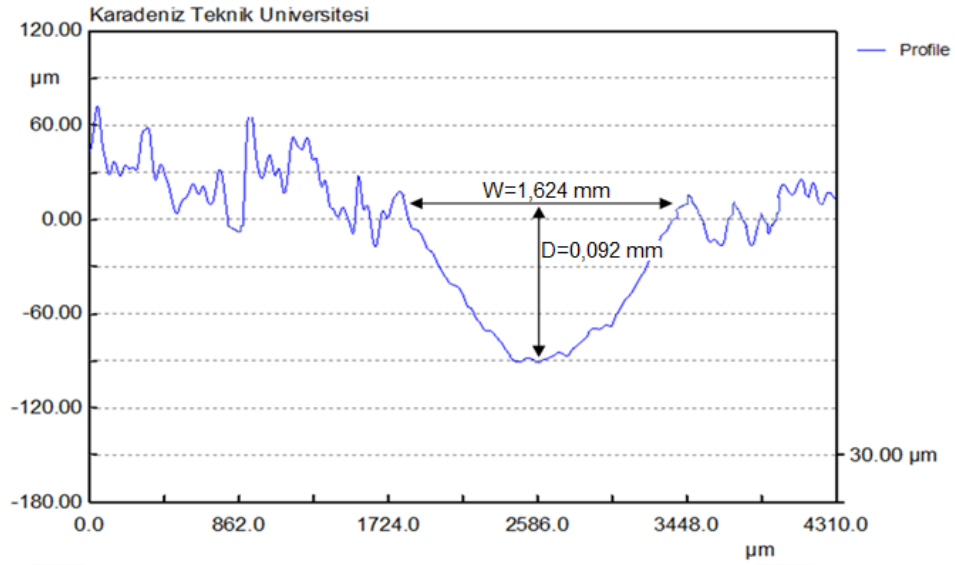
$$W = 1,534 \text{ mm}$$



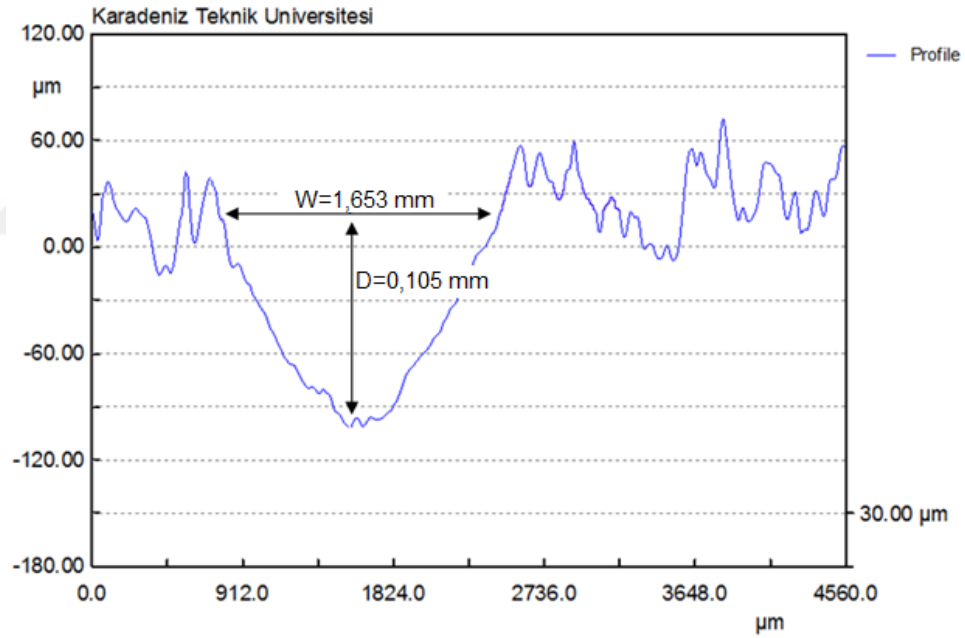
Şekil 49. D₁ bölgesinin aşınma iz genişliği ve derinliği



Şekil 50. D₂ bölgesinin aşınma iz genişliği ve derinliği



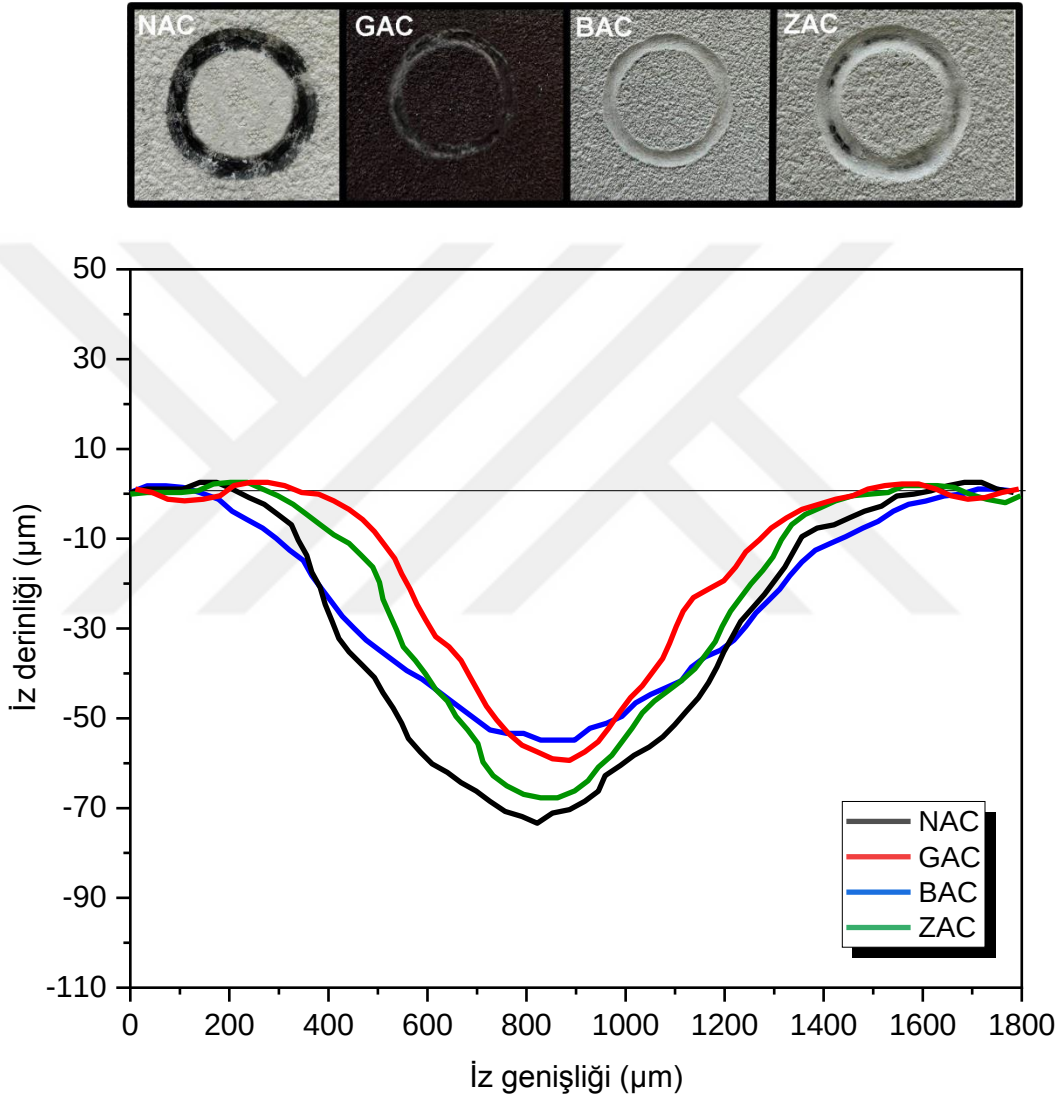
Şekil 51. D₃ bölgesinin aşınma iz genişliği ve derinliği



Şekil 52. D₄ bölgesinin aşınma iz genişliği ve derinliği

Şekil 53’de NAC, GAC, BAC ve ZAC kodlu numunelerin 25 °C sıcaklıkta yapılan sürtünme ve aşınma deneyi sonrası meydana gelen iz derinliği ve genişliği gösterilmiştir. Bütün numunelerin tamamen birbirlerinden farklı iz derinliği ve genişliğine sahip olduğu net olarak görülmektedir. Bu nedenle numunelerin aşınma iz hacimlerinin de farklılık göstermesi beklenmektedir. NAC, GAC, BAC ve ZAC kodlu numunelerin aşınma iz hacimleri sırasıyla 2,025 mm³, 1,495 mm³, 1,692 mm³ ve 1,852 mm³ olarak ölçülmüştür.

Bu durumdan da anlaşılabacağı gibi iz derinliği ve genişliğinin aşınma iz hacmine doğrudan etki ettiği görülmektedir. En yüksek iz genişliği değerine BAC kodlu numune sahip iken en az ise GAC kodlu numunenin sahip olduğu tespit edilmiştir. En yüksek iz derinliği değerine ise NAC kodlu numune sahip iken en az BAC kodlu numunenin sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 53. Numunelerin 25 °C’deki iz derinliği ve genişliği değişimi

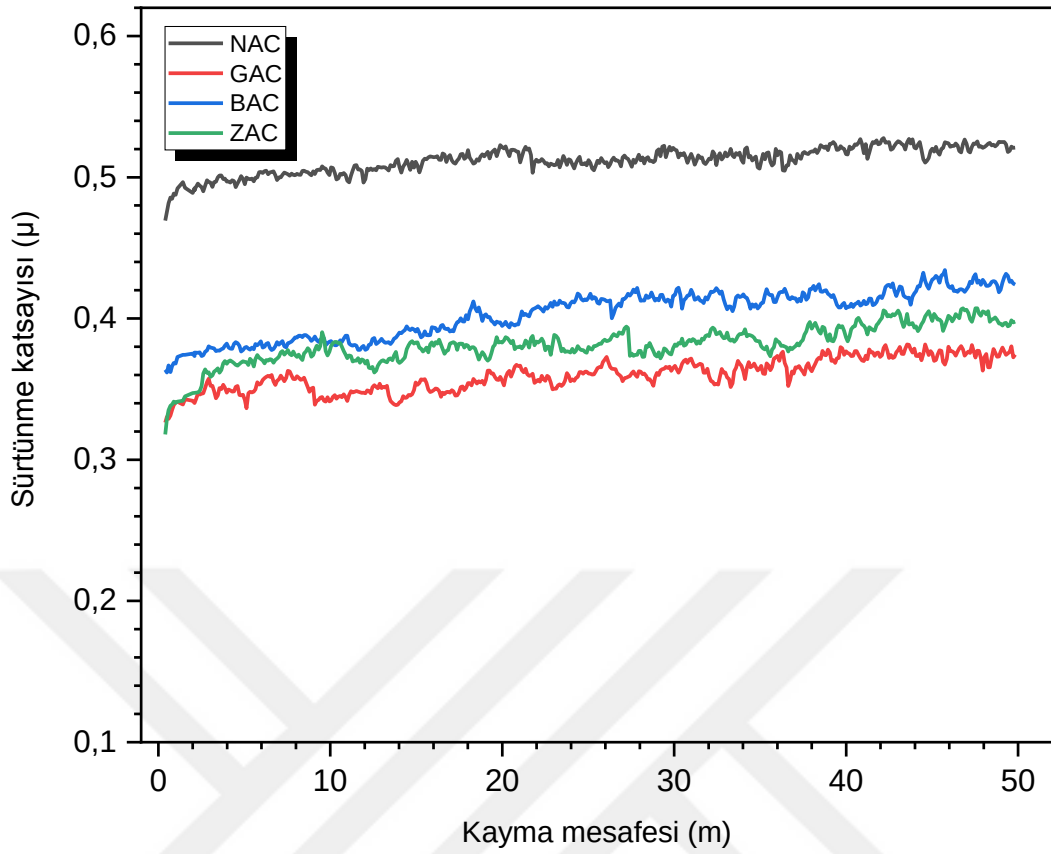
Şekil 54-57’de kaplanmış numunelerin sırasıyla 25, 90, 150 ve 250 °C sıcaklıklarda gerçekleştirilen sürtünme ve aşınma deneylerinin, sürtünme katsayısının kayma mesafe ile değişim grafikleri verilmiştir. Bu grafikler irdelendiğinde, aşınma deneyleri başlangıcında tüm numunelerin sürtünme katsayısı değerlerinde ani bir artış meydana gelmektedir. Aşındırıcı bilye ilk önce sertliği düşük ve oldukça yüksek oranda γ - Al_2O_3 fazı içeren

kaplamanın zayıf, gevşek ve gözenekli olarak bilinen dış tabaka kısmı ile temas etmektedir. Aşındırıcı bilyenin dış tabaka ile teması sonrası numune yüzeylerinde bulunan pasif oksit tabakası kırılır ve böylece gevşek tabakanın hasar görmesi ile bilye - tabaka temas alanının artması sonucu sürtünme katsayısı artmaktadır. Sürtünmenin devam etmesi ile birlikte bilye, aşınan dış tabakadan sonra $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ fazı içeren daha sert ve yoğun ara tabaka ile karşılaşmaktadır. Bu nedenle sürtünme katsayısı hafif dalgalanmalar ile kararlı hale gelme eğilimindedir. MAO tekniği ile kaplanmış numunelerin aşınma testi sırasında aşınma hızı, önce hızlı bir şekilde artar daha sonra ise kararlı hale gelmektedir (Polat, 2009).

