

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALÜMİNYUMUN MİKROARK OKSİDASYON
KAPLAMA DAVRANIŞINA ARTAN LİTYUMUN ETKİSİ

DİLEK ERGÜN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2019

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALÜMİNYUMUN MİKROARK
OKSİDASYON KAPLAMA
DAVRANIŞINA ARTAN LİTYUMUN
ETKİSİ

DİLEK ERGÜN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
DOÇ. DR. MEHMET TARAKÇI

GEBZE
2019

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**EFFECT OF INCREASING LITHIUM ON
COATINGS OF MICROARC OXIDATION
OF ALUMINUM**

DİLEK ERGÜN
A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF MATERIAL SCIENCE AND ENGINEERING

THESIS SUPERVISOR
ASSOC. PROF. DR. MEHMET TARAKÇI

GEBZE
2019

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 26./06./..2019... tarih ve 2019...../.....29..... sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 24./...07./..2019... tarihinde tez savunma sınavı yapılan Dilek Ergün.....'ün tez çalışması ...Malzeme Bilimi ve Mühendisliği.....Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

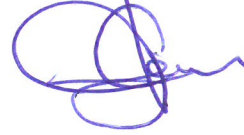
(TEZ DANIŞMANI)

: Doç. Dr. Mehmet Tarakçı



ÜYE

: Prof. Dr. Yücel Gençer



ÜYE

: Doç. Dr. Mediha İpek



ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

ÖZET

Bu çalışmada öncelikle atomik olarak %1, %2, %4, %8, %10 ve %14 Li içeren ikili Al-Li alaşımları atmosfer kontrollü fırında hazırlanmıştır. Hazırlanan bu alaşımlar mikroark oksidasyon (MAO) tekniği ile 2 gr/lt KOH ve 12gr/lt Na₂SiO₃ içeren elektrolitik solüsyon içerisinde 120 dakika süre ile kaplanmıştır. Kaplanan alaşımların faz kompozisyonu X-ışını kırınımıyla (XRD), sertlik ölçümü mikrosertlik ölçüm cihazıyla, kaplama kalınlığı Eddy akım yöntemi ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile mikroyapısı, yüzey morfolojisi karakterize edildi.

MAO kaplanması sonucu lityumun Al-Li alaşımının, oluşan kaplama özelliklerine etkisi araştırıldı. İncelenen kaplama kalınlıklarına göre ikili Al-Li alaşımları Li miktarı arttıkça kaplama kalınlığı da artmaktadır. En kalın kaplama kalınlığı at. %14 Li içeren alaşımda görülmüştür. Kaplama sertliklerinin 252.45-1182.81 HV aralığında olduğu tespit edilmiştir. En yüksek kaplama sertlik değerlerinin sırasıyla 2Li ve 8Li alaşımlarında olduğu tespit edilmiştir. Artan Li miktarı ile yüzey pürüzlülüğünün arttığı tespit edilmiştir. Altlıktan bağımsız olarak α -Al₂O₃, γ -Al₂O₃, κ -Al₂O₃, müllit (Al₆Si₂O₁₃) ve Al₂SiO₅ fazlarından oluşmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Mikroark Oksidasyon (MAO) Kaplama, Alüminyum-Lityum Alaşımları

SUMMARY

In this study, the effect of lithium on binary Al-Li alloys were coated with Plasma Electrolytic Oxidation (MAO) has been investigated. The binary Al-Li alloys which include at. 1 %, 2 %, 4 %, 8 %, 10 % and 14 % Li were coated for 120 min in the electrolytic solution containing 2 gr/lt KOH and 12gr/lt Na₂SiO₃. The coatings were characterized by X-ray diffraction, profilometry to determine surface roughness, Vickers Microhardness measurement device for microhardness, scanning electron microscopy to determine phase analysis, microstructure, surface morphology, surface thickness of the coatings.

The effect of lithium, on coating properties was investigated. According to the of binary Al-Li alloys' coatings, the surface thickness increases with the amount of Li. Also the thickest coating has been found which contains at.14% Li. The microhardness of alloys ranges 252.45 to 1182.81 HV. The highest microhardness values are determined respectively on 2Li and 8Li alloys. With increasing Li content, surface roughness increased. Regardless of substrate chemical composition, all coatings consist of α - Al₂O₃, γ -Al₂O₃, κ -Al₂O₃, mullite (Al₆Si₂O₁₃) and Al₂SiO₅ phases.

Key Words: Microarc Oxidation Coating, Aluminium-Lithium Alloys.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince yardımlarını esirgemeyen Sayın Danışman Hocam Doç. Dr. Mehmet TARAKÇI' ya teşekkür ederim.

Tez çalışmam süresince bilgi ve birikimlerini paylaşan Sayın Hocam Prof. Dr. Yücel GENÇER' e teşekkür ederim.

Tez çalışmamda yardımlarını esirgemeyen Dr. Sezgin CENGİZ, Dr. Ali Emre GÜLEÇ, Dr. Kerem Özgür GÜNDÜZ, Dr. Yunus AZAKLI ve Arş. Gör. Zafer Çağatay ÖTER'e teşekkür ederim.

Hayatım boyunca her daim yanımda olup desteğini esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLolar DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
1.1. Alüminyumun Fiziksel Özellikleri	1
1.2. Alüminyum Alaşımları	3
1.3. Dövme Alaşımları	3
2. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINA ALAŞIM ELEMENTLERİNİN ETKİSİ	7
2.1. Bakır	7
2.2. Mangan	9
2.3. Silisyum	10
2.4. Magnezyum	10
2.5. Magnezyum- Mangan	11
2.6. Çinko	12
2.7. Demir	12
3. ALÜMİNYUM - LİTYUM ALAŞIMLARI	13
3.1. Al-Li Alaşımlarının Mekanik Özellikleri	19
3.2. Al-Li Alaşımlarının Kırılma Tokluğu	22
3.3. Al-Li Alaşımları Korozyon Özellikleri	22
3.4. Al-Li Alaşımları Yorulma Özellikleri	23
3.5. Al-Li Alaşımlarının Üretimi	24
3.6. Kaplamalar	25
3.7. Elokso	26
4. MİKROARK OKSİDASYON KAPLAMA	29

4.1. MAO Kaplamaların Kullanım Alanları	30
4.2. MAO Prosesinin Fiziksel ve Kimyasal Temelleri	30
4.3. MAO Akım-Voltaj Karakteristiği	31
4.4. MAO İşlemine Etki Eden Parametreler	33
4.5. MAO İşleminde Güç Kaynakları	36
4.6. Doğru Akım Güç Kaynakları	36
4.7. Titreşimli Doğru Akım Güç Kaynakları	36
4.8. Dengelenmemiş Alternatif Akım Güç Kaynakları	37
4.9. MAO Avantaj ve Dezavantajları	37
4.10. MAO Yönteminin Eloksal ile Karşılaştırılması	38
4.11. Alüminyum Alaşımlarında Oluşan Oksit Tabakası	41
4.12. Al-Li alaşımlarına Uygulanan Kaplamalar	42
5. ÇALIŞMANIN AMACI	45
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	48
6.1. Deneysel Program	48
6.2. Altlık Malzeme Seçimi ve Üretimi	49
6.3. Altlık Malzeme Boyutlandırılması ve Yüzeyinin Hazırlanması	50
6.4. Al-Li Alaşımlarının XRD Karakterizasyonu	51
6.5. MAO Prosesinin Uygulanması	51
6.6. Kaplanan Numunenin Karakterizasyon Çalışmaları	52
6.7. Kaplama Kalınlığı Ölçümü	52
6.8. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü	52
6.9. Kaplamaların Yüzeyinden Mikroyapı Analizi	54
6.10. Kesit Numunelerinin Hazırlanması	54
6.11. Kaplama Yüzeyinden Elementel Analizi	54
6.12. Sertlik Ölçümü	54
7. SONUÇLAR	56
7.1. Al-Li Alaşımlarının Kimyasal Analizi	56
7.2. Al-Li Alaşımlarının Faz Analizi	56
7.3. Kaplama Faz Analizi	57
7.4. Kaplama Kalınlığı	60
7.5. Yüzey Pürüzlülüğü	61
7.6. Yüzey SEM	62

7.7. Kesit SEM	75
7.8. Kaplama Sertliği	89
8. TARTIŞMA	91
KAYNAKLAR	94
ÖZGEÇMİŞ	105

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u> <u>Kisaltmalar</u>	<u>Açıklamalar</u>
cm ³	: Santimetreküp
µm	: Mikrometre
µs	: Mikro saniye
°C	: Santigrat derece
Al	: Alüminyum
Al ₆ Si ₂ O ₁₃	: Müllit
g	: Gram
l	: Litre
Li	: Lityum
Mg	: Magnezyum
Mn	: Manganez
Na ₂ SiO ₃	: Sodyum silikat
t	: Süre
V	: Volt
AC	: Alternatif akım
DC	: Doğru akım
dak.	: Dakika
Hz	: Hertz
KOH	: Potasyum hidroksit
MAO	: Mikro Ark Oksidasyon
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
XRD	: X-ışınları Kırınımı

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Bakırın, T6 temperli Al-%0.3Mn%0.2Zr-%0.1V alaşımının çekme özelliklerinin değişimi.	8
2.2: 565°C sıcaklıkta su verilmiş %99,95 saflıktaki alüminyumun çekme özelliklerine manganın etkisi.	9
2.3: 13 mm H321 ve O temperli Al-Mg-Mn alaşım plakasının çekme özellikleri.	11
3.1: Alüminyum alaşımlarında eklenen metallerin yoğunluk üzerine etkisi.	16
3.2: Alüminyum alaşımlarında eklenen metallerin elastik modülüs üzerine etkisi.	17
3.3: Alüminyum – lityum faz diyagram	18
3.4: Al ₃ Li yapısı.	20
3.5: Elokstal uygulanan altlığın iki ve üç boyutlu gösterimi.	27
4.1: Mikroark oksidasyon prosesi.	29
4.2: Tank içinde gerçekleşen kimyasal elektrolizindeki elektrot işlemleri.	31
4.3: MAO prosesi sırasında akım –voltaj eğrilerinin gösterimi.	31
4.4: MAO prosesinde oksit tabakasının oluşumu.	32
4.5: Çeşitli kaplama ve malzemelerin sertliklerinin gösterimi.	39
4.6: MAO ve diğer kaplamaların aşınma değerlerinin gösterimi.	39
4.7: MAO ve diğer kaplamaların 2000 saat boyunca tuz püskürtme testi sonucu korozyon dayanımlarının gösterimi.	40
4.8: MAO kaplanmış Al-1Zn kesit SEM görüntüsü.	41
4.9: MAO kaplama yapılan 8090 Al-Li alaşımının SEM görüntüsü.	44
6.1: Deneysel akış programı.	49
6.2: Altlık malzemenin kaplama işlemi öncesi boyutlandırılması.	50
6.3: Yüzey pürüzlülüğü ölçülen bölgelerinin şematik gösterimi.	52
6.4: Vickers ucu yandan ve üstten şematik gösterimi.	55
7.1: Al-Li alaşımlarının altlık XRD sonuçları.	57

7.2:	Al-Li alaşımlarına ait kaplama faz analizi sonuçları.	58
7.3:	120 dk. MAO ile kaplanan 8Li alaşımının kademeli olarak kazınmış ve yüzeyden alınan XRD sonuçları.	59
7.4:	Al-Li alaşımlarına ait altlığa yakın kısımdan alınan kaplama faz analizi sonuçları (4. Kazımalar).	60
7.5:	MAO ile kaplanan Al-Li alaşımlarının SEM ve Eddy akımları yöntemleri ile ölçülen kaplama kalınlığının Li miktarına (atomik %) göre değişimi.	61
7.6:	Al-Li alaşımlarına uygulanan MAO kaplamada yüzey pürüzlülüğünün lityum miktarına göre değişimi.	62
7.7:	MAO ile 120 dakika süre kaplanmış 1Li alaşımına ait yüzey SEM fotoğrafları a) 250 b) 500X c) 1000X d) 1000X.	63
7.8:	MAO ile 120dk süre ile kaplanan 2Li alaşımına ait yüzey SEM fotoğrafları a) 250X b) 500X c) 1000X d) 1000X.	65
7.9:	MAO ile 120dk süre ile kaplanan 4Li alaşımına ait yüzey SEM fotoğrafları a) 250X b) 500X c) 1000X.	68
7.10:	MAO ile 120dk süre ile kaplanan 8Li alaşımına ait yüzey SEM fotoğrafları a) 250X b) 500X c) 1000X.	70
7.11:	MAO ile 120dk süre ile kaplanan 10Li alaşımına ait yüzey SEM fotoğrafları a) 250X b) 500X c) 1000X.	72
7.12:	MAO ile 120 dk süre ile kaplanan 14 Li alaşımına ait yüzey SEM fotoğrafları a) 250X b) 500X c) 1000X.	74
7.13:	MAO ile 120 dk boyunca kaplanan 1Li alaşımının farklı büyütmelerdeki kesit SEM fotoğrafları a) 250X b) 500X c) 1000X.	76
7.14:	MAO ile 120 dk boyunca kaplanan 2Li alaşımının farklı büyütmelerdeki kesit SEM fotoğrafları a) 125X b) 250X c) 500X d) 1000X.	78
7.15:	MAO ile 120 dk boyunca kaplanan 4Li alaşımının farklı büyütmelerdeki kesit SEM fotoğrafları a) 125X b) 250X c) 500X d) 1000X.	80

7.16:	MAO ile 120 dk boyunca kaplanan 8Li alaşımının farklı büyütmelelerdeki kesit SEM fotoğrafları a) 125X b) 250X c) 500X d) 1000X.	83
7.17:	MAO ile 120 dk boyunca kaplanan 10Li alaşımının farklı büyütmelelerdeki kesit SEM fotoğrafları a) 125X b) 250X c) 500X d) 1000X.	85
7.18:	MAO ile 120 dk boyunca kaplanan 14Li alaşımının farklı büyütmelelerdeki kesit SEM fotoğrafları a) 125X b) 250X c) 500X d) 1000X.	87
7.19:	Al-Li alaşımlarının MAO kaplamalarına ait mesafeye bağlı mikrosertlik değerleri.	90
8.1:	1-14Li Alaşımlarının Kesit SEM görüntüleri.	92

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
1.1: Alüminyumun fiziksel özellikleri.	1
1.2: Dövme alüminyum alaşımlarının serileri ve alaşım elementleri, göreceli korozyon direnci ve mukavemet ve ısıt işlemler uygulanabilirliğinin gösterimi.	3
1.3: Ana temperleme işaretleri ve ısıt işlemler alt bölümleri.	4
1.4: Çeşitli dövme alüminyum alaşımlarının çekme mukavemetleri.	5
3.1: Li içeren alaşımların % ağırlıkça kompozisyonları.	13
3.2: Alüminyum alaşım elementlerinin mekanik özelliklere etkisi.	18
3.3: Eloksoal filmin fiziksel özellikleri.	28
4.1: MAO uygulanan çeşitli alüminyum alaşımlarının mikrosertlik değerleri.	37
4.2: Eloksoal ve MAO yöntemlerinin farklılıkları.	40
6.1: Üretilen Al-Li alaşımları ve içeriği.	50
6.2: Yüzey pürüzlülüğü ölçümü şematik ve matematiksel ifadeleri.	53
7.1: Deneysel çalışmada kullanılan ikili Al-Li alaşımlarının kimyasal analizi.	56

1. GİRİŞ

Gelişen teknolojiye ile birlikte hafif metallerin otomotiv, hava ve uzay endüstrisinde önemi ve kullanımı artmaktadır. Hafif malzemelerin kullanılan ortama göre yüksek mukavemet, korozyon ve aşınma direnci özellikleri malzemelerin daha uzun süre kullanılmasına da olanak sağlamaktadır. Hafif malzemelerin korozyon ve aşınma özellikleri, bu malzemelere uygulanan çeşitli yüzey işlemler ile geliştirilmektedir.

Başlıca hafif metallerden olan alüminyum; alaşımlandırma, ısıt işlem ve yüzey kaplamalarla özellikleri geliştirilmektedir [1]. Alüminyum ve alaşımlarına, (eloksall, kromat kaplama...) çeşitli kaplamaların uygulanarak mekanik ve yüzey özellikleri geliştirilmektedir. Bu kaplamaların zehirli olup çevreye zararlarından dolayı, son yıllarda eloksall prensibine dayanan ve çevreye zararı olmayan Mikroark Oksidasyon (MAO) kullanımı artmıştır.

1.1. Alüminyumun Fiziksel Özellikleri

Oksijen ve silisyumdan sonra yer kabuğunda en çok bulunan (ağ. %8.2) alüminyumun en belirgin özelliği yoğunluğu düşük bir metal olmasıdır. Bunun yanı sıra atmosferik ortamda korozyon direnci yüksek, ısı ve elektrik iletkenliği iyi, kolayca dökülebilir ve işlenebilir olması ve nispeten düşük fiyatı ile alüminyum birçok kullanım alanında vazgeçilmez mühendislik malzemesi haline gelmiştir.

KYM'li kristal yapıya sahip alüminyumun katı yoğunluğu (20°C) 2,7 g/cm³'tür. Ergime sıcaklığı 659,7- 660,1°C ve kaynama sıcaklığı 2400-2450°C'dir.

Tablo 1.1: Alüminyumun fiziksel özellikleri.

Özellikleri	Alüminyumun Verileri
Atomik Kütle	26.9815386 g
Çekme Mukavemeti	77 MN/m ²
Maksimum Oksidasyon Numarası	3+
Minimum Oksidasyon Numarası	0

Tablo 1.1: Devam.

Kristal Yapısı	KYM
Yoğunluk (20°C)	2.7 g/cm ³
Ergime Noktası	659,7 – 660,1°C
Kaynama Noktası	2400-2450°C
Özgül ısı (20°C)	0.891 kJ/kg°C
Isıl İletkenlik (20°C)	272 W/m.K
Van der Waals yarıçapı	0.143 nm
İyon yarıçapı	0.05 nm

Alüminyumun diğer fiziksel veri ve özellikleri Tablo 1.1’ de gösterilmiştir [2]. Magnezyumdan sonra en hafif metallerden biri olan alüminyum ve alaşımları, geri dönüşüm ve yeni ergitme prosesi avantajlarına ek olarak mukavemet/ağırlık oranı oldukça yüksektir [2], [3]. Magnezyum, alüminyumdan daha düşük ergime sıcaklığına sahiptir ve alüminyum kadar kolay dökülebilir olmasına rağmen sıcak ortamda (100°C’den fazla) mekanik özellikleri zayıftır, özellikle sürünme ve korozyona karşı duyarlıdır [2]. Alüminyum ve alaşımları manyetik değildir, yüksek yansıtma özelliğine ve katalitik olmayan etkilere sahiptir [3], [2].

Geliştirilmekte olan plastiklerle birlikte alüminyum ve magnezyum kompozitlerin, mekanik özellikleri çok iyidir. Fakat birçok uygulamada maliyetleri çok yüksektir [2]. Bunun yanı sıra kompozitler; çevre bozunuma karşı hassas, kontrolleri zor ve zaman gerektiren malzemelerdir. Hafifliğinden dolayı uçak yapılarında tercih edilen titanyum alaşımları da üretim ve fabrikasyon zorlukları ve çok yüksek fiyatlarından ötürü kullanımını korozyif ortamlarla sınırlandırmaktadır [2].

Alüminyumun kullanım alanları; tarım, inşaat, kimya, gıda, ulaştırma, elektrik ve elektronik, uzay, havacılık, otomotiv sanayii gibi birçok kullanım alanına sahiptir. Alüminyum elektrik iletkenliği gibi ısı iletiminin iyi bir metal olması nedeniyle soğutma sanayinde de kullanılmaktadır. Ayrıca havadaki oksijenle reaksiyona girerek, yüzeyinde ince bir kararlı pasif bir oksit tabakası oluşturur bu da alüminyumu korozyona karşı dirençli kılar. Bakırdan daha ucuz olması ve daha çok bulunması, işlenmesinin kolay olması ve yumuşak olması nedeniyle birçok sektörde kullanılan bir metaldir.

1.2. Alüminyum Alaşımları

Alüminyum alaşımları; dövme ve dökme alüminyum alaşımları olmak üzere iki kategoriye ayrılır. Dövme alaşımları ısıtılma işlemi neticesinde sertleşen ve tabii sert alaşımlar olmak üzere ikiye ayrılır. Dökme, dövme, haddeleme, çekme ve ekstrüzyon gibi mekanik operasyonlar istenilen harici şekilleri elde etmek için kullanıldığı gibi, ısıtılma işlemleri de içyapıyı değiştirerek sertlik, mukavemet, süneklik vs. içyapıyı mekanik özelliklere tesir etmek üzere kullanılır. Dökme alüminyum alaşımlarından çeşitli profiller, yuvarlak ve köşeli, tel, boru, vb. ürünler ile sac, levha ve folyo gibi yassı ürünler üretilir.

1.3. Dövme Alaşımları

Dövme alüminyum alaşımları içerdikleri ana alaşım elementlerine göre sınıflandırılır. Dövme alüminyum alaşımlarını tanımlamak için dört rakamlı bir işaret kullanılır. İlk rakam belirli alaşım elementlerini grubu, ikinci rakam başlangıçtaki alaşım üzerinde yapılan değişiklikleri ve son iki rakam alüminyum alaşımlarının saflığını belirtmektedir [4].

Dövme alüminyum alaşımları; ısıtılma işlemi uygulanabilir ve uygulanamaz olarak da ikiye ayrılmaktadır. *Isıtılma işlemi uygulanabilir alaşımlar*; 2xxx, 6xxx, 7xxx ve 8xxx serileridir. Bu alaşımlara soğuk işlem yapıldığı gibi yaşlandırma işlemi ile mukavemet kazandırılabilir. Bu serilerin yanı sıra 4xxx serisi alaşımların bir kısmına da ısıtılma işlemi uygulanabilmektedir. *Isıtılma işlemi uygulanamayan alaşımlar* ise 1xxx, 3xxx, 4xxx ve 5xxx'dir. Bu alaşımlara da soğuk işlem uygulandıktan sonra özellikleri geliştirmek için tavlama yapılabilir [5], [6], [7].

Tablo 1.2: Dövme alüminyum alaşımlarının serileri ve alaşım elementleri, göreceli korozyon direnci ve mukavemet ve ısıtılma işlemi uygulanabilirliğinin gösterimi.

Seri Numarası	Birincil Alaşım Elementi	Göreceli Korozyon Direnci	Göreceli Mukavemet	Isıtılma İşlemi
1xxx	-	harika	orta	uygulanamaz
2xxx	bakır	orta	harika	uygulanabilir

Tablo 1.2: Devam.

3xxx	mangan	iyi	orta	uygulanamaz
4xxx	silisyum	-	-	alaşıma göre değişir
5xxx	magnezyum	iyi	iyi	uygulanamaz
6xxx	magnezyum ve silisyum	iyi	iyi	uygulanabilir
7xxx	çinko	orta	harika	uygulanabilir

Tablo 1.2’de dövme alüminyum alaşımlarının serileri ve alaşım elementleri, göreceli korozyon direnci ve mukavemet ve ısıt işlemlerinin uygulanabilirliği gösterilmektedir [6].

Tablo 1.3: Ana temperleme işaretleri ve ısıt işlemleri alt bölümleri.

Ana Temperleme İşaretleri ve Isıt İşlemleri Alt Bölümleri	
F (M)	Üretildiği gibi. Gerinme sertleşmesinin miktarı üzerinde bir denetim yok; mekanik özellikler sınırı yok.
O	Tavlanmış ve yeniden kristallenmiş. En düşük dayanım ve en yüksek süneklik için menevişlenmiş.
H	Gerinme sertleşmesi yapılmış
T	F ve O’den başka kararlı menevişler için ısıt işlemleri görmüş.
T1	İmalat sıcaklığından soğutulmuş ve doğal yaşlandırılmış.
T2	İmalat sıcaklığından soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve doğal yaşlandırılmış.
T3	Çözelti ısıt işlemleri uygulanmış, soğuk işlenmiş ve doğal yaşlandırılmış.
T4(TB)	Çözelti ısıt işlemleri uygulanmış ve doğal yaşlandırılmış.
T5(TE)	İmalat sıcaklığından soğutulmuş ve yapay yaşlandırılmış.
T6(TF)	Çözelti ısıt işlemleri uygulanmış ve yapay yaşlandırılmış.
T7	Çözelti ısıt işlemleri uygulanmış ve aşırı yaşlandırma ile dengelenmiş.

Tablo 1.3: Devam.

T8	Çözelti ısıtıl işlemi uygulanmış, soğuk şekillendirilmiş ve yapay yaşlandırılmış.
T9	Çözelti ısıtıl işlemi uygulanmış, yapay yaşlandırılmış ve soğuk şekillendirilmiş.
T10	İmalat sıcaklığından soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve yapay yaşlandırılmış.

Dövme alüminyum alaşımları için menevişleme işareti “-” işareti ile ayrılmıştır (örneğin; 1100-0). Ana menevişleme işleminin alt grubu, harfle belirtilen izleyen ek bir rakam daha alır (örneğin; 1100-H14) [4]. Aşağıdaki Tablo 1.3’de ana temperleme işaretleri ve ısıtıl işlem alt bölümleri gösterilmiştir [4], [8]. Alternatif İngiliz seri numaraları parantez içerisinde verilmiştir.

Tablo 1.4: Çeşitli dövme alüminyum alaşımlarının çekme mukavemetleri.

AA serisi	Alaşım kompozisyon tipi	Mukavemet mekanizması	Çekme mukavemeti (MPa)
1xxx	Al	Soğuk işlem	70-175
2xxx	Al-Cu-Mg (%1-2.5 Cu)	Isıl işlem	170-310
	Al-Cu-Mg-Si (%3-6 Cu)	Isıl işlem	380-520
3xxx	Al-Mn-Mg	Soğuk işlem	140-280
4xxx	Al-Si	Soğuk işlem (bazısına ısıtıl işlem uygulanabilir)	105-350
5xxx	Al-Mg (%1-2.5 Mg)	Soğuk işlem	140-280
	Al-Mg-Mn (%3-6Mg)	Soğuk işlem	280-380

Tablo 1.4 : Devam.

6xxx	Al-Mg-Si	Isıl işlem	150-380
7xxx	Al-Zn-Mg	Isıl işlem	380-520
	Al-Zn-Mg-Cu	Isıl işlem	520-620
8xxx	Al-Li-Cu-Mg	Isıl işlem	280-560

Ayrıca Tablo 1.4’de de dövme alaşımlarının çekme mukavemet değerleri verilmiştir [5]. En iyi mukavemet özellikleri bakır içeren 7xxx ve Li içeren 8xxx serisi alaşımlarda görülmektedir. En düşük mukavemet özellikleri ise alaşım elementi içermeyen 1xxx serisi alaşımlarda görülmektedir.

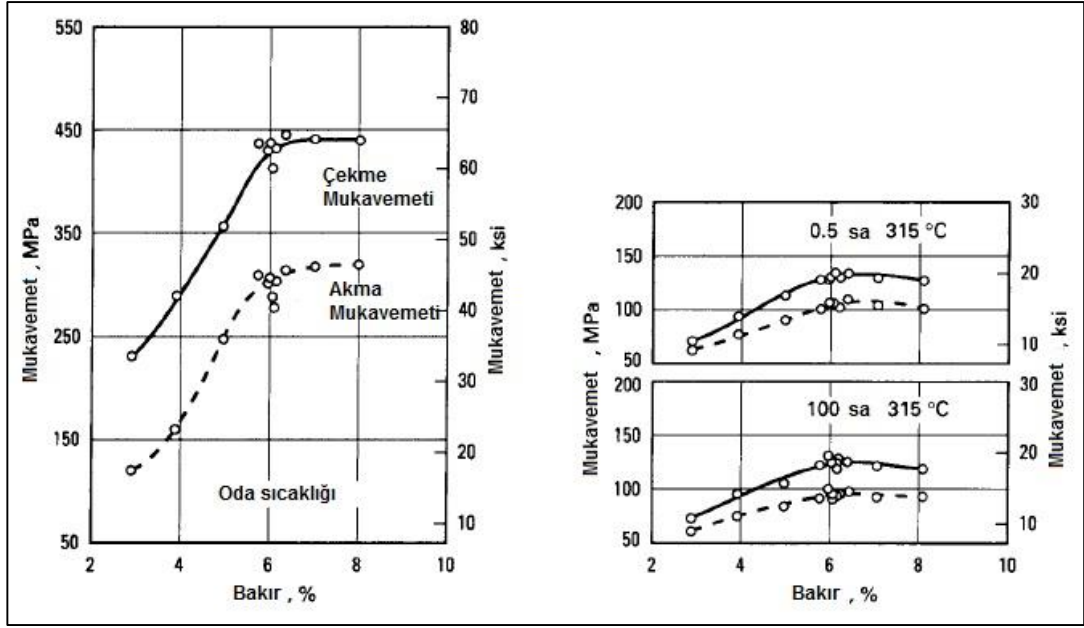
2. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINA ALAŞIM ELEMENTLERİNİN ETKİSİ

Alüminyumun göreceli olarak düşük maliyetli oluşu ve alaşımlarının özelliklerinin (performans/ağırlık) x maliyet oranı en iyi olması uçak gövdelerin yapımında kapsamlı olarak kullanılmasını sağlamaktadır [2].

Alüminyum alaşımlarının mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikleri kompozisyon ve mikroyapıya bağlıdır. Saf alüminyuma ilave edilen elementler, kullanım yerine göre özelliklerini iyileştirmek amacıyla katılmaktadır. Alaşımlandırmanın baskın sebebi; mukavemet, sertlik, sürünme, yorulma, aşınma direncinin arttırmasıdır. Bu özellikler, farklı alaşım elementlerine ve kombinasyonlarına özeldir ve faz diyagramları, mikroyapı ve altlıklarla alakalıdır. Katılma, termomekanik geçmiş, ısıtma işlem veya soğuk şekillendirmelerin sonucu altlıklar şekillenmektedir. Süper saflıktaki tavlanmış alüminyumun çekme ve akma mukavemeti yaklaşık 10-20 MPa iken ısıtma işlem görmüş ticari yüksek mukavemetli alaşımlar için bu değer 550 MPa'ı aşmaktadır [5].

2.1. Bakır

2xxx serisinin ana alaşım elementlerinden biri olan bakır; genellikle diğer alaşım elementleri ile birlikte alüminyum içinde %2-10 arasında bulunmaktadır. Bütün dökme ve dövme alüminyum bakır alaşımlarında mukavemet ve sertliği arttırmak, uzamayı düşürmek için çözündürme ısıtma işlemi (solution heat treatment) ve ardından yaşlandırma yapılmaktadır [5].



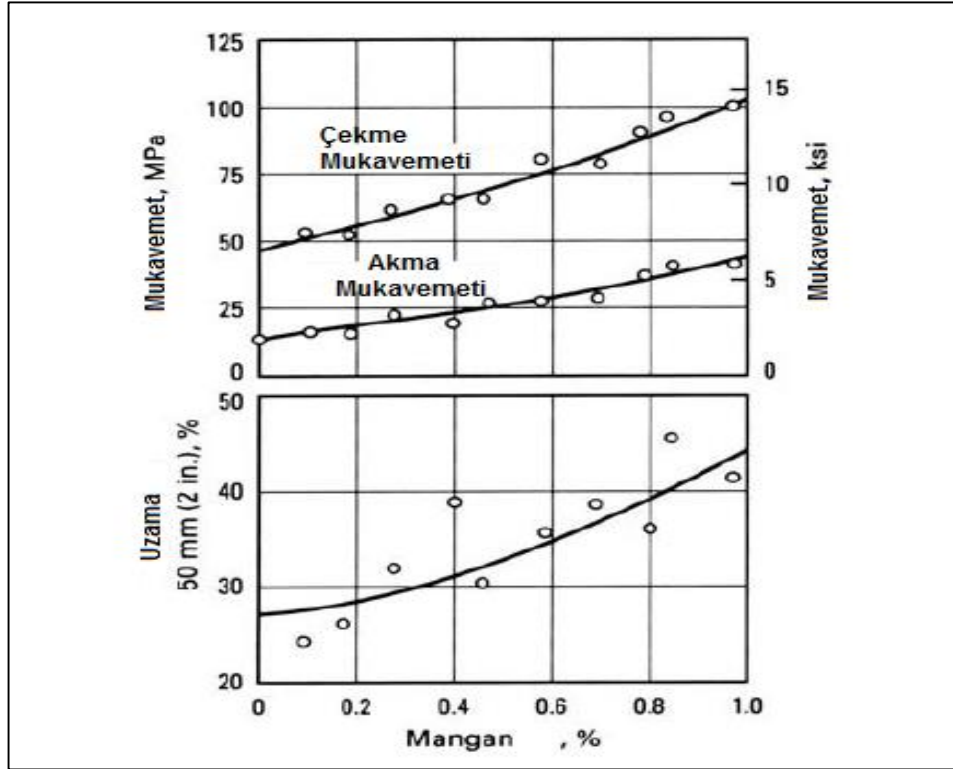
Şekil 2.1: Bakırın, T6 temperli Al-%0.3Mn-%0.2Zr-%0.1V alaşımının çekme özelliklerinin değişimi.

Şekil 2.1’de alüminyuma katılan bakırın çekme ve akma mukavemetine etkisi gösterilmektedir [5]. Maksimum mukavemet % 4 ve % 6 Cu ilavesi ile sağlanır ve diğer bileşenlerin(%0-2 arası Mg ile) varlığının etkisine de bağlıdır [5], [7]. Ağırlıkça %12’ye kadar Cu miktarı, alaşımda çökelme sertleşmesiyle, Al_2Cu ve Al_2CuMg intermetalik fazları vasıtasıyla, mukavemeti attırmaktadır. Daha fazla Cu miktarı alaşımı kırılgan hale getirir. Ayrıca yorulma özellikleri çok iyidir. Fakat Cu varlığı korozyon direnci açısından kötüdür. Bakır, tane sınırlarında çökelmeyi tercih eder ve bu da malzemeyi pitting, taneler arası ve stress korozyonuna hassas hale getirmektedir [7]. Bu nedenle genellikle Mg-Si alaşımlı 6xxx serisi veya saf alüminyum tarafından giydirme (clad) yapılmaktadır [9]. Ayrıca kalın levha olarak koruyucu kaplama olmadan da kullanılmıştır [10].

Bakır, alüminyumun yorulma özelliklerini, yüksek sıcaklık özelliklerini ve işlenebilirliğini geliştirmektedir. Düşük Cu içeren alaşımlar otomobil endüstrisinde (2024, 2014) kullanılmaktadır. Buna ek olarak yüksek mukavemet gereken yapısal uygulamalarda; uçak yapısında ve tekerleklerinde, ordu araçlarında ve köprülerde de kullanılmaktadır [7].

2.2. Mangan

3xxx serisinin ana alaşım elementi olup, 5xxx serisinde de magnezyum ile birlikte kullanılmaktadır. Özgöl direnci düşüren mangan katı çözeltili içinde veya ince (finely) çökelmiş intermetalik faz olarak [5], alaşımlanmamış alüminyuma göre mukavemeti ~%20 arttırmaktadır [6]. Şekil 2.2’de manganın alüminyum üzerinde çekme ve akma mukavemetine etkisi gösterilmektedir [5].



Şekil 2.2: 565°C sıcaklıkta su verilmiş %99,95 saflıktaki alüminyumun çekme özelliklerine manganın etkisi.

Mn’ın sınırlı yüzdesi (~% 1-2 kadar) sünek, işlenilebilir hale getirmektedir [7]. Korozyona bir etkisi yoktur. Mukavemet artışını arttırmak ve tane yapısını kontrol etmek için kullanılmaktadır. Mangan yeniden kristalleşme sıcaklığını arttırma ve sıcak haddelemeye bağlı lif yapısının gelişmesini sağlar. Dağılmış çökelti halinde ise toparlanmayı (recovery) yavaşlatır ve tane büyümesini engeller. Mangan çökeltisi ısıt işlem uygulanabilir alaşımlarda su verme hassasiyetini arttırmaktadır. Mangan; iğnemsî (acicular) veya tabakalı (platelike) biçimindeki demir içeren bileşiklerin morfolojisini düzelterek, çatlak oluşumuna karşı hassasiyetini düşürmektedir [5].

Ağırlıkça % 2'ye kadar Mn, mukavemet ve sertlikte artış sağlar fakat Cu ve Mg'ye göre daha az etkilidir. Mangan, alaşımlarda sünekliği arttırırken demir ile kombinasyonu dökülebilirliği geliştirir ve katılaşma sırasında da çekmeyi düşürür [7]. Mangan katı çözelti içinde, ikili alaşımların mukavemetlendirilmesinde büyük ölçüde etkilidir, ticari alaşımlarda ise etkisi daha azdır [5].

Mn içeren alüminyum alaşımları; içecek kutuları, mutfak gereçleri, ısı değiştiriciler, depolama tankları, mobilya, çatı malzemeleri ve diğer mimari ürünlerde kullanılmaktadır [6], [9].

2.3. Silisyum

4xxx serisi ana alaşım elementi olan silisyum, yüksek miktarda (ağırlıkça %12'ye kadar) kullanıldığında düşük sünekliğe neden olmaktadır. Silisyum, intermetalik formda çökünce düşük süneklik sağlarken, elemental olarak malzemeyi kırılgan yapmaktadır [7].

Dövme alaşımlarda 6xxx serisinde Mg ile birlikte %1.5 seviyesine kadar bulunmaktadır ve Mg_2Si oluşturmaktadır. Silisyum içeren herhangi bir alaşıma, düşük miktarlarda Mg eklenmesi ısıl işlem görülebilir hale getirir, Mg miktar aşıldığında ise Mg_2Si oluşarak bu bileşiğin katı çözelti içinde çözünürlüğünü düşürerek [5], malzemeyi kırılgan hale getirir [7]. Dövme alaşımlarında %12'ye kadar silisyum sert lehim sacına giydirme yapılması için eklenmektedir. %5 Si içeren alaşımlar, eloksal uygulandığında siyah renkte olmaktadır ve dekoratif amaçlı kullanılmaktadır [5]. Ayrıca yeterli miktarlarda (%12'ye kadar) silisyum; kaynaklama ve lehimleme uygulamalarının ergime noktasını düşürmektedir [6]. Genellikle yüksek Si içeren alaşımlar döküm proseslerinde yani düşük sünekliğin gerektiği proseslerde kullanılmaktadır. Ayrıca Si çekmeyi (shrinkage) düşürdüğünden dökümde yüksek miktarda Si içeren alaşımlar tercih edilmektedir. Si'nin korozyon direncine etkisi çok azdır [7].

2.4. Magnezyum

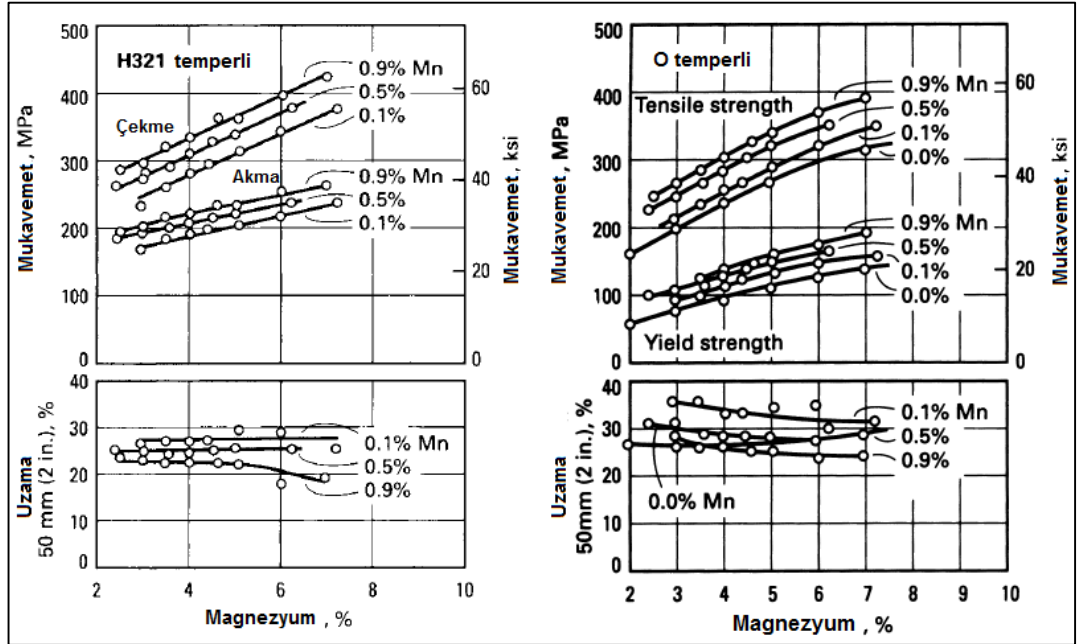
Alüminyum içindeki çözünürlüğü % 17.4 olan magnezyum 5xxx ve 6xxx serilerinin ana alaşım elementidir ve 2xxx serisinde bakırın yanında ikincil element

olarak eklenmektedir. Dövme alaşımlarında miktarı % 5.5'i aşmamaktadır. Magnezyum, alüminyumun mukavemetini, sünekliğini çok düşürmeden arttırmaktadır. Magnezyum, tane sınırlarında tercihli olarak çökelerek Mg_5Al_3 veya Mg_5Al_8 yüksek anodik fazları oluşur ve taneler arası çatlama ve stres korozyonuna daha hassas hale gelir, korozyon direnci ve işlenebilirliği iyidir [5].

Magnezyum, manganla kıyaslandığında sertlik sağlamada daha etkilidir; sertlik artışı açısından % 0,8 Mg ilavesi, % 1,25 Mn ilavesine denk gelmektedir [5].

2.5. Magnezyum- Mangan

Dövme alaşımlarında bu sistem deformasyon sertleşmesi koşullarında yüksek mukavemet, yüksek korozyon direnci ve iyi kaynaklama karakteristiğine sahiptir. Mg veya Mn'dan herhangi birinin miktarındaki artış fabrikasyondaki zorluğu arttırmaktadır ve sıcak haddeleme sırasındaki çatlak oluşma eğilimini arttırmaktadır (özellikle sodyum varlığında). Manganın eklenmesindeki iki önemli avantaj; magnezyum fazının çökeltisi yapı boyunca daha yaygındır ve bu da mukavemet artışı sağlar, mangan daha düşük magnezyum içeriğine izin verir ve alaşımın kararlılık derecesinin daha iyi olmasını sağlar.



Şekil 2.3: 13 mm H321 ve O temperli Al-Mg-Mn alaşım plakasının çekme özellikleri.

Şekil 2.3’de H321 ve O temperli Al-Mg-Mn alaşımasının mukavemet ve uzama özellikleri gösterilmektedir [5]. Magnezyumdaki her % 1’lik artış, çekme mukavemetinde yaklaşık 35 MPa’ a kadar arttırmaktadır; manganın yaklaşık iki katı magnezyum kadar etkilidir [5].

2.6. Çinko

Al-Zn alaşımları, döküm alaşımlarının sıcak çatlağı ve dövme alaşımlarının stres- korozyon- çatlağına duyarlılığı bu alaşımların kullanımını düşürmektedir. Buna rağmen alüminyum içinde çinko varlığı, çözünme potansiyelini arttırdığı için koruyucu giydirme (7072) yapılmaktadır. Diğer elementleri içeren Al-Zn alaşımları, dövme alaşımlarında çekme özelliklerinin en yüksek kombinasyonu sunmaktadır [5].

