

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**Al-6082 ALAŞIMININ MİKRO ARK OKSİDASYONUNDA ELEKTROLİT
KATKISI OLARAK KARBON NANOTÜPÜN ETKİLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yakup YÜREKTÜRK

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2013

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**Al-6082 ALAŞIMININ MİKRO ARK OKSİDASYONUNDA ELEKTROLİT
KATKISI OLARAK KARBON NANOTÜPÜN ETKİLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Yakup YÜREKTÜRK
(506111455)**

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Murat BAYDOĞAN

HAZİRAN 2013

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 506111455 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Yakup YÜREKTÜRK**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**Al-6082 ALAŞIMININ MİKRO ARK OKSİDASYONUNDA ELEKTROLİT KATKISI OLARAK KARBON NANOTÜPÜN ETKİLERİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Murat BAYDOĞAN**

İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Eyüp Sabri KAYALI**

İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Sakin ZEYTİN

Sakarya Üniversitesi

Teslim Tarihi : **2 Mayıs 2013**

Savunma Tarihi : **7 Haziran 2013**

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca yaptığım çalışmalarda ve araştırmalarda bütün bilgi ve deneyimini benimle paylaşan, ve bana her konuda destek olan tez danışmanım Doç. Dr. Murat BAYDOĞAN'a, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşarak bana yol gösteren ve desteklerini esirgemeyen hocalarım Prof. Dr. Eyüp Sabri KAYALI'ya ve Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENÖĞLU'na, çalışmalarım sırasında bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan Arş. Gör. Faiz MUHAFFEL'e, teşekkürlerimi sunarım. Laboratuvar çalışmalarımda bana yardımcı olan İTÜ Fizik Bölümü hocalarından Doç. Dr. Sevim İŞÇİ TURUTOĞLU'na, GYTE Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümünden Yrd. Doç. Dr. Erdem ATAR ve Uzm. Ahmet NAZIM'a, ve TÜBİTAK'a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca Y. Müh. Barış ATEŞ'e teşekkür ederim.

Mekanik Metalurji Laboratuvarında çalışmış veya çalışmakta olan tüm arkadaşlarıma, yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmalarım boyunca yardım ve desteklerini benden esirgemedikleri için teşekkür ederim.

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

Haziran 2013

Yakup Yürektürk
Metalurji ve Malzeme Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
SEMBOL LİSTESİ	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
2. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ ÖZELLİKLERİ	3
2.1 Alaşım Elementleri ve Sınıflandırma.....	4
2.1.1 6xxx serisi alaşımları	4
3. KARBON NANOTÜPLER	5
3.1 Karbon Nanotüp Çeşitleri	5
3.1.1 Tek duvarlı karbon nanotüpler	5
3.1.2 Çok duvarlı karbon nanotüpler.....	6
3.2 Karbon Nanotüplerin Özellikleri	7
3.2.1 Mekanik özellikleri	8
3.2.2 Elektriksel özellikleri	8
3.2.3 Termal özellikleri	8
3.3 Karbon Nanotüplerin Kullanım Alanları	9
4. MİKRO ARK OKSİDASYON.....	11
4.1 Giriş.....	11
4.2 Mikro Ark Oksidasyon Prosesinin Uygulama Alanları	11
4.3 Mikro Ark Oksidasyon Prosesinin Avantajları	12
4.4 Mikro Ark Oksidasyon Prosesi	13
5. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ MİKRO ARK OKSİDASYONU	15
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	27
6.1 Kullanılan Malzemeler.....	27
6.2 Mikro Ark Oksidasyon İşlemleri	28
6.3 Yapısal ve Mekaniksel Karakterizasyon Çalışmaları	28
6.3.1 Mikro yüzey ve kesit incelemeleri	28
6.3.2 X-ışınları analizleri.....	29
6.3.3 Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri.....	29
6.3.4 Mikro sertlik ölçümleri	29
6.3.5 Aşınma testleri	29
6.3.6 Zeta potansiyel ölçümleri.....	30
7. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME.....	31
7.1 Yüzey İncelemeleri	31
7.2 Kesit İncelemeleri	37
7.3 XRD Analizleri	42

7.4 Kaplama Kalınlığı Ölçümleri	44
7.5 Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri.....	45
7.6 Mikro Sertlik Ölçümleri	46
7.7 Aşınma Testleri	48
7.8 Zeta Potansiyel Ölçümleri	54
8. GENEL SONUÇLAR	55
KAYNAKLAR.....	57
ÖZGEÇMİŞ.....	61

KISALTMALAR

CNT	: Karbon Nanotüp
CVD	: Kimyasal Buhar Biriktirme
EDS	: Enerji Dispersif Spektrometresi
MAO	: Mikro Ark Oksidasyon
MWCNT	: Çok Duvarlı Karbon Nanotüp
PEO	: Plazma Elektrolitik Oksidasyon
PVD	: Fiziksel Buhar Biriktirme
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SWCNT	: Tek Duvarlı Karbon Nanotüp
XRD	: X-Işınları Difraksiyonu

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 : Saf alüminyumun özellikleri.	3
Çizelge 2.2 : Dövme alaşım grupları.	4
Çizelge 2.3 : Al-6082 alaşımının kimyasal bileşimi.....	4
Çizelge 3.1 : Karbon nanotüp türlerinin karşılaştırılması.....	7
Çizelge 3.2 : Çeşitli karbon nanotüplerin ve diğer malzemelerin mekanik özelliklerinin kıyası.	8
Çizelge 5.1 : MAO kaplanmış farklı alüminyum alaşımlarının mikro sertlik ve relatif aşınma dirençleri.	16
Çizelge 5.2 : MAO’da kullanılan MWCNT katkılı elektrolitlerin kimyasal kompozisyonu.	20
Çizelge 5.3 : MAO’da kullanılan grafit katkılı ve grafit katkısız elektrolitlerin kimyasal kompozisyonu.	22
Çizelge 5.4 : MAO’da kullanılan farklı konsantrasyonlarda grafit katkılı elektrolitin kimyasal kompozisyonu.	23
Çizelge 6.1 : MAO’da kullanılan farklı konsantrasyonlarda MWCNT katkılı elektrolitin kimyasal kompozisyonu.	27
Çizelge 7.1 : 10 dakika MAO işlemi uygulanmış farklı voltajlardaki kaplama kalınlıklarının mikro sertlik için kullanılan değerleri.....	47
Çizelge 7.2 : Kaplamasız saf Al-6082 ve 10 dakika MAO işlemine tabi numunelerin ortalama iz genişliği, ortalama iz derinliği ve aşınma alanlarının değerleri.....	49

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1 : Grafen katmanının tek duvarlı karbon nanotüp formu	5
Şekil 3.2 : Çapraz vektör, $\vec{c} = n\alpha_1 + m\alpha_2$ boyunca karbon nanotüpün oluşumu	6
Şekil 3.3 : (a) Çok duvarlı karbon nanotüp, (b) çok duvarlı karbon nanotüpün SEM görüntüsü.	7
Şekil 4.1 : Mikro ark oksidasyon işleminde kullanılan donanım.	13
Şekil 4.2 : MAO işlem basamakları.....	14
Şekil 5.1 : Mikro ark oksidasyon işleminde oksit tabakasının oluşumu.....	15
Şekil 5.2 : 480 V altında (a) 200 Hz (b) 400 Hz (c) 600 Hz frekans değerlerinde yüzey morfolojisi.	16
Şekil 5.3 : Pozitif ve negatif voltaj çevrimi.	17
Şekil 5.4 : Voltaj değişimine bağlı yüzey morfolojisi görünümü (a) 480 V (b) 440 V (c) 400 V.....	17
Şekil 5.5 : Alüminyumun MAO işlemi için kullanılan elektrolitlerin I=f(U) fonksiyonu.	18
Şekil 5.6 : Farklı akım yoğunlukları için voltajın zamana bağlı değişimi.....	19
Şekil 5.7 : (a) 50, (b) 100, ve (c) 150 mA/cm ² CNT ilaveli ve (d) 150 mA/cm ² CNT ilavesiz, farklı akım yoğunlukları ve farklı büyütme oranlarında yüzey morfolojisi	19
Şekil 5.8 : MWCNT'lerin farklı pH değerlerindeki zeta potansiyeli.	20
Şekil 5.9 : MAO işlemi yapılmış 7075-Al alaşımının (a) A ortamı, (b) B ortamı oksit tabakası yüzey morfolojisi.....	21
Şekil 5.10 : MAO kaplamasız saf 7075-Al alaşımı ile A ve B elektrolit ortamında MAO işlemi uygulanmış 7075-Al alaşımları.....	21
Şekil 5.11 : (a) 10 µm, (b) 30 µm, (c) 70 µm grafit ilaveli elektrolit ve (d) grafit ilavesiz elektrolite ait XRD paterni.....	23
Şekil 5.12 : MAO kaplama kalınlığının grafit konsantrasyonuna bağlı değişimi.	24
Şekil 5.13 : Grafit konsantrasyonunun MAO kaplama pürüzlülüğüne etkisi.....	24
Şekil 5.14 : MAO 'da grafit konsantrasyonunun sürtünme katsayısına etkisi.	25
Şekil 5.15 : Farklı grafit konsantrasyonlarında yapılmış MAO kaplamasının SEM görüntüleri, (a) 2 g/L, (b) 4 g/L, (c) 6 g/L.....	25
Şekil 6.1 : Mikro Ark Oksidasyon Cihazı.	28
Şekil 6.2 : Aşınma izinin genişliğinin ve derinliğinin şematik olarak gösterimi.....	29
Şekil 7.1 : (a) 300 V, (b) 300 V; 2 g/L CNT, (c) 300 V; 4 g/L CNT, 1 dakika MAO işlemine tabi kaplamaların yüzey morfolojilerine ait SEM görüntüleri.....	32
Şekil 7.2 : (a) 300 V, (b) 300 V; 2 g/L CNT, (c) 300 V; 4 g/L CNT, 2 dakika MAO işlemine tabi kaplamaların yüzey morfolojilerine ait SEM görüntüleri.....	33

Şekil 7.3 : (a) 300 V, (b) 300 V; 2 g/L CNT, (c) 300 V; 4 g/L CNT, 5 dakika MAO işlemine tabi kaplamaların yüzey morfolojilerine ait SEM görüntüleri.	34
Şekil 7.4 : (a) 300 V, (b) 300 V; 2 g/L CNT, (c) 300 V; 4 g/L CNT, 10 dakika MAO işlemine tabi kaplamaların yüzey morfolojilerine ait SEM görüntüleri.	34
Şekil 7.5 : (a) 400 V, (b) 400 V; 2 g/L CNT, 1 dakika MAO işlemine tabi kaplamaların yüzey morfolojilerine ait SEM görüntüleri.	35
Şekil 7.6 : (a) 400 V, (b) 400 V; 2 g/L CNT, 2 dakika MAO işlemine tabi kaplamaların yüzey morfolojilerine ait SEM görüntüleri.	35
Şekil 7.7 : (a) 400 V, (b) 400 V; 2 g/L CNT, 5 dakika MAO işlemine tabi kaplamaların yüzey morfolojilerine ait SEM görüntüleri	36
Şekil 7.8 : (a) 400 V, (b) 400 V; 2 g/L CNT, 10 dakika MAO işlemine tabi kaplamaların yüzey morfolojilerine ait SEM görüntüleri	36
Şekil 7.9 : (a) 300 V, (b) 300 V; 2 g/L CNT, (c) 400, (d) 400 V; 2 g/L CNT, farklı voltaj altında, aynı elektrolit ortamında 5 dakika MAO işlemi uygulanmış kaplamalara ait yüzey SEM görüntüleri	37
Şekil 7.10 : (a) 300 V, (b) 300 V; 2 g/L CNT, (c) 300 V; 4 g/L CNT, 1 dakika MAO işlemine tabi kaplamaların kesitlerinin SEM görüntüleri.	38
Şekil 7.11 : (a) 300 V, (b) 300 V; 2 g/L CNT, (c) 300 V; 4 g/L CNT, 2 dakika MAO işlemine tabi kaplamaların kesitlerinin SEM görüntüleri.	38
Şekil 7.12 : (a) 300 V, (b) 300 V; 2 g/L CNT, (c) 300 V; 4 g/L CNT, 5 dakika MAO işlemine tabi kaplamaların kesitlerinin SEM görüntüleri.	39
Şekil 7.13 : (a) 300 V, (b) 300 V; 2 g/L CNT, (c) 300 V; 4 g/L CNT, 10 dakika MAO işlemine tabi kaplamaların kesitlerinin SEM görüntüleri	40
Şekil 7.14 : (a) 400 V, (b) 400 V; 2 g/L CNT, 1 dakika MAO işlemine tabi kaplamaların kesit morfolojilerine ait SEM görüntüleri.....	41
Şekil 7.15 : (a) 400 V, (b) 400 V; 2 g/L CNT, 2 dakika MAO işlemine tabi kaplamaların kesit morfolojilerine ait SEM görüntüleri.	41
Şekil 7.16 : (a) 400 V, (b) 400 V; 2 g/L CNT, 5 dakika MAO işlemine tabi kaplamaların kesit morfolojilerine ait SEM görüntüleri	42
Şekil 7.17 : (a) 400 V, (b) 400 V; 2 g/L CNT, 10 dakika MAO işlemine tabi kaplamaların kesit morfolojilerine ait SEM görüntüleri.	42
Şekil 7.18 : (a) 300 V, (b) 300 V; 2 g/L CNT, (c) 300 V; 4 g/L CNT, (d) 400 V, (e) 400 V; 2 g/L CNT, MAO kaplamalara ait XRD paternleri	43
Şekil 7.19 : CNT ilaveli ve CNT ilavesiz alüminat elektrolitlerde MAO işlemi uygulanan numunelerin kaplama kalınlığı değerleri	44
Şekil 7.20 : CNT ilaveli ve CNT ilavesiz alüminat elektrolitlerde MAO işlemi uygulanan numunelerin yüzey pürüzlülüğü değerleri.	46
Şekil 7.21 : 1) 400 V; 2 g/L CNT, 2) 300 V, 3) 400 V, 4) 300 V; 2 g/L CNT, mikro sertlik-kaplama kalınlığı grafiği.	47
Şekil 7.22 : Kaplamasız saf Al-6082 alaşımının ve CNT ilaveli / ilavesiz MAO işlemi uygulanan numunelerin mikro sertlik değerleri	48
Şekil 7.23 : Kaplamasız saf Al-6082 alaşımı ile farklı şartlarda 10 dakika MAO işlemi uygulanan numunelerin relatif aşınma dirençlerinin karşılaştırılması	49
Şekil 7.24 : 1) Kaplamasız Saf 6082 Al, 2) 300 V, 3) 300 V; 2 g/L CNT, 4) 300 V; 4 g/L CNT, 5) 400 V, 6) 400 V; 2 g/L CNT, sürtünme katsayıları.	50

Şekil 7.25 : 10 dakika MAO işlemine tabi numunelerin aşınma izlerinin (a) 300 V, (c) 300 V; 2 g/L CNT, (e) 300 V; 4 g/L CNT optik mikroskop görüntüleri, (b) 300 V, (d) 300 V; 2 g/L CNT, (f) 300 V; 4 g/L CNT.	51
Şekil 7.26 : 10 dakika MAO işlemine tabi numunelerin aşınma izlerinin (a) 400 V, (c) 400 V; 2 g/L CNT, optik mikroskop görüntüleri, (b) 400 V, (d) 400 V; 2 g/L CNT, SEM görüntüleri.....	52
Şekil 7.27 : Kaplamasız saf Al-6082 alaşımı numunenin aşınma izlerinin (a) optik mikroskop görüntüsü, (b) SEM görüntüsü.	52
Şekil 7.28 : (a) Kaplamasız saf Al-6082, (b) 300 V, (c) 300 V; 2 g/L CNT, (d) 300V; 4 g/L CNT, (b) 400 V, (c) 400 V; 2 g/L CNT, numunelerin bilya aşınma izlerinin optik mikroskop görüntüleri.	53

SEMBOL LİSTESİ

kV	: Kilovolt
kW	: Kilowatt
mA	: Miliamper
mN	: Milinewton
mV	: Milivolt
µm	: Mikrometre
µs	: Mikrosaniye
N	: Newton
V	: Voltaj
V(+)	: Pozitif voltaj
V(-)	: Negatif voltaj

Al-6082 ALAŞIMININ MİKRO ARK OKSİDASYONUNDA ELEKTROLİT KATKISI OLARAK KARBON NANOTÜPÜN ETKİLERİ

ÖZET

Alüminyum, sahip olduğu 2.7 g/cm^3 'lük yoğunluğu ile demir, çelik, titanyum gibi yapısal malzemeler arasında en hafif metallere biridir. Bu hafifliği sayesinde başta otomotiv ve havacılık sektörü olmak üzere birçok sektörde kullanılan alüminyum alaşımlarının özellikle ağırlık tasarrufunun önemli olduğu bilgisayar, telefon gibi günlük kullanım alanları oldukça fazladır. Alüminyum alaşımları sahip oldukları yüksek korozyon direnci, yüksek işlenebilirlik ve yüksek ısı iletkenlik özellikleri ile tercih sırasında öncelikli öneme sahip malzemelerdir. Bu özelliklerinin yanısıra, alüminyum alaşımları geri dönüşebilme, tasarımlarındaki ağırlığın azaltılmasına bağlı olarak yakıt tüketimini azaltarak tasarruf sağlayabilme ve dolayısıyla havaya bırakılan zararlı gazı azaltma özellikleriyle de çevre dostu malzemelerdir.

Alüminyum alaşımları mekanik ve korozyon özellikleri bakımından birçok iyi özellik göstermesine rağmen düşük yüzey sertliği ve düşük aşınma direnci alüminyum alaşımlarının bazı uygulama alanlarında kullanımı açısından problem teşkil etmektedir. Çünkü bu dezavantajlar alüminyum alaşımları ile yapılan parçaların kullanım ömrünü azaltmaktadır. Yapılan araştırmaların gösterdiği üzere bu problemlerin aşılabilmesi ancak çeşitli yüzey işlemleri ile mümkün olabilmektedir.

Günümüzde alüminyum alaşımlarında görülen düşük yüzey sertliği ve aşınma direnci problemlerinin çözümü için mikro ark oksidasyon, anodizasyon, sol-jel, fiziksel buhar biriktirme, kimyasal buhar biriktirme gibi pek çok kaplama teknolojisi mevcuttur. Bu yüzey kaplama teknolojileri içerisinde mikro ark oksidasyon teknolojisi son yıllarda sürekli gelişme göstererek, gerek ekonomik gerekse çevre dostu bir teknoloji olmasıyla önemli bir yere sahiptir. Bu teknoloji sayesinde her türlü alüminyum alaşımı kolay bir şekilde kaplanabilmekte, üstün yüzey özellikleri sağlanabilmektedir. Mikro ark oksidasyon teknolojisi temel olarak geleneksel anodik prosesine benzemekle beraber gerek işlem parametreleri gerekse uygulanan yüksek voltaj/akım ile birlikte sağlanan iyi özellikler bakımından geleneksel anodik oksidasyon metodundan ayrılmaktadır.

Mikro ark oksidasyon işlemi yüzeyde kontrollü oksit tabakası oluşumu sağlayan bir işlemdir. Bu işlem elektrolit içerisine batırılmış anot numuneye negatif voltaj, katoda ise pozitif voltaj uygulanması ile malzeme yüzeyinde ark oluşturma prensibine dayanır. Oluşan bu arklar sayesinde numune yüzeyinde oksit tabakası oluşur. Mikro ark oksidasyon süreci, anoda negatif voltaj uygulaması ile başlar ve uygulanan voltaj kritik bozunum voltajı (dielectric breakdown) değerini aştığında malzeme yüzeyinde ark oluşumu şeklinde olur. Mikro ark oksidasyon metodunda elektrolit olarak çevre dostu alkali esaslı elektrolitler kullanılır. Bu yöntem sayesinde istenilen düzeyde oksit tabakası kalınlığı, sertliği, porozite oranı ve yapışma kuvveti gibi özellikler uygun işlem parametreleri seçilerek nispeten düşük maliyette kaplamalar elde edilebilir. Bu yönüyle mikro ark oksidasyon teknolojisi birçok diğer teknolojiye

kıyasla avantajlı bir görünüm ortaya koymaktadır. Alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri, korozyon ve aşınma dirençleri mikro ark oksidasyon sayesinde yüzeyde oluşturulan seramik filmleri ile geliştirilebilmektedir.

Bu çalışmada 6082 kalite Al alaşımına elektrolit içeriğinde karbon nanotüp ilaveli/ilavesiz olarak mikro ark oksidasyon işlemi uygulanmış ve bu işlem sonunda oluşan oksit tabaka halindeki kaplamanın yüzey özelliklerine, mekanik özelliklerine çeşitli işlem parametrelerinin etkisi incelenmiştir. 6082 kalite alüminyum alaşımının mikro ark oksidasyonunda alüminat esaslı bazik elektrolitlere 400 V-80 V ve 300 V-60 V (pozitif-negatif voltaj) olarak iki farklı voltaj uygulanmıştır. Voltaj kontrollü olarak gerçekleştirilen mikro ark oksidasyon proseslerinde pozitif/negatif voltaj uygulanma süresi ile bu süreler arasındaki bekleme süresi parametreleri sabit tutularak, pozitif/negatif voltaj değerleri, karbon nanotüp miktarı, elektrolit bileşimi ve işlem süresi değiştirilmiştir. Alüminat esaslı elektrolitlere karbon nanotüp ilavesi/ilavesiz yapılarak, 6082 kalite alüminyum alaşımına mikro ark oksidasyon işlemiyle oluşturulmuş oksit tabakası ile kaplı numunelerin mikro yüzey incelemeleri, kesit incelemeleri, kaplama kalınlığı ölçümleri, yüzey pürüzlülüğü ölçümleri, yüzey porozite yüzde hesaplamaları, mikro sertlik ölçümleri, X-ışınları difraksiyonu (XRD) analizleri, , aşınma testleri yapılmıştır.

DeneySEL çalışmaların sonuçları irdelendiğinde; yüksek voltaj ile yapılan mikro ark oksidasyon işleminde karbon nanotüp ilavesinin genel olarak kaplama kalınlığını azalttığı görülürken, düşük voltaj ile aynı sürede yapılan karbon nanotüp ilaveli mikro ark oksidasyonda belirli bir karbon nanotüp miktarına kadar kaplama kalınlığının arttığı, daha sonra azaldığı tespit edilmiştir. Yapılan pürüzlülük incelemelerinde, aynı voltaj altında mikro ark oksidasyon işleminde artan karbon nanotüp ve süreyle birlikte pürüzlülük değerlerinin de arttığı gözlemlenmiştir. Gerek yüksek voltaj, gerekse düşük voltaj ile yapılan mikro ark oksidasyon işlemlerinde artan karbon nanotüp miktarı ile birlikte porozite yüzdesinin azaldığı görülmüştür. Mikro ark oksidasyon uygulanmış karbon nanotüp ilaveli numunelerin aynı voltajda karbon nanotüp ilavesiz numunelere kıyasla sertliğinin arttığı; farklı voltaj aynı karbon nanotüp miktarında ise düşük voltaj ile yapılan mikro ark oksidasyonda sertliğin azaldığı görülmüştür. XRD analizleri sonucunda gerek karbon nanotüp ilaveli, gerekse karbon nanotüp ilavesiz alüminat esaslı elektrolitlerde oluşan kaplamaların aynı şekilde α -Al₂O₃, γ -Al₂O₃ ve Al fazlarını içerdiği saptanmıştır. Elektrolitlere değişik konsantrasyonlarda karbon nanotüp ilave edilmesi yeni bir faz oluşturmamış sadece oluşan fazların pik şiddetlerinde artma ya da azalmaya neden olmuştur. Aşınma testlerinde, yüksek voltaj ile yapılan mikro ark oksidasyon işlemlerinde karbon nanotüp ilavesi bağıl aşınma direncini artırdığı görülürken, düşük voltaj ile yapılan mikro ark oksidasyon işlemlerinde karbon nanotüp ilavesinin bağıl aşınma direncini azalttığı görülmüştür.

Sonuç olarak, alüminat esaslı elektrolitlere hem yüksek voltajda hem de düşük voltajda karbon nanotüp ilavesi yapılması yapıdaki poroziteyi azaltmış, mikro sertliği artırmış böylece daha sert ve kompakt kaplamalar elde edilmiştir.

THE EFFECTS OF CARBON NANOTUBE AS ELECTROLYTE ADDITIVE IN MICRO ARC OXIDATION OF 6082 ALUMINUM ALLOY

SUMMARY

Aluminum, with the density of 2.7 g/cm^3 , is one of the lightest metals among constructional materials such as iron, steel and titanium. With this lightweight, aluminum alloys are used in many places especially in the automotive and the aerospace industry. In addition, they are used in the applications where weight saving is an important factor such as computer and phone applications in daily use. Aluminum alloys, which have high corrosion resistance, high workability and high thermal conductivity, are priority materials instead of other alloys. Furthermore, aluminum alloys are environmentally-friendly and recyclable materials and also reduction in weight of these materials decrease the fuel consumption thereby reducing harmful exhaust gases.

Although aluminum alloys have lots of good features in terms of mechanical and corrosion properties, low surface hardness and low wear resistance are substantial problems for the use of some application areas of these materials. These disadvantages reduce the useful life of parts made of aluminum alloys. However, as it indicated by the researches, it is possible to overcome these problems with various surface treatment methods.

Nowadays, the low surface hardness and wear resistance problems of aluminum alloys can be solved by vast methods including micro arc oxidation, anodization, sol-gel, physical vapor deposition, and chemical vapor deposition. Among these surface technologies, the micro arc oxidation technology showing the continuous growth on research and development is more economical and more environmentally friendly than other technologies. Thanks to the micro arc oxidation technology, all kinds of aluminum alloys can be coated easily and superior surface properties can be achieved with this technology. Basically, micro arc oxidation technology are similar to conventional anodic process, but micro arc oxidation method is not familiar with conventional anodic oxidation method in terms of the process parameters and the applied high voltage / current providing good features.

