



EGE ÜNİVERSİTESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**PLAZMA ELEKTROLİTİK OKSİDASYON
YÖNTEMİNİN Al/Al₂O₃ METAL MATRİSLİ
KOMPOZİT MALZEMELERE UYGULANMASI**

Şöhret Melda AYDIN

Tez Danışmanı :Dr. Öğr. Üyesi Serdar KARAOĞLU

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Sunuş Tarihi : 13.07.2018

Bornova-İZMİR

2018

EÜ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

(YÜKSEK LİSANS TEZİ)

**PLAZMA ELEKTROLİTİK OKSİDASYON
YÖNTEMİNİN Al/Al₂O₃ METAL MATRİSLİ
KOMPOZİT MALZEMELERE UYGULANMASI**

Şöhret Melda AYDIN

Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Serdar KARAOĞLU

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Sunuş Tarihi : 13.07.2018

Bornova-İZMİR

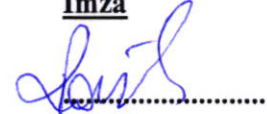
2018

Şöhret Melda AYDIN tarafından Yüksek Lisans tezi olarak sunulan “Plazma Elektrolitik Oksidasyon Yönteminin Al/Al₂O₃ Metal Matrisli Kompozit Malzemelere Uygulanması” başlıklı bu çalışma E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi'nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 13.07.2018 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

İmza

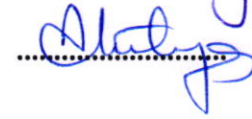
Jüri Başkanı : Prof. Dr. Rasim İPEK



Raportör Üye : Dr. Öğr. Üyesi Serdar KARAOĞLU



Üye : Doç. Dr. Hülya DURMUŞ






EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Plazma Elektrolitik Oksidasyon Yönteminin Al/Al₂O₃ Metal Matrisli Kompozit Malzemelere Uygulanması” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

13 / 07 / 2018


Adı-Soyadı

Şöhret Melda AYDIN



ÖZET
PLAZMA ELEKTROLİTİK OKSİDASYON YÖNTEMİNİN
Al/Al₂O₃ METAL MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERE
UYGULANMASI

AYDIN, Şöhret Melda

Yüksek Lisans Tezi, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Serdar KARAOĞLU
Mayıs 2018, 47 sayfa

Toz metalürjisi ile üretilmiş seramik partikül takviyeli alüminyum metal matrisli kompozitlerde, çalışma şartları altında kuvvet ve ısı etkisiyle takviyelerin ayrılması, Al-MMK'lerin aşınma ömürlerini kısaltmaktadır. Bu tez çalışmasında toz metalürjisi yöntemi ile Al numuneler ve Al matrisli, %5 ve %10 oranında Al₂O₃ seramik partikül içeren kompozitler üretilmiştir. Numuneler üzerine plazma elektrolitik oksidasyon (PEO) işlemi ile seramik kaplama uygulanmıştır. İşlem için 20A/dm² akım yoğunluğu ve 30 dk süre belirlenmiştir. Elektrolit olarak 1g/l KOH ve 7g/l Na₂SiO₃ çözeltisi kullanılmıştır. Numunelerin görsel karakterizasyonu için taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri alınmış, gerekli görülen yerlerde EDS analizi yapılmıştır. Sertlik ölçümleri mikro Vickers yöntemi ile, numune yüzeyine 2 kg yük uygulanarak yapılmıştır. Numunelere, pin-on-silindir test düzeneğinde 10N kuvvet altında, 0,5m/s hızla aşınma testi uygulanmıştır. Test sırasında eş zamanlı kuvvet ölçümleri ile sürtünme katsayıları tespit edilmiştir. Aşınma kaybı değerleri kütle ölçümü ile belirlenmiştir.

Karakterizasyon ve aşınma testleri sonucunda, takviye partikül içeriğinin kaplama homojenliğini bozduğu fakat, altlık malzeme dayanımını artırması sebebiyle aşınma dayanımına olumlu katkıda bulunduğu görülmüştür.

Anahtar sözcükler: Alüminyum matrisli kompozit, toz metalürjisi, plazma elektrolitik oksidasyon, aşınma testi.



ABSTRACT
APPLICATION OF PLASMA ELECTROLYTIC OXIDATION
METHOD ON Al/Al₂O₃ METAL MATRIX COMPOSITE
MATERIALS

AYDIN, Şöhret Melda

MSc in Mechanical Eng.

Supervisor: Dr Lecturer. Serdar KARAOĞLU

May 2018,47 pages

Separation of reinforcements under the effect of force and heat in ceramic reinforced aluminium matrix composites produced by powder metallurgy shortens the wear lifespan of Al-MMCs. In this thesis, Al samples and Al matrix composites containing, 5% and 10% Al₂O₃ ceramic particles were produced by powder metallurgy. Plasma electrolytic oxidation (PEO) treatment was applied to the samples. A current density of 20 A/dm² and duration of 30 min were determined for the process. 1 g/l KOH and 7 g/l Na₂SiO₃ solution were used as the electrolyte. Scanning electron microscope (SEM) images were taken for visual characterization of the samples and EDS analysis was performed where necessary. Hardness measurements were made by micro Vickers method with 2 kg load applied to the sample surface. The specimens were subjected to a wear test at a speed of 0.5 m/s under a force of 10 N in a pin-on-cylinder test apparatus. Simultaneous force measurements and friction coefficients were determined during the test. Wear loss values were determined by mass measurement.

As a result of the characterization and wear tests, it was found that the reinforcement particulate content ruined the coating homogeneity but contributed positively to the abrasion resistance by increasing the strength of the substrate material.

Keywords: Aluminium matrix composites, powder metallurgy, plasma electrolytic oxidation, wear test



TEŞEKKÜR

Tez çalışmamda tecrübesi ve bilgileriyle beni yönlendiren Dr. Öğretim Üyesi Sayın Serdar KARAOĞLU'na teşekkürü borç bilirim. Numunelerime uyguladığım kaplamalarda, laboratuvar imkânlarından faydalanmamı sağlayan Dokuz Eylül Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Prof. Dr. Uğur MALAYOĞLU'na ve laboratuvarında bana yol gösteren İzmir Katip Çelebi Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Araştırma Görevlisi Metehan ATAGÜR'e yardımlarından dolayı teşekkür ederim. Kullandığım aşınma test cihazının bilgisayar üzerinden kontrollerini sağladığım arayüzü oluşturması ve kalibrasyonla ilgili her türlü yardımından dolayı bölümümüz Araştırma Görevlisi Dr. Barış Oğuz GÜRSES'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu süreçte benden desteğini hiçbir zaman esirgemeyen aileme ve eşime sonsuz teşekkür ederim. Tezimi, bu süreçte kaybettiğim sevgili babama ve varlığıyla hayatımı değiştiren güzeller güzeli kızıma ithaf ediyorum.



İÇİNDEKİLER

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI	v
ÖZET.....	vii
ABSTRACT.....	ix
TEŞEKKÜR.....	xi
İÇİNDEKİLER	xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xv
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvii
1. GİRİŞ	1
2. METAL MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELER.....	3
2.1. Kompozit Malzemeler.....	3
2.1.1. Kompozit Malzemenin Tanımı	3
2.1.2. Takviye Malzemeleri	4
2.1.3. Matris Malzemeleri	5
2.2. Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri.....	8
2.2.1. Sıvı Hal Yöntemleri	8
2.2.2. Katı Hal Yöntemleri.....	10
3. TOZ METALURJİSİ	12
3.1. Toz Metalurjisinin Aşamaları.....	12
3.1.1. Malzeme Seçimi.....	12
3.1.2. Presleme	12
3.1.3. Sinterleme	14
3.2. Toz Metalurjisi Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları	15
4. SERAMİK KAPLAMA YÖNTEMLERİ.....	16
4.1. Isıl Püskürtme Kaplamaları	16
4.2. Buhar Depolama Yöntemleri.....	16
4.2.1. Fiziksel Buhar Depolama Yöntemi (PVD).....	16
4.2.2. Kimyasal Buhar Depolama Yöntemi (CVD)	17
4.3. Elektrolitik Yöntemler.....	18
4.3.1. Elektroforez ile Biriktirme	18
4.3.2. Anodik Oksidasyon.....	18
5. PLAZMA ELEKTROLİTİK OKSİDASYON.....	20

İÇİNDEKİLER (DEVAMI)

5.1. PEO'nun Tarihsel Gelişimi	20
5.2. PEO Donanımı	21
5.3. PEO Tabakasının Oluşumu	21
5.3.1. Akım-Voltaj Karakteristikleri	21
5.3.2. Oksit Tabakanın Kalınlaşması	23
5.4. PEO İşlem Parametreleri	24
6. DENEYSEL ÇALIŞMA	26
6.1. TM Yöntemi İle Üretim	26
6.2. PEO Kaplama Uygulaması.....	26
6.3. Aşınma Testi	27
6.4. Karakterizasyon Testleri	28
7. DENEY VERİLERİ ve TARTIŞMA.....	29
7.1. Mikro Yapı ve Sertlik İncelemesi	29
7.2. Aşınma Testi	31
8. SONUÇLAR	38
ÖZGEÇMİŞ	47
YAYINLARI	47

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 Kompozit malzemelerin takviye geometrisine göre sınıflandırılması (Callister, 2007)	4
Şekil 2.2 Türbin kanatları tasarımında seramik matrisli kompozit kullanımı (Yaroslavna, 2016)	6
Şekil 2.3 İşleme sırasında partiküllerin çökmesini en aza indirmek için kompozit eriyiğin seramik parçacıkları ile karıştırılması (Chawla, 2006).....	8
Şekil 2.4 Savurma döküm işleminin şeması (a), dönen kalıp elemanları (b) ve takviye dağılım gradyenin görüldüğü parça kesiti(c) (Chawla, 2006).	9
Şekil 2.5 Sıkıştırılmalı döküm yönteminin şematik gösterimi (Chawla, 2006).	9
Şekil 3.1 Toz Metalurjisi yönteminin aşamaları (Ames, 2018)	12
Şekil 3.2 Soğuk izostatik preslemenin şematik gösterimi (SubsTech, 2012)	13
Şekil 3.3 Sıcak izostatik preslemenin şematik gösterimi (SubsTech, 2012)	14
Şekil 4.1 Isıl püskürtme kaplama türlerinin işlem sıcaklığı ve partikül hızları (Berger, 2015)	16
Şekil 4.2 PVD yönteminin şematik gösterimi (Reveron Pojan, 2018)	17
Şekil 4.3 CVD yönteminin şematik gösterimi(Thulasikanth, 2016).....	18
Şekil 5.1 Deneyleerde kullanılan PEO ünitesinin şematik gösterimi	21
Şekil 5.2 PEO işleminde akım-voltaj diyagramı (Yerokhin et al., 1999)	22
Şekil 5.3 PEO tabakasının oluşumu (Zhang et al., 2017)	24
Şekil 6.1 Tek eksenli pres kalıbı, numune (a) ve Sinterleme fırını (b)	26
Şekil 6.2 Üretilen numune ve boyutları	26
Şekil 6.3 Keronite G2 Mikro Ark Oksidasyon ünitesi	27
Şekil 6.4 Deneyleerde kullanılan aşınma cihazı	28
Şekil 6.5 Pin-on-silindir aşınma düzeneğinin şematik gösterimi	28
Şekil 7.1 Partikül takviyeli alüminyum matrisli toz metalürjisi ile üretilmiş kompozit malzemenin içyapı fotoğrafı; Al-Al ₂ O ₃ -5 (a), Al-Al ₂ O ₃ -10 (b)...	29
Şekil 7.2 Metal matrisli kompozit malzemeler üzerine uygulanan plazma elektrolitik oksidasyon (PEO) kaplaması yüzey görünümü; Al-Al ₂ O ₃ -0/PEO (a), Al-Al ₂ O ₃ -5/PEO (b), Al-Al ₂ O ₃ -10/PEO (c)	29
Şekil 7.3 PEO ile yüzeyi kaplanmış alüminyum matrisli kompozit malzemelerin kesit görünümü; Al-Al ₂ O ₃ -0/PEO (a), Al-Al ₂ O ₃ -5/PEO (b), Al-Al ₂ O ₃ -10/PEO (c)	30
Şekil 7.4 PEO ile yüzeyi kaplanmış %10 Al ₂ O ₃ takviyeli alüminyum matrisli kompozit malzemenin (Al-Al ₂ O ₃ -10/PEO) kesit görünümü	30
Şekil 7.5 5 dk süre ve 20dk süre uygulanan aşınma testi sonunda her numunede gerçekleşen toplam aşınma kaybı	31
Şekil 7.6 Zamana bağlı aşınma kaybı	32
Şekil 7.7 Al-Al ₂ O ₃ -0 numunenin aşınma testi sonrası yüzey görünümü	32

ŞEKİLLER DİZİNİ (DEVAMI)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 7.8 Al-Al ₂ O ₃ -5 numunenin aşınma testi sonrası yüzey görünümü.....	33
Şekil 7.9 Al-Al ₂ O ₃ -10 numunenin aşınma testi sonrası yüzey görünümü..	33
Şekil 7.10 PEO ile yüzeyi kaplanmış alüminyum matrisli kompozit malzemelerin aşınma testi sonrası yüzey görünümü; Al-Al ₂ O ₃ -0/PEO (a), Al-Al ₂ O ₃ -5/PEO (b), Al-Al ₂ O ₃ -10/PEO (c).....	33
Şekil 7.11 Al-Al ₂ O ₃ -0/PEO numunenin aşınma testi sonrası yüzey görünümü	34
Şekil 7.12 Al-Al ₂ O ₃ -0/PEO numunenin aşınma testi sonrası yüzeyden alınan EDS analizi	34
Şekil 7.13 Al-Al ₂ O ₃ -5/PEO numunenin aşınma testi sonrası yüzey görünümü	34
Şekil 7.14 Al-Al ₂ O ₃ -10/PEO numunenin aşınma testi sonrası yüzey görünümü	35
Şekil 7.15 Al-Al ₂ O ₃ -10/PEO numunenin aşınma testi sonrası yüzeyden alınan EDS analizi.....	35
Şekil 7.16 Al-Al ₂ O ₃ -5/PEO numunenin aşınma testi sonrası yüzeyden alınan EDS analizi	36
Şekil 7.17 Aşınma testi sırasında elde edilen sürtünme katsayıları	37
Şekil 7.18 Al-Al ₂ O ₃ -0 numunenin aşınma testi sonrası yüzeyden alınan EDS analizi.....	37

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 5.1 PEO'nun tarihsel gelişimi (Kalkancı Başak, 2008)	20
Çizelge 5.2 Alüminyum esaslı malzemelere uygulanan PEO kaplama parametreleri	25
Çizelge 6.1 Numunelerin adlandırılması.....	27
Çizelge 7.1 TM ile üretilmiş Al-Al ₂ O ₃ numunelerin ve PEO kaplanmış numunelerin sertlik ölçümleri	31



1. GİRİŞ

Alüminyum matrisli kompozitler (Al- MMK), yerlerine kullanıldıkları monolitik malzemelere kıyasla hafiflikleri, yüksek mukavemetleri, yüksek elastik modülleri ve yüksek aşınma dirençleriyle otomotiv endüstrisinde özellikle motor pistonu, silindir gömleği, fren disk ve kampanaları gibi uygulamalarda tercih edilmektedir. (Mavhungu et al.,2017)

Metal matrisli kompozit malzemeler (MMK) içerdikleri farklı korozyon direncine sahip fazlardan dolayı monolitik malzemelere kıyasla korozyona daha açık malzeme gruplarıdır (Tandler et al., 2000). Matris malzemesi olarak kullanılan Al, Mg, Ti hafif metallerinin yüzeylerindeki oksit tabakası kararlı olmakla beraber takviyelendirildiklerinde içerdikleri mikro gözenekler sebebiyle buldukları ortamın etkisiyle de korozyona uğramaktadırlar (Verma et al., 2015). Korozyonun yanı sıra aşınmaya maruz çalışan MMK'larda kuvvet ve oluşan ısı sebebiyle takviye partiküllerin malzemeden ayrılması, malzemelerin aşınma ömürlerini kısaltan bir faktördür (Diler et al., 2011). Son yıllarda MMK'lerin aşınma ve korozyon direncini artırmak amacıyla anotlama, kimyasal dönüşüm filmleri, lazer yüzey işlemleri gibi çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Fakat geleneksel anotlama ve kimyasal dönüşüm uygulamaları Al-MMK malzemelerde alüminyum alaşımlarında olduğu gibi verimli sonuç vermemekle beraber bu işlemler alüminyum alaşımlarının korozyon dirençlerini artırsa da aşınma dirençlerinde ciddi artışlar sağlamamıştır (Xue et al., 2006; Cui et al., 2007).

Son yıllarda çalışmaların arttığı bir anotlama türü olan plazma elektrolitik oksidasyon (PEO) yöntemi demir dışı malzemelerin aşınma ve korozyon dirençlerini artırmak amacıyla geliştirilmiştir. (Ceschini et al.,2011; Liu et al., 2016; Trevino et al., 2012; Jiang et al., 2011) Bu yöntem bir elektrolit içerisine daldırılan seçilen malzeme ve alaşımların plazma kimyası ve elektrokimyasal reaksiyonların etkisi ile oluşan plazma boşalmaları sayesinde yüzeyin kalın, sert, aşınmaya ve korozyona karşı dirençli bir tabaka ile kaplanması esasına dayanmaktadır (Tekin vd., 2008). Geleneksel anotlamaya olan üstünlükleri; ön işlem gerektirmemesi, oluşan kaplamanın kristal yapıya sahip olmasıyla aşınma, korozyon direncinin yüksek olması ve ana metale mükemmel tutunma özelliği, elektrolit olarak kullanılan zayıf alkalın çözeltilerin doğaya dost olmaları şeklinde sayılabilir (Cui et al., 2007). PEO yöntemi, anotlama işleminin uygulanmadığı alaşımlarda istenilen özellikleri yüksek verimle elde etmeyi sağlamıştır (Özkara ve Baydoğan, 2009; Wang et al., 2009; Sabatini et al., 2010; Malayoglu et al., 2011). Sınırlı sayıda da olsa MMK malzemelerden çoğunlukla magnezyum matrisli kompozit malzemeler üzerine

yoğunlaşmış, alüminyum matrisli kompozit malzemeler üzerine yalnızca birkaç çalışma yapılmıştır.

PEO yöntemi için kullanılan donanım geleneksel anotlama işlemlerinde kullanılan donanımlara benzer. Temel olarak bir elektroliz ünitesi ve bir elektrik kaynağından oluşur. Elektroliz ünitesi genellikle paslanmaz çelik küvet içerisinde su soğutmalı bir banyodur. Bu paslanmaz çelik küvet aynı zamanda karşıt elektrot olarak iş görür. Küvet izole edilmiş bir tabana yerleştirilir ve zemine sabitlenmiş bir çelik kafes içerisine kapatılır. Elektroliz ünitesi; elektrolit karıştırma ve soğutma ünitesi ve gaz çıkış düzeneği ile birlikte çalışır.

