

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAK YÖNTEMİYLE BİRLEŞTİRİLMİŞ
ALÜMİNYUM-MAGNEZYUM SİSTEMİNİN MİKRO ARK OKSİDASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Emir KARAÇAM

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

MAYIS 2014

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAK YÖNTEMİYLE BİRLEŞTİRİLMİŞ
ALÜMİNYUM-MAGNEZYUM SİSTEMİNİN MİKRO ARK OKSİDASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Öğrenci Emir KARAÇAM
(506121407)**

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENÖĞLU

MAYIS 2014

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 506121407 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Emir KARAÇAM**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAK YÖNTEMİYLE BİRLEŞTİRİLMİŞ ALÜMİNYUM-MAGNEZYUM SİSTEMİNİN MİKRO ARK OKSİDASYONU**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENÖĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Adı SOYADI**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Adı SOYADI
Boğaziçi Üniversitesi

Teslim Tarihi : **5 Mayıs 2014**
Savunma Tarihi : **29 Mayıs 2014**

Aileme,

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca yaptığım çalışmalarda bütün bilgi ve deneyimini benimle paylaşan ve bana her konuda destek olan tez danışmanım Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENÖĞLU'na; çalışmalarımda bana yol gösteren ve desteklerini esirgemeyen değerli hocalarım Prof. Dr. Eyüp Sabri KAYALI'ya ve Doç. Dr. Murat BAYDOĞAN'a; laboratuvar çalışmalarım sırasında bilgi ve deneyimlerini bana aktaran Arş. Gör. Faiz MUHAFFEL'e; tez yazım aşamasında bıkmadan, usanmadan bana yardım eden Arş. Gör. Fatma ÜNAL'a ve meslektaşım Berrak BULUT'a teşekkürlerimi sunarım.

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

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

Aralık 2014

Emir Karaçam
Metalurji ve Malzeme Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
SEMBOL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
2. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI VE ÖZELLİKLERİ.....	3
2.1 Alüminyum Hakkında Genel Bilgiler	3
2.2 Alaşım Elementine Göre Sınıflandırılması	3
2.3 Alaşım Elementlerinin Etkisi	4
2.4 Alüminyuma Uygulanan Isıl İşlemler	5
2.4.1 Homojenleştirme	5
2.4.2 Tavlama.....	6
2.4.3 Gerilim Giderme Tavlaması.....	6
2.4.4 Çözeltiye Alma	6
2.4.5 Yaşlandırma	6
2.5 Alüminyum Alaşımlarının İşlem Kodlaması	7
2.6 Alüminyumun Kullanıldığı Yerler	8
2.6.1 Sektörel Bazda Kullanımı	8
2.6.2 Alaşım Elementi Bazında Kullanımı	9
3. MAGNEZYUM ALAŞIMLARI VE ÖZELLİKLERİ	11
3.1 Magnezyum Hakkında Genel Bilgiler.....	11
3.2 Magnezyum Alaşımlarının Sınıflandırılması	11
3.3 Alaşım Elementlerinin Etkisi	13
3.4 Yaygın Kullanılan Magnezyum Alaşımları	14
3.4.1 Ticari Alaşımları	14
3.4.2 Yüksek Sıcaklık Alaşımları	15
3.5 Magnezyumun Kullanım Alanları.....	15
4. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI (SKK).....	17
4.1 SKK'nin Özellikleri ve Mekanizması	17
4.2 Metal Akışı ve Kaynak Mikroyapısı	19
4.3 SKK Parametreleri	20
4.3.1 Takım Geometrisi	20
4.3.2 Kaynak Parametreleri.....	21
4.3.3 Kaynak Dizayını.....	21
4.4 SKK'nin Uygulandığı Malzemeler ve Bazı Kullanım Alanları	22
5. MİKRO ARK OKSİDASYON	25

5.1 MAO Prosesi ve Mekanizması.....	25
5.2 Mikro Ark Oksidasyon Uygulama Alanları	28
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	31
6.1 Giriş	31
6.2 Malzemeler.....	31
6.3 Mikro Ark Oksidasyon İşlemi	33
6.4 Karakterizasyon Çalışmaları	33
6.4.1 Yüzey ve Kesit İncelemeleri	34
6.4.2 X-ışınları Analizi.....	34
6.4.3 Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri.....	34
6.4.4 Sertlik Ölçümleri	34
6.4.5 EPMA (Electron Probe Micro-Analyzer) Analizi.....	34
7. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME	35
7.1 SKK İle Birleştirilmiş Al-Mg Sisteminin İnceleme Sonuçları.....	35
7.2 MAO Uygulanmış Al-Mg Sisteminin İnceleme Sonuçları	38
7.2.1 Voltaj Kontrollü Kaplama Sonuçları.....	38
7.2.2 Süre Kontrollü Kaplama Sonuçları	44
8. GENEL SONUÇLAR	51
KAYNAKLAR	53
EKLER.....	57
ÖZGEÇMİŞ.....	61

KISALTMALAR

TWI	: The Welding Institute
FSW	: Friction Stir Welding
rpm	: dakikadaki devir sayısı
MAO	: Mikro Ark Oksidasyon
PEO	: Plazma Elektrolitik Oksidasyon
DC	: Doğru Akım
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
XRD	: X-Işınları Difraksiyonu
EPMA	: Elektron Prob Mikroanalizörü
SKK	: Sürtünme Karıştırma Kaynağı
IACS	: International Annealed Copper Standard
TIG	: Tungsten Inert Gas
TMEB	: Termo mekanik olarak etkilenen bölge
ITAB	: Isı tesiri altındaki bölge
EDS	: Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Saf alüminyumun özellikleri	3
Çizelge 2.2 : Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması	4
Çizelge 2.3 : Alaşım elementlerinin etkisi.....	5
Çizelge 3.1 : Saf magnezyumun özellikleri.....	11
Çizelge 3.2 : Alaşım elementlerini simgeleyen harfler	12
Çizelge 3.3 : Çeşitli otomobil firmalarının kullandıkları magnezyum parçalar	15
Çizelge 6.1 : Kaplama için belirlenen voltaj ve süre değerleri.....	32

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Çözeltiliye alma ve yaşlandırma işlemlerinin gösterimi	7
Şekil 3.1 : Magnezyum alaşımlarının genel kullanım alanları	14
Şekil 4.1 : Sürtünme Karıştırma Alın Kaynağı Şematik Gösterimi.....	18
Şekil 4.2 : Sürtünme Karıştırma Bindirme Kaynağı Şematik Gösterimi	18
Şekil 4.3 : Kaynaklanan metalin kesitten şematik görünümü.....	19
Şekil 4.4 : Kaynak sırasında takımın çevresinde görülen metal akış paterni	19
Şekil 4.5 : SKK sonrası kesitten bakılan numune üzerindeki kaynak bölgeleri.....	20
Şekil 4.6 : Takım geometrisinin şematik gösterimi	21
Şekil 4.7 : SKK dizaynları	21
Şekil 5.1 : MAO düzeneği	26
Şekil 5.2 : MAO safhaları.....	26
Şekil 5.3 : MAO sırasında gerçekleşen akım-voltaj değişimi	27
Şekil 5.4 : Magnezyum üzerinde mikro ark oksidasyon işleminin gösterimi.....	28
Şekil 6.1 : Kaynaklı numune fotoğrafları	31
Şekil 6.2 : Dilimlenmiş numune fotoğrafları.....	31
Şekil 7.1 : (a-d) Alüminyum-magnezyum sisteminin farklı birleşme bölgelerine ait optik mikroskop fotoğrafları	35
Şekil 7.2 : Ayrılan yüzeylerden alınan stereo mikroskop resimleri.....	36
Şekil 7.3 : Birbirine sıcaklık ve basınç etkisiyle bağlanan bölgeler	37
Şekil 7.4 : Kaynak bölgesindeki metal akışı.....	37
Şekil 7.5 : Kaplamasız numunenin sertlik profili	38
Şekil 7.6 : Voltaj kontrollü grubun stereo mikroskop resimleri (a) 450 V, (b) 500 V, (c) 550 V, (d) 600 V	38
Şekil 7.7 : Voltaj kontrollü grubun ortalama yüzey pürüzlülük (R_a) değerleri	39
Şekil 7.8 : 450 V ile kaplanan numunenin (a) magnezyum, (b) alüminyum tarafı; 500 V ile kaplanan numunenin (c) magnezyum, (d) alüminyum tarafı	40
Şekil 7.9 : (a) 450 V ile kaplanan numunenin birleşim yeri, (b) 500 V ile kaplanan numunenin birleşim yeri.....	40
Şekil 7.10 : 550 V ile kaplanan numunenin (a) magnezyum, (b) alüminyum tarafı; 600 V ile kaplanan numunenin (c) magnezyum, (d) alüminyum tarafı ..	41
Şekil 7.11 : (a) 550 V ile kaplanan numunenin birleşim yeri, (b) 600 V ile kaplanan numunenin birleşim yeri.....	41
Şekil 7.12 : Voltaj kontrollü grubun XRD analizi.....	42
Şekil 7.13 : 450 V ile kaplanan numunenin elementel EPMA analizi, (a) alüminyum, (b) magnezyum, (c) silisyum, (d) oksijen	43
Şekil 7.14 : Voltaj kontrollü grubun alüminyum ve magnezum için ölçülen kaplama kalınlıkları	43
Şekil 7.15 : Süre kontrollü grubun stereo mikroskop resimleri (a) 2 dak, (b) 5 dak, (c) 10 dak, (d) 20 dak	44
Şekil 7.16 : Süre kontrollü grubun ortalama yüzey pürüzlülük (R_a) değerleri	45

Şekil 7.17 : 2 dakika kaplanan numunenin (a) magnezyum, (b) alüminyum tarafı; 5 dakika kaplanan numunenin (c) magnezyum, (d) alüminyum tarafı.....	45
Şekil 7.18 : (a) 2 dakika kaplanan numunenin birleşim yeri, (b) 5 dakika kaplanan numunenin birleşim yeri.....	46
Şekil 7.19 : 10 dakika kaplanan numunenin (a) magnezyum, (b) alüminyum tarafı; 20 dakika kaplanan numunenin (c) magnezyum, (d) alüminyum tarafı..	46
Şekil 7.20 : (a) 10 dakika kaplanan numunenin birleşim yeri, (b) 20 dakika kaplanan numunenin birleşim yeri.....	46
Şekil 7.21 : Süre kontrollü grubun XRD analizi.....	47
Şekil 7.22 : 2 dak kaplanan numunenin elementel EPMA analizi, (a) alüminyum, (b) magnezyum, (c) silisyum, (d) oksijen	48
Şekil 7.23 : Süre kontrollü grubun alüminyum ve magnezum için ölçülen kaplama kalınlıkları	48
Şekil A.1 : 500 V ile kaplanan numunenin elementel EPMA analizi, (a) alüminyum, (b) magnezyum, (c) silisyum, (d) oksijen.....	58
Şekil A.2 : 550 V ile kaplanan numunenin elementel EPMA analizi, (a) alüminyum, (b) magnezyum, (c) silisyum, (d) oksijen.....	59
Şekil A.3 : 600 V ile kaplanan numunenin elementel EPMA analizi, (a) alüminyum, (b) magnezyum, (c) silisyum, (d) oksijen.....	60
Şekil B.1 : 5 dk kaplanan numunenin elementel EPMA analizi, (a) alüminyum, (b) magnezyum, (c) silisyum, (d) oksijen	60
Şekil B.2 : 10 dk kaplanan numunenin elementel EPMA analizi, (a) alüminyum, (b) magnezyum, (c) silisyum, (d) oksijen	61
Şekil B.3 : 20 dk kaplanan numunenin elementel EPMA analizi, (a) alüminyum, (b) magnezyum, (c) silisyum, (d) oksijen	61

SEMBOL LİSTESİ

°C	: Santigrat Derece
mm	: Milimetre
dak	: Dakika
g	: Gram
cm	: Santimetre
MPa	: Megapascal
V	: Voltaj
kW	: Kilowatt
mg	: Miligram
µm	: Mikrometre
µs	: Mikrosaniye
K	: Kelvin

SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAK YÖNTEMİYLE BİRLEŞTİRİLMİŞ ALÜMİNYUM-MAGNEZYUM SİSTEMİNİN MİKRO ARK OKSİDASYONU

ÖZET

Alüminyum ve magnezyum düşük yoğunluk ve yüksek mukavemetinden dolayı hafiflik istenen birçok sektörde yaygın olarak kullanılır. Alüminyum, çelikten sonra en çok kullanılan ikinci metaldir. Özgül dayanımı ve iletkenliği yüksek olup yüzeyde oluşturduğu Al_2O_3 tabakası sayesinde korozyona karşı da dirençlidir. Magnezyum ise alüminyumdan da hafiftir. İçine ilave edilen alaşım elementleri ile mukavemeti artırılabilir bile magnezyumun oksijene afinitesi ve korozyon davranışı başlıca dezavantajlarıdır. En başta otomotiv ve havacılık sektörü olmak üzere, ağırlık azaltmaya çalışan bütün sektörlerde bu iki metal önem kazanmıştır. Bu durumda üzerine çok yük gelmeyen, çok spesifik amacı bulunmayan parçaların, aynı işi yapacak daha hafif parçalarla değiştirilmesi söz konusu olmuştur. Değiştirme ihtiyacı, yanında parçaların birleştirilmesi işlemini de beraberinde getirmiştir. Birleştirme işlemi kaynakla yapılır. Fakat hafif metallerin kaynaklama işlemi çok zordur. Özellikle alüminyum ve magnezyumun düşük sıcaklıkta ergimesi, porozite yatkınlığı gibi faktörler, bu metallerin ergitme kaynak yöntemleri ile birleştirilmesini imkansız kılmaktadır. Mekanik özelliklerden fazla ödün vermeden başarılı bir kaynak yapabilmek için katı hal kaynağı kullanılması gerektiği fark edilmiştir.

Alüminyum ve magnezyum gibi hafif metallerin birleştirilmelerinde katı hal kaynağı olarak 1991'de İngiltere'de The Welding Institute tarafından bulunan sürtünme karıştırma kaynağı kullanılmaktadır. Bu yöntem, malzemeleri ergitmeden yapılan, düşük ısı girdisi sayesinde enerji verimliliği yüksek, sarf malzemesine ihtiyaç duymayan ve atık üretmeyen çevre dostu bir yöntemdir. Bu yöntemde kaynak işlemi şu şekilde yapılır; malzemelere dışarıdan bir miktar ısı verilerek yumuşatılır, daha sonra kaynak yapacak takım eksenini etrafında belirli bir hızla dönerek kaynak yapılması istenen hat üzerine yerleştirilir ve bu dairesel hareketini kaynak hattı boyunca ilerleyerek sürdürür. Hem dairesel hızın hem de ilerleme hızının etkisiyle aşırı sürtünme sonucu önemli miktarda ısı çıkar. Bu ısı, metallerin plastikleşmesini sağlar ve daha kolay karışma görülür. Kaynak sonrası birbirinin içine geçmiş, girift bir mikroyapı gözlemlenir.

Sürtünme karıştırma kaynaklarında, alın ve bindirme tipi kaynaklarda kesin bir başarı sağlanırken bazı kaynak dizaynlarında bu yöntem yetersiz kalabilmektedir. Başarılı bir kaynak yapmak için pin şekli, takım açısı, takımın dönüş hızı ve ilerleme hızı da malzemelere uygun seçilmelidir.

Kaynak sonrasında bu metallerin, alaşımsız oldukları için herhangi bir yüzey işlemi yapılmadığı takdirde atmosfer ve ortam koşullarına açık kalacağı ve korozyona uğrayacakları görülmüştür. Bunun önüne geçmek için metallere uygun bir kaplama işlemi seçilmelidir. Kaplama yöntemi olarak çevre dostu, kolay uygulanabilen, sert ve kalın seramik tabakalar üretilen ve hafif metallere uygulanabilirliğiyle ün yapmış

bir yöntem olan mikro ark oksidasyon seçilmiştir. Mikro ark oksidasyon, alüminyum, titanyum, magnezyum ve bunların alaşımlarına uygulanan bir kaplama yöntemidir. İş parçasının, doğru akım kaynağına bağlanıp genellikle alüminat, fosfat, silikat iyonları içeren bazik çözelti içerisinde yüzeyinden arklar çıkarak oksitlenmesi sağlanır. Kalın ve sert seramik kaplamalar üretmenin hızlı ve ekonomik bir yoludur.

Bu çalışmada öncelikle sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiş alüminyum ve magnezyum plakalardan parçalar kesilerek bunların yeterli derecede birleşip birleşmediği incelenmiştir. Optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu ile resimler alınıp birleşme bölgesi incelenmiştir. XRD ile kaynak sırasında oluşan fazlara bakılmıştır. Daha sonra bu parçaların mikro ark oksidasyon yöntemiyle kaplanabilirliği incelenmiştir. Farklı voltaj ve sürelerde yapılan kaplamalara SEM, XRD, pürüzlülük, EPMA gibi birtakım karakterizasyon işlemleri yapıp bunların sonucunda kaplama için optimum değerler elde edilmiştir.

Alüminyum ve magnezyumun ayrı ayrı kaplanması ile ilgili pek çok çalışma varken ikisinin bir arada kaplanması seyrek görülen bir durumdur.

MICRO ARC OXIDATION OF ALUMINUM-MAGNESIUM SYSTEM JOINED BY FRICTON STIR WELDING

SUMMARY

Light metals such as aluminum and magnesium are increasingly used in many industries because of their low density and high strength. Aluminum has high strength/density ratio, high electrical and thermal conductivity and good corrosion behaviour because of Al_2O_3 layer at surface. Magnesium is lighter than aluminum. Magnesium's strength is increased with the alloying elements but there is an important disadvantage; corrosion behaviour and affinity for oxygen. Because of affinity for oxygen, magnesium is easily oxidized moreover this oxide layer is not protective although it is thick. To reduce weight and fuel efficiency are remarkable factors nowadays. Replacing some useless heavy parts with the light one is getting more significant. But replacing process requires joining process. Joining process of metals is performed with welding. Welding of light metals such as aluminum and magnesium very difficult because of their low melting points, tendency to porosity etc. If any fusion welding is chosen, it is obvious that the mechanical properties will decrease. Then it was realized that in order to keep mechanical properties stable, solid state welding must be used.

In 1991, The Welding Institute (TWI) in England discovered friction stir welding (FSW) as solid state welding to join light metals. This non fusion welding is environmentally friendly because of low energy input and doesn't need any consumable materials. After welding process, there is no waste seen. Process is started with placing materials as butt or lap weld design. Then materials are heated to soften. Pin which makes welding, starts rotating and is plunged into the weld line. And pin advances along the weld line while rotating. Materials are stirred by rotational motion. Friction between pin and materials helps softening of materials. Therefore metals are stirred easily. After the welding, metals exhibit intricate microstructures. Welding is achieved in lap and butt weld designs with ease. There are several parameters to make a successful weld. Pin can exist in different shapes and properties. There are plain pins, threaded pins, pins with flutes etc. This must be chosen with respect to process. Tool angle is another parameter. Rotational speed (rpm), rotational direction (clockwise or counter-clockwise) and advancing speed (mm/min) must be ranged within the optimum values. If the speed is increased, possibility of forming cavity between metals will get higher. Post welding investigations show that there are different zones in weld area: thermo-mechanically affected zone, heat affected zone, stirred (nugget) zone and base metal. Grain size, grain shape and chemical composition vary in these zones. Furthermore if distinct metals are welded, intermetallic compounds are observed. According to metal pairs temperature is measured between 300-400 °C. Partial melting can be observed sometimes.

After welding it is experinced that these welded parts are susceptible to corrosion and appropriate surface modification must have been applied to metals.

Micro arc oxidation (MAO) also known as plasma electrolytic oxidation (PEO) were chosen as surface modification because of its superior properites. It is environmentally friendly and performed easily. This method produces hard, well adhered and thick ceramic layers on the surface. MAO is only suitable for valve metals which includes aluminum, magnesium, titanium and zirconium. Generally weak alcali electrolytes like silicate, aluminate, phosphate etc. are prepared. Part to be coated is immersed into alcali solution and connected as anode to DC power supply. Stainless steel vessel is connected as cathode. Voltage and time are main parameters for MAO. When the voltage is applied, metal oxide will form in surface. This is first step of coating and named anodic oxidation (eloxal). This passive film forms and dissolves continuously. Then voltage exceeds critical breakdown voltage and arc discharge occurs at surface. Passive film breaks and micro arc oxidation starts. Oxide film starts to grow and arcs make oxide layer thicker. MAO is economic way to produce ceramic layers.

Coating consists of two main layers: one is dense layer and the other one is loose layer. Dense or compact layer is formed in coating/substrate interface. Loose layer is formed in coating/electrolyte interface. Loose layer contains too many pores inside. Even if coating is very thick, pores reduces hardness and wear resistance. Dense layer is more crucial to determine the mechanical properties of coating.

In our research, pure aluminum and pure magnesium were joined each other with friction stir lap welding. Aluminum and magnesium plate has 3 mm and 4 mm thickness respectively. Magnesium plate was placed on top and aluminum at bottom. During welding, rotational speed was 1600 rpm and advancing speed was 40 mm/min. After welding, plates were sliced with the 1 cm width. Then excess metals because of lap welding were trimmed. Each sample had 1 cm width and 7 mm height. These samples were ground up to 1000 grit SiC abrasive paper and rinsed with distilled water and ethanol. Then samples were ready to be coated. Samples were immersed into electrolyte which contains 3 g/L KOH ve 10 g/L Na_2SiO_3 for different voltage and time values.

To see voltage and time effect, time dependent and voltage dependent two groups of sample were coated and examined. Voltage dependent group were coated for 5 minutes with 450 V, 500 V, 550 V and 600 V respectively. Time dependent group were coated with 500 V for 2 min, 5 min, 10 min and 20 min respectively.

Before MAO process, welded metals were examined by optical microscope, SEM in order to see whether joining with these FSW parameters is acceptable or not. And XRD patterns were obtained to see which phases are formed during welding. Hardness profile from magnesium side to aluminum side was produced with micro Vickers.

After all the coatings finished, several characterizations were done. As macro examination, stereo microscope images and SEM images were taken from all the samples. SEM images were taken from aluminum side, magnesium side and interlayer. Roughness tests were applied to all samples. XRD patterns were also obtained. Differences in chemical composition were measured with EPMA, started in magnesium side towards aluminum side.

Then by cutting samples and mounting in epoxy resin, they were prepared for micro examination. Images of cross section were taken with optical microscope and SEM.

According to results, as voltage and time increases thickness of film and roughness increase. But the increment by the effect of voltage is more intensive. It was always seen that magnesium has more tendency to form oxide than aluminum. So all the measurements exhibited that magnesium oxide is thicker than aluminum oxide. According to XRD results Al_2O_3 is formed in aluminum side and MgO , Mg_2SiO_4 , MgSiO_3 is formed in magnesium side. For the optimum parameters, as electrolyte 3 g/L KOH and 10 g/L Na_2SiO_3 mixture, 500 V, 10 minute treatment time and 1000 Hz frequency are suggested.

