

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ

ALAŞIM ELEMENTİ OLARAK BAKIRIN
ALÜMİNYUMUN MİKROARK OKSİDASYON
TEKNİĞİ İLE KAPLAMA DAVRANIŞINA
ETKİSİ

Ahmet Oktay DEVECİLİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

GEBZE

2009

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ

ALAŞIM ELEMENTİ OLARAK BAKIRIN
ALÜMİNYUMUN MİKROARK OKSİDASYON
TEKNİĞİ İLE KAPLAMA DAVRANIŞINA
ETKİSİ

Ahmet Oktay DEVECİLİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI

Yrd. Doç. Dr. Yücel GENÇER

GEBZE

2009



YÜKSEK LİSANS TEZİ JÜRİ ONAY SAYFASI

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 15.06.2009 tarih ve ...2009/13.. sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 15.07.2009... tarihinde tez savunma sınavı yapılan Alihan Oktay Deyici... 'in tez çalışması Malz. B.t. ve Mch. Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) :

Yrd. Doç. Dr. Hücel GENÇER

ÜYE

Yrd. Doç. Dr. Osman ÖZTÜRK

ÜYE

Mehmet Tarakan

ONAY

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../20... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

TEZ BAŞLIĞI: Alaşım elementi olarak bakırın alüminyumun mikroark oksidasyon tekniği ile kaplama davranışına etkisi

YAZAR ADI : Ahmet Oktay DEVECİLİ

Anahtar kelimeler: Mikroark oksidasyon, alfa alümina, müllit, Al-Cu alaşımları, seramik kaplama, alüminyum kaplama.

Bu çalışmada, ağırlıkça %0,7-1-2-4-8-16-33 bakır içeren Al-Cu alaşımlarının yüzeyinde mikroark oksidasyon (MAO) yöntemiyle bazik solüsyon içinde, 20-40-60-120 dk süreyle oksit kaplama yapılmıştır.

Bu kaplamaların karakterizasyonu, SEM-EDS, XRD, Mikrosertlik, Çizik testi ve Profilometre ile yapılmıştır.

Altlık malzemedeki bakır miktarının artmasıyla birlikte kaplamadaki porozite miktarı artmaktadır. Kaplama kalınlığı bakır miktarıyla birlikte azalmakta, kaplama süresiyle artmakta olup, 2-80 mikron arasında değişmektedir. Yapılan kimyasal analizlerde kaplamalarda Cu elementi tespit edilmemiştir. İlave olarak kaplamaların dış bölgesinin Si elementince zengin olduğu bulunmuş, alüminyum ve oksijen konsantrasyonu tüm kaplama boyunca değişmediği tespit edilmiştir.

XRD ile yapılan faz analizlerinde Cu miktarı arttıkça müllit fazı, Cu miktarı azaldıkça ve işlem süresi uzadıkça alfa alümina fazı artmaktadır. Kaplanan yüzeylerin pürüzlülük (Ra) değerleri artan Cu miktarına bağlı olarak azalmaktadır.

Kaplama sertlik değerleri 700-2400 HV arasında bulunmuştur ve Cu miktarı arttıkça mikrosertlik değerlerinin düştüğü tespit edilmiştir.

Çizik testi sonucunda Cu miktarı düşük olan alaşımlar üzerinde oluşan kaplamaların yapışmasının yüksek Cu içerenlere göre daha iyi olduğu görülmüştür. Artan bakır miktarına bağlı olarak, kaplamaların yapışması kötüleşmekte ve çizilme direnci düşmektedir.

SUMMARY

TITLE OF THE THESIS: Effect of copper as an alloying element on the coating behavior of aluminium by microarc oxidation technique.

AUTHOR: Ahmet Oktay DEVECİLİ

Keywords: Microarc oxidation, alpha alumina, Al-Cu alloys, ceramic coating, aluminium coating.

In this study, the surface of the Al-Cu binary alloys containing 0.7-1-2-4-18-33 wt.% Cu were coated by MAO method in a basic solution for the coating duration of 20, 40, 60, 120 mins. Characterisation of the oxide coatings was carried out by using SEM-EDX, XRD, microhardness, scratch test and profilometer.

The amount of porosity in the coating increased with increasing amount of copper in the substrate material. The thickness of coating changed from 2 to 80 μm depending on amount of copper in the alloys and the duration of coating. The SEM EDX analysis showed that there were not any signal of Cu element from the coating. It was found that the outer surface of the coating was rich of Si element while the concentration of Al and O elements was constant through the thickness of coatings.

The results of XRD phase analysis showed that the mullite phase increased with increasing amount of copper while the amount of alpha alumina phase increased with decreasing amount of copper and with increasing of coating time.

The coating microhardness values were measured as 700-2400 HV and the values decreased by increasing amount of Cu.

The surface roughness of the coatings decreased with increasing amount of copper. Depending on the increasing amount of copper, the adhesion of the coating worsened and the scratch resistance decreased.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması sırasında beni yönlendiren ve destekleyen tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. Yücel GENÇER' e, bilgi ve tecrübelerini her konuda paylaştan Yrd. Doç. Dr. Mehmet TARAKÇI'ya teşekkür ederim.

Yaptığım deneysel çalışmalarım sırasında bana yardımcı olan Sayın Dr. Aytekin POLAT, kullandığım cihazlar sırasında yardımlarını esirgemeyen Uzman Adem ŞEN ve Ahmet NAZIM 'a teşekkürü borç bilirim.

Yaşamım boyunca maddi ve manevi desteğini esirgemeyen aileme, aramızda olmayan ama yaşama şeklini örnek almaya çalıştığım çok kıymetli Ayşe nineme minnettarım.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
TABLolar DİZİNİ	xv
GİRİŞ	1
1.1.Saf Alüminyumun Özellikleri	3
1.2. Alüminyum Üretimi	4
1.3. Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması	7
1.3.1. Isıl İşlem Uygulanamayan Alüminyum Alaşımları	8
1.3.2. Isıl İşlem Uygulanabilen Alüminyum Alaşımları	8
1.3.2.1. Alüminyum - Bakır Alaşımları	9
1.4. Çökelme Sertleşmesi Isıl İşlemi	11
1.5. Alüminyum ve Alaşımlarında Oluşan Aşınma Türleri	12
1.6. Alüminyum ve Alaşımlarında Oluşan Korozyon Türleri	13
1.7. Aşınma Ve Korozyona Karşı Kaplama Yapmanın Sebepleri	15
1.8. Al ve Alaşımlarına Uygulanan Yüzey Kaplama Teknikleri	16
1.8.1 Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) Yöntemi	16
1.8.2. İyon İmplantasyonu Yöntemi	17
1.8.3. Termal Sprey Yöntemi	18
1.8.4. Klasik Anodik Oksidasyon (Eloksal) Yöntemi	20
1.8.5. Mikroark Oksidasyon (MAO) Yöntemi	22
1.8.5.1. MAO Kaplamalarının Mikroyapı Özellikleri	28
1.8.5.2. Kaplama Kompozisyonu	30
1.8.5.3. Kaplama Boşluk Yapısı	30
1.8.5.4. Aşınma Direnci	31
1.8.5.5. Dielektriksel Özellikler	33
1.8.5.6. Korozyon Direnci	34

1.8.5.7. MAO Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları	35
1.8.5.8. MAO Prosesinin Uygulama Alanları	36
1.9. Çalışmanın Amacı	38
1. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	39
2.1. Al-Cu Alaşımların Hazırlaması	39
2.2. Al-Cu Alaşımlarının Kimyasal Analizi	42
2.3. Al-Cu Alaşımların XRD Karakterizasyonu	42
2.4. MAO İşlemi İçin Çözelti Hazırlama	42
2.5. MAO Yöntemiyle Al-Cu Numunelerin Kaplanması	43
2.6. MAO Yapılmış Numunelerin Kesilmesi	45
2.7. Yüzey Pürüzlülüğü Analizi	45
2.8. Kaplanmış Numunelerin XRD Analizi	46
2.9. MAO Yapılmış Numunelerin Çizik Testi	46
2.10. Metalografik Çalışma	46
2.11. Kaplamaların Mikro Sertlik Ölçümü	47
2.12. SEM Analizi	48
2.13. MAO Yapılmış Numunelerin EDS Analizi	48
2. DENEYSEL SONUÇLAR	49
3.1 Alaşımların Kimyasal Analiz Sonuçları	49
3.2. Alaşımların XRD Sonuçları	49
3.3. MAO İşlemi Sırasında Akım ve Gerilim Değişimi	52
3.4. MAO Yapılmış Numunelerin XRD Sonuçları	54
3.5. MAO İle Elde Edilen Kaplamaların Kalınlık Sonuçları	62
3.6. MAO İle Elde Edilen Kaplamaların Kesit Mikroyapısı	65
3.7. MAO İle Kaplanmış Al-Cu Alaşımlarının EDS Sonuçları	75
3.8. MAO Yapılmış Al-Cu Alaşımlarının Sertlik Ölçümleri	81
3.9. Hazırlanan Kaplamaların Çizik Testi Sonuçları	85
3.10. MAO Yapılmış Al-Cu Alaşımlarının Yüzey SEM Analizi Sonuçları	92
3.11. MAO Yapılmış Al-Cu Alaşımların Yüzey Pürüzlülüğü Analizi	97
3. SONUÇLARIN İRDELENMESİ	99
4. GENEL SONUÇLAR	104
KAYNAKLAR	106
ÖZGEÇMİŞ	111

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

MAO	: Mikroark oksidasyon
PEO	: Plazma elektrolitik oksidasyon
PVD	: Fiziksel buhar biriktirme
CVD	: Kimyasal buhar biriktirme
µm	: Mikrometre
HV	: Vickers sertligi
DC	: Doğru akım
AC	: Alternatif akım
Q	: Isı akısı (lumen)
U	: Gerilim (Volt)
I	: Akım (Amper)
E	: Elektrik alanı (volt/metre)
J	: Akım yoğunluğu (A/m ²)
P	: Buhar basıncı (Pa)
N	: Newton
µ	: Ortalama sürtünme katsayısı (kgxm/sn ²)
k	: Aşınma oranı (mm ³ /Nm)
Ra	: Pürüzlülük (µm/µinch)
XRD	: X-ışınları kırınımı
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
TEM	: Geçirimli elektron mikroskobu
EDS	: Enerji dağıtıcılı X-ışını spektrometresi
a,q,E	: Potansiyel bariyer, iyon şarjı, elektrik alan
ΔG	: Aktivasyon enerjisi
i_i	: Akım yoğunluğu
α , β	: Sabit
U	: Potansiyel düşüş
m_{bl}	: Bariyer etkisi
h_{bl}	: Bariyer kalınlığı

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>sayfa</u>
1.1. Boksit cevherinden alümina üretiminin şematik gösterilişi	1
1.2. Alüminyum oksitten metalik alüminyum üretiminin şematik gösterilişi	6
1.3. Al-Cu Faz Diyagramı	9
1.4. Değişik kaplama teknikleriyle kaplanmış malzemelerde elde edilen sertlik değerleri	14
1.5. Fiziksel buhar biriktirme yönteminin şematik görünüşü	16
1.6. İyon implantasyonu yöntemiyle yapılan kaplamanın şematik görünüşü	17
1.7. Termal spreyci yöntemlerinin karşılaştırılması	18
1.8. Elektrik ark spreyci yönteminde kullanılan kaplama tabancasının şematik gösterilişi	19
1.9. Mikroark oksidasyon (MAO) yönteminin şematik gösterilişi	23
1.10. Mikroark oksidasyon işlem basamakları	24
1.11. MAO ve anodik oksidasyon yöntemlerinde elektrot yüzeyindeki dielektrik filmde akım-voltaj değişimi	25
1.12. Alüminyumun MAO tekniği ile oksitlenmesi işleminde kullanılan elektrolitlerin fonksiyonları	26
1.13. Al alaşımı üzerine MAO yöntemiyle yapılan kaplamanın kesit görüntüsü	28
1.14. Kesit alandan alınan kaplamanın TEM görüntüsü	29
1.15. Talc'a göre bazı malzemelerin göreceli aşınma direnç (ϵ_w) diyagramı	31
1.16. Aşınma derinliği (I), sertlik (H) ve aşınma oranının (dI/dt) zamanla değişimi ve gözenekliliğin (P) kaplama kalınlığı (h) ile değişimi	31
1.17. Kaplama kesiti mikro sertlik dağılımı	32
2.1. Al- Cu alaşımlarının ergitilmesi için tasarlanan fırının şematik kesit görüntüsü	40
2.2. MAO yapılacak AL-Cu altlık malzemenin hazırlanmasının şematik gösterimi	41
2.3. MAO işlemi içi hazırlanan numunelerin şematik gösterimi	42
2.4. MAO işlemi için kurulan düzeneğin şematik gösterimi	44
2.5. MAO yapılmış numunenin kesilmesi ve kullanım yerleri	45
2.6. MAO yapılmış numunelerden alınan sertlik ölçümlerinin şematik gösterimi	47

3.1. Altlık malzeme olarak kullanılan farklı miktarlarda Cu içeren Al-Cu ikili alaşımlarının XRD sonuçları	51
3.2. MAO işlemi sırasında anod geriliminin kaplama süresine göre değişimi	52
3.3. MAO işlemi sırasında anod akımının kaplama süresine göre değişimi	53
3.4. MAO işlemi ile farklı sürelerde (20,40,60,120 dk) kaplama yapılmış saf alüminyumun XRD sonucu	54
3.5. MAO işlemi ile farklı sürelerde (20,40,60,120 dk) kaplama yapılmış %0,7 Cu (Al ₀ 7Cu) içeren alaşımın XRD sonucu	55
3.6. MAO işlemi ile farklı sürelerde (20,40,60,120 dk) kaplama yapılmış %1 Cu (Al ₁ Cu) içeren alaşımın XRD sonucu	56
3.7. MAO işlemi ile farklı sürelerde (20,40,60,120 dk) kaplama yapılmış %2 Cu (Al ₂ Cu) içeren alaşımın XRD sonucu	57
3.8. MAO işlemi ile farklı sürelerde (20,40,60,120 dk) kaplama yapılmış %4 Cu (Al ₄ Cu) içeren alaşımın XRD sonucu	58
3.9. MAO işlemi ile farklı sürelerde (20,40,60,120 dk) kaplama yapılmış %8 Cu (Al ₈ Cu) içeren alaşımın XRD sonucu	59
3.10. MAO işlemi ile farklı sürelerde (20,40,60,120 dk) kaplama yapılmış %16 Cu (Al ₁₆ Cu) içeren alaşımın XRD sonucu	60
3.11. MAO işlemi ile farklı sürelerde (20,40,60,120 dk) kaplama yapılmış %33 Cu (Al ₃₃ Cu) içeren alaşımın XRD sonucu	61
3.12. MAO sonucu oluşan kaplamaların süreye bağlı kalınlık değişimi	62
3.13. MAO sonucu oluşan kaplama kalınlıklarının bakır miktarına bağlı olarak değişimi	63
3.14. MAO yöntemi ile farklı sürelerde kaplanmış saf alüminyum numunelerin kesitten alınmış SEM görüntüleri; a) 20 dk, b) 40 dk, c) 60 dk, d) 120 dk	65
3.15. MAO yöntemi ile farklı sürelerde kaplanmış %0,7 Cu içeren (Al ₀ 7Cu) Al-Cu ikili alaşımının kesitten alınmış SEM görüntüleri; a) 20 dk, b) 40 dk, c) 60 dk, d) 120	66
3.16. MAO yöntemi ile farklı sürelerde kaplanmış %1 Cu içeren (Al ₁ Cu) Al-Cu ikili alaşımının kesitten alınmış SEM görüntüleri; a) 20, b) 40, c) 60, d) 120	67
3.17. MAO yöntemi ile farklı sürelerde kaplanmış %2 Cu içeren (Al ₂ Cu) Al-Cu ikili alaşımının kesitten alınmış SEM görüntüleri; a) 20 dk, b) 40 dk, c) 60 dk, d) 120 dk	69

3.18. MAO yöntemi ile farklı sürelerde kaplanmış %4 Cu içeren (Al ₄ Cu) Al-Cu ikili alaşımının kesitten alınmış SEM görüntüleri; a) 20 dk, b) 40 dk, c) 60 dk, d) 120 dk	70
3.19. MAO yöntemi ile farklı sürelerde kaplanmış %8 Cu içeren (Al ₈ Cu) Al-Cu ikili alaşımının kesitten alınmış SEM görüntüleri; a) 20 dk, b) 40 dk, c) 60 dk, d) 120 dk	71
3.20. MAO yöntemi ile farklı sürelerde kaplanmış %16 Cu içeren (Al ₁₆ Cu) Al-Cu ikili alaşımının kesitten alınmış SEM görüntüleri; a) 20 dk, b) 40 dk, c) 60 dk, d) 120 dk	72
3.21. MAO yöntemi ile farklı sürelerde kaplanmış %33 Cu içeren (Al ₃₃ Cu) Al-Cu ikili alaşımının kesitten alınmış SEM görüntüleri; a) 20 dk, b) 40 dk, c) 60 dk, d) 120 dk	73
3.22. 120 dk süreyle MAO ile kaplanmış saf alüminyumun kaplama tabakasından elde edilen EDS spekturumu; a) çizgisel, b) alan	75
Şekil 3.23. 120 dk süreyle MAO ile kaplanmış Al ₀₇ Cu alaşımının (%0,7 Cu içeren) kaplama tabakasından elde edilen EDS spekturumu; a) çizgisel, b) alan	76
3.24. 120 dk süreyle MAO ile kaplanmış Al ₁ Cu alaşımının (%1 Cu içeren) kaplama tabakasından elde edilen EDS spekturumu; a) çizgisel, b) alan	76
3.25. 120 dk süreyle MAO ile kaplanmış Al ₂ Cu alaşımının (%2 Cu içeren) kaplama tabakasından elde edilen EDS spekturumu; a) çizgisel, b)alan	77
3.26. 120 dk süreyle MAO ile kaplanmış Al ₄ Cu alaşımının (%4 Cu içeren) kaplama tabakasından elde edilen EDS spekturumu; a) çizgisel, b) alan	78
3.27. 120 dk süreyle MAO ile kaplanmış Al ₈ Cu alaşımının (%8 Cu içeren) kaplama tabakasından elde edilen EDS spekturumu; a) çizgisel, b) alan	79
3.28. 120 dk süreyle MAO ile kaplanmış Al ₁₆ Cu alaşımının (%16 Cu içeren) kaplama tabakasından elde edilen EDS spekturumu; a) çizgisel, b) alan	79
3.29. 120 dk süreyle MAO ile kaplanmış Al ₃₃ Cu alaşımının (%33 Cu içeren) kaplama tabakasından elde edilen EDS spekturumu; a) çizgisel, b) alan	80
3.30. MAO ile kaplama yapılmış farklı bakır miktarlarına sahip Al-Cu alaşımlarının kaplama zamanına göre sertlik değişimleri	81
3.31. MAO ile 120 dk kaplama yapılmış farklı bakır (%0, 0,7, 1, 2, 4, 8, 16, 33 Cu) miktarlarına sahip Al-Cu alaşımlarının kaplama kalınlığına göre sertlik değişimleri	82

3.32. MAO ile 120 dk kaplama yapılmış Al-Cu alaşımlarından alınan mikrosertlik değerlerinin bakır miktarına göre değişimi	83
3.33. 120 dk süreyle MAO yapılmış saf alüminyum numunenin kesitinden alınan vikers sertlik izlerinin SEM görüntüsü	84
3.34. Al _{0.7} Cu alaşımının 120 dk MAO yapılmış numunesinden alınan sertlik ölçümlerinin SEM görüntüsü	84
3.35. Saf alüminyum ve Al-Cu alaşımlarının 20 dk süreyle MAO yöntemi ile kaplanmış numunelerinin çizik testi sonuçları	85
3.36. Saf alüminyum ve Al-Cu alaşımlarının 40 dk süreyle MAO yöntemi ile kaplanmış numunelerinin çizik testi sonuçları	86
3.37. Saf alüminyum ve Al-Cu alaşımlarının 60 dk süreyle MAO yöntemi ile kaplanmış numunelerinin çizik testi sonuçları	86
Şekil 3.38. Saf alüminyum ve Al-Cu alaşımlarının 120 dk süreyle MAO yöntemi ile kaplanmış numunelerinin çizik testi sonuçları	87
3.39. Saf alüminyumun 120 dk süreyle MAO sonrası yapılan çizik testi SEM görüntüsü	88
3.40. Al _{0.7} Cu alaşımının 120 dk süreyle MAO sonrası yapılan çizik testi SEM görüntüsü	88
3.41. Al ₁ Cu alaşımının 120 dk süreyle MAO sonrası yapılan çizik testi SEM görüntüsü	89
3.42. Al ₂ Cu alaşımının 120 dk süreyle MAO sonrası yapılan çizik testi SEM görüntüsü	89
3.43. Al ₄ Cu alaşımının 120 dk süreyle MAO sonrası yapılan çizik testi SEM görüntüsü	90
3.44. Al ₈ Cu alaşımının 120 dk süreyle MAO sonrası yapılan çizik testi SEM görüntüsü	90
3.45. Al ₁₆ Cu alaşımının 120 dk süreyle MAO sonrası yapılan çizik testi SEM görüntüsü	91
3.46. Al ₃₃ Cu alaşımının 120 dk süreyle MAO sonrası yapılan çizik testi SEM görüntüsü	91
3.47. 20 dk süreyle MAO yapılmış alaşımların SEM görüntüsü; a) saf Al, b) Al _{0.7} Cu, c) Al ₁ Cu, d) Al ₂ Cu	92

3.48. 20 dk süreyle MAO yapılmış alaşımların SEM görüntüsü; e) Al ₄ Cu, f) Al ₈ Cu, g) Al ₁₆ CU, h) Al ₃₃ Cu	93
3.49. 120 dk süreyle MAO yapılmış alaşımların SEM görüntüsü; a) saf Al, b) Al ₀₇ Cu, c) Al ₁ CU, d) Al ₂ Cu	94
3.50. 120 dk süreyle MAO yapılmış alaşımların SEM görüntüsü; e) Al ₄ Cu, f) Al ₈ Cu, g) Al ₁₆ CU, h) Al ₃₃ Cu	95
3.51. MAO ile kaplanmış Al-Cu alaşımlarında yüzey pürüzlülüğünün bakır miktarına bağlı değişimi	97
3.52. Yüzey pürüzlülüğünün MAO süresine bağlı değişimi	98

TABLOLAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>sayfa</u>
1.1. Alüminyumun saflığına bağlı olarak isimlendirilmesi	3
1.2. Saf alüminyumun fiziksel ve mekanik özellikleri	4
1.3. Isıl işlem uygulanabilen ve uygulanmayan ticari Al alaşımlarının mekanik özellikleri ile uygulama alanları	7
1.4. Alüminyum alaşımları için yapılan ısıl işlemlerin temper numaraları	8
1.5. Klasik anodik oksitleme proseslerinde kullanılan elektrolit çözeltiler	21
1.6. MAO yöntemiyle kaplanmış Al ve alaşımlarının kaplama karakteristikleri	34
1.7. MOA yöntemiyle klasik anodik oksidasyon yöntemi arasındaki farklar	36
1.8. MAO işleminin uygulanabildiği alanlar ve elde edilen sonuçlar	37
2.1. Altlık malzeme olarak hazırlanacak Al-Cu alaşımlarını hazırlamada kullanılan Al ve Cu miktarları	39
2.2. MAO için hazırlanan alaşımların oksitlenme işlem sırası	43
3.1. Ergitilerek dökülüp hazırlanmış Al-Cu alaşımlarının kimyasal analiz sonuçları	49

1. GİRİŞ

İçinde bulunduğumuz 21. yüzyıl teknolojisi geniş bir endüstri alanında gittikçe çok farklı çalışma şartları altında kullanılabilir yüksek teknoloji malzemeleri elde etmede büyük çaba sarfetmektedir. Bunun için mevcut malzeme sistemlerinin özelliklerini geliştirme, modifiye etme, özelliklerini birleştirme yönünde çalışmalar yapılmaktadır.

Gerekli işlemlerden geçirildiğinde tokluğu yüksek, demir ve alaşımlarına göre daha yüksek yoğunluk/mukavemet oranına sahip, aynı zamanda plastik olarak şekillendirilebilen Al, Ti, Mg gibi metal ve alaşımları ile, aşınma ve korozyon dirençleri çok iyi aynı zamanda yüksek sıcaklıklarda çalışma imkanları bulunan seramiklerin özelliklerini birleştirerek kullanım alanlarına sunulması örnek olarak gösterilebilir. Özelliklerin birleştirip kullanıldığı kombinasyonlar genelde metal ve alaşımlarının yüzeylerinin seramik malzemelerle kaplanmasıdır.

Ağır çalışma şartlarında kullanılan malzemelerin yüzeylerinin aşınmaya, korozyona ve çevresel etkilere karşı korunması için yapılan kaplamalı malzemeler geniş bir kullanım alanına sahiptir.

Belirtilen hafif metal ve alaşımlarına uygulanan kaplama tekniklerinin başlıcaları; plazma sprey kaplama, kimyasal ve fiziksel buhar biriktirme (PVD,CVD), elektron iyon biriktirme yöntemleridir. Mikroark oksidasyon (MAO) yöntemi de bu metal ve alaşımlarına uygulanabilen en yeni kaplama tekniklerinden biridir. Son yıllarda sıkça araştırılan ve kısmen uygulama bulan bu yöntem plazma elektrolitik oksidasyon (PEO), pulse elektrolitik oksidasyon, kıvılcım anodlama, spark boşaltım anodizasyonu gibi terimler ile de ifade edilmektedir.

MAO yöntemi Al, Mg, Ti gibi oksijene karşı yüksek afiniteye sahip hafif metaller ve alaşımlarının üzerine başarılı bir şekilde uygulanmaktadır. Bu kaplama tekniğiyle altlık malzemenin oksitlenerek oluşan oksit tabakaların yüzeyde biriktirilmesi prensibine dayanır. MAO yöntemiyle oluşmuş kaplamalar yüksek sertlik değerine, son derece iyi aşınma ve korozyon direncine, kullanılan altlık malzeme ile kuvvetli

yapışma özelliklerine sahip olup diğer kaplama yöntemlerine göre birçok üstünlük sağlamaktadır.

MAO yöntemi ile yapılan kaplamaların sürekli geliştirilen özellikleri (aşınma direnci, sertlik, korozyon direnci vs.) sayesinde kullanım alanları genişlemektedir. Özellikle yerkabuğunda bol miktarda bulunan alüminyumun maliyet olarak diğer hafif metallere (Mg, Ti) göre düşük seviyelerde olması otomotiv, beyaz eşya, petrokimya tesisleri, tekstil gibi geniş kitlelere hitap eden sektörlerde bol miktarda kullanılmasına yol açmıştır. MAO yöntemiyle yapılan kaplamaların da alüminyum ve alaşımları üzerinde yoğunlaşmasına sebep olmuştur.

1.1. Saf Alüminyumun Özellikleri

Demir dışı metallerin kullanımında ilk sırada gelen alüminyum hafiflik, kaplamalar sonunda korozyona karşı dayanıklılık, yüksek ısı ve elektriksel iletkenlik, dekoratif amaçlar için güzel görünüş ve kolay işlenebilme gibi bazı üstün özellikleri nedeniyle endüstride geniş bir kullanım alanına sahiptir. 20. yüzyılın ikinci yarısından beri diğer demir dışı metallerle karşılaştırıldığında endüstriyel çapta üretimi yapılan metallerden biri olmasının yanında bakır, kurşun, kalay, titanyum, çinko, magnezyum gibi diğer tüm demir dışı metallerin toplamından daha fazla kullanılmaktadır [1,2].

Yerkabuğunda bol miktarda (%7,5 - 8,1) bulunan alüminyumun ilk keşfedildiği yıllarda cevherinden ayrıştırılması çok zor ve ayrıca saflaştırılması en zor olan metallerden birisiydi. Bunun nedeni, çok hızlı oksitlenmesi, oluşan bu oksit tabakasının çok kararlı oluşu ve demirdeki pasın aksine yüzeyden sıyrılmayıdır [1,2].

Alüminyumun hurdalardan geri kazanımı, günümüz alüminyum endüstrisinin önemli bir bileşeni haline gelmiştir. Geri kazanım prosesi, metalin basitçe tekrar ergitilmesi esasına dayanır. Bu yöntem metalin cevherinden üretimine nazaran çok daha ekonomiktir. Alüminyum rafinasyonu çok yüksek miktarlarda elektrik enerjisi gerektirir. Buna karşılık geri kazanım prosesinde kullanılan enerji, üretiminde kullanılan enerjinin %5'ine karşılık gelmektedir. Geri kazanım prosesi 1900'lü yılların başlarından beri uygulanmakta olup, 1960'lı yılların sonlarına kadar düşük profilli bir faaliyet olarak devam eden geri kazanım prosesi, bu tarihten itibaren enerjinin daha da önem kazanması ve alüminyum kullanımının genişlemesiyle birlikte daha yoğun şekilde kullanılmaya başlanmıştır [3,4].

Tablo 1.1. Alüminyumun saflığına bağlı olarak isimlendirilmesi.

Alüminyum (%)	İsim
99,5000-99,7900	Ticari Saflıkta
99,8000-99,9490	Yüksek Saflıkta
99,9500-99,9959	Süper Saflıkta
99,9960-99,9990	Ekstrem Saflıkta
99,9990- ve üzeri	Ultra Saflıkta

Dünyada ilk defa %99.99 saflığa sahip alüminyum 1920' lerde elde edilmiştir. Özellikle elektronik sanayinde kullanılan yarıiletkenlerin üretiminde çok ince metal kapasitörlerin yapılabilmesi için çok daha yüksek saflıkta olması ihtiyacı doğan alüminyumun, saflaştırma prosesinin geliştirilmesine sebep olmuştur. Alüminyumun saflığına bağlı olarak isimlendirilmesi Tablo1.1'de verilmiştir [5].

Tablo 1.2. Saf alüminyumun fiziksel ve mekanik özellikleri [6].

Kimyasal sembol	Al
Atom numarası	13
Atom Ağırlığı	26,98
Kafes Yapısı	KYM
Yoğunluğu (20°C)	2.6989 gr/cm ³
Elastik modül,(E)	7.2 103kp/mm ²
Kayma modülü,(g)	2.7 103kp/mm ²
Ergime sıcaklığı	660.24 °C
Ergime ısısı	94.6 cal/gr
Elektrik iletkenliği	37.74 m/Ohm.mm ²
Isı iletkenliği, (λ)	0.55 cal/cm.s.°C
Uzama değeri (%)	50

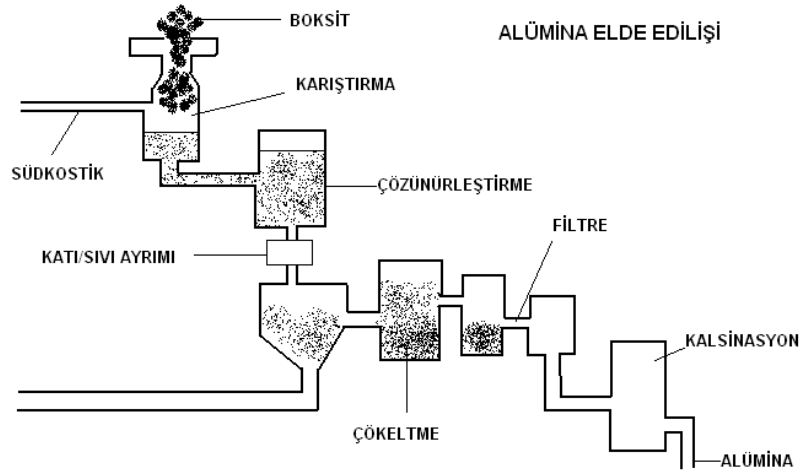
1.2. Alüminyum Üretimi

Alüminyum üretiminin yapıldığı temel cevher boksittir. Boksit cevherleri içinde bulunan en önemli mineraller Gibsit, $Al(OH)_3$ veya $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$, ile diasporit ve böhmittir, $AlOH$ veya $Al_2O_3 \cdot H_2O$. Gibsit ve böhmit sudkosit eriyiğinde kolay çözünürken diasporit zor çözünür.

Alüminyum yukarıdaki cevherlerden aynı yöntemler kullanılarak, iki aşamada üretilir. Birinci aşamada boksit cevherinden alfa alümina, ikinci aşamada ise, elektroliz ile alfa alümina'dan alüminyum elde edilir [7].

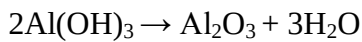
Alümina tesisleri, genellikle boksit cevherlerinin yanına kurulur. Madenden çıkarılan boksit cevheri, sudkostik (Kostiksoda, NaOH) eriyiği ile muamele edilerek

alüminyum hidroksit eldesi gerçekleşir. Bu işlem sonucunda oluşan çözünmeyen kalıntılar (kırmızı çamur) ayrılır ve alüminyum hidroksitin kalsinasyonu ile " alümina" (Al_2O_3) elde edilir (Şekil 1.1).



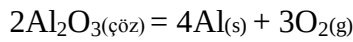
Şekil 1.1. Boksit cevherinden alümina üretiminin şematik gösterilişi.

Boksit içerisindeki minerallerin cinsine göre 150-250°C de ve 10-30 atm basınç altında ve değişen NaOH konsantrasyonlarında otoklavlarda işlenir. Cevherdeki alüminyum reaksiyonlarına göre sodyum alüminat şeklinde çözeltiye alınır. Boksit otoklavlarda basınç altında çözündürüldükten sonra katı-sıvı ayrımı için filtrasyon kademesine geçilir. Bu kademedeki kırmızı çamur adı verilen atık madde ayrıştırılır. Çözelti ise 60° C sıcaklığına kadar soğutulur ve çöktürme tanklarına gönderilir. Toplam çöktürme işlemi 30 ila 70 saat içinde tamamlanır. Çöktürme işlemi ile elde edilen $Al(OH)_3$ termik ayrışma işlemine tabi tutularak yani kalsinasyonla alüminaya (Al_2O_3) dönüştürülür.

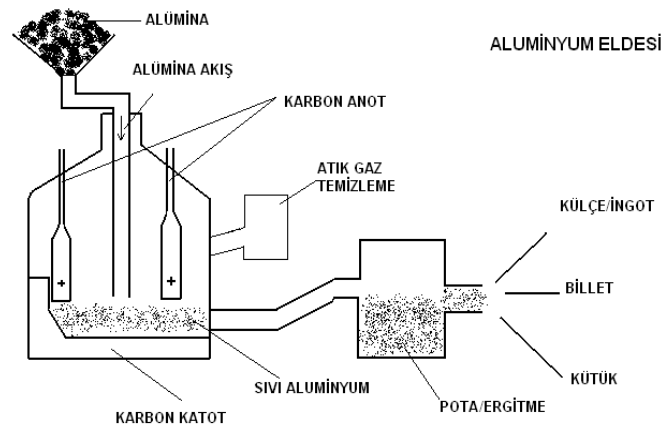


Kalsinasyon işlemi klasik olarak sıvı yakıt veya doğal gaz ile ısıtılan döner fırınlarda 1200-1250°C de gerçekleştirilir. Kalsinasyon sonucu elde edilen ürün alüminadır. Bu arada elde edilen ürünün yaklaşık %50 si bacaya gider. 250-300°C sıcaklıklarda multisiklonlarda (toztutucu) katı parçacıklar geri kazanılarak verim %95-98 miktarına yükseltilir [7].

Alüminyumun üretilmesinde ikinci aşama alüminanın alüminyuma dönüştürülmesi işlemidir. Beyaz bir toz görünümündeki alümina, elektroliz işleminin yapılacağı alüminyum oksit içerisindeki oksijenin alınarak metalik alüminyumun elde edileceği elektroliz hücrelerine alınır (Şekil 1.2). Elektroliz hücrelerinin tabanı karbon bloklardan yapılmıştır. Bu bölüm aynı zamanda hücrede katot görevini yapmaktadır. Buradan akım girişi alüminyum baradan olmakta ve banyo tabanınca katot barası olarak çelik kullanılmaktadır. Anot olarak karbon bloklar kullanılır. Anotlara akım iletimi alüminyum baradan olup anotla bağlantı çelikten yapılmaktadır. Banyo tabanı ısı kaybını önlemek amacıyla refrakter malzeme ile izole edilmiştir. Banyonun tümü bir çelik çerçeve içinde bulunmaktadır. Elektrolit içinde çözünmüş olarak ortalama %5 civarında Al_2O_3 içeren kriyolit (Na_3AlF_6) eriyiğidir. Elektrolit sıcaklığı 950-970°C civarındadır. Bunun için gerekli ısıyı elektrik enerjisi sağlar.



Elektroliz işlemi için 4-5 volt gerilimde doğru akım uygulanarak gerçekleştirilir. Alüminadan alüminyum üretimi redüksiyon elektrolizi ile gerçekleştirilmektedir. Dipte biriken alüminyumun alınması ile işlem tamamlanır.



Şekil 1.2. Alüminyum oksitten metalik alüminyum üretiminin şematik gösterilişi.

Genel olarak, ağırlıkça 4 birim boksitten 2 birim alümina ve 2 birim alüminadan da 1 birim alüminyum elde edilir. İlk zamanlarda üretilen birincil alüminyumun her tonu için 42.000 kwh olan enerji sarfiyatı, günümüzde ortalama 16.500 kwh değerine düşmüştür. Bu değer, en yeni teknoloji ile çalışıldığında 13.000 kwh/t olmaktadır [8].

1.3. Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Alüminyum alaşımları üretim metotları göz önüne alınarak dövme ve döküm alaşımları olarak ayrılır. Plastik deformasyonla şekillendirilen dövme alaşımları, döküm alaşımlarından farklı bir mikro yapı ve kompozisyona sahiptirler. Her ana grup içerisindeki alaşımlar ısıtıl işlem uygulanabilen ve ısıtıl işlem uygulanamayan alaşımlar olarak ta iki ana gruba ayrılır. Isıtıl işlem uygulanan alüminyum alaşımlarında büyük oranda fiziksel mukavemet artışları sağlanabilmektedir. Tablo 1.3 'te yaşlandırma sertleştirilmesi ısıtıl işlemi uygulanabilen ve ısıtıl işlem uygulanamayan alüminyum alaşımlarının özellikleri gösterilmiştir [9].

Tablo 1.3. Isıtıl işlem uygulanabilen ve uygulanmayan ticari Al alaşımlarının mekanik özellikleri ile uygulama alanları[10].

Ticari İsim	Alaşımlar Elementi	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	%Uzama	Uygulamalar
Isıtıl İşlem Uygulanamayan					
1100-0	D>%99 Al	89,66	34,48	40	Elektriksel parçalar, folyo üretimi
1100 H18		165,52	165,38	10	Korozyona dirençli
3003-0	%1,2 Mn	110,34	41,38	35	İçecek kutuları, Mimari uygulamalar
4043-0		144,82	68,97	22	Kaynak elektrot dolgu mazl.
4043-H18		282,76	268,97	1	
5056-0	%5 Mn	289,66	165,5	35	Denizcilik sektörü
5056 H18		413,79	344,83	15	
Isıtıl İşlem Uygulanabilen					
2024-0	%4,4 Cu	186,21	75,86	20	Otomotiv ve havacılık
2024 - T4		486,97	324,14	20	Havacılık
4032-T6	%12 Si %1 Mg	379,31	317,24	9	
6061-0	%1 Mg %1Si	124,14	56,7	27	Ulaştırım, havacılık

1.3.1. Isıl İşlem Uygulanamayan Alüminyum Alaşımları

İstenilen mukavemet ve fiziksel özelliklere yapılan soğuk işleme metotları (hadde, dövme vs.) ile ulaşılan alaşım gruplarıdır. Isıl işlem uygulanamayan alüminyum alaşım grupları üç grupta toplanmıştır.

- 1. 1XXX Alaşımları:** Bu alaşım grubunda alüminyum miktarı %99,0 civarındadır. Kalan empürite elementleri demir ve silisyumdan oluşur. Dayanımı artırmak için %0,12 civarında Cu elementi bu alaşım grubuna ilave edilir.
- 2. 3XXX Alaşımları:** Bu grupta ana alaşım elementi Mn'dır. Alüminyumun dayanımını artırmak için kullanılır.
- 3. 5XXX Alaşımları:** Magnezyum ana alaşım elementi olarak %5 miktarında katılarak sertliğin artırılması sağlanır.

1.3.2. Isıl İşlem Uygulanabilen Alüminyum Alaşımları

Alüminyumun bazı alaşım gruplarına aşağıda kodlarıyla verilmiş şekillerde ısıtıl işlem uygulanıp fiziksel dayanım, sertlik, tokluk gibi özelliklerinin geliştirilmesi sağlanır. Isıl işlem uygulanan alaşım grubu üçe ayrılır. Tablo 1.4'te alüminyum ve alaşımlarına uygulanabilen ısıt işlemler gösterilmektedir.

Tablo 1.4. Alüminyum alaşımları için yapılan ısıt işlemlerin temper numaraları [9].

KOD	Yapılan Isıl İşlem
T1	Sıcak işlemden sonra soğutulur ve doğal yaşlanma ile kararlı duruma getirilir
T2	Sıcak işlemden sonra soğutulur, soğuk işlemden geçirilir ve doğal yaşlanma ile kararlı duruma getirilir
T3	Solüsyona alma ısıt işlemi uygulanır, soğuk işlemden geçirilir, ve doğal yaşlanma ile kararlı duruma getirilir
T4	Solüsyona alma ısıt işleminden geçirilir, doğal yaşlanma ile kararlı duruma getirilir
T5	Sıcak işlemden sonra soğutulur ve yapay yaşlanma ile sertleştirilir.
T6	Solüsyona alma ısıt işleminden geçirilir ve yapay yaşlanma ile sertleştirilir
T7	Solüsyona alma ısıt işleminden geçirilir ve yapay aşırı yaşlanma yapılır
T8	Solüsyona alma ısıt işleminden geçirilir, soğuk işlemden geçirilir,ve yapay yaşlandırma yapılmış

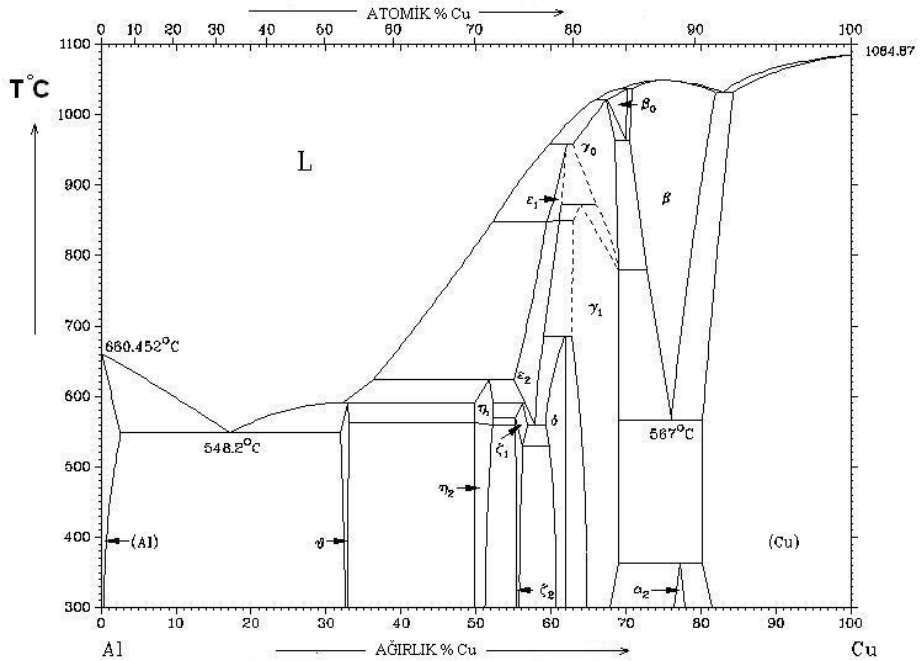
1. 6XXX Alaşımları: Bu grup alaşımların temel alaşım elementleri birleşerek Mg_2Si bileşiğini oluşturan magnezyum ve silisyumdur. Mg_2Si bileşiği ısıtıl işlem sonrasında çökelti halinde mikroyapıya dağılırlar.

2. 7XXX Alaşımları: Alaşım grubunun başlıca alaşım elementi Zn, Mg ve Cu'dır. Bu alaşım ısıtıl işlem sonrasında Zn ve Mg'un alüminyumdaki yüksek çözünürlüğünden dolayı, yüksek yoğunlukta çökelti oluşmasına ve bu da yüksek dayanımlara ulaşmasına neden olmaktadır.

3. 2XXX Alaşımları: Bu alaşım grubunda %0,5 oranında magnezyum bulursa da ana alaşım elementi bakırdır.