Elektrik kaynağı olarak PEO konusundaki ilk çalışmalarda doğru akım kaynakları kullanılmış olsa da zamanla darbeli doğru akım ve alternatif akım kaynakları daha çok tercih edilmeye başlamıştır. (Yerokhin et al., 1998a, 2005b; Nie et al., 1999; Gu et al., 2007) Darbeli doğru akım kullanımında darbe şeklinin de kontrol edilebilmesiyle prosesin kontrollü olarak kesilmesi ve arkın yüzeyde kalma süresinin ayarlanmasına imkân tanınır. Bu sayede işlem sırasında ısıl değişimler ve beraberinde kaplama kompozisyonu ve yapısı kontrol edilebilir. Alternatif akım kullanımında bunlara ek olarak farklı genliklerde pozitif ve negatif akım uygulanması, kontrol edilebilen kaplama çökmesi aralığının genişletilmesine imkân verir (Tekin vd., 2008).

Alüminyum malzemelerin PEO ile kaplanmasında yaygın olarak silikat, alüminat, fosfat içerikli alkali elektrolitler kullanılmaktadır (Snizhko et al., 2004).

Bu çalışmada alüminyum matrisli Al_2O_3 partikül takviyeli kompozit malzemeler, toz metalürjisi yöntemi ile, farklı partikül hacim oranlarında üretilmiştir. Üretilen kompozit numunelere Plazma Elektrolit Oksidasyon kaplaması uygulanarak aşınma davranışlarına etkileri incelenmiştir.

2. METAL MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELER

2.1. Kompozit Malzemeler

2.1.1. Kompozit Malzemenin Tanımı

Kompozit malzeme, iki ya da daha fazla sayıda, aynı veya farklı tür malzemenin, en üstün özelliklerini, yeni ve tek bir malzemede toplamak amacıyla birleştirilerek oluşturulan malzemelerdir.

Bir malzemenin kompozit sayılabilmesi için ve teknik olarak kompozit malzemeyi alaşımlardan ayırabilmek için kabaca aşağıdaki özellikleri taşıması gerekmektedir:

- Farklı bileşenlerle beraber kimyasal olarak birbirinden farklı en azından iki malzemenin kombinasyonundan oluşmalıdır.
- Kompozit malzemeyi oluşturan ayrı malzemeler üç boyutlu olarak birleşmelidir.
- Kompozit, kendisini meydana getiren bileşenlerin tek başlarına sahip olamayacakları özellikler göstermelidir

Kompozitleri meydana getiren bileşen sınıfları seramik, metal, polimer gibi çeşitli malzemelerden oluşabilmektedir. Kompozit sistemlerine bağlı olarak Farklı sınıftaki malzemelerden en az iki grup malzeme bir araya getirilerek üstün özelliklere sahip malzemeler elde edilmektedir (Clyne and Withers, 1993).

Kompozit malzemeler çoğunlukla; sürekli ve diğer fazı çevreleyen matris ile matris fazı içine dağılmış olan takviye fazlarından meydana gelir. Kompozit malzemelerin özellikleri bileşen özelliklerinin, oransal miktarlarının ve takviye fazı geometrisinin fonksiyonudur. Burada takviye fazı geometrisinden kasıt; parçacık şekli, parçacık boyutu, dağılımı ve yönüdür. (Callister, 2007)

Kompozit malzemeler gruplandırılırken, bileşen faz karakteristikleri (matris sistemleri veya tabakalar), bileşenlerin dağılımı (sürekli veya süreksiz), kompozitin fonksiyonu (elektriksel, yapısal vs.) gibi çok değişik sınıflandırmalar yapılmıştır. Burada matris malzeme türüne ve yapısal bileşenlerin şekline göre iki tip sınıflandırmadan bahsedilecektir.

Takviye fazına göre:

- Partikül takviyeli kompozitler
- Fiber takviyeli kompozitler

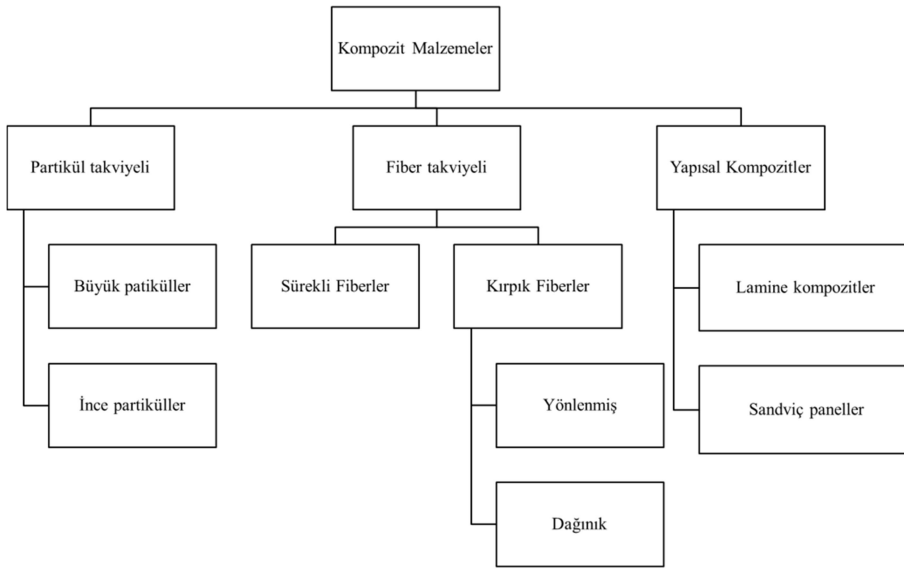
- Yapısal kompozitler

Matris malzemesine göre:

- Polimer matrisli kompozitler
- Seramik matrisli kompozitler
- Metal matrisli kompozitler

2.1.2. Takviye Malzemeleri

Kompozit malzemeleri takviye geometrisine sınıflandırdığımızda üç ana kısımda incelenebilir: partikül takviyeli, fiber takviyeli ve yapısal kompozitler (Şekil 2.1). Partikül takviyelerin en-boy ölçüleri yaklaşıktır ve malzeme için homojen dağılması ve malzeme mukavemetinin yönden bağımsız olması beklenir. Fiber takviyelerin uzunluk/çap oranı büyüktür. Fiberlerin dağılımı ve yönü malzeme özelliklerini etkiler. Yapısal kompozitler, kompozit ve homojen malzemelerin kombinasyonudur. (Callister, 2007)



Şekil 2.1 Kompozit malzemelerin takviye geometrisine göre sınıflandırılması (Callister, 2007)

Fiberler sahip oldukları küçük kesit alanı ve yüksek en-boy oranı sayesinde, yüksek elastikiyet ve aynı kompozisyondaki döküm malzemelere göre daha yüksek mukavemet değerleri gösterirler. Karbon fiber, bor fiber, cam fiber, oksit fiberler (ör. Al_2O_3) ve SiC/B₄C fiberler çeşitli araştırma ve uygulamalarda karşımıza çıkmaktadır. Malzeme içindeki yönü veya dokuma yönü malzemenin anizotropik olmasını sağlar. (Chawla, 2006)

Kırpık fiberler; daha küçük en-boy oranına sahip, malzeme içine yönlü veya dağınık olarak yayılabilen takviye elemanlarıdır. Bu sayede malzemenin mukavemeti izotropik hale gelebilir. Fiberlerin her türü kırpık

fiber olarak kullanılabilir (Chawla, 2006). Kırpık fiber takviyeli malzemelerde takviyelerin yükü taşıma yeteneği, kritik fiber uzunluğu denilen, fiberin dayanımı, çapı ve matris-fiber ara yüzey dayanımına bağlı bir değere göre belirlenir. (Callister, 2007)

Yapısal kompozitler lamine kompozitler ve sandviç paneller olmak üzere iki grupta incelenir. Lamine kompozitler farklı yönlerde dokunmuş fiber elyafların veya yönlü ahşap plakaların belirlenen yönlerde üst üste getirip bir bağlayıcı yardımıyla tek bir kompozit malzeme haline getirilmesi ile oluşur. Sandviç panellerse farklı özelliklere sahip, her biri monolitik veya kompozit olabilen katmanların bir birine simetrik olarak bir araya getirilmesidir. (Callister, 2007)

Partikül takviyelerin üretimin ucuz ve kompozit üretiminin kolay olması, partikül takviyeli kompozit malzemeleri, hava ve otomotiv uygulamalarında tercih edilen malzemeler haline getirmektedir. Partikül takviyeli kompozit malzemeler, diğer kompozitlere kıyasla izotropik özellikleri, plastik deformasyon ile şekil alabilme ve işlenebilirlik gibi önemli avantajlara sahiptir. Yaygın olarak Al_2O_3 , SiC, B_4C , WC gibi seramik partiküller uygulamalarda yer alır. (Chawla, 2006).

Al_2O_3 , SiC'den sonra takviye olarak kullanılan en yaygın seramik partiküldür. Yüksek sıcaklıklarda metal matris ile tepkimeye girmemesi ve kırılma fazlar oluşturmaması sebebiyle SiC ile kıyaslandığında termal kararlılığı daha yüksektir. (Rahimian et al.,2011; Ganesh et al., 2015)

2.1.3. Matris Malzemeleri

Matris fazı takviyeyi taşıyan esas malzemedir. Kompozit malzemelerde matrisin görevleri şunlardır:

- Bileşenleri bir arada tutar ve kompozitin termo-mekanik özelliklerini belirler.
- Takviyeyi darbelerden ve ortam etkisinden korur.
- Kompozit malzemedeki sağladığı gerilme transfer ortamı ile uygulanan yükün dağıtılmasına yardımcı olur.
- Malzemenin kesme ve bası dayanımını, tabakalar arası tokluğunu artırır.
- Takviyelerin dağılımını ve yönlenmesini belirler. (Akovalı, 2001)

2.1.3.1. Polimer Matrisli Kompozitler

Polimer malzemeler, metal ve seramik malzemelere kıyasla daha düşük dayanım ve elastik modül değerlerine sahip olmalarına karşın

hafiflikleri ve üretim hızları sebebiyle matris malzemesi olarak yaygın olarak tercih edilmektedir. Polimer matrisli kompozitlerin (PMK) yaygınlaşmasında fiberlerin yüksek performanslı üretimi ve gelişen matris malzeme çeşitliliği büyük rol oynamaktadır (Chawla, 2006).

Polimer matrisli kompozit malzemeler matris olarak kullanılan polimer malzemenin türüne göre, termoset polimer matrisli ve termoplast polimer matrisli kompozit malzemeler olmak üzere iki grup altında incelenir. Termoset matrisli kompozitler geleneksel olarak çok daha yaygın kullanılmaktadır, ancak termoplast matrisli kompozitler günümüzde hızlı bir gelişme odağına sahiptir. (Chung, 2010) Takviye malzemesi olarak sürekli veya uzun; cam, karbon ve organik fiberler geniş uygulama alanı bulmaktadır.

2.1.3.2. *Seramik Matrisli Kompozitler*

Seramik malzemeler, sahip oldukları düşük yoğunluk, yüksek gözeneklilik ve yüksek ısı sığası sebebiyle türbin kanatları (Şekil 2.2) ve ısı koruma sistemleri gibi yüksek sıcaklık uygulamalarında en çok tercih edilen malzeme grubudur. Fakat aşırı gevrek olmaları ve düşük tokluk çalışma sırasında yıkıcı hasarlara sebep olduğundan kullanımları kısıtlanmaktadır. (Deng et al., 2017) Fiber takviyeli seramik matrisli kompozitler monolitik seramiklerin iyi özelliklerini sürdürmesinin yanı sıra tokluk ve dayanım gibi mekanik özellikleri de iyileştirir.



Şekil 2.2 Türbin kanatları tasarımında seramik matrisli kompozit kullanımı (Yaroslavna, 2016)

2.1.3.3. *Metal Matrisli Kompozitler*

Metal matrisli kompozit malzemelerin mekanik ve kimyasal özellikleri, diğer kompozit türleriyle karşılaştırıldığında, yapısal malzemeler olarak kullanılmak için çok önemli olan çeşitli avantajlara sahiptir: (Hangshenas, 2016)

- Yüksek sertlik ve yüksek mukavemet
- Yüksek Young modülü
- Yüksek sıcaklıklarda yüksek yorulma mukavemeti
- Yüksek korozyon direnci

- Düşük yoğunluk
- Yüksek termal ve elektriksel iletkenlik
- Yüksek aşınma direnci

MMK malzemelerin geliştirilmesi, son 30 yıl içinde malzeme bilimindeki büyük yeniliklerden biridir. MMK malzemeler üzerine ilk çalışmalar sürekli fiber takviyeli kompozitlerde yapılmıştır. Sürekli fiber takviyeli MMK malzemelerin üretimlerinin karmaşık ve yüksek maliyetli olması, süresiz takviyeler üzerine çalışmaların başlamasına sebep olmuştur. Al_2O_3 ve SiC kırpık fiber takviyeli MMK malzemeler dizel motor pistonlarında ve uzay çalışmalarında kullanım alanı bulmuştur. Partikül takviyeli MMK malzemeler yüksek elastik modül, yüksek aşınma direnci, üretim kolaylığı, çeşitlilik ve düşük maliyet avantajları sebebiyle MMK malzemeler içinde önemli bir yere sahiptir ve bu alandaki çalışmalar oldukça fazladır. (Awalellu, 2016)

MMK malzemeler genellikle sünek, düşük dayanımlı ve düşük elastisite modülüne sahip bir matrisle sert, kırılğan, yüksek dayanımlı ve yüksek elastisite modüllü seramik takviyelerin çeşitli yöntemlerle bir araya getirilmesiyle oluşturulur. (Clyne and Withers, 1993). Bu şekilde elde edilen kompozit malzemenin mukavemeti; metal matris içerisindeki dislokasyon hareketlerinin seramik partiküller tarafından engellenmesi, bu engellenmenin dislokasyon miktarını artırmasıyla (Orowan mekanizması) matrisin kendi içinde mukavemetlenmesi ile artar. (Chawla, 2006; Lee et al, 2011)

Matris malzemeleri yaygın olarak alüminyum, magnezyum, titanyum gibi hafif malzemelerden ve bunların alaşımlarından seçilir. Kobalt, bakır, gümüş, nikel çeşitli çalışmalarda karşımıza çıkan diğer metal matris malzemeleridir (Chawla, 2006). Magnezyum, yanıcılığına ve hegzagonal kristal kafes yapısı sebebiyle işlenebilirliğinin zor olmasına rağmen en düşük özkütleyle sahip olması nedeniyle uzay, hava ve otomotiv sektöründe tercih edilen bir malzemedir. (Dey and Pandey, 2015) Titanyum, yüksek ergime sıcaklığı sebebiyle üretimi kolay olmamakla beraber; yüksek özgül dayanım ve yüksek korozyon direnci sebebiyle uzay endüstrisi ve biyo uygulamalarda yaygın kullanım alanı bulmaktadır. (Threrujirapapong et al, 2009)

Alüminyum alaşımları düşük yoğunluk, yüksek dayanım, tokluk ve korozyon direnci özelliklerinden dolayı otomotiv, uzay ve hava endüstrisinde geniş uygulama alanına sahiptir. Özellikle Al-Cu-Mg ve Al-Zn-Mg-Cu gibi alaşımların mikro yapısı çökeltme sertleştirilmesi ile modifikasyona elverişlidir. (Chawla, 2006).

Alüminyum ve alaşımları MMK'ler içerisinde en fazla pazar payına sahip matris malzeme gruplarını oluşturmaktadır. Bunların yaygın kullanım sebebi;

- Dayanım/özgül ağırlık oranının yüksek olması,
- Elektrik iletkenliği/özgül ağırlığının yüksek olması,
- Atmosfere ve diğer ortamlara karşı yüksek korozyon direncine sahip olmasıdır.

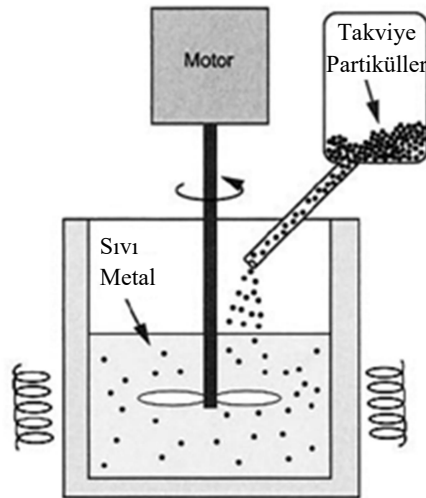
Alüminyum matrisli kompozitler, literatürde; parçacık takviyeli, kırpık fiber takviyeli ve sürekli fiber takviyeli kompozitler olarak ele alınmaktadır. (Shirvanimoghaddam et al., 2017; Gangil et al., 2017)

2.2. Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

2.2.1. Sıvı Hal Yöntemleri

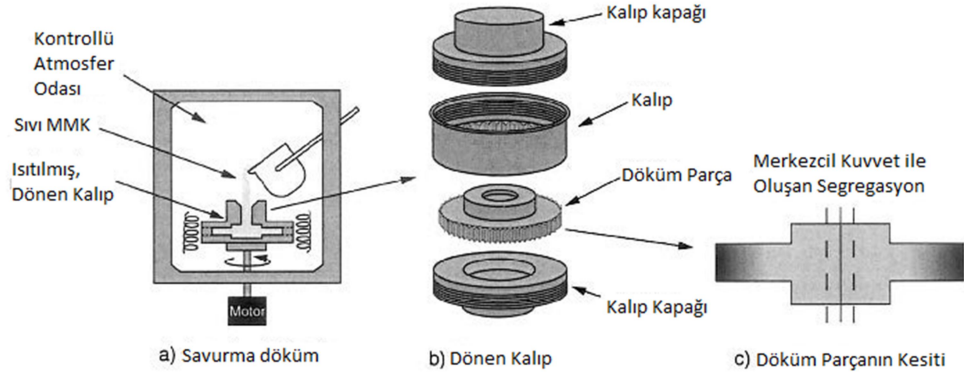
2.2.1.1. Döküm ve Sıvı İnfiltrasyon

Döküm yöntemi, fiber preformların basınçsız dökümündeki zorluktan dolayı genellikle partikül takviye kullanımında uygulanır. Partikül ve ergimiş metal pota içinde katılaştırılır. (Şekil 2.3) Bu yöntemde takviye malzemeye en az düzeyde tepkimeye girecek alaşım seçilmelidir. Eklenen takviyeler ergiyiğin viskozitesini artıracığı için üretim, monolitik alaşımda kullanılanlardan daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilir. Yoğunluk farkı sebebiyle batma eğilimi gösteren takviyeler için ergiyiğin karıştırılması gerekebilir. Manyetik karıştırıcılar veya mekanik titreşimler takviyelerin ıslanabilirliğini ve ergiyik matris içine penetrasyon yeteneğini iyileştirerek karışımın homojenleşmesini sağlarlar. (Chawla, 2006).



Şekil 2.3 İşleme sırasında partiküllerin çökmesini en aza indirmek için kompozit eriyiğin seramik parçacıkları ile karıştırılması (Chawla, 2006).

Fren diskı gibi aksel simetrik bazı parçalarda takviye dağılımı aşınma dayanımı ve parçanın işlenebilirliği açısından önemli olduğunda savurma döküm yöntemi ile dönme hızı ayarlanarak istenilen dağılım gradyeni oluşturulabilir (Şekil 2.4). Aşınmaya maruz disk yüzeyinde yoğun takviye beklenirken montaj yapılan yüzeyin toleransının işlenebilmesi için takviyesiz yüzey istenmektedir. (Chawla, 2006).