1. GİRİŞ

Alüminyum ve magnezyum gibi hafif metaller, yüksek dayanım ve düşük yoğunluk gibi özelliklerinden dolayı havacılık, otomotiv ve daha birçok sektörde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Fakat hafif metallerin en büyük dezavantajı birleştirme işlemi sırasında ortaya çıkmaktadır. Geleneksel kaynak yöntemleriyle birleştirme işlemlerinde çatlaklar, büyük boşluklar ve porozite görülmesinin yanı sıra malzemelerin ergime sıcaklıkları, kaynak işlemi için çıkılan sıcaklıklara göre bir hayli düşüktür. Bu sorunu ortadan kaldırmak için 1991'de İngiltere'de TWI (The Welding Institute) kurumu, bir katı hal kaynak metodu olan sürtünme karıştırma kaynağını (Friction Stir Welding) geliştirdi. SKK yeni ve çevreye duyarlı bir kaynak metodudur. Uygulaması da kolay bir yöntemdir. Metaller üstüste veya yanyana koyulduktan sonra sıkıştırılarak sabitlenir ve ısıtılır. Bu ısıtmanın amacı, malzemenin kolay karışması için, sürtünme ile oluşan ısıya katkıda bulunmaktır. Düz ya da vida benzeri dişlere sahip silindirik bir parça dönerek parçaların birleşim yerine bir delik açarak girer ve parçaların temas yüzeyi boyunca dönerek ilerler.

Alüminyum ve magnezyum gibi farklı metallerin sürtünme karıştırma kaynağında Al_3Mg_2 ve $Al_{12}Mg_{17}$ gibi intermetalikler görülür. Yoğun plastik deformasyonun yanında 200-400 °C gibi bir sıcaklık dağılımı gözlenir [1,2].

Kaynak işleminden sonra birleşme yerinde üç bölge görülür; karışma bölgesi, ısı tesiri altında kalan bölge ve termomekanik olarak etkilenen bölge. Bu farklı bölgelerde, karışmaya ve sıcaklığa bağlı olarak kimyasal kompozisyon ve tane boyutu homojen değildir. Bu sebeple kaynak bölgesinde bazı bölgeler korozyona daha yatkın olur. Korozyonun önüne geçebilmek için kaynaklı parçaların kaplanması gerekir. Bu çalışmada çevre dostu ve oldukça ekonomik ve uygulanması kolay bir yöntem olan mikro ark oksidasyon seçilmiştir [3].

Mikro ark oksidasyon (MAO), plazma elektrolitik oksidasyon (PEO) olarak da adlandırılır. Sert, kalın, aşınma ve korozyon direnci yüksek ve altlığa kuvvetli bağlanan seramik kaplama üretme yöntemidir. Yöntem, sadece valf metaller denen

alüminyum, titanyum, magnezyum ve bunların alaşımlarına uygulanır. MAO, yöntem olarak anodik oksidasyondur. Malzeme, bazik elektolit (genellikle silikat, fosfat, alüminat çözeltileri) içersinde anota bağlanır. Kaplanacak malzeme, yüzeyde hem kendi oksidini oluştururken hem de elektrolit içindeki bileşikler iyonlaşarak yüzeye tutunur; bu sayede kalın bir oksit tabakası meydana getirir. Bu çalışmada MAO parametrelerinden süre ve voltajın kaplamalar üzerine etkisi incelenmiştir [3,4].

2. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI VE ÖZELLİKLERİ

2.1 Alüminyum Hakkında Genel Bilgiler

Alüminyum ve alaşımları, çelikten sonra en çok kullanılan endüstriyel malzemedir. Yer kabuğunda en bol bulunan ve en yaygın kullanılan demirdışı elementtir. Primer alüminyum üretimi için en çok kullanılan cevher boksittir. Cevherde genelde oksitli bileşikler halinde bulunur. Her ne kadar bol olsa da metalik olarak bulunmadığı için primer üretimi, hurdadan üretime göre daha masraflıdır. Çünkü, primer üretimde öncelikle boksit cevherinden Bayer prosesiyle alümina üretilir, daha sonra alüminadan ergimiş tuz elektroliziyle alüminyum üretilir.

Alüminyumu birçok sektörün göz bebeği yapan şey, üstün özellikleridir. Bunların başında hafif olması gelir; yoğunluğu $2,7 \text{ g/cm}^3$, atom ağırlığı $26,97 \text{ g/mol}$ 'dür. Yüksek mukavemetinden dolayı, özgül dayanımı da yüksektir. Isıl ve elektrik iletkenliği IACS standartlarına göre bakırın %61'i gibi ciddi bir değerdedir. Bunların yanında, alüminyumun korozyona karşı direnci de bir hayli yüksektir. Yüzeyinde oluşturduğu Al_2O_3 tabakası sayesinde pek çok koroziv ortamda tercih edilebilir. Yüzey merkezli kübik kristal yapısına sahip olduğu için kolay şekillendirilebilir. Saf alüminyumun diğer özellikleri aşağıdaki gibidir [5,6,7].

Çizelge 2.1 : Saf alüminyumun özellikleri [8].

Atom numarası	13
Ergime derecesi	660°C
Elastisite modülü	$69 \times 10^3 \text{ MPa}$
Kristal yapısı	Yüzey merkezli kübik

2.2 Alaşım Elementine Göre Sınıflandırılması

Alüminyum alaşımlarında Cu, Mn, Si, Mg, Zn gibi ana alaşım elementleri kullanılır. Bunların yanında Ti, Ni, Co, Zr gibi elementler de ilave olarak kullanılır. Bu elementler, alaşıma belirli özellikleri getirmesinin yanı sıra yaşlandırma işlemi

sırasında intermetalik oluşturarak sertlik ve dayanım artışına katkı sağlarlar. Alaşım elementine göre sınıflandırma çizelgedeki gibi yapılır.

Çizelge 2.2 : Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması.

Alaşım Grubu	Alaşım Elementi
1xxx	Yok
2xxx	Bakır
3xxx	Mangan
4xxx	Silisyum
5xxx	Magnezyum
6xxx	Silisyum – Magnezyum
7xxx	Çinko
8xxx	Lityum

8 alaşım grubundan 2, 6 ve 7. gruba yaşlandırma işlemi uygulanabilir [5,6].

2.3 Alaşım Elementlerinin Etkisi

- Bakır; %3-12 oranında kullanılır, sertlikte ve çekme mukavemetinde artış sağlar. Alüminyumla intermetalik oluşturarak yaşlandırma işlemine olanak sağlar.
- Mangan; dökülebilirliği, sünekliği ve tokluğu artırır.
- Silisyum; metalin akışkanlığını ve korozyon direncini yükseltir. %13'ten fazla silisyum, alaşımın işlenmesini zorlaştırır.
- Magnezyum; katı çözelti sertleşmesi yaratır. Dökülmeleri zordur fakat %6'ya kadar kullanılan magnezyum, şekil vermeyi kolaylaştırır.
- Çinko; dökülebilirliği belirgin bir şekilde azaltır. Diğer alaşım elementleriyle birlikte dayanımı artırır.
- Demir; genelde cevherden gelirler. Bazı alaşımların sertlik ve dayanımını artırmakta ve tane küçültücü olarak kullanılmaktadır.
- Geçiş metalleri; genel olarak krom, zirkonyum ve titanyumun dayanımı düşürme eğilimi vardır fakat bazı araştırmalara göre bu elementlerin atom

bağlarının mukavemetini artırarak difüzyonu azalttığı söylenmektedir. Titanyum, bor ile birlikte kullanıldığında tane inceltici etki yapar [5,9].

Genel olarak alaşım elementlerinin etkisini şu çizelge ile özetleyebiliriz.

Çizelge 2.3 : Alaşım elementlerinin etkisi [10].

Nitelikler	Cu	Si	Mg	Zn	Ni	Co	Ti	Mn	Fe	Cr
Kopma Mukavemeti	++	+	+	++	+	+	+			-
Elastiki Sınır	++	+	-	+	-					
Sertlik	++		-	-	+			+	+	
Isıya Dayanıklılık	++		++		+				+	
Kaynak Kabiliyeti	-	++	+	-	-		+	+		+
Talaş Kaldırma ile İşlenebilirlik	++	-	+	+	+		++	+	++	+
Elastikiyet Modülü	+	++	-	+	+	++		+	-	
Döküm Kabiliyeti	+	++	-	+			+	-	-	
Süneklik	-	--	+				+		--	
Korozyon Direnci	-	+	++	+				-	--	++
Anodizasyona Elverişsizlik	-	+	++	+				-		
++: Çok İyi	+: İyi			-: Ortanın Altında			--: Zararlı			

2.4 Alüminyuma Uygulanan Isıl İşlemler

2.4.1 Homojenleştirme

Homojenleştirme tavlama 450-600°C sıcaklık aralığında mikrosegregasyonun etkilerini azaltmak, düşük ergime noktasına sahip dengesiz ötektikleri kaldırmak ve

çözünmüş elementlerin aşırı konsantrasyonlarını kontrollü çökeltmek amacı ile yapılır.

2.4.2 Tavlama

Soğuk işlem görmüş alaşımlara, soğuk işlemin etkisini kaldırıp malzemeyi yumuşatmak için 300-450°C aralığında tavlama işlemi yapılır.

2.4.3 Gerilim Giderme Tavlaması

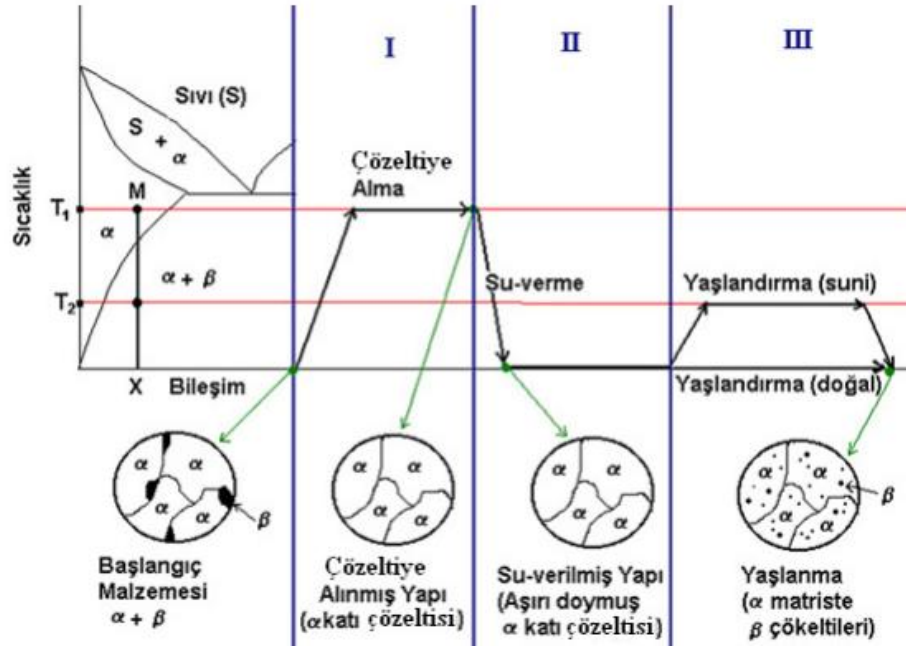
Isıl işlem uygulanabilen alaşımlarda soğuk deformasyonun etkisini gidermek için yapılır. Tavlama sıcaklığı 345°C'ye kadar çıkabilir. İşlem sonucunda toparlanma, kısmi rekristalizasyon veya tamamen rekristalizasyon görülür.

2.4.4 Çözeltiye Alma

Alaşımı, kısmi çözünme hattının üzerinde, ötektik sıcaklığın altında bir bölgede tutarak tek fazlı bir yapıya geçirme işlemidir. İkincil fazlar ve diğer bileşenler çözülerek yapıya disperse olur. Daha sonra su verilerek bu yapının oda sıcaklığında da muhafaza edilmesi sağlanır.

2.4.5 Yaşlandırma

Çözeltiye alınan alaşımın oda sıcaklığında ya da belirlenen bir sıcaklıkta tutulmasıyla dayanımın artması işlemidir. Bu işlemin hızını sıcaklık belirler. Atomlar, difüzyon ile intermetalik oluştururlar. İntermetalik çökelti, dislokasyonları kilitleyerek onların hareketini engeller. Bu sayede mukavemet artışı olur. Çözeltiye alınan alaşım oda sıcaklığında bekletilirse doğal yaşlanmış olur. Fakat doğal yaşlanma uzun süren bir süreçtir. Günler, haftalar hatta aylar sürebilir. Pratik bir işlem olmadığı için yapay yaşlandırma yapılır. Çökelti oluşturma işi, atom difüzyonuna, dolayısıyla sıcaklığa bağlı olduğu için alaşımlar tutma sıcaklığında bekletilir. Yapay yaşlandırmanın, daha yüksek tutma sıcaklığında gerçekleştiği için daha hızlı olduğu aşıkardır. Eğer alaşım yüksek sıcaklıkta ve/veya uzun sürelerde tutulursa aşırı yaşlanma meydana gelir. Bu durumda çökelti büyür ve matris ile oluşturduğu gerilme bölgesi ortadan kalkar. Serbest kalan dislokasyonların etkisiyle malzemede sertlik ve dayanımdan ödün verilir [9,11].



Şekil 2.1 : Çözeltiye alma ve yaşlandırma işlemlerinin gösterimi [41].

2.5 Alüminyum Alaşımlarının İşlem Kodlaması

- EC, elektrik iletimi için kullanılan alaşımlar içindir. En az %99,45 saflıktadırlar.
- O, tavllanmış ve yeniden kristalleşmiş alaşımlar için kullanılır.
- F, ısıtıl işlem veya mekanik işlem görmemiş (fabrikadan çıktığı halde) alaşımlar için kullanılır.
- H, deformasyon sertleşmesi görmüş ısıtıl işlem uygulanmayan alaşımları belirtir. H1, soğuk işlem görmüş alaşımı simgeler fakat H1'e ilaveten bir sayı daha koyulursa o da, sertlik derecesini gösterir. Buna göre, 2 çeyrek sert, 4 yarı sert, 6 üç çeyrek sert, 8 tam sert durumu gösterir. Örneğin, H12, malzemenin soğuk işlem gördüğünü ve daha sonra yumuşatılarak çeyrek sertliğe getirildiğini belirtir. H2, soğuk işlem görmüş ve ardından kısmi tavlama yapılmış alaşımları ifade eder.
- W, doğal yaşlanmayı simgeler. Bu gösterim şeklinde bir de yaşlanma süresi saat cinsinden belirtilir. Örneğin, 2024-W-8 simgesi, 8 saatlik yaşlanmayı gösterir.
- T, ısıtıl işlem görmüş alaşımlar için kullanılır.

T1, sıcak şekillendirme sonrası soğutulup doğal olarak yaşlanmış alaşımlar için kullanılır.

T2, sıcak şekillendirme sonrası soğutulur, soğuk deformasyon uygulanır ve doğal olarak yaşlandırılır.

T3, çözeltiliye alınmış alaşımların soğuk işlem ile sertleştirilip doğal yaşlandırılığını gösterir.

T4, çözeltiliye alma ve ardından doğal yaşlandırmayı sembolize eder.

T5, sıcak şekillendirme sonrası yapay yaşlanmayı ifade eder.

T6, çözeltiliye alma ve ardından yapay yaşlandırmayı sembolize eder.

T7, çözeltiliye alma ve ardından aşırı yaşlandırmayı sembolize eder.

T8, çözeltiliye almanın ardından soğuk deformasyon uygulandığını ve yapay yaşlandırma işlemini anlatır.

T9, birbirini izleyen çözeltiliye alma, yapay yaşlandırma ve soğuk işlemi gösterir.

T10, sıcak şekillendirme sonrası yapay yaşlandırılmış ve soğuk işlem görmüş alaşımları simgeler [8].

2.6 Alüminyumun Kullanıldığı Yerler

2.6.1 Sektörel Bazda Kullanımı

- Ulaşım sektörü; motor blokları, ön ve arka süspansiyon elemanları, şaft, tekerlek jantları, ısı eşanjörleri, radyatör ve klima birimleri, motor parçaları, kaporta sacı, yük ve yolcu vagonları, tekne gövdesi
- Savunma ve havacılık sektörü; yapı elemanları, uçak gövdesi, zırh kaplama
- Elektrik-elektronik sektörü; jeneratörler, iletkenler, telefon kabloları
- İnşaat sektörü; duvar kaplama, çatı kaplama, pencere ve kapı doğrama
- Ambalaj sektörü; konserve ve meşrubat kutuları, folyo, kapaklar
- Beyaz eşya sektörü; klimalar, buzdolapları, pişirme araçları
- Spor ve eğlence sektörü; bisiklet iskeletleri, beyzbol sopaları, golf raketleri, kızaklar vb.

alanlarda kullanılmaktadır [5,10].

2.6.2 Alaşım Elementi Bazında Kullanımı

1XXX serisi, elektrik iletkenliğinin istendiği yerlerde, folyo olarak ambalaj sektöründe, elektrik ve elektronik sektöründe, derin çekme uygulamalarında kullanılır. 2XXX serisi, yaşlanmaya müsait yapısından dolayı, havacılık sektöründe, vida, cıvata, perçin yapımında, dövme silindir kafalarında, pistonlarda, uçak pervanelerinde kullanılır. 3XXX serisi, iyi işlenebilirliği ve orta seviye dayanımı olduğundan çatı kaplamalarında, meşrubat kutularında, madde ve gıda taşıma ekipmanlarında kullanılır. 4XXX serisi, kaynak ve lehim tellerinde, silindir kafalarında, motor bloklarında, subap gövdelerinde ve mimari uygulamalarda kullanılır. 5XXX serisi, yüksek dayanıma sahip olduğundan basınçlı kaplarda, otomotiv sektöründe, deniz taşıtlarında, yapısal elemanlarda, depolama tanklarında, zırhlarda kullanılır. 6XXX serisi, yüksek mukavemetli olduklarından dolayı otomobillerde, tren vagonlarında, deniz taşıtlarında, makine parçaları ve ilaç sanayisinde kullanılır. 7XXX serisi, mukavemeti en yüksek alaşımları içerir. Bu gruptaki alaşımlar uçaklarda, savunma sanayide, kalın kesitli dövme parçalarda, zırh levhalarında, ağır taşıtlarda, vinçlerde kullanılır. 8XXX serisi ise havacılık sektöründe yakıt ve yanma tanklarında kullanılır [5,7].

3. MAGNEZYUM ALAŞIMLARI VE ÖZELLİKLERİ

3.1 Magnezyum Hakkında Genel Bilgiler

Magnezyum, yapısal uygulamalarda kullanılabilecek en hafif metaldir. Hafiflik istenen otomotiv, taşıma, uçak ve uzay endüstrisinin ilgi duyduğu bir metaldir. Yoğunluğu $1,74 \text{ g/cm}^3$, atom ağırlığı 24 g/mol 'dür. Doğada dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), magnezit (MgCO_3) ve karnalit ($\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) olarak bulunur. Genelde son ürünlerin çok büyük bir kısmı döküm ürünleridir. Hafif olması büyük bir avantaj olsa da mukavemeti ve korozyon dayanımı oldukça düşüktür. Oksijene olan afinitesinden dolayı çok kolay oksitlenir [12].

Çizelge 3.1 : Saf magnezyumun özellikleri [8].

Atom numarası	12
Ergime derecesi	650°C
Elastisite modülü	$45 \times 10^3 \text{ MPa}$
Kristal yapısı	Hegzagonal Sıkı Paket

Magnezyumun ısı iletkenliği, titreşim sönümleme kabiliyeti ve talaşlı imalat kabiliyeti yüksektir. Metal kalıba yüksek verimlilikle dökülür ve gaz korumalı atmosferde kolaylıkla ark kaynağı yapılabilir. Fakat emf serisinde, standart elektrod potansiyeli çok düşük olduğu için farklı metallerle galvanik hücre oluşturması halinde çok çabuk korozyona uğrar. Oksijene ilgisinden dolayı hızlı bir biçimde magnezyum oksit oluşur. Ayrıca hegzaonal sıkı paket yapısından dolayı deformasyonu zordur [42].

3.2 Magnezium Alaşımlarının Sınıflandırılması

Mühendislik uygulamalarında magnezyumun saf halde kullanımı çok sınırlıdır. Magneziuma, korozyon direncini ve dayanımını artırmak için alüminyum, zirkonyum, çinko, mangan, gümüş vb elementler katılır. Sınıflandırma işlemi şu şekilde yapılır; öncelikle magnezyumun içindeki iki ana alaşım elementini

simgeleyen harfler yazılır, daha sonra yanlarına bu iki ana alaşım elementinin yüzde olarak oranları yazılır. Alaşım elementi oranlarının yanında, tek bir harf ile simgelenen, malzemenin kondisyonu yazar. En sona da malzemenin ısıtma işlem ya da üretim durumu yazılır [13].

Çizelge 3.2 : Alaşım elementlerini simgeleyen harfler [42].

Harf	Element	Harf	Element
A	Alüminyum	M	Mangan
B	Bizmut	N	Nikel
C	Bakır	P	Kurşun
D	Kadmiyum	Q	Gümüş
E	Nadir toprak elementleri	R	Krom
F	Demir	S	Silisyum
G	Magnezyum	T	Kalay
H	Toryum	W	İtiryum
K	Zirkonyum	Z	Çinko
L	Lityum		

Alaşımın kondisyonunu belirten harfler şunlardır:

A - Birinci bileşim

B - İkinci bileşim

C - Üçüncü bileşim

D - Yüksek saflıkta

E - Yüksek korozyon direnci

Isıl işlem durumu veya üretim durumunu gösteren harfler şunlardır:

AC - Döküldüğü gibi

F - Üretildiği gibi (fabrikadan çıktığı halde)

O - Tavlanmış

W - Çözeltiye alınmış

T - Çözeltiye alma, soğutma ve yaşlandırma durumlarını gösterir.

Örnek gösterim:

AZ91D : %9 alüminyum, %1 çinko, D kondisyon (yüksek saflık)

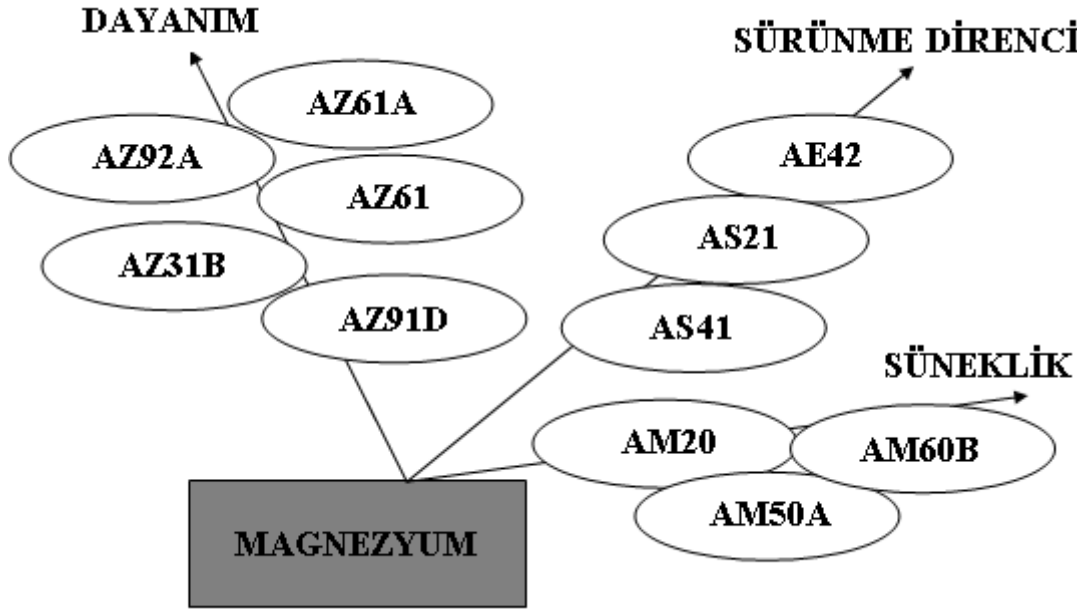
QE22A-T6 : %2 gümüş, %2 nadir toprak elementleri, A kondisyon (birinci bileşim), T6 ısıtıl işlemi (çözeltiye alma, hızlı soğutma ve yapay yaşlandırma) [13,14,42]

3.3 Alaşım Elementlerinin Etkisi

- Alüminyum: magnezyum alaşımlamada en çok kullanılan elementtir. Alüminyum ilavesiyle çekme dayanımı ve sertlik artarken, darbe dayanımı ve süneklikte azalma gözlenir.
- Çinko: tane sınırlarında ötektik miktarını artırarak alaşımın düşük sıcaklıkta katılaşmasını sağlar. Çökelti oluşturduğu için sertlik ve dayanımı artırır fakat %2'den daha fazla olursa sıcak yırtılmaya sebep olabilir. Bakır ihtiva eden alaşımlarda korozyon özellikleri düşer. Bunu önlemek için çinko ilavesi yapılabilir.
- Mangan: Mg-Al ve Mg-Al-Zn alaşımlarının korozyon direncini artırır ve genel olarak süneklik istenen alaşımlara katılır.
- Titanyum: az da olsa tane inceltici rolü vardır.
- Gümüş: yüksek sıcaklık dayanımını artırıp sürünme davranışını iyileştirir.
- Silisyum: ergimiş alaşımın akışkanlığını artırır. Demir ile beraber kullanımı korozyon davranışını olumsuz etkiler. Yüksek sıcaklık dayanımını artırır.
- Zirkonyum: tane inceltici olarak yapıya ilave edilir.
- Kalay: Mg_2Sn intermetalliğini oluşturarak çökelti sertleşmesine katkıda bulunur.
- İtiryum: sürünme özelliklerini geliştirir.
- Nadir toprak elementleri: yüksek sıcaklıkta dayanımı muhafaza ettiği için sürünme direncini artırır. Bunun yanında döküm porozitesini azalttığı da gözlemlenmiştir [13,15,16,42].

