T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALÜMİNYUM DİBORİD TAKVİYELİ ALÜMİNYUM MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ABRAZİF AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Erman İNCİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Programı

Danışman

Doç. Dr. Ömer SAVAŞ

Temmuz, 2020

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALÜMİNYUM DİBORİD TAKVİYELİ ALÜMİNYUM MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ABRAZİF AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Erman İNCİ tarafından hazırlanan tez çalışması 14.07.2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

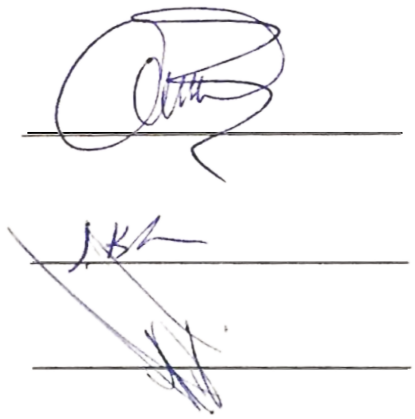
Doç. Dr. Ömer SAVAŞ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Ömer SAVAŞ, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi İlknur KESKİN ÖNER, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

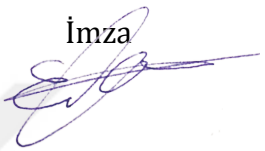
Doç. Dr. Faruk VAROL, Üye
Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi



Danışmanım Doç. Dr. Ömer SAVAŞ sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Alüminyum Diborid Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Abrazif Aşınma Davranışlarının İncelenmesi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Erman İNCİ

İmza



Aileme

ve

dostlarıma

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmalarımda bana yol gösteren, maddi ve manevi destek sağlayan, yaptığım işi sevdiren ve arkadaşça yaklaşımıyla her zaman beni motive eden saygıdeğer danışmanım Doç. Dr. Ömer SAVAŞ'a teşekkür ederim

Ayrıca tez sürecinde bana anlayış gösteren ve her zaman beni destekleyen sevgili aileme, motivasyonumu diri tutan sevgili dostlarım Sn. Merve AKYAZI, Sn. Mert Can BENLİ ve Sn. Deniz Emek SAİTOĞLU'na teşekkür ederim.

Erman İNCİ

İÇİNDEKİLER

ŞEKİL LİSTESİ x

TABLO LİSTESİ xi

ÖZET xii

ABSTRACT xiv

1 GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 1
1.2 Tezin Amacı 3
1.3 Hipotez 4

2 KOMPOZİT MALZEMELER 5

2.1 Kompozit Malzemelerin Genel Özellikleri 6
2.1.1 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması 7
2.2 Seramik Matrisli Kompozitler 8
2.3 Polimer Matrisli Kompozitler 8
2.4 Metal Matrisli Kompozitler 8
2.4.1 Metal Matrisli Kompozitlerin Mekanik Özellikleri 10
2.4.2 Metal Matrisli Kompozitlerin Uygulama Alanları 12
2.4.3 İntermetalik Kompozitler 15
2.4.4 Metal Matris Olarak Kullanılan Malzemeler 15
2.4.5 Alüminyum Matrisli Kompozitler 20
2.5 Metal Matrisli Kompozitler ve Takviye Tipleri 23
2.5.1 Parçacık Takviyeli Kompozitler 24
2.5.2 Kedi Bıyığı (Whisker) Takviyeli Metal Matrisli Kompozitler 25
2.5.3 Sürekli Lif Takviyeli Metal Kompozitler 25
2.6 Metal Matrisli Kompozitler İçin Üretim Yöntemleri 26
2.6.1 Sıvı Hal Üretim Yöntemleri 26
2.6.2 Katı Hal Üretim Yöntemleri 31

2.7 AlB2 Takviyeli AMK'ler 32
2.7.1 AlB2 Sentezleme Yöntemleri 33
2.7.2 AlB2/Al Kompozit Özellikleri 37

3 AŞINMA **41**

3.1 Aşınma Türleri 42
3.1.1 Abrazif Aşınma 42
3.1.2 Adhezif Aşınma 43
3.1.3 Yorulma Aşınması 43
3.2 Aşınma Ölçümünde Kullanılan Yöntemler 44
3.2.1 Ağırlık Farkı Yöntemi 44
3.2.2 Kalınlık Ölçüm Yöntemi 44
3.2.3 İz Değişimi Ölçüm Yöntemi 45
3.2.4 Radyoizotoplarla Ölçüm Yöntemi 45

4 TAGUCHI METODU **46**

4.1 Ortogonal Diziler 46
4.2 Sinyal/Gürültü (S/N) Oranı 48
4.3 Taguchi Metodunda Etkileşimler 48
4.4 Varyans Analizi 48
4.4.1 Kareler Toplamı 48
4.4.2 Serbestlik Derecesi 49
4.4.3 Varyans 50
4.4.4 F Testi 50
4.4.5 Toplam Değişime Etki Eden Faktör Yüzdesi 50
4.4.6 Doğrulama Deneyleri 51

5 DENEYSEL ÇALIŞMALAR **52**

5.1 Kompozit Malzemenin Üretimi 52
5.2 Karakterizasyon 56
5.2.1 Mikroyapı 56

5.2.2 Yoğunluk 56
5.2.3 Sertlik 56
5.2.4 Takviye Oranı 56
5.2.5 Aşınma 57
6 DENEYSEL SONUÇLAR **61**
6.1 Mikroyapı İncelemeleri 61
6.2 Aşınma Sonuçları 65
7 DENEYSEL SONUÇLARIN YORUMLANMASI **73**
8 SONUÇ VE ÖNERİLER **74**
KAYNAKÇA **76**
TEZDEN ÜRETILMIŞ YAYINLAR **84**

SİMGE LİSTESİ

Al	Alüminyum
B	Bor
Cu	Bakır
HB	Brinell sertlik
g	Gram
HCl	Hidroklorik asit
Mg	Magnezyum
m	Metre
µm	Mikron
N	Newton
Pa	Pascal
s	Saniye
°C	Santigrat derece
S/N	Sinyal/Gürültü Oranı
Ti	Titanyum

KISALTMA LİSTESİ

AMK	Alüminyum Matrisli Kompozit
MMK	Metal Matrisli Kompozit
SEM	Tarayıcı Elektron Mikroskobu
XRD	X-Ray Difraktometre

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Kompozitlerin yapısı 6
Şekil 2.2 Kompozitlerin sınıflandırılması 7
Şekil 2.3 Metal matrisli kompozitten üretilmiş motor bloğu 14
Şekil 2.4 MMK'lar için matris malzemelerinin endüstride kullanım oranları 17
Şekil 2.5 Bazı elementleri doğada bulunma yüzdesi 21
Şekil 2.6 Piston kolu(a), fren diski parçaları (b) ve kardan mili (c) 23
Şekil 2.7 Farklı tip takviye malzemelerin şematik çizimi 24
Şekil 2.8 Hacimce %40 SiC takviyeli AMK'ların mikroyapısı 25
Şekil 2.9 Şematik olarak gösterilen vorteks yöntemi 27
Şekil 2.10 Sıkıştırma döküm yönteminde işlem basamakları 29
Şekil 2.11 Basınçlı filtrasyon işlemi 30
Şekil 2.12 MMK üretim yöntemlerinin uygulama alanlarına göre kullanım oranları 31
Şekil 2.13 Oksit redüksiyonu yöntemi ile borür oluşum temsili şeması 35
Şekil 2.14 a) 1360°C'de boraks ile, b) 1360°C'de bor oksit ile, c) 900°C'de boraks ile elde edilen kompozitlerin mikroyapı görüntüsü 35
Şekil 2.15 %3 Al-B alaşımına ait XRD analizi 36
Şekil 2.16 AlB2 partiküllerini filtreleme sistemi 38
Şekil 2.17 a) Master alaşım, b) %4 AlB2/Al, c) %10 AlB2/Al, d) %20 AlB2/Al 39
Şekil 3.1 Tribolojik sistem 42
Şekil 3.2 Örnek adhezif aşınma modelleri 43
Şekil 3.3 Yüzeyde oluşan çatlak ve ilerlemesi 44
Şekil 5.1 Al-B alaşımı faz diyagramı 53
Şekil 5.2 AlB2 kompozit üretim aşaması; a) 1200°C'de ve b) 900°C'de 53
Şekil 5.3 Filtreleme sistemi 54
Şekil 5.4 Ergitme potası 55
Şekil 5.5 (a) Ergitme fırını ve (b) potanın fırından çıkarılması 55
Şekil 5.6 Aşınma test düzeneğinin temsili görüntüsü 58
Şekil 5.7 Hassas terazi 59
Şekil 6.1 Üretilen kompozite ait mikroyapı 61
Şekil 6.2 Saf Al mikroyapısı 62

Şekil 6.3 %7,5 AlB2 takviyeli kompozit mikroyapısı 63
Şekil 6.4 %15 AlB2 takviyeli kompozit mikroyapısı 63
Şekil 6.5 AlB2 borür yapılarının boy dağılımı 64
Şekil 6.6 Faktör ve seviyelerinin grafik gösterimi 69
Şekil 6.7 Aşınma mekanizmaları a) Saf Al, b) %7,5 AlB_2/Al, c) %15 AlB_2/Al 72

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Endüstride yer bulan MMK modelleri 10
Tablo 2.2 MMK'lar için takviye malzemelerinin temel özellikleri 12
Tablo 2.3 Metal matrisli kompozitlerin kullanım alanları 13
Tablo 2.4 Saf Al özellikleri 18
Tablo 2.5 Matris malzemesi metallerin yoğunlukları 18
Tablo 2.6 Titanyumun mekanik özellikleri 19
Tablo 2.7 Ti, Al ve Mg alaşımlarının karşılaştırılması 20
Tablo 2.8 AlB2 yapılarının takviye içeriği ve boyut değişimi 40
Tablo 4.1 Taguchi kayıp formülleri 46
Tablo 4.2 L4 deney reçetesi 47
Tablo 4.3 L9 deney reçetesi 47
Tablo 5.1 Saf Al ve Al-B kompozisyonu 52
Tablo 5.2 Aşınma deneyleri için belirlenen faktör ve seviye değerleri 59
Tablo 5.3 Aşınma deneyleri içilen L27 (35) deney reçetesi 60
Tablo 6.1 Üretilen kompozitler ve saf Al matrisinin ortalama sertlik değerleri 65
Tablo 6.2 Aşınma deney sonuçları, ortalamalar ve S/N değerleri 66
Tablo 6.3 Deney 8'in parametreleri (en yüksek ağırlık kaybı) 67
Tablo 6.4 Deney 19'un parametreleri (en düşük ağırlık kaybı) 67
Tablo 6.5 S/N oranlarına göre hazırlanan ANOVA tablosu 68
Tablo 6.6 Optimum deney şartları 70
Tablo 6.7 Doğrulama deneyi için güven aralığı 71

ÖZET

Alüminyum Diborid Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Abrazif Aşınma Davranışlarının İncelenmesi

Erman İNCİ

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Ömer SAVAŞ

Bu çalışma AlB_2 takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin üretimi ve aşınma davranışlarının incelenmesine yöneliktir.

Kompozitleri üretmek için öncelikle Al-2B master alaşımı çelik pota içerisinde 1200°C'de 1 saat ergitme işlemine alındıktan sonra 900°C'de 2 saat boyunca fırında bekletilmiştir. Bu şekilde Al matrisi içerisinde AlB_2 borür yapıları ekzotermik reaksiyon sonucu kendiliğinden oluşmuştur. Üretilen kompozit malzemeler, bir filtreleme sistemi aracılığıyla farklı takviye oranlarında hazırlanmıştır.

Farklı takviye oranına sahip kompozit malzemeler mikroyapı incelemeleri ve sertlik testlerinin ardından aşınma deneylerine tabi tutulmuştur. En yüksek sertlik, ortalama 74,06 HB değeri ile %15 takviye oranlı kompozitte görülmüştür. Saf Al matrisine ait sertlik değeri ise ortalama 28,59 HB olarak tespit edilmiştir. Kompozitin takviye oranı arttıkça sertliğinin de arttığı görülmüştür.

Aşınma deneylerinde farklı takviye oranında hazırlanan kompozit malzemelerin, aşındırıcı partikül boyutu, yük, kayma hızı ve kayma mesafesi parametrelerindeki davranışları incelenmiştir. Deneysel çalışmalar için Taguchi yaklaşımından faydalanılmıştır ve $L_{27}(3^5)$ ortogonal serisi baz alınarak deney reçeteleri oluşturulmuştur.

Kompozitlerin aşınma miktarı ağırlık kaybı metoduyla ölçülmüştür. Kompozit numuneler aşınma testleri öncesinde ve sonrasında hassas terazi ile ölçülmüştür.

Deneyler sonucunda, takviye oranının artışıyla birlikte malzemenin aşınmaya direncinin arttığı sonucuna varılmıştır. Takviye oranının yanısıra aşındırıcı partikül boyutunun, uygulanan yükün ve kayma mesafesinin de aşınmaya etkisi olduğu tespit edilmiştir. Aşındırıcı partikül boyutunun, uygulanan yükün ve kayma mesafesinin azalması ile daha düşük aşınma sonuçları elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum matrisli kompozitler, AlB_2, abrazif aşınma.

ABSTRACT

Investigation Of Abrasive Wear Behavior Of Aluminium Diborid Reinforced Aluminium Matrix Composites

Erman İNCİ

Department of Naval Architecture and Marine Engineering

MSc. Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Ömer SAVAŞ

In this study, production and wear behaviors of AlB_2 reinforced aluminium matrix composites were investigated.

Al-2B master alloy was melted in a steel crucible for 1 hour at 1200°C and then kept in the oven for 2 hours at 900°C for production of the composites. In this way, the AlB_2 boride structures in the Al matrix were formed spontaneously as a result of exothermic reaction. The composite materials produced in different reinforcement ratios through a filtering system.

Composite materials with different reinforcement ratios were subjected to abrasion tests after microstructures and hardness tests. The highest hardness was seen in the composite 15% reinforcement rate with an average value of 74,06 HB. The hardness value of pure Al matrix was determined as 28,59 HB. As the reinforcement ratio of the composites increased, the hardness values also increased.

The behavior of composite materials in abrasive particle size, load, sliding velocity and sliding distance parameters were investigated. For experimental studies, the

Taguchi approach was used and experiment recipes were created based on the $L_{27}(3^5)$ orthogonal series.

The amount of wear of composites was measured by weight loss method. Composite samples were measured with precision scales before and after wear tests.

In the test results, it is concluded that the resistance of material to wear increases with the increase of reinforcement rate. In addition, it has been determined that the abrasive sanding, the applied load and the sliding distance have an effect on the wear. Lower wear results have been achieved with less particle size, less load and less sliding distance.

Keywords: Aluminium matrix composites, AlB_2, abrasive wear.

1
GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Gelişen modern teknoloji ile birlikte malzeme bilimi de hızlı bir gelişim göstermektedir. Son yıllarda yeni malzeme geliştirmeye yönelik çalışmalar hayli artmıştır (Udupa, Rao, & Gangadharan, 2014).

Günümüzde kullanılan malzemeler, gelişen teknoloji doğrultusunda ihtiyaçları karşılamada yetersiz gelmeye başlamışlardır. Otomotiv, denizcilik ve havacılık endüstrilerinde kullanılan malzemeler artık ihtiyacı karşılayamamaları sebebiyle kompozit malzemelerin üretimi ve geliştirilmesi üzerine çalışmalar başlamıştır. Bu endüstrilerde malzemenin hafif ve dayanıklı olması istenmektedir (Sarıtaş, 1995).

Kompozit malzemeler, birbiri içerisinde çözünmeyen en az iki farklı malzemenin birleşimi sonucunda oluşan ve kompoziti oluşturan mazlemelerden daha iyi özelliklere sahip malzeme olarak tanımlanmaktadır. Oluşan yeni malzeme, tek bir malzeme tarafından sağlanamayan mukavemet, süneklik, tokluk ve sertlik gibi özellikleri bir arada sunmaktadır (D. K. Sharma, Mahant, & Upadhyay, 2020; Toozandehjani vd., 2018). Metal matrisli kompozit malzemeler aşınma ve yorulmaya karşı yüksek direnç, yüksek ısı ve elektrik iletimi, yüksek korozyon direnci ve yüksek spesifik mukavemet gibi özelliklere sahiptir.

Uzay ve havacılık alanları ve otomotiv sektörü metal matrisli kompozitlerin yaygın olarak kullanıldığı yerlerdir. Kompozitlerin otomotiv sektöründeki uygulama alanları için fren diskleri, silindir gömleği ve kasnaklar örnek olarak verilebilir (Mahendra & Radhakrishna, 2015). Rawal ve Al (Rawal & Al, 2001), uzay uygulamalarında Hubble Uzay Teleskobu'nda grafitle güçlendirilmiş metal matrisli kompozitlerden faydalanıldığını belirtmiştir.

Aşınma problemi birbiri üzerinde hareket eden yüzeylerin bozulması sonucu oluşan hasarlardır ve bu hasarlar ekonomik olarak sıkıntı oluşturmaktadır. Daha fazla enerji tüketimi ve malzeme kaybı aşınmanın olumsuz etkileridir. Bu etkileri azaltmak için ihtiyaç duyulan malzemeler, düşük sürtünme katsayısı ve yüksek

aşınma direncine sahip olmalıdır (Mohan, Prakash, & Pathak, 2002; Salman & Durak, 2011; P. Sharma, Khanduja, & Sharma, 2014).

Metal matrisli kompozitler (MMK), yüksek aşınma direncine sahip olmasıyla aşınmanın olumsuz sonuçlarını azaltabilecek özelliktedir. Değişen takviye parçacıkları ve takviye yoğunluklarıyla aşınma dirençleri de farklılık göstermektedir (Ahlatçı, 2003).

Metal matrisli kompozitlerde mekanik özellikleri iyileştirmede takviye elemanlarının etkisi büyüktür. MMK'ları güçlendirmek için yaygın olarak kullanılan takviye elemanları; TiO_2, SiC, Al_2O_3, TiB_2 olarak gösterilebilir (Meignanamoorthy vd., 2020).

Alüminyum, kompozit malzemelerin üretiminde en fazla başvurulan matris malzemesidir (Evans, Marchi, & Mortensen, 2003).

Bu çalışmada matris malzemesi alüminyum olarak belirlenmiş ve takviye elemanı olarak AlB_2 tercih edilmiştir. Yapılan literatür taramalarında AlB_2 takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin aşınmaya karşı dirençlerinin matris malzemesine göre yüksek olduğu belirtilmiştir(Koksal, Ficici, Kayikci, & Savas, 2012),(Fıçıcı, Köksal, Savaş, & Kayıkçı, 2014).

AlB_2 takviyeli Al matrisli kompozitlerin üretimi için kullanılan yöntemlerden bir tanesi olan in-situ tekniği, bu çalışmada da kullanılmıştır. Bu teknikle yapılan üretimde AlB_2 borür yapıları sıvı alüminyum içerisinde ekzotermik reaksiyonlar sonucunda kendiliğinden oluşmaktadır. In-situ tekniğinde ıslatilabilirlik ve arayüzey uyumsuzluğu gibi problemlerin önüne geçilmektedir. In-situ tekniğinin diğer yöntemlerden temel farkı budur. Bu nedenle bu yöntemle üretilen kompozitler daha mukavemetli ve kararlı bir yapıya sahip olur(Kerti, 1999; Peng & Fan, 2000).

AlB_2 takviyeli kompozitlerin aşınma davranışlarını incelemek için yapılan bu çalışmada deneylerin yapılmasında Taguchi yaklaşımından faydalanılmıştır. Taguchi yöntemi farklı parametrelerin farklı seviyeleri arasında optimum birleşiminin tespiti adına oldukça önemlidir. Çok sayıda deney yapılması gereken çalışmalarda Taguchi yöntemi sayesinde daha az deney yapılarak sonuca

ulaşılmaktadır. Birçok çalışmada bu yöntemin başarılı bir şekilde kullanıldığı görülmektedir (Ramazan Kayikci, 2007; Ross, 1988; Savaş, 2020).

Kompozit malzemeler üzerine yapılan çalışmalarda takviye oranı, kayma hızı, yük, partikül boyutu (aşındırıcı medya) gibi parametrelerin aşınmaya etkilerinin incelendiği görülmektedir (Ficici, 2016; Ficici & Koksal, 2016; Savaş, 2019).

Kompozit malzemelerdeki takviye elemanının oranı, şekli ve boyutu malzemenin mekanik özelliklerini etkilemektedir. Kumar ve arkadaşları (Kumar, Chakraborty, Subramanya Sarma, & Murty, 2008) çalışmalarında kompozit malzeme içerisinde bulunan takviye oranının aşınmaya önemli bir etkisi olduğunu ve artan takviye oranıyla birlikte AlB_2 partiküllerinin malzemenin sertlik değerini de artırması sebebiyle malzemenin aşınmaya karşı direncinin arttığını belirtmişlerdir.

Çalışmalarında farklı partikül boyutlarındaki aşındırıcıların etkilerini de inceleyen Savaş, Fıçıcı ve Köksal (Ficici, 2016; Ficici & Koksal, 2016; Savaş, 2019) aşındırıcı partikül boyutlarının artmasının daha fazla aşınmaya sebep olduğunu raporlamışlardır.

Mevcut çalışmalarda yük etkenini de inceleyen aşınma deneylerinde malzemeye uygulanan yük miktarı arttığı zaman aşınma miktarının da arttığı raporlanmıştır. (Ko, 2006; Kumar, Sarma, & Murty, 2007; Ozdin, 2007; N. Radhika & Raghu, 2018; Nachimuthu Radhika & Raghu, 2016)

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmanın ana hedefleri özetle aşağıdaki şekildedir:

- Tekil yapılı malzemeler ve alaşımlardan daha iyi mekanik özelliklere sahip malzemelerin üretimi.
- Al-2B master alaşımı kullanarak, in-situ tekniğiyle AlB_2 takviye yapılarının kendiliğinden oluşumunu sağlamak.
- Filtreleme sistemiyle kompozit malzemenin takviye oranını arttırmak ve artan takviye oranıyla birlikte malzemenin aşınma dirençlerini iyileştirmek.

1.3 Hipotez

Al alaşımlarına ve tekil mazlemelere karşın sahip oldukları iyi mekanik özellikler sebebiyle ilgi odağı olan alüminyum matrisli kompozitler üzerine yapılan çalışmaların giderek arttığı ve bu tip malzemelerin endüstrideki uygulama alanının genişlediği bilinmektedir. Bu çalışmada in-situ tekniği kullanılarak kendiliğinden reaksiyonla oluşan AlB_2 partikülleri ile sertlik ve aşınma dirençleri yüksek alüminyum matrisli kompozit malzemelerin üretilmesi öngörülmektedir.

2
KOMPOZİT MALZEMELER

Malzeme, modern teknolojinin temel direklerinden biri olarak görülmektedir. Yeni malzeme geliştirmeye yönelik araştırmalar, ileri teknoloji alanının yapı taşı sayılan malzemelerin buluşuna öncülük etmiştir ve son yıllarda malzeme bilimi hızlı bir gelişim göstermiştir (Udupa vd., 2014).

Teknolojik olarak gelişmek için materyalleri anlama ve kullanma yeteneği büyük önem arz etmektedir. Günümüzde bilim insanları ve mühendisler, ekonomik ve çevresel nedenlerle yenilikçi malzemeler kullanmanın öneminin farkındadırlar (Naebe & Shirvanimoghaddam, 2016).

Kompozit üretimi, sünek ve tok özelliklere sahip alüminyum matrisi, aşınmaya karşı iyi derecede dayanıklı ve güçlü seramik parçacıkları ile karıştırarak ihtiyaçlar doğrultusunda uyarlanabilen yeni bir malzeme oluşturmak için ortaya çıkmıştır (P. Sharma vd., 2014)

Özellikle nakliye araçları ve yüksek hızlandırılmış makine bileşenleri için düşük ağırlık gereklidir (Degischer, 1998).

Uzay ve havacılık endüstrisinin de özel ilgi gösterdiği yüksek sertlikte malzeme elde etmek için kompozit malzemeler bir alternatif konumuna gelmiştir (Torralba, Costa, & Velasco, 2003).

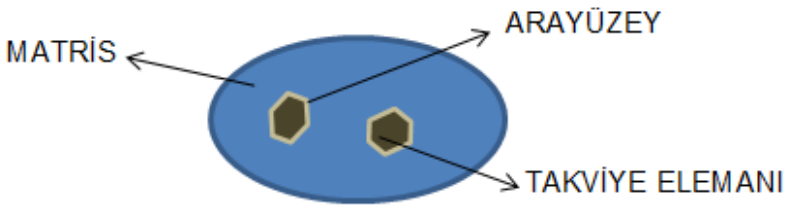
Teknolojinin gelişmesiyle birlikte endüstride kullanılan mevcut malzemeler ihtiyaçları karşılama konusunda yetersiz kalmışlardır. Özellikle havacılık, denizcilik ve otomotiv endüstrisinin hafif ve aynı zamanda dayanıklı malzemelere ihtiyaç duyması sebebiyle kompozit malzeme üretimi ve geliştirilmesi üzerine çalışmalar artmıştır (Sarıtaş, 1995).