Micro arc oxidation is a controlled formation of oxide layer on the surface treatment. A typical micro arc oxidation apparatus consists of high power supply unit, cooling water, mixer, electrolyte bath, anode (aluminum alloy), thermometer and cathode (stainless steel container). In principle, a negative voltage is applied to the anode and a positive voltage is applied to the cathode in the electrolyte thereby consisting micro arc on the surface of the material. With these arcs, the oxide layer on the surface of the sample takes place. Micro arc oxidation process starts with application of negative voltage applied to the anode and when the applied voltage exceeds the value of the dielectric breakdown voltage, the formation of arc on the surface of the material is observed. Micro arc oxidation known as plasma electrolytic oxidation is performed by using environmentally friendly alkali-based electrolytes. In this

manner, micro arc oxidation method is more advantageous than others when comparing many other methods. Thanks to the micro-arc oxidation, the desired level characteristics including oxide layer thickness, hardness, porosity ratio and the adhesive force can be obtained by selecting the appropriate process parameters. The cost of coating can be easily reduced relatively contrary to other production methods by this oxidation methods' appropriate process parameters. The mechanical properties such as corrosion and wear resistances of aluminum alloys can be improved by micro arc oxidation process with forming on the surface of ceramic films.

In this study, 6082 aluminum alloy was micro arc oxidized in an alkaline solution with or without carbon nanotube addition into the electrolyte. As a result of this process, formed oxide layer coating was investigated regarding the effect of various process parameters, which effect surface properties, mechanical properties of the coating. 6082 aluminum alloy was micro arc oxidized by two different voltage values, which were chosen 400 V- 80 V (positive voltage-negative voltage) and 300 V- 60 V (positive voltage-negative voltage), in the aluminate-based electrolytes. During the micro arc oxidation processes controlled by the voltage, the time of the application of positive / negative voltages, and the waiting time between these periods were kept constant. Positive / negative voltage values, amount of carbon nanotubes, electrolyte composition, and the processing time were changed. 6082 Al alloy samples, which were formed with the oxide layer by micro arc oxidation process with or without carbon nanotube addition into the aluminate-based electrolytes and micro surface examinations, cross-sectional examinations, coating thickness measurements, surface roughness measurements, percentage of surface porosity calculations, micro hardness measurements, X-ray diffraction (XRD) analysis, and wear tests were applied on these micro arc oxidized samples.

When the results of the experimental studies evaluated; generally, coating thickness decreased with the increasing carbon nanotube amount for high voltage applied micro arc oxidation process. However, for low voltage applied micro arc oxidation process with the same time, coating thickness increased up to a certain amount of carbon nanotube, then coating thickness reduced with increasing carbon nanotube. Under the same voltage for micro arc oxidation process, the roughness values increased with the increasing carbon nanotube amount and the time. The percentage of porosity decreased with increasing the amount of carbon nanotube in the applications of high voltage and low voltage applied micro arc oxidation process. Micro arc oxidized samples with the addition of carbon nanotube into the electrolyte were found to be more hard than micro arc oxidized samples without carbon nanotube addition into the electrolyte with the same voltage. Among the micro arc oxidized samples, which were treated by the same amount of carbon nanotube and different voltage, hardness was observed to be less at low voltage than its value at high voltage. As a result of XRD analysis, α -Al₂O₃, γ -Al₂O₃ and Al phases were found for each of the coated samples by micro arc oxidation in the aluminate-based electrolytes with or without carbon nanotube. The addition of different amounts of the carbon nanotube in the aluminate-based electrolytes varied by concentrations did not make out a new phase but it caused peak intensity of the same phases decrease or increase. As a result of the wear tests, relative wear resistance increased with the addition of carbon nanotube into the electrolyte for high voltage applied micro arc oxidized samples. However, relative wear resistance decreased with the addition of

the carbon nanotube amount into the aluminate based electrolytes for low voltage applied micro arc oxidized samples.

In conclusion, porosity of the structure decreased with the addition of the carbon nanotubes into the aluminate based electrolytes in which the micro arc oxidized samples at low voltage or high voltage presented. Furthermore, micro hardness increased with the addition of the carbon nanotubes into the aluminate based electrolytes for both high voltage applied micro arc oxidation process and high voltage applied micro arc oxidation process. Briefly, with the addition of carbon nanotubes, more rigid and compact coatings were obtained by micro arc oxidation process.

1. GİRİŞ

Hafif metaller, özellikle alüminyum ve magnezyum alaşımları yüksek mukavemet, düşük yoğunluk ve kolay üretim gibi özelliklerinden dolayı elektronik, genel mühendislik ve havacılık endüstrilerinde kullanılmaktadır [1]. Bu hafif metaller içerisinde alüminyum gerek yüksek elektrik ve ısı iletkenliği, gerekse yüksek atmosferik korozyon direnciyle önemli bir yere sahiptir [2].

Alüminyum yüzeyinde bulunan ince ve aynı zamanda yoğun alümina (Al_2O_3) tabakası, alüminyumun birçok ortamda korozif etkilerden korumaya yarar. Bu tabaka, alüminyumun oksijene olan yüksek afinitesinden kaynaklanır ve alüminyum yüzeyinin havayla teması sonucu oluşur. Oluşan bu koruyucu oksit tabakanın yapısı bazı asit, baz ve tuz çözeltileriyle kolayca bozulabilmektedir [3].

Bu bozulmayla beraber alüminyumun mekanik özellikleri ve korozyon özellikleri de bozulduğu için bu bozuklukları gidermek için çeşitli yüzey işlemlerine ihtiyaç duyulmuştur. Bu yüzey işlemlerine örnek olarak mikro ark oksidasyon (MAO), PVD, CVD, sol-jel, plazma sprej vb. verilebilir. Bu yüzey işlemleri içerisinde MAO prosesi ekonomik ve çevre dostu olması ile ön plana çıkmaktadır.

MAO prosesinin temel amacı elektrolit içerisinde batırılan malzemenin yüzeyinde çeşitli elektrokimyasal reaksiyonlar meydana getirerek kalın, sert, aşınma ve korozyon direnci yüksek bir kaplama meydana getirmektir. Ancak zaman zaman bu mikro ark oksidasyon işleminde kullanılan temel silikat ve alüminat esaslı elektrolitler malzemeye istenilen düzeyde mekanik ve korozyon özellikleri kazandırmamaktadır. İstenilen düzeyde mekanik ve korozyon özellikleri elde etmek için elektrolite katkı maddesi ihtiyacı doğmuştur. Bu ihtiyaca binaen son yıllarda yapılan birtakım çalışmalarda elektrolite grafit, karbon nanotüp (CNT) vs. katılarak çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalarda büyük ölçüde başarı sağlanmıştır.

Bu alışmada Al-6082 alaşımı, alüminat esaslı elektrolite (15 g/L NaAlO₂+2 g/L KOH) değişik miktarlarda karbon nanotüp (2 ya da 4 g/L MWCNT) katılarak, değişen voltaj ve sürelerde mikro ark oksidasyon (MAO) işlemi yapılmış oluşan oksitli tabakanın yapısı incelenmiştir.

2. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ ÖZELLİKLERİ

Günümüzde alüminyum alaşımlarının birçok sektörde öncelikli olarak kullanılmasının en önemli nedenleri alüminyumun sahip olduğu yüksek mekanik ve korozyon özellikleridir. Alüminyumun sahip olduğu yüksek mukavemet, düşük yoğunluk (2.7 g/cm^3), yüksek elektrik ve ısı iletkenliği, atmosferik korozyon direnci hafif metaller grubunda önemli bir yere sahip olmasını sağlamakla beraber diğer metallerle çekme dayanımı yüksek alaşım oluşturabilmesi en önemli özelliklerinden birisidir. Tüm bu özelliklerin yanısıra, farklı proseslerle üretim olanakları, şekillendirilebilme kabiliyeti ve geri dönüşüm özellikleri alüminyumun kullanım alanlarını genişletmiştir [2,4,5]. Çizelge 2.1'de saf alüminyumun özellikleri gösterilmektedir.

Çizelge 2.1 : Saf alüminyumun özellikleri [6].

Atom numarası	13
Atom ağırlığı (g/mol)	26.97
Kristal yapısı	Yüzey merkezli kübik (YMK)
Yoğunluğu (g/cm^3)	2.7
Ergime noktası ($^{\circ}\text{C}$)	660
Yeniden kristalleşme sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	150-300
Buharlaştırma noktası ($^{\circ}\text{C}$)	2450
Özgül ısı (cal/g)	0.224
Elastisite modülü (MPa)	72×10^3
Kayma modülü (MPa)	27×10^3
Çekme mukavemeti (MPa)	40-90
Akma mukavemeti (MPa)	10-30
Kopma uzaması	% 30-40

Alüminyum alaşımları dövme ve döküm olmak üzere iki grupta kategorize edilebilir. Dövme alaşımları, 1954 yılında Alüminyum Birliği tarafından kullanılan elementlere bağlı olarak standartlaştırılmıştır. Alüminyum alaşımlarının simgesi ve alaşım elementleri yapılan bu standartlarla gösterilmiştir [7]. Dört rakam olarak gösterilen alüminyum alaşımlarından dövme alüminyum alaşımları ısıtma işlem uygulanabilirliği ile beraber diğer dövme alaşımlarıyla birlikte Çizelge 2.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.2 : Dövme alaşım grupları [5,7].

Alaşım Grubu	Alaşım Elementi	Isıl İşlem Uygulanabilirliği
1xxx	Saf alüminyum	Uygulanmıyor
2xxx	Bakır	Uygulanıyor
3xxx	Manganez	Uygulanmıyor
4xxx	Silisyum	Uygulanıyor/Uygulanmıyor
5xxx	Magnezyum	Uygulanmıyor
6xxx	Silisyum – Magnezyum	Uygulanıyor
7xxx	Çinko	Uygulanıyor
8xxx	Lityum	Uygulanıyor
9xxx	Diğer elementler	-

2.1 Alaşım Elementleri ve Sınıflandırma

Saf alüminyumun özellikleri Mg, Cu, Si, Zn ve Mn ana elementleri ve ilave elementler Ti, Ni, Co, Zr ile daha fazla geliştirilebilmektedir [8,9]. 1954 yılında Alüminyum Birliği tarafından dövme ve döküm olarak sınıflandırılan alüminyum alaşımları genel olarak aynı elementi içermelerine rağmen 3xxx ve 8xxx serilerinde değişik elementler kullanılmaktadır.

2.1.1 6xxx serisi alaşımları

Alaşım elementi olarak Mg-Si kullanılmaktadır. Çizelge 2.3'te 6xxx serisinin önemli alaşımlarından 6082 kalite alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi gösterilmektedir.

Çizelge 2.3 : Al-6082 alaşımının kimyasal bileşimi (% ağırlık) [10].

6082	Zn	Mg	Cu	Cr	Mn	Fe	Si	Ti	Al
Kimyasal Bileşim	0.2	0.6-1.2	0.1	0.25	0.4-1	0.5	≤ 1.3	0.1	Kalan

Yüksek işlenebilirlik özelliğinden dolayı ekstrüzyon işlemi ile üretimi yapılan malzemelerde kullanılır [5]. Atmosfer korozyon dirençlerinin yüksek olması en önemli özelliklerinden birisidir. Mekanik özellikler silisyum takviyesi ile iyileşmektedir. Bunun yanısıra ısıl işleme yaşlandırılarak daha iyi mekanik özelliklere sahip olabilmektedir [4].

3. KARBON NANOTÜPLER

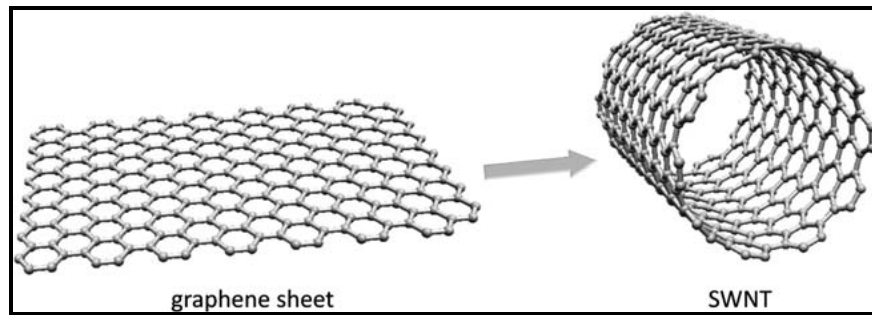
İlk olarak 1952 yılında Radushkevich and Lukyanovich tarafından tespit edilen ve tanımlanan karbon nanotüpler, 1990 yılında Krätschmer ve ekibi tarafından inert gaz ortamında grafit çubuklara alternatif akım (AC) uygulanarak ark yöntemiyle grafit çubuklarının buharlaştırılmasıyla üretilmiştir. Ancak karbon nanotüplerin keşfi, 1991 yılında C_{60} molekülü için yeni bir ark geliştirme aşamasındayken rasgele karbon nanotüpleri keşfeden ve daha sonra bu bulgularının Nature adlı dergide yayımlanmasından ötürü Lijima'ya atfedilmektedir. Tek karbonlu karbon nanotüp tespiti ve büyüme mekanizması Lijima ve Bethune tarafından eş zamanlı olarak 1993 yılında yapılmıştır [11,12].

3.1 Karbon Nanotüp Çeşitleri

Karbon nanotüpler tek duvarlı ve çok duvarlı olmak üzere 2 çeşittir.

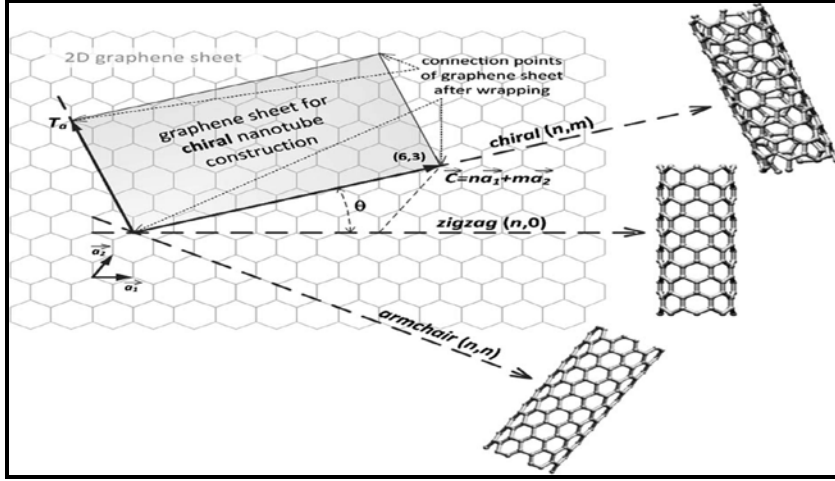
3.1.1 Tek duvarlı karbon nanotüpler

Tek duvarlı karbon nanotüp (SWCNT) grafen katmanının silindirik şekle getirilmesiyle (Şekil 3.1) elde edilir [12].



Şekil 3.1 : Grafen katmanının tek duvarlı karbon nanotüp formu [12].

SWCNT'ler silindirik hale getirilirken çapraz vektörlerinin (Şekil 3.2) arasındaki açıya bağlı olarak sandalye tipi, zigzag tipi gibi çeşitli isimler alırlar. Elektriksel, mekaniksel, optiksel vb. özelliklerini çapraz kuvvetin konumuna göre alan karbon nanotüpler, birkaç nanometre uzunluğunda çap'a ve mikrometre mertebesinde uzunluğa sahiptirler [12].



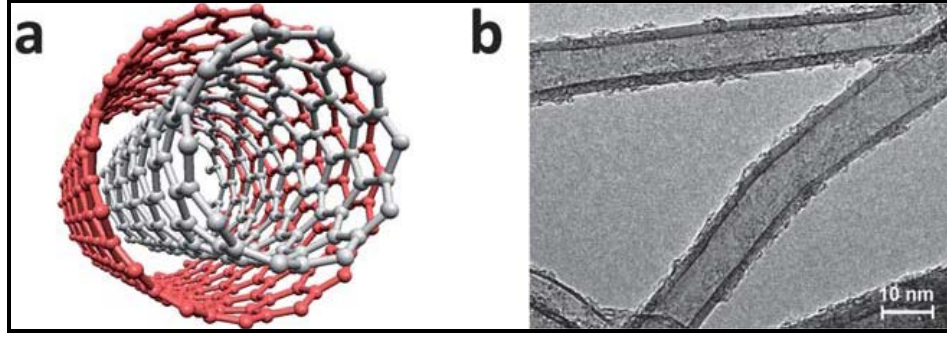
Şekil 3.2 : Çapraz vektör, $\vec{C} = n\alpha_1 + m\alpha_2$ boyunca karbon nanotüpün oluşumu [12].

SWCNT üretimi çeşitli katalizörler (Co, Fe, Ni) kullanılarak hidrojen veya argon gazı atmosferinde ark buharlaştırma metodu kullanılarak yapılır. Aralarında belirli mesafe bulunan iki elektrot kullanılarak gerçekleştirilir [12].

SWCNT üretim metodlarından biri de lazer buharlaştırma yöntemidir. Bu yöntem ark buharlaştırma yöntemine oldukça benzemekle birlikte tek fark hedef maddenin buharlaştırılmasında kullanılan enerji kaynağıdır. Lazer buharlaştırma yöntemi ile ark buharlaştırma yöntemine nazaran daha saf ürünler elde edildiğinden daha avantajlıdır. Bunun yanında saflık ve karbon nanotüp büyümelerinin kontrolü için en uygun yöntem, düşük sıcaklıklarda ($<800^\circ\text{C}$) üretimi mümkün kılan CVD yöntemidir [12].

3.1.2 Çok duvarlı karbon nanotüpler

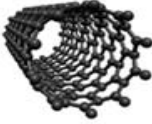
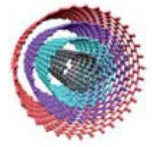
Eş merkezli birçok silindirden oluşan çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNTs) (Şekil 3.3), birkaç nanometre çapında ve mikrometre uzunluğundadır. Katalizör kullanmadan ark buharlaştırma yöntemiyle üretilen çok duvarlı karbon nanotüpler çoğunlukla doğru akım ark buharlaştırma yöntemiyle üretilirler. Bu yöntem, aralarında 6-12 mm mesafe bulunan iki su soğutmalı elektrotla helyum gazı doldurulmuş kapalı bir haznede düşük atmosfer koşullarında gerçekleşir. Son zamanlarda çok duvarlı karbon nanotüp üretimi kimyasal buhar biriktirme (CVD) metoduyla yapılmaktadır [12].



Şekil 3.3 : (a) Çok duvarlı karbon nanotüp, (b) çok duvarlı karbon nanotüpün SEM görüntüsü [12].

Tek duvarlı ve çok duvarlı karbon nanotüplerin boyut, üretim yöntemleri, termal ve mekanik özellikler açısından karşılaştırması Çizelge 3.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 3.1 : Karbon nanotüp türlerinin karşılaştırılması [12].

Karbon Nanotüp	Üretim Yöntemleri	Termal Özellikleri	Mekanik Özellikleri
Tek duvarlı  SWNT	Lazer buharlaştırma , ark buharlaştırma , kimyasal buhar biriktirme (CVD)	~1800°C ye kadar kararlı, Termal iletkenliği: $>3500 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	Young’s modülü: ~1.8 TPa(deneysel+ teorik) Çekme mukavemeti: ~1.0 TPa(deneysel)
Çok duvarlı  MWNT	Lazer buharlaştırma , ark buharlaştırma , kimyasal buhar biriktirme (CVD)	Termal kararlılığı çapa ve uzunluğa bağlı değişir, Termal iletkenliği: $>3000 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	Young’s modülü: 0.27–0.95 TPa(deneysel) Çekme mukavemeti: 11–63 GPa (deneysel)

3.2 Karbon Nanotüplerin Özellikleri

Karbon nanotüplerin özellikleri mekanik, elektriksel ve termal özellikler olarak 3 kısımda incelenmiştir.

3.2.1 Mekanik özellikleri

Karbon atomları arasında sp_2 kovalent bağlarına sahip olmasından dolayı şimdiye kadar keşfedilen en sağlam malzeme olma özelliğine sahip olan karbon nanotüpler, $1.3 - 1.4 \text{ g/cm}^3$ yoğunluğa sahiptir. Ayrıca, $48 \times 10^3 \text{ kN.m/kg}$ spesifik modülleri şu ana kadar ölçülmüş en yüksek değerdir [13]. Çizelge 3.2 farklı tipte karbon nanotüplerin bazı mekanik özelliklerini göstermektedir.

Çizelge 3.2 : Çeşitli karbon nanotüplerin ve diğer malzemelerin mekanik özelliklerinin kıyası [13].

Malzeme	Çekme mukavemeti (GPa)	Young 's modülü (GPa)
Tek duvarlı karbon nanotüp	13-53	1002
Sandalye tipi tek duvarlı	126	940
Zigzag tipi tek duvarlı	94	940
Çapraz tipi tek duvarlı	-	920
Çok duvarlı karbon nanotüp	11-150	270-950
Paslanmaz çelik	0.38-1.55	186-214
Kevlar	3.6-3.8	60-180

3.2.2 Elektriksel özellikleri

Çapraz vektörün konumuna göre iletken veya yarı iletken olabilen karbon nanotüplerin elektriksel akım yoğunluklarının $4 \times 10^9 \text{ A/cm}^2$, ve akım kapasitelerinin $10^4 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ olduğu yapılan çalışmalarla görülmüştür [13].

3.2.3 Termal özellikleri

Yapılan çalışmalarda karbon nanotüpün termal (ısı) iletkenliği 3500 W/m.K olarak bulunmuştur [13]. Bu değer metaller arasında ısı iletkenliği hayli yüksek olan bakır (385 W/m.K) ile kıyaslandığında, karbon nanotüplerin ısı iletkenliğinin bakırdan yaklaşık olarak dokuz kat daha yüksek olduğunu göstermektedir.

3.3 Karbon Nanotüplerin Kullanım Alanları

Karbon nanotüpler optimum mekaniksel ve yapısal özellikleri ile nanoteknolojik uygulamalarda, elektriksel ve optiksel uygulamalarda, biyomedikal ve spor aletleri

olarak birçok alanda kullanılmaktadır. Buna ek olarak CNT'ler sahip oldukları yüksek elektromanyetik alan özelliği ile kimyasal nanotellerde, mıknatıslarda ve iletken filmlerde uygulama alanına sahiptir [13].

Son zamanlarda yapılan çalışmalarda karbon nanotüpler mikro ark oksidasyon prosesinde elektrolit katkı malzemesi olarak da kullanılmıştır. Bununla ilgili ayrıntılı bilgi 'alüminyum alaşımlarının mikro ark oksidasyonu' adlı kısımda anlatılmaktadır.

4. MİKRO ARK OKSİDASYON

4.1 Giriş

Mikro ark oksidasyon (MAO), plazma elektrolitik oksidasyon (PEO) olarak da bilinen alışılmışın dışında bir yüzey modifikasyon tekniği olarak Al, Ti, Mg, Nb ve alaşımları gibi hafif metaller üzerinde sert ve kalın seramik kaplamalar elde edilmesini sağlayan elektrokimyasal bir işlemdir [14].

Esasen metal ve alaşımlarının sulu elektrolit içerisinde işlem gördüğü anodik oksidasyon işlemine dayanan MAO; alüminyum, titanyum ve magnezyum alaşımları üzerinde oksit bir kaplama oluşturmak amacıyla, yüksek voltaj ve uygun elektrolitler kullanılarak gerçekleştirilir [15,16].

İki kısımdan oluşan MAO işleminin ilk kısmı elektroliz olayıdır. Bu olay kaplanacak altlık malzemesi ile karşı elektrot arasında farklı potansiyellerin sıvı elektrolit içerisinde uygulanması sonucu oluşur. İkinci kısımda ise elektriksel deşarjlar altlık malzeme yüzeyine yakın yerlerde meydana gelir [17].

Doğru akım (DC), titreşimli doğru akım, alternatif akım (AC) ve heteropolar akım çeşitlerinde güç kaynakları MAO işleminde kullanılabilirler [18]. Mikro ark oksidasyon işlemi, elektrolit sıcaklığı, elektrolit bileşimi, kaplama süresi ve elektriksel parametrelere bağlı olarak sertliği, aşınma direnci, kaplama kalınlığı ve korozyon direnci gibi özellikleri değiştirebilmektedir [14].

4.2 Mikro Ark Oksidasyon Prosesinin Uygulama Alanları

Uçak-Uzay, otomotiv ve askeri olarak birçok alanda kendine uygulama alanı bulabilen MAO prosesi, çok iyi dielektriklik göstermesi sebebiyle yüksek ısıya dayanıklı kaplamalar meydana getirir. Bu özelliği sebebiyle özellikle uzay endüstrisinde füzelerin ve uzay mekiklerinin koruyucu kaplamalarının üretiminde önem kazanır. MAO teknolojisi ayrıca, orta derecedeki sıcaklıklara, güçlü asit ve bazlara karşı dirençli olmasından dolayı kimyasal uygulamalarda; sahip olduğu

yüksek oksit sertliği ($> 1300 \text{ kg/mm}^2$) tabakasından dolayı aşınma direncini artıran bir faktör olarak mekanik uygulamalarda; termal ve elektrik-elektronik uygulamalarında kullanılabilen bir yüzey modifikasyon prosesidir [19,20].

Mikro ark oksidasyon teknolojisinin farklı endüstri alanlarında kullanım yerleri şunlardır [13]; Uzay Endüstrisi: Uzay mekiği, yapı elemanları, yataklar ve tekerlek, iniş dişlisi bileşenleri

Otomotiv Endüstrisi: Piston, silindir blokları, süspansiyon elemanları, yakıt pompası, motor bloğu kapağı, şaft, mil, şanzıman kutusu, egzoz memesi, tekerlek

Tekstil Endüstrisi: İplik rotorları, makara, halkalar, kancalı dokuma tezgahı, sürgüler, bükme makinası

Denizcilik: Pervane, zincir ve gemi bölgesi bağlamalarında

Tıp: Kemik protezleri, tıbbi karışımlar

Mutfak araç-gereçleri: Tavalar, bıçak bileyiciler, kulplu tencereler.