2.7. Demir

Katı halde çözünürlüğü çok düşük ($\sim 0.05\%$) olan demir, alüminyum ve diğer alaşım elementleri ile birlikte intermetalik ikincil faz olarak görülmektedir. Demir alaşımda bulunması halinde sertliği arttırmakta ve alaşımı kırılganlaştırmaktadır. Dövme alaşımlarında tane boyutunu düşürmektedir [5].

3. ALÜMİNYUM - LİTYUM ALAŞIMLARI

Alüminyuma katılan metalik alaşım elementlerinden, yoğunlukta en büyük düşüş sağlayan lityum, kalsiyum, magnezyum ve berilyum elementleridir. En etkili yoğunluk düşüşünü lityum ve berilyum sağlamaktadır [9], [11]; saf alüminyuma ağırlıkça % 1 Li eklenmesi ile yoğunlukta % 3 düşüş sağlanırken, elastik modulüste % 6 artış sağlanmaktadır [11], [12].

Alüminyum içinde atomik olarak %1'den fazla çözünen sekiz elementten biri olan lityumun, çökelti sertleşmesi etkileri de geliştirilebilmektedir [13]. 1920'lerde Almanlar tarafından bulunan Al-Li alaşımları, ilk kez ticari olarak 1950 ve 1970'lerde kullanılmıştır [6] ve birinci nesil Al-Li alaşımları olarak bilinmektedir. 2020 alaşımı askeri bir uçak tipinde (RA5C Vigilante) [6] kanat yüzeyinde kullanılmış bu uçak 20 yılın aşkın süre boyunca korozyon veya çatlak belirtisi göstermeden hizmet göstermiştir [14]. Daha sonra düşük tokluk özelliklerinden dolayı kullanılmamıştır [15]. Birinci nesil alaşımlar; düşük mukavemet, düşük süneklik ve yüksek kırılgenlik özelliklerinden ötürü, daha çok alüminyum alaşımlarına (bakır, çinko gibi Al içinde çözünebilen elementler içeren) eklenerek özelliklerinin geliştirilmesinde kullanılmaktadır [13].

Tablo 3.1: Li içeren alaşımların % ağırlıkça kompozisyonları.

Alaşım Adı	Li	Cu	Mg	Zr	Diğer
2020	1.3	4.5	-	-	0.5Mn, 0.25Cd
2090	2.2	2.7	—	0.12	—
2091	2.0	2.1	1.5	0.10	—
8090	2.4	1.3	0.9	0.10	—
8091	2.6	1.9	0.9	0.12	—
8092	2.4	0.65	1.2	0.12	—
2094	1.1	4.8	0.5	0.11	0.4Ag

Tablo 3.1: Devam.

2095	1.3	4.3	0.4	0.11	0.4 Ag, 0.12 Si max, 0.15 Fe max
2096	1.6	2.7	0.4	0.11	0.4 Ag, 0.12 Si max, 0.15 Fe max
2097	1.5	2.8	0.35max.	0.12	0.35Mn
2197	1.5	2.8	0.25 max	0.11	0.05 Zn, 0.1 Fe max, 0.1 Si max
2195	1.0	4.0	0.5	0.12	0.4Ag
1420†	2.0	–	5.2	0.11	-
1421	2.1	-	5.2	0.11	0.17 Sc, 0.1 Si max, 0.15 Fe max
1440	2.4	1.5	0.8	0.11	0.1 Si max, 0.15 Fe max
1450	2.1	2.9	-	0.11	0.1 Si max, 0.15 Fe max
1460	2.25	2.9	-	0.11	0.1 Si max, 0.15 Fe max
Weldalite 049	1.3	5.4	0.4	0.14	0.4 Ag
CP 276	2.2	2.7	0.5	0.12	-

Tablo 3.1’de Li içeren alaşımların % ağırlıkça kompozisyonları gösterilmiştir [9], [14, 15] ,[16].

1980’lerde ikinci nesil Al-Li alaşım ürünleri ile ağırlık düşüşü sağlanarak, dövme ürünlerin yerini alması amaçlanmıştır [6], [14]. İkinci nesil alaşımlarda Li oranı ağırlıkça % 2’den fazladır [14]. Bu alaşımlarda istenen ağırlık düşüşü sağlanmıştır. Fakat bunun yanında gövde tasarımcıları için istenmeyen özellikler de görülmektedir [14]. Buna örnek olan 2090 ve 8090 alaşımları, başarılı olsa da anizotropik özellikleri

ve göreceli düşük korozyon direnci bu alaşımların kullanımını sınırlamıştır [6]. İkinci nesil alaşımlar için başlıca iyi performans farklılıkları;

- Düşük yoğunluk (% 7-10)
- Yüksek elastik modül (% 10-16)
- Yüksek yorulma ömrü (düşük yorulma kırılma büyüme hızı)

İkinci nesil alaşımlar için başlıca negatif performans farklılıkları;

- Düşük kısa enine kırılma tokluğu
- Düşük düzlemsel gerilme (K_{IC}) kırılma tokluğu/ levhada kalıntı mukavemet
- Çekme özelliklerini yüksek anizotropisi [14]

Bu sebeplerden ötürü 1980'lerin sonu ve 1990'ların başında Li miktarı ağırlık % 1-1.8'lere düşürülmüştür [14]. Lagan ve Pickens yaptığı çalışmada Li miktarı ağırlık % 1.3 üzerinde olduğunda akma ve çekme mukavemetini düşürdüğü görülmüştür. Ayrıca maksimum mukavemetin ağırlık % 1.1-1.3 Li oranı ile sağlandığı görülmüştür [17]. Ayrıca Al-Li-Cu alaşımlarına küçük miktarlarda Zr, Ag, Mg ve diğer nadir toprak elementlerinin katılması ile mukavemet ve toklukta iyi kombinasyon sağlanmıştır [18].

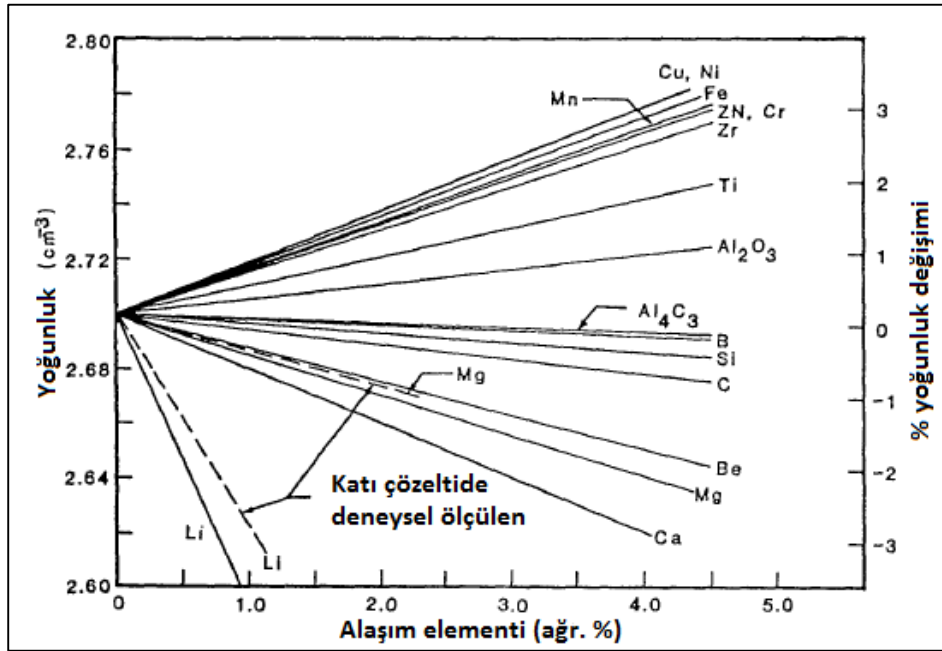
Sonucunda 1980 ve 1990 sonlarında üçüncü nesil olarak bilinen kaynak yapılabilir Al-Li alaşımları Martin Marietta'da yapılmış ve uzay ve uçak uygulamalarında önemli başarılar elde etmiştir [6]. Ayrıca Al-Li alaşımları kriyojenik uygulamalarda da kullanılmaktadır [19]. Bu alaşımlarda başlıca alaşım elementi bakırdır, az miktarda lityum (%1 den çok az fazla), % 0.4 Mg ve 0.4 Ag içerir [6]. Üçüncü nesil Al-Li alaşımları olarak anılan 2094, 2095, 2195, 2096, 2097 ve 2197 alaşımları plaka olarak 1990'larda araştırılıp geliştirilmiş ve lityum miktarı düşürülmüştür.

Üçüncü nesil alaşımlara örnek olan 2195 alaşımı, dış yakıt deposu (external fuel tank (2219-T8) yerini almıştır % 5 daha hafif ve % 30 daha mukavimdir [15], ~ 3500 kg ağırlıkta düşüş sağlanmıştır [6]. 2197 alaşımı, F-16 savaş jetlerinde bölmeleri yenilenmektedir [6].

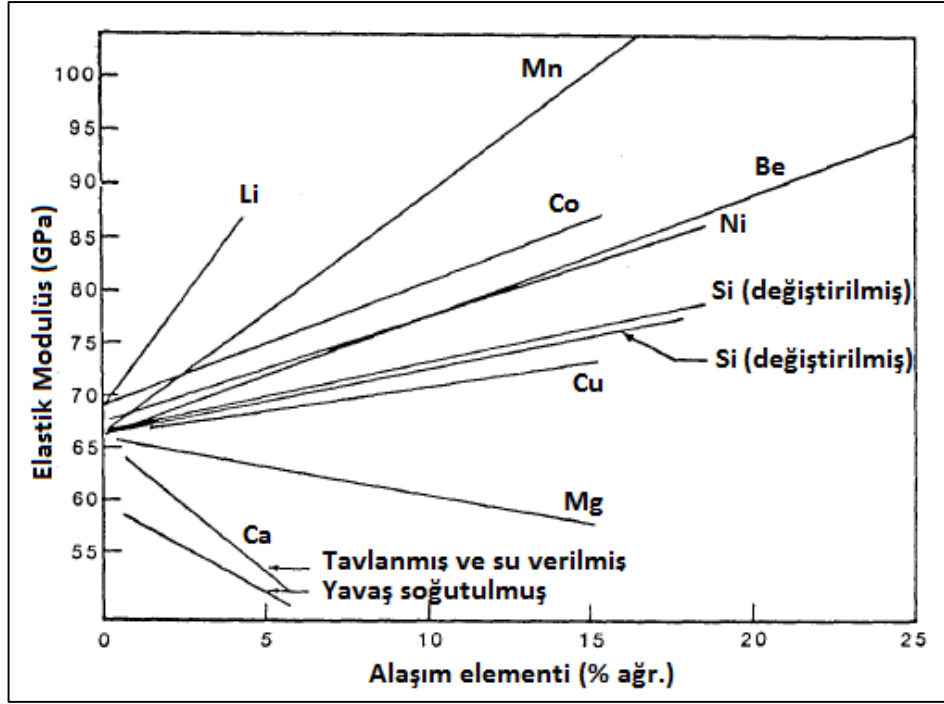
Al-Li alaşımlarının deney niteliğinde en umut vaadeden uygulamaları; hafif ve dayanıklı olan uzaya fırlatma aracıdır (space launch vehicles) [6]. Uzay araçlarını

alçak yörüngeye fırlatmak için kilo başına yaklaşık maliyet \$8000 olarak tahmin edilmektedir [6], [15].

Al-Li alaşımlarında lityumun küçük miktarlarda eklenmesi, ısıtım sırasında oluşan koherent, küresel δ' (Al_3Li) çökeltilerinin homojen dağılımı ile çökeltili sertleşmesiyle mukavemet sağlanmaktadır. Yoğunlukta düşüş ve çökeltili sertleşme karakteristikleri ile lityum, düşük yoğunluklu alüminyum bazlı alaşımların geliştirilmesinde kullanılan başlıca element olmuştur [9]. Ayrıca lityum aktif bir metal olmasına rağmen diğer alkali metallerle göre daha az aktiftir, zehirli değildir ve istenen çökeltili sertleşmesi karakteristiğini göstermektedir [11]. Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’ de alüminyuma lityum ve diğer alaşım elementleri ile birlikte yoğunluk ve elastik modülüne etkisi gösterilmektedir [20].



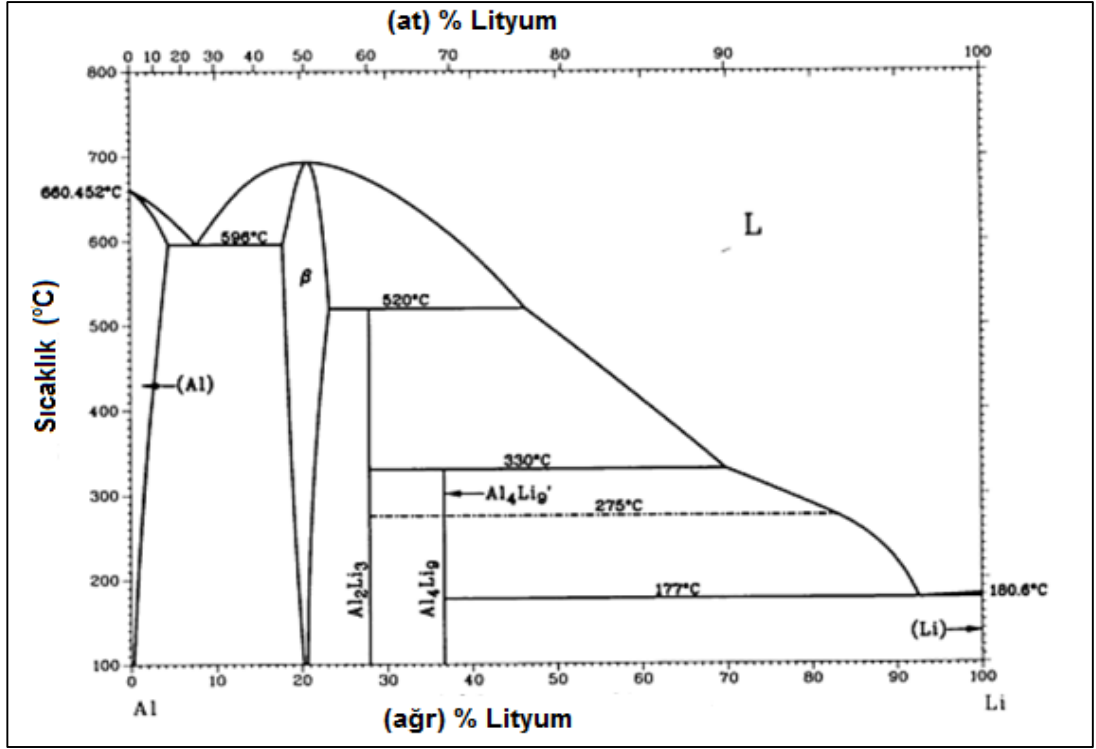
Şekil 3.1: Alüminyum alaşımlarında eklenen metallerin yoğunluk üzerine etkisi.



Şekil 3.2: Alüminyum alaşımlarında eklenen metallerin elastik modülüs üzerine etkisi.

Elastik özellikler lityumun alüminyum içerisinde çözelti içerisinde veya ikincil faz olarak bulunmasına bağlı değildir [12]. Yoğunluktaki düşüş ve elastik modülüsteki artış uçak gövde dizaynına avantaj sağlamaktadır. Al-Li ticari alaşımlarında % 7-10 yoğunlukta düşüş sağlanırken etkili mukavemet de elde edilmiştir. Ham petrol varilinde \$30-50 iken uçak üreticileri her pound (453 gr) için \$500-1000 ödediği ve günümüzde petrolün varil fiyatının ~ \$93,10 olduğu göz önüne alınırsa bu avantajları ile lityum alaşım elementleri arasında ilk seçenek haline gelmektedir [14], [21].

Şekil 3.3'de alüminyum – lityum faz diyagramı verilmiştir [22]. Alüminyumca zengin alaşımlarda, ötektik kompozisyon % 9.9 lityumdur ve ötektik sıcaklık 600°C'dir [23]. İkili Al-Li alaşımlarında lityumun çözünürlüğü 600°C'de ağırlıkça % 4,2 (atomik olarak % 16.3)'dir [20].



Şekil 3.3: Alüminyum – lityum faz diyagramı.

Tablo 3.2: Alüminyum alaşım elementlerinin mekanik özelliklere etkisi.

Alaşım Elementi	Kütlece % alaşım elementi miktarı	Sertlik (MPa)	Mekanik Özellikler			
			20°C		350°C	
			Çekme mukavemeti (MPa)	Göreceli uzama (%)	Çekme mukavemeti (MPa)	Göreceli uzama (%)
-	-	930	310	13	92	11
Cu	2	1280	410	8	95	6
Li	2	1340	430	7	112	6
Mg	2	1320	440	8	117	9
Ti	2	1110	340	9	98	8
Fe	2	1120	340	8	96	7
Ni	2	1130	360	7	96	6
Co	2	1140	370	9	107	7
Mn	2	1150	370	8	108	6

Tablo 3.2: Devam.

V	2	1180	380	8	112	6
Cr	2	1180	380	8	119	7
La	2	1170	380	8	119	7
Zn	2	1210	380	9	134	6
Si	5	1220	370	6	126	4
Pb	10	670	290	11	81	29
C	2	1310	450	6	194	4
B	4	1460	480	7	232	6

Tablo 3.2’de alüminyum içinde lityumun etkisi diğer alaşım elementleri ile birlikte mekanik özelliklere ve elastik modülüne etkisi görülmektedir [24].

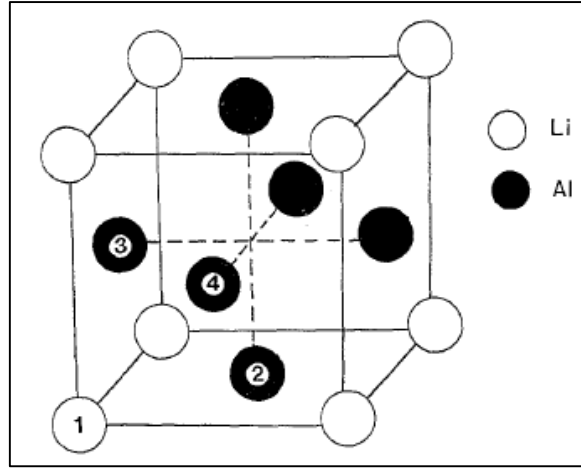
3.1. Al-Li Alaşımlarının Mekanik Özellikleri

Silcock’un yaptığı X-ışını çalışmalarında ikili Al-Li alaşımlarında çökelti sırasının

$$\alpha \text{ (aşırı doymuş)} \rightarrow \delta'(\text{Al}_3\text{Li}) \rightarrow \delta(\text{AlLi}) \quad (3.1)$$

olduğunu göstermiştir [25].

Al-Li temelli alaşımların başlıca mukavemet sağlayan bileşeni δ' (Al_3Li) yarı kararlı fazından kaynaklanmaktadır [26]. Bu yarı kararlı faz KYM-kübik yüzey merkezli Ll_2 düzenli yapıya sahip, birim hücrede bütün yüzeylerde Al ve bütün köşelerde Li yer alır [27]. Matris boyunca homojen ve küresel (gibi) olarak dağılmaktadır, matrisle küp-küp oryantasyonuna ve küçük misfit gerinimine sahiptir [28], [29], [30]. Şekil 3.4’de Al_3Li yapısı gösterilmiştir [20].



Şekil 3.4: Al₃Li yapısı.

δ' fazı, δ solvüs eğrisinden yukarıdaki sıcaklıklarda su verilmiş ve δ' solvüs eğrisinden aşağıdaki sıcaklıklarda yapay olarak yaşlandırılmış %1'den daha fazla lityum içeren Al-Li alaşımlarında oluşmaktadır [31]. Genellikle spinodal ayrışma oluşma mekanizması kabul edilmektedir [32], [33]. Williams ve arkadaşları bunu kabul etmemiş ve homojen çekirdeklenme mekanizması üzerinde çalışmıştır [29]. δ' çökeltileri Lifshitz-Wagner kinetiği ile aynı doğrultuda yaklaşık olarak ortalama yarıçapın küp kökü ile ($t_{ort}^{1/3}$) kabalaştığı görülmüştür [29], [34], [35], [36]. Bu kabalaşmanın da dislokasyon [30] ve tane sınırları [36] gibi hataların yakınlarında kabalaştığı görülmüştür.

δ' fazı, Al-Li-X alaşım sistemlerinin mukavemetlendirilmesinde önemli rol oynamaktadır. Noble ve arkadaşları yaptığı çalışmada, δ' çökeltilerinin Al-Li alaşımlarının mukavemetlendirilmesinde olabilecek dört modeli özetlemiştir [37] δ' parçacıkları dislokasyon hareketine dirençlidir ve bu da alaşımın mukavemetini geliştirir [27]. δ' fazı Al-Li, Al-Mg-Li ve Al-Cu-Li alaşımlarında gözlenmiştir [36] ve Al-Li alaşımlarına Cu ve Mg eklenerek, δ' (Al₃Li) fazına ek olarak mukavemet arttırmada yardımcı heterojen çekirdeklenen T_B (Al₇Cu₄Li) ve T₂ (Al₆CuLi₃) çökeltileri de oluşmaktadır [25], [38]. Mukavemet sağlayan homojen çekirdeklenmeye ek olarak arayüzeylerde ve tane sınırlarında oluşan heterojen çökelti kırılma davranışına tersi yönde etki eder. Kompozisyon ve sıcaklığa bağlı olarak, nispi boyut ve farklı çökeltilerin hacimsel oranı sistematik olarak değişmektedir [9].

Her ne kadar Al-Li-X alaşımlarında mukavemetlendirmede önemli bir rolü olsa da δ' yapılarının tane sınırlarına yakın çökmesi süneklik ve toklukta negatif etki oluşturmaktadır. δ' parçacıklarının yüksek kesilebilir (shearable) yapısı düzlemsel

kaymanın artışında neden olmaktadır. Ayrıca δ' yapıları dislokasyon yığılması ile tane sınırlarında yüksek streslere yol açabilir bu da kırılma direncini düşürmektedir [37], [39].

Genellikle uzun yaşlandırma sürelerinden sonra kararlı δ (AlLi) çökeltisi oluşmaktadır. KHM'li yapıya sahip δ çökeltisi, matrisle yarı koherenttir. Bu faz yüksek açılı ($<9^\circ$) tane sınırlarında baskın olarak heterojen çökeldiği gözlenmiştir [39], [30]. Tosten ve arkadaşları ise hem yetersiz yaşlandırılmış Al-Li-Cu alaşımlarında bazı δ çökeltilerini yüksek açılı tane sınırlarında hem de aşırı yaşlandırılmış durumlarda düşük açılı tane sınırlarında ve matris içinde gözlemlemiştir [30]. δ fazı, δ' çökelti serbest zonlarının (PFZs) oluşmasına neden olabilir [40] bunun da Al-Li ve Al-Li-X alaşımlarında kırılma direnci üzerinde istenmeyen etkisi bulunmaktadır [41]. δ' PFZs matrisle kıyaslandığında bölgesel olarak plastisiteyi arttırdığı görülmüştür ve taneler arası kırılma ve boşluk çekirdeklenmesine (void nucleation) sebep olmaktadır [42].

Bütün alüminyum alaşım ürünleri anizotropik özellik gösterir [43], [44]. Al-Li ürünlerinde çekme özelliklerinin anizotropisi diğer alüminyum alaşımlarına göre daha yüksektir. Bu farklılık; kristallografik dokunun (texture) yüksek derece kombinasyonları ve Al-Li çökeltilerinin etkileşiminden kaynaklanmaktadır. Al-Li temelli alaşımların mekanik özelliklerinde birkaç farklı anizotropi çeşitleri rapor edilmiştir. Hepsi; kristallografik doku, soğuk deformasyon, tane boyutu ve şekli arasındaki etkileşim içinde olan merkeze sahiptir ve yaşlandırma sırasında çökeltiler gelişmiştir [45], [46], [47]. Kristallografik doku sonucu oluşan anizotropi gibi dislokasyon ile etkileşen çökeltiler önemli ölçüde artar [14].

Al-Li tipi alaşımların optimum deformasyon ve kırılma davranışı; gerinim lokalizasyonu (kesilebilir çökeltilerin düzlemsel kaymasından kaynaklanır), yavaş katılma sırasında oluşan kaba intermetalikler, Al-Li alaşımlarında bulunan yüksek seviyelerdeki hidrojen ve sodyum, potasyum, sülfür gibi elementlerin tane sınırı segregasyonuna bağlıdır [48].

Mekanik özelliklerin anizotropisinin düşürülmesi şu işlemlerle gerçekleştirilmektedir; yeniden kristalleşme, ara basamakta yeniden kristalleşme, aşırı yaşlandırma, dağıtıcı şeklini değiştirme, farklı yönlerde gerdirme veya soğuk haddeleme, dövme deformasyonunun miktarını düşürmedir [14].

3.2. Al-Li Alaşımlarının Kırılma Tokluğu

Al-Li alaşımlarının kırılma direnci, geleneksel alüminyum alaşımları ile karşılaştırıldığında yetersiz kalmaktadır. Kapsamlı araştırmalar sonucu çeşitli metalurjik faktörlerin kırılma direncini direkt etkilediği görülmüştür.

Bunlar;

- aynı düzlemlile deformasyon ve kayma lokalizasyonu [39], [49], [50], [51], [52], [53],
- yumuşak δ' çökelti serbest zonları (PFZs) gerinim lokalizasyonu [54], [55], ,
- δ , T1 ve T2 gibi kaba dengeli çökelti ve kaba, köşeli Fe, Si içeren inklüzyonlar [55], [56], [57], [58], [59], [60],
- tane sınırları ve düşük ergime sıcaklığına sahip ötektik fazlara göre Na ve K alkali elementlerinin segregasyonu [61], [62],
- tane sınırı gevrekliğine neden olan daha yüksek hidrojen miktarı [59], [63],
- alt tane sınırları boyunca kırılmadır, (özellikle yeniden kristalleşmemiş alaşımlarda) [60], [64].

3.3. Al-Li Alaşımları Korozyon Özellikleri

Al-Li alaşımlarının korozyon davranışı, uçak uygulamalarında kullanılan diğer yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarının korozyon davranışına benzerdir. Sac ve plaka malzemeleri, yetersiz yaşlandırılmış ve aşırı yaşlandırılmış ısıt işlemlerde pul pul dökülme korozyonu ve çevre etkisiyle oluşan çatlağa karşı duyarlı olduğu bulunmuştur [65]. Sac malzemelerin gerilim korozyon çatlaması - stress corrosion cracking - (SCC) direnci tane yapısına bağlı olduğu belirtilmiştir [47].

Al-Li alaşımlarının korozyon direnci zayıflık, çökelti fazlarının (δ' fazı gibi) varlığından kaynaklanmaktadır. Lityum alüminyuma nazaran anot görevi görmesinden ötürü, alüminyumun lityum ile alaşımlandırılmasında korozyon direncini oldukça düşürmesi beklenmektedir [46]. Sinyavskii ve Semenov'un çalışmasında da ikili Al-Li alaşımlarında aslında SCC'ye karşı duyarsız olduğu ve normal koşullarda çözünme hızı lityumun selektif çözünmesi sonucu 30 kata kadar artabildiği (selective dissolution) görülmüştür [46]. Bu çalışmada lityumun alüminyumun elektrot

potansiyeli yavaşça düşürdüğü görülmüş ve SCC'ye karşı duyarsız olduğu belirtilmiştir [46].

Al-Li alaşımları sulu ortamlarda korozyon oluşumuna meyillidir ve mekanik özelliklerini kötüleştirmektedir [45]. Al-Li alaşımlarına, kromat anodik filmler, kromat dönüştürme tabakaları, korozyon engelleyiciler (nadir toprak tuzları gibi) uygulanmıştır [66].

3.4. Al-Li Alaşımları Yorulma Özellikleri

Dhers ve arkadaşlarının sistematik olarak saf Al ve ikili Al-Li alaşımları ile yaptığı çalışmada alüminyum katı çözeltide Li miktarı (< ağırlık % 0.7) iken düşük döngü yorulmasına (DDY) (Low cycle fatigue) önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür [67]. Daha çok Li eklediğinde (> ağırlık % 1.1) koherent δ' (Al_3Li) çökeltisi DDY direncini önemli derecede düşürmektedir [67]. Ayrıca ikili Al-% 2.5 Li (ağırlık %) DDY direnci saf Al ve Al-% 0.8 Li (ağırlık %) alaşımlarında daha düşüktür; δ' çökeltisinin kesilerek bölgesel gerinime neden olmaktadır ve taneler arası kırılma ile sonuçlanmasının katkısı vardır [67].

Suresh ve arkadaşlarının yaptığı ikili Al-% 2.5 Li alaşımlarında yaşlandırma derecesindeki artış DDY direncini düşürmektedir [42]. Dhers ve arkadaşları DDY direncindeki ani düşüşün, yüksek açılı tane sınırlarında kaba ve kolonsal δ çökeltilerinden kaynaklanan tane sınırı kırılabilirliği ile δ' çökeltisinin kabalaşması sonucu artan düzensel kaymanın katkısı vardır [67]. Lakin yaşlandırma derecesinin artışı DDY direncine etkisi her zaman zararlı değildir. Eswara ve arkadaşlarının AA8090 Al-Li alaşımı ile yaptığı çalışmada DDY direnci yaşlandırma derecesi ile artmaktadır [68]. Bütün bu çalışmalarda tane küçültme ve baskın olarak yeniden kristallemiş veya tamamen yeniden kristalleşmemiş tane yapısının DDY direncinin geliştirilmesinde daha yararlı olduğu görülmüştür [50], [69], [70]. Srivatsan ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada yeniden kristallenmemiş tane yapılarının, yeniden kristallenmiş eşleri ile karşılaştırıldığında yorulma ömrünün 2-3 kat kadar daha yüksek olduğu görülmüştür [69].

Mangan, tane küçültücü (grain refiner) olarak ikili Al-Li alaşımlarında mukavemeti geliştirir fakat DDY direncini geliştirmemektedir [71]. Ana alaşım

elementlerinden Cu (Mg ile birlikte veya değil) eklenmesi ile DDY direnci geliştirir ve esasen aynı veya bazı durumlarda çekme mukavemetini geliştirmektedir [71].

3.5. Al-Li Alaşımlarının Üretimi

Al-Li alaşımlarının üretimi; İngot metalurji, toz metalurjisi ve hızlı soğutma teknikleri ile gerçekleştirilmektedir. Bu malzemelerin üretimi, konvensiyonel Al alaşımlarına göre maliyetlidir. Çünkü Li'nin kimyasal reaktivitesinden dolayı özel tekniklerle üretimi gerekmektedir [23]. Al-Li alaşımlarının maliyeti süperplastik şekillendirme tekniği ile giderilebilmektedir. Bu teknik ile hem maliyet hem de ağırlıktan tasarruf sağlanmaktadır. Ancak, günümüzde bu teknik pres boyutları ile sınırlı kalmaktadır [72].

Düşük tokluk ve kırılma tokluğuna sahip Al-Li-X alaşımları bu dezavantajları minize etmek için hızlı soğutma, toz metalurjisinin mekanik alaşımlandırma ile birleşimi ve ingot döküm içeren çeşitli prosesler geliştirilmiştir. Hızlı soğutma ve mekanik alaşımlandırma, tane boyutunu düşürme ve katı çözünürlüğünü genişletmek için kullanılmaktadır. İngot döküm ise geniş plaka ve ekstrüzyon ürünlerinde en uygun method olduğunu ispatlamıştır ve halen ticari ürünlerde bu alaşımlar için kullanılmaktadır. Bununla birlikte, mekanik alaşımlandırma içeren toz metalurjisi ile dövme işlemleri uygulanan belirli ürünler için avantaj sağlamaktadır [73].

Lityumun alüminyuma bu yararlı etkilerinin yanında azami mukavemete yaşılandırılmış, su verilmiş ve çözündürme ısıll işlemi uygulanmış alaşımlarda sünekliğin ve kırılma tokluğunun düşüşüne neden olmaktadır, [20], [58], [64], [74], [75], [76],. Hızlı soğutma tekniği ve hızlı su verme ile lityum içeren alüminyum alaşımlarının düşük süneklik ve kırılma tokluğu özelliklerini geliştirmiştir [23].

Al- Li alaşımlarında hızlı soğutma tekniğinin ingot döküme göre avantajları mevcuttur [20];

- İngot dökümde Li miktarı maksimum ağırlıkça % 2.7 'dir.
- Dispersion mekanizması ve substructure mekanizmalarıyla daha sert yapı elde edilir.
- Alaşımlandırma miktarı artmaktadır.
- İkincil fazlardan yoksundur

Buna karşın ingot dökümle üretim; süneklik, kırılma tokluğu ve korozyon direncini de içeren diğer mekanik özellikleri de geliştirmiştir [23].

Birçok yenilenmiş Al-Li gelişmeleri sonucunda hızlı katılaşma toz metalurjisi teknikleri kullanılmıştır. Uçak için gereken kütük boyutu arttığı halde üretim aşırı derecede zor ve pahalı olmaktadır. Yeni ingot metalurji alaşımları 8090, 8091, 2090, 2091 ve CP 276 geliştirilmiştir. Günümüzde ise yukarıda bahsedilen toz ve ingot metalurji gelişmelerinden sadece 8090 ticari uygulamalarında geçerliliğini korumaktadır [13].

3.6. Kaplamalar

Alüminyum metali yüzeyinde oluşturduğu oksit tabakası sayesinde korozyona dirençlidir fakat alaşımlarında ise çeşitli korozyon türleri görülmektedir. Korozyon direnci, alaşımın içeriğine ve oksit filme etkisine bağlıdır. Esasen bütün alaşım elementleri, katı çözelti, çökelti oluşumu (yeni fazlar), mikroyapı ve dökülebilirlik vasıtasıyla alaşımın potansiyelini etkileyebilmektedir. Bu etki, korozyon hızını, pasifleştirmeyi ve korozyon tipini etkileyebilmektedir [2].

Bakır bazlı alüminyum alaşımları dışında diğer alüminyum bazlı alaşımlar (örneğin; 1100, 3300, 5052, 6053, Alclad 3300, Alclad 1017-T ve Alclad 2024-T) açık hava koşullarında korozyon direnci yüksektir. Bu alaşımlar açık havada (özellikle SO₂'den dolayı) renk değiştirir fakat (0.076 mm'den ince kısımlar haricinde) yapısal olarak özelliklerde değişme olmamaktadır [77]. Açık havaya maruz bırakılarak yapılan testlerde, 103.1mm'lik numunelerin bir yılda alaşıma ve atmosfere bağlı olarak çekme mukavemetlerinde genel olarak % 1-2 kayıp görülmüştür [2]. Bunun yanı sıra farklı alüminyum alaşımlarına farklı ülkelerde uygulanan testlerde korozyon hızının endüstriyel atmosferde 15-20 µm/yıl, deniz atmosferinde 10-18 µm/yıl olduğu görülmüştür [78].

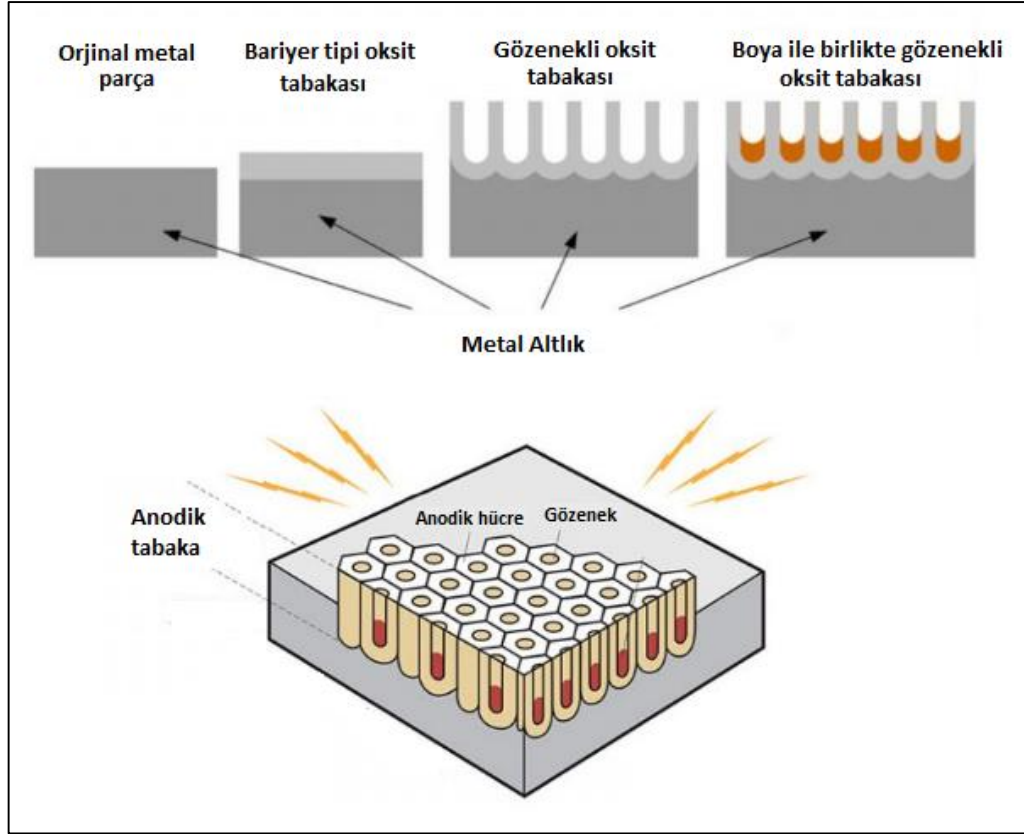
Genel olarak metallerde korozyonu engellemek veya azaltmak için metalik, organik ve inorganik kaplamalar uygulanır. İnorganik kaplamalar; cam ve seramik kaplamalardır, bazı uygulamalarda düzgün ve dayanıklı yüzey elde edilmesi için seramikle kaplama yapılır. Organik kaplamalar; boyalar, vernikler, lakeler ve diğer birçok organik polimer malzeme, metalleri korozyondan korumak için kullanılır. Bu

kaplamalarda koruyucu kısım; ince, sağlam ve kalıcı bir engeldir. Her ne kadar en çok kullanılan kaplamalar olsa da kaplama filminin çatlaması ile alttaki metalin hızla saldırıya uğradığı durumlarda kullanılmamalıdır [4]. Metalik kaplamalar; korunacak metal üzerine ince bir tabaka halinde çevrilerek, alttaki metalin yerine korozyona uğrarlar. Bazen ince bir metal korunacak metalin yüzeyine haddelenerek yapıştırılır. Alcladding (giydirme) korozyona dirençli ince bir saf alüminyum tabakası yüksek dayanımlı alüminyum alaşımlarına haddelenerek korozyona dirençli hale getirilir [4].

3.7. Eloksal

Uluslararası terminolojide “Anodik oksidasyon” veya “Anodizasyon” olarak da bilinen Eloksal yüzey işlemi; Almanca’dan dilimize girmiştir. Eloksal; elektrokimyasal olarak alüminyumun yüzeyinde, doğal olarak oluşan oksit tabakasının kalınlaştırılmasıdır. Eloksal; oksijen ilgisi yüksek olan hafif metal ve alaşımlara (Al, Mg, Ti... vb.) uygulanabilmektedir.

Dışta oluşan gözenekli yüzey renklendirilebilir ve su içinde kaynatılarak gözeneklerin alüminyum hidroksit ile doldurulabilir. Genellikle anodik kaplamaların kalınlığı 5-18 μm (0.2-0.7 mm)arasındadır [79]. Şekil 3.6’da eloksal uygulanan alüminyum alıtlığının iki boyutlu ve üç boyutlu gösterimi yer almaktadır [80].



Şekil 3.5: Eloksal uygulanan altlığın iki ve üç boyutlu gösterimi.

1920'lerden günümüze kadar kullanılmakta olan eloksallama, estetik görünümünü iyileştirmek, daha uzun ömür sağlamak, daha sert yüzey oluşturmak, korozyon ve aşınmaya karşı direncini arttırmak için yapılır. Silah ve medikal sektörlerinde kullanıldığı gibi dekoratif olarak da kullanılmaktadır. Dielektrik kapasitörler, koruyucu ve dekoratif olarak ve organik ve elektrolitik plating cila/rötuş (finishes) da kullanılır. Ayrıca elektriksel ve termal yalıtım, sert, sarma (seizure) ve aşınma direnci kaplamalarında kullanılır. Anotlama sonrası ikincil kaplamalara da kullanımına imkân vermektedir (boyama, reçine, vernikleme... vb.) [79].

Çeşitli eloksallama proses ve patentlerde [2], kromik asit, sülfürik asit [77], oksalik asit [78], [79], fosforik asit, borik asit [81] ve bunların asit karışımları kullanılmıştır. Bu elektrolitlerin arasında endüstride kullanılan çeşitleri; kromik asit, sülfürik asit, oksalik asit, borik asittir [79].

Sert anotlamada, solüsyonlarında sülfürik asit yalnız veya katkılarla (additive) kullanılmaktadır. Yeni borik ve sülfürik asit karışımı, anotlama süreci sırasında toksik asit atıklarının düşmesini ve daha iyi yorulma mukavemeti sağlar [79].

Tablo 3.3: Eloksal filmin fiziksel özellikleri.

Özellikler	Koşullar	Ölçüm değerleri
Özgöl ağırlık	20°C	2.5 - 3 g/cm ³
Sertlik	-	300-600 HV
Ergitme sıcaklığı	-	2100°C
Özgöl ısı	20-100°C	0.200 birimlerini yazalım eksik olanların
Isıl genleşme hızı	20-100°C	5 x 10 ⁻⁴
Isıl iletkenlik	-	0.05-0.015 (C.G.S)
Elektrik direnci ($\Omega \cdot \text{cm}^2/\text{m}$)	20°C (50 μm) 100°C(50 μm)	4 x 10 ¹⁷ 8x 10 ¹⁸
Voltaj limiti (V)	5-30 μm	$\mu\text{m} \times 20-40$

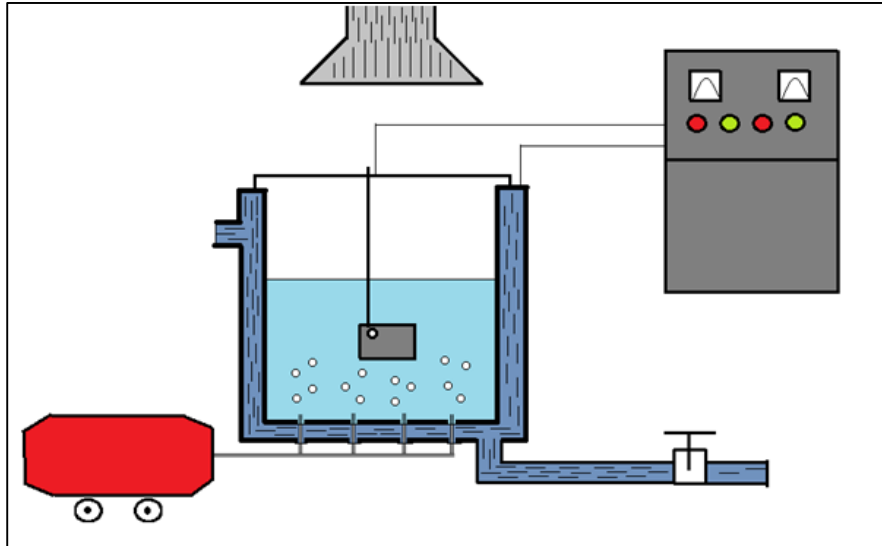
Tablo 3.3’de eloksal filmin fiziksel özellikleri gösterilmektedir [2]. Eloksal işlemi öncesinde, malzeme yüzeylerinde bulunan hataları gidermek ve istenilen parlak görünümün sağlanması amacıyla mekanik işlemlere (polisaj, zımparalama, satinaj) tabi tutulurlar. Mekanik işlemlerin ardından kimyasal işlemlerle yüzeyde kalan kalıntı ve yağlar giderilir. Ayrıca yüzeye mat veya parlak görüntü sağlamak için de uygulanmaktadır [81].