1.3.2.1. Alüminyum - Bakır Alaşımları

Alüminyum – Bakır (Al-Cu) alaşımlarının diğer alüminyum alaşımlarına göre en üstün özelliği yaşlandırma ısıtıl işlemi ile mukavemet artış oranının içerdiği bakır miktarına bağlı olarak yüksek artış göstermesidir. Al-Cu alaşımlarının endüstride yaygın olarak kullanılmasının başlıca nedenlerinden birisi de işlenebilirliğinin iyi olması, aynı zamanda ısıtıl iletkenliğinin yüksek olmasıdır [11].



Şekil 1.3. Al-Cu Faz Diyagramı [12].

Al-Cu ticari alaşımlarının tamamı %1-10 arasında değişen oranlarda Cu elementi içeren şekilde hazırlanırlar. Bakır ilavesi ile ergime sıcaklığı 548°C olan ötektik sıvı içerisinde (%33,2 Cu) bir Al-CuAl₂, bu sıcaklığın altındaki katı fazda %5,6 Cu içeren bir faz bulunur. Oluşan CuAl₂ intermetalik fazında bakır miktarı %52,5-53,7 aralığındadır. Al-Cu alaşımları döküm prosesine uygun alaşımlardır.

Şekil 1.3'te görüldüğü gibi Al-Cu faz diyagramında bakır miktarının yüksek olduğu (% 74,4-75,2 Cu içeren) alaşımın sıcaklığı düşürüldüğünde ilk oluşan faz monoklinik yapıya sahip β fazıdır. Sıcaklığın düşmesiyle birlikte bakır oranına bağlı olarak yapıda ζ_1 ve ζ_2 fazları oluşmakta bakır miktarının %77,4-78,6 oranlarında bulunduğu ötektik sıcaklığının üzerinde yeni bir γ fazı oluşmaktadır. Alaşım içerisindeki bakır miktarı düştükçe ilk katı oluşma sıcaklığı da düşerek %33,2-33,4 bakır içeren alaşım ötektik yapıdır. Bakır miktarının ötektik yapıda bulunan miktarın altına düşmesi durumunda ilk katının oluşma sıcaklığı artarak devam etmiş bakır miktarı azaldıkça alüminyumun ergime sıcaklığı olan 660°C sıcaklık civarına yükselmiştir [12].

Ticari olarak hazırlanmış olan tüm alaşımlardaki bakır oranı ötektik noktasının altındaki %33,2 'den düşük bakır içeren alaşımlardır. Belirtilen alaşımlar sıvı haldeyken ani soğutulduklarında alüminyumun içerisinde çözünme zamanı bulamamasından dolayı ikinci bir faz olarak (bakırca zengin) yapıda olarak görünebilirler.

Al-Cu alaşımlarında bulunan başka elementler de bulunmakta, ilave edilen bu elementler alaşımın farklı mekanik özelliklerinin artmasına neden olmaktadır. Bu elementlerin başında lityum, silisyum ve magnezyum elementleri gelir.

Al-Cu alaşımına lityum ilavesi yapıldığında yapıda iki ayrı intermetalik faz meydana gelir. Lityum ilavesiyle ötektik sıcaklığı daha da aşağı çekilerek 515°C civarına düşer. Oluşan intermetalik fazlardan ilki Cu₄LiAl₇ fazıdır ki %56,5 bakır, %1,5 lityum içerir. Oluşan ikinci intermetalik faz ise CuLi₃Al₆ (%26,9 bakır ve %8,8 lityum) fazıdır. Lityum içerikli Al-Cu alaşımlarına çökelme sertleşmesi ısıl işlemi uygulandığında daha yüksek sertlik değerleri elde edilebilmektedir [11].

Çoğu ticari Al-Cu alaşımlarında, silisyum alaşım elementi olarak bulunur. Silisyum miktarı % 5-6,5 oranında ilave edildiğinde ötektik noktasında mevcut %33,2 bakır kompozisyonu %26-31'e kadar geriler. Silisyum elementi bu alaşımlara döküm sırasında akıcılığı artırdığı için de ilave edilir.

Al-Cu alaşımlarına ilave edilen magnezyum, yaşlandırma ısı işlemi sırasında çökeltme oluşum hızının artmasına neden olur. 510 °C'de %33,1 bakır %6,25 magnezyum içeren ötektik yapıda CuAl_2 fazının yanında CuMgAl_2 fazı oluşur. Alüminyum katı çözeltisinde ise %4,28 bakır ve %1,35 magnezyum bulunur [13].

1.4. Çökeltme Sertleşmesi Isıl İşlemi

Yüksek mekanik mukavemet gerektiren uygulamalar için tasarlanmış bir alaşımın sünek bir yapıya sahip matris içerisinde dağılıp deformasyon sırasında hareket eden dislokasyonlarını engellemeye yönelik matris içerisinde dağılmış ikinci fazın oluşması istenir. İkinci fazın homojen şekilde dağılması sonucunda malzeme genelinde mekanik mukavemet, tokluk ve sertlik değerlerinde artışa neden olur [14].

Böyle bir dağılımın elde edilmesi alaşımların faz diyagramlarında mevcut olan solvus eğrilerinin hemen üzerinde yapıda hiç sıvı fazın bulunmadığı sıcaklıklarda gerçekleştirilir. Bu sıcaklıklarda tutulan alaşım grubu ikinci fazın sıcaklığın etkisiyle oluşması sonrasında sıcaklığın düşürülerek oda sıcaklığına soğutulması ile gerçekleştirilir. İşlem süresi difüzyon hızından dolayı büyük oranda sıcaklığa bağlıdır. Bu ısı işlemi yaşlandırma sertleşmesi olarakta literatürde yerini almıştır. Yapay yaşlandırma ısı işlemiyle gerçekleştirilen yapı içerisindeki dislokasyon hareketini engelleyen ikinci fazı oluşturma işlemi iken, doğal yaşlandırma işlemi ise dışarıdan herhangi bir etki yapmadan uzun yıllar sonunda oda sıcaklığında gerçekleşen difüzyon sonunda ikinci faz olarak çökeltelerin oluşmasıdır [10,14].

1.5. Alüminyum ve Alaşımlarında Oluşan Aşınma Türleri

Alüminyum ve alaşımlarında sıkça görülen aşınma türleri üç ana gruba ayrılabilir. Bunlar adhezif, abrazif ve erozif türü aşınmalardır.

Adhezif Aşınma: Birbirleriyle temas halinde ve bağıl harekete sahip parçalardan (örn. çelik yatak-alüminyum mil) birinden diğerine malzeme transferi olarak ta tanımlanır. Alüminyum ve alaşımlarından yapılmış makine ekipmanlarında en fazla karşılaşılan aşınma türüdür. Genellikle iki sürtünen yüzey arasında mukavemet ve sertlik açısından aşırı fark olan çalışma ekipmanlarında meydana gelir.

Malzeme transferinin sebebi ise temas halindeki noktada yüksek basınçtan dolayı yumuşak olan alüminyum ve alaşımlarının yüzeylerinin daha sert olan diğer çalışma ekipmanı ile soğuk kaynak bölgelerini meydana getirmesi ve çalışma esnasında bunların kopmasıdır.

Abrazif Aşınma: Yırılma veya çizilmelerin görüldüğü aşınma türüdür. Genel olarak malzeme yüzeylerinin kendisinden daha sert olan partiküllerle basınç altında etkileşip sert partikülün malzeme yüzeyinden parça koparmasına abrazif aşınma denir. İki ya da üç farklı malzeme aşınma mekanizmasına dahil olur.

Üç cisimli abrazif aşınma yuvarlanma ve kayma hareketi yapabilen aşındırıcı taneciklerin yüzeyden malzeme kaldırmasıdır. Burada sert yüzey üçüncü bir cisimdir. Genellikle aşınmanın çok küçük bir partikülüdür. Bu mekanizmada aşındırıcı tanecikler, iki metal ara yüzey arasında metal yüzeylerin birbirlerine göre izafi hareketleri sonucunda iki metalde de yivler oluşturmak sureti ile aşınma olayı gerçekleşir. Üç cisimli abrazif aşınma, aşınmayı hızlandırır. Başlangıçta aşınma mekanizması, ara yüzeyde tutunmuş olan aşındırıcı partiküllerle oluşan bir adhesiv aşınmadır. Üç cisimli abrazif aşınmadaki aşınma oranı iki cisimli abrazif aşınmaya göre daha düşüktür. Bunun sebebi hareketli taneciklerin uygulama zamanının %90'ını kesme etkisi meydana getirmeden yuvarlanma eğiliminde olmasıdır.

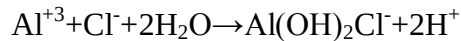
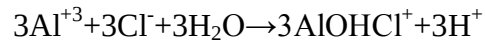
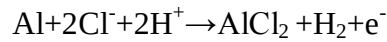
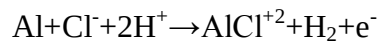
Erozif Aşınma: Alüminyum ve alaşımlarında görülen bir başka aşınma türü de erozif aşınmadır. Sıvı içerisindeki alüminyum alaşımlarından daha sert partiküllerin malzeme yüzeyinden yüksek hızlarda kayması ve yuvarlanması esnasında çok sayıda parça kopması sonucunda meydana gelir. En çok yüksek ve basınçla sıvı iletimlerinin olduğu pompalarda, pervanelerde, soğutma fanlarında, alüminyum nozullarda, boru ve tüplerin dirseklerinde görülür [15].

1.6. Alüminyum ve Alaşımlarında Oluşan Korozyon Türleri

Alüminyum ve alaşımları çevre koşullarının uygun olması durumunda yüzeyinde oluşan kararlı ince oksit tabakalar sebebiyle korozyona karşı demir esaslı malzemelere göre daha dirençlidirler. Fakat alüminyum ve alaşımlarından yapılmış ekipmanların bulunduğu ortamda klor iyonları mevcut ise yüzeyde oluşmuş pasif film delinerek metalin aktif duruma gelmesine neden olmakta korozyon için de uygun ortam sağlanmış olmaktadır [16,17].

Çukurcuk korozyonu: Alüminyum ve alaşımlarının yüzeylerinde mikro yada makro delikçikler ve çukurların oluştuğu korozyon türüdür. Genel olarak oluşan çukurcukların çapları ile derinlikleri doğru orantılı olarak büyürler. Oluşan çukurcukların birbirlerine uzaklığı ve miktarı ortamda bulunan korozif şartlara bağlı olmakla birlikte etkili bir korozyon ortamında gözle görülür pürüzlü bir yüzey görüntüsü oluştururlar.

Mikro çukurlar içerisinde alüminyum metali hızla çözünürken metal yüzeyinde oksijen indirgenir. Bu olay kendiliğinden başlar ve parabolik bir şekilde artarak devam eder. Çukurcuk içerisinde metalin çözünmesi sırasında artı yüklü iyonlar oluştuğundan dolayı elektriksel nötrlük koşulunu sağlamak için klor iyonları metalin çözündüğü çukurcuk içerisine difüz eder. Çukurcuk içerisinde $AlCl_3$ iyonlarının derişimi artınca hidrojen iyonu derişimi de artar. Çukurcuk korozyonunda aşağıda belirtilen reaksiyonlar gerçekleşir.



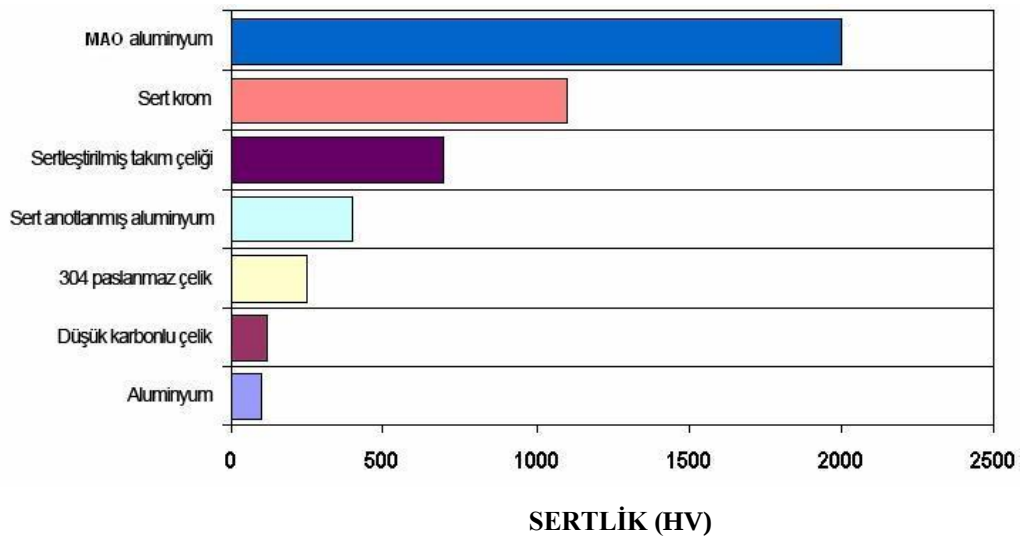
Ortamda bulunan oksijen çukurcuk içerisinde olmayıp alüminyum metalin yüzeyinde indirgenir. Bu arada çukurcuk ağzında hidroksit gruplarından bir tümsek oluşur ki bu olay çukurcuk içerisindeki çözelti derişiminin azalmasını önleyerek korozyona hızlandırıcı etki yapar [18].

Taneler arası korozyon: Alüminyum alaşımlarına uygulanan ısıt işlemler sonucunda veya ergimiş alüminyum alaşımlarının katılaşması sırasında tane sınırlarında bazı kusurlar ve zayıf bölgeler oluşabilir. Metal korozif bir ortam içerisine girdiğinde ilk başta pasif filminde oluşma miktarının ve oranının az olduğu tane sınırlarını etkileyerek korozyona uğramasına neden olurlar. Tane sınırlarındaki bu zayıflama alüminyum içerisinde bulunan alaşım elementlerinin bu bölgelerde yoğunlaşması ya da normalden daha az bulunması nedeniyle oluşmaktadır. Bu korozyon türünde korozyona uğrayan alan az olmasının yanında tane sınırları boyunca ilerleme sağlayacağından malzeme mukavemetlerinde önemli ölçüde düşüşlerin görülmesine neden olabilir [19].

Gerilmeli korozyon: Yüksek basınçlı çalışma ortamlarının olduğu alüminyumdan yapılmış motor bloklarında ve makine parçalarında değişen yük ve basınç altında mekanik olarak bir gerilim oluşur. Gerilimlerin etkisiyle yüzeylerde oluşan mikro çatlakların içi metalin yüzeyinden tamamen farklı davranış gösterebilir. Pasif filmi oluşturup koruma sağlayan oksijenin transferinin yavaşlaması nedeniyle metalin çözünmesi daha çok çatlağın iç bölgelerinde meydana gelmektedir [18].

1.7. Aşınma Ve Korozyona Karşı Kaplama Yapmanın Sebepleri

İstatistiklere göre makine elemanlarının ortalama %70'inin hurdaya ayrılma sebebi aşınma ve korozyondan kaynaklanmaktadır. Meydana gelen malzeme kayıpları, aşınan parçaların yenileriyle değiştirilmesi zorunluluğu, makinelerin bakım - onarım faaliyetleri için harcanan zaman ve emek ve bu faaliyetler için istihdam edilen teknik personel göz önüne alındığında her yıl milli sermayeye oldukça büyük yükler getirmektedir. Dünyada ortalama her ülke milli gelirlerinin % 3-4 kadar miktarını aşınma ve erozyon sonucu oluşan parça maliyetlerine harcamaktadır.



Şekil 1.4. Değişik kaplama teknikleriyle kaplanmış malzemelerde elde edilen sertlik değerleri.

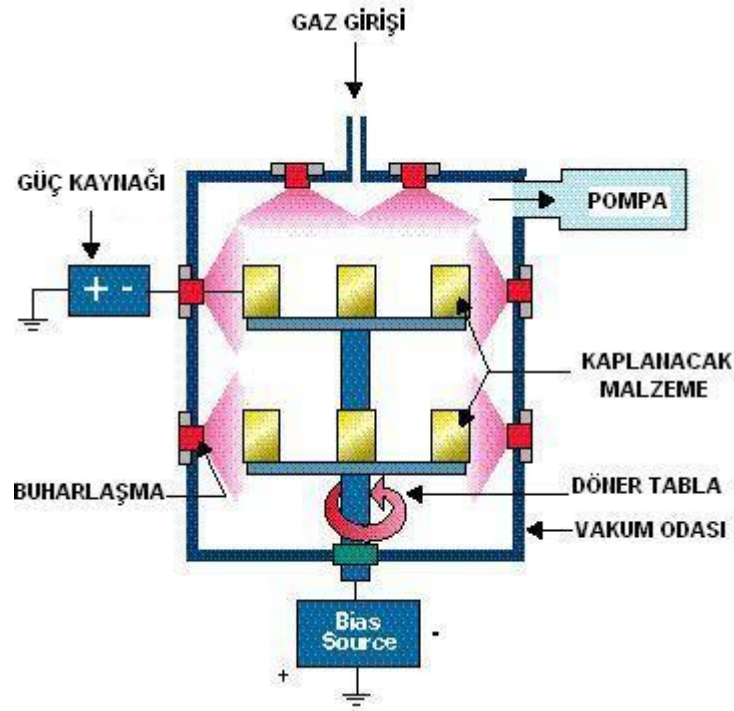
Malzemenin çalışma ömrünü ve kalitesini artırmak, çalışma ortamının olumsuz şartlarının etkilerini azaltmak ve fiziksel ve mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla metalik ve metalik olmayan kaplama yöntemleri geliştirilmiştir. Yapılan kaplama yöntemleriyle milli gelirden göz ardı edilemeyecek miktarda gider teşkil eden ekipmanların çalışma ömürleri artırılıp ekonomiye katkı sağlanması hedeflenmektedir.

Şekil 1.4'te gösterildiği gibi yapılan kaplamalar sonrasında malzeme sertlik değerlerinde büyük artışlar olmaktadır. Malzemelerde sertliğin artmasıyla birlikte aşınma dirençlerinde de artışlar olacaktır.

1.8. Al ve Alaşımlarına Uygulanabilen Yüzey Kaplama Teknikleri

1.8.1. Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) Yöntemi

Sisteme verilen enerji ile buhar fazına geçirilen malzemenin atomlarının ve iyonlarının kaplanacak malzeme yüzeyinde biriktirilme esasına dayanan yöntemdir. Isıl dirençten buharlaştırma, lazer ışınıyla buharlaştırma, katodik ark buharlaştırma gibi verilecek enerji kaynağının çeşidine göre farklı isimleri alır.



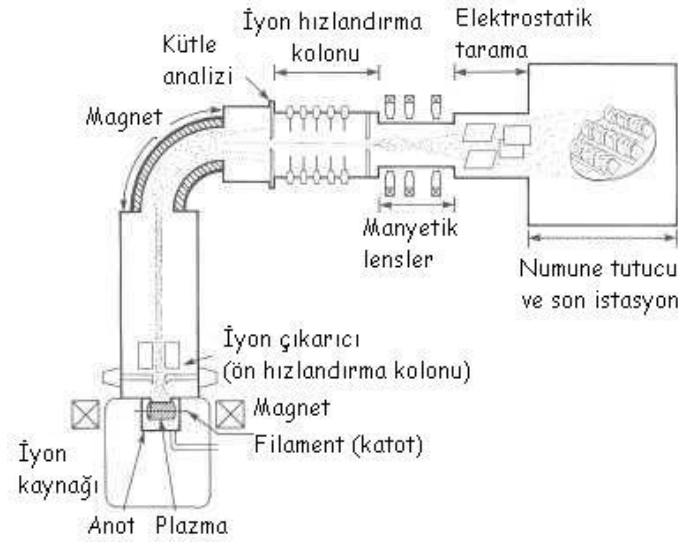
Şekil 1.5. Fiziksel buhar biriktirme yönteminin şematik görünüşü[20].

Yöntem kısaca buhar haline geçmiş atomların target malzeme üzerine çarptırılıp, bu enerjinin etkisi ile kopan elektronların kaplanacak malzeme yüzeyinde toplanmasıdır. Bu yöntem çok yüksek vakum şartları ($1,5 \times 10^{-9}$ - $1,5 \times 10^{-11}$ atmosfer) gerektiren yöntemdir. Vakum seviyesi kaplanacak malzemenin ve kullanılan target malzemenin yüzeylerini etkiler.

Bu yöntemle Al_2O_3 - Si_3N_4 -TiC-TiN-SiC gibi çok sert karbür veya nitrürlerin kaplaması yapılabilir. Kaplama kalınlığı uygulanan süreye veya verilen enerji ile buharlaşan malzeme miktarına göre değişir. Kalınlık $2-3 \text{ Å}$ ile $45-50 \text{ µm}$ kalınlığına kadar uygulanabilir [20].

1.8.2. İyon İmplantasyonu Yöntemi

İyon implantasyonu prosesi vakum içerisinde enerji verilerek üretilmiş iyonların hedef metalin yüzeyine nüfuzu sağlanarak fiziksel ve kimyasal özelliklerinin iyileştirilmesi esasına dayanır. Bu yöntemde metalik veya metalik olmayan N, C, B, O, Ti, Cr, Al gibi elementler 10^4 - 10^6 eV seviyelerine çıkarılarak hedef metale çarptırılırlar.



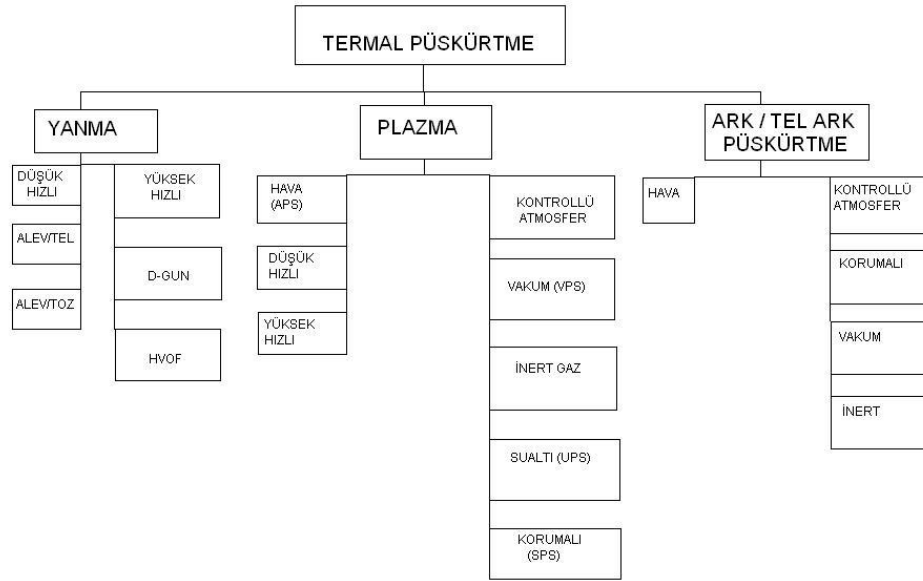
Şekil 1.6. İyon implantasyonu yöntemiyle kaplamanın şematik görünüşü [20].

İyon implantasyonunun gerçekleştirilmesi için, ilk olarak implante edilecek (katot) elementin atomlarından elektronların uzaklaştırılmasıyla iyonlar üretilir. Bu pozitif yüklü iyonlar bir yüksek elektrik alan potansiyelinde hızlandırılırlar. Genelde, iyon ışını odaklamak ve yönlendirmek üzere manyetik alan uygulanır. İyon ışını, hedef malzemede istenen implantasyon konsantrasyonuna ulaşılan kadar uygulanır. Yüzey özellikleri, implante edilen iyonların ve iyon enerjilerinin kontrolüyle geniş bir aralıkta değiştirilebilir [20].

Malzeme içerisine nüfuz eden iyonlar kafes yapılarının içerisinde yer alarak dislokasyon hareketlerinin azalmasına dolayısıyla kayma gerilmelerinin artmasına neden olurlar. Kayma gerilmelerinin artması mekanik özelliklerin iyileştirilmesi sağlanır. Bu yöntem 0,01 – 1 mm derinliğe kadar uygulanabilen prosestir.

1.8.3. Termal Sprey Yöntemi

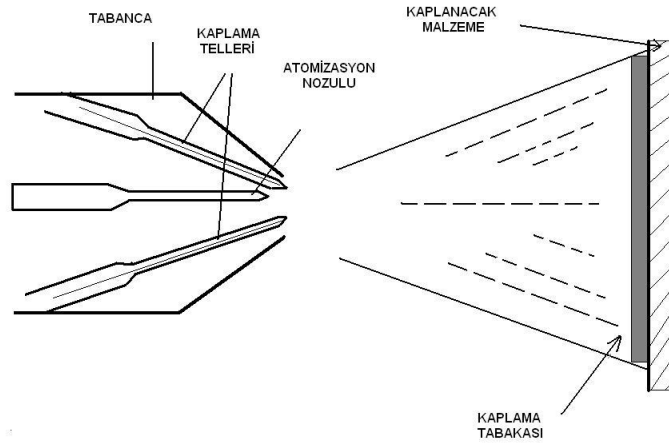
Termal sprey kaplama teknolojisinde temel amaç, metal veya metal alaşımlarının yüzeylerde koruyucu değeri daha yüksek, daha sert, aşınmaya karşı daha dayanıklı bir kaplama tabakası oluşturmaktır. Böylece kaplanmış malzeme aynı zamanda metallerin tokluk özelliklerinin yanı sıra seramiklerin aşınma, korozyon ve yüksek sıcaklık dayanımına aynı malzeme üzerinde sahip olmalarına sebep olacaktır.



Şekil 1.7. Termal sprey yöntemlerinin karşılaştırılması[20].

Termal sprey kaplama yöntemi, tekstil endüstrisi, kağıt ve matbaa sanayi, otomotiv sanayi, cam ve kimya, uzay ve havacılık, tıp biyomedikal ve demir çelik endüstrisinde geniş bir kullanım alanına sahip bir yüzey modifiye yöntemidir.

Elektrik ark spre yönteminde kaplama malzemesi olarak metal alaşım telleri kullanılır. Diğer yöntemlerde ise metal, seramik, kompozit, veya plastik esaslı toz malzemeler kaplanabilir. Toz şeklindeki parçaların kaplama yapılacak yüzeylere uygulanabilmesi için akışkan olması gerekir. İşlem genel itibariyle toz veya tel şeklindeki kaplama malzemesinin yüksek sıcaklık aleviyle ertirilip aynı anda önceden yüzeyi hazırlanmış kaplama yapılacak metal yüzeyine çok hızlı bir şekilde püskürtülmesinden oluşur. Kaplama malzemesini ertirmek için gerekli olan termal enerji elektrik veya yanıcı gazlardan elde edilen enerjiden sağlanır.



Şekil 1.8. Elektrik ark sprej yönteminde kullanılan kaplama tabancasının şematik gösterilişi[20].

Kaplama yapılan toz malzemeler genellikle metal ve alaşımları olarak paslanmaz çelik, nikel, molibden, bakır gibi metal ve alaşımlarıdır. Oksit seramik olarak; alüminyum oksit, krom oksit, zirkonyum oksit, sermet olarak; alüminyum oksit-nikel alüminat, karbür olarak; wolfram karbür, wolfram karbür kobalt, krom karbür-nikel krom karbürleri kullanılan bazı toz malzemelerdir.

Termal sprej kaplama teknolojisinde kaplama sıcaklık aralığı kaplanacak malzemenin ergime sıcaklığına bağlı olarak geniş bir aralıkta uygulanabilir. Bu sıcaklık aralığı plastikler için 300°C den başlayıp seramik kaplamalarda kullanılan 16000°C sprej sıcaklığına ulaşılabilir. İşlemden partikül hızı ise, yine kaplanacak tozun cinsi ve boyutlarına göre $250\text{--}1300\text{ m/sn}$ aralığındadır.

Termal sprej kaplamaların özellikleri kaplama prosesinin türüne, kullanılan tozun tane boyutuna ve dağılımına, yüzeyin pürüzlülüğüne ve kaplanacak yüzeyin sertliğine, altlık yüzeyin temizliğine, sıcaklığına ve ısıtılabilirlik özelliğine, kaplama tabakasının oksit içeriğine bağlı olarak değişir. Kaplamanın altlık malzemede kuvvetli bir bağ oluşturabilmesi için kaplama yapılacak yüzeyde oksit, nem tabakası, organik veya inorganik kirliliklerin temizlenmesi gerekir. Yüzeyin kaplamaya hazırlanması sırasında mekanik olarak işlenmesi, kimyasal veya abrasif olarak temizleme işlemlerinden geçirilmesi gerekir. Yüzeyde belli bir oranda pürüzlülük bulunması kaplama tozunun yüzeyde katılaşması sırasında pürüzlü yüzeyle kilitlenmesi sonucu kuvvetli bir bağ oluşumu sağlar [20,21].

1.8.4. Klasik Anodik Oksidasyon (Eloksal) Yöntemi

Oksijene karşı afinitesi yüksek olan hafif metal ve alaşımlarına (Al, Ti, Mg, ..vs) uygulanabilen yüzey modifiye işlemidir. Alaşımlarda bulunan metaller genellikle bakır (Cu), silisyum (Si) ve mangan (Mn) metalidir. Anodik oksitleme işlemine Almancadan geçmiş “eloksal” ifadesi de denilir [22].

Klasik anodik oksidasyon yöntemi daha çok dekoratif amaçlı kullanılan alüminyum alaşımlarına sıkça uygulanmaktadır. Anodik oksidasyon yönteminde işlem basamakları şöyledir;

- Yüzey temizleme (50-60⁰C)
- Elektro polisaj (DC akımlı 70⁰C)
- Yıkama
- Eloksal banyosu (18-24⁰C)
- Yıkama

Eloksal işlemi öncesi kaplama yapılacak malzeme, yüzeyde bulunan yağ ve organik bileşiklerin temizlenmesi amacıyla 50-60 ⁰C sıcaklıkta ana malzeme ile reaksiyona girmeyen solüsyon içerisinde temizlenir. İyi temizlenmemiş oksit, yağ tabakası ve organik atıkları iyi temizlenmemiş yüzeyden iyi netice alınmaz.

Elektrolit polisaj işleminde elektrik kaynağının anod kısmına bağlanmış metal (DC) akım uygulanmasıyla metalin yüzey kısımlarında kullanılan çözelti (NaOH) yardımıyla çözünme başlar. Yüzeyde pürüzlülük miktarı düşer. Yüzey tümsek ve çukurları 3-4 mikron seviyesine düşer. İşlem sonrasında yüzey HNO₃ banyosunda yıkanıp nötürlenir.

Alüminyum ve alaşımlarının klasik anodik oksidasyon işlemi sırasında genellikle Tablo 1.5'te gösterilen asidik özelliğe sahip çözeltiler kullanılır. Oksidasyon işlemlerinin çoğunda % 10-30 arasında derişime sahip sülfürik asit (H₂SO₄) kullanılır. Güç kaynağı olarak doğru akım kaynağı (DC) ve 10-30 volt arasında 0,3-4 amper akım yoğunluğunda, malzeme alaşımına, şekli ve çözelti konsantrasyonuna bağlı olarak değişen elektrik kaynağı kullanılır [23].

Tablo 1.5. Klasik anodik oksitleme proseslerinde kullanılan elektrolit çözeltiler[23].

SU İÇERİSİNDE ELEKTROLİT DAĞILIMI	ELEKTROLİT		ANODLAMA MODU				KALINLIK μm
	KOMPOZİSYON	konsantrasyo n, g/l	i_a , A/dm ²	U_b , V	t , °C	τ , minimum	
İNCE KAPLAMA ANODLAMA	H_3BO_3 , $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	90-150 <2,5	-	230-300	90-95	25-35	0,2-0,3
KALIN KAPLAMA ANODLAMA	H_2SO_4	180-350	2,5-6	15-120	-10 -+10	60-240	30-40
	KOH , Na_2SO_3	180-200	2,5-5	< 90	-7 - 0	20-90	
SÜLFİRİK ASİT ANODLAMA	H_2SO_4	180-200	0,5-2	< 24	15-23	15-60	5-25
KORMİK ASİT ANODLAMA	H_2CrO_4 (CrO_3)	30-55	3	< 40	20-40	30-60	2-6
OKSİLİK ANODLAMA	$\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$	40-60	2,5-3,5	120	15-20	90-210	42-52
ALKALİN ANODLAMA	Na_2CO_3	20-50	0,5	110-115	30	25-30	1-5
ÇOKLU ELEKTROLİT İÇİNDE ANODLAMA	H_2SO_4 , $\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$, SÜLFİRİK ASİT	2-4 27-33 90-110	1,5-3	< 100	10-28	20-120	15-75
ANODLAMADAN ÖNCE GALVANİZ	H_3PO_4	250-300	1-3	10-30	18-35	10-15	0,3-3

İşlem sırasında sıcaklıkta önemli bir parametredir. En verimli kaplama oluşma sıcaklığı 18-24 °C arasında değişen sıcaklıklarda elde edilmektedir. Sıcaklığın artması oksitlenme hızını düşürmekte ve işlem süresinin uzamasına, solüsyon derişiminin değıştirilmesine neden olmaktadır. Oluşan kaplamanın kalınlığına etken diğeri bir parametre akım/alan oranıdır. Aynı zamanda akım yoğunluğu olarak ta bilinen bu değeri genellikle 1,5-2 amper/dm² arasındadır.

Anodik oksidasyon yöntemi ile elde edilen kaplamaların ince olması (1-30 μm), oksitleme işlemi sırasında düşük ölçekli güç kaynağı gereksinimi, kaplamanın gerçekleştiği elektrolitin genelde asidik karakterde, oluşan kaplamaların sertliğinin maksimum 800 HV değeriinde olmasından dolayı MAO yöntemine göre değışkenlik gösterir [23].

1.8.5. Mikroark Oksidasyon (MAO) Yöntemi

MAO tekniği ile kaplama son 30 yılda bulunmuş bir kaplama tekniğidir. Rus bilim adamı N.Sluginov MAO yönteminin gelişmesine öncülük etmiştir. A.B.D’den S.Brown ve Tran Bao, Rusya’dan Van L.Snezhko, L.Gaakyan, A.Yefremov, V.Chernenko anodik spark depolamada, Japonya’dan M.Jainada. ve Y.Mita, Almanya’dan W.Krysmann ve P.Kurse MAO tekniğinin geliştirilmesinde önemli katkılar yapmışlardır [24,25,26].

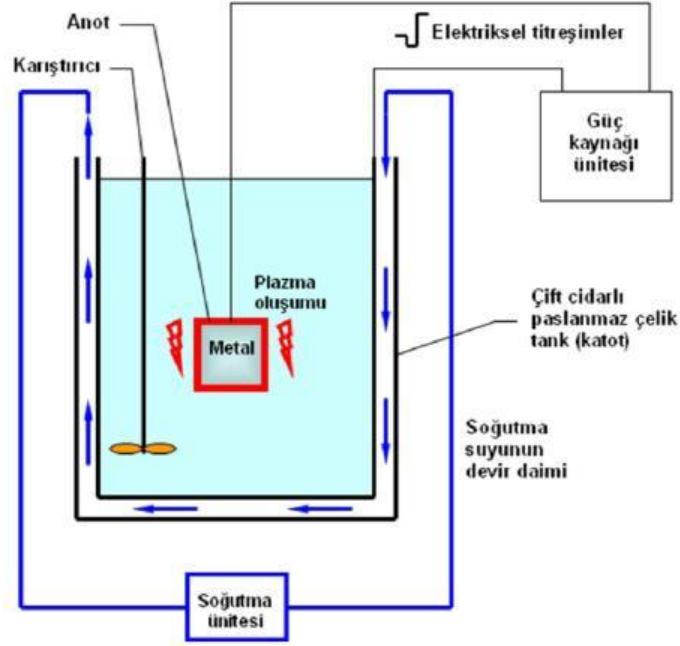
MAO tekniği ile hafif metaller grubuna giren aynı zamanda oksidasyona son derece yatkın metal ve alaşımları (Al, Ti, Mg) üzerine uygulanabilmektedir. MAO tekniği mikro plazma veya elektrolitik oksidasyon olarak ta adlandırılır.

MAO tekniği ile kaplama arasındaki yüksek bağlanma (adhezyon), yüksek sertlik, iyi aşınma direnci, korozyon direnci, yüksek dielektrik sabiti ve yüksek ısıl direnç gibi özellikleri ile ön plana çıkmaktadır. Genelde yoğunluğu düşük olan malzemelere uygulandığından yüksek teknoloji ürünlerinde havacılık, uzay, otomotiv biomalzemeler gibi geniş bir kullanım potansiyeline sahiptir [27].

MAO ile kaplama prosesi metal numunesinin elektrolitik solüsyona daldırılması, ve yüksek güç doğru akımın kontrollü bir şekilde uygulanması ile gerçekleştirilir. MAO prosesini oluşturan ve kaplama karakteristiğini etkileyen en önemli bileşenler,

- Uygulanan Akım ve Gerilim
- Elektrolitik Çözelti ve Bileşimi
- Metal ve(ya) Alaşımı
- Kaplama süresi
- Kaplama sıcaklığı

MAO tekniği ile yapılan kaplamanın yapısı uygulama yapılacak metal–metal alaşımının kompozisyonuna, kullanılan solüsyonun bileşimine ve PH değerine, uygulanan akım, gerilim gibi elektriksel faktörlerin değerlerine bağlıdır.



Şekil 1.9. Mikroark oksidasyon (MAO) yönteminin şematik gösterilişi [29].

Şekil 1.9.'da gösterildiği gibi oksitlenecek metal ve alaşımı güç kaynağının anot tarafına bağlanır. Çoğunlukla paslanmaz çelikten yapılmış tank içerisi çift cidarlı su soğutmalıdır. Tank aynı zamanda devreyi tamamlayan katot görevi de görür. Homojenliği sağlamak, aynı zamanda homojen bir sıcaklığın sağlanması amacıyla kompresör yardımıyla çözelti içerisine hava üflenir.

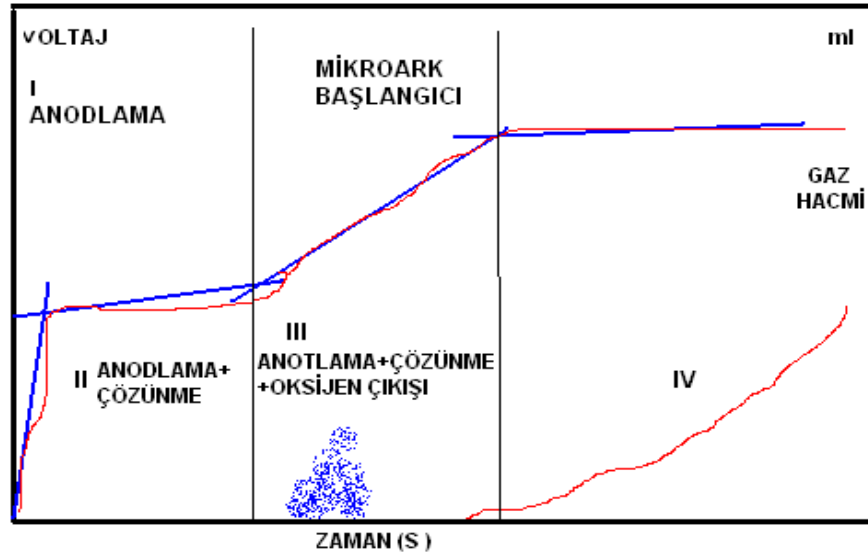
MAO kaplama tekniğinde kullanılan güç kaynakları doğru akım, titreşimli doğru akım ve dengelenmemiş akım üreten tipte güç kaynaklarıdır. Doğru akım üreten güç kaynakları potansiyostatik olarak akım uygulanmasını sağlar.

Doğru akım üreten güç kaynakları basit şekilli numunelerde ve ince yapılmak istenen kaplamalarda kullanılır. Sabit akım kaynağı ile yapılan kaplamalarda oksitlenme işleminin kontrolü daha kolaydır. Uygulanan akımın sabit olması kaplama yüzeylerinin daha gözenekli bir yapıda oluşmasını sağlar.

Alternatif akım üreten güç kaynakları yapıda gözenek miktarının düşük tutulmaya çalışıldığı durumlarda, aşınma ve korozyon direncinin daha yüksek olması istenildiği durumlarda kullanılan tip güç kaynaklarıdır.

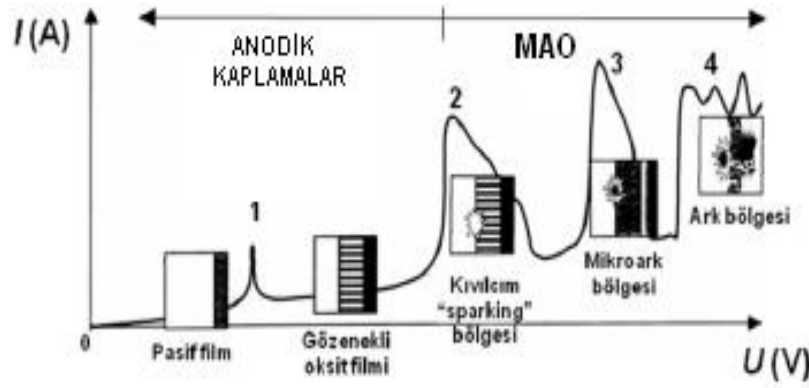
Titreşimli tip akım üreten akım kaynakları işlem sırasında anlık kesilmeler yarattığından arkın yüzeyde kalma süresinin ayarlanmasına imkan sağlar. Titreşim frekansı da değiştirilebilir olduğundan ısı değişimlerin kontrol edilmesine olanak sağlar, kaplama kompozisyonun yapısına bağlı olarak yapısı değişir.

Dengelenmemiş alternatif akım güç kaynakları farklı genliklere sahip pozitif ve negatif akım uygulanmasına, kaplama çökmesi aralığının genişletilmesine olanak sağlar.



Şekil 1.10. Mikroark oksidasyon işlem basamakları[28].

MAO sırasında (Şekil 1.10) uygulanan akımla birlikte sulu bazik çözelti içindeki metal yüzeyinde gözle görülebilir kıvılcımlar ve mikrosaniyelik mikroark spotlar görülür. Uygulanacak voltaj miktarı kaplamaya tabi tutulacak yüzeyin büyüklüğü ile doğru orantılıdır. Uygulanan voltaj, solüsyon derişimi, voltaj uygulanan alan ve zamana bağlı olarak kaplama kalınlığı geniş bir alanda (0-400 mikron) değişiklik gösterir [28].



Şekil 1.11. MAO ve anodik oksidasyon yöntemlerinde elektrot yüzeyindeki dielektrik filmde akım-voltaj değişimi [29].

MAO yöntemiyle kaplanan metal ve alaşımları genelde oksijene karşı afinitesi yüksek olan metaller ve alaşımlarıdır. Atmosfer ortamında yüzeyinde pasif olarak film tabakası bulunur. Şekil 1.11 'de 1 numaralı bölgeye kadar akımın etkisiyle ohm kuralına uygun davranış gösterir. Bu noktadan sonra voltajın etkisiyle pasif film tabakası çözünür ve 1- 2 aralığında korozyon potansiyeli aralığına denk gelir. Yeniden pasifleşme ile kullanılan akım kaynağına bağlı olarak daha gözenekli bir yapı oluşur ve bu bölgede voltaj düşüşü görülür [30-31].

2 noktasından itibaren oksit film içerisindeki elektrik alan kuvveti kritik değeri aşar. Bu değerin ötesinde oluşan film tabakası kırılır. Oksit filmin kırılmasıyla yüzeyde hareket halinde hızlıca yanıp sönen kıvılcımlar gözlemlenir.

$$aqE > \Delta G_{me/ox} + Q_d$$

$$h_{bl} = \frac{\beta U}{\ln i_i - \ln \alpha} = m_{bl} U$$

a,q,E : potansiyel bariyer, iyon şarjı, elektrik alan

$\Delta G_{me/ox}$: aktivasyon enerjisi

i_i : akım yoğunluğu

α, β : sabit

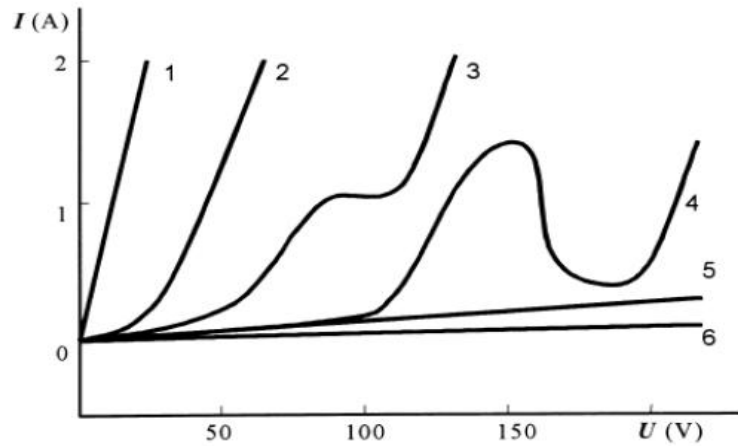
U : potansiyel düşüş

m_{bl} : bariyer etkisi

h_{bl} : bariyer kalınlığı

3 noktasında darbe iyonlaşması, termal iyonlaşma prosesiyle tetiklenerek daha yavaş oluşan fakat büyük ark-deşarj oluşması izler. 3-4 aralığında kalınlaşan oksit filmin çoğunluğunda negatif yük artışıyla termal iyonlaşma engellenir. Son bölge olan 4. bölgede ise oluşan mikro-ark kıvılcımları şiddetlenir ve metal yada alaşımları içerisinde ilerleyerek filmin termal olarak kırılmasına sebep olabilir. 2 noktasına kadar olan bölgede mikroark dışındaki anodik oksitleme prosesleri için geçerli akım ve voltaj değerleri kullanılır. Mikroark yönteminde geleneksel yöntemlerden daha yüksek akım ve voltaj değerleri gereklidir.