4.3 Mikro Ark Oksidasyon Prosesinin Avantajları

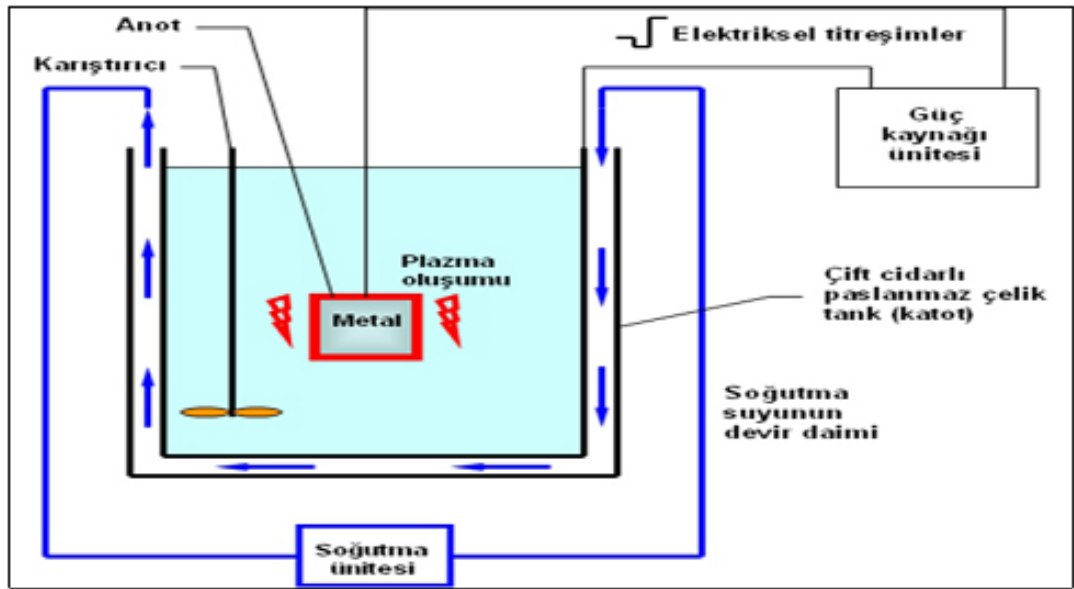
MAO teknolojisinin yaklaşık 50-60 yıllık bir geçmişinin olduğu ve günümüzde birçok alanda uygulama alanı bulduğu göz önünde bulundurulduğunda avantajlı bir yöntem olduğu söylenebilir.

Diğer yüzey işleme teknolojileriyle kıyaslandığında, MAO teknolojisinde işlem öncesi numune hazırlama işleminin daha az önem arz ettiği rahat bir şekilde görülebilir. Bu özellik sayesinde hızlı üretim süreci olur. Buna ek olarak hafif metallerin geleneksel metotlarla kaplanmasına alternatif olan MAO işlemi, zehirli atıklar içermeyen yani çevreye karşı oldukça duyarlı olması sebebiyle çok avantajlı bir yöntemdir. Aşınma ve korozyon direnci yüksek kaplamalar elde edilebilmesini sağlayan mikro ark oksidasyon teknolojisi, çelik esaslı parçalara alternatif olarak hafif Al, Mg, Ti vb. alaşımlarının otomotiv endüstrisinde kullanılmasına imkan tanımaktadır. Alüminyum, titanyum, magnezyum, zirkonyum, niyobyum gibi geniş bir malzeme grubuna uygulanabilen MAO işlemi, kaplanması geleneksel anotlama ile bir hayli zor olan yüksek silisyum içeren döküm malzemelerinin, yüksek bakır içeren alüminyum alaşımlarının 300 μm kalınlığa kadar ulaşabilmesini sağlayarak önemli avantajlar sağlamaktadır [19,21,22].

MAO teknolojisi anodik oksidasyon ile mukayese edildiğinde, daha yüksek voltajlara çıkılabilmesi dolayısıyla yüksek kaplama oluşum hızı ve kalınlığı ile daha üstündür. MAO teknolojisi altlık malzemesiyle birlikte gelişen yüksek adezyon kuvvetiyle, plazma spreyleme tekniğinden daha üstündür. Kullanılan elektrolitler açısından sert krom kaplama metoduyla kıyaslandığında, mikro ark oksidasyon prosesinde kullanılan alkali elektrolitlerin çevre dostu olduğu görülür. Özetle, MAO işlemi yüksek tribolojik özelliklerin elde edilebilmesini sağlayan, gelişmiş yüzey işleme tekniğiyle geleneksel birçok kaplamanın yerini alarak, günümüzde henüz gelişmekte olan ve gelişime açık avantajlı bir teknolojidir [23-25].

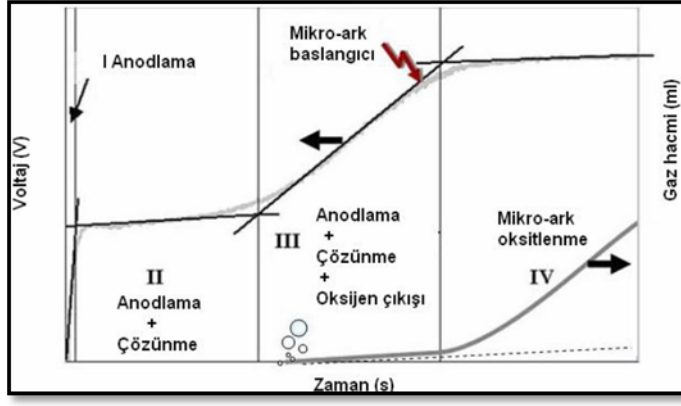
4.4 Mikro Ark Oksidasyon Prosesi

Mikro ark oksidasyon prosesi temel olarak bir elektrik güç kaynağı, bir elektrolit havuzu, anot, katot ve soğutma sisteminden oluşur. MAO işlemi elektrolit içerisine batırılmış anot numuneye negatif voltaj, katota ise pozitif voltaj uygulayarak oluşturulan potansiyel farkla anotta ark meydana getiren ve numune yüzeyinde oksit tabakası oluşturan bir işlemdir. Şekil 4.1’de MAO prosesi düzenine şematize edilmiştir [21,26].



Şekil 4.1 : Mikro ark oksidasyon işleminde kullanılan donanım [21].

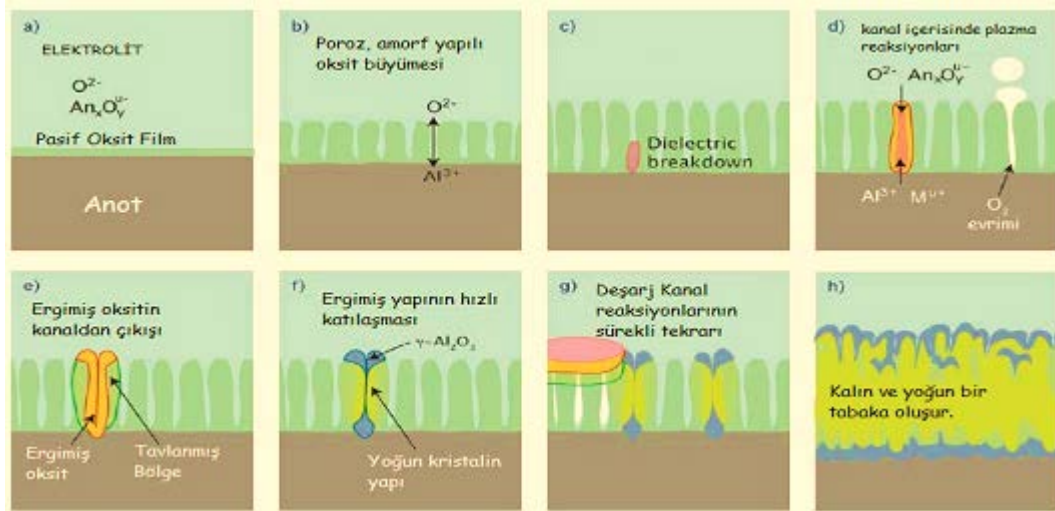
MAO prosesinin fiziksel ve kimyasal temellerini araştıran Snizhko ve arkadaşları [27], mikro ark oksidasyon işleminin değişik dört basamaktan meydana geldiğine kanaat getirmişlerdir. Bu basamaklar Şekil 4.2’de gösterilmektedir.



Şekil 4.2 : MAO işlem basamakları [21].

5. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ MİKRO ARK OKSİDASYONU

MAO kaplama oluşum mekanizması temel olarak anodik oksidasyon, termal oksidasyon ve plazma-kimyasal reaksiyonlarından meydana gelmektedir. Mikro ark oksidasyon işlemi dielektrik bozunum voltajının üzerinde yani yüksek voltajda meydana gelir [21,28]. Dielektrik bozunum voltajının üzerinde mikro arklar oluşur. Oluşan bu mikro arklar deşarj kanalları oluşturur ve bu deşarj kanalları o bölgede yüksek sıcaklık (10^4 K mertebesine kadar çıkabilir) ve basınç artışı meydana getirir. Deşarj kanallarının oluştuğu bölgede güçlü elektrik alandan dolayı elektrolitten gelen iyonlar kanala girer. Sıcaklıktaki ve basınçtaki ani artıştan dolayı altlık malzemedan gelen alüminyumlar oksitlenir ve sinterlenerek yüzeyi kaplar, ayrıca elektrolitten gelen iyonlar da bu oksit yapısının içerisine girerek oksit yapısını modifiye eder. Ardından kendisinden daha soğuk elektrolit ile temas eden oksitler (Al_2O_3) katılarak süreç devam eder ve kaplama kalınlığı artar [29]. Kaplama mekanizması Şekil 5.1’de gösterilmektedir.



Şekil 5.1 : Mikro ark oksidasyon işleminde oksit tabakasının oluşumu [29].

Yapılan literatür araştırmaları alüminyum ve alaşımlarına mikro ark oksidasyon yöntemi ile istenilen özellikte kaplamalar yapılabildiğini göstermiştir. MAO prosesini etkileyen altlık malzemesi, elektrolit sıcaklığı, süre, frekans, duty cycle (vuruş oranı), uygulanan akım ve voltaj, elektrolit içeriği gibi parametreler kaplamanın morfolojisi, kalınlığı, porozitesi, mekanik ve korozyon özelliklerini

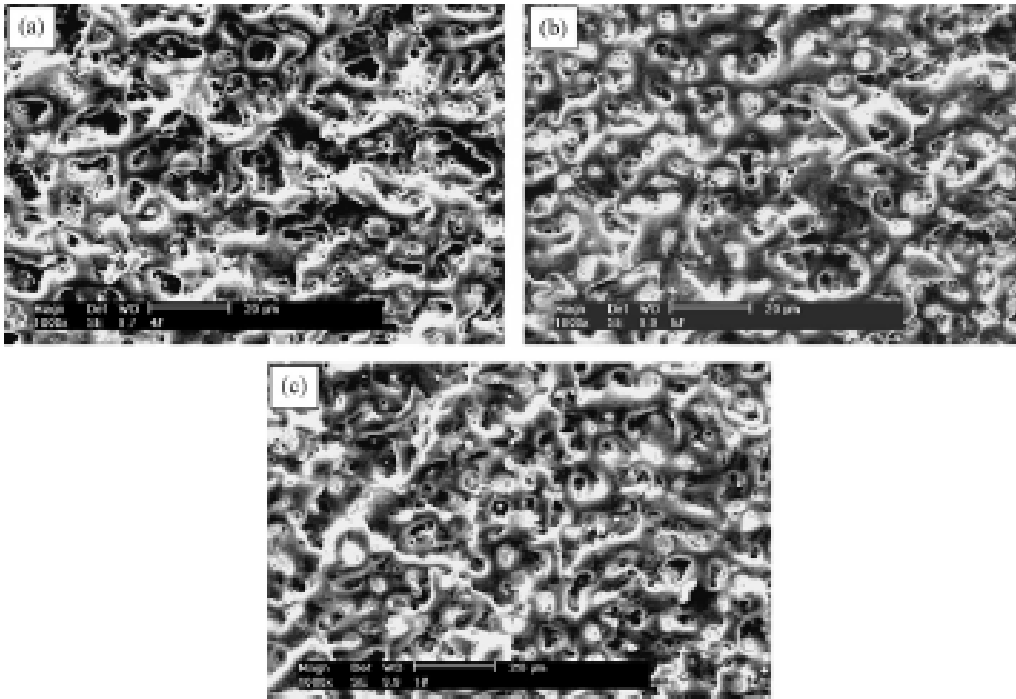
etkilemektedir. Bu parametrelerin iyi seçilmesi bağı olarak yüksek kalitede kaplamalar yapmak mümkün olabilmektedir.

Alüminyumun mikro ark oksidasyonunu etkileyen en önemli parametrelerden biri kullanılan altlık malzemesidir. Farklı alüminyum alaşımları kullanılarak yapılan mikro ark oksidasyon ilgili mikrosertlik ve relatif aşınma dirençleri Çizelge 5.1'te gösterilmektedir.

Çizelge 5.1 : MAO kaplanmış farklı alüminyum alaşımlarının mikrosertlik ve relatif aşınma dirençleri [30].

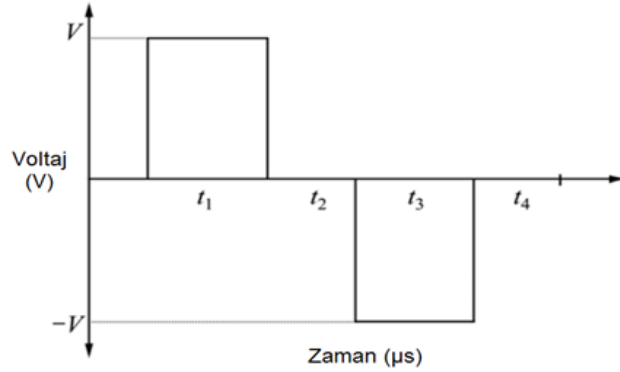
Alaşım Grubu	Seriler	Mikrosertlik (HV)	Relatif Aşınma Direnci
Al-Cu-Mg	2024, 2014	1400-2000	1.0
Al-Mg-Si	6061, 6463	1300-1800	1.23
Al-Mg Al-Mg-Zn	5056 3003	1200-1500	1.37
Al-Zn-Mg	7075, 7175	1200-1600	1.45
Al-Si-Cu	A.319.0 A.305.0	800-1200	1.93

MAO prosesini etkileyen parametrelerden biri olan frekans ile ilgili yapılan çalışmalarda frekansın kaplama morfolojisini önemli ölçüde etkilediği görülmüş. Şekil 5.1'de görüldüğü üzere 600 Hz işlem frekansında oluşan porozite miktarı, 200 Hz'ye göre çok daha azdır.



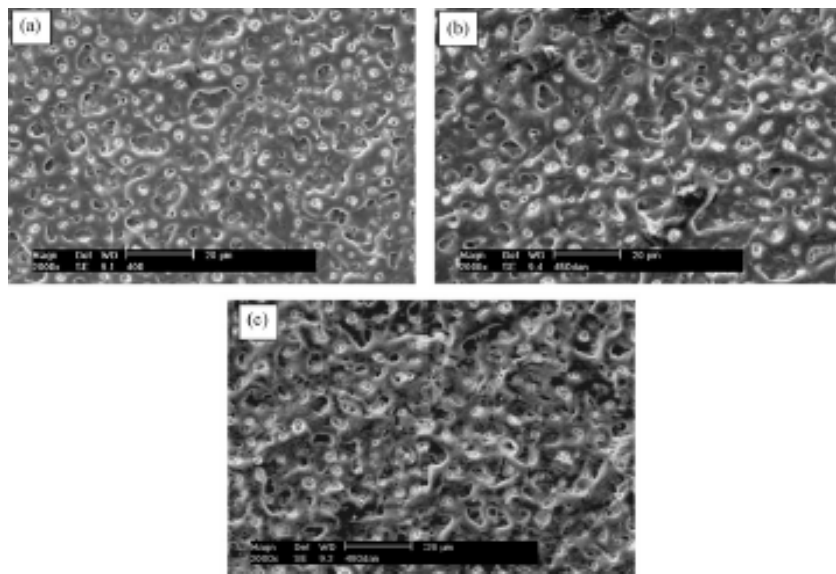
Şekil 5.2 : 480 V altında (a) 200 Hz (b) 400 Hz (c) 600 Hz frekans değerlerinde yüzey Morfolojisi [31].

Mikro ark oksidasyon işleminin bir diğer parametresi olan duty cycle (vuruş oranı), pozitif ve negatif vuruş oranı olarak ele alınmakta ve elektrolit sıcaklığını önemli miktarda etkilemektedir. Yüksek pozitif vuruş oranı değeri elektrolit sıcaklığının ve porozitenin artmasına neden olarak işlem süresini uzatır. Dolayısıyla düşük vuruş oranı daha yoğun bir kaplama sağlar [31]. Kare dalga akım prensibine göre çalışan oksidasyon sistemlerinin (Şekil 5.3) vuruş oranı ve frekans değerinin hesaplanmasında kullanılan çevrim aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 5.3 : Pozitif ve negatif voltaj çevrimi.

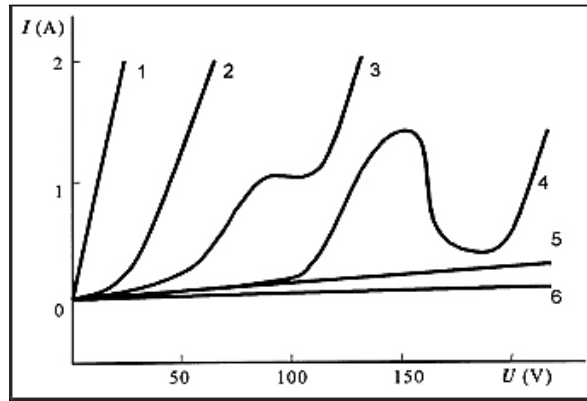
MAO işleminde anodik akım yoğunluğu olarak ifade edilen voltaj-akım değerlerine bağlı olarak ifade edilir ve bu anodik akım yoğunluğuna göre kaplamanın yapısı ve morfolojisi değişmektedir. Anodik akım yoğunluğu uygulanan voltaja bağlı olarak artmaktadır. Bununla ilgili olarak yapılan çalışmalarda voltaj düştükçe porozitenin ve aynı zamanda pürüzlülüğün de düştüğü görülmüştür [31]. Şekil 5.4'te voltaja bağlı olarak yüzey morfolojisinin değişimi gösterilmektedir.



Şekil 5.4 : Voltaj değişimine bağlı yüzey morfolojisi görünümü
(a) 480 V (b) 440 V (c) 400 V [31].

Mikro ark oksidasyon işleminin en önemli parametrelerinden bir diğeri de elektrolit seçimidir. Pratikte MAO işleminin gerçekleşmesi ancak metal-elektrolit ikili seçiminin doğru yapılmasına bağlıdır. Metal pasifleşmesi için kullanılan polarizasyon test verileri bu doğrulamamın yapılması için kullanılabilir.

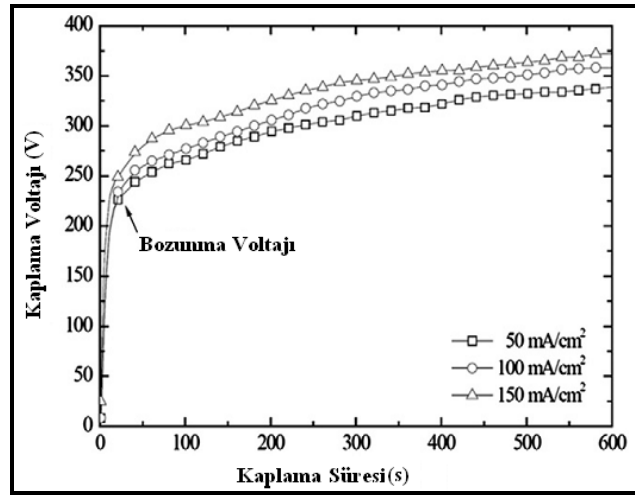
Metal-elektrolit uyumunun etkileri alüminyum alaşımlarının mikro ark oksidasyonu için kullanılan elektrolitler ile karşılaştırılmış olup, kaplama oluşum mekanizması etkilerine göre kısımlara ayrılmıştır. Alüminyum alaşımları üzerinde oksit kaplaması oluşturmak amacıyla kullanılan elektrolitler altı kısım halinde Şekil 5.5'te gösterilmektedir.



Şekil 5.5 : Alüminyumun MAO işlemi için kullanılan elektrolitlerin $I=f(U)$ fonksiyonu [18].

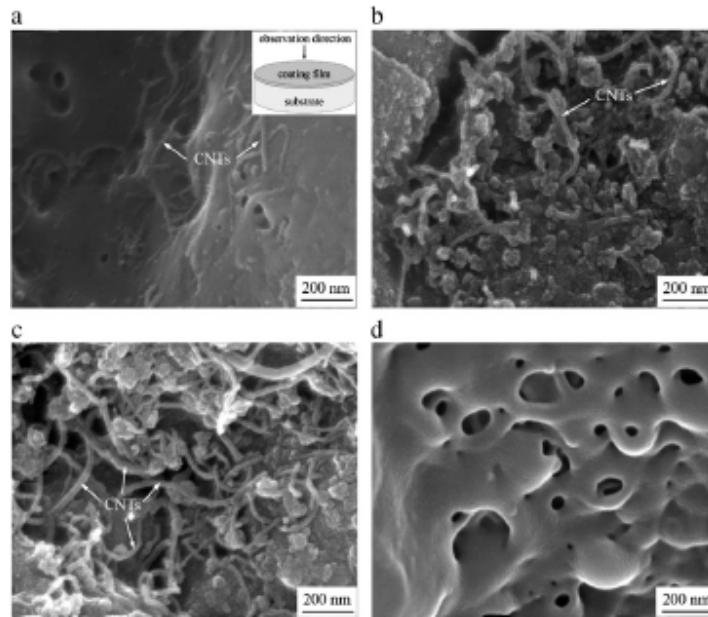
Bunlar sırasıyla; alüminyumun hızlı çözünmesini sağlayan tuz çözeltiler (NaCl , NaClO_3 , NaOH , HCl , NaNO_3), alüminyumun yavaş çözünmesini sağlayan elektrolitler (H_2SO_4 , $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$), alüminyuma yakın voltaj aralığında pasivasyon sağlayan elektrolitler (CH_3COONa ya da H_3PO_4), alüminyumu kompleks davranışlarıyla karakterize eden florür elektrolitler (KF , NaF), metalin yavaş pasivasyonunu sağlayan elektrolitler, metalin kuvvetli pasivasyonunu sağlayan elektrolitler (borik asit, alkali metallerin fosfatları, inorganik polimerler) olarak altı kısımda toplanmıştır. Şekil 5.5'te de görüldüğü üzere 4, 5 ve 6 grubu elektrolitler için kıvılcım oluşum voltajına (dielectric breakdown voltage) erişmek diğer elektrolitlere kıyasla daha kolaydır. Dolayısıyla bu üç elektrolit grubu için MAO metoduyla kaplama yapmak daha avantajlı olacaktır. Bu elektrolitler içerisinde alüminyumun yavaş çözünmesini sağlayan elektrolitler ile alüminyuma yakın voltaj aralığında pasivasyon sağlayan elektrolitlerin, kaplama kompozisyonunun ve özelliklerinin geniş bir aralıkta değiştirilmesine olanak verdiğinden diğer elektrolitlere nazaran daha umut verici olduğu söylenebilir [18,21].

Son zamanlarda alüminyumun mikro ark oksidasyonu ile ilgili yapılan çalışmalarda karbon nanotüp ve grafit gibi malzemeler elektrolit katkı maddesi olarak kullanılmış ve bu malzemelerin kaplamaya etkileri araştırılmıştır. Bu çalışmalardan biri silikat esaslı elektrolite karbon nanotüp katılarak 7075-Al alaşımına yapılan mikro ark oksidasyondur. Farklı akım yoğunluklarında ($50\text{-}100\text{-}150\text{ mA/cm}^2$) karbon nanotüp takviyeli elektrolit ile yapılan mikro ark oksidasyonda artan akım yoğunluğuyla birlikte bu akıma karşılık gelen bozunma voltajının arttığı görülmektedir. Şekil 5.6'da kaplama voltajı ve kaplama süresi grafiği gösterilmektedir.



Şekil 5.6 : Farklı akım yoğunlukları için voltajın zamana bağlı değişimi [32].

Buna ek olarak artan akım yoğunluğuyla beraber kaplamadaki karbon nanotüp miktarı artmış ve artan karbon nanotüple beraber mikroporlar azalmıştır (Şekil 5.7).



Şekil 5.7 : (a) 50, (b) 100, ve (c) 150 mA/cm^2 CNT ilaveli ve (d) 150 mA/cm^2 CNT ilavesiz, farklı akım yoğunluklarında yüzey morfolojisi [32].

Bu çalışmanın devamı olarak aynı kişiler tarafından yapılan bir diğer çalışmada ise yine silikat esaslı elektrolit kullanılmış, çok duvarlı karbon nanotüp elektrolite katılarak 7075-Al alaşımına 150 mA/cm² sabit akımda 600 sn boyunca 293 K elektrolit sıcaklığında mikro ark oksidasyon işlemi yapılmıştır.

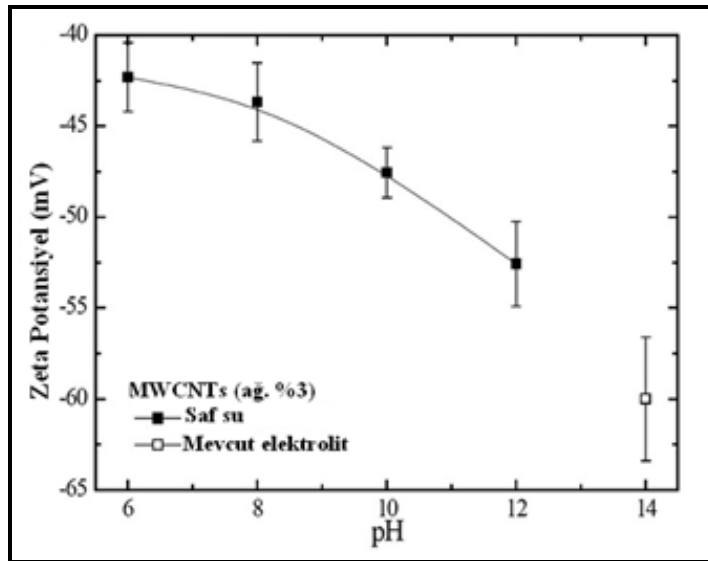
MAO işleminde kullanılan elektrolitlerin kimyasal kompozisyonu Çizelge 5.2’de gösterilmektedir.

Çizelge 5.2 : MAO’da kullanılan MWCNT katkılı/katkısız elektrolitlerin kimyasal kompozisyonu [33].