Elektrik akımı, anot ve katot arasında hareket ederken sülfürik asit elektroliti içerisindeki sülfürik asidin parçalanmasına neden olur. Bunun sonucunda iki alüminyum iyonu üç oksijen iyonu ile birleşerek alüminyum yüzeyinde Al₂O₃ oluşturur. Eloksal işlemi sırasında sıcaklık, elektrotlar arasındaki uzaklık, süre gibi ortam parametreleri kontrol altında tutulmalıdır [82], [83]. Eloksal yönteminde en verimli kaplamalar 18-24°C’de elde edilmiştir [84]. Bu yüzden sıcaklığın sabit tutulması gerekmektedir. İşlem sırasında ısı açığa çıkar ve bu ısının sistemden uzaklaştırılması gerekir.

4. MİKROARK OKSİDASYON KAPLAMA

Eloksala benzeyen bir yöntem olan mikroark oksidasyon (MAO) yöntemi; “Plasma Elektrolitik” ,”Mikro Plazma Oksidasyon”, “Kıvılcım deşarjı altında anot oksidasyonu” ve “Anodik Kıvılcım Oksidasyonu” olarak da bilinmektedir. MAO kaplamalar, anodik oksit kaplamalarla göre yüksek mekanik özellikler ve plazma spreylere göre de harika adhezyon mukavemet göstermektedir [85]. MAO kaplamaların harika aşınma, sürtünme, korozyon, elektriksel ve ısı özellikleri sayesinde özellikle tekstil makine parçalarında, uzay parçalarında, mühendislik araçlarının parçaları ve biyomedikal araçlarda ilgi uyandırmaktadır [86]. Eloksalın aksine MAO’da asimetrik alternatif akım veya darbeli akım altında zayıf alkali çözelti içinde yaklaşık 1000 V ile gerçekleştirilmektedir. Kaplanacak numune, elektrolitik çözelti içine daldırılarak ve yüksek güçteki doğru akım kontrollü olarak uygulanmaktadır.

MAO sistemi, 3 bölümden oluşmaktadır; güç kaynağı, tank ve pompa. Şekil 2.1’de MAO sistemi gösterilmektedir [87]. Paslanmaz çelik tank içerisinde, oksitlenecek metal veya alaşım anot kısmına bağlanır. Tank, çift cidar soğutmalıdır aynı zamanda katot görevi görmektedir. Pompa ise hava solüsyon ve soğutma birimi sıcaklığının homojenizasyonu için kullanılmaktadır.



Şekil 4.1: Mikroark oksidasyon prosesi.

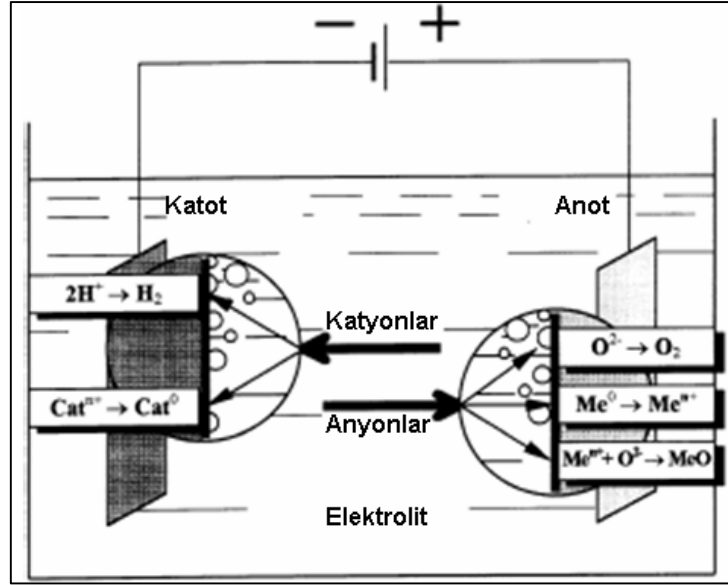
4.1. MAO Kaplamaların Kullanım Alanları

MAO kaplamalar, uzay araç malzemelerinde ısı kontrol olarak, kriyojenik özellik taşıyan uygulamalar ve uydular için kullanılmıştır. MAO kaplamaların özellikleri sayesinde özellikle tekstil makine parçalarında, uzay parçalarında, mühendislik araçlarının parçaları ve biyomedikal araçlarda ilgi uyandırmaktadır [86].

Alüminyum alaşımlarına MAO kaplama uygulanması ilgili ilk olarak akademik çalışma, Yerokhin ve arkadaşları tarafından 1999'da yapılmıştır. Ticari adı Keronite ve Keplacoat olarak endüstriye kazandırılmıştır. Uzay ve roket endüstrisinde, otomotiv, yağ ve gaz, tekstil, gemi imalatı, medikal aletler, biyomedikal ekipman ve ambalajlama endüstrisinde de kullanılmaktadır.

4.2. MAO Prosesinin Fiziksel ve Kimyasal Temelleri

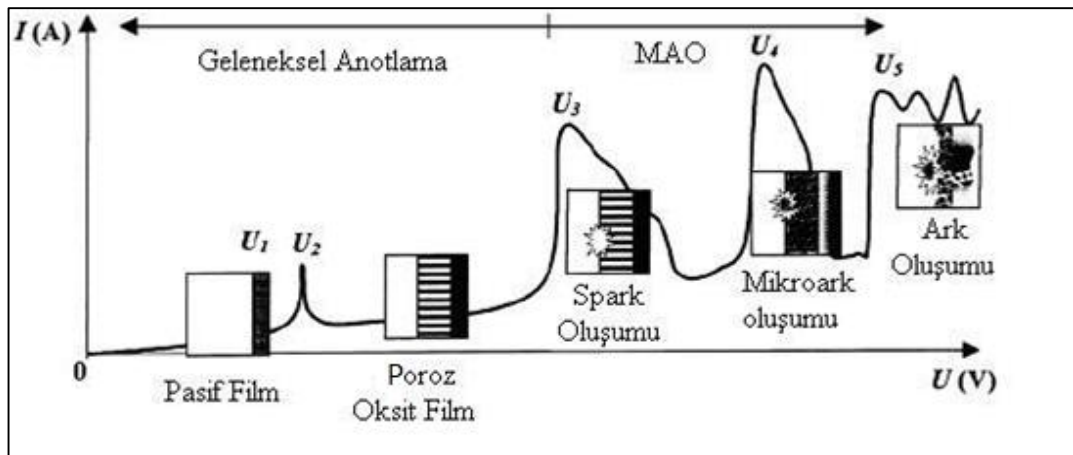
Şekil 4.2'de tank içinde gerçekleşen kimyasal elektrolizindeki elektrot işlemleri gösterilmektedir [86]. Şekilde görüldüğü gibi sıvı çözeltilerin elektrolizinde özellikle anot yüzeyinde oksijen gazının serbest hale gelmesi ve/veya metal oksitlenmesinin oluşması; katot yüzeyinde hidrojen gazının serbest hale gelmesi ve/veya katot indirgenmesinin oluşması gibi elektrot işlemlerinden oluşur. Elektrolitin kimyasal aktivitesine bağlı olarak metalle ilgili olarak; oksijen prosesi yüzey çözünmesi veya oksit film oluşturma şeklinde olabilir.



Şekil 4.2: Tank içinde gerçekleşen kimyasal elektrolizindeki elektrot işlemleri.

Geleneksel elektrolitik işlem (elektrokimyasal kaplama, anodizasyon vb.) çalışıldığı zaman, elektrolit işlemleri genellikle çift-şarjlı tabakadan oluşan tek faz sınırlı ikifazlı sistem (metal-elektrolit veya oksit-elektrolit çifti) tarafından temsil edilebilen, elektrot-elektrolit ara yüzeylerinde basitleştirilmiş model olarak düşünülür. Belirli koşullar altında prostesten elde edilen sonuçlar, elektrot ve/veya yüzey tabakalarını çevreleyen gazlı ortamda oluşan işlem tarafından önemli ölçüde etkilenir [86].

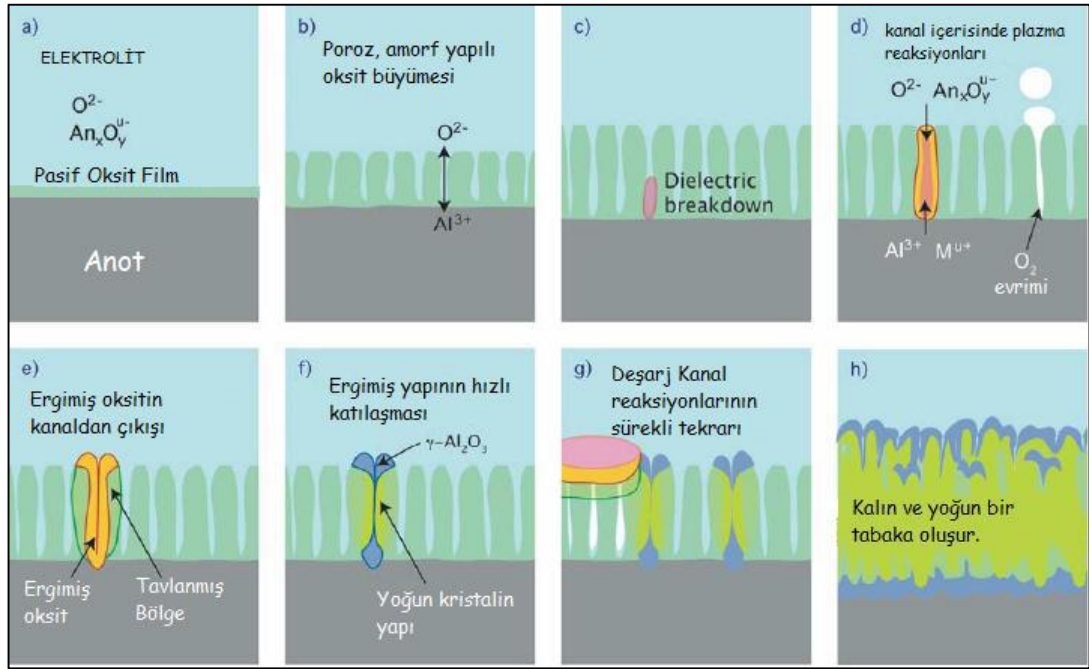
4.3. MAO Akım-Voltaj Karakteristiği



Şekil 4.3: MAO prosesi sırasında akım –voltaj eğrilerinin gösterimi.

Şekil 4.3' de MAO prosesi sırasında akım –voltaj eğrilerinin gösterimi verilmiştir. [88]. 0-U1 arasında pasif film oluşmaktadır. U2'de ise bu pasif film çözünmektedir. U2 - U3 arasında ise pasif film tekrar oluşmaktadır ve poroz oksit tabakası büyümeye başlamaktadır. U3'e kadar eloksal yöntemi ile aynıdır. U3 noktasında, oksit film içerisindeki elektrik alan kuvveti çarpma ve tunneling iyonizasyondan dolayı filmi baştanbaşa kıran kritik değere ulaşır [89], [90] ve oksit film yüzeyinde küçük parıldayan kıvılcımların hızlı bir şekilde hareket ettiği gözlenir. U4' de termal iyonizasyonun desteği ile daha yavaş ve büyük ark deşarjı görülür. U4-U5 arasında kalınlaşan oksit tabakası termal iyonizasyonu kısmen engeller. U5' de mikroark kıvılcımlarının şiddeti artar ve kaplamanın büyümesini engeller [91].

Şekil 4.4'de MAO prosesinde oksit tabakasının oluşumu gösterilmektedir [91].



Şekil 4.4: MAO prosesinde oksit tabakasının oluşumu.

MAO prosesinin başında, uygun elektrolitik solüsyon içerisinde ince dielektrik oksit kaplama metal yüzeyinde hızla oluşur. Voltaj artarak kritik seviyeye ulaştığında, oksit tabaka kırılır ve kıvılcım deşarjları görünür [92]. Bu koşullar altında, metal yüzeyinde çok sayıda ve kısa süreli parlak kıvılcımlar görülür [92] ve plazma atmosferi oluşur. Küçük deşarj bölgelerinde anlık sıcaklık 2000°C üzerine çıkabilmektedir [93]. Deşarj kanallarındaki güçlü elektrik alandan dolayı elektrolitten gelen aniyonik bileşenler kanala girer. Aynı zamanda yüksek sıcaklık nedeniyle, altlık malzemeden

gelen alüminyum ve alaşım elementlerideşarj kanallarına giriş yapar ve oksitlenir. Oksitlenmiş Al kanaldan kaplama yüzeyine doğru ilerleyerek elektrolitle temasa geçer. Son olarakdeşarj kanalı soğutulur ve reaksiyon ürünleri bu kanalın duvarlarında birikir [94]. Önceki zayıf noktalarda kalınlık ve elektriksel direnç gelişir. Kıvılcımlar diğer zayıf noktalara hareket eder ve break down genellikle bu zayıf noktalarda gerçekleşir. Sonuç olarak malzeme yüzeyinde uniform kalın oksit tabaka oluşur [92].

Yerokhin ve arkadaşlarının çalışmasında H30T Al alaşımına silikat solüsyon içerisinde MAO işlemi uygulanmıştır [95]. MAO sırasında mikrodeşarjların gelişimi ve yüzey tabakasının yapısal gelişimi incelenmiştir. Proses boyunca küçük mikrodeşarjlar baskındır fakat proses başlangıcında fraksiyonu %96 iken proses sonunda % 67-77'lere düşmektedir. Orta büyüklükteki mikrodeşarjlar, proses başlangıcındaki çok az iken yüzey tabakasının büyümesi ile artmaktadır ve 35 dk. sonrasında maksimum değere (% 27) ulaşmaktadır. Aynı zamanda büyük mikrodeşarjların yüzde oranı farkedilebilirken, prosesin son aşamasında % 10-12'lere ulaşmaktadır ve orta büyüklükteki mikrodeşarjların oranı yaklaşık % 11'e düşmektedir [95]. Tabaka büyüme hızı, tüm proses boyunca yaklaşık olarak $1\mu\text{m}/\text{dk}$ 'dır [95] ve daha sert ve aşınma dirençli alümina tabakaları üretmek için A.C. rejiminin uygulanmasından kaynaklanmaktadır [96, 97].

MAO prosesinde, orta tabakanın mikro ark rejiminde A.C. koşullarında oluştuğu görülmüştür. Sabit rms akım altında, 15-20 μm 'lik başlangıç kaplamanın ardından bu rejim başlar [98], [99], [100]; bu ise renk değişimi ve mikrodeşarjların boyutunun küçülmesi ile ortaya çıkmıştır [101].

4.4. MAO İşlemine Etki Eden Parametreler

MAO prosesinde kaplamayı etkileyen en önemli bileşenler; akım yoğunluğu, akım modu, voltaj, elektrolitik çözelti, kaplanan metal veya alaşım, kaplama süresi (veya soğuma hızı), elektrotlar arası mesafe, kaplama sıcaklığıdır [86], [95], [102], [103], [104], [105], [106], [107].

MAO prosesinde kontrol edilmesi gereken başlıca parametre akım yoğunluğudur ve 0.01 ila 0.3 A/cm^2 aralığında değişir. Ayrıca kaplama büyüme hızını belirler. Kaplama sırasında ilk başta hızlıca artar, daha sonra yavaşça ve sabit halde plasma koşulları sağlanır. Voltaj değerinin kritik oranı, elektrot yüzeyinde kıvılcım

deşarjlarının oluşması ile ilişkilidir. Bu değer 120-350 V arasındadır ve metal elektrolit kombinasyonuna önemli ölçüde bağlıdır. İlk başta elektrot etrafında beyaz ışık, kaplama ilerledikçe sarı kıvılcımlar olur ve gittikçe kıvılcım yoğunluğu düşer fakat güç artar. Sonunda kırmızı ark noktaları yüzey boyunca yavaşça hareket eder. Zamanla bu güçlü arklar, akım titreşimlerine ve kaplamada hasara neden olur. Bu nedenle güçlü arklar tespit edildiğinde hemen kesilmektedir [86].

X. Nie ve arkadaşları, 6082 alaşımını üzerinde 100, 150, 250 μm kalınlıklarında, silikat solüsyon içerisinde MAO kaplama oluşturmuş ve kaplama kalınlığının mekanik özelliklerine etkisini araştırmıştır. Alüminyum altlığın ortalama sertlik değeri 120 HV ve ilk 10 μm 'lik kaplama kalınlığı ile 1500 HV üzerine artmıştır. En yüksek sertlik 2400 HV olarak ölçülmüştür. Bunun yanı sıra kalın kaplamalar kayma ve çizik testlerinde en iyi performans gösterirken, ince kaplamalar çarpma ve düşük kayma testlerinde iyi performans göstermişlerdir [108].

F. Monfort ve arkadaşları, saf alüminyumla yaptığı MAO çalışmasında proses süresi ve elektrolitik solüsyonun etkisini araştırmıştır. 0.05 M KOH ve 0.025 M $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ içerikli elektrolitik solüsyon içerisinde 1, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 75, 90 dakika kaplama işlemine tabi tutulmuştur. Kaplama kalınlığı artan süre birlikte 0.5 μm 'den 51.7 μm 'ye ulaşmıştır. Yine aynı çalışmada sabit sürede (30 dk) sabit sodyum silikat solüsyon ile birlikte artan potasyum hidroksit solüsyonun ve tam tersi olarak sabit potasyum hidroksit ile artan sodyum silikat solüsyonun etkisi araştırılmıştır. Sabit sodyum silikat ve artan potasyum hidroksit içeren solüsyonun kalınlığa etkisi çok olmamaktadır. Sabit potasyum hidroksit ve artan sodyum silikat miktarına bağlı olarak kaplama kalınlığının arttığı rapor edilmiştir ve kalınlığın sabit sodyum silikat ve artan potasyum hidroksitten daha fazla oldu görülmüştür. XRD sonuçlarında α - alümina, γ - alümina fazlarının dışında daha kalın kaplamalarda δ - alümina da tespit edilmiştir. SEM ve SEM-EDS analizlerinde, kaplama yüzeylerinde amorf ve silikatça zengin bölgelerin olduğu yüzey tespit edilmiştir. Bu bölgeler, elektrolitik çözelti içerisinde bulunan sodyum silikatın madde miktarındaki artışa bağlı olarak artmaktadır [109].

Elektrolit sıcaklığı MAO prosesinde önemli rol oynar. Çünkü yüksek sıcaklıklarda gözenekli alümina ile γ -alümina oksit fazları görülürken, düşük sıcaklıklarda α -alümina oluşabilmektedir [102]. Bu da kaplamanın yapısını ve özelliklerini belirler.

W. Han-Hua ve arkadaşları, % 5-6 Zn, % 2-3 Mg, % 1.2-2 Cu içeren alüminyum alaşımında farklı anodik akım yoğunlukları ve çeşitli Ic/Ia oranlarının kaplama

kalitesine etkisini çalışmışlardır. MAO kaplamanın yüksek kalitesinin α - Al_2O_3 'ya bağlı olduğu düşünülmektedir ve yüksek α - Al_2O_3 miktarı ise mikroark deşarjlarının görüldüğü bölgelerde bulunmaktadır. Mikroark deşarj sayısı ve şiddetinin, akım yoğunluğu ve I_c/I_a (katodik akım/anodik akım) ile alakalı olduğunu rapor etmişlerdir. 1 saat süreli kaplamalarda en yüksek mikrosertlik I_c/I_a oranının 0.7 ve akım yoğunluğu 15 A/dm^2 olduğunda belirtilmiştir. Ayrıca alüminyum alaşımına yapılan 35, 53 ve 120 dk MAO uygulanan kaplamaların X-ray analizi yapılmıştır ve 35 dakikadan az süren kaplamaların faz analizlerinde γ - Al_2O_3 fazı, 53 dk'lık kaplama işleminde γ - Al_2O_3 ve az miktarda α - Al_2O_3 fazları ve 120 dk γ - Al_2O_3 ve α - Al_2O_3 fazları görülmüştür. α - Al_2O_3 fazının miktarının kaplama süresi ile arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca γ - Al_2O_3 fazının $800\text{-}1200^\circ\text{C}$ arasında α - Al_2O_3 'ya dönüştürülebileceği belirtilmiştir [105].

L. Rama Krishna ve arkadaşlarının çalışmasında, aynı kalınlıkta T6-6061 alaşımının sert eloksal ve MAO kaplamalarının tribolojik özelliklerinin karşılaştırılması yapılmıştır. 28 dk süren MAO prosesi; 4 g/l potastum hidroksit, 2 g/l sodyum meta/tetra silikat elektroliti içerisinde, akım yoğunluğu 0.3 A/cm^2 , voltaj değeri 150-300 Vrms değerleri arasında, A.C. güç kaynağı kullanılarak yapılmıştır. MAO kaplamanın mikrosertliğinin 1400-1700 HV arasında değiştiği ve altlıktan yüzeye doğru gitgide azaldığı görülmüştür. 6061 alaşımının abrasif aşınma direnci 1 N gibi düşük yükler altında, sert eloksal ile 2 kat artarken, MAO kaplama ile 12 kat arttığı belirtilmiştir. Kaplamaların her ikisinin de erozyon hızını arttırdığı görülmüştür; fakat MAO kaplama erozyon hızını çok daha az arttırmaktadır [110].

M. Tarakçı'nın yaptığı çalışmada, ağırlıkça % 0.5, 1, 2, 4, 7, 15 magnezyum içeren ikili Al-Mg alaşımlarını 12 g/L sodyum silikat ve 2 g/L potasyum hidroksit çözeltisi içerisinde 120 dakikalık süre ile MAO prosesi ile kaplanmıştır [111]. Magnezyumun saf alüminyuma farklı oranlarda katkılandırılması ile MAO davranışına etkisi araştırılmıştır. İkili Al-Mg alaşımlarında artan magnezyum miktarı ile beraber kaplama kazanımının çok hızlı şekilde arttığını rapor edilmiş ve elde edilen kaplamada iç bölgede oluşan sert faz α - Al_2O_3 ve dış bölgede oluşan ısı iletkenliği yüksek müllit fazının azaldığını belirtmiştir. Artan proses süresi ve ikili alaşım içerisindeki artan magnezyum miktarına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün arttığını tespit edilmiştir [111].

G. Sundararajan ve L. Rama Krishna'nın yaptığı çalışmada 7075 Al alaşım altlıkları alkali- silikat solüsyon içerisinde 1, 3, 5, 10, 20 ve 30 dk süre ile MAO ile kaplanmış, mikrosertlik, kaplama kalınlığı ve yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüştür.

Ayrıca bu çalışmada MAO yüzey morfolojisi karakterize edilmiştir. Artan proses süresi ile deşarj kanallarının yoğunluğunun azaldığı fakat çaplarının doğru orantılı olarak arttığı belirtilmiştir. Deşarj kanallarının çaplarının artışı ile yüzey pürüzlülüğündeki doğru orantılı artışının bağlantılı olduğu belirtilmiştir. Kaplama yüzeyinde ağırlıklı olarak γ -Al₂O₃ fazının bulunduğu ve bu fazın yüzey tabakalarındaki dağılımının kaplama kalınlığından bağımsız olduğu belirtilmiştir. Bunun yanı sıra bariyer tabakasından kaplama yüzeyine gidildikçe sertliğin azaldığı ve bunun nedeninin α -Al₂O₃ fazının yüzeye gidildikçe azalması olarak belirtilmiştir [85].

4.5. MAO İşleminde Güç Kaynakları

MAO prosesinde doğru akım, titreşimli doğru akım ve dengelenmemiş alternatif akım güç kaynakları kullanılmaktadır.

4.6. Doğru Akım Güç Kaynakları

Normalde bir köprü devresine dayanan sistem, doğru akımın galvanostatik ve potansiyostatik rejimlerinin uygulanmasına imkân verir. Bununla birlikte yüzey deşarj karakteristiklerinin ayarlanması zor olduğundan prosesin kontrol edilebilme imkânı sınırlandırılmıştır. Bu nedenle basit şekilli parçalar ve ince kaplamalar için kullanılmaktadır [86], [112].

4.7. Titreşimli Doğru Akım Güç Kaynakları

Titreşimli doğru akım kullanımı prosesin kontrollü olarak kesilmesini sağlamaktadır ve bu nedenle arkın yüzeyde kalma süresinin ayarlanmasını aynı zamanda titreşim şekli de değiştirilebilmektedir. Bütün bu özellikler işlem sırasında ısı değişimlerin kontrol edilmesine imkân verir ve kaplama kompozisyonu ile yapısı değişir. Bununla birlikte titreşimli akım kullanımı, elektriksel olarak yüklü bir çift tabakasının oluşumu nedeniyle elektrot yüzeyinin ilave polarizasyonuna yol açabilir. Bu durumda istenilen akım değerine ulaşabilmek için 1000 V'a kadar yüksek voltaj gerekebilir [86], [112].

4.8. Dengelenmemiş Alternatif Akım Güç Kaynakları

Arkın bölünmesi ile oluşabilecek elektrot yüzeyinde oluşabilecek ek polarizasyon, alternatif akım kaynağı kullanılarak engellenebilir. Ayrıca dengelenmemiş alternatif akım uygulaması, kaplama birikmesi kontrol aralığını genişletmesi mümkündür ve bu da kontrolünü kolaylaştırır [86]. Farklı genliklerde pozitif ve negatif alternatif akım uygulaması, kontrol edilebilen kaplama çökmesi aralığının genişletilmesine olanak verir [112]. Ayrıca güç (<10 kW) ve akım frekansındaki sınırlamalar dezavantajıdır [86].

4.9. MAO Avantaj ve Dezavantajları

Gelişmekte olan MAO teknolojisinde yapılan çalışmalar sonucu birçok avantajının yanı sıra dezavantajlarının da olduğu görülmüştür. Altlık yüzeyini korozyon ve aşınmaya dirençli yoğun ve sert seramik oksite çeviren MAO kaplama, düşük konsantrasyonda alkali elektrolit çözeltiler kullanılır; krom veya ağır metaller, amonyak, asitler gibi zararlı atıklar içermez. Kompleks geometri parçalara uygulanabildiği gibi eloksal işlemine göre daha geniş oranda alaşıma uygulanabilmektedir. Bunlar; eloksal uygulanamayan düşük oranda Si içeren veya daha kolay ve ucuz işlenebilen diğer düşük fiyatlı alüminyum alaşımlarıdır. Ayrıca eloksal işlemi zor olan yüksek oranda Cu, Fe vb. alaşımlarda da MAO işleminde herhangi bir problemle karşılaşmamaktadır. MAO seramik tabaka özellikleri, tıpkı rengi gibi alaşımdan alaşıma değişmektedir, fakat bütün alaşımlarda performansı geliştirmektedir [113].

Tablo 4.1: MAO uygulanan çeşitli alüminyum alaşımlarının mikrosertlik değerleri

Alüminyum Alaşımları	MAO Kaplama Mikrosertlik HV 100 g
2024,2014 (Al-Cu-Mg)	1400-2000
6061,6463 (Al-Mg-Si)	1300-1800
5056,3003 (Al-Mg, Al-Mg-Zn)	1200-1500
7075,7175 (Al-Zn-Mg)	1200-1600

Tablo 4.1: Devam.

A.319.0, A.305.0 (Al-Si-Cu)	800-1200
-----------------------------	----------

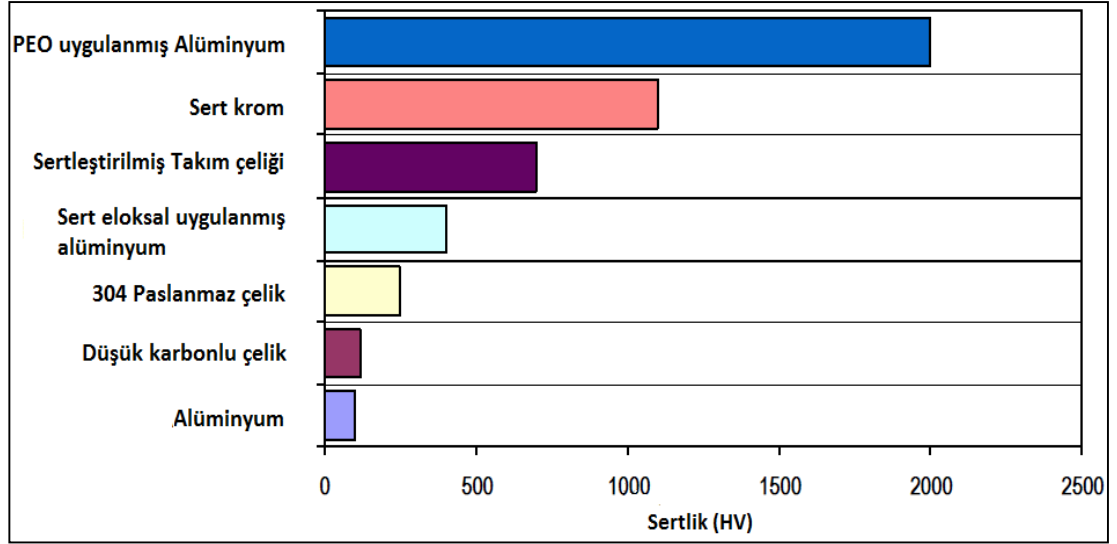
Tablo 4.1’de MAO kaplama ile kaplanan çeşitli alüminyum alaşımlarının 100 g’daki mikrosertlik değerleri verilmiştir [113].

MAO kaplamalarda, altlıkla moleküler seviyedeki bağ ile adhezyon problem olmamaktadır, çatlama veya pullanma (peeling) görülmemektedir [112]. 50-150 µm’lik kaplama sağlar, sertlikte, aşınma direnci, korozyon direncinde artış sağlar bunun yanı sıra çevre dostudur ve elektriksel yalıtım sağlar. Dezavantajları ise yüksek maliyete sahip olması, yüksek enerji tüketimi ve düşük kaplama hızıdır [107].

4.10. MAO Yönteminin Eloksal ile Karşılaştırılması

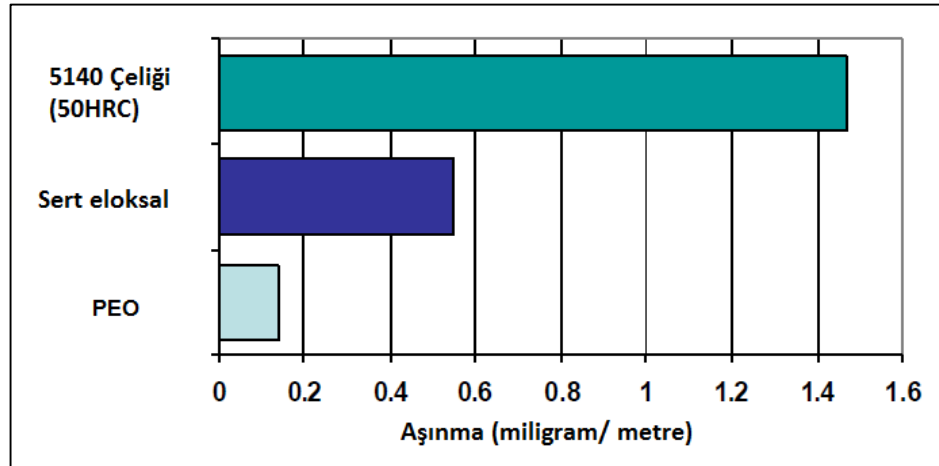
MAO kaplamaların aşınma direnci; abrasif, erozyon ve kayma (sliding) aşınma modlarında bütün (bulk) alümina ile karşılaştırılabilir ve termal sprey uygulanmış alümina ve sert eloksallardan daha iyidir [110].

MAO yöntemini eloksaldan ayıran en önemli fark; işlem sırasında malzeme yüzeyinde oluşan elektriksel mikro deşarjlardır. Bu elektriksel mikrobeşarjlar sayesinde oluşan kaplamanın yapı ve özellikleri daha iyidir. Bununla birlikte MAO yöntemini tercih etmemizin en önemli sebebi ise kullanılan zayıf alkali çözeltilerin çevreye zararı çok daha azdır. MAO’da kullanılan elektrolit pH değeri 8-12 arasında değişmektedir. Eloksalda ise daha düşüktür. Buna ek olarak eloksalın aksine malzeme yüzeyinde ön işlem yapılması gerekmemektedir.



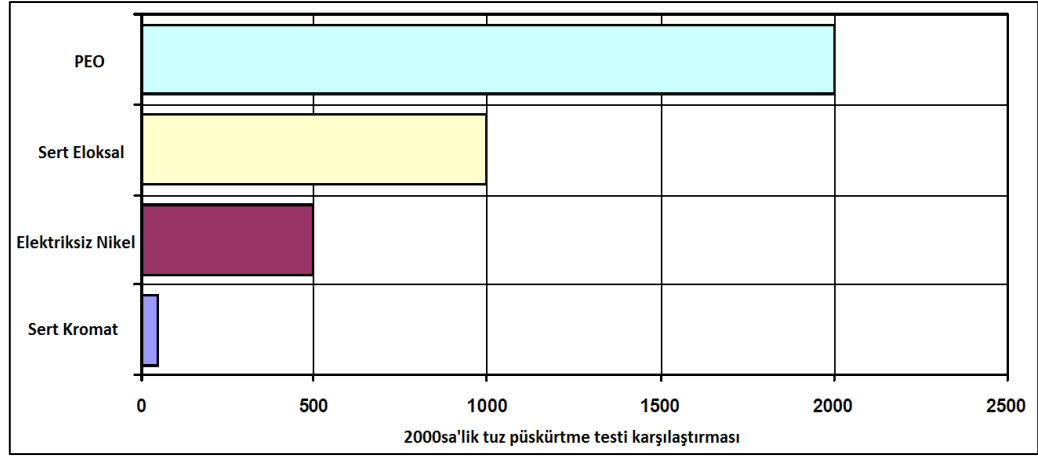
Şekil 4.5: Çeşitli kaplama ve malzemelerin sertliklerinin gösterimi.

Şekil 4.5’de çeşitli kaplamaların ve malzemelerin sertlikleri gösterilmiştir [113]. MAO işlemi ile alüminyumun yüzeyini sertleştirerek, pahalı seramik ve ağır çeliklerin kullanıldığı uygulamalarda kullanılmasına olanak sağlamaktadır [113].



Şekil 4.6: MAO ve diğer kaplamaların aşınma değerlerinin gösterimi.

Şekil 4.6’da MAO ve diğer kaplamaların aşınma değerlerinin gösterimi verilmiştir [113]. MAO uygulanan alüminyum, sert eloksal kaplamadan 3 kat, çelikten ise 10 kat aşınma direnci olduğu görülmektedir. Otomotiv sektöründe MAO kaplamalar; sertlik ve aşınma direncinin önemli ölçüde motor performansını arttırdığı (supap mekanizması, sarım dişlisi (pulley, pompalar, pistonlar gibi) uygulamalar için ideal yüzey özelliklerine sahiptir [113].



Şekil 4.7: MAO ve diğer kaplamaların 2000 saat boyunca tuz püskürtme testi sonucu korozyon dayanımlarının gösterimi.

MAO kaplamalar birçok uygulamada (piston kafası, egzoz borusu, silindir başı gibi...) kullanışlı termal bariyer görevi görmektedir, kaplamaların yüzeyi kısa süre için herhangi çatlak belirtisi göstermeden 2000°C'ye kadar dayanabilmektedir [113]. Şekil 4.7'de MAO kaplamayı diğer kaplama çeşitleri ile 2000 saatlik tuz püskürtme testi sonucunun karşılaştırılması gösterilmektedir [113].

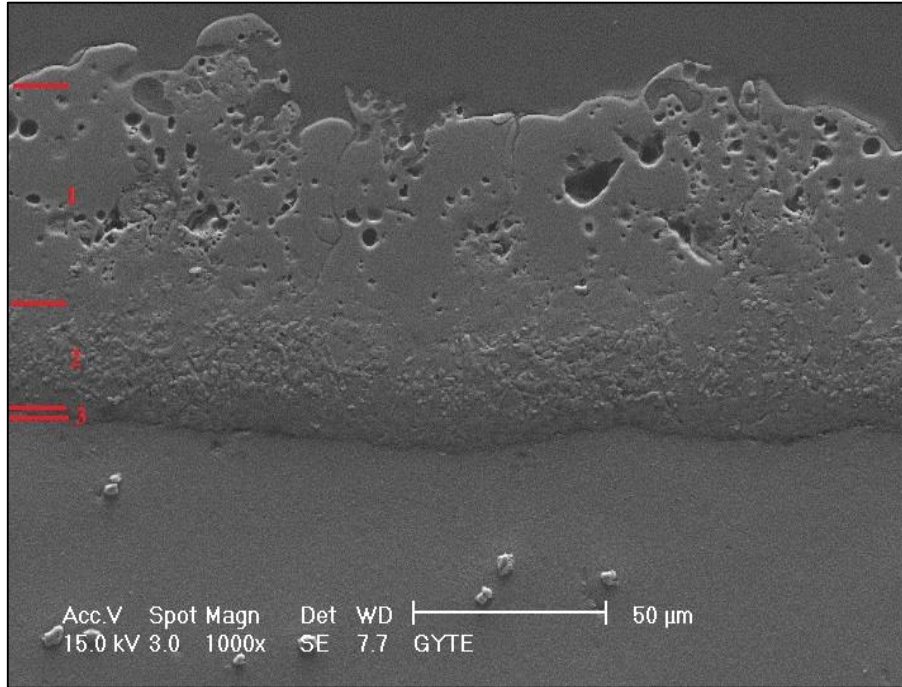
Tablo 4.2: Eloksal ve MAO yöntemlerinin farklılıkları.

Parametreler	Eloksal	MAO
Proses hızı	yavaş	hızlı
Güç kaynağı	Düşük DC	Yüksek AC
Elektrolit	Asidik	Bazık
Elektrolit sıcaklığı	düşük	yüksek
Kalınlık	3-30 μm	0-400 μm
Çevreye etkisi	zararlı	zararsız
Isı direnci	düşük	yüksek
Aşınma direnci	orta	yüksek
Sertlik	800 HV	2500 HV

Ayrıca Tablo 4.2'de de Eloksal ve MAO kaplama yöntemlerinin farklılıkları verilmiştir [84].

4.11. Alüminyum Alaşımlarında Oluşan Oksit Tabakası

MAO tekniği ile kaplanan Al alaşımlarında kaplamalar 3 farklı bölgeden oluşmaktadır. Bu bölgeler; baskın olarak gözenekli *dış tabaka*, yüksek sıcaklıklı değişikliklerden oluşan ve mikro çatlaklar ve mikrometre boyutunda boşluk içeren daha yoğun *iç tabaka* [86], [114], altlığın alaşım elementlerinin kompleks fazlarının gözlendiği ~500 nm olan ve altlık ile yoğun iç tabaka arasında bulunan kalın *bariyer tabaka* [86], [114]. Şekil 4.8’de MAO uygulanmış Al-1Zn (ağr. % 1 Zn içeren Al-Zn ikili alaşımı) alüminyum alaşımının kesit SEM görüntüsü gösterilmiştir [115] ve 1, 2, 3 numaraları ile sırasıyla dış tabaka, iç tabaka ve bariyer tabaka gösterilmiştir.



Şekil 4.8: MAO kaplanmış Al-1Zn kesit SEM görüntüsü.

Altlığa yakın bariyer tabaka, çok sert ve mükemmel yoğunluğa sahiptir; korozyon ve aşınmaya karşı mükemmel koruma sağlar. Bu koruyucu tabakaya ek olarak ince gözenekli tabaka dekoratif üst tabakalarla (boya ve vernik) birlikte emdirme (impregnation)için veya PTFE (teflon) ile birlikte kompozit kaplama şeklinde kullanılabilirliği ile ideal üst tabaka sağlanmaktadır. Bu iki tabaka birlikte en iyi fonksiyonel ve dekoratif kaplama özelliklerine sahiptir [113].

Bariyer tabakası, korozyon direncine katkıda bulunmaktadır. Orta tabaka ise sertliği ve aşınma direncini geliştirir (1500-2000 HV, uygulanan alaşım ve işlemlere bağlı olarak değişir). Tribolojik uygulamalarda orta ve dış tabaka oranının yüksek olması önem taşır (~4:1) [116], [117]. Elektrolit kompozisyonunun seçimi ve A.C. veya darbeli (pulsed)xx bipolar akım/ voltaj yöntemi ile gerçekleştirilebilir ve mikro deşarj ömrünü kontrol etmeyi sağlar. D.C. yöntemi, aşırı ısınma ve kaplama malzemesinin zarar görmesini engeller [118], [119].

MAO kaplamaların özellikleri final kaplama kalınlığına oldukça bağlıdır; kaplamadaki α - ve γ -alümina fazları oranı kaplama kalınlığı ile ilişkilidir [85], [113], [120], [121]. Bu kaplama aşınma ve korozyon direnci bakımından sıradışı özellikler göstermesi ile birlikte çeşitli uygulamalarda termal bariyer etkisi göstermektedir [113]. MAO kaplamanın dış ve iç tabakalarındaki α - ve γ - alümina miktarı, proses sırasındaki soğuma hızındaki farklılıktan kaynaklanmaktadır [92]. Prosesin başlangıcında alüminyum yüzeyinde hızlı bir şekilde ince bir tabaka halinde çok sayıda gözenekten oluşan bir oksit tabakası oluşur. Voltaj artar ve kritik değeri aştığında oksit tabakasının gözenekleri kırılır ve kıvılcım boşalmaları oluşur. Akabinde plazma oluşur ve kıvılcım boşalmalarıyla anlık sıcaklık 2000°C'ye ulaşır [122]. Dış yüzey solüsyonla temas halinde olduğu için soğuma çok hızlı gerçekleşir ve γ -Al₂O₃ oranı burada yüksektir. Bu tabakanın içeriği oksidasyon prosesi süresince sabit kalır [92]. İç katmanın soğuma hızı yavaş olduğundan yüksek miktarda (% 50' den fazlası) [92] α -Al₂O₃ bulunmaktadır ve bu da yüksek mikrosertlik ve harika aşınma direnci sağlar [122]. Göreceli olarak sert α alümina fazı akım fazı akım yoğunluğu arttıkça artmaktadır [86]. Kaplama kalınlığındaki artış da aşınma direncinin artmasına neden olur [108].

ASTM standartlarında B117 tuz sisi testi haznesinde MAO ile kaplanan alüminyum 2000 saat üzerinde korozyona dayanacağını göstermiştir [112]. Geleneksel olarak MAO kaplamalar gözeneklidir ve pürüzlülüğü seramik kaplama kalınlığı ile birlikte artmaktadır [112].