MAO yönteminde kullanılan elektrolit seçimi de çok önemlidir. Metal ve elektrolit ikilisi seçimi kaplama yapılacak altlık malzemelerin özelliğine göre seçilir. Bunun için genellikle metal pasifleşmesi için kullanılan polarizasyon test verileri esas alınır. Örneğin Şekil 1.12’de alüminyum ve alaşımları için hazırlanmış farklı voltaj ve akım eğrileri gösterilmektedir. Her eğri farklı elektrolit karışımı ile hazırlanmıştır.



Şekil 1.12. Alüminyumun MAO tekniği ile oksitlenmesi işleminde kullanılan elektrolitlerin fonksiyonları; (1) hızlı metal çözünmesi, (2) yavaş metal çözünmesi, (3) dar voltaj aralığında metal pasifleşmesi, (4) geniş bir pasifleşme aralığıyla karmaşık bir davranış, (5) zayıf, (6) güçlü metal pasifleşmesi [29].

1 nolu çözelti solüsyonu alüminyumun hızlı çözünmesini sağlayan NaCl, NaClO₃, HCl ve NaNO₃. 2. çözelti metalin yavaş bir şekilde çözünmesini sağlayan H₂SO₄, (NH₄)₂S₂O₈, NaSO₄. 3. çözelti daha dar bir voltaj aralığında metalin pasifleşmesini sağlayan sodyum asetat ve fosforik asit. 4. çözelti daha kompleks davranış gösteren florür elektrolit olan KF ve NaF. 5. çözelti metalin zayıf bir şekilde pasifleşmesini

sağlayan elektrolitler. 6. çözelti metalin güçlü bir şekilde pasifleşmesini sağlayan elektrolitler, borik asit, fosforik asit, karbonik asit, inorganik polimerler olan silikatlar, alüminatlar gibi bileşimlerden oluşur.

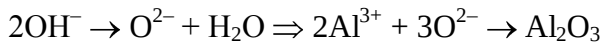
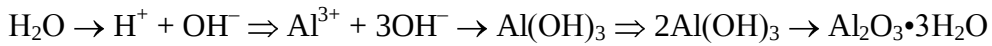
2 ve 3. gruba dahil olan elektrolit çözeltileri ana alt malzemenin oksitlenmesinin yanı sıra elektrolit içerisindeki maddelerin altlık malzemeye çökmesi ile kaplama oluşmasını tetiklerler. 2. ve 3 grup elektrolit bileşimleri geniş bir alanda kaplama kompozisyonunun ve özelliklerinin değiştirilebilmesine olanak sağlayan çözeltilerdir[29].

MAO tekniği ile kaplama prosesinde gerçekleşen reaksiyonlar genel olarak şöyledir:

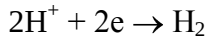
Anotta gerçekleşen reaksiyon,



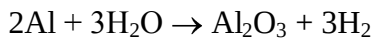
Elektrolitte gerçekleşen reaksiyon,



Katotta gerçekleşen reaksiyon,



Genel reaksiyon,

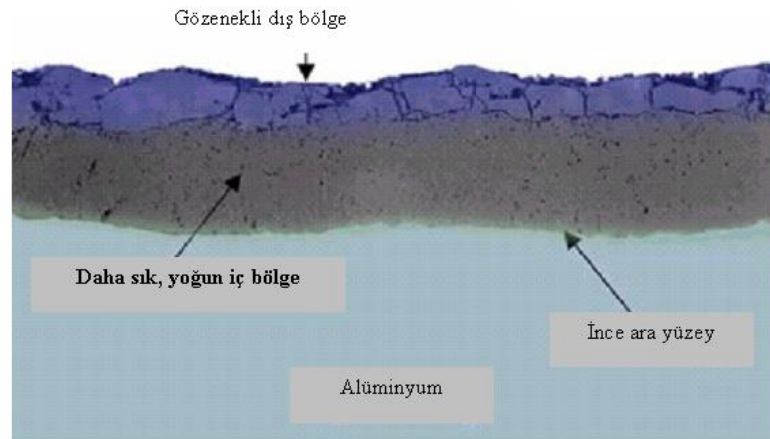


MAO yönteminde elektrolitler işleme farklı katkılarda bulunurlar. Kaplamaya sadece oksijen katan çözeltiler, kaplamaya diğer elementleri katan katodik bileşenler içeren elektrolitler, kaplamaya diğer anodik elementleri katan bileşenler içeren elektrolitler, makro büyüklükteki parçacıkların kaplama kompozisyonuna katılmasını sağlayan elektrolitlerdir.

Silikat esaslı ikiden çok bileşenli elektrolit çözeltileri sodyum ve potasyum silikat bazlı olanlar MAO yöntemiyle kaplamalarda geniş bir kullanım alanına sahiptir. Çözelti iletkenliğini artırmak amacıyla NaF, NaOH veya KOH gibi bazik çözelti oluşumuna neden olan katkıları kullanılır. Sistemi stabilize etmek amacıyla gliserin, sodyum karbonat veya potasyum karbonat ile modifiye edici sodyum alüminat ilaveleri yapılır. Elektrolitin sıcaklığı 20-40°C arasında kullanıldığı zaman iyi bir verim elde edilmektedir. Kullanılan elektrotların pH dereceleri 8-12 arasında değişmektedir. Diğer klasik anodlama prosesinde pH değerleri daha düşüktür. Ayrıca elektrolitler yüksek çalışma kararlılığı göstermekte, kullanım süresince doğrultulabilir ve işlemler arasında uzun zamanlı aralarda direnebilir özelliği taşımaktadır [29].

1.8.5.1. MAO Kaplamalarının Mikroyapı Özellikleri

MAO yöntemiyle yapılan kaplama çalışmaları sonucunda oluşan kaplamanın farklı tabakalardan oluştuğu gözlemlenmiştir (Şekil 1.13). Kaplama genellikle porozite oranı yüksek dış katman ile, içerde daha az poroziteye sahip ikinci bölgeden oluşmaktadır. Yapılan çalışmaların bazılarında ise ana altlık malzeme ile yoğun kaplamanın oluştuğu kısım arasında çok ince (5-6 mikron) tabaka oluştuğu rapor edilmiştir [32-35].

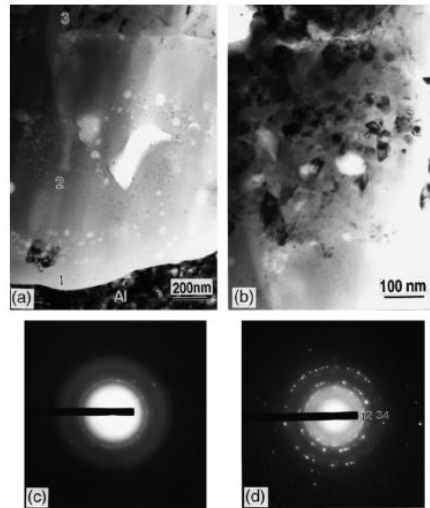


Şekil 1.13. Bir Al alaşımı üzerine MAO yöntemiyle yapılan kaplamanın kesit görüntüsü [36].

Oluşan bu katmalı tabakalardan en dışta oluşan tabakalar genelde düşük sıcaklıkta oluşabilen fazlardan oluşan mekanik mukavemet değerleri düşük olan kaplamalardır. İç kısımda oluşan yoğunluğu yüksek katman ise kullanılan akım, solüsyon ve alttık malzemenin çeşidine göre değişen değişik mekanik değerlere sahip fazlar içen yapıdır.

Gözenekli yapıda oluşmuş dış bölge kaplamasının kırılmanlığı yüksek olup genellikle toplam kaplama kalınlığının % 5-30'unu oluşturur. Bu bölgede daha çok, yarı kararlı olan $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ fazı bakımından zengin ve oldukça pürüzlü bir yüzeyden oluşur. Daha çok yumuşak ve kırılman olan bu bölge alttaki daha yoğun fonksiyonel tabakanın çıkarılması için kolaylıkla parlatılarak uzaklaştırılabilir. Bu genelde daha çok aşınma direnci ve yüksek sertlik gerektiren uygulamalarda uygulanır. Şekil 1.13'te gösterilen yoğun bölge genelde toplam kaplama kalınlığının %70-95'ni içerir [37].

Geçirimli elektron mikroskopuyla (TEM) yapılmış çalışmada kaplama tabakası yukarda belirtildiği gibi üç ayrı tabakaya ayrılarak incelenmiştir[37]. Yapılan inceleme sonrasında sınırlı sayıda geçirinime sahip incelemede 1 numaralı alt tabaka yoğun homojen gözenekli yapıyı, 2 numaralı alt tabaka yaklaşık 10-80 nm boyutunda gözenekliliğe sahip ve nano kristalli bölgelerden oluşan gözenekli yapıyı, 3 numaralı alt tabaka 50-80 nm aralığında tane boyutuna sahip nano kristalli yapıyı gösterir [37].



Şekil 1.14. Kesit alandan alınan kaplamanın TEM görüntüsü.(a) Kaplama-matris ara yüzeyine yakın kaplamanın iç bölgesi, (b) Orta tabaka ve görüntüleri, (c) 1 nolu alt tabaka, (d) 2 nolu alt tabaka [37].

Yapılan TEM analizi ile 1 nolu alt tabakada gözenekliliğin olmadığını, 2 nolu alt tabakadaki gözenekliliğin birbiri ile birleşik olmasından ziyade daha ayrık olduğunu gösterir. 1 nolu yoğun gözenek dağılımı homojen alt tabaka ve daha az gözenek oranına sahip olan 2 nolu alt tabaka kaplamalarının korozyon direncini güçlendirmede difüzyon bariyeri olarak görev yaparak kaplamalara mükemmel anti korozyon performansı sağlar. Bununla birlikte alümina kaplamaların nano ölçekli tane boyutuna sahip olması diğer kaplama metotlarına kıyasla önemli bir şekilde kaplama mukavemetini ve sünekliğini artırır. Kaplamaların daha yüksek aşınma ve korozyon direncine sahip olması yoğun iç tabakaların bulunmasına bağlıdır.

1.8.5.2. Kaplama Kompozisyonu

MAO prosesinde kaplama kompozisyonuna uygulanan akım yoğunluğu, voltaj profili ve altlık malzemenin yapısı, işlem sırasında kimyasal komponentlerin bileşimleri, yüksek ısınma ($\sim 10^4$ °K) ve soğuma (10^8 °Ks⁻¹) hızları farklı fazların oluşmasına neden olur. Tablo 1.6'da farklı alüminyum alaşımlarına yapılan MAO işlemi sonrasında kaplamada oluşan fazlar verilmiştir [33].

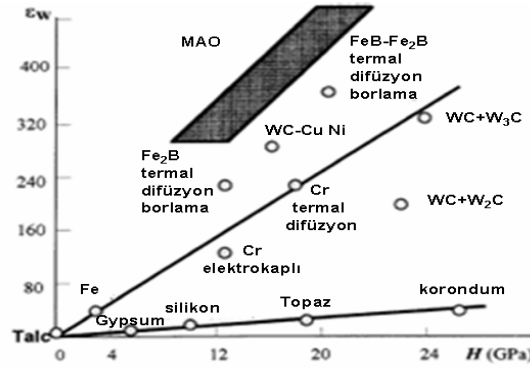
Tablo 1.6'da da görüldüğü gibi alüminyum ve alaşımlarında uygulanan MAO işleminde genelde α - γ Al₂O₃ fazları meydana gelir. Bakır oranı yüksek olan alüminyum alaşımlarında α Al₂O₃ oluşum miktarı % 60 civarına ulaşabilmektedir. Müllit fazının oluşum miktarı ise silisyum içeren altlık malzemelerde daha fazladır.

1.8.5.3. Kaplama Boşluk Yapısı

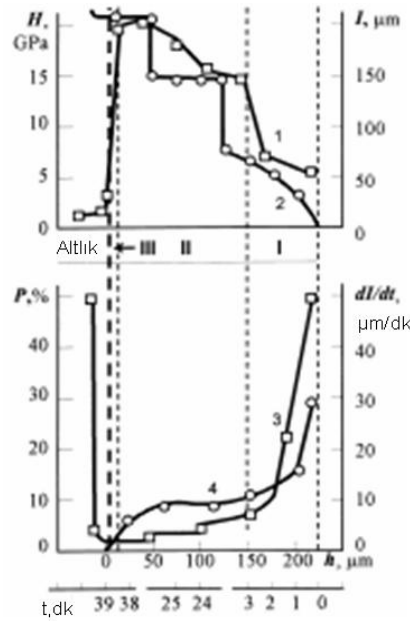
MAO yapılan kaplamaların gözenek yapıları diğer anodik kaplama yöntemlerine göre daha az seviyededir. 2,4 gr.cm⁻³ yoğunluğa tekabül eden % 10 gözeneklilik miktarı civarında gözeneklilik yapıda bulunmaktadır. Bazı çalışmalarda yapılan SEM kesit analizlerinde % 3 ten daha aşağıda gözenek miktarlarına rastlanılmıştır. Tablo 1.6'da değişik alüminyum alaşımlarının MAO işlemi sonrasında kaplamada oluşan boşluk oranları gösterilmiştir. Kaplamanın yoğun olması, iyi aşınma direnci, yüksek sertlik veya iyi korozyon direncinin niceliksel açıklaması olarak kullanılır [38,39].

1.8.5.4. Aşınma Direnci

MAO tekniğiyle alüminyum üzerinde oluşturulan kaplamaların abrasif aşınma direnci, diğer kaplama teknikleriyle oluşturulmuş olan (WC esaslı kompozitler, termal difüzyon bor kaplamalarına) göre daha fazladır. Tablo 1.6’da değişik alüminyum alaşımlarının MAO işlemi sonrasında oluşan kaplama tabakalarının aşınma dirençleri gösterilmiştir [40]. Şekil 1.15’te de gösterildiği gibi MAO yapılmış kaplamaların aşınma direnci ve sertliği oldukça yüksektir.



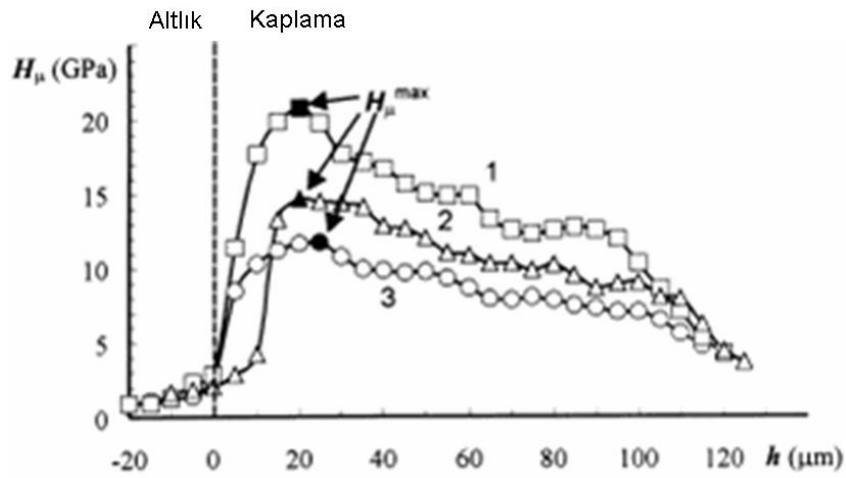
Şekil 1.15. Talc’a göre bazı malzemelerin göreceli aşınma direnci (ϵ_w), H: malzeme sertliği [40].



Şekil 1.16. Aşınma derinliği (I), sertlik (H) ve aşınma oranının (dl/dt) zamanla değişimi ve gözenekliliğin (P) kaplama kalınlığı (h) ile değişimi; dış gözenekli tabakanın (I) kalınlığı 30-60 μm ; yoğun iç tabaka (II) kalınlığı 100-170 μm ve difüzyon tabakasının (III) kalınlığı 3-5 μm [40].

Şekil 1.16'daki şekilde görüldüğü gibi 1 nolu alan dış tabakanın yüksek aşınma hızı, nispeten düşük sertlik ve gözeneklerle alakalıdır. 2 nolu alan kaplamanın iç bölgesindeki minimum aşınma hızı, bu bölgedeki en yüksek sertlik ve en düşük gözenekle alakalıdır. 3 nolu alan ise kaplama-altlık ara yüzeyindeki aşınma hızının ani artışı, işlem görmemiş yumuşak alüminyum altlık malzemenin açığa çıkmasıyla ani sertlik ve yük taşımasının düşmesinden dolayıdır.

MAO prosesinde oluşan kaplama fazlarının, kaplama kalınlığının artışıyla bağlı olarak ciddi miktarda mekanik özelliklerde artış meydana gelmektedir.



Şekil 1.17. Kaplama kesiti mikrosertlik dağılımı; (1) $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$; (2) $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$; (3) müllit [41].

Genelde kaplamada en sert bölge, kaplama- altlık ara yüzeyinden yaklaşık 20-30 μm uzaklıkta bulunan altlık malzemeye yakın yoğun yüksek sıcaklık fazlarının maksimum oluşma olasılığının olduğu yerdedir. Maksimum sertlik değerleri α -alumina esaslı kaplamalar için 2200-2500 HV, γ -fazlı kaplamalar için 1500-2000 HV ve müllit esaslı kaplamalar için 900-1300 HV'dir. Kaplamanın gözenekli dış bölgeleri daha düşük sertlik değerlerine sahiptirler [42].

1.8.5.5. Dielektriksel Özellikler

MAO prosesiyle oluşan Silika ve alüminanın yüksek elektrik direnci ve yüksek kırılma dayanımı güçlü dielektrik özellikler sağlar. Özgül direnç değerleri $2,7 \times 10^{14}$ - $3,5 \times 10^{13} \Omega m$ civarındadır [43,44].

1.8.5.6. Korozyon Direnci

Genelde alüminyum ve alaşımlarına uygulanan MAO işleminde oluşan kaplama fazları mükemmel korozyon direncine sahip kaplamalardır. Örneğin 0,5 M NaCl çözeltisine batırılan numuneler 316L paslanmaz çeliğe göre daha iyi korozyon direnci gösterirler. Tablo 1.6'da değişik alüminyum alaşımlarının MAO işlemi sonrasında oluşan kaplamalarının korozyon dirençleri gösterilmiştir [37,45].

Tablo 1.6. MAO yöntemiyle kaplanmış Al ve alaşımların kaplama karakteristikleri[42,45,46,47,48,49,50,51,52,53,54].

NO	AKTİK MALZEME	KULLANILAN ELEKTROLİT (g/l)	UYGULANAN AKIM (A/cm ²)	UYGULANAN VOLTAJ (V)	KAPLAMA SÜRESİ (dk)	SOLÜSYON SICAKLIĞI (°C)	ELDE EDİLEN KAPLAMA KALINLIĞI (µm)	ELDE EDİLEN KAPLAMA FAZI	KAPLAMA SERTLİĞİ (HV)	KAPLAMA BÜYÜME ORANI (µm/dk)	ELASTİSİTE MODÜLÜ (E, GPa)	KAPLAMA PORÖZİTE ORANI (%)	KAPLAMA YOĞUNLUĞU (gr/cm ³)	EMEİL TUNERLİ (m ² /dm ²)	KOR. DİRENCİ (kohm/cm ²)	YÜR. (Ra)
1	%30Cu-%70Al 21g-%0.5 Fe+dl	H ₂ SO ₄ 10	4	1000	120	20-30	50-60	γ-Al ₂ O ₃ malin	-	-	22	7-10	3.47	-	-	-
2	2024	HOH 10	5	1000	60	18-25	170	γ-Al ₂ O ₃ malin	-	2.83	-	-	3.38	11.8	-	-
3	2024	HOH 10	1	1000	180	18-25	240	γ-Al ₂ O ₃ malin	2100±400	1.25	-	-	3.38	267	-	-
4	2024	HOH 10	0.67	1000	60	18-25	170	γ-Al ₂ O ₃ malin	2100±400	1.17	-	-	-	30	-	-
5	2024	HOH ₂ 20 31H ₂ O 13	1.25	1000	25-120	18-25	75-105	γ-Al ₂ O ₃ malin	2100±400	0.71	-	-	-	35-177	-	-
6	2024	HOH ₂ 10 21H ₂ O 13	1	1000	90-150	18-25	150-250	γ-Al ₂ O ₃ malin	2100±400	1.67	-	-	-	4	-	-
7	2024	HOH 21H ₂ SO ₄ 10 3H ₂ O 13	1	1000	135	18-25	130	γ-Al ₂ O ₃ malin	2100±400	0.96	-	-	-	8	-	-
8	2024	HOH 5	10	1000	120-300	35	50-250	γ-Al ₂ O ₃	-	-	-	-	-	-	-	-
9	Hg-%9Al-%50 492n	H ₂ SO ₄ 23H ₂ O 10	10	1000	20	24	60	HgO Hg-Al ₂ O ₃	-	-	-	-	-	-	1*10 ³	7.250.3
10	2024	HOH ₂ 10 H ₂ SO ₄ 10	1	400-600	140	35	60	γ-Al ₂ O ₃ malin	-	-	-	-	-	-	-	-
11	%40Cu-%60Al 21g-%0.5 Fe+dl	H ₂ SO ₄ 10	4	1000	120	20-30	50-60	γ-Al ₂ O ₃ (%64)	-	-	18-22	7-10	3.47	-	-	-
12	%4.3Cu-%4.5 Hg+dl	H ₂ SO ₄	-	1000	-	-	230	γ-Al ₂ O ₃ (%12-63)	-	-	38-32	-	-	-	-	-
13	Al/magnez- dl	Al ₂ SO ₄ 10H ₂ O 26.3	-	-	240	20-60	-	Al ₂ C ₃ Al ₂ O ₃	1000±300	1.25	-	-	-	6.6	-	-
14	%99.5 Al	HOH 2	-	1000	120	20	60-80	γ-Al ₂ O ₃	2000±400	-	24	-	-	-	-	-
15	Al ₂ H ₂ O ₄ 02- 297-7.04	H ₂ SO ₄ 8 HOH 3	5	1000	90	20	25-30	γ-Al ₂ O ₃ malin	-	-	-	-	-	-	-	7.5-8.62
16	600.2 Al	H ₂ SO ₄ 10	-	400-600	180	4-8	20-100	γ-Al ₂ O ₃ malin	2400-1500	-	-	3-10	-	-	-	-
17	7075 Al	H ₂ SO ₄ 10	0.1-0.3	-	60	32-36	100	γ-Al ₂ O ₃	1500±300	0.55	-	-	3.45	-	-	-
18	%99.9 Hg	H ₂ HO 20	-	50-250	10-15	25	-	HgO	-	-	-	-	-	-	1.07*10 ³	-
19	7075 Al	H ₂ SO ₄ 10	0.3	-	1-30	35-37	1.45 (dk)	γ-Al ₂ O ₃	1500-1200	-	-	-	-	-	-	0.5-25
20	600.2	H ₂ O 350 40 HOH	0.4-1.40	1000	-	15-45	40-50	γ-Al ₂ O ₃	-	(10-30%)	-	-	3.1	-	-	-
21	600.2	H ₂ SO ₄ 5 HOH 3	1	400-600	120	15-25	100	γ-Al ₂ O ₃	900-2000	-	-	-	-	-	1.03*10 ³	6.3
22	2024	H ₂ OH ₂ -2+ H ₂ SO ₄ 12- 40	1	1000	90	25	150	γ-Al ₂ O ₃	1200- 1500H	1.67	-	-	-	-	-	-
23	600.2	H ₂ SO ₄ 10	1	400-600	90-240	25-25	100-250	γ-Al ₂ O ₃ malin	2400±200	-	-	-	-	-	49.45*10 ³	-

1.8.5.7. MAO Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları

Oksitlenmeye karşı yüksek afiniteye sahip (Al, Ti, Mg gibi) metal ve alaşımlarına uygulanan yöntem, bu tür metal ve alaşımlarının yoğunluğunun düşük olması nedeniyle çalışma ortamlarına göre daha yüksek sertlik, aşınma ve korozyon direncinden dolayı kompozit malzemelere alternatif olarak potansiyel malzemelerdir.

Yüksek alaşımlı çeliklerle ve özel işlemlerle elde edilebilen mukavemet değerleri, MAO tekniği ile daha düşük fiyata sahip alüminyum ve alaşımlarına uygulanarak parça maliyeti daha düşük ürünler elde edilir.

Aşınma direnci, korozyona karşı yüksek direnç, termal erozyon direnci, dielektrik karakteristikleri gibi fiziksel ve mekanik özellikler bakımından diğer tekniklere göre çok daha iyi sonuçlar vermektedir.

MAO'nun diğerlerine göre en önemli farkı oluşan kaplama tabakasının son derece kararlı bir yapıda olması ayrıca kaplama kalınlığının 350-400 mikron seviyelerine kısa sürede (120-180 dk) çıkabilmesinden dolayı işlem süreleri açısından oldukça kısadır.

İşlem sırasında çevreye karşı zararlı asidik solüsyonlar ve kimyasallar kullanılmadığından dolayı çevreye karşı daha az zararlıdır.

Klasik anodlama işlemiyle karmaşık oranda grift parça yüzeylerine özel işlemler gerektirmeden homojen bir kaplama kalınlığı elde edilebilir ve eşit ve homojen kaplama yüzeyleri elde edilir. Özel geometriye sahip parçaların MAO işlemi sırasında iki yüzey arasında etkileşim olacaktır. Parçaların elektrolit ve çıkan elektrik arklarını sönmülmesi ciddi bir problemdir. Proseste iki yüzey birbirinden etkilenecek kaplama kalitesini, kalınlık ve yüzey morfolojisi açısından etkiler.

Proses sırasında banyo sıcaklığı ısıtıl işlemlerde kullanılan tuz banyoları gibi yüksek sıcaklıklara sahip değildir. Banyo sıcaklığı 20-50 °C arasındadır ki işlem sırasında çıkılan sıcaklık ve etki süresi mikro saniyeler mertebesinde olduğundan dolayı ana malzeme alaşımlarında difüzyon etkisiyle homojensizlik problemi görülmez.

Tablo 1.7. MOA yöntemiyle klasik anodik oksidasyon yöntemi arasındaki farklar.

İŞLEM PARAMETRESİ	MAO	KLASİK ANODLAMA
Proses Hızı	Hızlı	Yavaş
Güç Kaynağı	Yüksek AC	Düşük DC
Elektrolit	Bazik	Asidik
Elektrolit Sıcaklığı(⁰ C)	Düşük (20-60)	Yüksek
Kalınlık (mikron)	0-400	0-30
Sertlik (vikers)	Max.2500	Max.800
Zehirli Atık	Yok	Var
Elektrik Direnci	Dielektrik	Değişken
Isı Direnci	Yüksek	Orta
Aşınma Direnci	Yüksek	Orta

İşlem sonrasında numune boyutlarında değişme oranı çok düşüktür. Tolerans verilmesi neticesinde işlem sonrasında boyutsal değişim çok az olduğundan dolayı ekstra işlem gerektirmez.

MAO da enerji limitleri vardır. Yüzey alanı yüksek ürünlerde MAO işlemini yürütmek için yüksek voltaj (10.000 V'un üzerinde) ve güç kaynağı kapasitesi (1 MW'tan fazla) gerekmektedir. Bu yüksek enerji tüketimi ve gereksinimi için ilk kurulum maliyeti çok yüksektir.

1.8.5.8. MAO Prosesinin Uygulama Alanları

MAO yöntemiyle kaplanmış parçaların çevreye karşı zehirli atıklar üretilmemesi, hafif metal ve alaşımlarına uygulanmasıyla yüksek alaşımlı çeliklerle mukayese edilir. Hatta daha yüksek aşınma ve korozyon direncine sahip olması, kaplamanın son derece kararlı olması nedeniyle özellikle otomotiv, tıp ve makine sanayinde kullanımı artan alüminyum, titanyum ve magnezyum alaşımlarında çalışma şartlarına göre yaygın olarak uygulanmaktadır. Tablo 1.8'de gösterildiği gibi MAO sonrasında malzemelerin mekanik değerlerinde ciddi oranlarda artışlar olmakta, maliyet olarak düşüşler görülmektedir [33].

MAO tekniği ile kaplama arasındaki yüksek bağlanma (adhezyon), yüksek sertlik, iyi aşınma direnci, korozyon direnci, yüksek dielektirik sabiti ve yüksek ısıl direnç gibi özellikleri ile ön plana çıkmaktadır. Proseste değiştirilebilen parametreler (voltaj, elektrolit bileşimi akım yoğunluğu) neticesinde farklı yapı ve özelliklere sahip mikro düzeyde pürüzlülük içeren yüzeyler elde edilebildiğinden dekoratif amaçlı ya da ikincil kaplamaların yüzeylerine uygulanabilmektedir. Bu açıdan polimer, seramik veya metaller değişik yöntemlerle (CVD, PVD,) kaplandıkları yüzeylerine mikroark işlemi uygulanabilmektedir.

Tablo 1.8. MAO işleminin uygulanabildiği alanlar ve elde edilen sonuçlar [33].

UYGULAMA	PARÇA	MALZEME	ALTLIK MALZ.	KAPLAMA	KAP.ÖZELLİĞİ	KATKISI
Tekstil mak. Kesme mak. Bükme mak.	Rotor İğne Koruyucu kap.	Yüksek muk. Al alaşım. Krom/çelik alaşım.	Yüksek muk. Al-alaşım	α -Al ₂ O ₃ 100-150 mikron	%100-200 çalışma ömrü artışı	%60-80 üretim maliyet azalması
Gaz pomp. Kitleme fit. Basınç pomp.	Kesme bıçak. Parlatma yüz.	Yüksek muk. Al alaşım. Takım çel.	Al-Mg alaşım	γ - Al ₂ O ₃ 60-120 mikron	%100-200 çalışma ömrü artışı	Üretim zam.mal azalması
Motor ends. Elektrik mot.	Piston	Al alaşımları- Al-Si alaş.	Al-Mg alaşım Al-Si alaşım	γ - Al ₂ O ₃ , müllit 6-10 Gpa	%160-250 ağırlık azalması	%80 üretim maliyet azalması
Elektrolitik kap. Elektrik alç.	Elektrot eng. Isı kapa.	Al/anodik Al-alaş. Renkli anod.	Al	γ - Al ₂ O ₃ 30-50 mikron	%20-50 kapasite azalması	%80 oksidas. zamanı azalması
Biomedikal malz. Mikser	Bıçak İmplant	Paslanmaz çelik. Titanyum	Al-alaşım. Ti -alaş.	α -Al ₂ O ₃ TiO ₂ 4-10 mikron	Bio uyumlulukta gelişme	%70 üretim maliyet
Turbo moleküler pomp. Buharlaştırıcı	Rotor Statör Bot	Paslanmaz çelik W, Mo, Ta	Al-Ti	γ - Al ₂ O ₃ 50 mikron 14 Gpa	%200 çalışma ömrü artışı	%80 maliyet azalması
Uzay ends. Optik alet. Dişli çark.	Dişli teker	Paslanmaz çelik. Ti/termal oksidasyon	Yük. Muk. Al alaşım	TiO ₂ 4-10 Mikron 10-14 Gpa	Ağırlık azalması, %100 çalışma ömrü artışı	%60 maliyet azalması
Takım end. Kesme ve presleme mak.	Kesme ucu Mil Presleme.	Yüksek hız çeliği	Yüksek hız çelikleri	α - WB, W ₂ B ₅ 100-150 mik.	%50-150 çalışma ömrü artışı	%70 maliyet azalması

1.9. Çalışmanın Amacı

Al, Ti, Mg gibi düşük yoğunluğa sahip metallere uygulanan MAO kaplama tekniğiyle elde edilen oksit tabakanın özelliklerine etki eden birçok parametre olup parametrelerden akım ve voltaj, kullanılan elektrolitin bileşimi ile ilgili bir çok araştırma yapılmış ve yapılan bu araştırmalardan bazıları Tablo 1.6’da gösterilmiştir.

Alüminyumun MAO yöntemiyle kaplanması prosesinde bir diğer önemli parametre olan altlık malzemenin bileşiminin tek başına kaplama karakteristiğini nasıl etkilediği bilgisine yapılan literatür taraması sonrasında rastlanılmamıştır.

Altlık malzemenin MAO prosesinde önemli bir parametre olduğu dolaylı olarak anlaşılmaktadır. Tablo 1.6’da görüldüğü gibi değişik alaşım grubundan malzemeler MAO ile kaplanmıştır. Ancak altlık malzemenin kimyasal bileşiminin MAO davranışına etkisini direk olarak araştıran sistematik bir çalışma görülmemiştir.

Yapılan bu çalışmada alaşım elementi olarak bakırın, alüminyumun MAO tekniği ile kaplama davranışına etkisi amaçlanmıştır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

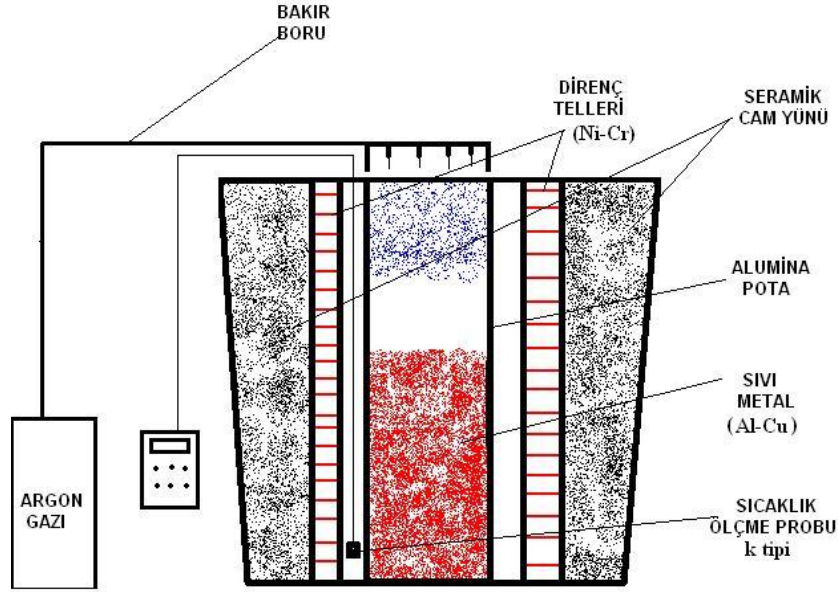
2.1. Al-Cu Alaşımların Hazırlaması

Bu çalışmada, sentetik Al-Cu alaşımlarını hazırlamada kullanılacak saf alüminyum (%99,90) ve saf bakır (%99,95) külçelerinden ergitme sırasında kullanılan alümina potalara sığacak şekilde farklı boyutlarda parçalar kesilip, yüzeyleri 80 ve 320 numara zımpara ile muhtemel oksit ve yağ tabakaları gidermek üzere temizlendi ve etil alkol ile yıkanıp sıcak hava ile kurutuldu. Saf alüminyum ve saf bakır elementlerinden Tablo 2.1’de belirtilen miktarlarda tartılarak yedi farklı alaşım ergitme işlemi için hazırlandı.

Tablo 2.1. Altlık malzeme olarak hazırlanacak Al-Cu alaşımlarını hazırlamada kullanılan Al ve Cu miktarları.

Alaşım No	% Cu	Alüminyum Miktarı (gr)	Bakır Miktarı (gr)	Toplam Metal Miktarı (gr)
1	0,5	246,30	1,25	247,55
2	1	225,85	2,29	228,14
3	2	357,30	7,30	364,60
4	4	219,06	9,03	228,09
5	8	224,50	19,40	243,90
6	16	211,90	45,32	257,22
7	34	187,75	95,01	282,76

Yüzeyleri temizlendikten sonra tartılan alüminyum ve bakır elementleri % 99,90 saflığa, 0,5-3 mikron toz boyutuna sahip alümina tozlarının slip casting ile hazırlanıp 1620 °C’de sinterlenen yüksek yoğunluğa ulaşmış çapı 30 mm, yüksekliği 200 mm olan silindirik alümina potalar içerisine yerleştirildi. Tablo 2.1’de belirtilen miktarlarda her bir alaşım ayrı potada ergitildi. Al-Cu alaşımlarının ergitilerek hazırlanması için GYTE laboratuvarında bu çalışma için tasarlanan bir fırın kullanıldı.



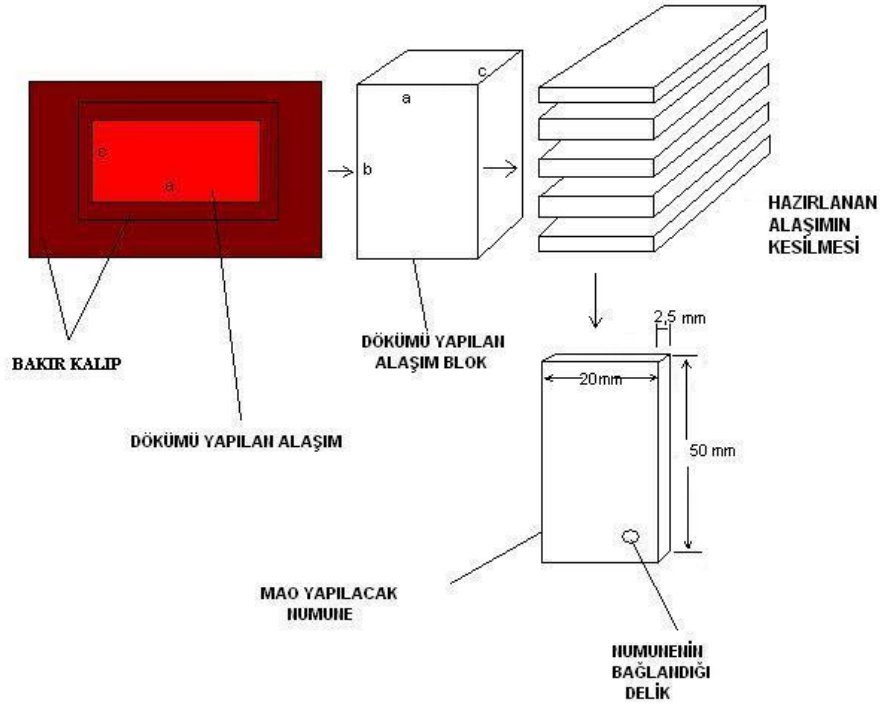
Şekil 2.1. Al-Cu alaşımlarının ergitilmesi için tasarlanan fırının şematik kesit görüntüsü.

Bu fırın elektrik direnç prensibine göre çalışmakta olup 25 cm yüksekliğe, 10 cm çapa sahip alümina bir tüp üzerine Ni-Cr alaşımlı direnç telleri sarılmış ve bu tüp 20 cm yüksekliğe ve 8 cm çapa sahip silindirik ikinci bir alümina tüp içerisine yerleştirilmiştir. Fırına uygulanan elektriksel güç (0-20 A, 10-220 V) ayarlanabilir bir varyak ile kontrol edilmiştir. Dizayn edilen fırının çıkabileceği maksimum sıcaklık yapılan ön denemelerde K tipi termokopl ile 1150 °C olarak ölçülmüştür. Yine yapılan ön denemelerde Al-Cu alaşımlarının maksimum 850° C’de ergitilip bu sıcaklıkta 5 dk süreyle bekletilip Cu kalıba döküldüğünde kimyasal olarak homojen bir içerik elde edildiği tespit edilmiştir. Dolayısıyla altlık malzeme olarak Al-Cu alaşımların hazırlanması 900 °C’deki ergitme ile gerçekleştirilmiştir. Bu sıcaklığa 60 ° C/dk hızla çıkılmış ve bu sıcaklıkta 10 dk bekletilerek bakırın alüminyum içerisinde tamamen çözünmesi sağlanmıştır. Fırına ergitme sırasında bir aparat ile %99,98 saflıkta argon gazı, yaklaşık 80 cm² yüzey alanına sahip fırının üst yüzeyinden 20 ml/dk hızla fırın sıcaklığı 100° C ye ulaştıktan sonra üflenmiştir. Bekleme sırasında sıvı haldeki metal karışımı bir çubuk ile karıştırılmış ve çok az miktarda oluşan curuf tabakası temizlenmiştir.

Döküme hazır hale getirilen sıvı metal karışımı bakır bloktan yapılmış yüksekliği 200 mm, genişliği 25 mm ve boyu 50 mm olan dikdörtgen kesite sahip oda sıcaklığındaki bakır kalıp içerisine dökülerek katılaştırılmıştır.

Dökülen her alaşımın katılaşmasından sonra bir miktar ısınmış olan bakır kalıp su ile soğutulup kurutulduktan sonra diğer döküm için hazır hale getirilmiştir.

Elde edilen yedi Al-Cu alaşım Şekil 2.2’de gösterildiği gibi $2,5 \times 20 \times 50$ mm³ boyutlarında dilimlendi. Kesme işlemi Struers Discotom-5 sulu kesme cihazı ile yapıldı. Kesme işlemi sonrasında dikdörtgen şeklindeki numuneler etil alkol ile yıkanıp sıcak hava ile kurutuldu. MAO işlemi sırasında numunelerin tutturulması için numunenin köşesinden 3 mm çapında delik ve diş açıldı.

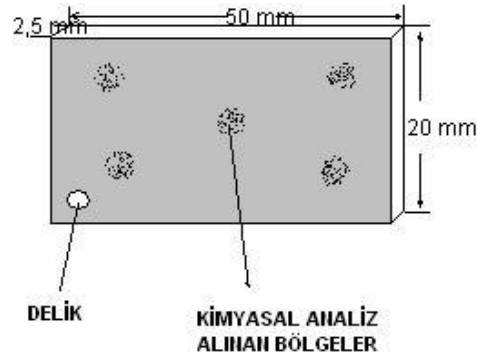


Şekil 2.2. MAO yapılacak Al-Cu altlık malzemenin hazırlanması.

Numunelerin yüzeyleri sırayla 80, 120, 320, 600, 800, 1000, 1200 grit zımparalarla zımparalanıp numunelerin yüzeyleri MAO prosesi ve kimyasal analiz için hazırlandı. Zımparalama işlemi sonrasında yüzeyler etil alkol yıkanıp hava ile kurutuldu.

2.2. Al-Cu Alaşımlarının Kimyasal Analizi

Kesilip temizlenen alaşımların kimyasal analizi Spectro-Max LMF14 cihazıyla yapılmıştır. Şekil 2.3'te gösterildiği gibi her numune için 5 farklı bölgeden ölçüm yapılarak bilgisayar programıyla aritmetik ortalaması hesaplanıp kayıt edilmiştir.



Şekil 2.3. Altlık malzemedeki kimyasal analiz yapılan bölgelerin şematik görüntüsü.

2.3. Al-Cu Alaşımların XRD Karakterizasyonu

Al-Cu numuneler 1200 grit zımpara ile zımparalanıp etil alkol ile kurutulup XRD analizi yapılmıştır. Analiz işlemi Rigaku –Rint 2200 serisi X-ray cihazında Cu K α (grafit monokromotor) ışını ile 40 kV ve 40 mA de, 1⁰/dak hız ve 0.02 derece/adım aralıklarla 20-90° arasında yapılmıştır.

2.4. MAO İşlemi İçin Çözelti Hazırlama

Hazırlanan numunelerin MAO tekniği ile kaplanması için 250 litre destile edilmiş su, 12 gr/lt (5210 gr) Na₂SiO₃.5H₂O ve 2 gr/lt KOH'ten (500 gr) kullanılarak çözelti hazırlandı. Hazırlanan çözelti MAO yapılacak Şekil 2.4'te gösterilen tanka boşaltılıp 30 dakika boyunca kompresör yardımıyla karışması sağlandı. Karışma sonunda kalibrasyonu yapılmış pH metre kullanılarak çözeltinin pH'ı 11.85 olarak ölçüldü. Banyo sıcaklığı MAO işlemi öncesi 18 °C, işlem sonrası 19°C olarak ölçüldü.

2.5. MAO Yöntemiyle Al-Cu Numunelerin Kaplanması

MAO tekniği ile kaplama yapılacak numunelerin kaplama işlemine başlamadan önce oksitlenmesi istenilmeyen kısımları teflon bant ile sarılıp yalıtkan hale getirildi. Prosese başlamadan önce hazırlanmış numuneler etil alkol ile 5 dakika ultrasonik temizleyicide temizlenip kurutulduktan sonra solüsyonla dolu tanka daldırılarak gerekli elektriksel bağlantılar yapıldı.

Kaplama işleminde kullanılan cihaz 1-1000 volt, 1-100 amper 50 Hz alternatif akım ile çalışan özel üretim cihazdır. Cihazda 50 mikrofaraadlık basamaklarla maksimum 400 mikrofaraada kadar elektriksel yük uygulanabilmektedir.