Ortam	Na ₂ SiO ₃ (mol/L)	KOH (mol/L)	KF (mol/L)	MWCNT (mL/L)
A	0.16	0.27	0.09	-
B	0.16	0.27	0.09	150

MWCNT’nin kaplama yapısına nasıl girdiği ve karbon nanotüplü kaplamaların korozyon özelliklerine etkisi ile ilgili bilgi verilmiştir. Çalışmada MWCNT ilavesiz (A) ve ilaveli (B) iki farklı elektrolit kullanılmıştır. MWCNT ilaveli B elektrolit ortamının daha düşük bozunma voltajı değeri gösterdiği görülmüştür. Bu durumun nedeni olarak karbon nanotüpün doğasında bulunan grafenden dolayı elektrokimyasal yük taşıma kapasitesinin yüksek olduğu ve buna bağlı olarak karbon nanotüplerin MAO işlemi sırasında dielektrik mikro şarjları depolamak için kullanılabileceği belirtilmiştir.

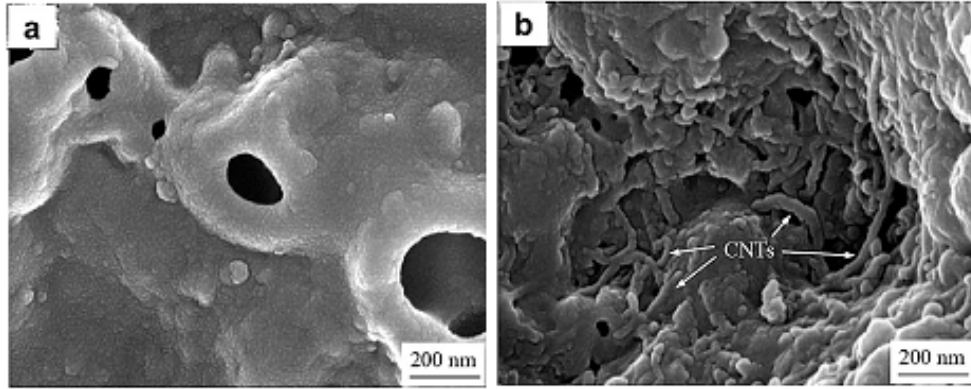
Şekil 5.8’de MWCNT’lerin zeta potansiyel değerleri gösterilmiştir.



Şekil 5.8 : MWCNT’lerin farklı pH değerlerindeki zeta potansiyeli [33]

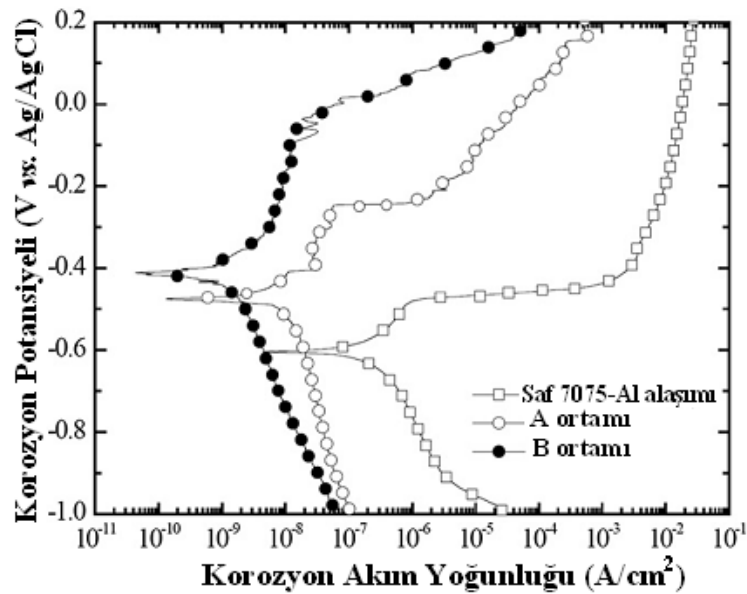
Elektrolit içerisinde iyonize olmayan ve çözünmeyen MWCNT'lerin yüksek elektrik alan etkisinden dolayı oluşan elektroforetik ortamda disperse oldukları ve negatif olarak yüklendikleri belirtilmiştir. Saf suda ve mevcut elektrolit içerisinde disperse edilen çok duvarlı karbon nanotüplerin negatif olarak ne kadar yüklendiği zeta potansiyel ile tayin edilmiştir.

MWCNT ilaveli elektrolit ile yapılan MAO işleminde çok duvarlı karbon nanotüplerin mikro porları doldurarak daha yoğun bir oksit (Al_2O_3) tabakası (Şekil 5.9) oluşturduğu ve bundan dolayı korozyon özelliğinin geliştiği belirtilmiştir.



Şekil 5.9 : MAO işlemi yapılmış 7075-Al alaşımının (a) A ortamı, (b) B ortamı oksit tabakası yüzey morfolojisi [33].

Şekil 5.10'da A ve B elektrolit ortamında MAO uygulanmış 7075-Al alaşımları ile, MAO işlemi yapılmamış saf 7075-Al alaşımının korozyon potansiyeli-korozyon akım yoğunluğu grafiği verilmiştir.



Şekil 5.10 : MAO kaplamasız saf 7075-Al alaşımı ile A ve B elektrolit ortamında MAO işlemi uygulanmış 7075-Al alaşımları [33].

Korozyon özellikleri % 3.5 NaCl çözeltisi içerisinde potansiyodinamik polarizasyon testi ile tespit edilmiştir. Oksit tabakası porozitesi % 0.245 olan MWCNT ilavesiz A elektrolit ortamının MAO kaplama yapılmamış saf 7075-Al alaşımına göre korozyon direncinin yüksek, oksit tabakası % 0.0136 olan MWCNT ilaveli B elektrolit ortamına kıyasla ise korozyon direncinin daha düşük olduğu gözlenmiştir.

Takviye malzemesi olarak karbon nanotüp ile benzerlik gösteren grafit de alüminyumun mikro ark oksidasyon işleminde elektrolit takviye malzemesi olarak kullanılmıştır. Guo-Hua ve diğerleri tarafından 2009 yılında saf alüminyum ile grafit katkılı sodyum metasilikat elektrolit kullanılarak yapılan mikro ark oksidasyon işleminde tıpkı karbon nanotüp takviyeli elektrolit ile yapılan MAO prosesinde olduğu gibi, katkısız elektrolite kıyasla korozyon direncinin arttığı görülmüştür. MAO işleminde kullanılan elektrolitlerin kimyasal kompozisyonu Çizelge 5.3'de gösterilmektedir.

Çizelge 5.3 : MAO'da kullanılan grafit katkılı ve grafit katkısız elektrolitlerin kimyasal kompozisyonu [34].

Na ₂ SiO ₃ (mol/L)	NaOH (mol/L)	Grafit çapları (µm)	Grafit (g/L)
0.03	0.05	70; 30; 10	5
0.03	0.05	-	-

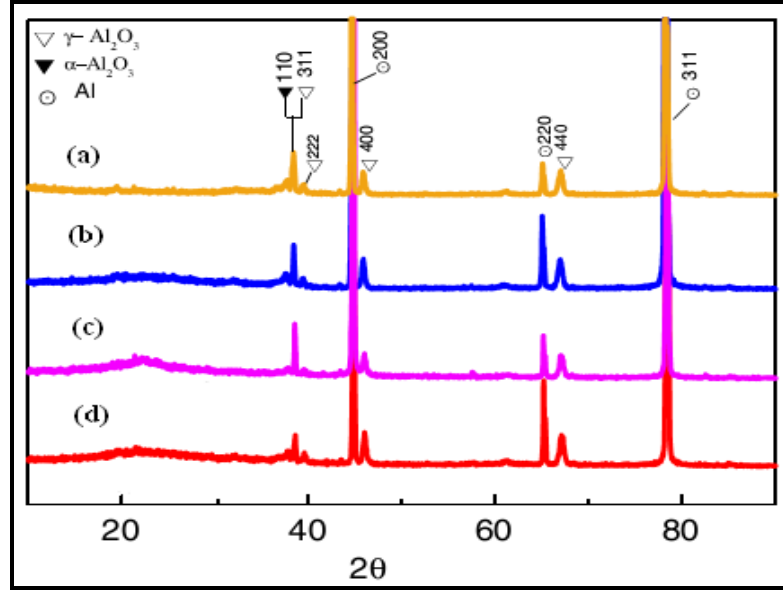
Farklı çaplarda (70 µm, 30 µm, 10 µm) grafit kullanılarak yada grafit kullanılmayarak 5 A/dm⁻² akım yoğunluğunda 30 dakika boyunca 308 K elektrolit sıcaklığında yapılan bu çalışmada, 10 µm çapındaki grafit taneleri kullanılarak yapılan mikro ark oksidasyon işleminde en az porozitenin ve en yoğun tabakanın olduğu gözlenmiştir [34].

Şekil 5.11'de Saf Al alaşımının grafit ilaveli ve grafit ilavesiz elektrolit ortamındaki kaplamalarına ait XRD paternleri görülmektedir.

Grafit katkılı sodyum metasilikat elektrolit ortamında yapılan XRD faz analizlerinde ise grafit pikleri bulunamamıştır. Grafit piklerinin bulunamamasının nedeni olarak, grafit parçalarının kaplama içerisindeki düzensiz dağılımından kaynaklı olabileceği düşünülmektedir.

Yapılan bu X-ışınları faz analizinden de görüleceği gibi oksit tabakası iki ayrı fazdan meydana gelmektedir. Bu fazlar sırasıyla α-Al₂O₃ ve γ-Al₂O₃'dür. Yapılan araştırmalar MAO kaplamasının yüksek anodik akım yoğunluğunda α-Al₂O₃ fazının, düşük anodik akım yoğunluğunda ise γ-Al₂O₃ fazının meydana geldiğini

göstermektedir. Anodik akım yoğunluğunun MAO kaplamasının porozite ve yoğunluğu üzerindeki etkisi göz önünde bulundurulursa , yüksek anodik akım yoğunluğunda α - Al_2O_3 fazıyla birlikte sertliğin dolayısıyla kaplama kalitesinin arttığı söylenebilir [35].



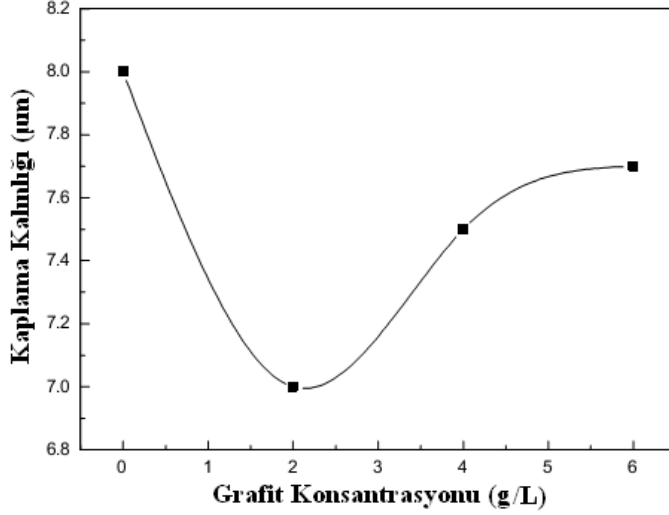
Şekil 5.11 : (a) 10 μm , (b) 30 μm , (c) 70 μm grafit ilaveli elektrolit ve (d) grafit ilavesiz elektrolit ait XRD paterni [34].

Grafit katkıli elektrolit kullanılarak yapılan bir diğer mikro ark oksidasyon işleminde ise, altlık malzemesi olarak LY12-Al alaşımı seçilmiş farklı miktarlarda grafitler kullanılarak 475 V voltaj altında 15 dakika boyunca <323 K elektrolit sıcaklığında sodyum metasilikat elektrolit ortamında oksidasyon yapılmıştır. MAO işleminde kullanılan elektrolitin kimyasal kompozisyonu Çizelge 5.4’de gösterilmektedir.

Çizelge 5.4 : MAO’da kullanılan farklı konsantrasyonlarda grafit katkıli elektrolitin kimyasal kompozisyonu [36].

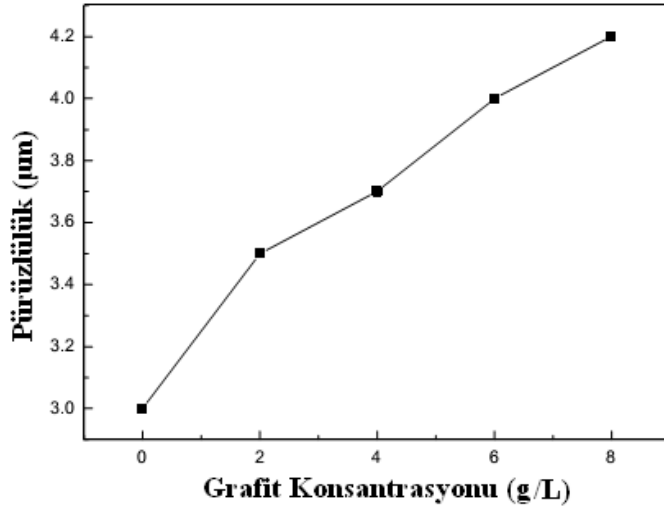
Na_2SiO_3 (g/L)	NaOH (g/L)	Grafit (g/L)
10	2	0; 2; 4; 6

Farklı miktarlarda (0; 2; 4; 6 g/L) grafit kullanılarak yapılan çalışmada kaplamanın kalınlık, pürüzlülük, sürtünme katsayısı ve yüzey morfolojisi özellikleri incelenmiştir. Grafit katkısız elektrolit ile yapılan ölçümlerde kaplama kalınlığı en yüksek olmasına rağmen, grafit katkıli elektrolitler içerisinde artan grafit ile birlikte kaplama kalınlığının da arttığı görülmüştür. Bunun sebebinin grafitin elektriksel iletkenliği olabileceği düşünülmektedir. Şekil 5.12’de farklı grafit konsantrasyonlarında kalınlık-grafit grafiği gösterilmektedir.



Şekil 5.12 : MAO kaplama kalınlığının grafit konsantrasyonuna bağlı değişimi [36].

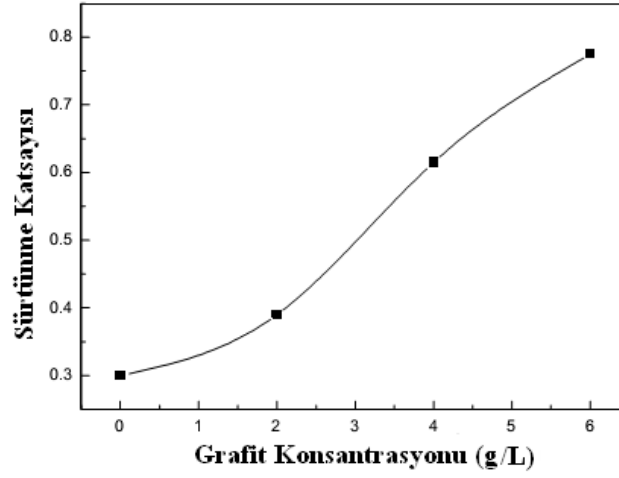
Mikro ark oksidasyon kaplamanın pürüzlülük değerleri ise artan grafit konsantrasyonu ile beraber lineer bir şekilde artmıştır. Grafit katkısız elektrolit ile 8 g/L grafit katılarak yapılan MAO kaplaması kıyaslandığında pürüzlülüğünün 1.4 kat arttığı gözlenmiştir. Pürüzlülüğün gözle görülür şekilde değişmesi grafit içeriğiyle birlikte değişen yapı ve faz kompozisyonuna bağlanmaktadır. Şekil 5.13'te pürüzlülük-grafit konsantrasyonu gösterilmektedir.



Şekil 5.13 : Grafit konsantrasyonunun MAO kaplama pürüzlülüğüne etkisi [36].

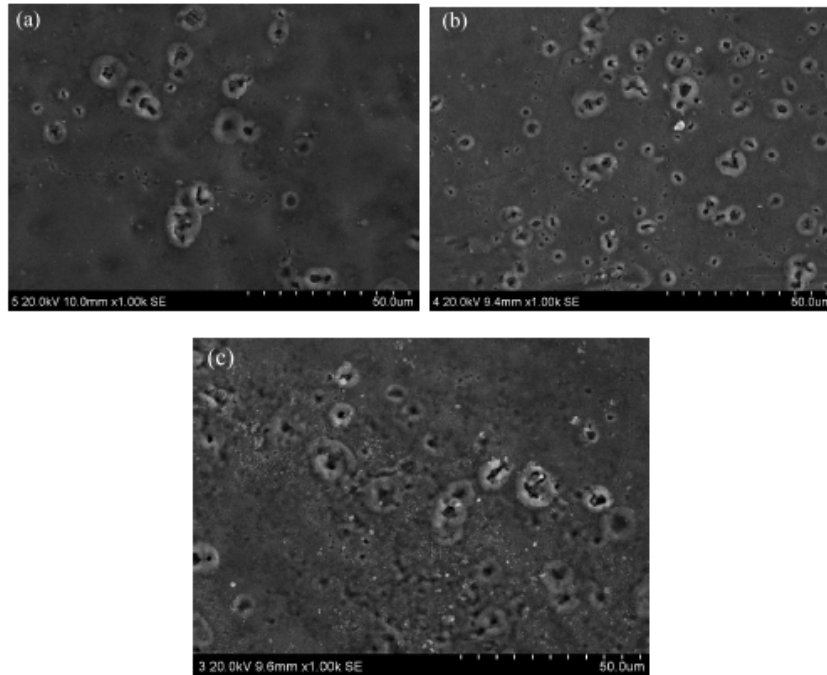
LY12-Al alaşımının grafit katkılı sodyum metasilikat elektrolit ortamı ile yapılan aşınma testleri 20 N yük altında yaklaşık 0,34 Hz frekansında 1,5 mm çapında Si₃N₄ pin kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Daha önce yapılan benzer çalışmaların aksine sürtünme katsayısı artan grafit konsantrasyonu ile beraber artmıştır. Ayrıca grafit katkısız elektrolit kullanılarak yapılan MAO işleminin, grafit kullanılarak yapılan

MAO işlemine kıyasla sürtünme katsayısının oldukça düşük olduğu gözlenmiştir (Şekil 5.14).



Şekil 5.14 : MAO 'da grafit konsantrasyonunun sürtünme katsayısına etkisi [36].

LY12-Al alaşımının grafit katkılı metasilikat elektrolit ortamı ile yapılan mikro ark oksidasyonunda yüzey morfolojisinin mikroporlardan oluşan poroz yapısının nispeten homojen dağıldığı, ayrıca kaplama yüzeyindeki tümseklikler ve konkav yapılardan dolayı yüzeyin pürüzlü olduğu görülmüştür. Buna ek olarak artan grafit ile birlikte porozitenin de arttığı gözlenmiştir. Şekil 5.15'te farklı grafit konsantrasyonlarında kaplamanın SEM görüntüleri gösterilmektedir.



Şekil 5.15 : Farklı grafit konsantrasyonlarında yapılmış MAO kaplamanının SEM görüntüleri, (a) 2 g/L, (b) 4 g/L, (c) 6 g/L [36].

Yapılan tüm bu literatür araştırmalarından da görüleceği üzere farklı şartlar altında alüminyum alaşımlarının mikro ark oksidasyonu yapılabilmektedir.

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada 6082 kalite alüminyum alaşımının mikro ark oksidasyonunda elektrolite karbon nanotüp ilavesinin etkisi incelenmiştir.

Mikro ark oksidasyon işleminde voltaj, işlem süresi ve karbon nanotüp miktarı değişken parametreler olarak seçilerek, oluşan kaplamanın yapısal, ve mekanik özellikleri yapılan deneylerle incelenerek mikro ark oksidasyon proses koşulları optimum özelliklere sahip olacak şekilde ayarlanmıştır.

6.1 Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada anot malzemesi olarak 6082 kalite alüminyum alaşımı kullanılmıştır. MAO prosesi öncesi 10 mm x 10 mm x 4 mm ebatlarında hazırlanan 6082 alüminyum alaşımı numuneler 400-2400 meş arasındaki SiC zımparalarla zımparalanmış, daha sonra saf su ve ardından etil alkol ile temizlenip kurutulduktan sonra mikro ark oksidasyon işlemi için hazır hale getirilmiştir.

Katot malzemesi olarak ise mikro ark oksidasyon cihazının kendi bünyesinde barındırdığı paslanmaz çelik kullanılmıştır.

Mikro ark oksidasyon işlemlerinde kullanılmak üzere 3 (üç) farklı elektrolit ortamı hazırlanmış, hazırlanan elektrolitlerin kimyasal bileşimleri Çizelge 6.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 6.1 : MAO'da kullanılan farklı konsantrasyonlarda MWCNT katkılı elektrolitin kimyasal kompozisyonu.

Ortam	NaAlO ₂ (g/L)	KOH (g/L)	MWCNT (g/L)
A	15	2	-
B	15	2	2
C	15	2	4

Mikro ark oksidasyon işlemleri, farklı pozitif voltaj/negatif voltaj uygulanarak sırasıyla 300/60 ve 400/80 değerlerinde, gerçekleştirilmiştir. MAO işlem süresince elektrolit sıcaklığı $<20^{\circ}\text{C}$ tutulmaya çalışılmıştır.

6.2 Mikro Ark Oksidasyon İşlemleri

Mikro ark oksidasyon işlemleri İTÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında kurulu bulunan 30 kV kapasiteli AC güç kaynağına sahip MAO cihazı ile yapılmıştır (Şekil 6.1). Mikro ark oksidasyon cihazının pozitif voltaj değeri maksimum 700 V iken, negatif voltaj değeri maksimum 300 V'dur.



Şekil 6.1 : Mikro Ark Oksidasyon Cihazı.

6.3 Yapısal ve Mekaniksel Karakterizasyon Çalışmaları

Mikro ark oksidasyon proseslerinin ardından numuneler üzerinde çeşitli yapısal ve mekaniksel karakterizasyon çalışmaları yapılmıştır. Bu karakterizasyon çalışmaları mikro yüzey incelemeleri, kesit incelemeleri, X-ışınları analizi, yüzey pürüzlülüğü ölçümleri, sertlik ölçümleri, ve aşınma testlerini içermektedir.

6.3.1 Mikro yüzey ve kesit incelemeleri

Mikro yüzey ve kesit incelemeleri EDS donanımlı HITACHI TM-1000 marka masaüstü taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yapılmıştır.

6.3.2 X-ışınları analizleri

X-ışınları analizi (GBC, MMA 027) 28.5 mA , 35 kW güç değerlerinde CuK α tüp kullanılarak 10°-90° arasında 2°/dak.'lık artışlar ile numune yüzeyinde tarama yapacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

6.3.3 Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri

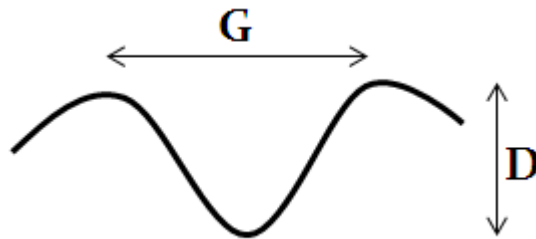
Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri, Veeco Dectac 6000M marka profilometrede 10 mg yük altında numune yüzeylerinde 2000 μ m mesafede tarama yapılarak gerçekleştirilmiştir.

6.3.4 Mikro sertlik ölçümleri

Mikro sertlik ölçümleri, CSM marka “nano-hardness tester” sertlik cihazında numunelerin kesitleri üzerine uygulanan 25 g yükü Vickers uç batırılarak, oksit tabakası üzerinden 15 ölçümden ortalama değer alınarak gerçekleştirilmiştir.

6.3.5 Aşınma testleri

Aşınma testleri, karşıt hareketli (reciprocating) Tribotech aşınma cihazı ile kuru ortamda gerçekleştirilmiştir. Aşındırıcı malzeme olarak 6 mm çapında Si₃N₄ bilya kullanılmıştır. Aşınma testleri 4 N yük altında, 10 mm/s kayma hızıyla toplam kayma mesafesi 100000 mm olarak, 5 mm'lik çizik oluşturularak yapılmıştır. Aşınma testlerinin ardından, aşındırıcı bilyaların yüzeyleri Leica marka optik mikroskopta incelenirken, numune yüzeyleri ise hem optik mikroskopla hem de taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Numunelerin aşınma iz alanları (A) ise, Veeco marka profilometre ile ölçülen aşınma iz genişliği (G) ve aşınma iz derinliği (D) ile hesap edilmiştir. Şekil 6.2'de aşınma izi profil şematik olarak gösterilmektedir. Eşitlik (6.1)'de ise aşınma iz alanı hesabı gösterilmektedir.



Şekil 6.2 : Aşınma izinin genişliğinin ve derinliğinin şematik olarak gösterimi.

$$A = (\pi/4).G.D \quad (6.1)$$

A = Aşınma iz alanı

G = Aşınma iz genişliği

D = Aşınma iz derinliği

6.2.6 Zeta potansiyel ölçümleri

Zeta potansiyel ölçümleri Malvern Instruments Zetasizer 2000 adlı cihazda yapılmıştır.

7. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada 6082 kalite alüminyum alaşımının mikro ark oksidasyonunda elektrolite karbon nanotüp ilavesinin etkisi incelenmiştir.

Karbon nanotüpler kimyasal olarak inerttirler [37]. Dolayısıyla karbon nanotüpler mevcut bazik elektrolit ortamında kimyasal olarak tepkime veremeyeceğinden elektrolit içerisindeki OH^- iyonların etkisiyle statik olarak negatif davranış göstermekte (zeta potansiyel), ve böylece pozitif elektrod olan anoda doğru gitmektedirler.

Mikro ark oksidasyon işleminde voltaj, işlem süresi ve karbon nanotüp miktarı değişken parametreler olarak seçilerek, oluşan kaplamanın yapısal, mekanik ve korozyon özellikleri yapılan deneylerle incelenerek mikro ark oksidasyon proses koşulları optimum özelliklere sahip olacak şekilde ayarlanmıştır. Yapılan deneysel çalışmaların sonuçları; yüzey incelemeleri, kesit incelemeleri, XRD analizleri, kaplama kalınlığı ölçümleri, yüzey pürüzlülüğü ölçümleri, mikro sertlik ölçümleri, ve aşınma testleri başlıkları altında incelenmiştir.