Genel olarak kompozit malzemeler, birbirleri içerisinde çözünmeyen ve erimeyen en az iki farklı bileşenin kombinasyonuyla, bileşenlerinden daha iyi mekanik özelliklere sahip olan yeni bir malzeme olarak tanımlanır. Tipik olarak dağınık şekilde bulunan takviye fazı ve gerilimi bu takviye fazına ileten bir matris yapıdan

oluşur. Kompzitteki her bileşen kompozitin nihai özelliklerinin elde edilmesinde rol oynar (Toozandehjani vd., 2018).

Tek bir malzeme tarafından elde edilmesi zor olan mukavemet, sertlik, süneklik ve tokluk gibi özellikler, iki veya daha fazla malzemenin birleşimi neticesinde oluşan kompozit malzemelerle elde edilmektedir. Kompozitlerin özellikleri matris malzemesi, takviye malzemesi ve üretim yöntemine göre şekillenir (D. K. Sharma vd., 2020).

Şekil 2.1'de kompozit malzemelerin yapısı gösterilmektedir.



Şekil 2.1 Kompozitlerin yapısı

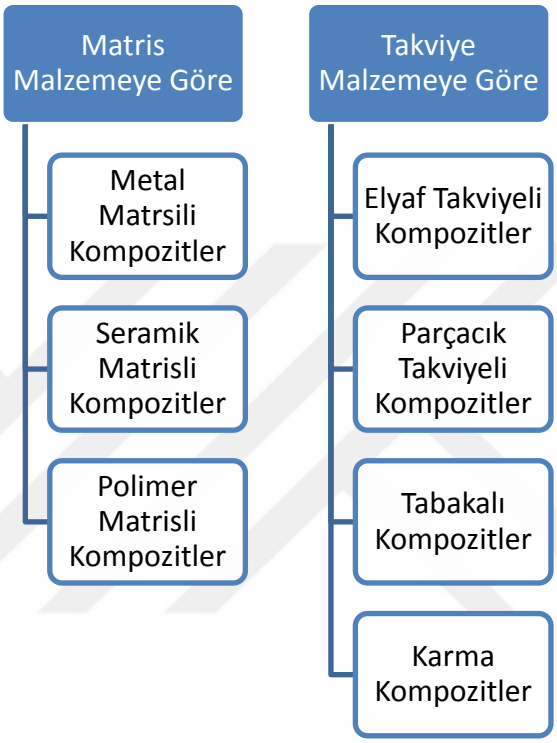
2.1 Kompozit Malzemelerin Genel Özellikleri

Kompozit malzemeler yüksek ısı ve elektrik iletimi, iyi aşınma ve korozyon dirençleri, yüksek sertlik ve düşük yoğunluk gibi özelliklerle sahiptir. Kompozit malzemeler, sağlamlık ve düşük ağırlık özellikleriyle hava araçları ve denizcilik endüstrisinde ihtiyacı karşılama potansiyelindedir (Dinaharan & Murugan, 2012; Miracle, 2005; Rosso, 2006).

Yüksek esneklik modülü ve mukavemet, darbeye karşı dayanım ve yüksek tokluk, yüzey sertliği ve yüzey çatlaklarına karşı düşük hassasiyet gibi özellikler kompozit malzemelerin avantajlarıdır. Kompozitlerin tekil malzemelere gore sahip olduğu iyi özelliklerinin yanısıra görece düşük süneklik, üretim ve işlemede yüksek maliyet gibi dezavantajları da vardır (Kalemtaş, 2014).

2.1.1 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler yaygın olarak matris yapısı ve takviye elemanlarına gore sınıflanıdırılmaktadır. Matris malzemeye göre metal matrisli, seramik matrisli ve polimer matrisli olarak ayırt edilebilen kompozit malzemeler, takviye malzemeye göre ise elyaf takviyeli, parçacık takviyeli, tabakalı ve karma kompozitler olarak sınıflandırılmaktadır(Şekil 2.2) (Kaya, 2016).



Şekil 2.2 Kompozitlerin sınıflandırılması

Metal matrisli kompozit (MMK) malzemeler, metal ve seramik parçacıkları ile güçlendirilmiş metalik bazlı matristen oluşur. Aşınmaya dayanıklı ve gerilme mukavemetleri yüksek olur. Seramik matrisli kompozit malzemeler seramik esaslıdır ve takviyeler temel olarak kısa liflerdir. Rijit bir yapıda ve gevrek olan bu kompozitler yüksek sıcaklıkta çalışma koşulları için uygundur. Polimer matrisli kompozitler ise genelikle karbon ve camlar gibi çok çeşitli takviyelerle güçlendirilen polimer bazlı bir reçine matrisine sahiptir (Kaya, 2016; Toozandehjani vd., 2018).

2.2 Seramik Matrisli Kompozitler

Monolitik seramikler oldukça yüksek mukavemet ve sertliğe sahip fakat kırılgan yapıdadır. Bu nedenle seramik matris kompozitlerinin üretilmesindeki ana amaçlardan biri, tokluğu arttırmaktır (Rosso, 2006).

Yapısı gereği gevrek ve rijit olan seramik kompozitlerin yüksek sıcaklıklara karşı dayanımı iyidir. Seramik matrisli kompozitlerin kullanım alanlarına otomotiv, haberleşme, uzay-havacılık, svunma sanayi ve tıp alanları örnek verilebilir.

2.3 Polimer Matrisli Kompozitler

Günümüzde kullanım alanı en fazla olan maleme olarak nitelendirilen polimer matrisli kompozitler; işlenmesi kolay, korozyona dirençli ve uzun surely kullanıma uygundur (Kaya, 2016).

Polimer matrisli kompozitler iki gruba ayırılır:

- Termoset matrisler
- Termoplastik matrisler

Lif takviyeli kompozit yapımında kullanılan termoset matrisler sıvı haldedir ve yüksek ısı dirençleri vardır. Sünek ve eritilebilir özelliğie sahip olan termoplastik matrisler tekrar şekillendirilebilme özelliği sağlar (Itoh, Inoue, Hirayama, Sugimoto, & Seguchi, 2002; Kaya, 2016).

Termoset plastiklere polyesterler, epoksiler, alkitler ve aminler örnek verilebilir.

Termoplastiklere örnek olarak naylon, polietilen, karbonflorür, akrilikler, selülozikler ve viniller gösterilebilir.

2.4 Metal Matrisli Kompozitler

Metal matrisli kompozitler (MMK), temel olarak bir metalden ve küçük bir bileşen olarak takviye elemanından oluşmaktadır. Hafif, yüksek sıcaklık dayanımı, korozyon direnci ve tokluk gibi özelliklere sahip olan alüminyum, magnezyum, titanium ve alaşımları MMK'ların üretiminde matris olarak kullanılan en yaygın metal ve alaşımlardır.

MMK'ların geliştirilmesi son yıllarda malzeme bilimindeki en büyük yeniliklerden biridir. Dünya çapında büyük ilgi gören MMK'lar, üstün mekanik ve tribolojik özelliklere sahiptir. Fiber, parçacık, pul ve bıyık şeklinde takviye fazlarına sahip olan MMK'ların gelişmiş mühendislik malzemeleri olarak kullanımı hızla artmaktadır (Ficici, Koksal, Kayikci, & Savas, 2011; Peng, Fan, & Evans, 2001).

MMK'lar sert seramik takviye malzmelerinin sünek bir metal veya alaşım matrisine gömüldüğü bir tür malzemeye karşılık gelmektedir. MMK'lar metalerin süneklik ve tokluk özellikleri ile seramiklerin yüksek mukavemet ve rijitlik özelliklerini birleştirerek daha yüksek mukavemet ve daha yüksek servis sıcaklığı özelliklerini ortaya çıkarır (Tjong & Ma, 2000).

Takviye parçacıklarıyla güçlendirilmesi nedeniyle çok iyi mekanik özelliklere sahip olarak dikkat çeken MMK'lar havacılık, otomotiv ve yapı endüstrilerinde yenilikçi uygulamalar için elverişli bir malzeme olarak gelişmiştir. Metal matrisi güçlendirerek gelişmiş mekanik özellikler elde etmek için TiO_2, SiC, Al_2O_3, TiB_2, TiC, ZrB_2, B_4C, AlN yaygın olarak kullanılmaktadır (Meignanamoorthy vd., 2020).

Son yıllarda gelişen MMK'lar ilk olarak uzay aracı ve uçak gövdesi yapıları için havacılık endüstrisinden destek gördü. Daha sonraları otomotiv ve elektronik sektörleri bu kompozitlerle çalışmaya başladı (Jr, 1998).

MMK'ların, günümüzde uygulamalarının hızla artmasının ve en önemli malzemelerden kabul edilmesinin sebebi alaşımlara karşı sahip oldukları düşük yoğunluk, aşınmaya karşı direnç ve özgül dayanımları olarak gösterilmektedir (H. G. Zhu, Ai, Min, Wu, & Wang, 2010).

Kompozit malzemeler üretilirken matris ve takviye elemanı arasında bir etkileşim meydana gelir. Bu etkileşim, matris malzeme ile takviye malzeme arasında bir arayüz oluşmasıyla sonuçlanır. Meydana gelen arayüzey kompozit malzemenin mekanik özelliklerine önemli bir etkiye sahiptir (Tjong & Ma, 2000; Uygur & Saruhan, 2004).

Metal matris kompozit modellerinden yaygın olarak kullanılanlar Tablo 2.1'de gösterilmiştir (Uygur & Saruhan, 2004).

Tablo 2.1 Endüstride yer bulan MMK modelleri (Uygur & Saruhan, 2004)

Takviye malzeme	Matris malzeme
Boron lifi	Al, Ti
Grafit lifi	Al, Mg, Cu
Almunia lifi	Al, Mg
Silisyum Karbür lifi	Al, Ti
Silisyum Karbür kedi bıyığı	Al, Mg
Silisyum Karbür ve Alümina Parçacık	Al, Mg, Ti

Geleneksel metaller ve alaşımlar karşısında MMK'ların sahip olduğu bazı avantajlar şu şekildedir:

- Aşınma ve yorulmaya karşı yüksek direnç
- Düşük ısıl genleşme katsayısı
- Yüksek spesifik mukavemet
- İyi ısı ve elektrik iletkenliği
- Yüksek spesifik rijitlik(modül)
- Daha yüksek çalışma sıcaklığı
- Yüksek korozyon direnci
- Yüksek tokluk
- Gürültü, vibrasyon
- Metallerden daha iyi vibrasyon, gürültü ve sertlik özellikleri

Kompozit malzemelerin metaller karşısında sahip olduğu avantajların yanı sıra yüksek hammade fiyatı ve düşük üretim hızı dezavantajları olarak sayılır.

2.4.1 Metal Matrisli Kompozitlerin Mekanik Özellikleri

Aşınma direnci: Aşınma problemi endüstriyel operasyonlarda büyük bir etkiye sahiptir. Bu problemin aşılmasında düşük sürtünme katsayılı ve yüksek aşınma dirençli malzemelerin kullanılması gerekmektedir (Mohan vd., 2002; P. Sharma vd., 2014). Matris malzemesi olarak seçilen hafif metaller ve alaşımlar aşınmaya karşı yeteri kadar direnç gösterememektedir. Ancak takviye malzemeleriyle

güçlendirilerek üretilen MMK'lar takviye elemanlarının katkısıyla aşınmaya karşı direnç kazanır ve matris malzemesinin düşük yoğunluğa sahip olmasıyla da ağırlık tasarrufu sağlanır.

Spesifik mukavemet: Günümüzde pek çok tasarımcı maksimum mukavemeti minimum ağırlıkta elde etmek ister. Bu ihtiyacı karşılamak için metaller yüksek yoğunlukları sebebiyle yetersiz kalmaktadırlar. MMK'lar içerdikleri takviye malzemesi sayesinde mukavemet değerlerini yükseltirken matris fazındaki hafif metaller ile de istenilen ağırlıkta kalabilmektedir. Bu sebeple MMK'lar özellikleri gereği spesifik mukavemet ihtiyacını karşılayabilmektedir.

Spesifik rijitlik: Malzemenin elastiste modülünün yüksek olması, kalıcı şekil değiştirmeye uğramadan daha büyük kuvvet değerlerine dayanabileceğini ifade eder. Elastiste modülü ne kadar yüksek olursa malzeme de o kadar rijit kabul edilir. MMK'ların önemli avantajlarından sayılan spesifik rijitlik (elastiste modülü/yoğunluk), kompoziti oluşturan düşük yoğunluktaki matris ve rijit yapıdaki takviye malzemelerin kombinasyonuyla önemli oranda bir artış yakalar.

Isıl genleşme katsayısı: Isıl genleşme katsayısı çalışma sıcaklığı parametresinin önemli olduğu durumlarda göz önünde bulundurulması gereken bir özelliktir. Al, Mg, Ti ve Cu gibi metallerin ısıl genleşme katsayısı yüksektir. Bu özellikleri sebebiyle de sıcaklık farkı sonucunda hacimsel boyut değişimi yüksek olur. MMK'ların üretiminde matris olarak kullanılan bu hafif metallere ısıl genleşme katsayısı düşük takviye malzemeleri eklenir ve kompozitin ısıl genleşme katsayısı görece düşük olur (Dieringa & Kainer, 2006).

Metal matrisli kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan takviye malzemelerinde bulunması istenen bir takım özellikler vardır. Boyut, şekil, elastiste modülü, yoğunluk, çekme dayanımı, ısıl genleşlme katsayısı, Kristal yapısı ve matris malzemeyle uyumu başlıca aranan özelliklerdir. Bu özellikler MMK'ların mekanik özellikleri için de belirleyici olduğu için önemli bir husustur.

MMK'ların mekanik özelliklerine etki eden bir diğer önemli husus matris elemanı ile takviye elemanı arasında oluşan arayüzeydir. Oluşacak güçlü bir arayüzey

malzemeye uygulanan dış kuvvetin matris tarafından takviye elemanına iletilmesini iyileştirecektir (Kalemtaş, 2014).

Tablo 2.2'de MMK'lar için tercih edilen takviye elemanlarının özellikleri sunulmuştur (Ibrahim, Mohamed, & Lavernia, 1991).

Tablo 2.2 MMK'lar için takviye malzemelerinin temel özellikleri (Ibrahim vd., 1991)

Malzeme	**Takviye Formu**	**Elastiklik Modülü (GPa)**	**Yoğunluk (g/cm^3)**	**Isıl İletkenlik (W/mK)**	**Isıl Genleşme Katsayısı ($x10^{-6}/K$)**
SiC	Partikül	448	3,21	120	3,4
SiC	Kısa Fiber	400-700	3,21	32	3,4
SiC	Fiber	450	3,46		
Al_2O_3	Partikül	410	3,9	25	8,3
AlN	Partikül	350	3,25	10	6,0
B_4C	Partikül	450	2,52	29	5,0-6,0
TiB_2	Partikül	370	4,5	27	7,4
TiC	Partikül	320	4,93	29	7,4
BN	Partikül	90	2,25	25	3,8
Al_2O_3	Kısa	300	3,29		

Arayüzeyin sahip lduğu muavemet, kompozit malzemenin de mukavemetini belirler. Islatılabilirlik, üretim esnasındaki kimyasal etkileşimler ve oksit oluşumu arayüz mukavemetine etki eden faktörlerdir.

2.4.2 Metal Matrisli Kompozitlerin Uygulama Alanları

Son 30 yılda MMK'lar çeşitli ileri mühendislik uygulamalarının yanı sıra ulaşım, askeri, denizcilik gibi uygulama alanlarında geleneksel malzemelerin yerini alma potansiyeline sahiptir (Mohanavel, Kumar, Sathish, & Anand, 2018).

MMK'lara yönelik dünya talebinin, bilgilerin çıkarıldığı Şekil 2.3'te gösterildiği gibi sürekli arttığı bildirilmiştir (Salih, Ou, Sun, & Mccartney, 2015).

Uzay döneminin başlangıcından itibaren, uzay uygulamaları için yüksek özgül sertliğe ve sıfıra yakın termal genleşme katsayısına sahip organik-matris ve metal-matris kompozitler geliştirilmiştir (Rawal & Al, 2001).

Uzay ve havacılık uygulamaları için çok önemli bir faktör olan yüksek mukavemet / ağırlık oranından yararlanılır (Prater, 2013; Toozandehjani vd., 2018).

MMK'lar yüksek sıcaklık kapasitesine, yüksek termal iletkenliğe, düşük termal genleşme katsayısına, yüksek özgül sertliğe ve mukavemete sahiptir. Rawal ve Al (Rawal & Al, 2001), bu potansiyel faydaların, 1980'lerin sonlarında kritik uzay sistemi uygulamaları için MMK'lar için iyimserlik yarattığını raporlamıştır.

Uzay uygulamalarında grafit liflerle güçlendirilmiş alüminyum matrisli kompozitler, Hubble Uzay Teleskobu'nda anten bomu (anten kolu) için kullanılmaktadır. Üretiminde kompozit malzemeden faydalanılan 3.6 m uzunluğundaki bom, uzay manevraları sırasında antenin konumunu korumak için istenen sertliği ve düşük termal genleşmeyi sağlamaktadır (Rawal & Al, 2001).

Alüminyum, magnezyum ve titanyum, uzay endüstrisinde MMK matrisi veya alaşım olarak kullanılan en yaygın matrislerdir (Toozandehjani vd., 2018).

MMK'ların uygulama alanları Tablo 2.3'te sunulmuştur.

Tablo 2.3 Metal matrisli kompozitlerin kullanım alanları

Uzay sanayi	Uzay yapıları ve antenler
Havacılık	Gövde ve iç donanım parçaları, kompresör ve türbin kanatları, helikopter parçaları
Otomotiv	Motor blokları, pistonlar, biyeller, akü plakaları
Elektrik	Motor fırçaları, kablo ve elektrik kontakları, ev aletleri akü plakaları
Tıp	Protezler, tekerlekli sandalyeler
Spor	Tenis raketleri, kayaklar, olta, golf sopalar ve bisiklet

Mahendra ve Radhakrishna (Mahendra & Radhakrishna, 2015), otomotiv sektöründe fren diskleri, silindir gömleği ve güç aktarımında kullanılan

kasnaklarda seramik parçacıklarla takviye edilmiş Al matrisli kompozitlerden faydalanıldığını belirtmiştir. Kayış kasnaklarında geleneksel döküm malzeme yerine kompozit malzeme kullanılmasının başlıca nedeni MMK'ların sahip olduğu düşük yoğunluk ve yüksek aşınma direncidir (Mahendra & Radhakrishna, 2015).

Yakıt ekonomisi, azaltılmış araç emisyonları ve rekabetçi maliyetle artan araç güvenliği gibi hedefler, otomotiv endüstrisinde yeni malzemeler ve imalat teknolojisi geliştirmek ve uygulamak için itici güç olmuştur. Al-matrisli kompozitler gibi hafif malzemeler, daha hafif motor ve daha iyi özelliklere ve performansa sahip yapısal bileşenlerin otomobillerde tasarlanmasına ve kullanılmasına olanak sağlar (Prasad & Asthana, 2004).

Şekil 2.3'te MMK'ların kullanımına örnek olan bir motor bloğu gösterilmektedir.

Şekil 2.3 Metal matrisli kompozitten üretilmiş motor bloğu

Otomotiv sektöründe MMK'ların tercih edilmesindeki başlıca sebepleri şu şekilde sıralayabiliriz:

- Motor parçalarının ağırlığını azaltmak
- Motor parçalarının çalışma sıcaklığını artırmak
- Sertlik ve dayanımı artırmak
- Aşınma direncini artırmak

2.4.3 İntermetalik Kompozitler

Günümüzde popüler bir malzeme grubu olan intermetalik kompozit malzemelerin sanayide uygulamalarına oldukça sık rastlanmaktadır.

Uzay teknolojilerinde kullanımına da rastlanan bu malzemelerden NASA uzay aracının bazı parçaları için faydalanmıştır.

Al-Ti temelli intermetalik kompozitler en yaygın kullanıma sahip olanlarıdır. Bu malzeme grubunun öne çıkan avantajlarını aşağıdaki gibi sıralayabiliriz:

- Yüksek dayanım ve sertlik
- Düşük yoğunluk
- Düşük bakım maliyeti
- Sürtünmeye direnç
- Yüksek çalışma sıcaklıklarında paslanmaya karşı direnç

Sahip olduğu avantajlara karşın düşük kırılma direnci ve düşük süneklik, intermetalik kompozitlerin dezavantajları olarak bilinmektedir (Sıcakyüz, 2007).

2.4.4 Metal Matris Olarak Kullanılan Malzemeler

Metal matrisli kompozitlerin üretiminde matris olarak kullanılan yaygın metaller ve alaşımlar genellikle alüminyum, magnezyum, titanyum ve alaşımlarını hafif, yüksek sıcaklık dayanımı, korozyon direnci ve tokluk gibi uygun özelliklere sahiptir (Koksal, Ficici, Kayikci, & Savas, 2014).

MMK'larda alüminyum, magnezyum, titanyum esas olarak SiC, B_4C, TiC, Si_3N_4, AlN, Al_2O_3, TiB_2, vb.'nin takviye malzemeleri olarak kombinasyonu ile matris olarak kullanılır (D. K. Sharma vd., 2020).

En çok kullanılan iki metal matris, alüminyum ve titanyum esaslıdır. Bu metallerin her ikisi de nispeten düşük özgül ağırlıklara sahiptir ve çeşitli alaşım formlarında mevcuttur. Magnezyum daha da hafif olmasına rağmen, oksijene olan büyük afinitesi atmosferik korozyonu arttırır ve birçok uygulama için daha az uygun hale getirir (Rosso, 2006).

Berilyum, tüm yapısal metallerin en hafifidir ve çelikten daha yüksek bir çekme modülüne sahiptir. Bununla birlikte, potansiyel bir matris malzemesi olarak hariç tutulmasının nedeni olan aşırı kırılganlıktan muzdariptir (Rosso, 2006).

2.4.4.1 Alüminyum ve Alaşımları

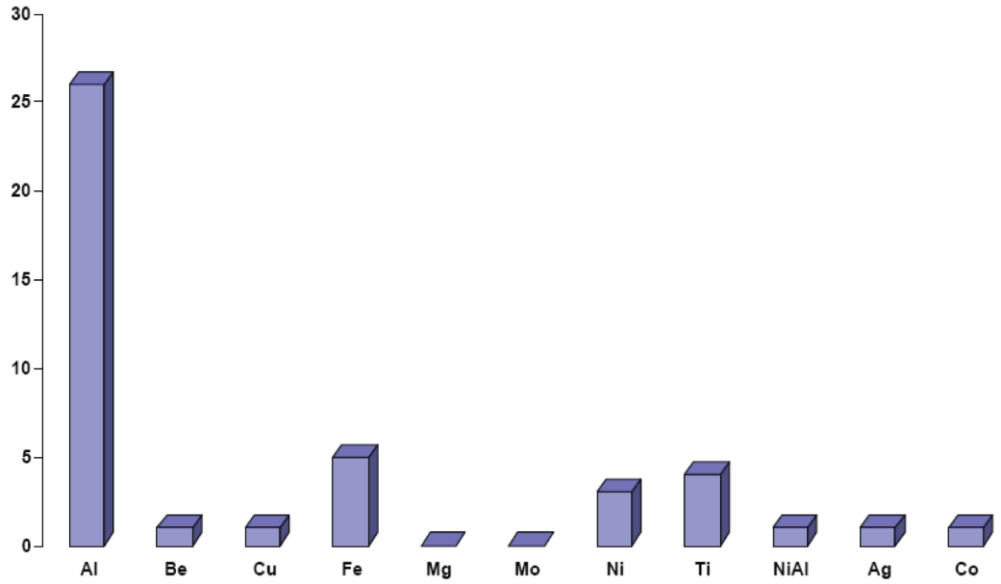
Alüminyum alaşımlarının korozyon direnci, yüksek mukavemet ve ısıl iletkenlik, süneklik gibi iyi mekanik özelliklere sahip olması ve hafif olması sebebiyle endüstride kullanım için tercih edilmektedir (Arslan, Gavgalı, & Çolak, 2019).

Ağırlık faktörünün önemli olduğu uygulamalarda yaygın olarak Al ve Al alaşımları matris olarak seçilmektedir.