3.4 Yaygın Kullanılan Magnezyum Alaşımları

Konunun girişinde magnezyum ile ilgili şu resmi koymak, genel bir izlenim yaratması açısından faydalı olacaktır.



Şekil 3.1 : Magnezyum alaşımlarının genel kullanım alanları [42].

3.4.1 Ticari Alaşımları

- Mg-Al : alüminyum, sertliği ve dayanımı artırır. $Mg_{17}Al_{12}$ inkoherent çökeltisi oluşur.
- Mg-Al-Zn : çökelti sertleşmesiyle dayanımı artar. 214-241 MPa dayanım değerleri ve %1-8 uzama görülür. Döküm yapılarda çökelti tane sınırlarında çekirdeklenir. Daha yavaş soğuyan alaşımlarda süreksiz $\beta(Mg_{17}Al_{12})$ fazı görülür.
- Mg-Zn ve Mg-Zn-Cu : tane sınırlarında dendritik $MgZn_2$ çökelti oluşur. Cu ilavesiyle bunlar lamelar morfolojiye dönüşür. Cu, ayrıca süneklik kazandırır.
- Mg-Zn-Zr ve Mg-RE-Zn-Zr : çinko katı çözelti sertleşmesine katkı sağlarken; zirkonyum ise tane inceltici olarak görev yapar. Döküm alaşımlarında porozite yatkınlığı ve yüksek çinko içeriği yüzünden kaynak kabiliyetlerinin düşük olması gibi etkenler endüstriyel kullanımlarını kısıtlamaktadır. Ce ve

Nd gibi nadir toprak elementleri, döküm kabiliyetini artırıp mikroporozite oluşumunu azaltmak için katılır [42].

3.4.2 Yüksek Sıcaklık Alaşımları

- Mg-Ag-RE : Gümüşün Mg-RE alaşımlarında çökelti davranışlarına olumlu etki yaptığı bulunmuştur. Gümüş ilavesiyle çökelti incilir. QE serisinin de yüksek sıcaklık dayanımı ve sürünme direnci yüksektir.
- Mg-Y-RE : 300 °C'ye kadar mukavemetini korur ve iyi bir sürünme davranışı gösterir. Dezavantajı itriyumun pahalı olması, oksijene afinitesinin yüksek olması ve yaklaşık 1500 °C derecede ergimesi sebebiyle alaşımlanmasının zor olması.
- Mg-Ag-Th-RE-Zr : Toryum, yüksek sıcaklık özelliklerini geliştirir, tane inceltir fakat radyoaktiftir. Bu sebeple alaşımın ticari olarak kullanımı sınırlıdır [42].

RE : E grubunu temsil eden elementler. Rare Earth kelimelerinin baş harflerinden oluşur.

3.5 Magnezyumun Kullanım Alanları

Magnezyum, hafif olmasından dolayı otomotiv ve havacılık sektöründe çok tercih edilen bir malzemedir. Düşük dayanımı alaşımlama ile artırılıp korozyon davranışı da birtakım yüzey işlemleri ile geliştirilmiş bir alaşım, pekçok sektör için arzu edilen bir malzeme haline gelir. Otomobillerde tekerlekler, debriyaj gövdesi, koltuk kızıkları, kapı içi koruyucu kirişler, şanzıman gövdesi, iç kapı kolları, araç ön paneli, far mesnedi, motor blokları, aktarma organları, jant, silindir kapağı, direksiyon gibi bölümlerde kullanılır [13,16].

Çizelge 3.3 : Çeşitli otomobil firmalarının kullandıkları magnezyum parçalar [13].

Şirket	Parça	Araç	Alaşım
Ford	Debriyaj yuvaları, yağ karteri, direksiyon kolunu	Ranger	AZ91HP
	Manuel transmisyon kutusu gövdesi	Bronco	AZ91D
General Motors	Valf kapakları, hava filtresi, debriyaj pedalı	Corvette	AZ91HP
	Fren pedalı, debriyaj pedalı	Pontiac	AZ91D
	Direksiyon kolunu braketleri	Pontiac	AZ91D

Chrysler	Destek braketleri, yağ karteri Direksiyon kolunu	Jeep LH	
Mercedes-Benz	Destek braketleri, yağ karteri Koltuk iskeleti	Viper 500SL	AM20/50
Honda	Silindir kapakları Tekerlekler	City Prelude	AZ91D AM60B
Toyota	Direksiyon simidi Silindir bloğu, yağ pompası, kam mili kapağı	Lexus Quad 4	AM60B ZE41A

Havacılık sektöründe helikopter şanzıman kutuları, koltukları ve pedallarında, yakıt ve hidrolik depolarında kullanılır. Elektronik sektöründe taşınabilir elektronik ve haberleşme cihazlarında (cep telefonları, dizüstü bilgisayarlar, kameralar) kullanılır. Bisiklet gövdesi yapımında kullanılır [14,15].

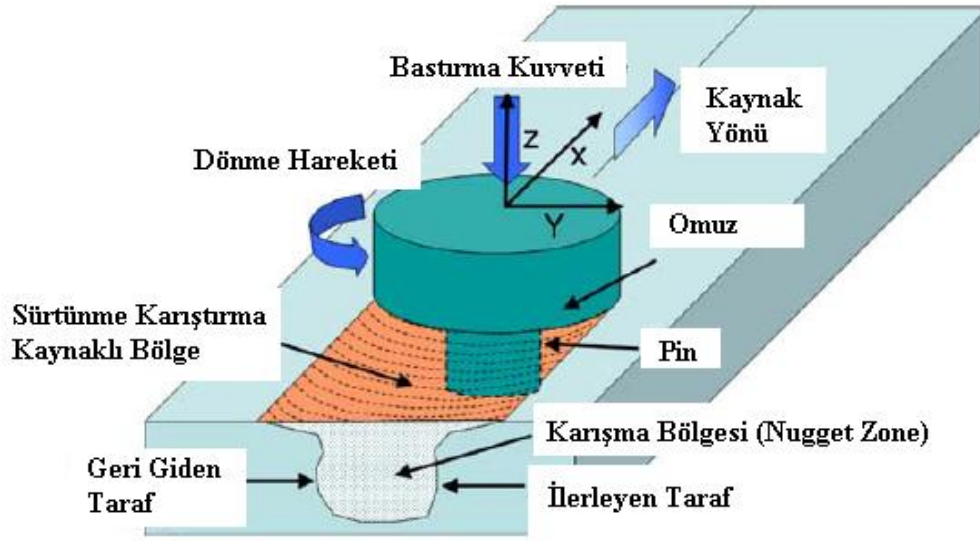
4. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI (SKK)

Sürtünme karıştırma kaynağı, 1991 yılında İngiltere’de TWI (The Welding Institute) tarafından geliştirilmiştir. SKK, düşük ergime dereceli metaller ile ergitme kaynağı vasıtasıyla birleştirilmesi güç olan metallerin kaynağı için geliştirilmiş olan bir katı hal kaynak yöntemidir. Düşük ısı girdisi sayesinde ITAB’ta, ergitme kaynaklarında görülen olumsuzluklara bu yöntemde pek rastlanılmaz. Düşük distorsiyon, yüksek boyutsal kararlılık, ince tane yapısı, çatlaksız kaynaklar, koruyucu gaz ve elektrod gibi sarf malzemelerine gerek duyulmaması, düşük enerji girdisi kullanılması gibi pekçok avantajı vardır. Enerji verimliliği yüksek ve çevreye oldukça duyarlı bir yöntemdir. SKK’yi sınırlayan iki faktör vardır. Bunlardan birincisi dizayn sınırlamasıdır. Bazı köşe ve T kaynaklarında SKK yetersiz kalabilmektedir. İkincisi ise levha kalınlığıdır. Çok kalın levhalarda homojen ısı dağılımı olmadığından sağlıklı bir birleştirme söz konusu olmaz. Prosesin yavaş olması da dezavantaj olarak sayılabilir.

Her kaynak yönteminde olduğu gibi iş parçalarının temizliği çok önemlidir. Kaynak sırasında yüzeyden içeriye doğru gidebilecek herhangi bir pislik, partikül, yağ vs kullanım sırasında beklenmeyen bir hasara yol açabilir [2,17,18].

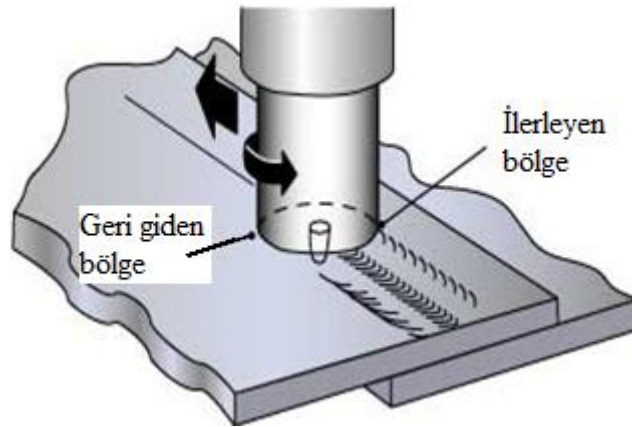
4.1 SKK’nin Özellikleri ve Mekanizması

SKK özel olarak tasarlanmış bir omuz ve uç vasıtasıyla yapılır. Kaynaklanacak malzemeler, bir araya getirilip titreşimden ve uç hareketlerinden etkilenmemesi için sabitlenir. Sabitleme işleminin ardından kaynağı yapacak uç dairesel hareketine başlar. Uç, metallerin üzerine daldırılarak işlem başlar. Metalleri deldikten sonra dairesel hareketine devam ederek kaynak çizgisi boyunca ilerlemeye başlar. Uç dönerek ilerledikçe hem malzemeleri ısıtır hem de karıştırır. Isınan malzemeler daha kolay karışır, bu da birleşmeyi sağlar. Bu hareket sırasında sürtünmeden kaynaklanan ciddi bir ısı çıkışı olur. Ayrıca malzemelere dışarıdan da ısı verilerek karışma sırasında daha kolay plastikleşmesi sağlanır. Aşırı plastik deformasyon ve metal akışı gözlenir [19].



Şekil 4.1 : Sürtünme Karıştırma Alın Kaynağı Şematik Gösterimi [2].

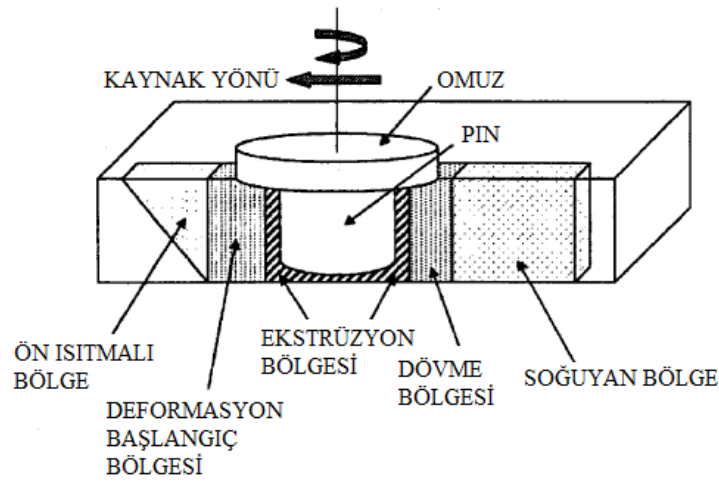
Takımın dairesel hızının vektörünün, kaynak yönü ile aynı olduğu yer ilerleyen taraf, hücum kenarı, ilerleme tarafı gibi isimlerle adlandırılır. Takımın dairesel hızının vektörünün, kaynak yönüne ters olduğu yer geri giden taraf, gerileme tarafı, firar kenarı şeklinde adlandırılır. Karıştırma işini pin yapar, omuz ise malzeme yüzeyinde basma kuvveti oluşturur.



Şekil 4.2 : Sürtünme Karıştırma Bindirme Kaynağı Şematik Gösterimi [43].

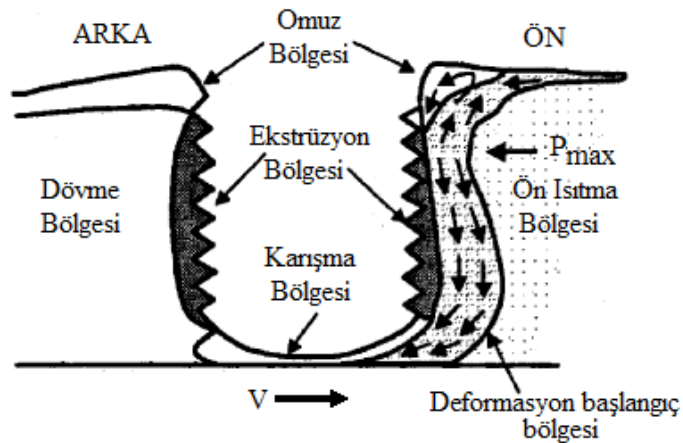
4.2 Metal Akışı ve Kaynak Mikroyapısı

SKK sırasındaki metal akışı oldukça komplike bir hadisedir. Metal akışının ve deformasyonun anlaşılabilmesi için birçok model öne sürülmüştür. Bu modellere tek tek girmeden genel olarak anlatmak gerekirse, metal akışı birden fazla bağımsız parametreye bağlıdır. Bu parametreleri şöyle özetleyebiliriz; takım geometrisi (pin ve omuz tipi ve büyüklükleri), kaynak parametreleri (takımın devir hızı, ilerleme hızı, dönüş yönü, takımın metale batma derinliği, takım açısı), malzeme cinsi, malzeme sıcaklığı vb. [2]



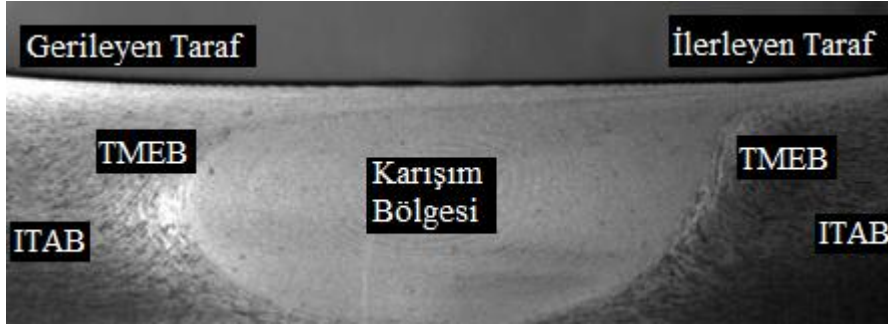
Şekil 4.3 : Kaynaklanan metalin kesitten şematik görünümü [2].

Kaynak sırasında takımın; malzemeye ilk buluştuğu yere deformasyon başlangıç bölgesi, malzemeyi karıştırdığı bölgeye ekstrüzyon bölgesi adı verilir. Takım ilerleyip ekstrüzyon bölgesini geçtiği zaman, bu bölümün adı dövme bölgesi adını alır.



Şekil 4.4 : Kaynak sırasında takımın çevresinde görülen metal akış paterni [2].

Kaynak mikroyapısına bakacak olursa geleneksel yöntemlerde olduğu gibi ısıdan etkilenen bölgeler mevcuttur fakat ısı girdisi az olduğu için daha az dönüşüm gerçekleşir.



Şekil 4.5 : SKK sonrası kesitten bakılan numune üzerinde kaynak bölgeleri [2].

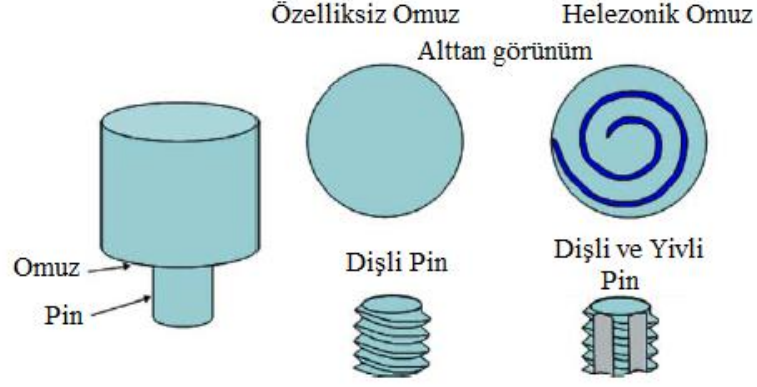
Karışım bölgesi ve civarında dinamik yeniden kristallenme gerçekleşir. Bu nedenle dislokasyon yoğunluğu düşüktür ve ince yönlenmiş tanelere rastlanır. TMEB (Termo mekanik olarak etkilenen bölge)'de ana metalin tanelerinin kaynak merkezinden bu bölgeye ekstrüze edilmesiyle yoğun bir dövme bölgesi oluşmuştur. Uzamış ve yassılaştırmış taneler görülür. ITAB'ta ise deformasyona uğramamış, yalnızca ısıdan etkilenen taneler bulunmaktadır. Sıcaklığın yüksek olduğu yerlerde tane irileşmesi görülür [2,19].

4.3 SKK Parametreleri

SKK parametrelerini 3 ana başlıkta toplayabiliriz.

4.3.1 Takım Geometrisi

Takım geometrisi en önemli parametrelerden birisidir. Takımın iki tane işlevi vardır; lokal ısınmayı sağlamak ve karıştırma işini yapmak. Takım, omuz metale değene kadar metalin içine daldırılır. Sürtünme ile oluşan ısının büyük bir kısmı omuz ile iş parçasının temasından çıkar. Dişli ve yivli pinlerin karıştırmayı ve metal akışını kolaylaştırma, dövme bölgesine gönderilen metal miktarını azaltma, kaynak kuvvetini düşürme gibi faydaları vardır [2].



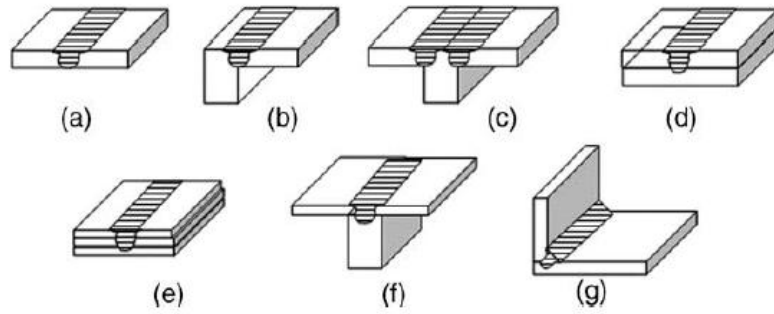
Şekil 4.6 : Takım geometrisinin şematik gösterimi [2].

4.3.2 Kaynak Parametreleri

Kaynak parametrelerine bakacak olursak burada iki önemli faktör vardır. Birincisi takımın rpm cinsinden dönüş hızı ve bu hızın yönü (saat yönü veya saat yönünün tersi), ikincisi ise takımın mm/dak cinsinden ilerleme hızıdır. Takımın dönüş hızı arttıkça daha fazla ısı çıkışı ve karışım sağlanır. Optimum dönüş hızı ve ilerleme hızı belirlenemezse kaynak hatalı olabilir. İlerleme hızının fazla seçildiği durumlarda metaller arasında boşluk kalabilir [2].

4.3.3 Kaynak Dizaynı

En çok uygulanan kaynak şekli alın (a) ve bindirme (d) tipi kaynaklardır. Bu tip kaynaklar için özel bir hazırlık gerekmez. Diğer birleştirme şekilleri de gerektiği takdirde uygulanır fakat alın ve bindirme kaynağına göre uygulanmaları biraz daha zordur [2].



Şekil 4.7 : SKK dizaynları [2].

4.4 SKK'nin Uygulandığı Malzemeler ve Bazı Kullanım Alanları

- Gemi inşasında; güverte, kenar, perde ve zemin panelleri, taşımacılık yapıları, yüzer yapılar vb.
- Tren üretiminde; yüksek hızlı trenler, tramvaylar, tanker ve vagonlar vb.
- Havacılık endüstrisinde; uçak kanat, gövde ve kuyrukları, yapı elemanları, yakıt tankları, roketler vb.
- Otomotiv endüstrisinde; motor yatakları, otobüsler, yakıt tankerleri, paletli zırhlı araçlar, karavanlar, kamyon gövdeleri vb.

SKK'nin kullanıldığı yerlere örnek olarak verilebilir [20].

Alüminyum alaşımları, magnezyum alaşımları, titanyum alaşımları, bakır alaşımları, bu metallerin herhangi ikisinin bir arada kullanıldığı malzemeler, alüminyum matrisli kompozitler, termoplastikler, çelikler gibi malzemeler SKK ile kaynaklanabilir. Çelik ve diğer yüksek ergime dereceli malzemelerin kaynağında, 1000°C ve üzeri sıcaklıklara dayanabilen bir uç bulunması gerekir. Aksi takdirde uç da metal çiftlere kaynaklanan bir parça gibi davranmış olur [17].

Alüminyum ve magnezyum, havacılık endüstrisinde klasik kaynak yöntemleri göz önüne alındığında “kaynaklanamaz” veya “zor birleştirilebilir” sınıfındadır. Kaynak dışındaki birleştirme yöntemlerine bakılacak olursa; farklı malzeme kullanımı ağırlık artışına sebep olacak, perçin kullanılırsa ağırlık artışının yanısıra aralık korozyonu da görülecek, lehim beklenen mukavemeti vermeyecek, sert lehimleme ise bu malzemelerin ergime sıcaklıklarının üzerinde yapılacaktır. TIG veya laser kaynaklarıyla birleştirildiklerinde, kaynaklı parçanın çekme mukavemeti, ana malzemenin çekme mukavemetinin %50-60'ı kadar olabilmektedir. Ayrıca bu malzemelerin düşük sıcaklıklarda ergimesi ve poroziteye yatkın olması bu yöntemin çıkışını zorunlu hale getirmiştir [18].

Farklı zamanlarda yapılan birçok çalışmada alüminyumun ve magnezyumun sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesi incelenmiş; malzeme akışı, sertlik değişimleri, oluşan fazlar, intermetalikler gözlenmiş; kaynak parametreleri değiştirilerek hatasız kaynak yapma yolları denenmiştir.