Aşınma deneyleri sırasında tüm numunelerin sürtünme katsayıları birbirlerine yakın değerleri takip etmiştir ve ani iniş ve çıkışlar fazla gözlenmeyerek genelde stabil olarak hareket ettiği tespit edilmiştir.

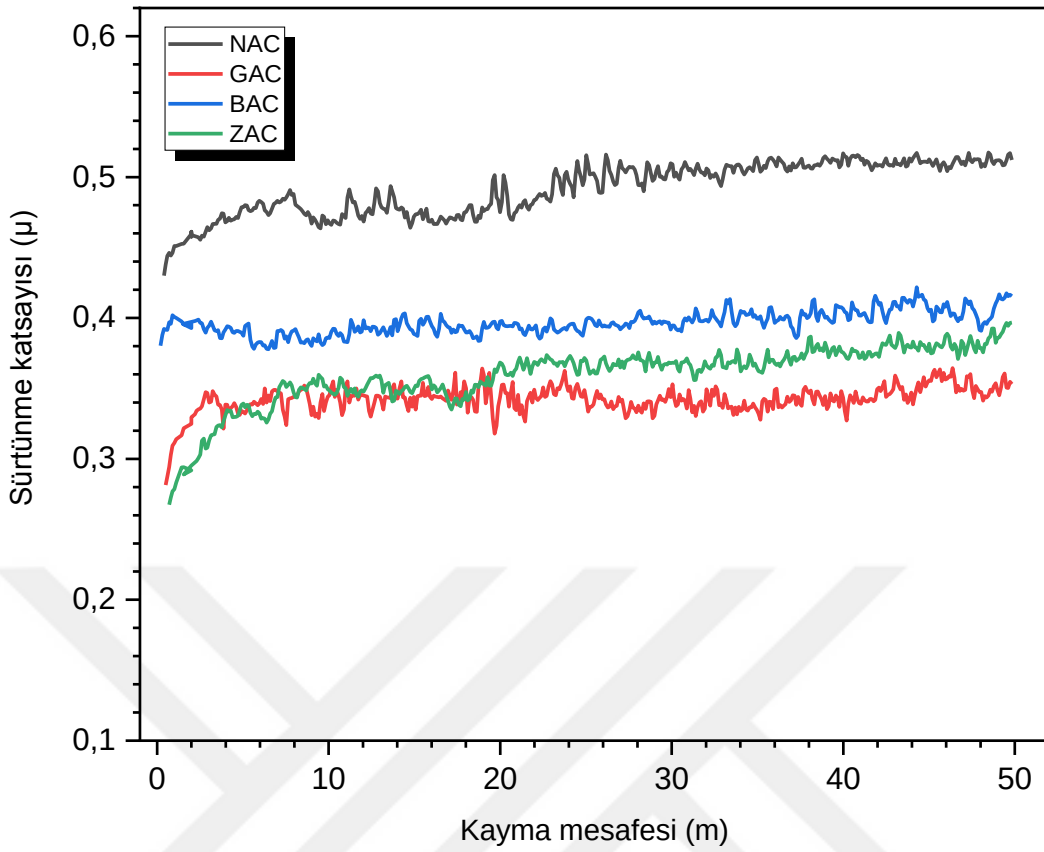
Şekil 54’de NAC, GAC, BAC ve ZAC kodlu numunelerin 25 °C’deki sürtünme katsayısının kayma mesafesi ile değişim grafiği verilmiştir. 25 °C sıcaklıkta yapılan aşınma deneyinde NAC, GAC, BAC ve ZAC kodlu numunelerin ortalama sürtünme katsayısı sırasıyla 0,50, 0,35, 0,40 ve 0,38’dir. En düşük ortalama sürtünme katsayısı GAC kodlu numunede 0,35 iken en yüksek ortalama sürtünme katsayısı ise NAC kodlu numunede 0,50 olarak tespit edilmiştir.

Li ve Di (2017)’nin yaptığı bir çalışmada alüminyum 2024 alaşımına, farklı miktarlarda h-BN partikülleri ilave edilerek MAO kaplama işlemi uygulanmıştır. Yapılan tribolojik test sonucunda sürtünme katsayısının azaldığı görülmüştür. Ma vd., (2014)’nin yaptığı bir çalışmada alüminyum 6061 alaşımına grafit partikülleri eklenerek MAO tekniği ile oksit kaplamalar oluşturulmuştur. Meydana gelen kaplamalara sürtünme ve aşınma testi uygulanarak sürtünme katsayısının düştüğü görülmüştür.



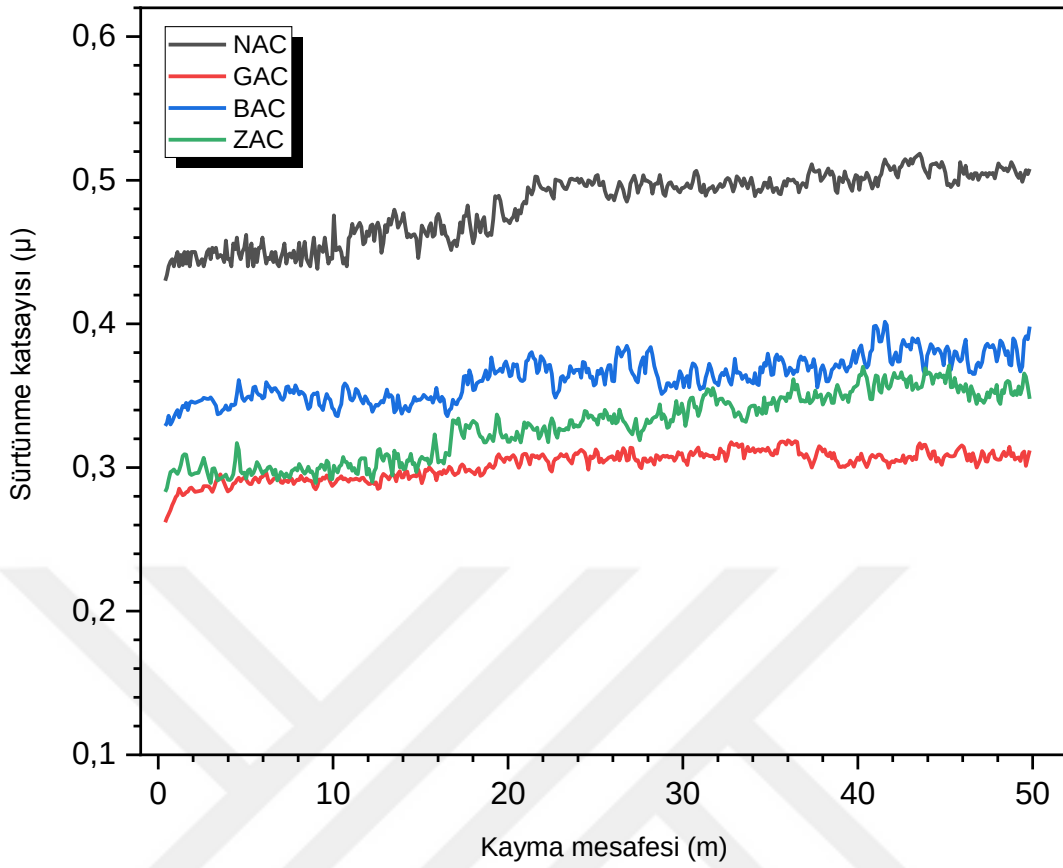
Şekil 54. Numunelerin 25 °C’deki sürtünme katsayısının kayma mesafesi ile değişimi

Şekil 55’de NAC, GAC, BAC ve ZAC kodlu numunelerin 90 °C’deki sürtünme katsayısının kayma mesafesi ile değişim grafiği verilmiştir. 90 °C sıcaklıkta yapılan aşınma deneyinde NAC, GAC, BAC ve GAC kodlu numunelerin ortalama sürtünme katsayısı sırasıyla 0,49, 0,34, 0,39 ve 0,36’dır. En düşük ortalama sürtünme katsayısı GAC kodlu numunede 0,34 ve en yüksek ortalama sürtünme katsayısı ise NAC kodlu numunede 0,49’dur.



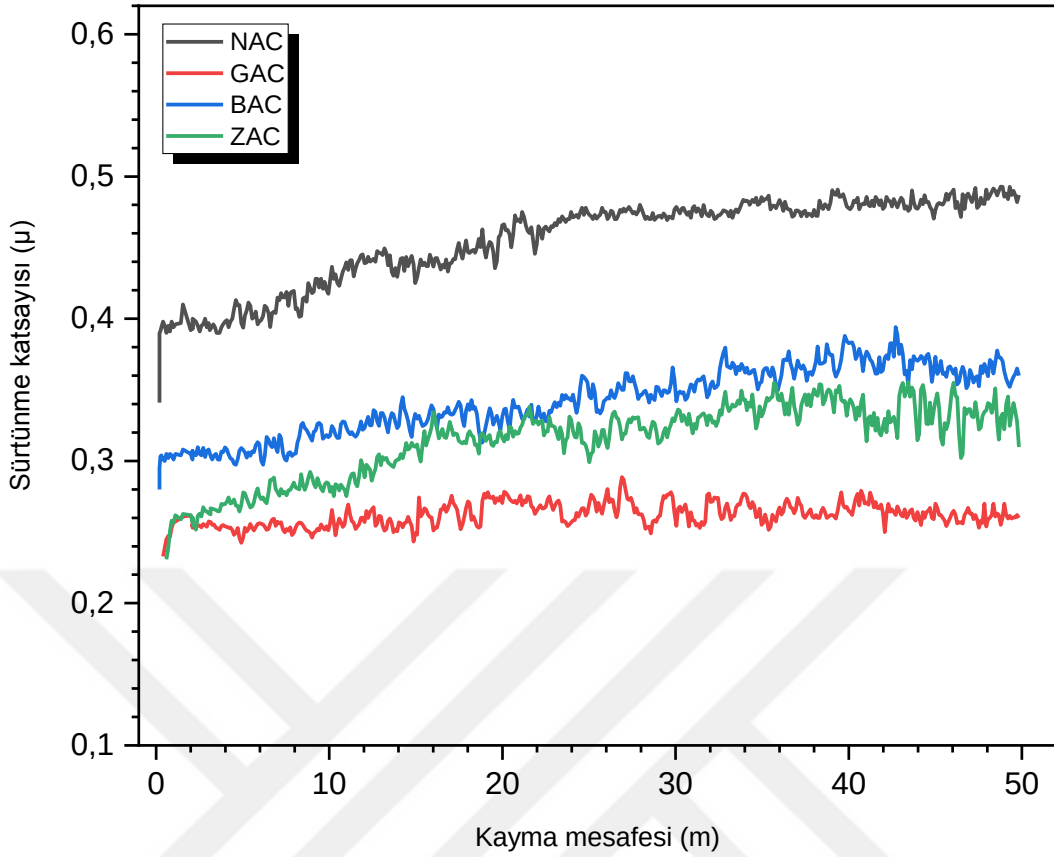
Şekil 55. Numunelerin 90 °C’deki sürtünme katsayısının kayma mesafesi ile değişimi

Şekil 56’de NAC, GAC, BAC ve ZAC kodlu numunelerin 150 °C’deki sürtünme katsayısının kayma mesafesi ile değişim grafiği verilmiştir. 150 °C sıcaklıkta yapılan aşınma deneyinde NAC, GAC, BAC ve ZAC kodlu numunelerin ortalama sürtünme katsayısı sırasıyla 0,47, 0,30, 0,36 ve 0,33’dür. En düşük ortalama sürtünme katsayısı GAC kodlu numunede 0,30 iken en yüksek ortalama sürtünme katsayısı ise NAC kodlu numunede 0,47 olarak bulunmuştur.



Şekil 56. Numunelerin 150 °C’deki sürtünme katsayısının kayma mesafesi ile değişimi

Şekil 57’de NAC, GAC, BAC ve ZAC kodlu numunelerin 250 °C’deki sürtünme katsayısının kayma mesafesi ile değişim grafiği verilmiştir. 250 °C sıcaklıkta yapılan aşınma deneyinde NAC, GAC, BAC ve ZAC kodlu numunelerin ortalama sürtünme katsayısı sırasıyla 0,45, 0,25, 0,34 ve 0,31’dir. En düşük ortalama sürtünme katsayısı GAC kodlu numunede 0,25 olup en yüksek ortalama sürtünme katsayısı ise NAC kodlu numunede 0,45 olduğu tespit edilmiştir.