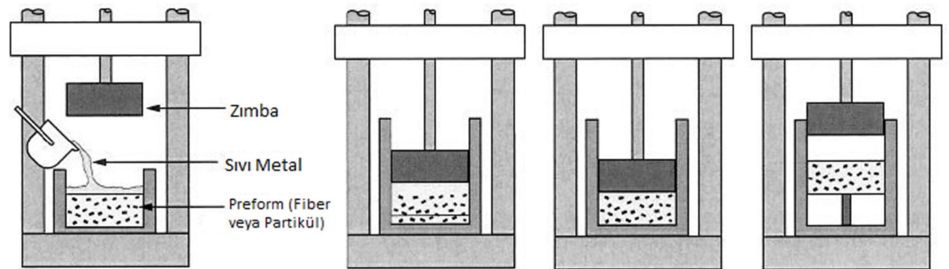


Şekil 2.4 Savurma döküm işleminin şeması (a), dönen kalıp elemanları (b) ve takviye dağılım gradyeninin görüldüğü parça kesiti (c) (Chawla, 2006).

Takviye partiküllerin refrakter dolgu malzemesi ile preform halinde hazırlanması ve metalin ergitilerek dolgu malzemesinin yerine geçirilmesi işlemi sıvı infiltrasyon yöntemi olarak adlandırılır. Hazırlanan preform Al alaşımı için 700-1000°C sıcaklıkta bekletilir, tahmini infiltrasyon hızı 25cm/h 'in altındadır.

2.2.1.2. Sıkıştırılmalı Döküm ve Basınçlı İnfiltrasyon

Sıkıştırılmalı döküm ve basınçlı infiltrasyon yöntemlerinde sıvı metal matris, kısa fiber veya partiküllerden oluşan preform içine basınç yardımıyla gönderilir (Şekil 2.55). Yöntem sıvının basınç yardımıyla daha ince kesitli boşlukları doldurabilmesi sebebiyle karmaşık şekilli parça imalatına ve hızlı olması sebebiyle seri imalata uygun bir yöntemdir. Uygulanabilmesi için sıvı metalin viskozitesinin düşük, takviye malzemeyi ıslatabilirliği yüksek olmalıdır (Chawla, 2006).



Şekil 2.5 Sıkıştırılmalı döküm yönteminin şematik gösterimi (Chawla, 2006).

2.2.1.3. Püskürtme Yöntemi

MMK'lerin eldesi için kullanılan yöntemlerden biri de püskürtme yöntemidir. Bu yöntem, ergiyik haldeki matris alaşımı damlacıkları ve takviye elemanlarından oluşan karışımın bir altlık üzerine püskürtülerek biriktirilmesi esasına dayanır. Yöntemde metal alaşım ergime sıcaklığından katılma sıcaklığına çok hızlı bir şekilde soğurken, katılma sıcaklığından oda sıcaklığına yavaş bir soğumaya maruz kalır. Bu durum elde edilen malzemenin çok ince taneli ve çökelti yapısında olmasına neden olur. Yöntem önceleri döküm yoluyla üretilmeleri güç olan çelikler ve nikel esaslı süper alaşımlar için geliştirilmiş olsa da günümüzde bakır ve alüminyum alaşımları ve MMK malzemeler için de kullanılmaktadır (Davis, 2004).

Yöntemde sıvı metal ile takviye partikülleri arasındaki temas süresi kısadır. Bu durum ergiyik matris partikülleri ile takviye fazı arasındaki arayüzey reaksiyonlarını da azaltmaktadır. Böylece istenmeyen arayüzey bileşenleri ve kırılma oluşumu minimize edilmiş olur. Bu yöntem takviye malzemesinin homojen dağıldığı, ince mikroyapılı parçaların eldesini mümkün kılar. Diğer yandan, bu yöntemle elde edilen kompozitin yoğunluk değeri teorik yoğunluk değerinin %95'i kadardır. Bu nedenle tam yoğunluk değerini elde etmek için bitirme işlemi zorunludur (örneğin dövme, ekstrüzyon ya da haddeleme gibi) (Davis, 2004; Chawla, 2006; Torralba et al., 2003).

2.2.2. Katı Hal Yöntemleri

Başlangıçta, sıvı faz yöntemlerinde takviye dağılımının kontrolü ve üniform matris mikroyapısı elde etmedeki güçlükler sebebiyle ortaya atılmıştır. Sıvı fazda kullanılan yüksek sıcaklıkların istenmeyen arayüzey reaksiyonları oluşturması daha düşük sıcaklıklarda malzeme üretimine imkân veren katı faz yöntemlerinin geliştirilmesinin en önemli sebebi olmuştur(Chawla, 2006).

Katı hal yöntemleri arasında en yaygın kullanılan yöntem toz metalürjisi olmakla beraber haddeleme ve ekstrüzyon gibi deformasyon yöntemleri de çalışmalarda ve uygulamalarda yer bulmaktadır. (Amirkhanlou et al., 2011)

2.2.2.1. Deformasyon Yöntemleri

Haddeleme yöntemi, tabaka kompozit üretimi için kullanılan başlıca yöntemdir. Polimer matrisli lamine kompozitler farklı yönlerde dokunmuş preform elyafların belirli oryantasyonlarda üst üste getirilerek kurlama sıcaklığı ve atmosferinde haddelenerek üretilir. Sandviç kompozitlerde tabakaların birleştirilmesi için de aynı yöntem uygulanır.

Çok tabakalı metalik kompozitlerin üretiminin yanı sıra malzemenin mekanik olarak alaşımlanmasını gerçekleştirmek amacıyla tekrarlı haddeleme uygulaması iki metalin birbiri içinde makro boyutta homojen dağılmasını sağlamaktadır. (Eizadjou et al., 2008)

Seramik partiküllü Al matrisli kompozit üretimi için 2009 yılında Jamaati ve ekibi tarafından ortaya atılan sürekli tavlama haddeleme (CAR) yöntemi, katı alüminyum plakalar arasında seramik partiküllerin uygulanıp beraber sırasıyla haddeleme ve tavlama işlemlerinin tekrarlanması şeklinde gerçekleşir. İşlem tekrarı arttıkça daha homojen partikül dağılımı oluşmaktadır. (Amirkhanlou et al., 2011; Jamaati et al., 2010)

Ekstrüzyon, metal matrisli kompozit üretiminde başlıca iki şekilde karşımıza çıkmaktadır: Sürekli fiber takviyeli süper iletken malzemelerin üretiminde ve toz metalurjisi ile üretilen malzemelerin ikincil işlemi olarak.

2.2.2.2. Toz Metalurjisi

Metal matrisli kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan en yaygın yöntemlerden biri toz metalurjisi tekniğidir. Çok eskilerden beri bilinen ve uygulanan bir yöntem olmasına rağmen uygulama açısından gelişmesi yeni sayılabilir. Toz metalurjisini cazip kılan, ekonomik açıdan, çok yüksek hassasiyette karmaşık şekilli, yüksek kalitede parça üretiminin mümkün olmasıdır. Çok sayıda küçük parçalar için ekonomik üretim sağlar.

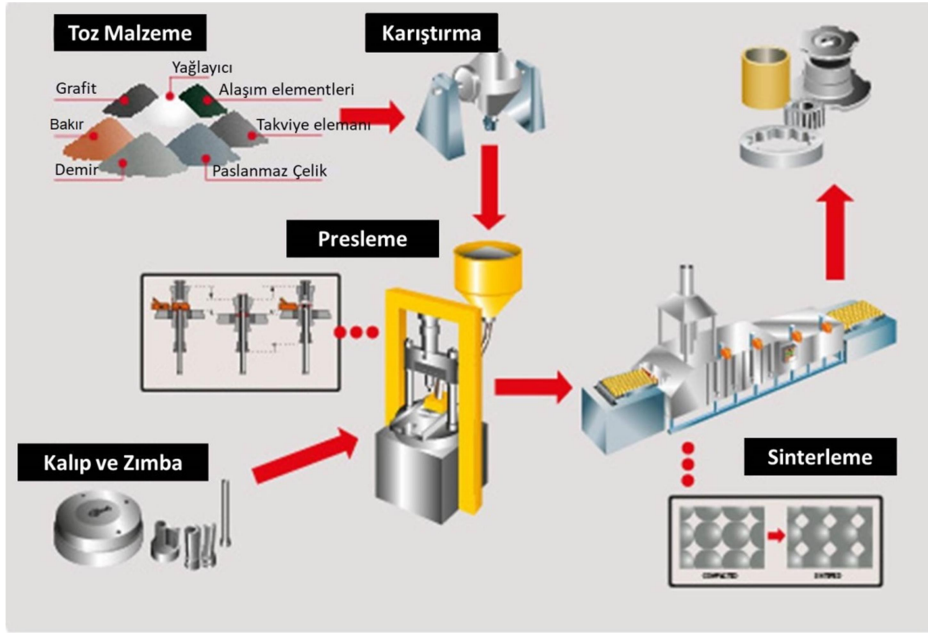
İstenilen kimyasal bileşimdeki metallerin tozları ile parça üretebilmenin yanı sıra farklı metallerin tozlarından oluşan karışımlar da kullanılabilir. Mekanik alaşımlama adı verilen yöntem, ergiyik halde çözelti oluşturamayan metallerin, bilyalı karıştırma değirmenleri yardımıyla katı fazda(toz) mekanik olarak bir araya getirilmesidir.

3. TOZ METALURJİSİ

3.1. Toz Metalurjisinin Aşamaları

Toz metalurjisi yönteminin temel aşamaları şu şekilde sıralanır:

1. Malzeme seçimi ve karıştırma
2. Presleme
3. Sinterleme
4. İkincil işlemler



Şekil 3.1 Toz Metalurjisi yönteminin aşamaları (Ames, 2018)

3.1.1. Malzeme Seçimi

Toz metalürjisi yönteminde üretim için seçilen metal tozlarının şekil ve boyutları belirlenir. Belirli boyut aralığında olması isteniyorsa, tozlar elek analizi ile gruplandırılır. MMK üretilecekse matris tozları ve takviye partiküller için bu işlem ayrı ayrı yapılır. Matris/takviye oranına göre tozlar birbiri ile karıştırılır. Oluşturulacak karışıma bağlayıcı ve yağlayıcılar ilave edilir.

3.1.2. Presleme

Metal tozlarının sıkıştırılması aşağıdaki ana fonksiyonlara sahiptir:

- Tozu istenilen şekle getirmek
- İstenen son boyutların mümkün olduğunca yüksek bir dereceye kadar verilmesi (Sinterlemeden kaynaklanacak herhangi bir boyutsal değişikliğe dikkat edilmelidir.)

- İstenilen seviyede ve şekilde gözeneklilik vermek.
- Daha sonra kullanım için yeterli dayanımı kazandırmak.

Bu hedeflere ulaşmak için çeşitli değişkenlerin optimum olarak belirlenmesi gerekir. Bu değişkenler:

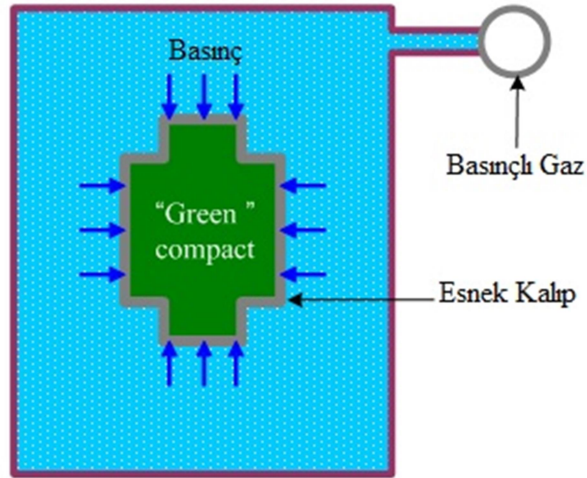
- Basınç: yüksek - düşük,
- Sıkıştırma hızı: yüksek - düşük
- Sıcaklık: oda sıcaklığı veya yükseltilmiş sıcaklık;
- Tek, çift eksenli - hidrostatik presler. (Upadhyaya, 2002)

3.1.2.1. Tek ve çift eksenli presleme

Tek eksenli sıkıştırma işleminde, toz karışımı kalıp boşluğuna doldurulduktan sonra yalnızca üst zımba; çift eksenli sıkıştırma işleminde üst ve alt zımba ile basınç uygulanır. Tek eksenli sıkıştırmada yoğunluk zımbaya yakın olan yerden uzaklaştıkça azalmaktadır. Bu nedenle karışımın çift eksenli olarak sıkıştırılması daha homojen yoğunluk dağılımı sağlamaktadır.

3.1.2.2. İzostatik Presleme

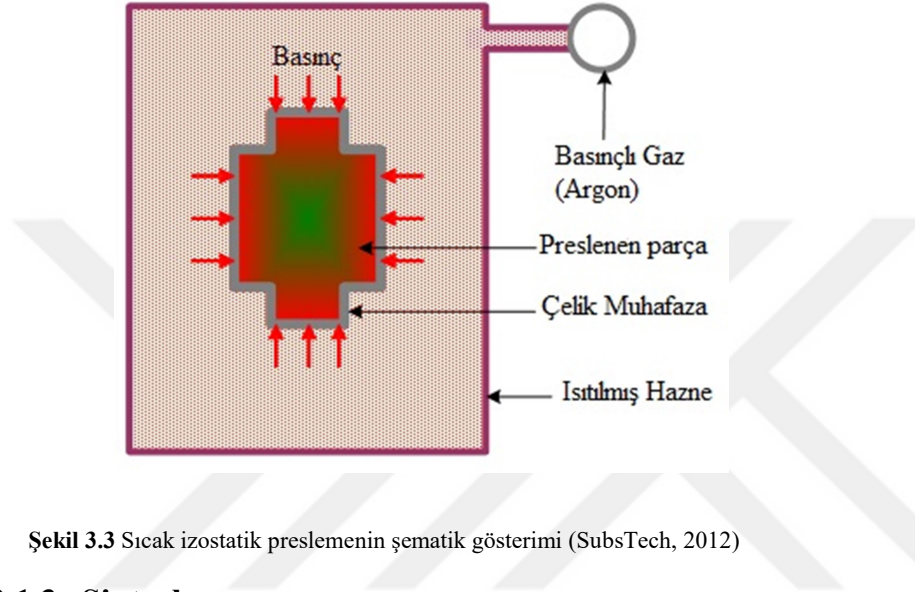
İzostatik presleme, uygun kalıba konulan bir toz halindeki veya ön şekillendirilmiş bir parçaya her yönden eşit olarak basınç uygulanarak gerçekleştirilen bir şekil verme yöntemidir. İzostatik presleme; boyutu büyük, en/boy oranı yüksek veya kalıpta homojen olarak sıkıştırılamayacak parçaların üretiminde kullanılır. Sıkıştırma işlemi bir izostatik ortamda gerçekleştiği için basınç homojen bir şekilde dağılmakta ve böylece uniform bir yoğunluk elde edilmektedir. (Henderson et al., 2000)



Şekil 3.2 Soğuk izostatik preslemenin şematik gösterimi (SubsTech, 2012)

3.1.2.3. Sıcak Presleme

Sıcak presleme yöntemlerinde basınç ile birlikte aynı anda ısı da uygulanır. Bunun sonucunda yüksek dayanım, sertlik ve yoğunluk yanında parçada gaz boşluğu ve kendini çekmenin daha az olması gibi üstünlükler sağlamaktadır. Sıcak presleme işlemleri, tek, çift eksenli veya izostatik olarak gerçekleştirilebilir. İşlem, belirli bir sıcaklıkta gerçekleştirildiği için parçanın kirlenmesini önlemek amacıyla sıkıştırma işlemi vakum veya koruyucu gaz atmosferi altında yapılmaktadır.



Şekil 3.3 Sıcak izostatik preslemenin şematik gösterimi (SubsTech, 2012)

3.1.3. Sinterleme

Sinterleme, toz metal parçalara mukavemet kazandırmak ve tozların birbirine bağlanmasını sağlamak amacıyla preslenmiş ürüne, genellikle ergime sıcaklığının altında uygulanan bir ısıl işlemdir. Tozlar arası bağ oluşumu adhezyon, yüzeysel ve hacimsel difüzyon yolları ile gerçekleşir.(Diler, 2012)

Sinterleme işlemi ön ısıtma, sinterleme ve soğutma aşamalarından oluşur. İlk aşamada ön ısıtma bölgesinde yağlama amacıyla toza ilave edilen katkıların tamamı parçadan uzaklaştırılır. Bu aşamada birbirinden bağımsız olan toz partikülleri arasında tane sınırı oluşumu başlar. Partiküllerin merkezleri çok küçük bir miktar birbirlerine yaklaşır. İkinci aşamada, sinterleşmenin gerçekleştiği aşama olup en yüksek sıcaklığa ulaşılır. Bu aşamada gözenek miktarı azalır. Yeni bir mikro yapı oluşumuna izin veren partikül büyümesi gerçekleşir. Boyutsal küçülmenin en fazla olduğu aşamadır. Sinterleme bölgesinde sıcaklık homojen olmalıdır. Son aşamada, kapalı gözenek oranı hızla azalır. Bu aşamada, soğutma hızı malzeme içerisindeki faz dönüşümlerinden dolayı mekanik özellikleri etkiler. Birbirinden izole edilen gözenekler küresel şekil kazanmaya başlar.(Erden, 2015)

Sinterlemede önemli olan bir diğer konu da koruyucu atmosferdir. İşlem sırasında oluşabilecek istenmeyen oksitlenmeleri önlemek, buharlaşan yağlayıcı, bağlayıcı gazları ve dumanları dışarı atmak ve sinterlenen parçaların bileşimini kontrol etmek için kullanılır. MMK'daki toz metal malzemeye göre seçilen bu atmosferler redükleyici (H_2 , CO , CH_4), nötr (vakum, He , Ar , N_2) veya nitrürleyici(NH_3) özelliklerde olabilir.

Alüminyumun oksijene duyarlılığı yüksek olduğu için alüminyum tozları etrafında bir alüminyum oksit tabakası bulunmaktadır. Bu tabaka üretime geçmeden bazı kimyasal işlemlerle toz yüzeyinden uzaklaştırılabilmekte veya tozların sıkıştırılması sırasında kırılabilmektedir. Dolayısıyla alüminyumun tekrar oksitlenmesini önlemek için sinterleme işlemi belirli nötr bir atmosfer (vakum, Ar , N_2 , vb) altında yapılmaktadır. Alüminyum ile ilgili yapılan çalışmalarda en uygun atmosfer ortamının azot olduğu belirtilmektedir.