Değişik devir ve ilerleme hızlarında yapılan çalışmalarda, kaynak sırasında oluşan bölgelerin büyüklükleri ve morfolojileri, intermetalik oluşumları farklı çıkmıştır.

Buna bağılı olarak da kaynaklı numunelerin çekme dayanımları ve uzama oranları değışkenlik göstermiştir [21,22].

Kaynak sırasında kısmi ergimeler söz konusu olduğunda ötektik reaksiyon sonucu $Al_{12}Mg_{17}$ intermetaliki ve magnezyumun ayrıştığı ve ana metallerdeki alaşım elementlerinin de yeni intermetalikler oluşturduğu 2007’de yapılan bir çalışmada gösterilmiştir [23].

2013’te yapılan bir çalışmada alüminyum ve magnezyumun sürtünme karıştırma alın kaynağı sırasında metal akışı değişik bir yöntemle incelenmiştir. Alüminyum ilerleyen kenara, magnezyum gerileyen kenara yerleştirilip kaynak ucu, kaynak çizgisinden alüminyum tarafına doğru 1 mm içeri yerleştirilmiştir. Kaynak sonrası ısıı işlemin mekanik özellikler üzerindeki etkisini görmek için 320°C’de 1, 2 ve 4 saat tutulmuştur. Malzeme akışını incelemek için uç etrafına 1 mm çapında elik toplar koyulup bunların kaynaktan sonra ne tarafa gittiği X ışınlarıyla tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre elik bilyelerin gerileyen taraftaki hareketi, ilerleyen taraftaki hareketine göre oldukça fazla çıkmıştır. Kaynak bölgesi incelendiğinde üst bölgede aşırı ekstrüzyon ve karışma görülürken, alt bölgeye doğru bu etki azalmıştır. Bu durumda malzeme akışının üstten alta doğru olduğu ortaya çıkmıştır. Üst bölgede daha yüksek sıcaklık görüldüğünden Al_3Mg_2 intermetaliki oluşmuştur. 4 saat ısıı işlem gören numunede $Al_{12}Mg_{17}$ intermetaliki oluşmuştur [1].

2010’da yapılan bir çalışmada 5052 serisi alüminyum ile AZ31 alaşımı sürtünme karıştırma alın kaynağı ile birleştirilip çeşitli karakterizasyonlar yapılmıştır. Birleştirme işlemi 6 mm çaplı pin ile yapılmıştır. Karışma bölgesinde alüminyumun ve magnezyumun dinamik rekristalizasyona uğradığı belirtilmiştir. Alınan sertlik profiline göre kaynak çizgisinin sağa ve sola doğru 3 mm’lik kısmında, yani pin çapı kadar bir bölgede sertlik değerleri, ana metalin sertlik değerlerinin birkaç katı çıkmıştır [24].

2003 yılında yapılan bir çalışmada alüminyum 5083 alaşımı ile AZ31B magnezyum alaşımı sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilip intermetaliklerle ilgili bir inceleme yapılmıştır. Elde edilen verilere göre $Al_{12}Mg_{17}$ intermetalikiinin oluşmaması için sıcaklığın, 437 °C’nin altında kalması gerektiği gösterilmiştir. Al-Mg ikili sistemine göre magnezyumun ağırlıkça %67 olduğu nokta, 437 °C’ye denk gelen ötektik noktadır. Bu sıcaklık geçildiği takdirde, ötektik bileşime yakın bir

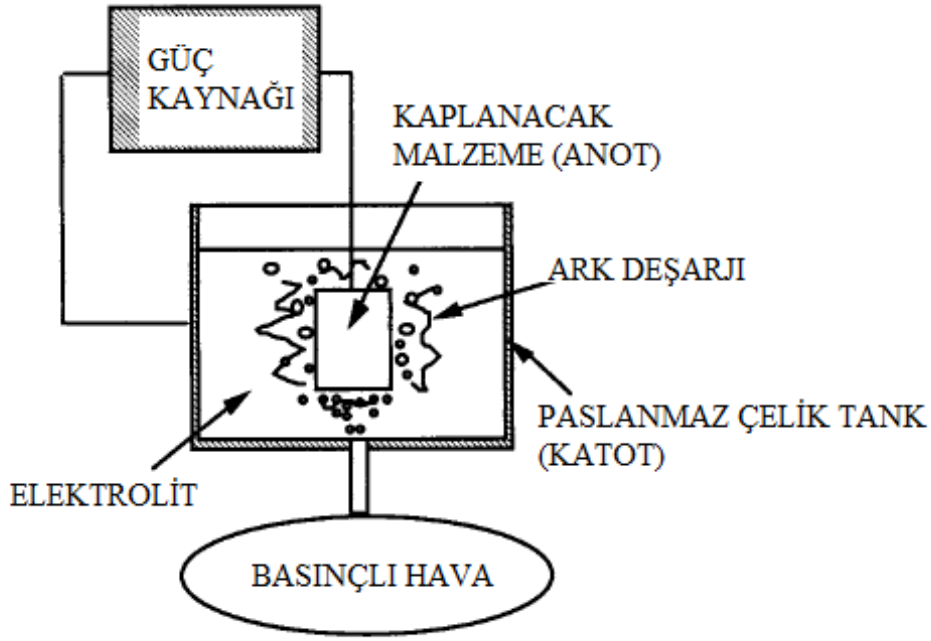
kompozisyona sahip kısmi ergime görülür. Kaynak sonrası soğuma işleminde lamelar ötektik ayrılma sonucu $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ ve magnezyum ürünleri ortaya çıkmaktadır [25].

5. MİKRO ARK OKSİDASYON

Mikro ark oksidasyon, 60'lı yılların sonlarında Sovyetler Birliği'nde bulunan bir kaplama yöntemidir. Bu yöntemle metale iyi tutunan, sert ve kalın seramik kaplamalar üretilir. Bu prosese çok çeşitli isimler verilmiştir, bu isimlerden bazıları şunlardır; kıvılcımlı anodik oksidasyon (spark anodizing), anodik kıvılcımlı biriktirme (anodic spark deposition), mikro ark anodik oksidasyon (micro arc anodizing), mikro plazma anodik oksidasyon (micro plasma anodizing), mikro plazma oksidasyon (micro plasma oxidation), plazma elektrolitik oksidasyon (plasma electrolytic oxidation), elektro plazma oksidasyon (electro plasma oxidation) [26].

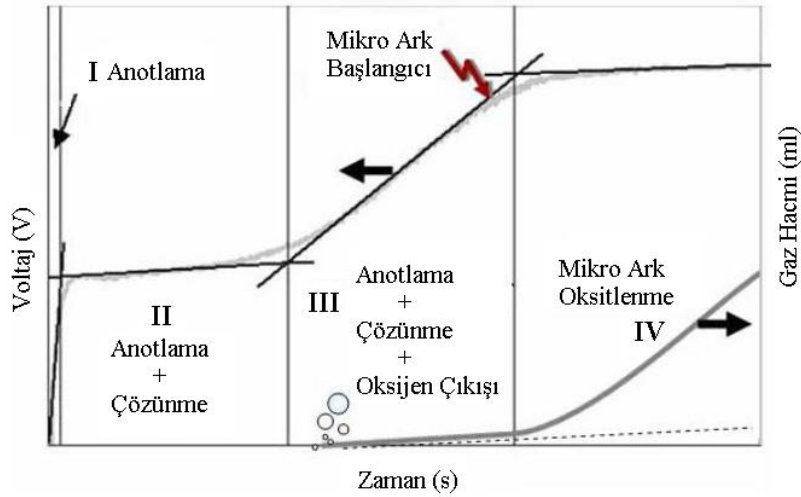
5.1 MAO Prosesi ve Mekanizması

MAO proesinde kaplanacak parça yüksek voltaj güç kaynağına bağlanır ve bazik çözelti içerisine daldırılır. Genellikle fostat, alüminat, silikat, borat, hidroksit gibi bazik çözeltiler kullanılsa da asidik çözelti içinde de denenmiş ve başarılı sonuçlar alınmıştır. Kaplama yapısını modifiye etmek için istenilen amaca göre metal oksitleri içeren ince tozlar, grafit, gümüş, çeşitli yağlayıcılar, teflon vb malzemeler katılabilir. Malzeme anot olarak, kaplamanın yapıldığı paslanmaz çelik tank katot olarak bağlanır. Proses başladığında metal yüzeyinde ark oluşumu sebebiyle çözelti ısınmaya başlar. Bu sıcaklık artışının önüne geçmek için soğutma sistemi kullanılır. İşlem genellikle 10 ila 60°C derece sıcaklık aralığında yapılır. Malzemeye negatif voltaj uygulandığı anda yüzeyde oksit filmi oluşmaya başlar. Bu, klasik anodik oksidasyon işlemidir. Uygulanan voltaj, belli bir kritik seviyeyi aştığı zaman ise metal yüzeyinde arklar oluşmaya başlar. Bu kritik voltaj seviyesine kritik bozulma voltajı (critical breakdown voltage) da denir. Yüzeyde oluşan arklarla oksit oluşumu başlar. Bu kritik voltaj seviyesi, elektrodun kutupsallığına, elektrod malzemesine ve elektrolit bileşimine bağlıdır. Ark oluşumu sırasında kıvılcımlardaki sıcaklık birkaç bin Kelvin'e çıkabilmektedir [3,4,27].



Şekil 5.1 : MAO düzeneği [28].

Mikro ark oksidasyon 4 ana safhadan oluşur. Bu safhalar sırasıyla anotlama; anotlama ve anodik çözünme; anotlama, anodik çözünme ve oksijen çıkışı; mikro ark oksidasyon şeklinde gösterilir.

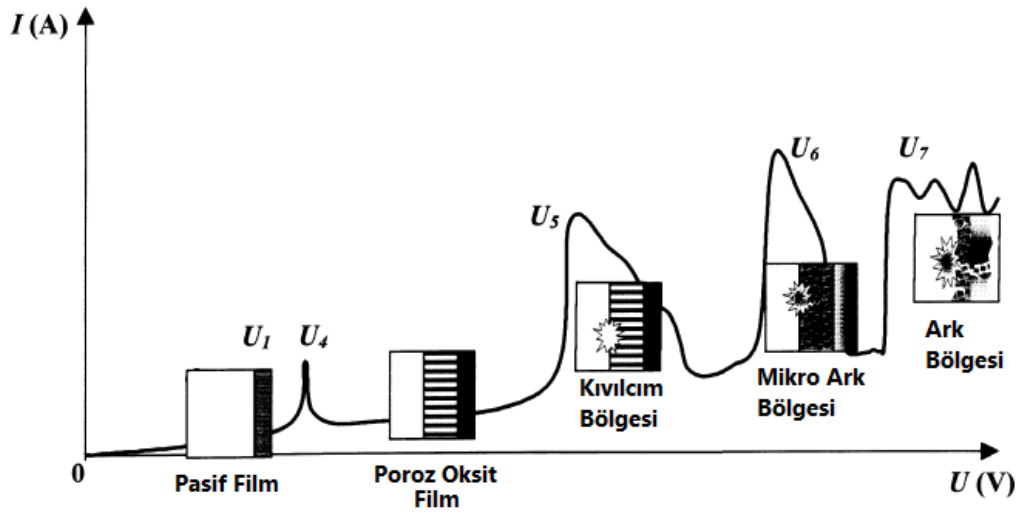


Şekil 5.2 : MAO safhaları [27].

Şekil 5.2’de I noktasına kadar pasif film oluşumu gözlenir. Sıradan anodizasyon işlemini I. bölge temsil eder. Daha sonra II. bölgeye geçiş ile bu pasif film çözünme ve tekrar oluşma eğilimine girer. II noktasında oksit film içerisindeki elektrik alan,

kritik seviyeyi aşar ve film kırılır. Bu sırada yüzeyden kıvılcımlar çıkmaya başlar ve bu kıvılcımlar, büyümeyi hızlandırır. III noktasında daha büyük arklar çıkmaya başlar ve III-IV arasında film kalınlaşmaya başlar. IV. bölgede ise mikro arkların gücü artar ve filmin termal olarak kırılmasına sebep olabilirler [27].

Yapılan çalışmalarda elde edilen veriler, kritik bozulma voltajı geçildiğinde arkların oluşmaya başladığını ve daha sonra da arkların büyüyerek kalın bir seramik film oluşturduğunu göstermektedir. Kaplama için seçilen voltaj ne kadar fazla olursa, kaplama kalınlığı da o kadar artış gösterir. Fakat bu kalınlık artışı her zaman olumlu sonuç vermez. Mikro ark oksidasyon işleminden sonra altlığa bağlı yoğun ve kompakt bir tabaka oluşurken bu tabakanın üzerinde ise gözenekli bir katman görülür. Şekil 5.3'teki kıvılcım bölgesinden itibaren bu yoğun tabaka oluşmaya başlar. Kaplama kalınlığını esas artıran ise, işlemin ileriki safhalarında oluşan gözenekli tabakanın büyümesidir. Triboloji testlerinde gözenekli tabakanın, kalınlığı ne kadar fazla olursa olsun, kompakt tabakaya oranla daha kötü bir aşınma davranışı sergilediği görülmüştür. Doğal olarak kalın fakat yapısal hatalar gösteren bir kaplama, ince ve daha az hataya sahip bir kaplamadan daha kolay korozyona uğrar [29,30,31].

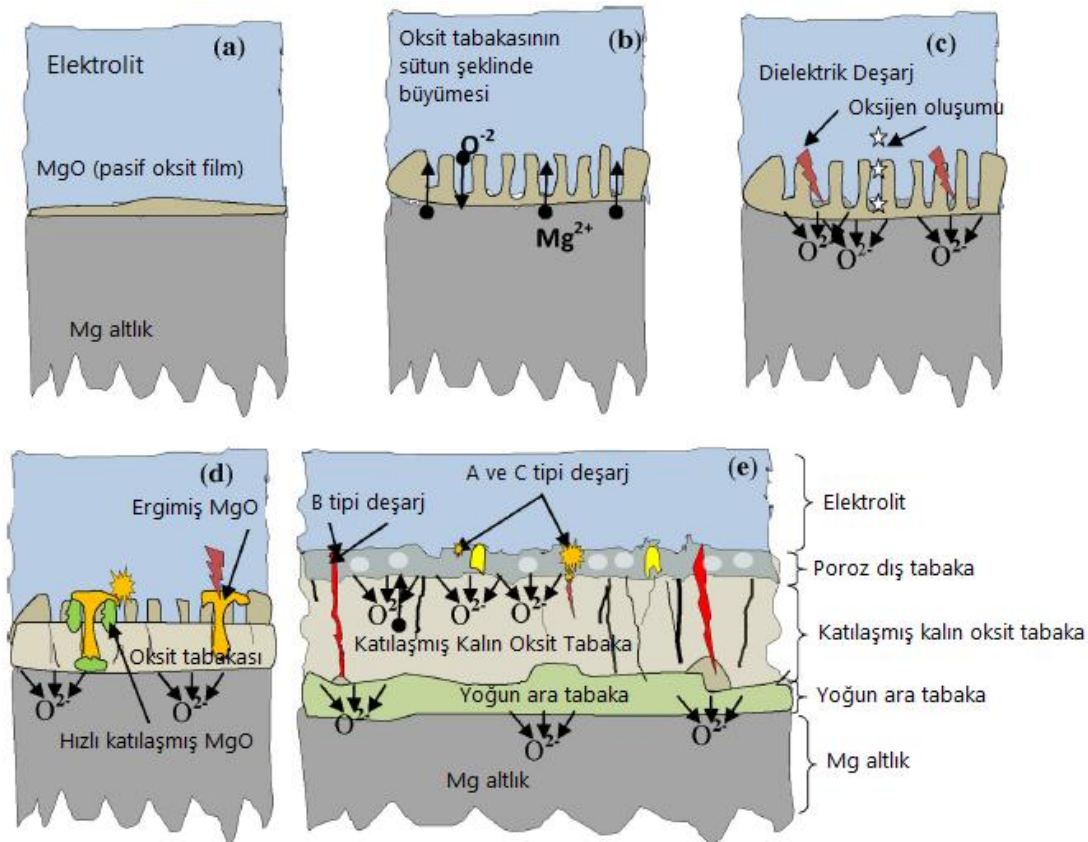


Şekil 5.3 : MAO sırasında gerçekleşen akım-voltaj değişimi [32].

Farklı işlem süreleri uygulanan bir çalışmada, süre artışıyla beraber poroz tabakanın kalınlığının arttığı ve bununla beraber sertliğin düştüğü belirtilmiştir. Bunun sebebi olarak ise farklı soğuma hızlarına bağlı olarak farklı fazların oluşması ve kimyasal bileşim farklılığı öne sürülmüştür [33,34].

Çözünmüş alkali (örneğin KOH) ve silikat (örneğin Na_2SiO_3) çözeltileriyle yapılan araştırmalar, kaplamadaki kompakt ve gözenekli tabakanın elektrolit konsantrasyonu ile alakalı olabileceğini göstermiştir. Homojen bir kaplama olması için alkali ve silikat konsantrasyonlarının dengeli olması gerektiği görülmüştür. Silikat konsantrasyonu artışı ile kompakt tabakanın arttığı; alkali konsantrasyonu artışı ile ark çıkışının yoğunlaştığı ve bunun da oksit tabakasını kısmi çözünmeye zorlaması sonucu gözenekli tabakanın büyüdüğü tespit edilmiştir [35].

Kompakt ve gözenekli tabaka oluşumu şekil 5.4'te aşama aşama gösterilmiştir.



Şekil 5.4 : Magnezyum üzerinde mikro ark oksidasyon işleminin gösterimi [36].

5.2 Mikro Ark Oksidasyon Uygulama Alanları

MAO, kalın seramik kaplama istenen uygulamalarda çokça kullanılır. Otomotiv endüstrisinde, uçak-uzay endüstrisinde, askeri uygulamalarda kendine birçok

kullanım yeri bulmuştur. Yüksek sıcaklık dayanımı gösteren kaplamalar, uzay araçlarında, mekiklerde ve roketlerde kullanılmaktadır.

Yüksek miktarda silisyum içeren ve magnezyum içeren alüminyum alaşımları geleneksel anodik oksidasyon işlemiyle iyi kaplanamadığı için bu yönetime ihtiyaç duyulur.

Güçlü asit ve bazlara olan dayanımından dolayı kimya ve gıda sanayide kullanılırlar. Sert ve kalın oksit tabakası sayesinde abrasif ve erozif aşınma görülen yerlerde kullanılırlar. Sürtünme katsayısının düşük olması da yağlama koşullarında kullanımı mümkün kılmaktadır. Oksit tabakası, yalıtkan bir film olarak elektrik ve elektronik bileşenler üzerlerinde kullanılırlar [27].

Mutfak eşyalarında, tıpta, implantlarda, robot yapımında, matbaa ve ambalaj sektöründe, mimari uygulamalarda kendine yer bulmuştur [26,37].

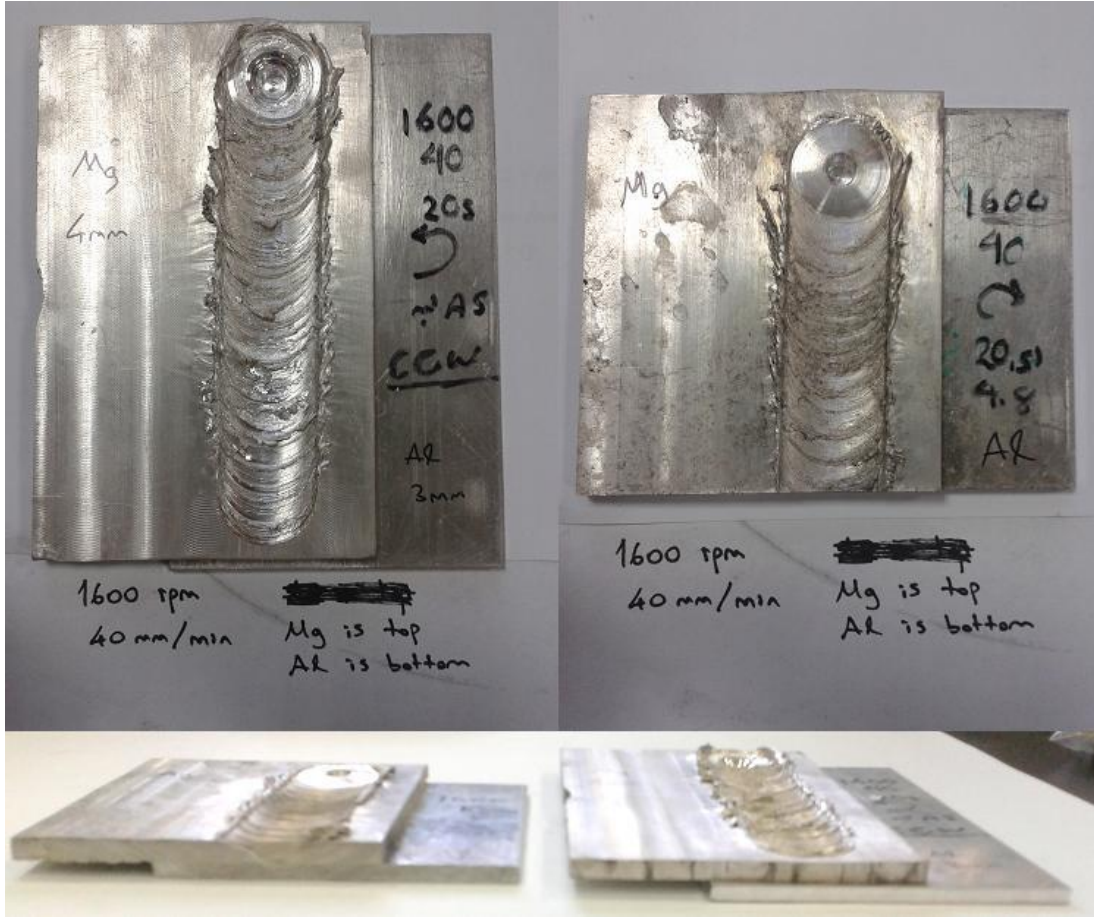
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1 Giriş

Bu çalışmada sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen saf alüminyum ve saf magnezyum plakaların, mikro ark oksidasyon ile kaplanabilirliği incelenmiştir. Mikro ark oksidasyon işleminde süre ve voltaj değişken olarak seçilmiştir. Kaplamalar yapıldıktan sonra numuneler SEM, XRD, EPMA, stereo mikroskop, optik mikroskop ve pürüzlülük cihazı ile incelenip kaplama işlemi için optimum değerler elde edilmeye çalışılmıştır.

6.2 Malzemeler

Bu çalışmada anot olarak sürtünme karıştırma kaynaklı numuneler kullanılmıştır. 3 mm' lik alüminyum plaka alta, 4 mm' lik magnezyum plaka üste gelecek şekilde kaynaklanan levhadan birer santimetrelik dilimler kesilerek kenarları tıraşlanmıştır. Kaynak sırasında takımın dairesel hızı 1600 rpm, takımın ilerleme hızı ise 40 mm/dak seçilmiştir. 7 mm yüksekliğinde ve 1 cm genişliğindeki numuneler, sırasıyla 500 ve 1000 numaralı SiC zımpara ile tüm yüzeyleri zımparalanıp saf su ve etil alkol ile yıkanıp mikro ark oksidasyon işlemine hazırlanmıştır.



Şekil 6.1 : Kaynaklı numune fotoğrafları.



Şekil 6.2 : Dilimlenmiş numune fotoğrafları.