Matris malzemesi olarak Al ve alaşımlarının mukavemet ve ısıl kararlılık gibi özellikleri takviye elemanı kullanarak iyileştirilebilmektedir. Ayrıca işleme kolaylığı da Al ve alaşımlarının matris malzeme olarak seçilmesinin nedenlerindendir (Kalemtaş, 2014).

Alüminyumun genel özelliklerini şu şekilde sıralayabiliriz:

- Doğada kolay bulunur ve düşük maliyetli
- Düşük yoğunluğa sahip
- Yüksek spesifik mukavemete sahip
- Düşük aşınma direnci
- Kolay ısıl işlem uygulanabilirliği



Şekil 2.4 MMK'lar için matris malzemelerinin endüstride kullanım oranları (Evans vd., 2003)

Şekil 2.4'te endüstride kullanılan metal matrisli kompozitlerin matris malzemesi olarak kullanılan metallerin kulanım oranları verilmiştir. Grafikte alüminyumun, matris malzemesi olarak kullanılan metaller arasında oldukça yüksek bir kullanım oranına sahip olduğu göze çarpmaktadır.

Tablo 2.4'te MMK'lar için en yaygın matris malzemesi olarak seçilen alüminyum ait özelliker sunulmuştur.

Tablo 2.4 Saf al özellikleri (Kalemtaş, 2014)

Kristal Yapı	Yüzey Merkezli Kübik
Atom Numarası	13
Atom Kütlesi	26,98
Elektronegativite	1,61 pauling ölçeği
Yoğunluk	2,7 g/cm^3
Erğime Noktası	660,3°C
Kaynama Noktası	2519°C
Termal Genleşme	23,1 x 10^{-6}K^{-1}(26°C)
Çekme Dayanımı	230-570 Mpa
Young Modülü	70-79 Gpa
Poisson Oranı	0,33
Sertlik	167 Mpa

2.4.4.2 Magnezyum ve Alaşımları

Hafif metal alaşımlardan olan magnezyum alaşımları birçok uygulama alanına sahiptir. Tablo 2.5'te de görüleceği üzere Ti ve Al'den daha hafif olarak göze çarpmaktadır ancak Rosso'nun (Rosso, 2006) açıkladığı üzere oksijene olan büyük bağ çekimi sebebiyle atmosferik korozyona neden olur. Bu yüzden uygulama alanı nispeten daha dardır.

Tablo 2.5 Matris malzemesi metallerin yoğunlukları

Özellik	Alüminyum	Titanyum	Magnezyum
Yoğunluk, g/cm^3	2,70	4,54	1,74

2.4.4.3 Titanyum ve Alaşımları

MMK'larda titanium ve alaşımlarının matris malzemesi olarak kullanımı oldukça yaygındır. Korozyona karşı direnciyle dikkat çekmektedir. Alüminyuma kıyasla daha dayanıklı ve rijit bir malzeme olan Ti oldukça pahalıdır.

Titanyum MMK'lar, maliyeti çok yüksek olmasına rağmen performansın talep edildiği uygulamalarda kullanılır. Performansı elde ettiği yer, geleneksel malzemelerle erişilemeyen yüksek sıcaklıklardır (Akdoğan, 2005; Rosso, 2006).

Yüksek korozyon direnci sebebiyle titanium ve alaşımları denizcilik endüstrisinde kullanıma uygundur.

Tablo 2.6'da titanyumun temel özellikleri verilmiştir.

Tablo 2.6 Titanyumun mekanik özellikleri (Günyüz, 2007)

Kristal Yapı	αTi, βTi
Molekül Ağırlığı	47,867 g/mol
Yoğunluk	4,54 g/cm^3
Erğime Noktası	1660°C
Özgül Isı	25,05 j/mol.K(298 K)
Termal İletkenlik	21,9 W/m.K(20°C)
Termal Genleşme	8,5 x 10^{-6} °C
Vickers Sertlik	970 Mpa
Elastisite Modülü	116 Gpa
Kayma Modülü	44 Gpa
Poisson Oranı	0,32
Elektriksel Direnç	43 μ Ω.cm(20°C)

Tablo 2.7'de Yaygın olarak kullanılan Ti-Al6-V4 alaşımının bazı Al ve Mg alaşımlarla karşılaştırılması verilmiştir. Ti-Al6-V4 alaşımı korozyona karşı mükemmel direnciyle birlikte yüksek mukavemet/ağırlık oranına sahiptir. Havacılık endüstrisi ve biyomedikal uygulamalar için kullanılmaktadır (Chu & Lu, 2013).

Tablo 2.7 Ti, Al ve Mg alaşımlarının karşılaştırılması

Malzeme	**Çekme Muk.** (MPa)	**Elastiklik Mod.** (GPa)	**Yoğunluk** (kg /dm^3)
Ti-Al6-V4	988	110	4430
Al-2124 (T6)	470	72	2770
Mg-AZ61	198	40	38

2.4.4.4 Bakır ve Alaşımları

Bakırın iyi elektrik iletkenliği özelliği sebebiyle, Cu ve alaşımlarından elektronik uygulamalarda faydalanılmaktadır (Akdoğan, 2005).

2.4.5 Alüminyum Matrisli Kompozitler

Metal matrisli kompozitler için sıklıkla kullanılan bir metallerden biri Al'dir. Hafifliği, korozyona karşı iyi direnci, iyi termal özellikleri ve manyetik olmaması sebebiyle Al önem kazanmış bir metaldir (Steinman vd., 2018).

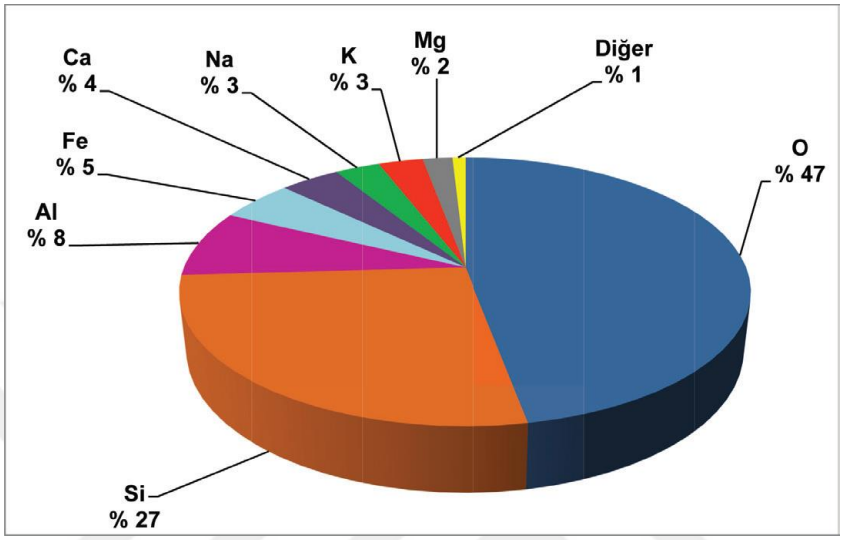
Alüminyum matrisli kompozitler sahip oldukları düşük ağırlık, düşük ısıl genleşme katsayısı, yüksek aşınma dirençleri ve iyi mekanik özellikler sayesinde gelişmiş malzemeler olarak göz önündedir (Mohanavel vd., 2018).

Al matris, SiC, Al_2O_3, B_4C gibi parçacıklarla takviye edildiği zaman saf Al'nin dayanıklılık ve tribolojik özelliklerinde iyileşme meydana gelir. Oluşan alüminyum matrisli kompozit (AMK), Al'nin sahip olduğu süneklik ve tokluk ile takviye malzemenin sahip olduğu mukavemet ve rijitliğin kombinasyonu olarak değerlendirilebilir. Bu gelişmiş özelliklere sahip olması da AMK'ları otomotiv, havacılık ve denizcilik endüstrisinde kullanılabilir bir duruma getirir (P. Sharma vd., 2014).

AMK'ların tekil yapıdaki malzemelere göre sahip olduğu üstün özellikler en büyük avantajlarıdır. Bazı uygulamalar için Al alaşımları, Ti alaşımları, demir alaşımları ve polimer matrisli kompozitlerin yerini AMK'lara bırakacağı tahmin edilmektedir (Bedir, 2006).

Al'nin matris olarak kullanılmasında etkili olan mekanik özellikleri dışında , Al'nin zehirli olmaması ve doğada nispeten daha kolay bulunması da etkilidir (Kalemtaş, 2014).

Gıda sektöründe kullanılabilirliği artarken, doğada kolay bulunması (Şekil 2.5) maliyeti azaltır.



Şekil 2.5 Bazı elementlerin doğada bulunma yüzdesi (Ashby & Jones, 1996)

2.4.5.1 AMK'ların Mekanik Özellikleri

Uzun bir süre boyunca, alüminyum alaşımları hem araştırma ve geliştirme hem de endüstriyel uygulamalarda MMK'larda matris olarak en yaygın kullanılan malzemelerden biriydi. Al alaşımlarının matris olarak kullanılmasının temel sebeplerinden birisi düşük yoğunluğudur. Hafiflik birçok uygulamada öncelikli bir ihtiyaç olarak göze çarpmaktadır. Ek olarak Al alaşımları, diğer düşük yoğunluklu alaşımlarla (Mg veya Ti gibi) karşılaştırıldığında ucuzdurlar (Torralba vd., 2003).

Al alaşımları ve AMK'lar, yüksek sıcaklık dayanımı, yüksek özgül mukavemeti ve özgül sertliği, yüksek sertlik ve aşınma direnci nedeniyle otomobil, havacılık ve yapı sektörlerinde büyük ilgi görmektedir (Pramod, Bakshi, & Murty, 2014; Yu, Deng, Ma, & Ng, 2004).

AMK'ların daha iyi mekanik özelliklere sahip olmasında takviye malzemesi ile matris arasındaki arayüzey önemli bir etkiye sahiptir. Takviye parçacıklarının temiz bir arayüz ve yüksek bir bağlama kuvveti oluşturması için matris içinde

homojen dağılıma sahip olması ve matris tarafından ıslatılabilmesi gerekir. AMK'lar için takviye parçacıkları olarak Al_2O_3, TiB_2, TiC, ZrC ve ZrB_2 gibi in-situ seramik bileşimlerinin kullanımı yaygındır (Emamy, Mahta, & Rasizadeh, 2006; Tjong & Ma, 2000; H. G. Zhu vd., 2010; H. Zhu, Wang, Ge, Xu, & Yuan, 2008).

AMK'ların takviye edilmemiş malzemelere kıyasla başlıca avantajları aşağıdaki gibidir (Surappa, 2003):

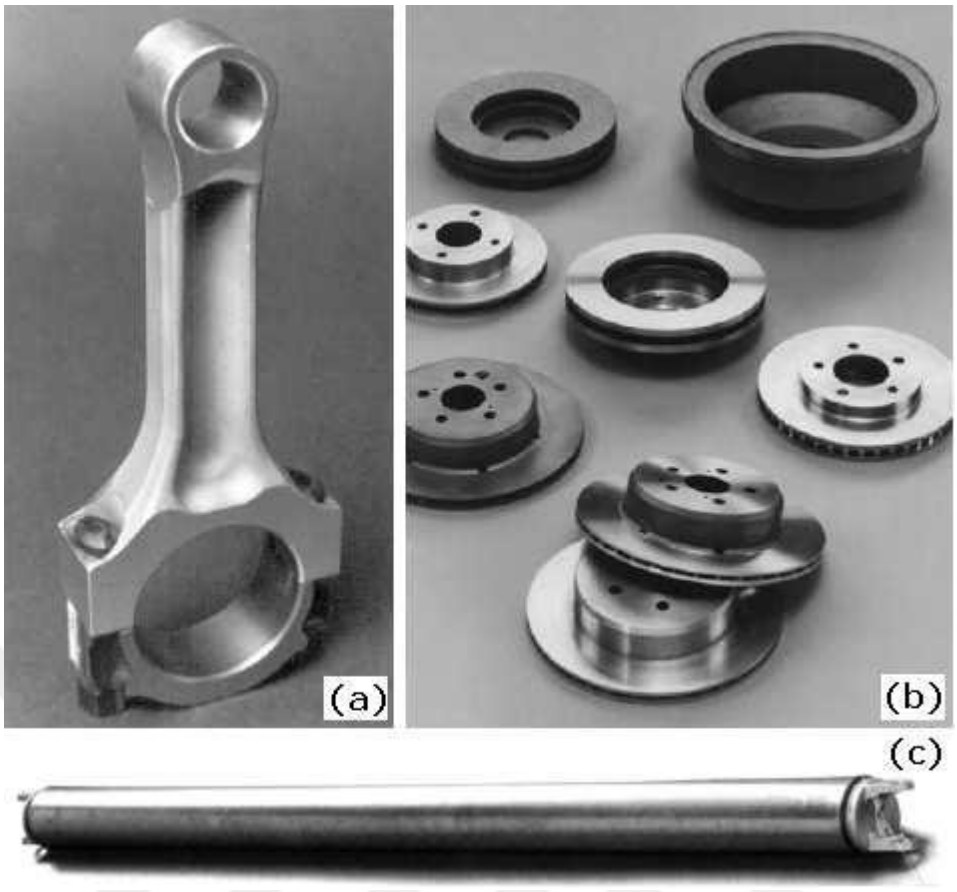
- Daha fazla mukavemet
- Geliştirilmiş sertlik
- Düşük yoğunluk
- Geliştirilmiş yüksek sıcaklık özellikleri
- Kontrollü termal genleşme katsayısı
- Geliştirilmiş aşınma ve korozyon direnci

AMK'ler takviye tiplerine; parçacık takviyeli, bıyık veya kısa elyaf takviyeli, sürekli elyaf ve monofilament olarak 4 farklı grupta sınıflandırılabilir (Surappa, 2003).

2.4.5.2 AMK'ların Kullanım Alanları

AMK'lar yüksek aşınma dirençleri, yüksek yük taşıma kapasiteleri ve hafiflikleri ile otomotiv sektöründe tribolojik parçalarda kullanılmaktadır. Ayrıca AMK'lerin ulaşım sektöründeki temel faydaları düşük yakıt tüketimi, daha az gürültü sağlamasıdır. Artan katı çevre uygulamaları ve yakıt ekonomisindeki iyileştirme çabaları AMK'ların ilerleyen zamanlarda daha çok tercih edilmesini sağlayacaktır (P. Sharma vd., 2014; Surappa, 2003).

AMK'lar otomotiv sektöründe piston, silindir gömleği ve fren diski gibi parçalarda kullanılmaktadır (Şekil 2.6) (Toptan, Kumdali, & Kert, y.y.).



Şekil 2.6 Piston kolu(a), fren diski parçaları (b) ve kardan mili (c) (Hunt & Miracle, 2001)

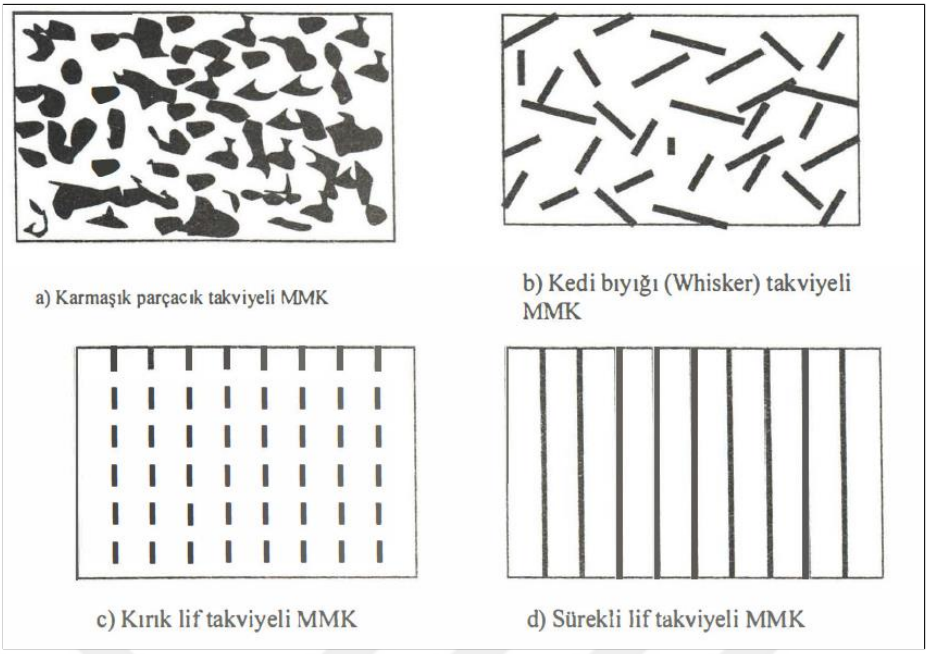
AMK'ların hafif ağırlıkta ve yüksek mukavemette olması sebebiyle havacılık sektöründe sıklıkla faydalanılmaktadır. Uzay uygulamalarında da AMK uygulamalarına sıkça rastlanır (Rawal & Al, 2001; Yılmaz & Evci, 2015).

2.5 Metal Matrisli Kompozitler ve Takviye Tipleri

MMK'lar takviye tiplerine 4 ana grupta sınıflandırılmaktadır:

- Kedi bıyığı (whisker) takviyeli
- Parçacık takviyeli
- Kırık lif takviyeli
- Sürekli lif takviyeli

Şekil 2.7'de MMK'lar için farklı takviye tipleri şematik olarak gösterilmiştir.



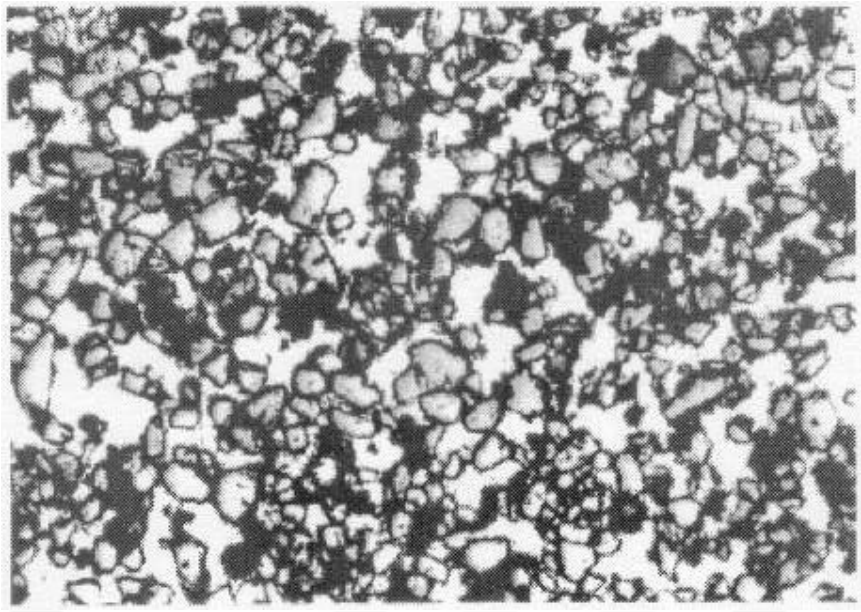
Şekil 2.7 Farklı tip takviye malzemelerin şematik çizimi (Uygur & Saruhan, 2004)

2.5.1 Parçacık Takviyeli Kompozitler

Bu kompozitler genellikle yaklaşık 5'ten daha düşük bir en-boy oranına sahip eşdeğer eksenli seramik takviyeleri içerir. Seramik takviye malzemesi olarak çoğunlukla oksitler, karbürler veya boridler (Al_2O_3, SiC veya TiB_2) kullanılmaktadır ve aşınma direnci için olan uygulamalarda katkı oranı yaklaşık %30 dolaylarındadır (Bedir, 2006; Surappa, 2003).

Parçacık takviyeli AMK'ların mekanik özellikleri, bıyık / kısa elyaf / sürekli elyaf takviyeli AMK'lara kıyasla daha düşüktür, ancak güçlendirilmemiş alüminyum alaşımlarına kıyasla çok daha üstündür (Surappa, 2003).

Şekil 2.8'de hacmen %40 SiC takviye parçacığı ihtiva eden bir AMK'nın mikroyapısı gösterilmektedir.



Şekil 2.8 Hacimce %40 SiC takviyeli AMK'ların mikroyapısı (Surappa, 2003)

2.5.2 Kedi Bıyığı (Whisker) Takviyeli Metal Matrisli Kompozitler

Bu tip kompozitler 5'ten daha büyük en-boy oranına sahip takviyeler içermektedir fakat takviyeler süreksizdir (Surappa, 2003).

Whisker takviyeli kompozitlerin yük taşıma kapasitesi parçacık takviyeli kompozitlere gore daha iyidir. Ancak son yıllarda kedi bıyığı takviyeli kompozitlerin kullanımının insan sağlığına zarar vermesinden dolayı ticari uygulamalarda kullanımı kısıtlanmıştır (Bedir, 2006; Uygur & Saruhan, 2004).

2.5.3 Sürekli Lif Takviyeli Metal Kompozitler

Bu tip kompozitlerde taviyeler 20 μm'den daha küçük çapta ve sürekli elyaflar (alümin, Sic veya karbon) formundadır. Bu tip AMK'ların hacim fraksiyonu %40'a kadar çıkılabilir ve üretiminde sıkma infiltrasyon tekniği kullanılır (Bedir, 2006; Surappa, 2003).

Bu tip kompozitler yüksek rijitlik ve iyi aşınma direnci özellikleri göstermektedir. Ancak üretiminin zor ve pahalı olması ise bu tip kompozitlerin dezavantajlarıdır.

Savunma sanayi ve uzay uygulamalarında kullanılsa da üretimdeki dezavantajı sebebiyle kullanımı sınırlıdır (Uygur & Saruhan, 2004).

2.6 Metal Matrisli Kompozitler İçin Üretim Yöntemleri

MMK'lar için üretim tekniği belirlenirken malzemenin uygulama alanı ve malzemeden beklenen özelliklerin tespiti önemlidir. Doğru üretim tekniğinin seçilmesi ekonomik anlamda fayda sağlayacaktır (Eliasson & Sandström, 1995).

MMK'ların üretiminde dikkat edilmesi gereken temel özellikleri aşağıdaki şekilde sıralayabiliriz (Akdoğan, 2005):

- Malzemenin çalışacağı sıcaklık aralığı
- Takviye malzemesinin tip, boyut ve şekli
- Kompoziti oluşturan matris-takviye arasındaki uyum
- Matris ile takviye malzeme arasındaki olası tepkime ve etkileşimler
- Takviye-matris arasındaki arayüzey bağı
- Matris içersindeki takviyenin homojen dağılımı

Herhangi bir kompozitin imalatında benimsenen üretim yolu, kompozitin nihai özelliklerinin belirlenmesinde hayati bir rol oynar. Kaliteli MMC ürünlerinin geliştirilmesi için benimsenen çeşitli teknikler vardır (Mustansar vd., 2019):

- Sıvı hal işlemleri
- Katı hal işlemleri
- Çökeltme işlemleri

2.6.1 Sıvı Hal Üretim Yöntemleri

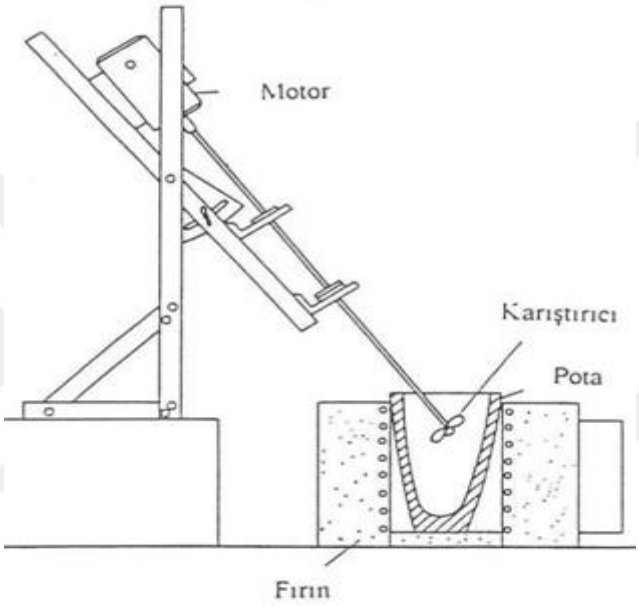
2.6.1.1 Karıştırma Döküm

Kompozit üretimin karıştırma döküm işleminde, takviye, karıştırılarak erimiş metale sokulur. Karıştırma döküm işlemi genellikle seçilen matris malzemenin bir eriyiğinin üretilmesini, ardından eriyiğe kuvvetlendirici malzemenin sokulmasını ve karıştırma yoluyla uygun bir dağılma elde edilmesini içerir (Mustansar vd., 2019).