4.12. Al-Li alaşımlarına Uygulanan Kaplamalar

Al-Li alaşımlarının korozyon direnci zayıflık, çökelti fazlarının (δ ' fazı gibi) varlığından kaynaklanmaktadır. Matrisi çeviren farklı potansiyeller karakterize edilmiştir bu da bölgesel korozyon olayına çevirmektedir [123]. Al-Li alaşımlarına,

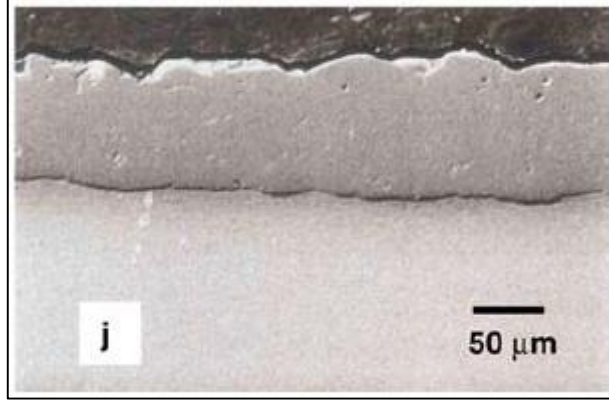
kromat anodik filmler, kromat dönüştürme tabakaları, korozyon engelleyiciler (nadir toprak tuzları gibi) uygulanmıştır [66]. Fakat bu uygulamalar zehirli veya pahalıdır, özellikle bu uygulamalar sonucu geri dönüşüme de katılmaktadır.

Rangel ve Travassos'ın çalışmasında, alüminyum üzerine (açık devre potansiyelinde) lityum içeren alkali solüsyondan Li bazlı dönüşüm kaplamalar uygulanmıştır [124]. Koruyucu kaplama karakteri, oluşan lityum alüminatın gözenek doldurucu gibi davranması ile ilişkilendirilmiştir [124].

Yapılan bir çalışmada kromik anotlama Al-Li alaşımlarında korozyona karşı etkili bir bariyer oluşturduğu görülmüştür. 2024 ve 8090 alaşımları için oksit tabaka kalınlığı eşdeğerdir. Sert eloksal CP 276 alaşımı için uygun olduğu kanıtlanmıştır. Sülfürik eloksal 8090 alaşımı üzerinde denenmiş ve oksit tabakasının kalınlığı zamanla arttığı görülmüştür. Oksit tabakasının 2024 alaşımından daha kalın olduğu görülmüştür. Isıl işlemde oluşan Li_2CO_3 tabakası asit dağlaması ile giderilmesi önerilmiştir. Anotlama öncesi asit(sulfochromic) dağlaması ile yakıcı dağlama tercih edilmiştir [73].

Bardi ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada korozyon özelliklerini geliştirmede, yüzeydeki çökeltileri agrasif ortamlardan koruyan saf alüminyum tabakaya çevirmektedir [123]. Kaplama birikme hızı $10 \mu\text{m/sa}$ olarak ölçülmüştür ve saf alüminyumun elektrokaplama ile P90 alaşımına uygulanması sonucu korozyon etkisini azalttığı görülmüştür [123].

MAO çalışmalarında, Krishna ve arkadaşları aynı proses koşullarında ve aynı kalınlıkta 10 farklı ticari alaşımı ile yaptığı çalışmada MAO kaplama işlemi uygulanmış ve Al altlığı eklenen alaşım elementlerinin MAO kaplamaların birikimini, kinetiğini ve kaplama özelliklerini etkilediği görülmüştür [125]. Krishna ve arkadaşlarını yaptığı çalışmada elektrolitik solüsyon 2-6 gr potasyum hidroksit ve 1-3 gr sodyum tetra silikat içermektedir [125], [126]. Bu çalışmada Li içeren 8090 alaşımına da MAO uygulanmış ve diğer alaşımlara göre birikiminin hızının ($\sim 2.3 \mu\text{m/dk}$) daha yüksek olduğu görülmüştür [125]. Kaplama kalınlığı arttıkça Ra değeri de artmıştır, α -alümina, γ -alümina ve Al_4Li_9 intermetalik bileşiği görülmüştür [125]. Sertliği ise arayüzeyden itibaren $\sim 1800 \text{ HV}$ 'den uzaklaştıkça $\sim 1400 \text{ HV}$ ' e kadar düşmüştür [125]. MAO uygulanmış Al-Li alaşımında abrasif ve kayma (sliding) aşınmalar, kaplama uygulanmamış alaşıma göre sırasıyla ~ 6 kat ve ~ 2 kat daha düşüktür [125]. Şekil 4.9'da görüldüğü üzere 8090 alaşımında yoğun kaplama oluşmuştur [125].



Şekil 4.9: MAO kaplama yapılan 8090 Al-Li alaşımasının SEM görüntüsü.

Shrestha ve Hutchins'in yaptığı çalışmada A92099 (1.6Li, 2.5Cu, 0.8Zn, 0.3Mn, 0.1Ti) ve A92195 (1Li, 4Cu, 0.4Mg, 0.3Ag, 0.15Zr) alaşımlarına MAO uygulanmıştır. 2099 ve 2195 alaşımlarına uygulanan MAO düşük kaplamanın kalınlığı 30-40 µm'dir. Tuz sisi ve elektrokimyasal test methodları uygulanmış ve sert anotlama ile karşılaştırılmıştır [127]. 2099 alaşımasının MAO kaplamasının, 2195 alaşımındakinden daha yoğun olduğu görülmüştür ve 2195 alaşımında Cu miktarının fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Kaplama sertliklerinin ise 1400 HV'den fazla olduğu görülmüştür [127]. MAO kaplama sonucu bu iki alaşımın pasiflikleri ölçülmüş ve korozyona karşı önemli derecede koruma sağlandığı görülmüştür. Ayrıca MAO kaplanmış bu iki alaşımın 106 saat sonra tuz sisi testi sonucu 2195 alaşımında çukur korozyonu görülmüş ve sebebinin ise Cu/Li oranının daha yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir [127].

5. ÇALIŞMANIN AMACI

MAO kaplanmış alüminyum alaşımları, uzay araçları, uydular, roket endüstrisi, kriyojenik özellik taşıyan uygulamalar, tekstil makine parçaları, biyomedikal araçlar vb. gibi geniş bir kullanım alanına sahiptir [86] Ayrıca MAO kaplamaların akademik olarak da birçok çalışmada araştırmada yer almıştır. Alüminyumun ikili alaşımlarında yapılan çalışmalar ise aşağıda belirtilmiştir.

M. Tarakçı'nın yaptığı çalışmada, ağırlıkça % 0.5, 1, 2, 4, 7, 15 magnezyum içeren ikili Al-Mg alaşımlarını 12 g/L sodyum silikat ve 2 g/L potasyum hidroksit çözeltisi içerisinde 120 dakikalık süre ile MAO prosesi ile kaplanmıştır. Magnezyumun saf alüminyuma farklı oranlarda katkılandırılması ile MAO davranışına etkisi araştırılmıştır. İkili Al-Mg alaşımlarında artan magnezyum miktarı ile beraber kaplama kazanımının çok hızlı şekilde arttığını rapor edilmiş ve elde edilen kaplamada iç bölgede oluşan sert faz α -Al₂O₃ ve dış bölgede oluşan ısı iletkenliği yüksek müllit fazının azaldığını belirtmiştir. Artan proses süresi ve ikili alaşım içerisindeki artan magnezyum miktarına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün arttığını tespit edilmiştir [111].

A. O. Devecili'nin yaptığı çalışmada ikili Al-Cu alaşımlarında bakırın MAO kaplama davranışına etkisi araştırılmıştır. Bakırın miktarı arttıkça, kaplamada oluşan porozite miktarının arttığı, kaplamanın mikrosertlik değerlerinin ve kaplama kalınlığının düştüğü görülmüştür. XRD analizlerinde bakır miktarı arttıkça müllit fazının arttığı tespit edilmiştir. Kaplama süresi arttıkça ve bakır miktarı düştükçe alfa fazının arttığı görülmüştür. Ayrıca kaplamanın Ra değerlerinin bakır miktarı arttıkça azaldığı ve çizilme direncinin azaldığı görülmüştür [84].

Y. Genç ve A.E. Güleç'in yaptığı çalışmada, ağırlıkça % 1, % 4, % 8, % 10, % 15 ve %33 Zn içeren ikili Al-Zn alaşımları ve saf alüminyuma, sodyum silikat ve potasyum hidroksit solüsyon içerisinde MAO 120 dk boyunca uygulanmıştır. Zn miktarı arttıkça kaplamada porozitenin ve yüzey pürüzlülüğünün arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca Zn miktarı ile kaplama kalınlığının 80 μ m'den 120 μ m'ye arttığı görülmüştür. Müllit ve γ -alümina fazlarının bütün Al-Zn alaşımlarında ve α -alümina fazının % 15 ve % 33 Zn içeren Al-Zn alaşımları haricinde bütün alaşımlarda bulunduğu tespit edilmiştir. Al-Zn alaşımlarında Zn miktarı arttıkça α -alüminanın oluşumunu durdurduğu ve kaplamanın mikrosertliğini düşürdüğü görülmüştür [115].

A.E. Güleç'in diğer bir çalışması olan sentetik Al-Si ikili alaşımlarının mikroark oksidasyonla kaplanması, saf alüminyuma atomik olarak % 1, 2, 4, 8, 12, 16 ve 32 oranlarında Si eklenerek, 120 dk mikroark oksidasyon kaplama yapılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü, kaplama kalınlığı ölçümü, SEM, kaplama faz analizi yapılmıştır. İkili alaşımlarda Si miktarı arttıkça kaplama kalınlığının ve yüzey pürüzlülüğünün azaldığı gözlenmiştir. Yapılan analizlerde tüm numunelerde Al, müllit ($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$), $\kappa\text{-Al}_2\text{O}_3$ fazları gözlenirken $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ fazı sadece saf Al ile Al-1Si numuneleri üzerindeki kaplamalarda görülmektedir. Müllit ve $\kappa\text{-Al}_2\text{O}_3$ fazlarının şiddeti alaşım içerisindeki Si miktarı arttıkça azaldığı tespit edilmiştir [128].

O. Yucak'ın yaptığı çalışmada da atomik olarak % 1, 2, 4, 6, 8 Ti içeren ikili Al-Ti alaşımlarına ve saf Al altlıklara 2 g/l KOH ve 12 g/l Na_2SiO_3 içeren elektrolitik solüsyon içerisinde 120 dakika süreyle MAO kaplama yapılmıştır. İkili alaşımlarda Ti miktarı arttıkça kaplama kalınlığı ve yüzey pürüzlülüğünün bariz bir değişiklik görülmemekle birlikte kaplama sertliğinin düştüğü tespit edilmiştir. İkili alaşımlarda Ti miktarı arttıkça Al_3Ti intermetalik fazının miktarının ve boyutunun arttığı, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ fazlarının ise iç tabakada oluşturduğu bant yapısı sürekliliğinin bozulduğu ve çökelti miktarının azaldığı belirtilmiştir [129].

Z. Ç. Öter'in çalışmasında da atomik olarak % 1, 2, 4 ve 8 Mn içeren ikili Al-Mn alaşımlarına MAO kaplama uygulanmış ve yüzey pürüzlülüğü, kaplama kalınlığı, faz analizi, mikrosertlik, elemental analiz ve mikroyapılar incelenmiştir. Artan Mn miktarı ile yüzey pürüzlülüğünde çok belirgin olmayan ve kaplama kalınlığında ise belirgin artış görülmüştür. Sertlikte ise Mn miktarı arttıkça sertliğin azaldığı ve mikroyapısı incelendiğinde gözenekliliğin arttığı tespit edilmiştir [130].

L. R. Krishna ve arkadaşları, 10 farklı ticari alaşıma yaptığı çalışmada MAO kaplama işlemi uygulanmış ve Al altlığı eklenen alaşım elementlerinin MAO kaplamaların birikimini, kinetiğini ve kaplama özelliklerini etkilediği görülmüştür. Bu çalışmada Li içeren 8090 alaşımına da MAO uygulanmış ve diğer alaşımlara birikiminin hızının ($\sim 2.3\mu\text{m/dk}$) daha yüksek olduğu görülmüştür. Kaplama kalınlığı arttıkça Ra değeri de artmıştır, $\alpha\text{-alümina}$, $\gamma\text{-alümina}$ ve Al_4Li_9 intermetalik bileşiği görülmüştür. MAO uygulanmış Al-Li alaşımında abrasif ve kayma (sliding) aşınmalar, kaplama uygulanmamış alaşıma göre sırasıyla ~ 6 kat ve ~ 2 kat daha düşüktür [125].

Y. Cheng ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada 2A97 Al-Cu-Li alaşımına sulandırılmış ve konsantre sodyum silikat solüsyonlarda, farklı akım yoğunlukları (pozitif ve negatif 300 ve 200 mA/cm^2 , 150 ve 100 mA/cm^2) uygulanmıştır. Kaplama

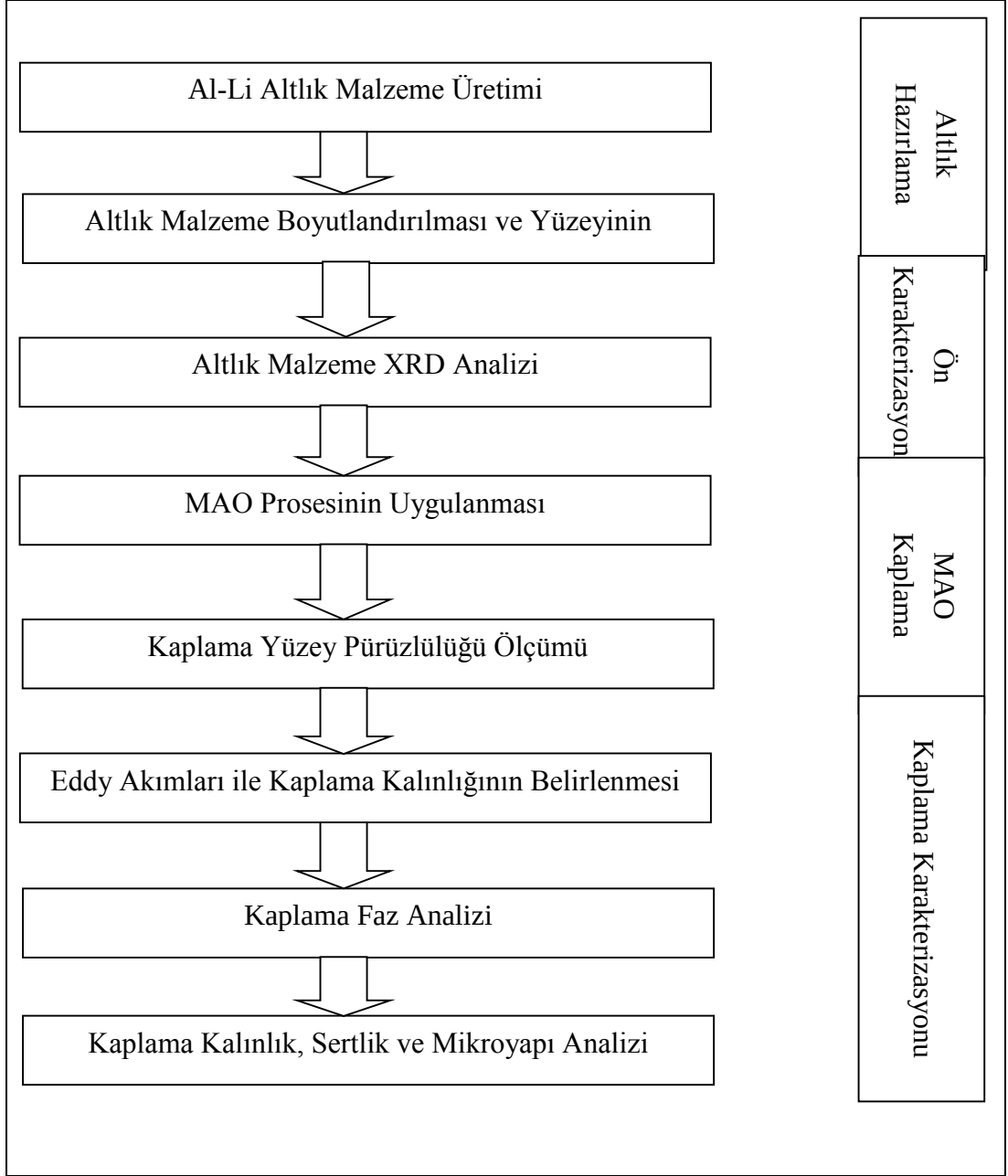
yoğunluğu olarak pozitif ve negatif 150 ve 100 mA/cm²'de dış tabakanın sertliğinin 17,5-19 GPa, iç tabakanın ise 9.4-12 GPa olduğu belirtilmiş olmakla birlikte kaplama arayüzeyinde büyük gözenekler görülmüştür. Konsantre solüsyonda hızlı kaplama oluşumu görülmekle birlikte kaplama sertliği düşük tespit edilmiştir [131].

Yapılan çalışmalarda da görüldüğü üzere alaşım elementleri, MAO prosesinde yüzeyde oluşan oksit tabakanın özelliklerini etkilemektedir. Alüminyumun önemli alaşım elementleri arasında bulunan lityumun da MAO kaplama özelliklerine etkisi kaçınılmazdır. Lityumun, alüminyumun MAO yöntemiyle kaplama davranışı üzerine literatürde sistematik bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Yukarıda da belirtildiği gibi sınırlı sayıda farklı oranlarda lityum içeren alüminyum alaşımların MAO yöntemiyle kaplanılmış ancak bu alaşımların içerisinde alaşım elementi olarak lityumun yanı sıra diğer alaşım elementlerinin de bulunması lityumun, MAO kaplama davranışına etkisi net olarak ortaya çıkarılamamaktadır. Lityumun etkisini araştırmak üzere bu etkiyi araştırmak için atomik olarak % 1, % 2, % 4, % 8, % 10, % 14 Li içeren ikili Al-Li alaşımlarına 120 dk. boyunca MAO kaplama yapılmıştır ve bu kaplamaların detaylı karakterizasyonu yapılmıştır.

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1. Deneysel Program

Alüminyumun mikroark oksidasyon davranışına, alüminyuma ilave edilen lityumun etkisini ortaya çıkarmak için gerçekleştirilen bu çalışmada, öncelikle Al-Li ikili alaşımları üretilmiş, daha sonra MAO yöntemiyle kaplama işlemi gerçekleştirilmiş ve son olarak üretilen kaplamaların, yüzey pürüzlülüğü, oluşan fazların tayini, kaplama sertliklerinin ölçümü ve SEM ile kimyasal ve mikroyapı analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada kaplamanın karakterizasyonu ve sonuçların irdelenmesinde izlenen deneysel akış programının genel hatları Şekil 6.1’de verilmiştir.



Şekil 6.1: DeneySEL akış programı.

6.2. Altlık Malzeme Seçimi ve Üretimi

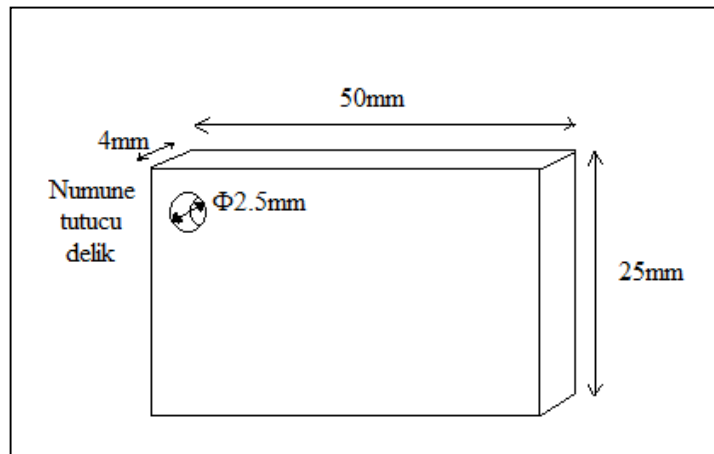
Al-Li alaşımlarının üretimi için alüminyum levha kırılarak ve kaba testere ile pota içerisine sığacak büyüklükte parçalar haline getirildi. Ardından 80 SiC zımpara ile keskin kenarlar alındı ve yüzeyleri temizlendi. Atomik olarak oluşturacağımız Al-Li alaşımlarının hesaplamaları yapılarak, hassas terazide Al ve Li parçaların tartımı yapıldı. Lityumun hızlı oksitlenmesi dolayısıyla Li parçalar tartım ardından alüminyum folyo içerisine sarıldı ve hemen ergitme işlemine geçildi.

Al-Li alaşımlarının ergitilmesinde indüksiyon fırını ile seramik pota kullanıldı. Seramik pota etrafına cam yünü sarılarak ısı kaybının en aza indirgenmesi sağlandı. İlk başta daha önce tarttığımız alüminyum, indüksiyon fırınında ergitildi. Ergitme sırasında elik çubuk ile mekanik karıştırma yapıldı ve argon gazı üflenerek homojen karışması ve sıvı metalin ositlenmemesi sağlandı. Ergitme sırasında yüzeyde oluşan cüruf, elik çubuk ile alındı. Ardından alüminyum folyoya sarılmış lityum parçalar pota içerisine atılarak ergitildi. Ergiyik alaşımın homojen olarak karışması, oksijenle reaksiyonunun engellenmesi ve lityumun veriminin sağlanması için ergitme ve döküm sırasında argon gazı üflendi. Alaşımların kimyasal analizleri, Spectro-Max LMF14 marka spektrometre ile yapıldı. Bu çalışmada atomik olarak % 1, % 2, % 4, % 8, % 10, % 14 Li içeren Al alaşımlarına üretilmiştir. Tablo 6.1’ de üretilen Al-Li alaşımları ve bu alaşımlarına ait kodlama verilmiştir.

Tablo 6.1: Üretilen Al-Li alaşımları ve içeriği.

Alaşımdaki Li miktarı (atomik %)	Üretilen Alaşımlarının Kodları
1	1Li
2	2Li
4	4Li
7.7	8Li
10	10Li
14.85	14Li

6.3. Altlık Malzeme Boyutlandırılması ve Yüzeyinin Hazırlanması



Şekil 6.2: Altlık malzemenin kaplama işlemi öncesi boyutlandırılması.

Şekil 6.2’de altlık malzemenin kaplama işlemi öncesi boyutlandırılması verilmiştir. Hazırlanan ergiyik 50x25 mm boyutunda kalıba dökülerek mikroark numuneleri kaba testere ile kalınlığı 4mm olacak şekilde kesildi. Numunelerin daldırılma aparatına takılması için 2.5 mm çapında olacak şekilde matkap ile delindi ve kılavuz ile dış açıldı. Kaba testereden meydana gelen izler 80-120-240-320-600-800 SiC zımparaları ile zımparalanarak ve numune kalınlıkları 4 mm’den 3.5 mm’ye indirildi. Zımparalanan numuneler aseton içerisinde 3 dk ultrasonik temizleme yapıldı. Asetonla temizliği yapılarak kurutularak MAO kaplama işlemi için hazır hale getirilmiştir.

6.4. Al-Li Alaşımlarının XRD Karakterizasyonu

Dalga boyu 1,541 Å, Cu K α radyasyon kaynağı (2 θ üzerinde) 20°- 90°’ye kadar 1 derece/dakika “Bruker D8 Advance” cihazında, yavaş tarama yapılarak, kırınıma uğramış X-ışınları demetleri toplanarak alaşımların faz analizleri yapıldı.

6.5. MAO Prosesinin Uygulanması

MAO solüsyonu 2 gr/lt KOH, 12gr/lt Na₂SiO₃ ve saf su kullanılarak hazırlanmıştır. Her numune 120 dk boyunca 100 kVA kapasiteye sahip asimetric AC güç kaynağı kullanılarak MAO işlemi uygulandı.

Kaplama yapılması için hazırlanan numune, dış kısmı plastikten oluşan ve ucunda paslanmaz civata olan alüminyum levhaya tutturuldu. Daha sonra numune alüminyum levha ile birlikte 1mx1mx1m’lik su soğutmalı kazan içerisine, bütün kenarlara eşit mesafede olacak şekilde bakır çubuğa tutturuldu. Numune düzeneğe tutturulmadan önce bağlanma yerleri, izolasyonun sağlanması için teflon ile sarıldı. Numune anot, su soğutmalı kazan katot olacak şekilde güç ve kontrol ünitesine bağlandı ve 50 μ F’lik yük uygulandı. Her 10 dk’da anot ve katottaki voltajlar kontrol ünitesindeki göstergelerden ve devreden geçen akım pens ampermetresi ile ölçüldü ve kayıt edildi. Kaplama işleminin ardından numune distile su ile temizlendikten sonra etanol içerisinde Sonorex Rk 105 marka cihazla 3 dk ultrasonik temizleme yapıldı.

6.6. Kaplanan Numunenin Karakterizasyon Çalışmaları

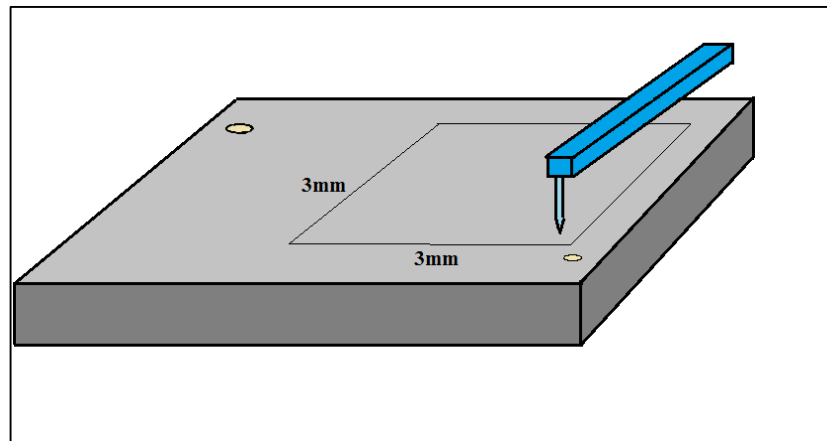
Kaplanan numuneler, kaba testerede dört parçaya ayrılarak karakterizasyon çalışmaları için SiC zımpara ile çapakları alındı ve ethanol içerisinde 3 dk ultrasonik temizleme yapıldı ve ardından kurutuldu.

6.7. Kaplama Kalınlığı Ölçümü

Kaplama kalınlıkları “Philips XL30 SFEG” marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile alınan görüntüler kullanılarak ve “Fischer” marka Eddy akımları ile ölçüldü. SEM ile belirlenen kaplama kalınlıklarında, her bir numunenin 3 farklı bölgesinin 6 farklı noktasından alınarak belirlendi. Eddy akımları ile kaplama kalınlıkları 6 farklı bölgeden ölçüm yapılarak belirlendi.

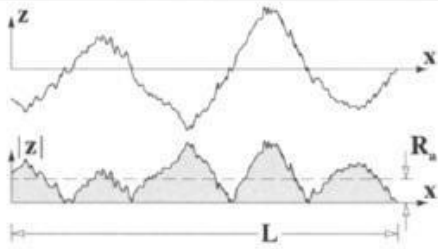
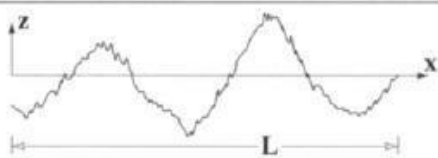
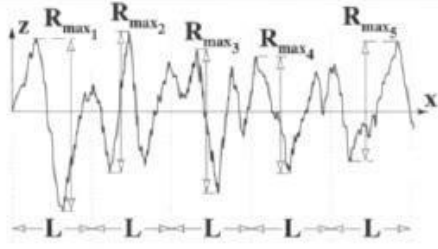
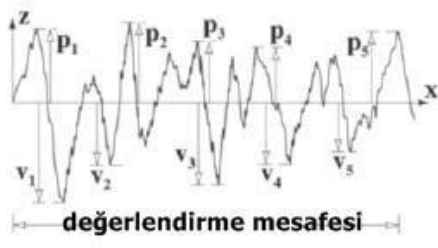
6.8. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü

Yüzey pürüzlülüğünü ölçümü, “Veeco Dektak 8” marka profilometre cihazında yapıldı. Cihazın ucundaki elmas sivri ucun, numune yüzeyinde ilerlemesi ile numune yüzeyindeki girinti ve çıkıntıların profilinin çıkarılması esasına dayanır. Şekil 6.3’de yüzey pürüzlülüğünün ölçüldüğü bölgenin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 6.3: Yüzey pürüzlülüğü ölçülen bölgelerinin şematik gösterimi.

Tablo 6.2: Yüzey pürüzlülüğü ölçümü şematik ve matematiksel ifadeleri.

Ra	$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L z dx$	
Rrms veya Rq	$R_q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L z^2 dx}$	
Rt	$R_t = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 R_{max_i}$	
Rz	$R_z = \frac{p_1 + \dots + p_5 + v_1 + \dots + v_5}{5}$	

- Ra: Aritmetik ortalama sapma
- Rz (JIS): 5 tane en yüksek 5 tane en alçak noktanın ortalaması
- Rt: Tüm ölçüm uzunluğu için maksimum yükseklik ile maksimum derinliğin toplamı
- Rrms (Rq): Aritmetik ortalama sapmaların karekökü anlamında bir parametredir.

Tablo 6.2’de yüzey pürüzlülüğü ölçümü şematik ve matematiksel ifadeleri verilmiştir [132]. Ra pürüzlülük değeri, daha pratik ve anlaşılması kolay olduğu için tercih edilmektedir. Kaplanmamış numunelere 5 miligram yük uygulanarak yüzeyinde 3 mm x 3 mm’lik bir alan taraması sonucu, tarama mesafesi 50 mm olacak şekilde her bir tarama için 120 saniye uygulanarak, ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerleri elde edildi.

6.9. Kaplamaların Yüzeyinden Mikroyapı Analizi

Numune yüzeylerinde oluşan oksit kaplama Philips XL30 SFEG SEM ile incelendi. Farklı Li miktarına sahip numunelerin yüzey görüntüleri alındı. SEM'den daha iyi görüntü alabilmek için numunelerin yüzeyleri altın ile kaplandı.

6.10. Kesit Numunelerinin Hazırlanması

MAO yönetimi ile kaplanan numunelerin yüzey karakterizasyonlarının ardından, kesit SEM görüntüsü için daha önce dörde bölünen 1Li, 2Li, 4Li, 8Li, 10Li ve 14Li numuneleri sırasıyla epoksi kalıp içerisine alınması için hazırlandı. Epoksi ve sertleştirici ile hazırlanan karışım, Al-Li alaşımları üzerine yavaşça dökülerek 24 saat epoksinin donması beklenildi. 24 saatin ardından 80 SiC zımpara ile çapakları alındı ve 80-120-240-320-600-800-1200 SiC zımpara ile yüzeyi zımparalandı. Zımparalamanın ardından alümina solüsyonla parlatma işlemi gerçekleştirildi. Sonrasında etanol içerisinde 3 dk ultrasonik temizleme yapıldı ve tekrar etanol temizliği yapılarak kurutuldu. Ardından SEM'den daha iyi görüntü alabilmek için numune yüzeyleri altın ile kaplandı.

6.11. Kaplama Yüzeyinden Elementel Analizi

Lityum, SEM'e bağlı bulunan enerji dağılımlı spektrometre (EDS) cihazı tarafından ölçülemediği için kaplama yüzeyinde elementel analiz yapılamamıştır.

6.12. Sertlik Ölçümü

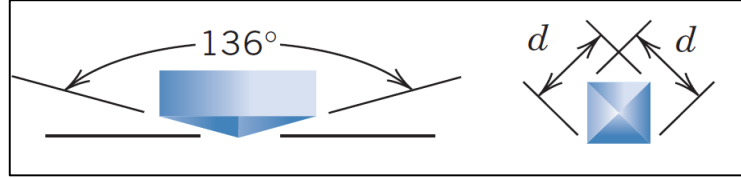
Malzemelere uygulanan genel testlerden biri olan sertlik ölçülmesi, diğer mekanik özellikler arasında doğru orantılıdır. Deneyin basit ve diğer testlere göre daha az tahrip edici olmasında dolayı tercih edilmektedir.

Kaplamaların sertliği, yaygın olarak kullanılan sertlik ölçme yöntemlerinden biri olan Vickers sertlik ölçme yöntemiyle ölçüldü.

$$HV = \frac{1,854 \times P}{d^2} \quad (6.1)$$

P: uygulanan yük (kg)

d: izin köşegen uzunluğu (mm)



Şekil 6.4: Vickers ucu yandan ve üstten şematik gösterimi.

Şekil 6.4’de vickers ucu yandan ve üstten şematik gösterimi verilmiştir [133]. Bu yöntem, tabanı kare olan tepe açısı 136° olan piramit şeklindeki elmas ucun, belli yük uygulanarak malzeme yüzeyinde meydana gelen iz köşegenlerinin ölçülmesi ile gerçekleştirilmektedir.

Kesit numuneler, epoksi içerisine alınarak 80-180-320-600-800-1000-1200 SiC zımparalarla zımparalandı ardından da alümina solüsyon ile parlatma gerçekleştirildi. Parlatmanın ardından ethanol ile ultrasonik temizliği yapıldı. Sonrasında ethanolle tekrar temizlenerek kurutuldu. Kaplamanın sertlik ölçümleri, Mitutoyo HM-202A Hardness Testing cihazı ile ölçüm yapıldı. Daha sonrasında SEM ile iz köşegenleri ölçülerek mikrosertlikleri belirlendi. Sertlik testi için yük 30 gram, yükleme süresi 5 saniye, yük bekletme süresi 6 saniye ve yük boşaltma süresi 4 saniye olarak ayarlandı.

7. SONUÇLAR

7.1. Al-Li Alaşımlarının Kimyasal Analizi

MAO çalışmalarda altlık malzeme, kaplamada oluşacak fazların oluşumunda ve kaplama özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir etkidir.

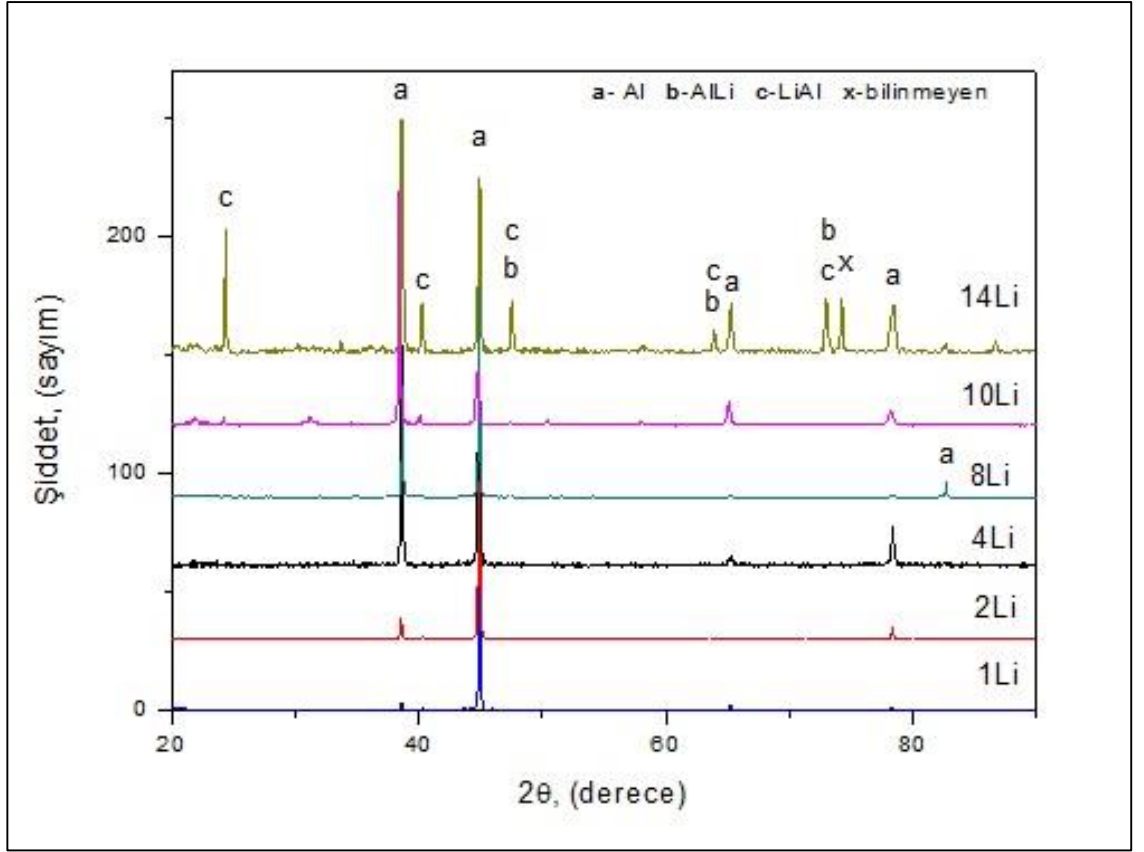
Tablo 7.1: Deneysel çalışmada kullanılan ikili Al-Li alaşımlarının kimyasal analizi.

% Atomik Alaşım Miktarları	1Li	2Li	4Li	8Li	10Li	14Li
Al	98,8801	97,6247	95,4413	91,4827	90,386	85,6998
Li	0,9707	2,2121	4,4035	7,7542	9,4548	13,8572
Si	0,0698	0,0753	0,0742	0,0684	0,0769	0,0674
Fe	0,0792	0,0873	0,08	0,693	0,0799	0,1307
Sr	0,00019	0,0005	0,0010	0,0018	0,0025	0,2449

Bu çalışmada özellikle lityumun etkisini görebilmek için hazırlanan ikili Al-Li alaşımlarının spektral analizi Tablo 7.1’de verilmiştir. İkili Al-Li alaşımlarının % atomik miktarları ve diğer safsızlıkların ihmal edilebilecek kadar küçük olduğu görülmektedir.

7.2. Al-Li Alaşımlarının Faz Analizi

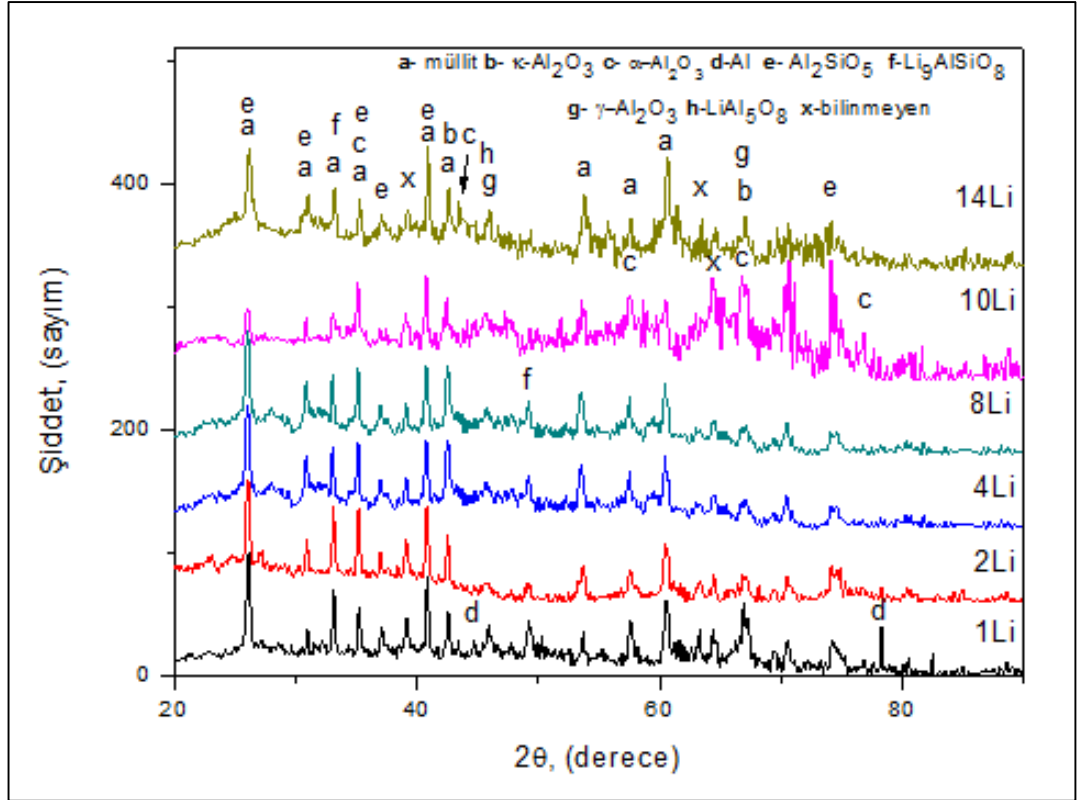
Al-Li alaşımlarının altlık XRD faz analizi Şekil 7.1’de verilmiştir. Faz analizine göre alüminyum, AlLi, LiAl tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra 14Li içeren Al-Li alaşımında bilinmeyen pik tespit edilmiştir.



Şekil 7.1: Al-Li alaşımlarının altlık XRD sonuçları.

7.3. Kaplama Faz Analizi

Kaplamanın faz analizinde, XRD cihazı kullanılarak aynı elektrolitik solüsyon ve aynı proses süresi içerisinde Li miktarına bağlı olarak kaplama faz yapısı incelendi. Farklı Li miktarına sahip alaşımların faz analizi sonuçları Şekil 7.2’de verildi.

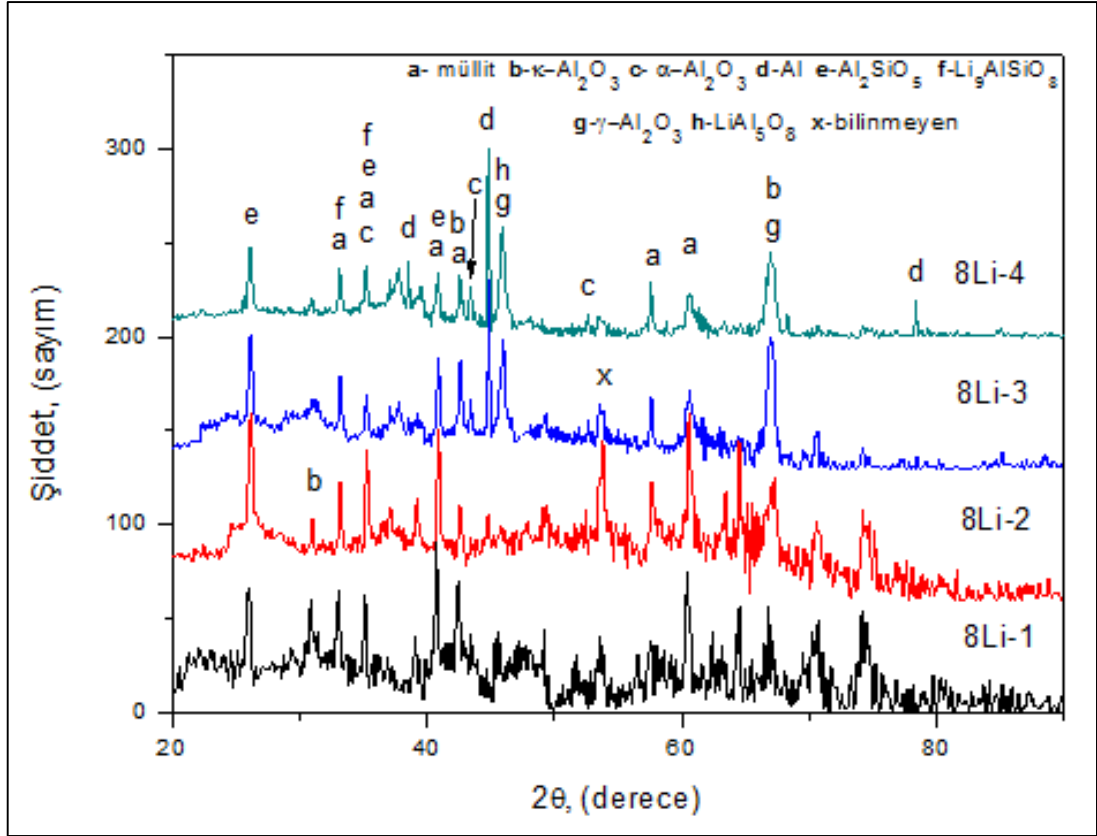


Şekil 7.2: Al-Li alaşımlarına ait kaplama faz analizi sonuçları.