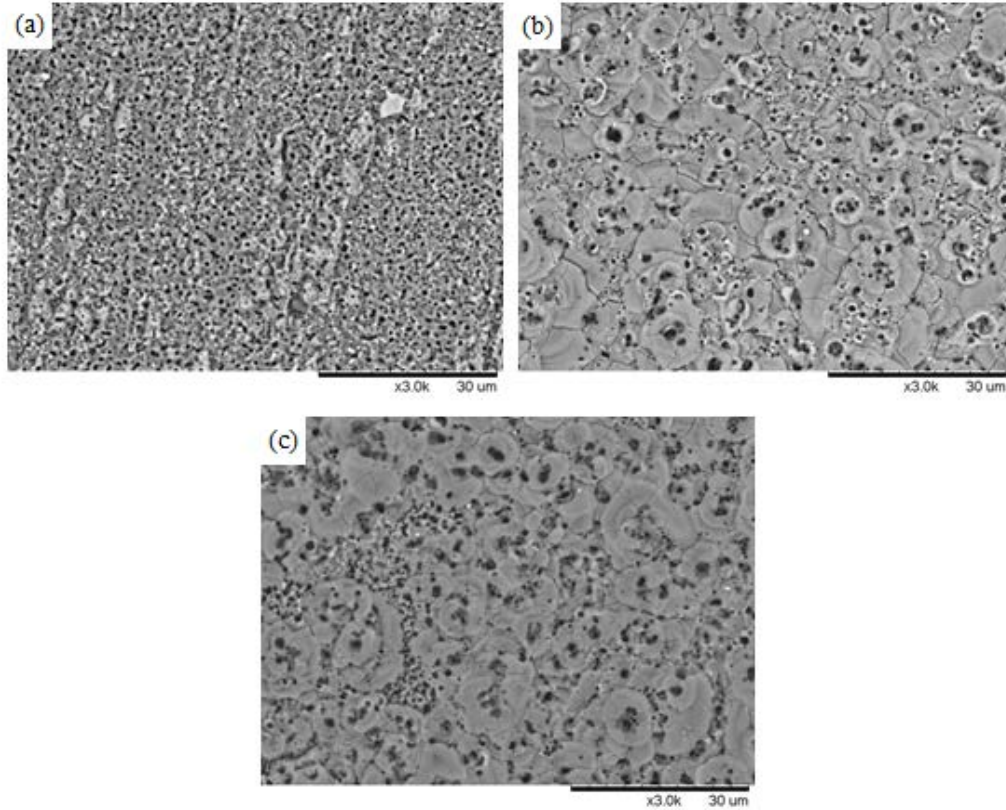
7.1 Yüzey incelemeleri

Temel olarak $\text{KOH}+\text{NaAlO}_2$ ve saf su karışımından meydana gelen elektrolit, içerisine farklı konsantrasyonlarda karbon nanotüp katılarak ya da katılmadan farklı voltaj ve farklı sürelerde mikro ark oksidasyon işlemine tabi tutulmuştur.

Mikro ark oksidasyon işleminde, iki farklı voltaj uygulanmıştır. 300 V uygulanan 6082 kalite Al alaşımı numunelerin yüzeylerinde oluşan kaplamaların yüzey morfolojilerine bakıldığında, elektrolite karbon nanotüp takviyesi yapılmadan gerçekleştirilen MAO işleminde artan süreyle birlikte porozite yoğunluğunun çok fazla değişiklik göstermediği, ancak por sayısının nispeten azaldığı, por boyutunun arttığı görülmektedir. Bununla beraber 1, 2 ve 5 dakika mikro ark oksidasyon uygulanan numunelerde mikro çatlaklar neredeyse görülmezken ve yüzey pürüzlülüğü neredeyse aynı iken, 10 dakika mikro ark oksidasyon işlemi uygulanmış

numunede mikro çatlakların belirginleştiği ve yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmektedir.

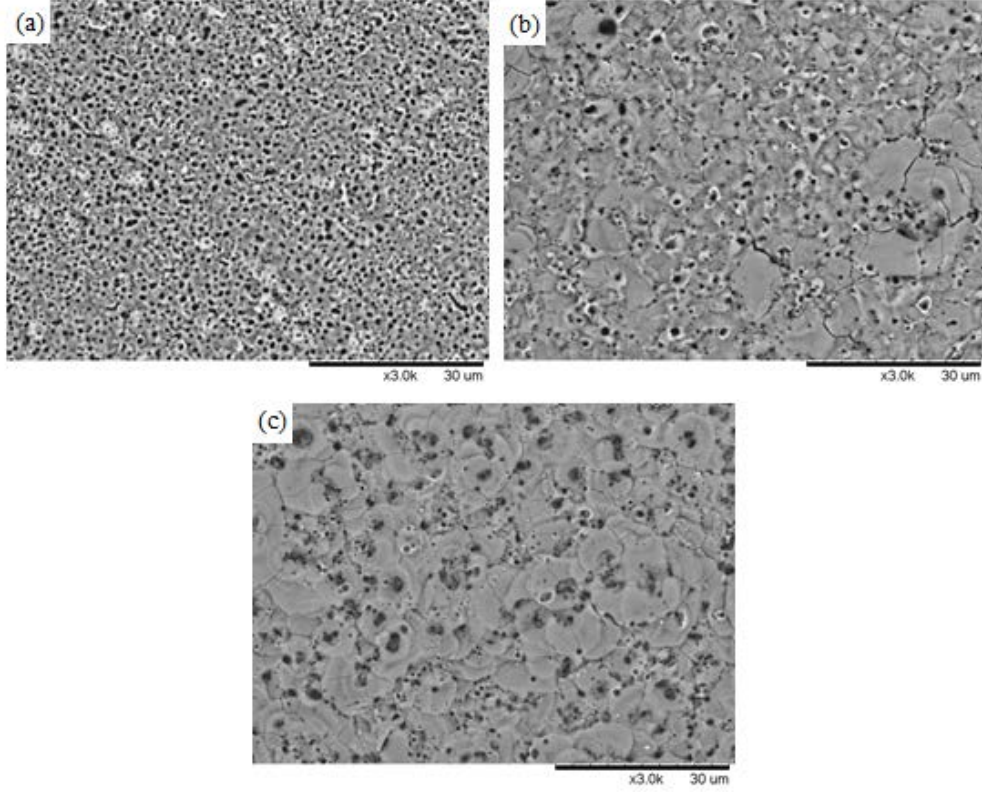
1 dakika boyunca CNT ilavesiz/ilaveli 300 V⁺ (volt) MAO işlemine tabi tutulmuş 6082 kalite Al alaşımı numunelerin yüzeylerinde oluşan kaplamaların yüzey morfolojilerine ait taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Şekil 7.1'de gösterilmektedir.



Şekil 7.1 (a) 300 V, (b) 300 V; 2 g/L CNT, (c) 300 V; 4 g/L CNT, 1 dakika MAO işlemine tabi kaplamaların yüzey morfolojilerine ait SEM görüntüleri.

Alüminat esaslı elektrolite 2 g/L karbon nanotüp ilavesi ile yapılan mikro ark oksidasyon işlemiyle yüzeyde nispeten mikro çatlaklar ve yüzey pürüzlülüğü artmıştır. Elektrolite 4 g/L CNT ilavesi, elektrolite karbon nanotüp ilave edilmeden yapılan yada 2 g/L CNT ilave edilerek yapılan mikro ark oksidasyona kıyasla daha az porozite içermekte ve aynı zamanda daha pürüzlü bir yapı oluşturmaktadır.

2 dakika boyunca CNT ilavesiz/ilaveli 300 V⁺ (volt) MAO işlemine tabi tutulmuş 6082 kalite Al alaşımı numunelerin yüzeylerinde oluşan kaplamaların yüzey morfolojilerine ait taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Şekil 7.2'de gösterilmektedir.

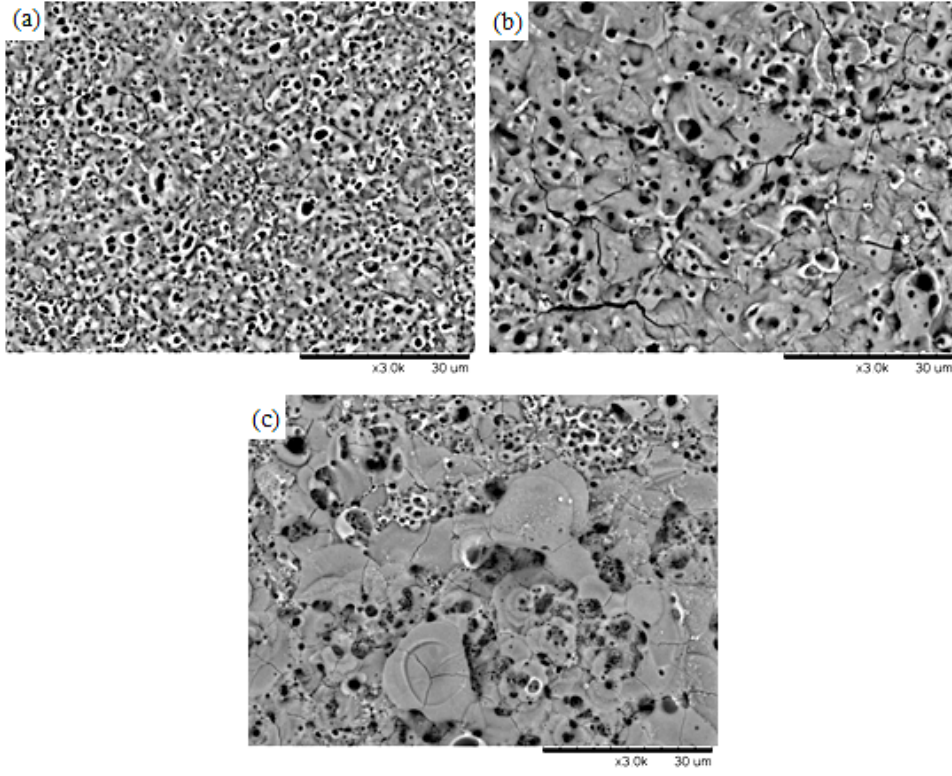


Şekil 7.2 (a) 300 V, (b) 300 V; 2 g/L CNT, (c) 300 V; 4 g/L CNT, 2 dakika MAO işlemine tabi kaplamaların yüzey morfolojilerine ait SEM görüntüleri.

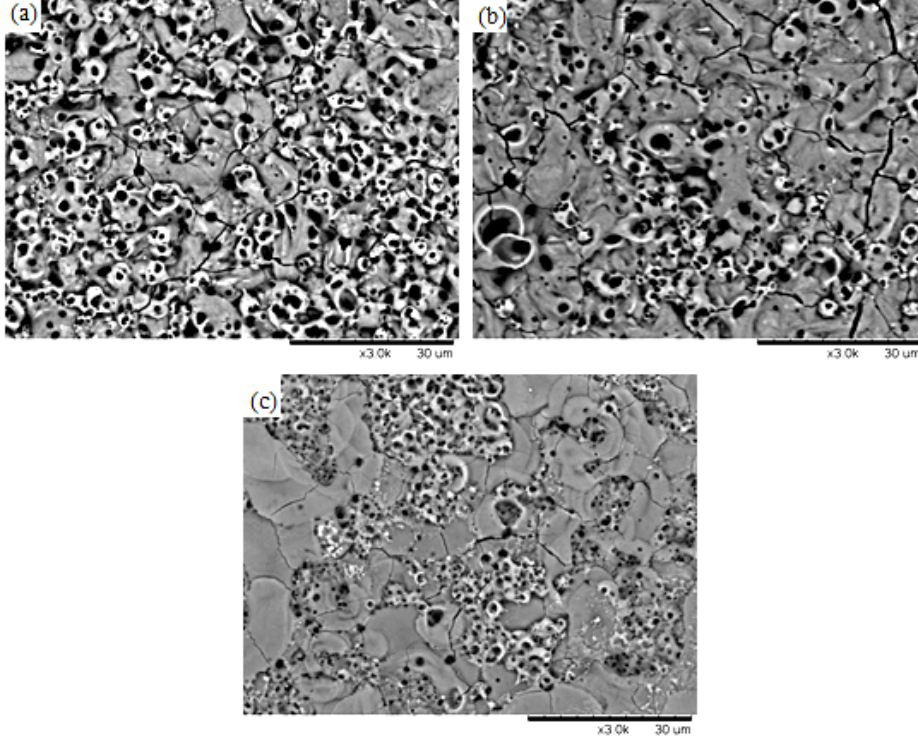
5 dakika boyunca CNT ilavesiz/ilaveli 300 V⁺ (volt) MAO işlemine tabi tutulmuş 6082 kalite Al alaşımı numunelerin yüzeylerinde oluşan kaplamaların yüzey morfolojilerine ait taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Şekil 7.3’de gösterilmektedir.

300 V altında yapılan tüm MAO işlemlerinde genel olarak elektrolite 2 g/L karbon nanotüp ilavesi, aynı sürede karbon nanotüp ilave edilmeden yapılan mikro ark oksidasyona kıyasla porozite yoğunluğunu azaltmış, nispeten por boyutunu artırmış ancak daha kompakt bir yapı oluşmasını sağlamıştır. Yine aynı sürede elektrolite 4 g/L CNT ilavesi, elektrolite karbon nanotüp ilave edilmeden yapılan yada 2 g/L CNT ilave edilerek yapılan mikro ark oksidasyon işlemine kıyasla daha az porozite içermekte, daha pürüzlü bir yapı meydana getirmektedir.

10 dakika boyunca CNT ilavesiz/ilaveli 300 V⁺ (volt) MAO işlemine tabi tutulmuş 6082 kalite Al alaşımı numunelerin yüzeylerinde oluşan kaplamaların yüzey morfolojilerine ait taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Şekil 7.4’de gösterilmektedir.

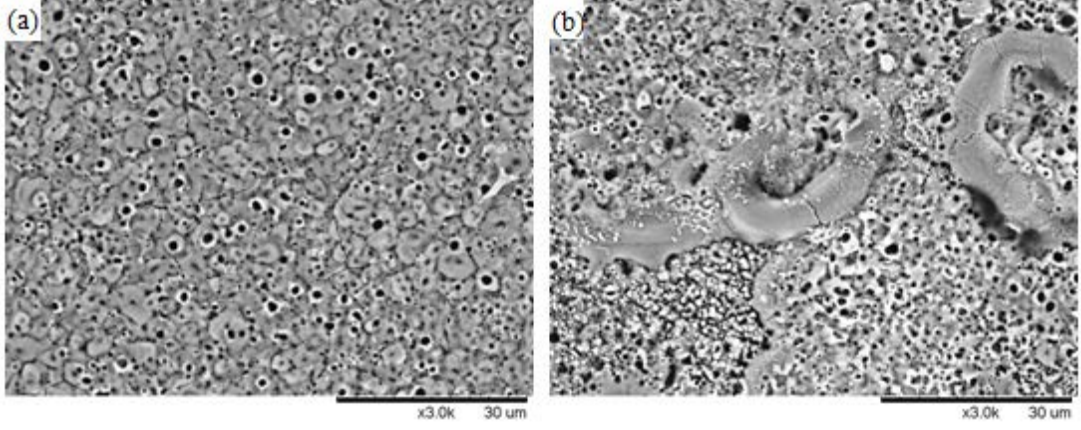


Şekil 7.3 (a) 300 V, (b) 300 V; 2 g/L CNT, (c) 300 V; 4 g/L CNT, 5 dakika MAO işlemine tabi kaplamaların yüzey morfolojilerine ait SEM görüntüleri.



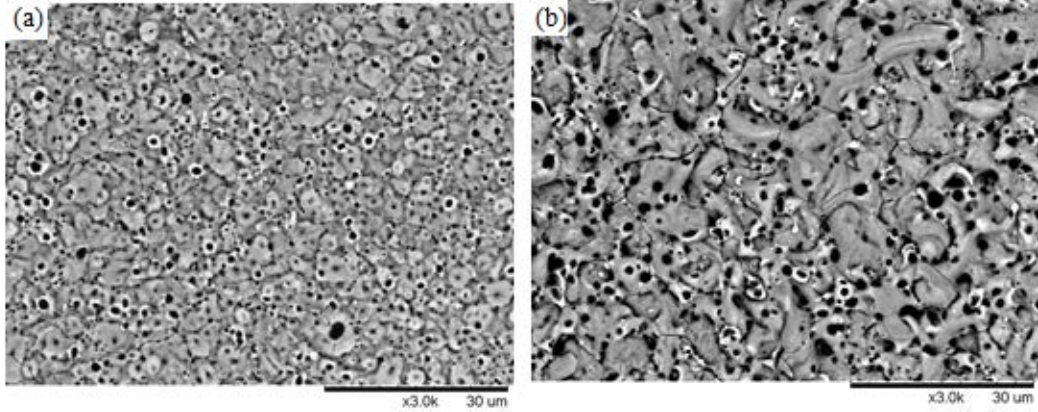
Şekil 7.4 (a) 300 V, (b) 300 V; 2 g/L CNT, (c) 300 V; 4 g/L CNT, 10 dakika MAO işlemine tabi kaplamaların yüzey morfolojilerine ait SEM görüntüleri.

1 dakika boyunca CNT ilavesiz/ilaveli 400 V⁺ (volt) MAO işlemine tabi tutulmuş 6082 kalite Al alaşımı numunelerin yüzeylerinde oluşan kaplamaların yüzey morfolojilerine ait taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Şekil 7.5’de gösterilmektedir.



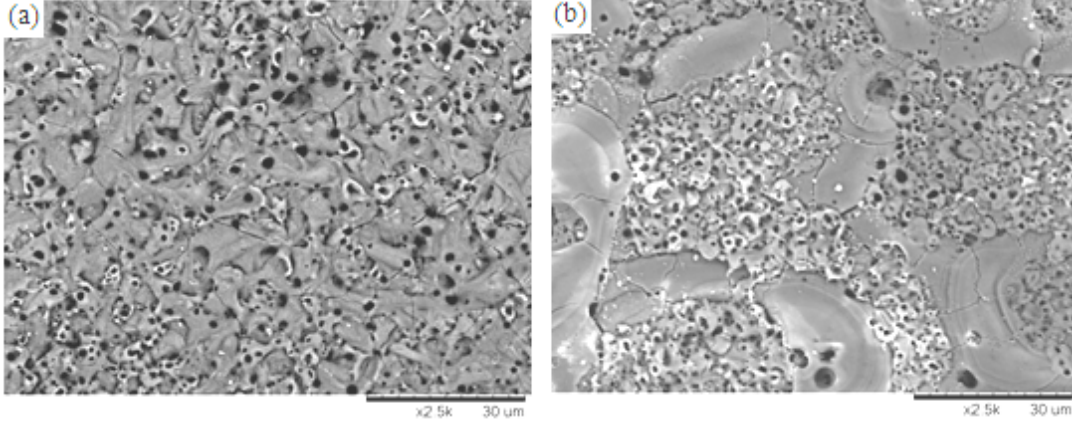
Şekil 7.5 (a) 400 V, (b) 400 V; 2 g/L CNT, 1 dakika MAO işlemine tabi kaplamaların yüzey morfolojilerine ait SEM görüntüleri.

2 dakika boyunca CNT ilavesiz/ilaveli 400 V⁺ (volt) MAO işlemine tabi tutulmuş 6082 kalite Al alaşımı numunelerin yüzeylerinde oluşan kaplamaların yüzey morfolojilerine ait taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Şekil 7.6’da gösterilmektedir.



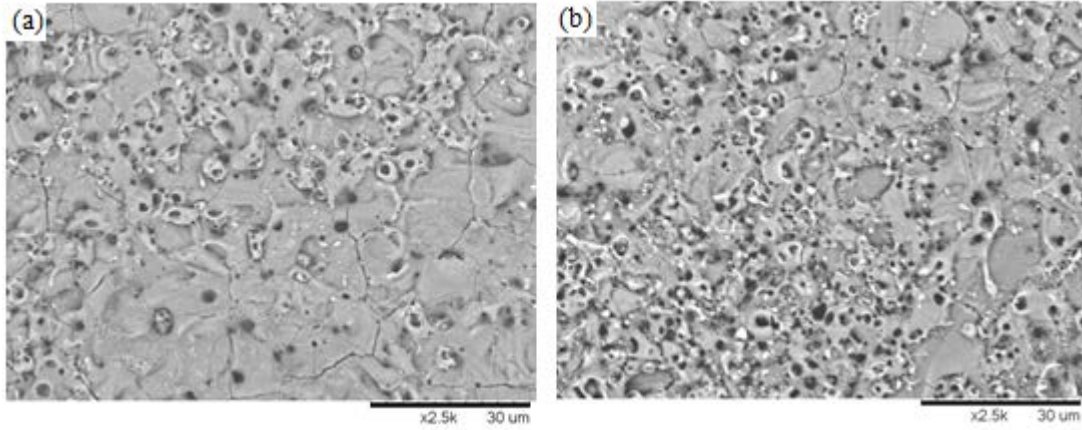
Şekil 7.6 (a) 400 V, (b) 400 V; 2 g/L CNT, 2 dakika MAO işlemine tabi kaplamaların yüzey morfolojilerine ait SEM görüntüleri.

5 dakika boyunca CNT ilavesiz/ilaveli 400 V⁺ (volt) MAO işlemine tabi tutulmuş 6082 kalite Al alaşımı numunelerin yüzeylerinde oluşan kaplamaların yüzey morfolojilerine ait taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Şekil 7.7’de gösterilmektedir.



Şekil 7.7 (a) 400 V, (b) 400 V; 2 g/L CNT, 5 dakika MAO işlemine tabi kaplamaların yüzey morfolojilerine ait SEM görüntüleri.

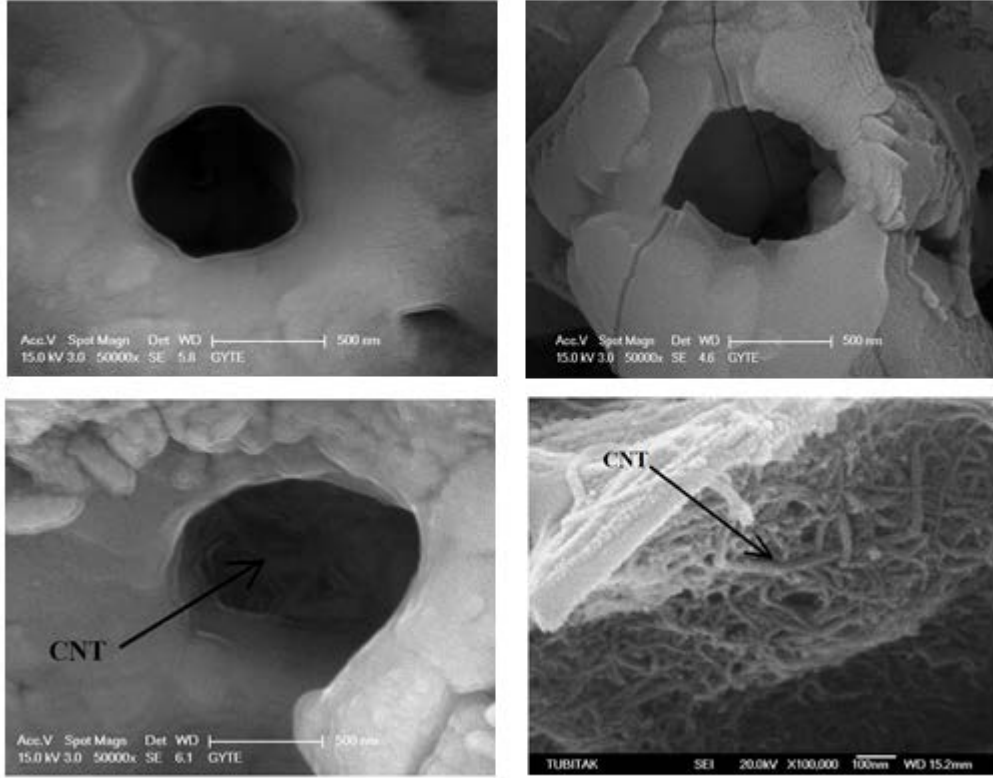
10 dakika boyunca CNT ilavesiz/ilaveli 400 V⁺ (volt) MAO işlemine tabi tutulmuş 6082 kalite Al alaşımı numunelerin yüzeylerinde oluşan kaplamaların yüzey morfolojilerine ait taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Şekil 7.8’de gösterilmektedir.



Şekil 7.8 (a) 400 V, (b) 400 V; 2 g/L CNT, 10 dakika MAO işlemine tabi kaplamaların yüzey morfolojilerine ait SEM görüntüleri.

400 V uygulanan 6082 kalite Al alaşımı numunelerin yüzeylerinde oluşan kaplamaların yüzey morfolojilerine bakıldığında, elektrolite karbon nanotüp takviyesi yapılmadan gerçekleştirilen MAO işleminde porozite yoğunluğunun; elektrolite 2 g/L karbon nanotüp takviyesi yapılarak gerçekleştirilen MAO işlemine nazaran daha fazla olduğu, ancak pürüzlülük değerlerinin çok fazla değişiklik göstermediği görülmektedir. Bununla birlikte elektrolite CNT takviyesinin, yapıdaki por sayısını nispeten azalttığı ve por boyutunu ise neredeyse değitirmediği ilgili şekillerdeki SEM görüntülerinden anlaşılmaktadır.

300 V ve 400 V altında aynı elektrolit ortamında MAO işlemi uygulanan kaplamaların yüzey morfolojilerine ait SEM görüntüleri Şekil 7.9'da gösterilmektedir.

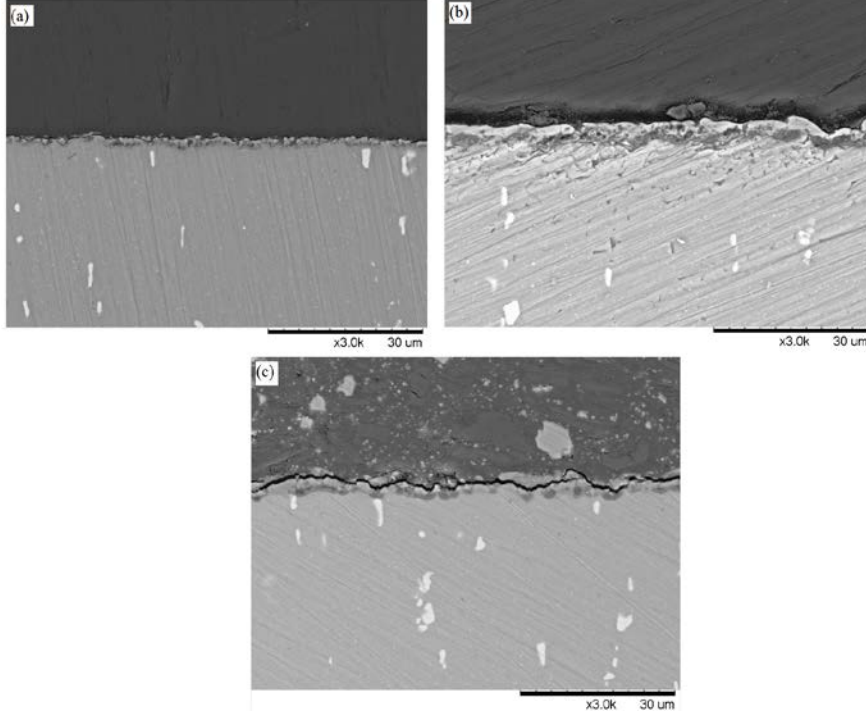


Şekil 7.9 : 4 (a) 300 V, (b) 300 V; 2 g/L CNT, (c) 400, (d) 400 V; 2 g/L CNT, farklı voltaj altında, aynı elektrolit ortamında 5 dakika MAO işlemi uygulanmış kaplamalara ait yüzey SEM görüntüleri.