3.2. Toz Metalurjisi Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları

- ✓ Toz metalurjisi yönteminde düşük sıcaklıklarda çalışıldığı için dökümde karşılaşılan ve MMK'lerin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkileyen arayüzey reaksiyon ürünlerinin oluşması engellenebilmektedir.
- ✓ T/M yönteminde fiberlere göre daha ucuz olan partiküllerin kullanılması fiberlerin kullanıldığı yöntemlere göre daha düşük maliyetli malzeme üretimini sağlamaktadır.
- ✓ Üretim sonrası elde edilen parça istenilen tolerans ve ölçüdedir, malzeme kaybı çok azdır.
- ✓ Karmaşık ve özel şekilli parçaların üretimi mümkündür.
- Takviye partiküllerin matris içerisinde homojen dağılımını sağlamak zordur.
- Büyük ve karmaşık şekilli parçaların üretimi için uygun değildir.
- Takviye olarak fiber kullanılmak istendiğinde, karıştırma esnasında fiberler kırılabilir.
- Mikro veya nano ölçekli tozlar insan sağlığı açısından tehlike oluşturabileceği için iş sağlığı ve güvenliğinin sıkı takibi gereklidir.
- Metal tozların üretimi, istenen geometrik form ve boyutların sağlanması maliyetlidir.

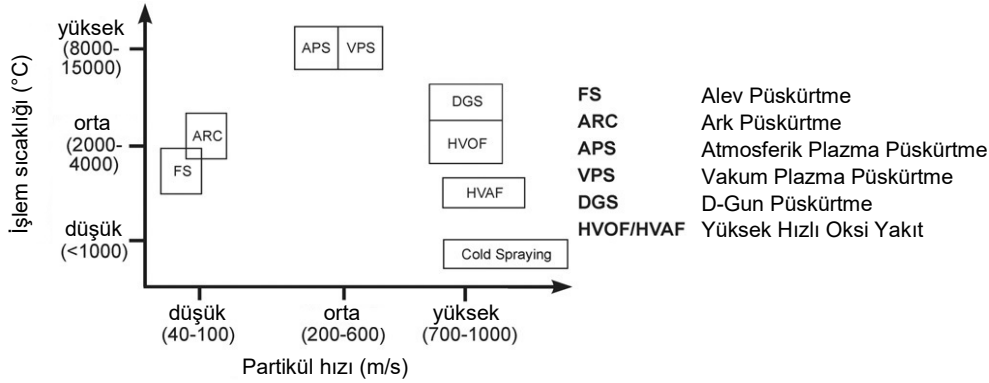
4. SERAMİK KAPLAMA YÖNTEMLERİ

Çeşitli malzeme gruplarının korozyon direncini, aşınma direncini artırmak; sertlik sağlamak, boya uygulaması öncesi boyanın tutunabileceği astar oluşturmak, malzemenin ısı ve elektriksel iletkenlik, yalıtkanlık ve manyetik özelliklerini modifiye etmek, görünüm özelliklerini değiştirmek gibi sebeplerle birçok yüzey kaplama yöntemi geliştirilmektedir.

4.1. Isıl Püskürtme Kaplamaları

Isıl püskürtme; kaplama oluşturmak amacı ile önceden hazırlanmış olan altlık metale çok ince metalik veya metalik olmayan malzemeleri çökelten bir grup yöntemi tanımlamak için kullanılan bir terimdir. Kaplama malzemesi toz, çubuk ya da tel biçiminde olabilir. Isıl püskürtme alevi, kaplama malzemesini ergetmek için gerekli olan sıcaklığı; yanıcı gazlar, elektrik arkı veya plazma arkı ile elde eder. Ergiyen kaplama malzemesi kaplanacak olan metal yüzeyine püskürtülür. Yüze darbe etkisiyle çarpan tanecikler, düzleşmekte ve hedef metale olan ısı transferi ile soğuyarak katılaşmakta ve birbirleri ile temas haline gelerek tabaka meydana getirmektedir.(Berger, 2015)

Şekil 4.1’de yaygın olarak kullanılan ısıl püskürtme kaplama türlerinin işlem parametreleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



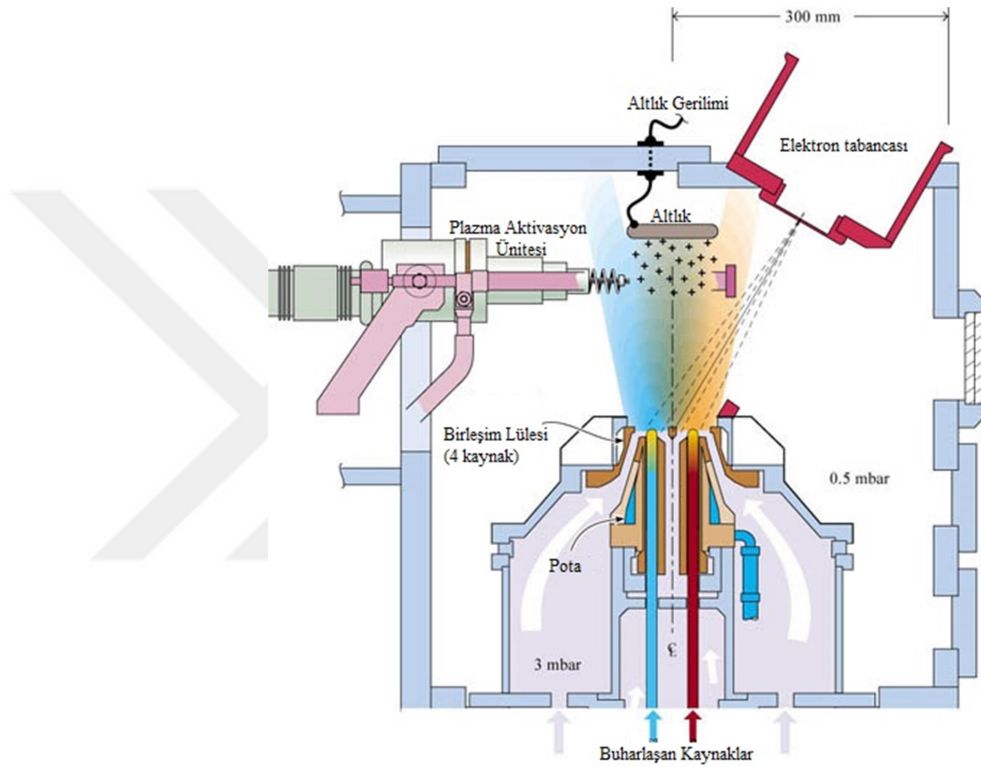
Şekil 4.1 Isıl püskürtme kaplama türlerinin işlem sıcaklığı ve partikül hızları (Berger, 2015)

4.2. Buhar Depolama Yöntemleri

4.2.1. Fiziksel Buhar Depolama Yöntemi (PVD)

Fiziksel buhar depolama (PVD) çok düşük vakum seviyelerinde gerçekleşen ince film üretim teknolojilerinin genel adıdır. Dışarıdan uygulanan ısı veya elektrik enerjisi yardımıyla buhar fazına geçirilen bir

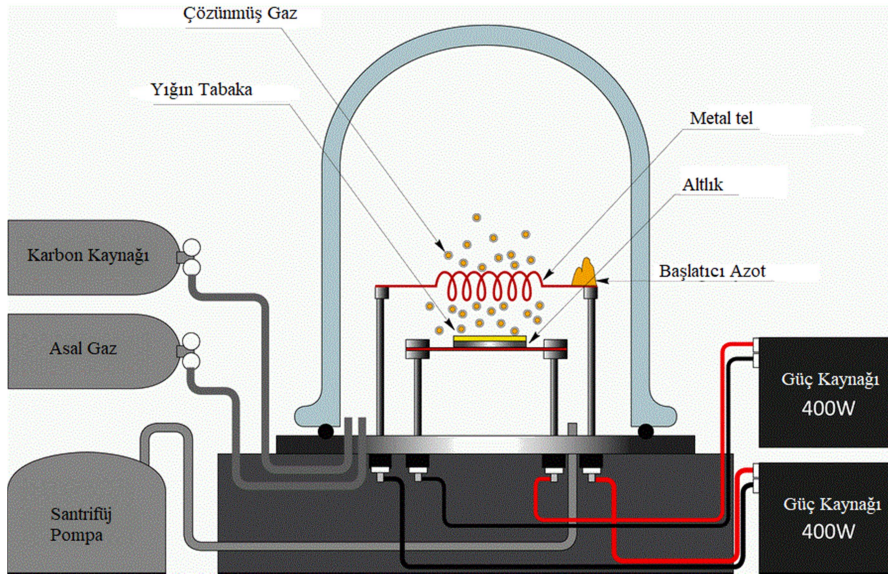
malzemenin atomlarının veya iyonlarının altlık malzeme yüzeyinde biriktirilmesi, plazma fazına geçirilmiş gazın iyonlarının hedef bir malzeme üzerine çarptırılması ile kopartılan atomlarının altlık malzeme yüzeyinde biriktirilmesi esaslarına dayanır. Bu yöntemle altlık malzeme üzerinde, yüksek sertlik ve tokluk özelliklerine sahip; metal-nitrür, metal-karbür ve metal-karbo-nitrür (TiN, TiC, TiCN gibi) tabakaları üretilebilir. Kaplama tabakalarının kalınlıkları en fazla 1–5 μm kadardır (Tozkoparan, 2010). PVD yönteminin uygulanması ve donanımı Şekil 4.2’de şematik olarak verilmiştir.



Şekil 4.2 PVD yönteminin şematik gösterimi (Reveron Pojan, 2018)

4.2.2. Kimyasal Buhar Depolama Yöntemi (CVD)

Kimyasal buhar depolama (CVD) yöntemi buhar fazındaki kimyasal bir reaksiyondan ısıtılmış bir yüzey üzerine bir katının biriktirilmesi olarak tanımlanabilmektedir. Kimyasal buhar depolama yöntemi bir buhar transfer işlemi olmakla beraber doğadaki atomlarla ilgilidir. Ayrıca kimyasal buhar biriktirme iyon kaplama, moleküler buhar kaplama, püskürtme ve buharlaştırma gibi çeşitlerini de içermektedir. Yeni proseslerin çoğu genişletilmiş plazma kimyasal buhar biriktirme ve aktif püskürtme gibi iki sistemin tamamen etkileşimi halindedir.(van Mol, 2003) CVD yönteminin uygulanması ve donanımı Şekil 4.3’de şematik olarak verilmiştir.



Şekil 4.3 CVD yönteminin şematik gösterimi(Thulasikanth, 2016)

4.3. Elektrolitik Yöntemler

Bir metalin elektrolitik olarak kaplanmasında, yüzeyi kaplanacak olan malzeme uygun bir elektrolite batırılır. Elektroliz ve elektroforez gibi yöntemlerde kaplanacak olan malzeme katot olarak kullanılır. Anot ise çökecek metalden ve yüksek saflıkta (%99.98) olmalıdır. Oksidasyon işlemlerinde ise kaplanacak olan malzeme anot iken, katot reaktif olmayan bir metaldir (ör: paslanmaz çelik).

4.3.1. Elektroforez ile Biriktirme

Elektroforez ile biriktirme (EPD), elektroforez ve depozisyon olmak üzere iki farklı süreçten oluşur. Elektroforez, yüklü parçacıkların bir süspansiyon içerisinde elektriksel alan etkisiyle hareketini kapsar. Diğer kaplama yöntemleri ile kolayca ulaşılamayacak derecede yüksek saflıkta malzeme birikmesine olanak sağlaması ve kompozitler ve biyo malzemeler gibi karmaşık yapılar üzerine kaplama yapılabilmesi sebebiyle biyomedikal uygulamalar için elektroforez önemli bir avantaj oluşturmaktadır. Depozisyon ise küçük yüklü parçacıkların birikmesi sonucu yoğun kütleler oluşturmaktadır. (Besra and Liu, 2007)

Besra ve Liu (2007), EPD yöntemini, kararlı bir süspansiyondan gelen yüklü parçacıkların, zıt yüklü bir altlık yüzeyinde doğru akım altında depolanmasını içeren koloidal oluşum tekniği olarak tanımlamıştır. EPD yöntemi ile toz halindeki kaplama malzemesinin karmaşık yapıli elektrotlar üzerine homojen olarak birikmesi sağlanabilir.

4.3.2. Anodik Oksidasyon

Anodik oksidasyon (anotlama, eloksal), kaplanacak olan metalin anot olarak ayarlanmasıyla, yüzeyindeki oksit tabakasının anodik tepkimelerle

kalınlaşmasıdır. İşlem, oksijene karşı afinitesi yüksek olan hafif metal ve alaşımlarına uygulanır.

Anodik oksidasyon kaplamasında tabaka kalınlığını etkileyen faktörler elektrolit, sıcaklık ve uygulanan akımdır.

Anotlama sırasında kullanılan elektrolitik banyo sülfirik asit (H_2SO_4), oksalik asit ($\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$), kromik asit (H_2CrO_4), borik asit (H_3BO_3) gibi çözültülerden oluşur. Sülfirik asit ile 8-50 μm arası kalınlık elde edilebilirken kromik asit kullanıldığında 2 μm kalınlığında bir tabaka oluşur. Borik asit ise bariyer film denilen gözeneksiz bir kaplama tabakası sağlar.(Kalkancı, 2004)

Anotlamanın ısıveren bir tepkime olması sebebiyle banyo sıcaklığı işlem sırasında çok artar. En verimli kaplama sıcaklığı 18-22°C arasında elde edilmektedir. Sıcaklığın artması oksitlenme hızını düşürmekte ve işlem süresinin uzamasına sebep olmaktadır. Bu nedenle elektrolit sıcaklığını düşürmek ve sabit tutmak için ısı değiştiriciler ve soğutma sistemi kullanılmaktadır.

Düşük voltajlı doğru akımın kullanıldığı anotlamada gözenek hacmi neredeyse %50'dir ve akım yoğunluğu düşük olduğu için kaplama işlemi çok yavaştır. İşlem süresini düşürmek ve kaplama kalınlığını artırmak için darbeli doğru akım güç kaynakları kullanılmaktadır.

Anodik oksidasyon kaplamasında önemli olan bir diğer faktör akım yoğunluğudur. Bu değer 0,3-4 arasında değişmekle beraber kullanılacak değer altlık malzeme, elektrolit, istenen kaplama kalınlığına bağlı olarak seçilmektedir. Normal anotlamada sülfirik asit kullanılırken 8 μm kaplama kalınlığı için 1,4-1,8 A/dm^2 akım yoğunluğu optimum iken, sert anotlamada yine sülfirik asitle 25-250 μm kalınlık eldesi için 2-10 A/dm^2 akım yoğunluğu kullanılır.

Metal matrisli kompozitler, takviye ile matris arasındaki galvanik reaksiyonlar, arayüz reaksiyonlarıyla oluşan bileşikler sebebiyle seçici korozyon, arayüzdeki kusurlar sebebiyle oluşan çatlaklar gibi nedenlerle korozyona karşı daha hassastır. Anotlama işlemi MMK'lerde korozyon direncini bir miktar artırmaktadır fakat takviye partiküller ve onların yarattığı boşluklar nedeniyle yüzeyde boşluksuz bir kaplama sağlanamadığı için monolitik malzemelerdeki kadar verimli bir korunma sağlamaz.(Xue et al., 2006; He et al., 2011)

5. PLAZMA ELEKTROLİTİK OKSİDASYON

Plazma elektrolitik oksidasyon (PEO) yöntemi, anodik oksidasyon prensibine dayanan, klasik anotlamaya kıyasla daha yüksek akım yoğunluğu ve voltaj kullanılarak uygulanan bir yüzey kaplama yöntemidir. (Tekin vd., 2008) Klasik anotlamanın yetersiz kaldığı, yüksek oranda Cu ve Si içeren alüminyum alaşımlarında ve metal matrisli kompozitlerde plazma elektrolitik oksidasyonun korozyon ve aşınma dayanımlarını iyileştirdiği yönünde çalışmalar bulunmaktadır.(Cui et al., 2007; Lee et al., 2008; He et al., 2011; Erarslan, 2013; Wang et al., 2005; Arrabal et al., 2010; Pardo et al., 2009; Xue et al., 2009)

5.1. PEO'nun Tarihsel Gelişimi

PEO yönteminin günümüzdeki kullanımına ulaşması yarım yüzyılı aşkın bir sürede gerçekleşmiştir.

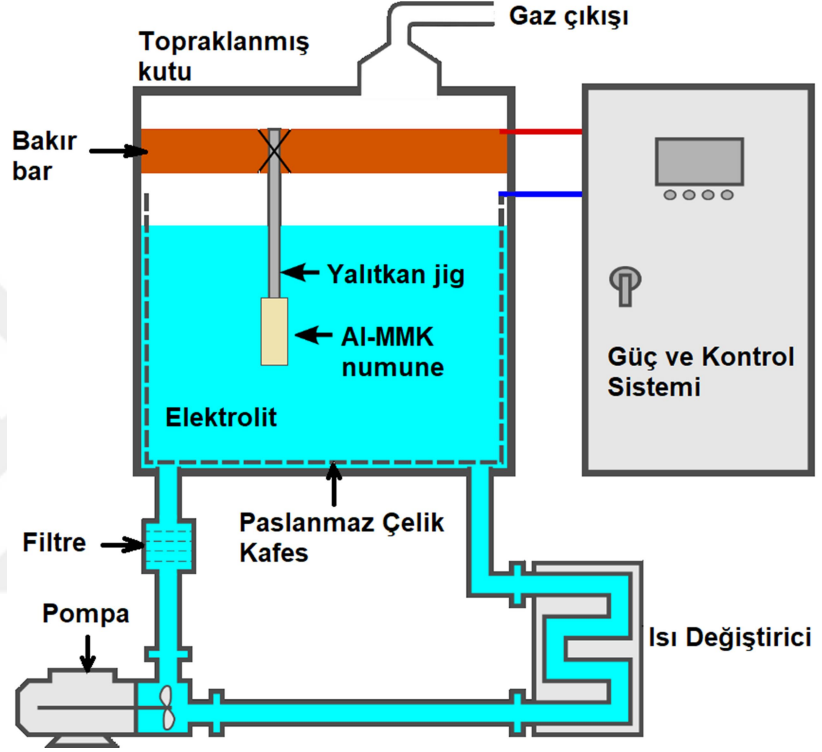
Çizelge 5.1 PEO'nun tarihsel gelişimi (Kalkancı Başak, 2008)

Yıl	Araştırma	Araştırmacı
1844	Suyun elektrolizi sırasında metal yüzeyinde ışıltama	Fizeau, Foucault
1878	Metallerin anotlanmasında ışıltama	Sluginov
1932	“Spark Fenomeni”: Kaplama özelliklerine zararlı, kaçınılmalı	Gunterschultze, Betz
1958	İlk başarılı PEO kaplama: Kadmiyum (anot) yüzeyine kadmiyumniobat	McNiell, Nordbloom
1966	Patent : “Anodik Spark Reaksiyon Prosesleri ve Reaksiyonları”	McNiell
1974	Patent : Anodik boşaltımlar kullanılarak metallerin kaplanması	Gradovsky
1977	Anodik Spark Depozisyonunun Mekanizması	Van
1982	“Alüminyum Üzerinde Sert Oksit Kaplamaları Üretmek İçin AC ve Puls Bipolar Prosesleri Uygulaması”	Markov
1980-1995	Anodik Spark Depozisyonu teorik ve teknolojik olarak geliştirilmiştir	Tchermenko, Snezhko
1995	Carl Zeiss ve Keronite Ltd. firmaları teçhizatının üretimini yapmaktadır	Carl Zeiss

PEO işlemi için gerekli donanım ticari olarak üretilip piyasaya sürüldükten sonra akım-voltaj karakteristikleri ve elektrolitler ile alakalı çalışmalara ağırlık verilmiştir. Son 20 yılda farklı akım türlerinde ve farklı elektrolit kombinasyonlarında kaplama uygulamaları yapılmış, kaplamanın oluşum mekanizmasına, aşınma ve korozyon dayanımlarına etkileri araştırılmıştır.