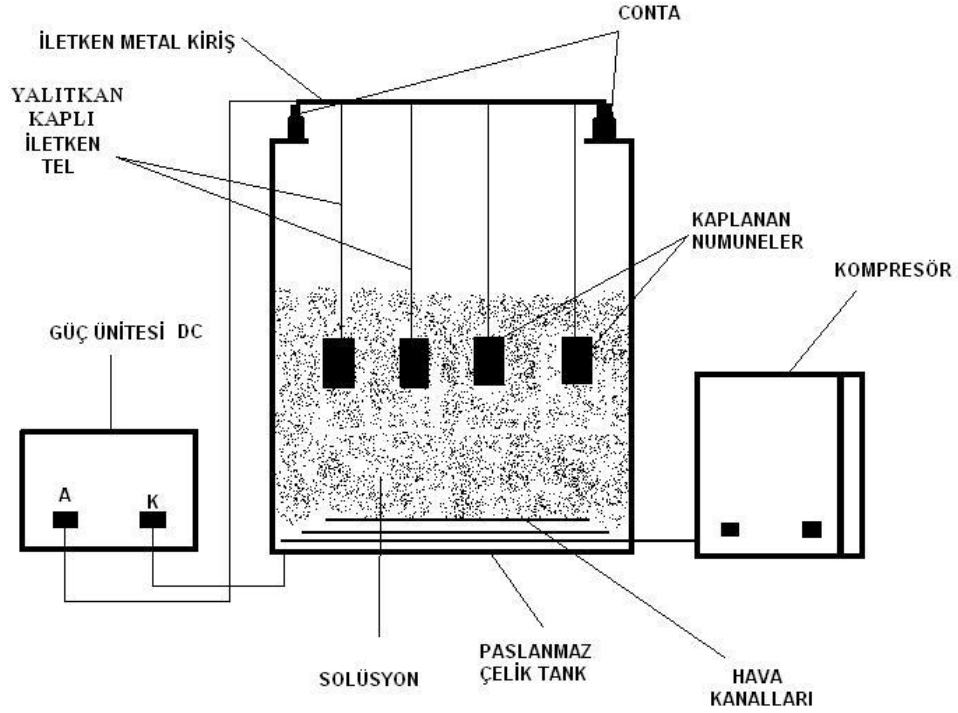
MAO işleminin yapıldığı paslanmaz çelikten yapılmış tank Şekil 2.4 'te görülmektedir. Tankın iki ayrı katmanı olup arada su soğutma düzeneği mevcuttur. Tankın alt kısmında solüsyonu karıştıran kompresörden gelen hava kanalları, üst kısmında ise güç kaynağından gelen gerilimin tankla bağlantısını kesen contalar mevcuttur.

Tablo2.2'de görüldüğü gibi kaplama yapılacak numuneler kimyasal içeriğe göre 8 ayrı gruba ayrıldı ve her biri 4 numuneden oluşacak şekilde MAO işlemi ile kaplandı. Her grubun birinci numunesi 20 dk, ikinci numunesi 40 dk, üçüncü numunesi 60 dk, dördüncü numunesi ise 120 dk süreyle kaplanmıştır.

Tablo 2.2. MAO için hazırlanan alaşımların oksitlenme işlem sırası (MAO işlemine 1.gruptan başlanıp 8.grup ile bitirilmiştir).

SÜRE	1.GRUP	2.GRUP	3.GRUP	4.GRUP	5.GRUP	6.GRUP	7.GRUP	8.GRUP
20 DK	%0.7 Cu	%1 Cu	%2 Cu	%4 Cu	%8 Cu	%18 Cu	%33 Cu	SAF Al
40 DK	%0.7 Cu	%1 Cu	%2 Cu	%4 Cu	%8 Cu	%18 Cu	%33 Cu	SAF Al
60 DK	%0.7 Cu	%1 Cu	%2 Cu	%4 Cu	%8 Cu	%18 Cu	%33 Cu	SAF Al
120 DK	%0.7 Cu	%1 Cu	%2 Cu	%4 Cu	%8 Cu	%18 Cu	%33 Cu	SAF Al

MAO işlemi sırasında her 5 dakika da bir gerilim ve akım değerleri ölçülüp kayıt edilmiş ve değişiklikler sonuçlar kısmında ayrıntılı olarak verilmiştir. İki ayrı gerilim değerleri bulunmaktadır. Birinci gerilim kapasitördeki potansiyel farkı vermekte, ikincisi ise numuneye uygulanan potansiyel farkı göstermektedir.

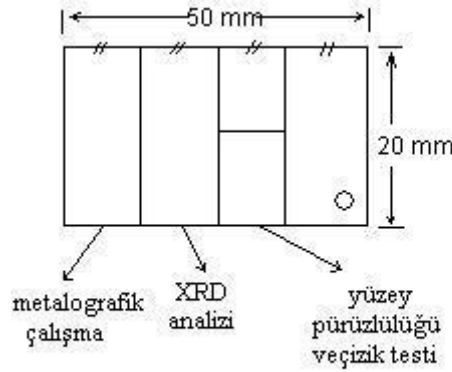


Şekil 2.4. MAO kaplama ünitesinin şematik gösterimi.

Kaplama işleminde her numuneye 50 μF 'lık sabit yük uygulanmıştır. Kaplama prosesi başlangıcında aynı gruptan 4 numune aynı anda tanka daldırılıp 200 μF yük uygulanmıştır. 20 dk sonra kaplama işlemi kısa süre durdurulup 1. numune alınarak yük 150 μF 'a düşürüldü. 40 dakika sonunda işlem kısa bir süre durdurulup 2. numune alınarak yük 100 μF 'a düşürülerek tekrar başlatılmış 60 dk sonunda işlem tekrar durdurularak 3. numune alınmıştır. Kalan son numuneye 50 μF yük 120 dk boyunca uygulanarak 1. alaşım grubunun oksidasyon işlemi tamamlanmıştır. Diğer gruptaki alaşımların kaplanmasında da aynı yöntem uygulanmıştır.

Kaplama süresi biten numuneler ilk önce musluk suyunda yıkandı. Daha sonra etil alkol içerisinde ultrasonik temizleyicide 30 dakika boyunca bekletilip muhtemel çözelti kalıntıları giderildi. Daha sonra sıcak hava ile kurutuldu.

2.6. MAO Yapılmış Numunelerin Kesilmesi



Şekil 2.5. MAO yapılmış numunenin kesilmesi ve kullanım yerleri.

Şekil 2.5'te gösterildiği gibi MAO kaplama işlemi sonrasında oluşan kaplamaların özelliklerinin analiz edilebilmesi için numuneler kesilmiştir. Numunelerin kesitten mikroyapı incelemesi ve sertlik ölçümleri için soğuk reçine ile kalıba alınmıştır. Kesme işlemi elmas testere (Struers Minitom) ile 300 rpm de oluşan kaplamaya dik bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Kesilen numunelerin her birinden 5 mm lik kalınlığa sahip parçalar XRD analizi için ayrılmıştır. Kesitleri açığa çıkacak şekilde kalıplanmış numuneler 120, 180, 320, 500, 600, 800 grit zımpara ile zımparalanıp kurutulmuştur.

2.7. Yüzey Pürüzlülüğü Analizi

Kaplama yapılmış numunelerin yüzey pürüzlülüğü DEKTAK 8 VEECO profilometre cihazı ile ölçülmüştür. Yüzey tarama işlemi her numune için Şekil 2.5'te belirtilen yüzey pürüzlülüğü analizi için ayrılan 10mmx5mm'lik alanda yapılmıştır. Her tarama boyu olan 5 mm'lik mesafe 60 saniyede, 5 miligram yük altında ve 5 mikronluk yarıçapa sahip elmas uç ile yapılmıştır. Her numune için belirtilen alanda 500 μm 'luk aralıklarla ile 20 tarama yapılmıştır. Bu işlem kaplanan 32 numune için tekrarlanmıştır.

2.8. Kaplanmış Numunelerin XRD Analizi

XRD analizi yapılacak kaplanmış numunelere ait kısımlar Şekil 2.5'te belirtilen bölgelerden kesilerek çıkarılmıştır. Rigaku D-max 2200 marka XRD cihazında Cu K α (grafit monokromotor) ışını ile 40 kV ve 40 mA de, 1⁰ /dakika hız ve 0.02 derece/adım aralıklarla X ışınlarına maruz bırakıldı. Kaplama ile oluşmuş fazların analizi için kaplanan tüm numunelere XRD analizi yapılmıştır.

2.9. MAO Yapılmış Numunelerin Çizik Testi

Çizik testleri Şekil 2.5'te belirtilen numunede bu amaç için kesilen kısımdan NONOVEA MTR3/50 scratch tester cihazı ile 0,5 mm lik uç kullanılarak numunelerin herbiri için yapılmıştır. Uygulanan artan yük 200 N, çizik boyu 6 mm'dir.

2.10. Metalografik Çalışma

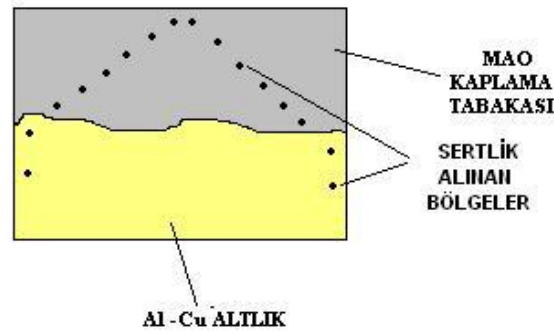
MAO işlemi ile kaplanmış ve 10x25x3 mm³ boyutlarında kesilmiş numuneler kesiti açığa çıkacak şekilde soğuk reçine kalıba alındı. Soğuk reçine kalıplama işlemi her alaşımın Tablo 2.2'de gösterilen aynı grup 4 farklı zamanı bir araya gelecek şekilde hazırlanıp toplamda 8 adet soğuk reçinede kalıplanarak zımparalama ve parlatma işlemi için hazır hale getirildi. Zımparalama işlemi sırasıyla 80, 120, 180, 240, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200 numara zımparalarla yapılmıştır.

Parlatma işlemine geçmeden önce tüm zımparalanmış numuneler su ve etil alkol ile yıkanıp sıcak hava ile kurutuldu. Parlatma işlemi 1 mikron elmas pasta solüsyonu ile gerçekleştirilmiştir. Parlatma sonrasında numuneler 30 dakika boyunca etil alkol içerisinde ultrasonik temizleyici ile temizlenip sıcak hava ile kurutuldu.

2.11. Kaplamaların Mikro Sertlik Ölçümü

Metalografik inceleme için kesitten parlatılmış numunelerden mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır. Mikrosertlik ölçümü ZEISS AX10 optik mikroskoba entegre ANTON PAAR MHT-10 mikro sertlik cihazıyla yapılmıştır. Mikrosertlik ölçümü 10 saniye boyunca sabit yük modunda yapılmıştır. Uygulama yükünün hızı 10 gr/sn'dir.

Sertlik ölçümü için 20 gr ve 50 gr yükler uygulanmış oluşan kaplamanın kalınlığına bağlı olarak uygulama kuvvetleri değiştirilmiştir. Mikrosertlik ölçüm sırasında, çatlak oluşturan izler hesaplama dahil edilmeyerek paralelindeki başka bir bölgeden mikrosertlik ölçümü tekrarlanmıştır.



Şekil 2.6. MAO yapılmış numunelerden alınan sertlik ölçümlerinin şematik gösterimi.

Kaplama kalınlığı yeterince uygun olan numuneler için Şekil 2.6'da şematik olarak gösterildiği gibi mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır. Altlık malzemeden kaplama yüzeyine ve kaplama yüzeyinden altlık malzemeye doğru mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır. Bu şekilde kaplama kalınlığı uygun olan kaplamalar için 10-12 ölçüm yapılmıştır. İnce kaplamalara sahip numunelerde ise sadece kaplamaya paralel (bir çizgi boyunca) 5 ölçüm yapılmıştır. Ayrıca her numunenin altlık malzemesinden de sertlik ölçümleri alınmıştır (Şekil 2.6).

2.12. SEM Analizi

Optik mikroskop altında incelenmiş ve sertlik izleri oluşturulmuş numuneler SEM ile incelenmiştir. SEM incelenmesi hem bölüm 2.11’de belirtildiği gibi kesitten alınan sertlik izlerinin boyutlarını tespit etmek için hem de kesitten kaplama tabakasını mikroskopik olarak analiz etmek üzere yapılmıştır. Philips XL30/SFE EDS analizi de yapabilen mikroskop analiz için kullanılmıştır. SEM incelenmesi öncesinde numunelerin yüzeyleri iletkenliği artırmak amacıyla 3 dk altın ile kaplanmıştır. Sekiz grup numunenin her birinin (Tablo 2.2) SEM’de öncelikle sertlik cihazıyla oluşturulan izlerin boyutları tespit edilmiştir. Daha sonra kaplama kalınlığını tespit etmek üzere çeşitli büyütmelede görüntüler alınmıştır. Ayrıca kaplamaların genel mikroyapı karakterizasyonu da SEM’de yapılmıştır.

2.13. MAO Yapılmış Numunelerin EDS Analizi

EDS analizleri Philips XL30/SFE elektron mikroskopunun EDS modunda kaplama içerisinden başlayıp matrise kadar uzanan bir çizgi şeklinde alınıp element spektrumları görsel grafik halinde kayıt edilmiştir. Ayrıca kaplamaların bazı bölgelerinden nokta modunda EDS analizi yapılmıştır.

3.DENEYSEL SONUÇLAR

3.1 Alaşımların Kimyasal Analiz Sonuçları

Altlık malzeme olarak hazırlanmış Al-Cu alaşımlarının kimyasal analizleri Tablo 3.1’de verilmiştir. Eser miktardaki elementler dikkate alınmamıştır. Bu sonuçlar hedeflenen alaşım miktarlarına yaklaşıktır. Sadece %0,5 ve %34 Cu içermesi gereken alaşımlarda sırasıyla %0,2 ve %1 sapma görülmüştür.

Tablo 3.1. Ergitilerek dökülüp hazırlanmış Al-Cu alaşımlarının kimyasal analiz sonuçları.

ALAŞIMLAR	Al07Cu	Al1Cu	Al2Cu	Al4Cu	Al8Cu	Al16Cu	Al33Cu
% Al	98,900	98,600	97,600	95,600	91,600	83,800	66,400
%Cu	0,710	1,130	2,120	4,120	8,080	16,080	33,070
%Si	0,120	0,060	0,050	0,050	0,050	0,050	0,040
%Fe	0,170	0,018	0,170	0,160	0,180	0,160	0,170
%Mg	0,010	0,010	0,020	0,010	0,010	0,020	0,010
%Cr	0,005	0,005	0,005	0,005	0,004	0,005	0,004
%Ni	0,001	0,001	0,002	0,001	0,003	0,054	0,140
%Sn	0,004	0,004	0,003	0,002	0,012	0,023	0,009
%Ti	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
%V	0,001	0,002	0,002	0,001	0,002	0,002	0,002

3.2. Alaşımların XRD Sonuçları

Altlık malzeme olarak üretilen Al-Cu alaşımları ve saf alüminyumun XRD analizi sonuçları Şekil 3.1’de verilmiştir. Metalik haldeki alüminyumdan alınan XRD analizinde alüminyum piki dışında başka bir faza ait pik tespit edilmemiştir. Bakır miktarı artırılarak (% 0,7, 1, 2, 4, 8, 16, 33) hazırlanmış olan 7 farklı alaşımdan alınan XRD analizleri Şekil 3.1’de gösterilmiştir. % 0,7 Cu alaşımdan alınan XRD analizinde elde edilen sonuçların, metalik haldeki alüminyumun sonuçlarına benzer olduğu görülmüştür (82° deki pik yok). Grafikte gösterildiği gibi saf Al pikleri yaklaşık 38, 45, 65, 78 derecede tespit edilmiştir.

% 1 Cu içeren Al-Cu alaşımda yine 38, 45, 65 ve 78 derecelere karşılık gelen piklerin alüminyum elementine ait olduğu tespit edilmiştir. Bu alaşımda 45 derecedeki alüminyum piki haricindeki pikler zayıf halde bulunmuştur.

% 2 Cu içeren Al-Cu alaşımının XRD analizinde 20, 37 ve 47 derecelerde bulunan piklerin CuAl_2 fazına ait olduğu tespit edilmiştir.

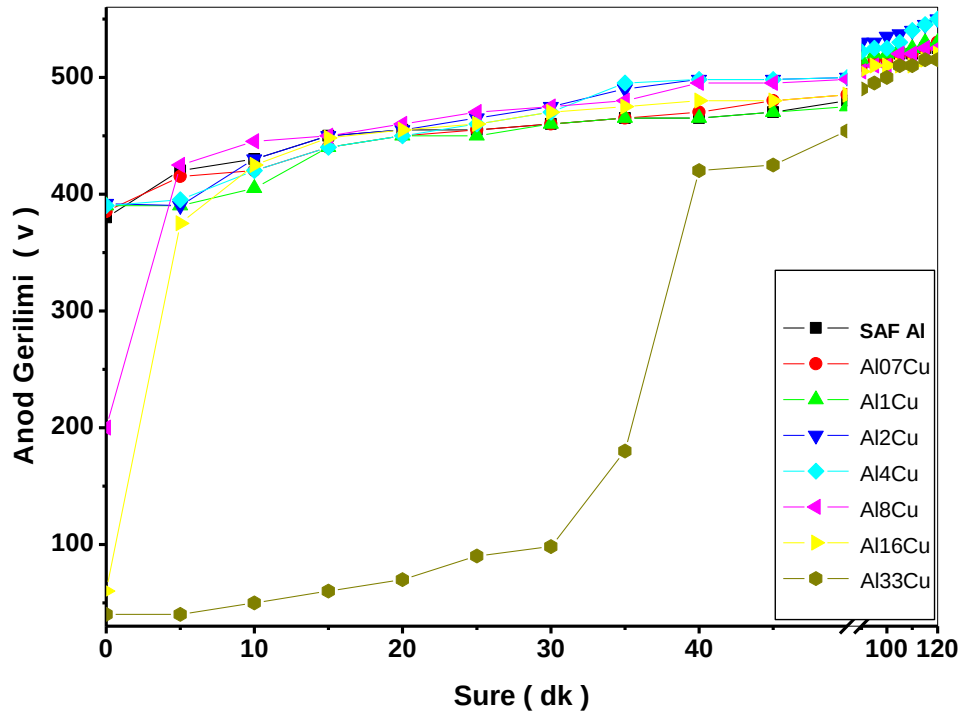
%4 Cu içeren Al_4Cu alaşımında da Şekil 3.1.b' de görüldüğü gibi saf alüminyum ve CuAl_2 fazlarına ait pikler tespit edilmiştir.

%8 Cu içeren Al_8Cu , Al_{16}Cu ve Al_{33}Cu alaşımlarının XRD analiz sonuçları Şekil 3.1.b' de gösterilmiştir. Bu alaşımlarda daha düşük bakır içeriğine sahip alaşımlarda oluşan fazların dışında değişik yapıdaki bir faza rastlanılmamıştır. Ancak bakır miktarı arttıkça oluşan CuAl_2 fazının şiddeti artmış ve şekilde de görüldüğü gibi farklı açılarda CuAl_2 fazına ait zayıf pikler tespit edilmiştir.

Dolayısıyla altlık malzeme olarak hazırlanan Al-Cu alaşımlarına yapılan XRD analizlerinde elde edilen pikler alüminyum elementi ve CuAl_2 fazına ait olduğu tespit edilmiştir. CuAl_2 fazına ait piklerin yüksek bakır oranlarına sahip alaşımlarda daha şiddetli ve faza ait piklerin çoğu görülürken, düşük bakır içeren alaşımlarda (Al_{10}Cu , Al_{11}Cu ve Al_{12}Cu) ya hiç görülmemiş yada piklerin düşük şiddette olduğu tespit edilmiştir.

3.3. MAO İşlemi Sırasında Akım ve Gerilim Değişimi

MAO işlemiyle kaplama yapılmış yüzeylerde kaplama süresine bağlı olarak anod gerilimindeki değişim Şekil 3.2’de verilmiştir. Önce saf alüminyumun, daha sonra en düşük Cu içeren Al-Cu alaşımlarından başlayarak 7 farklı alaşım grubuna MAO yöntemiyle kaplama işlemi uygulanmıştır. Kaplama işlemi sırasında aynı alaşımdan elde edilen 4 numune kaplama işlemine tabi tutulmuş ve kaplama süresi (20, 40, 60 ve 120 dk) biten alaşım, kaplama işlemi durdurulup kaplama solüsyonundan dışarı çıkartılmış ve prosese devam edilmiştir.

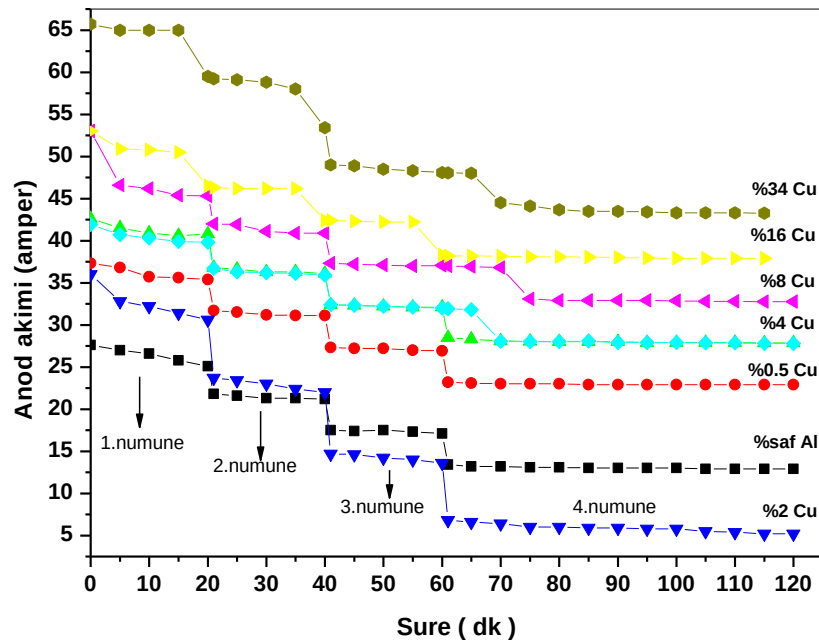


Şekil 3.2. MAO işlemi sırasında anod geriliminin kaplama süresine göre değişimi.

MAO kaplama işlemi sırasında her numune için anod-katot gerilimi ve akım değerleri 5 dakika ara ile kayıt edilmiştir. Şekil 3.2’de gösterildiği gibi saf Al ile bakır oranı düşük olan alaşımların MAO prosesi başlar başlamaz gerilim değerlerinde ani olarak yükselme tespit edilmiştir. Bu, kaplama işlemi sırasında oksitlenmeyen metal yüzeyinin azalıp, oksitlenen tabaka kalınlığı miktarının arttığının göstergesidir. Bakır oranı düşük alaşımlarda (Al07Cu, Al1Cu ve Al2Cu) oksitlenme işlemi başlar başlamaz değişen gerilimin, bakır oranı yüksek olan

(Al16Cu ve Al33Cu) alaşım grubundaki gerilim değişiminden çok daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun nedeni oluşan dielektrik oksit tabakasının kırılması için gereken gerilim miktarının düşük oranda bakır içeren Al-Cu alaşımları için daha fazla olmasıdır.

Bakır miktarı yüksek alaşımlarda altlık malzemenin oksitlenmesi, dolayısıyla gerilimin artması gecikmekte, kaplama prosesinin başlama ve oluşum hızının yavaş olduğunu göstermektedir. Yüksek oranlarda bakır içeren alaşımların oksitlenme hızının daha yavaş olduğu dolayısıyla dielektrik filmin yeterince kuvvetli olmamasından dolayı filmin kırılması için gerekli geriliminde düşük olduğu görülmektedir (şekil 3.2). İşlem başlar başlamaz saf alüminyumun kaplanması sırasında geçen akım miktarı 25-30 amper aralığında iken bu değer %33 bakır içeren alaşımda 65 amper civarlarında ölçülmüştür.

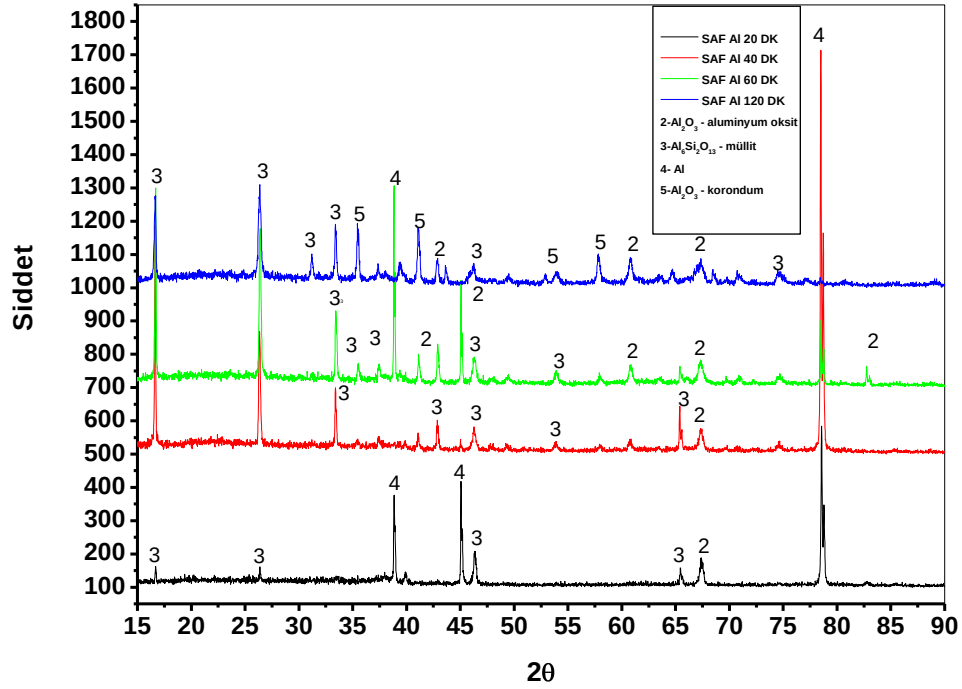


şekil 3.3. MAO işlemi sırasında anod akımının kaplama süresine göre değişimi.

MAO prosesinde numunelerden geçen akımın kaplama süresiyle değişimi şekil 3.3'de verilmiştir. Bölüm 2.5'te belirtilen şekilde oksitlenen alaşımlarından alınan anod akımı değerlerinde basamaklar halinde belirgin şekilde arka arkaya 3 düşüş tespit edilmiştir. Bu toplamda akım geçen yüzey alanının oksitlenme süresi dolan alaşımın çıkarılmasından, dolayısıyla oksitlenen yüzey alanının ani olarak düşmesinden kaynaklanmaktadır.

3.4. MAO Yapılmış Numunelerin XRD Sonuçları

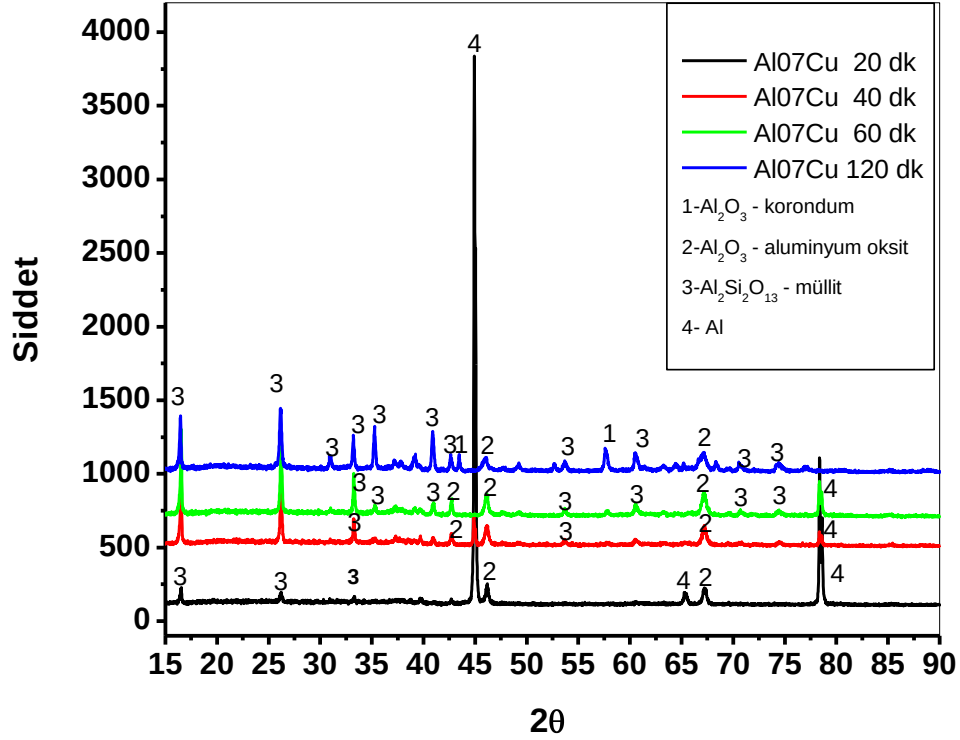
MAO yöntemiyle 20, 40, 60, 120 dk süreyle kaplanan saf alüminyumun kaplama yüzeylerinden alınan XRD analiz sonuçları Şekil 3.4’de verilmiştir.



Şekil 3.4. 20, 40, 60, 120 dk süreyle MAO yöntemi ile kaplama yapılmış saf alüminyumun XRD sonucu.

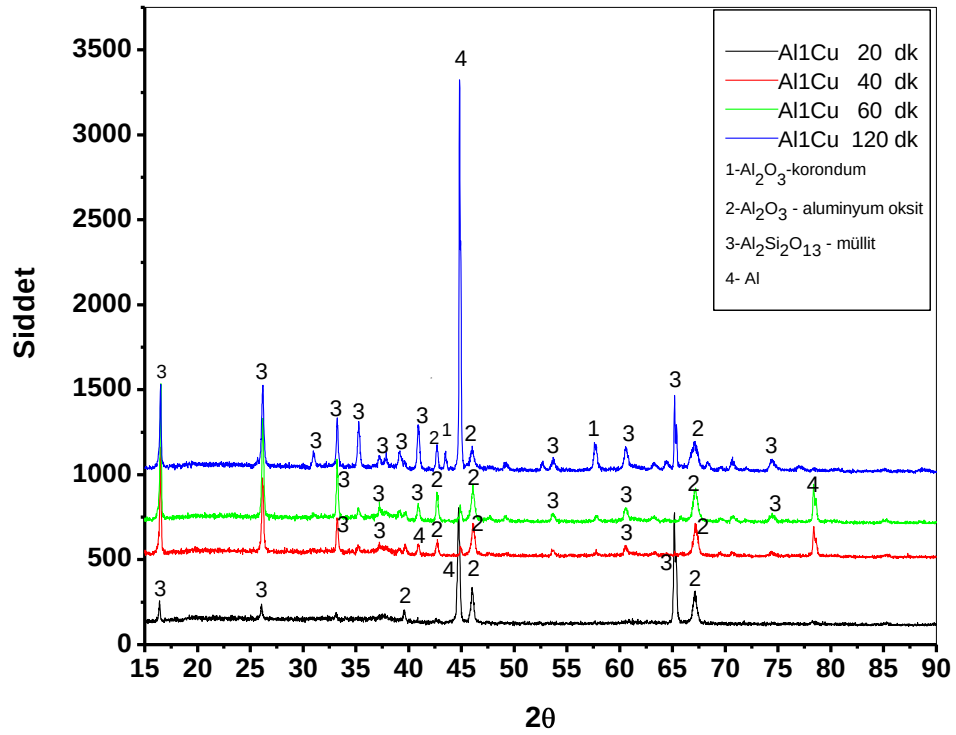
Şekil 3.4’de gösterildiği gibi tüm MAO sürelerinde saf alüminyumun yüzeyinde oluşan kaplamalarda müllit fazının oluştuğu yaklaşık 17 ve 26 derecelerdeki piklerle tespit edilmiştir. 20 dk MAO yapılmış saf alüminyum numunesinden yaklaşık 38, 45 ve 78 derecelerdeki piklerin alüminyum elementine ait olduğu tespit edilmiştir. 120 dk süreyle kaplanmış olan saf alüminyum numunesinin XRD analizinde yaklaşık 36, 41 ve 57 derecelerdeki piklerin korondum fazına ait olduğu tespit edilmiştir.

Saf alüminyumun MAO yöntemiyle kaplanması sonrasında kaplamadan alınan XRD analizinin de 17 ve 23 derecelerdeki piklerin müllit fazına ait olduğu tespit edilmiştir. Müllit fazına ait pikin şiddetinin oksidasyon işlemi uzadıkça arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca işlem süresi uzadıkça altlık malzemedan alınan alüminyuma ait olduğu tespit edilen piklerin şiddetinin kaplama kalınlığının artmasıyla birlikte azaldığı görülmüştür.



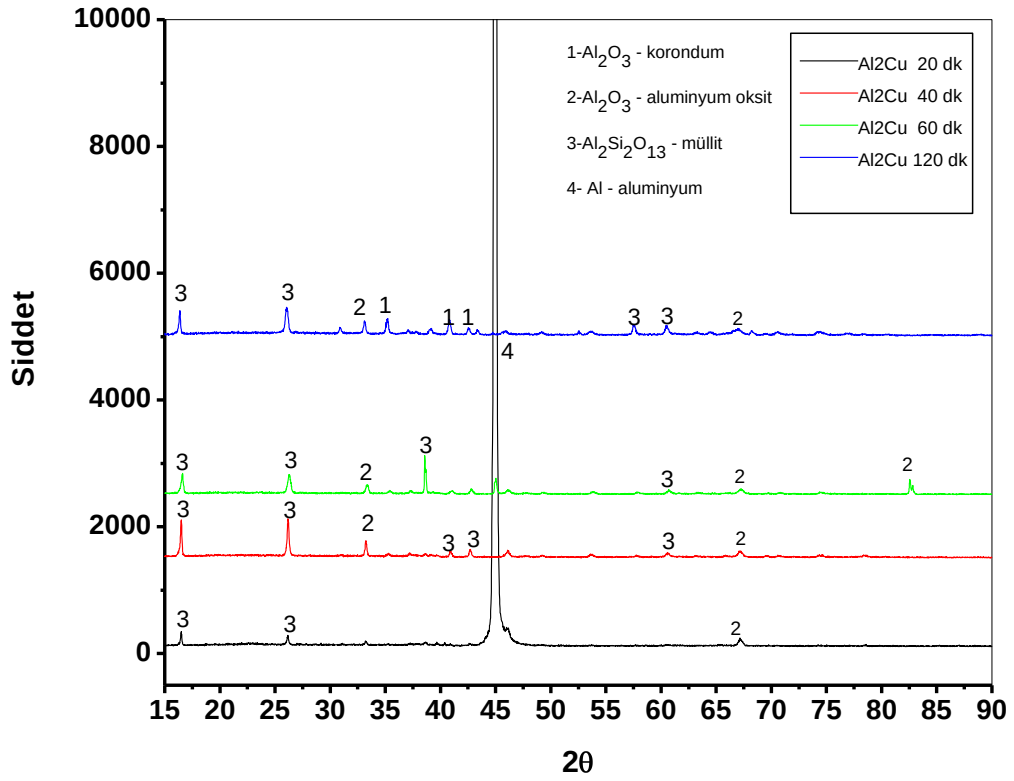
Şekil 3.5. 20, 40, 60, 120 dk süreyle MAO yöntemi ile kaplama yapılmış %0,7 Cu içeren (Al_{0.7}Cu) alaşımın XRD sonucu.

MAO yöntemiyle 20, 40, 60, 120 dk süreyle kaplanan %0,7 Cu içeren Al-Cu alaşımın kaplama yüzeylerinden alınan XRD analizi sonuçları Şekil 3.5’de verilmiştir. MAO işlemi sonunda %0,7 Cu içeren alaşımın XRD analizi sonucunda da saf alüminyuma benzer fazların olduğu tespit edilmiştir. 17 ve 26 derecelerde tüm kaplama sürelerinde oksidasyon süresinin uzamasıyla müllit fazının daha çok olduğu pik şiddetinin artmasına hamledilebilir. 120 dk süreyle kaplanan numunelerde 43 ve 57 derecelerde korondum fazına ait pikler tespit edilmiştir. Kaplama süresinin daha kısa olduğu numunelerde bu faz tespit edilememiştir. 45 ve 78 derecelerdeki alüminyum fazına ait olduğu tespit edilen pikin şiddetinin kaplama süresi uzadıkça azaldığı görülmüştür. Kaplama süresi uzadıkça oluşan kaplama tabakasının kalınlığının artması alınan bu piklerin şiddetinin azalmasına hamledilebilir.



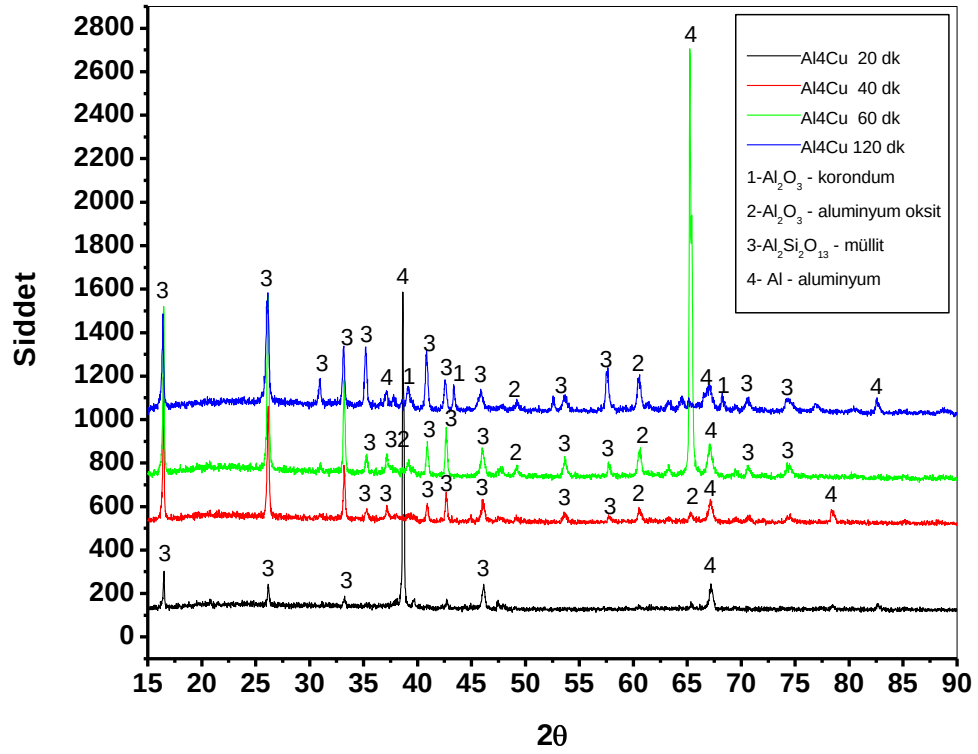
Şekil 3.6. 20, 40, 60, 120 dk süreyle MAO yöntemi ile kaplama yapılmış %1 Cu içeren (Al1Cu) alaşımın XRD sonucu.

MAO yöntemiyle 20, 40, 60, 120 dk süreyle kaplanan %1 Cu içeren alaşımın kaplama yüzeylerinden alınan XRD analiz sonuçları Şekil 3.6'da gösterilmiştir. % 1 Cu içeren alaşımın MAO işlemi sonrasında tüm sürelerde kaplamada oluşan faz, yaklaşık 17 ve 26 derecelerde ortak pikleri görülen müllit fazıdır. Yaklaşık 67 derecede tüm kaplama sürelerinde görülen pik alüminyum oksit'e aittir ve oluşma şiddeti hemen hemen eşittir. Kaplama süresinin uzamasıyla birlikte yapıda müllit fazının arttığı, müllit fazına ait birkaç (17, 26, 34 derece) pikten tespit edilmiştir. 45 derecede 20 dk süreyle oksitlenmiş numunede alüminyum piki tespit edilmiştir. 120 dk süreyle kaplanmış numunede de 45 derecede daha şiddetli bir alüminyum piki tespit edilmiştir.



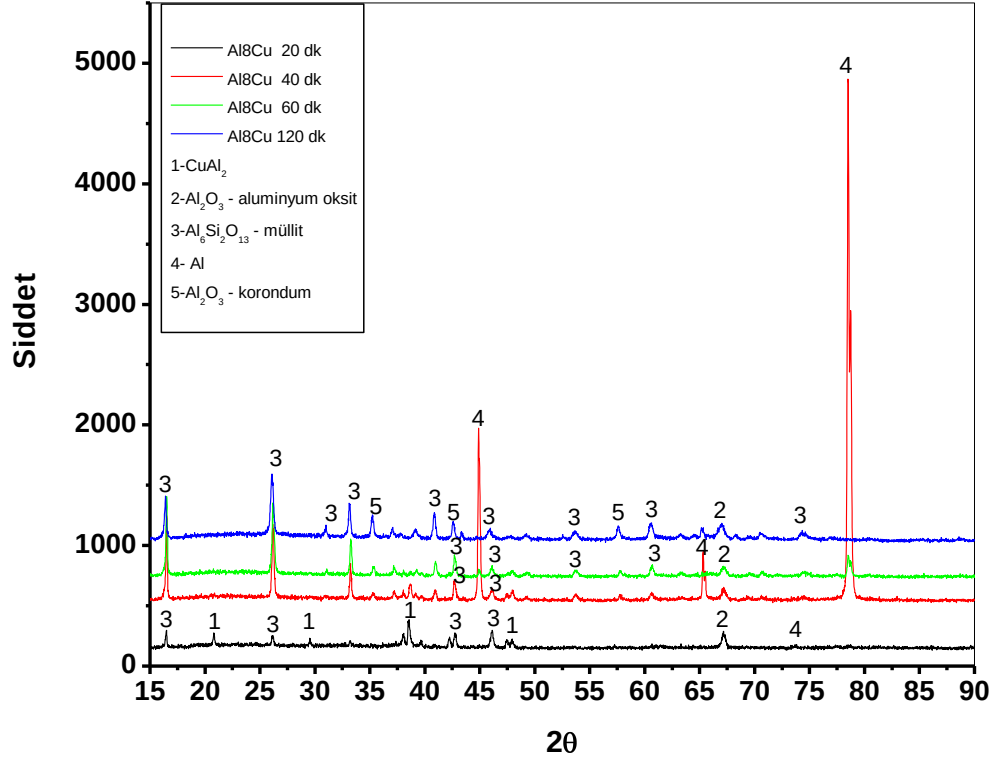
Şekil 3.7. 20, 40, 60, 120 dk süreyle MAO yöntemi ile kaplama yapılmış %2 Cu içeren (Al₂Cu) alaşımların XRD sonucu.

Şekil 3.7’de MAO yöntemiyle 20, 40, 60, 120 dk süreyle kaplanan %2 Cu içeren alaşımların kaplama yüzeylerinden alınan XRD analiz sonuçları gösterilmiştir. Al₂Cu alaşımında olduğu gibi 17 ve 26 derecelerde de müllit fazına ait pikler tespit edilmiştir. Yine ortak pik olarak yaklaşık 67 derecede zayıf şiddette görülen pik alüminyum oksit fazına aittir. Saf alüminyuma ait 45 derecedeki pik, 20 dk süreyle kaplanmış numunede şiddeti yüksek bir şekilde tespit edilmiştir. Yaklaşık 78 derecelerde oluşan yine alüminyuma ait pik bu numunede görülmemiştir. Bu alüminyumun katılaşma sırasında oryantasyonuna hamledilebilir. Yaklaşık 34 derecede 20, 40, 60, 120 dk süre ile kaplanmış numunelerde alüminyum oksit pikine rastlanılmıştır. Yaklaşık 40 derecede zayıf şiddette görülen pik ise koronduma ait olup yalnızca 120 dk süre ile kaplanmış numunede tespit edilmiştir.