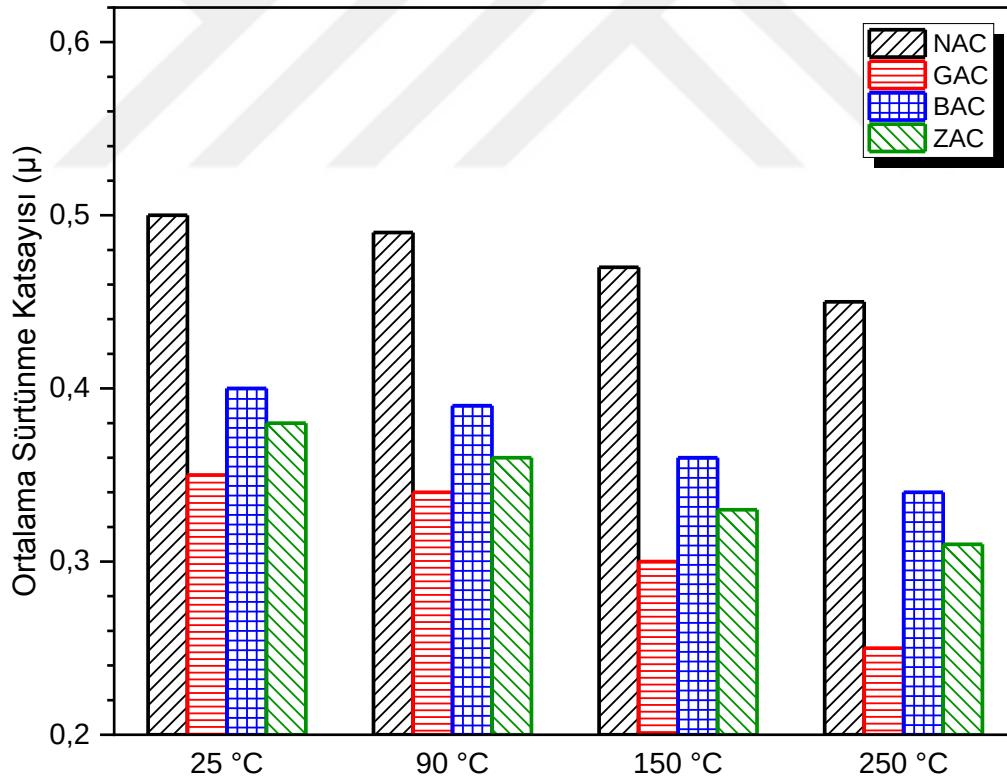
Şekil 57. Numunelerin 250 °C’deki sürtünme katsayısının kayma mesafesi ile değişimi

MAO tekniği ile kaplanmış NAC, GAC, BAC ve ZAC kodlu numunelerin 25, 90, 150 ve 250 °C sıcaklıklarda yapılan aşınma deney sonuçlarına göre, GAC kodlu numunenin dört farklı sıcaklıkta en düşük sürtünme katsayı değerine sahip olduğu gözlenmiştir. MAO tekniği öncesi hazırlanan elektrolit çözelti içerisine grafit partikülleri katılması sonucunda sürtünme katsayısının iyileştiği anlaşılmaktadır. Elektrolit çözelti içerisine katılan grafit partiküllerinin, sürtünme katsayısını azaltması grafitin yağlayıcı özelliğinin bir göstergesidir (Ming, 2012).

Şekil 58’de uygulanan sıcaklığa bağlı olarak ortalama sürtünme katsayısı grafiği verilmiştir. Bu grafiğe göre sürtünme ve aşınma deney sıcaklıklarının artması ile numunelerin sürtünme katsayısı değerlerinin azaldığı, aşınma iz ve derinliklerinin arttığı gözlemlenmiştir. Sürtünme katsayısının azalması yüksek sıcaklıkta altlık malzeme yüzeyinde oluşan ince bir oksidasyon tabakasının yağlayıcı etki oluşturmamasından kaynaklanmaktadır (Yang vd., 2019). Ayrıca GAC, BAC ve ZAC kodlu numunelere ilave edilen katkı maddelerinin yağlayıcı özellikleri, sürtünme katsayısını düşürmede daha etkili olmuştur. GAC kodlu numune her bir sıcaklıkta yapılan sürtünme ve aşınma deneylerinde

diğer numunelere göre en düşük sürtünme katsayısı değerine sahip olduğu net olarak görülmektedir.

Liu ve arkadaşları (2017)'nin yaptıkları bir çalışmada, Al 2219 alaşımı yüzeyinde MAO işlemi gerçekleştirmişlerdir. Oluşturulan kaplamalara 25, 80, 120 ve 160°C'de sürtünme ve aşınma testi uygulanmış ve sürtünme katsayısının sıcaklığın artmasıyla azaldığını ortaya koymuşlardır. Arslan ve arkadaşları (2009)'nin yaptıkları bir çalışmada, farklı sıcaklıklarda alüminyum oksit tabakalarının yüksek sıcaklık aşınma davranışını değerlendirmişlerdir. Artan sürtünme ve aşınma test sıcaklığı ile sürtünme katsayısının azaldığını tespit etmişlerdir. Ayrıca Yang ve arkadaşları (2019)'nin yaptıkları bir çalışmada, 7075 Al-Zn-Mg-Cu altlık kullanılarak MAO kaplama yapmışlardır. Farklı sıcaklıklarda (25, 150 ve 300 °C) yapılan sürtünme ve aşınma test sonrasında kaplamanın tribolojik özellikleri değerlendirmişlerdir. Artan test sıcaklığı ile sürtünme katsayısının azaldığını, aşınma iz genişliği ve derinliğinin arttığını tespit etmişlerdir.



Şekil 58. Numunelerin ortalama sürtünme katsayılarının sıcaklıkla değişimi

NAC, GAC, BAC ve ZAC kodlu numuneler üzerinde farklı sıcaklıklarda yapılan tribolojik deneylerde meydana gelen aşınma iz hacimleri Tablo 8-11'de gösterilmiştir.

Uygulanan sıcaklık arttıkça numunelerin aşınma iz hacimlerinin de arttığı görülmektedir. Yapılan deneylerde tüm sıcaklıklarda en düşük aşınma iz hacmine GAC kodlu numune sahiptir.

Tablo 8. NAC kodlu numunenin farklı sıcaklıklardaki aşınma iz hacim değerleri

Uygulanan Sıcaklık (°C)	Ortalama Genişlik (mm)	Ortalama Derinlik (mm)	Aşınma iz hacmi (mm ³)
25	1,425	0,072	2,025
90	1,464	0,074	2,138
150	1,521	0,073	2,191
250	1,733	0,115	3,934

Tablo 9. GAC kodlu numunenin farklı sıcaklıklardaki aşınma iz hacim değerleri

Uygulanan Sıcaklık (°C)	Ortalama Genişlik (mm)	Ortalama Derinlik (mm)	Aşınma iz hacmi (mm ³)
25	1,262	0,060	1,495
90	1,293	0,072	1,838
150	1,474	0,067	1,949
250	1,628	0,068	2,185

Tablo 10. BAC kodlu numunenin farklı sıcaklıklardaki aşınma iz hacim değerleri

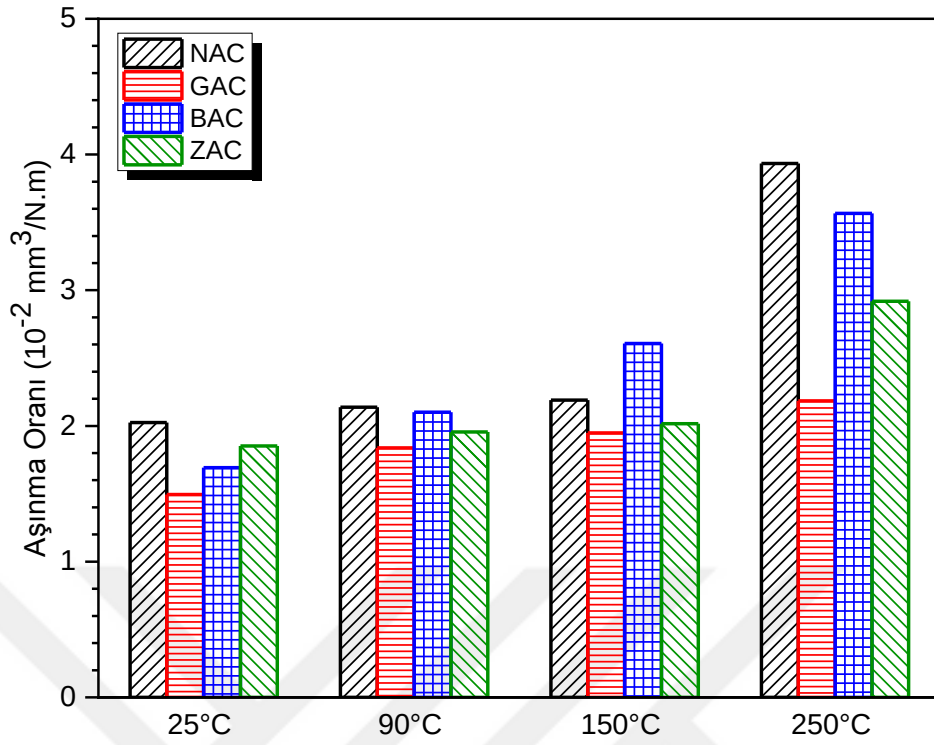
Uygulanan Sıcaklık (°C)	Ortalama Genişlik (mm)	Ortalama Derinlik (mm)	Aşınma iz hacmi (mm ³)
25	1,558	0,055	1,692
90	1,690	0,063	2,101
150	1,716	0,077	2,608
250	1,882	0,096	3,566

Tablo 11. ZAC kodlu numunenin farklı sıcaklıklardaki aşınma iz hacim değerleri

Uygulanan Sıcaklık (°C)	Ortalama Genişlik (mm)	Ortalama Derinlik (mm)	Aşınma iz hacmi (mm ³)
25	1,380	0,068	1,852
90	1,524	0,065	1,955
150	1,363	0,075	2,017
250	1,590	0,093	2,919

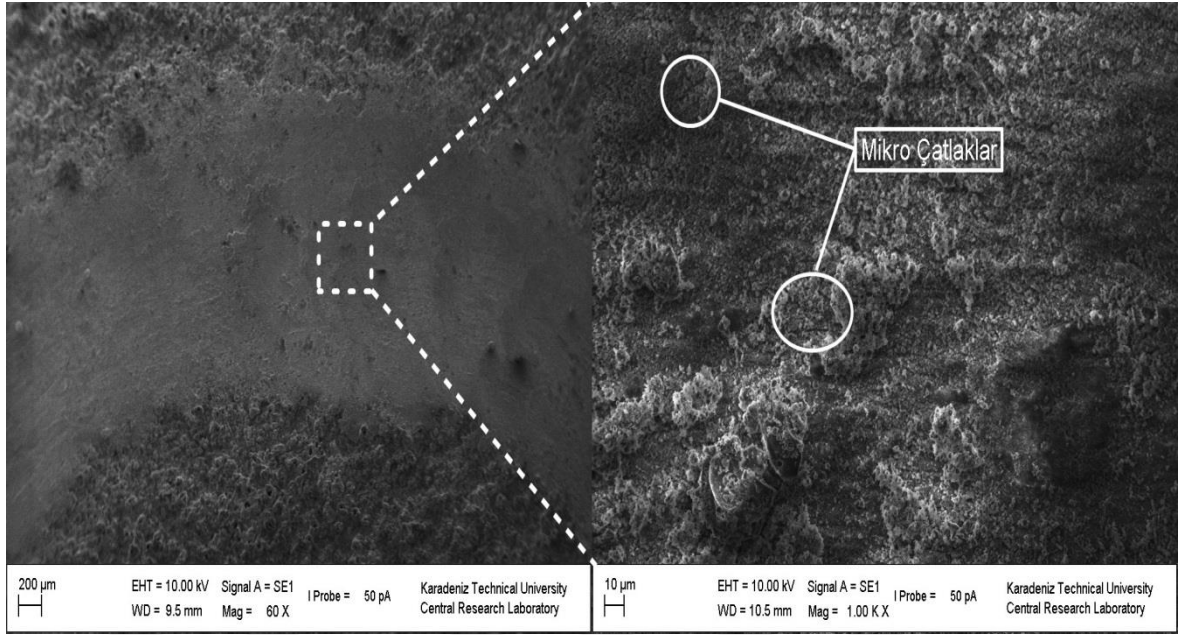
Yüksek sıcaklıkta aşınmanın daha şiddetli hale geldiği anlaşılmakta ve aşınan yüzeylerde aşınma kalıntıları daha fazla gözlenmektedir. Numunelerin aşınma test sıcaklığının artması ile aşınma iz hacimleri de artmaktadır (Yang vd., 2019). Oda sıcaklığı (25 °C) ve yüksek sıcaklıklarda (90, 150 ve 250 °C) yapılan aşınma ve sürtünme deneylerinde en düşük aşınma iz hacmine GAC kodlu numunenin sahip olduğu görülmektedir. Elektrolit çözelti içerisindeki grafit partikülleri yağlayıcı olarak davranarak ve numune yüzeyinde oluşan mikro boşluklara nüfuz ederek yüzey pürüzlülüğünü düşürmektedir. Yüzey pürüzlülüğünün düşmesiyle kaymaya karşı bir direnç oluşmaktadır. Aşınma iz hacminin azalmasıyla aşınma direnci artmaktadır (Polat, 2009).