5.2. PEO Donanımı

PEO uygulaması, bir güç kaynağı ve elektroliz ünitesi olmak üzere iki temel donanıma sahiptir. Elektroliz ünitesi, yalıtılmış, kapalı bir kap ve içerisinde paslanmaz çelik bir kafesten oluşur. Kap içinde bulunan elektrolite daldırılmış, yalıtkan bir numune tutucu bulunur. Elektolitin sıcaklığı bir ısı değiştirici ve pompa düzeneği ile kontrol altında tutulmaktadır. PEO işleminde numune anot olarak kutuplanırken, paslanmaz çelik kafes, katot olarak kutuplanır.



Şekil 5.1 Deneysel PEO ünitesinin şematik gösterimi

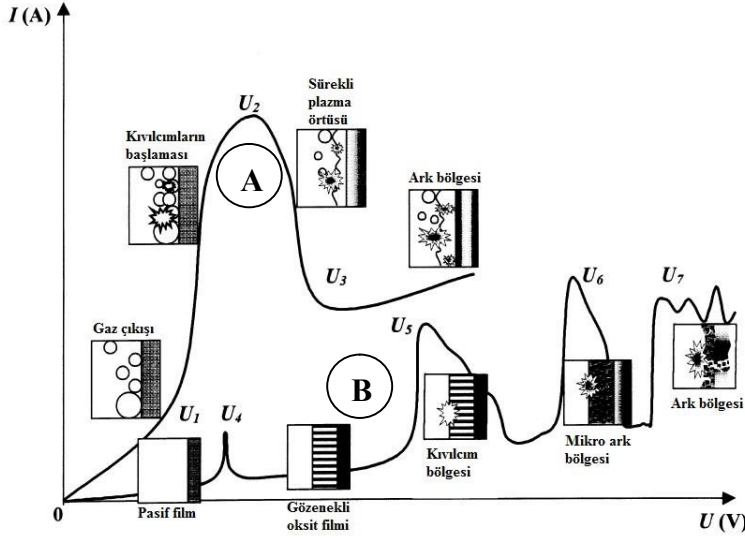
Uygulanan elektriksel rejime bağlı olarak farklı tipte güç kaynakları kullanılabilir. Bunlar: doğru akım kaynakları, darbeli doğru akım kaynakları, dengesiz alternatif akım kaynakları ve farklı kutuplu akım kaynaklarıdır (Wang et al., 2009; Khan et al., 2010; Matykina et al., 2009; Malayoglu et al., 2009)

5.3. PEO Tabakasının Oluşumu

5.3.1. Akım-Voltaj Karakteristikleri

PEO işleminde iki tip akım-voltaj grafiği vardır. Şekil 5.2'deki A eğrisinde anodik ve katodik yüzeyde gaz açığa çıkaran metal-elektrolit sistemi görölmektedir. Şekil 5.2'deki B eğrisi ise oksit film tabakasının oluşumunu göstermektedir. Malzeme yüzeyinde var olan pasif film tabakası, A eğrisinde U_1 gerilim değerine, B eğrisine kadar U_2 değerine kadar Ohm kuralına uygun davranış gösterir. U_1 ve U_2 kritik gerilim değerleri,

malzemenin korozyon potansiyeline denk gelir. Bu noktalardan itibaren hem yüzeyde bulunan pasif oksit tabakası çözülmeye başlar hem de akım-voltaj davranışları değişir. (Yerokhin et al., 1999; Tekin vd., 2011)



Şekil 5.2 PEO işleminde akım-voltaj diyagramı (Yerokhin et al., 1999)

A Eğrisi

- U_1-U_2 aralığında artan potansiyel ile akım değerinde dalgalanma ve yüzeyde ışıltama görülür. Elektrot (numune) üzerinde O_2 ve H_2 gazlarını açığa çıkaran tepkime gerçekleşir. Gazların teması kestiği bölgelerde tepkime sınırlandırılırken, teması kesmediği bölgelerde akım yoğunluğu artar.
- U_2 değerinde elektrot (numune) yüzeyi elektrik iletkenliği düşük gaz tabakasıyla örtülüdür. Bu noktada elektrik alan, iyonizasyonu başlatacak şiddettedir (10^6-10^8 V/m). İyonizasyon, dağınmış gaz kabarcıklarındaki kıvılcımlarla başlar ve buhar plazma kılıf boyunca düzgün yayılır.
- U_2-U_3 arasında buhar kılıf hidrodinamik olarak stabildir ve akım düşer.
- U_3 değerinde parlak deşarjlar ve yoğun kıvılcımlar görülür.

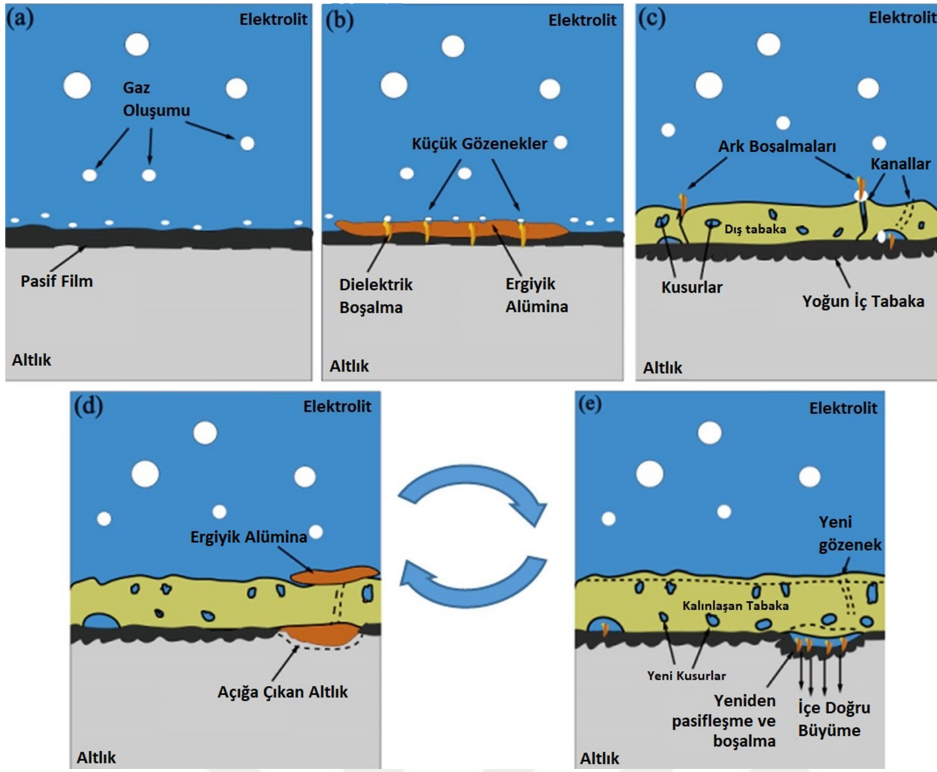
B Eğrisi

- U_4 gerilim değeri malzemenin korozyon potansiyeline denk gelir ve numunede var olan pasif film tabakası çözünür.
- U_4-U_5 aralığında oksit film yeniden pasifleşir ve voltaj düşer. Gözenekli oksit film oluşur. Bu aşama klasik anotlama işlemi ile aynıdır.

- U_5 değerinde, oksit film tabakasındaki elektrik alan şiddeti film tabakasının kırıldığı kritik bir değere ulaşır. Darbe veya tünelleme iyonlaşması ile oksit filmi yüzeyinde hızlıca hareket eden parlak kıvılcımlar gözlenir ve bu olay oksit filmin büyümesine yardımcı olur.
- U_6 değerinde termal iyonlaşmanın katkısıyla daha yavaş ve daha büyük ark deşarjları meydana gelir.
- U_6-U_7 aralığında kalınlaşan oksit filmde negatif yükün artmasıyla termal iyonlaşma engellenir. Bu etki düşük kuvvette ve kısa süreli mikro ark deşarjlarına sebep olur. Mikro arklar sayesinde film tabakası ergir ve elektrolit içerisinde bulunan elementler ile alaşımlanır.
- U_7 ve üzeri değerlerde mikro arkların şiddeti artar ve metal içerisine ilerleyerek oksit filmin termal olarak kırılmasına neden olabilir.

5.3.2. Oksit Tabakanın Kalınlaşması

Düşük akım yoğunluğu için PEO kaplamaların büyüme mekanizması şu şekilde tanımlanabilir: İlk önce altlık üzerinde mikro kusurlara sahip (başlangıçtaki plazma boşalma noktaları) pasif bir film oluşur (Şekil 5.3a). Çalışma voltajı yeterince yükseldiğinde, filmdeki mikro kusurlarda, küçük oksijen kabarcıklarının ve küçük kıvılcımların eşlik ettiği yalıtkan bozunum meydana gelir ve kompakt ince PEO oksit tabakası hemen altlık üzerinde oluşur. Ancak orijinal pasif film, dielektrik bozulma nedeniyle küçük deşarj kanallarıyla gözenekleşir (Şekil 5.3b). Bundan kısa bir süre sonra yoğun iç tabakanın kalınlığı sabit kalmaya başlar, ancak çevrimsel PEO işlemi daima altlık-kaplama arayüzünde devam eder. Akım yoğunluğu düşük olduğunda deşarj kıvılcımları küçüktür ve aynıdır. Yoğun iç tabakanın dielektrik olarak parçalanması ile ince tabaka kırılarak yeni PEO ürünlerinin yığılıp, altlık kaplama arayüzünde yarı küresel çıkıntılar oluşur. Bu esnada altlık, boşluklardaki elektrolit ile karşılaşır ve üzerinde yeni bir ince tabaka oluşur ve böylece kaplama içe doğru büyür. (Şekil 5.3d). İçte oluşan bu ince tabaka altlık-kaplama arayüzünde sürekli olarak yeniden üretilir ancak kalınlığı ince ve sabittir. Bu döngü süreci her zaman devam etmekte olup, kaplamaların toplam büyümesi, plazma-kimyasal, elektro-kimyasal ve termokimyasal reaksiyonlar sonucunda gerçekleşmektedir. (Şekil 5.3e) Isınan alüminyumun plastisitesi nedeniyle kaplama büyürken gaz kabarcıkları genişler ve birbirine bağlı kanallara ve dış tabakada daha fazla kusura neden olur.(Zhang et al., 2017)



Şekil 5.3 PEO tabakasının oluşumu (Zhang et al., 2017)

Kaplama tabakasının kristal yapıları incelendiğinde; altlık malzemenin üzerinde yoğunluğu yüksek alfa-alümina ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$), dış katmanda ise daha yumuşak ve gözenekli gama-alümina ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) görülür. Gözenek yoğunluğu %15'in üzerindeki dış katmanın sertlik aralığı 500-1000HV iken, gözenekliliği %2-15 arasına düşen iç katmanın sertlik değeri 900-2000HV değerine kadar yükselmektedir.(Barik et al., 2005)

5.4. PEO İşlem Parametreleri

PEO yönteminde kaplama kalınlığını ve kalitesini belirleyen birçok faktör bulunmaktadır. Literatüre bakıldığında en çok araştırma alanı bulan işlem değişkenleri akım yoğunluğu, voltaj, işlem süresi ve elektrolit çeşit ve derişimleri olmuştur. Çizelge 5.2'de bu değişkenleri inceleyen örnek birkaç yayın ve kaplama kalınlıkları (yayında verilmişse) bulunmaktadır.

Çizelge 5.2 Alüminyum esaslı malzemelere uygulanan PEO kaplama parametreleri

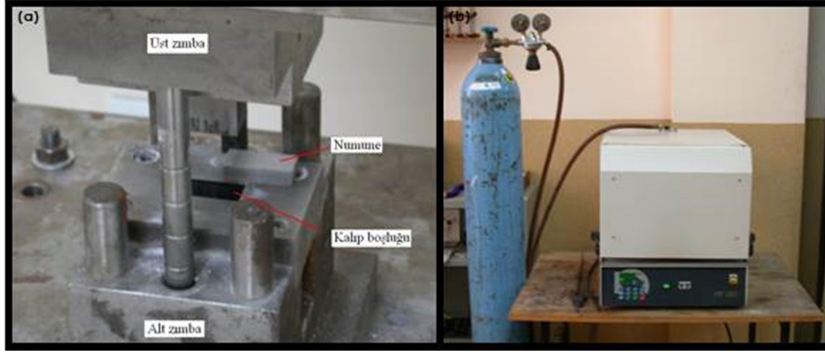
Altlık Malzeme	Akım-Voltaj-Süre	Elektrolit	Kaplama kalınlığı
Al-6082 (Nie et al., 1999)	400-600V 50Hz	Na ₂ SiO ₃	100-150-250µm
Al-6082 (Nie et al., 2002)	400-600V 50Hz 10A/dm ²	2-10g/l Na ₂ SiO ₃ 1-2g/l KOH	150-250µm
Al-6082 (Khan et al., 2005)	• DC – 10A/dm ² 30dk • 50-10000Hz	1g/l KOH	4-13 µm
Al-2024 (Guan et al., 2008)	0,3 A/mm ² 60-120-180-240dk	20g/l Na ₂ SiO ₃	
A356 AA7075 (Sabatini et al., 2010)	15A/dm ² 20-27 dk	(Kerolyte aluminium)	40 µm 46 µm
Al-2214 Al-1050 (Martin et al., 2013)	• 10A/dm ² – 100Hz • 90A/dm ² – 1000Hz 70-40 dk	1g/l Na ₂ SiO ₃ 1g/l KOH	
Al-6061 (Trevino et al., 2013)	400-600 V 50Hz	KOH NaSiO ₄	100-125-150 µm
Al-6082 (Fatkullin et al., 2015)	(+)400-600V (-)5-200V	1g/l KOH 1g/l Na ₂ P ₂ O ₇ 2g/l Na ₂ SiO ₃	
Al-AA1190 (Erfanifar et al., 2017)	DC – 223mA/cm ² 1-2-4-8-16dk	2g/l KOH 6g/l Na ₂ SiO ₃ 4g/l Na ₃ PO ₄	
Saf Al (Zhang et al., 2017)	2,2-4,4-8,8 A/dm ² 10-60-600s	13,5g/l Na ₂ SiO ₃ 16,5g/l Na ₃ (PO ₃) ₆ 0,5g/l KF 4g/l NaOH	15-25-35 µm
Al-2024/SiC _p (Xue et al., 2006)	(+)550-600V (-)150-200V 50Hz 4sa 20-10A/dm ²	6-10g/l Na ₂ SiO ₃ 1-2g/l KOH	180 µm
A356/SiC _p (Cui et al., 2007)	1000-1200A/m ²	NaAlO ₂ Na ₂ SiO ₃	
A356/SiC _p (Lee et al., 2008)	2000-2200A/m ² 20-50 dk	15g/l NaAlO ₂ 3g/l Na ₂ SiO ₃	50-100 µm
Al-2024/SiC _p (He et al., 2011)	5-20 mA/cm ² 40 dk	%16 H ₂ SO ₄	
Saf Al/CuO (Erarslan, 2013)	(+)500V (-)83V 5 dk	KOH KF Na ₂ SiO ₃	20-25 µm

6. DENEYSEL ÇALIŞMA

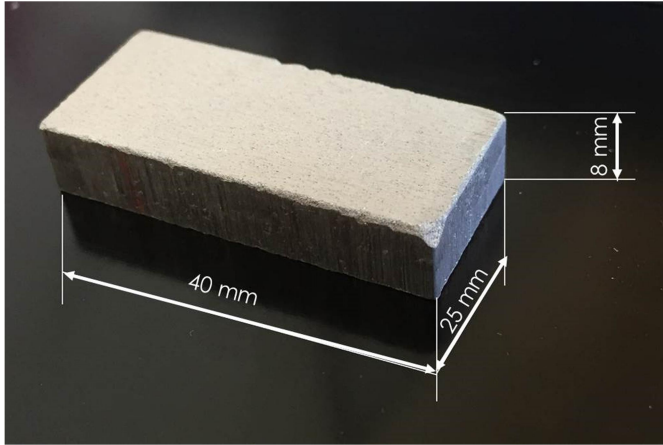
6.1. TM Yöntemi İle Üretim

Deneylerde kullanılan malzemeler toz metalurjisi yöntemiyle üretilmiştir. Bunun için öncelikle tozların yakın boyutlarda olmasını sağlamak amacıyla eleme işleminden geçirilmiş ve 60-70 μm arasındaki ticari saflıkta alüminyum tozları ve aynı boyut aralığında Al_2O_3 partikülleri kullanılmıştır.

Kullanılacak miktarlarda toz ve partiküllere 100°C'de nem alma işlemi uygulandıktan sonra, %5 ve %10 Al_2O_3 partikül ilave edilen alüminyum tozları homojen dağılımı sağlamak amacıyla üç boyutlu karıştırıcıda 1 saat karıştırılmıştır. Ardından soğuk tek eksenli preste 500MPa basınç ile sıkıştırılıp Şekil 6.1b'da görülen yüksek sıcaklık fırınında 600°C sıcaklıkta 8 saat sinterlenmiştir.



Şekil 6.1 Tek eksenli pres kalıbı, numune (a) ve Sinterleme fırını (b)



Şekil 6.2 Üretilen numune ve boyutları

6.2. PEO Kaplama Uygulaması

Numunelere plazma elektrolitik oksidasyon kaplama işlemi Dokuz Eylül Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümü İleri

Malzemeler Laboratuvarında bulunan Keronite G2 Mikro Ark Oksidasyon ünitesi (Şekil 6.3) ile uygulanmıştır.



Şekil 6.3 Keronite G2 Mikro Ark Oksidasyon ünitesi

Kaplama öncesi numune yüzeyleri zımparalanmış, aseton ve distile su ile temizlenmiştir.

Kaplamalar için çeşitli denemeler ve literatür araştırmalarının ardından sabit $20\text{A}/\text{dm}^2$ akım yoğunluğu ve 30 dk süre belirlenmiştir. Elektrolit olarak $1\text{g}/\text{l}$ KOH ve $7\text{g}/\text{l}$ Na_2SiO_3 çözeltisi kullanılmıştır.