Vorteks tekniği tüm karıştırma döküm yolları arasında en basit ve en ticari olarak kullanılan yöntemdir.

Girdap tekniği, önceden işlenmiş seramik partiküllerinin döner çark tarafından oluşturulan erimiş alaşım girdabı içine sokulmasını içerir (Contreras, Lopez, & Bedolla, 2004).

Şekil 2.9'da vorteks tekniğinin kullanıldığı örnek bir düzenek gösterilmiştir. Mekanik karıştırıcı ve fırından oluşan bu sistemde, pota içersindeki sıvı metal karıştırılır ve bir girdap oluşur. Takviye elemanı olarak kullanılacak metal veya seramikler, pota içersinde oluşan girdabın ortasına verilerek homojen bir şekilde dağılması sağlanır (Pai, Ramani, Pillai, & Satyanarayana, 1995; Rohatgi, 1992).



Şekil 2.9 Şematik olarak gösterilen vorteks yöntemi (Ray, 1993; Rohatgi, 1992)

Bu yöntemde bazı işlemlerin kontrollü olarak yapılması önemlidir. Aksi halde takviye partiküllerinin homojen dağılımı sağlanamayabilir. Karıştırma hızı ve karıştırıcının pozisyonu, karıştırma süresi, takviye parçacıklarının boyutu ve sıvı metalin sıcaklığı ve soğuma hızı kontrol altında tutulması gereken parametrelerdir (Rohatgi, 1991, 1992).

Karıştırma döküm yöntemindeki iki büyük zorluk, ilk olarak seramik partiküllerinin genellikle sıvı metal matrisi tarafından ıslatılmaması ve ikincisi, takviye edici partiküllerin sıvı metale göre yoğunluklarına bağlı olarak batma veya yüzmeye eğilimlidir ve bu nedenle seramik partiküllerinin dağılımı eşit olmayabilir (Lakshmi, Lu, & Gupta, 1998).

Karıştırma döküm yöntemi için porozite oluşumu ciddi bir dezavantaj olarak kabul edilir. Erimiş metalin karıştırılmasıyla meydana gelen vorteks hava kabarcıklarını da emmektedir. İşlem parametrelerinde yeteri kadar kontrol sağlanmadığı takdirde %30 dolaylarında porozite sorunu ile karşılaşılmaktadır. Porozite problemini en az seviyede tutmak için birtakım önlemler mevcuttur ve aşağıdaki şekilde sıralanabilir (Akbulut, 1994; Laden, Guerin, Watremez, & Bricout, 2000; Ray, 1993):

- Çevresel etkilerin kontrolü
- Karıştırcının dizaynını ve pozisyonunu iyileştirmek
- Karıştırıcı hızını optimal seviyede tutmak
- Takviye parçacıklarını karşıtırma yöntemi öncesinde nemden arındırmak

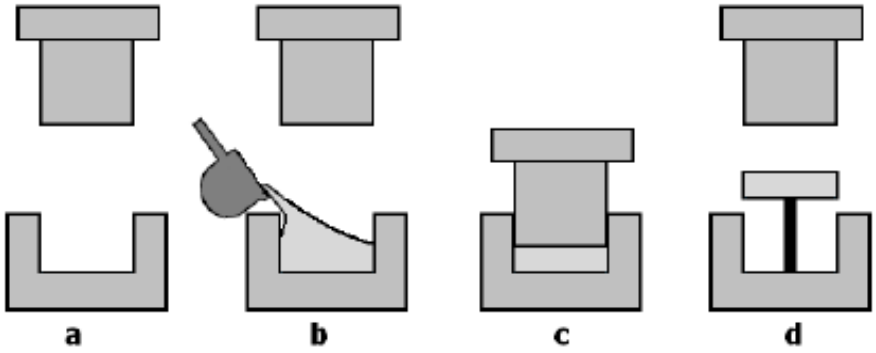
2.6.1.2 Sıkıştırma Döküm

Sıvı metalin kapalı bir kap içerisinde, yüksek basınç altında sıkıştırılması suretiyle katılaştırılması sıkıştırma döküm tekniğidir. Döküm işleminden iyi bir sonuç elde etmek için kalıp, perform ve zımba matris alaşımına bir ön ısıtma işlemi uygulanmalıdır. Uygulanan ön ısıtma işleminde malzemelerin ergime sıcaklığı aşılmamalıdır (Froyen, 1994).

Sıkıştırma döküm yönteminde ön ısıtma ve takviye fazının sıcaklığı, uygulanan basıncın şiddeti ve süresi üretilen kompozitin kalitesini belirleyen unsurlardır (Akbulut, 1994).

Sıkıştırma döküm yönteminin avantajı hızlı bir işlem olması ve daha az porozite oluşmasıdır. Ek olarak net şekil kapasitesi ile kompoziti son şekle yakın bir yapıda üretir. Dezavantajları ise; ön ısıtma sistemi sebebiyle yüksek maliyet, basınç limitlemelerinden dolayı sınırlı boyutlarda üretim ve fiber takviyelerine zarar verme ihtimali sayılabilir (Akbulut, 1994; Cayron, 2000; Froyen, 1994).

Şekil 2.10'da sıkıştırma döküm yönteminin kademeleri gösterilmiştir.

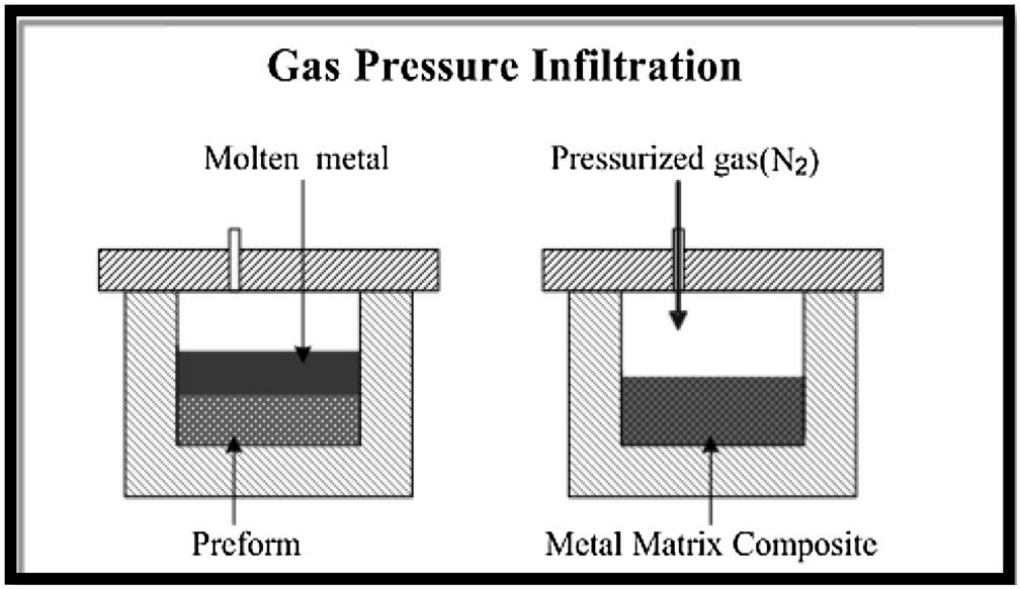


Şekil 2.10 Sıkıştırma döküm yönteminde işlem basamakları

2.6.1.3 Basınçlı İnfiltrasyon

Bu yöntemde, erimiş metalın gözenekli takviyeye infiltrasyonunu yönetmek için harici bir basınç veya mekanik kuvvet kullanılır. Erimiş metali preforma iterek takviye ve matris arasındaki zayıf yapışma dezavantajının üstesinden gelinir ve ekonomik bir yöntemdir. Basınçlı infiltrasyon yönteminin diğer bir avantajı %70 oranına kadar takviyelendirme yapılabilmesidir ve bu oran diğer dökümlerde %30 civarındadır (Lee, Sim, Kwon, & Cho, 2001; Mustansar vd., 2019).

Şekil 2.11'de basınçlı filtrasyon yöntemine örnek bir görsel sunulmuştur.



Şekil 2.11 Basınçlı filtrasyon işlemi (Mustansar vd., 2019)

2.6.1.4 In-situ (Yerinde Reaksiyon) Tekniği

Partikülün şekli ve miktarı kontrol edilebilen bu teknikte takviye faz, eriyik metalin içersinde çekirdeklenmektedir (Allison & Cole, 1993). Bu özelliği sayesinde görece daha kaliteli bir kompozit üretim yöntemidir.

In-situ tekniğinin avantajları olarak ıslatılabilirlik ve arayüzey uyumsuzluğu problemlerinin yaşanmamasıdır. Bu özellikler bu tekniğin diğer yöntemlerden temel farkı olarak gösterilmektedir. Ek olarak takviye parçacıkları nispeten küçük boyutlarda oluşur ve matris içerisinde homojen şekilde dağılır. Bunun sonucunda da daha mukavemetli ve kararlı bir kompozit oluşmaktadır (Kerti, 1999; Peng & Fan, 2000).

2.6.1.5 Püskürtme Yöntemi

Bu yöntemde takviye parçacıkları ve damla şeklinde bulunan eriğik metal matris çıkarılabilir bir alt katmana püskürtme yapılarak uygulanır. Bu yöntemin başlıca avantajları; yüksek mukavemet ve ince taneli yapının oluşmasıdır. Yalnızca süreksiz takviyelerde ve parça üretimini basit şekillerle sınırlamasının yanında pahalı bir uygulama olması da dezavantajlarıdır (Froyen, 1994).

2.6.2 Katı Hal Üretim Yöntemleri

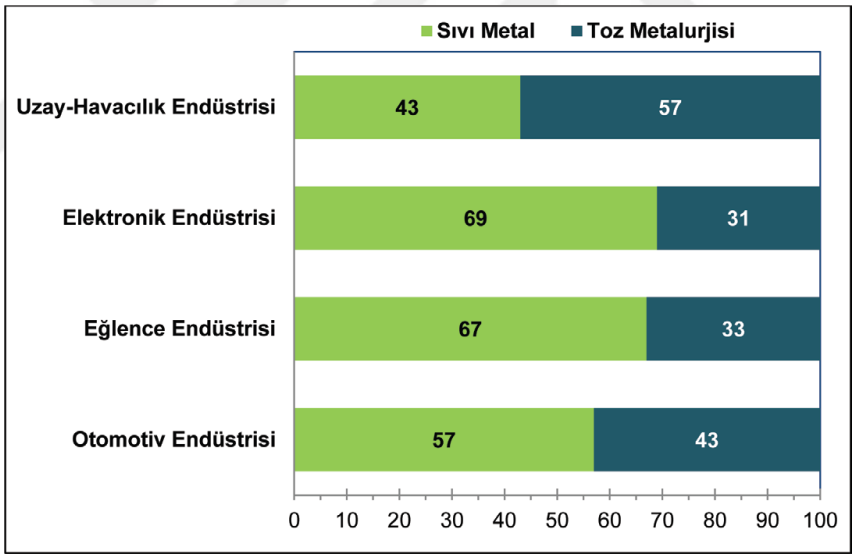
Katı faz üretim yöntemlerini 3 gruba ayrılmaktadır:

- Toz metalurjisi yöntemi
- Difüzyon bağlanma yöntemi
- Yüksek enerji-yüksek hız yöntemi

Kompozit üretimi amacıyla geliştirilen ilk yöntem olan toz metalurjisi yöntemi katı hal üretim yöntemleri arasında en sık başvurulan yöntemdir (Froyen, 1994).

Toz metalurjisi işleme tekniği, daha düşük sıcaklıklar kullandığından ve dolayısıyla teorik olarak arayüz kinetiğinin daha iyi kontrolünü sağladığı için çok caziptir. Al_2O_3, son yıllarda toz metalurjisi yöntemiyle hızla geliştirilen alüminyum matris kompozitlerde önemli bir takviyedir (Mustansar vd., 2019).

Sıvı hal üretim yöntemleri ile toz metalurjisi yönteminin uygulandıkları endüstri alanlarına göre kullanımlarının karşılaştırılması Şekil 2.12'de gösterilmiştir.



Şekil 2.12 MMK üretim yöntemlerinin uygulama alanlarına göre kullanım oranları (Evans vd., 2003)

Difüzyon bağlanma yöntemi ısıya duyarlı malzemeler için geliştirilmiş bir yöntemdir ve oksit tabakası oluşumundan kaçınılamayan veya diğer yöntemlerle üretimi zor olan kompozitler için uygulanır (Feest, 1986).

Takviye hacim oranının kontrolü ve farklı matrislerin kullanılabilirliğine olanak sağlaması bu yöntemin avantajları olarak gösterilmektedir. Ancak üretim işlem süreleri, yüksek sıcaklık ve basınç gereksinimi sebebiyle maliyetinin artması dezavantajı olarak kabul edilir (Chawla & Chawla, 2006; Eliasson & Sandström, 1995).

2.7 AlB2 Takviyeli AMK'ler

Metal matrsli kompozitler, alüminyum alaşımlarının sert seramik veya intermetalik parçacıklarla güçlendirilmesi suretiyle daha iyi mekanik özellikler elde etmek için üretilmektedir (Ramazan Kayikci & Savaş, 2015; Rohatgi, 2001).

Nami vd. (Nami, Adgi, Sharifitabar, & Shamabadi, 2011), Al matrisli kompozitlerin geliştirilmiş mukavemet, sertlik, termal genleşme katsayısı, gelişmiş aşınma ve korozyon dirençleri, daha yüksek sıcaklıktaki performans gibi özellikleri ve artan hafif ve orijinal malzeme ihtiyacı nedeniyle ön plana çıktığını bildirmiştir.

Fıçıcı ve ark., (Fıçıcı vd., 2014) alüminyum ana yapılı, AlB_2 takviyeli kompozitlerle ilgili az çalışma yapıldığından bahsetmişlerdir. Son zamanlarda hakkında çalışmalar yapılmaya başlanan bu kompozitler; ucuz ve kolay üretilebilmelerinin yanı sıra yapısal dağılımda homojenlik ve termodinamik kararlılık gibi özellikleriyle ön plana çıkmaktadır (Savaş & Kayikci, 2013b).

Yuan ve arkadaşları (Yuan, Han, Liu, & Jiang, 2016) AlB_2 parçacıklarının alüminyum alaşımları için etkili çekirdeklenme bölgeleri olduğunu ve parçacıklar ve eriyik arasındaki kimyasal reaktivitenin en aza indirildiğini bildirmişlerdir. Bu durumun da matris ile mükemmel arayüzey bağlanmasına yol açtığı raporlanmıştır.

Economy ve ark., Wohrer ve ark. (Economy, Matkovich, & Wohrer, 1969; Wohrer, Wosilait, & Economy, 1973) tarafından AlB_2 parçacıklarını epoksi matrisli kompozitlerde bir takviye bileşiği olarak kullanmışlarıdır.

Matris ve takviye bazında AlB_2 matrisli MMK'ların sentezlenmesinde genel olarak sınıflandırılmış iki kategori katı hal işleme ve sıvı hal işlemedir. Ayrıca sınıflandırmanın diğer yöntemi, exsitu sürecine ve insitu sürecine dayanmaktadır (Dayanand & B, 2020).

Savaş ve Kayıkçı (Savas & Kayikci, 2013), AlB_2/Al üretimine yönelik olarak yaptıkları çalışmalarında yerinde reaksiyon (in-situ) tekniğini kullanmışlardır. Bu yöntemde AlB_2 partikülleri, Al matrisi içerisinde katılaşma sırasında alüminyum ve bor arasında ekzotermik bir reaksiyon ile üretildiği için kolay ve de ucuz bir yöntem olduğunu rapor etmişlerdir (R Kayikci, 2012). Ayrıca Savaş ve Kayıkçı (Savaş & Kayikci, 2013b), bu yöntemin sentezlenen AlB_2 partiküllerinin termodinamik kararlılık ve homojen dağılıma sahip olduğunu raporlamışlardır.

Ayrıca Ramesh vd. (Ramesh, Pramod, & Keshavamurthy, 2011), insitu yöntemi ile oluşturulan partiküllerin düzgün dağılıma, iyi bir arayüzeye ve yüksek sıcaklıkta stabiliteye sahip olduğunu ortaya koymuştur.

2.7.1 AlB_2 Sentezleme Yöntemleri

AlB_2 ile güçlendirilmiş kompozitlerin takviye elemanı olan AlB_2 borür yapıları, matris yapısı içerisinde kendiliğinden oluşmakta ve farklı yöntemlerle sentezlenebilmektedir. Bor ve alüminyum atomları arasında gerçekleşen ekzotermik reaksiyonlar, AlB_2 borür yapılarının kendiliğinden oluşmasını sağlar. AlB_2 borür yapıları sentezlenirken yüksek ve düşük aspekt oranlı olabilir.

Kendiliğinde reaksiyonla üretilen AlB_2 kompozitlerinin üretiminde takviye elemanı AlB_2 iki aşamada sentezlenmektedir:

- Al-B çözeltisinin hazırlanması
- AlB_2 borür yapılarının sentezlenmesi

Bor oksit, KBF_4 ve amorf bor tozlarının sıvı alüminyuma ilavesi ile Al-B çözeltisi hazırlanabilmektedir. AlB_2 borür yapıları Al-B çözeltisi içinde bor ve alüminyum atomlarının reaksiyona girmesi neticesinde sentezlenmektedir (Deppisch, Liu, & Hall, 1998).

2.7.1.1 Basit Çözeltiye Alma Yöntemi

Bu yöntemde %99,9 saflıkta amorf bor tozlarının, sıvı alüminyuma ısı katkısı ile ilave edilmesi sonucu Al-B çözeltisi hazırlanmaktadır. Basit bir teknik olarak anılan bu yöntemde amorf tozlarının üretim maliyeti, bu yöntemin uygulanmasını kısıtlamaktadır.

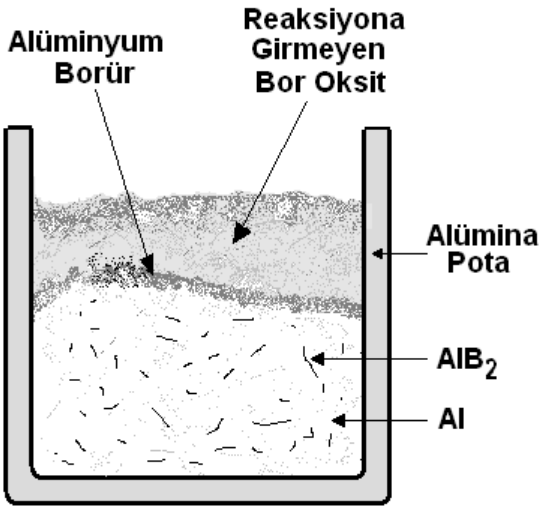
Deppicsh ve arkadaşları bu yöntemi kullanarak %1,8 bor ihtiva eden Al-B çözeltisi hazırladıklarını rapor etmişlerdir.

Uygulamalarında 1300°C sıcaklıkta, 6895 Pa basınç altında, 1 saat boyunca %99,999 saflıkta amorf tuzları ve aynı saflık derecesinde alüminyumu işleme alarak Al- B çözeltisini oluşturduklarını rapor etmişlerdir (Deppisch vd., 1998).

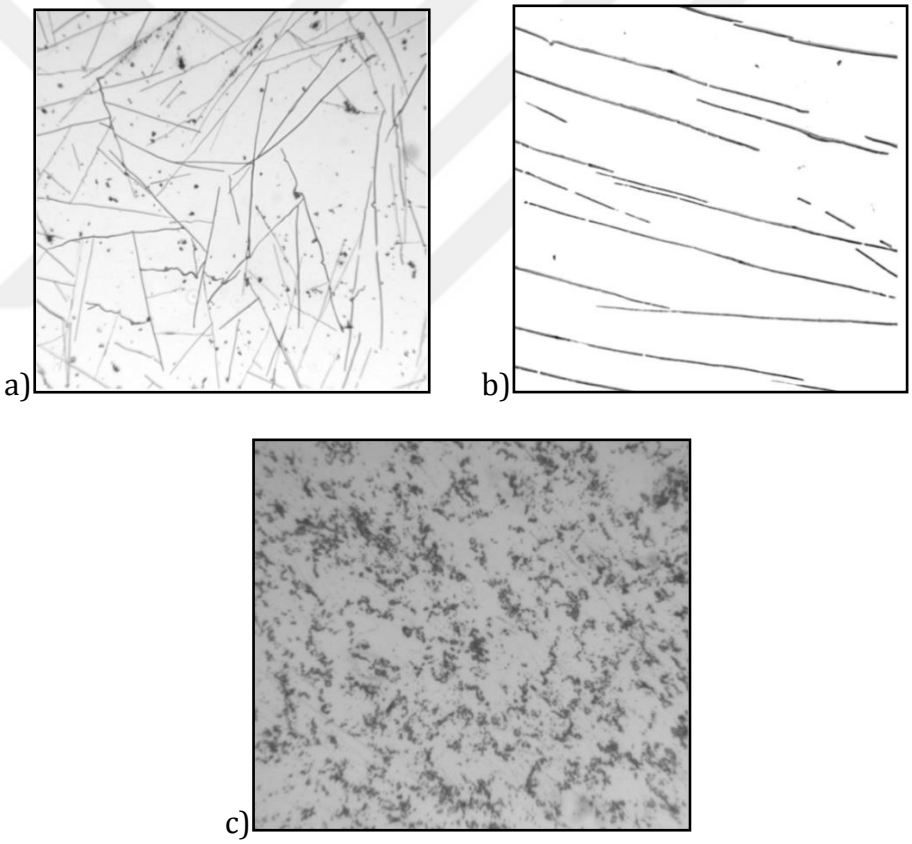
2.7.1.2 Oksit Redüksiyonu ile Bor İndirgeme Yöntemi

Bu yöntemde alüminyum ile bor oksit ve boraksın sahip olduğu oksijenle birlikte redüksiyonu sırasında serbest kalan borun sıvı alüminyum içerisinde çözünmesi ile oluşmaktadır. Bor oksit ve boraksa ülkemizdeki erişimin kolaylığı ve maliyetin düşük olması, AlB_2 borür yapıların sentezinde kullanılan bu yöntemin avantajları arasındadır.

Hall ve Economy (A. C. Hall & Economy, 2000), bor oksit ve boraks kullanılarak AlB_2 börür yapılarını sentezlediklerini rapor etmişlerdir. Şekil 2.13'te temsili olarak kullandıkları tekniğin resmedilişi görülmektedir.



Şekil 2.13 Oksit redüksiyonu yöntemi ile borür oluşum temsili şeması (A. C. Hall & Economy, 2000)



Şekil 2.14 a) 1360°C'de boraks ile, b) 1360°c'de bor oksit ile, c) 900°c'de boraks ile elde edilen kompozitlerin mikroyapı görüntüsü (A. Hall & Economy, 2000)

Hall ve arkadaşları (A. Hall & Economy, 2000), çalışmalarında 1360°C'de boraks ve bor oksitin eriğik alüminyum ile girdiği reaksiyon neticesinde elde edile

kompozitin yapısındaki borun hepsinin AlB_2 olarak çökeldiğini ve yapıda AlB_{12}'lerin bulunmadığını raporlamışlardır. Şekil 2.14a ve b'de mikroyapıları gösterilmiştir. Öte yandan 900°C'de prosesin gerçekleşmesi durumunda ise Şekil 2.14c'de görüleceği üzere kompozit yapıda AlB_2 yapılarının küçük partiküller halinde ve eş eksenli bir şekilde oluştuğu raporlanmıştır.

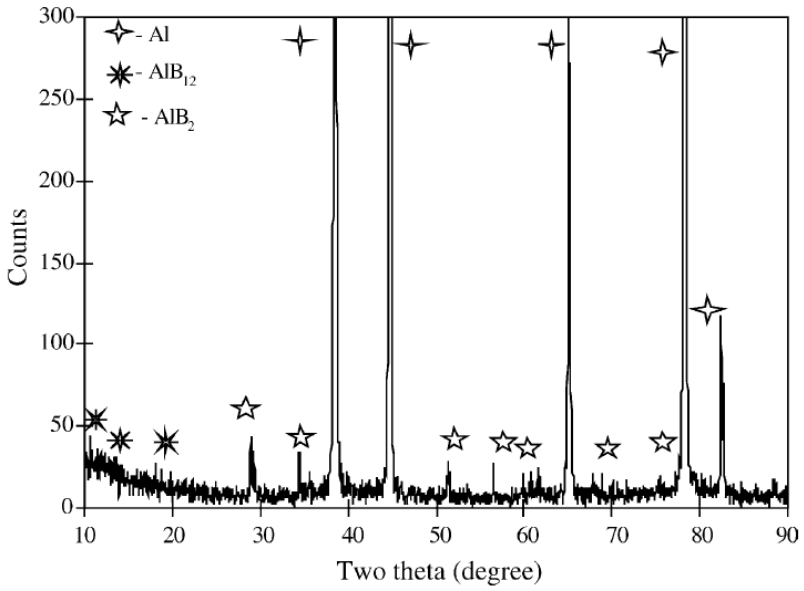
2.7.1.3 KBF_4 Tuzları ile Bor İndirgeme Yöntemi

Yaklaşık olarak 800°C'de KBF_4 tuzlarının sıvı alüminyum tarafından indirgenmesiyle Al-B çözeltisi hazırlanabilmektedir.