Şekil 59'da numunelerin farklı sıcaklıklardaki aşınma oranları verilmiştir. Sürtünme ve aşınma deneyi sırasında uygulanan sıcaklığın artması ile birlikte aşınma derinliği ve aşınma genişliğinin arttığı görülmektedir. Sıcaklığın artması ile tüm numunelerin aşınma oranları artmıştır (Yang vd., 2019), (Liu vd., 2018). Tüm sıcaklıklarda en düşük aşınma oranları GAC kodlu numunede görülmüştür. 25 °C sıcaklıktaki en düşük aşınma oranı, GAC kodlu numunede $1,495 \times 10^{-2} \text{ mm}^3/(\text{N.m})$ olarak bulunmuştur. 90 °C sıcaklıktaki en düşük aşınma oranı, GAC kodlu numunede $1,838 \times 10^{-2} \text{ mm}^3/(\text{N.m})$ olarak tespit edilmiştir. 150 °C sıcaklıktaki en düşük aşınma oranı, GAC kodlu numunede $1,949 \times 10^{-2} \text{ mm}^3/(\text{N.m})$ olduğu görülmüştür. 250 °C sıcaklıktaki en düşük aşınma oranı, GAC kodlu numunede $2,185 \times 10^{-2} \text{ mm}^3/(\text{N.m})$ olarak tespit edilmiştir. Uygulanan yük ve sıcaklık şartları altında aşınma derinliği, kaplanmış numunelerin hiçbirinde altlık malzemeye kadar ulaşmamıştır. Ayrıca sürtünme ve aşınma deneyi sonrası numune yüzeylerinde meydana gelen etkiler sonucunda abrazyon aşınma türünün gerçekleştiği anlaşılmaktadır.



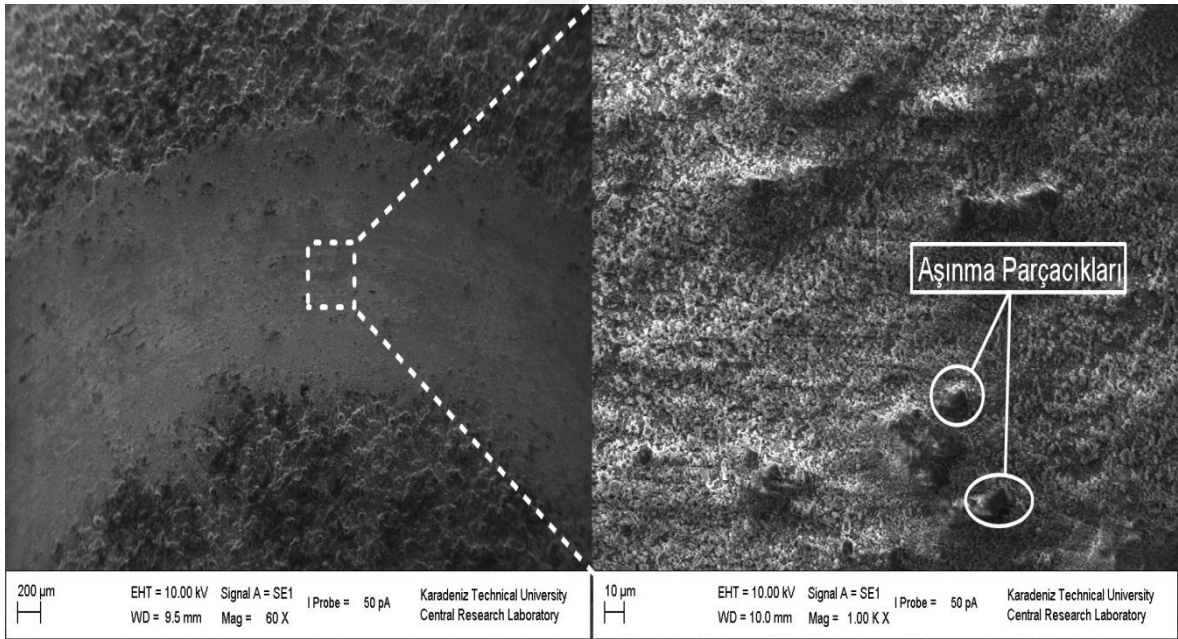
Şekil 59. Numunelerin farklı sıcaklıklardaki aşınma oranları

Şekil 60-63’de NAC, GAC, BAC ve ZAC kodlu numunelerin sırasıyla oda sıcaklığı (25 °C) ve yüksek sıcaklıklardaki (90, 150 ve 250 °C) aşınma izlerinin SEM görüntüleri gösterilmiştir. Aşınma izlerinin SEM görüntüleri irdelendiğinde, aşınma sırasında sertliği düşük ve gevşek yapıdaki γ -Al₂O₃ fazının bulunduğu dış tabakanın aşınması ile sert ve yoğun ara tabakanın α -Al₂O₃ fazının meydana geldiği tespit edilmiştir. Aşınma deneyi yapılan numunelerde aşınmanın sebep olduğu kayma yönüne paralel olarak aşınma izleri, aşınma kalıntıları ve malzeme aktarımı gibi birçok etkiler görülmüştür. Bunların yanı sıra mikro çatlak gibi etkilerin varlığı da tespit edilmiştir. MAO kaplamaların mekanik özellikleri açısından oldukça büyük öneme sahip olan mikro çatlaklar; kaplamanın sertliğini düşürmede büyük role sahiptir (Curran & Clyne, 2006).



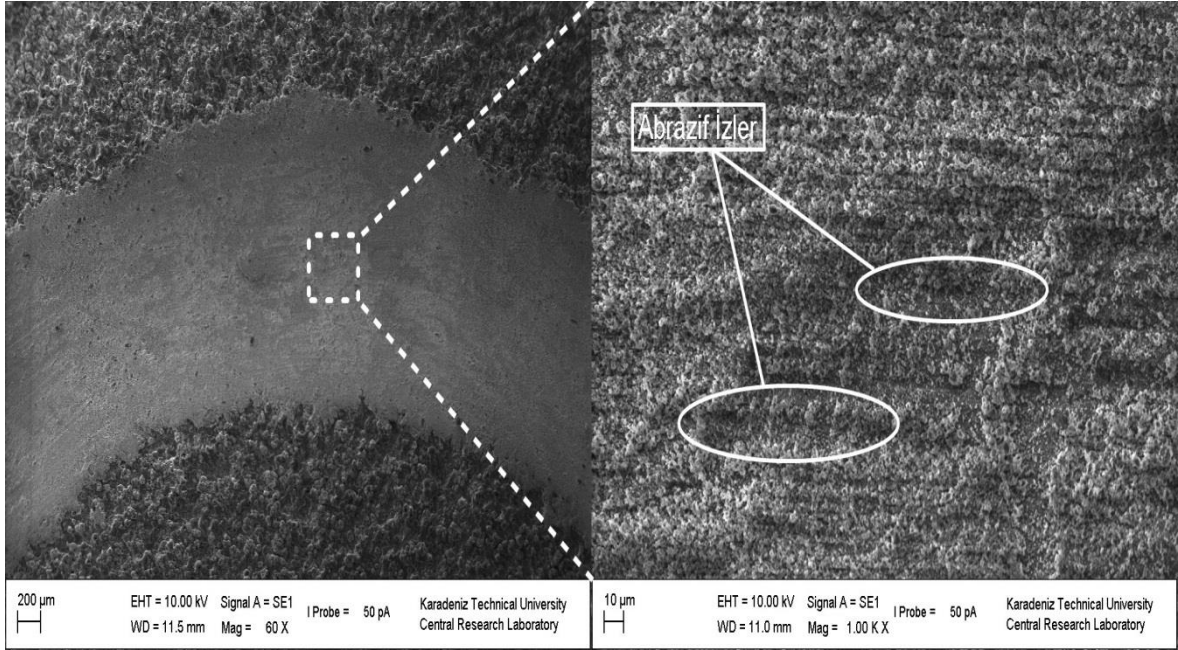
a)

Şekil 60. 25 °C’de numunelerin aşınma izleri a) NAC b) GAC c) BAC d) ZAC

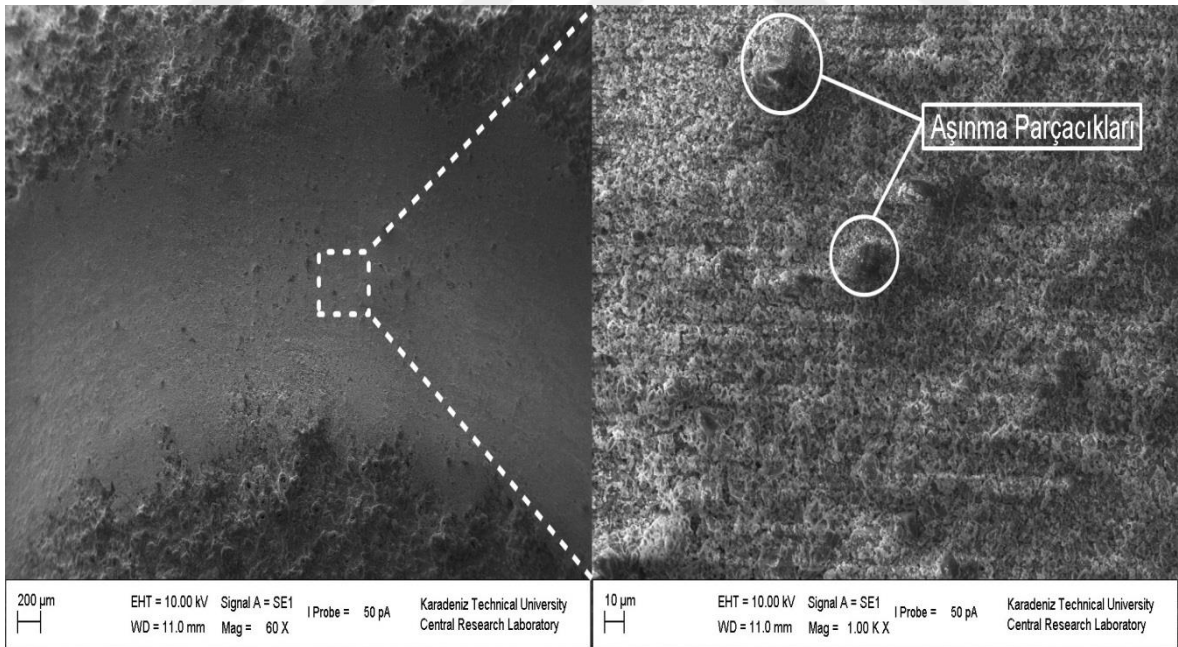


b)