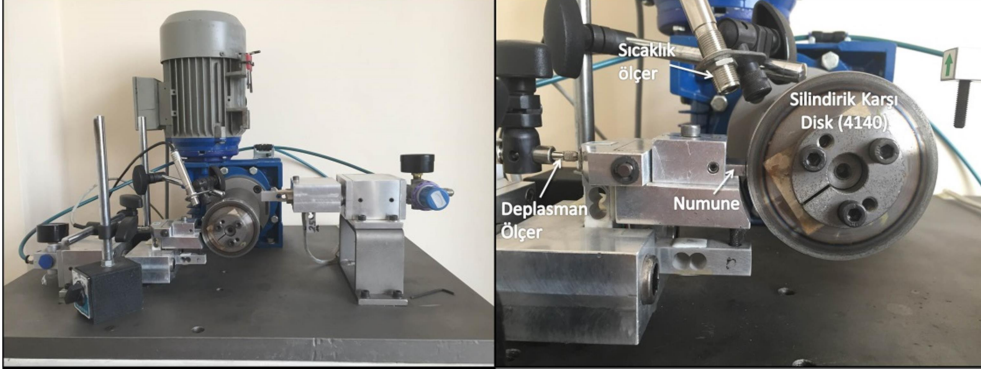
Çizelge 6.1 Numunelerin adlandırılması

Numune adı	Al_2O_3 partikül takviye oranı	PEO kaplama
Al- Al_2O_3 -0	Yok	Yok
Al- Al_2O_3 -5	%5	Yok
Al- Al_2O_3 -10	%10	Yok
Al- Al_2O_3 -0/PEO	Yok	Var
Al- Al_2O_3 -5/PEO	%5	Var
Al- Al_2O_3 -10/PEO	%10	Var

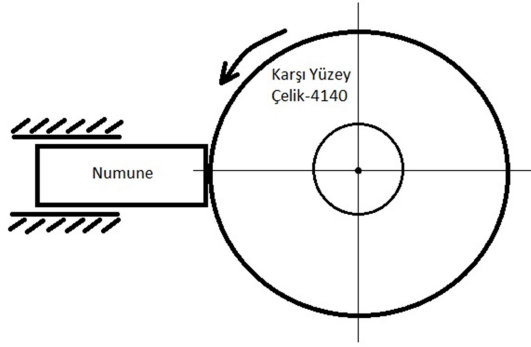
6.3. Aşınma Testi

Aşınma testleri “pin on silindir” tipi kuru sürtünmeli aşınma cihazı ile yapılmıştır (Şekil 6.4). Numunenin karşısında çalışan malzeme 60HRC

sertliğe sahip 4140 çeliğidir. Aşınma testleri 10N kuvvet altında, 0,5m/s hızla, 20dk süreyle uygulanmıştır. Şekil 6.5’de görüldüğü üzere, aşınma kuvveti numuneye çizgisel olarak etki etmektedir.



Şekil 6.4 Deneylerde kullanılan aşınma cihazı



Şekil 6.5 Pin-on-silindir aşınma düzeneğinin şematik gösterimi

6.4. Karakterizasyon Testleri

Numunelerin görsel karakterizasyonu için taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile görüntüleri alınmış, gerekli görülen yerlerde EDS analizi yapılmıştır.

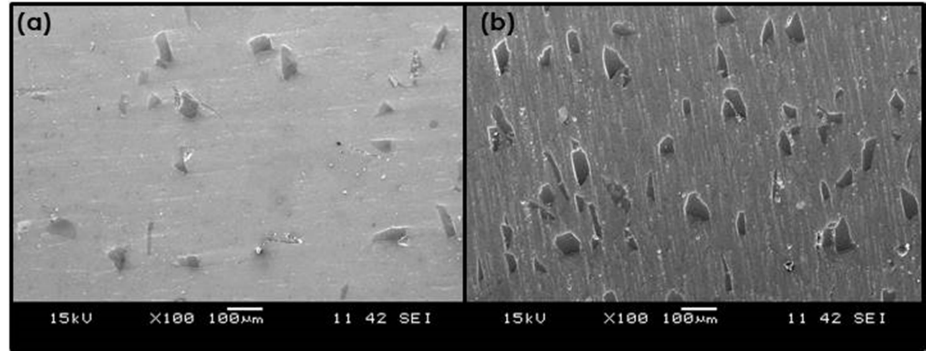
Sertlik ölçümleri Vickers yöntemi ile, numune yüzeyine 2 kg yük uygulanarak yapılmıştır.

7. DENEY VERİLERİ ve TARTIŞMA

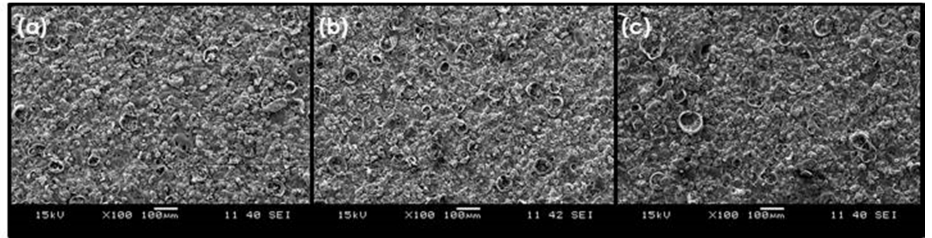
7.1. Mikro Yapı ve Sertlik İncelemesi

Çalışmada toz metalürjisi ile üretilmiş Al_2O_3 partikül takviyeli alüminyum matrisli kompozit malzemenin aşınma özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmış, bunun için PEO kaplama işlemi seçilmiştir.

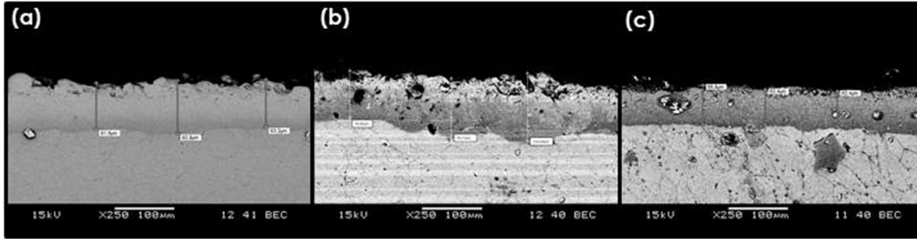
Kaplama işlemi her numune için aynı şartlarda uygulanmış, Şekil 7.2'de yüzeysel olarak çok belirgin bir fark görülmesine de, takviye partiküller sebebiyle farklı kalınlık profilleri ölçülmüştür. (Şekil 7.3) Takviye partikül eklenmemiş alüminyum malzemenin ($Al-Al_2O_3-0$) kaplama yapısı ve kalınlığı, takviyeli numunelere ($Al-Al_2O_3-5$ ve $Al-Al_2O_3-10$) kıyasla daha üniformdur. Kaplama öncesi tüm yüzeylerin zımparalanmasına rağmen takviye partiküllerin yüzeye çıktığı noktalar ve zımparalama sırasında malzemeden kopan partiküller sebebiyle MMK'lerin yüzey pürüzlülükleri, aynı işlem uygulanan monolitik malzemeden daha yüksek olabilmektedir. Bu durum sebebiyle yüzeyde plazma arkları farklı doğrultularda oluşmakta ve kaplamanın yalnızca yüzeyinde değil, farklı bölgelerinde de baloncuk şeklinde gözeneklerin oluşmasına sebep olmaktadır.



Şekil 7.1 Partikül takviyeli alüminyum matrisli toz metalürjisi ile üretilmiş kompozit malzemenin içyapı fotoğrafı; $Al-Al_2O_3-5$ (a), $Al-Al_2O_3-10$ (b)

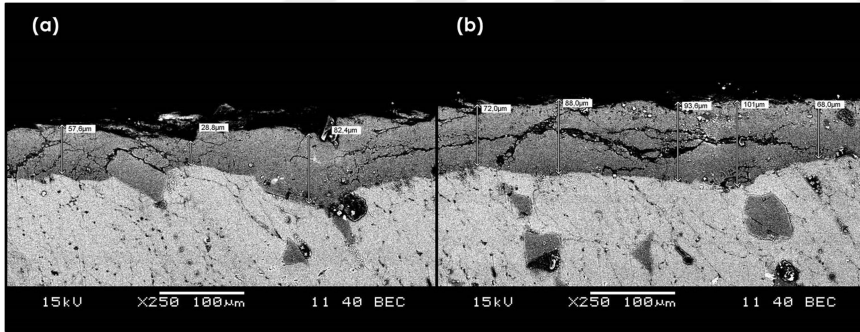


Şekil 7.2 Metal matrisli kompozit malzemeler üzerine uygulanan plazma elektrolitik oksidasyon (PEO) kaplaması yüzey görünümü; $Al-Al_2O_3-0/PEO$ (a), $Al-Al_2O_3-5/PEO$ (b), $Al-Al_2O_3-10/PEO$ (c)



Şekil 7.3 PEO ile yüzeyi kaplanmış alüminyum matrisli kompozit malzemelerin kesit görünümü; Al-Al₂O₃-0/PEO (a), Al-Al₂O₃-5/PEO (b), Al-Al₂O₃-10/PEO (c)

Takviye miktarı arttıkça matris ve takviyenin ısıl genleşme katsayılarının farklı olması sebebiyle, ısıl gerilmeler artmaktadır. Bu durum kaplamada iç gerilmelere ve mikro çatlaklara sebep olmuştur (Şekil 7.4). Kaplama kalınlığı arttıkça bu mikro çatlaklar da artmıştır. Yüzey hazırlama sırasında kopan partiküllerin oluşturduğu derinliklerde kaplama tabakası daha derinlere nüfuz etmiştir. Bununla beraber takviye partiküllerin malzeme dışına uzandığı yerlerde kaplama, partikül çevresinde gerçekleşen tepkimelerle oluşmuştur. Burada oluşan kaplama kalınlığı diğer bölgelerden ince olmakla beraber takviye partikül ile herhangi bir etkileşime girmemiş, de herhangi bir bozulmaya sebep olmamıştır.



Şekil 7.4 PEO ile yüzeyi kaplanmış %10 Al₂O₃ takviyeli alüminyum matrisli kompozit malzemenin (Al-Al₂O₃-10/PEO) kesit görünümü

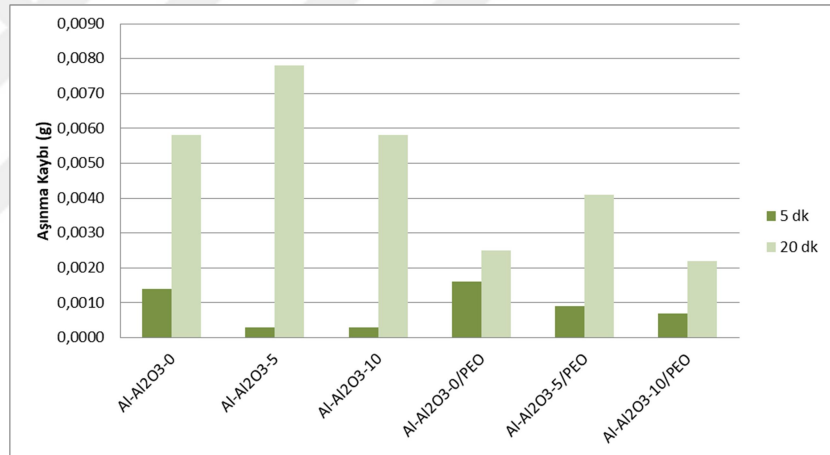
Sertlik değerlerine bakıldığında (Tablo 7.1); kaplamasız numunelerde, takviye oranı artışıyla sertlik değerinin arttığı bilinmektedir (Rahiminian et al., 2010; Diler and İpek, 2013; Yashpal et al., 2017). Sertlik ölçümünde kullanılan yöntemde, altlık malzemenin, kaplanmış numune sertliği üzerine direkt etkili olmaktadır. Altlık malzeme ne kadar sert ise kaplamanın batmaya karşı direnci o kadar fazladır.

Çizelge 7.1 TM ile üretilmiş Al-Al₂O₃ numunelerin ve PEO kaplanmış numunelerin sertlik ölçümleri

	Kaplamasız MMK sertliği	PEO uygulanmış MMK yüzeyi sertliği	Kaplama Kalınlığı
Al-Al ₂ O ₃ /0	25,5HV	338HV	81-93 µm
Al-Al ₂ O ₃ /5	28,2HV	499HV	82-114 µm
Al-Al ₂ O ₃ /10	31,8HV	584HV	30-101 µm

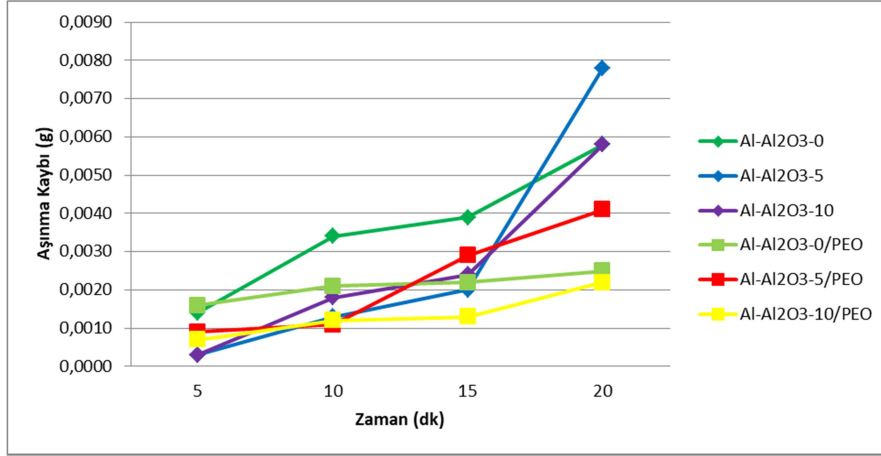
7.2. Aşınma Testi

Al-Al₂O₃ kompozit malzemelerin aşınma test sonuçları incelendiğinde (Şekil 7.5) ilk 5 dakikada takviyeli numunelerin (Al-Al₂O₃-5 ve Al-Al₂O₃-10) aşınma kayıpları takviyesiz (Al-Al₂O₃-0) numuneden daha düşüktür. Bu, MMK'ların doğal aşınma direnci kavramına da uygundur. Sert seramik takviye partiküllerin, alüminyum matrisin aşınma direncini artırdığı net bir şekilde görülmüştür.



Şekil 7.5 5 dk süre ve 20dk süre uygulanan aşınma testi sonunda her numunede gerçekleşen toplam aşınma kaybı

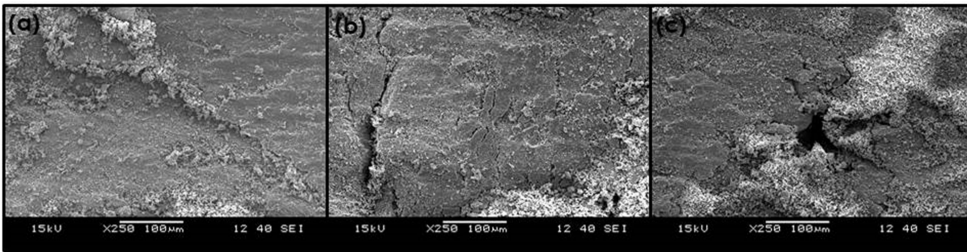
Aşınmanın seyri bir süre takviye partiküllerin etkin olmasıyla devam etmektedir. 15. dakikadan sonra yüzeydeki takviye partiküller malzemeden kopmaya başlayarak hem koruyucu özelliğini kaybetmekte, hem de 3 cisimli aşınmaya sebep olarak aşındırıcı rolü üstlenmektedir. Şekil 7.6'daki grafiğe bakıldığında, 15-20 dakika arasında, hem takviye partikül kaybı hem de matristeki aşınma nedeniyle takviyeli numunelerin aşınma kayıpları hızla artmıştır.



Şekil 7.6 Zamana bağlı aşınma kaybı

Aşınma kaybı grafiklerine bakıldığında (Şekil 7.5 ve Şekil 7.6), hem kaplamasız hem PEO kaplamalı, Al-Al₂O₃-0 numunelerin toplam aşınma kayıpları, Al-Al₂O₃-5 ve Al-Al₂O₃-10 numunelerinin toplam aşınma kayıplarından düşük görünmektedir. Bu durumu anlamak için kaplamasız ve PEO kaplamalı numunelerin aşınma yüzey görünüşleri incelenmiştir.

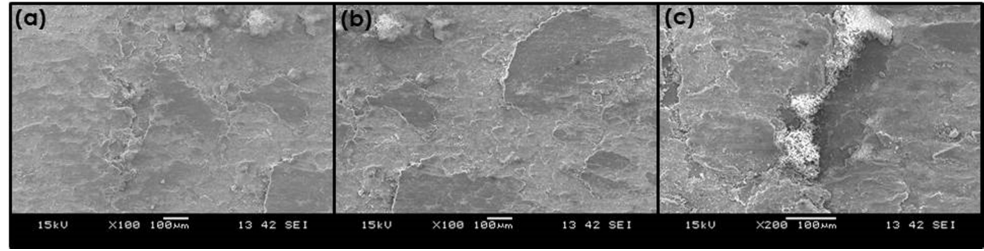
Al-Al₂O₃-0 numunenin aşınma yüzey görüntülerinde (Şekil 7.7) aşınma yönüne dik doğrultuda oluşmuş çatlaklar ve plastik deformasyona uğramış bölgeler görülmektedir. Uygulanan kuvvetin etkisiyle karşı yüzeye göre daha yumuşak ve sünek olan alüminyum plastik deformasyona uğramaktadır. Aşınma süresi ilerledikçe deformasyona uğrayan tabaka pekleşmeye yani gevrekleşmeye başlar. Gevrekliğin artmasıyla aşınma doğrultusuna dik çatlaklar oluşur. Bu durum delaminasyon öncesi aşamadır. Sayısal olarak aşınma kaybı değeri daha düşük görünmesine karşın, yüzey, bir makine elemanının çalışamayacağı kadar deforme olmuştur. Bir diğer deyişle, yüzey değişimi (deformasyonu) dikkate alınmadan, yalnızca aşınma kaybı değerine bakılarak Al-Al₂O₃-0 numunenin aşınma dayanımının Al-Al₂O₃-5 ve Al-Al₂O₃-10 numunelerden daha fazla olduğu söylenemez.



Şekil 7.7 Al-Al₂O₃-0 numunenin aşınma testi sonrası yüzey görünümü

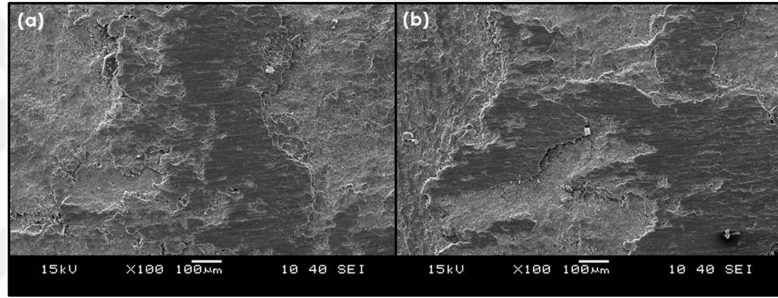
Al-Al₂O₃-5 numunesinin aşınma yüzey görünümünde (Şekil 7.8) henüz belirgin çatlak olmamasına rağmen Şekil 7.8c'de bir çatlak başlangıcı olduğu düşünülen işaretler mevcuttur. Yüzeye yakın bir Al₂O₃ takviye

partikül civarında görülen beyaz bölge mekanik etkileşimin yüksek olduğu yerleri ifade etmektedir. Mikro çatlaklar, bu etkileşim alanı etrafında oluşmaktadır.