Bu yöntemle üretilen Al-B alaşımının yapısında düşük aspekt oranlı AlB_2 yapıları ve kompleks şekle sahip AlB_{12} yapıları bulunmaktadır.

Mekanik karıştırıcı vasıtası ile 850°C'de sıvı alüminyum içerisine KBF_4 tozları ilavesiyle ürettiği Al-B alaşımının %3 bor içeriğine sahip olduğunu raporlamıştır (Wang, 2005).

Wang, sıvı alüminyum ile KBF_4 tuzları arasında gerçekleşen reaksiyonların ardından matris alaşımı içerisinde AlB_2 ve AlB_{12} yapılarının çökelidiğini belirtmiştir. Çalışması sonucu üretilen alaşıma ait XRD görüntüsü Şekil 2.15'te verilmiştir. XRD analiz sonucu incelendiği zaman AlB_2 ve AlB_{12} börür pikleri görülmektedir.



Şekil 2.15 %3 Al-B alaşımına ait XRD analizi (Wang, 2005)

El mahallawy ve arkadaşları (El-mahallawy, Taha, Jarfors, & Fredriksson, 1999) da bu yöntemin araşıtırlmasına yönelik yaptıkları çalışmada, 800°C ve 1000°C olacak şekilde prosesi farklı sıcaklıklarda gerçekleştirmek suretiyle bir inceleme yapmışlardır. Çalışma sonucunda ise 1000°C'de AlB_2 ve AlB_{12} yapılarının elde edebilirken 800°C'de yalnızca AlB_2 yapılarının varlığını gözlemlemiştir.

2.7.2 AlB_2/Al Kompozit Özellikleri

Takviye elemanının matris içerisindeki oranı ve aspekt oranı kompozitin mekanik özelliklerini belirleyici öneme sahiptir (Rohatgi, 2001).

Kayıkçı ve arkadaşları (Ramazan Kayikci, Kurtulus, & Gurbuz, 2009) AlB_2 borid partiküllerinin yüksek en boy oranına sahip ince altıgen pul şeklinde oluştuğunu bildirmiştir. Yüksek en boy oranlı takviye fazının, kübik faza kıyasla daha yüksek sertlik ve daha yüksek akma mukavemeti sergilediği bilinmektedir (A. C. Hall, 1999).

AlB_2 partiküllerinin üretiminde yaygın olarak Al-B ikili alaşımlardan faydalanılmaktadır. Yüksek mekanik özellik için yüksek takviye oranı ve yüksek takviye oranı için de yüksek bor yüzdesine sahip Al-B alaşımlarının eldesi gerekmektedir.

Deppisch ve arkadaşları (Deppisch, Liu, Shang, & Economy, 1997) %20'ye kadar AlB_2 parçacıklarıyla takviyelendirilen alüminyum alaşımlarının basınç ve çekme mukavemetlerinin önemli ölçüde arttığını bildirmiştir.

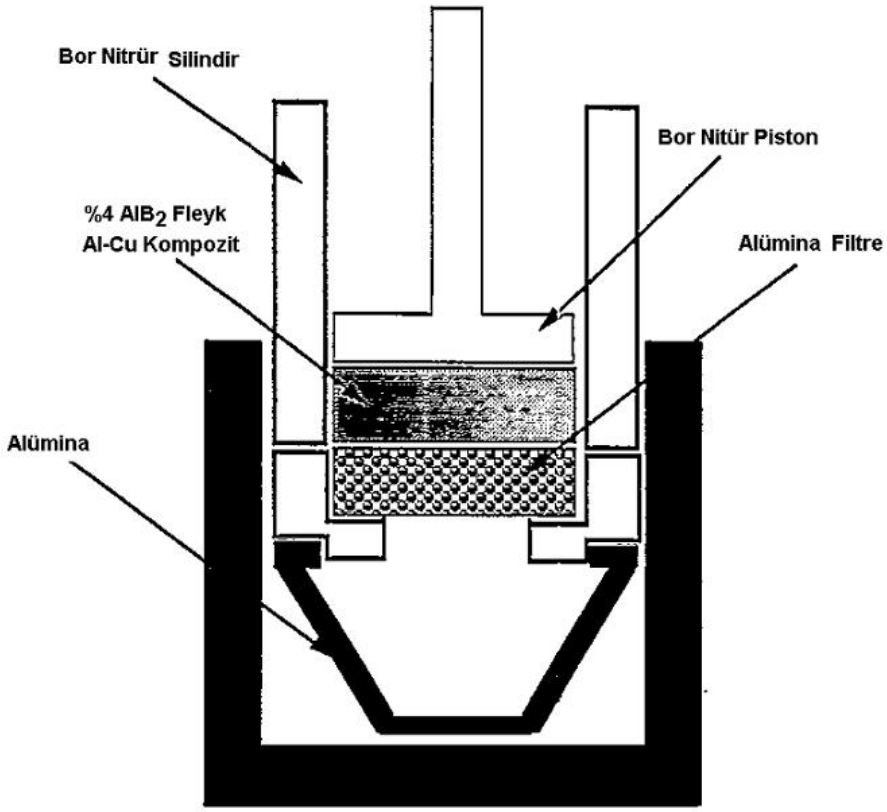
Savaş ve Kayıkçı (Savaş & Kayikci, 2013a) çalışmalarında borür partiküllerinin sertliğinin 3050 Hv olarak ölçmüşlerdir. Ayrıca, %33 hacimde borür parçacığı eklenerek, kompozit sertliğinin 90 HB'den 250 HB'ye yükseldiğini rapor etmişlerdir. Ficici ve çalışma arkadaşları (Ficici vd., 2011) alüminyum matrisine hacimce %30 AlB_2 borür pulları eklenerek, kompozitlerin aşınma direncinin %30 artırılabileceğini bildirmiştir.

Düşük aspekt oranına sahip AlB_2 kompozit üretimi yüksek aspekt oranına sahip AlB_2 üretiminden daha kolaydır. KBF_4 tuzları ilavesi ve boraks ve bor oksit ilaveleriyle Al-B alaşımlarının üretilmesi başarılı şekilde uygulanmaktadır. Ticari

amaçla üretilen Al-B alaşımlarında 1000°C'nin üzerine çıkılmamaktadır. Bunun sonucunda yapıda oluşan AlB_2 parçacıkları düşük aspekt oranına sahip olmaktadır.

Yüksek aspekt oranına sahip AlB_2 üretiminde üzerinde durulması gereken 2 önemli nokta vardır. İlk olarak Al-B çözeltisinin yüksek sıcaklıkta hazırlanması ve hızlı bir şekilde peritektik sıcaklık seviyesinin altına düşülerek, aspekt oranı yüksek AlB_2 yapılarının çekirdeklemesidir (A. C. Hall, 1999). İkinci olarak ise hazırlanan Al-B çözeltisinin yüksek bor yüzdesine sahip olması gerekliliğidir. Bu sayede yüksek takviye oranı elde edilebilmektedir (A. C. Hall & Economy, 2000).

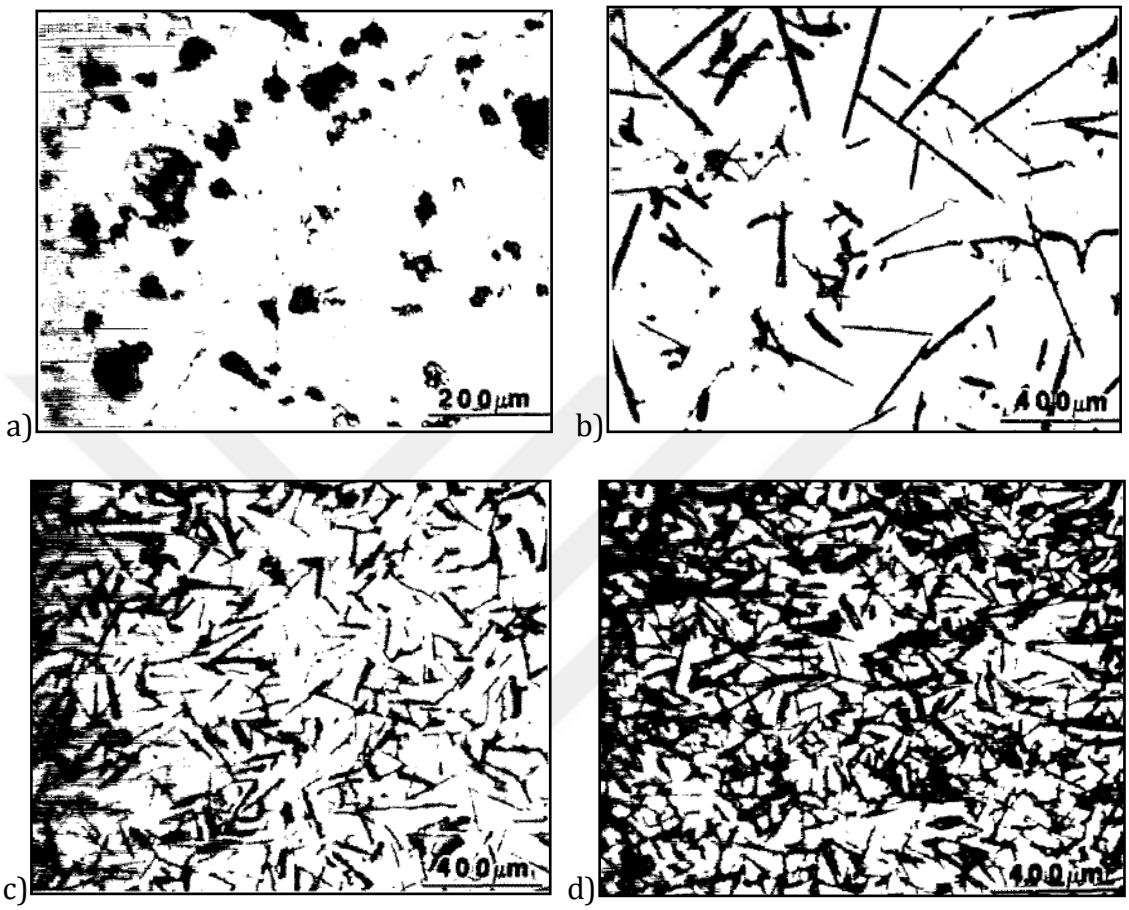
Şekil 2.16'da Deppisch ve arkadaşlarının geliştirdiği filtreleme sistemi gösterilmiştir. Bu filtreleme sistemi sayesinde yüksek aspekt oranlı ve yüksek takviye oranına sahip kompozitler üretmişlerdir.



Şekil 2.16 AlB2 partiküllerini filtreleme sistemi (Deppisch vd., 1997)

Deppisch ve arkadaşları (Deppisch vd., 1997), çalışmalarınnda aspekt oranı yüksek AlB_2 kompozitlerinin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Bu çalışmaları doğrultusunda üretmiş oldukları yüksek aspekt oranına sahip kompozit malzemeyi

ergiterek bir filtreleme işleminden geçirmek suretiyle farklı takviye oranlarına sahip kompozit malzemeler elde etmişlerdir. Master alaşımla birlikte %4, %10 ve %20 takviye oranına sahip AlB_2 kompozitler elde ettiklerini raporlamışlardır. Şekil 2.17'de elde edilen kompozitlere ait mikroyapılar gösterilmiştir.



Şekil 2.17 a) Master alaşım, b) %4 AlB2/Al, c) %10 AlB2/Al, d) %20 AlB2/Al (Deppisch vd., 1997)

Şekil 2.17a'da düşük aspekt oranlı master alaşım görülmektedir. Şekil 2.17b'de verilen mikroyapı ise alaşımın 1360°C'ye çıkarılıp işlem görmesinin ardından elde edilmiştir. Filtreleme işlemlerinin ardından %10 ve %20 takviye oranlarına sahip AlB_2 kompozitlerinin mikroyapıları sırasıyla Şekil 2.17c ve Şekil 2.17d' de verilmiştir.

Mikroyapı görüntülerinden anlaşılacağı üzere ısıl işlem uygulanmasının ardından düşük aspekt oranındaki AlB_2 yapıları, yüksek aspekt oranlı AlB_2 yapılarına dönüşmekte ve yapı içerisinde AlB_2 borürleri homojen dağılıma sahiptir. Bununla birlikte mikroyapı incelendiği takdirde AlB_2 fleyklerinin aspekt oranlarının takviye oranının artışına bağlı olarak azalmakta olduğu göze çarpmaktadır.

Elde edilen kompozitlere ait AlB_2 yapılarının genişlik, kalınlık ve aspekt oranı ortalamaları Tablo 2.8'de gösterilmiştir.

Tablo 2.8 AlB2 yapılarının takviye içeriği ve boyut değişimi (Deppisch vd., 1997)

Kompozit takviye içeriği	Genişlik (G), µm	Kalınlık (K), µm	Aspekt oran (G/K)
%4 AlB_2/(Al-3,3Cu)	176+89	3,0+1,8	59
%10 AlB_2/(Al-3,3Cu)	126+57	3,5+2,4	36
%20 AlB_2/(Al-3,3Cu)	76+32	4,2+1,9	18

Tabloda takviye içeriğindeki oranın artışına bağlı olarak AlB_2 yapısının genişlik değerinin azaldığını, kalınlık değerinin ise arttığını görmekteyiz. Bu doğrultuda aspect oranının da 59'dan 18'e kadar düşüş yaşadığını görmekteyiz. Filtreleme işlemi yapılırken uygulanan basıncın fleyklere zarar vermesi sebebiyle bu düşüşün gözlendiği rapor edilmiştir.

Ek olarak mikroyapı incelemelerinde AlB_2 yapılarının dağılımının homojen olmadığı belirtilmiştir (Deppisch vd., 1997).

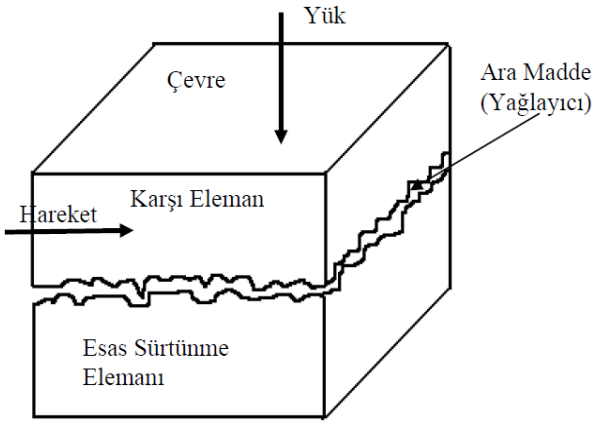
3
AŞINMA

Aşınma, triboloji biliminin bir konusu olarak hareket eden yüzeylerin birbirleri ile girdiği etkileşimi incelemektedir. Bu etkileşim, hareketli yüzeylerde oluşan malzeme kaybı veya yer değiştirmesi olarak neticelenmektedir. Temas halindeki yüzeyler başlangıçta sahip oldukları yüzey yapısını koruyamaz ve malzeme istenen performansı sergilemekten uzaklaşır. Ayrıca oluşan malzeme kaybıyla birlikte makinelerin ömrü azalmaktadır (Neale, 1973; Williams, 2005).

Aşınma sonucunda yüzeylerin bozulmasıyla oluşan hasarlar endüstride yıkıcı bir etkiye sahip olmakla birlikte daha fazla enerji sarfiyatı ve malzeme kaybıyla ülkelerin ekonomilerine de zarar vermektedir. Bu olumsuzlukları azaltmak ve aşınma sorununu gidermek için sürtünme katsayısı düşük ve aşınma direnci yüksek malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır (Mohan vd., 2002; Salman & Durak, 2011; P. Sharma vd., 2014).

Metal matrisli kompozitler, yapılan araştırma ve geliştirmeler sonucunda yüksek aşınma dirençleriyle söz konusu aşınma probleminin önüne geçmek için iyi bir seçenek konumuna gelmiştir. Kompozitlerin, yapısındaki matris ve takviye malzemesinin özelliklerine bağlı olarak aşınmaya karşı dirençleri farklılık göstermektedir. Matris malzemesi, takviye elemanının tip, şekil, boyut ve matris içerisindeki yoğunluğu etkili faktörlerdir (Ahlatçı, 2003).

Aşınmanın incelenebilmesi için aşımaya neden olan başlıca etkenlerin bilinmesi gerekmektedir. Şekil 2.16'da aşınmaya neden olan etkenlerin gösterildiği tribolojik sistem sunulmuştur (İmece, 2013).



Şekil 3.1 Tribolojik sistem (İmece, 2013)

3.1 Aşınma Türleri

Aşınma probleminin önüne geçmek için öncelikle aşınma türünün bilinmesi önemlidir.

Williams (Williams, 2005), mekanik aşınma türlerini 4 başlık altında sınıflandırmıştır:

- Abrazif aşınma
- Adhezif aşınma
- Yüzey yorulma aşınması
- Erozyon aşınması

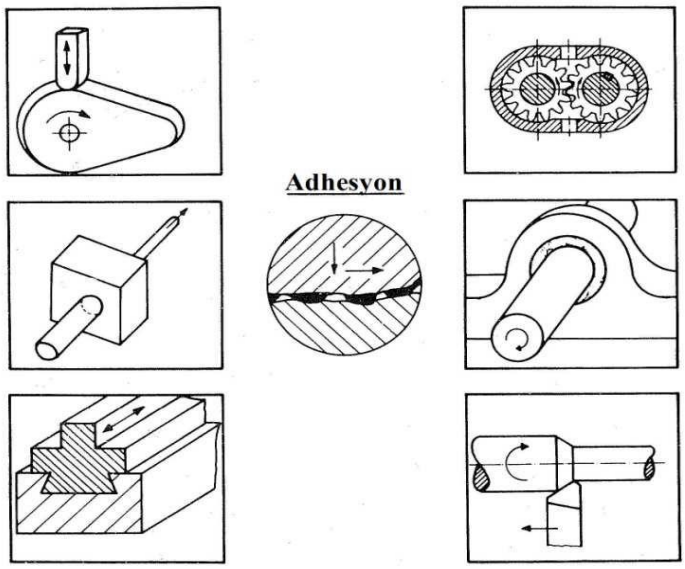
3.1.1 Abrazif Aşınma

Makine parçalarının birbiri yüzeyinde hareketi esnasında görece daha sert yapıda olan yüzeyin, daha az sert yüzeyi kesmesi veya kazıması suretiyle ya da iki yüzey arasına çevreden giren partiküllerin yüzeyleri deforme etmesi neticesinde abrazif aşınma meydana gelmektedir. Burada karşılıklı temas halindeki yüzeylerden kopan veya sisteme dışarıdan katılan mineral, toz gibi partüküllerin aşınmaya etkisi önemli boyuttadır (Er, 2003; Gahr, 1987).

Toz metalurjisinde kullanılan kalıplar, birbiri yüzeyinde çalışan pürüzlü yüzeyler ve kırıcılar abrazif aşınmanın görüldüğü sistemlerdir (Er, 2003). Ayrıca Al-rubaie (Al-rubaie, 2000), abrazif aşınma için endüstrideki aşınma problemlerinin yarısından fazlasını oluşturduğunu raporlamıştır.

3.1.2 Adhezif Aşınma

Adhezif aşınma, malzemelerin birbiri üzerinde hareket eden yüzeylerindeki pürüzlerin, temas halindeki diğer yüzeyi keserek malzeme kaybına neden olmasıdır (İmece, 2013). Yüzeyleri birbirine yakın olan malzemelerin yüzeyleri arasında bir kaynama oluşmaktadır. Bu yüzeyler arasındaki kayma neticesinde kaynak bağı koparak malzeme kaybına sebep olmaktadır. Adhezif aşınmaya örnek parça resimleri şekil 3.2'de gösterilmektedir(Gahr, 1987).

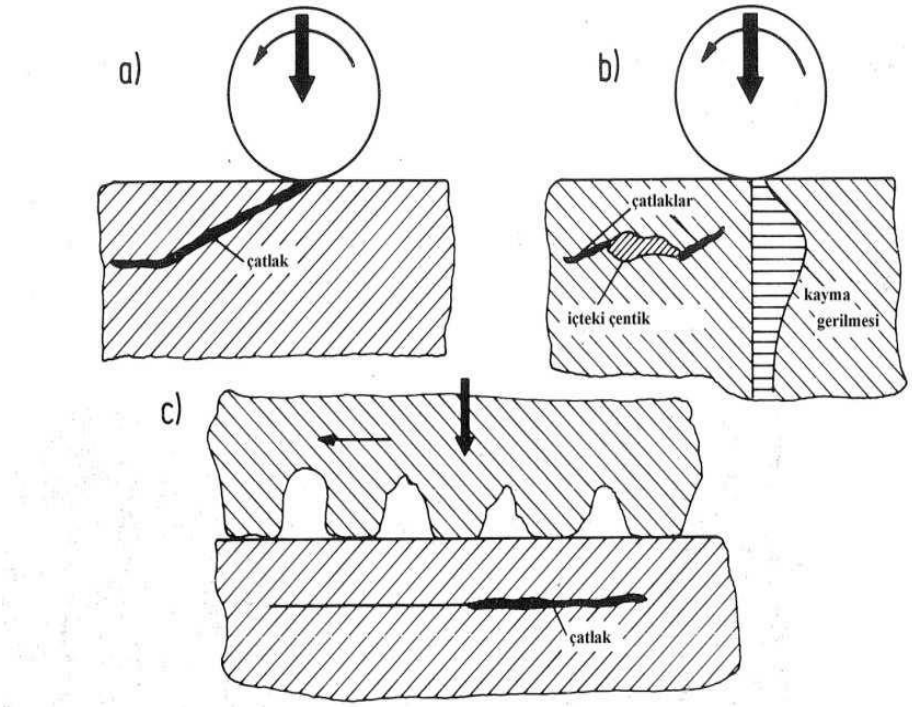


Şekil 3.2 Örnek adhezif aşınma modelleri (Gahr, 1987)

3.1.3 Yorulma Aşınması

Sıklıkla dairesel hareket ederek çalışan mekanizmalarda görülen yorulma aşınması, malzeme üzerinde çatlak ve dökülmelere sebebiyet vermektedir. Tekrarlı yükler metallerde yorgunluk oluşturmakta ve çatlak oluşumuna neden olmaktadır. Bu çatlaklar yüzeysel olabildiği gibi derin çatlaklar da olabilmektedir (Er, 2003).

Yüzey yorulması, dönme hareketi yapan rulmanlarda, raylı sistemlerde ve tekerlekli sitemlerde görülebilmektedir. Şekil 3.3'te malzemede oluşan çatlak ve çatlağın ilerleyişi görülmektedir (Gahr, 1987).



Şekil 3.3 Yüzeyde oluşan çatlak ve ilerlemesi (Gahr, 1987)

3.2 Aşınma Ölçümünde Kullanılan Yöntemler

Aşınmanın ölçülebilmesi için malzemenin aşınma öncesinde ve sonrasında hacimsel ya da kütlesel olarak karşılaştırılması gereklidir. Ölçüm yöntemleri 4 farklı şekilde inceleyebiliriz.

3.2.1 Ağırlık Farkı Yöntemi

Ağırlık farkı yöntemi en yaygın bilinen ve ilk başvurulan aşınma ölçüm yöntemidir. Numunenin aşınma deneyi öncesinde ve sonrasında ağırlık ölçümü yapılır ve bu iki ölçü arasındaki fark aşınma miktarını göstermiş olur. Ağırlık kaybı ölçümü yapılırken hassas davranılması gereken konu, aşınma öncesinde ve sonrasında ağırlık ölçümü yapılan malzemenin iyi bir şekilde temizlenmesi ve kurutulmasıdır (Arı & Parlar, 2013; Cesur, 2008).

3.2.2 Kalınlık Ölçüm Yöntemi

Aşınma sonucunda oluşacak boyut değişimi, başlangıç değeri ile karşılaştırılır. Aradaki boyut farkı kullanılarak birim hacimdeki aşınma miktarı

hesaplanmaktadır. Kalınlık ölçümü yapacak aletlerin hassas olması gerekmektedir (Cesur, 2008).