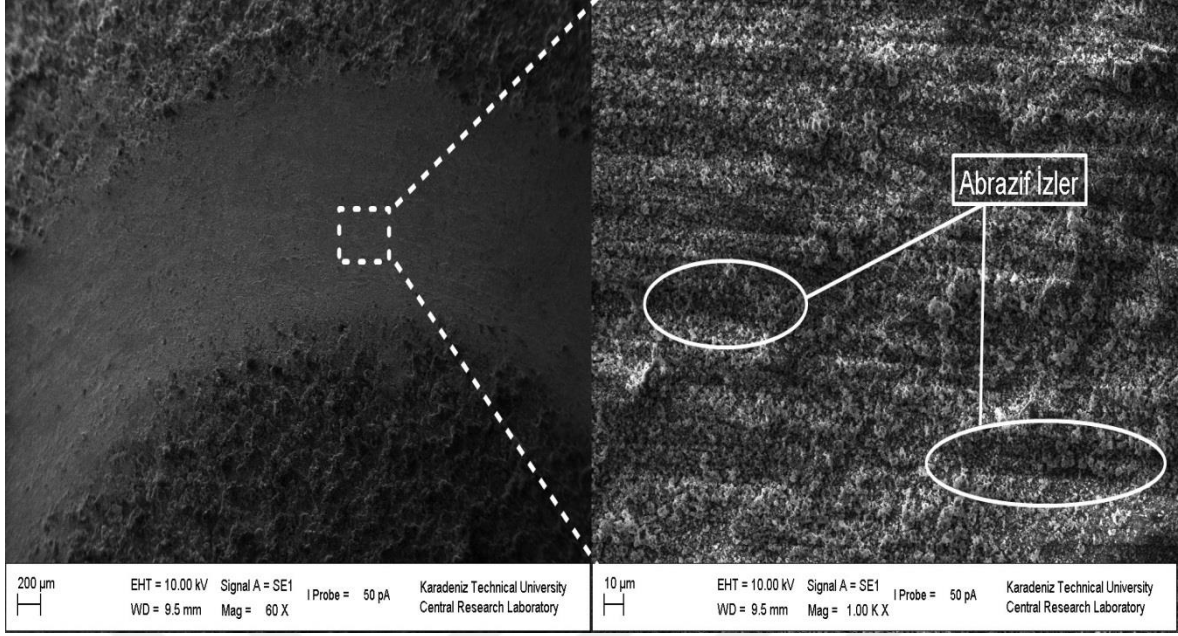
Şekil 60'ın devamı



c)

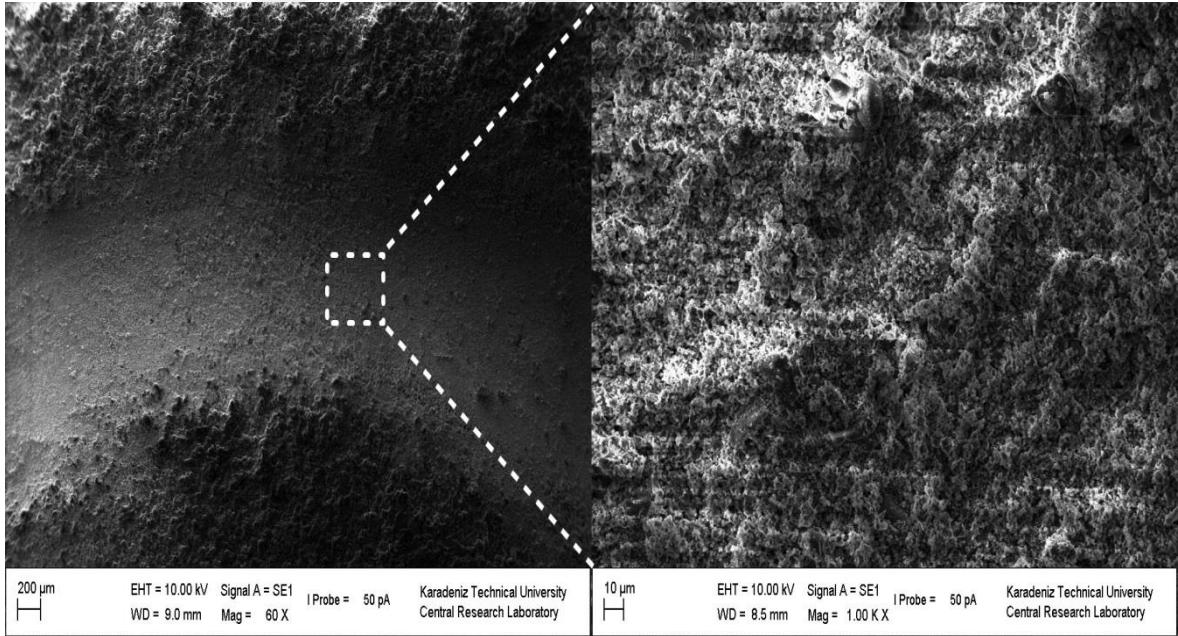


d)



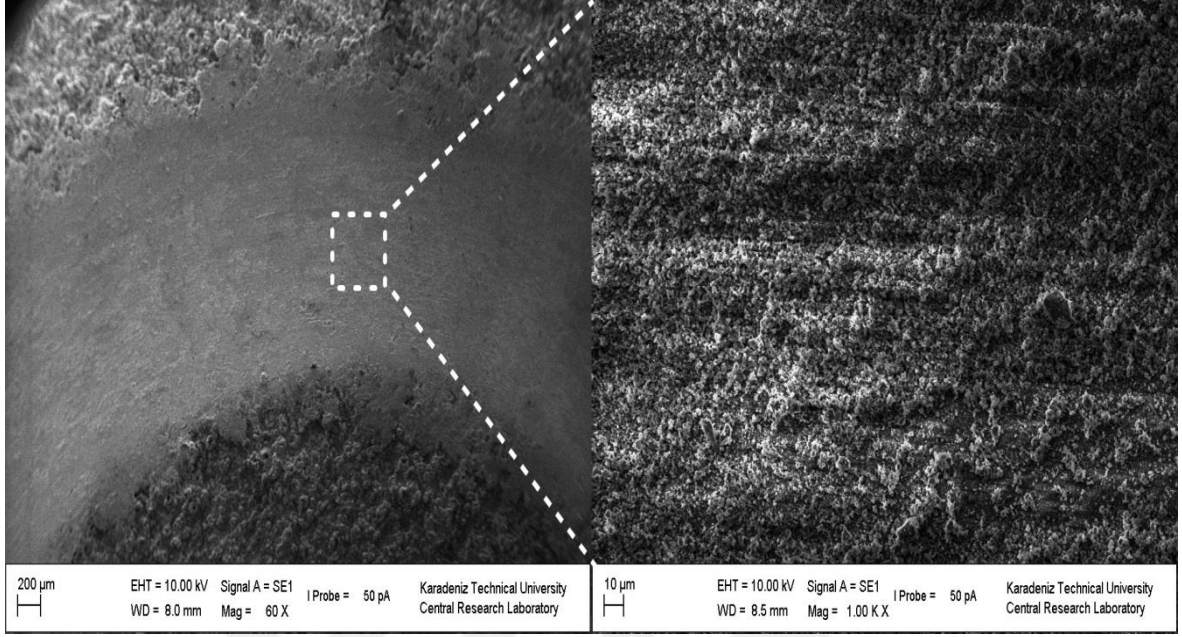
a)

Şekil 61. 90 °C’de numunelerin aşınma izleri a) NAC b) GAC c) BAC d) ZAC

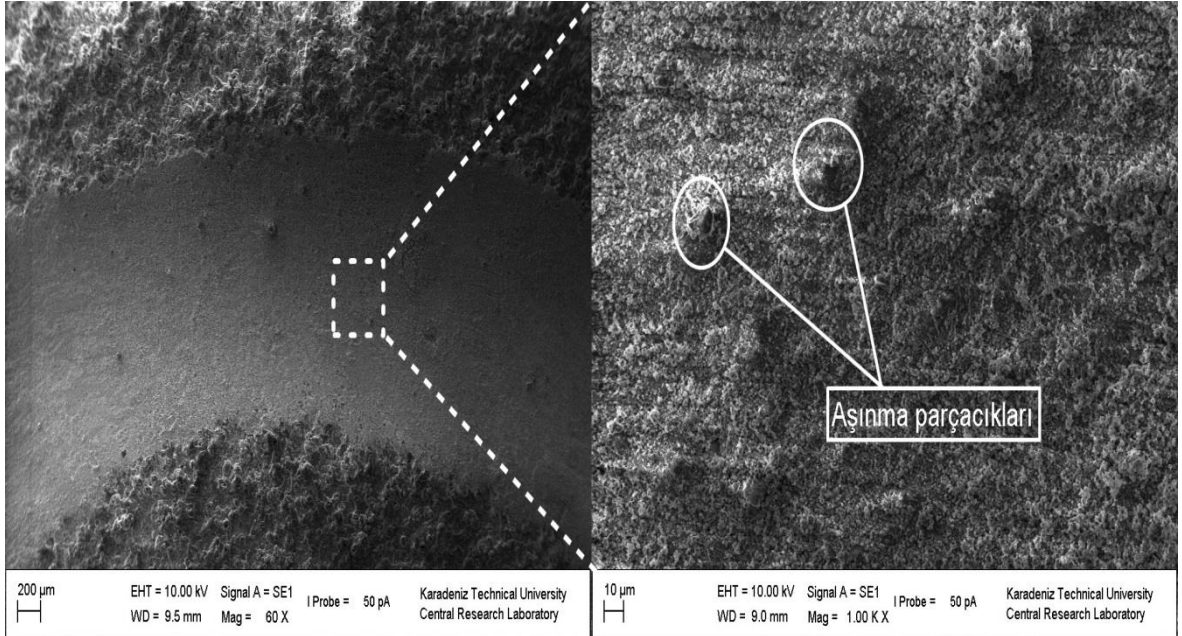


b)

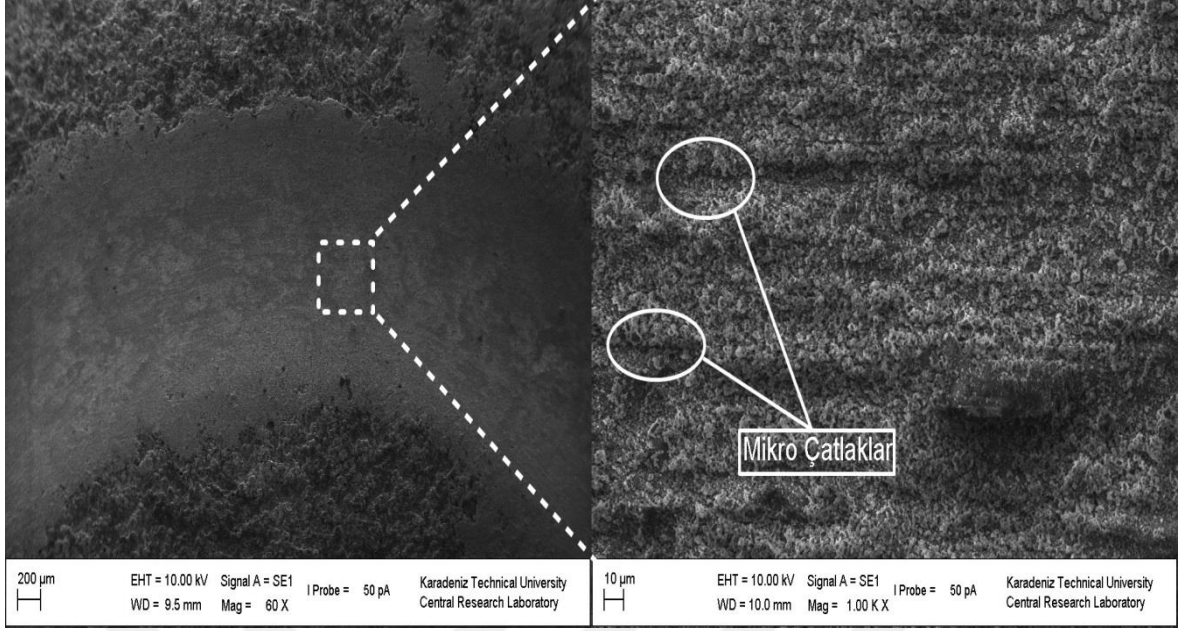
Şekil 61'in devamı



c)

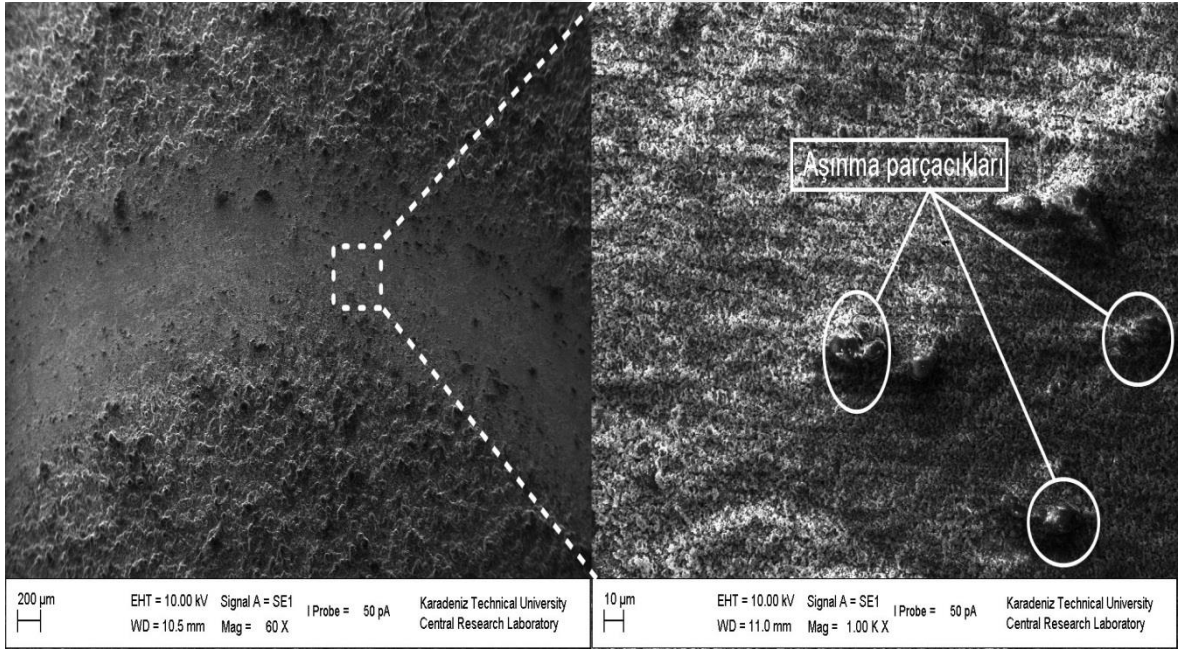


d)