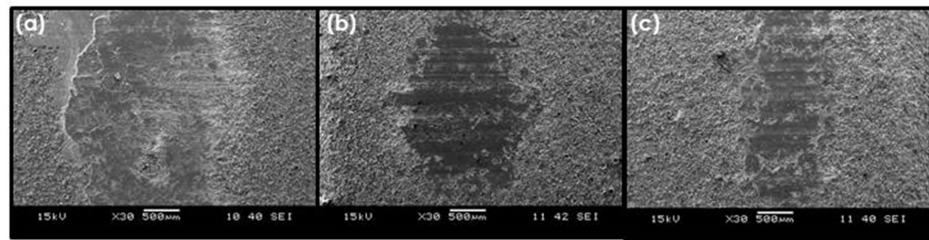
Şekil 7.8 Al-Al₂O₃-5 numunenin aşınma testi sonrası yüzey görünümü

Al-Al₂O₃-10 numunenin aşınma kaybı değeri ve yüzey görünümü (Şekil 7.9) kaplamasız numuneler arasında aşınma dayanımı en yüksek kompozit malzeme olduğunu göstermektedir.



Şekil 7.9 Al-Al₂O₃-10 numunenin aşınma testi sonrası yüzey görünümü

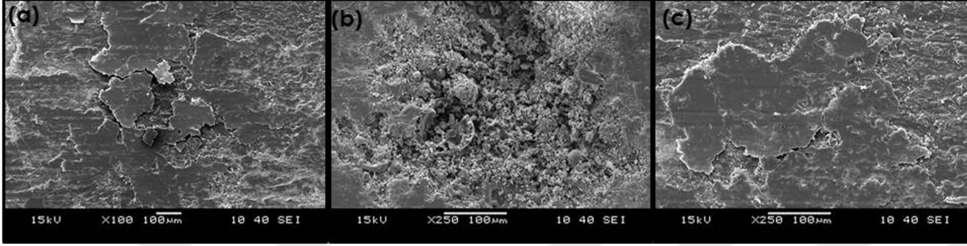
Aşınma yüzeylerinden alınan makro fotoğraflarda (Şekil 7.10), aşınma alanının takviye partikül oranı arttıkça küçüldüğü görülmektedir. Takviyesiz (Al-Al₂O₃-0/PEO) numunede aşınma yüzey alanının daha geniş olması, altlık malzemenin direncinin zayıf olduğunu göstermektedir.



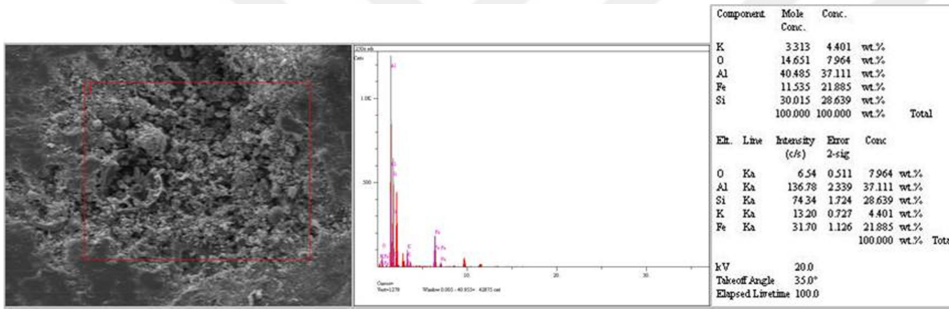
Şekil 7.10 PEO ile yüzeyi kaplanmış alüminyum matrisli kompozit malzemelerin aşınma testi sonrası yüzey görünümü; Al-Al₂O₃-0/PEO (a), Al-Al₂O₃-5/PEO (b), Al-Al₂O₃-10/PEO (c)

PEO kaplamalı aşınma yüzey görüntüleri incelendiğinde takviye miktarı arttıkça, aşınmaya uğrayan alan daralmaktadır. Bunun sebebi takviye partiküllerin altlık malzemenin dayanımını ve sertliğini artırması, bu sayede kaplamaya daha sağlam bir destek sağlamasıdır.

Al-Al₂O₃-0/PEO numunesinin detaylı yüzey görünümüne bakıldığında (Şekil 7.11), yüzeydeki baloncuk tabakasının tamamen yok olduğu görülmektedir. Şekil 7.11a'da uygulanan kuvvet altında yüzeyde pul pul tabakaların oluştuğu ve döküldüğü görülmektedir. Bunun yanında PEO kaplamanın sahip olduğu ark kanallarının gözeneklerine karşı elemanın aşınma partikülleri (debrisleri) yerleşmiştir. Şekil 7.12'deki EDS analizinde %21 Fe elementine rastlanmıştır. Bu durum, aşınma kaybı değerinin düşük hesaplanması anlamına gelmektedir.

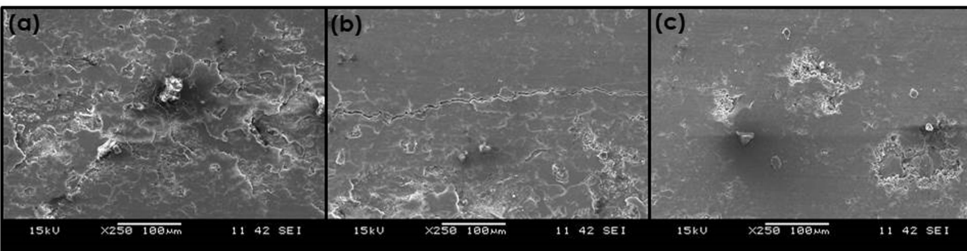


Şekil 7.11 Al-Al₂O₃-0/PEO numunenin aşınma testi sonrası yüzey görünümü



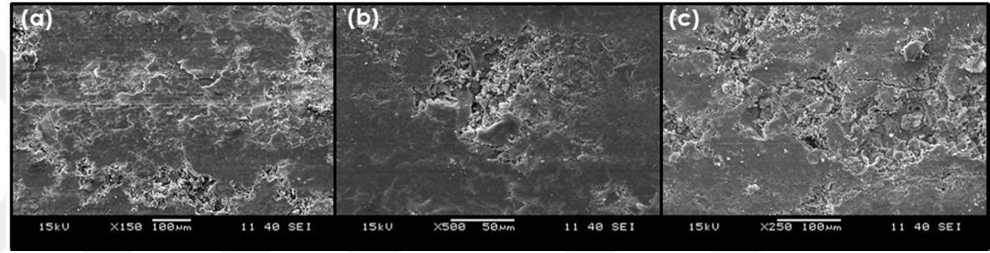
Şekil 7.12 Al-Al₂O₃-0/PEO numunenin aşınma testi sonrası yüzeyden alınan EDS analizi

Şekil 7.3b'de Al-Al₂O₃-5/PEO numunesinin kaplama kalitesinin, içerdiği takviye partikülleri sebebiyle Al-Al₂O₃-0/PEO numunesinden daha kötü olduğu görülmektedir. Bu düzensizlik yüzeye göre yüksek noktalarda lokal olarak daha fazla gerilmeler oluşturmakta ve kaplamanın zayıf olduğu yerlerde mikro çatlaklara sebep olmaktadır. Aşınma testinde tipik olarak aşınma doğrultusuna dik mikro çatlakların oluşması beklenir. Şekil 7.13 Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.b'de aşınma doğrultusunda bir çatlak görülmektedir. Bu durum kaplama tabakasının aşınma kuvvetini karşılayamayacak kadar zayıf bölgelere sahip olduğunu düşündürür.

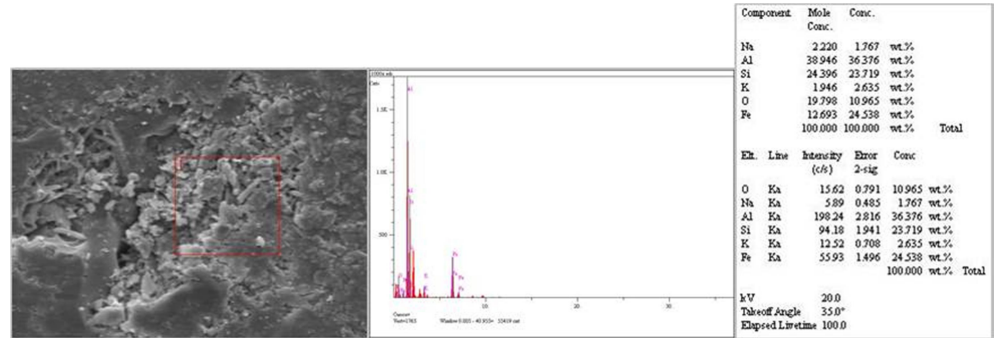


Şekil 7.13 Al-Al₂O₃-5/PEO numunenin aşınma testi sonrası yüzey görünümü

Al-Al₂O₃-10 numunesinin (kaplama öncesi) mekanik özellikleri diğer kaplama uygulanmamış numunelerden daha yüksektir. Bu durumda uygulanan PEO kaplama mekanik etkileşime girdiğinde, altlık malzemenin kaplama tabakasını daha iyi desteklediği görülmüştür (Şekil 7.10). Al-Al₂O₃-10/PEO'nun kaplama kalınlığı yüzey profili dalgalı ve düzensizdir. Bu düzensizlik sebebiyle aşınma, yüzeyden çıkıntı halinde bulunan baloncukların aşınması ile başlamıştır. Ardından daha yoğun ve kararlı PEO tabakası mekanik etkileşime girmiştir. Bu aşamada çukur bölgelerde kalan baloncuklu yapılar etkileşime girmemiştir. PEO tabakasının yüksek dayanımlı kısmı, daha düşük malzeme kaybının ardından yüke maruz kalmıştır. Yüzeydeki çukurlarda kalan aşınmamış baloncuklarda, aşınma partikülleri birikecek yer bulmuşlardır. Şekil 7.14'de hem aşınmış, hem baloncuklu tabakalar görülmektedir. Şekil 7.14b'den alınan EDS analizinde (Şekil 7.15) baloncuklu bölgede karşı yüzeyin aşınma partiküllerinin biriktiğini gösteren %24 oranında Fe tespit edilmiştir.



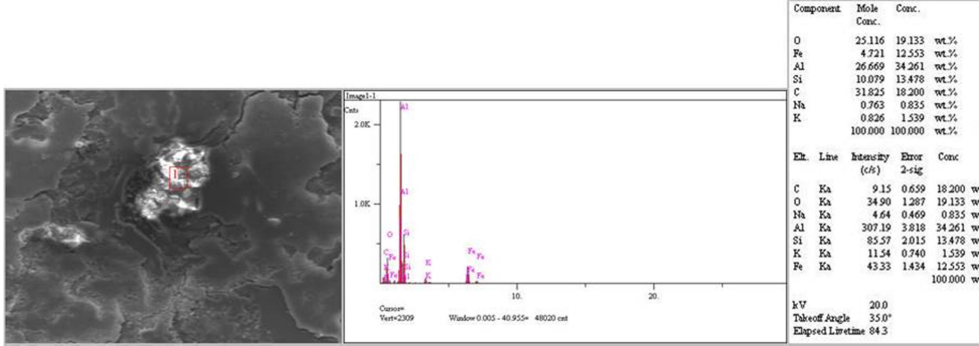
Şekil 7.14 Al-Al₂O₃-10/PEO numunesinin aşınma testi sonrası yüzey görünümü



Şekil 7.15 Al-Al₂O₃-10/PEO numunesinin aşınma testi sonrası yüzeyden alınan EDS analizi

PEO kaplanmış numunelerin aşınma testinin ilk 5 dakikası incelendiğinde (Şekil 7.5), aşınma kayıplarının kaplamasız numunelerden daha fazla olduğu görülmektedir. PEO kaplamanın tipik baloncuklu yüzey yapısı, birkaç mikronluk derinlikte ince kesitlere sahip bir seramik tabaka anlamına gelmektedir. Bir kuvvet ile karşılaştığında bu kırılabilir bölge ilk olarak kırılarak başlangıç aşınma bölgesindeki aşınma kaybı miktarının yüksek olmasına sebep olmaktadır. Bu gevrek ve dayanımı düşük tabakanın aşınmasının ardından karşı yüzey; yoğun, kalın ve sert olan kaplama tabakasıyla karşılaşır. Bu tabakanın sertlik ve elastisite modülü değerleri

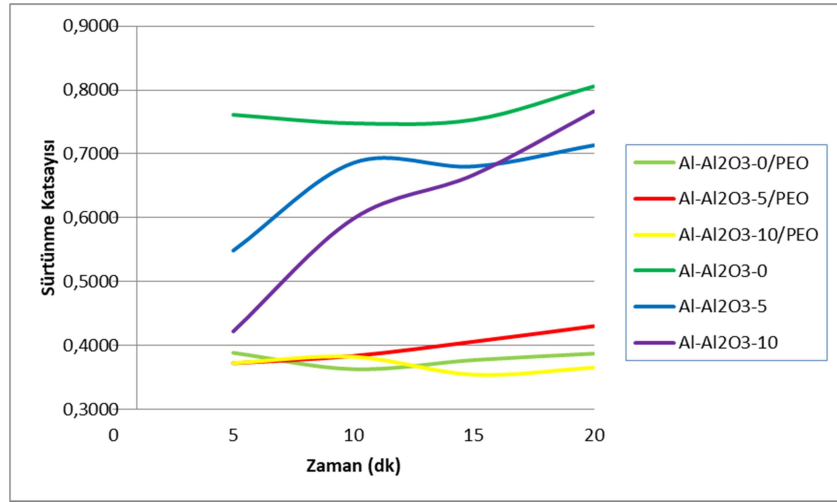
karşı malzemeden yüksek olduğu için aşınma yüksek oranda karşı yüzeyde gerçekleşmiştir. Numunelerin aşınma yüzeyleri üzerinden alınan EDS analizlerinde (Şekil 7.12, 7.15 ve 7.16) Fe (demir) oranı %10'un üzerinde görülmektedir. Karşı yüzeyin aşınma partikülleri PEO tabakasında bulunan gözenekli kısımlarda birikmiştir.



Şekil 7.16 Al-Al₂O₃-5/PEO numunenin aşınma testi sonrası yüzeyden alınan EDS analizi

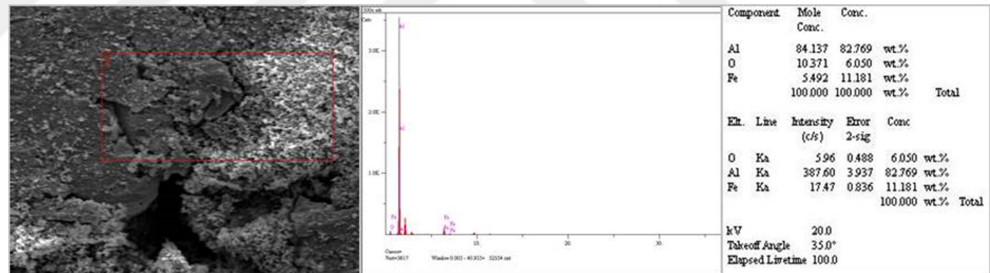
PEO kaplama işlemi toplam aşınma kaybını çok belirgin bir şekilde azaltmıştır. Bunun nedenlerinden ilki seramik kaplama tabakasının sertlik ve elastisite modülü değerlerinin hem altlık malzemeden hem de karşı malzemeden yüksek olmasıdır. İkincisi ise, uygulanan kuvvet altında kaplamasız numunelerde takviye partikülleri kopma eğilimindeyken, PEO kaplama numunenin her bir elemanını (matris ve takviye) bir arada tutabilmesidir.

Bir diğer sebep, çelik malzemeye karşı çalışan seramik yüzeyin sürtünme katsayısının daha düşük olmasıdır. Yapılan aşınma testlerinde eş zamanlı kuvvet ölçümleri yardımıyla sürtünme katsayısının aşınma testi süresince değişimi saptanmıştır (Şekil 7.17). Alınan değerler, PEO kaplamanın daha stabil ve düşük sürtünme katsayısına sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 7.17 Aşınma testi sırasında elde edilen sürtünme katsayıları

Kaplamasız numunelerin sürtünme katsayılarının aşınma testi boyunca değişimi incelendiğinde; Al-Al₂O₃-0 numunesinde, kısmi metal-metal teması gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Bu durumda aşınma adeziftir. Neticesinde, numune yüzeyinde karşı malzemeden metal transferi olduğunu belirten test verileri alınmıştır. Al-Al₂O₃-0 numunenin EDS analizinde %11 Fe değeri görülmektedir. (Şekil 7.18).



Şekil 7.18 Al-Al₂O₃-0 numunenin aşınma testi sonrası yüzeyden alınan EDS analizi

Al-Al₂O₃-5 ve Al-Al₂O₃-10 numunelerde aşınmada, başlangıçta takviye partikül teması daha etkin olduğu için sürtünme katsayısı düşük ölçülmüştür. Test süresi ilerledikçe sürtünme katsayısı artmıştır. Bunun nedeni, Al₂O₃ takviye partiküllerinin yerlerinden çıkmasıyla artan yüzey pürüzlülüğü ve kısmi metal-metal temasıdır. Aşınma testi boyunca hem adeziv hem abrazif aşınma mekanizmalarının birlikte etkin olduğu gözlemlenmiştir.

PEO kaplamalı numunelerde aşınma seramik-metal teması şeklinde gerçekleşmektedir ve her hangi bir adeziv mekanizma gerçekleşmez. Yalnızca abrazif aşınma mekanizması aktiftir.

Bunların yanı sıra, Şekil 7.4'te Al-Al₂O₃-10/PEO'nun kaplama kesitinde çok fazla mikro çatlak görünümü bulunmaktadır. Fakat bu mikro

çatlaklar aşınmada büyüyerek aşınma partikülleri oluşumuna sebep olmamıştır. Buradan, çatlakların yüzey altında çok küçük alanlar kapladıkları, birbirleriyle, delaminasyona sebep olacak şekilde, birleşmedikleri çıkartılabilir. Yani, kaplama kalitesi, içerdiği yüksek takviye oranı sebebiyle kötü görünse de, PEO tabakasının kendi yüksek dayanımı sayesinde aşınma dayanımına olumlu katkısı olduğu düşünülmektedir.