3.2.3 İz Değişimi Ölçüm Yöntemi

Sürtünmeye maruz kalan yüzeylerde plastik deformasyon oluşması suretiyle malum bir iz oluşur. Ölçümler yapılırken iz çapındaki değişim izlenmektedir. İz değişimi ölçümü yönteminde kullanılan ölçüm aleti mikroskoptur. Brinell ve Vickers sertlik ölçme teknikleri, bu yöntem için en bilinen örneklerdir (Cesur, 2008).

3.2.4 Radyoizotoplarla Ölçüm Yöntemi

Çok hassas ölçüm yapılmasını sağlayan ancak ekonomik olmamaması sebebiyle az tercih edilen bir yöntemdir. Bu ölçüm yönteminde aşınmış yüzeye yüklü atom parçacıklarının bombardıman edilmesi suretiyle ölçüm yapılmaktadır (Cesur,2008).

4
TAGUCHI METODU

Dr. Genichi Taguchi tarafından 1950'lerde geliştirilen Taguchi yöntemi, deney sayılarını en az sayıda tutarak süreci iyileştirme metodudur. Farklı parametrelerin farklı seviyeleri arasında optimum birleşimin tespiti adına Taguchi yöntemi oldukça faydalı bir yöntemdir. Taguchi yöntemi çok sayıda deney yapılması gereken çalışmalarda, sonuca çok daha az deney sayısı yaparak ulaşmak için orthogonal dizi reçeteleri kullanmaktadır (Ross, 1988).

Taguchi yöntemi, kalite kaybına sebep veren faktörleri ortaya koyarak sistemi optimize eder. Savaş (Savaş, 2010), tablo 4.1'de kayıp formüllerini göstermektedir.

Tablo 4.1 Taguchi kayıp formülleri (Savaş, 2010)

Karakteristik tipi	Kayıp
Daha yüksek daha iyi	$k(1/y^2)$
Nominal en iyi	$k(y-m)^2$
Daha düşük daha iyi	$k(y)^2$

4.1 Ortogonal Diziler

Taguchi yönteminde deney sayılarını belirlemek için ortogonal diziler oluşturulur. Ortogonal deney dizilerinin oluşturulması, deney parametrelerini tek tek değiştirerek zaman kaybetmek yerine parametreleri aynı anda değiştirmeyi mümkün kılar. Bu durum da hem zaman hem de ekonomik anlamda verimlilik sağlar. L4, L8, L9, L16, L18 ve L27 dizileri en çok başvurulan ortogonal dizilerdir. Tablo 4.2'de L4 ve tablo 4.3'te L9 dizileri örnek sunulmuştur (Ross, 1988; Savaş, 2010).

Tablo 4.2 L4 deney reçetesi

L4 Ortalgonal Dizisi			
Deney No	Sütün		
	1	2	3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

Tablo 4.3 L9 deney reçetesi

L9 Ortagonal Dizisi				
Deney No	Sütün			
	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

4.2 Sinyal/Gürültü (S/N) Oranı

Sinyal/gürüntü oranı fonksiyonları, kayıp fonksiyonları olarak da adlandırılır. En düşük-en iyi, en yüksek-en iyi ve nominal-en iyi olmak üzere 3 adet S/N oranı vardır (Ross, 1988; Savaş, 2010).

En düşük-en iyi durumu için;

$$S/N= -10 \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} yi^2\right) \quad (4.1)$$

En yüksek-en iyi durumu için;

$$S/N= -10 \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{yi^2}\right) \quad (4.2)$$

Nominal-en iyi durumu için;

$$S/N= -10 \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{s^2}^{-2}\right) \quad (4.3)$$

4.3 Taguchi Metodunda Etkileşimler

Bu yöntemde bahsedilen etkileşim, etken değişkenlerin birbirleriyle etkileşimidir. A ve B faktörleri arasındaki etkileşimi ifade etmek için AXB şeklinde bir gösterim kullanılır. Ortogonal serilerden faydalanılarak faktörler için etkileşim belirlenir (Ross, 1988; Savaş, 2010).

4.4 Varyans Analizi

Taguchi yöntemi uygulanırken sisteme etkisi bulunan tüm etkenlerin belirlenmesi gerekmektedir. Varyans (ANOVA) analizi, faktörlerin sonuca ne derece etki ettiğini belirler ve sonuçların analizini yapmaya yardımcı olur. Kareler toplamı, serbestlik derecesi ve karelerin ortalaması, varyans analizinde başvurulan bazı matematiksel ifadelerdir (Ross, 1988; Savaş, 2010).

4.4.1 Kareler Toplamı

A ve B etken değişkenleri ve A X B etkileşimleri üzerine toplam varyasyon denklemi;

$$SS_T=SS_A+SS_B+SS_{AxB}+SS_e \quad (4.4)$$

$$SS_T = [\sum_{i=1}^{N} yi^2] - \frac{T^2}{N} \quad (4.5)$$

A faktörü için varyans denklemi;

$$SS_A = [\sum_{i=1}^{K_A} \left(\frac{Ai^2}{n_{Ai}}\right)] - \frac{T^2}{N} \quad (4.6)$$

Anova tablosunda yer alan hata varyasyonu denklemi;

$$SS_e = SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AxB} \quad (4.7)$$

Şeklinde ifade edilmektedir (Ross, 1988; Savaş, 2010).

4.4.2 Serbestlik Derecesi

Anova tabloları için ihtiyaç duyulan bir diğer öğe de serbestlik derecesidir. Aşağıdaki formül ile ifade edilir.

$$VT = N - 1 \quad (4.8)$$

A ve B faktörünün serbestlik derecesi faktör seviyelerinin bir eksiğidir.

$$V_A = k_A - 1, V_B = k_B - 1 \quad (4.9)$$

Etkileşimlerin serbestlik derecesi ise şu şekildedir;

$$V_{AxB} = (V_A)(V_B) \quad (4.10)$$

Hata serbestlik derecesi ise;

$$V_e = V_T - V_A - V_B - V_{AxB} \quad (4.11)$$

şeklindedir (Ross, 1988; Savaş, 2010).

4.4.3 Varyans

Aşağıdaki denklem hata varyans değerinin bulunması için kullanılır (Ross, 1988; Savaş, 2010);

$$V_e = SS_e \ / \ V_e \tag{4.12}$$

Varyans değerinin her farklı faktör adına tek tek hesaplanabilmesi mümkündür. Aşağıdaki eşitlik ile A faktörü hesaplanır;

$$V_A = SS_A \ / \ V_B \tag{4.13}$$

4.4.4 F Testi

F testi, ANOVA tablolarındaki faktörlerin etkilerini gösterme aracıdır. A faktörünün F testi eldesi şu şekildedir (Ross, 1988; Savaş, 2010);

$$F_A = V_A \ / \ V_e \tag{4.14}$$

F test değerleri ve F tablo değerleri her faktör için ayrı ayrı kıyaslanır. Faktörün proses üzerinde etkiye sahip olup olmadığı hesaplanan F test değeri tablo değerinden büyük ya da küçük olmasıyla anlaşılır. F test, F tablo değerinden büyükse etkisi vardır ve küçükse etkisi yoktur şeklinde yorumlanmaktadır (Savaş, 2010).

Pooling (hata), faktörlerin sistem üzerinde çok düşük etkiye sahip olduğu durumlarda başvurulan bir ifadedir. Pooling kabul edilen faktörlerin varyasyonu ve hata varyasyonu görmezden gelinir, iptal edilerek değerlendirme tekrar yapılır (Savaş, 2010).

4.4.5 Toplam Değişime Etki Eden Faktör Yüzdesi

Aşağıdaki denklem sisteme etkiyen faktörlerin etkinlik yüzdelerini elde etmek amacıyla kullanılmaktadır;

$$SS'_A = SS_A - (V_e)\ (V_A) (\text{A faktörü için}) \tag{4.15}$$

$$P = (SS'_A \ / \ SS_T) \times 100 \ (\text{ A faktörü için}) \tag{4.16}$$

4.4.6 Doğrulama Deneyleri

Taguchi yönteminde hesaplamalar sonucu oluşturulan grafikler yardımıyla faktörlerin optimal seviyeleri okunabilmektedir. En uygun şartlar dikkate alınarak kalite karakteristiği ve güven aralığna ulaşılır. Optimize edilen şartlarda yeniden bir deney yapılır ve yapılan bu deney sonucunun güven aralığında olup olmadığı kontrol edilir. Yapılan bu deneye doğrulama deneyi denmektedir. Deneyin başarılı olarak yapıldığı ifade etmek için doğrulama deneyi sonucunda ulaşılan veri güven aralığı içerisinde olması gerekmektedir.

Güven aralığının dışında kalan veriler için gözden geçirilmesi gereken noktalar olduğu ve gerekirse deneylerin tekrarlanması gereklidir (Savaş, 2010).

5
DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1 Kompozit Malzemenin Üretimi

Araştırmada kullanılacak olan kompozit malzeme, Al-2B master alaşımı ve %99,9 safiyete sahip alüminyum kullanılarak üretilmiştir.

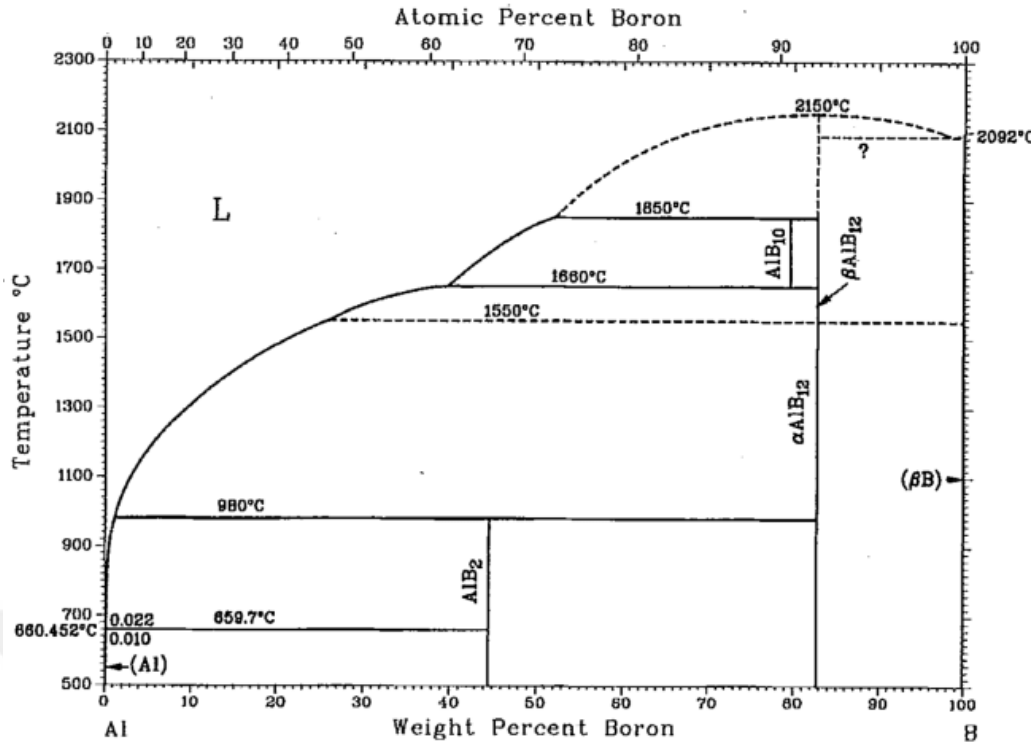
Tablo 5.1'de kompozit üretiminde kullanılan malzemelerin kimyasal kompozisyonu verilmiştir.

Tablo 5.1 Saf Al ve Al-B kimyasal kompozisyonu

Alaşım	Element, Ağ..%								
	Ti	B	Fe	Si	Mn	Mg	Cr	Cu	Al
Saf Al	0,001	0	0,301	0,116	0,026	0,009	0	0	Kalan
Al-B	0,009	1,98	0,151	0,128	0,088	0,001	0,017	0,001	Kalan

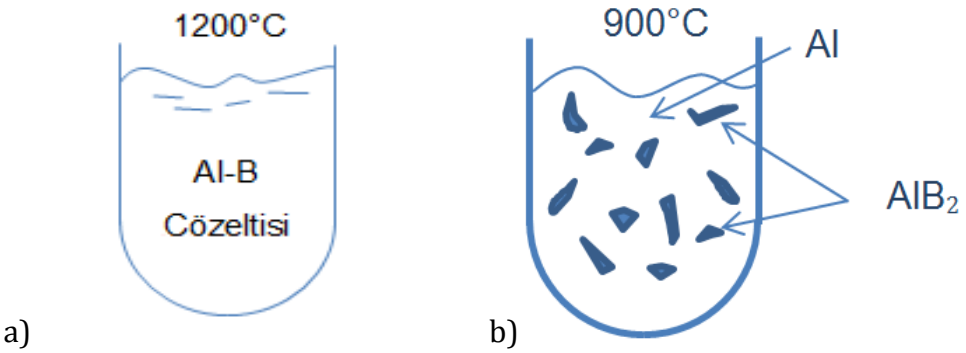
Al-B faz diyagramı dikkate alındığında Al-2B master alaşımı içerisinde kararlı AlB_2 ve kararsız AlB_{12} gibi borür yapılarını içermesi mümkün görülmektedir (Carlson, 1990).

Şekil 5.1'de Al-B faz diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 5.1 Al-B alaşımı faz diyagramı (Carlson, 1990)

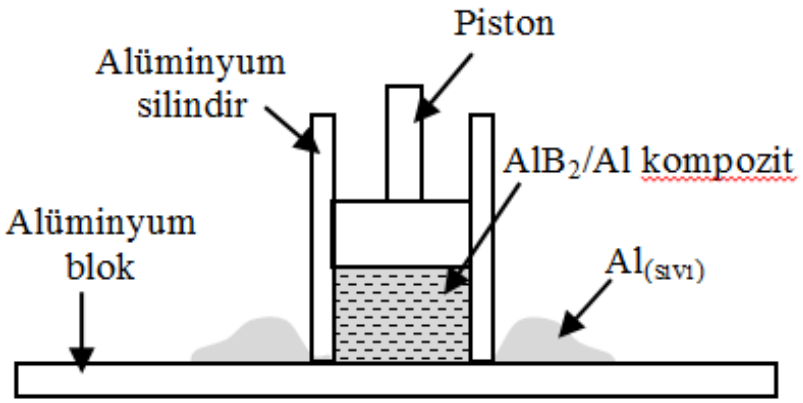
Yapıda kararsız borür yapılarının AlB_2 borür yapılarına dönüşmesi için Al-2B master alaşımı 1200°C'de 1 saat ergitme işlemine alınarak yapıda bulunan borun hepsinin sıvı alüminyum tarafından çözülmesi sağlanmıştır (Şekil 5.2a). Yüksek aspect oranlı AlB_2 yapılarının sentezlenmesi için ise çözelti 900°C'ye hızlıca indirilerek bu sıcaklıkta 2 saat beklenmiştir (Şekil 5.2b).



Şekil 5.2 AlB2 kompozit üretim aşaması; a) 1200°C'de ve b) 900°C'de

Bu sıcaklıkta hazırlanan "$Al_{(sıvı)}$ + $AlB_{2(katı)}$" çözeltisinin hem takviye oranını artırmak hem de nihai şekillerinin verilmesi amacı ile Savaş ve ark. (Ramazan

Kayikci & Savaş, 2015; Savaş & Kayikci, 2013a) yaptıkları tasarıma benzer şekilde Şekil 5.3'te temsili görüntüsü verilen bir filtreleme sitemi tasarlanmıştır.



Şekil 5.3 Filtreleme sistemi

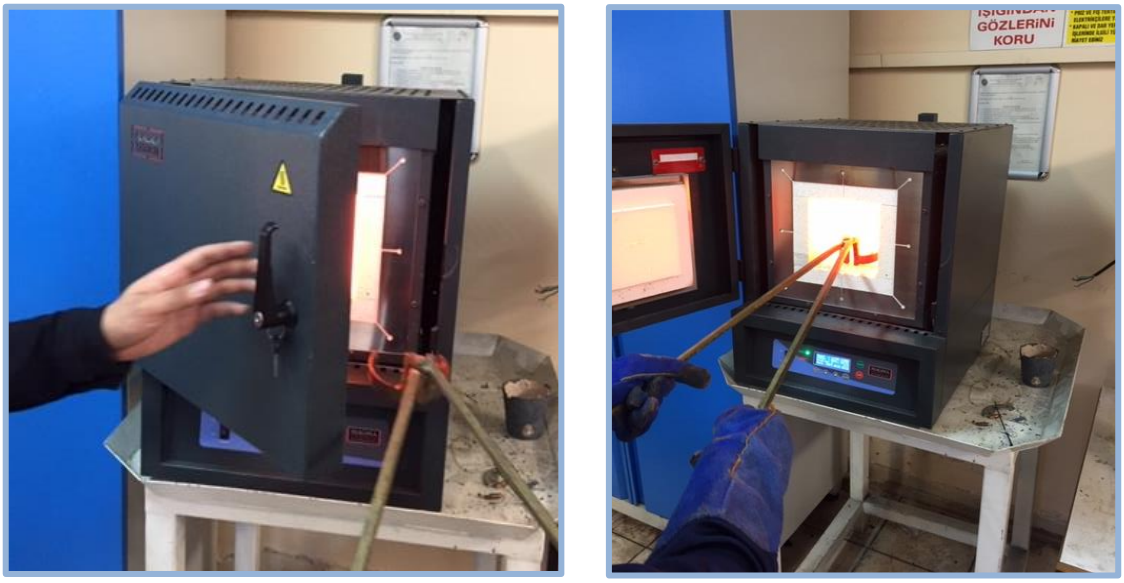
Çelikten imal edilen filtreleme sistemi, "$Al_{(sıvı)}$ + $AlB_{2(katı)}$" karışımında bulunan sadece sıvı alüminyumun dışarı çıkmasını sağlayan 0.4 mm çapında tahliye deliklerine sahiptir. Şekilde görülen piston ile yarı katı çözeltiye uygulanan basınç yardımı ile erimiş metalin deliklerden kontrollü bir şekilde dışarı çıkması sağlanmaktadır. Bu şekilde hem kompozitin takviye oranı ayarlamış hem de çözelti sıkıştırılarak katılaştırılmıştır. Çelikten imal edilen filtreleme sisteminin sıvı alüminyum ile reaksiyona girmesini önlemek amacıyla sistemin iç yüzeyi sıvı bor nitrür sprey boya ile kaplanmıştır.

Filtreleme sistemi ile yaklaşık 10 ve 20 Mpa basınç uygulanarak %7,5 ve %15 AlB_2 takviye oranına sahip alüminyum matrisli kompozitler üretilmiştir. Karşılaştırmanın daha gerçekçi olması amacı ile (%0) AlB_2 yapılarını içermeyen bir alüminyum malzemesi üretmek için filtreleme sistemi üzerindeki delikler kapatılarak 20 Mpa basınç altında sıvı alüminyum 900°C'de katılaştırılmıştır.

Şekil 5.4'te ergitme işlemlerinde kullanılan potanın resmi verilmiştir. Çelik malzemeden imal edilen potanın sıvı alüminyum ile reaksiyona girmesini engellemek amacıyla potanın iç yüzeyine önce şamot sürülmüş ve ardından bor nitrür sprey boya ile boyanmıştır.

Şekil 5.4 Ergitme potası

Ergitme işlemlerinde MAGMA THERM marka ergitme fırını kullanılmıştır. Şekil 5.5a'da ergitme fırını ve Şekil 5.5b'de fırın içerisinden numune çıkarılışı görülmektedir.



Şekil 5.5 (a) Ergitme fırını, (b) potanın fırından çıkarılması

5.2 Karakterizasyon

5.2.1 Mikroyapı

Üretilen kompozit malzemeden alınan numuneler mikroyapının iyi bir şekilde incelenebilmesi için ilk olarak zımparalama işlemine tabi tutulmuştur. Zımparalama işleminde sırasıyla 150, 400, 600, 1000 ve 1200 grit değerinde SiC zımparalar kullanılmıştır. Zımparalama işleminin ardından elmas süspansiyonlar ile yüzey parlatma işlemi uygulanan kompozit numunelerin mikroyapı analizlerini gerçekleştirmek için Olympus optik mikroskop kullanılmıştır.

5.2.2 Yoğunluk

Kompozitlerin yoğunlukları Arşimet tekniği kullanılarak ölçülmüştür. Yapıda yalnızca AlB_2 borür yapılarının içerildiği varsayılarak, üretilen kompozitlerin takviye oranları yoğunluk ölçümleri dikkate alınarak karışımlar kuralına göre hesaplanmıştır.

5.2.3 Sertlik

Kompozit numune sertlik testleri öncesinde bir hazırlık sürecinden geçirildi. Yüzeyde bulunan girinti ve çıkıntıların sertlik testi öncesinden giderilmesi gerekmektedir. Sertlik ölçümünün sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi için malzeme yüzeyinin teste uygun hale getirilmesi gerekmektedir. Numune, kademeli olarak 150 gritten 1200 gritlik zımparaya kadar bir zımparala sürecinden geçirilmiştir.

Sertlik ölçümleri 3'er kez tekrarlanıp ortalama değerleri sonuç olarak kabul edilmiştir.

5.2.4 Takviye Oranı

Kompozit malzemelerin AlB_2 takviye oranlarının belirlenmesi, yapıda bulunan AlB_2 partiküllerinin ağırlıkları ölçülerek hesaplanmıştır. Bu işlem amacı ile üretilen kompozitlerden yaklaşlık 10 gramlık numuneler alınmıştır. Numuneler, ağırlıkları ölçüldükten sonar %37,5 HCl çözeltisi içerisine alınmış ve alüminyumun çözünmesi sağlanmıştır. İşlem sonrasında çözünmeyen AlB_2 yapılarını ağırlıkları

ölçülmüştür. Ölçülmüş olan AlB_2 partiküllerinin ağırlıkları önceki ağırlığa oranlanarak kompozitlerin takviye oranları ağırlıkça hesaplanmıştır.

%AlB_2 oranı = (HCl çözeltisi ile dağlama sonrası ağırlık / HCl çözeltisi ile dağlama öncesi ağırlık) x 100

5.2.5 Aşınma

Bu çalışmada AlB_2 takviyeli Al matrisli kompozitlerin aşınma davranışları incelenecektir. Deney faktörleri aşağıdaki şekilde seçilmiştir;

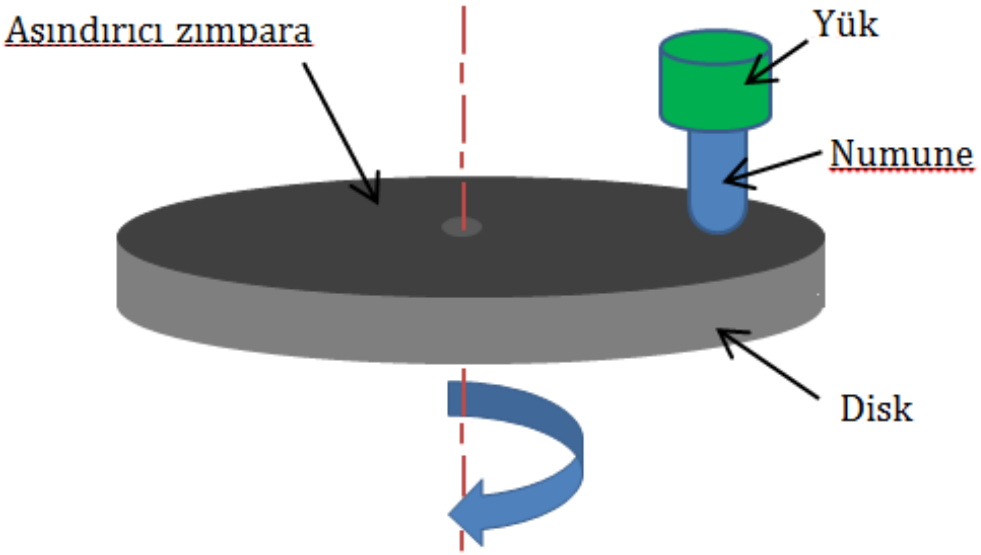
- Takviye oranı
- Aşındırıcı medya tipi
- Yük
- Kayma hızı
- Kayma mesafesi

Üretilen kompozitlere aşınma testleri uygulanırken Taguchi deneysel yaklaşımından faydalanılmıştır. Deney reçeteleri $L_{27}(3^5)$ ortogonal serisine göre hazırlanmıştır.

Kompozitlerin aşınma dirençleri, ağırlık kayıpları dikkate alınarak incelenmiştir.

Kompozit malzemenin aşınma deneyleri abrazif aşınma tekniği ile yapılmıştır. Numuneler 6 mm çapında ve 20 mm boyunda silindirik yapıda hazırlanmıştır.

Aşınma deneyleri şekil 5.6'da temsili olarak gösterilen bir sistem kullanılmıştır.