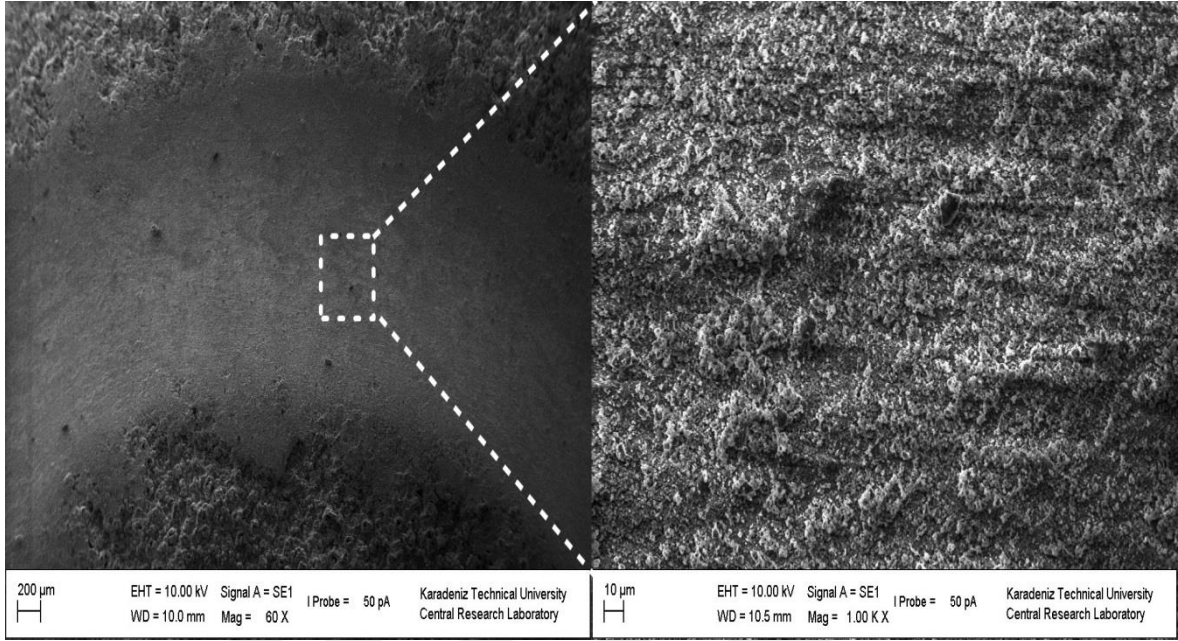
a)

Şekil 62. 150 °C’de numunelerin aşınma izleri a) NAC b) GAC c) BAC d) ZAC

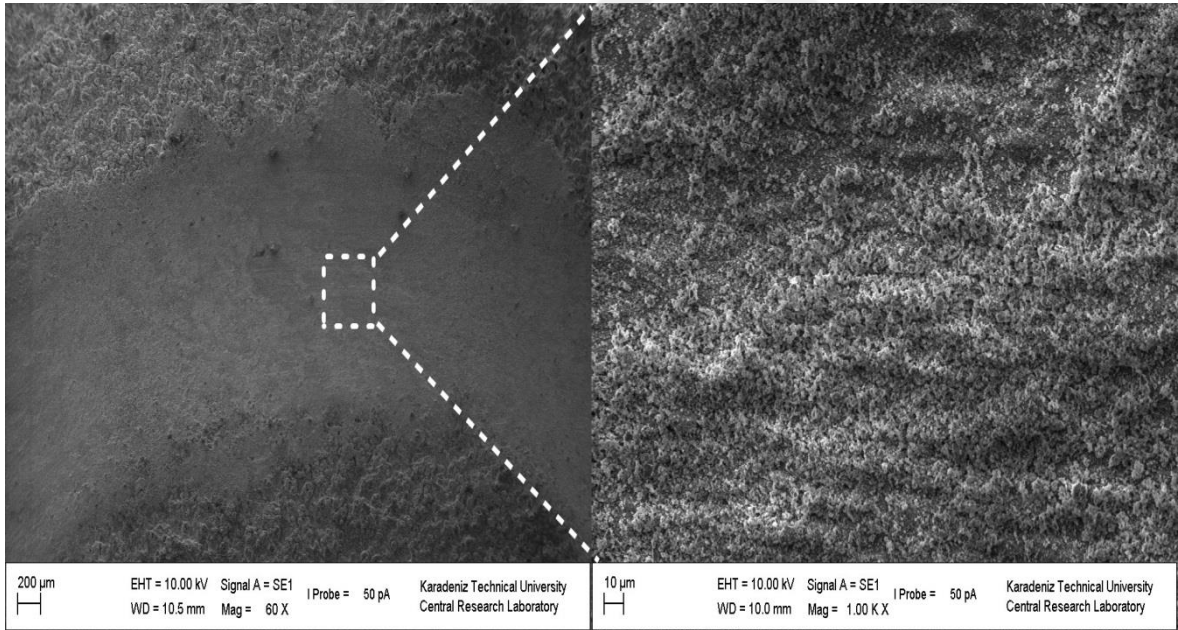


b)

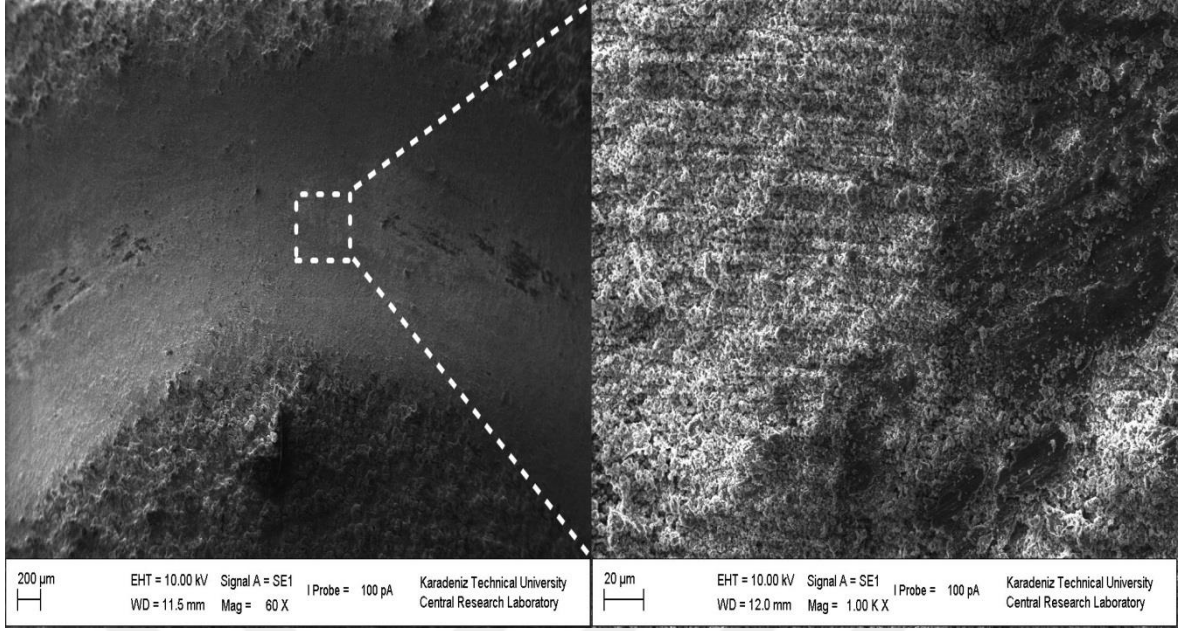
Şekil 62'nin devamı



c)

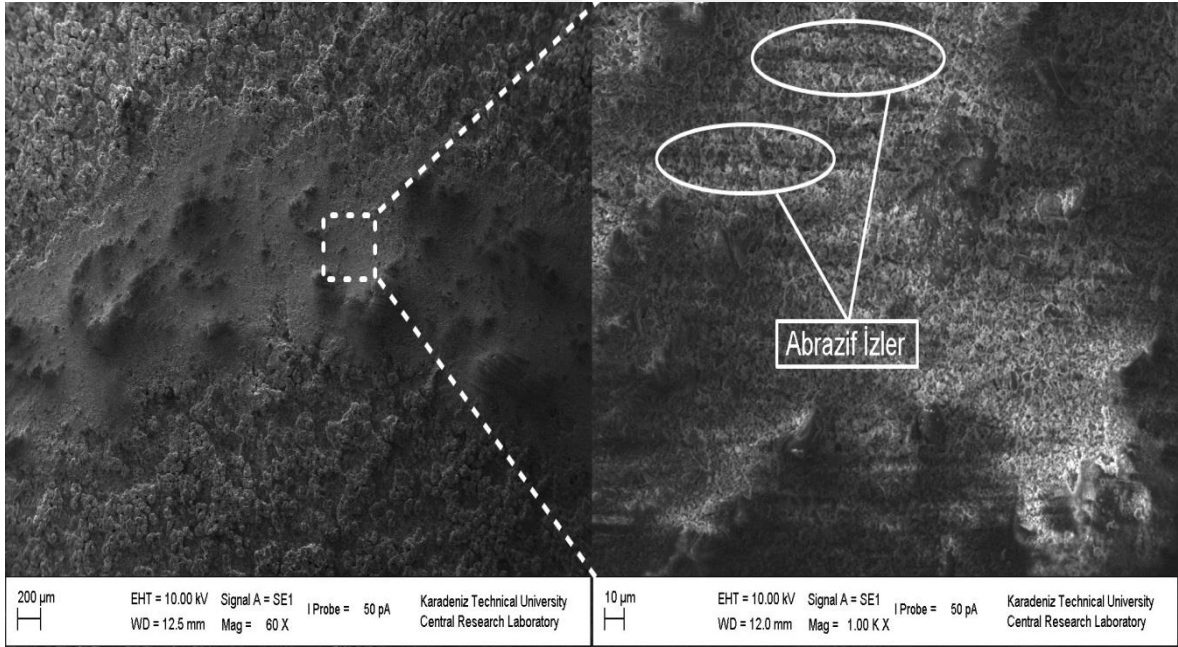


d)



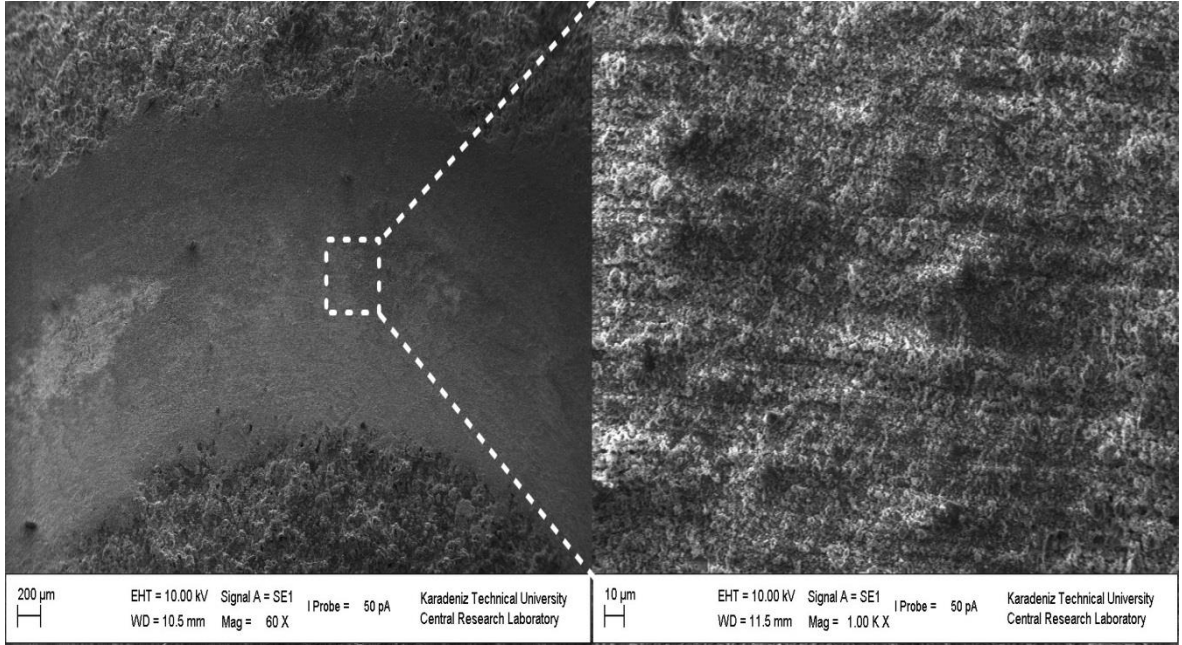
a)