8. SONUÇLAR

1. Al_2O_3 partikül takviyesinin, TM yöntemiyle üretilmiş alüminyum matrisli kompozit malzemenin aşınma dayanımını artırdığı görülmüştür.
2. Aşınma testinde, Al- Al_2O_3 kompozit malzemelerde kısmi metal-metal ve kısmi metal-seramik etkileşimleri vardır. Bu durumun adhezif ve abrazif aşınma mekanizmalarının her ikisinin de görülmesine sebep olduğu düşünülmektedir.
3. Plazma elektrolitik oksidasyon kaplamasının, Al- Al_2O_3 kompozit malzemelerin aşınma dayanımlarının belirgin şekilde artırdığı gözlemlenmiştir.
4. Aşınma dayanımının, plastik deformasyonun etkin olduğu durumlarda, yalnızca sayısal olarak malzeme kaybı değerine göre belirlenmesi uygun olmadığı söylenebilir.
5. Çelik ve Al_2O_3 çiftinin sürtünme katsayısının, çelik ve alüminyum çiftine göre belirgin olarak düşük olduğu iki durumda tespit edilmiştir:
 - 5.1. PEO kaplamalı numunelerin aşınma testi
 - 5.2. Al_2O_3 takviyeli kompozit malzeme numunelerinin aşınma testi

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Akovağ, G.**, 2001, Handbook of Composite Manufacturing, Rapra Technology Ltd., Ankara, 6p
- Ames**, 2018, “Basic Manufacturing Process”, <https://www.ames-sintering.com/us/pm-basic-manufacturing-process/> , (Erişim Tarihi: 25.05.2018)
- Amirkhanlou, S., Jamaati, R., Niroumand, B., Toroginejad, M.R.**, 2011, Fabrication and characterization of Al/SiCp composites by CAR process, Materials Science and Engineering A, 528, p4462-4467
- Arrabal, R., Pardo, A., Merino, M.C., Mohedano, M., Casajus, P., Matykina, E., Skeldon, P.**, 2010, Corrosion behaviour of a magnesium matrix composite with a silicate plasma electrolytic oxidation coating, Corrosion Science, 52, p3738-3749
- Awalellu, K.A.**, 2016, A Review on Properties and Applications of Polymer Matrix Composites, International Journal of Research and Scientific Innovation, 3(IA), p53-55
- Barik, R.C., Wharton, J.A., Wood, R.J.K, Stokes, K.R., Jones, R.L.**, 2005, Corrosion, erosion and erosion–corrosion performance of plasma electrolytic oxidation (PEO) deposited Al₂O₃ coatings, Surface & Coatings Technology, 199, p158-167
- Berger, L.M.**, 2015, Application of hardmetals as thermal spray coatings, Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 49, p350-364
- Besra, L., Liu, M.**, 2007, A review on fundamentals and applications of electrophoretic deposition (EPD), Progress in Materials Science, 52, p1-61
- Callister, W.D.**, 2007, Materials Science and Engineering: An Introduction, John Wiley & Sons, Inc., New York, p577-619
- Ceschini, L., Martini, C., Sambogna, G., Tarterini, F.**, 2011, Dry sliding behaviour of PEO(Plasma Electrolytic Oxidation) treated AA 2618/20% Al₂O_{3p} composite, Material Science Forum, 678, p61-74
- Chawla, N. and Chawla, K.K.**, 2006, Metal Matrix Composites, Springer, New York, p5-110,
- Chung, D.D.L.**, 2010, Composite Materials: Science and Applications, Springer, Buffalo.
- Clyne, T.W., Withers, P.J.**, 1993, An Introduction to Metal Matrix Composites, Chabridge University Press, Melbourne,

- Cui, S., Han, J., Du, Y., Li, W.,** 2007, Corrosion resistance and wear resistance of plasma electrolytic oxidation coatings on metal matrix composites, *Surface & Coatings Technology*, 201, p5306-5309
- Davis, J.R.,** 2004, *Handbook of Thermal Spray Technology*, ASM International, p52,
- Deng, Y., Li, W., Wang, R., Shao, J., Geng, P., Kou, H., Zhang, X., Ma, J.,** 2017, Temperature dependent first matrix cracking stress model for the unidirectional fiber reinforced ceramic composites, *Journal of the European Ceramic Society*, 37, p1305-1310
- Dey, A., Pandey, K.M.,** 2015, Magnesium metal matrix composites - A review, *Reviews on Advanced Materials Science*, 42, p58-67
- Diler, E.A.,** 2012, Toz Metalurjisiyle Üretilen Al-SiCp Metal Matrisli Kompozitlerde Faktör Etkileşimlerinin Partikül Dağılımı, Eğme Dayanımı ve Asınma Özelliklerine Etkileri, Doktora Tezi, EÜ Makine Mühendisliği ABD, s36
- Diler E. A., İpek R., Eroğlu Ş. M.,** 2011, Application of Central Composite Design to investigate the effects of reinforcement volume fraction and matrix-reinforcement particle size ratio on wear characteristics of Al-SiCp Metal Matrix Composites, 6th International Powder Metallurgy Conference and Exhibition, Ankara,
- Diler, E.A., İpek, R.,** 2013, Main and interaction effects of matrix particle size, reinforcement particle size and volume fraction on wear characteristics of Al-SiCp composites using central composite design, *Composites: Part B*, 50, p371-380
- Eizadjou, M., Talachi, K., DaneshManesh, H., ShakurShahabi, H., Janghorban, K.,** 2008, Investigation of structure and mechanical properties of multi-layered Al/Cu composite produced by accumulative roll bonding (ARB) process, *Composites Science and Technology*, 68, p2003-2009
- Erarslan, Y.,** 2013, Wear performance of in-situ aluminum matrix composite after micro-arc oxidation, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 23, p347-352,
- Erden, M.A.,** 2015, Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen Mikroalaşım Çeliklerinin Mikroyapı Mekanik Özellik İlişkisinin Araştırılması, Doktora tezi, KÜ İmalat Mühendisliği ABD, s58

- Erfanifar, E., Aliofkhazraei, M., Nabavi, H.F., Sharifi, H., Rouhagdam, A.S.,** 2017, Growth kinetics and morphology of plasma electrolytic oxidation coating on aluminum, *Materials Chemistry and Physics*, 185, p162-175
- Fatkullin, A.R., Parfenov, E.V., Yerokhin, A., Lazarev, D.M., Matthews, A.,** 2015, Effect of positive and negative pulse voltages on surface properties and equivalent circuit of the plasma electrolytic oxidation process, *Surface & Coatings Technology*, 284, p427-437
- Ganesh, R., Subbiah, R., Chandrasekaran, K.,** 2015, Dry Sliding Wear Behavior of Powder Metallurgy Aluminium Matrix Composite, *Materials Today: Proceedings*, 2, p1441-1449
- Gangil, N., Siddiquee, A.N., Maheshwari, S.,** 2017, Aluminium based in-situ composite fabrication through friction stir processing: A review, *Journal of Alloys and Compounds*, 715, p91-104
- Gu, W.C., Lv, G.H., Chen, H., Chen, G.L., Feng, W.R., Yang, S.X.,** 2007, Characterisation of ceramic coatings produced by plasma electrolytic oxidation of aluminum alloy, *Materials Science and Engineering A*, 447, p158-162
- Guan, Y., Xia, Y., Li, G.,** 2008, Growth mechanism and corrosion behavior of ceramic coatings on aluminum produced by autocontrol AC pulse PEO, *Surface & Coatings Technology*, 202, p4602-4612
- Hangshenas, M.,** 2016, *Metal Matrix Composites*, Elsevier Inc., Waterloo, Canada,
- He, C., Lou, D., Wang, J., Cai, Q.,** 2011, Corrosion protection and formation mechanism of anodic coating on SiCp/Al metal matrix composite, *Thin Solid Films*, 519, p4759-4764
- Henderson, R.J., Chandler, H.W., Akisanya, A.R., A. R., Barber, H. and Moriarty, B.,** 2000, Finite element modelling of cold isostatic pressing, *Journal of the European Ceramic Society*, 20, p1121-1128.
- Jamaati, R., Toroghinejad, M.R., Najafizadeh, A.,** 2010, An alternative method of processing MMCs by CAR process, *Materials Science and Engineering A*, 527, p2720-2724
- Jiang, Y., Zhang, Y., Bao, Y., Yang, K.,** 2011, Sliding wear behaviour of plasma electrolytic oxidation coating on pure aluminium, *Wear*, 271, p1667-1670

- Kalkancı, N.H.**, 2004, Mikro ark oksidasyon teknolojisi ve alüminyum alaşımlı malzemelere uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, S.Ü. Metalurji ve Malzeme Müh.Böl., s33
- Kalkancı Başak, N.H.**, 2008, Plazma elektrolitik oksidasyon teknolojisi uygulanan 6082 alüminyum alaşımının özelliklerinin araştırılması, Doktora Tezi, S.Ü. Metalurji ve Malzeme Müh.Böl., s6
- Khan, R.H.U., Yerokhin, A.L., Pilkington, T., Leyland, A., Metthew, A.**, 2005, Residual stresses in plasma electrolytic oxidation coatings on Al alloy produced by pulsed unipolar current, *Surface & Coatings Technology*, 200, p1580-1586
- Khan, R.H.U., Yerokhin, A.L., Li, X., Dong, H., Metthew, A.**, 2010, Surface characterisation of DC plasma electrolytic oxidation treated 6082 aluminium alloy: Effect of current density and electrolyte concentration, *Surface & Coatings Technology*, 205, p1679-1688
- Lee, J.M., Kang, S.B., Han, J.**, 2008, Dry sliding wear of MAO-coated A356/20 vol.% SiCp composites in the temperature range 25–180 °C, *Wear*, 264, p75-85
- Lee, I.S., Hsu, C.J., Chen, C.F., Ho, N.J., Kao, P.W.**, 2011, Particle-reinforced aluminum matrix composites produced from powder mixtures via friction stir processing, *Composites Science and Technology*, 71, p693-698
- Liu, C., Liu, P., Huang, Z., Yan, Q., Guo, R., Li, D., Jiang, G., Shen, D.**, 2016, The correlation between the coating structure and the corrosion behavior of the plasma electrolytic oxidation coating on aluminum, *Surface & Coatings Technology*, 286, p223-230
- Malayoglu, U., Tekin, K.C., Malayoglu, U., Shrestha, S.**, 2011, An investigation into the mechanical and tribological properties of plasma electrolytic oxidation and hard-anodized coatings on 6082 aluminum alloy, *Materials Science and Engineering A*, 528, p7451-7460
- Martin, J., Melhem, A., Shchedrina, I., Duchanoy, T., Nomine, A., Henrion, G., Czerwicz, T., Bolmonte, T.**, 2013, Effects of electrical parameters on plasma electrolytic oxidation of aluminium, *Surface & Coatings Technology*, 221, p70-76

- Matykina, E., Arrabal, R., Skeldon, P., Thompson, G.E.,** 2009, Investigation of the growth processes of coatings formed by AC plasma electrolytic oxidation of aluminium, *Electrochimica Acta*, 54, p6767-6778
- Mavhungu, S.T., Akinlabi, E.T., Onitiri, M.A., Varachia, F.M.,** 2017, Aluminum matrix composites for industrial use: Advances and trends, *Int.Conference on Sustainable Materials Processing and Manufacturing, Procedia Manufacturing*, 7, p178-182
- Nie, X., Leyland, A., Song, H.W., Yerokhin, A.L., Dowey, S.J., Matthews, A.,** 1999, Thickness effects on the mechanical properties of micro-arc discharge oxide coatings on aluminium alloys, *Surface and Coatings Technology*, 116-119, p1055-1060
- Nie, X., Meletis, E.I., Jiang, J.C., Leyland, A., Yerokhin, A.L., Matthews, A.,**2002, Abrasive wear/corrosion properties and TEM analysis of Al₂O₃ coatings fabricated using plasma electrolysis, *Surface and Coatings Technology*, 149, p245-251
- Özkara, İ.M., Baydoğan, M.,** 2009, Mikro ark oksidasyon işleminde voltaj uygulama süresinin 2024 kalite alüminyum alaşımının morfolojik özelliklerine ve aşınma direncine etkisi, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), Karabük,
- Pardo, A., Merino, S., Merino, M.C., Barroso, I., Mohedano, M., Arrabal, R., Viejo, F.,** 2009, Corrosion behaviour of silicon-carbide-particle reinforced AZ92 magnesium alloy, *Corrosion Science*, 51, p841-849
- Rahimian, M., Parvin, N., Ehsani, N.,** 2011, The effect of production parameters on microstructure and wear resistance of powder metallurgy Al-Al₂O₃ composite, *Materials and Design*, 32, p1031-1038
- Rahimian, M., Parvin, N., Ehsani, N.,** 2010, Investigation of particle size and amount of alumina on microstructure and mechanical properties of Al matrix composite made by powder metallurgy, *Materials Science and Engineering A*, 527, p1031-1038
- Reveron Pojan, H.M.,** 2018, "PVD" <http://prof.usb.ve/hreveron/PVD%20pagina.htm#Evaporaci%F3n> , (Erişim Tarihi: 25.05.2018)
- Sabatini, G., Ceschini, L., Martini, C., Williams, J.A., Hutchings, I.M.,** 2010, Improving sliding and abrasive wear behaviour of cast A356 and

wrought AA7075 aluminium alloys by plasma electrolytic oxidation, *Materials and Design*, 31, p816, 828

Shirvanimoghaddam, K., Hamim, S.U., Akbari, M.K., Fakhrhoseini, S.M., Khayyam, H., Pakseresht, A.H., Ghasali, E., Zabet, M., Munir, K.S., Jia, S., Davim, J.P., Naebe, M., 2017, Carbon fiber reinforced metal matrix composites: Fabrication processes and properties, *Composites: Part A*, 92, p70-96

Snizhko, L.O., Yerokhin A.L., Pilkington A., Gurevina N.L., Misnyankin D.O., Leyland A., Matthews A., 2004, Anodic processes in plasma electrolytic oxidation of aluminium in alkaline solutions, 49, p2085-2095

SubsTech, 2012, "Isostatic pressing of metallic powders", http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=isostatic_pressing_of_metallic_powders&s=hot%20isostatic%20press , (Erişim Tarihi: 25.05.2018)

Tandler, M., Sustarsic, B., Vehovar, L., Torkar, M., 2000, Corrosion of Al/SiC metal-matrix composites, *Mater. Tehnol.*, 34, p353-358

Tekin, K.C., akmak, E., Malayoğlu, U., 2008, Plazma elektrolitik oksidasyon yontemiyle hafif metallerin kaplanması, *Mühendis ve Makina*, 49/582, s3-9

Threrujirapapong, T., Kondoh, K., Imai, H., Umeda, J., Fugetsu, B., 2009, Mechanical Properties of a Titanium Matrix Composite Reinforced with Low Cost Carbon Black via Powder Metallurgy Processing, *Materials Transactions*, 50/12, p2757-2762

Thulasikanth, V., 2016, "Fabrication of microelectronic devices" <https://www.slideshare.net/VTKanth/fabrication-of-microelectronic-devices-63837091> , s30, (Erişim Tarihi: 25.05.2018)

Torralba, J.M., da Costa, C.E., Velasco, F., 2003, P/M aluminum matrix composites: an overview, *Journal of Materials Processing Technology*, 133, p203-206

Tozkoparan, D., 2010, Plazma Sprey Kaplama Kalitesine Etki Eden Faktörlerin Taguchi Yöntemiyle Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, S.Ü. Metalurji ve Malzeme Müh.Böl.,

Trevino, M., Garza-Montes-de-Oca, N.F., Perez, A., Hernández-Rodríguez, M.A.L., Juarez, A., Colas, R., 2012, Wear of an aluminium alloy coated

by plasma electrolytic oxidation, *Surface & Coatings Technology*, 206, p2213-2219

Trevino, M., Mercado-Solis, R.D., Colas, R., Perez, A., Talamantes, J., Velasco, A., 2013, Erosive wear of plasma electrolytic oxidation layers on aluminium alloy 6061, *Wear*, 301, p434-441

Van Mol, A.M.B., 2003, Chemical vapour deposition of tin oxide thin films, Doktora Tezi, Eindhoven University of Technology,

Verma, A.S., Sumankant, Suri, A.M., Yashpal, 2015, Corrosion Behavior of Aluminum base Particulate Metal Matrix Composites: A review, 4th International Conference on Materials Processing and Characterization, *Materials Today: Proceedings*, 2, p2840-2851

Wang, Y.Q., Zheng, M.Y., Wu, K., 2005, Microarc oxidation coating formed on SiCw/AZ91 magnesium matrix composite and its corrosion resistance, *Materials Letters*, 59, p1727-1731

Wang, K., Koo, B.H., Lee, C.G., Kim, Y.J., Lee, S.H., Byon, E., 2009, Effects of electrolytes variation on formation of oxide layers of 6061 Al alloys by plasma electrolytic oxidation, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 19, p866-870

Xue, W., Wu, X., Li, X., Tian, H., 2006, Anti-corrosion film on 2024/SiC aluminum matrix composite fabricated by microarc oxidation in silicate electrolyte, *Journal of Alloys and Compounds*, 425, p302-306

Xue, W., Jin, Q., Shu, Q., Hua, M., Ma, Y., 2009, Anti-corrosion microarc oxidation coatings on SiCP/AZ31 magnesium matrix composite, *Journal of Alloys and Compounds*, 482, p208-212

Yaroslavna, I., 2016, "Ceramic Matrix Composite", <http://basalt.today/2016/07/6079/>, (Erişim Tarihi: 25.05.2018)

Yashpal, Sumankant, Jawalkar, C.S., Verma, A.S., Suri, N.M., 2017, Fabrication of Aluminium Metal Matrix Composites with Particulate Reinforcement: A Review, 5th International Conference of Materials Processing and Characterization, *Materials Today: Proceedings*, 4, p2927-2936

Yerokhin, A.L., Voevodin, A.A., Lyubimov, V.V., Zabinski, J., Donley, M., 1998, Plasma electrolytic fabrication of oxide ceramic surface layers for tribotechnical purposes on aluminium alloys, *Surface and Coatings Technology*, 110, p140-146

Yerokhin, A.L., Nie, X., Leyland, A., Matthews, A., Doney, S.J., 1999,
Plasma electrolysis for surface engineering, *Surface and Coatings
Technology*, 122, p73-93

**Zhang, Y., Wu, Y., Chen, D., Wang, R., Li, R., Guo, C., Jiang, G., Shen, D.,
Yu, S., Nash, P., 2017,** Micro-structures and growth mechanisms of
plasma electrolytic oxidation coatings on aluminium at different current
densities, *Surface & Coatings Technology*, 321, p236-246



ÖZGEÇMİŞ

Şöhret Melda AYDIN, 1986 yılında Ankara’da doğmuştur. Lise öğrenimini 2004 yılında Dr. Binnaz-Rıdvan Ege Anadolu Lisesinde tamamlamıştır. 2009 yılında Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünden mezun olduktan sonra Ağustos 2009 – Ekim 2010 arasında Polisac A.Ş.’de Proje Mühendisi ve Teknik Büro Şefi pozisyonlarında görev almıştır. 2011 yılından bu yana Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.

YAYINLARI

- Diler E. A., İpek R., Eroğlu Ş. M.,** 2011, Application of Central Composite Design to investigate the effects of reinforcement volume fraction and matrix-reinforcement particle size ratio on wear characteristics of Al-SiCp Metal Matrix Composites, 6th International Powder Metallurgy Conference and Exhibition, Ankara,
- Karaoğlu, S., Kasman, Ş., Eroğlu, Ş.M., Eser, M.,** 2011, Toz Metalurjisi ile Üretilen Al/SiCp Metal Metrisli Kompozitlerin Tel Erozyon ile Kesilmesinde Oluşan Yüzeylerin İncelenmesi, I. Ulusal Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu, İzmir,
- Diler E.A., İpek R., Eroğlu Ş.M.,** 2011, Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen Al-SiC metal matrisli kompozitlerde matris ve takviye partikül boyutu bileşik etkisinin malzeme mekanik özelliklerine etkisi, I. Ulusal Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu, İzmir.
- Serim, D., Eroğlu, Ş.M., İpek, R.,** 2011, T/M ile Üretilen B4C/Al Matrisli Kompozitin Abrasiv Aşınma Davranışlarının Deneysel Araştırılması, I. Ulusal Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu, İzmir.
- Aydın, Ş.M., Karaoğlu, S.,** 2013, Toz Metalurjisi İle Üretilen Al/SiC MMK'lerin Haddelenmesi, II. Ulusal Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu, Aydın.
- Aydın, Ş.M., Karaoğlu, S.,** 2018, Wear And Tribological Behavior Of PEO Coated Al/Al₂O₃ Metal Matrix Composite Material Produced Via PM, 1st International Symposium on Light Alloys and Composite Materials (ISLAC'18), Karabük, Turkey, p185-186