Şekil 5.6 Aşınma test düzeneği temsili görüntüsü

Abrazif aşınma deneyleri Taguchi yaklaşımı kullanılarak yapılmıştır. Deney faktör ve seviyeleri Tablo 5.2'de verilmiştir. Aşınma deneylerinde %0, %7,5 ve %15 AlB_2 takviye oranına sahip kompozit malzemeler, 1500, 1200 ve 1000 grid zımparalar üerinde 1, 2 ve 3 N yük uygulanarak, 1,5 – 3,0 – 4,5 m/s kayma hızında ve 50, 100, ve 150 m kayma mesafesinde yapılmıştır.

Aşındırıcı medya olarak 1500, 1200, 1000 grid su zımparaları kullanılmıştır. Kullanılan su zımparalarının ortalama partikül boyutları sırasıyla 9, 18 ve 26 µm'dir. Bu sayede aşındırıcı partikül boyutunun aşınmaya etkisi ortaya konmuş olacaktır.

Tablo 5.2 Aşınma deneyleri için belirlenen faktör ve seviye değerleri

Kolon	Faktör	Seviyeler		
		1. Seviye	2. Seviye	3. Seviye
A	Takviye oranı %	0	7,5	15
B	Aşındırıcı medya	1500 grid	1200 grid	1000 grid
C	Yük N	1	2	3
D	Hız m/s	1,5	3	4,5
E	Yol m	50	100	150

Aşınma deneyleri sonucunda malzemelerin aşınmaya karşı dirençlerini analiz etmek için ağırlık kaybından yola çıkılmıştır. Ağırlık ölçümleri de Şekil 5.7'de gösterilen hassas terazi ile yapılmaktadır.

Şekil 5.7 Hassas terazi

Aşınma deneyleri için Taguchi $L_{27}(3^5)$ ortogonal serisi baz alınarak hazırlanan deney reçetesi Tablo 5.3'te gösterilmektedir. Eğer aşınma deneyleri Taguchi tasarımı yerine tüm kombinasyonlar dikkate alınarak yapılmış olsaydı toplamda (3^5) 243 deneme yapılması gerekecekti. Yapılan çalışmada Taguchi tasarımı kullanılarak deney sayısı 27'ye düşürülmüştür.

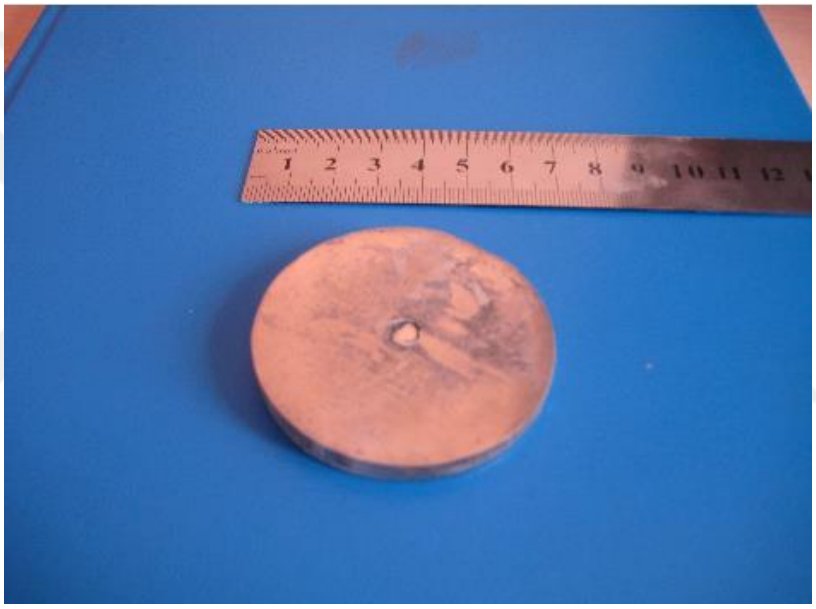
Tablo 5.3 Aşınma deneyleri için seçilen L27(35) deney reçetesi

Deney No	Takviye Oranı, %	Aşındırıcı Medya	Yük, N	Kayma Hızı, m/s	Kayma Mesafesi, m
1	0	1500 grid	1	1,5	50
2	0	1500 grid	2	3,0	100
3	0	1500 grid	3	4,5	150
4	0	1200 grid	1	3,0	150
5	0	1200 grid	2	4,5	50
6	0	1200 grid	3	1,5	100
7	0	1000 grid	1	4,5	100
8	0	1000 grid	2	1,5	150
9	0	1000 grid	3	3,0	50
10	7,5	1500 grid	1	3,0	50
11	7,5	1500 grid	2	4,5	100
12	7,5	1500 grid	3	1,5	150
13	7,5	1200 grid	1	4,5	150
14	7,5	1200 grid	2	1,5	50
15	7,5	1200 grid	3	3,0	100
16	7,5	1000 grid	1	1,5	100
17	7,5	1000 grid	2	3,0	150
18	7,5	1000 grid	3	4,5	50
19	15	1500 grid	1	4,5	50
20	15	1500 grid	2	1,5	100
21	15	1500 grid	3	3,0	150
22	15	1200 grid	1	1,5	150
23	15	1200 grid	2	3,0	50
24	15	1200 grid	3	4,5	100
25	15	1000 grid	1	3,0	100
26	15	1000 grid	2	4,5	150
27	15	1000 grid	3	1,5	50

6
DENEYSEL SONUÇLAR

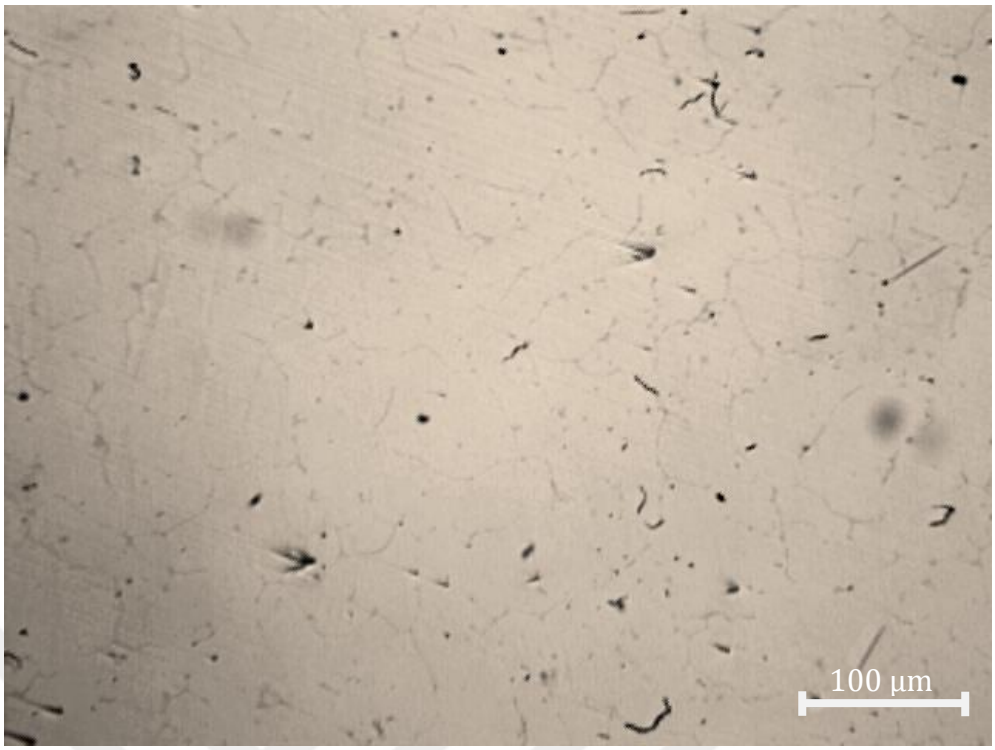
6.1 Mikroyapı İncelemeleri

Silindirik şekilde üretilen kompozit numune 60 mm çapındadır. Filtreleme sistemi yardımı ile 900°C'de %0, %7,5 ve %15 oranında takviye oranına sahip AlB_2/Al kompozitler üretilmiştir. Üretilen kompozite ait bir görüntü Şekil 6.1'de verilmiştir. Şekilde üretilen kompozitler 60 mm çapında ve yaklaşık 10 mm kalınlığında olduğu görülmektedir.



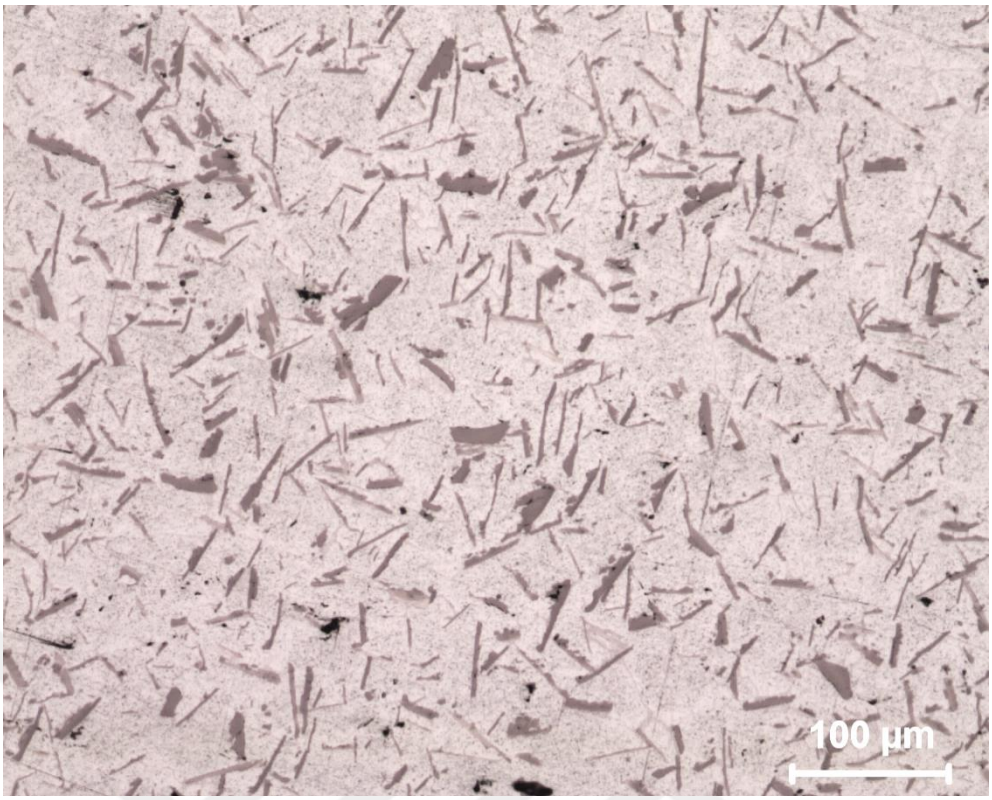
Şekil 6.1 Üretilen kompozite ait mikroyapı

Şekil 6.2'de AlB_2 borür yapılarını içermeyen (%0 AlB_2 oranına sahip malzeme), Şekil 6.3'te %7,5 AlB_2 takviyeli kompozit ve Şekil 6.4'te %15 AlB_2 takviyeli kompozite ait mikroyapı görüntüleri verilmiştir.

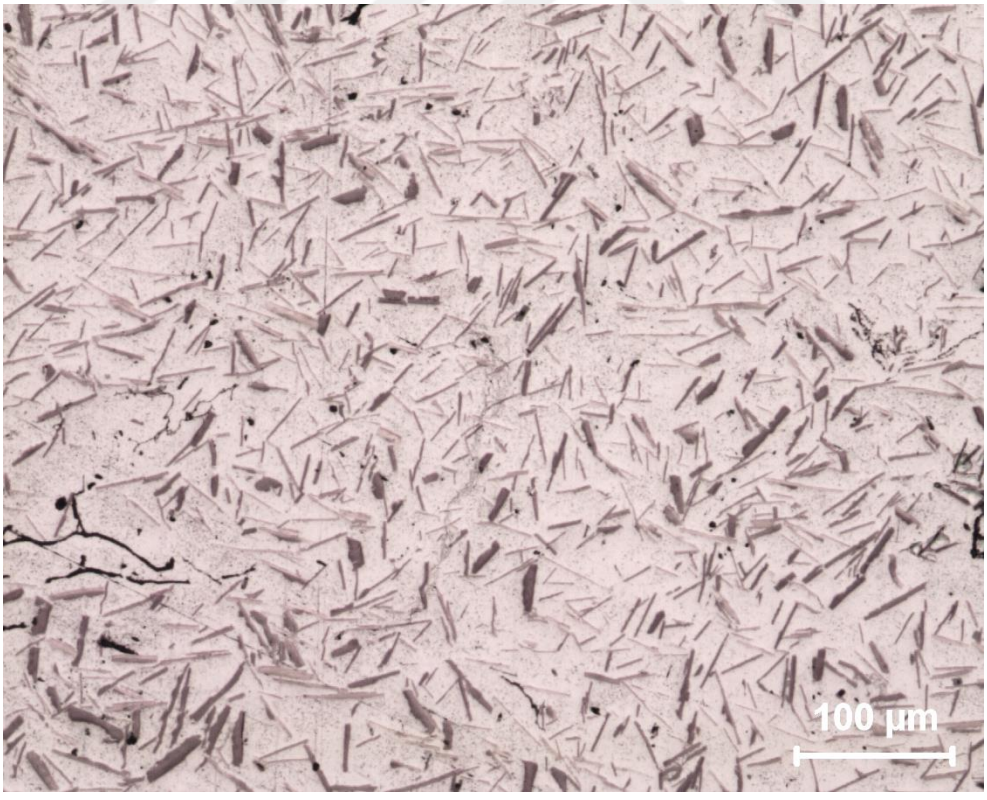


Şekil 6.2 Saf Al mikroyapısı

Şekil 6.2'de AlB_2 borür yapılarını içermeyen matris alaşımının mikro yapı görüntüsünde yalnız beyaz renkte alüminyum matris görülmektedir. Ayrıca mikro yapı görüntüsünde gözenek bulunmadığı dikkati çekmektedir.



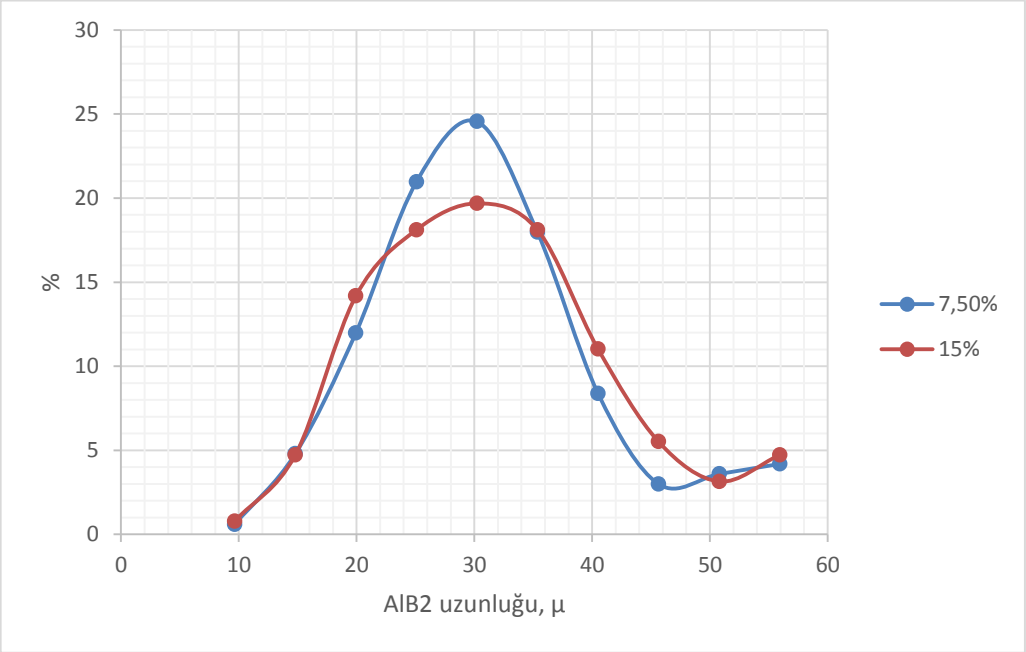
Şekil 6.3 %7,5 AlB2 takviyeli kompozit mikroyapısı



Şekil 6.4 %15 AlB2 takviyeli kompozit mikroyapısı

Şekil 6.3 ve Şekil 6.4'te gösterilen mikro yapılarda AlB_2 yapılarının homojen bir dağılımda olduğu gözükmektedir. Mikro yapı görüntüsünde AlB_2 borür yapılarının kızıl renkte ve uzun çubuklar şeklinde olduğu görülmektedir. Ayrıca takviye fazı ve matris arasında ara bileşiklere rastlanmadığı görüntülenmektedir.

Şekil 6.5'te %7,5 ve %15 takviye oranına sahip kompozitler üzerinden ölçülen AlB_2 borür yapılarının boyutlarının her iki kompozitte de normal bir dağılım sergilediği ve boyutlarının her iki kompozitte de ortalama 30 mikron civarında olduğu görülmektedir.



Şekil 6.5 AlB2 borür yapılarının boy dağılımı

Tablo 6.1'de üretilen %7,5 ve %15 takviye oranına sahip AlB_2/Al kompozitleri ve saf Al matris (AlB_2 borür yapıları içermeyen alüminyum malzeme) alaşımının ortalama Brinell sertlik sonuçları görülmektedir.

Tablo 6.1 Üretilen kompozitler ve saf Al matrisinin ortalama sertlik değerleri

Malzeme	Yoğunluk	Sertlik, HB
Saf Al matris	2,69 g/cm3	28,59 ± 4
%7,5 AlB_2/Al kompozit	-	51,76 ± 12
%15 AlB_2/Al kompozit	-	74,06 ± 22

Tablo 6.1'de kompozit malzemelerinin sertlik değerlerinin matris alaşımına göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca tabloda %15 AlB_2/Al kompozitinin sertlik değerinin %7,5 AlB_2/Al kompozitinin sertlik değerinden daha yüksek olduğu dikkat çekmektedir. Tabloda en düşük sertlik değeri ortalama 28,59 HB ile saf alüminyum matriste iken en yüksek sertlik değeri ortalama 74,06 HB ile %15 AlB_2/Al kompozitinde olduğu görülmektedir.

Saf Al matrise göre kompozitlerin sertlik değerlerinin yüksek olmasının sebebi matris içerisindeki AlB_2 borür yapılarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca kompozit içerisindeki AlB_2 borür yapılarının oranının artmasıyla doğru orantılı olarak kompozitin sertlik değerinin de artmakta olduğunu söyleyebiliriz.

6.2 Aşınma Sonuçları

Tablo 6.2'de $L_{27}(3^5)$ ortogonal serisinin sunduğu reçetelere göre yapılan aşınma deneyi sonuçları, deney sonuçlarının ortalamaları ve "en küçük en iyidir" kalite karakteristiğine göre hesaplanan S/N değerleri sunulmuştur.

Tablo 6.2 Aşınma deney sonuçları, ortalamalar ve S/N değerleri

Deney No	1. Ölçüm gr	2. Ölçüm gr	3. Ölçüm gr	Ort. gr	S/N
1	0,0024	0,0035	0,0035	0,0031	50,00
2	0,0075	0,0064	0,0076	0,0072	42,85
3	0,0116	0,0116	0,0103	0,0112	39,03
4	0,0271	0,0245	0,0296	0,0271	31,32
5	0,0167	0,0167	0,0167	0,0167	35,52
6	0,0236	0,0235	0,0236	0,0236	32,55
7	0,0232	0,0193	0,0189	0,0205	33,74
8	0,0359	0,0359	0,0359	0,0359	28,91
9	0,0176	0,0164	0,0178	0,0173	35,24
10	0,0026	0,0023	0,0026	0,0025	51,99
11	0,0112	0,0126	0,0118	0,0119	38,50
12	0,0143	0,0160	0,0143	0,0149	36,54
13	0,0238	0,0238	0,0271	0,0249	32,06
14	0,0073	0,0089	0,0080	0,0081	41,85
15	0,0287	0,0148	0,0165	0,0200	33,57
16	0,0147	0,0156	0,0181	0,0161	35,82
17	0,0248	0,0224	0,0252	0,0241	32,33
18	0,0093	0,0093	0,0093	0,0093	40,64
19	0,0003	0,0007	0,0003	0,0004	66,55
20	0,0027	0,0039	0,0013	0,0026	50,93
21	0,0054	0,0017	0,0019	0,0030	49,17
22	0,0030	0,0018	0,0018	0,0022	52,71
23	0,0020	0,0012	0,0006	0,0013	57,20
24	0,0008	0,0051	0,0007	0,0022	50,50
25	0,0019	0,0012	0,0039	0,0024	51,60
26	0,0024	0,0048	0,0033	0,0035	48,79
27	0,0018	0,0013	0,0017	0,0016	55,95

Tabloda göreceğimiz üzere en yüksek ağırlık kaybının 8 numaralı deneyde ortalama 0,0359 gr, en düşük ağırlık kaybının ise 19 numaralı deneyde ortalama 0,0004 gr olarak ölçülmüştür. Aşınma deneyleri sonucunda ağırlık kayıplarının 0,0004 - 0,0359 gr değerleri arasında değişim gösterdiğini görmekteyiz.

En düşük ve en yüksek ağırlık kayıplarının görüldüğü 8 ve 19 numaralı deneylerdeki parametreler ise Tablo 6.3'te ve Tablo 6.4'te sunulmuştur.

Tablo 6.3 Deney 8'in parametreleri (en yüksek ağırlık kaybı)

Deney No	Takviye Oranı, %	Aşındırıcı Medya	Yük, N	Kayma Hızı, m/s	Kayma Mesafesi, m
8	0	1000 grid	2	1,5	150

Tablo 6.3'te görüldüğü üzere 0,0359 gr ağırlık kaybı sonucunun elde edildiği 8 numaralı deneyde parametre seviyeleri %0 takviye oranı, 1000 grid aşındırıcı zımpara, 2,6 N yük, 1,5 m/sn kayma hızı ve 150 m kayma mesafesidir.

Tablo 6.4 Deney 19'un parametreleri (en düşük ağırlık kaybı)

Deney No	Takviye Oranı, %	Aşındırıcı Medya	Yük, N	Kayma Hızı, m/s	Kayma Mesafesi, m
19	15	1500 grid	1	4,5	50

Takviye oranı %15 olan numunenin, 1500 grid zımpara üzerinde, 2,1 N yük altında, 4,5 m/s kayma hızı ve 50 m kayma mesafesinde yapılan 19 numaralı deneyde 0,0004 gr ile en düşük ağırlık kaybı elde edilmiştir.

Ayrıca bu deneydeki faktör seviyeleri, ayrı ayrı değerlendirildiğinde faktörlerin aşınmaya karşı en iyi direnci göstereceği tahmin edilen seviyeleri olarak göze çarpmaktadır.

Tablo 6.2'de görülen S/N oranları dikkate alınarak hazırlanmış ANOVA tablosu Tablo 6.5'te gösterilmektedir.

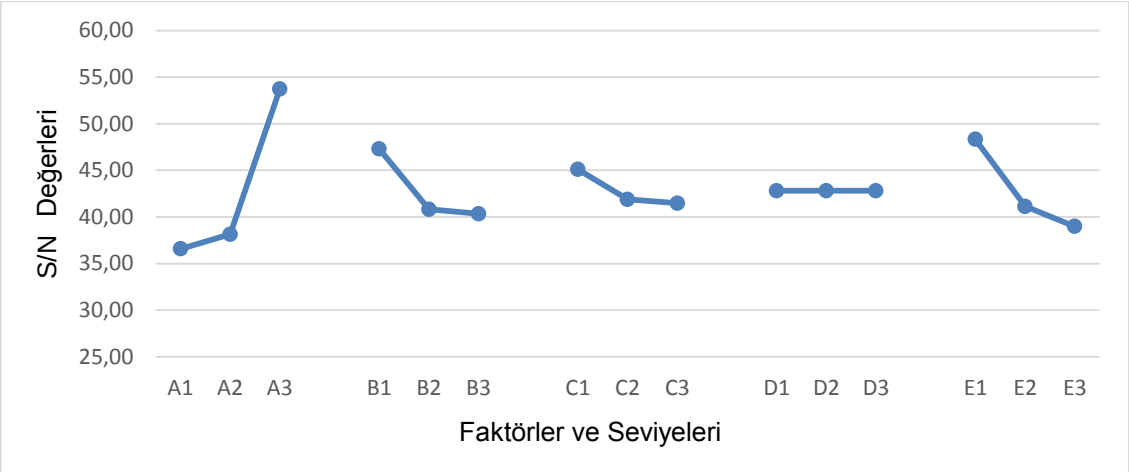
Tablo 6.5 S/N oranlarına göre hazırlanan ANOVA tablosu

Kolon	Değişim Kaynağı	Kareler Toplamı S	Serbestlik Derecesi *f*	Kareler Ortalaması	Teorik *F* $F_{(hesap)}$	İstatiksel *F* $F_{(tablo)}$
A	Takviye Oranı	1614,98	2	807,49	114,12	
B	Aşındırıcı Ortam	271,42	2	135,71	19,18	
C	Yük	70,8	2	35,4	5	5,93 (%99 için)
D	*Kayma Hızı	0	2	0	0	3,55 (%95 için)
E	Yol	431,26	2	215,63	30,47	2,62 (%90 için)
	Toplam	2388,46	8	298,56		
	e	127,37	18	7,08		
	*pooling, ep	Kayma hızı faktörü pooling yapıldı.				