6.3 Mikro Ark Oksidasyon İşlemi

MAO işlemi, 30 kV kapasiteli DC güç kaynağına sahip MAO cihazı ile yapılmıştır. Cihazın maksimum değerleri pozitif (+) 700 V ile negative (-) 300 V' tur.

Kaplama işlemi için biri sabit süre-değişken voltaj, diğeri sabit voltaj-değişken süre olmak üzere iki grup belirlenmiştir. 5 dakikalık süre için; 450/90 V, 500/100 V, 550/110 V ve 600/120 V uygulanmıştır. 500/100 V değeri için; 2 dak, 5 dak, 10 dak ve 20 dak süreli kaplama yapılmıştır.

Elektrolit olarak 3 g/L KOH ve 10 g/L Na₂SiO₃ karışımı kullanılmıştır. Katot malzemesi olarak paslanmaz çelik tank kullanılmıştır. Yapılan ön deneylerde düşük frekanslarda başarılı kaplama elde edilememiştir. Bu nedenle MAO işlemleri 1000 Hz frekans değerinde gerçekleştirilmiştir (pozitif yönde vuruş süresi 100 µs, negatif yönde vuruş süresi 100 µs, pozitif ve negatif arasında bekleme süresi 400 µs).

Çizelge 6.1 : Kaplama için belirlenen voltaj ve süre değerleri.

Voltaj Kontrollü	Süre Kontrollü
450-90 V 5 dak	2 dak 500-100 V
500-100 V 5 dak	5 dak 500-100 V
550-110 V 5 dak	10 dak 500-100 V
600-120 V 5 dak	20 dak 500-100 V

6.4 Karakterizasyon Çalışmaları

Mikro ark oksidasyon prosesinin ardından kesitten yapılan karakterizasyon çalışmalarında, numuneler elmas kesici ile kesilip yüksek sıcaklık ve basınç altında epoksi reçine içine alınmıştır. Epoksi reçine alınan numuneler, SiC içeren 500-1000-1200-2500 numaralı zımpara kağıdı ile aşındırılıp daha sonra sırasıyla, 3µm ve 1µm elmas partikül içeren sıvılarla çuha üzerinde parlatılmıştır.

Optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskop ile kaplama yüzeyi ve numune kesidi incelenmiş; X-ışınları analizi, yüzey pürüzlülüğü, EPMA ve kaplamasız numunenin sertlik testlerini içeren karakterizasyon çalışmaları yapılmıştır.

6.4.1 Yüzey ve Kesit İncelemeleri

Yüzey ve kesit incelemelerinde EDS donanımlı Hitachi TM-1000 marka taramalı elektron mikroskobu ile Leica marka optik mikroskop ve yine Leica marka stereo mikroskop kullanılmıştır.

6.4.2 X-ışınları Analizi

X-ışınları analizi (GBC, MMA 027) 28,5 mA ve 35 kW güç değerlerinde $\text{CuK}\alpha$ tüp kullanılarak 10° - 90° arasında $2^\circ/\text{dak}$ 'lık artışlar ile gerçekleştirilmiştir.

6.4.3 Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri

Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri, Veeco Dectac 6000M marka profilometrede 5 mg yük altında, numune yüzeyinde 2000 μm tarama yapılarak gerçekleştirilmiştir.

6.4.4 Sertlik Ölçümleri

Sertlik ölçümü yalnızca kaplamasız numune için yapılmıştır. Ölçümler, 200 gram kullanılarak micro vickers yöntemi yapılmıştır.

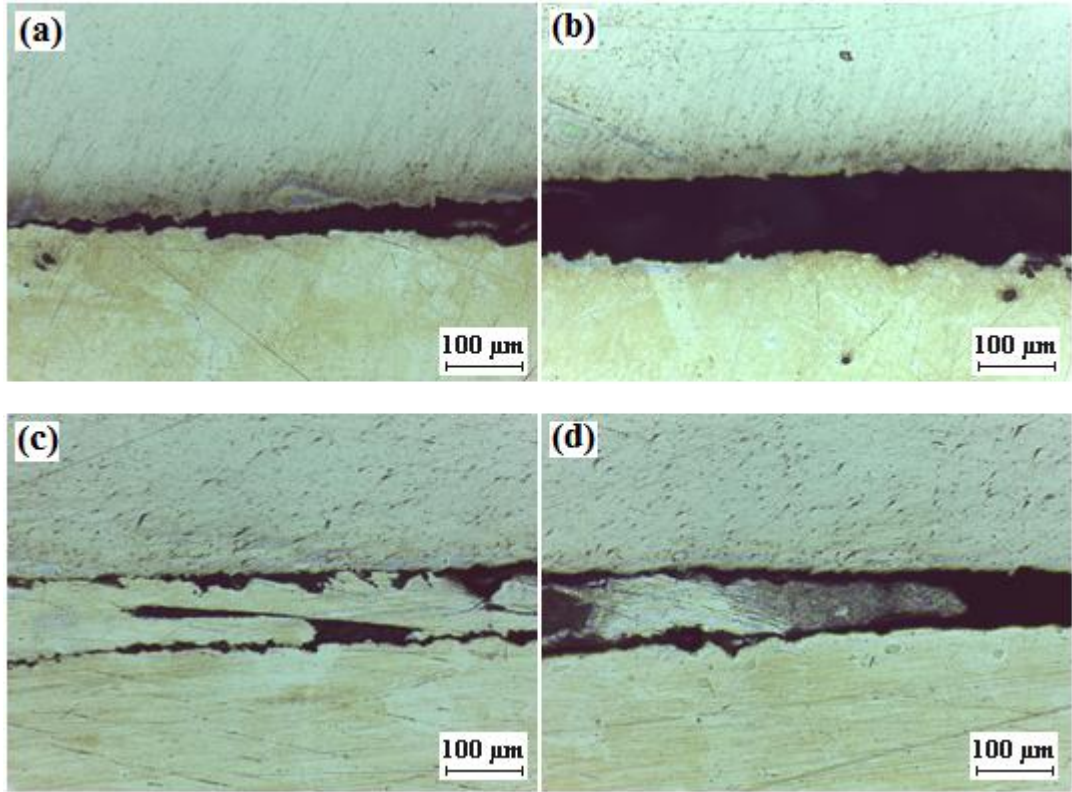
6.4.5 EPMA (Electron Probe Micro-Analyzer) Analizi

EPMA testi, kaplamadan sonra atomların yoğunlaştıkları bölgeleri görmek ve elementel dağılım hakkında fikir sahibi olmak için, numune yüzeyini tarayarak yapılmıştır.

7. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

7.1 SKK İle Birleştirilmiş Al-Mg Sisteminin İnceleme Sonuçları

Optik mikroskop ile, yalnızca kaplamasız numunelerde alüminyum ve magnezyumun kaynak sonrası birbirine ne kadar bağlandığı, arayüzeydeki süreksizlikler, kaynak bölgesi gibi pek çok durum ve bölge incelenmiştir. Birleşme bölgesi boyunca bakılan numunelerde değişik bölgeler tespit edilmiştir ve birçok bölgede birleşmenin mükemmel olmadığı görülmüştür. Bazı bölgelerde birbirine yapışması gereken metallerin arasında hayli büyük aralıklar saptanmıştır.

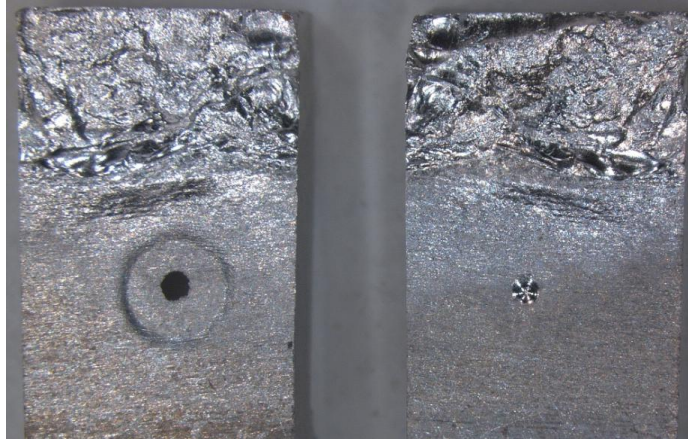


Şekil 7.1 : (a-d) Alüminyum-magnezyum sisteminin farklı birleşme bölgelerine ait optik mikroskop fotoğrafları.

Bunların sebebi incelendiğinde şu sonuçlar karşımıza çıkmıştır; kaynak yapılmadan önce metal plakaların yüzey temizliği yeteri kadar iyi gerçekleştirilmemiş olabilir. Metallerin arasına pas, kir, hidrokarbon vb kalıntılar kaynak sırasında sıkışmış

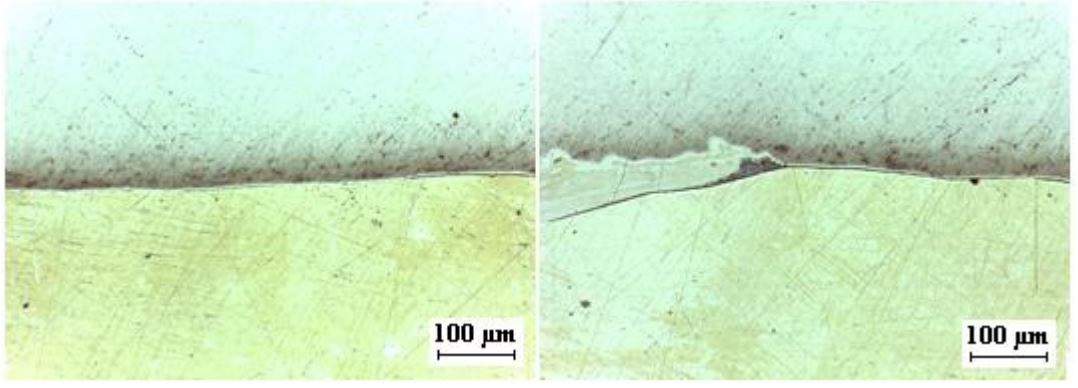
olabilir. Metaller oksitli haldeyken kaynak yapılmış olabilir. Oksit tabakası mekanik etkiyle kırılıp plakaların arasına girmiş ve orada kalmış olabilir. Kaynak sırasında açığa çıkan enerji pek yüksek olmadığı için bu oksitlerin çözünme ihtimali de çok azdır. Ayrıca takımın dönüş hızı ve ilerleme hızı çok fazla ise metallerin arasında hava sıkışma olasılığı da bulunmaktadır.

Alüminyum-magnezyum sistemi, birleşmenin tam olmadığı bu bölgelerden küçük bir mekanik etki ile birbirinden ayrılmıştır. Ayrılan parçaların stereo mikroskop resimleri çekilmiş (Şekil 7.2) ve bu ayrılma yüzeylerinde XRD analizleri yapılmıştır. Stereo mikroskop incelemeleri birleşme bölgesinin küçük olduğunu ortaya çıkarmıştır. Şekil 7.2’de görüldüğü üzere kaynaklı bölgenin uzunluğu, numune uzunluğunun neredeyse üçte biri kadardır. XRD analiz sonuçlarına göre bu yüzeylerde, kaynak işleminin bir sonucu olarak Al_3Mg_2 ve $Al_{12}Mg_{17}$ intermetalikleri oluşmuştur.



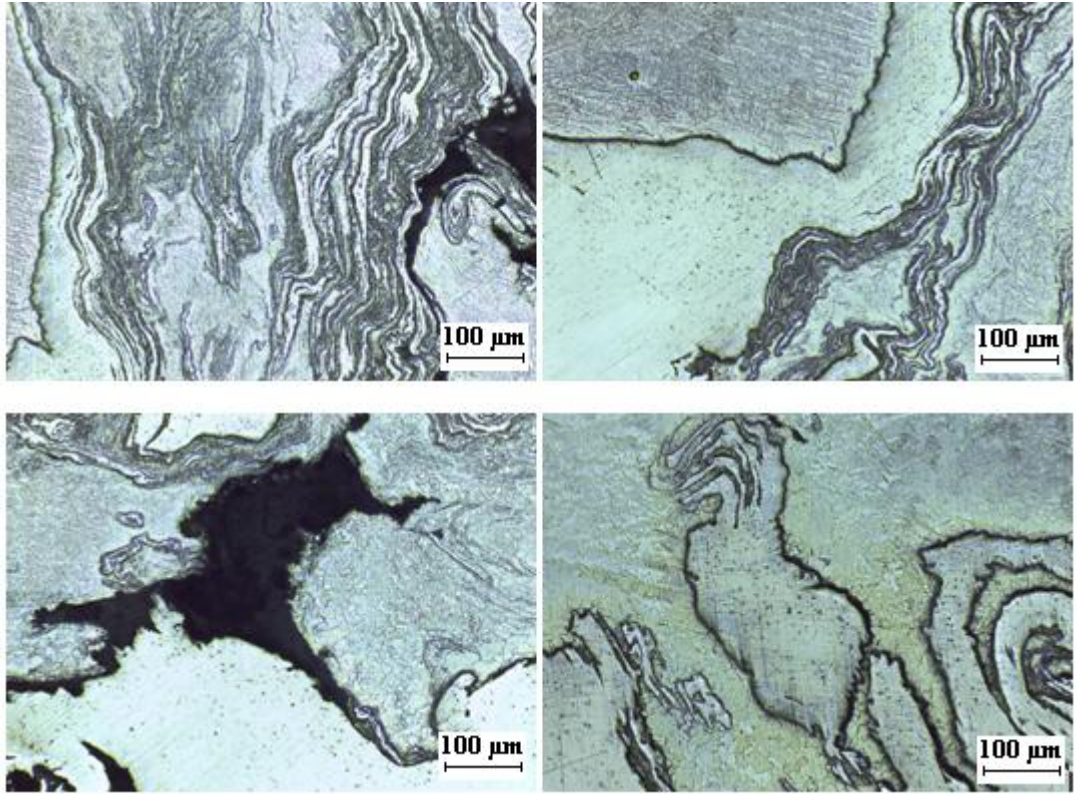
Şekil 7.2 : Ayrılan yüzeylerden alınan stereo mikroskop resimleri.

Şekil 7.3’te kaynak bölgesinin dışında kalan yerler gösterilmiştir. Bu bölgeler her ne kadar birbirine kusursuz bağlanmış gibi gözükse de, bu bağlanmanın tek sebebi kaynak sırasında uygulanan sıcaklık ve basınçtır. Kaynak bölgesi zedelendiği zaman bu bölgelerin ne kadar kolay ayrılabilceği tecrübe edilmiştir. Çünkü o bölgede malzemeleri tutacak bir kuvvet bulunmadığı gibi herhangi bir karışım da görülmez.



Şekil 7.3 : Birbirine sıcaklık ve basınç etkisiyle bağlanan bölgeler.

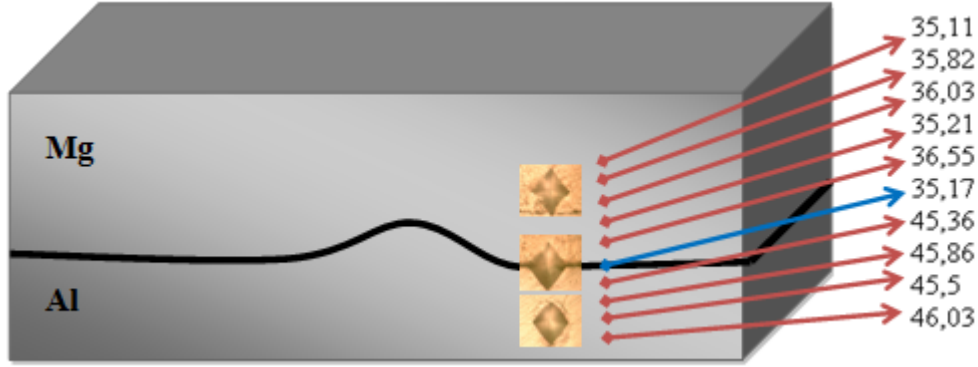
Birleşmenin tam olduğu bölgeye doğru gelindiğinde ise Şekil 7.1’den bambaşka bir mikroyapı ortaya çıkmıştır (Şekil 7.4). Karışmanın etkisiyle yoğun bir metal akışı ve birbirinin içine geçmiş metal paternleri görülmektedir. Bu etkileyici şekillerin arasında görülen boşlukların oluşma sebebin de yukarıdakilerle aynı olduğu düşünülmektedir.



Şekil 7.4 : Kaynak bölgesindeki metal akışı.

Metalleri birbirlerine bağlayan şey, bu metal akışıdır. Geri kalan bölgeler birbirine yalnızca sıcaklık ve basınç etkisiyle bağlanmıştır.

Birleşme bölgesi boyunca alınan optik mikroskop resimlerinden sonra kaplamasız numuneden sertlik değerleri alınarak sertlik profili oluşturulmuştur (Şekil 7.5). Sertlik ölçümü, micro Vickers yöntemiyle yapılmış olup 200 gram yük kullanılmıştır. Yalnızca kaplamasız numunedeki sertlik profili oluşturulup metallerin alaşımsız ve herhangi bir işleme tabi tutulmadıklarını göstermek amaçlı yapılmıştır.

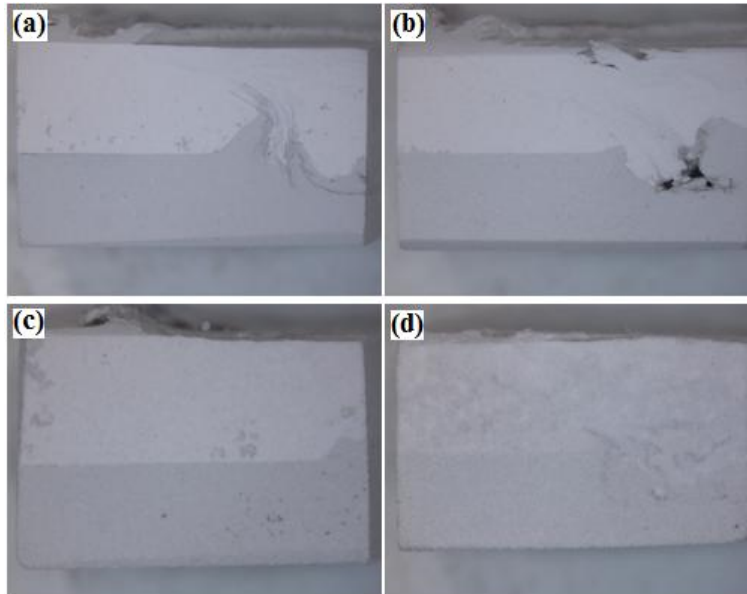


Şekil 7.5 : Kaplamasız numunenin sertlik profili.

7.2 MAO Uygulanmış Al-Mg Sisteminin İnceleme Sonuçları

7.2.1 Voltaj Kontrollü Kaplama Sonuçları

SKK yöntemiyle birleştirilen Al-Mg sistemine ait numuneler 5 dakika süre ile 450 ila 600V aralığında MAO işlemine tabi tutulmuş olup kaplama sonrası yüzey görünümleri Şekil 7.6’te görülmektedir.

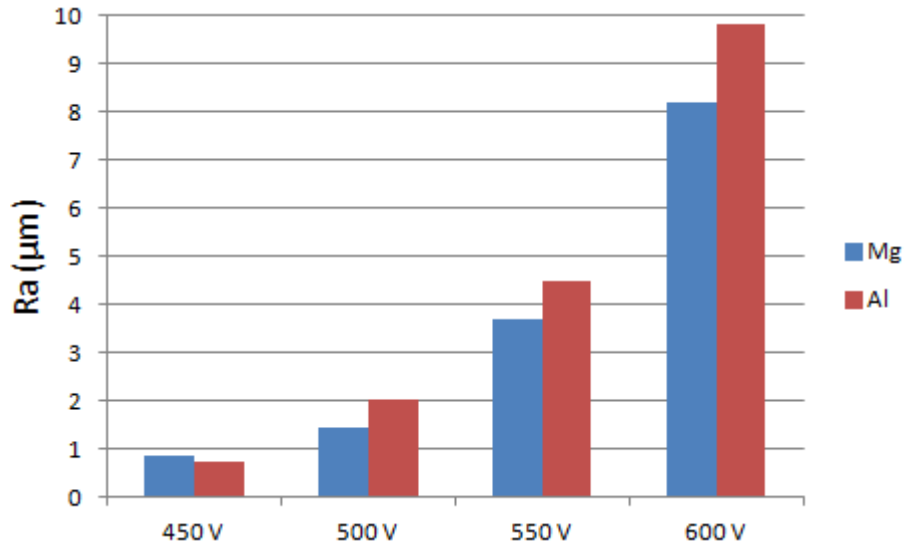


Şekil 7.6 : Voltaj kontrollü grubun stereo mikroskop resimleri (a) 450 V, (b) 500 V, (c) 550 V, (d) 600 V.

Voltaj arttıkça ark oluşumu da daha şiddetli bir şekilde gözlenmiştir. Hatta o kadar yoğun ark çıkışı olmuştur ki, paslanmaz çelik tankın içi aydınlanmıştır. Bu aşamada kaplama kalınlığı ve pürüzlülük artışı hız kazanır. Görüldüğü gibi 600 Volt'a gelindiğinde birleşme çizgisinin bile kaybolduğu dikkat çekmektedir.

Kaplamalı numunelerde hem alüminyum hem magnezyum üzerinden ortalama pürüzlülük ölçümleri alınmıştır. Bu değerlerin voltaj ve süre etkisi ile nasıl değiştiğine ve diğer yapılan test ve analiz sonuçları ile arasında bağlantı olup olmadığına bakılmıştır.

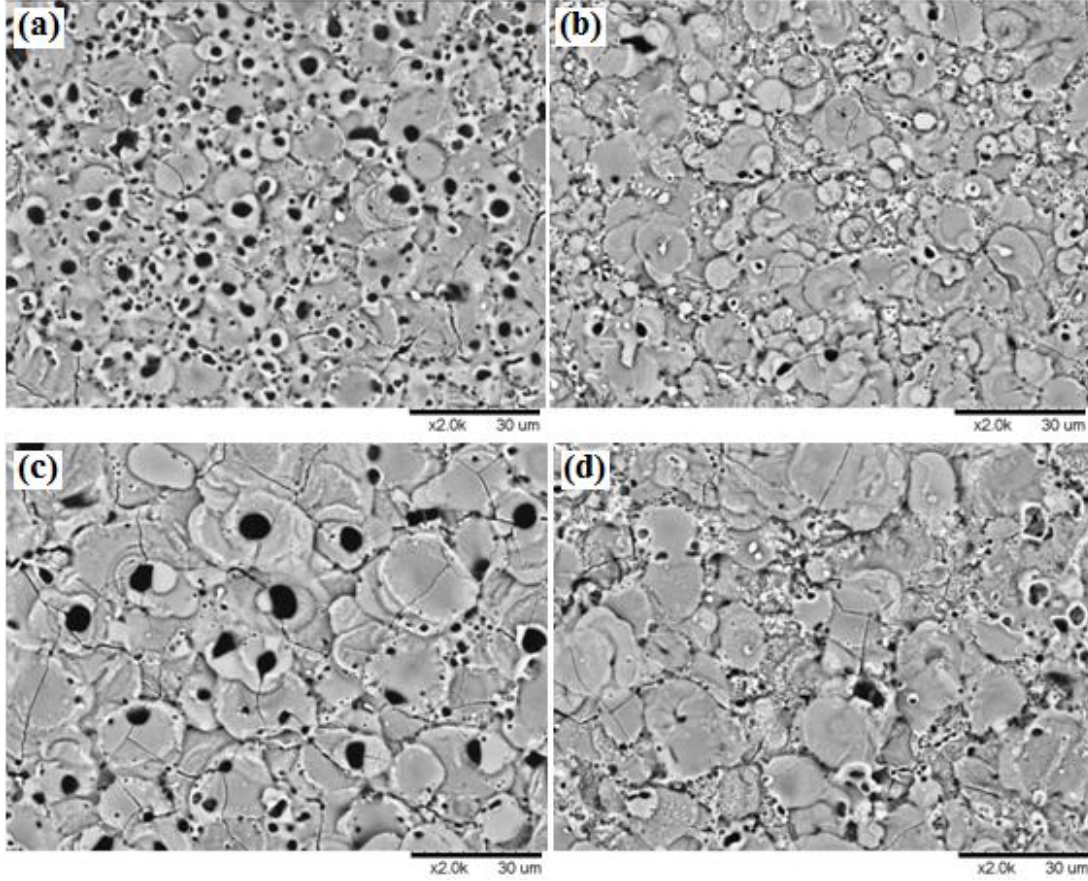
Yüzey pürüzlülük değerleri, Şekil 7.7'da gösterildiği gibi voltaj artışıyla hızlı bir artış göstermiştir. Buna sebep olan faktör, Şekil 5.4'te şematik olarak anlatıldığı gibi kompakt tabakanın üzerinde bulunan poroz tabakanın çok hızlı bir şekilde büyümesidir. Kaplamadan önceki ortalama pürüzlülük değerleri alüminyum için 0,55 μm , magnezyum için 0,23 μm ölçülmüştür.