Şekil 7.2 incelendiğinde alüminyum alaşımlarının MAO yöntemi ile kaplanması sonucu oluşan γ - Al_2O_3 ve α - Al_2O_3 fazları kullanılan bütün alaşımlarda tespit edildi. Bunun yanı sıra alüminyum, müllit, κ - Al_2O_3 , Al_2SiO_5 , $\text{Li}_9\text{AlSiO}_8$ ve LiAl_5O_8 'e ait XRD pikleri tespit edildi. 1Li alaşımında tespit edilen alüminyumun altlıktan kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca bilinmeyen pikler de tespit edilmiştir.

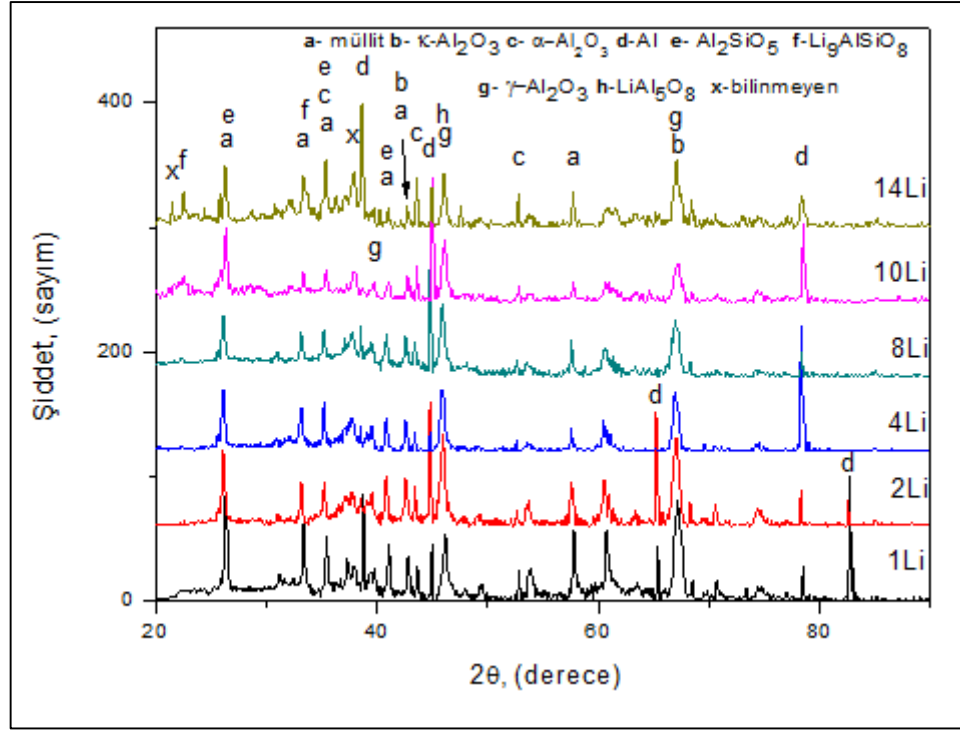
Ayrıca 4 kademededen oluşan kazımalı XRD analizleri yapılmıştır. Bunlar;

- i) Kaplama yüzeyinden alınan XRD
- ii) Kaplama üzerindeki ufak parçacıkların 320 SiC zımpara ile kazınması sonucunda alınan XRD
- iii)Kaplamanın yarısının kazınması sonucunda alınan XRD
- iv)45-50 μm ye inilerek alınan XRD.



Şekil 7.3: 120 dk. MAO ile kaplanan 8Li alaşımının kademeli olarak kazınmış ve yüzeyden alınan XRD sonuçları.

Şekil 7.3’de 120 dk. MAO ile kaplanan 8Li alaşımının kademeli olarak kazınmış ve yüzeyden alınan XRD sonuçları verildi. Şekil 7.3’de beklenildiği üzere Al pikleri altlığa yakın kısımda görülmektedir. Yüzeyden altlığa gidildikçe müllit fazının kaplamanın orta kısımlarında pik yaptığı görülmüştür. α - Al_2O_3 ve γ - Al_2O_3 kaplamadan altlığa gidildikçe piklerin şiddetini arttığı ve altlığa yakın kısımda piklerin şiddetinin azaldığı görülmektedir. κ - Al_2O_3 fazı ise kaplamanın yüzeyine yakın kısımda tespit edilmiştir ve altlığa gidildikçe pikin şiddetinde azalma tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra alüminyum pikleri tespit edilmiştir. Tespit edilen piklerin altlıktan geldiği düşünülmektedir.



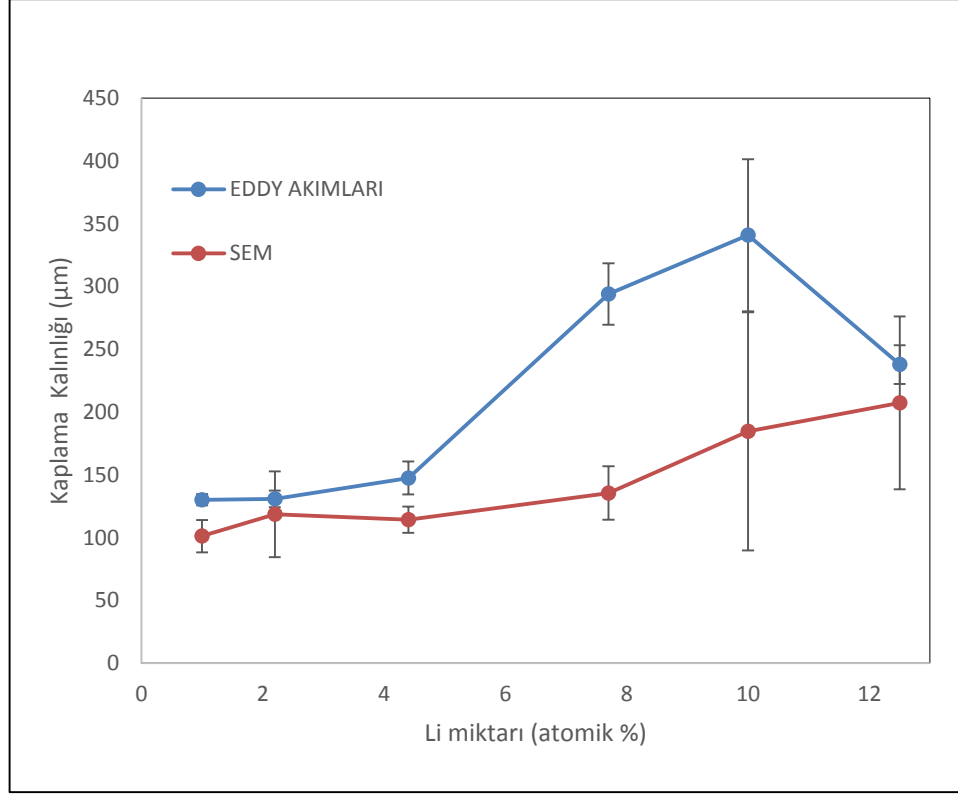
Şekil 7.4: Al-Li alaşımlarına ait altlığa yakın kısımdan alınan kaplama faz analizi sonuçları (4. Kazımlar).

Değişen Li miktarına bağlı olarak 45-50 μm ye inilerek alınan XRD sonuçları Şekil 7.4’de verilmiştir. Altlığa yakın olduğu için alüminyum pikleri görülmektedir. Bunun yanı sıra, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, müllit, $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\text{Li}_9\text{AlSiO}_8$, Al_2SiO_5 ve $\kappa\text{-Al}_2\text{O}_3$ fazları görülmektedir. Li miktarı arttıkça $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ pik şiddetinin de arttığı ve $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ pik şiddetinin azaldığı açıkça görülmektedir.

7.4. Kaplama Kalınlığı

120 dk boyunca MAO kaplama ile kaplanan Al-Li alaşımlarının SEM ve Eddy akımları ile ölçülen kaplama kalınlığının Li miktarına göre değişimi Şekil 7.5’de verilmiştir.

SEM yöntemi ile ölçülen kaplama kalınlıkları 101,23 – 207,4 μm arasında, Eddy Akımları yöntemi ile ölçülen kaplama kalınlığı 130,17 - 340,83 μm arasında değişmektedir. 10Li’da standart sapmanın fazla olduğu yani kaplama kalınlığının diğer altlıkarın kaplama kalınlıklarına göre kaplama kalınlığının değişkenlik gösterdiği, her iki yöntemle de elde edilen verilerde görülmektedir.

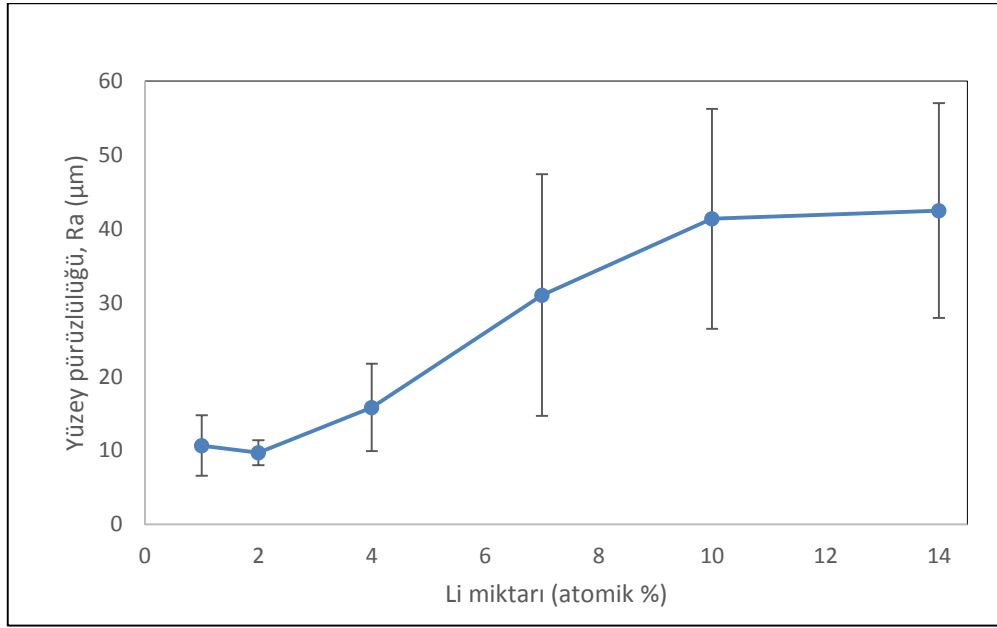


Şekil 7.5: MAO ile kaplanan Al-Li alaşımlarının SEM ve Eddy akımları yöntemleri ile ölçülen kaplama kalınlığının Li miktarına (atomik %) göre değişimi.

Her iki yöntemde de artan Li miktarı ile kaplama kalınlığının arttığı görüldü. 1Li, 2Li ve 4Li alaşımlarının kaplama kalınlıkları her iki yöntemde de birbirine yakın değerler olduğu tespit edildi. 8Li, 10Li ve 14Li alaşımlarında ise kaplama kalınlıklarında farklılıklar tespit edildi. Eddy akımları yöntemi ile ölçülen 8Li alaşımının kaplama kalınlığında ani artış görülürken 10Li da bu artışta azalma görüldü. SEM yöntemi ile yapılan ölçümlerde ise kaplama kalınlığındaki ani artış 10Li alaşımında tespit edilmiştir ve kaplama kalınlık değeri $340,83 \pm 60,53 \mu\text{m}$ 'dir. 14Li alaşımında her Eddy akımları yöntemiyle de ölçülen kaplama kalınlığında düşüş olduğu, SEM ile yapılan ölçümde ise kaplama kalınlığında artış nispeten az olmakla birlikte görüldü.

7.5. Yüzey Pürüzlülüğü

MAO yöntemi ile 120 dk kaplanan Al-Li alaşımlarının yüzey pürüzlülüğü sistematik olmasa da Li miktarı ile birlikte arttığı görüldü. Şekil 7.6'da kaplanan Al-Li alaşımlarının Li miktarına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü değişimi verildi.

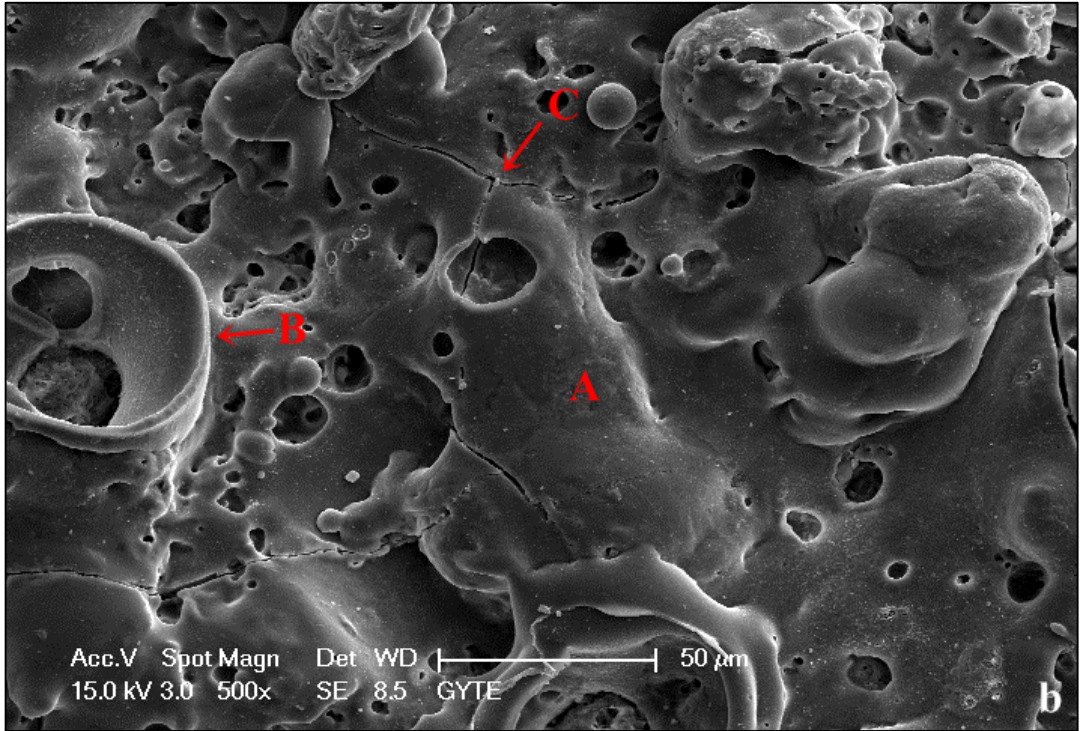
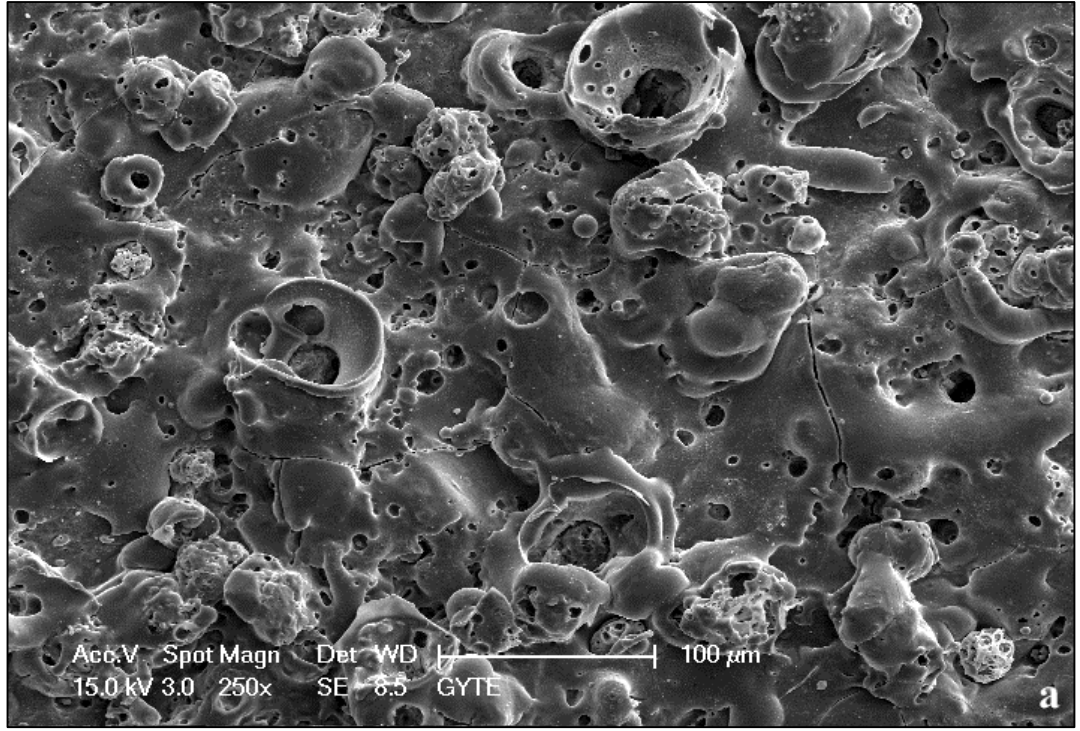


Şekil 7.6: Al-Li alaşımlarına uygulanan MAO kaplamada yüzey pürüzlülüğünün lityum miktarına göre değişimi.

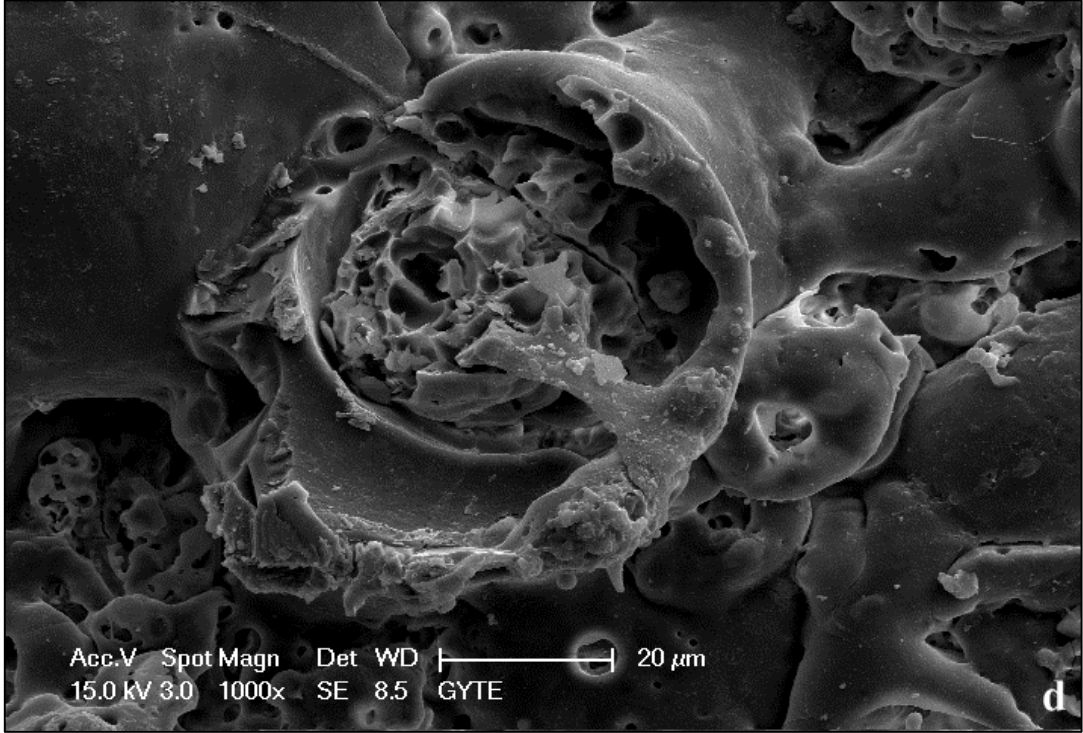
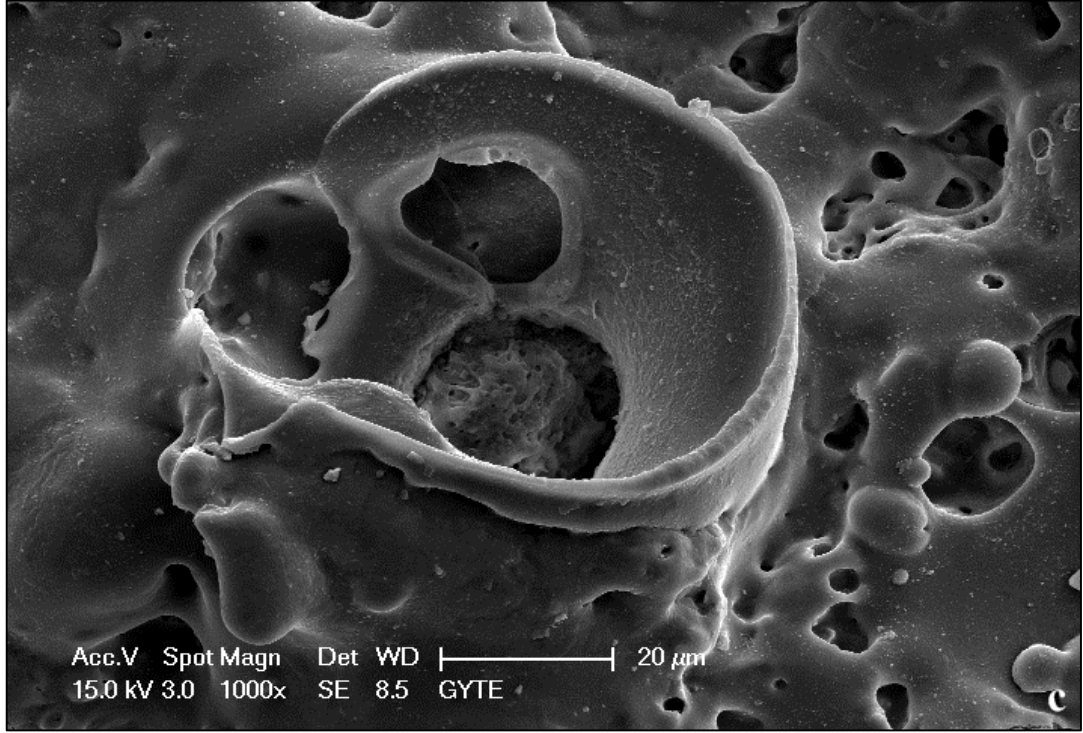
Yüzey pürüzlülüğü 1Li alaşımının kaplamasında $10,68 \pm 4,08$ μm değerinde ölçülürken, 2Li alaşımının kaplamasında $9,7 \pm 1,68$ μm ölçüldü. Ardından Li miktarındaki artış ile 4Li alaşımının kaplamasında yüzey pürüzlülüğü $15,82 \pm 5,92$ μm olarak ölçüldü. 4Li, 8Li ve 10Li alaşımlarının kaplama yüzey pürüzlülüklerinde sistematik bir artış görüldü. 8Li alaşımının yüzey pürüzlülüğü $31,04 \pm 16,34$ μm iken 10Li alaşımında ise $41,36 \pm 14,89$ olarak ölçüldü. Bunu takiben 14Li alaşımının kaplamasında yüzey pürüzlülüğündeki sistematik artış düşüşe geçmiştir ve 14Li alaşımının kaplama yüzey pürüzlülüğü $42,48 \pm 14,55$ μm olarak ölçüldü.

7.6. Yüzey SEM

Kaplanan metal veya alaşım, MAO prosesinde kaplamayı etkileyen en önemli bileşenlerden biridir. SEM ile farklı atomik yüzdelerde Li içeren Al-Li alaşımlarının MAO ile kaplanan yüzey morfolojisi incelendi.



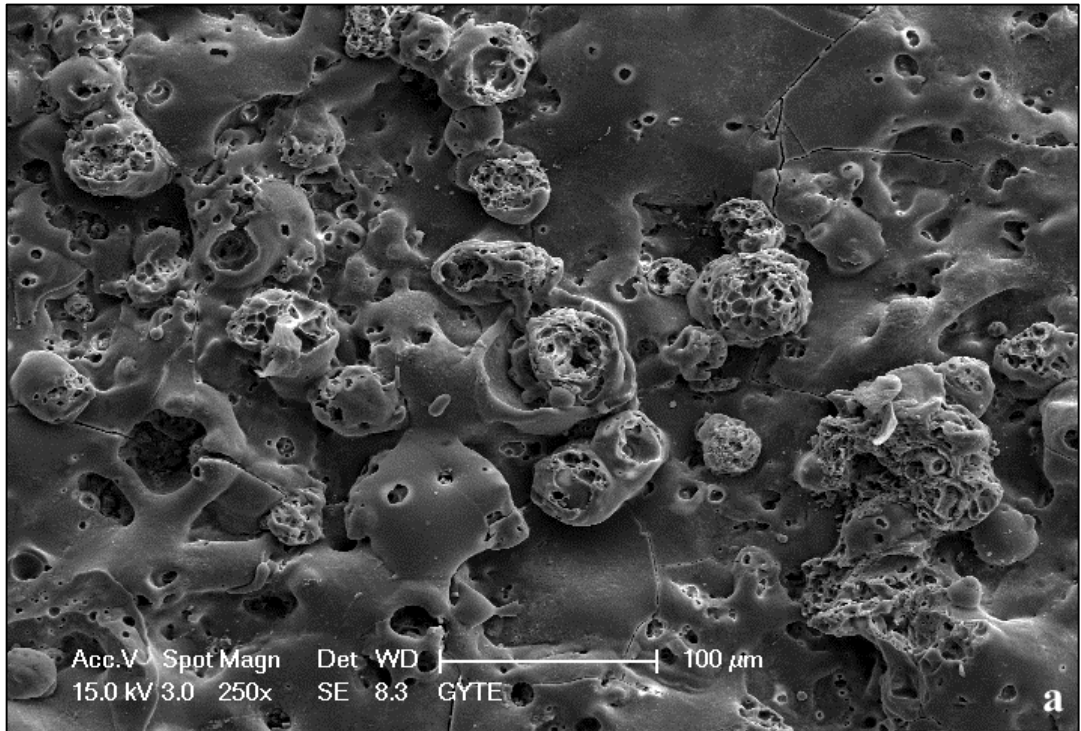
Şekil 7.7: MAO ile 120 dakika süre kaplanmış 1Li alaşımına ait yüzey SEM fotoğrafları a) 250 b) 500X c) 1000X d) 1000X.



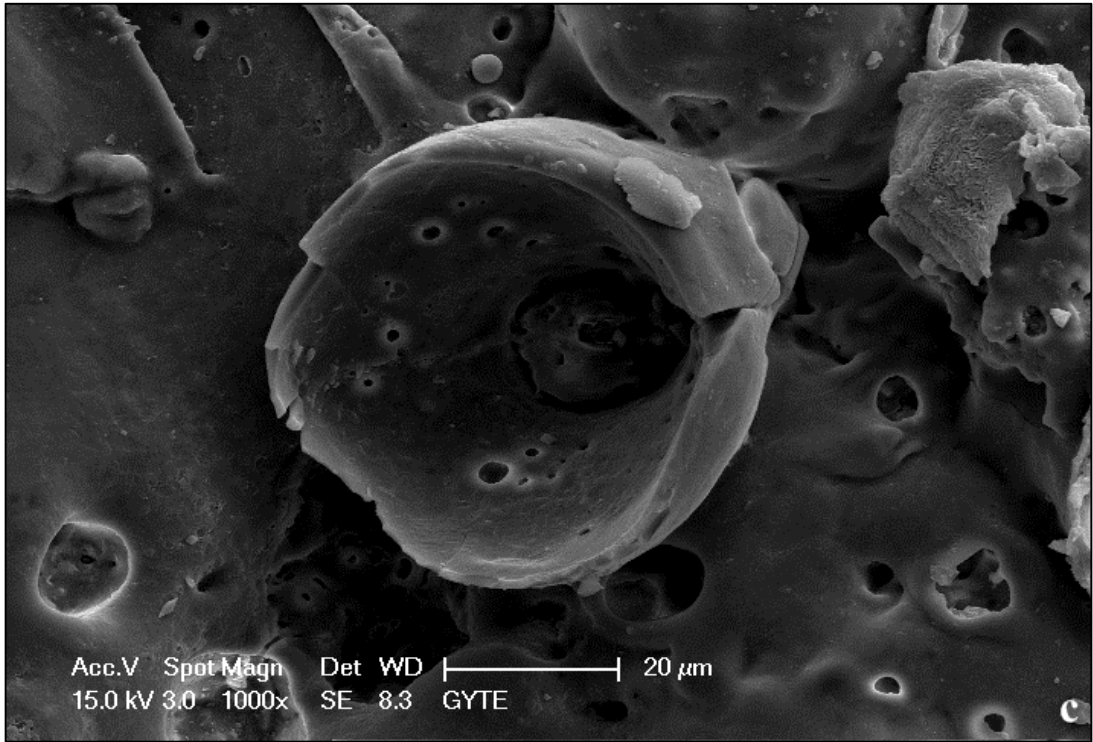
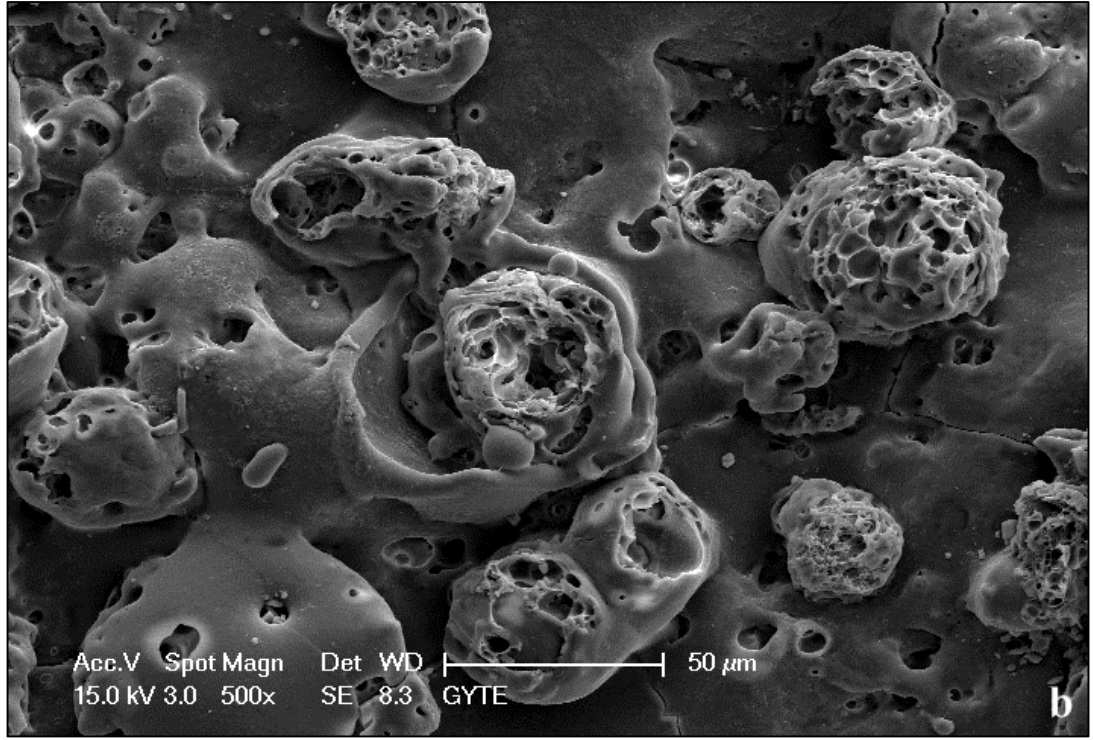
Şekil 7.7: Devam.

Şekil 7.7’da 1Li alaşımının yüzey SEM fotoğrafları gösterilmiştir. Şekil 7.7’de farklı büyüttmelerdeki yüzey SEM fotoğrafları incelendiğinde kaplama yüzeyinde,

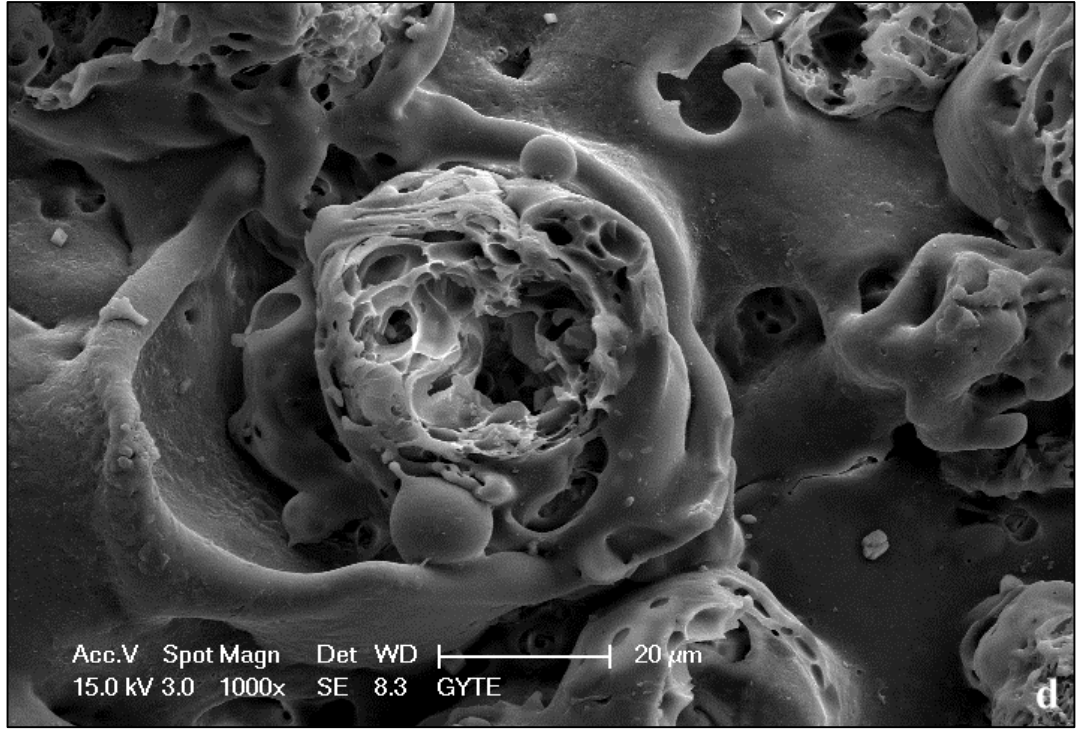
gözenekler, deşarj kanalları, kraterimsi ve süngerimsi yapılar görülmektedir. Krater benzeri yapılar, uygulanan yüksek voltaj ile yüzeyde oluşan kıvılcımların ani soğuması sonucu, ergiyen maddelerin kanalımsı yapılarından fışkırmasıyla oluşur [121]. Deşarj kanalları çevresinde görülen kraterimsi ve yüzeye sıvanmış yapılar görülmektedir. Bu daha az pürüzlü sıvanmış yapıda da çatlaklar görülmektedir. Şekil 7.7’de kaplama yüzeyinde görülen koyu renkli dairesel noktalar Sundararajan ve Krishna tarafından deşarj kanalları olarak tanımlanmıştır [85]. Şekil 7.7 (b)’de ‘A’; deşarj kanalları çevresindeki sıvanmış yapı, ‘B’; deşarj kanalı ve kraterimsi yapı, ‘C’; sıvanmış yüzeyde termal gerilmelerden dolayı oluşan çatlakları göstermektedir. Şekil 7.7(c) ve (d)’de deşarj kanalı ve etrafında hızla katılaştıran yapı sonucu oluşan kraterimsi yapı görülmektedir. (d)’de ayrıca deşarj kanalı içerisindeki süngerimsi yapı, altlıktan gelen ergiyik malzemenin yüzeye yakın yerde deşarj kanalı içerisinde ani soğuması sonucu oluşmuştur [85, 111] , ve burada küresel yapının et kalınlığı ince olduğu için soğuk elektrolitik solüsyonla karşılaştığında kırılarak yarı küresel yapı hali gelmiştir.



Şekil 7.8: MAO ile 120dk süre ile kaplanan 2Li alaşımına ait yüzey SEM fotoğrafları
a) 250X b) 500X c) 1000X d) 1000X.

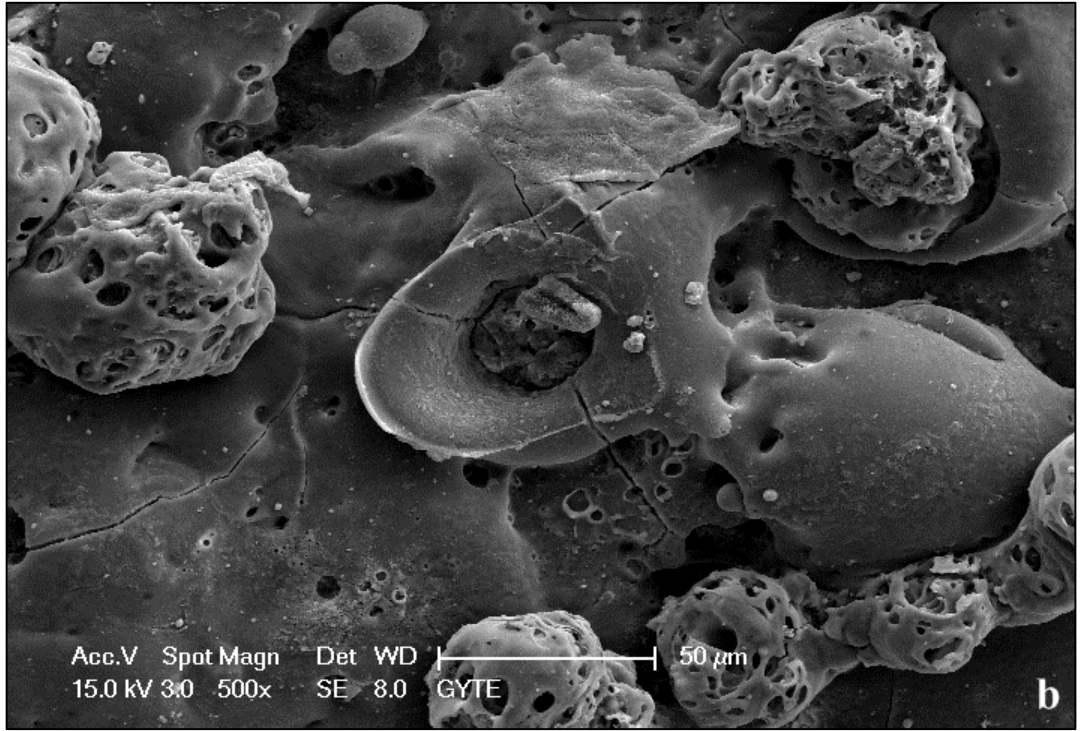


Şekil 7.8: Devam.

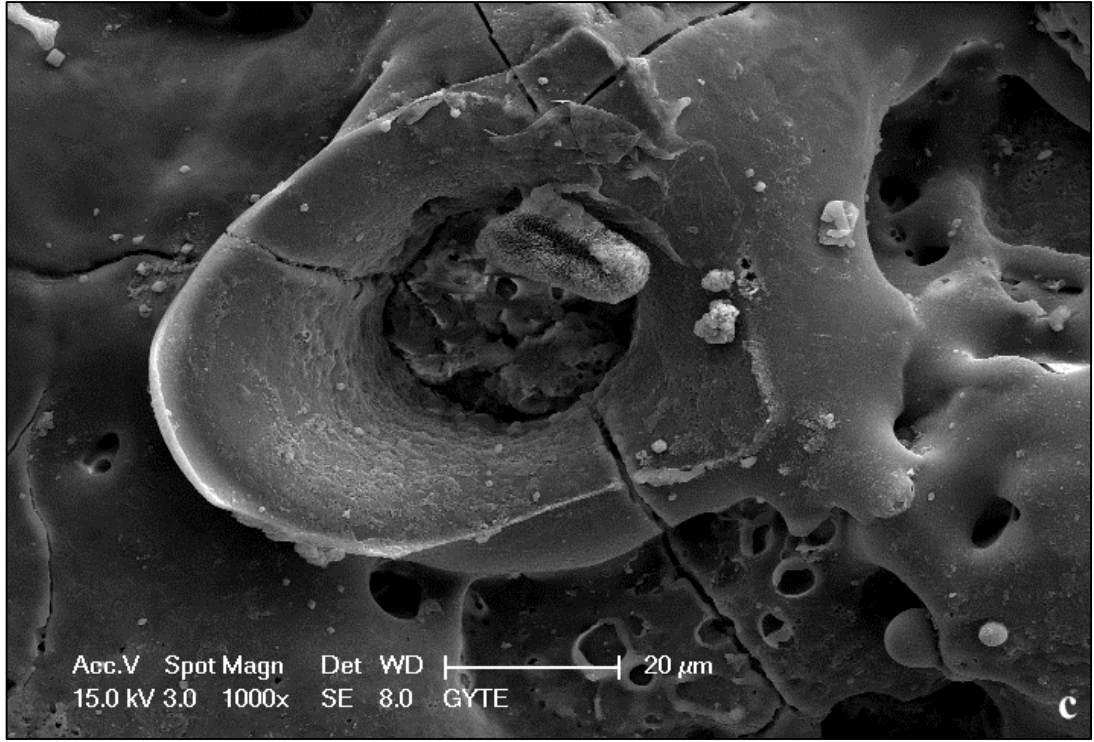


Şekil 7.8: Devam.

MAO ile 120 dk süre ile kaplanan 2Li alaşımasının Şekil 7.8’de farklı büyütmelerdeki yüzey SEM fotoğrafları görülmektedir. 2Li alaşımında da 1Li alaşımına benzer şekilde kraterimsi yapılar, deşarj kanalları, gözenekler ve çatlaklar görülmektedir. 1Li alaşımından farklı olarak nispeten daha fazla deşarj kanalı vardır ve süngerimsi yapı daha belirgin şekilde görülmektedir. Bunun yanı sıra deşarj kanalları çevresinde yüzeyde sıvanmış yapı daha geniş alanda görülmektedir. 1Li alaşımından farklı olarak deşarj kanalı çevresinde oluşan kraterimsi yapının et kalınlığı nispeten daha fazladır.