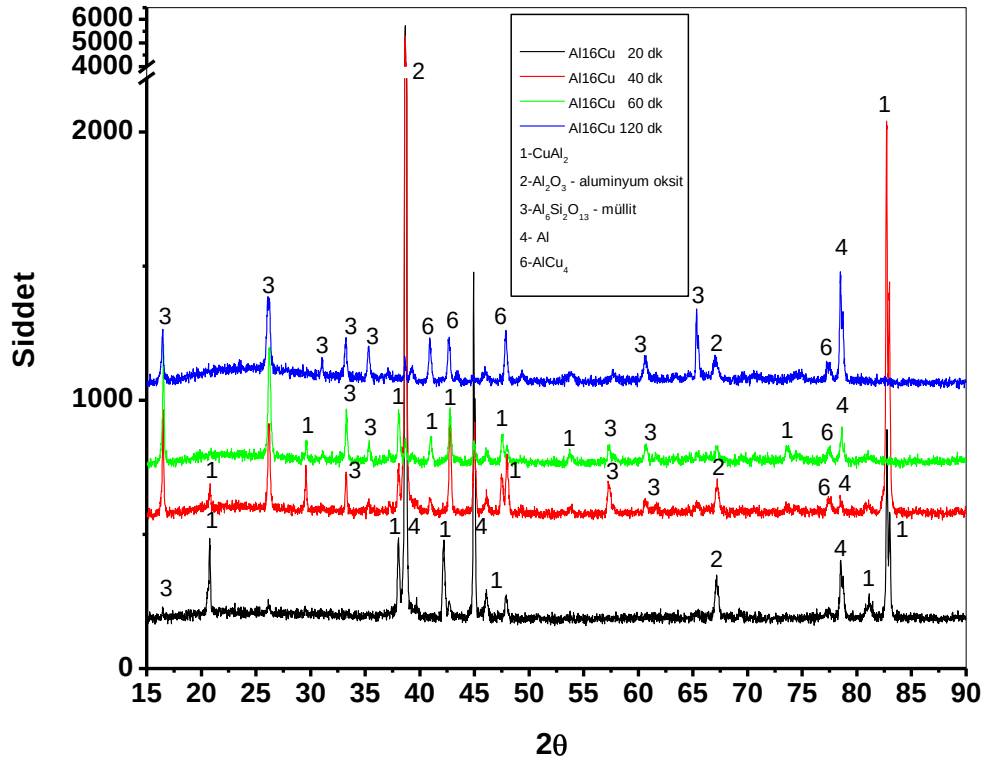
Şekil 3.8. 20, 40, 60, 120 dk süreyle MAO yöntemi ile kaplama yapılmış %4 Cu içeren (Al4Cu) alaşımin XRD sonucu.

MAO yöntemiyle 20, 40, 60, 120 dk süreyle kaplanan %4 Cu içeren alaşımin kaplama yüzeylerinden alınan XRD analiz sonuçları Şekil 3.8’de gösterilmiştir. Al07Cu, Al1Cu ve Al2Cu alaşımlarında olduğu gibi %4 Cu miktarına sahip Al4Cu alaşımında da yaklaşık 17 ve 26 derecelerde müllit fazına ait pikler tespit edilmiştir. Kaplama süresi uzadıkça müllit fazının arttığı pikin şiddetinden görülmektedir. Saf alüminyuma ait yaklaşık 38 derecedeki pik, 20 dk süreyle kaplanmış Al4Cu alaşımında aynı zamanda yaklaşık 67 derecede de tespit edilmiştir. 67 derecede tespit edilen pik tüm numunelerde görülmüştür. 60 dk süreyle kaplanmış Al4Cu alaşımında yaklaşık 65 derecede şiddetli bir alüminyum piki tespit edilmiştir. Bu pikin diğer numunelerde görülememesi alaşımın içindeki alüminyumun yönlendirilmesine hamledilebilir. Al4Cu alaşımının 20 dk süreyle MAO yapılmış numunesi hariç diğer tüm numunelerde yaklaşık 60 derecede alüminyum oksit piki tespit edilmiştir. Alüminyum oksit pikinin ilk oluştuğu numune 40 dk süreyle MAO yapılmış numunedir. Ayrıca 120 dk süreyle kaplama yapılmış numunede korondum fazının oluştuğu 43 derecedeki pikle tespit edilmiştir.



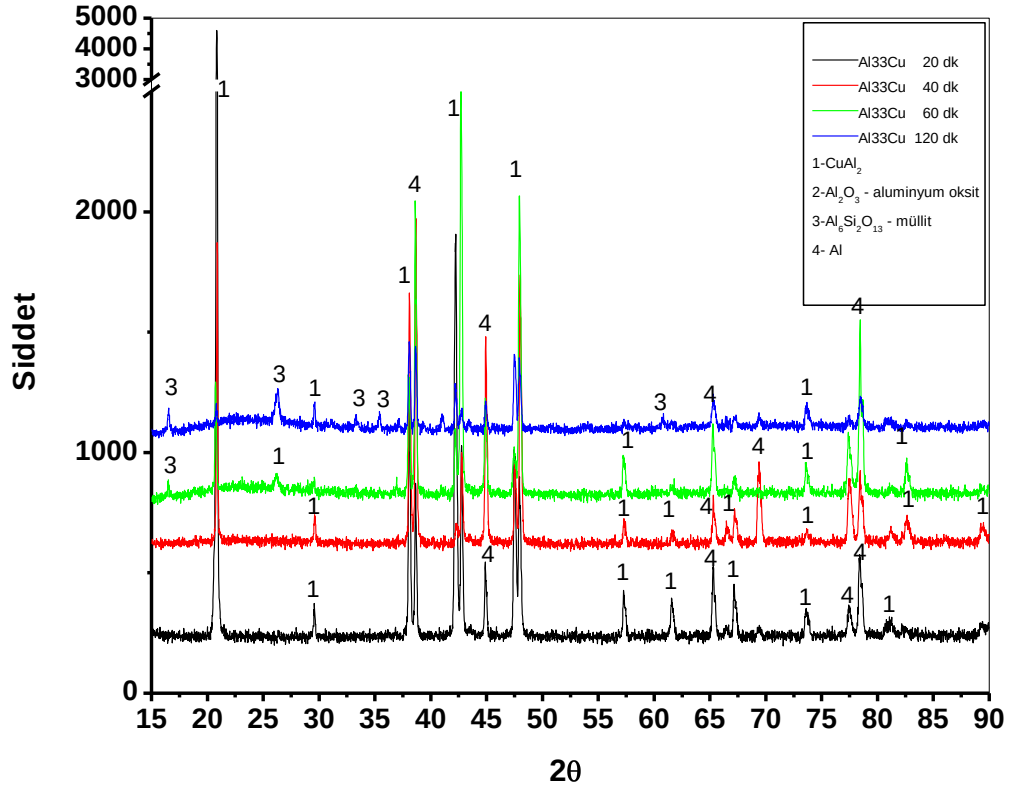
Şekil 3.9. 20, 40, 60, 120 dk süreyle MAO yöntemi ile kaplama yapılmış %8 Cu içeren (Al8Cu) alaşımın XRD sonucu.

Şekil 3.9’da MAO yöntemiyle 20, 40, 60, 120 dk süreyle kaplanan %8 Cu içeren alaşımın kaplama yüzeylerinden alınan XRD analiz sonuçları gösterilmiştir. 20 dk süreyle MAO yapılmış Al8Cu numunesinde 17 ve 26 derecelerde tüm numunelerde görülen müllit fazına ait pikler tespit edilmiştir. Piklerin şiddeti kaplama süresi uzadıkça artmıştır. 40 dk süreyle kaplanmış numunede 45 ve 78 derecede alüminyuma ait şiddetli pikler tespit edilmiştir. Yaklaşık 67 derecede tüm numunelerde alüminyum oksit fazına ait pik görülmüştür. Bu numunede ayrıca yaklaşık 20 ve 47 derecelerde CuAl_2 intermetalik fazına ait pikler tespit edilmiştir. Kaplama kalınlığının daha fazla olduğu 40, 60 ve 120 dk süreyle MAO yapılmış numunelerde bu faza rastlanılmamıştır. Al8Cu alaşımının 120 dk süreyle MAO yapılmış numunesinde yaklaşık 36 ve 57 derecede korondum fazına ait pikler tespit edilmiştir.



Şekil 3.10. 20, 40, 60, 120 dk süreyle MAO yöntemi ile kaplama yapılmış %16 Cu içeren (Al16Cu) alaşımın XRD sonucu.

MAO yöntemiyle 20, 40, 60, 120 dk süreyle kaplanan %16 Cu içeren alaşımının kaplama yüzeylerinden alınan XRD analiz sonuçları Şekil 3.10'da gösterilmiştir. 20 dk süreyle MAO yapılmış numunede CuAl_2 intermetalik fazına ait 20,47 ve 81 derecedeki pikler görülmüştür. Yine alüminyum pikine ait 45 ve 78 derecedeki pikler mevcuttur. Al16Cu alaşımının tüm kaplanan numunelerinde yaklaşık 67 derecede alüminyum oksit'e ait pik tespit edilmiştir. Alaşımın bütün numunelerinde müllit fazı oluşmuştur. Müllit fazına ait olan 17 ve 26 derecelerdeki piklerin şiddetinin arttığı tespit edilmiştir. 42, 43 ve 77 derecelerde 120 dk MAO yapılmış numunede CuAl_4 fazı tespit edilmiştir. 78 derecede alüminyuma ait pik 20, 40, 60 ve 120 dk süreyle kaplanmış numunelerde görülmüştür. 120 dk süreyle kaplanmış numunede bu pikin şiddeti diğer numunelere göre daha şiddetlidir.



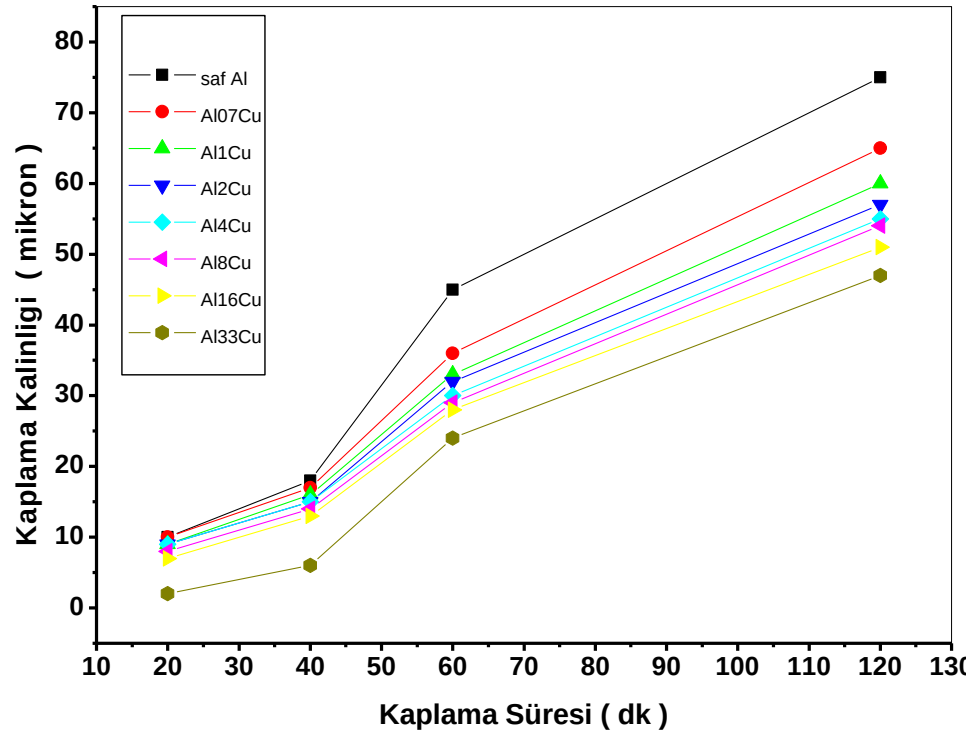
Şekil 3.11. 20, 40, 60, 120 dk süreyle MAO yöntemi ile kaplama yapılmış %33 Cu içeren (Al33Cu) alaşımın XRD sonucu.

Şekil 3.11’de MAO yöntemiyle 20, 40, 60, 120 dk süreyle kaplanan %33 Cu içeren alaşımın kaplama yüzeylerinden alınan XRD analiz sonuçları gösterilmiştir. %33 bakır miktarına sahip alaşımın 20 ve 40 dk süreyle MAO yapılmış numunelerinde 17 ve 26 derecelerde görülen müllit fazına ait pik tespit edilememiştir. 60 ve 120 dk süreyle kaplanmış numunelerde müllit fazının oluştuğunu 17 ve 26 derecelerdeki zayıf şiddetli pikler göstermektedir. 20, 40, 60 ve 120 dk süre ile MAO yöntemiyle kaplanmış numunelerin XRD analizinde 42 ve 47 derecelerde şiddeti yüksek CuAl_2 fazı görülmüştür. Yaklaşık 73 derecede görünen yine CuAl_2 intermetalik fazına ait piklerdir. 20 ve 40 dk süreyle MAO işlemine tabi tutulan numunelerin XRD sonuçlarına göre yüzeyde herhangi bir oksit tabakasına rastlanılmamıştır. 60 ve 120 dk süre ile kaplanan Al33Cu alaşımının numunelerinde müllit fazı tespit edilmiştir. 45 ve 78 derecelerdeki alüminyuma ait piklerin şiddetinin kaplama işleminin süresi uzadıkça azaldığı görülmüştür

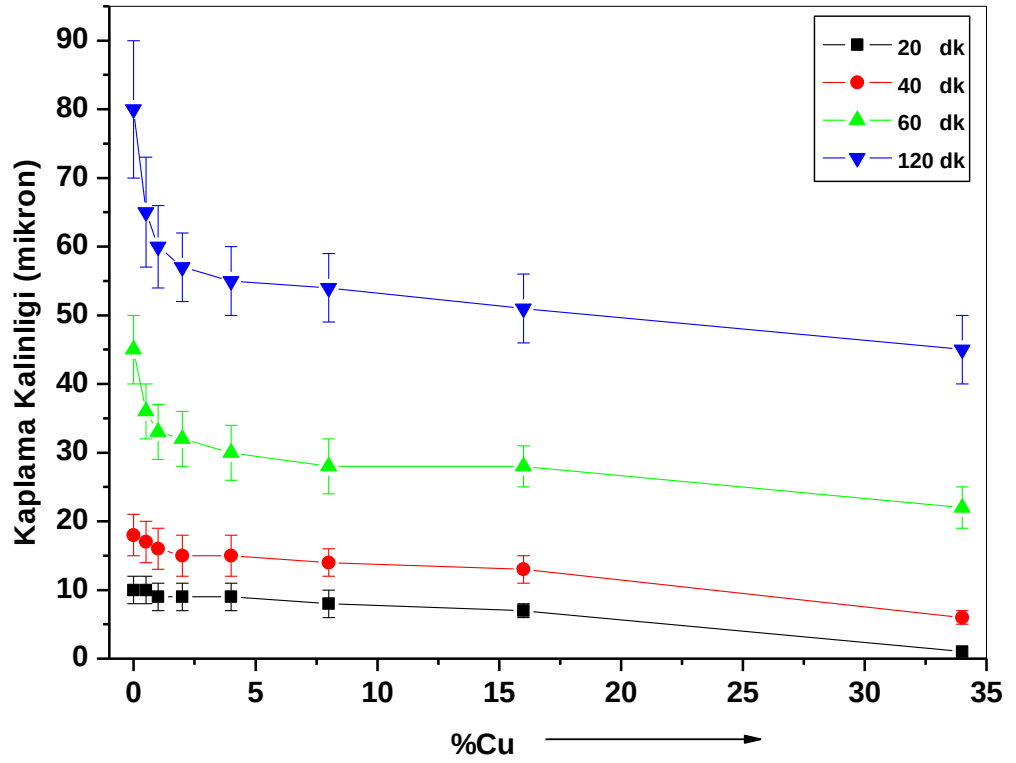
3.5. MAO İle Elde Edilen Kaplamaların Kalınlık Sonuçları

MAO ile Al-Cu alaşımlarında oluşan kaplamaların kalınlık değişimleri Şekil 3.12’de verilmiştir. Kaplama kalınlığı ölçümleri kaplamanın değişik 5 noktasından ölçülüp aritmetik ortalaması alınmıştır. Şekil 3.12’de MAO kaplama süresinin artmasıyla birlikte kaplama kalınlığındaki artış görülmektedir. Cu miktarı az olan (Al07Cu, Al1Cu, Al2Cu) kaplamalarının kalınlıklarındaki değişim miktarı, bakır miktarı yüksek olan (Al8Cu, Al16Cu, Al33Cu) alaşımlardan daha çok değişmiştir. MAO işlemi sonucunda işlem süresine bağlı olarak kaplama kalınlık değerleri 2-80 μm aralığında olduğu tespit edilmiştir.

20 dk süreyle MAO yapılmış numunelerin kaplama kalınlıkları 0-13 μm aralığında, 40dk MAO yapılmış alaşımların kaplama kalınlıkları 2-18 μm aralığında, 60 dk ile MAO yapılmış alaşımlardan ölçülen kaplama kalınlıklarının 20-45 μm aralığında değiştiği tespit edilmiştir.



Şekil 3.12. MAO sonucu oluşan kaplamaların süreye bağlı kalınlık değişimi.



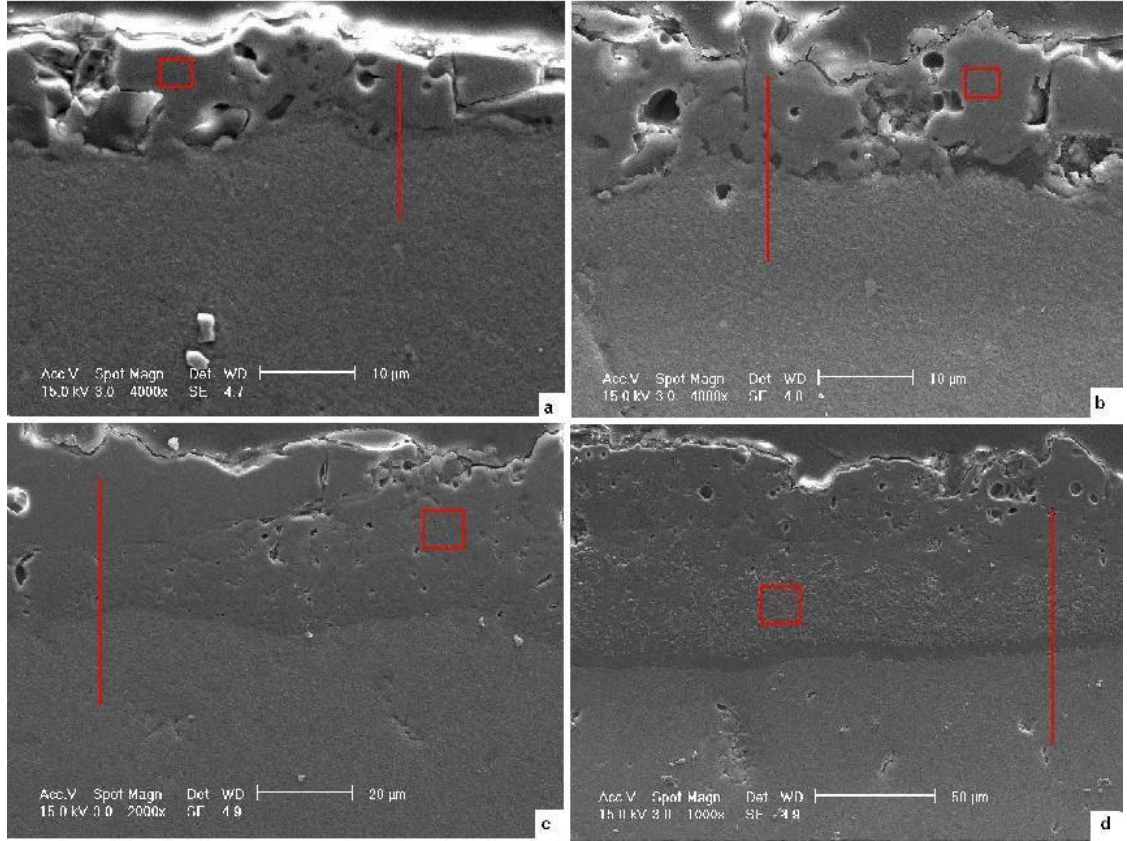
Şekil 3.13. MAO ile oluşan kaplama kalınlıklarının bakır miktarına bağlı olarak değişimi.

Şekil 3.13’de kaplama kalınlıklarının Al-Cu alaşımlarındaki bakır miktarına göre değişimi verilmiştir. Şekilde gösterildiği gibi bakır miktarı %4’e kadar olan alaşımlarda oluşan kaplamaların kalınlıklarında logaritmik azalma tespit edilmiştir. Bakır miktarı %4’e kadar olan Al07Cu, Al1Cu, Al2Cu alaşımlarına 120 dk süreyle kaplama yapıldığında kaplama kalınlığındaki düşüşün daha fazla olduğu görülmektedir. Kaplama süresi kısaldıkça kaplama kalınlığındaki bu düşüşün azaldığı tespit edilmiştir. %4 bakır miktarından daha fazla miktarlarda bakır içeren alaşımların da (Al8Cu, Al16Cu, Al33Cu) kaplama kalınlıklarında aynı oranda bir düşüş tespit edilmiştir. Mikroark prosesinin de ana temelinde yatan oksitlenmiş filmin kırılıp tekrar alt malzemede oksitlenmeye karşı yüksek meyilli malzeme tekrar oksitlenirken, bu mekanizma oksitlenmeye karşı düşük aktiviteye sahip yüksek bakır alaşımlı numunelerde daha uzun zamanda gerçekleşmektedir. Kaplama kalınlığındaki hızlı düşüş buna hamledilebilir.

Şekil 3.13’de gösterildiği gibi tüm kaplama zamanlarında bakır oranının artmasıyla kaplama kalınlığında düşüş tespit edilmiştir. Bu düşüş parabolîğe benzer bir davranış göstermektedir. Kısa süreli kaplamalarda bu düşüş net bir şekilde görülmektedir. Aynı zamanda %4 bakır içeren alaşımdan %33 bakır içeren alaşıma kadar yapılan kaplama işleminde oluşan kaplama kalınlıklarında lineer bir düşüş tespit edilmiştir.

3.6. MAO İle Elde Edilen Kaplamaların Kesit Mikroyapısı

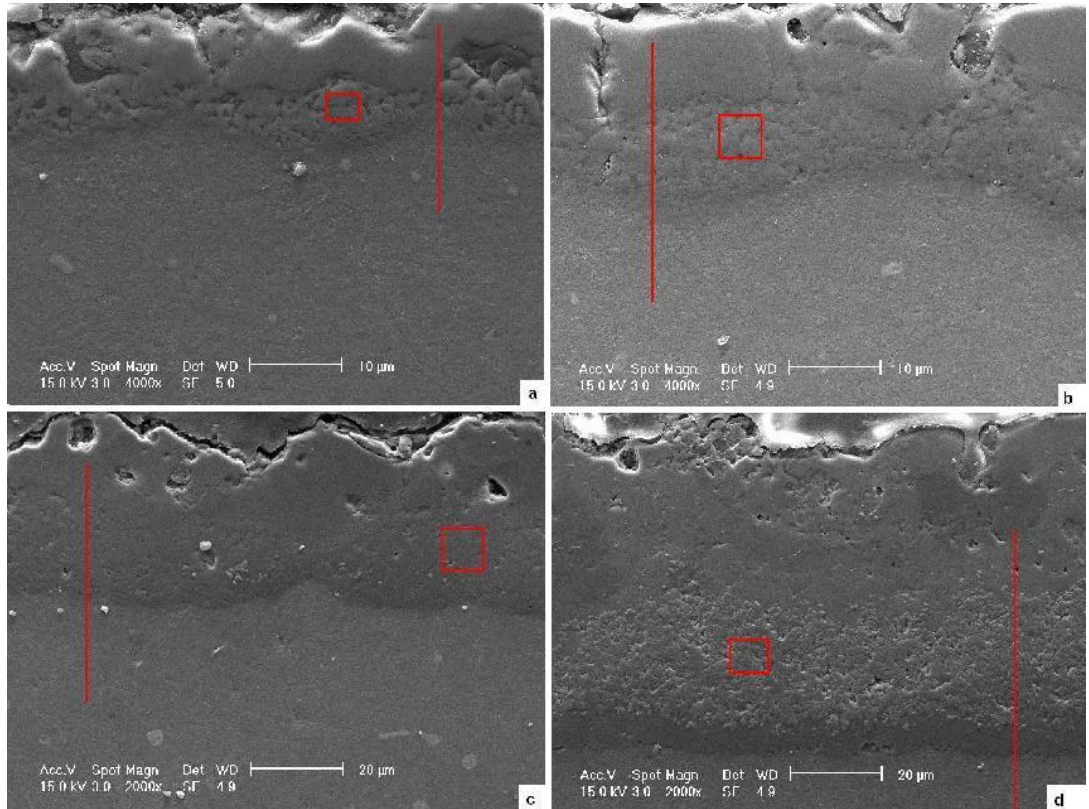
MAO ile yapılan kaplamaların kesitten alınan SEM görüntüleri Şekil 3.14-21’de gösterilmiştir. Kesit resimlerinde kırmızı çizgi ve dikdörtgenle belirtilmiş kısımlardan çizgisel ve bölgesel EDS analizi yapılmıştır. EDS analizi ile ilgili alınan sonuçlar bölüm 3.7’de detaylı olarak verilmiştir.



Şekil 3.14. MAO yöntemi ile farklı sürelerde kaplanmış saf alüminyum numunelerin kesitten alınmış SEM görüntüleri; a) 20 dk, b) 40 dk, c) 60 dk, d) 120 dk.

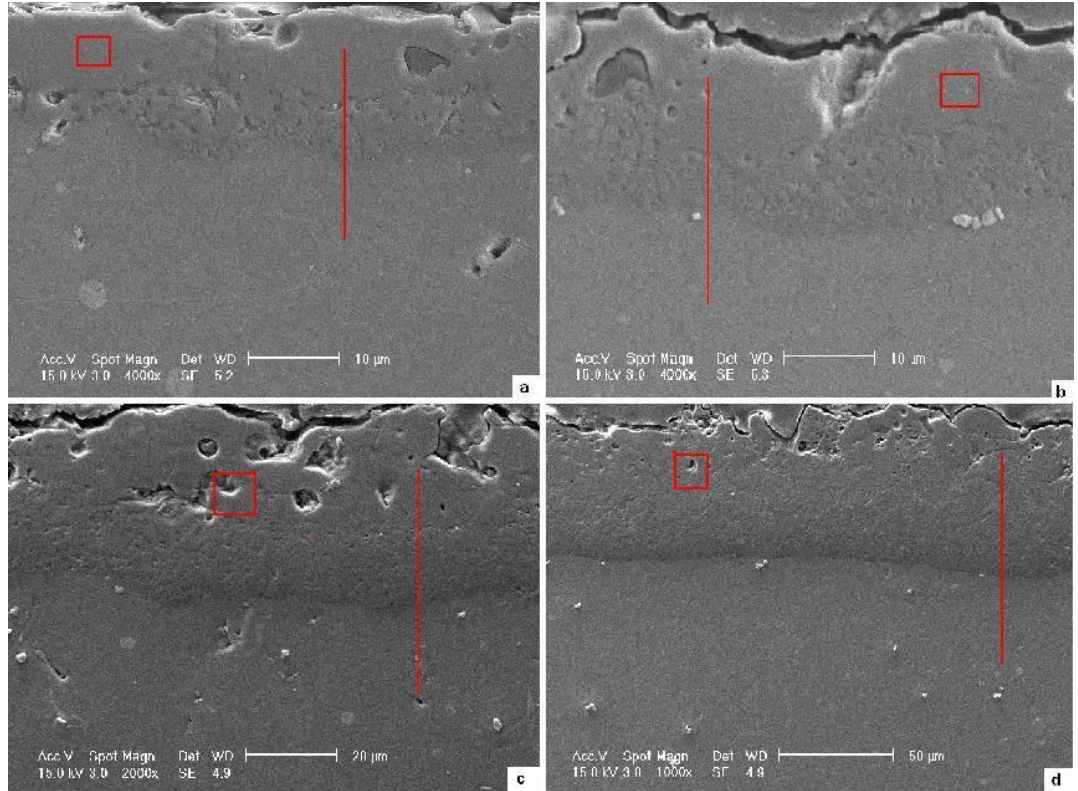
Şekil 3.14’de saf alüminyumun 20, 40, 60, 120 dk süreyle MAO yöntemiyle kaplanması sonrasında oluşan kaplamalardan alınan kesit resimleri görülmektedir. 20 dakika süreyle kaplama yapılan numunede yaklaşık 12 ± 2 µm kalınlığında kaplama olduğu görülmüştür. Oluşan kaplamada porozite miktarı oldukça fazladır. Kaplamanın en dış yüzeyinde dökülmeler görülmüştür. 40 dakika süreyle kaplanan numunesinde 20 dakika süreyle kaplanan Şekil 3.14.a numunesine benzer şekilde porozite miktarı çok olan kaplama elde edilmiştir. Kaplama kalınlığı 15 ± 2 µm arasında değişmektedir. Kaplamanın en dış yüzeyi de dahil matrisle birleşen iç

yüzeyde yer yer boşluklara rastlanılmıştır. 60 dakika süreyle MAO yapılmış saf alüminyuma ait oluşmuş kaplamanın kesit görüntüsü Şekil 3.14.c’de verilmiştir. Kaplamanın en dış kısmıyla matrise yakın kısımlarında iki farklı tabaka açık bir şekilde görülmektedir. Kontrast farkından ayrılan iki tabakanın farklı fazlara ait olduğu düşünülmektedir. En dışa yakın kısımlarda kaplamanın yapısındaki porozite miktarı oldukça yüksek iken, matrise yakın iç bölgede oluşan kaplamada porozite miktarının azaldığı görülmektedir. Kaplama kalınlığı 40 ± 5 μm civarında olduğu tespit edilmiştir. Şekil 3.9.d’de 120 dakika süreyle MAO yapılmış saf alüminyuma ait kaplamanın kesit resmi görülmektedir. Kaplama kalınlığı 80 ± 10 μm aralığındadır. Kaplamanın matrise yakın bölgelerinde daha açık renkte zımparalama ve parlatma sonrasında daha az aşınarak yükselti şeklinde görülen bölgeler tespit edilmiştir. Muhtemelen bu bölgeler sertliği ve aşınma direnci daha yüksek olan alfa alüminadan oluşmuştur. Kaplamanın en dış kısmında yaklaşık 5-8 μm çaplı poroziteler görülmektedir.



Şekil 3.15. MAO yöntemi ile farklı sürelerde kaplanmış %0,7 Cu içeren (Al07Cu) Al-Cu ikili alaşımının kesitten alınmış SEM görüntüleri; a) 20 dk, b) 40 dk, c) 60 dk, d) 120 dk.

Şekil 3.15 'de % 0,7 Cu içeren Al-Cu alaşımının MAO yapılması sonrasında oluşan kaplamaların kesitinden alınan SEM resimleri görülmektedir. 20 dakika süreyle kaplama yapılmış resminde kaplama kalınlığı 12 ± 2 μm kalınlığındadır. Kaplamanın dış yüzeyinde porozite miktarı az, matrise yakın bölgede ise 4 ± 1 μm bant kalınlığında poroz bir yapının olduğu görülmektedir. 40 dakika süreyle MAO yapılmış numunede de benzer şekilde belirgin olarak farklı fazlar görülmektedir. İç kısımlardaki porozitelerin boyutları küçük ama daha yoğundur. 60 dakika süreyle MAO yapılmış numunede elde edilen kaplama kalınlığı 45 ± 5 μm aralığındadır. 120 dakika süreyle kaplama yapılmış numunede görüldüğü gibi kaplama kalınlığı 70 ± 10 μm civarındadır. Kaplamanın matrise yakın kısımlarında açık renkte görülen farklı bir bölge görülmektedir. Zımparalama ve parlatma sırasında diğer kısımlardan daha sert olduğu için daha az miktarda aşınarak yükselti şeklinde görülmesine neden olmuştur. Bu fazın alfa alümina fazı olduğu tahmin edilmektedir. Bu fazın matris ara yüzeyinde oluşmadığı yaklaşık matristen 6-8 μm içerde yoğun bir şekilde oluştuğu ve kaplamanın en dış kısımdan 40 ± 5 μm içerde sonlandığı görülmektedir.



Şekil 3.16. MAO yöntemi ile farklı sürelerde kaplanmış %1 Cu içeren (Al1Cu) Al-Cu ikili alaşımının kesitten alınmış SEM görüntüleri; a) 20 dk, b) 40 dk, c) 60 dk, d) 120 dk.

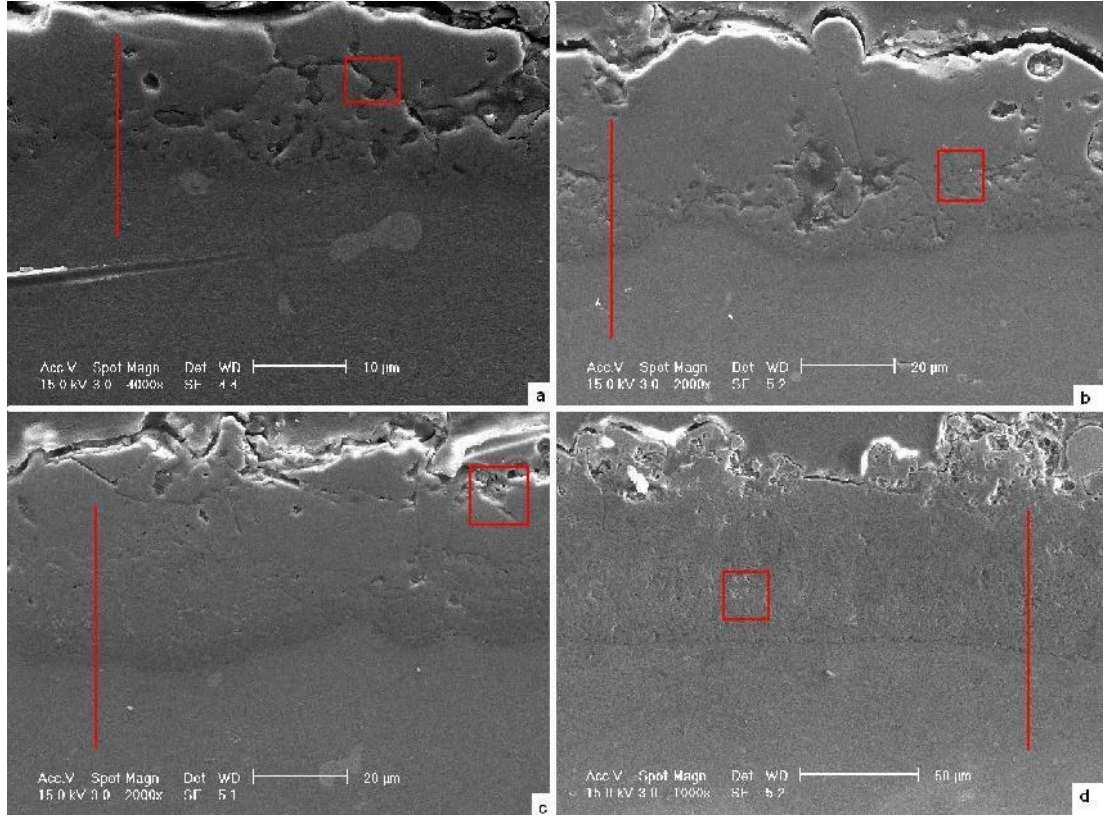
Şekil 3.16 'da % 1 Cu içeren Al-Cu alaşımı yüzeylerinde oluşan kaplamaların kesitinden alınan SEM resimleri görülmektedir.

20 dakika süreyle kaplama yapılmış numunede elde edilen kaplama kalınlığı 8 ± 4 μm civarındadır. Kaplamada en dış kısımda oluşan kaplamada porozite miktarı çok azdır. Matrise yakın kısımlarda oluşan kaplamada dış yüzeye göre daha poroziteli bir yapı elde edilmiştir.

40 dakika süreyle MAO yapılmış numunede elde edilen kaplama kalınlığı 20 μm civarındadır. Kaplama matrise yakın iç bölgede porozite oranı daha az ama yüzey olarak daha girintili çıkıntılı olarak oluştuğu tespit edilmiştir. Kaplama dış bölgesinde oluşan porozitelerin boyutlarının 10 μm kadar çıktığı tespit edilmiştir. Kaplamanın en dış kısımda görülen derin çatlak kaplama ile kalıp reçinesi arasında bulunan boşluktur.

60 dakika süreyle MAO yapılmış numunede oluşan kaplama kalınlığı 28 ± 3 μm olarak tespit edilmiştir. Kaplamanın dış kısmında porozite miktarı oldukça yüksek, boyutları 10 μm yaklaşan porozitelere rastlanılmıştır. Kaplamanın iç bölgesinde yüzey pürüzlülüğü daha fazla olan ayrı bir faz tespit edilmiştir. Bu fazın matrise yapışan ara yüzeyinde herhangi bir boşluğa rastlanılmamıştır.

120 dakika süreyle kaplama yapılmış numunede Şekil 3.16.d'de görüldüğü gibi kaplama kalınlığı 50 ± 5 μm civarındadır. Kaplamanın dış bölgesindeki porozite iç kısma göre daha fazladır. Matris ile kaplama yüzeyi arasında herhangi bir kırılma yada boşluğa rastlanılmamıştır.

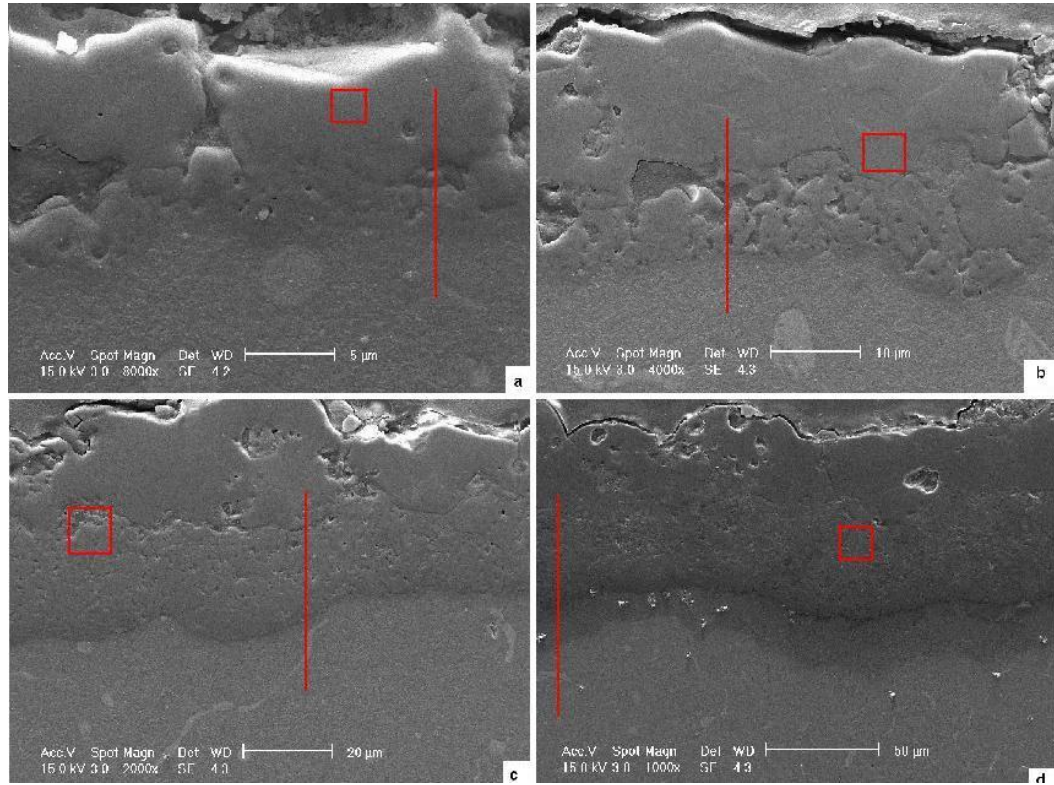


Şekil 3.17. MAO yöntemi ile farklı sürelerde kaplanmış %2 Cu içeren (Al_2Cu) Al-Cu ikili alaşımının kesitten alınmış SEM görüntüleri; a) 20 dk, b) 40 dk, c) 60 dk, d) 120 dk.

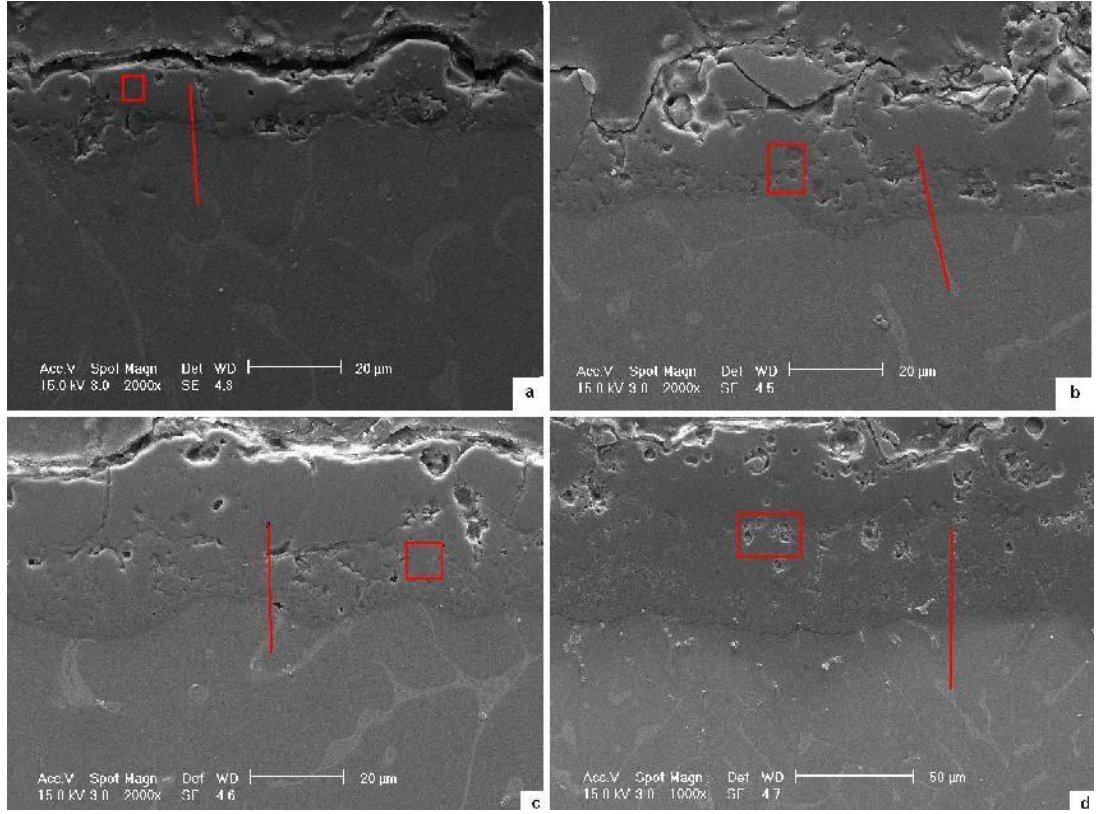
Şekil 3.17 'de % 2 Cu içeren alaşımda oluşan kaplamaların kesitinden alınan SEM resimleri görülmektedir.

20 dakika süreyle MAO yapılmış numunenin kesitinden alınmış Şekil 3.17.a'daki SEM resminde görüldüğü gibi kaplamada porozite miktarı oldukça fazladır. Matris-kaplama ara yüzeyine çok yakın bölgelerde de yer yer porozitelere rastlanılmıştır. Kaplamada matrise kadar boydan boya çatlak görülmektedir. Kaplama kalınlığı yaklaşık 10 ± 2 µm'dur. 40 dakika süreyle MAO yapılmış % 2 Cu miktarına sahip alaşımın kesit resminde oluşan kaplamanın dış bölgelerinde parlatma sonrasında daha düzgün bir yüzeye sahip kaplamanın oluştuğu görülmektedir. Matrise yakın iç kısımda oluşan kaplamanın homojen olmadığı, pürüzlü bir yapıya sahip olduğu tespit edilmiştir. Matrisin kaplama prosesine tabi tutulmadan önce zımparalanıp parlatılması sonrasında düz bir yüzeye sahip iken kaplama sonrasında matrisin farklı derinliklerde kaplamaların oluşması sonucu bozulduğu görülmüştür.

60 dakika MAO kaplama yapılmış Al₂Cu alaşımında elde edilen kaplama kalınlığı 40 μ m civarındadır. Kaplamanın en dış kısımlarında muhtemelen kalıplama sırasında reçine kalıba iyi yapışmamasından dolayı zımparalama ve parlatma sırasında oluşmuş yer yer çatlaklar görülmüştür. Kaplamanın dış bölgesinde porozite miktarı iç kısma göre daha fazla olup poroz deliklerin çapları 6 ± 2 μ m civarındadır. Matris bölgesinde daha açık renkte görülen bölgeler Cu miktarı yüksek CuAl₂ intermetalik fazıdır. 120 dakika süreyle MAO yapılmış numuneye ait kaplama kesitten alınan SEM görüntüsü Şekil 3.17.d'de verilmiştir. Oluşan kaplama kalınlığı 50 ± 5 μ m civarındadır. Kaplamanın en dış yüzeyindeki porozite miktarı iç kısımlara göre daha fazladır. Matriste görülen açık renkli kısımlar bakır oranınca zengin CuAl₂ fazıdır. Matris ile kaplama arasında herhangi bir boşluğa rastlanılmamış olup yapışma son derece iyidir.