Şekil 63. 250 °C’de numunelerin aşınma izleri a) NAC b) GAC c) BAC d) ZAC

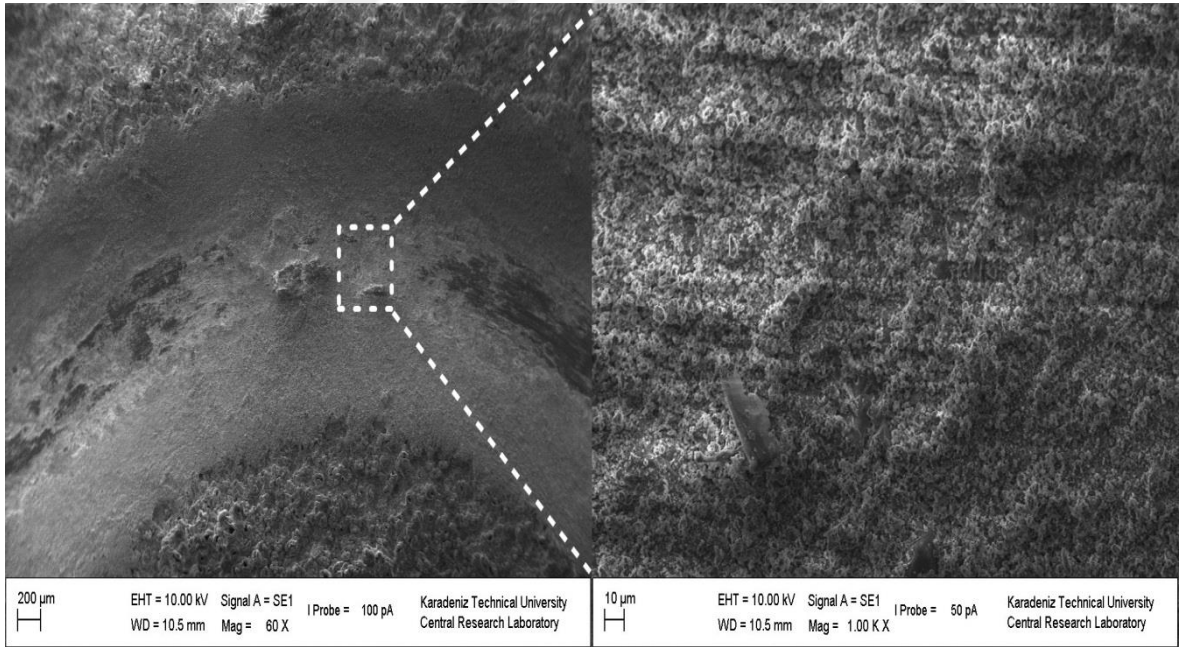


b)

Şekil 63'ün devamı



c)



d)

Aşınma testi sırasında kaplama yüzeyinde ve kaplamanın yapıştığı kısımlarda gerilmeler oluşmaktadır. Oluşan bu gerilmeler numunelerin dayanımından daha fazla olması durumunda çatlaklar meydana gelir ve ilerlemeye devam ederler. Kaplama

sertliğinin ve meydana gelen gerilmelerin homojen olarak dağılmaması da çatlak ve kırıkların oluşumu için başlıca etkenler arasındadır. Kaplama kalınlığı arttıkça kaplamanın kırılmaya karşı gösterdiği direnç artmaktadır. MAO işlemi sırasında oluşan deşarj kanallarından çıkan kaplama ürünleri yüzeyde toplanarak zayıf, gözenekli bölgeler meydana getirir ve aşınma sırasında bu bölgelerde çatlaklar oluşmaktadır (Polat, 2009).



4. SONUÇLAR

Bu çalışmada elektrolit içerisine grafit, h-BN ve ZnO katkı maddeleri ilave edilerek ve edilmeden MAO yöntemiyle Al 5052 alaşımı yüzeyinde oksit kaplamalar oluşturulmuştur. Daha sonra oluşturulan oksit kaplamaların yüzey özellikleri, farklı sıcaklıklarda sürtünme ve aşınma davranışlarına etkileri incelenmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda açıklanmıştır.

1. Bu yöntemle elektrolit içerisine katkı maddeleri ilave edilerek Al 5052 alaşımı yüzeyinde başarılı bir şekilde kaplama oluşturulmuştur.
2. MAO yöntemiyle kaplanan Al 5052 alaşımının yüzey pürüzlülüğü artmıştır. GAC kodlu numune 8,82 μm yüzey pürüzlülük değeri ile diğer numunelere oranla daha düşüktür. En yüksek yüzey pürüzlülük değeri (13,34 μm) ise ZAC kodlu numunede olduğu görülmüştür.
3. Elektrolit içerisine ilave edilen katkı maddeleri kaplama kalınlık değerlerini etkilemiştir. En düşük ortalama kaplama kalınlığı değeri (118,5 μm) GAC kodlu numunede, en yüksek değer (230,1 μm) ise ZAC kodlu numunede ölçülmüştür.
4. XRD verileri incelendiğinde; Al, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$, grafit, h-BN ve ZnO fazlarına rastlanmıştır. Ayrıca bütün numunelerin dış katmanında $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ fazı, iç katmanında ise $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ fazının olduğu tespit edilmiştir. GAC, BAC ve ZAC kodlu numunelerde sırasıyla grafit, h-BN ve ZnO pikleri görülmüştür.
5. MAO kaplama sonrasında bütün numunelerde gözenekli bir yapı meydana gelmiştir. En düşük ortalama gözenek boyutuna GAC kodlu numune 0,69 μm değeri ile sahip olduğu görülmüştür. En yüksek ortalama gözenek boyutuna sahip olan 1,45 μm ile ZAC kodlu numunedir.
6. En düşük ortalama gözenek sayısına GAC kodlu numune sahip iken en yüksek ise ZAC kodlu numune sahiptir.
7. Yapılan sürtünme ve aşınma deneyleri sırasında numuneler farklı sıcaklıklara maruz kalmıştır. NAC, GAC, BAC ve ZAC kodlu numunelerin sertlik değerleri genelde sıcaklığın artması ile azaldığı tespit edilmiştir.
8. Bütün numunelerin sürtünme ve aşınma deneylerindeki ortalama sürtünme katsayısı değerleri sıcaklığın artması ile düşmüştür. En düşük ortalama sürtünme katsayısı değeri 25 °C sıcaklıkta 0,35 değeri ile GAC kodlu numunede

ölçülmüştür. En yüksek ortalama sürtünme katsayısı değeri ise 25 °C sıcaklıkta 0,50 değeri ile NAC kodlu numunede ölçülmüş.

9. Farklı sıcaklıklarda yapılan sürtünme ve aşınma deneylerinde sıcaklığın artması ile tüm numunelerin aşınma iz hacmi ve aşınma oranlarının arttığı görülmüştür. Yapılan deneylerde en düşük aşınma iz hacmi ($1,495 \text{ mm}^3$) ve aşınma oranı ($1,495 \times 10^{-2} \text{ mm}^3/(\text{N.m})$) değerlerine 25 °C sıcaklıkta GAC kodlu numunenin sahip olduğu tespit edilmiştir.
10. Numunelerin aşınma izlerinin SEM görüntülerinde abrazif izler, mikro çatlaklar ve aşınma parçacıklarının varlığı net olarak görülmüştür.



5. ÖNERİLER

1. Temel elektrolit içerisine farklı konsantrasyonlarda katkı maddeleri ilave edilerek MAO yöntemi ile oluşturulan kaplamalar karakterize edilebilir.
2. Farklı yük, sıcaklık ve kayma hızlarında sürtünme ve aşınma deneyleri yapılarak tribolojik performansı araştırılabilir.
3. Farklı ortamlarda numunelerin korozyon performansları incelenebilir.



6. KAYNAKLAR

- Ağdacı, G. E. (2019). Dökme Demir-Nikel Alüminat-Bronz Tabakalı Kompozitin Sürtünme ve Aşınma Davranışları. E.S.O.G.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir.
- Alcala, G. (2002). Mechanical Properties of Amorphous Anodic Alumina and Tantara Films Using Nanoindentation. *Nanotechnology*, 13, 451-455.
- Arslan, E., Totik Y E.E. Demirci., Vangölü, Y., Alsaran, A. & Efeoğlu, I. (2009). High Temperature Wear Behavior of Aluminum Oxide Layers Produced by AC Micro Arc Oxidation. *Surface & Coatings Technology*, 204, 829-833.
- Atamert, S. (1988). Stability, Wear Resistance and Microstructure of Iron. Cobalt and Nickel-Based Hardfacing Alloys, PhD Thesis, University of Cambridge, Doktora Tezi, İngiltere.
- Aydın, H. (2018). Nanoyapılı Hegzagonal Bor Nitrür Üretimi ve Karakterizasyonu. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 30(2), 269-275.
- Bağcı, M., (2010). Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Erozyon Aşınma Davranışının İncelenmesi. S.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Konya.
- Barros, B. S., Barbosa, R., Dos Santos, N. R., Barros, T. S. & Souza, M. A. (2006). Synthesis and X-Ray Diffraction Characterization of Nano Crystalline ZnO Obtained by Pechini Method. *Inorganic Materials*, 42(12), 1348-1351.
- Ceviz, M. (2021). AA7075-T6 Alaşımı ve AA7075-T6 Alaşımı Alt Tabaka Üzerine HVOF Termal Sprey ile Kaplanmış WC-10Co-4Cr Kaplamanın Farklı Sıcaklıklardaki Sürtünme ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Edirne.
- Cuhadaroğlu, A., Kara, D. & Kara, E. (2018). Grafit: Bir Genel Değerlendirme. *Teknik Bilimler Dergisi*, 8, 14-33.
- Curran, J.A., Clyne, T.W. (2006). Porosity in Plasma Electrolytic Oxide Coatings. *Acta Materialia*, 54, 1985-1993.
- Çetin, H. (2005). Alüminyum Alaşımı Hafif Metal Levhaların Prizmatik Derin Çekmede Biçimlendirilebilirlik Özelliklerinin Araştırılması. S.D.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Isparta.
- Çuhadaroğlu, A. D., Kara, E. (2018). Grafit Bir Genel Değerlendirme. *Teknik Bilimler Dergisi*, 8(1), 15-30.
- Davis, J. R. (2001). *Light Metals and Alloys. Alloying Understanding the Basics*, ASM International, USA.

- Dearnley, P. A., Gummersbach, J., Weiss, H., Ogwu, A. A. & Davies, T. J. (1999). The Sliding Wear Resistance and Frictional Characteristics of Surface Modified Aluminium Alloys Under Extreme Pressure. *Wear*, 225, 127-134.
- Demirci, E.E. (2014) Manyetik Sıçratma (Cfubms) ve Mikro Ark Oksidasyon (MAO) Teknikleri İle Ti6Al4V Alaşımının Dubleks Yüzey Modifikasyonu. A.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Erzurum.
- Eyre, T. S., (1991). Friction and Wear Control in Industry. Surface Engineering.
- Fanya J., Honghui, T. (2006). Structure and Microwave Absorbing Properties of Fe-particle Containing Alumina Prepared by Micro Arc Oxidation. *Surface and Coating Technology*, 201, 292-295.
- Fanya, J. (2006). Improvement of Surface Porosity and Properties of Alümina Films by Incorporation of Fe Micro Grains in Micro Arc Oxidation. *Applied Surface Science*, 253, 863-868.
- Gök, M. S., (2008). Düşük ve Orta Karbonlu Çeliklerin Yüzeyine TIG Kaynak Metoduyla Kaplanan Östenitik Paslanmaz Çelik Tozunun Aşınma Direncine Karbür İçeriğinin Etkisinin Araştırılması. F.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elâzığ.
- Guidong, X., Jiong. L. I. (2007). Power Source Types Effects on the Properties of Oxide Ceramic Coatings on Mg Alloys. *Naturel Science and Foundation of China*, 150-152.
- Günyüz, M. 2007. Titanyum, ve Alaşımlarının Mikro Ark Oksidasyon Yöntemiyle Kaplanması. İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Halling, J. (1976). Introduction to Tribology. Wykeham Publications Ltd, London.
- Huang P., Han Y. (2004). Surface Modification of Titanium Implant by Microarc Oxidation and Hydrothermal Treatment. *Journal of Biomedical Materials*, 70B, 187-190.
- Hussein, R. O. (2010). Spectroscopic Study of Electrolytic Plasma and Discharging Behaviour During The Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) Process. *Applied Physics*, 43, 10, 105-203.
- Hussein, R. O., Nie, X. & Northwood, D. O. (2013). An Investigation of Ceramic Coating Growth Mechanisms in Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) Processing. *Electro Chimica Acta*, 112, 111-119.
- Hussein, R., Northwood D. O. & Nie, X. (2010). Coating Growth Behavior During the Plasma Electrolytic Oxidation Proces. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 28, 4, 766-773.
- <https://www.askimya.com/urunler/cinko-oksit-46.html>. Kimyasal Ürünler, 21 Temmuz 2023.