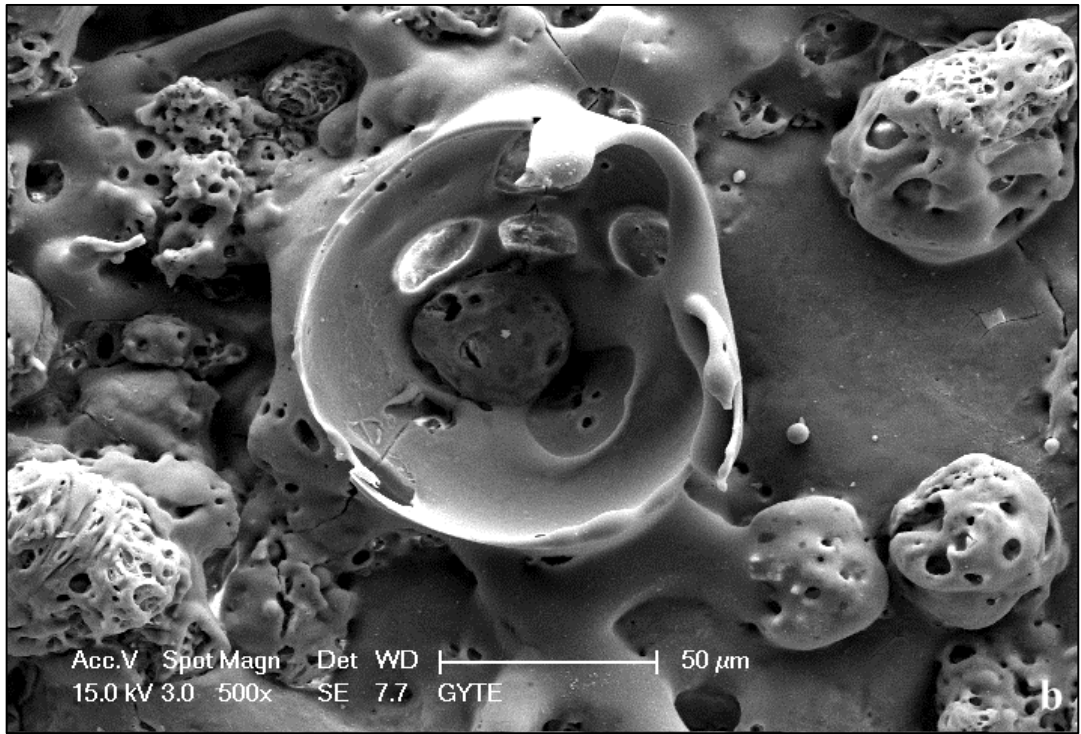
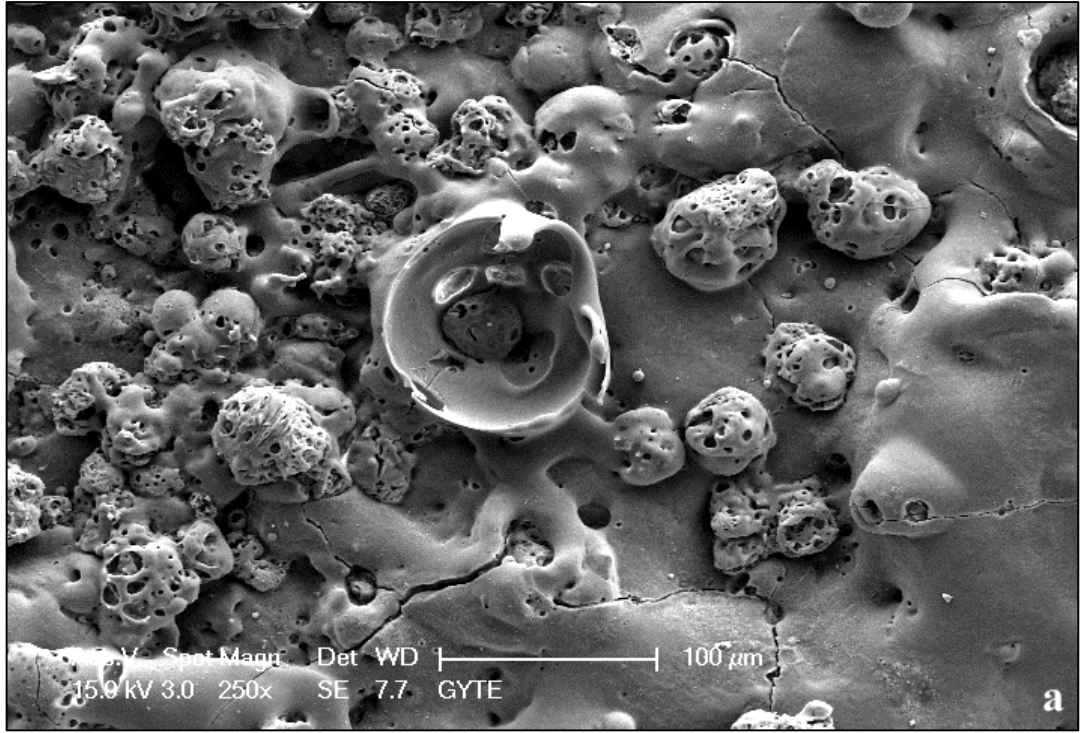


Şekil 7.9: MAO ile 120dk süre ile kaplanan 4Li alaşımına ait yüzey SEM fotoğrafları
a) 250X b) 500X c) 1000X.

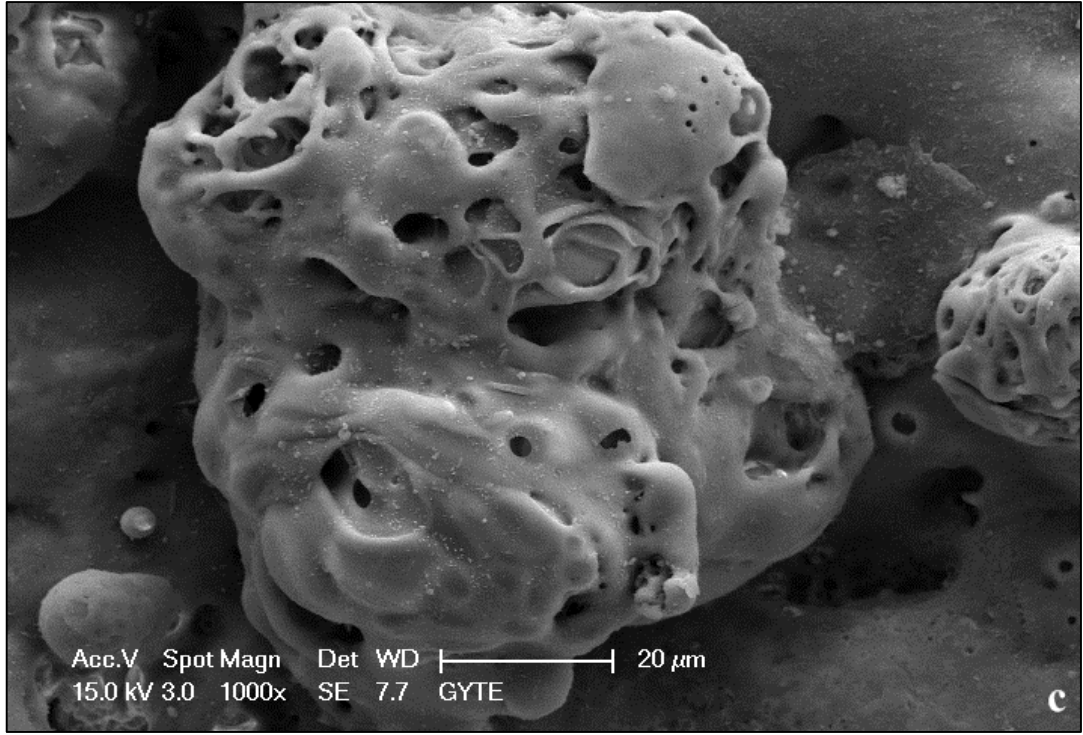


Şekil 7.9: Devam.

4Li alaşımlarının yüzey SEM fotoğrafları Şekil 7.9’da gösterilmiştir. 1Li ve 2Li alaşımlarına benzer yapıda olup daha az sayıda deşarj kanalları ve nispeten daha fazla öbekleşmiş halde süngerimsi yapılar görülmektedir. Bunun yanı sıra 2Li alaşımında kaplamadaki sıvanmış yüzeyde bulunan çatlakların 4Li alaşımında daha belirgin halde görülmektedir. Şekil 7.9 (c)’de deşarj kanalı ve krater yapı görülmektedir ve bu deşarj kanalının içerisinde 1Li’daki gibi süngerimsi yapı görülmektedir.

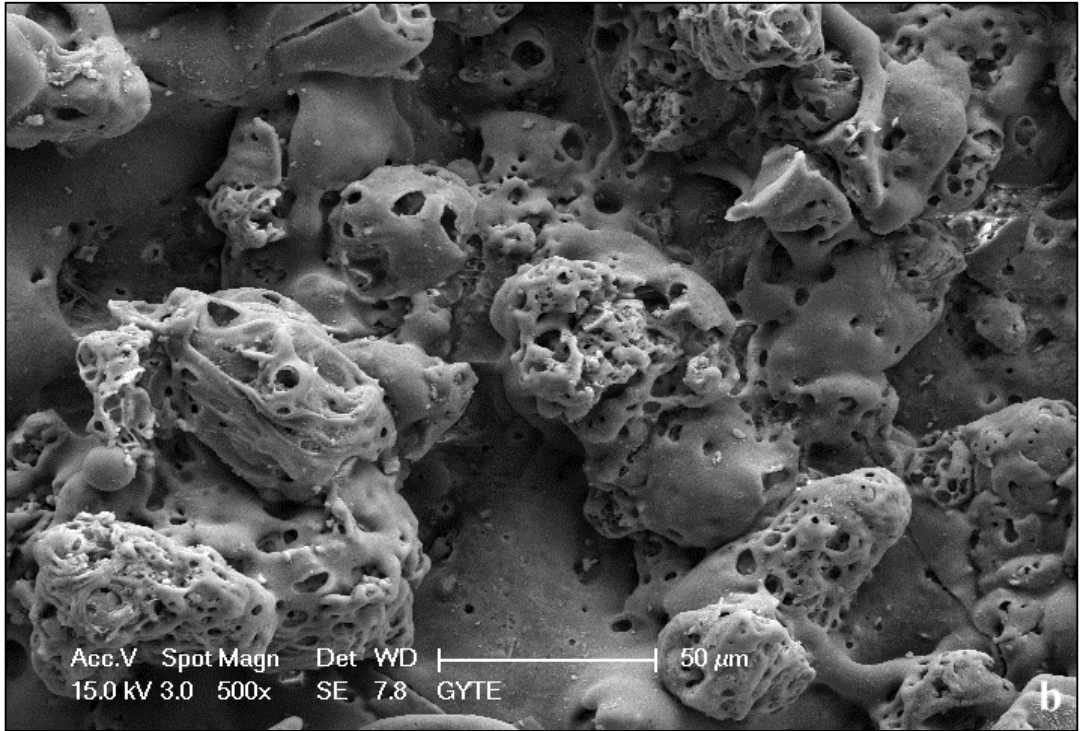
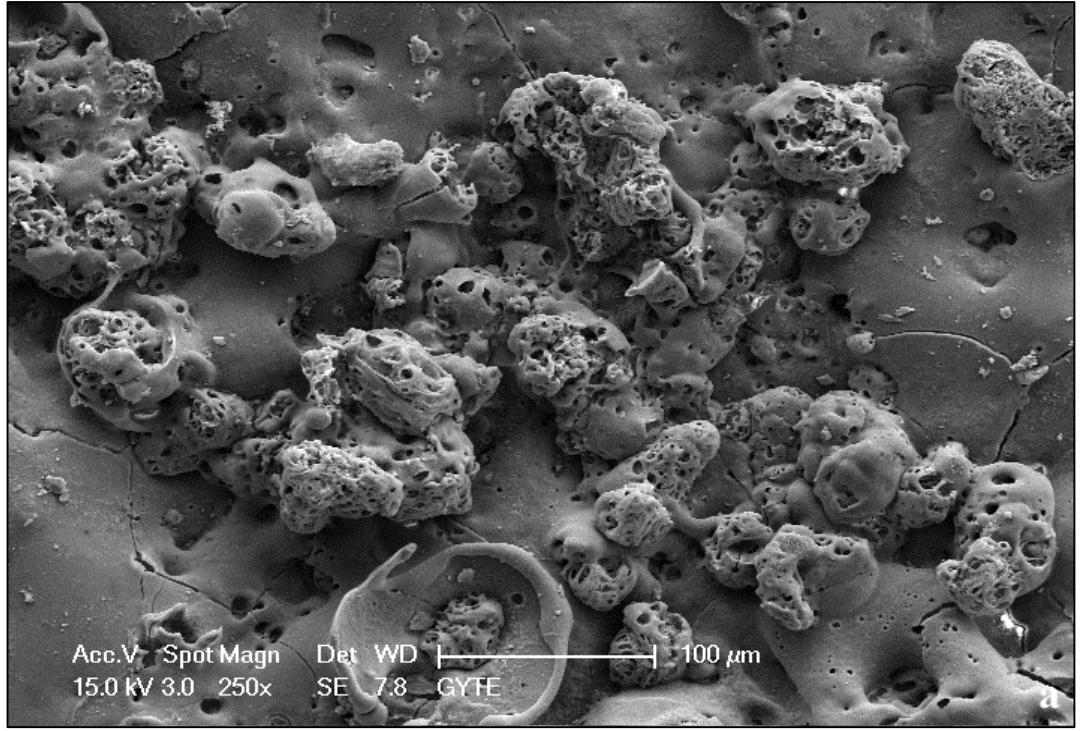


Şekil 7.10: MAO ile 120dk süre ile kaplanan 8Li alaşımına ait yüzey SEM fotoğrafları a) 250X b) 500X c) 1000X.

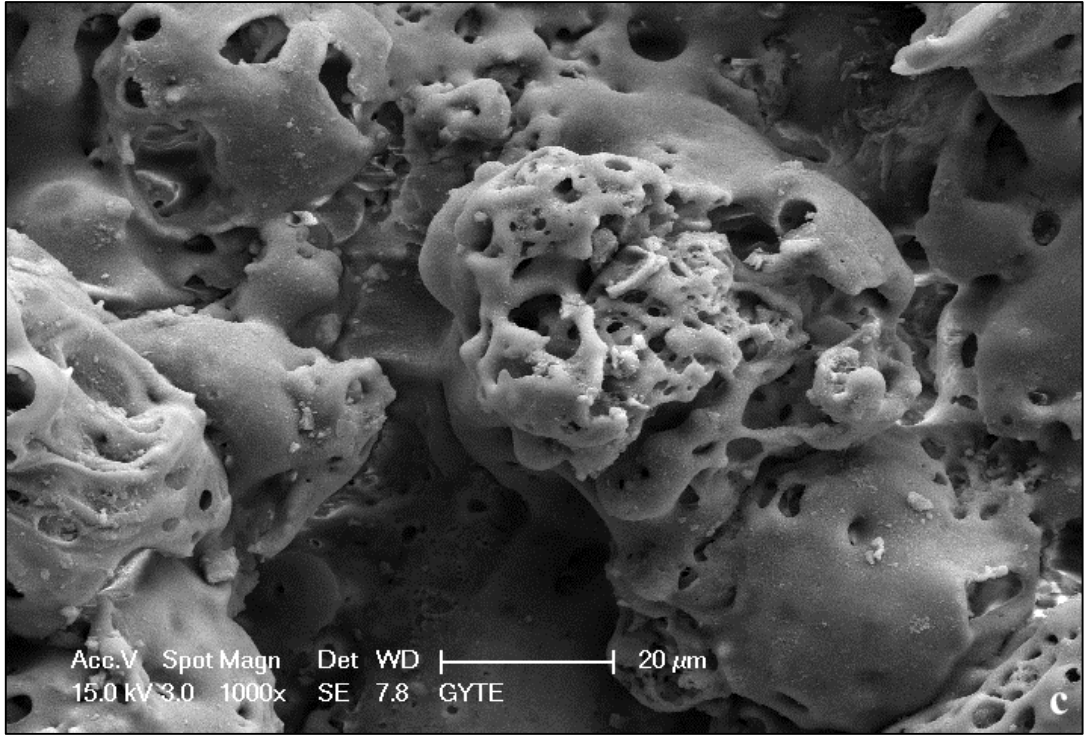


Şekil 7.10: Devam.

Şekil 7.10'da 8Li alaşımlarının yüzey SEM fotoğrafları gösterilmiştir. 8Li alaşımlarında deşarj kanallarının çevresindeki süngerimsi yapıların sayısı 4Li alaşımına göre daha fazladır fakat yer yer boyutları küçülmüştür. Deşarj kanalları çevresinde oluşan sıvanmış pürüzsüz yüzey yapısı daha geniş alanda görülmektedir. Deşarj kanalları çevresinde bulunan mikro çatlaklar, 4Li alaşımına göre daha belirgin şekilde görülmektedir. Ayrıca 4Li alaşımına göre yüzeyde bulunan gözenekli yapılar daha öbekleşmiş halde görülmektedir. 4Li alaşımına benzer şekilde şekil 7.10 (c)'de deşarj kanalı ve kraterimsi yapı görülmektedir.

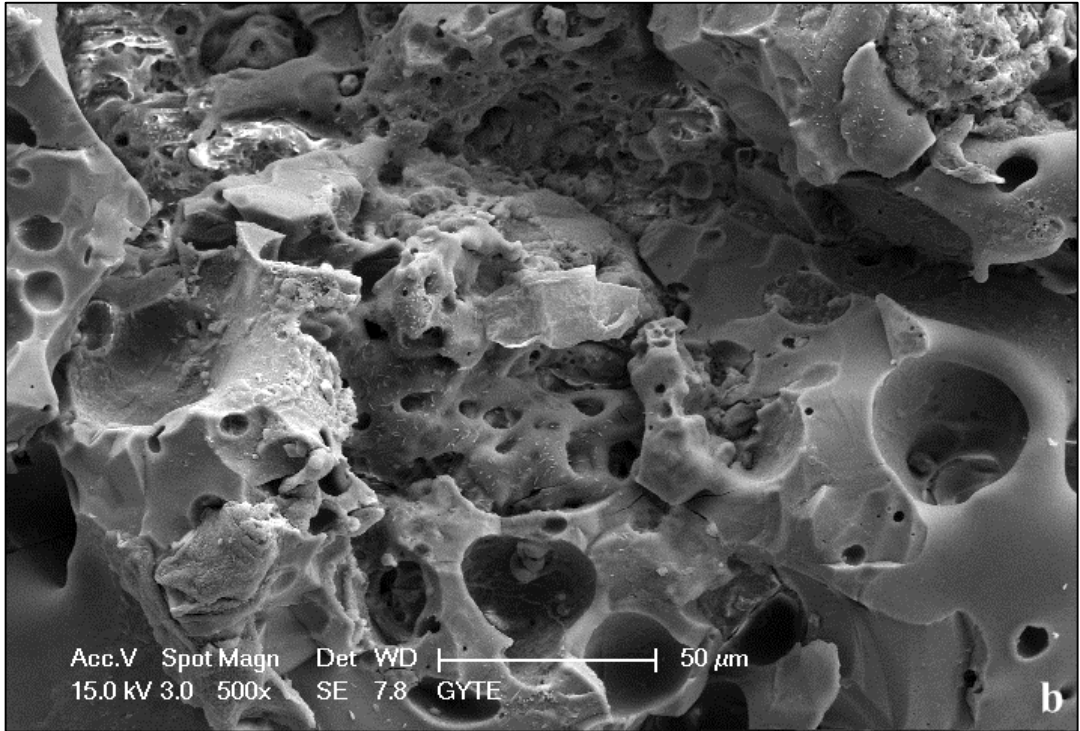
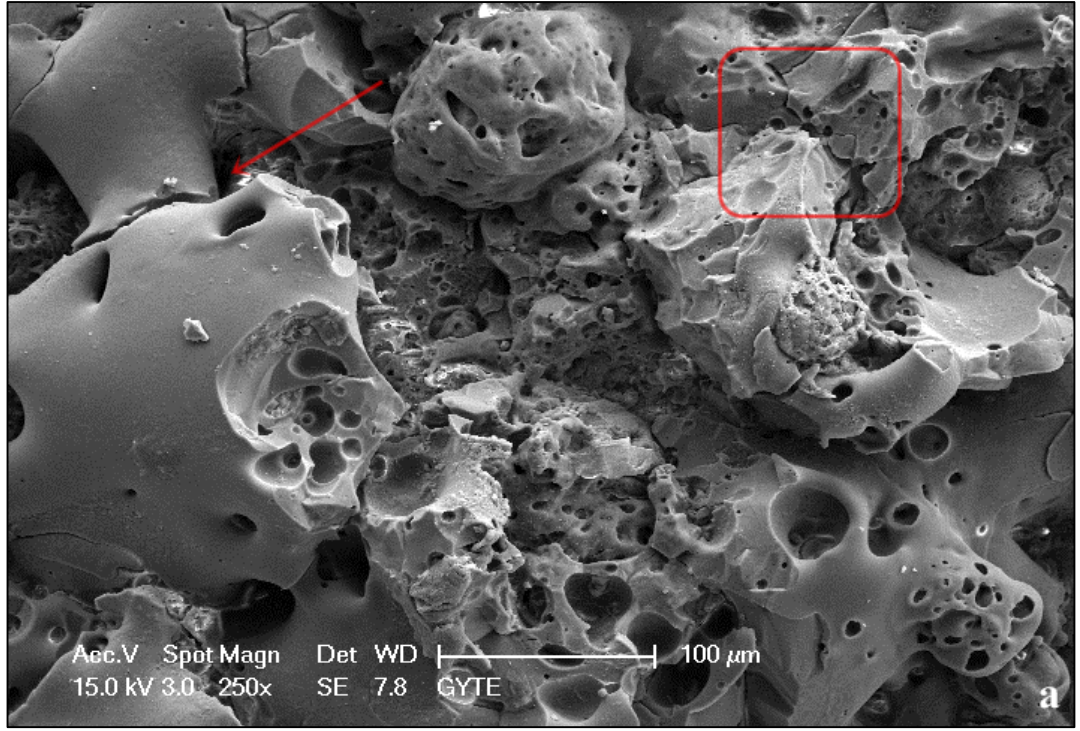


Şekil 7.11: MAO ile 120dk süre ile kaplanan 10Li alaşımına ait yüzey SEM fotoğrafları a) 250X b) 500X c) 1000X.

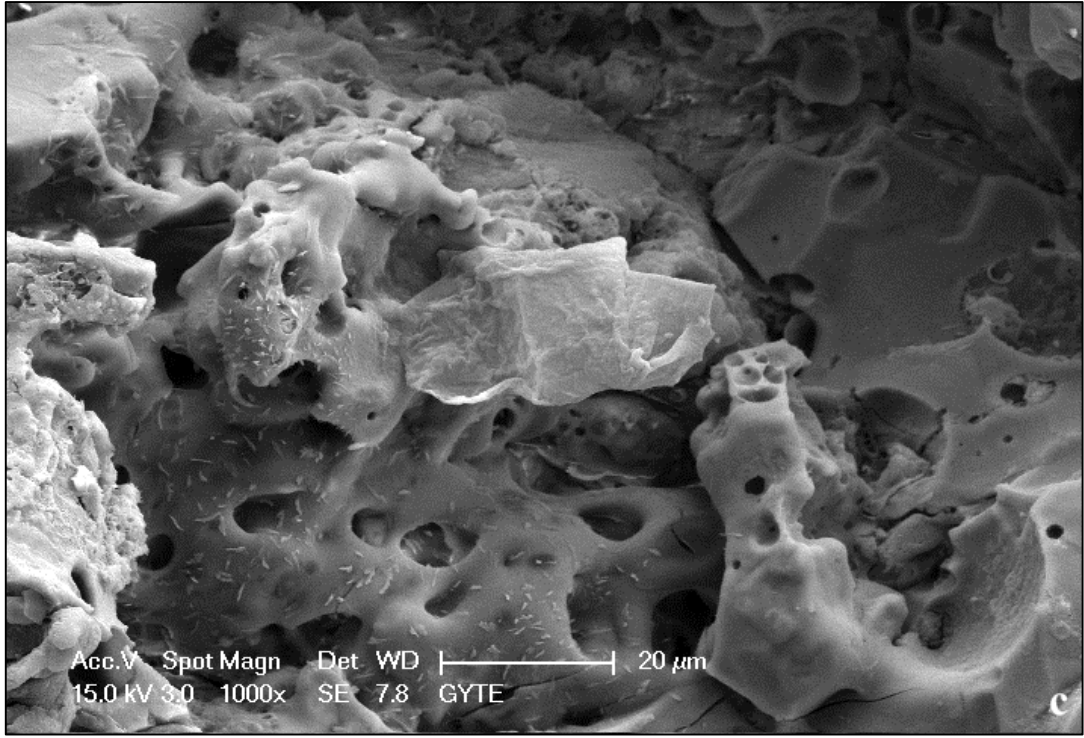


Şekil 7.11: Devam.

10Li alaşımlarının yüzey SEM fotoğrafları Şekil 7.11’de gösterilmiştir. 10Li alaşımı, 8Li alaşımına benzer yapıdadır. Belirli bölgelerde kraterimsi yapılar yer alırken, bazı bölgelerde süngerimsi yapılar çevresinde yüzeye sıvanmış, daha az pürüzlü bölgelerden oluşmaktadır. Daha az pürüzlü yüzeyde çeşitli mikroçatlaklar görülmektedir. 8Li alaşımından farklı olarak yüzeyde süngerimsi gözenekli yapılar nispeten daha fazladır ve süngerimsi yapılar biribiri içerisine geçmiş şekilde yer almaktadır.



Şekil 7.12: MAO ile 120 dk süre ile kaplanan 14 Li alaşımına ait yüzey SEM fotoğrafları a) 250X b) 500X c) 1000X.

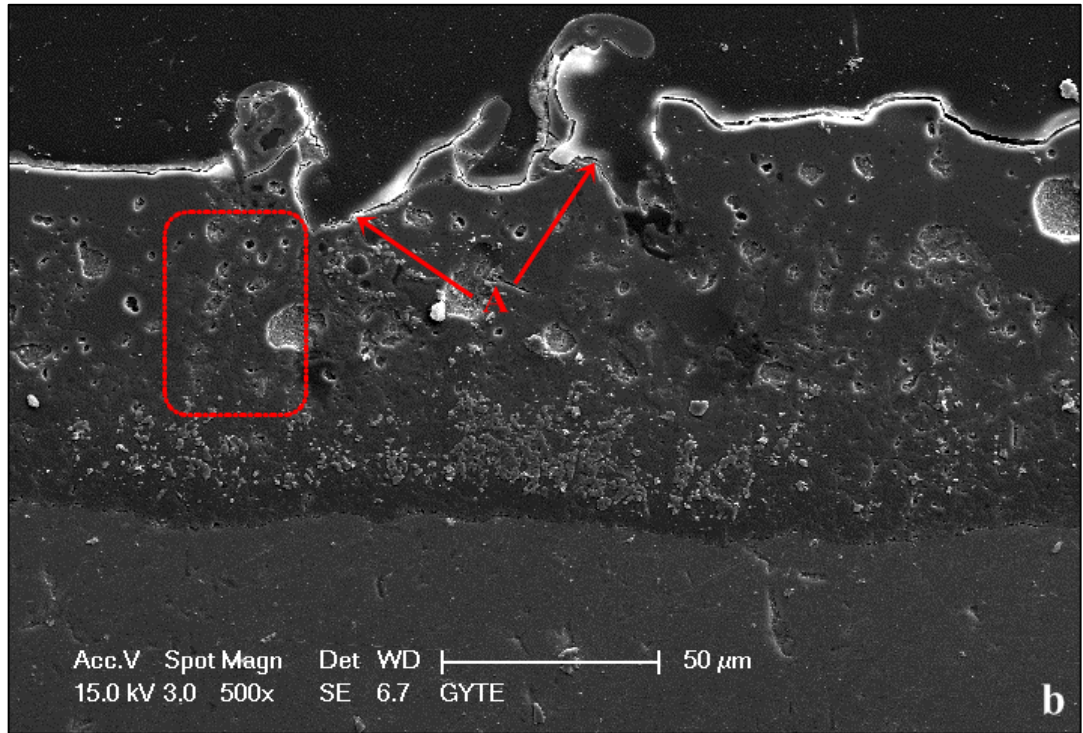
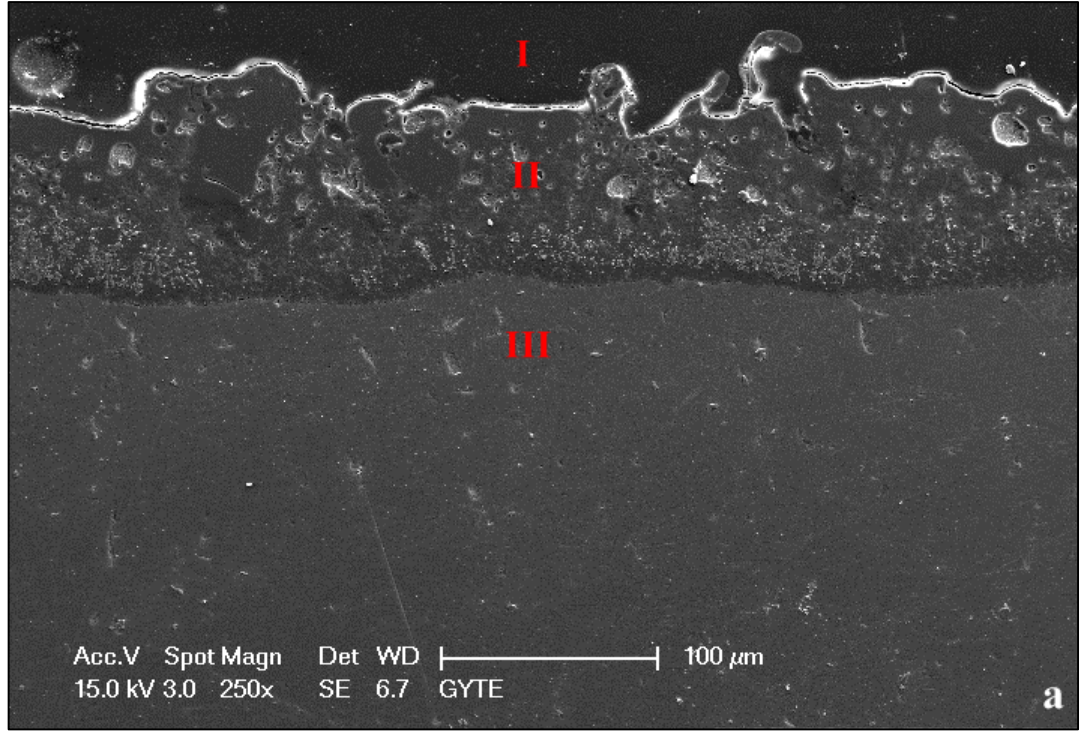


Şekil 7.12: Devam.

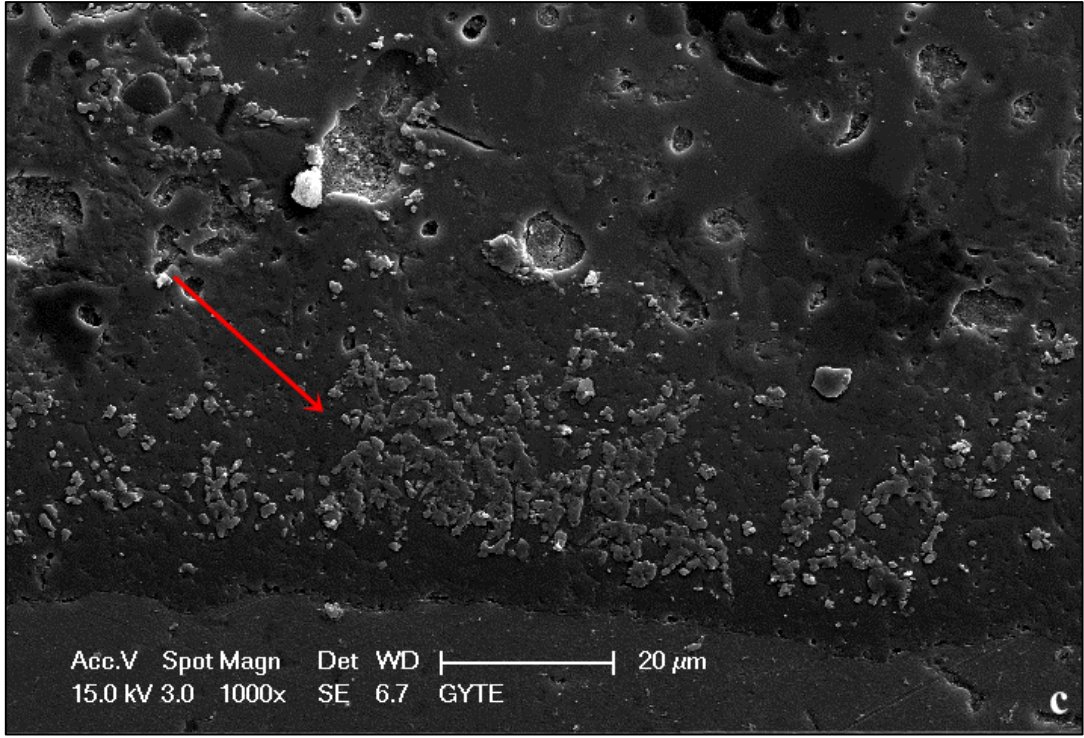
14Li alaşımlarının yüzey SEM fotoğrafları Şekil 7.12’de gösterilmiştir. 10Li alaşımında görülen deşarj kanalları çevresindeki süngerimsi gözenekli yapılar, 14Li alaşımında çok daha büyük ve fazla sayıdadır, benzer şekilde süngerimsi yapılar çevresinde yüzeye sıvanmış daha az pürüzlü bölgeler bulunmaktadır. Bunun yanı sıra diğer alaşımlarda da görülen mikroçatlaklar çok daha belirgin şekilde görülmektedir ve şekil 7.12 (a)’da gösterilmiştir.

7.7. Kesit SEM

MAO ile 120 dk. boyunca kaplanan 1Li alaşımlarının kesit SEM fotoğrafları Şekil 7.13’de gösterilmiştir. Şekil 7.13 (a)’da ‘I’; numunenin kalıba alındığı epoksiyi, ‘II’; MAO prosesi sonucu oluşan oksit esaslı kaplamayı, ‘III’; Al-Li alaşımını göstermektedir.

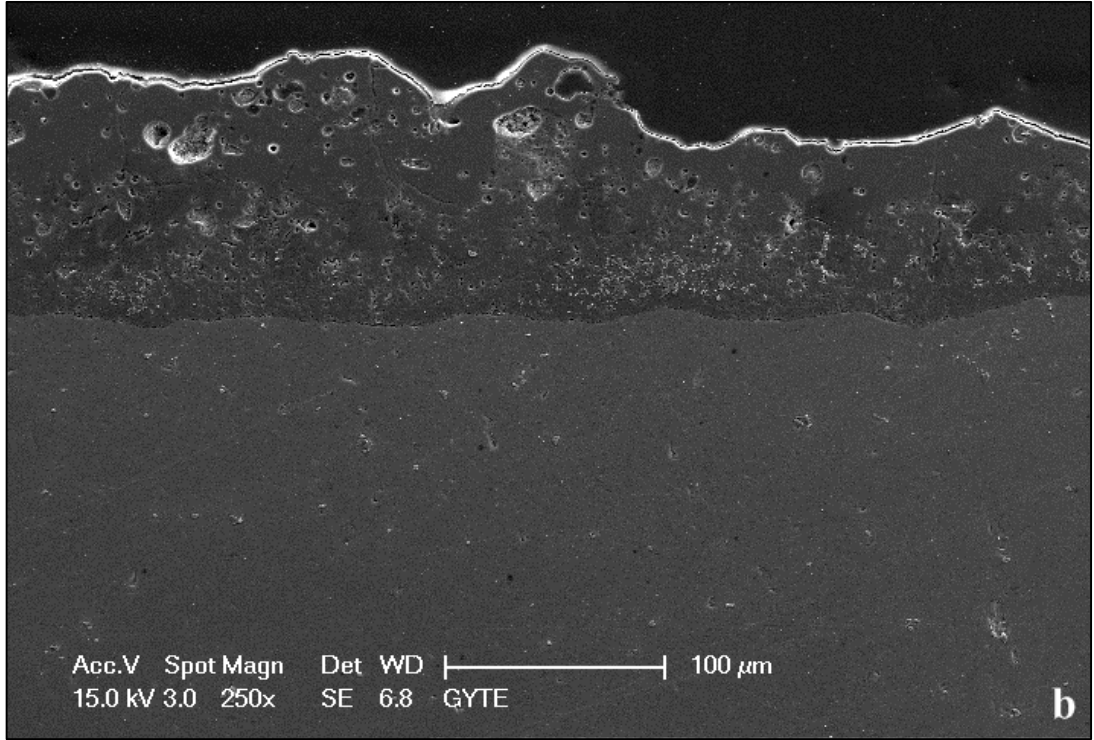
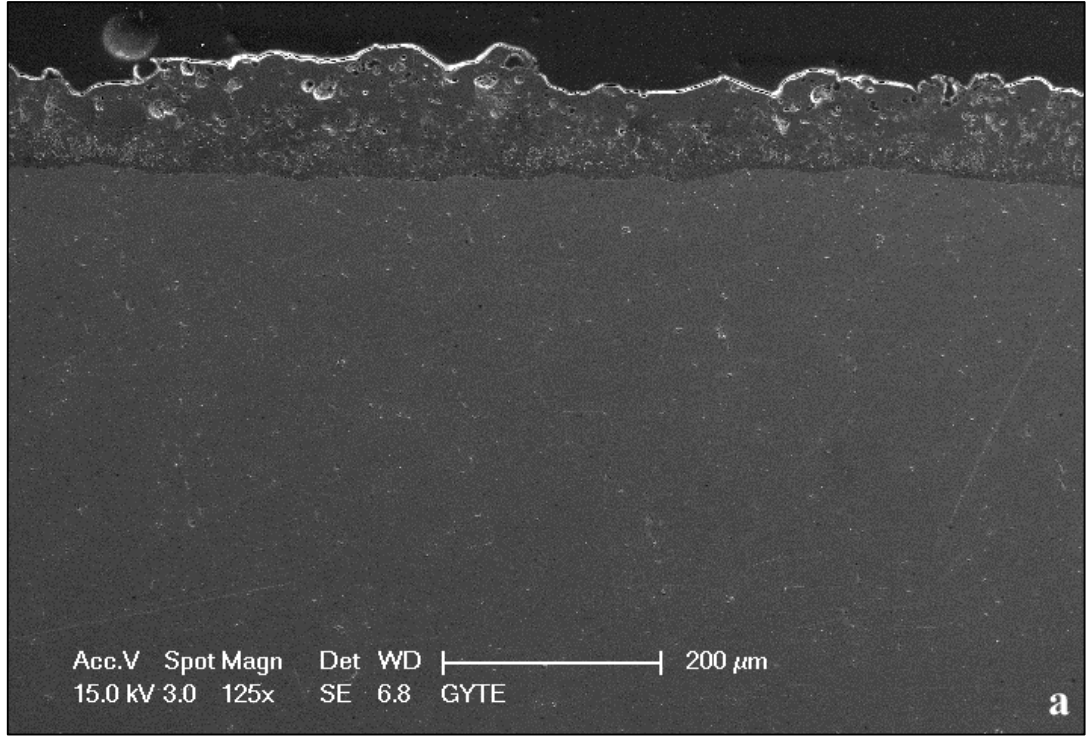


Şekil 7.13: MAO ile 120 dk boyunca kaplanan 1Li alaşımının farklı büyütmelerdeki kesit SEM fotoğrafları a) 250X b) 500X c) 1000X.

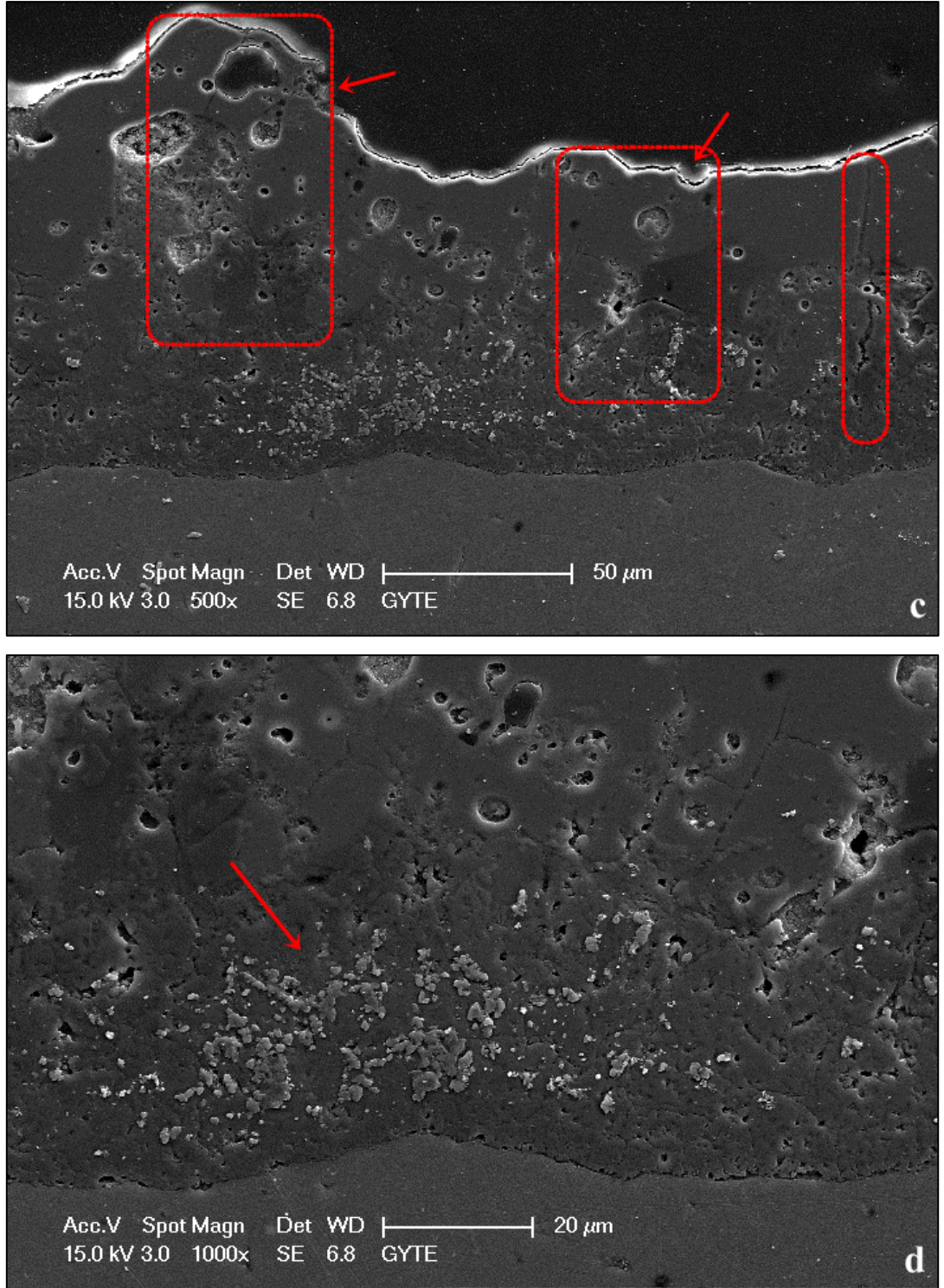


Şekil 7.13: Devam.