Şekil 3.18. MAO yöntemi ile farklı sürelerde kaplanmış %4 Cu içeren (Al₄Cu) Al-Cu ikili alaşımının kesitten alınmış SEM görüntüleri; a) 20 dk, b) 40 dk, c) 60 dk, d) 120 dk.



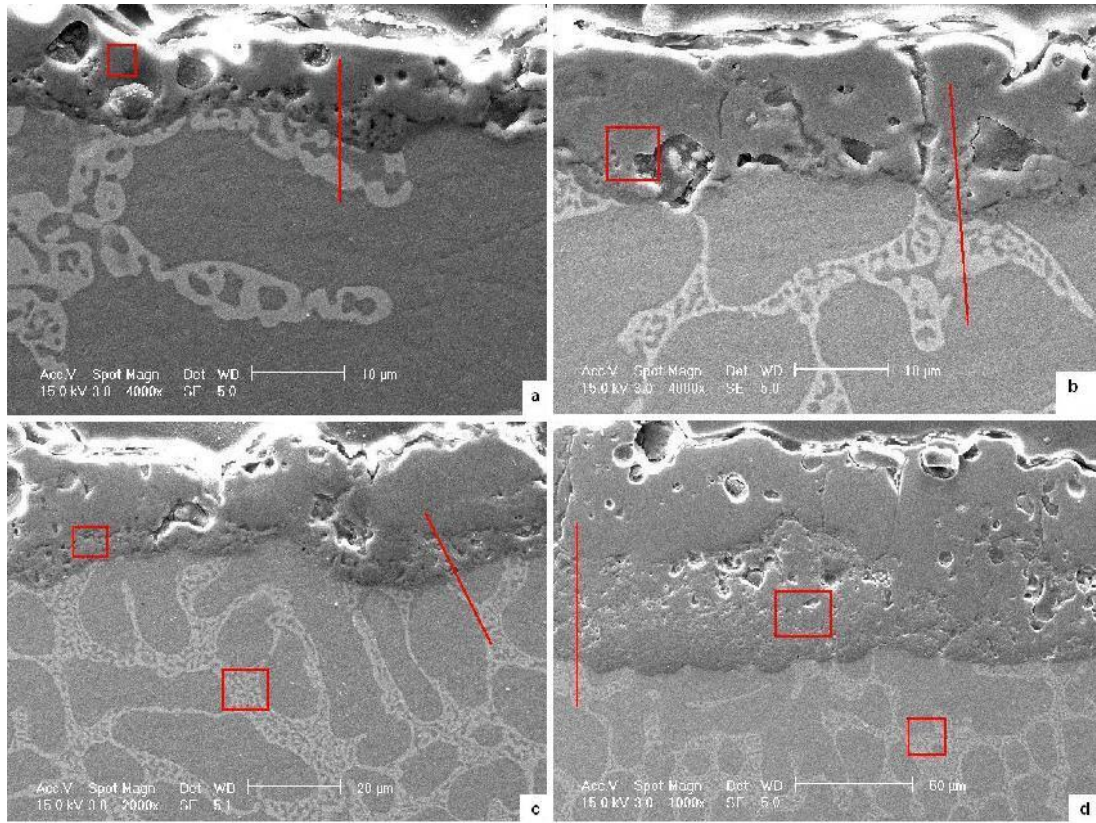
Şekil 3.19. MAO yöntemi ile farklı sürelerde kaplanmış %8 Cu içeren (Al8Cu) Al-Cu ikili alaşımının kesitten alınmış SEM görüntüleri; a) 20 dk, b) 40 dk, c) 60 dk, d) 120 dk.

Şekil 3.19 ‘da % 8 Cu içeren alaşımda oluşan kaplamaların kesitinden alınan SEM resimleri görülmektedir.

20 dakika süreyle kaplama yapılan numunede (Şekil 3.19.a) oluşan kaplamanın tamamında yüksek oranda poroziteye rastlanılmıştır. Kaplama ile kalıplama reçinesi arasında tam yapışma olmamasından dolayı numunede zımparalama ve parlatma sırasında kaplamanın ince olmasından dolayı boydan çatlamlar görülmüştür. 20 dakika MAO işlemi sonrasında elde edilen kalınlık $8 \pm 2 \mu\text{m}$ aralığındandır.

40 dakika süreyle kaplama işlemine tabi tutulmuş numunede (Şekil 3.19.b) kaplamanın dış bölgelerinde kılcal şekilde görülen çatlaklar mevcuttur. Numunenin metalografik olarak hazırlanması sırasında dış kısımda bulunan katılaşmış kalıp reçinesinin sertliği düşük olduğundan poroz yapıdaki kaplamaya zımparalama ve parlatma sırasında uygulanan kuvvetle birlikte kırılmalar oluşmuş yer yer kaplamanın dökülmesine neden olmuştur.

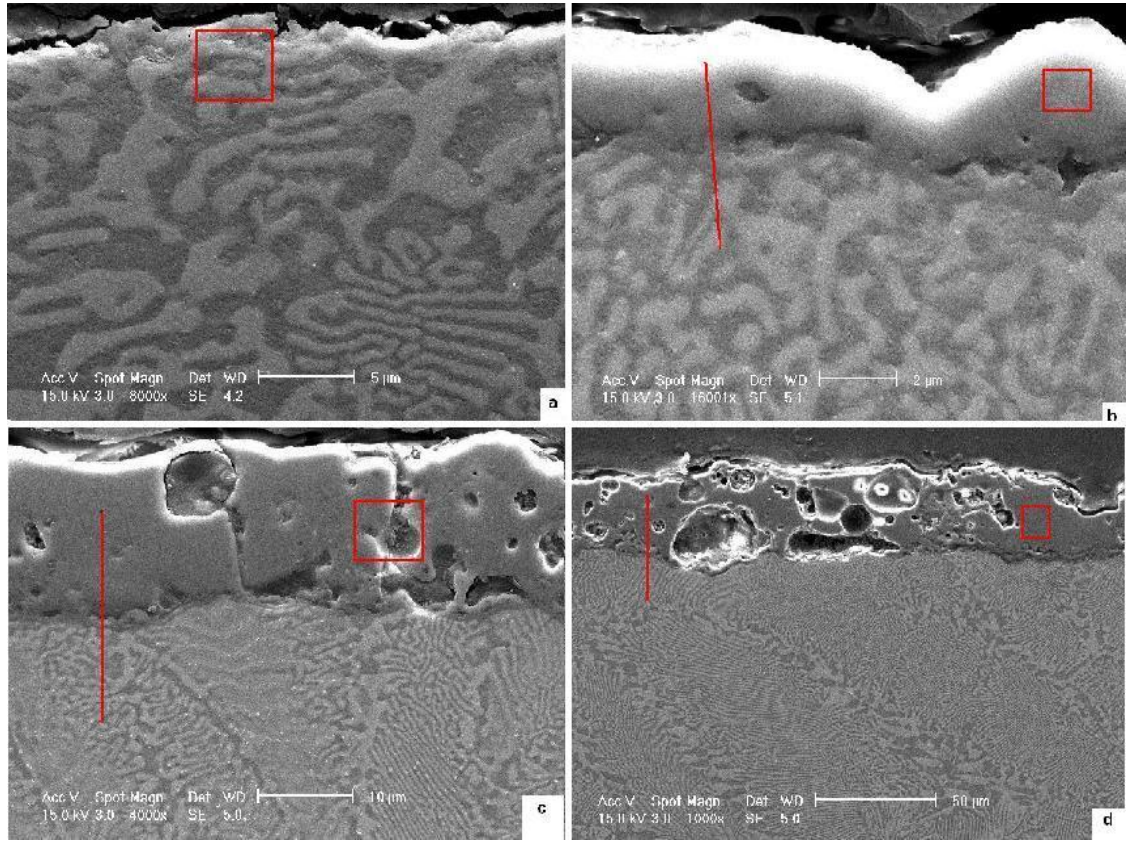
Matrise yakın bölgelerde oluşan kaplamalarda küçük çaplı poroziteler mevcuttur. Kaplama kalınlığı 20 ± 5 μm arasında değişen değerlere sahiptir. 60 dakika süreyle MAO yapılmış numunede (Şekil 3.19.c) elde edilen kalınlık değeri yaklaşık 30 ± 3 μm aralığındadır. Kaplamanın dış bölgesinin yüzeyi parlatma sonrasında son derece düzgün bir yapıya sahip olup matrise yakın iç bölgelerin yüzeyi daha pürüzlüdür. Matriste bulunan bakırca zengin CuAl_2 fazının kaplamaya birleştiği kısımlarda kaplama davranışına etkisi tespit edilememiştir. 120 dakika süreyle MAO yapılmış numunede (Şekil 3.19.d) elde edilen kalınlık değeri 55 ± 5 μm aralığındadır. Kaplamada herhangi bir çatlama ya da dökülmeye rastlanılmamıştır. Kaplamanın dış bölgelerinde porozite miktarı daha fazla iken matrise yakın bölgelerde boşluk oranı azalmıştır. Matriste bulunan bakırca zengin CuAl_2 fazının kaplamayla temas eden bölgelerinde herhangi bir değişik bölgeye rastlanılmamıştır.



Şekil 3.20. MAO yöntemi ile farklı sürelerde kaplanmış %16 Cu içeren (Al16Cu) Al-Cu ikili alaşımının kesitten alınmış SEM görüntüleri; a) 20 dk, b) 40 dk, c) 60 dk, d) 120 dk.

Şekil 3.20’de görülen %16 Cu içeren numunelerin kesit resimlerinde ilk göze çarpan matris içerisinde oluşan ikinci CuAl_2 fazıdır. Bu alaşımın 60 ve 120 dakika MAO yapılmış numunelerinde (Şekil 3.20.a) matrise yakın bölgelerdeki oluşan kaplama ile en dış kısımda oluşan fazın fiziksel yapısı arasında fark olduğu görülmektedir. Bu fark daha çok gözenek yapısındaki değişikliklerle göze çarpmaktadır. Matrise yakın iç bölgelerde gözenek ve porozite daha çok görülmektedir. 20 dakika MAO işlemi sonrasında elde edilen kalınlık 6 ± 2 μm aralığındandır.

Şekil 3.20.a’da matris içerisinde bulunan CuAl_2 fazının kaplama ile temas eden kısımları görülmektedir. Özellikle temasın olduğu kısımlarda daha büyük boşluklar görülmektedir. %16 Cu miktarına sahip Al_{16}Cu alaşımının 60 dakika süreyle MAO yapılmış numunesinde de elde edilen kalınlık değeri yaklaşık 25 ± 5 μm aralığındadır.



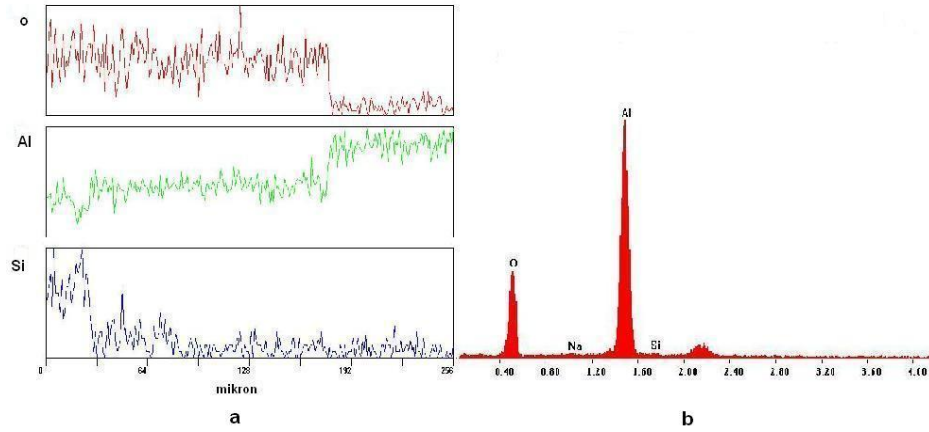
Şekil 3.21. MAO yöntemi ile farklı sürelerde kaplanmış %33 Cu içeren (Al_{33}Cu) Al-Cu ikili alaşımının kesitten alınmış SEM görüntüleri; a) 20 dk, b) 40 dk, c) 60 dk, d) 120 dk.

Şekil 3.21 'de % 33 Cu içeren alaşımda oluşan kaplamaların kesitinden alınan SEM resimleri görülmektedir. %33 bakır içeriğine sahip numunelerin kaplamalarında ilk göze çarpan 20 dakika (Şekil 3.21.a) geçmesine rağmen herhangi bir kaplama tabakasının oluşmadığıdır. Kaplama daha uzun sürelerde oluşmuştur. Oluşan bu kaplamalarda da gözenek ve boşluk oranı çok daha fazladır. Bakır oranının düşük olduğu alaşımlarda görülen alfa alümina fazına ait olduğu tahmin edilen daha açık renkte görünen faz bu alaşımda görülememiştir. %33 Cu miktarına sahip Al33Cu alaşımının 120 dakika süreyle MAO yapılmış numunesinde (Şekil 3.21.d) elde edilen kalınlık değeri yaklaşık $25 \pm 4 \mu\text{m}$ aralığındadır. %16 ve %33 bakır içeren alaşımların MAO yapılmış numunelerinde görülen kaplamadaki boşlukların oranı daha da artmış ve üniform bir kaplama oluşmamıştır. Şekil 3.21.d'de görüldüğü gibi %33 Cu miktarına sahip alaşımın 120 dk süreyle MAO işlemiyle oksitlenmesi sonucunda oluşan porozitelerin boyutlarının büyüdüğü, kaplama ile matris arayüzeyinde boşlukların olduğu tespit edilmiştir.

%33 Cu miktarına sahip alaşımın matrisine dikkat edildiğinde tam bir ötektik yapısı gözükmemektedir. Al-Cu faz diyagramında da görüldüğü gibi yaklaşık %33-34 bakır içeren alaşım ötektik noktaya rastlamaktadır. Alaşım ani olarak soğutulup faz oda sıcaklığına taşınmıştır.

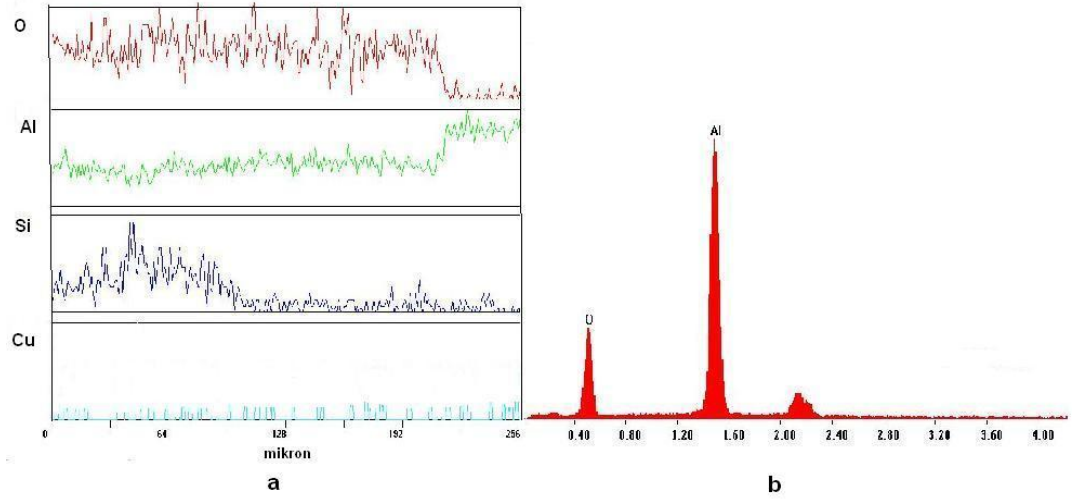
3.7. MAO İle Kaplanmış Al-Cu Alaşımlarının EDS Sonuçları

Al-Cu ikili alaşımları üzerine yapılan MAO kaplamalarında EDS analizi yapılan bölgeler kaplama kalınlığını gösteren kesit SEM görüntülerinde (Şekil 3.14–3.21) gösterilmiştir. Analizler “çizgi” modunda kaplamanın dış kısmından başlayıp altlık malzemeye doğru alınmış, ayrıca kaplamanın kırmızı renkle dikdörtgen şeklinde işaretlenmiş bölgesinden “alan” modunda alınarak elde edilen EDS spekturumları Şekil 3.22-3.29 ‘da gösterilmiştir. Bu çalışmada 20, 40, 60 ve 120 dk süre ile kaplanan tüm alaşımların (Al07Cu, Al1Cu, Al2Cu, Al4Cu, Al8Cu, Al16Cu, Al33Cu) EDS analizleri alınmış, fakat kaplama süresine bağlı olarak EDS analizinde bir değişiklik tespit edilemediğinden sadece 120 dk süreyle kaplanan numunelerin EDS analizleri verilmiştir.

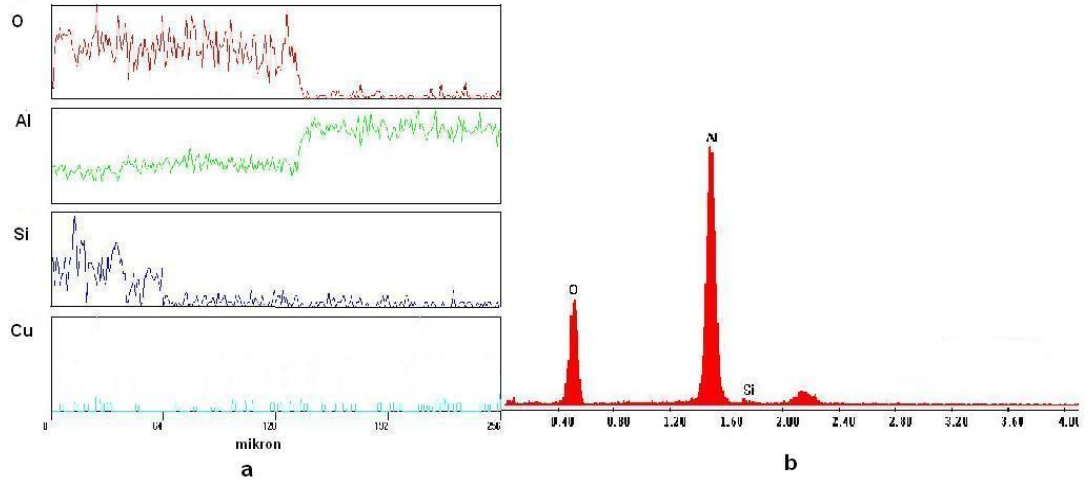


Şekil 3.22. 120 dk süreyle MAO ile kaplanmış saf alüminyumun kaplama tabakasından elde edilen EDS spekturumu; a) çizgisel, b) alan (bkz. Şekil 3.14.d).

Şekil 3.22’de saf alüminyumun 120 dk süreyle MAO ile kaplanmış numunesi üzerine yapılan EDS sonuçları gösterilmiştir. Çizgi modunda elde edilen EDS spekturumunda (Şekil 3.22.a) oksijen, alüminyum ve silisyum elementlerine ait pikler bulunmuştur. XRD ile kaplamada olduğu tespit edilen alüminyum oksit (Al_2O_3), korondum ve müllit fazlarının bileşimlerinde bulunan alüminyum, oksijen ve silisyum elementlerinin bulunması XRD sonuçlarını destekler özelliğindedir. “Çizgi” modunda yapılan EDS analizinde kaplama tabakasından altlık malzemeye geçişte oksijen miktarında düşüş tespit edilmiş, bunun yanında alüminyum miktarında artış görülmüştür. Bu durum kaplama bölgesinden altlık malzemeye geçişi göstermektedir. Kaplamadan “alan” modunda alınan EDS analizinde (Şekil 3.22.b) sodyum elementine rastlanılmıştır.



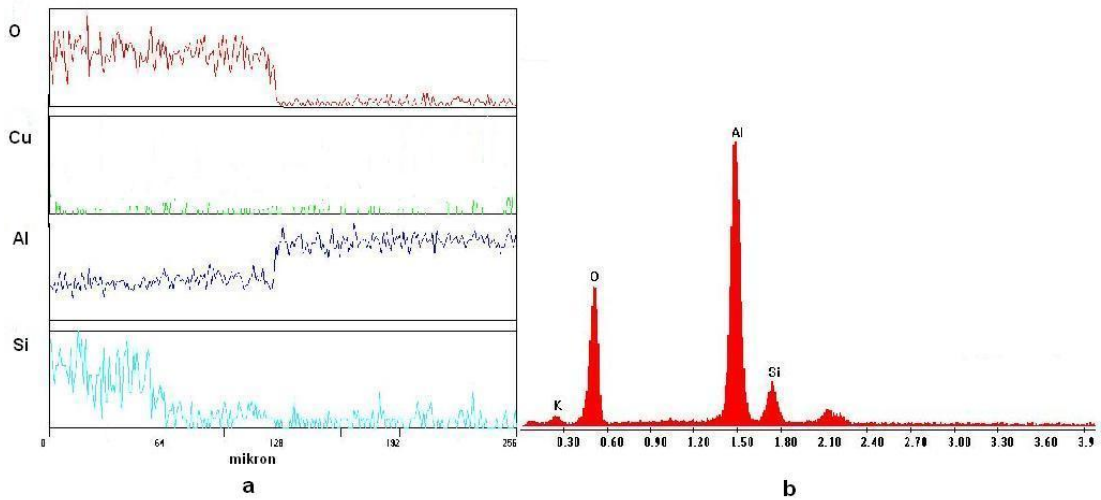
Şekil 3.23. 120 dk süreyle MAO ile kaplanmış Al_{0.7}Cu alaşımının (%0,7 Cu içeren) kaplama tabakasından elde edilen EDS spekturumu; a) çizgisel, b) alan (bkz. Şekil 3.15.d).



Şekil 3.24. 120 dk süreyle MAO ile kaplanmış Al₁Cu alaşımının (%1 Cu içeren) kaplama tabakasından elde edilen EDS spekturumu; a) çizgisel, b) alan (bkz. Şekil 3.16.d).

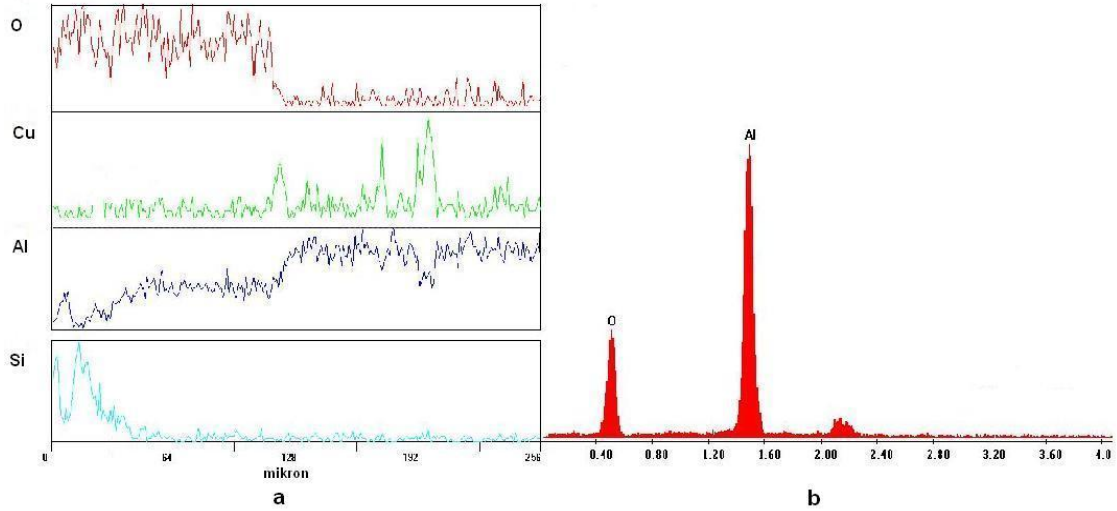
Şekil 3.23 ‘de görülen ağırlıkça % 0,7 Cu miktarına sahip alaşım üzerine yapılan kaplama tabakasının EDS analizinde saf alüminyuma benzer sonuçlar vermiştir. Şekil 3.23.a-24.a’da görünen EDS analizlerinde silisyum elementi tespit edilmiştir. Kaplamadan alınan “çizgi” modu EDS analizinde oksijen, alüminyum ve silisyum elementleri bulunmuştur. Analizin alındığı bölgelerde (bkz. Şekil 3.15.d-3.16.d) açık renkli alfa alümina olduğu tahmin edilen bölgelerin altlık malzemeye doğru daha yoğun bir şekilde oluştuğu görülmüştür. Şekil 3.23.b’de kaplamanın analiz alınan kısmında, çözeltiden yada oluşması muhtemel olan müllit fazındaki silisyum pikine rastlanılmamıştır.

Şekil 3.24.’de görülen % 1 Cu içeriğine sahip AlCu alaşımının kaplama bölgesinden alınan “çizgi” modu EDS analizinde oksijen, alüminyum ve düşük şiddette silisyum piki tespit edilmiştir. Matristen alınan EDS analizinde yalnızca alüminyum pikine rastlanılmıştır.



Şekil 3.25. 120 dk süreyle MAO ile kaplanmış Al₂Cu alaşımının (%2 Cu içeren) kaplama tabakasından elde edilen EDS spekturumu; a) çizgisel, b) alan (bkz. Şekil 3.17.d).

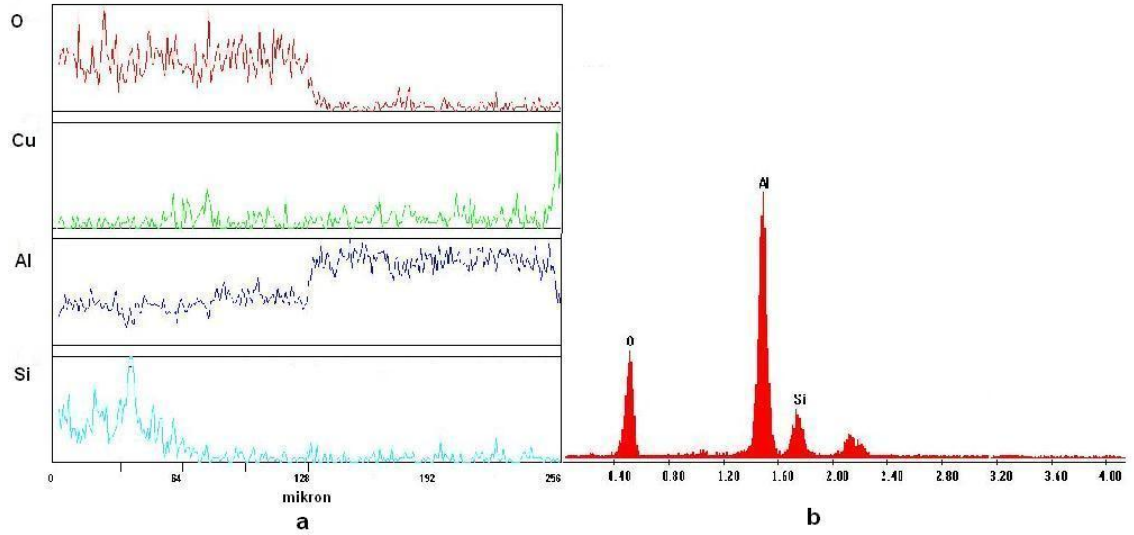
Şekil 3.25’de Al₂Cu alaşımının 120 dk süreyle MAO ile kaplanmış numunesi üzerine yapılan EDS sonuçları gösterilmiştir. Şekil 3.25 ‘de görülen ağırlıkça % 2 Cu içeriğine sahip Al₂Cu alaşımında kaplamadan alınan EDS analizinde potasyum pikine rastlanılmıştır. Çizgi modu analizinde (Şekil 3.25.a) kaplamada silisyum, oksijen ve alüminyum pikleri tespit edilmiştir. Al₂Cu alaşımında matristen alınan EDS analizinde (Şekil 3.25.a) Cu elementine zayıf bir pikle rastlanılmıştır. Bakır oranı %2 seviyesinde olduğundan dolayı pik zayıf şiddette görülmüştür.



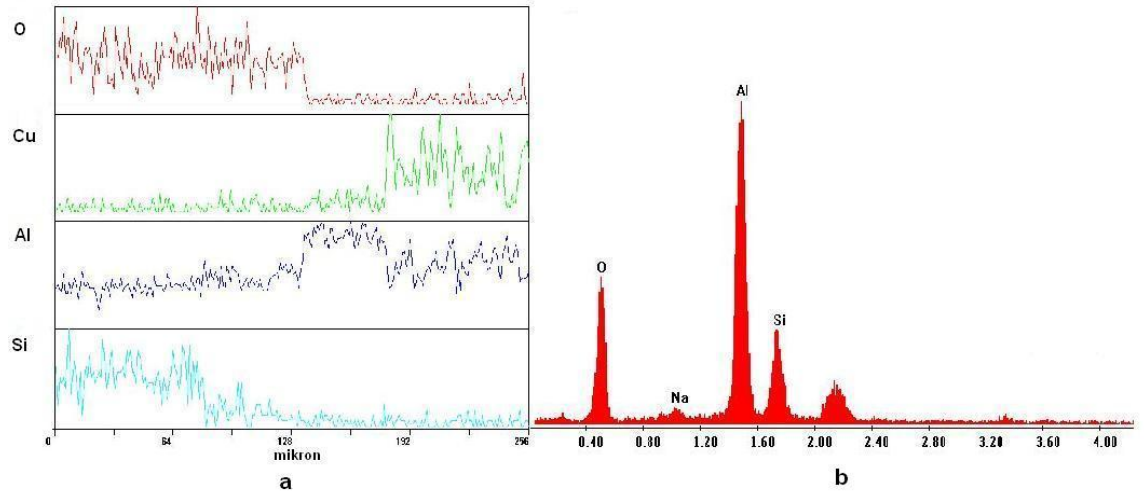
Şekil 3.26. 120 dk süreyle MAO ile kaplanmış Al_4Cu alaşımının (%4 Cu içeren) kaplama tabakasından elde edilen EDS spekturumu; a) çizgisel, b) alan (bkz. Şekil 3.18.d).

Şekil 3.26’da görülen ağırlıkça % 4 Cu içeriğine sahip alaşımdan (Al_4Cu) alınan EDS analizinde kaplamadan alınan sinyaller, oluşmuş olan alümina fazlarının bileşiminde bulunan oksijen ve alüminyum elementlerine aittir. Kaplamada çözültiden gelebilecek ya da oluşması muhtemel müllit fazına ait silisyum piki Şekil 3.26.a’da görülmektedir. Şekil 3.26.a’da “çizgi” modu analizi sırasında kaplama bölgesinin bittiği oksijen pikinin şiddetinin düşmesiyle görülmektedir. Altlık malzeme içerisinde devam eden analiz anında CuAl_2 (Cu miktarı %52-54) fazı üzerinden geçiş sırasında bakır miktarının arttığı tespit edilmiştir.

Şekil 3.27’de görülen % 8 Cu içeriğine sahip alaşımdan (Al_8Cu) alınan kaplamaya ait EDS analizinde, kaplamadan alınan sonuçlara (Şekil 3.27.b) göre alüminyum, oksijen ve silisyum elementlerine rastlanılmıştır. Bulunan bu elementler kaplamada oluşan alümina ve müllit fazına aittir. Alaşımın matristen alınan sonucunda ise bakır oranı analizin son aşamasında yüksek oranda artış göstermiştir. Bu artışın sebebi altlık matris malzemede bakır oranının yüksek olduğu ikinci bir faz olan CuAl_2 fazının bulunmasıdır. Analizin son aşamasında bu fazın bulunduğu bölgeye rastlanılmış ve bakır oranının ani olarak artmasına neden olmuştur.



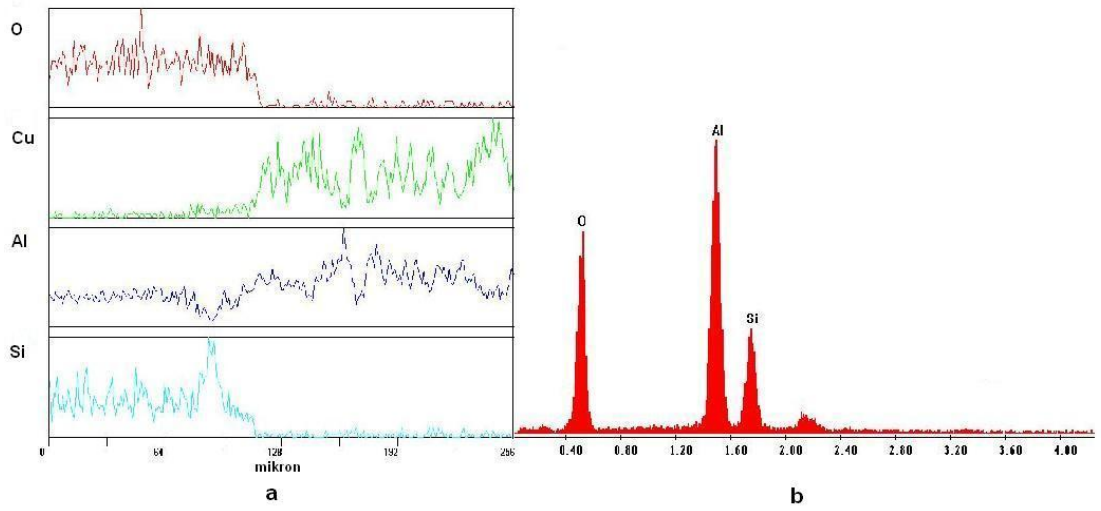
Şekil 3.27. 120 dk süreyle MAO ile kaplanmış Al_8Cu alaşımının (%8 Cu içeren) kaplama tabakasından elde edilen EDS spekturumu; a) çizgisel, b) alan (bkz. Şekil 3.19.d).



Şekil 3.28. 120 dk süreyle MAO ile kaplanmış Al_{16}Cu alaşımının (%16 Cu içeren) kaplama tabakasından elde edilen EDS spekturumu; a) çizgisel, b) alan (bkz. Şekil 3.20.d).

Şekil 3.28.a'da kaplamadan alınan Al_{16}Cu alaşımında oksijen, alüminyum ve kaplamanın dış kısmında ağırlıklı olarak silisyum elementi tespit edilmiştir. Kaplama bölgesinden altlık malzeme doğru alınan analizde altlık malzemeye yakın bölgelerde silisyum pikinde düşüş görülmüştür. Kaplama bölgesinin bitip altlık malzemeye giriş kısımlarında oksijen pikinde ani düşüşler tespit edilmiştir.

Şekil 3.28.b’de görülen %16 Cu içeriğine sahip alaşımın kaplamasından alınan EDS analizinde farklı olarak sodyum elementine rastlanılmıştır. Matristen alınan analizde ise bakır elementine bulunmuştur. Çizgi şeklinde alınan analiz sırasında (Şekil 3.28.a) matriste bulunan ikinci CuAl_2 fazı bulundurduğu yüksek bakır oranı (%52-54) nedeniyle bakır pikinin artmasına neden olmuştur. Bu fazın içerisinde alınan analiz sırasında silisyum ve oksijen miktarında ani düşüşler gözlemlenmiştir. Matriste bulunan bu fazın dağılımında da görüldüğü gibi fazlar arasında mesafeler vardır.



Şekil 3.29. 120 dk süreyle MAO ile kaplanmış Al_{33}Cu alaşımının (%33 Cu içeren) kaplama tabakasından elde edilen EDS spekturumu; a) çizgisel, b) alan (bkz. Şekil 3.21.d).

Şekil 3.29’da görülen %33 Cu içeriğine sahip alaşımdan (Al_{33}Cu) alınan EDS analizinde kaplamadan alınan sinyalde alüminyum oksit ve müllit fazına ait oksijen, yine oksidasyon işlemi sırasında kullanılan solüsyona veya müllit fazına ait olabilecek silisyum elementi tespit edilmiştir. Matristen alınan sinyalde bakır pikinin şiddeti önceki alaşımlara göre daha da artmıştır. Şekil 3.21.d ‘de görüldüğü gibi matriste bulunan ikinci CuAl_2 fazı tüm yapıya dağılmıştır. EDS analizi sırasında bakır pikinin ani iniş çıkışları tespit edilmiştir.

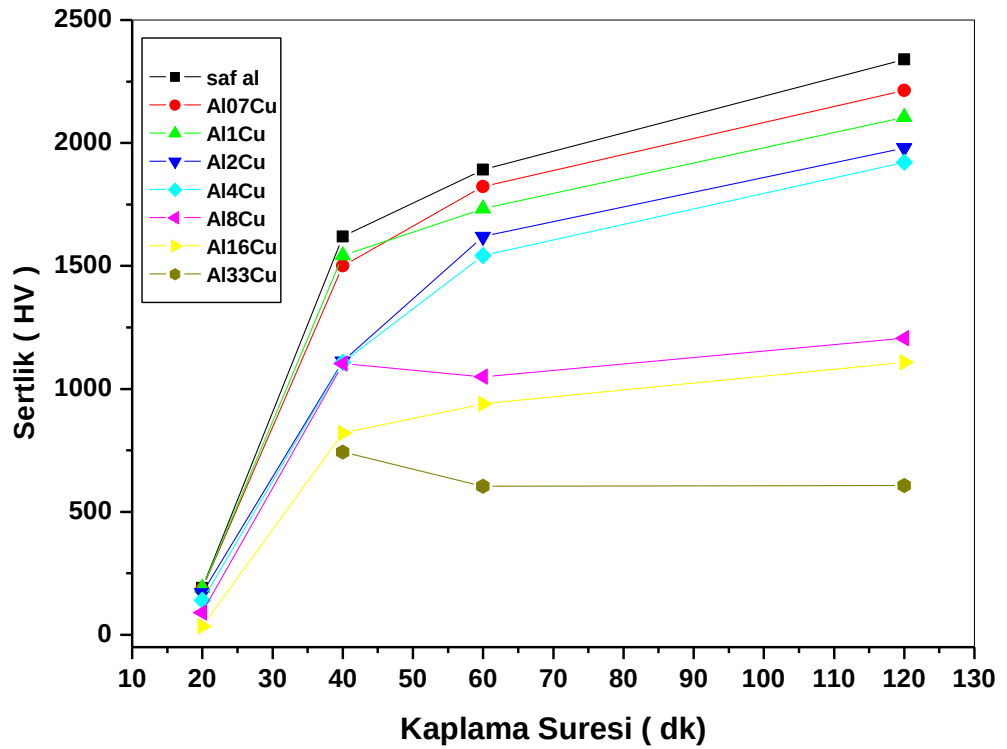
Şekil 3.29.a’da kaplama bölgesinden alınan analiz sırasında bakır pikine rastlanılmamıştır. Alüminyum, oksijen ve silisyum elementlerinden oluşan kaplama tabakasında kaplama bölgesinden altlık malzemeye geçildiğinde oksijen ve silisyum piki tespit edilememiştir.

3.8. MAO Yapılmış Al-Cu Alaşımlarının Sertlik Ölçümleri

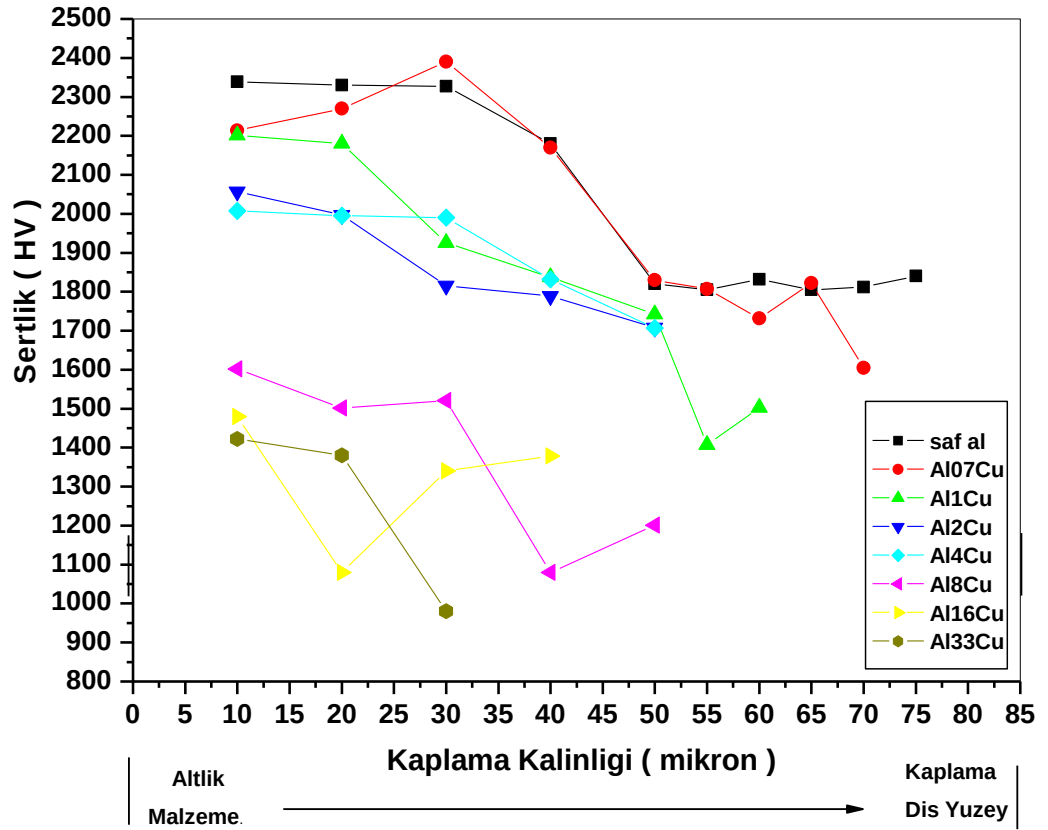
MAO yöntemiyle kaplanmış numunelerde oluşan kaplama tabakalarından kaplama süresine, kaplama kalınlığına ve içerdiği bakır miktarına bağlı olarak değişen sertlik değerleri Şekil 3.30-32’de gösterilmiştir.

Şekil 3.30’da kaplama süresine bağlı olarak her alaşım için sertlik değerlerinin aritmetik ortalaması alınmış ve grafikte gösterilmiştir. Kaplama süresi 20 dk dan 40 dk ya geçişte daha da fazla olmakla beraber kaplama süresinin artmasıyla birlikte ölçülen sertlik değerlerinde de artışlar tespit edilmiştir.

20 dk süreyle yapılan kaplama işleminde kaplama tabakasının ince olması (2-12 μm) nedeniyle sertlik izi bazı numunelerde alınamamıştır. Kaplama süresine bağlı olarak ölçülen sertlik değeri 800 HV ile 2400 HV arasındadır.

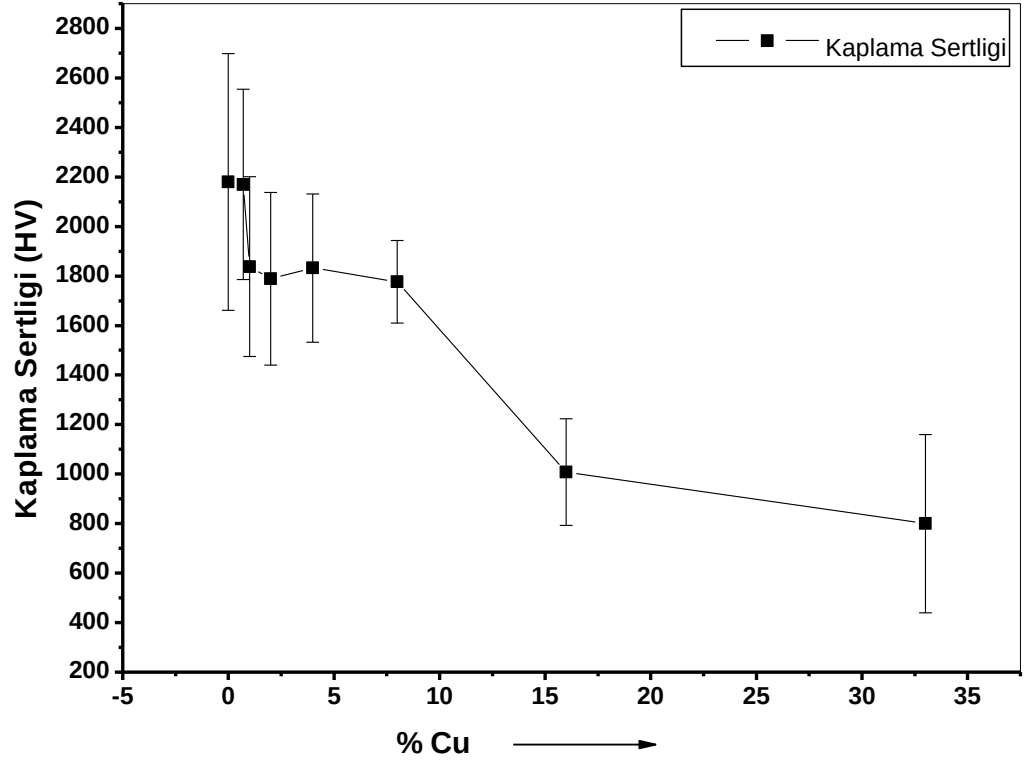


Şekil 3.30. MAO ile kaplama yapılmış farklı bakır miktarlarına sahip Al-Cu alaşımlarının kaplama zamanına göre sertlik değişimleri.