- Jacobs, M. H. (1999). Introduction to Aluminum as an Engineering Material. TALAT Lecture 1201, European Aluminium Association.
- Jin, J., Huan, L. & Xiaohan, L. (2017). Friction and Wear Behavior of Micro Arc Oxidation Coatings on Magnesium Alloy at High Temperature. *Rare Materials and Engineering*, 46, 5, 1202-1206.
- Karabaşoğlu, M., (2008). Aşınma Deney Cihazı Tasarımı ve İmalatı. S.A.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya.
- Karaoğlu, Y., (2006). Bir Aşınma Test Cihazının Tasarımı ve İmalatı. S.A.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya.
- Karl-Heinz, Z. G., John, A. Williams. (1987). Microstructure and Wear of Materials. Tribology Series, 10.
- Krishna, R. L. (2006). A Comparative Study of Tribological Behavior of Micro Arc Oxidation and Hard Anodized Coatings. *Wear*, 261, 1095-1101.
- Krishna, R. L., Somaraju, K. R. C. & Sundararajan, G. (2003). The Tribological Performance of Ultra-hard Ceramic Composite Coatings obtained through Microarc Oxidation. *Surface and Coatings Technology*, 163-164, 484-490.
- I. Levin, & D. Brandon. (1998). Metastable alumina polymorphs: crystal structures and transition sequences. *J. Am. Ceram. Soc.* 81,1995–2012.
- Lee, J. M., Kanga, S. B. & Hana, J. (2007). Dry Sliding Wear of MAO Coated A356/20 vol.% SiCp Composites in the Temperature Range 25–180 °C. *Wear*, 264, 75-85.
- L, Magniez, C., Da Silva Tusch, S., Fontana, S., Cahen, J., Martina, C. H. & Erola, G. (2023). Henriona, Plasma electrolytic oxidation of aluminium in electrolytes containing various concentrations of carbon black nanoparticles. *Surface and Coatings Technology* 473.
- Li, H.X., Song, R.G., Ji, Z, G. (2013). Effect of nano additive TiO₂ on performance of micro-arc oxidation coatings formed on 6063 aluminum alloy. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 23, 406-411.
- Li, Q., Liang, J., Liu, B., Peng, Z. & Wang, Q. (2014). Effects of Cathodic Voltages on Structure and Wear Resistance of Plasma Electrolytic Oxidation Coatings Formed on Aluminium Alloy. *Applied Surface Science*, 297, 176-181.
- Li, Q., Yang, W., Liu, C., Wang, D. & Liang, J. (2017). Correlations Between The Growth Mechanism and Properties of Micro Arc Oxidation Coatings on Titanium Alloy: Effects of Electrolytes. *Surface & Coatings Technology*, 316, 162-170.
- Liu, J., Yue, W., Liang, J., Hou, B., Sun, J., She, D., Gu, Y. & Yi, P. (2018). Effects of Evaluated Temperature on Tribological Behaviors of Micro-arc Oxidated 2219

- Aluminum Alloy and Their Field Application. *Int J Adv Manuf Technol*, 96, 1725-1740.
- Li, Z., Di, S. (2017). The microstructure and wear resistance of microarc oxidation composite coatings containing nano-hexagonal boron nitride (HBN) particles. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26, 1551-1561.
- Ma, K. J., Al Bosta, M. M. & Wu, W. T. (2014). Preparation of self-lubricating composite coatings through a micro-arc plasma oxidation with graphite in electrolyte solution. *Surface & Coatings Technology*, 7.
- Malayoğlu U., Çakmak E. (2008). Plazma Elektrolitik Oksitlenme Yöntemiyle Hafif Metallerin Kaplanması. *Mühendis ve Makina*, 49, 582, 3-9.
- Ming, M. (2012). Preparation and Tribological Properties of Self Lubricating TiO₂ Graphite Composite Coating on Ti6Al4V Alloy. *Applied Surface Science*, 258, 22, 8570-8576.
- Muhaffel, F., Baydoğan, M. & Çimenoglu, H. (2021). A Study to Enhance the Mechanical Durability of the MAO Coating Fabricated on the 7075 Al Alloy for Wear Related High Temperature Applications. *Surface & Coatings Technology*, 409.
- Nie, X., Leyland, A., Song, H. W., Yerokhin, A. L., Dowey, S. J. & Matthews, A. (1999). Thickness Effects on the Mechanical Properties of Micro Arc Discharge Oxide Coatings on Aluminium Alloys. *Surface and Coatings Technology*, 116-119, 1055-1060.
- Nie, X., Matthews, A. (2000). Deposition of Dublex Al₂O₃ DLC Coatings on Al Alloys for Tribological Applications Using a Combined Micro Arc Oxidation. *Surface and Coatings Technology*, 121, 506-513.
- Ong, C. B., Ng, L. Y. & Mohammad, A. W. (2018). A Review of ZnO Nano Particles as Solar Photocatalysts: Synthesis, Mechanisms and Applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 536-551.
- Özcan, M. E. (2014). Mikro Ark Oksidasyon Yöntemi ile Kaplanmış Alüminyum Alaşımının Aşınma Davranışının İncelenmesi. F.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ.
- Özkara, İ. M. (2009). 2024 Alüminyum Alaşımının Mikro Ark Oksidasyon Yöntemiyle Kaplanması ve Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesi. İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Peterhouse, J. A. C. (2005). Thermal and Mechanical Properties of Plasma Electrolytic Oxide Coatings, Phd Thesis. University of Cambridge.

- Polat, A. (2009). 2017A, 6061 ve 7039 Alüminyum Alaşımlarının Mikro Ark Oksidasyon Yüzey Kaplama Yöntemi İle Sert Seramik Kaplanması. K.O.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Kocaeli.
- Shi-Gang X., Li-Xin S. (2006). Composition and Thermal Properties of the Coating Containing Mullite and Alumina. *Materials Chemistry and Physics*, 97, 132-136.
- Snizhko, L.O., Yerokhin, A.L., Pilkington, A., Gurevina, N.L., Misnyankin, D.O., Leyland, A. & Matthews, A. (2004). Anodic Processes in Plasma Electrolytic Oxidation of Aluminium in Alkaline Solutions. *Electrochim Acta*, 49, 2085-2095.
- Soydan Y., Ulukan L. (2003). Sürtünme, Aşınma, Yağlama Bilimi ve Teknolojisi. Teknoloji Araştırma ve Geliştirme Merkezi Teknolojik Yayınlar Serisi, No:1, Sakarya.
- Stachowiak, G. W., Batchelor, A. W. (2011). *Engineering Tribology*. Butterworth-Heinemann, Oxford.
- Sundararajan, G., Rama, L. K. (2003). Mechanisms Underlying the Formation of Thick Alumina Coatings Through the MAO Coating Technology. *Surface and Coatings Technology*, 167, 2-3, 269-277.
- TMMOB. (2003). II. Ulusal Demir Çelik Sempozyumu ve Sergisi. Bildiriler Kitabı, 336, Ankara.
- Uysal, N. (2019). Grafit Esaslı Karbon Nano Akışkan Eldesi ve Isı Değiştirici Sistemlerinde Kullanımının Araştırılması. E.S.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir.
- Wang, C. (2006). Growth Process and Wear Resistance for Ceramic Coatings Formed on Al-Cu-Mg Alloy by Micro Arc Oxidation. *Surface Science*.
- Wang, K., Koo, B. H., Lee, C. G., Kim, Y. J., Lee, S. H. & Byon, E. (2009). Effects of Electrolytes Variation on Formation of Oxide Layers of 6061 Al Alloys by Plasma Electrolytic Oxidation. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 19, 866-870.
- Wanxia, T., Jikang, Y., Gang, Y., Guoyou, G., Jinghong, D., Jiamin, Z., Yichun, L., Zhe, S. & Jianhong, Y. (2014). Effect of Electrolytic Solution Concentrations on Surface Hydrophilicity of Micro-arc Oxidation Ceramic Film Based on Ti6Al4V Titanium Alloy. *Rare Metal Materials and Engineering*, 43, 2883-2888.
- Wei, T. B., Yan, F. Y. & Tian, J. (2005). Characterization and Wear and Corrosion Resistance of Microarc Oxidation Ceramic Coatings on Aluminum Alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 389 (1-2), 169-176.
- Wenbin, X. (1998). Analysis of Phase Distribution for Ceramic Coatings Formed by Microarc Oxidation on Aluminum Alloy. *Journal of the American Ceramic Society*, 81, 1365-1368.

- Xin, S., Song, L. (2006). Composition and Mechanical Properties of Hard Ceramic coating Containing α -Al₂O₃ Produced by Micro Arc Oxidation on Ti-6Al-4 V alloy. *Materials Chemistry and Physics*, 97, 132-136.
- Yang, X., Chen, L., Jinb, X., Du, J. & Xuea, W. (2019). Influence of Temperature on Tribological Properties of Micro Arc Oxidation Coating on 7075 Aluminium Alloy at 25 °C - 300 °C. *Ceramics International*, 45, 12312-12318.
- Yang, Z. R., Sun, Y., Li, X. X., Wang, S. Q. & Mao, T. J. (2015). Dry Sliding Wear Performance of 7075 Al Alloy Under Different Temperatures and Load Conditions. *Rare Metals*.
- Yerokhin A. L., Snizhko L.O. (2003). Discharge Characterization in Plasma. *J. Phys D Appl Phys*, 36, 2110-2120.
- Yerokhin, A. L., Nie, X., Leyland, A., Matthews, A. & Dowey, S. J. (1999). Plasma Electrolysis for Surface Engineering. *Surface and Coatings Technology*, 122, 2-3, 73-93.
- Yerokhin, A. L., Snizhko L. O., Gurevina N. L., Leyland, A., Pilkington A. & Matthews A. (2003). Discharge Characterization in Plasma Electrolytic Oxidation of Aluminium. *Journal of Physics Applied Physics*, 36, 2110-2120.
- Yıldız, T., Gür, A. K. (2006). Aşınma sistemleri. *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları*, 4, 2, 86-91.
- Yi, P., Yue, W., Liang, J., Hou, B., Sun, J., Gu, Y. & Liu, J. (2017). Effects of Nano Crystallized Layer on the Tribological Properties of Micro Arc Oxidation Coatings on 2618 Aluminum Alloy Under High Temperatures. *Int J Adv Manuf Technol*, 96, 1635-1646.
- Yüce, M. (2014). Mikro Ark Oksidasyon (MAO) Yöntemi ile Kaplanmış AZ91 Magnezyum Alaşımının Korozyon Davranışının Araştırılması. A.T.A.Ü.N.İ., Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Erzurum.
- Zefei Yu, An Du, Chenyang Wang, Ruina Ma, Yongzhe Fan, Xue Zhao, Xiaoming Cao. (2021). Incorporation mechanism of ZnO nanoparticles in PEO coating on 1060 Al Alloy. *Surface&CoatingsTechnology*, 412.
- Zhao, D., Lu, Y., Wang, Z., Zeng, X., Liu, S. & Wang, T. (2016). Antifouling Properties of Micro Arc Oxidation Coatings Containing Cu₂O/ZnO Nanoparticles on Ti6Al4V. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 54, 417-421.
- Zhu, M.H., Zhou, Z.R. (2007). Fretting Wear Behaviour of Ceramic Coating Prepared by Micro-Arc Oxidation on Al-Si Alloy. *Wear*, 263, 472-480.

ÖZGEÇMİŞ

Faruk İPEK, İlk, orta ve lise eğitimini Görele’de tamamladı. 2009 yılında Afyon Kocatepe Üniversitesi’nde Metal Öğretmenliği Bölümünü kazandı ve 2013 yılında mezun oldu. Yine aynı yıl içerisinde Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümüne geçiş hakkı kazandı ve 2016 yılında mezun oldu. 2019 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans eğitimine başlamıştır.