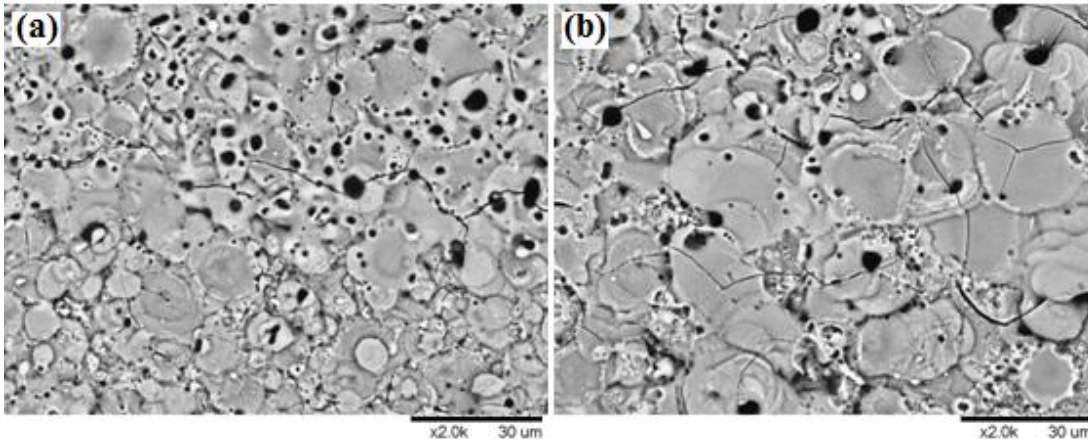
Şekil 7.7 : Voltaj kontrollü grubun ortalama yüzey pürüzlülük (R_a) değerleri.

Daha sonra bu numunelerin kaplama yüzeylerinden 2000 büyütme ile hem alüminyum tarafından hem magnezyum tarafından hem de birleşme bölgesinden taramalı elektron mikroskobu ile resimler alınmış ve bu resimler üzerinden pürüzlülük değerleri, krater oluşumu, por miktarı, büyüklüğü ve dağılımı ilişkileri kurulmuştur.

Şekil 7.8’de sırasıyla 450 V ve 500 V ile kaplanan numunelerin magnezyum ve alüminyum taraflarının elektron mikroskobu görüntüleri verilmiştir. Şekil 7.9’da ise bu numunelerin arayüzey resimleri verilmiştir.

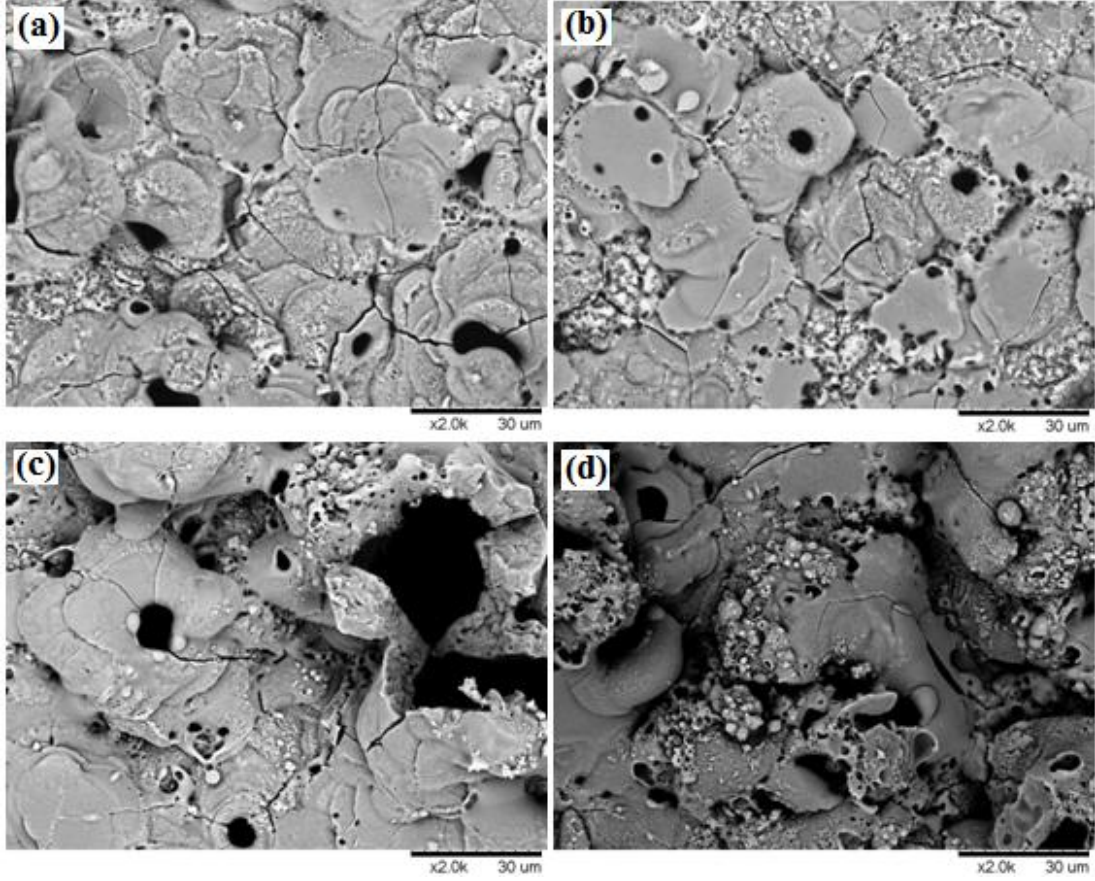


Şekil 7.8 : 450 V ile kaplanan numunenin (a) magnezyum, (b) alüminyum tarafı; 500 V ile kaplanan numunenin (c) magnezyum, (d) alüminyum tarafı.

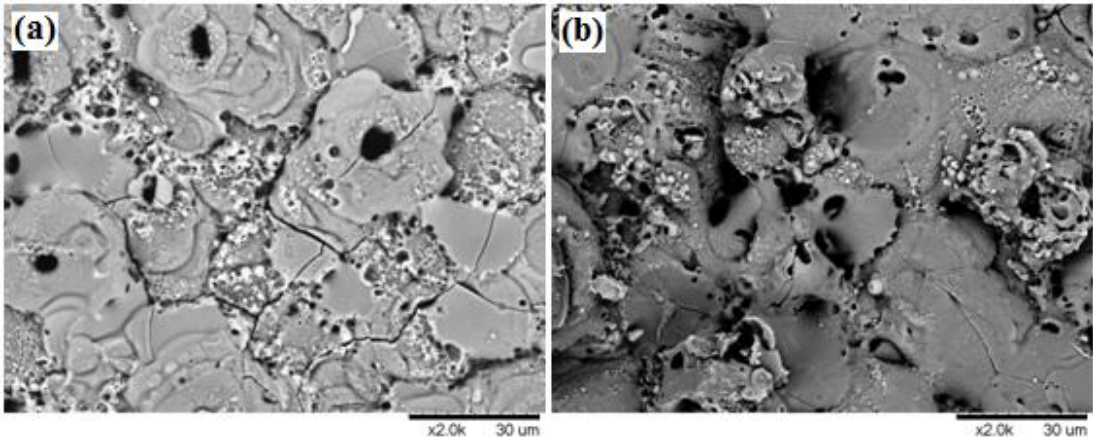


Şekil 7.9 : (a) 450 V ile kaplanan numunenin birleşim yeri, (b) 500 V ile kaplanan numunenin birleşim yeri.

Şekil 7.10’da sırasıyla 550 V ve 600 V ile kaplanan numunelerin magnezyum ve alüminyum taraflarının elektron mikroskobu görüntüleri verilmiştir. Şekil 7.11’de ise bu numunelerin arayüzey resimleri verilmiştir.

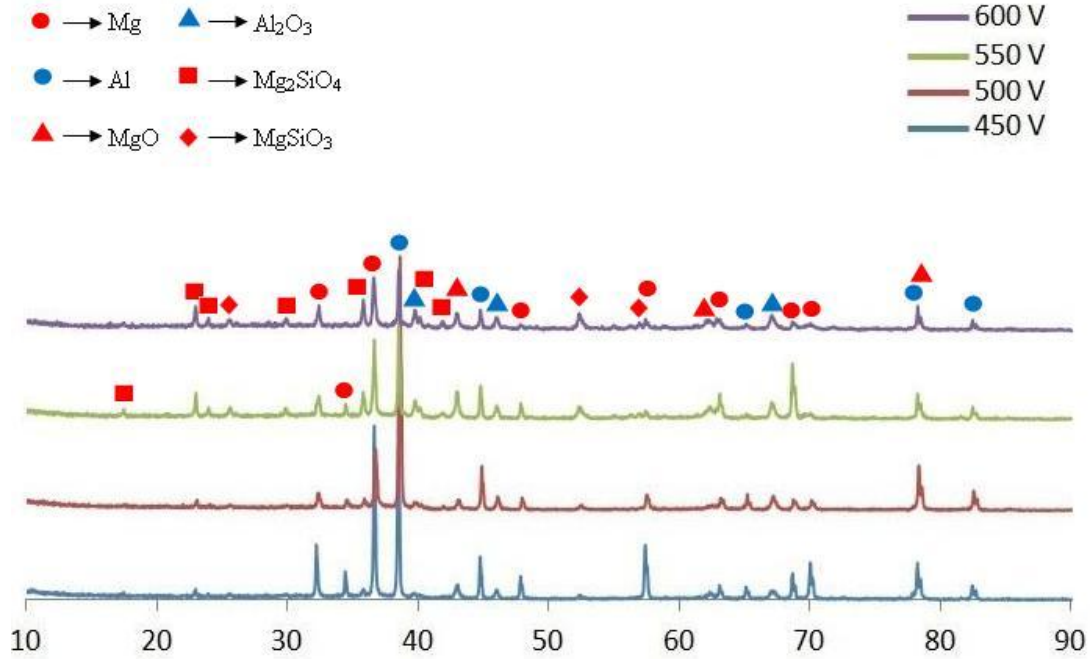


Şekil 7.10 : 550 V ile kaplanan numunenin (a) magnezyum, (b) alüminyum tarafı; 600 V ile kaplanan numunenin (c) magnezyum, (d) alüminyum tarafı.



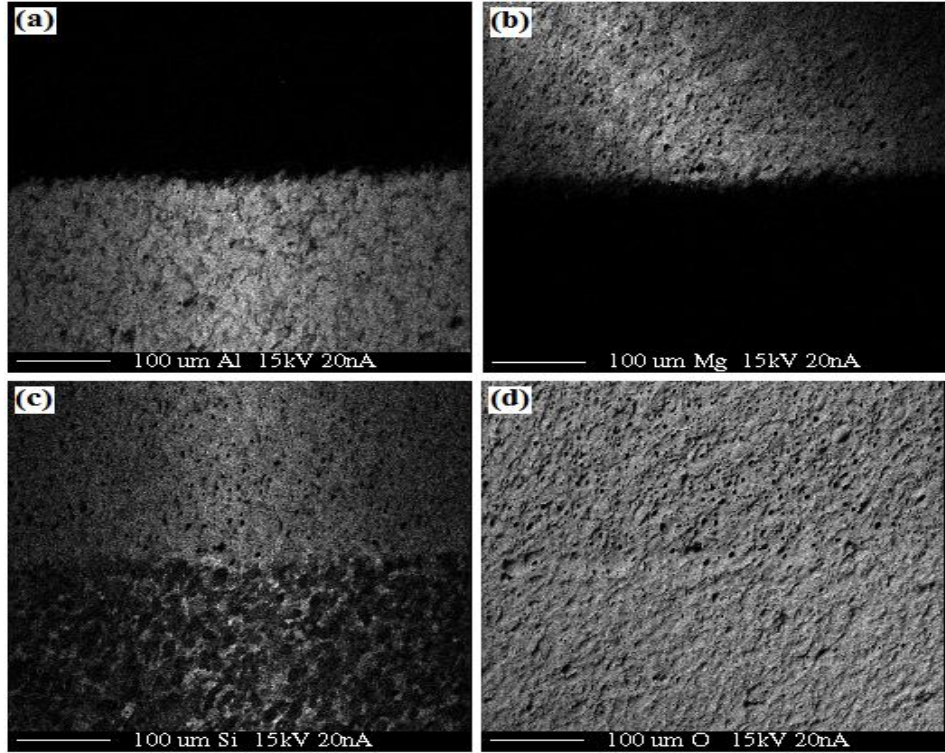
Şekil 7.11 : (a) 550 V ile kaplanan numunenin birleşim yeri, (b) 600 V ile kaplanan numunenin birleşim yeri.

Voltajın artışına bağlı olarak ark çıkığının yoğunlaşması üzerine kraterlerin arttığı ve arkların çıktığı kanallara katyonların girmesi ile yüzeyin kabalaştığı ve porların çaplarında ciddi bir artış olduğu görülmektedir. Daha sonra SEM görüntülerinin çekildiği bölgeye XRD analizi yapılmış ve Şekil 7.12’de bu analizin sonuçları verilmiştir.



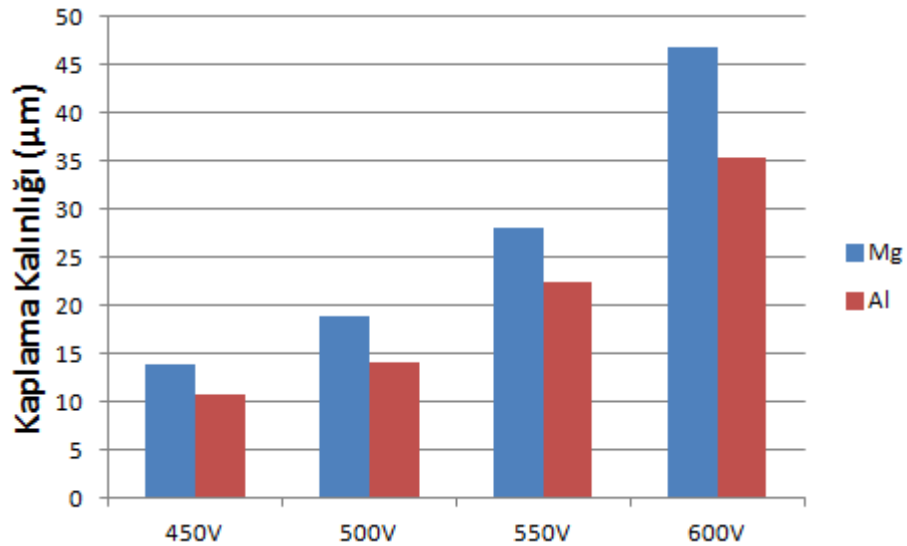
Şekil 7.12 : Voltaj kontrollü grubun XRD analizi.

XRD analiz sonuçlarına göre alüminyum tarafında Al_2O_3 , magnezyum tarafında ise MgO’nun yanı sıra Mg_2SiO_4 ve $MgSiO_3$ olduğu görülmüştür. Magnezyum tarafındaki oksit tabakasında silisyum varlığı, silisyumun elektrolitten geldiğini göstermektedir. XRD analiz sonuçları alındıktan sonra numunelere EPMA analizi uygulanmıştır. Bu analizde kaplanmış numunelerin birleşim bölgelerine odaklanarak elementel analiz yapılmıştır. Sırasıyla alüminyum, magnezyum, silisyum ve oksijen için yapılan bu analiz, bu elementlerin yoğun olduğu bölgeleri daha açık renkle göstermektedir. EPMA analizinin yapılma amacı kaplama sonrası hangi bileşenin hangi bölgede yoğunlaştığını görmek, XRD sonuçlarını destekleyici veriler elde etmektir. Şekil 7.13’te görüldüğü gibi silisyumun, magnezyum tarafında yoğun bulunması, XRD sonuçlarında fazla bulunan Mg_2SiO_4 ve $MgSiO_3$ ’ü destekler niteliktedir. Oksijen hem alüminyum hem de magnezyum tarafında homojen bir dağılım göstermektedir. Ek A’da 500 V, 550 V ve 600 V’ta yapılan MAO işlemleri sonrasında yüzeyde gerçekleştirilen EPMA analizlerinin sonuçları verilmiştir.



Şekil 7.13 : 450 V ile kaplanan numunenin elementel EPMA analizi, (a) alüminyum, (b) magnezyum, (c) silisyum, (d) oksijen.

EPMA analizlerinin ardından numuneler elmas kesici ile kesilip epoksi reçine içine alındıktan sonra zımpara ve parlatma işlemine tabi tutulmuş ve bu numunelerin kaplama kalınlıkları optik mikroskop vasıtasıyla ölçülmüştür.

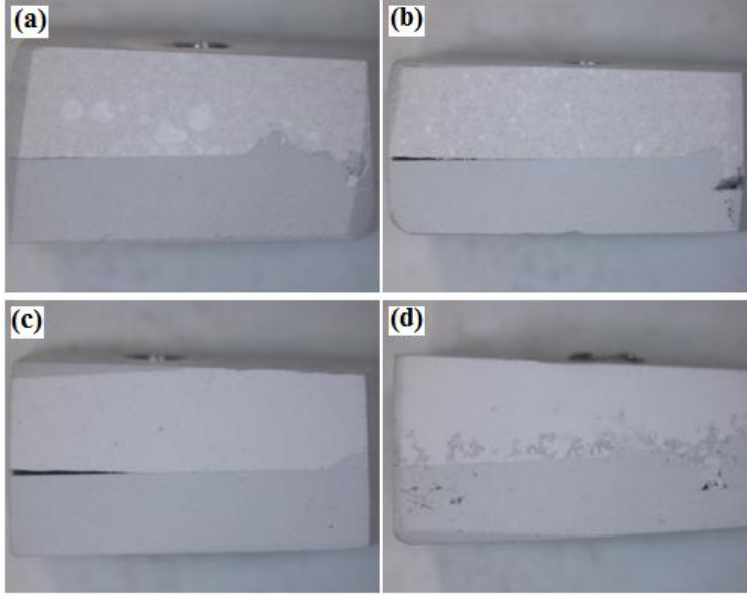


Şekil 7.14 : Voltaj kontrollü grubun alüminyum ve magnezum için ölçülen kaplama kalınlıkları.

Yapılan ölçümler sonucunda 4 numunede de magnezyum tarafındaki oksit tabakası kalınlığı, alüminyuma göre daha fazla çıkmıştır.

7.2.2 Süre Kontrollü Kaplama Sonuçları

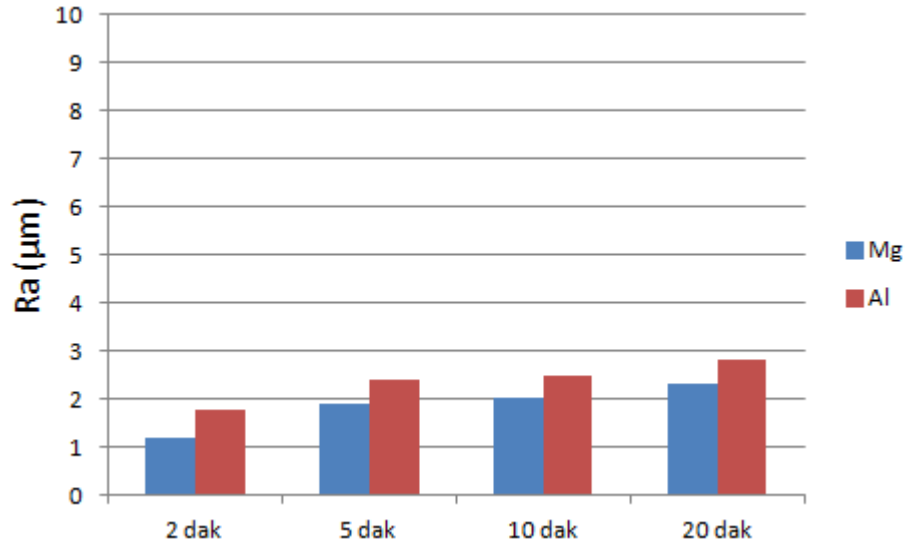
SKK yöntemiyle birleştirilen Al-Mg sistemine ait numuneler 500 V ile 2 ila 20 dakika aralığında MAO işlemine tabi tutulmuş olup kaplama sonrası yüzey görünümleri Şekil 7.15'te görülmektedir.



Şekil 7.15 : Süre kontrollü grubun stereo mikroskop resimleri (a) 2 dak, (b) 5 dak, (c) 10 dak, (d) 20 dak.

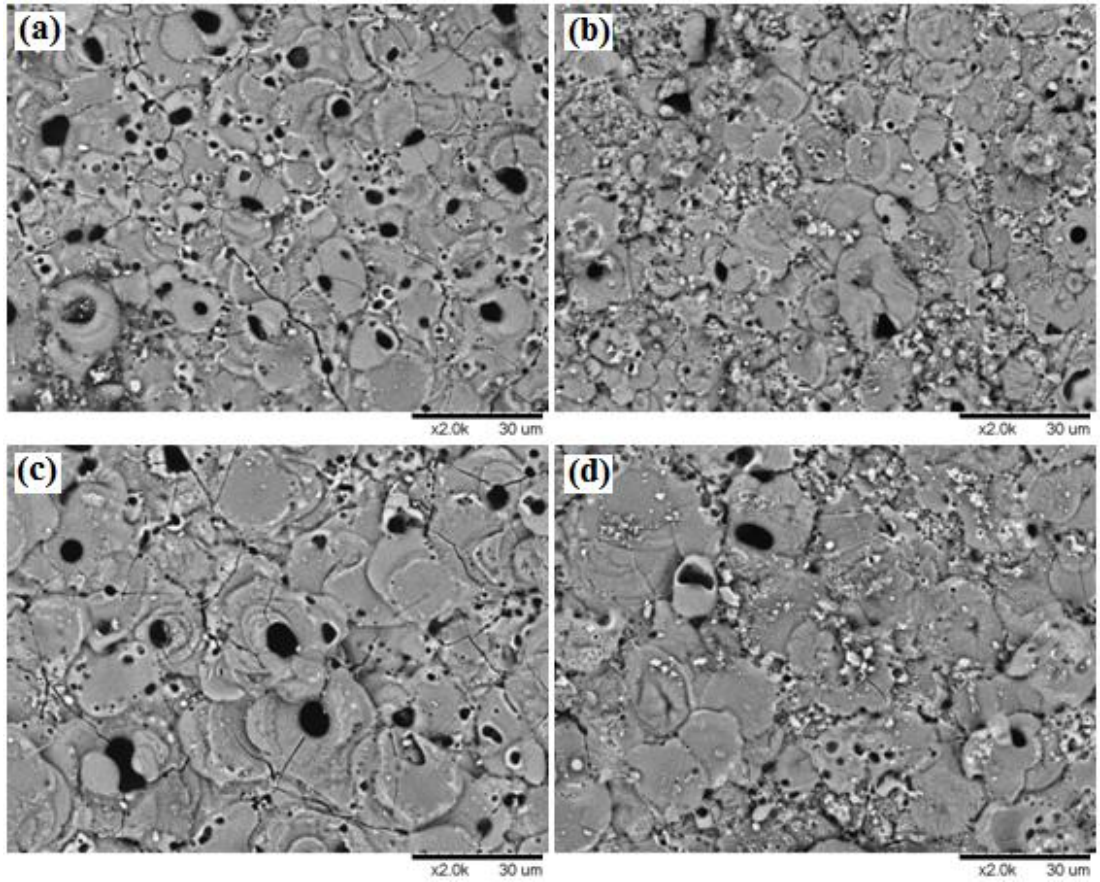
Kaplamalı numunelerde hem alüminyum hem magnezyum üzerinden ortalama pürüzlülük ölçümleri alınmıştır. Bu değerlerin voltaj ve süre etkisi ile nasıl değiştiğine ve diğer yapılan test ve analiz sonuçları ile arasında bağlantı olup olmadığına bakılmıştır.