7.2 Kesit İncelemeleri

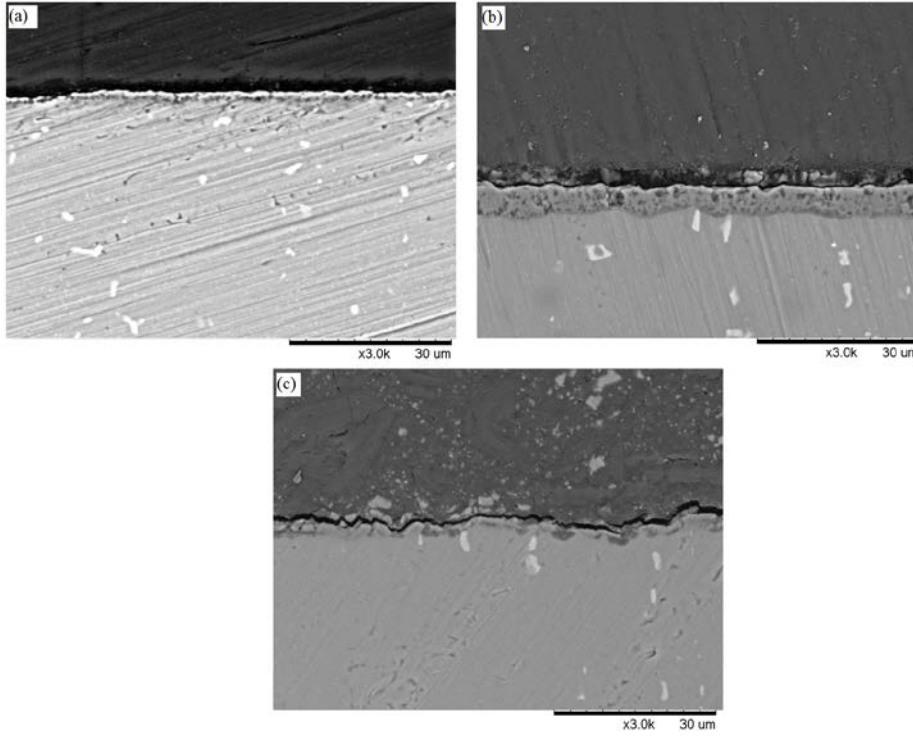
Karbon nanotüp ilavesiz ve ilaveli alüminat esaslı elektrolitlerde mikro ark oksidasyon sonrası elde edilen kaplamaların altlık 6082 kalite alüminyum alaşımı malzemeye yapışmasının ve kalınlık boyunca oksit tabakası morfolojisinin değerlendirilmesi için numunelerin kesiti taramalı elektron mikroskobu (SEM) cihazında incelenmiştir.

1 dakika boyunca CNT ilavesiz/ilaveli 300 V⁺ (volt) MAO işlemine tabi tutulmuş 6082 kalite Al alaşımı numunelerin kesit morfolojilerine ait taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Şekil 7.10'da gösterilmektedir.



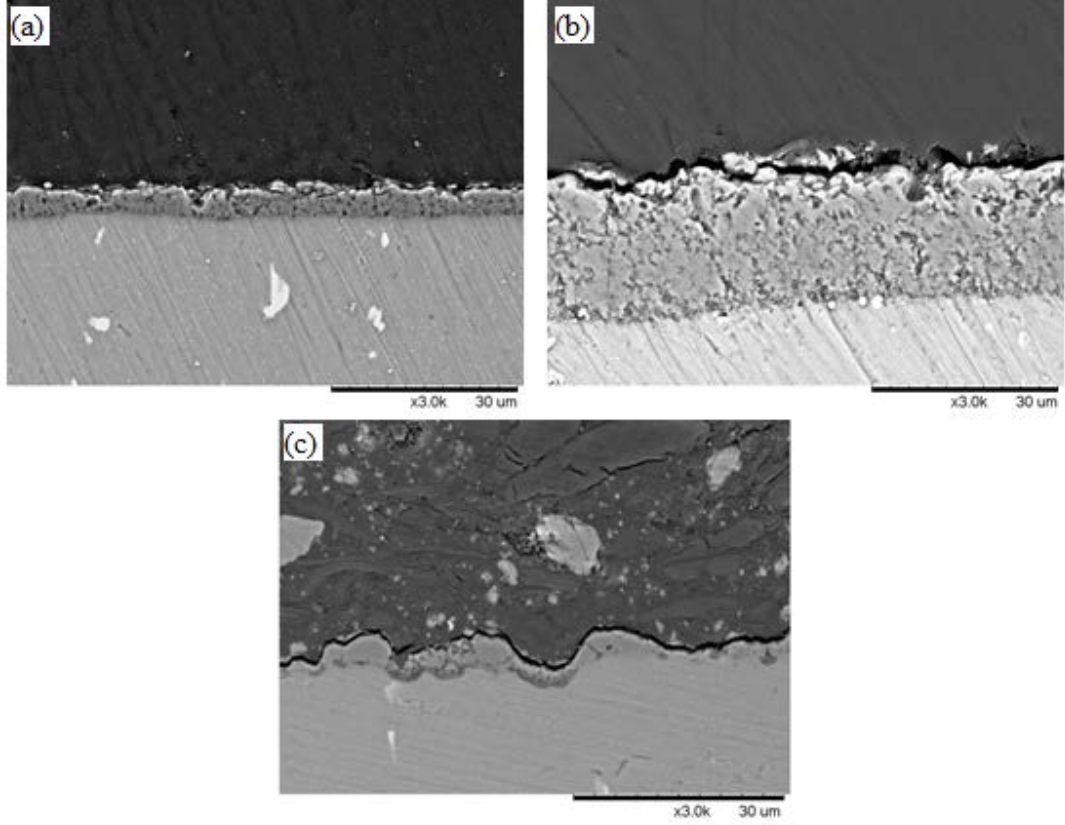
Şekil 7.10 : (a) 300 V, (b) 300 V; 2 g/L CNT, (c) 300 V; 4 g/L CNT, 1 dakika MAO işlemine tabi kaplamaların kesitlerinin SEM görüntüleri.

2 dakika boyunca CNT ilavesiz/ilaveli 300 V⁺ (volt) MAO işlemine tabi tutulmuş 6082 kalite Al alaşımı numunelerinin kesit morfolojilerine ait taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Şekil 7.11’de gösterilmektedir.



Şekil 7.11 : (a) 300 V, (b) 300 V; 2 g/L CNT, (c) 300 V; 4 g/L CNT, 2 dakika MAO işlemine tabi kaplamaların kesitlerinin SEM görüntüleri.

5 dakika boyunca CNT ilavesiz/ilaveli 300 V⁺ (volt) MAO işlemine tabi tutulmuş 6082 kalite Al alaşımı numunelerin kesit morfolojilerine ait taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Şekil 7.12’de gösterilmektedir.

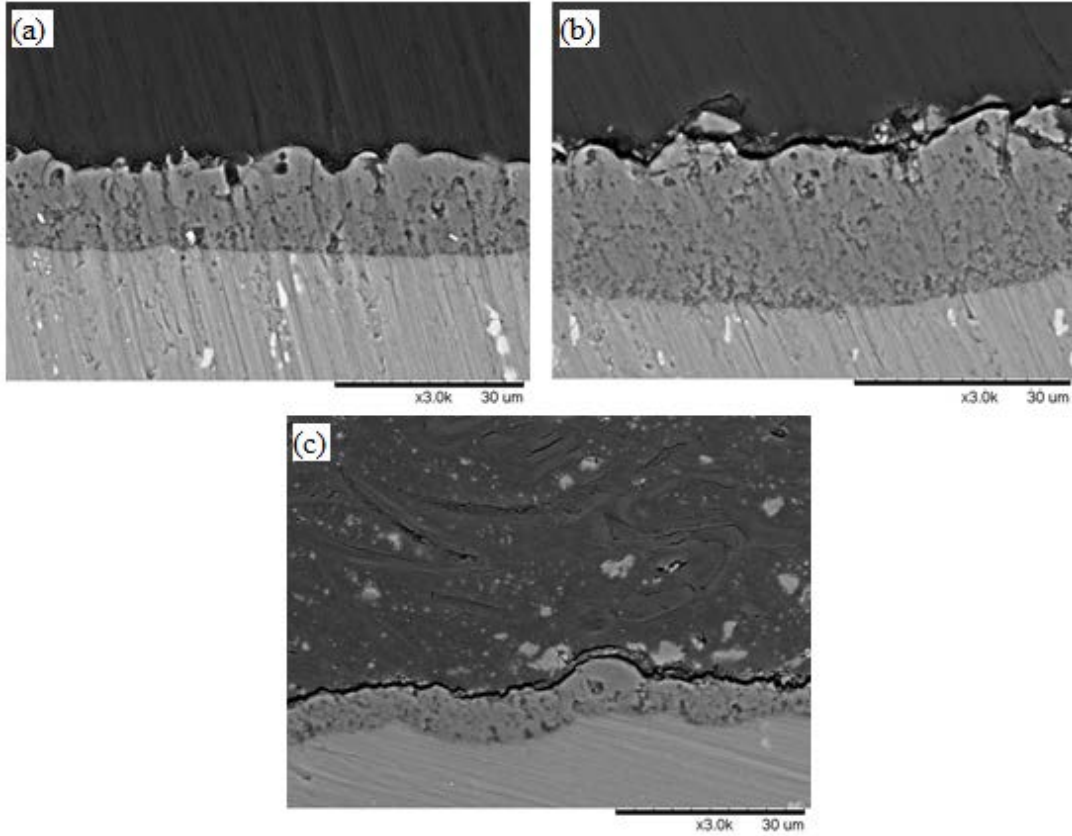


Şekil 7.12 : (a) 300 V, (b) 300 V; 2 g/L CNT, (c) 300 V; 4 g/L CNT, 5 dakika MAO işlemine tabi kaplamaların kesitlerinin SEM görüntüleri.

10 dakika boyunca CNT ilavesiz/ilaveli 300 V⁺ (volt) MAO işlemine tabi tutulmuş 6082 kalite Al alaşımı numunelerin kesit morfolojilerine ait taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Şekil 7.13’de gösterilmektedir.

300 V uygulanan 6082 kalite Al alaşımı numunelerin kesit morfolojileri değerlendirildiğinde, CNT ilavesiz 1 ve 2 dakikalık mikro ark oksidasyon işlemlerinde elde edilen oksit tabakaları ile altlık 6082 Al alaşımları ara yüzeylerinde süreksizlikler görülmekteyken; 5 ve 10 dakikalık mikro ark oksidasyon işlemlerinde bu süreksizlikler görülmemektedir. Süreksizliklerin olması yapışma dayanımının kötü olduğunun göstergesi olabilir. Elektrolite 2 g/L CNT ilave edilerek yapılan farklı sürelerdeki MAO işlemlerinin hiçbirinde oksit tabakaları ile altlık 6082 Al alaşımları ara yüzeylerinde süreksizlikler görülmemektedir. Ayrıca CNT ilavesiz MAO işlemleriyle kıyaslandığında, daha kompakt ve az porozlu bir yapının olduğu

söylenbilir. Elektrolite 4 g/L CNT ilave edilerek yapılan farklı sürelerdeki MAO işlemlerinin kesit morfolojilerindeki süreksizlik durumu CNT ilavesiz yapılan MAO işlemlerine çok benzerlik göstermektedir. Ancak kesit yapısının diğer yapılara kıyasla daha sık ve az porozlu bir yapıya sahip olduğu söylenbilir. Bunlara ilaveten, CNT katkıli MAO işlemleriyle elde edilen oksit kaplamalara ait kesit morfolojilerinin bazılarında dalgalı yapı göze çarpmaktadır. Elektrolite CNT ilavesi yapılınsın yada yapılmınsın MAO işlemine tabi tüm numunelerde artan süreyle birlikte kaplama kalınlıklarının arttığı rahat bir şekilde görülmektedir.

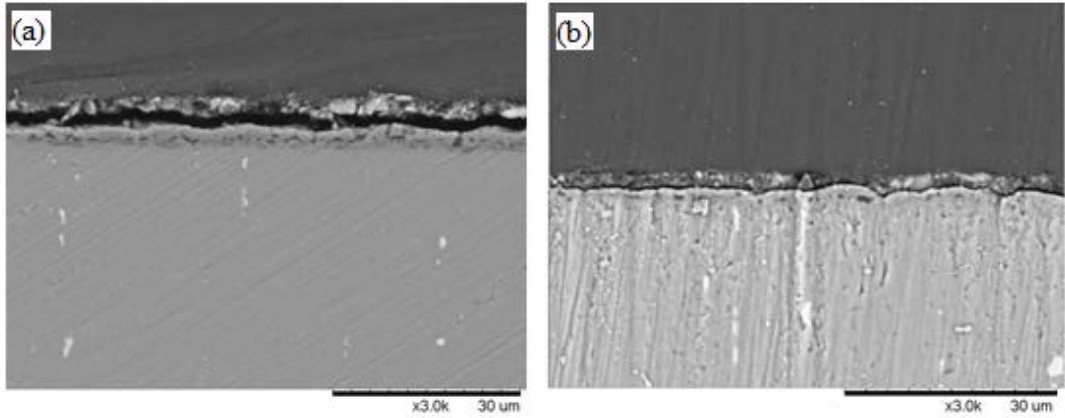


Şekil 7.13 : (a) 300 V, (b) 300 V; 2 g/L CNT, (c) 300 V; 4 g/L CNT, 10 dakika MAO işlemine tabi kaplamaların kesitlerinin SEM görüntüleri.

1 dakika boyunca CNT ilavesiz/ilaveli 400 V⁺ (volt) MAO işlemine tabi tutulmuş 6082 kalite Al alaşımı numunelerin kesit morfolojilerine ait taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Şekil 7.14’de gösterilmektedir.

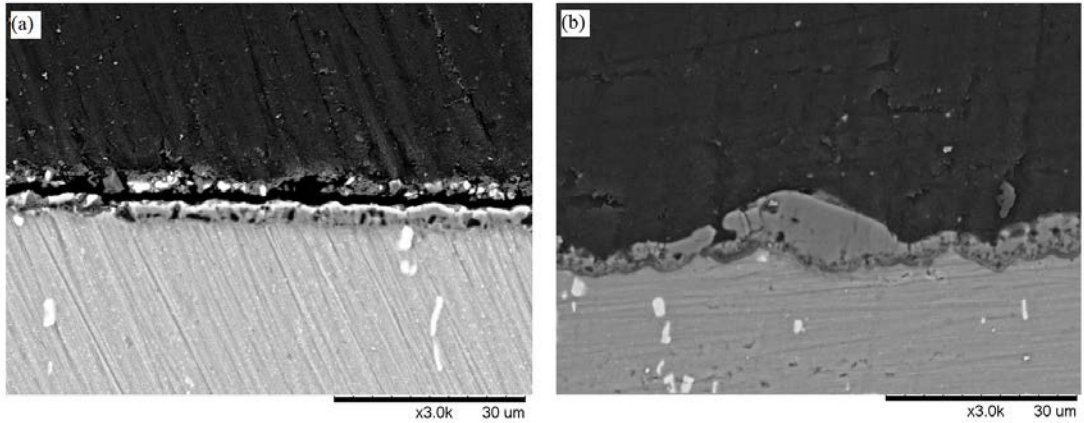
400 V uygulanmış MAO kaplamaların kesit morfolojilerine ait SEM görüntüleri değerlendirildiğinde, hem CNT ilavesiz yapılan MAO işlemlerinde hem de CNT ilave edilerek yapılan MAO işlemlerinde kaplama yapısında süreksizlikler görülmemektedir. Ayrıca, kalınlık olarak da CNT ilavesinin etkisi çok az olmuştur.

Ancak CNT ilavesiyle daha dalgalı dolayısıyla kaplama kalınlığı bakımından daha az homojen bir yapı mevcuttur.



Şekil 7.14 (a) 400 V, (b) 400 V; 2 g/L CNT, 1 dakika MAO işlemine tabi kaplamaların kesit morfolojilerine ait SEM görüntüleri.

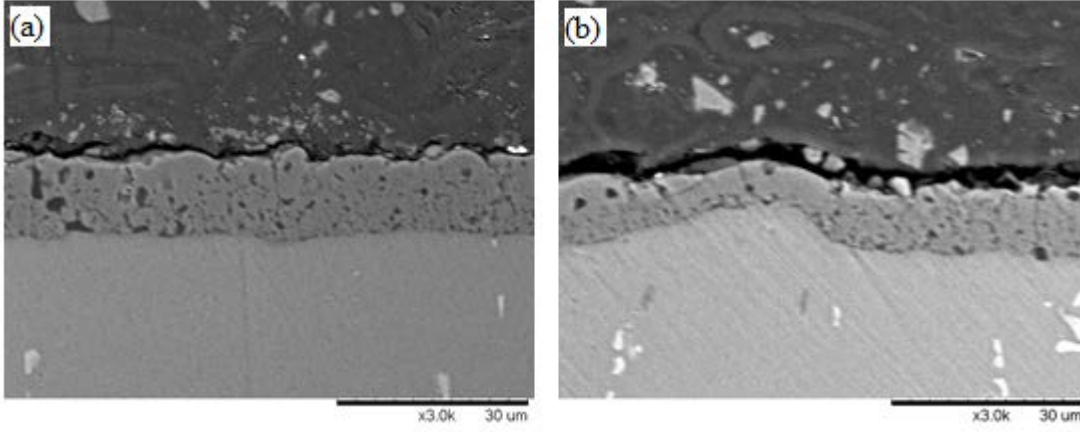
2 dakika boyunca CNT ilavesiz/ilaveli 400 V⁺ (volt) MAO işlemine tabi tutulmuş 6082 kalite Al alaşımı numunelerin kesit morfolojilerine ait taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Şekil 7.15’de gösterilmektedir.



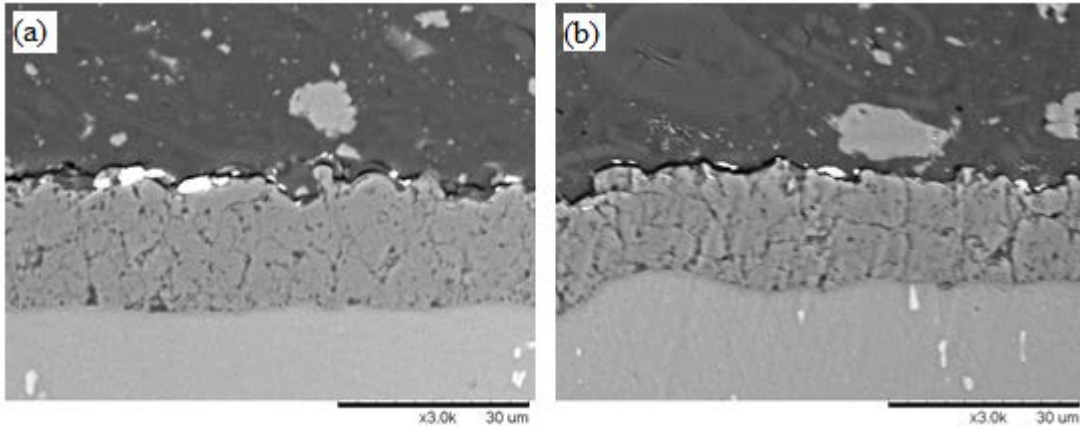
Şekil 7.15 (a) 400 V, (b) 400 V; 2 g/L CNT, 2 dakika MAO işlemine tabi kaplamaların kesit morfolojilerine ait SEM görüntüleri.

5 dakika boyunca CNT ilavesiz/ilaveli 400 V⁺ (volt) MAO işlemine tabi tutulmuş 6082 kalite Al alaşımı numunelerin kesit morfolojilerine ait taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Şekil 7.16’da gösterilmektedir.

10 dakika boyunca CNT ilavesiz/ilaveli 400 V⁺ (volt) MAO işlemine tabi tutulmuş 6082 kalite Al alaşımı numunelerin kesit morfolojilerine ait taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Şekil 7.17’de gösterilmektedir.



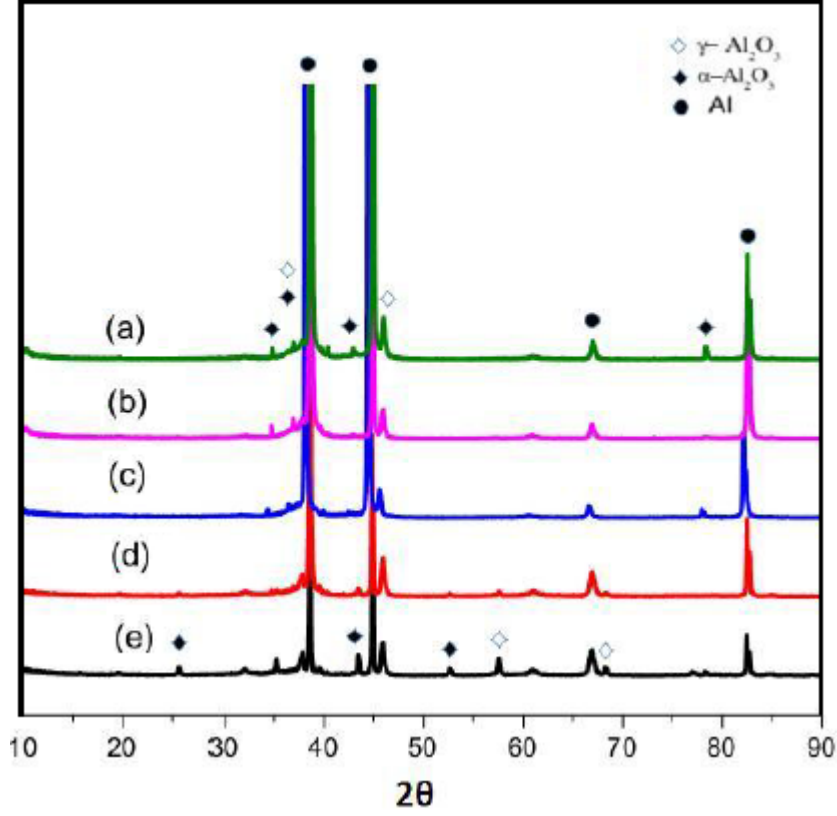
Şekil 7.16 (a) 400 V, (b) 400 V; 2 g/L CNT, 5 dakika MAO işlemine tabi kaplamaların kesit morfolojilerine ait SEM görüntüleri.



Şekil 7.17 (a) 400 V, (b) 400 V; 2 g/L CNT, 10 dakika MAO işlemine tabi kaplamaların kesit morfolojilerine ait SEM görüntüleri.

7.3 XRD Analizleri

Karbon nanotüp ilavesiz ve ilaveli alüminat esaslı elektrolitlerde mikro ark oksidasyon işlemi uygulanan numunelerin yapısal karakterizasyonu XRD analizleri ile oksit tabakaların faz kompozisyonunun kalitatif (nitel) olarak belirlenmesi şeklinde yapılmıştır. Xue ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmaya paralel olarak, artan MAO işlem süreyle birlikte kaplamaların faz içerikleri neredeyse değişmemiştir [38]. Bu doğrultuda, sadece MAO işlem süresi 10 dakika uygulanan, farklı voltaj ve CNT miktarları ilave edilerek ya da edmeden yapılan oksidasyon işlemine bağlı olarak elde edilen XRD paternleri Şekil 7.18’de gösterilmiştir.



Şekil 7.18 : (a) 300 V, (b) 300 V; 2 g/L CNT, (c) 300 V; 4 g/L CNT, (d) 400 V, (e) 400 V; 2 g/L CNT, MAO kaplamalara ait XRD paternleri.

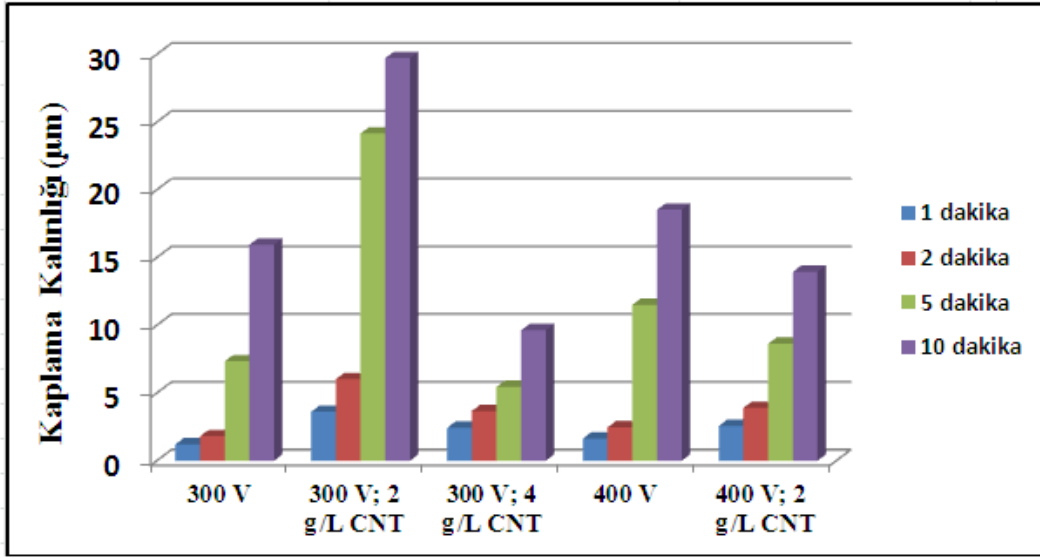
Yapılan XRD incelemelerinde uygulanan farklı voltaj değerlerine göre farklı faz yapılarının oluştuğu gözlemlenmektedir. Genel olarak oluşan oksit film tabakasına hakim fazlar α - Al_2O_3 ve γ - Al_2O_3 fazlarıdır. İşlem parametrelerinin değiştirilmesiyle oksit tabakasındaki fazların pik şiddetlerinde çok az farklılık gözlemlenmektedir. Aynı şekilde fazların oranlarında da çok fazla değişiklik olmamıştır. Fazların oranlarındaki değişiklik, Xue ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada bildirildiği üzere, MAO işlemi sırasında malzeme yüzeyinde ve içersinde meydana gelen farklı soğuma hızlarıdır. Soğuma hızının yüksek olduğu dış yüzeyde yarı kararlı γ - Al_2O_3 fazı hakimken, soğuma hızının düşük olduğu iç yüzeylerde kararlı ve daha sert α - Al_2O_3 fazı hakimdir [38].