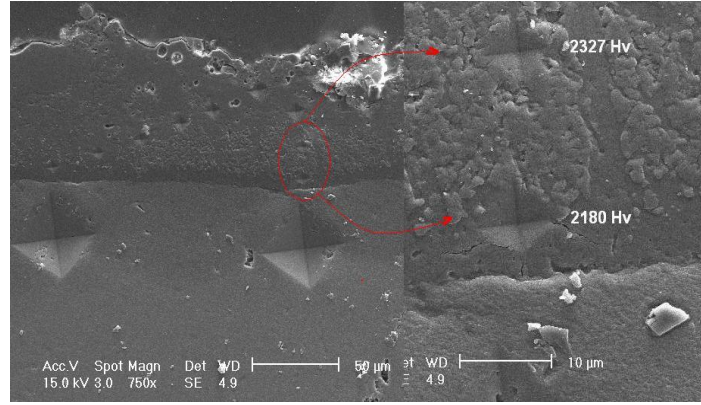
Şekil 3.31. MAO ile 120 dk kaplama yapılmış farklı bakır (%0, 0,7, 1, 2, 4, 8, 16, 33 Cu) miktarlarına sahip Al-Cu alaşımlarının kaplama kalınlığına göre sertlik değişimleri.

Şekil 3.31’de 120 dk MAO ile kaplama yapılmış farklı bakır içeriğine (%0,7-33 Cu) sahip Al-Cu alaşımları ile saf alüminyumun kaplama kalınlığı ile mikrosertlik değerleri gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi tüm Al-Cu alaşımlarından alınan mikrosertlik değerlerinde altlık malzemeye yakın bölgelerdeki sertlik değerleri yüksek iken kaplamanın dış yüzeyine doğru düştüğü tespit edilmiştir. Bakır miktarı düşük olan Al07Cu ve Al1Cu alaşımlarında mikrosertlik değerlerinin azalma miktarı daha fazladır. Alaşımlardaki bakır miktarı yükseldikçe alınan mikrosertlik değerlerinde de düşüş tespit edilmiştir. Kaplama kalınlığı yüksek olan düşük bakır içerikli alaşımlardan alınan sertlik değerlerinde, kaplama kalınlığının 50-55 μm civarındaki derinliklerinde yaklaşık 1700-1800 HV aralığına ulaşp hemen hemen bu değerlerde sabit kaldığı görülmektedir (Şekil 3.31).



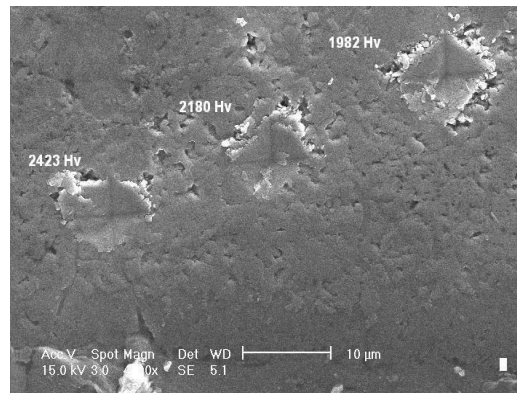
Şekil 3.32. MAO ile 120 dk kaplama yapılmış Al-Cu alaşımlarından alınan mikrosertlik değerlerinin bakır miktarına göre değişimi.

Şekil 3.32 'de her Al-Cu alaşımı için alınan on sertlik değeri görülmektedir. Saf alüminyumda ve bakır oranı düşük alaşımlarda ($Al_{10}Cu$, $Al_{11}Cu$) mikrosertlik değeri 2400 HV ile 1700 HV arasında değişmektedir. Bakır miktarının artmasıyla birlikte mikrosertlik değerlerinde de yaklaşık lineer bir düşüş tespit edilmiştir. Ağırlıkça %8 bakır içeren alaşım grubu dahil, daha yüksek bakır içeren alaşımlardan alınan sertlik değerlerindeki düşüş daha belirgindir. Bakır miktarı %33 olan $Al_{33}Cu$ alaşımında ölçülen mikrosertlik değeri 650 HV ile 1000 HV arasında değişmektedir.



Şekil 3.33. 120 dk süreyle MAO yapılmış saf alüminyum numunenin kesitinden alınan vikers sertlik izlerinin SEM görüntüsü.

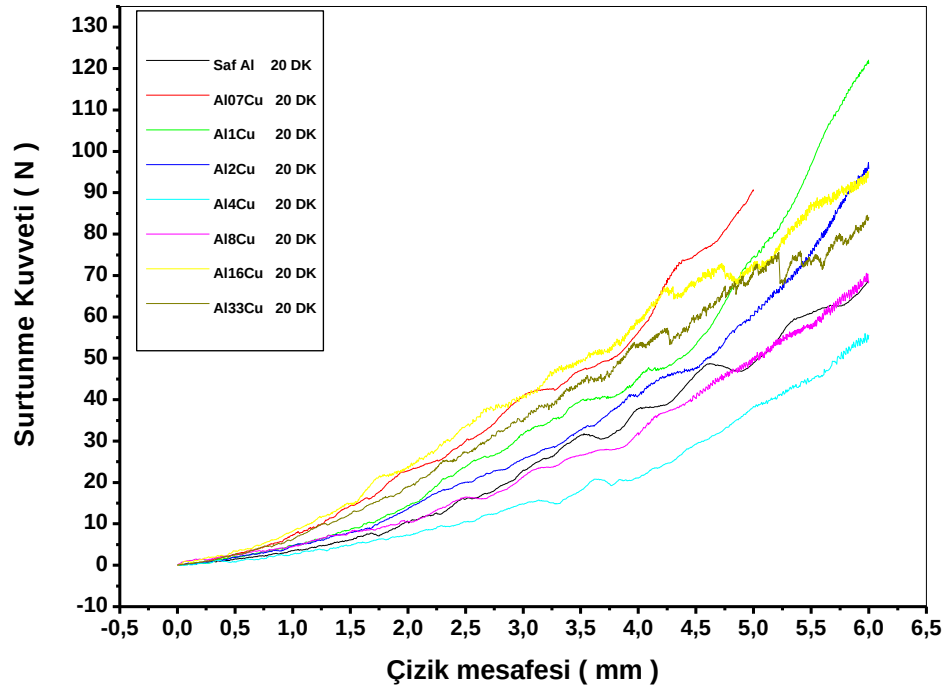
Şekil 3.33’de görülen saf alüminyumun 120 dakika süreyle MAO ile kaplama yapılmış numunesine ait SEM görüntülerinde sertlik ölçümlerinin kaplamadan v şeklinde alındığı gösterilmiştir. Kaplama derinliğe bağlı olarak sertliklerin değiştiği tespit edilmiştir (Şekil 3.31). Şekil 3.33’te kaplama kalınlığına bağlı olarak alınan sertlik izlerinin boyutlarının değiştiği görülmektedir. Oluşan fazlara ve poroziteye bağlı olarak ölçülen sertlik değerleri değişiklik göstermektedir. Diğer kısımlara göre daha beyaz renkte görülen parlatma ve zımparalama sonrasında bu fazın daha az aşındığı SEM fotoğrafında görülmektedir. Alınan mikrosertlik değeri de bu bölgede daha yüksek olarak (2327 HV) tespit edilmiştir. Şekil 3.34’te Al07Cu alaşımına ait mikrosertlik ölçümlerinde kaplama tabakasının alt kısımlarının poroz bir yapıda olduğu tespit edilmiştir. Porozite miktarının az olduğu bölgede sertlik değeri daha yüksektir.



Şekil 3.34. Al07Cu alaşımının 120 dk MAO yapılmış numunesinden alınan sertlik ölçümlerinin SEM görüntüsü.

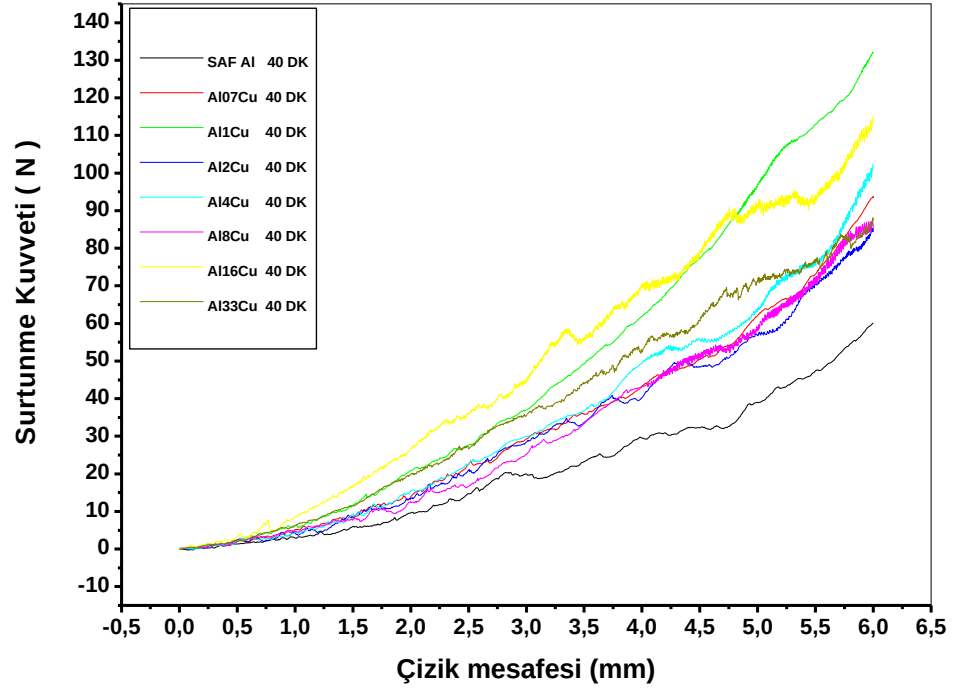
3.9. Hazırlanan Kaplamaların Çizik Testi Sonuçları

Saf alüminyum ve Al-Cu alaşımlarının 20, 40, 60, 120 dk süreyle MAO yöntemi ile kaplanmış numunelerinin çizik testi sonuçları Şekil 3.35-38’de gösterilmiştir. Deneysel kısımda belirtildiği gibi çizik boyu 6mm, çizme sırasında uygulanan maksimum kuvvet 200 N, çizme ucu 0,5 mm’lik elmas uçtur.

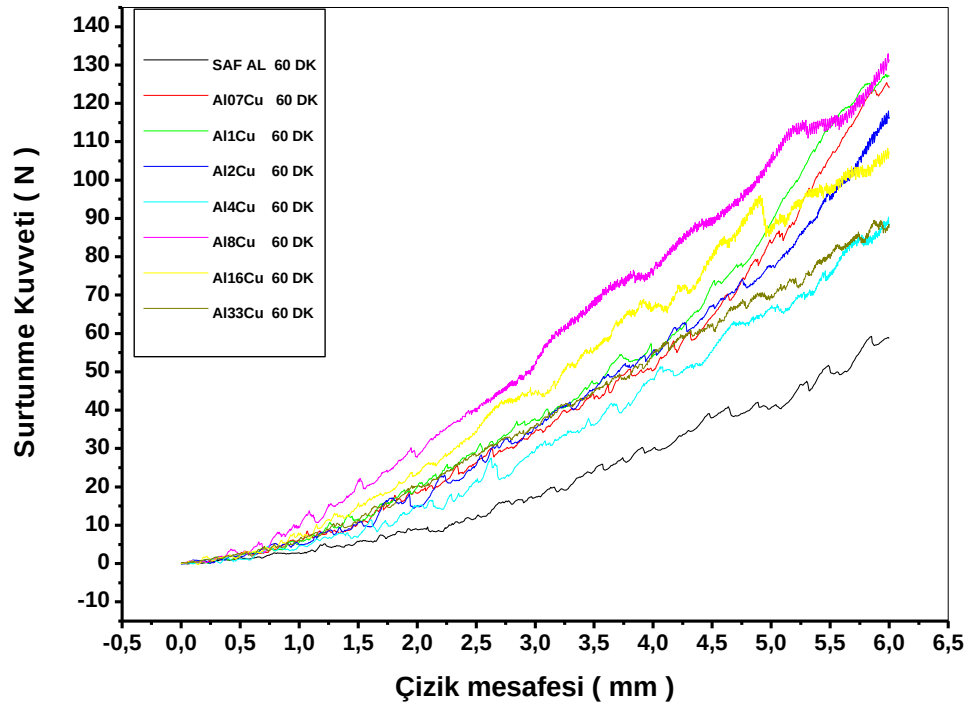


Şekil 3.35. Saf alüminyum ve Al-Cu alaşımlarının 20 dk süreyle MAO yöntemi ile kaplanmış numunelerinin çizik testi sonuçları.

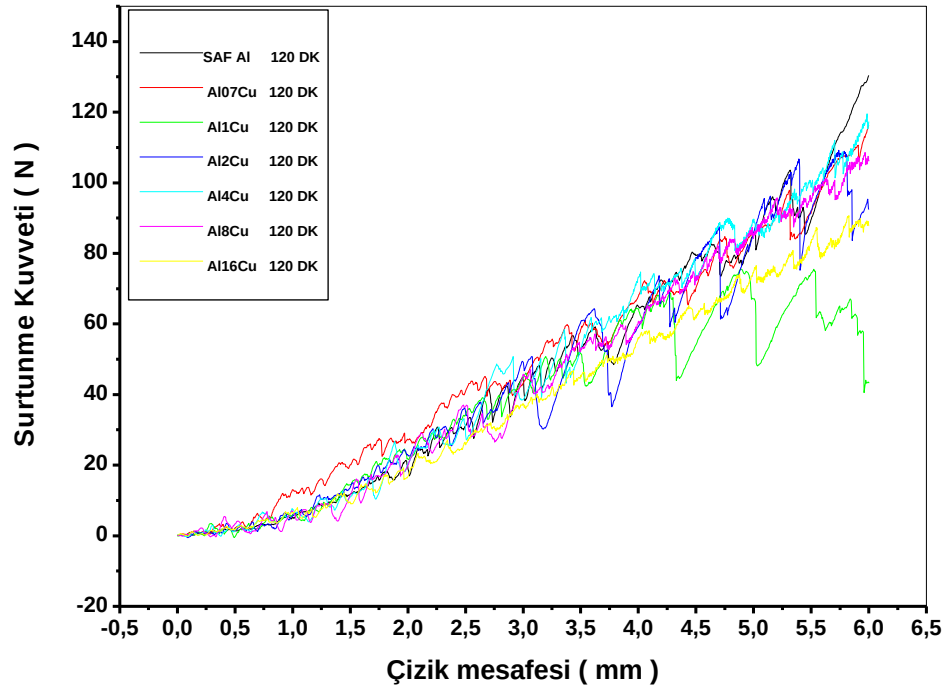
Şekil 3.35'te Al-Cu alaşımları ve saf alüminyumun 20 dakika MAO yöntemiyle kaplanması sonrası yapılan çizik testi sonuçları verilmiştir. %4 bakır içeren alaşımda yaklaşık 3,5 mm çizik mesafesinde sürtünme kuvvetinde düşüş tespit edilmiştir. Yine %16 bakır içeren alaşımda da 4 mm çizik mesafesinde sürtünme kuvvetinde ani düşüş tespit edilmiştir. Kesit resimlerinden tespit edilen %16 bakır içerikli Al16Cu alaşımının da 20 dakika MAO ile kaplanması sonrasında oluşan kaplamanın ince (10-15 mikron) olmasına rağmen Şekil3.35'de görüldüğü gibi daha düşük bakır içerikli alaşımlardan daha yüksek kuvvet altında deformasyon gösterdiği görülmektedir. 6mm'lik çizik testi sonunda sürtünme kuvvetleri 50-110 N arasında değişen değerler almıştır.



Şekil 3.36. Saf alüminyum ve Al-Cu alaşımlarının 40 dk süreyle MAO yöntemi ile kaplanmış numunelerinin çizik testi sonuçları.



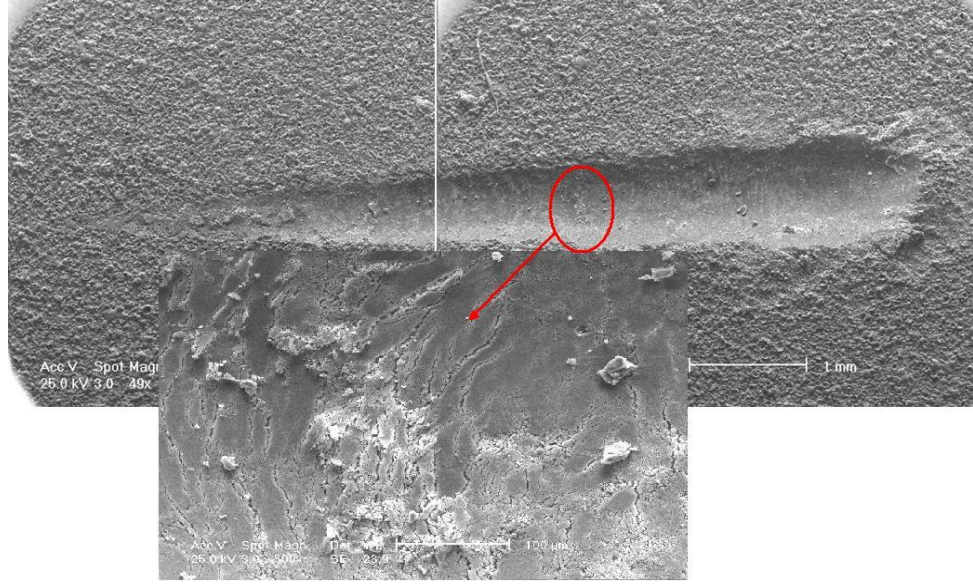
Şekil 3.37. Saf alüminyum ve Al-Cu alaşımlarının 60 dk süreyle MAO yöntemi ile kaplanmış numunelerinin çizik testi sonuçları.



Şekil 3.38. Saf alüminyum ve Al-Cu alaşımlarının 120 dk süreyle MAO yöntemi ile kaplanmış numunelerinin çizik testi sonuçları.

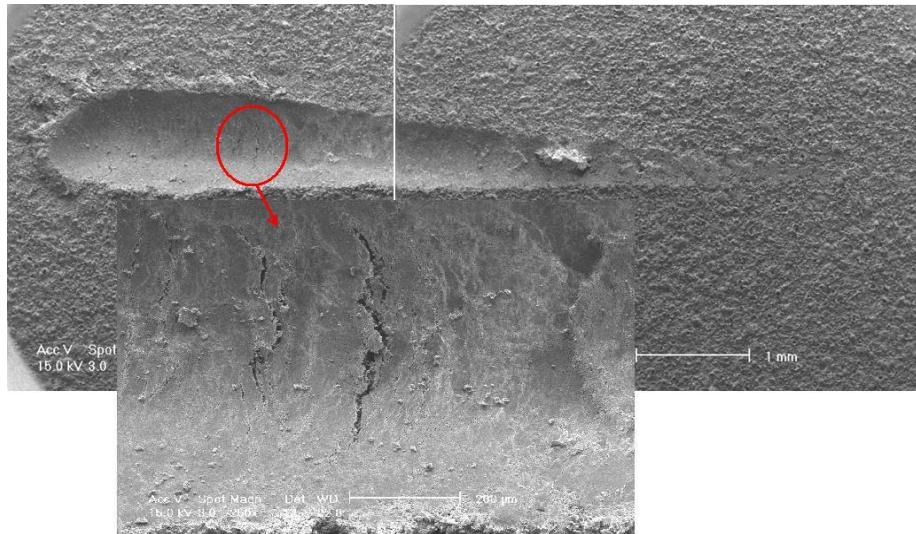
Şekil 3.36’da görülen 40 dakika MAO işlemine tabi tutulmuş numunelerin alınan çizik testi sonuçlarında görüldüğü gibi bakır miktarı diğer alaşımlara göre yüksek sayılabilecek Al16Cu ve Al33Cu alaşımlarının sürtünme kuvvetleri daha yüksek çıkmıştır. 6mm’lik çizik testi sonunda sürtünme kuvvetleri 50-130 N arasında değişen değerler almıştır.

Yüksek bakır miktarına sahip Al8Cu, Al16Cu ve Al33Cu alaşımlarının çizik testi sırasında kaplamalarında ani kırılmalarla birlikte sürtünme kuvvetinde ani düşüşler tespit edilememiştir. Düşük bakır içerikli Al07Cu ve Al1Cu alaşımlarında kısa sürede (20 dk) MAO yapılmış alaşımlarda yük altında deforme olan kaplama test başından itibaren matrise sıvanma eğilimi göstererek ani yük düşüşlerine neden olmamıştır. Kaplama kalınlığının yüksek olduğu uzun süreli MAO yapılmış numunelerde ise kaplamada ani kırılmaların olduğu tespit edilmiştir (Şekil 3.38). 120 dk süreyle kaplanan numunelere uygulanan çizik testinde uygulanan yük değerlerinin bütün alaşımlarda birbirine yaklaştığı tespit edilmiştir. 6mm’lik çizik testi sonunda sürtünme kuvvetleri 90-130 N arasında değişen değerler almıştır.

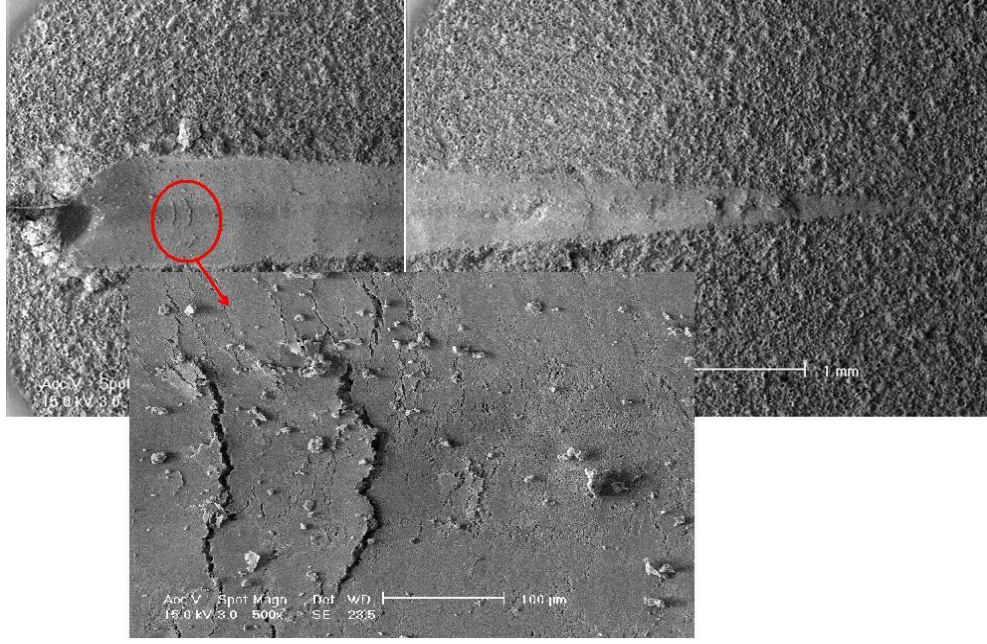


Şekil 3.39. Saf alüminyumun 120 dk süreyle MAO sonrası yapılan çizik testi SEM görüntüsü.

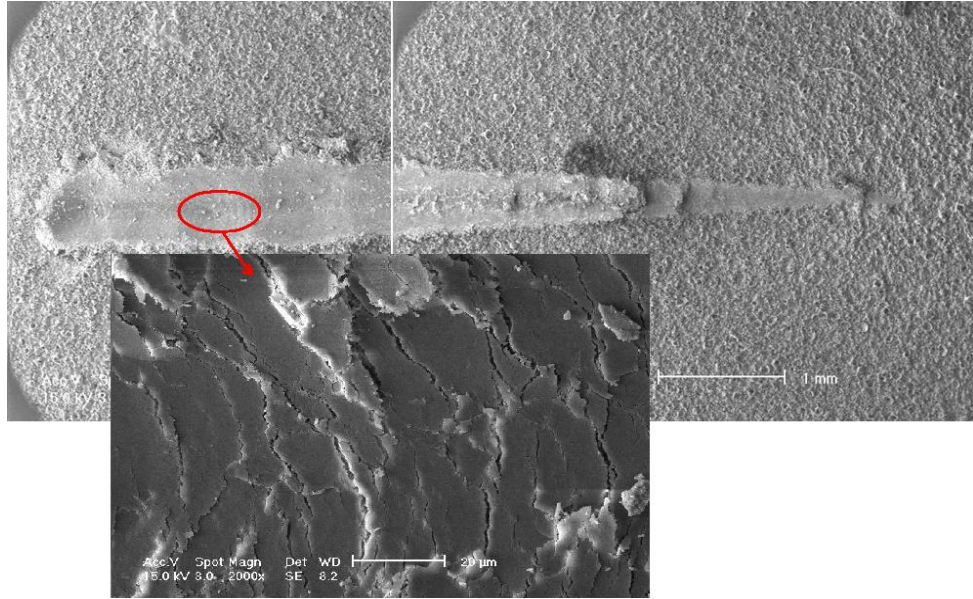
Şekil 3.39-3.40'ta saf alüminyum ve %0,7 Cu içerikli alaşımın çizik testi SEM görüntüleri görülmektedir. Test sırasında kaplamada uygulanan kuvvet yönüne dik bir şekilde ani kırılmaların olduğu görülmektedir. Matrise yakın kısımda büyük çoğunluğu alfa alümina olarak tahmin edilen kaplama tabakasının son derece kırılgan, tokluğu düşük bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Kaplama kalınlığının da 70-80 mikron arasında SEM kesit resimlerinden tespit edilen numunelerin alt kısımlarında bulunan son derece yumuşak matris tabakası kaplamanın yük altında ani olarak kırılmasına neden olmuştur (bkz. Şekil 3.38).



Şekil 3.40. Al_{0.7}Cu alaşımının 120 dk süreyle MAO sonrası yapılan çizik testi SEM görüntüsü.

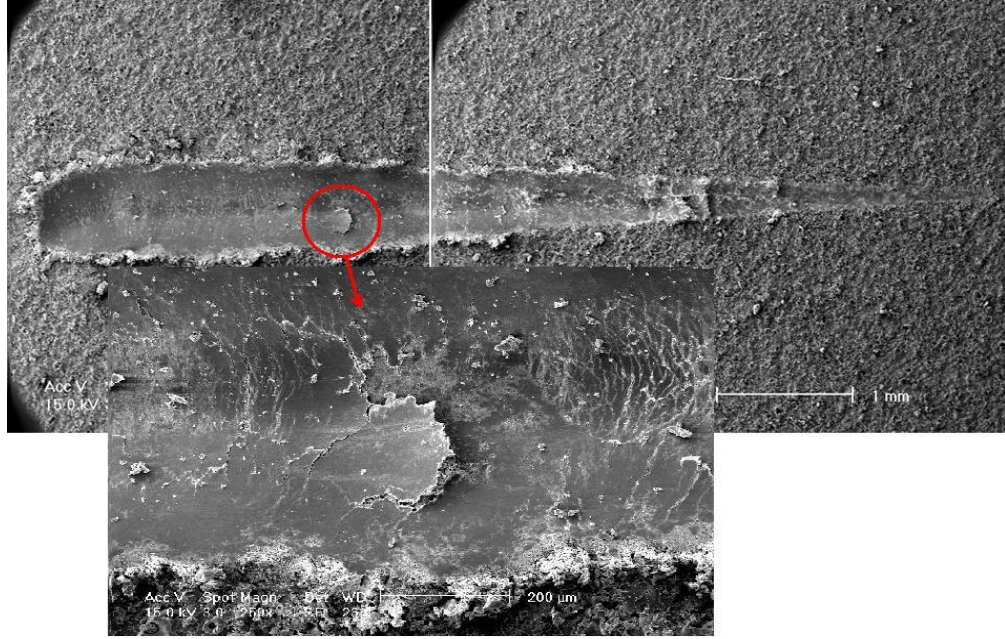


Şekil 3.41. Al1Cu alaşımasının 120 dk süreyle MAO sonrası yapılan çizik testi SEM görüntüsü.



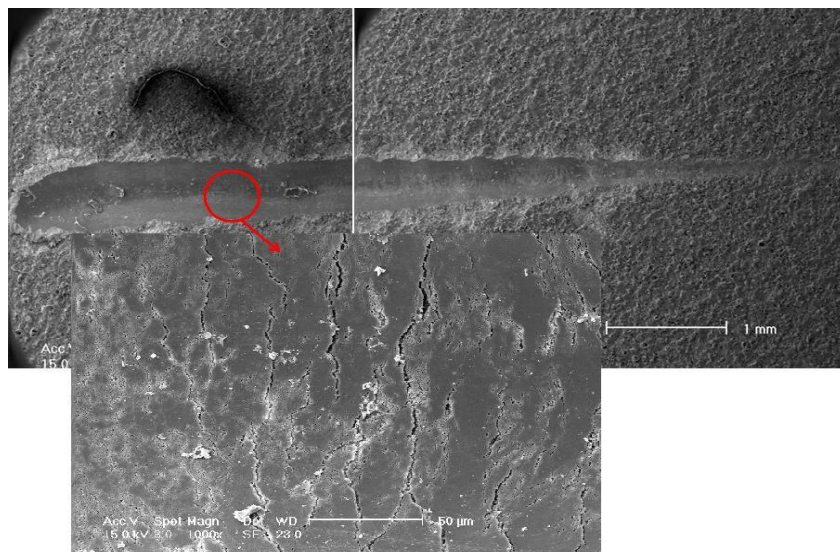
Şekil 3.42. Al2Cu alaşımasının 120 dk süreyle MAO sonrası yapılan çizik testi SEM görüntüsü.

Şekil 3.42’de görülen %2 Cu içerikli alaşımin çizik testi SEM görüntüsünde kılcal şekilde oluşmuş birçok çatlak görülmektedir. Üst kısımlarda yoğun olarak bulunan müllit fazının altında daha sert açık renkli fazın olduğu yapılan kesit SEM resimlerinde gösterilmiştir. Yükün etkisiyle altta bulunan ve son derece kırılğan olan poroz yapılı muhtemel alümina fazının etkisiyle SEM fotoğrafında görülen müllit fazı sıvanmanın yanında kılcal şekilde çatlamıştır.

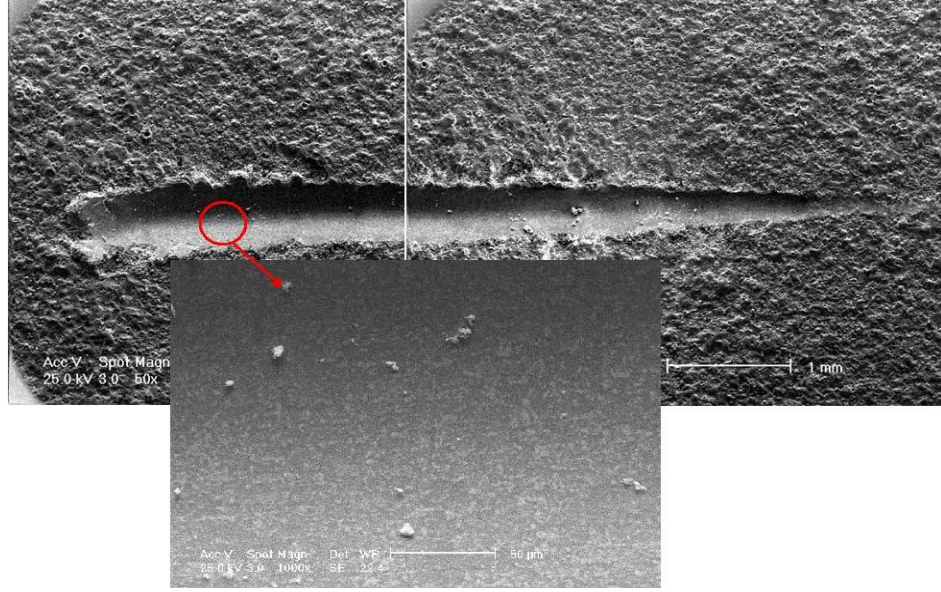


Şekil 3.43. Al₄Cu alaşımasının 120 dk süreyle MAO sonrası yapılan çizik testi SEM görüntüsü.

Şekil 3.43’de görülen %4 Cu içerikli alaşımanın çizme testi sonrasında alınan SEM görüntüsünde üst tabakanın çizme ucunun etkisiyle bir miktar kalkarak yükselti kazandığı görülmektedir. Görülen bu tabaka en dışta oluşması yüksek muhtemel müllit fazına ait olabilir. Altta daha sert olan alümina fazı ile arasındaki yapışma bağı kuvvetli olmadığından ayrılma göstermiştir.

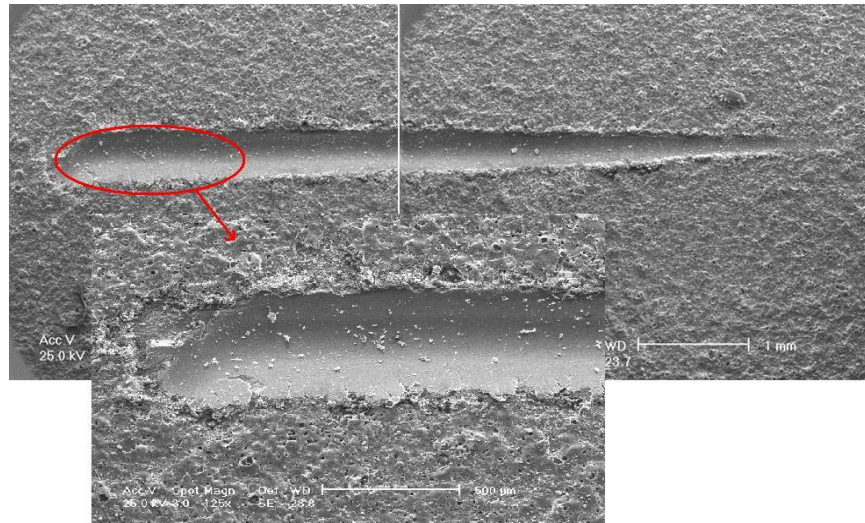


Şekil 3.44. Al₈Cu alaşımasının 120 dk süreyle MAO sonrası yapılan çizik testi SEM görüntüsü.



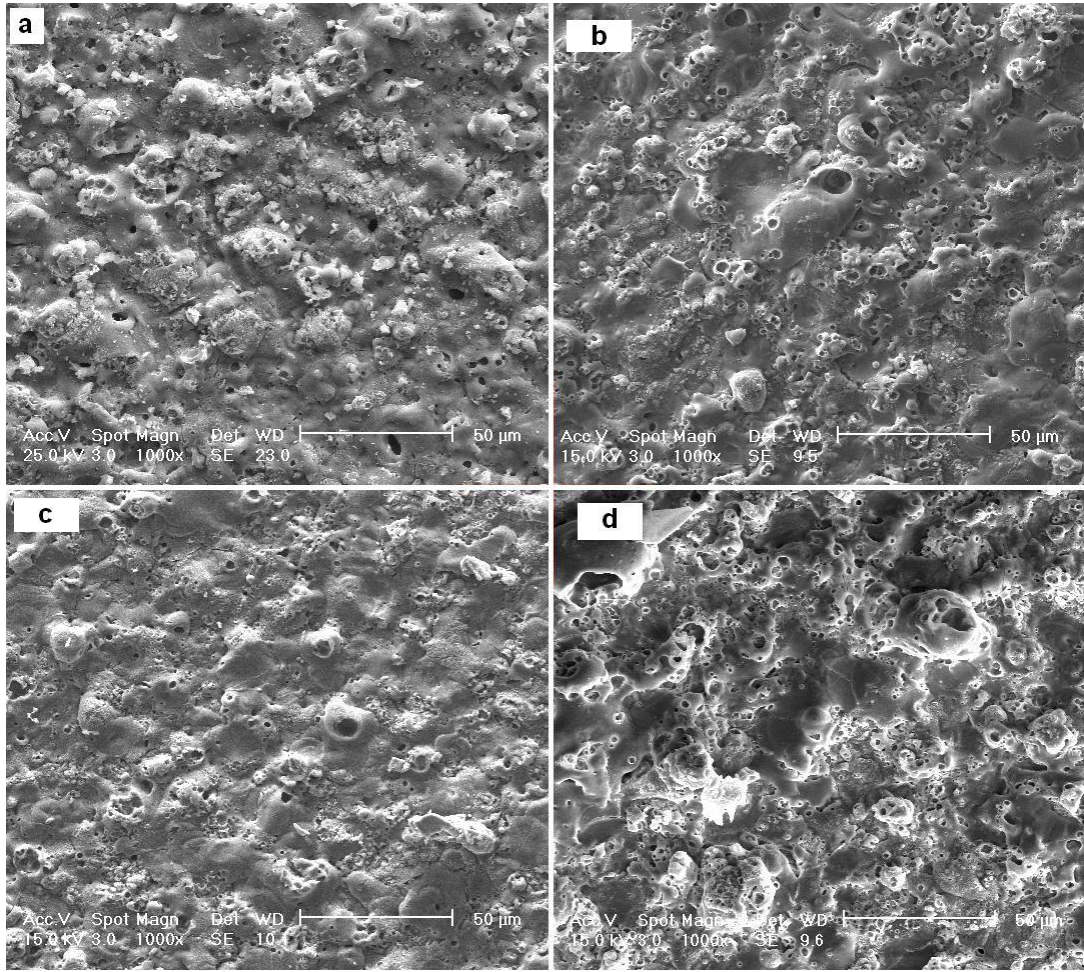
Şekil 3.45. Al₁₆Cu alaşımlarının 120 dk süreyle MAO sonrası yapılan çizik testi SEM görüntüsü.

Şekil 3.45-46'da görülen %16-33 Cu miktarına sahip alaşımlardan alınan çizme testi SEM görüntülerinde herhangi bir yüzey çatlağına ya da kırılmaya rastlanmamıştır. Bu iki alaşımların 120 dk MAO sonrasında oluşan kaplamasında yalnız müllit fazı yapılan XRD analizinde tespit edilmiştir. Bu faz alümina fazlar gibi kırılma ve tokluğu düşük olmadığından kuvvet altında matrise sıvanarak deforme olma eğilimi göstermiştir. Matris tabakasının da CuAl₂ fazınca zengin olması, düşük Cu içerikli alaşımlardan daha sert olması nedeniyle kaplamanın kırılmamasına katkıda bulunmuştur.



Şekil 3.46. Al₃₃Cu alaşımlarının 120 dk süreyle MAO sonrası yapılan çizik testi SEM görüntüsü.

3.10. MAO Yapılmış Al-Cu Alaşımlarının Yüzey SEM Sonuçları

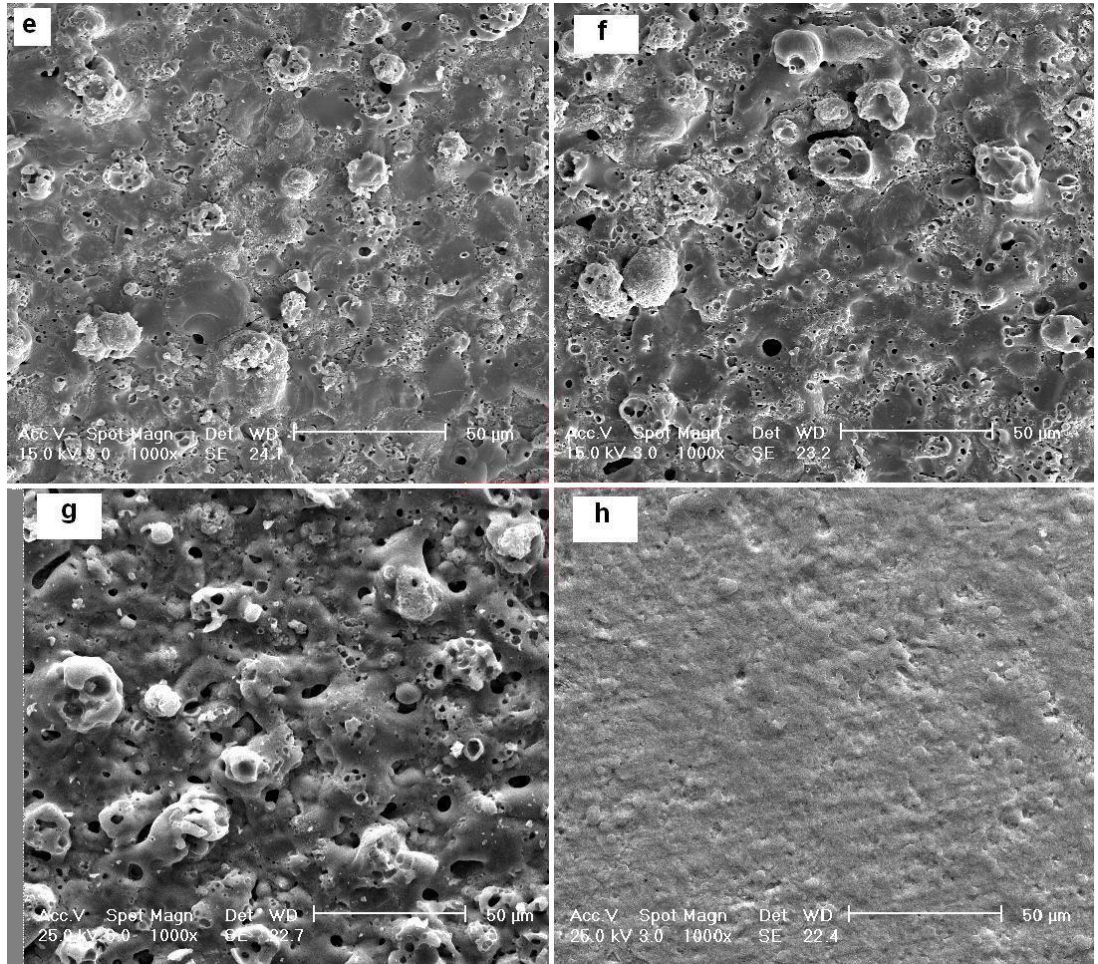


Şekil 3.47. 20 dk süreyle MAO yapılmış alaşımların yüzey SEM görüntüsü; **a)** saf Al, **b)** Al07Cu, **c)** Al1Cu, **d)** Al2Cu.

MAO ile 20 dk ve 120 dk süreyle kaplanmış alaşımların yüzeylerinden alınmış SEM fotoğrafları Şekil 3.47-3.50’de gösterilmiştir.

Şekil 3.47’de 20 dakika MAO işlemi ile kaplanmış saf alüminyum, Al07Cu, Al1Cu ve Al2Cu alaşımlarına ait yüzey SEM resimleri gösterilmiştir. Şekil 3.47’deki numunelerin yüzeylerinde oluşan kaplamalarda farklılıkların olduğu tespit edilmiştir. 20 dk kaplama yapılmış saf alüminyumun yüzeyine ait Şekil 3.47.a’da daha poroz bir yapı tespit edilmiştir. Kaplama yüzeyinde yer yer yükseltiler ve elektriğin boşaldığı oyuklar görülmektedir.