Süre kontrollü grupta voltaj sabit kaldığı için pürüzlülük artışı daha yavaş gerçekleşir ve daha kompakt bir kaplama görülür. Ark şiddeti, voltaj kontrollü gruba göre daha az olduğu için poroz tabakanın artışı yerine kompakt tabakanın büyümesi sonucu ortalama pürüzlülük değerleri düşük çıkmıştır (Şekil 7.16). Kaplamadan önceki pürüzlülük değerleri alüminyum için 0,55 μm , magnezyum için 0,23 μm ölçülmüştür.

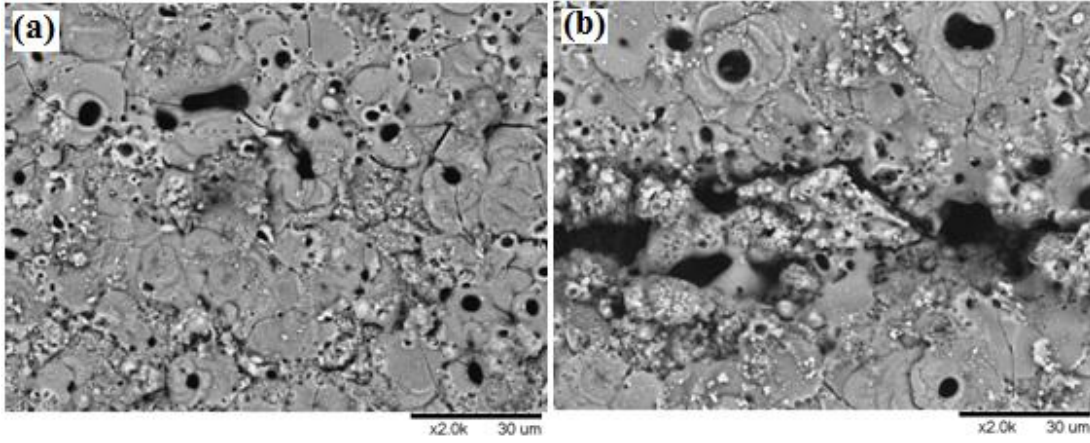


Şekil 7.16 : Süre kontrollü grubun ortalama yüzey pürüzlülük (Ra) değerleri.

Şekil 7.17’de 2 dakika ve 5 dakika kaplanan numunelerin magnezyum ve alüminyum taraflarından alınan resimler verilmiştir. Şekil 7.18’de ise bu numunelerin birleşme yerlerinin görüntüleri yer almaktadır.

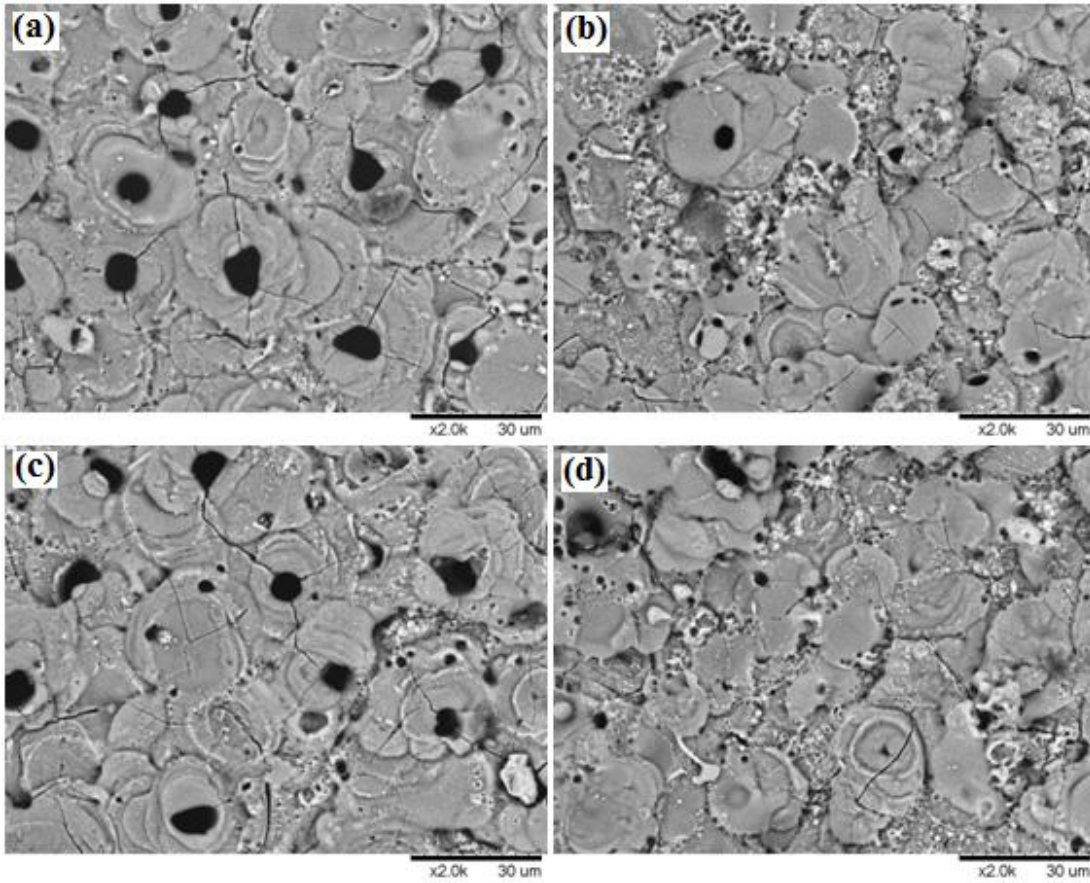


Şekil 7.17 : 2 dakika kaplanan numunenin (a) magnezyum, (b) alüminyum tarafı; 5 dakika kaplanan numunenin (c) magnezyum, (d) alüminyum tarafı.

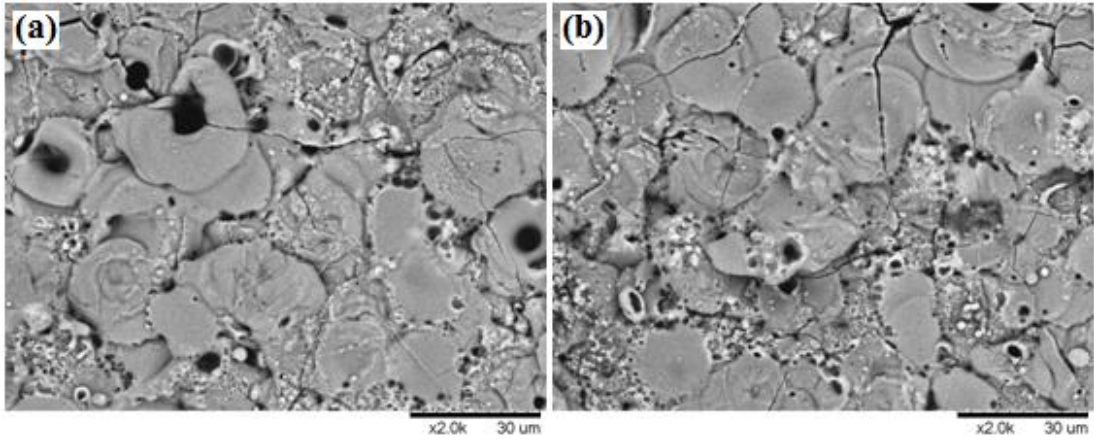


Şekil 7.18 : (a) 2 dakika kaplanan numunenin birleşim yeri, (b) 5 dakika kaplanan numunenin birleşim yeri.

Şekil 7.19’da 10 dakika ve 20 dakika kaplanan numunelerin magnezyum ve alüminyum taraflarından alınan resimler verilmiştir. Şekil 7.20’de ise bu numunelerin birleşme yerlerinin görüntüleri yer almaktadır.



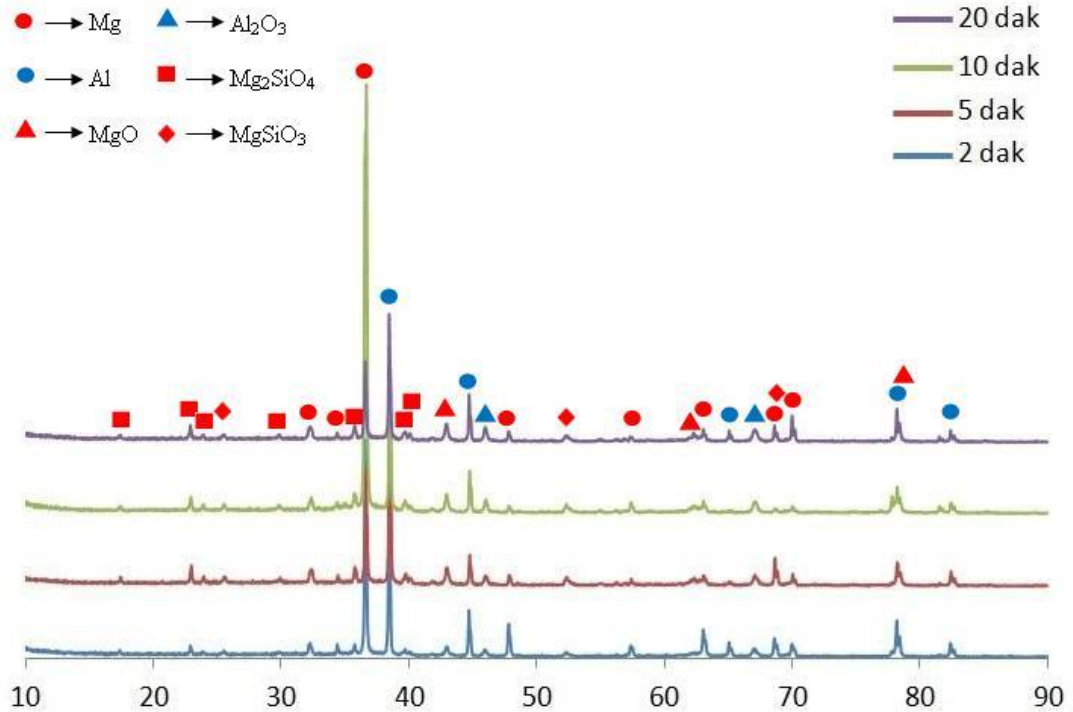
Şekil 7.19 : 10 dakika kaplanan numunenin (a) magnezyum, (b) alüminyum tarafı; 20 dakika kaplanan numunenin (c) magnezyum, (d) alüminyum tarafı.



Şekil 7.20 : (a) 10 dakika kaplanan numunenin birleşim yeri, (b) 20 dak kaplanan numunenin birleşim yeri.

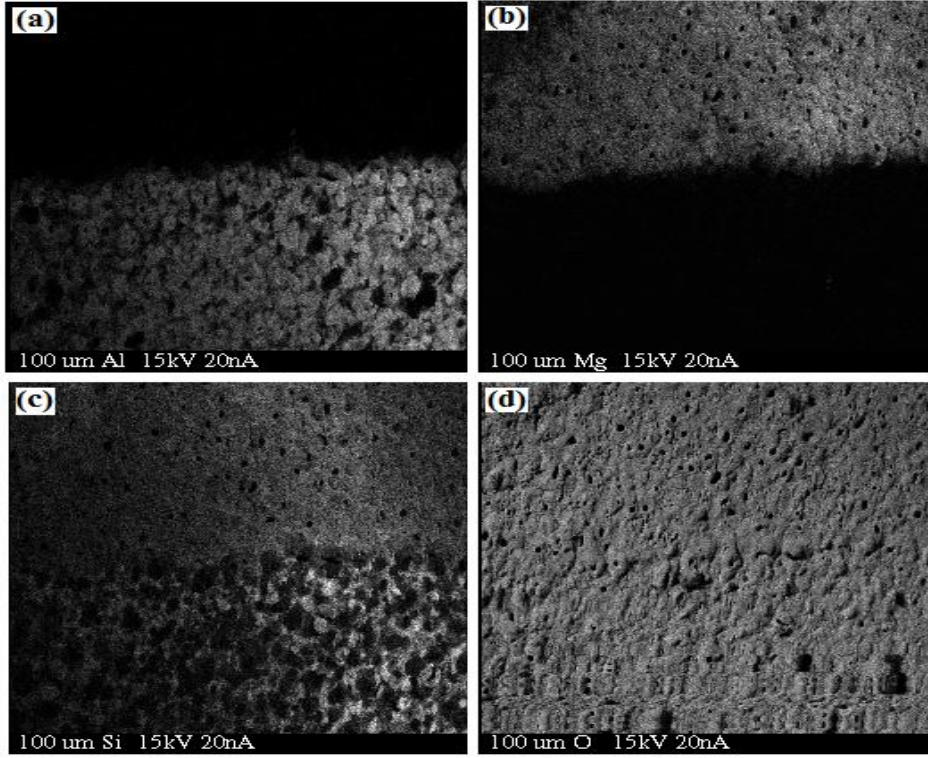
SEM resimlerine bakarak süre kontrollü grupta por çaplarının fazla büyümediğini, ark deşarjının az olması sebebiyle yüzeyin kabalaşmadığını, kraterlerin ve mikro çatlakların daha az oluştuğunu görmekteyiz.

SEM resimlerinin alınmasının ardından, SEM görüntülerinin çekildiği bölgeye XRD analizi yapılmış ve Şekil 7.21’de bu analizin sonuçları verilmiştir.



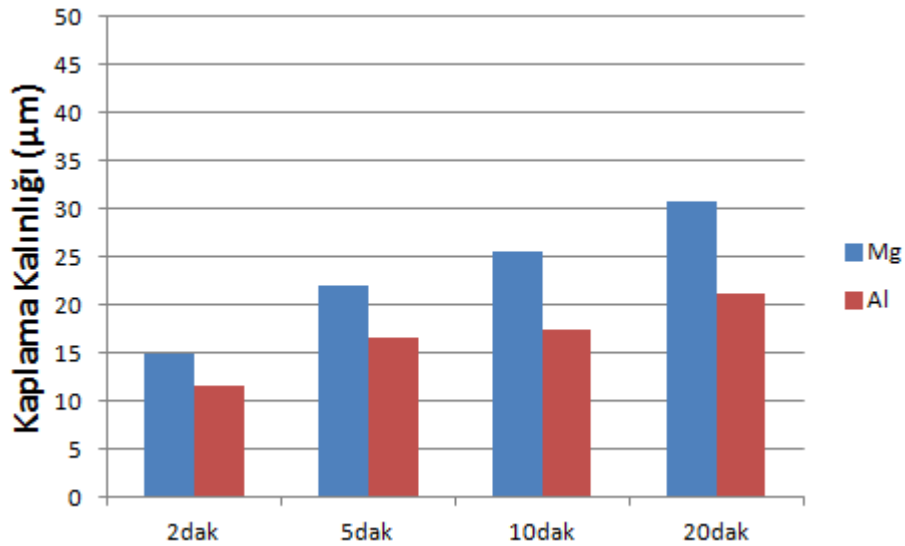
Şekil 7.21 : Süre kontrollü grubun XRD analizi.

XRD analiz sonuçlarına göre alüminyum tarafında Al_2O_3 , magnezyum tarafında ise MgO 'nun yanı sıra Mg_2SiO_4 ve $MgSiO_3$ olduğu görülmüştür. Magnezyum tarafındaki oksit tabakasında silisyum varlığı, silisyumun elektrolitten geldiğini göstermektedir. Voltaj kontrollü gruba kıyasla farklı bir faz görülmeyip yalnızca bunların şiddetleri arasında bir fark görülmüştür. Silikatlı bileşiklerin şiddetlerinin, voltaj kontrollü gruba göre daha düşük olmasının sebebini yine ark deşarjı ve reaksiyon şiddetiyle açıklayabilmekteyiz. Daha stabil gerçekleşen reaksiyonlar sonucu bu bileşiklerin pikleri daha düşüktür. Bu sonuçları desteklemesi açısından EPMA uygulanan numunelerde, elementel olarak sırasıyla alüminyum, magnezyum, silisyum ve oksijen nokta analizleri yapılmış ve sonuçlar Şekil 7.22'de gösterilmiştir. Ek B'de 5 dakika, 10 dakika ve 20 dakika süre ile gerçekleştirilen MAO işlemleri sonrasında yüzeyde gerçekleştirilen EPMA analizlerinin sonuçları verilmiştir.



Şekil 7.22 : 2 dak kaplanan numunenin elementel EPMA analizi, (a) alüminyum, (b) magnezyum, (c) silisyum, (d) oksijen.

EPMA analizlerinin ardından numuneler, voltaj kontrollü gruba yapıldığı gibi elmas kesici ile kesilip epoksi reçine içine alındıktan sonra zımpara ve parlatma işlemine tabi tutulmuş ve bu numunelerin kaplama kalınlıkları optik mikroskop vasıtasıyla ölçülmüştür.



Şekil 7.23 : Süre kontrollü grubun alüminyum ve magnezyum için ölçülen kaplama kalınlıkları.

Süre kontrollü grupta ise kalınlık artışının yavaş olması, kaplamayı poroz olmaktan kurtarıp daha kompakt bir hale sokmuştur.

Bütün test ve analiz sonuçlarından yola çıkarak voltajın, poroziteyi artırma etkisinin süreye göre çok daha fazla olduğu; süre artışıyla beraber kaplamanın kompakt olarak büyüdüğü ve poroz tabakanın çok az etkilendiği; voltaj artışı ile kaplama üzerindeki mikro çatlak sayısı ve büyüklüğünün arttığı gözlemlenmiştir.

Bunların sebebini MAO işleminin mekanizmasını göz önünde bulundurarak açıklayabiliriz: Ark deşarj kanallarından ark çıkışı sırasında metaller ergir. Ergiyen metal aniden soğurken onun yarattığı boşluğa anyonik bileşenler girer ve keskin şekilli boşluklar meydana getirir. Öte yandan porların oluşum sebebi ark çıkışı sırasında oluşan gazların kaplama içine hapsolması şeklinde yorumlanmaktadır. Kraterlerin ise, ergimiş metalin elektrolitle temas anında oksitlenerek ani soğuması ve depolanmasıyla oluştuğu öne sürülmektedir. Bu veriler gösteriyor ki, ark çıkışı şiddetlenirse krater ve porların sayısı ve büyüklüğü artar [34,38,39]. Deşarj kanallarındaki anlık sıcaklık 7000 K'e kadar çıkabilmektedir. Bu ergimiş metalin elektrolitle teması sonucu soğuma hızı ise 10^8 K'i bulmaktadır. Bu sebeple kaplamalarda mikro çatlaklar görülür [31].

Kaplama kalınlıklarının voltaj ve işlem süresine bağlı olarak arttığı birçok çalışmada görülmüştür. Prosesin ilk aşamasında kaplama yüzeyden dışarıya doğru büyürken

belli bir kalınlığa ulaştıktan sonra malzemeye doğru büyümeye başlar. Dolayısıyla ölçülen kaplama kalınlıkları, sadece dışarıya doğru büyüyen kısımdan ibaret değil, aynı zamanda altlık içerisinde doğru büyüyen tabakaları da içerir [36].

Yüksek şiddetli arklar, kaplama kalınlığını daha fazla artırır. Ark boyu büyüdükçe, arkın çıktığı kanala giren anyon ve katyonların sayısı daha fazla olup kaplama kalınlığını artırır [39]. Yüksek şiddetli ark oluşturmanın en basit ve en etkili yolu voltajın artırılmasıdır. Bunun yanında KOH gibi yüksek alkali bileşiklerin kullanılması da ark deşarjını şiddetlendirici etki yaratmaktadır [35].

Kaplama kalınlığının süre kontrollü grupta, voltaj kontrollü gruba göre daha az çıkmasının nedeni de ark deşarj kanalları ile ilgilidir. Bu kanalların sayısının, artan işlem süresi ile birlikte azaldığı tespit edilmiştir. Bu yüzden süre kontrollü grubun kaplama kalınlığı daha az çıkmaktadır [40].

8. GENEL SONUÇLAR

1. Bu çalışma, sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiş alüminyum-magnezyum sisteminin MAO ile, birlikte oksit kaplanabileceğini ortaya çıkarmıştır. Kaplamalar alüminyum tarafında Al_2O_3 , magnezyum tarafında ise MgO , Mg_2SiO_4 ve $MgSiO_3$ fazlarından oluşmaktadır.

2. MAO işleminin voltaj kontrollü koşullarda yapılması, süre kontrollü koşullara nazaran kaplama kalınlığını ve pürüzlülüğünü artırmaktadır. Gerek voltaj ve gerekse süre kontrollü MAO işlemleri sonrasında magnezyum yüzeyinde alüminyumun yüzeyine nazaran daha kalın oksit tabakası oluşmaktadır.