Gerek elektrolite yapılan CNT ilavesi ile yapılan MAO işleminde, gerek elektrolite CNT ilavesi yapılmadan gerçekleştirilen MAO işlemleri için elde edilen XRD paternlerinde karbon bulunamamıştır. Bu çalışmaya benzer olarak, Lv ve arkadaşları tarafından elektrolite grafit katılarak yapılan MAO işleminde elde edilen XRD paternlerinde grafitte rastlanmamış ve bu durum grafitin kaplama içerisindeki dağılımının homojen olmamasından kaynaklı olabileceği belirtilmiştir [34]. Bu

çalışmada da karbonun XRD paternlerinde bulunmaması CNT'nin kaplama içerisinde homojen dağılmamasına bağlanmaktadır.

7.4 Kaplama Kalınlığı Ölçümleri

Karbon nanotüp ilavesiz / ilaveli alüminat esaslı elektrolitlerde mikro ark oksidasyon işlemi uygulanan numunelerin kaplama kalınlığı değerleri Şekil 7.19'da verilmiştir.



Şekil 7.19 : CNT ilaveli ve CNT ilavesiz alüminat elektrolitlerde MAO işlemi uygulanan numunelerin kaplama kalınlığı değerleri.

Şekil 7.19'da görüldüğü gibi kaplama kalınlığı en fazla 300 V uygulanarak ve elektrolite 2 g/L CNT katılarak yapılan mikro ark oksidasyon işleminde elde edilmişken, en az kaplama kalınlığı 300 V uygulanarak ve elektrolite 4 g/L CNT katılarak yapılan mikro ark oksidasyon işleminde elde edilmiştir. 300 V altında farklı karbon nanotüp miktarlarında kaplama kalınlığı farklı çıkmaktadır. Bu durumun sebebinin, belirli bir miktara kadar karbon nanotüpün kaplama kalınlığını arttırdığı, belirli bir miktardan sonra ise karbon nanotüpün elektrolit içerisinde daha fazla topaklanmalara sebep olarak kaplama kalınlığını düşürdüğü tahmin edilmektedir. Lee ve arkadaşlarının Al-7075 alaşımının elektrolite CNT katkısı yaparak gerçekleştirdikleri MAO işleminde karbon nanotüplerin elektroforetik olarak anoda gittikleri söylenmektedir [33]. Elektroforetik ortamın oldukça yavaş bir ortam olduğu göz önünde bulundurulursa, anoda gittiği düşünülen karbon nanotüplerin bu topaklanmalara bağlı olarak anoda gitme hızının düştüğü, daha az gittiği düşünülmekte ve dolayısıyla kaplama kalınlığı düşmektedir.

400 V uygulanarak ve elektrolite karbon nanotüp ilavesi yapılarak ya da yapılmadan 10 dakika gerçekleştirilen MAO işlemleri kıyaslandığında; elektrolite 2 g/L CNT ilavesi kalınlığı azaltmıştır. Bu duruma benzer olarak, Gao ve Shao tarafından yapılan benzer çalışmada, LY12 alüminyum alaşımının mikro ark oksidasyonunda elektrolite 2 g/L grafit katılarak elde edilen kalınlık, elektrolite grafit katılmadan yapılan MAO işlemine kıyasla daha az bulunmuştur [36].

Xue ve arkadaşları tarafından 2024 Al alaşımları için yapılan çalışmada artan MAO işlem süresiyle birlikte kaplama kalınlığının da arttığı görülmüştür [38]. Bu çalışmada da, Xue ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmaya paralel olarak, artan MAO işlem süresiyle kaplama kalınlıkları da artmıştır.

Elektrolite karbon nanotüp ilavesi yapılmadan gerçekleştirilen mikro ark oksidasyon işleminde ise, her iki farklı voltaj için elde edilen kaplama kalınlıkları kıyaslandığında, kaplama kalınlıklarının uygulanan tüm süreler için çok fazla farklı olmadığı görülmektedir. MAO için uygulanan süreler göz önüne alındığında voltajın kaplama kalınlığı üzerinde düşük sürelerde çok etkili olmadığı söylenebilir.

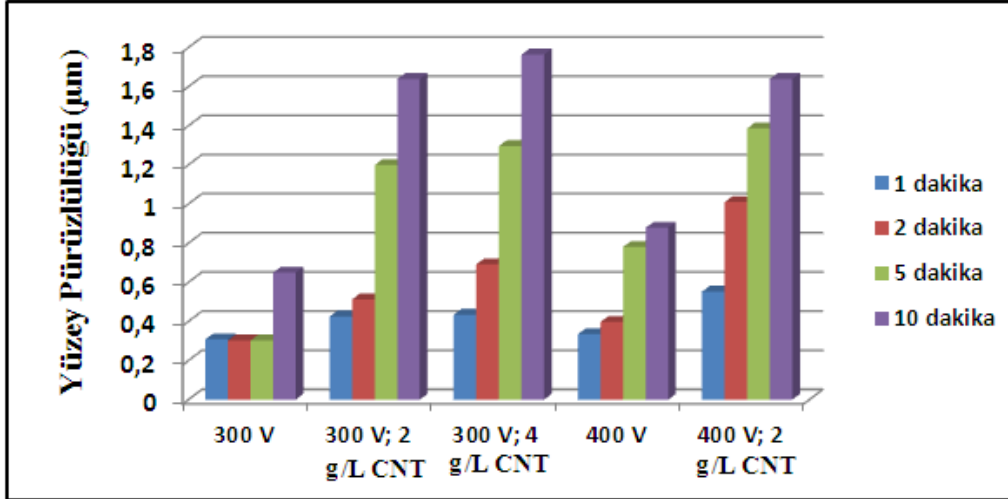
7.5 Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri

Karbon nanotüp ilavesiz ve ilaveli alüminat esaslı elektrolitlerde mikro ark oksidasyon işlemi uygulanan numunelerin yüzey pürüzlülüğü değerleri Şekil 7.20'de verilmiştir.

Şekil 7.20'de görüldüğü gibi yüzey pürüzlülüğü en fazla 300 V uygulanarak ve elektrolite 4 g/L CNT katılarak yapılan mikro ark oksidasyon işleminde elde edilmişken, en az yüzey pürüzlülüğü 300 V uygulanarak yapılan mikro ark oksidasyon işleminde elde edilmiştir.

Jin ve arkadaşları LY12 alüminyum alaşımına yaptıkları mikro ark oksidasyonda artan kaplama kalınlığı ile yüzey pürüzlülüğünün de arttığını görmüşlerdir [39]. Bu çalışmada, tamamen aynı şartlar altında yapılan MAO işlemlerinde Jin ve arkadaşlarının yaptığı çalışmaya paralel olarak artan kaplama kalınlığıyla neredeyse tüm MAO işlemlerinde yüzey pürüzlülüğü artmıştır. Ancak elektrolite karbon nanotüp ilavesi yapılarak elde edilen pürüzlülük ve kalınlık sonuçları değerlendirildiğinde, önceki duruma zıt olabilecek bulgular elde edilmiştir. Örneğin; 300 V uygulanarak ve elektrolite 2 g/L CNT ilave edilerek yapılan MAO işleminde

normal CNT ilavesize göre kaplama kalınlığı ile beraber yüzey pürüzlülüğü de artmışken; 300 V uygulanarak ve elektrolite 4 g/L CNT ilave edilerek yapılan MAO işleminde 2 g/L CNT ilaveliye göre kaplama kalınlığı azalırken yüzey pürüzlülüğü artmıştır.



Şekil 7.20 : CNT ilaveli ve CNT ilavesiz alüminat elektrolitlerde MAO işlemi uygulanan numunelerin yüzey pürüzlülüğü değerleri.

Benzer çalışma olarak, Gao ve arkadaşları tarafından LY12 alüminyum alaşımlarının grafit katkılı elektrolitte MAO işlemiyle elde edilen pürüzlülük sonuçlarında grafit katkısı yüzey pürüzlülüğünü artırmıştır [36]. Bu çalışmada, Gao ve arkadaşlarının yaptığı çalışmaya paralel olarak aynı şartlar altında yapılan mikro ark oksidasyon işlemlerinde CNT takviyesi yüzey pürüzlülüğünü artırmıştır.

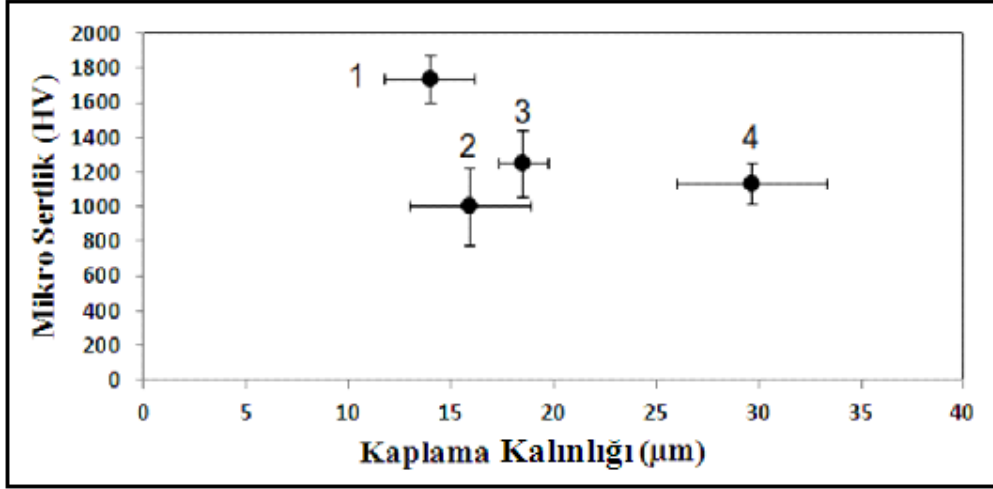
7.6 Mikro Sertlik Ölçümleri

Karbon nanotüp ilavesiz ve ilaveli alüminat esaslı elektrolitlerde mikro ark oksidasyon işlemi uygulanan numunelerin mikro sertlikleri; kesit boyunca oksit tabakasının birkaç yerinden ölçüm alınarak yapılmış olup, tüm sertlik ölçümleri 25 g'lık yük altında gerçekleştirilmiştir.

Karbon nanotüp ilaveli ve ilavesiz alüminat elektrolitlerde farklı voltajlarda 10 dakika MAO işlemi uygulanan numunelerin mikro sertlik-kaplama kalınlığı grafiği Şekil 7.21'de gösterilmektedir.

Şekil 7.21 irdelendiğinde, 300 V ve elektrolite CNT ilave edilmeden gerçekleştirilen MAO işlemi ile; 400 V uygulanarak elektrolite CNT ilave edilerek gerçekleştirilen

MAO işleminde voltajın kalınlık üzerinde pek fazla etkili olmadığı, düşük voltajda nispeten daha fazla kalınlık elde edildiği görülmektedir.



Şekil 7.21 : 1) 400 V; 2 g/L CNT, 2) 300 V, 3) 400 V, 4) 300 V; 2 g/L CNT, mikro sertlik-kaplama kalınlığı grafiği.

Ancak mikro sertlikler farklılık göstermektedir. Bu farklılığın kaplama yapısında oluşan fazlara ve CNT'ye bağlı olduğu düşünülmektedir.

Mikro sertlik için kullanılan oksit (Al_2O_3) kaplamaların kalınlıkları ve bu kalınlıkların hangi voltajlarda yapıldıkları Çizelge 7.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 7.1 : 10 dakika MAO işlemi uygulanmış farklı voltajlardaki kaplama kalınlıklarının mikro sertlik için kullanılan değerleri.

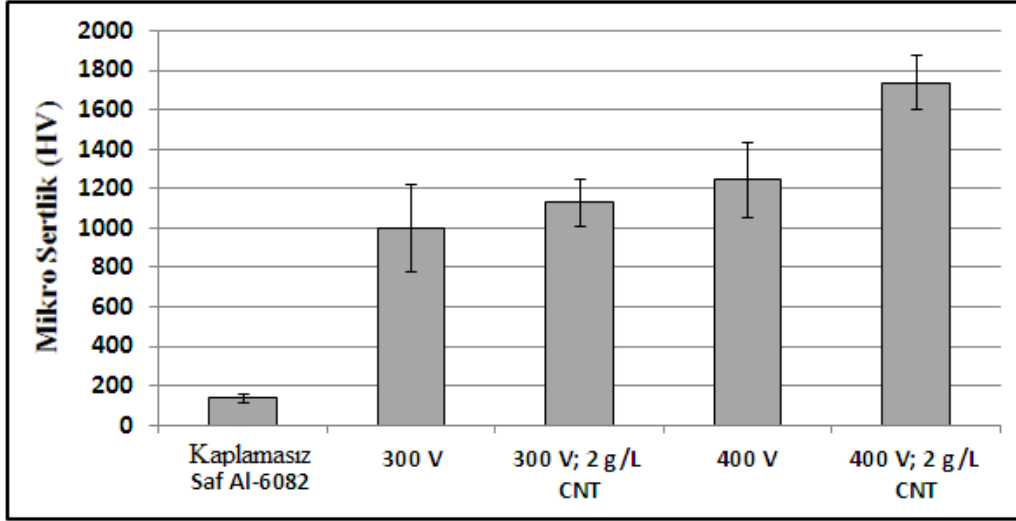
V ⁺ (volt)	Kaplama Kalınlıkları (µm)	MAO işlemi sırasında elektrolitteki CNT miktarı
300	15.95	-
300	29.72	2 g/L CNT
400	18.53	-
400	13.95	2 g/L CNT

Karbon nanotüp ilavesiz ve ilaveli alüminat esaslı elektrolitlerde farklı voltajlarda 10 dakika mikro ark oksidasyon işlemi uygulanan numunelerin mikro sertlik değerleri Şekil 7.22'de verilmiştir.

Mikro ark oksidasyon işlemi uygulanan alüminyum alaşımı numunelerin, MAO işlemi uygulanmayan saf Al-6082 alaşımına kıyasla mikro sertliklerinin bir hayli yüksek olduğu görülmektedir.

300 V uygulanarak ve elektrolite karbon nanotüp ilavesi yapılarak ya da yapılmadan 10 dakika gerçekleştirilen MAO işlemleri kıyaslandığında; elektrolite 2 g/L CNT

ilavesinin kalınlıkla beraber, mikro sertliği de artırdığı grlmŖtr. Bu durum, Jin ve arkadaşları tarafından LY2 alaŖımlarının mikro ark oksidasyonunda elektrolite Fe tanecikleri katılarak yapılan alıŖmada yüksek kalınlığa sahip kaplamada yüksek mikro sertlik elde edilen duruma paralellik göstermektedir [39].



Ŗekil 7.22 : Kaplamasız saf Al-6082 alaŖımının ve CNT ilaveli / ilavesiz MAO iŖlemi uygulanan numunelerin mikro sertlik değerleri.

400 V uygulanarak ve elektrolite karbon nanotüp ilavesi yapılarak ya da yapılmadan 10 dakika gerekleŖtirilen MAO iŖlemleri kıyaslandığında; elektrolite 2 g/L CNT ilavesi kalınlığı azaltırken, mikro sertliği artırmıŖtır.

7.7 AŖınma Testleri

AŖınma testi için seçilen numuneler, MAO kaplamasız saf alüminyum ve farklı voltajlarda 10 dakika MAO iŖlemine tabi tutulmuŖ elektrolite CNT ilavesi yapılarak ya da yapılmadan elde edilen numunelerdir.

AŖınma alanlarının hesaplanması, EŖitlik 6.1’de verilen bağıntı kullanılarak, aŖınma iz geniŖliđi (G) ve aŖınma iz derinliği (D)’ne bağlı olarak elde edilmiŖtir. AŖınma izi geniŖliđi ve aŖınma izi derinliği değerleri, aŖınma izinin farklı noktalarından alınarak, ortalama olarak verilmiŖtir. Tüm numunelerin aŖınma izi uzunluğu (L) aynı olduğundan, aŖınma hacminin yerine aŖınma alanı yazılmıŖtır.

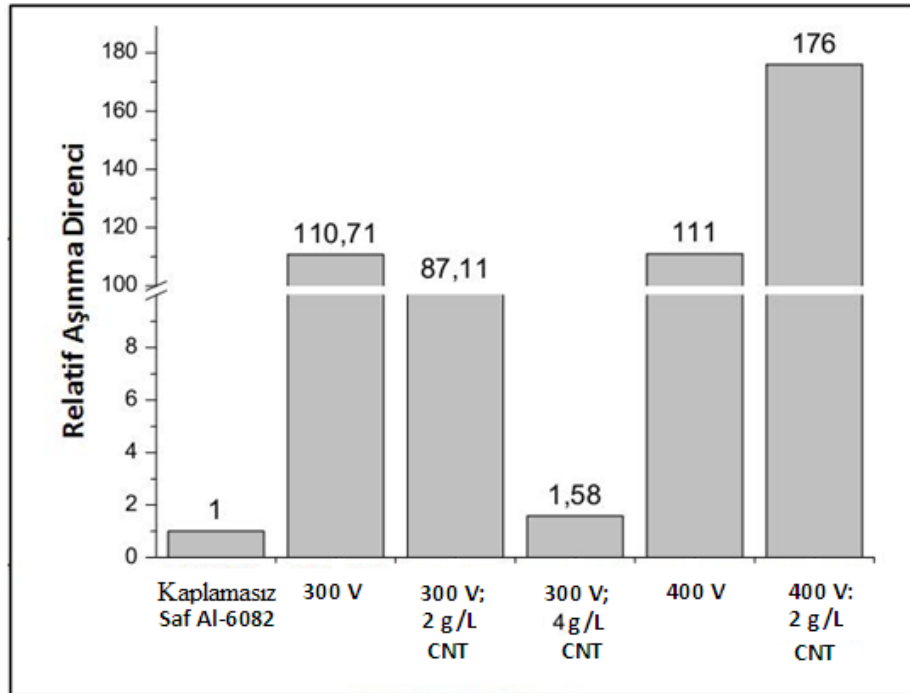
Çizelge 7.2’de kaplamasız saf Al-6082 ve 10 dakika MAO iŖlemine tabi numunelerin ortalama iz geniŖliđi, ortalama iz derinliği ve aŖınma alanlarının değerleri gösterilmektedir.

Şekil 7.23’de aşınma testine tabi numunelerin relatif aşınma dirençleri karşılaştırılmıştır. Relatif aşınma dirençleri hesaplanırken, aşınma alanı en fazla olan numune referans olarak alınmıştır.

Çizelge 7.2 : Kaplamasız saf Al-6082 ve 10 dakika MAO işlemine tabi numunelerin ortalama iz genişliği, ortalama iz derinliği ve aşınma alanlarının değerleri.

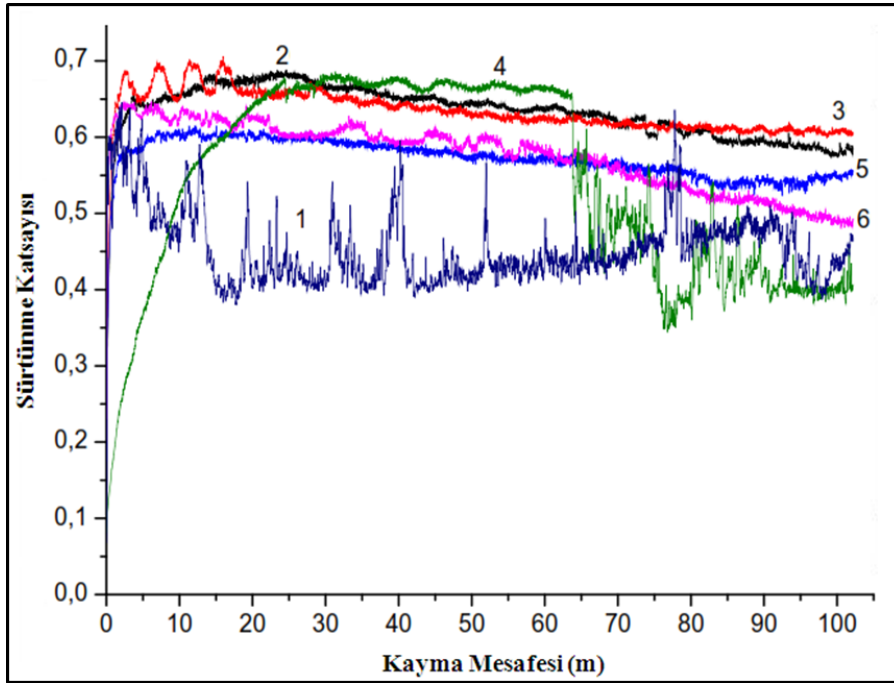
Numune, V	G	D	A
	Aşınma izi genişliği (μm)	Aşınma izi derinliği (μm)	Aşınma alanı (μm^2)
Kaplamasız saf Al-6082	1846.6 (± 31.5)	129.97 (± 4.78)	239999.6
300 V	868 (± 41.29)	2.5 (± 0.9)	2167.97
300 V 2 g/L CNT	858.72 (± 75.84)	3.21 (± 0.87)	2755.14
300 V 4 g/L CNT	1705.75 (± 50.6)	91.28 (± 12.59)	155698.94
400 V	805 (± 41.11)	2.69 (± 0.74)	2164.02
400 V 2 g/L CNT	708 (± 55.96)	1,93 (± 0.37)	1364.09

Çizelge 7.2’de de görüldüğü gibi MAO işlemi görmemiş numune, MAO işlemi uygulanan numunelere kıyasla daha fazla aşınma alanına sahiptir. Daha yüksek aşınma alanı, relatif aşınma direncinin daha düşük olduğunu gösterir.



Şekil 7.23 : Kaplamasız saf Al-6082 alaşımı ile farklı şartlarda 10 dakika MAO işlemi uygulanan numunelerin relatif aşınma dirençlerinin karşılaştırılması.

Burada relatif aşınma oranları hesaplanırken MAO uygulanmamış saf Al-6082 numunesi aşınma iz alanı referans olarak alınmış ve MAO uygulanmış numunelerin aşınma alanları buna göre relatif olarak kıyaslanmıştır. Buna göre, MAO işlemsiz numunenin relatif aşınma direnci 1 olmaktadır. Kaplamalar arasında kıyaslama yapılacak olursa kaplama kalınlığı diğer kaplamalara göre düşük olan, 300 V uygulanarak ve elektrolite 4 g/L karbon nanotüp ilavesi yapılarak elde edilen, kaplamanın en düşük relatif aşınma oranına sahip olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, aşınmada kullanılan Si_3N_4 bilyanın kaplama tabakasını delerek altlık malzemeye temas ederek orayı aşındırmasından kaynaklanmaktadır. Bu durum aşınma testine tabi tutulan tüm numunelere ait sürtünme katsayısı-kayma mesafesi (m) grafiğinden rahat bir şekilde görünmektedir (Şekil 7.24).



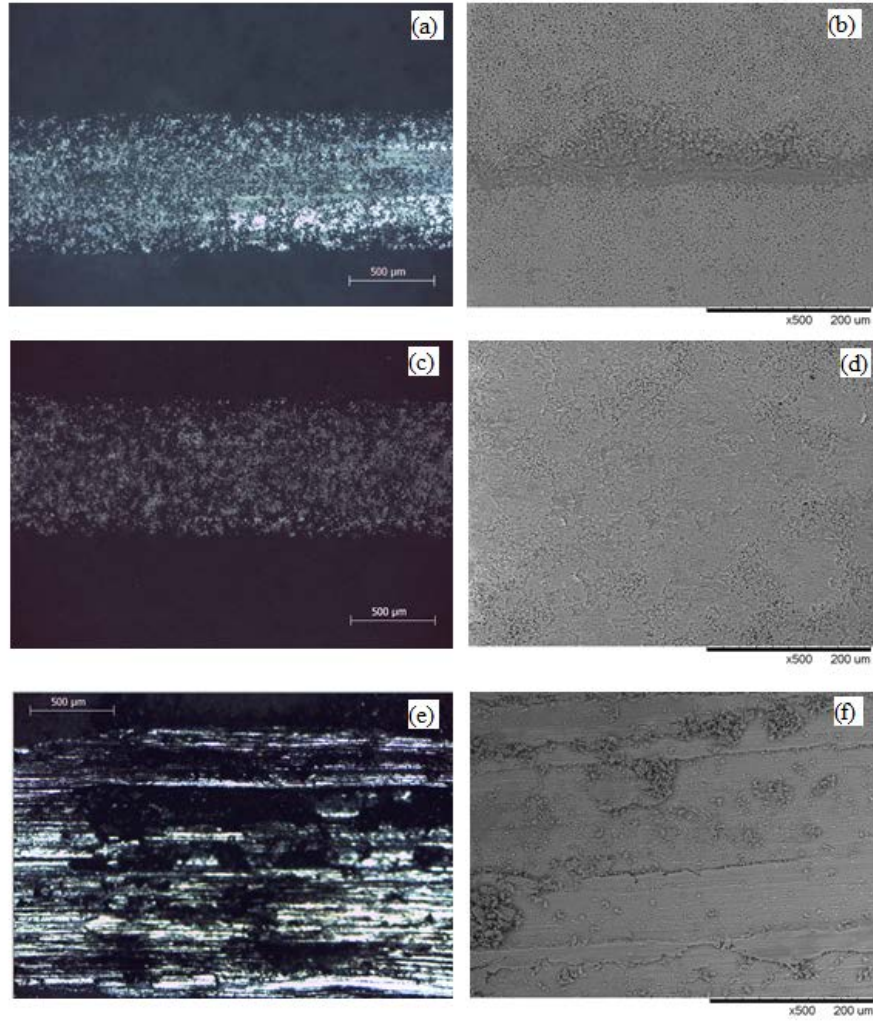
Şekil 7.24 : 1) Kaplamasız Saf 6082 Al, 2) 300 V, 3) 300 V; 2 g/L CNT, 4) 300 V; 4 g/L CNT, 5) 400 V, 6) 400 V; 2 g/L CNT, sürtünme katsayıları.