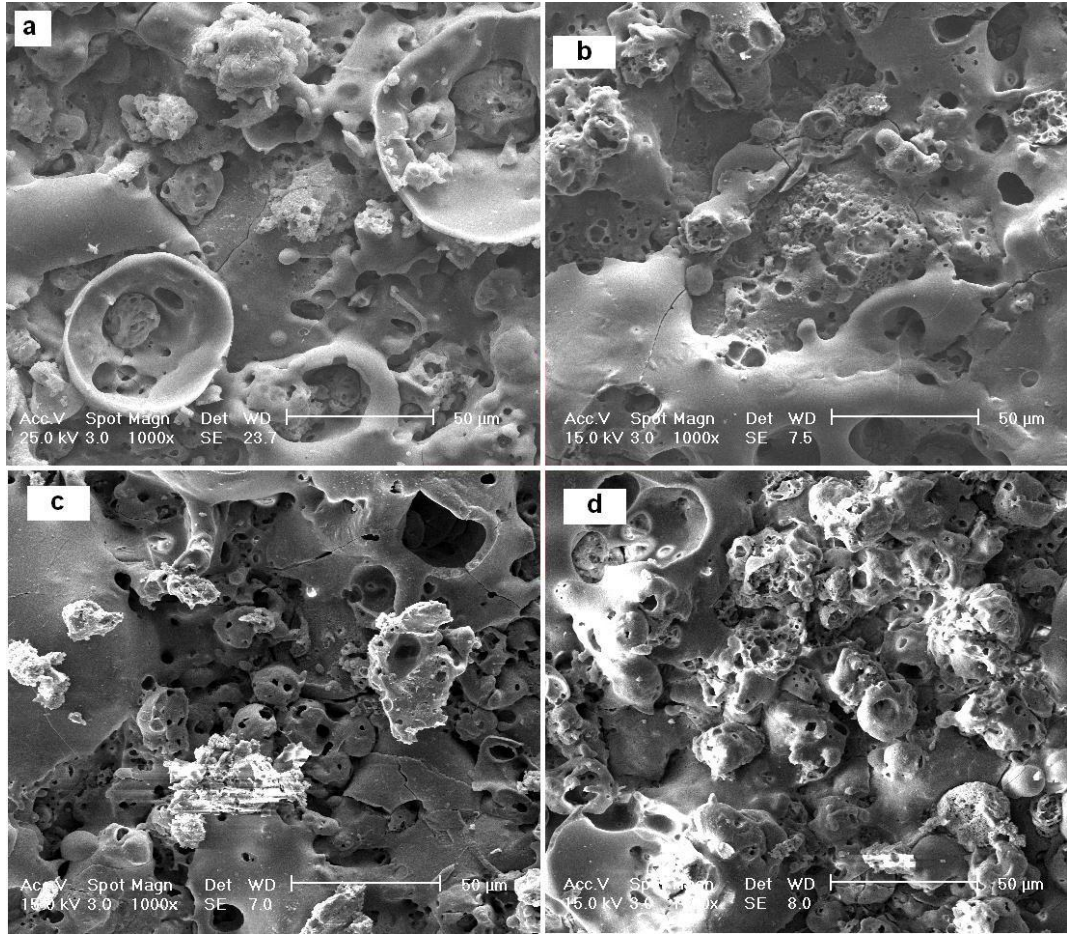
XRD analizinde de alümina ve müllit fazının oluştuğu tespit edilmiş olan numunenin SEM görüntüsünde açık renkli ve daha koyu renkli bölgeler görülmektedir. Şekil3.47.d’de Al2Cu alaşımının 20 dk boyunca MAO işlemi ile kaplanması sonrasında oluşan yapı poroz bir yapıya sahiptir. Kaplamada oluşan oksit film, yapılan XRD analizinde de tespit edildiği üzere yalnızca müllit fazıdır. Oluşan müllit tabakasının yüzey SEM resminde saf alüminyum numunesinden farklı olarak porozite miktarının yer yer daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Şekil 3.47.a’da kaplama yüzeyinin her tarafında benzer yapıdaki boşluk ve yükseltiye rastlanırken Şekil 3.47.d’de ki SEM fotoğrafında kaplamanın bazı bölgelerde müllit fazının yapısından dolayı boşluk konsantrasyonunun arttığı ve kaplama yapısında da düzensizliğin olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 3.48. 20 dk süreyle MAO yapılmış alaşımların yüzey SEM görüntüsü; **e)** Al4Cu, **f)** Al8Cu, **g)** Al16Cu, **h)** Al33Cu.

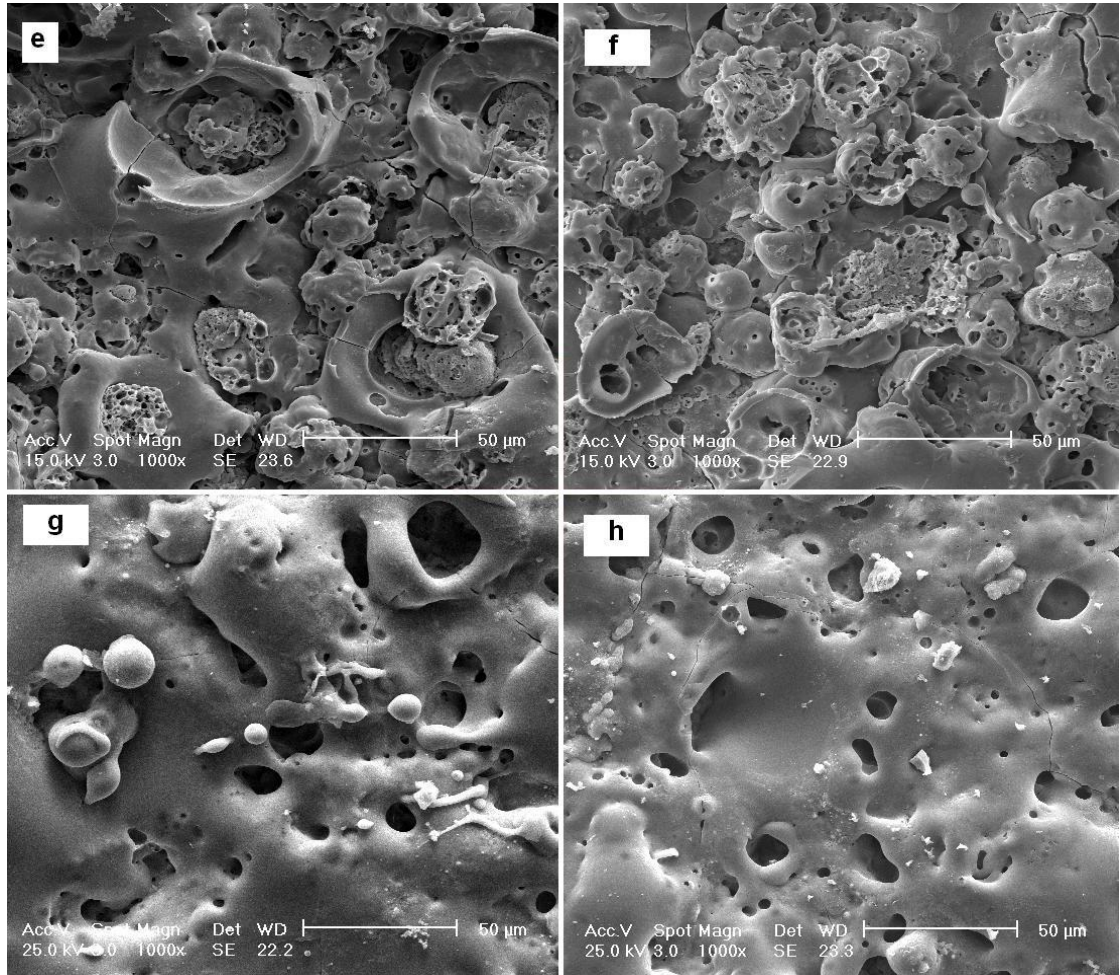
Şekil 3.48.e’de görülen %4 Cu içerikli Al4Cu alaşımının 20 dk MAO işlemi ile kaplanması sonrasında oluşan yapı, yapılan XRD analizinde tespit edildiği gibi sadece müllit fazına ait SEM görüntüsüdür. Bakır miktarının daha fazla olduğu (%16) Şekil 3.48.g’de daha poroz bir kaplamanın oluştuğu tespit edilmiştir. Kaplamada oluşan porozite boyutlarının büyük olmasının yanında boşluk dışında oluşan kaplamada yoğunluğun yüksek olduğu görülmüştür.

%33 Cu içerikli Al33Cu alaşımının 20 dk MAO yapılmış numunesinde Şekil 3.48.h’da da görüldüğü gibi yüzeyinde herhangi bir kaplama tabakasına rastlanılmamıştır. Yapılan XRD analizinde de alüminyum ve intermetalik CuAl_2 fazı tespit edilmiştir.



Şekil 3.49. 120 dk süreyle MAO yapılmış alaşımların yüzey SEM görüntüsü; **a)** saf Al, **b)** Al07Cu, **c)** Al1Cu, **d)** Al2Cu.

Şekil 3.49.a'da 120 dk süreyle MAO işlemine tabi tutulmuş saf alüminyumda oluşan kaplamanın SEM görüntüsü verilmiştir. Kaplama yüzeyinde kraterlerin oluştuğu tespit edilmiştir. Saf alüminyumun 20 dk süreyle MAO yapılmış numunesinde böyle bir durum tespit edilmemiştir. Şekil 3.49'da görüldüğü gibi kaplama süresi uzadıkça oluşan kaplama kalınlıklarının artmasının yanında yüzey pürüzlülüğünün tüm alaşımlarda arttığı tespit edilmiştir. Şekil 3.49.c ve Şekil 3.49.d'de % 1 ve 2 Cu miktarına sahip alaşımlarda yuvarlak yapılı daha farklı kaplamalar görülmektedir. Yapılan XRD analizinde saf alüminyumun ve %0,7 Cu içerikli alaşımın 120 dk MAO işlemi sonunda oluşan kaplamasında şiddetli korondum ve alfa alümina fazına ait xray sinyallerine rastlanırken %1-2 Cu içerikli alaşımların aynı işlem zamanında zayıf şiddetteki bu fazlara ek olarak, yüksek şiddette müllit fazına ait sinyaller de tespit edilmiştir.



Şekil 3.50. 120 dk süreyle MAO yapılmış alaşımların yüzey SEM görüntüsü;

e) Al₄Cu, f) Al₈Cu, g) Al₁₆Cu, h) Al₃₃Cu.

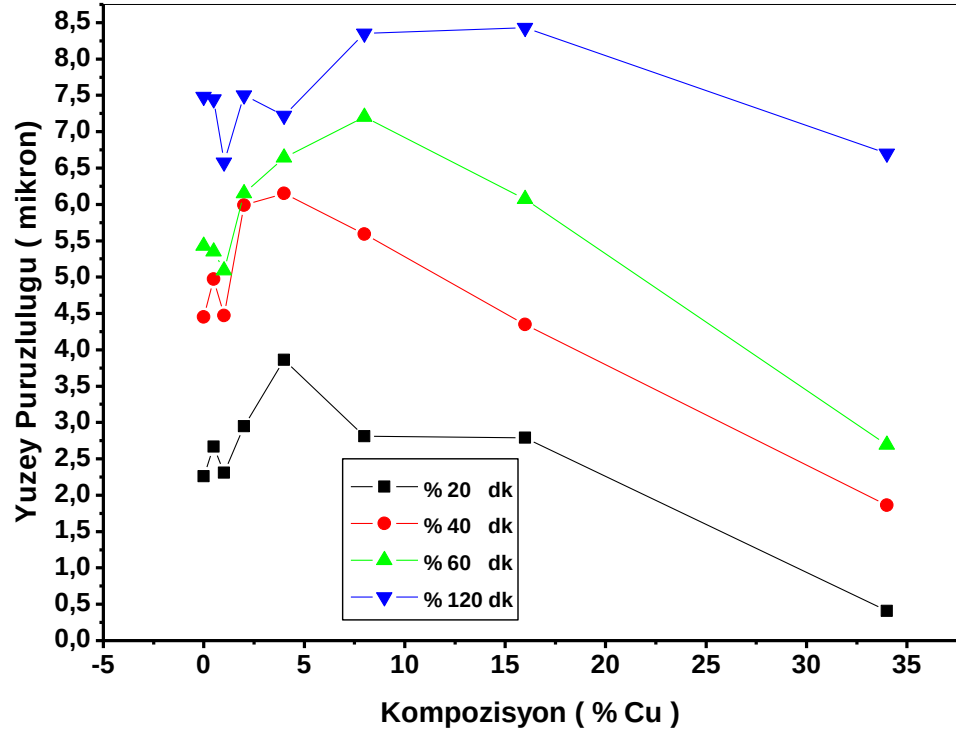
Şekil 3.49 ve Şekil 3.50 'de görülen 120 dk MAO prosesine tabi tutulmuş alaşımların yüzeylerinde oluşan kaplamaların genelinde kısa süreli (20dk) MAO yapılmış numunelere göre yüzey pürüzlülüğünde artış tespit edilmiştir.

Şekil 3.50.g ve Şekil 3.50.h'da ağırlıkça %16 ve %33 bakır miktarına sahip Al16Cu, Al33Cu alaşımlarında oluşan kaplama tabakalarının porozite miktarının yüksek olduğu görülmüştür. Müllit fazından oluşan 120 dk MAO yapılmış Al33Cu alaşımının Şekil 3.50.h'ta gösterildiği gibi oluşan kaplama tabakasının pürüzlülük miktarının azaldığı tespit edilmiştir.

Bakır miktarı yüksek olan alaşımlarda oluşma miktarı ve oranı daha çok olan müllit fazının fazla oluştuğu alaşımlarda (Al8Cu, Al16Cu, Al33Cu), yüzey pürüzlülüğü daha düşük seviyelerde iken, oksitlenmenin daha hızlı ve şiddetli olduğu alüminyum oksit fazlarının yüksek oranda oluştuğu düşük bakır konsantrasyonlu alaşımlarda (Al07Cu, Al1Cu) pürüzlülük artışının daha çok olduğu tespit edilmiştir.

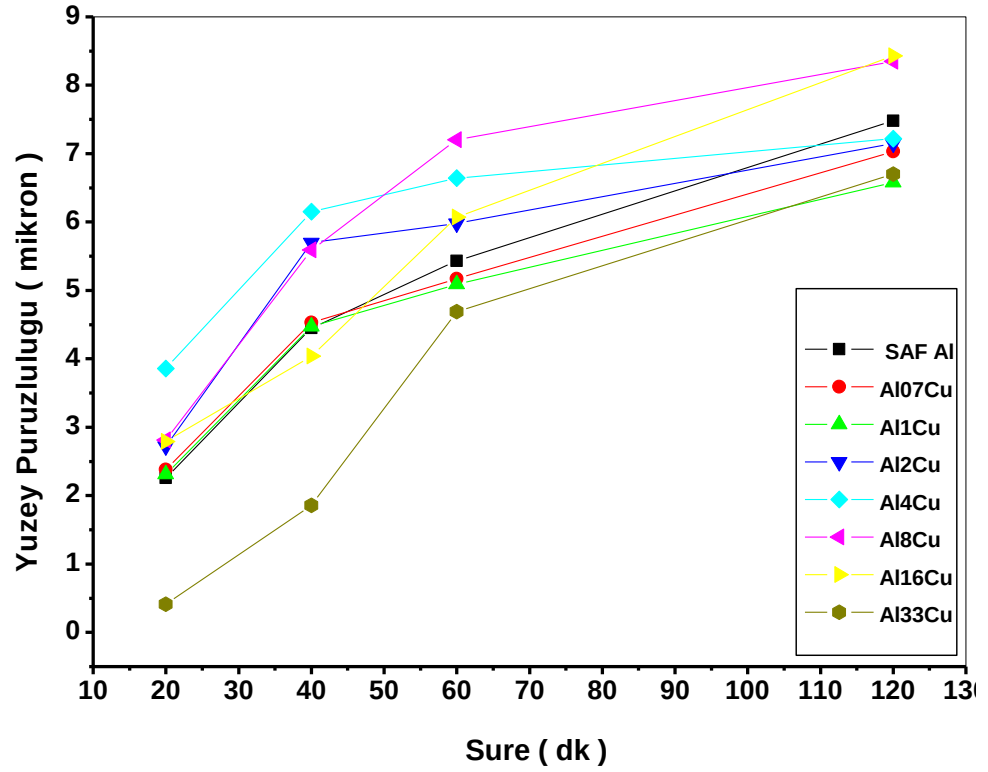
3.11. MAO Yapılmış Al-Cu Alaşımların Yüzey Pürüzlülüğü Analizi

Al-Cu ikili alaşımlarına uygulanan MAO işlemi sonrasında her numunede bakır miktarına ve kaplama süresine göre değişen ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) değerleri Şekil 3.51-52’de gösterilmiştir.



Şekil 3.51. MAO ile kaplanmış Al-Cu alaşımlarında yüzey pürüzlülüğünün bakır miktarına bağlı değişimi.

Şekil 3.51’de yüzey pürüzlülüğünün, bakır miktarına bağlı olarak değişimi görülmektedir. Yüzey pürüzlülük değerinin bakır miktarına göre yaklaşık ağırlıkça %4 ‘e kadar arttığı, daha da artan bakır miktarıyla birlikte azaldığı tespit edilmiştir. Şekil 3.51’de görüldüğü gibi 20 dk MAO yapılmış Al33Cu alaşımının ortalama pürüzlülük değeri $0,5 \pm 0,05 \mu\text{m}$ iken, 120 dk MAO yapılmış aynı alaşımın pürüzlülük değeri $6,5 \pm 0,5 \mu\text{m}$ olmuştur. Yine 120 dk MAO yapılmış Al16Cu alaşımının ortalama pürüzlülük değeri $8 \pm 0,5 \mu\text{m}$ iken, bu değer Al33Cu alaşımında $6,5 \pm 0,5 \mu\text{m}$ olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 3.52. Yüzey pürüzlülüğünün MAO süresine bağlı değişimi.

Şekil 3.52’de yüzey pürüzlülük değerinin MAO işlem süresine bağlı değişimi gösterilmektedir. 20 dk süre MAO yapılmış Al33Cu alaşımının yüzey pürüzlülük değerinin diğer alaşımlara göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu alaşımın 20 dk süreyle MAO işlemi ile kaplanması sonrasında yüzeyinde herhangi bir kaplamaya rastlanılmadığı yapılan SEM ve XRD analizinde tespit edilmiştir.

MAO işlem zamanının artışıyla birlikte bütün alaşımlarda oluşan kaplamaların yüzey pürüzlülüğünde artış görülmektedir. Yalnız %33 ve %16 Cu içeren (Al16Cu, Al33Cu) iki alaşımın 40 dk MAO sonrası kaplama kalınlığındaki artış hızına bağlı olarak elde edilen yüzey pürüzlülüğündeki artışında diğer alaşımlara oranla daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 3.52’de gösterildiği gibi kaplama süresine bağlı olarak oluşan kaplamalardaki yüzey pürüzlülüğü artış miktarının, hiç bakır içermeyen saf alüminyum ile düşük bakır içerikli (%0,7 ve %1 Cu) alaşımlarda daha düşük olduğu görülmüştür.

4. SONUÇLARIN İRDELENMESİ

MAO yapılacak Al-Cu ikili alaşımlarına yapılan kimyasal analiz işleminde, bakır içeriğinin istenilen miktarlara çok yakın olduğu bulunmuştur. Her alaşımın kendi içinde değişik noktalarından alınan analiz sonuçlarında bakır miktarında sapma tespit edilmemiştir. Bu sonuç alaşımın homojen olarak katılaştırıldığını gösterir.

Al-Cu alaşımlarının XRD analizlerinde bakır miktarının artışına bağlı olarak CuAl_2 fazları tespit edilmiştir. Bakır miktarı yüksek olan alaşımlarda (Al_8Cu , Al_{16}Cu , Al_{33}Cu) bu faza ait piklerin şiddetinin arttığı tespit edilmiştir. Pikin şiddetinin artması oluşan bu fazın yapıda daha çok bulunduğunu gösterir (bkz. Şekil 3.1.a-b).

MAO işlemi sırasında ölçülen “anod gerilim” değerinin bakır miktarı yüksek olan Al_{33}Cu alaşımında düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu, MAO işlemi sırasında bakır miktarı az olan alaşımların yüzeylerinin çok hızlı oksitlenerek dielektrik filmin oluşmasına ve bu oluşan filmin kırılması için gerekli olan gerilimin artmasına neden olmaktadır. Al_{33}Cu alaşımında bakır miktarı çok yüksek olduğu için yüzeyin oksitlenme hızı düşmüştür. Dolayısıyla yüksek bakır içeren alaşımlarda oluşan filmi kırmak için gerekli olan gerilim değerinin de düşmesine neden olmuştur (bkz. Şekil 3.2).

20 dk süreyle MAO yapılmış Al_{10}Cu , Al_{11}Cu , Al_{12}Cu , Al_{14}Cu ve Al_{18}Cu alaşımlarının tamamında müllit fazı oluşmuştur. Yalnız Al_{16}Cu ve Al_{33}Cu alaşımlarında oksit film oluşmamıştır. Bakır miktarının yüksek olduğu bu alaşımlarda 20 dk’lık süre oksit filmin oluşması için yeterli olmamıştır. Bunun yanında bakır miktarının düşük olduğu Al_{10}Cu , Al_{11}Cu ve saf alüminyum alaşımlarına yapılan oksidasyon işleminde alüminyum oksit fazı görülmüştür.

40 dk süreyle MAO yapılmış alaşımlarda Al_{33}Cu alaşımı hariç tüm alaşımlarda müllit fazı tespit edilmiştir. 20 dk süreyle MAO yapılmış Al_{16}Cu alaşımında oluşmayan müllit fazının bu kaplama süresinde oluştuğu tespit edilmiştir.

Aynı şekilde 120 dk süreyle MAO yapılmış alaşımların tümünde müllit fazı tespit edilmiştir. Kaplama süresinin uzamasıyla birlikte, oksitlenmeye karşı daha yüksek afiniteye sahip düşük bakır içerikli alaşımların yüzeylerinde oksit tabakaların oluştuğu tespit edilmiştir. 120 dk süreyle MAO yapılmış saf alüminyum, Al_{10}Cu , Al_{11}Cu , Al_{12}Cu , Al_{14}Cu ve Al_{18}Cu alaşımlarında alüminyum oksit tabakası oluşmuştur. 120 dk süreyle kaplanmış numunelerde kaplama kalınlıkları 45-80 μm aralığında

değişmektedir. Bu kaplama kalınlığına sahip alaşım gruplarında kesitten yapılan SEM incelemelerinde daha açık renkte görülen fazın alüminaya ait olduğu düşünülmektedir. Bu fazın kaplamada altlık malzemedan kaplamanın dış kısmına doğru azalarak yayıldığı tespit edilmiştir (bkz. Şekil 3.15.d). Alümina fazının oluşan kaplamada daha geç soğuyan iç kısımlarda yoğun olarak bulunması, fazın oluşması için yeterli sıcaklığa ulaşıldığına ve bu sıcaklıkta yeterince uzun süre kalmasına hamledilebilir.

Yapılan XRD analizinde 20 dk süreyle MAO yapılmış Al8Cu, Al16Cu ve Al33Cu alaşımlarında CuAl_2 fazı tespit edilirken bu alaşımlardan ağırlıkça daha düşük miktarlarda bakır içeren alaşımlarda bu fazın oluşma miktarının az olmasından, ayrıca yüzeyde oluşan daha kalın oksit tabakasından dolayı faz tespit edilememiştir. MAO işleminin 40, 60 ve 120 dk süreyle gerçekleştirildiği numunelerde de Al8Cu alaşımında CuAl_2 fazı hem kaplama kalınlığının artmasından hem de altlık malzemedan oluşan bu fazın oranının düşük olmasından dolayı tespit edilememiştir.

MAO yapılmış tüm numunelerden alınan XRD sonuçlarında alüminyum fazı tespit edilmiştir. Alınan alüminyuma ait piklerin şiddetinin kaplama kalınlığıyla ters orantılı olarak değiştiği tespit edilmiştir. Alüminyuma ait piklerin şiddetinin alaşımlarda farklı yönlenmelerden dolayı bazı alaşımlarda farklı derecelerde artıp azaldığı tespit edilmiştir (bkz. Şekil 3.8).

MAO yapılan alaşımlarda ağırlıkça bakır elementinin artışına bağlı olarak oluşan kaplamalardaki alfa alümina oluşma miktarının azaldığı tespit edilmiştir (bkz. Şekil 3.4-11).

Kaplama işleminde bakır miktarına bağlı olarak oluşan kaplamaların kalınlıklarında değişiklikler tespit edilmiştir. MAO işlemiyle oluşan filmin kırılıp tekrar alt malzemedan oksitlenmeye karşı yüksek meyilli malzeme tekrar oksitlenirken, bu mekanizma oksitlenmeye karşı düşük aktiviteye sahip yüksek bakır alaşımlı numunelerde daha uzun sürede gerçekleşmektedir. Kaplama kalınlığındaki hızlı düşüş buna hamledilebilir (bkz. Şekil 3.13).

MAO yapılmış numunelerin parlatılmış kesit SEM görüntülerinde kaplamanın genelde 2 katmandan oluştuğu tespit edilmiştir. Kaplamanın altlık malzemeye yakın iç kısımlarının porozite miktarının az ve daha yoğun olduğu, kaplamanın dış kısımlarının ise daha poroz bir yapıya sahip olup kaplama yoğunluğunun az olduğu tespit edilmiştir.

Oksidasyon sırasında oluşan dielektrik filmi kırmak için gerekli olan gerilimin artması kaplama kalınlığı ile orantılı olarak artmakta, dolayısıyla kaplamanın en dış kısmının porozite ve pürüzlülük oranının, daha şiddetli elektriksel boşalmalardan dolayı artmasına neden olmaktadır.

Al-Cu altlık malzeme içerisinde yüksek bakır miktarına sahip alaşımlarda sıkça görülen CuAl_2 fazının, MAO işleminde oluşan kaplama tabakasının altlık malzeme ile kaplama tabakası yapışma ara yüzeyini etkilediği tespit edilmiştir (bkz. Şekil 3.20). Bakır miktarı düşük alaşımlarda oluşan kaplama tabakası ile altlık malzeme arasındaki yapışmanın iyi olduğu fakat CuAl_2 fazlarının fazla miktarda bulunduğu alaşımlarda (Al_{16}Cu - Al_{33}Cu) oluşan kaplama tabakası ile matris arasında porozitelerin olduğu tespit edilmiştir. MAO prosesinde bu faz dielektrik filmin oluşmasını geciktirmekte aynı zamanda oluşan filmin uniformluğunu bozmaktadır. Bakır miktarının yüksek olduğu Al_{33}Cu alaşımında yapışma arayüzeyindeki boşluklar buna hamledilebilir.

MAO yöntemiyle elde edilen kaplamaların dış bölgelerinde porozite oranının yüksek olması nedeniyle parlatma sırasında uygulanan kuvvetin de etkisiyle kaplamanın dış bölgelerinde kırılmalar ve çatlamlar oluşmuştur (bkz. Şekil 3. 19).

Yapılan EDS analizlerinde ortak olarak (bkz. Şekil 3.22.a) kaplama bölgesinin en dış kısmından altlık malzemeye doğru ilerledikçe silisyum elementinin azaldığı tespit edilmiştir. Silisyum elementinin kaplamada müllit fazına ait olma ihtimali yüksektir. Bu durum müllit fazının kaplamanın dış bölgelerinde daha çok oluştuğunu kaplamanın altlık malzemeye yakın bölgelerine doğru yerini alüminyum oksit fazına bıraktığını göstermektedir. Analiz sırasında kaplama bölgesinden altlık malzemeye geçiş sırasında oksijen elementinde ani bir düşüş, bunun yanında alüminyum elementinde ise ani bir yükselme tespit edilmiştir. Bu kaplamada bulunan oksit tabakasının bittiğini gösterir.

MAO ile kaplanmış Al-Cu ikili alaşımlarına yapılan “çizgi” ve “alan” modu EDS analizinde kaplamada bakır elementine rastlanılmamıştır. Bakır elementinin yüksek olduğu Al_{16}Cu ve Al_{33}Cu alaşımlarının kaplamalarına yapılan EDS analizlerinde (bkz. Şekil 3.29) oksijen, alüminyum ve silisyum elementleri tespit edilmiştir. Bakır elementinin kaplama bölgesinden altlık malzemeye bölgesine geçildiğinde ani olarak yükseldiği ve aynı trendde devam ettiği tespit edilmiştir. Bu durum bakır elementinin

MAO işlemleri sırasında çözeltiye karışma ihtimalinin yüksek olduğunu göstermektedir.

Kaplama bölgesinden altlık malzemeye doğru devam eden “çizgi” modu EDS analizinde altlık malzemede bakır elementine ait piklerin ani artış ve düşüşleri görülmektedir. Bu düşüş ve artışlar ötektik yapıdaki matris içerisinde yer alan bakır miktarı yüksek (%52-54) CuAl_2 fazından kaynaklanmaktadır (bkz. Şekil 3.26).

Kaplanmış Al-Cu ikili alaşımlarından alınan mikrosertlik değerlerinin düşük bakır içeren alaşımlar (Al_{107}Cu , Al_{11}Cu) için 2400-1600 HV arasında olduğu tespit edilmiştir. Kaplamanın altlık malzemeye yakın bölgelerinden alınan sertlik değerlerinin 2100-2400 HV arasında değişen değerler aldığı tespit edilmiştir. Bu sertlik değerleri alfa alüminanın sertlik değerlerine yakın değerlerdir. SEM fotoğraflarıyla da görülen (bkz. Şekil 3.15.d) daha açık renkteki, aynı zamanda diğer fazlara göre yüksek sertliğinden dolayı yükselti şeklinde görülen fazın alfa alümina fazına ait olduğu düşünülmektedir.

MAO prosesiyle elde edilen kaplamanın genelde poroz yapılı olması ölçülen mikrosertlik değerlerinde de değişimlere neden olmaktadır. Şekil 3.34’te ölçülen sertlik değerleri alfa alümina fazının olduğu bölgeden alınan sertlik değerleridir. Ancak, alfa alümina tabakasının içerisinde bulunan poroziteler ölçülen mikrosertlik değerlerinin düşmesine sebep olmaktadır. Şekil 3.34’te kaplama tabakasının altında bulunan poroz bölge sebebiyle ölçülen mikrosertlik değerlerinin 1982 HV ile 2423 HV olduğu tespit edilmiştir.

MAO yapılmış kaplamalardan alınan mikrosertlik değerlerinin bakır miktarı arttıkça azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 3.32). Ölçülen mikrosertlik değerlerinin bakır miktarı arttıkça azalması, oluşan kaplama tabakasında bakır miktarının artmasıyla porozite oranının artmasına ve alfa alümina fazının yapıda azalmasından kaynaklanmaktadır. Yüksek bakır içerikli Al_{16}Cu ve Al_{33}Cu alaşımlarından alınan mikrosertlik değerlerinin 600 HV ile 1400 HV arasında değiştiği tespit edilmiştir. Yapılan XRD analizinde kaplamada yalnızca müllit fazı tespit edilmiştir. Müllit fazı, ölçülen bu değerlerden daha yüksek sertlik değerine sahiptir. Kaplamadan ölçülen mikrosertlik değerinin daha düşük çıkması yapıda yoğun olarak bulunan porozitelerden kaynaklanmaktadır.

MAO yöntemiyle kaplanmış Al-Cu alaşımlarının yüzey topoğrafisinde de farklılıklar tespit edilmiştir. Bakır miktarının düşük olduğu alaşımlar ile (Al₁₀7Cu, Al₁₁Cu) saf alüminyumun 120 dk süreyle MAO yapılmış numunelerinin yüzey SEM görüntülerinde volkanik kraterlere benzeyen yapılar görülmüştür. Bu yapı mikroark sırasında sıvı halde bulunan yapının ani olarak katılaşması sonrasında oluşmuştur.

Düşük bakır içerikli alaşımlarda kaplamada daha çok bulunan alüminyum oksit fazının ergime sıcaklığının yüksek olması nedeniyle volkanik patlama sonrasında yapının ergime sıcaklığının altına düştüğünü göstermektedir (bkz Şekil 3.49). Bunun yanında yüksek bakır içerikli alaşımların kaplama yüzeylerinden alınan SEM görüntülerinde oluşan kaplama yapısının daha düz olduğu tespit edilmiştir (Şekil 3.50).

Yapılan XRD analizinde de görüldüğü üzere, kaplama tabakasının ağırlıklı olarak müllit fazından oluştuğu Al₈Cu, Al₁₆Cu ve Al₃₃Cu alaşımlarının yüzeyleri müllit fazının ergime sıcaklığının alümina fazına göre düşük olması nedeniyle, MAO işlemi sırasında kaplama tabakası daha düşük bakır içerikli alaşımlara göre daha uzun süre sıvı halde kalarak yüzeyde yayılmıştır.

Yapılan yüzey pürüzlülüğü analizinde alaşımlardaki ağırlıkça bakır miktarı oranının artmasıyla birlikte yüzey pürüzlülük R_a değerinin azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 3.51). Bu durum kaplamanın dış bölgesinde daha çok oluşan müllit fazının ergime sıcaklığının düşük olmasına ve MAO işlemi sırasında daha uzun süre sıvı halde kalarak yüzeye yayılmasına hamledilebilir.

5. GENEL SONUÇLAR

Ağırlıkça %0,7, 1, 2, 4, 8, 16, 33 bakır içeren Al-Cu ikili alaşımları ile saf alüminyum 20, 40, 60, 120 dk süreyle MAO yöntemiyle kaplanmıştır. Kaplanmış numunelerin faz analizi, kaplamaların kalınlıkları, mikroyapısı, yüzey özellikleri, çizilme dirençleri, mikrosertlik değerleri ve kaplamanın kimyasal kompozisyonu incelenmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. MAO yapılmış tüm numunelerin yüzeylerinde kaplama elde edilmiştir. Ancak ağırlıkça %33 bakır içeren ve 20, 40, 60 dk süreyle kaplama işlemine tabi tutulan numunelerde kaplama oluşmamıştır.
2. MAO ile yapılmış numunelerde oluşan fazlar bakır içeriği ve kaplama süresine bağlı olarak değişim göstermiş olup kaplamada oluşan bu fazlar alümina ve/veya müllittir.
3. Aynı süre MAO yapılmış Al-Cu alaşımlarında bakır miktarı arttıkça kaplamada oluşan alfa alümina oluşum miktarı azalmakta veya hiç oluşmamakta, bunun yanında müllit fazı tüm alaşımlarda oluşmaktadır.
4. Aynı Al-Cu alaşımı için MAO işlem süresi uzadıkça alfa alümina oluşumu artmaktadır(%16 ve 33 Cu içeren alaşım hariç).
5. Bakır miktarı arttıkça oluşan kaplama kalınlığı azalmaktadır. Kaplama kalınlığı ağırlıkça bakır konsantrasyonuna ve süreye bağlı olarak 2-80 μm arasında değişmektedir.
6. Al-Cu alaşımlarında bakır miktarı arttıkça oksit kaplamada oluşan porozite miktarı artmaktadır.

7. Kesitten yapılan SEM incelemeleri kaplamaların iki bölgeden oluştuğunu göstermiştir; altlık malzemeye yakın daha az poroziteye sahip iç bölge ve porozitesi yüksek dış bölge.
8. Kesitten yapılan çizgisel ve alan modu SEM-EDS analizlerinde genel olarak silisyum elementi kaplamanın sadece dış bölgelerinde tespit edilirken alüminyum ve oksijen elementleri tüm kaplama tabakasında sabit bir konsantrasyonda olduğu görülmüştür. Bu analizlerinde bakır elementi tespit edilmemiştir.
9. Kaplamaların yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerleri bakır miktarı %4'e kadar olan Al-Cu alaşımları için artmakta, bakır miktarının daha yüksek olduğu alaşımlarda ise azalmaktadır.
10. MAO süresi uzadıkça yüzey pürüzlülük değeri tüm alaşımlarda artmaktadır.
11. Bakır miktarının artışına bağlı olarak ortalama kaplama sertliği düşmektedir. Bakır miktarının ağırlıkça %0,7 ve %1 olduğu alaşımlarda 1900-2100 HV mikrosertlik değeri tespit edilirken, ağırlıkça %16 ve %33 Cu içeren alaşımlarda mikrosertlik değerleri 700-1100 HV olarak ölçülmüştür.
12. MAO yöntemiyle yüzeyi kaplanmış Al-Cu alaşımlarına yapılan çizik testlerinde ağırlıkça bakır oranının düşük olduğu alaşımlarda sürtünme kuvvetine dik yönde tekli kırılmalar ve yapışmanın iyi olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanında bakır miktarının yüksek olduğu alaşımlarda hem kaplama kalınlığının göreceli olarak daha ince olmasından hem de matrisin daha sert olmasından dolayı sürtünme kuvvetlerinde ani düşüşler olmamıştır.

KAYNAKLAR

- 1) F.C Frary, "The Electrolytic Refining of Aluminum" Transaction of American Electrochemical Society, Vol 47, s 275-286, (1925).
- 2) J.D. Edwards, "The Properties of Pure Aluminum" Transaction of American Electrochemical Society, Vol 47, s 287-300, (1925).
- 3) W.D Hannibal , "Ultrapure Aluminum Production, Processing and Properties" Bonn, West Germany: Light Metal Research Institute, Vereinigte Aluminum-Werke AG, Metal, Vol 27, s 203-211, (1973).
- 4) Continuous Purification of Aluminum, Pechinery-Compagnie de Produits Chimiques et Electrometallurgiques, s23, (1965).
- 5) "Ultra High Purity Metals" American Society for Metals, (1962).
- 6) Aluselect, www.aluselect.com
- 7) www.kenyil.sakarya.edu.tr/aluminyum.pdf.
- 8) <http://tr.wikipedia.org/wiki/Al%C3%BCminyum>.
- 9) "Kvande H, Environmental Improvements in Aluminum Production Technology" Light Metal Age, s44-54, (1999).
- 10) Donald R. Askeland, "Science and Engineering of Materials" University of Missouri-Rolla, (1998).
- 11) L.F. Mondolfo, "Aluminum Alloys Structure and Properties" London: Butterworths, (1976).
- 12) "Metal Handbook" Vol 3, American Society for Metal, (1992).
- 13) J.W.Pashley, J.W.Rhodes, A.Sendorek, "Journal of the Institute of Metals" Vol 94, , s41-48, (1966).
- 14) Charlie R. Brooks, University of Tennessee, (1993).
- 15) Eş M., "Malzemelerin aşınma Karakteristiklerinin İncelenmesi" Yüksek Lisans Tezi, (2004).
- 16) V.Branzoi, F.Branzoi, Revue Roumaine De Citime 47 , s1193-1203, (2002).
- 17) C.Vargel, "Corrosion of Aluminum" Elsevier, (2004).
- 18) S.Üneri, "Korozyon ve Önlenmesi" Poyraz Ofset, (1988).
- 19) H.Yalçın, T.Koç, "Elektrokimya" Palme Yayıncılık, (1999).
- 20) Sarıkaya Ö., "Aşınmaya Karşı Yüzey Mühendisliği Yöntemleri" Sakarya, (2007).

- 21) Ürgen M., “Seramik Kaplamalar Ders Notları” İstanbul, (1998).
- 22) <http://www.eloksaltr.com/eloksal-nedir.html#more-92>.
- 23) www.yuzeyislemeler.com/galvanoteknik/eloksal.
- 24) Sluginov, N.P., J. Russ. Phys. Chem. Soc., s 193, (1880).
- 25) Kurze, P., Krysmann, W., Marx, G. , Wiss, Z. , Tech.- Hochsch. Karl-Marx-Stadt 24, 139, (1982).
- 26) Kurze, P., Schreckenbach, J., Schwarz, T., Krysmann, W., Metallobin erflaeche 40 (12) (1986) 539.
- 27) Khokhryakov E.V., Butyagin P.I., Mamaev A.L., Protective Coating-Formation by Microarc Oxidation, Vol 6, s143-145, (2002).
- 28) Snizhko L.O, Yerokhin A.L., Pilkington A., Gurevina N.L., Misnyankin D.O., Leyland A., Matthews A., Anodic Proseses in Plasma Electrolytic Oxidation of Aluminium in Alkaline Solutions, Vol 49, s2085-2095, (2004).
- 29) Yerokhin, A.L., X. Nie, A. Leyland, A. Matthews, and S.J. Dowey, “Plasma Electrolysis for Surface Engineering (Review)”, Surf. Coat. Techn., 122(2-3), 73-93, (1999).
- 30) Konopisov, S., Electrochim. Acta 22 (10) 1077, (1977).
- 31) Monterro, J., Fernandez, M., Albella, J.M., Electrochim. Acta 32.
- 32) Xue, W.B., Deng Z.W., Lai,Y.C., and Chen, R.Y., “Analysis of Phase Distribution for Ceramic Coatings formed by Microarc Oxidation on Aluminum Alloy”, J. Amer. Ceram. Soc., 81(5), 1365-1368, (1998).
- 33) Yerokhin, A.L., X. Nie, A. Leyland, A. Matthews, and S.J. Dowey, “Plasma Electrolysis for Surface Engineering (Review).” Surf. Coat. Techn.,. 122(2-3), 73-93,(1999).
- 34) Nie, X., A. Leyland, H.W. Song, A.L. Yerokhin, S.J. Dowey, and A. Matthews, “Thickness Effects on the Mechanical Properties of Micro-Arc Discharge Coatings on Aluminium Alloys” Surf. & Coat. Techn..119,1055-1060, (1999).

- 35) Xue, W.B., Z.W. Deng, R.Z. Chen, T.H. Zhang, and H. Ma, "Microstructure and Properties of Ceramic Coatings Produced on 2024 Aluminium Alloy by Micro Arc Oxidation" *Surf. & Coat. Techn.*, 36, 2615-2619 (2001).
- 36) Tian, J., Z.Z. Luo, S.K. Qi, and X.J. Sun, "Structure and Antiwear Behavior of Micro-arc Oxidized Coatings on Aluminum Alloy". *Surf. & Coat. Techn.*, 154 (1), 1-7, (2002).
- 37) Nie, X., Meletis, E.I, Jiang, J.C., Leyland, A., Yerokhin, A.L. and Matthews, A., "Abrasive Wear/corrosion Properties and TEM Analysis of Al₂O₃ Coatings Fabricated using Plasma Electrolysis", *Surf. & Coat. Techn.*, 149(2-3), 245-251, (2002).
- 38) Malyshev, V.N., Petrosyants, A.A. and Gubkin, I.M., *MINKh&GP Collection of Works (in Russian)*, 185, (1985).
- 39) Dearnley, P.A., Gummersbach, J., Weiss, H., Ogburn, A.A. and Davies, T.J., "The sliding wear resistance and frictional characteristics of surface modified aluminium alloys under extreme pressure", *Wear*, 225, 127-134, (1999).
- 40) Fyedorov, V.A., Gubkin, I.M., *MINKh&GP Collection of Works* , MINKh&GP, Moscow, 185, 22, (1985), in Russian
- 41) Brushan, B., Gupta B.K., "Handbook of Tribology-Materials", Coating and Surface Treatments, McGraw-Hill, Inc, (1991).
- 42) Rama-Krishna, L., Somaraju, K.R.C. and Sundararajan, G., "The Tribological Performance of Ultra-hard Ceramic Composite Coatings obtained through Microarc Oxidation", *Surf. Coat. Techn.*, 163-164, 484-490, (2003).
- 43) Curran, J.A and Clyne, T.W, "Thermo-physical properties of plasma electrolytic oxide coatings on aluminium", *Surface and Coatings Technology*, 199, Issues 2-3, Plasma Electrolysis, 168-176, (2005).

- 44) Askeland, D.R., The Science and Engineering of Materials, 4th edition, Thermal Properties of Materials, (Chap. 21), (2004).
- 45) Wei, T., Yan, F. and Tian, J. "Characterisation and Wear and Corrosion-resistance of Microarc Oxidation Ceramic Coatings on Aluminum Alloy". J. Alloys and Compounds, 389, 169-176, (2004).
- 46) Yerokhin A.L., Shatrov A., Samsonov V., Shashkov P., Pilkington A. "Oxide ceramic coating on aluminium alloy produced by a pulsed bipolar plasma electrolytic oxidation process" Surf. Coat. Techn. 199, 150-157, (2005).
- 47) Wenbin Xue, Zhiwei Deng, Ruyi Chen, Tonghe Zhang "Growth regularity of ceramic coatings formed by microarc oxidation on Al-Cu-Mg alloy" Thin solid films 372, 114-117, (2000).
- 48) Tongbo Wei, Fengyuan Yan, Jun Tian "Characterization and wear-and corrosion-resistance of microarc oxidation ceramic coating on aluminium alloy" Journal of Alloy and Compounds 389, 169-176, (2005).
- 49) Xue, W., Wang, C., Li, Y., Chen, R and Zhang, T., "Analyses of microarc oxidation Coatings formed on Si-containing cast aluminum alloy in silicate solution", ISIJ International, 42(11), 1273-1277,(2002).
- 50) Han-Hua,W.,Zeng-Sun,J.,Bei-Yu,L.,Feng-Rong,Y., Xian-Yi, L., "Charecterization of Microarc oxidation process on aluminium alloy", Chin.Phys. Lett. 20(10), 1815–1818, (2003).
- 51) Guang-Liang,Y., Xian-Yi, L., , Yi-Zhen,B.,Zeng-Sun, J., "Charecterization of microarc oxidation discharge Process for depositing ceramic coating", Chin.Phys. Lett., 18, (8), 1141-1143, (2001).
- 52) R.C. Barik, J.A.Wharton, R.J.K. Wood, K.R.Stokes, R.L.Jones "Corrosion, erosion-corrosion performance of plasma electrolytic oxidation deposited Al_2O_3 coatings" Surf. Coat. Techn. 199, 159-167, (2005).
- 53) G.Sundararajan, L.Rama Krishna "Mechanisms underlying the formation of thick alumina coatings through the MAO coating technology" Surf. Coat. Techn. 167, 269-277,(2003).

- 54) Y.Ma, X.Nie, D.O.Northwood, H.Hu “Corrosion and erosion properties of silicate and phosphate coatings on magnesium” Thin Solid Films 469, 472-477, (2004).
- 55) T.Fukuda, T.Kakuhari “New Surface Treatment Technology for Light Metals” Journal of the Surface Finishing Society of Japan Cilt 58 N6 357, (2007).

ÖZGEÇMİŞ

1983 yılında K.Maraş'ta doğdu. İlköğretim ve lise öğrenimini Kahramanmaraş'ta tamamladı. 2000 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümüne girdi. 2005-2006 öğretim yılında mezun oldu. 2006 yılında kısa dönem olarak Bandırma 6. Ana Jet Üssü'nde askerlik görevini tamamladı. 2006 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Yüksek Lisans programı'na kayıt oldu.