3. Bu tez kapsamında yapılan sistematik çalışmalar kapsamında Al-Mg sistemi için optimum MAO işlem parametreleri aşağıdaki gibi belirlenmiştir;

Elektrolit: 3 g/L KOH ve 10 g/L Na_2SiO_3

Voltaj: 500V

Süre: 10 dakika

Frekans: 1000 Hz

KAYNAKLAR

- [1] **Pourahmad, P. ve Abbasi, M.** (2013). Materials flow and phase transformation in friction stir welding of Al6013-Mg, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **23**, 1253-1261.
- [2] **Mishra, R.S. ve Ma, Z.Y.** (2005). Friction stir welding and processing review article, *Materials Science and Engineering R*, **50**, 1-78.
- [3] **Rao, K.P., Ramb, G.D.J. ve Stuckerb, B.E.** (2008). Improvement in corrosion resistance of friction stir welded aluminum alloys with micro arc oxidation coatings, *Scripta Materialia*, **58**, 998-1001.
- [4] **Lv, G., Gu, W., Chen H., Feng, W., Khosa, M.L., Li, L., Niu, E., Zhang, G. ve Yang S.** (2006). Characteristic of ceramic coatings on aluminum by plasma electrolytic oxidation in silicate and phosphate electrolyte, *Applied Surface Science*, **253**, 2947-2952.
- [5] **Delikanlı, Y.E.** (2011). *Alüminyum alaşımlarında çökeltme sertleşmesinin mekanik özelliklere etkisi* (yüksek lisans tezi). Adres: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/>
- [6] **Yürektürk, Y.** (2013). *Al-6082 alaşımının mikro ark oksidasyonunda elektrolit katkısı olarak karbon nanotüpün etkileri* (yüksek lisans tezi).
- [7] **Sudağ, M.** (2011). *Alüminyum alaşımı malzemelerin sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile birleştirilmesi ve dayanım özelliklerinin araştırılması* (yüksek lisans tezi). Adres: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/>
- [8] **Brandes, E.A. ve Brook, G.B.** (1998). *Smithells light metals handbook*, Hartnolls Ltd, Bodmin, Cornwall.
- [9] **Tufan, M.** (2011). *AA6082 alüminyum alaşımlarında yaşlandırma ısı işleminin işlenebilirliğe ve yüzey pürüzlülüğüne etkisinin incelenmesi* (yüksek lisans tezi). Adres: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/>
- [10] **Kırcı, O.** (2012). *AW-5005 alüminyum alaşımının bindirme sürtünme karıştırma kaynaklı bağlantı özelliklerine takım profilinin etkisi* (yüksek lisans tezi). Adres: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/>
- [11] **Kumru, N.** (2007). *ETİAL-141, 145 ve 160 tipi döküm alüminyum ile plaka tipi alüminyum malzemeler için yorulma makinası tasarımı ve eğilmeli yorulma davranışlarının incelenmesi* (doktora tezi). Adres: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/>
- [12] **Kuşdemir, H.** (2008). *AZ91 Magnezyum Alaşımının Korozyon Davranışları Üzerine İlave Alaşım Elementlerinin Etkisi* (yüksek lisans tezi). Adres: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/>
- [13] **Ünver, G.** (2011). *AZ91 magnezyum alaşımına Ti ve Cr alaşım elementlerinin ilavesinin özelliklere etkisinin incelenmesi* (yüksek lisans tezi). Adres: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/>

- [14] **Altay, M.** (2012). *AZ91 magnezyum alaşımının mikro ark oksidasyon işleminde elektriksel parametrelerin etkisi* (yüksek lisans tezi). Adres: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/>
- [15] **Muhaffel, M.R.** (2012). *Mikro ark oksidasyon işlemi uygulanmış silisyum karbür takviyeli AZ91D magnezyum alaşımının korozyon ve aşınma özelliklerinin incelenmesi* (yüksek lisans tezi). Adres: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/>
- [16] **Engin, A.** (2013). *AZ91 magnezyum alaşımına farklı oranlarda alaşım elementlerinin ilavesi ile uygulanan ısı işlemin mikroyapı ve sertlik üzerine etkilerinin incelenmesi* (yüksek lisans tezi). Adres: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/>
- [17] **Çam, G. ve Meran, C.** (2009). Çeliklerin Sürtünme Karıştırma Kaynağı, *Mühendis ve Makina*, Cilt **50**, sayı **599**.
- [18] **Dalkılıç, S.** (2012). Sürtünme Karıştırma Kaynağı Ve Havacılık Ve Uzay Endüstrisindeki Uygulama Alanları, *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, Cilt **5**, sayı **4**, Sf. 25-33.
- [19] **Kadayıfçı, Z.A.** (2013). *Benzer ve farklı türden alüminyum alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynağının deneysel ve sayısal olarak incelenmesi* (yüksek lisans tezi). Adres: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/>
- [20] **İpekoğlu, G.** (2011). *Kaynak sonrası ısı işlemin sürtünme karıştırma kaynaklı AA6061 ve AA7075 alüminyum alaşımı levhalarda içyapı ve mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi* (doktora tezi). Adres: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/>
- [21] **Khodir, S.A. ve Shibayanagi, T.** (2007). Dissimilar friction stir welded joints between 2024-T3 aluminum alloy and AZ31 magnesium alloy, *Materials Transactions*, Cilt **48**, sayı **9**, Sf. 2501-2505.
- [22] **Kwon, Y.J., Shigematsu, I. ve Saito, N.** (2008). Dissimilar friction stir welding between magnesium and aluminum alloys, *Materials Letters*, **62**, 3827-3829.
- [23] **Chen, Y.C. ve Nakata, K.** (2008). Friction stir lap joining aluminum and magnesium alloys, *Scripta Materialia*, **58**, 433-436.
- [24] **Yan, Y., Zhang, D., Qiu, C ve Zhang, W.** (2010). Dissimilar friction stir welding between 5052 aluminum alloy and AZ31 magnesium alloy, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **20**, 619-623.
- [25] **McLean, A.A., Powell, G.L.F., Brown, I.H. ve Linton, V.M.** (2003). Friction stir welding of magnesium alloy AZ31B to aluminium alloy 5083, *Science and Technology of Welding and Joining*, Cilt **8**, sayı **6**, Sf. 462-464 doi 10.1179/136217103225009134
- [26] **Özkara, İ.M.** (2009). *2024 alüminyum alaşımının mikro ark oksidasyon yöntemiyle kaplanması ve yüzey özelliklerinin geliştirilmesi* (yüksek lisans tezi). Adres: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/>
- [27] **Çakıcı, S.** (2009). *6082 Kalite Alüminyum Alaşımının Mikro Ark Oksidasyon Yöntemiyle Yüzey Modifikasyonu* (yüksek lisans tezi). Adres: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/>

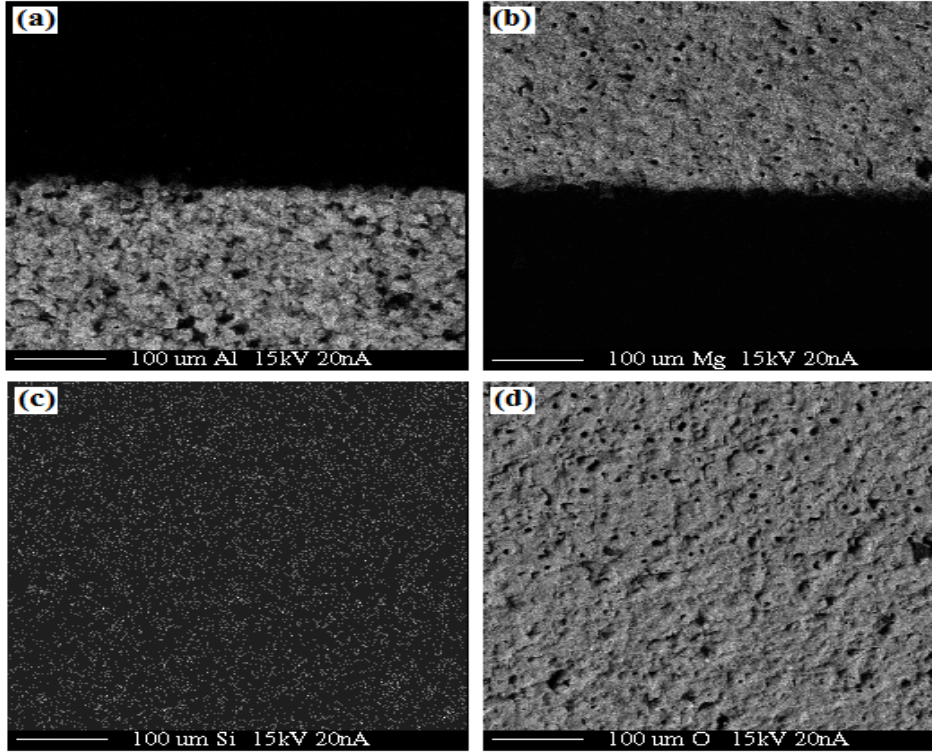
- [28] **Dearnley, P.A., Dahm, K.L. ve Murakami, R.** (2002). Hard engineering surfaces for aluminium alloys, *Boundary and Mixed Lubrication: Science and Applications*, **40**, 259-264.
- [29] **Nie, X., Leyland, A., Song, H.W., Yerokhin A.L., Dowey, S.J. ve Matthews, A.** (1999). Thickness effects on the mechanical properties of micro-arc discharge oxide coatings on aluminium alloys, *Surface and Coatings Technology*, **116-119**, 1055-1060.
- [30] **Xu, J., Liu, F., Luo, J. ve Zhao, L.** (2013). Effects of anodic voltages on microstructure and properties of plasma electrolytic oxidation coatings on biomedical NiTi alloy, *Journal of Materials Science & Technology*, **29(1)**, 22-28.
- [31] **Wei, T., Yan, F. ve Tian, J.** (2005). Characterization and wear- and corrosion-resistance of microarc oxidation ceramic coatings on aluminum alloy, *Journal of Alloys and Compounds*, **389**, 169-176.
- [32] **Yerokhin A.L., Nie, X., Leyland, A., Dowey, S.J. ve Matthews, A.** (1999). Plasma electrolysis for surface engineering, *Surface and Coatings Technology*, **122**, 73-93.
- [33] **Gang, X.S., Xin, S.L., Gen, Z.R. ve Fang, H.X.** (2005). Properties of aluminium oxide coating on aluminium alloy produced by micro-arc oxidation, *Surface and Coatings Technology*, **199**, 184-188.
- [34] **Javidi, M. ve Fadaee, H.** (2013). Plasma electrolytic oxidation of 2024-T3 aluminum alloy and investigation on microstructure and wear behavior, *Applied Surface Science*, **286**, 212-219.
- [35] **Yerokhin A.L., Voevodin, A.A., Lyubimov, V.V., Zabinski, J. ve Donley, M.** (1998). Plasma electrolytic fabrication of oxide ceramic surface layers for tribotechnical purposes on aluminium alloys, *Surface and Coatings Technology*, **110**, 140-146.
- [36] **Hussein, R.O., Nie, X. ve Northwood, D.O.** (2013). An investigation of ceramic coating growth mechanisms in plasma electrolytic oxidation (PEO) processing, *Electrochimica Acta*, **112**, 111-119.
- [37] **Günyüz, M.** (2007). *Titanyum ve alaşımlarının mikro ark oksidasyon işlemi ile kaplanması* (yüksek lisans tezi). Adres: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/>
- [38] **Gu, W.C., Lv, G.H., Chen, H., Chen, G.L., Feng, W.R. ve Yang, S.Z.** (2007). Characterisation of ceramic coatings produced by plasma electrolytic oxidation of aluminum alloy, *Materials Science and Engineering, A* **447**, 158-162.
- [39] **Durdu, S. ve Usta, M.** (2012). Characterization and mechanical properties of coatings on magnesium by micro arc oxidation, *Applied Surface Science*, **261**, 774-782.

- [40] **Sundararajan, G. ve Krishna, L.R.** (2003). Mechanisms underlying the formation of thick alumina coatings through the MAO coating technology, *Surface and Coatings Technology*, **167**, 269-277.
- [41] **Url-1** < <http://dolusozluk.com> >, alındığı tarih: 27.03.2014.
- [42] **Url-2** < <http://eng.sut.ac.th> >, alındığı tarih: 15.01.2014.
- [43] **Url-3** < <http://www.twi-global.com> >, alındığı tarih: 18.02.2014.

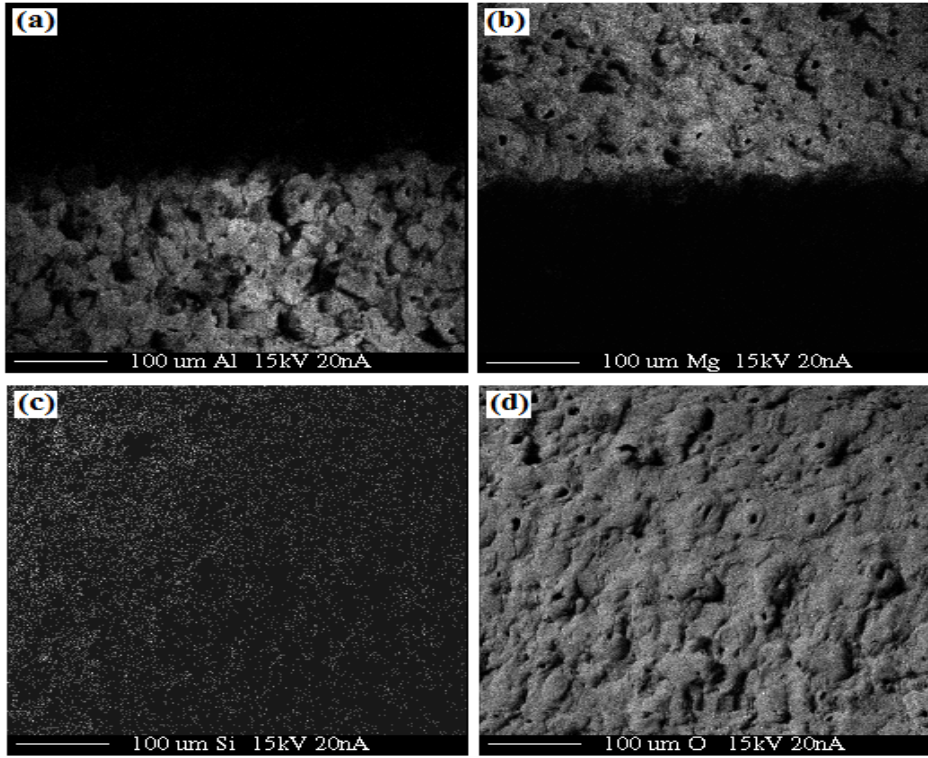
EKLER

EK A : 500 V, 550 V ve 600 V ile kaplanan numunelerin kaplama yüzeylerine yapılan EPMA analizleri.

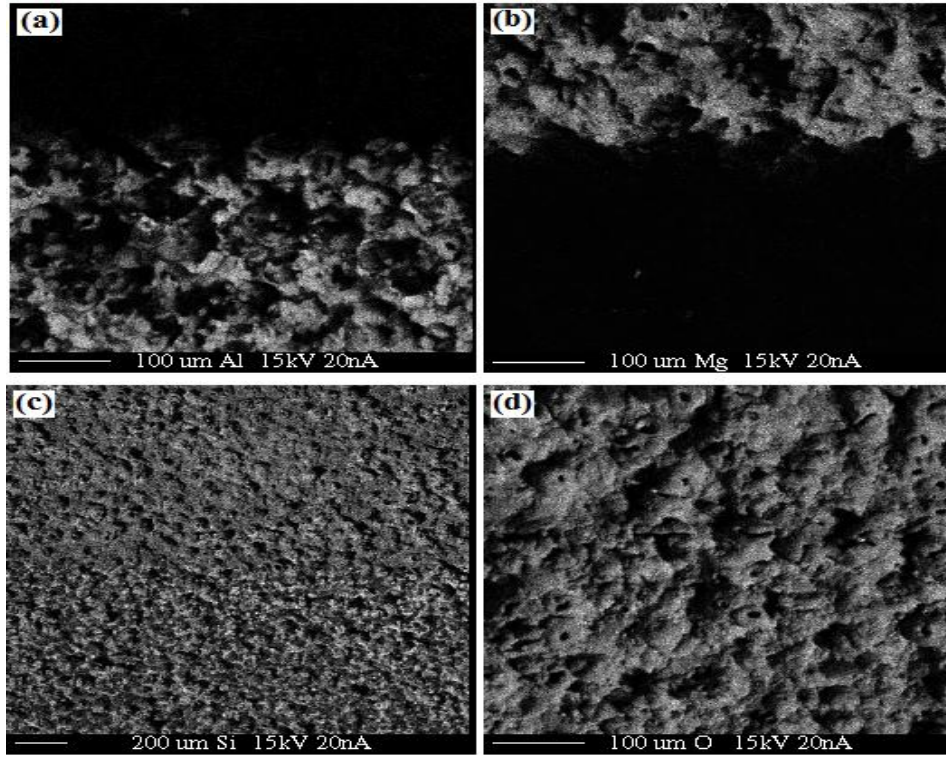
EK B : 5 dak, 10 dak ve 20 dak ile kaplanan numunelerin kaplama yüzeylerine yapılan EPMA analizleri.



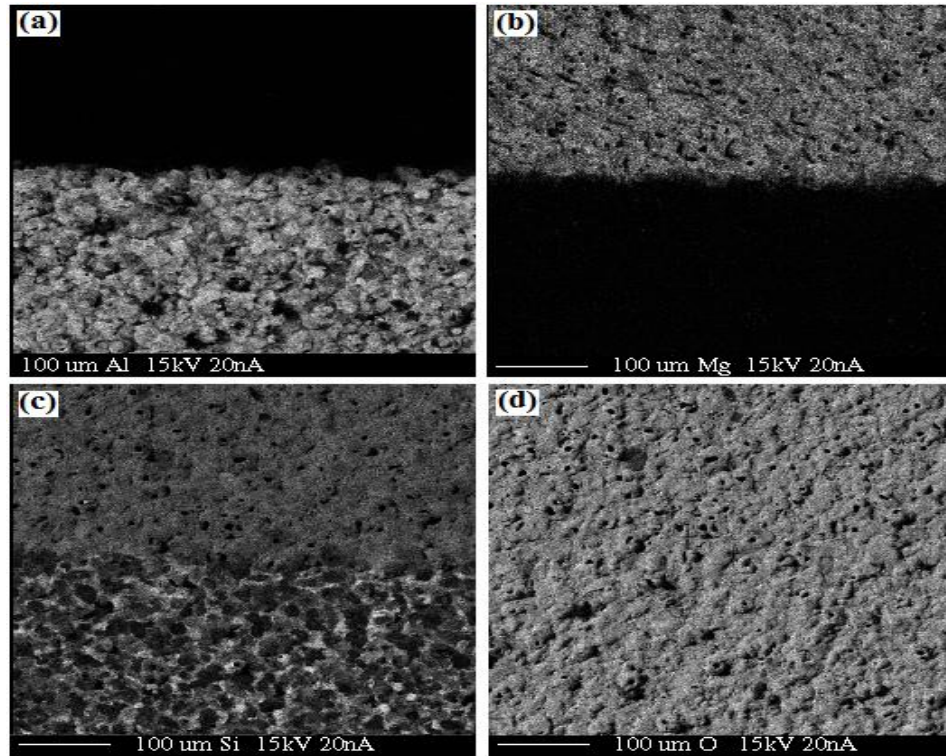
Şekil A.1 : 500 V ile kaplanan numunenin elementel EPMA analizi, (a) alüminyum, (b) magnezyum, (c) silisyum, (d) oksijen.



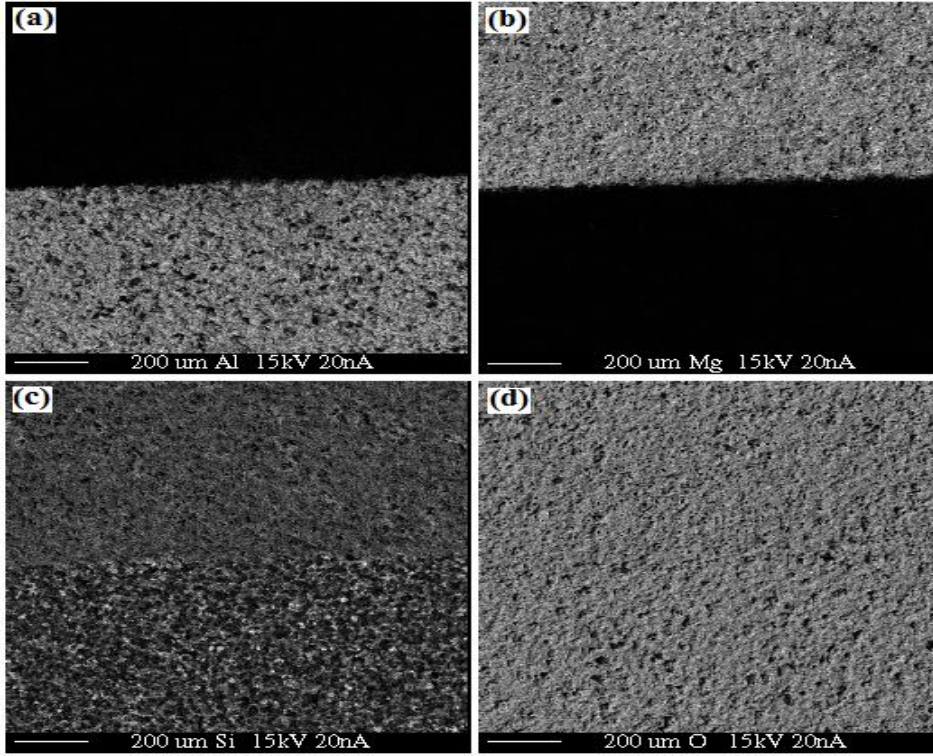
Şekil A.2 : 550 V ile kaplanan numunenin elementel EPMA analizi, (a) alüminyum, (b) magnezyum, (c) silisyum, (d) oksijen.



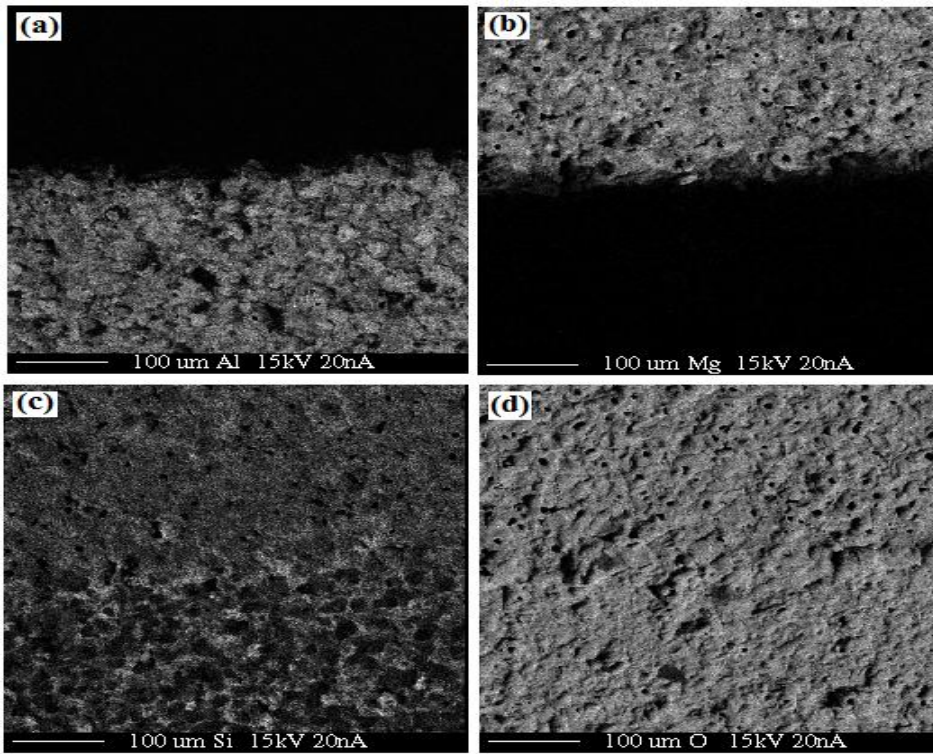
Şekil A.3 : 600 V ile kaplanan numunenin elementel EPMA analizi, (a) alüminyum, (b) magnezyum, (c) silisyum, (d) oksijen.



Şekil B.1 : 5 dk kaplanan numunenin elementel EPMA analizi, (a) alüminyum, (b) magnezyum, (c) silisyum, (d) oksijen.



Şekil B.2 : 10 dk kaplanan numunenin elementel EPMA analizi, (a) alüminyum, (b) magnezyum, (c) silisyum, (d) oksijen.



Şekil B.3 : 20 dk kaplanan numunenin elementel EPMA analizi, (a) alüminyum, (b) magnezyum, (c) silisyum, (d) oksijen.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Emir KARAÇAM

Doğum Yeri ve Tarihi: İSTANBUL / 10.04.1989

E-Posta: emirkaracam@gmail.com

Lisans: Yıldız Teknik Üniversitesi

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği (2008 – 2012)