Aynı voltaj altında MAO işlemi uygulanan kaplamalar için CNT takviyesinin sürtünme katsayısı üzerinde çok fazla etkili olmadığı söylenebilir. Ancak yüksek voltajda CNT takviyesi yapılarak yada yapılmadan elde edilen kaplamalarda sürtünme katsayısının daha düşük olduğu görülmektedir.

Mu ve arkadaşları alüminyum alaşımları gibi hafif metal alaşımları grubundan olan titanyum alaşımı olan Ti-6Al-4V alaşımına elektrolite grafit katkısı yaparak yada yapmayarak gerçekleştirdikleri MAO işleminde, kaplamasız Ti-6Al-4V alaşımının normal elektrolit ortamında MAO işlemi uygulanmış alaşıma göre daha az sürtünme

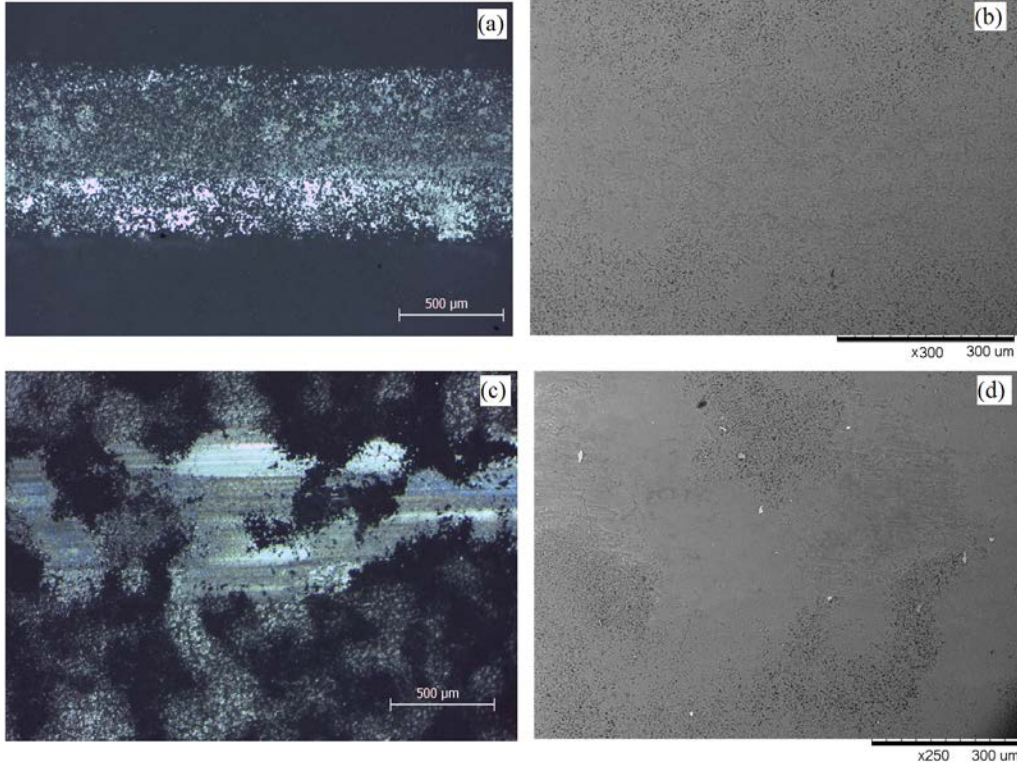
katsayısına sahip olduğunu; ancak elektrolite grafit katkısıyla yapılan MAO işlemiyle sürtünme katsayısının hem kaplamasız göre hemde normal elektrolitte kaplanmış numuneye göre sürtünme katsayısının azaldığını görmüşlerdir. Sürtünme katsayısındaki azalma grafitin yağlayıcı etkisine bağlanmıştır [40]. Mu ve arkadaşlarının yaptığı çalışmanın aksine, bu çalışmada elektrolite CNT ilavesi ile yapılan MAO işleminde sürtünme katsayısı normal CNT ilavesiz yapılan MAO işleminde neredeyse değişmemiştir. Bu durum karbon nanotüpün grafit gibi yağlayıcı etkisi olmadığını göstergesi olarak yorumlanabilir.

Şekil 7.25’de kaplamasız saf Al-6082 ve 10 dakika 300 V uygulanmış MAO işlemine tabi numunelerin aşınma izlerinin optik mikroskop ve SEM görüntüleri verilmiştir.



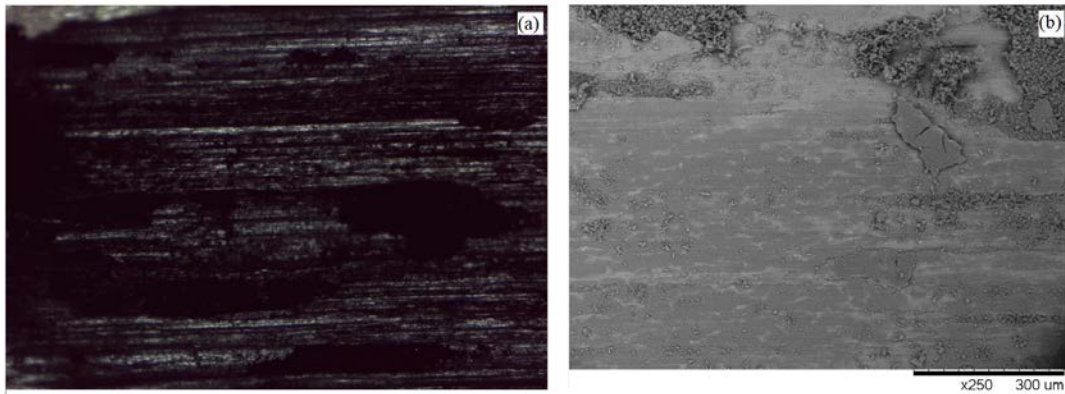
Şekil 7.25 : 10 dakika MAO işlemine tabi numunelerin aşınma izlerinin (a) 300 V, (c) 300 V; 2 g/L CNT, (e) 300 V; 4 g/L CNT optik mikroskop görüntüleri, (b) 300 V, (d) 300 V; 2 g/L CNT, (f) 300 V; 4 g/L CNT SEM görüntüleri.

Şekil 7.26'da kaplamasız saf Al-6082 ve 10 dakika 400 V uygulanmış MAO işlemine tabi numunelerin aşınma izlerinin optik mikroskop ve SEM görüntüleri verilmiştir.



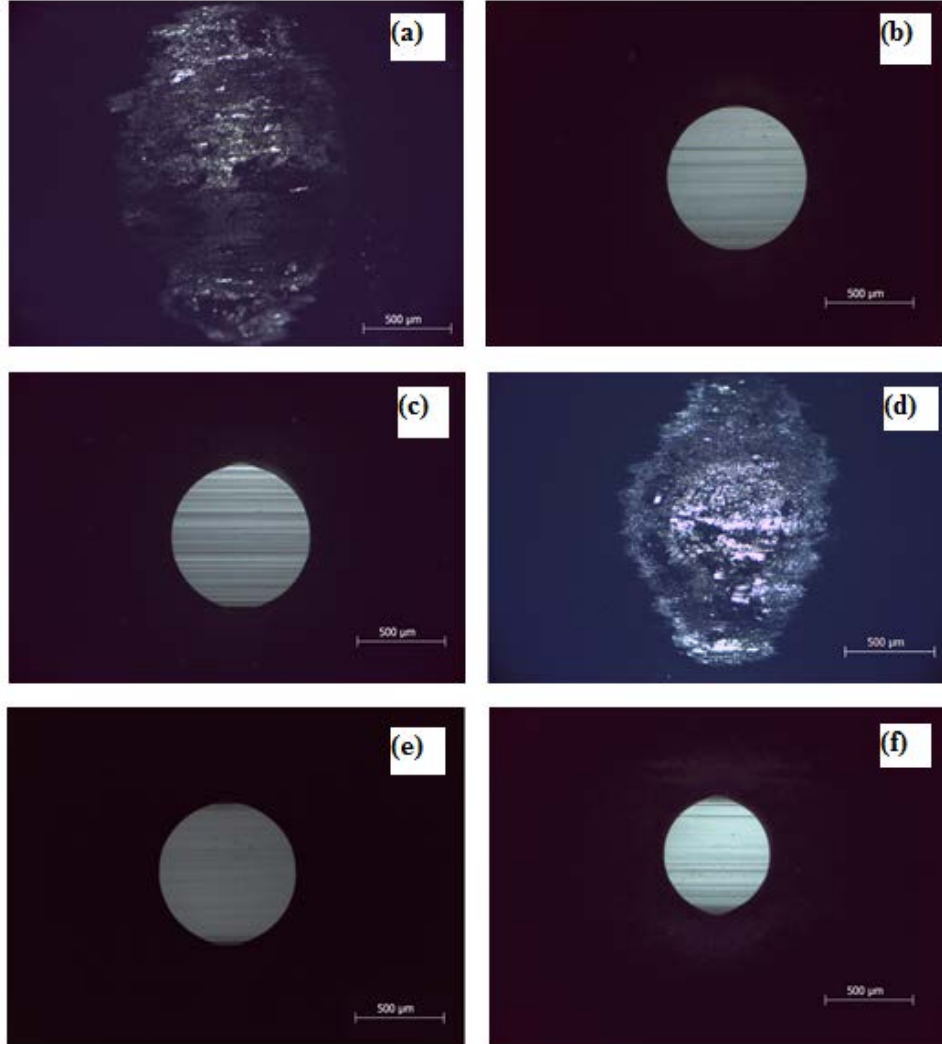
Şekil 7.26 : 10 dakika MAO işlemine tabi numunelerin aşınma izlerinin (a) 400 V, (c) 400 V; 2 g/L CNT, optik mikroskop görüntüleri, (b) 400 V, (d) 400V; 2 g/L CNT, SEM görüntüleri.

Şekil 7.27'de kaplamasız saf Al-6082 numunenin aşınma izlerinin optik mikroskop ve SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 7.27 : Kaplamasız saf Al-6082 alaşımı numunenin aşınma izlerinin (a) optik mikroskop görüntüleri, (b) SEM görüntüleri.

Karbon nanotüp ilavesiz ve ilaveli alüminat esaslı elektrolitlerde 10 dakika mikro ark oksidasyon işlemi uygulanan numuneler ile kaplamasız saf Al-6082 alaşımı numunenin bilya aşınma izlerini gösteren optik mikroskop görüntüleri Şekil 7.28’de verilmiştir.



Şekil 7.28 : (a) Kaplamasız saf Al-6082, (b) 300 V, (c) 300 V; 2 g/L CNT, (d) 300V; 4 g/L CNT, (b) 400 V, (c) 400 V; 2 g/L CNT, numunelerin bilya aşınma izlerinin optik mikroskop görüntüleri.

Şekil 7.28’de görüleceği üzere, kaplamasız saf Al-6082 ve elektrolite 4 g/L CNT ilave edilerek 300 V altında MAO işlemi uygulanan numunede silisyum nitür (Si_3N_4) bilya kaplama yüzeyini aşındırmış, ısınmaya da bağlı olarak plastik deformasyon meydana getirerek hem abrasif hem de adhezif aşınma meydana getirmiştir. Diğer numunelerde ise silisyum nitür (Si_3N_4) bilyanın yüzeylerinin temiz olduğu görülmekle birlikte aşınma çizgileride mevcuttur. Si_3N_4 bilyanın aşınma davranışına bakıldığında abrasif aşınmaların meydana geldiği söylenebilir.

7.8 Zeta Potansiyel Ölçümleri

Karbon nanotüplerin elektrolit içerisinde statik olarak ne kadar yüklendikleri zeta potansiyel ölçümleri ile 10 ölçüm yapılarak tayin edilmiş, ortalama $-19.7 (\pm 4.1)$ mV olarak bulunmuştur.

8. GENEL SONUÇLAR

6082 alüminyum alaşımına $\text{NaAlO}_2 + \text{KOH}$ çözeltisi içerisinde farklı voltaj, farklı süre, farklı CNT miktarlarında mikro ark oksidasyona tabi tutulmuş ve elde edilen oksit (Al_2O_3) kaplamalarına işlem parametrelerinin etkileri aşağıda sıralanmıştır:

1. Elektrolite CNT ilavesi yapılarak değişik sürelerde ve değişik voltajlarda MAO işlemi uygulanmış numunelerde, farklı özelliklerde oksit tabakası oluştuğu gözlemlenmiştir.
2. 300 V altında 2 g/L CNT takviyesi yapılarak gerçekleştirilen MAO işleminde, aynı voltaj altında CNT takviyesi yapılmadan gerçekleştirilen MAO işlemine kıyasla por boyutu artmasına rağmen daha kompakt bir yapı oluşmuştur. 300 V altında 4 g/L CNT takviyesi yapılarak gerçekleştirilen MAO işleminde, aynı voltaj altında 2 g/L CNT takviyesi yapılarak gerçekleştirilen MAO işlemine kıyasla por boyutu neredeyse değişmemiş ancak porozite yoğunluğu azalmıştır.
3. 400 V altında 2 g/L CNT takviyesi yapılarak gerçekleştirilen MAO işleminde, aynı voltaj altında CNT takviyesi yapılmadan gerçekleştirilen MAO işlemine kıyasla por sayısının nispeten azaldığı, por boyutunun değişmediği ve porozite yüzdesinin azaldığı görülmüştür.
4. Genel olarak, 300 V altında 2 g/L CNT takviyesi yapılarak gerçekleştirilen MAO işleminde, aynı voltaj altında CNT takviyesi yapılmadan gerçekleştirilen MAO işlemine kıyasla kaplama kalınlığı artmışken; 300 V altında 4 g/L CNT takviyesi yapılarak gerçekleştirilen MAO işleminde, aynı voltaj altında 2 g/L CNT takviyesi yapılarak ya da CNT takviyesi yapılmadan gerçekleştirilen MAO işlemine kıyasla kaplama kalınlığı azalmıştır.
5. 400 V altında 2 g/L CNT takviyesi yapılarak gerçekleştirilen MAO işleminde, aynı voltaj altında CNT takviyesi yapılmadan gerçekleştirilen MAO işlemine kıyasla kaplama kalınlığı çok fazla değişiklik göstermemiştir.

6. Aynı şartlar altında farklı sürelerde MAO işlemiyle elde edilen tüm kaplamalarda artan süreyle birlikte kaplama kalınlığı da artmıştır.
7. Aynı voltaj altında, artan süreyle ve CNT ilavesiyle genel olarak pürüzlülük değerleri artış göstermiştir.
8. Yapılan XRD analizlerinde hem CNT ilavesi yapılarak gerçekleştirilen MAO işlemlerinde, hem de CNT ilavesiz yapılan MAO işlemlerinde α -Al₂O₃ ve γ -Al₂O₃ fazları görülmüş, ancak fazların pik şiddetlerinde ve sayılarında değişiklikler olmuştur.
9. Yapılan mikro sertlik ölçümlerinde hem düşük voltajda hem de yüksek voltajda yapılan MAO işlemlerinde 2 g/L CNT ilavesinin mikro sertliği arttırdığı görülmüştür. Buna ek olarak artan voltajla beraber mikro sertlik artmıştır.
10. 300 V uygulanarak yapılan MAO işlemi ile 400 V uygulanarak yapılan MAO işleminde relatif aşınma dirençleri yaklaşık olarak aynı çıkmıştır. 300 V ve elektrolite 2 g/L CNT katılarak gerçekleştirilen MAO işleminde, CNT katkısı normal 300 V uygulanarak yapılan MAO işlemine kıyasla relatif aşınma direncini düşürürken; 400 V ve elektrolite 2 g/L CNT katılarak gerçekleştirilen MAO işleminde, CNT katkısı normal 400 V uygulanarak yapılan MAO işlemine kıyasla relatif aşınma direncini artırmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Walsh, F.C., Low, C.T.J., Wood, R.J.K., Stevens, K.T., Archer, J., Poeton, A.R. ve diğ. (2009). Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) for Production of Anodised Coatings on Lightweight Metal (Al, Mg, Ti) Alloys: A review, *Transactions of the Institute of Metal Finishing*, Vol. 87, No. 3, 122-135.
- [2] Xin, S.G., Song, L.X., Zhao, R.G. ve Hu, X.F. (2006). Composition and Thermal Properties of the Coating Containing Mullite and Alumina. *Materials Chemistry and Physics*, 97, 132-136.
- [3] Nie, X., Wilson, A., Leyland, A. ve Matthews, A. (2000). Deposition of Duplex Al₂O₃ / DLC Coatings on Al Alloys for Tribological Applications Using a Combined Micro Arc Oxidation and Plasma İmmersion İon İmplantation Technique. *Surface and Coatings Technology*, 131, 506-513.
- [4] Vargel, C. (2004). Corrosion of Aluminium, *Elsevier Science*, Fransa, Sf. 9-73.
- [5] Görener, A. (2007). Al-Si Matrisli Kompozit Malzemelerin Korozyon Davranışlarının İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Y.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- [6] Gökşahin, E. (2007). Sert Eloksal İle Kaplanmış 6XXX Serisi Alüminyum Alaşımlarının Aşınma Davranışının İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- [7] Savaş, Ö. (2005). Alüminyum-Silisyum Döküm Alaşımlarında Mikro Porozite Oluşumuna Etki Eden Faktörlerin İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, Türkiye.
- [8] Düztepe, B.G. (2006). Hiperötektik Bir Alüminyum Alaşımının Dökümünde Ultrason Uygulaması ve Çeşitli Özelliklere Etkisi. *Yüksek Lisans Tezi*, Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Antalya, Türkiye.
- [9] Kocabiçak, G. (1996). Malzeme Seçiminde Bilgi Tabanlı Sistemler ve Alüminyum Döküm Alaşımlarına Uygulanması. *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, Türkiye.
- [10] Nie, X., Meletis, E.I., Jiang, J.C., Leyland, A., Yerokhin, A.L. ve Matthews, A. (2002). Abrasive Wear / Corrosion Properties and TEM Analysis of Coatings Fabricated Using Plasma Electrolysis. *Surface and Coatings Technology*, 149, 245-251.
- [11] Salvétat, J.D. ve Rubio, A. (2002). Mechanical Properties of Carbon Nanotubes: a Fiber Digest for Beginners. *Carbon*, 40, 1729-1734.
- [12] Prasek, J., Drbohlavova, J., Chomoucka, J., Hubalek, J., Jasek, O., Adam, V. ve Kizek, R. (2011). Methods for Carbon Nanotubes Synthesis: A review, *Journal of Materials Chemistry*, 21, 15872-15884.

- [13] **Mostofizadeh, A., Li, Y., Song, B. ve Huang, Y.** (2011). Synthesis, Properties, and Applications of Low Dimensional Carbon Related Nanomaterials: A review, *Hindawi Publishing Corporation Journal of Nanomaterials*, doi:10.1155/2011/685081.
- [14] **Gu, W., Lv, G. H., Chen, H., Chen, G., Feng, W. ve Yang, S.** (2007). Characterisation of Ceramic Coatings Produced by Plasma Electrolytic Oxidation of Aluminum Alloy. *Materials Science and Engineering*, 447, 158-162.
- [15] **Wang, Y., Lei, T., Jiang, B. ve Guo, L.** (2004). Growth, Microstructure and Mechanical Properties of Micro Arc Oxidation Coatings on Titanium Alloy in Phosphate Containing Solution. *Applied Surface Science*, 233, 258-267.
- [16] **Guo, H.F., An, M.Z., Huo, H.B., Xu, S. ve Wu, L.J.** (2006). Microstructure Characteristic of Ceramic Coatings Fabricated on Magnesium Alloys by Micro Arc Oxidation in Alkaline Silicate Solutions. *Applied Surface Science*, 252, 7911–7916.
- [17] **Tohumcu, S.** (2005). Plazma Elektrolitik Oksidasyon Yöntemiyle Alüminyum Alaşımlarının Kaplanması. *Yüksek Lisans Tezi*, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, Türkiye.
- [18] **Yerokhin, A. L., Nie, X., Leyland, A., Matthews, A. ve Dowey, S. J.** (1999). Plasma electrolysis for surface engineering: A review, *Surface and Coatings Technology*, 122, 73-93.
- [19] **Günyüz, M.** (2007). Titanyum ve Alaşımlarının Mikro Ark Oksidasyon İşlemi ile Kaplanması. *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- [20] **Sun, X., Jiang, Z., Xin, S. ve Yao, Z.** (2005). Composition and Mechanical Properties of Hard Ceramic Coating Containing α -Al₂O₃ Produced by Micro Arc Oxidation on Ti-6Al-4V Alloy. *Thin Solid Films*, 474, 194-199.
- [21] **Tekin, K.C., Çakmak, E. ve Malayoğlu, U.** (2008). Plazma Elektrolitik Oksitlenme Yöntemiyle Hafif Metallerin Kaplanması, *Mühendis ve Makine*. Cilt 49, sayı. 582, Sf. 3-9.
- [22] **Fukuda, T. ve Kakuhari, T.** (2007). New Surface Treatment Technology for Light Metals-Keronite. *Journal-Surface Finishing Society of Japan*, 58, 357-360.
- [23] **Morks, M. F., Cole, I., Corrigan, P. ve Kobayashi, A.** (2011). Electrochemical Characterization of Plasma Sprayed Alumina Coatings. *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology*, Vol. 1 No. 3, 107-111.
- [24] **Malayoglu, U., Tekin, K. C., Malayoglu, U. ve Shrestha, S.** (2011). An Investigation into the Mechanical and Tribological Properties of Plasma Electrolytic Oxidation and Hard Anodized Coatings on 6082 Aluminum Alloy. *Materials Science and Engineering*, 528, 7451–7460.

- [25] **Lee, J.M., Kang, S.B. ve Han, J.** (2008). Dry Sliding Wear of MAO Coated A356/20 vol. % SiCp Composites in the Temperature Range 25–180°C. *Wear*, 264, 75-85.
- [26] **Li, J.F., Wan, L. ve Feng, J.Y.** (2005). Study on the Preparation of Titania Films for Photocatalytic Modification by Micro Arc Oxidation. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90, 2449–2455.
- [27] **Snizhko, L.O., Yerokhin, A.L., Pilkington, A., Gurevina, N.L., Misnyankin, D.O., Leyland, A.** ve diğ. (2004). Anodic Processes in Plasma Electrolytic Oxidation of Aluminium in Alkaline Solutions. *Electrochimica Acta*, 49, 2085-2095.
- [28] **Matykina, E., Arrabal, R., Monfort, F., Skeldon, P. ve Thompson, G. E.** (2008). Incorporation of Zirconia into Coatings Formed by DC Plasma Electrolytic Oxidation of Aluminium in Nanoparticle Suspensions. *Applied Surface Science*, 255, 2830-2839.
- [29] **Curran, J.A.** (2005). Thermal and Mechanical Properties of Plasma Electrolytic Oxide Coatings. *Phd Thesis*, University of Cambridge, Peterhouse, United Kingdom.
- [30] **Kalkancı, N.H.** (2004). Mikro Ark Oksidasyon Teknolojisi ve Alüminyum Alaşımli Malzemelere Uygulanması. *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, Türkiye.
- [31] **Zhang, R.F., Shan, D.Y., Chen, R.S. ve Han, E.H.** (2008). Effects of Electric Parameters on Properties of Anodic Coatings Formed on Magnesium Alloys. *Materials Chemistry and Physics*, 107, 356-373.
- [32] **Lee, K.M., Ko, Y.G. ve Shin, D.H.** (2011). Incorporation of Carbon Nanotubes into Micro Coatings Film Formed on Aluminum Alloy via Plasma Electrolytic Oxidation. *Materials Letters*, 65, 2269-2273.
- [33] **Lee, K.M., Ko, Y.G. ve Shin, D.H.** (2011). Incorporation of Multi-Walled Carbon Nanotubes into the Oxide Layer on a 7075 Al Alloy Coated by Plasma Electrolytic Oxidation: Coating Structure and Corrosion Properties. *Current Applied Physics*, 11, 55-59.
- [34] **Lv, G.H., Chen, H., Gu, W.C., Feng, W.R., Li, L., Niu, E.W.** ve diğ. (2009). Effects of Graphite Additives in Electrolytes on the Microstructure and Corrosion Resistance of Alumina PEO Coatings. *Current Applied Physics*, 9, 324-328.
- [35] **Sundararajan, G. ve Krishna, L.R.** (2003). Mechanisms Underlying the Formation of Thick Alumina Coatings through the MAO Coating Technology. *Surface and Coatings Technology*, 167, 269-277.
- [36] **Gao, J. ve Shao, Z.** (2012). The Effects of Graphite on Ceramic Coatings on LY12 Aluminium Alloys by Micro Arc Oxidation. *Advanced Materials Research*, 454, 126-129.
- [37] **Lee, Y.S., Cho, T.H., Lee, B.K., Rho, J.S., An, K.H. ve Lee, Y.H.** (2003). Surface Properties of Fluorinated Single-walled Carbon Nanotubes. *Journal of Fluorine Chemistry*, 5872, 1-6.

- [38] **Xue, W., Deng, Z., Lai, Y. ve Chen, R.** (1998). Analysis of Phase Distribution for Ceramic Coatings Formed by Micro Arc Oxidation on Aluminum Alloy. *Journal*, Vol. 81, No. 5, 1365-1368.
- [39] **Jin, F., Chu, P.K., Tong, H. ve Zhao, J.** (2006). Improvement of Surface Porosity and Properties of Alumina films by Incorporation of Fe Micrograins in Micro Arc Oxidation. *Applied Surface Science*, 253, 853-868.
- [40] **Mu, M., Zhou, X., Xiao, Q., Liang, J. ve Huo, X.** (2012). Preparation and Tribological Properties of Self-lubricating TiO₂ / Graphite Composite Coating on Ti6Al4V Alloy. *Applied Surface Science*, 258, 8570-8576.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Yakup YÜREKTÜRK
Doğum Yeri ve Tarihi: VAN / 16.01.1987
Adres: Selimbey Mah.Yoğurtçuoğlu Sok. No:30/B VAN
E-Posta: yurekturky@gmail.com
Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği (2007 – 2012)

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

- Yürektürk, Y., Muhaffel, F., Baydoğan, M., 2013: Effect of Process Parameters on the Surface Properties of Micro Arc Oxidized 6082 Aluminum Alloy, *International Journal of Arts and Sciences (IJAS'13)* Mayıs 28-31, 2013, Prag, Çek Cumhuriyeti.