1Li alaşımının kesit SEM fotoğrafları incelendiğinde kaplama kalınlığı 101,23 μm olduğu görülmüştür. Şekil 7.13(b)'de kaplama yüzeyinde kraterimsi yapıların 'A' ile kesitten görünüşü gösterilmektedir. Ayrıca deşarj kanalı kesit boyunca sıralı şekilde gözenekler şeklinde görülmektedir. Şekil 7.13(c)'de kaplamada altlığa yakın bölgede α -alümina görülmektedir ve bu bölge işaretle gösterilmiştir. Kaplamanın dış tabakanın oldukça gözenekli, iç tabakanın yoğun olduğu ve yer yer gözenekler olduğu görülmektedir. İç tabakanın hemen altında ince bariyer tabakası bulunmaktadır ve α -alüminanın altında koyu renkli şekilde görülmektedir. Bunun yanı sıra kaplama yüzeyinin oldukça pürüzlü olduğu görülmektedir.



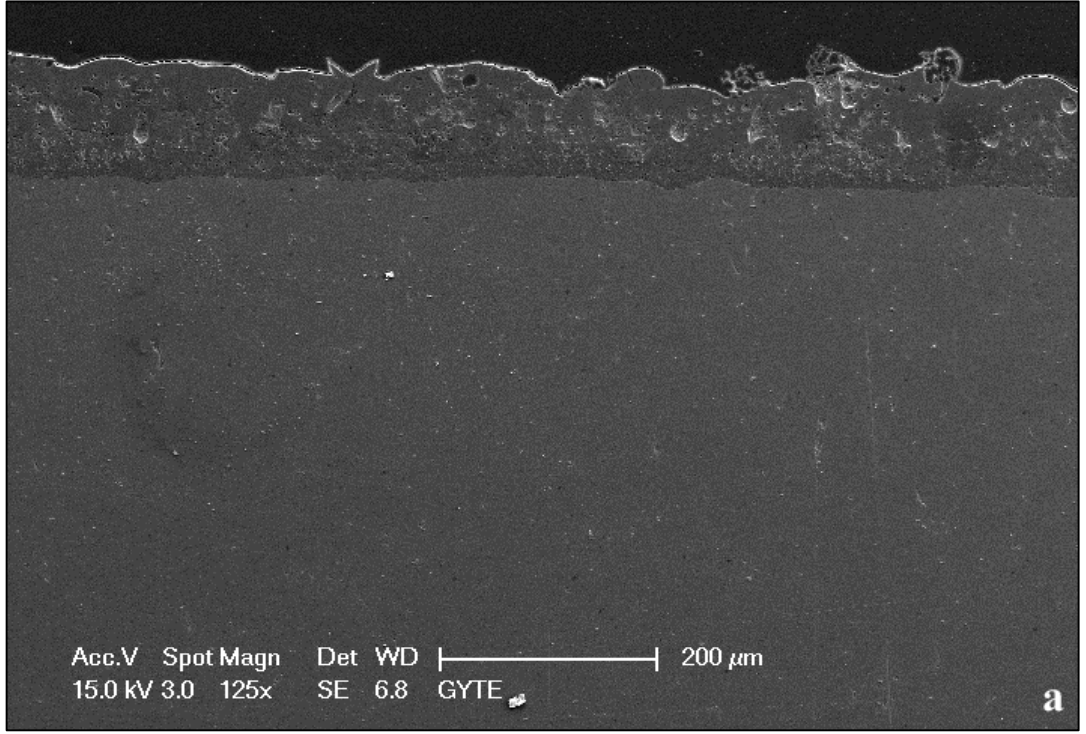
Şekil 7.14: MAO ile 120 dk boyunca kaplanan 2Li alaşımasının farklı büyütmelelerdeki kesit SEM fotoğrafları a) 125X b) 250X c) 500X d) 1000X.



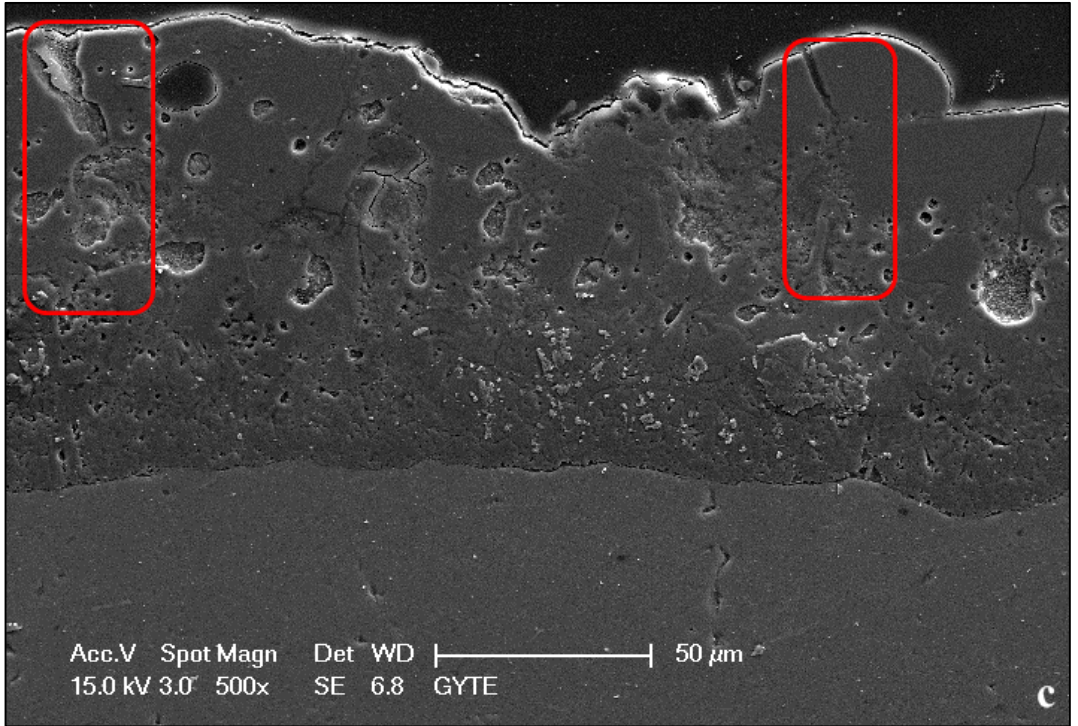
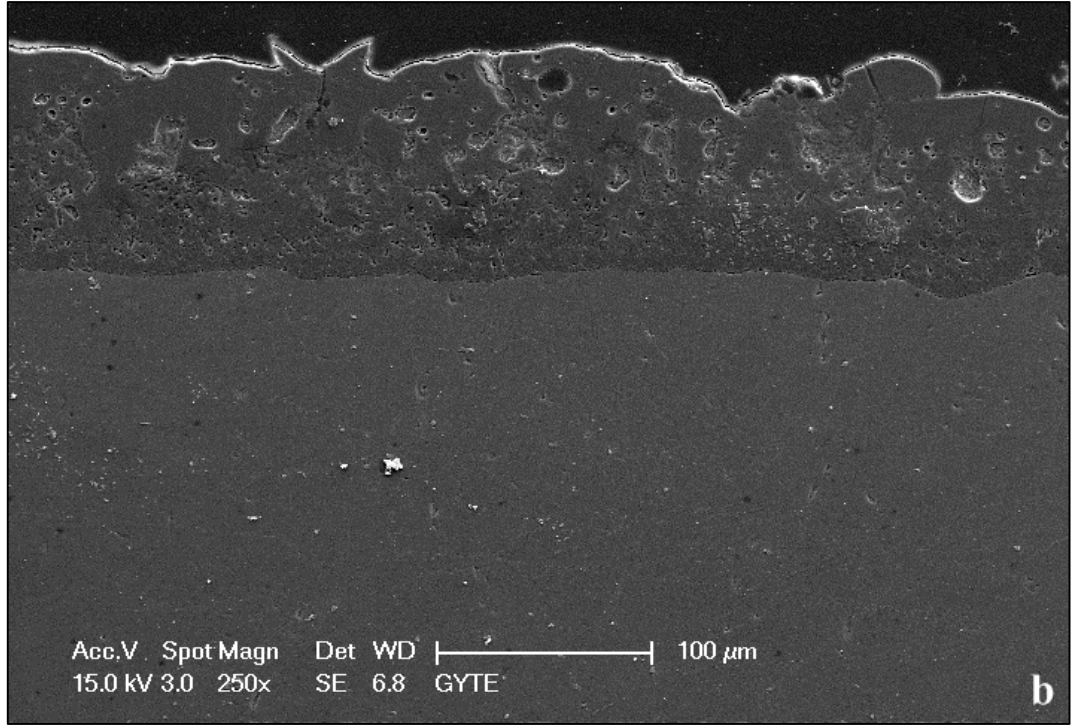
Şekil 7.14: Devam.

Şekil 7.14’de 2Li alaşımlarının farklı büyütmedeki kesit SEM fotoğrafları görülmektedir. 2Li alaşımlarının kaplama kalınlığı 118,68 μ m’dir. Şekil 7.14 (c) ve (d)’de α -alümina açıkça görülmektedir fakat 1Li alaşımlarına göre daha az α -alümina görülmektedir. (c)’de deşarj kanalları daire içine alınmış ve deşarj kanalları çıkışında

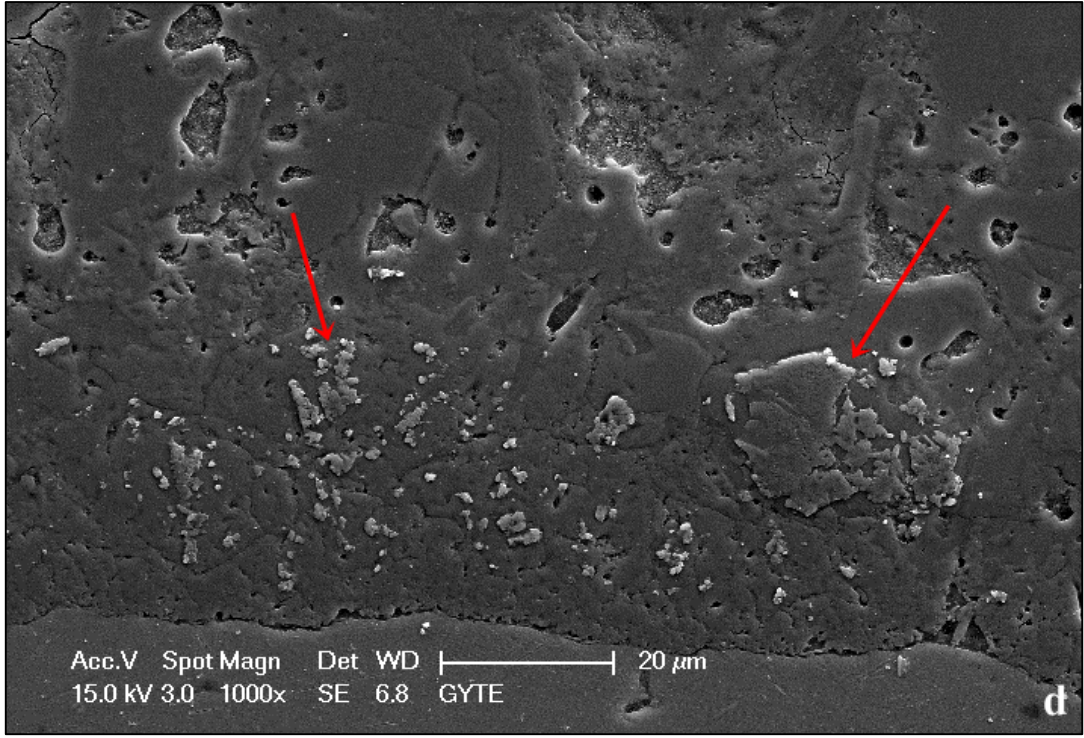
oluşan kraterimsi yapılar gösterilmiştir. Ayrıca bariyer tabakası 1Li alaşımındaki gibi belirgin şekilde görülmemektedir. Dış tabakanın gözenekli yapıya sahip olduğu ve iç tabakada ise daha küçük gözenekler olduğu görülmektedir. 1Li alaşımına göre kaplama yüzeyinin daha az pürüzlü olduğu fakat yer yer kaplama kalınlığının azaldığı görülmektedir.



Şekil 7.15: MAO ile 120 dk boyunca kaplanan 4Li alaşımının farklı büyütmelerdeki kesit SEM fotoğrafları a) 125X b) 250X c) 500X d) 1000X.

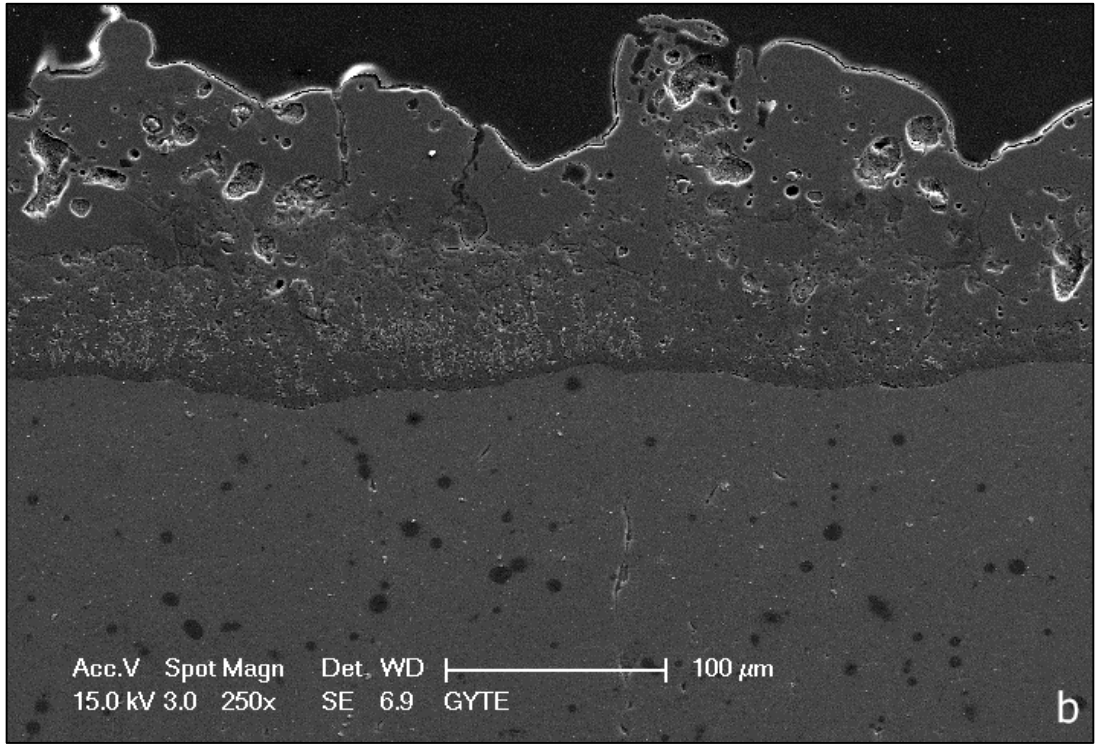
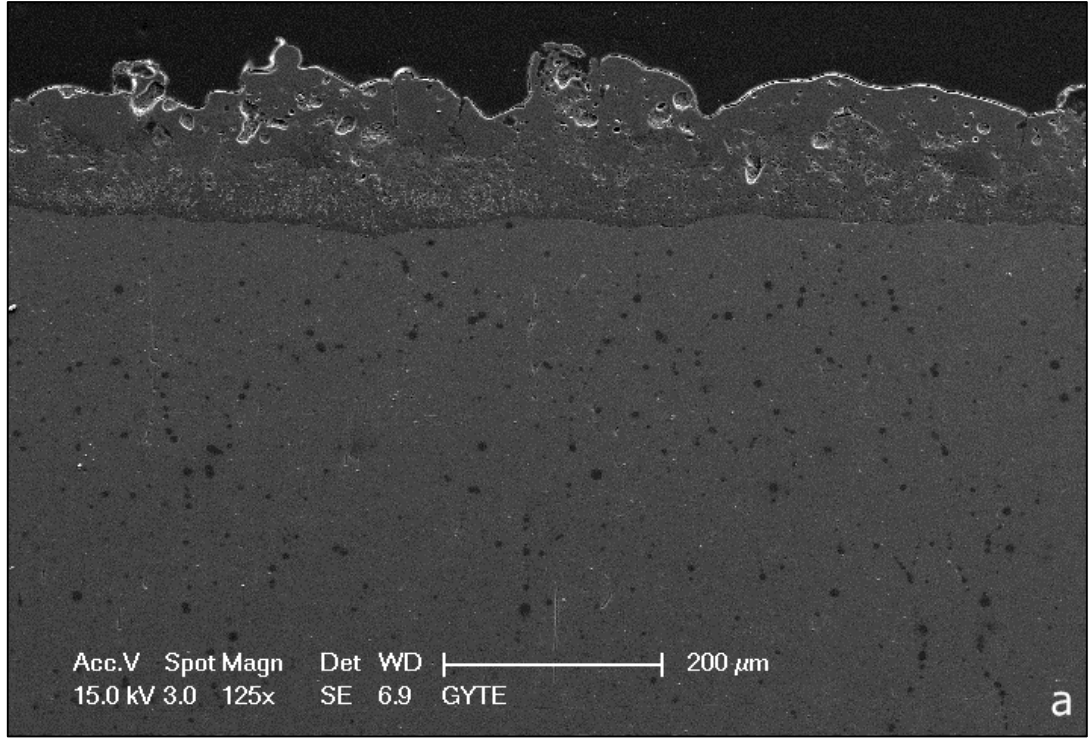


Şekil 7.15: Devam.

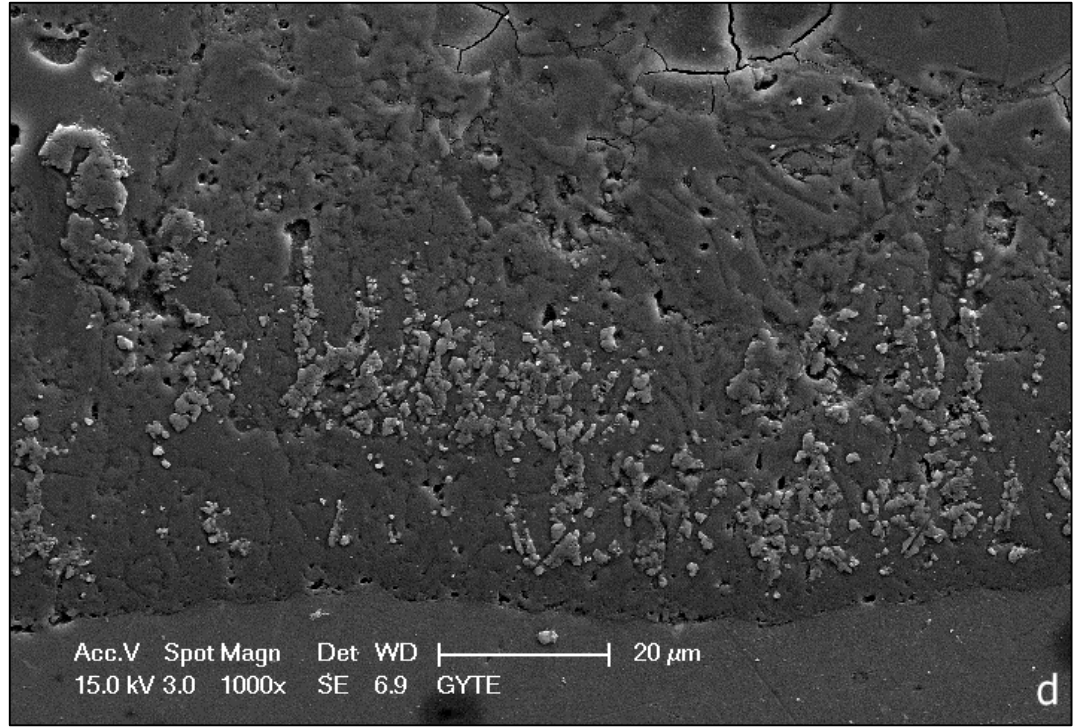
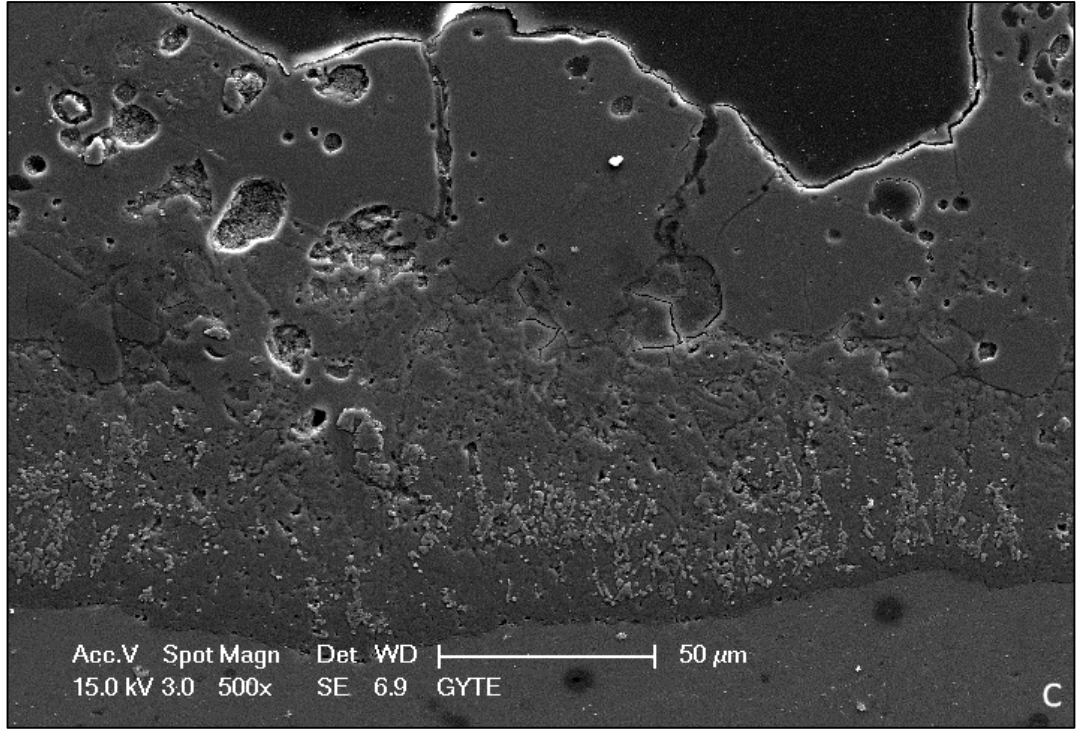


Şekil 7.15: Devam.

Şekil 7.15’de 4Li alaşımasının kesit SEM fotoğrafları görülmektedir. 1Li ve 2Li alaşımlarında olduğu gibi α - alümina görülmektedir. Bu kaplamada görülen α - alüminanın nispeten daha az olduğu görülmektedir. Kaplama kalınlığının 114,30 μm ’dir. Ayrıca kaplama yüzeyinin 2Li alaşımına göre daha pürüzlü olduğu görülmektedir. Dış tabakada çatlaklar ve büyük gözenekler, iç tabakada ise küçük gözenekler görülmektedir, fakat gözenekler 1Li ve 2Li alaşımlarına göre nispeten daha küçük ve daha az sayıdadır.



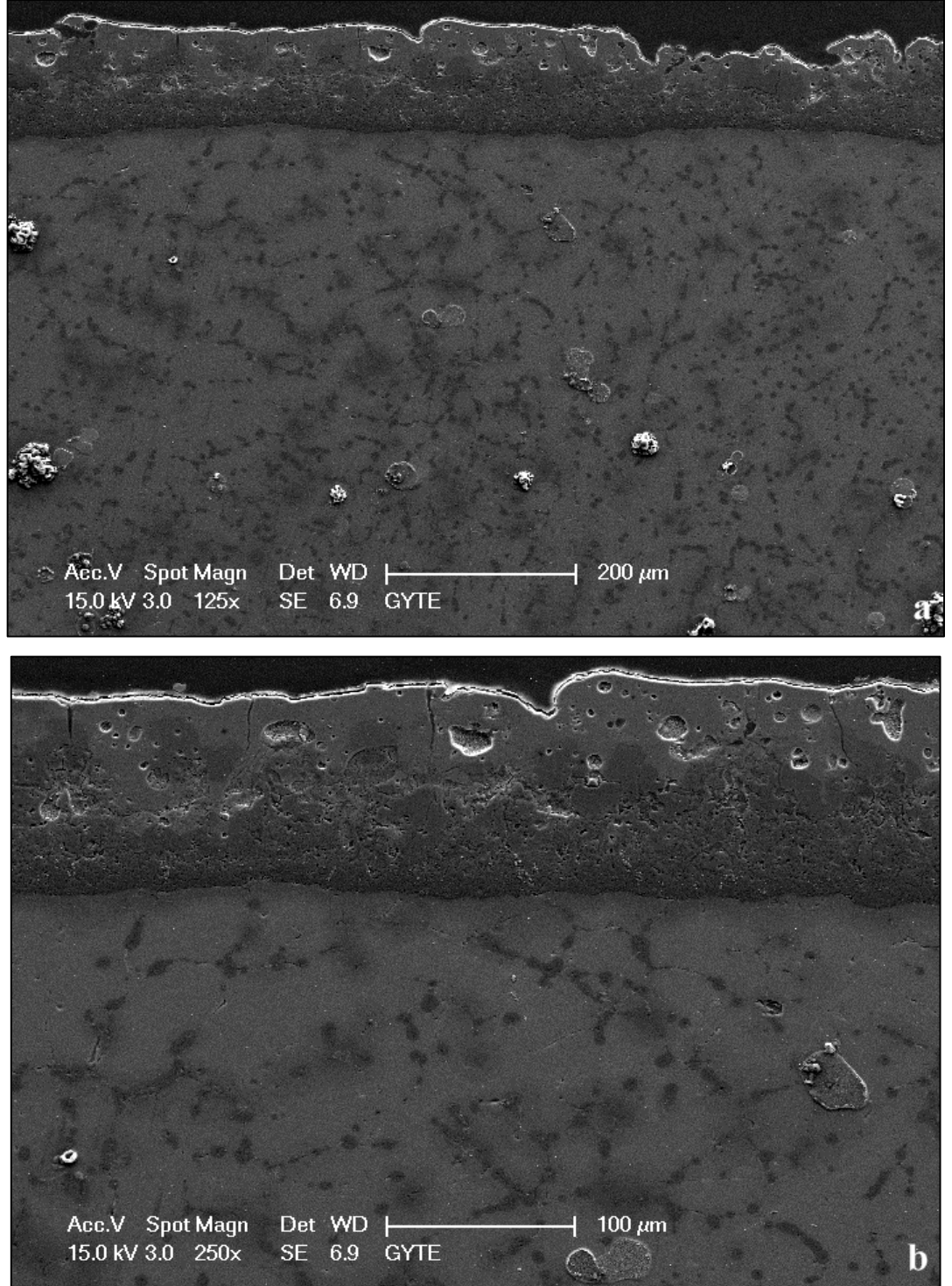
Şekil 7.16: MAO ile 120 dk boyunca kaplanan 8Li alaşımının farklı büyütmelelerdeki kesit SEM fotoğrafları a) 125X b) 250X c) 500X d) 1000X.



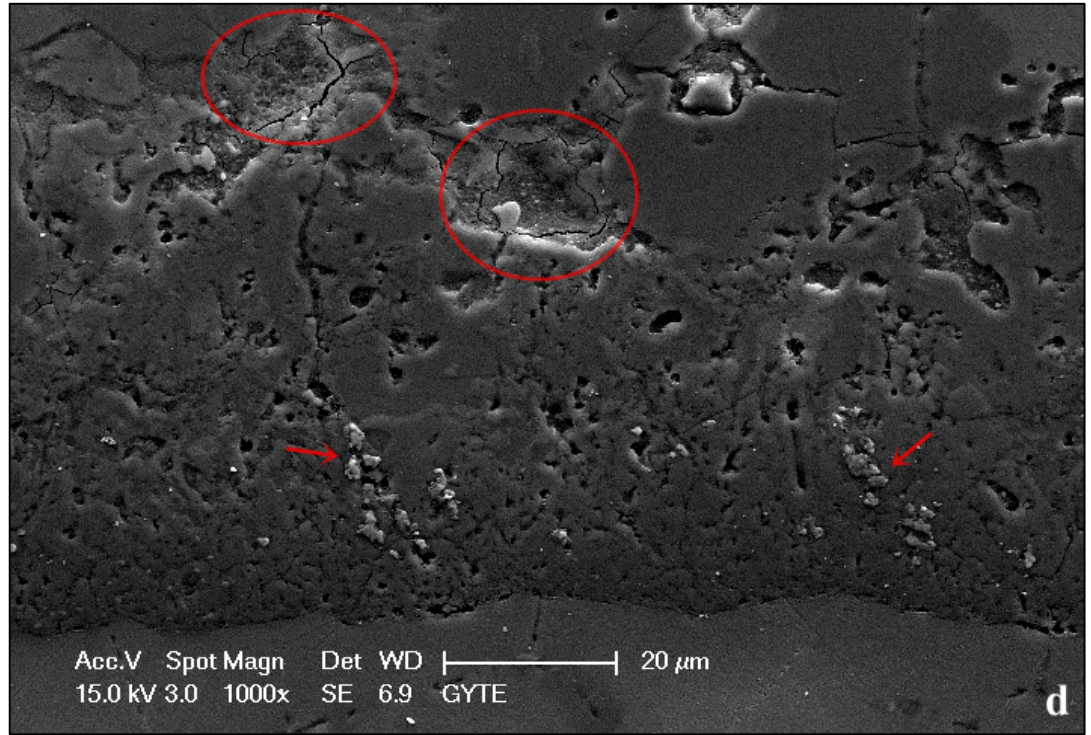
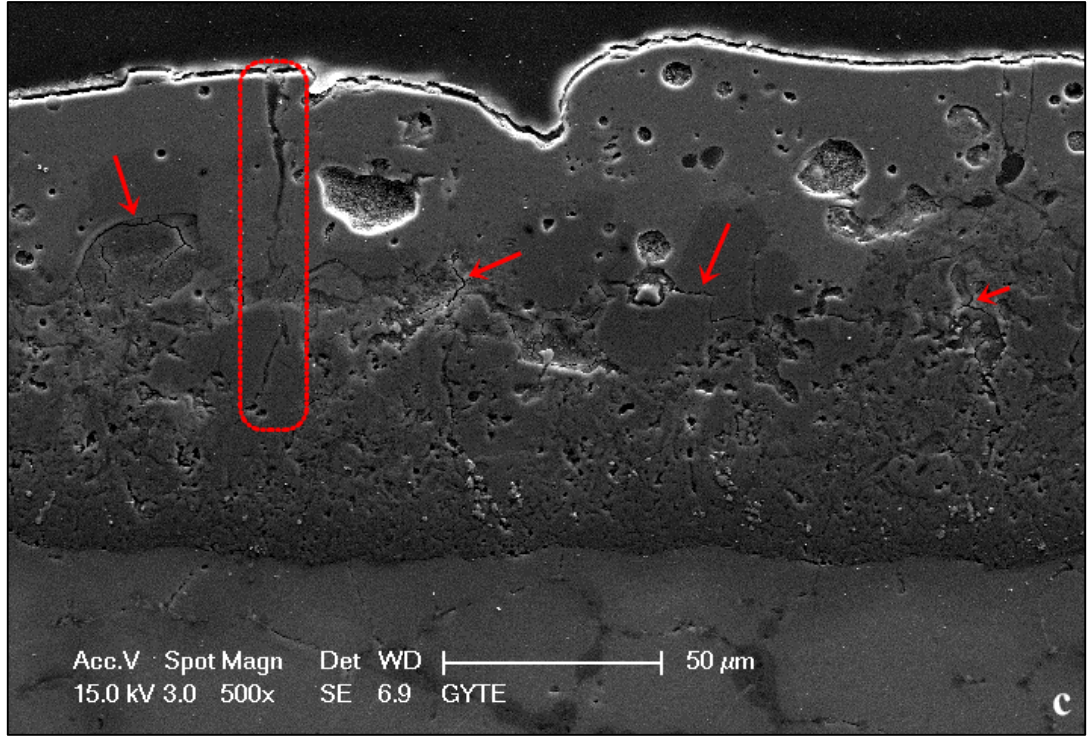
Şekil 7.16: Devam.

Şekil 7.16’da 8Li alaşımlının kesit SEM fotoğrafları gösterilmiştir. Kaplama kalınlığı 135,56 μ m’dir. 4Li alaşımına benzer şekilde kaplama görülmektedir, 4Li alaşımından farklı olarak deşarj kanalları daha fazla ve belirgin şekilde görülmektedir. Dış tabakadaki gözenekler 8Li alaşımında daha büyük ve yer yer çatlaklar görülmektedir. Çatlaklar iç tabakada da görülmektedir. Kaplamanın oldukça girinti-

ıkıntılı olduğu ve kaplama kalınlılığının homojen olmadığı görülmüştür. Kaplamada iç tabakada görülen α -alümina daha yoğun olarak görülmektedir.



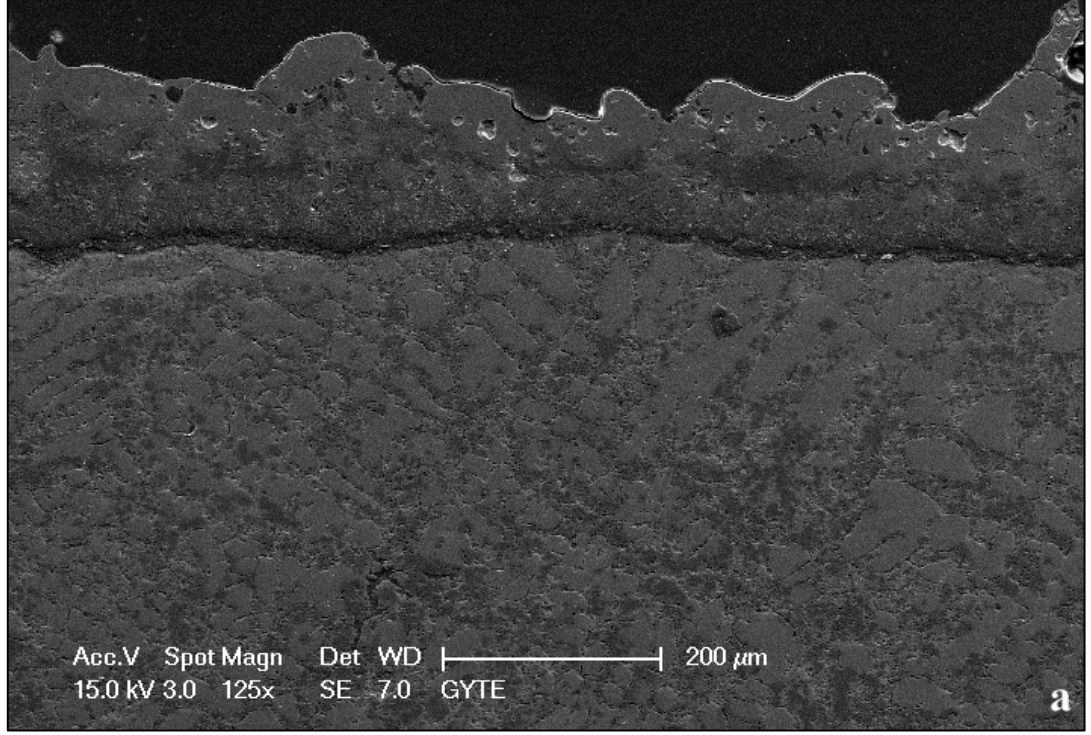
şekil 7.17: MAO ile 120 dk boyunca kaplanan 10Li alaşımının farklı büyütmelerdeki kesit SEM fotoğrafları a) 125X b) 250X c) 500X d) 1000X.



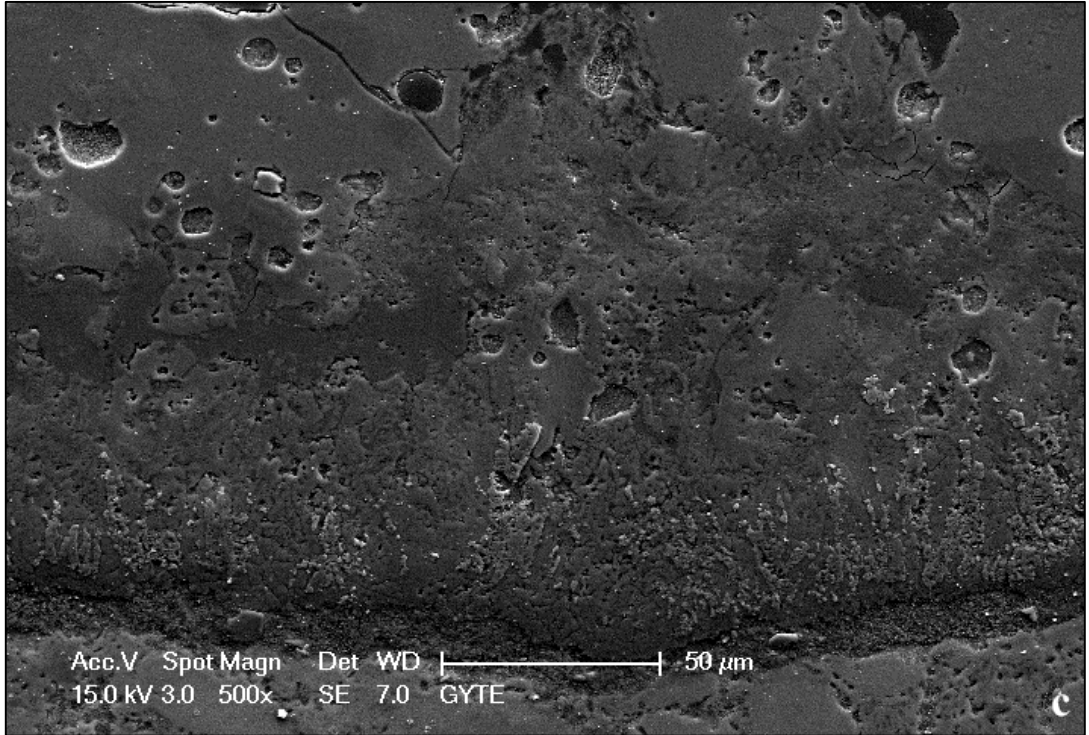
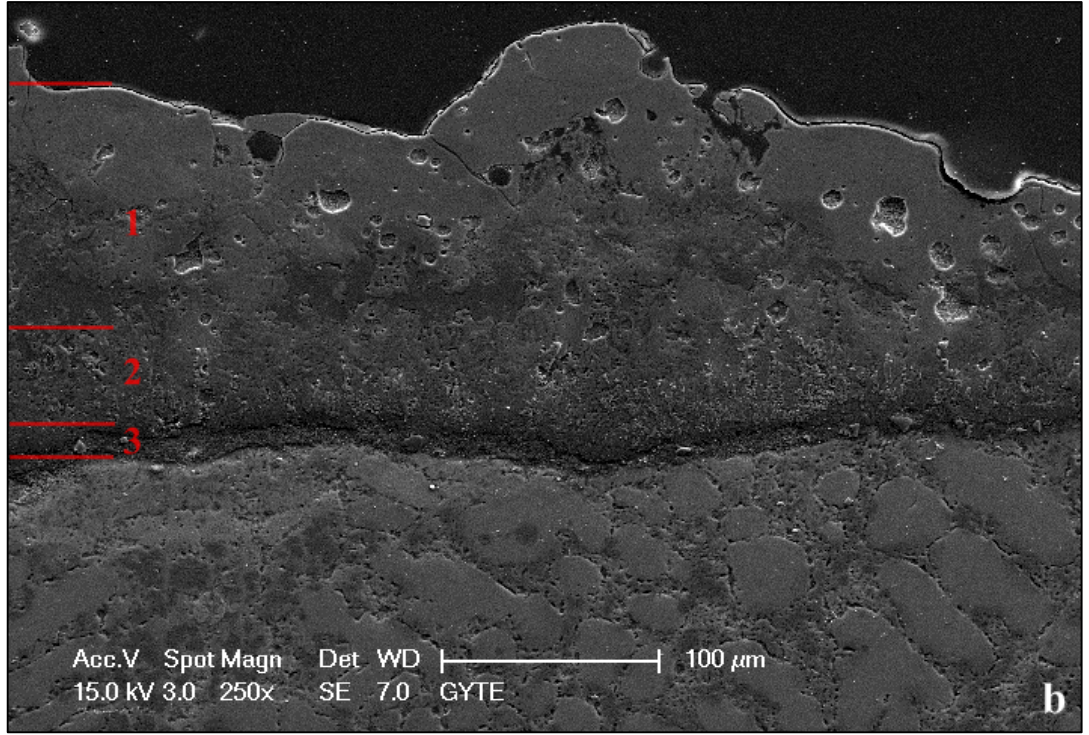
Şekil 7.17: Devam.

Şekil 7.17’de 10Li alaşımının kesit SEM fotoğrafları gösterilmiştir. Kaplama kalınlığı 184,66 μm ’dir. Kaplamanın yer yer girintili çıkıntılı olduğu görülmüştür. Kaplamada dış tabaka boyunca çatlaklar ve yuvarlağa yakın büyük gözenekler görülmektedir ve 8Li alaşımına göre nispeten daha yoğun kaplama yapısına sahiptir.

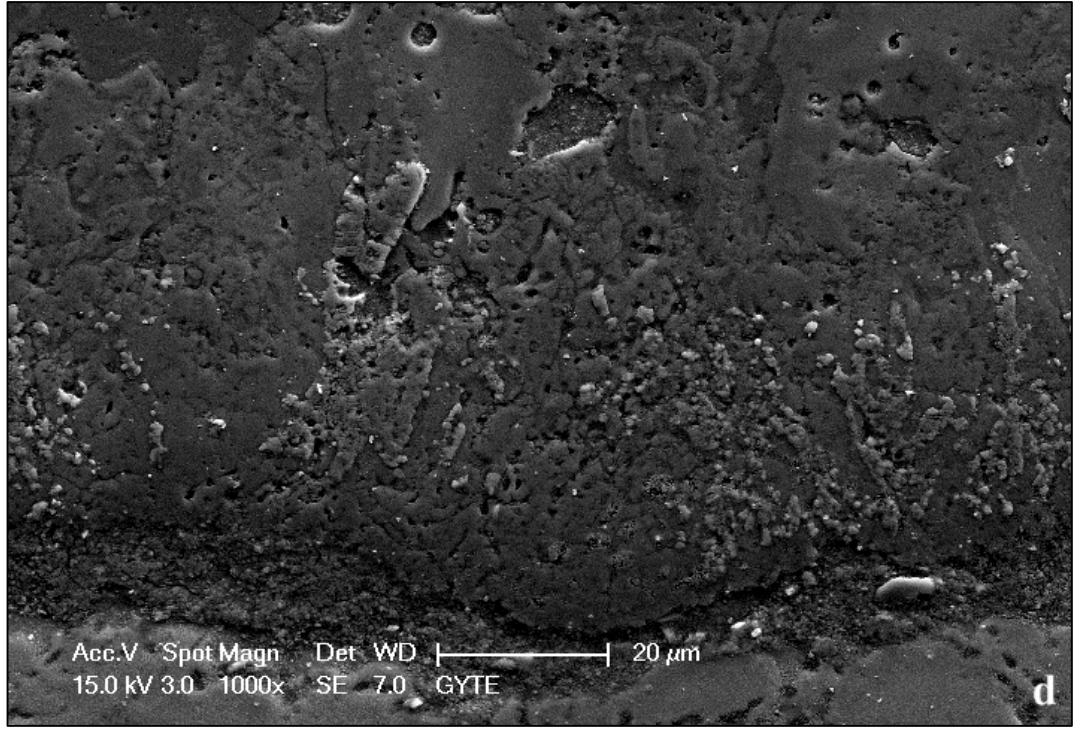
İç tabakada da mikroçatlaklar görülmektedir ve çok sayıda küçük çatlaklar görülmektedir. Şekil 7.17 (c)'de yatay ve dikey şekilde çatlak görülmektedir. Şekil 7.17 (d)'de ise yatay çatlağın oldukça uzun olduğu ve bölgesel çatlaklarla birleşmiş olduğu görülmektedir. Altlığın hemen üzerinde çok az belirgin olan bariyer tabakası renk değişimi şeklinde görülmektedir.



Şekil 7.18: MAO ile 120 dk boyunca kaplanan 14Li alaşımının farklı büyütmelerdeki kesit SEM fotoğrafları a) 125X b) 250X c) 500X d) 1000X..



Şekil 7.18: Devam.

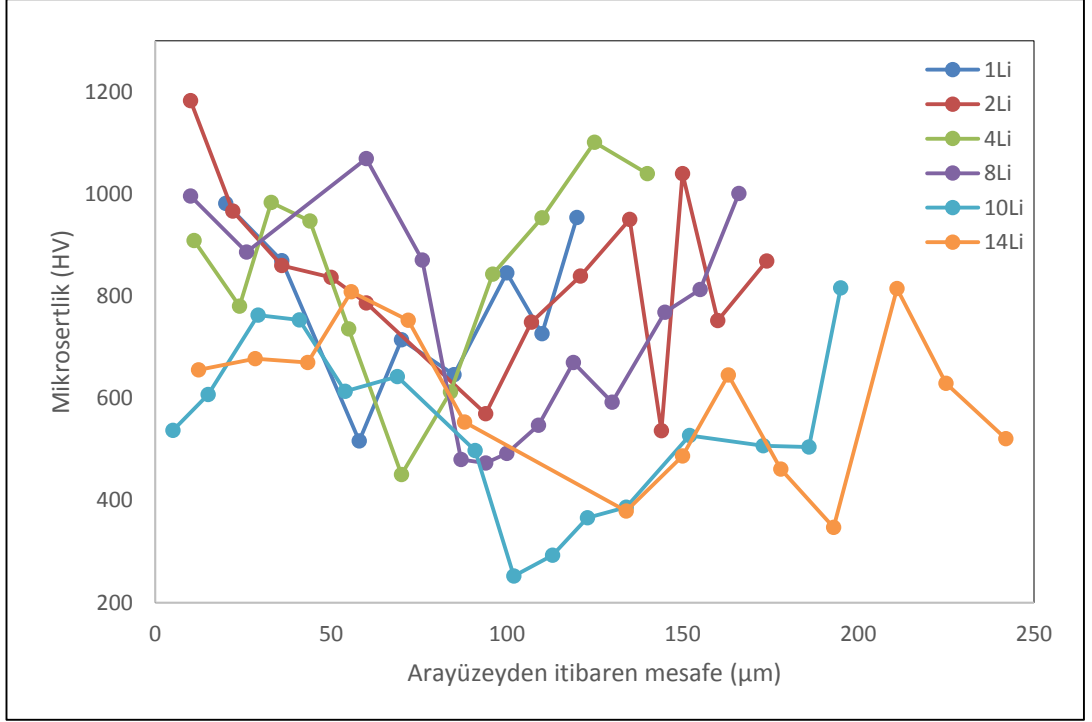


Şekil 7.18: Devam.

Şekil 7.18’de 14Li alaşımasının kesit SEM fotoğrafları görülmektedir. Kaplama kalınlığı 207,46 μm ’dir. Kaplamanın 10Li alaşımına göre daha girintili çıkıntılı olduğu ve kaplama kalınlığının homojen olmadığı görülmüştür. Dış tabaka ve iç tabakada çatlaklar daha belirgin şekilde görülmektedir. Kaplamanın iç tabakasında 10Li alaşımana göre daha fazla α -alümina görülmektedir. Altlık ve iç tabaka arasında bulunan bariyer tabakası oldukça belirgindir ve koyu renktedir.

7.8. Kaplama Sertliği

MAO kaplı farklı Li miktarı içeren numunelerin, Li miktarının kaplamanın arayüzeyden itibaren mesafeye bağlı olarak alınan mikrosertlik değerleri Şekil 7.19’da verildi. Kaplamaların genelinde arayüzeyden itibaren kaplamaların orta kısımlarında sertlikte düşüş ve dış tabakaya doğru sertlikte artış görüldü. Kaplamaların arayüzeye yakın kısımlarında sertlik genelde yüksek iken, 4Li, 8Li ve 10Li alaşımlarının kaplamalarında dış tabakadaki sertlik arayüzeye yakın kısımdan daha fazla olduğu görüldü.



Şekil 7.19: Al-Li alaşımlarının MAO kaplamalarına ait mesafeye bağlı mikrosertlik değerleri.

Kaplama sertliğinde artan Li miktarına göre değişimine bakınca maksimum sertlik değeri 2Li’da görülmüştür. Bununla birlikte 4Li, 8Li alaşımlarının kaplamalarında da yakın değerler görüldü. Fakat 10Li ve 14Li alaşımlarının kaplamalarında ise sertlik değerlerinde düşüş görüldü.

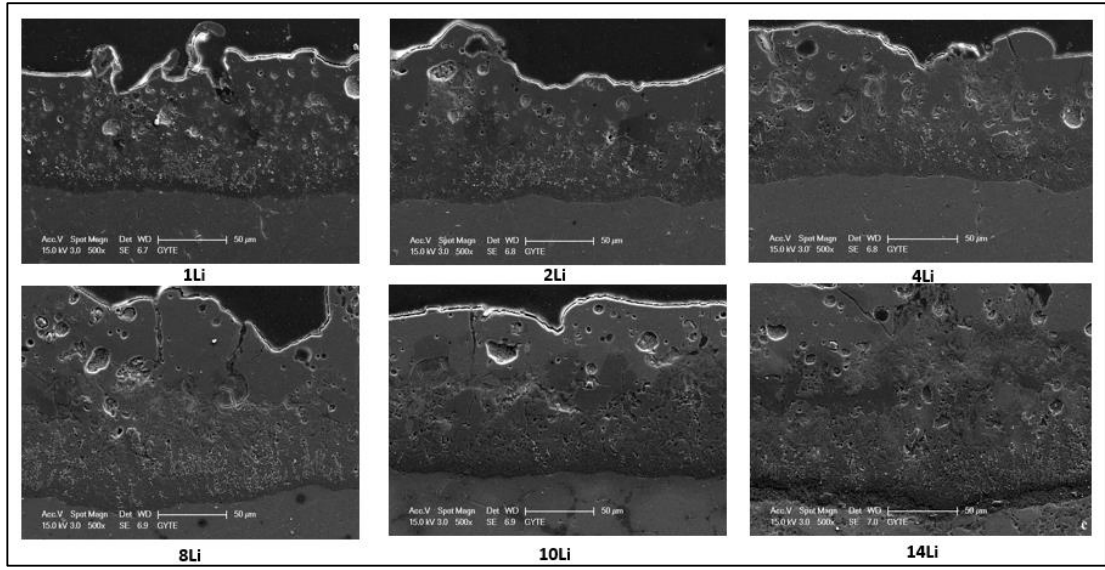
8. TARTIŞMA

Bu çalışmada alüminyum alaşımlarında kullanılan MAO kaplama davranışına lityumun etkisini ortaya çıkarmak için, atomik olarak %1, %2, %4, %8, %10 ve %14 Li içeren alaşımlar MAO kaplaması yapılarak incelenmiştir.

Al-Li alaşımlarında artan Li miktarı ile yüzey pürüzlülüğü artmıştır (Şekil 7.6). Daha önce yapılan çalışmalarda kaplama pürüzlülüğünün, kaplama kalınlığı ile doğru orantılı olduğu bildirilmiştir [130]. Eddy akımları ile yapılan ölçümlerde, kaplama kalınlığının 10Li alaşımına kadar arttığı ve 14Li alaşımında azaldığı görülmüştür. SEM ile yapılan ölçümde ise artan Li miktarı ile kaplama kalınlığında artış devam etmiş fakat 10Li alaşımında sonra 14Li alaşımında artış kısmen azalmıştır (Şekil 5.5). Eddy akımları yönteminde, pürüzlü yüzeyden sonra en sivri nokta ile en alttaki tabaka arasındaki farkı verdiği için, Eddy akımlarıyla yapılan ölçümler daha az hassastır. SEM ile yapılan ölçüm yüzey pürüzlülüğü ile doğru orantılı olduğu görülmektedir. Reaktif bir metal olan lityum, oksijene karşı aktivitesi yüksektir. Li miktarının artması ile birlikte kaplama kalınlığındaki artışın, lityumunlu alaşımın hızlı oksitlenmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Krishna ve arkadaşlarını yaptığı çalışmada da Li içerikli 8090 alaşımının sonuçlarında, diğer alaşımlara göre birikiminin hızının ($\sim 2.3 \mu\text{m/dk}$) daha yüksek olduğu görülmüştür [125].

Şekil 5.3'de 8Li alaşımına ait XRD grafiğinde kademeli olarak 4 kazımanın grafiği görülmektedir. Yüzeye yakın olan 1. ve 2. kazımalarda XRD'sinde amorf yapılar görülmektedir. Bariyer tabaka ve altlığa yaklaştıkça amorf yapı gözlenmemiştir. Şekil 5.3, yüzeyden altlığa yaklaştıkça $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ pik şiddeti artarken, $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ pik şiddeti azalmaktadır. Y.Gençer ve A.E. Güleç'in yaptığı çalışmada sentetik ikili Al-Zn alaşımlarında çinkonun mikroark oksidasyon davranışına etkisi araştırılmış ve α -alümina yapısı gösterilmiş ve XRD ile de doğrulanmıştır. Bu çalışmada kaplamadan altlığa doğru α -alümina pik şiddetlerinin arttığı görülmüştür [115]. α -alümina düşük soğuma hızında ve γ - alümina ise yüksek soğuma hızında oluşur [92], bu durumda kaplamanın iç tabakasında α -alümina, dış tabakasında γ -alümina daha fazla oranda oluşmaktadır. Bu çalışmada da benzer sonuçlar bulunmuştur. Kesit SEM görüntülerinde (Şekil 5.13-c) görülen öbek halinde bulunan yapıların α -alümina olduğu belirlenmiştir. Şekil 8.1'de 1-14Li alaşımlarının kesit SEM görüntüleri görülmektedir. Literatürde kaplama kalınlığı arttıkça ısı bariyer oluştuğu

ve α -alümina miktarının arttığı belirtilmiştir, 1-14Li kesit SEM görüntülerinde kaplama kalınlığı arttıkça α -alümina miktarında literatüre uymadığı görülmektedir. M. Tarakçı, Y. Genç ve ekibi tarafından Al-Mg, Al-Zn ve Al-Ti ikili alaşımları üzerinde yapılan çalışmalarda alaşım elementi miktarının artmasına bağlı olarak kaplama kalınlığı artmış fakat α -Al₂O₃ fazı oluşumunun azaldığı rapor edilmiştir. Bu sonuçlar, çalışmamızı desteklemektedir [111], [115], [129]. Bunun yanı sıra 14Li alaşımının bariyer tabakası kalınlığının yaklaşık 10-15 μ m olduğu görülmektedir. Bariyer tabakası literatürde korozyon ve aşınmaya karşı direnç sağlamaktadır [101], [113].



Şekil 8.1: 1-14Li Alaşımlarının Kesit SEM görüntüleri.

Şekil 7.2 ve Şekil 7.4'deki XRD sonuçlarına bakıldığında da α -alümina fazının pik şiddeti Li miktarına göre değişiklik gösterdiği görülmektedir. Alüminyum alaşımlarında yapılan MAO kaplama çalışmalarından farklı olarak altlığa bağlı olarak şu fazlar müllit, κ -Al₂O₃, Li₉AlSiO₈ ve Li₉AlSiO₈ görülmüştür. Al pikleri altlığa yakın kısımda görülmektedir. Tespit edilen piklerin altlıktan geldiği düşünülmektedir. κ -Al₂O₃ fazı ise kaplamanın yüzeyine yakın kısımda tespit edilmiştir ve altlığa gidildikçe pikin şiddetinde azalma tespit edilmiştir.

MAO sırasında deşarj kanallarından yüzeye çıkan altlık malzeme ve elektrolitten gelen bileşenler, SEM görüntülerinde gözenekler, deşarj kanalları, kraterimsi, süngerimsi ve yüzeye sıvanmış gibi duran yapılar ve çatlaklar görülmektedir. Çatlakların solüsyonla karşılaşp ani soğuma sonrası olduğu düşünülmektedir. Li miktarının artışı ile birlikte kaplama yüzeyinde oluşan gözenekler azalmış, yerine

süngerimsi ve camsı görünümlü (amorf) yapıların arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca kaplama yüzeyinde görülen kraterimsi, süngerimsi yapıların ve camsı, pürüzsüz tabaka gibi gözüken amorf yapıların üzerinde kırılarak döküldüğü görülmüştür. Lityumun oksidasyon potansiyeli alüminyumdan fazla olduğu için kaplama yüzeyinde Li miktarı arttıkça daha fazla amorf yapının oluşmasına ve oksitlenmesi ile süngerimsi yapıların oluşmasına neden olduğu düşünülmektedir. Ayrıca Li, özellikle su ile reaksiyona girer ve LiOH oluşturur [134]. Kaplama sırasında suyla karşılaşması sonucu suyla hızlıca reaksiyona girer, hidroksit ve hidrojen gazı oluşturur [135], bu da yüzeyde süngerimsi yapıların oluşmasına neden olduğu düşünülmektedir. Amorf yapıların ise alümina silikat camlarda olduğu gibi kaplama işlemi sırasında solüsyonda bulunan Si, altlıktan gelen Li ve Al bileşenleri ile amorf yapı oluşturduğu düşünülmektedir.

MAO kaplı farklı Li miktarı içeren numunelerin, Li miktarının kaplamanın arayüzeyden itibaren mesafeye bağlı olarak alınan mikrosertlik değerleri Şekil 5.20’de verildi. Kaplamaların genelinde arayüzeyden itibaren kaplamaların orta kısımlarında sertlikte düşüş ve dış tabakaya doğru sertlikte artış görüldü. Kaplamaların arayüzeye yakın kısımlarında sertlik genelde yüksek iken, 4Li, 8Li ve 10Li alaşımlarının kaplamalarında dış tabakadaki sertlik arayüzeye yakın kısımdan daha fazla olduğu görüldü. M. Tarakçı’nın yaptığı çalışmada α -alüminanın bulunduğu bölgelerde sertliğin arttığı görülmüştür [111]. Lityum içeriklerine göre mikrosertliklerde en yüksek değer 2Li alaşımında arayüzeye yakın yerde görülmüştür ve 1182,81 HV’dır. 2Li alaşımından sonra en yüksek mikrosertlik değerleri 8Li alaşımında (996,22 HV) görülmüştür. 2Li ve 8Li haricinde Li miktarı artışı ile mikrosertlikte azalma görülmüştür. Krishna ve arkadaşları aynı 10 farklı ticari alaşımı ile yaptığı çalışmada MAO kaplama işlemi uygulanmış alaşımlar arasında 8090 (%2.5 Li, %1.2 Cu, %0.7 Mg, %95.6 Al) (at. %9 Li) alaşımının mikrosertlik değerleri ~1400 - 1800 HV arasında ölçülmüştür [125]. 8090 alaşımına en yakın olan 10Li alaşımı ile 8090 alaşımının sertlik değerleri karşılaştırdığında, 10Li alaşımında en yüksek değer 816,36 HV iken 8090 alaşımında 1400 - 1800 HV arasında değişmektedir.

Cu ve Mg’un da etkisi görüldüğü ve farklı elektrolit kullanımından ötürü sertlik değerlerinin değiştiği düşünülmektedir. Bir başka çalışmada kütlece %2 Li (at. %7,35) içeren alüminyum alaşımında sertlik 1340 MPa (~136,6 HV) ölçülmüştür [24]. Atomik olarak %Li değeri en yakın olan 8Li alaşımındaki kaplama sertliğinin değeri 473,52-1069,29 HV aralığındadır.

KAYNAKLAR

- [1] Tohumcu S., (2005), "Plazma Elektrolitik Oksidasyon Yöntemiyle Alüminyum Alaşımlarının Kaplanması", Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [2] Ghali, E., (2010), "Corrosion resistance of aluminum and magnesium alloys: understanding, performance, and testing" 1. Baskı, John Wiley & Sons.
- [3] Revie R.W., (2000), "Uhlig's Corrosion Handbook", 2. Baskı, Journal of Applied Electrochemistry, 30(10):1189-1189.
- [4] Smith W.F., (2009), "Malzeme Bilimi ve Mühendisliği", 3. Baskı, Literatür Yayınları.
- [5] Joseph R.D., "Alloying: Understanding the Basics", (2001), 1. Baskı, ASM International.
- [6] Kissell J.R., Ferry R.L., (2002)," Aluminum Structures: A Guide to Their Specifications and Design, 2. Baskı, John Wiley & Sons.
- [7] Web 1, (2012), <https://archive.li/aluminium.matter.org.uk>, (Erişim tarihi: 21/09/2012).
- [8] Askeland D.R., (1996), "The Science and Engineering of Materials", 3. Baskı, . Chapman & Hall.
- [9] ASM international Handbook committee, (1992), "Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials" 10. Baskı, ASM International.
- [10] Cramer S.D., Covino B.S., (2005), "Corrosion: Materials", ASM International, 13B, ISBN: 978-0-87170-707-9.
- [11] Abelkis P.R., Hudson C.M., (1982), "Design of Fatigue and Fracture Resistant Structures", ASTM international, ISBN-EB: 978-0-8031-4826-0.
- [12] Sankaran K., Grant, N., (1980), "The structure and properties of splat-quenched aluminum alloy 2024 containing lithium additions", Materials Science and Engineering, 44(2), 213-227.
- [13] Cantor B., Assender, H., P. Grant, (2015), "Aerospace Materials", 1. Baskı, CRC Press.
- [14] Rioja R.J., (1998), "Fabrication methods to manufacture isotropic Al-Li alloys and products for space and aerospace applications", Materials Science and Engineering: A, 257(1),100-107.

- [15] Polmear I.J., (2006), "Light Alloys: From Traditional Alloys to Nanocrystals" 4. Baskı, The Aeronautical Journal.
- [16] Chandler H., (1996), "Heat treater's guide: practices and procedures for nonferrous alloys", 1. Baskı, ASM international.
- [17] Gupta R.K., Nayanb N., Nagasireeshab G., Sharmab S.C., "Development and characterization of Al–Li alloys" Volume 420, Issues 1–2, 25 March 2006, Pages 228-234.
- [18] Kumar K., Heubaum F., (1997), "The effect of Li content on the natural aging response of Al-Cu-Li-Mg-Ag-Zr alloys", Acta materialia, 45(6), 2317-2327.
- [19] Davis J.R., (1993), "ASM Specialty Handbook : Aluminum and Aluminum Alloys", 1. Baskı, Davis & Associates.
- [20] Lavernia E., Srivatsan T.S., Mohamed F., (1990), "Strength, deformation, fracture behaviour and ductility of aluminium-lithium alloys", Journal of Materials Science, 25(2), 1137-1158.
- [21] Web 2, (2012), <http://www.cnnturk.com/2012/ekonomi/genel/09/21/ham.petrol.fiyatlari.toparlaniyor/677429.0/index.html>, (Erişim tarihi: 21/09/2012).
- [22] ASM International Handbook committee, (1992), "ASM International Metals Handbook volume 3: Alloy Phase Diagrams", 1. Baskı, ASM International, ISBN: 0-87170-381-5 (v.3).
- [23] John E.H., (1984), "Aluminum: properties and physical metallurgy", Aluminum Association, 1. Baskı, ASM international.
- [24] Vitiaz P.A., et al., (1997), "Fundamental formation laws of phase composition, structure and properties of aluminium materials" manufactured by mechanical alloying. Advanced Performance Materials, 4(3), 325-336.
- [25] Silcock J.M., (1960), "Structural ageing characteristics of aluminium-copper-lithium alloys", J. Inst. Metals., 88(8), 357-364.
- [26] Csontos A.A, Gable B.M., Gaber A, Starke E.A.Jr., (2000), "The effect of quench rate on the microstructure and properties of AF/C-458 and AF/C-489 Al-Li-Cu-X alloys", Materials science forum, 331, 1333-1340.
- [27] Chabala J.M., Levi-Setti R., Soni K.K., Williams D.B., Newbury D.E., (1991), "Secondary ion imaging of the distribution of δ' (Al₃Li) in Al-Li alloys". Applied surface science, 51(3-4), 185-192.
- [28] Noble B., Thompson G., (1971), "Precipitation characteristics of aluminium-lithium alloys", Metal Science Journal, 5(1), 114-120.
- [29] Williams D., Edington, J., (1975), "The precipitation of δ' (Al₃Li) in dilute aluminium–lithium alloys", Metal Science, 9(1), 529-532.

- [30] Williams A., (2010), "Microstructural analysis of aluminium alloy 2096 as a function of heat treatment", School of Metallurgy and Materials, University of Birmingham.
- [31] Starke E.A., (1970), "The causes and effects of “denuded” or “precipitate-free” zones at grain boundaries in aluminum-base alloys". JOM, 22(1), 54-63.
- [32] Noble B., Trowsdale A., (1995), "Evidence for pre δ' precipitation events in an Al-Li alloy". Scripta metallurgica et materialia, 33(1), 33-38.
- [33] Ohmori Y., Ito S., Nakai K., (1999), "Aging behavior of an Al- Li- Cu- Mg- Zr alloy", Metallurgical and Materials Transactions A, 30(13), 741-749.
- [34] Gu, B., Liedl G.L., Kulwicki J.H., Sanders Jr, T.H., (1985). "Coarsening of δ' (Al₃Li) precipitates in an Al-2.8 Li0. 3Mn alloy." Materials Science and Engineering, 70, 217-228.
- [35] Baumann S., Williams D.B., (1985), “Experimental observations on the nucleation and growth of δ' (Al₃Li) in dilute Al-Li alloys”, Metallurgical Transactions A, 16(7), 1203-1211.
- [36] Williams D.B., Edington J., (1976), "The discontinuous precipitation reaction in dilute Al-Li alloys". Acta Metallurgica, 24(4), 323-332.
- [37] Noble B., Harris S., Dinsdale, K., (1982), "Yield characteristics of aluminium–lithium alloys". Metal science, 16(9), 425-430.
- [38] Smith A., (1989), "Structure and properties of Al–Li–Cu–Mg–Zr alloy AA 2091 in sheet form". Materials science and technology, 5(6), 533-541.
- [39] Sanders Jr, T., Starke E.A. Jr, (1982), "The effect of slip distribution on the monotonic and cyclic ductility of Al-Li binary alloys", Acta Metallurgica, 30(5), 927-939.
- [40] Ahmad M., (1990), “Effects of environment and microstructure on stress corrosion crack propagation in an Al-Li-Cu-Mg alloy”. Materials Science and Engineering: A, 125(1), 1-14.
- [41] Vasudevan A.K, Ludwiczak E.A., Baumann S.F., Doherty R.D., Kersker M.M., (1985), “Fracture behavior in Al-Li alloys: role of grain boundary δ' ”, Materials Science and Engineering, 72(2), 25-30.
- [42] Suresh S., Vasudevan A.K., Tosten M., Howell P.R., (1987), “Microscopic and macroscopic aspects of fracture in lithium-containing aluminum alloys”, Acta Metallurgica, 35(1), 25-46.
- [43] Chakrabarti D.J, Weiland H., Cheney B.A., Staley J.T., (1996), “Through thickness property variations in 7050 plate”, in Materials Science Forum, 217-222, 1085-1090.

- [44] Staley J.T., (1992), SINTEF Metall. 3, 107-145.
- [45] Li J.-F., Chen W.-J., Zhao X.-S., Ren W.-D., Zheng Z.-Q., (2006), "Corrosion behavior of 2195 and 1420 Al-Li alloys in neutral 3.5% NaCl solution under tensile stress", Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 16(5), 1171-1177.
- [46] Sinyavskii V., Semenov A., (2002), "Mechanism of Stress Corrosion Cracking of Al-Li Alloys", Protection of metals, 38(2), 132-140.
- [47] Braun R., (1989), "On the corrosion behaviour of 8090-T6 sheet material", Materials and Corrosion, 40(11), 661-668.
- [48] Lavernia E.J., Grant N.J., (1987) "Aluminium-lithium alloys", Journal of Materials Science, 22(5), 1521-1529.
- [49] Gregson P., Flower H., (1985), "Microstructural control of toughness in aluminium-lithium alloys", Acta metallurgica, 33(3), 527-537.
- [50] Jata K., Starke, E., (1986), "Fatigue crack growth and fracture toughness behavior of an Al-Li-Cu alloy", Metallurgical Transactions A, 17(6), 1011-1026.
- [51] Prasad N.E., Prasad K.S., Kamat S.V., Malakondaiah G., (1995), "Influence of microstructural features on the fracture resistance of aluminium-lithium alloy sheets", Engineering fracture mechanics, 51(1), 87-96.
- [52] Rao K.V., Ritchie, R., (1989), "Mechanical Properties of Al-Li Alloys", I. Fracture Toughness and Microstructure. Mater. Sci. Technol., 5(9), 882-895.
- [53] Csontos A., Starke, E., (2000), "The effect of processing and microstructure development on the slip and fracture behavior of the 2.1 wt pct Li AF/C-489 and 1.8 wt pct Li AF/C-458 Al-Li-Cu-X alloys", Metallurgical and Materials Transactions A, 31(8), 1965-1976.
- [54] Lin F., Chakraborty S., Starke, E., (1982), "Microstructure-property relationships of two Al-3Li-2Cu-0.2 Zr-XCd alloys", Metallurgical Transactions A, 13(3), 401-410.
- [55] Prasad N.E., Kamat S., Malakondaiah G., (1993), "Effect of crack deflection and branching on the R-curve behaviour of an Al-Li alloy 2090 sheet", International journal of fracture, 61(1), 55-69.
- [56] Vasudevan A., Ludwiczak E.A., Baumann S.F., Howell P.R., Doherty R.D., Kersker M.M., (1986), "Grain boundary fracture in Al-Li alloys", Materials science and technology, 2(12), 1205-1209.
- [57] Vasudevan A.K., Doherty, R., (1987), "Grain boundary ductile fracture in precipitation hardened aluminum alloys", Acta metallurgica, 35(6), 1193-1219.

- [58] Chen C., Knott J., (1981), "Effects of dispersoid particles on toughness of high-strength aluminium alloys", *Metal Science*, 15(8), 357-364.
- [59] Lewandowski J., Holroyd N., (1990), "Intergranular fracture of Al-Li alloys: Effects of aging and impurities", *Materials Science and Engineering: A*, 123(2), 219-227.
- [60] Prasad N.E., Kamat S.V., Prasad K.S., Malakondaiah G., Kutumbarao V.V., (1993), "In-plane anisotropy in the fracture toughness of an Al-Li 8090 alloy plate", *Engineering Fracture Mechanics*, 46(2), 209-223.
- [61] Wert J., Lumsden J., (1985), "Intergranular fracture in an Al-Li-Cu- Mg-Zr alloy", *Scripta Metallurgica*, 19(2), 205-209.
- [62] Webster D., (1987), "The effect of low melting point impurities on the properties of aluminum-lithium alloys", *Metallurgical Transactions A*, 18(12), 2181-2193.
- [63] Shin K., Kim S., Lee, E., (1989), "Hydrogen embrittlement of a 2090 Al-Li alloy", *Aluminium-lithium alloys Birmingham: Mater. Components Eng. Publ.*, 3, 1319-1328.
- [64] Starke E., Lin, F.-S., (1982), "The influence of grain structure on the ductility of the Al-Cu-Li-Mn-Cd alloy 2020", *Metallurgical Transactions A*, 13(12), 2259-2269.
- [65] Braun R., (1995), "Exfoliation corrosion testing of aluminium alloys", *British Corrosion Journal*, 30(3), 203-208.
- [66] Davó, B., Damborenea, J. De, (2004), "Use of rare earth salts as electrochemical corrosion inhibitors for an Al-Li-Cu (8090) alloy in 3.56% NaCl", *Electrochimica Acta*, 49(27), 4957-4965.
- [67] Dhers J., Driver J., Foundeux A., (1986), "Cyclic deformation of binary Al-Li alloys", *Aluminium-lithium alloys*, (London: Inst. Met.), 3, 233-238.
- [68] Prasad N.E., Malakondaiah G., Kutumbarao V., (1997), "On the micromechanisms responsible for bilinearity in fatigue power-law relationships in aluminium-lithium alloys", *Scripta materialia*, 37(5), 581-587.
- [69] Srivatsan T.S., Coyne E.Jr, (1986), "Cyclic stress response and deformation behaviour of precipitation-hardened aluminium-lithium alloys", *International Journal of Fatigue*, 8(4), 201-208.
- [70] Flower H., Gregson P., (1987), "Solid state phase transformations in aluminium alloys containing lithium", *Materials science and technology*, 3(2), 81-90.

- [71] Wang Y., Jiang Z., Yao, Z., (2009), "Effects of Na₂WO₄ and Na₂SiO₃ additives in electrolytes on microstructure and properties of PEO coatings on Q235 carbon steel", Journal of Alloys and Compounds, 481(1-2), 725-729.
- [72] Tanatmış A. A., (1999), "Uçak Yapılarında Gelişmiş Malzemelerin Kullanımı Bilim Günleri, Tmmob Makina Mühendisleri Odası Denizli Şubesi, Bildiriler Kitabı Yayıncı No: 221 (5-6-7 Mayıs 1999).
- [73] New Light Alloys,. in AGARD CONFERENCE PROCEEDINGS No.444. 3-5 Ekim 1988, ISBN: 92-835-0519-0.
- [74] Webster D., (1979), "Properties and microstructure of aluminum-copper-magnesium-lithium alloys". Metallurgical Transactions A, 10(12), 1913-1921.
- [75] Vasudevan A., Suresh, S., (1985), "Microstructural effects on quasi-static fracture mechanisms in Al-Li alloys: the role of crack geometry" Materials Science and Engineering, 72(1), 37-49.
- [76] Sanders T. Jr, (1979), "Factors Influencing Fracture Toughness and Other Properties of Al-Li Alloys-Final Report", Contract No: N62269-76-C-0271, Naval Air Development Center, Aluminum CO OF America Alcoa Center PA Alcoa Labs, Amerika.
- [77] Hur B.-Y., Kim K.-W., (1998), "A new method for evaluation of pitting corrosion resistance of Mg alloys". Corrosion reviews, 16(1-2), 85-94.
- [78] Roberge P.R., (1999), "Handbook of corrosion engineering".1. Baskı, McGraw-Hill.
- [79] Totten G.E., MacKenzie D.S., (2003), "Handbook of Aluminum: Volume 2: Alloy Production and Materials Manufacturing" 1st edition, CRC press.
- [80] Web 2, (2019), <https://www.3erp.com/everything-about-anodizing-aluminum/>, (Erişim tarihi: 18/07/2019).
- [81] Web 3, (2019), <http://www.istekelokal.com/k/48/uygulamalar> , (Erişim tarihi: 16/07/2019).
- [82] Sheasby P.G., Pinner R., (2001),"The surface treatment and finishing of aluminium and its alloys: Vol2 " 6th edition, ASM international.
- [83] Hancı, A., Elokals Prosesinde Elektrolitik Renklendirmede Nitrat İyonlarının Etkileri, in Kimya Mühendisliği. 2009, Selçuk Üniversitesi.
- [84] Devecili A.O., (2009), "Alaşım Elementi Olarak Bakırın Alüminyumun Mikroark Oksidasyon Tekniği ile Kaplama Davranışına Etkisi", Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü.

- [85] Sundararajan G., Krishna L.R., (2003), "Mechanisms underlying the formation of thick alumina coatings through the MAO coating technology. Surface and Coatings Technology, 167(2-3), 269-277.
- [86] Yerokhin A.L., Nie X., Leyland A., Matthews A., Dowey S.J., (1999), "Plasma electrolysis for surface engineering". Surface and coatings technology, 122(2-3), 73-93.
- [87] Cengiz S., (2021), "Saf Zirkonyumun Mikroark Oksidasyon Tekniği İle Kaplanması", Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü.
- [88] Blawert C., Dietzel W., Ghali E., Song G., (2006), "Anodizing treatments for magnesium alloys and their effect on corrosion resistance in various environments". Advanced Engineering Materials, 8(6), 511-533.
- [89] Ikonopisov, S., Theory of electrical breakdown during formation of barrier anodic films. Electrochimica Acta, 1977. 22(10): p. 1077-1082.
- [90] Montero I., Fernandez M., Albella J., (1987), "Pore formation during the breakdown process in anodic Ta₂O₅ films", Electrochimica acta, 32(1), 171-174. Curran A.J., (2005), "Thermal and Mechanical Properties of Plasma Electrolytic Oxide Coatings", Malzeme bilimi ve Metalurji bölümü, University of Cambridge
- [91] Curran A.J., (2005), "Thermal and Mechanical Properties of Plasma Electrolytic Oxide Coatings", Malzeme bilimi ve Metalurji bölümü, University of Cambridge
- [92] Xue W., Deng Z., Lai Y., Chen R., (1998), "Analysis of phase distribution for ceramic coatings formed by microarc oxidation on aluminum alloy", Journal of the American Ceramic Society, 81(5), 1365-1368.
- [93] Van T.B., Brown S.D., Wirtz G.P., (1977), "Mechanism of anodic spark deposition". Am. Ceram. Soc. Bull.:(United States), 56(6), Univ. of Illinois, Urbana, 1977-06-01.
- [94] Yerokhin A.L., Lyubimov V.V., Ashitkov R.V., (1998), "Phase formation in ceramic coatings during plasma electrolytic oxidation of aluminium alloys". Ceramics International, 24(1), 1-6.
- [95] Yerokhin A., Snizhko L.O., Gurevina N.L., Leyland A., Pilkington A., Matthews A., (2003), "Discharge characterization in plasma electrolytic oxidation of aluminium", Journal of Physics D: Applied Physics, 36(17), 2110.
- [96] Voevodin A., Yerokhin A.L., Lyubimov V.V., Donley M.S., Zabinski J.S., (1996), "Characterization of wear protective Al-Si-O coatings formed on Al-based alloys by micro-arc discharge treatment", Surface and Coatings Technology, 86, 516-521.

- [97] Yerokhin A., Voevodin A.A., Lyubimov V.V., Zabinski J., Donley, M (1998), "Plasma electrolytic fabrication of oxide ceramic surface layers for tribotechnical purposes on aluminium alloys", *Surface and Coatings Technology*, 110(3), 140-146.
- [98] Jaspard-Mécuson F., Czerwec T., Henrion G., Belmonte T., Dujardin L., Viola A., Beauvir J., (2007), "Tailored aluminium oxide layers by bipolar current adjustment in the Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) process", *Surface and Coatings Technology*, 201(21), 8677-8682.
- [99] Sonova A., Terleeva O., (2008), "Morphology, structure, and phase composition of microplasma coatings formed on Al-Cu-Mg alloy", *Protection of Metals*, 44(1), 65-75.
- [100] Timoshenko A., Magurova Y.V., (2005), "Investigation of plasma electrolytic oxidation processes of magnesium alloy MA2-1 under pulse polarisation modes". *Surface and Coatings Technology*, 199(2-3), 135-140.
- [101] Matykin, E., Arrabal R., Skeldon P., Thompson G.E., (2010), "Optimisation of the plasma electrolytic oxidation process efficiency on aluminium", *Surface and Interface Analysis*, 42(4), 221-226.
- [102] Godja N., Kiss N., Löcker Ch. Schindel A., Gavrilovic A., Wosik J., Mann R., Wendrinsky J., Merstallinger A., Nauer G.E., (2010), "Preparation and characterization of spark-anodized Al-alloys: Physical, chemical and tribological properties". *Tribology International*, 43(7), 1253-1261.
- [103] Hussein R., Nie X., Northwood D., (2010), "Influence of process parameters on electrolytic plasma discharging behaviour and aluminum oxide coating microstructure". *Surface and Coatings Technology*, 205(6), 1659-1667.
- [104] Cakmak, E., Tekin K.C., Malayoglu U., Shrestha S., (2010), "The effect of substrate composition on the electrochemical and mechanical properties of PEO coatings on Mg alloys". *Surface and Coatings Technology*, 204(8), 1305-1313.
- [105] Han-Hua W., Zeng-Sun J., Bei-Yu L., Feng-Rong Y., Xian-Yi L., (2003), "Characterization of microarc oxidation process on aluminium alloy". *Chinese physics letters*, 20(10), 1815.
- [106] Oh Y.-J., Mun J.-I., Kim J.-H., (2009), "Effects of alloying elements on microstructure and protective properties of Al₂O₃ coatings formed on aluminum alloy substrates by plasma electrolysis". *Surface and Coatings Technology*, 204(1-2), 141-148.
- [107] Yerokhin A.L., Shatrov A., Samsonov V., Shashkov P., Pilkington A., Leyland, A., Matthews A., (2005), "Oxide ceramic coatings on aluminium alloys produced by a pulsed bipolar plasma electrolytic oxidation process". *Surface and Coatings Technology*, 199(2-3), 150-157.

- [108] Nie X., Leyland A., Song H.W., Yerokhin A.L., Dowey S.J., Matthews A., (1999), "Thickness effects on the mechanical properties of micro-arc discharge oxide coatings on aluminium alloys". *Surface and coatings technology*, 116, 1055-1060.
- [109] Monfort, F., Berkani A., Matykina E., Skeldon P., Thompson G.E., Habazaki H., Shimizu K., (2007), "Development of anodic coatings on aluminium under sparking conditions in silicate electrolyte", *Corrosion Science*, 49(2), 672-693.
- [110] Krishna L.R., Purnima A.S., Sundararajan G., (2006), "A comparative study of tribological behavior of microarc oxidation and hard-anodized coatings". *Wear*, 261(10), 1095-1101.
- [111] Tarakci M., (2011), "Plasma electrolytic oxidation coating of synthetic Al–Mg binary alloys". *Materials characterization*, 62(12), 1214-1221.
- [112] Fukuda T., Kakuhari T., (2007), "New Surface Treatment Technology for Light Metals-Keronite", *Journal-Surface Finishing Society of Japan*, 58(6), 357.
- [113] Lund P., (2008), "Plasma Electrolytic Oxidation-A new surface treatment for light metals", *Aluminium International Today*, 20(3), 19.
- [114] Matykina E., Arrabal R., Skeldon P., Thompson G.E., (2008), "Incorporation of zirconia nanoparticles into coatings formed on aluminium by AC plasma electrolytic oxidation". *Journal of Applied Electrochemistry*, 38(10), 1375-1383.
- [115] Gencer Y., Gulec A.E., (2012), "The effect of Zn on the microarc oxidation coating behavior of synthetic Al–Zn binary alloys". *Journal of Alloys and Compounds*, 525, 159-165.
- [116] Matykina E., Arrabal R., Monfort F., Skeldon P., Thompson G.E., (2008), "Incorporation of zirconia into coatings formed by DC plasma electrolytic oxidation of aluminium in nanoparticle suspensions" *Applied Surface Science*, 255(5), 2830-2839.
- [117] Curran J., Clyne T., (2006), "Porosity in plasma electrolytic oxide coatings". *Acta Materialia*, 54(7), 1985-1993.
- [118] Yerokhin A., Snizhko L.O., Gurevina N.L., Leyland A., Pilkington A., Matthews A., (2004), "Spatial characteristics of discharge phenomena in plasma electrolytic oxidation of aluminium alloy", *Surface and Coatings Technology*, 177, 779-783.
- [119] Parfenov E., Yerokhin A., Matthews A., (2007), "Frequency response studies for the plasma electrolytic oxidation process", *Surface and Coatings Technology*, 201(21), 8661-8670.
- [120] Nie X., Meletis E., Jiang J.C., Leyland A., Yerokhin A.L., Matthews A., (2002), "Abrasive wear/corrosion properties and TEM analysis of Al₂O₃ coatings fabricated using plasma electrolysis", *Surface and Coatings Technology*, 149(2-3), 245-251.

- [121] Guangliang Y., Xianyi L., Yizhen B., Haifeng C., Zengsun J., (2002), "The effects of current density on the phase composition and microstructure properties of micro-arc oxidation coating", *Journal of Alloys and Compounds*, 345(1-2), 196-200.
- [122] Xue W., Deng Z., Chen R., Zhang T., (2000), "Growth regularity of ceramic coatings formed by microarc oxidation on Al–Cu–Mg alloy", *Thin solid films*, 372(1-2), 114-117.
- [123] Bardi U., Caporali S., Craig M., Giorgetti A., Perissi I., Nicholls JR, (2009), "Electrodeposition of aluminium film on P90 Li–Al alloy as protective coating against corrosion", *Surface and Coatings Technology*, 203(10-11), 1373-1378.
- [124] Rangel C., Travassos M., (2006), "Li-based conversion coatings on aluminium: An electrochemical study of coating formation and growth", *Surface and Coatings Technology*, 200(20-21), 5823-5828.
- [125] Purnima A.S., Wasekar N.P., Sundararajan G., (2007), "Kinetics and properties of micro arc oxidation coatings deposited on commercial Al alloys", *Metallurgical and Materials Transactions A*, 38(2), 370-378.
- [126] Krishna L.R., Rybalko A.V., Sundararajan G., (2005), "Process for forming coatings on metallic bodies and an apparatus for carrying out the process", U.S. Patent Documents, US 6,893,551 B2.
- [127] Shrestha S., Hutchins S., (2009), "Microstructural and Corrosion Characteristics of PEO Treated UNS A97075, A92099 and A92195 Alloy" Department of Defense Corrosion Conference, 7907, Washington DC, 10 Ağustos 2009, 3:15 pm
- [128] Güleç A.E., (2012), "Sentetik Al-Si İkili Alaşımlarının Mikro Ark Oksidasyon (MAO) Tekniği ile Kaplanması", *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü*.
- [129] Yucak O., (2014), "Sentetik Al-Ti Alaşımlarının Mikroark Oksidasyon Tekniği ile Kaplanması", *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü*.
- [130] Öter Z.Ç., (2013), "Sentetik Al-Mn Alaşımlarının Mikro Ark Oksidasyon Tekniği ile Kaplanması", *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü*.
- [131] Cheng Y.-L., Xue Z.-G., Wang Q., Wu X.-Q., Matykina E., Skeldon P, Thompson G.E., (2013), "New findings on properties of plasma electrolytic oxidation coatings from study of an Al–Cu–Li alloy", *Electrochimica Acta*, 107, 358-378.
- [132] Stachowiak G., Batchelor A., (2005), "Engineering tribology", 3. Baskı, Elsevier Butterworth. Heinemann.

- [133] Callister W. D. Jr., (2007), "Material Science and Engineering-An Introduction", 7. Baskı, John Wiley & Sons, Inc.
- [134] McDowell J., (2008), "Essential Chemistry", 1. Baskı, Metals.
- [135] Vargel C., (1999), "Corrosion of aluminium", 1. Baskı, Elsevier.

ÖZGEÇMİŞ

1986 yılında Eskişehir’ de doğdu. Orta öğretim ve Liseyi Gebze Anibal Anadolu Lisesi’nde tamamladı. 2010 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü’nde lisans derecesini tamamladıktan sonra aynı yıl yüksek lisans çalışmalarına Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü’nde aynı anabilim dalında başladı.