ANOVA tablosunda %95 güven düzeyi için ($F_{(hesap)}$>$F_{(tablo)}$ olan faktörler) takviye oranı, aşındırıcı ortam, yük ve kayma mesafesi faktörlerinin ağırlık kaybı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Öte yandan ANOVA tablosu bize kayma hızı faktörünün ağırlık kaybı üzerine önemli bir etkiye sahip olmadığı sonucunu vermektedir. Bununla birlikte ANOVA tablosunda ağırlık kayıplarına en etkili faktör 114,12 $F_{(hesap)}$ değeri ile takviye oranı olduğu görülmektedir ve takviye oranını 30,47 $F_{(hesap)}$ değeri ile kayma mesafesi ve 19,18 $F_{(hesap)}$ değeri ile aşındırıcı ortam izlemektedir. Yük faktörünün ise 5 $F_{(hesap)}$ değeri ile diğer faktörleri takip ettiğini görmekteyiz. Tabloda kayma hızı faktörü, ağırlık kaybına etkisi çok düşük olduğu için "pooling" yapılarak hesaba dahil edilmemiştir ve tablo üzerinde * işareti ile belirtilmiştir.

Şekil 6.6'da faktör seviyelerinin S/N oranları temel alınarak hazırlanmış olan, faktör ve seviyelerinin grafik üzerinde gösterimi görülmektedir.

Grafikte yüksek S/N oranı düşük ağırlık kaybını ifade etmektedir ve faktörlerden büyük olan değer en düşük ağırlık kaybının elde edildiği optimum deney faktör seviyeleridir.



Şekil 6.6 Faktör ve seviyelerinin grafik gösterimi

Bu grafik sonucunda optimum faktör seviyeleri; A3, B1, C1 ve E1 olarak gözükmektedir. Bu da bizlere en düşük ağırlık kaybının %15 AlB_2 ile güçlendirilen kompozitin 1500 grid aşındırıcı ortamında, 1 N yük altında ve 50 m kayma mesafesinde elde edileceğini göstermektedir.

Grafik incelendiği zaman ağırlık kaybı üzerinde en fazla etkiye sahip faktörün A faktörü yani takviye oranı olduğu görülmektedir. A3 olarak ifade edilen %15 AlB_2 takviyeli kompozitin ağırlık kaybı düşük ve A1 olarak ifade edilen Saf Al matrisinin ağırlık kaybının çok daha yüksek olduğu göze çarpmaktadır.

B faktörü incelendiği zaman B3 ve B2 olarak ifade edilen 1000 grid ve 1200 gridlik aşındırıcı medya yerine B1 olarak ifade edilen 1500 grid (daha düşük partikül boyutlu) aşındırıcı medya kullanımının ağırlık kaybını önemli ölçüde azalttığı görülebilmektedir.

C faktörü ele alındığı zaman nispeten düşük bir etkiye sahip olsa da uygulanan yük değeri C1 yani 1 N olduğu takdirde, C2 ve C3 olarak ifade edilen 2 ve 3 N yük altındaki çalışmaya kıyasla daha az ağırlık kaybının elde edileceği anlaşılmaktadır.

1,5 , 3 ve 4,5 m/s seviyelere sahip olan kayma hızı faktörü grafikte sırasıyla D1, D2 ve D3 olarak ifade edilmiştir. Grafikte görüldüğü üzere ağırlık kaybında kayma hızı faktörünün bir etkisi tespit edilememiştir.

Son olarak E faktörünü yani kayma mesafesi faktörünü incelersek, E1, E2 ve E3 faktörleri sırasıyla 50 m, 100 m ve 150 m temsil etmektedir. Kayma mesafesi

faktöründe en az ağırlık kaybının E1 faktörü yani 50 m değerinde elde edilmiştir. Kayma mesafesi arttıkça ağırlık kaybının arttığını grafikten okuyabilmekteyiz.

Taguchi yaklaşımın göre yaptığımız bu incelemede deneylerin doğru yapılıp yapılmadığını test etmek için optimum deney şartlarında bir doğrulama deneyi yapılması gerekmektedir

Tablo 6.6'da en az ağırlık kaybını elde etmek için optimum deney şartları işaretlenmiştir.

Tablo 6.6 Optimum deney şartları

Kolon	Faktör	Faktör Seviyesi		
		1. Seviye	2. Seviye	3. Seviye
A	Takviye oranı, %	0	7,5	15
B	Aşındırıcı partikül boyutu, µm	9	18	26
C	Yük, N	1	2	3
D	Kayma hızı, m/s	1,5	3	4,5
E	Kayma mesafesi, m	50	100	150

Çalışmada minimum ağırlık kaybına ulaşmak için hesaplanan optimum deney şartları; %15 takviye oranı, 1500 grid aşındırıcı zımpara (9 µm partikül boyutuna sahip), 1 N yük, 4,5 m/sn kayma hızı ve 50 m kayma mesafesi faktörleri olarak ortaya çıkmıştır (Tablo 6.6).

19'uncu deney incelendiği takdirde optimum deney şartlarını içerdiği görülmektedir. Bu sebeple doğrulama deneyi için bu deney sonuçları kullanılmalıdır.

Tablo 6.7'de doğrulama deneyi için tahmini güven aralığı verilmiştir.

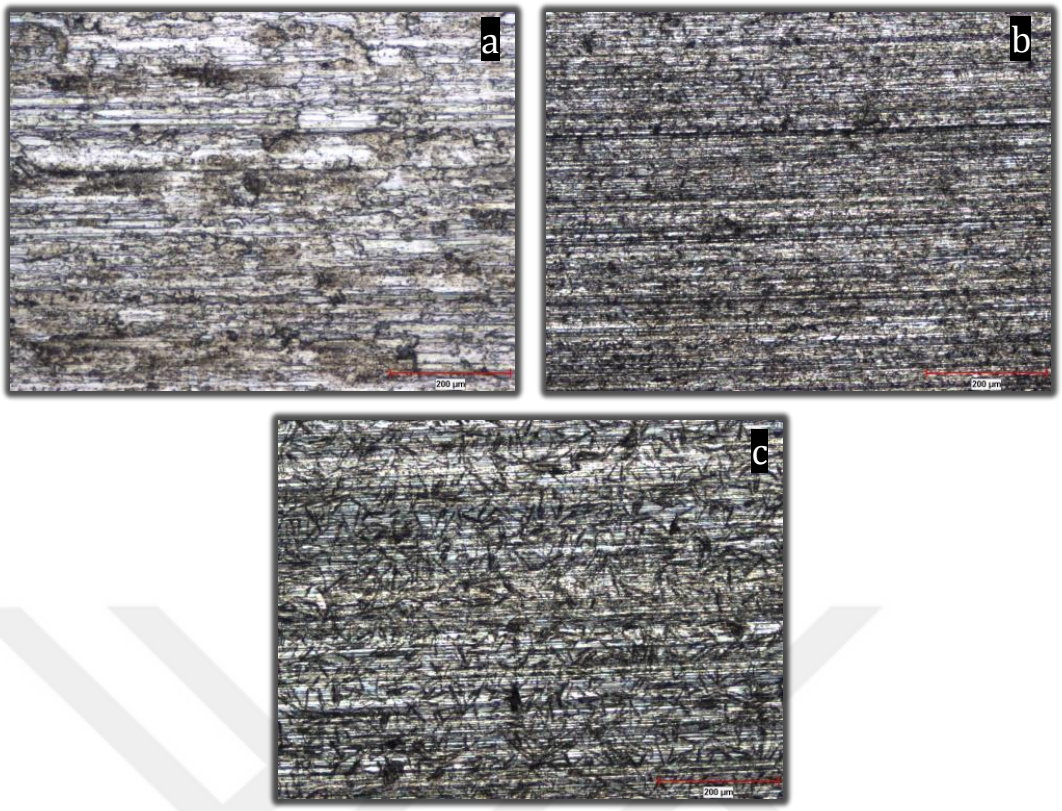
Tablo 6.7 Doğrulama deneyi için güven aralığı

Nicelik	S/N oranı	Ağırlık kaybı
Optimum şartlar	A3B1C1D3E1	A3B1C1D3E1
Ortalama değer	65,98	0,00042
Minimum değer	63,17	0,00037
Maksimum değer	68,79	0,00072
Doğrulama deneyi (Deney no 19)	66,55	0,0004

Tablo 6.7'de optimum şartlar altında yapılacak deney sonuçlarında ağırlık kaybı değerinin 0,00042 gr ve S/N oranının 65,98 dB olması gerektiği hesaplanmıştır. Bu değerler için verilen güven aralığında ise ağırlık kaybının 0,00037 – 0,00072 gr arasında ve S/N oranının 63,17 – 68,79 dB arasında olması gerekmektedir. Doğrulama deneyi olarak kabul edilen 119uncu deney neticesinde ağırlık kaybı 0,0004 gr ve S/N oranı 66,55 dB olarak tespit edilmiştir. Elde edilen bu sonucun tabloda gösterilen güven aralığı değerlerinin içinde olduğu görülmüştür.

Bu sonuçlar yapılan deneylerde kontrol altına alınamayan bir faktörün olmadığının göstergesidir.

Şekil 6.7'de saf Al matrisi, %7,5 AlB_2 takkviyeli ve %15 AlB_2 takviyeli numulerin aşınan yüzeylerinin optik görüntüleri gösterilmektedir. Güçlendirilmiş numunelere kıyasla saf Al matrisinin yüzeyinde daha derin penetrasyon izleri göze çarpmaktadır. Buna karşın güçlendirilmiş numunelerdeki izler ise daha sığ gözükmektedir. Bunun nedeni, AlB_2 parçacıklarıyla güçlendirilen malzemenin sertliğinin artmasıdır. Takviye oranının artışıyla birlikte sertlik değeri artmıştır.



Şekil 6.7 Aşınma mekanizmaları a) Saf Al, b) %7,5 AlB2/Al, c) %15 AlB2/Al

7
DENEYSEL SONUÇLARIN YORUMLANMASI

Çalışmalar neticesinde yapılan aşınma deneylerinin sonuçları göz önüne alındığında üretilen kompozit için aşınma ile ağırlık kaybına en fazla etki eden faktörün matris içerisindeki takviye parçacıkları oranı olduğu sonucuna varılmıştır. Takviye oranının artmasıyla beraber malzemenin aşınmaya karşı direncinin de ciddi ölçüde arttığı görülmüştür. Literatür çalışmalarında artan takviye oranı, malzemenin sertlik değerlerini de artırarak aşındırıcı partiküllerin aşınan yüzeye doğru penetrasyonunu zorlaştırmasından dolayı kompozitlerin aşıma direncini artırdığını rapor etmişlerdir (Kumar vd., 2008, 2007; Nachimuthu Radhika & Raghu, 2016). Bu çalışmada da AlB_2 ile güçlendirilmiş malzemenin aşınmaya karşı direncinin arttığı önceki çalışmalara benzer şekilde görülmüştür. Bunun nedeni AlB_2 partiküllerinin matris sertlik değerini arttırmasıdır.

Deney sonuçlarındaki bir diğer dikkat çekici aşındırıcı medya ortamının aşınma ve ağırlık kaybına etkisidir. Yapılan önceki çalışmalarda da aşındırıcı partikül boyutunun artmasının aşınmayı arttırdığı rapor edilmiştir (Ficici, 2016; Ficici & Koksal, 2016). Bu çalışmada da benzer şekilde aşındırıcı zımparadaki partikül boyunun büyümesiyle birlikte aşınma ve ağırlık kaybı miktarlarında artış olmuştur. Bunun muhtemel nedeni önceki çalışmalarda rapor edildiği gibi aşındırıcı partikül boyutunun artması aşınan yüzeylere daha fazla penetre olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir (Savaş, 2019).

Yük faktörü ele alındığı zaman deney sonuçlarında artan yük miktarının aşınmayı arttırdığı görülmüştür. Bu durumun muhtemel nedeni artan yükle birlikte aşındırıcı partiküllerin malzemeye penetrasyonunun artmasıdır (Ko, 2006; Kumar vd., 2007; Ozdin, 2007; N. Radhika & Raghu, 2018; Nachimuthu Radhika & Raghu, 2016). Çalışmalar neticesinde aşınmaya en etkili ikinci faktör olan kayma mesafesi de beklenen bir sonuç olarak karşımıza çıkmaktadır. Kompozit numune, aşındırıcı ortam üzerinde daha uzun yol aldığı için aşınma miktarı da gidilen mesafeyle doğru orantılı olarak artmaktadır.

8
SONUÇ VE ÖNERİLER

AlB_2 takviyeli AMK'ların abrazif aşınma davranışlarının incelenmesi amaçlanan çalışmada:

1. Al-2B master alaşımının 900°C'de 2 saat bekletilmesi suretiyle AlB_2 takviye yapılarının ekzotermik reaksiyon sonucunda kendiliğinden oluşması sağlanmıştır. Oluşan partiküllerin ortalama 30 μ boyutunda olduğu saptanmıştır.
2. Eriğik halde bulunan kompozit malzemelerin takviye oranı bir filtreleme sistemi aracılığıyla belirlenmiştir. Kompozit malzemelerin %0, %7,5 ve %15 takviye oranlarında üretilmesi başarılı bir şekilde sağlanmıştır.
3. Üretilen kompozitlere uygulanan sertlik testleri sonucunda %0, %7,5 ve %15 takviye oranına sahip kompozitlerin sırasıyla 28,59 HB, 51,76 HB ve 74,06 HB sertlik değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Takviye oranının artışıyla birlikte sertlik değerlerinin de arttığı saptanmıştır.
4. Uygulanan aşınma deneylerinde aşınma üzerine takviye oranı, aşındırıcı tipi, yük ve kayma mesafesinin ağırlık kaybı üzerinde etkili faktörler olduğu görülmüştür. Bu faktörler arasında en etkili faktörün takviye oranı olduğu ve onu sırasıyla kayma mesafesi, aşındırıcı tipi ve yük faktörlerinin takip ettiği tepit edilmiştir.
5. AlB_2 takviyesinin artırılmasının kompozitlerde aşınma direncini önemli bir seviyede arttırdığı sonucuna varılmıştır. Yapılan testlerde en iyi aşınma direncine %15 AlB_2 takviye oranına sahip kompozitin sahip olduğu tespit edilmiştir.
6. En düşük ağırlık kaybına ulaşabilmek için optimum faktörler A3, B1, C1, D1, E3 şeklinde tespit edilmiştir. En düşük ağırlık kaybına %15 AlB_2 takviyeli kompozitin 1 N yük altında, 1500 grid zımpara ile 3 m/s hızıyla ve 10 m kayma mesafesinde yapılan deneylerle ulaşılabileceği tespit edilmiştir.

7. Optimum deney şartları ile belirlenen doğrulama deneyinde ağırlık kaybının 0,00037 – 0,00072 gr arasında, S/N oranının ise 63,17 – 68,79 dB arasında olması gerektiği tespit edilmiştir.
8. Doğrulama deneyi olarak kabul edilen 19 numaralı deney sonucunda ağırlık kaybı 0,0004 gr ve S/N oranı 66,55 dB olarak ölçülerek deneylerde kontrol altında olmayan bir parametrenin olmadığı görülmüştür.

KAYNAKÇA

Ahlatçı, H. (2003). *Alüminyum Silisyum Karbür Kompozitlerin Mekanik Özelliklerine ve Aşınma Davranışına Takviye Boyutunun ve Matris Bileşiminin Etkisi*. İ.T.Ü.

Akbulut, H. (1994). *Alumina Fiber Takviyeli Metal Matriksli Kompozitlerin Üretimi ve Mikroyapı-Özellik İlişkilerinin İncelenmesi*. İ.T.Ü.

Akdoğan, A. (2005). Makine Malzemelerinde Korozyon ve Yüzeysel Koruma, Yüksek Lisans Ders Notu. İstanbul.

Al-rubaie, K. S. (2000). Equivalent hardness concept and two-body abrasion of iron-base alloys, *243*, 92–100.

Allison, J. E., & Cole, G. S. (1993). Metal Matrix Composites in The Automotive Industry: Opportunities and Challenges. *JOM*, 19–24.

Arı, Ş., & Parlar, Z. (2013). MEASUREMENT METHODS OF WEAR BETWEEN PISTON RING AND CYLINDER LINER. *Journal of Engineering and Natural Sciences*, (212), 319–334.

Arslan, İ., Gavgalı, E., & Çolak, M. (2019). Kum Kalıba Dökülen Farklı Alüminyum Alaşımlarının Dökümünde AL 5 TI 1 B ve AL 10 SR İlavesinin Mikroyapı Özelliklere Etkisinin İncelenmesi Investigation of The Effect of Adding AL 5 TI 1 B and AL 10 SR on Mechanical Properties for Casting Of Different Aluminum Alloys Used in Sand Molding, 237–244. https://doi.org/10.21541/apjes.424920

Ashby, M. F., & Jones, D. R. H. (1996). *Engineering Materials 1, An Introduction to Properties, Applications and Design*. İngiltere: Butterworth-Heinemann.

Bedir, F. (2006). Alüminyum kompozitlerin üretimi, karakteristik özellikleri ve endüstriyel uygulamalari, 28–35.

Carlson, B. O. N. (1990). The AI-B (Aluminum-Boron) System, *11*(6), 2092.

Cayron, C. (2000). *TEM Study of Interfacial Reactions and Precipitation Mechanisms in Al2O3 Shor Fiber or High Volume Fraction SiC particle reinforced Al-4Cu-1Mg-0.5Ag Squeeze-Cast Composites*. EPFL.

Cesur, İ. (2008). *Farklı Yakıt Karışımlarının Segman-Silindir Çifti Arasındaki Sürtünme ve Aşınma Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi*. Sakarya Üniversitesi.

Chawla, N., & Chawla, K. . (2006). *Metal Matrix Composites*. New York: Springer.

Chu, P. K., & Lu, X. P. (2013). *Low Temperature Plasma Technology: Methods and Applications*. CRC Press.

Contreras, A., Lopez, V. H., & Bedolla, E. (2004). Mg / TiC composites manufactured by pressureless melt infiltration, *51*, 249–253. https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2004.04.007

Dayanand, S., & B, S. B. (2020). A Review on synthesis of AlB 2 reinforced aluminium matrix composites. https://doi.org/10.1088/1757-

899X/810/1/012038

Degischer, H. P. (1998). Innovative light metals : metal matrix composites and foamed aluminium, *18*, 221–226.

Deppisch, C., Liu, G., & Hall, A. (1998). The crystallization and growth of AlB 2 single crystal flakes in aluminum.

Deppisch, C., Liu, G., Shang, J. K., & Economy, J. (1997). Processing and mechanical r , roperties of A1B2 flake reinforced Al-alloy composites, *225*(96), 153–161.

Dieringa, H., & Kainer, K. U. (2006). Particles , Fibers and Short Fibers for the Reinforcement of Metal Materials, 55–76.

Dinaharan, I., & Murugan, N. (2012). Effect of friction stir welding on microstructure , mechanical and wear properties of AA6061 / ZrB 2 in situ cast composites. *Materials Science & Engineering A*, *543*, 257–266. https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.02.085

Economy, J., Matkovich, I., & Wohrer, L. (1969). Single crystal flake reinforced composites. *SAMPE JOURNAL*, 23–28.

El-mahallawy, N., Taha, M. A., Jarfors, A. E. W., & Fredriksson, H. (1999). On the reaction between aluminium, K 2 TiF 6 and KBF 4, *292*, 221–229.

Eliasson, J., & Sandström, R. (1995). Applications of Aluminium Matrix Composites. *Key Engineering Materials*, *107*, 3–36. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.104-107.3

Emamy, M., Mahta, M., & Rasizadeh, J. (2006). SCIENCE AND Formation of TiB 2 particles during dissolution of TiAl 3 in Al – TiB 2 metal matrix composite using an in situ technique, *66*, 1063–1066. https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.04.016

Er, Ü. (2003). *Bor Yayımıyla Yüzeyi Sertleştirilmiş Çeliklerin Aşınmaya Karşı Dayanımlarının ve Pulluk Uç Demirlerinde Uygulama Olanaklarının Araştırılması*. Osmangazi Üniversitesi.

Evans, A., Marchi, C. S., & Mortensen, A. (2003). *Metal Matrix Composites in Industry*. Springer, Boston, MA.

Feest, E. A. (1986). Metal Matrix Composites for Industrial Application. *Mater Des*, *7*(2), 58–64.

Ficici, F. (2016). The experimental optimization of abrasive wear resistance model for an in-situ AlB2/Al-4Cu metal matrix composite. *Industrial Lubrication and Tribology*, *68*(6), 632–639. https://doi.org/10.1108/ILT-12-2015-0198

Ficici, F., & Koksal, S. (2016). Microstructural characterization and wear properties of in situ AlB2-reinforced Al-4Cu metal matrix composite. *Journal of Composite Materials*, *50*(12), 1685–1696. https://doi.org/10.1177/0021998315595709

Ficici, F., Koksal, S., Kayikci, R., & Savas, O. (2011). Investigation of unlubricated sliding wear behaviours of in-situ AlB 2/Al metal matrix composite. *Advanced Composites Letters*, *20*(4), 109–116.

Fıçıcı, F., Köksal, S., Savaş, Ö., & Kayıkçı, R. (2014). AlB 2 / Al-Cu Kompozit

Malzemelerin Abrasif Aşınma Davranışlarının İncelenmesi Investigation of Abrasive Wear Behavior of AlB 2 / Al-Cu Composite Materials, (November 2013), 220–223.

Froyen, L. (1994). Aluminium Matrix Composites Materials 1402 Aluminium Matrix Composites Materials, 1–28.

Gahr, K. H. Zum. (1987). *Microstructure and Wear of Materials*. Elsevier.

Günyüz, M. (2007). *Titanyum Alaşımlarının Mikroark Oksidasyonu*. İ.T.Ü.

Hall, A. C. (1999). *Pathweys to a family of low cast, high performance, metal matrix composites based on AlB2 in aluminum*. University of Illinois at Urbana-Champaign.

Hall, A. C., & Economy, J. (2000). Preparing High- and Low-Aspect Ratio AlB 2 Flakes from Borax or Boron Oxide, (February), 42–44.

Hall, A., & Economy, J. (2000). The Al (L) + AlB 12 ↔ AlB 2 Peritectic Transformation and Its Role in the Formation of High Aspect Ratio AlB 2 Flakes, *21*(1), 63–69.

Hunt, W. H., & Miracle, D. B. (2001). *Automotive Applications of Metal-Matrix Composites*. ASM Handbook.

Ibrahim, A., Mohamed, F. A., & Lavernia, E. J. (1991). Particulate Reinforced Metal Matrix Composites- A reiew. *Journal of Material Science*, *26*(1137–1156).

İmece, Y. (2013). *Katı Film Yağlayıcıların Farklı Ortam Şartlarında Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi*. Gazi Üniversitesi.

Itoh, M., Inoue, K., Hirayama, N., Sugimoto, M., & Seguchi, T. (2002). Fiber reinforced plastics using a new heat-resistant silicon based polymer, *7*, 3795–3801.

Jr, W. C. H. (1998). Commercial processing of metal matrix composites, *244*, 75–79.

Kalemtaş, A. (2014). Metal Matrisli Kompozitlere Genel Bir Bakış.

Kaya, A. İ. (2016). Makale Kompozit Malzemeler ve Özellikleri.

Kayikci, R. (2012). APPLICATION OF TAGUCHI METHOD TO INVESTIGATE THE EFFECT OF SOME FACTORS ON IN-SITU FORMED FLAKE STRUCTURES OF AL / ALB 2, *21*. https://doi.org/10.1177/096369351202100202

Kayikci, Ramazan. (2007). Application of Taguchi ' s methods to investigate some factors affecting microporosity formation in A360 aluminium alloy casting. *Materials & Design*, *28*, 2224–2228. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.06.008

Kayikci, Ramazan, Kurtulus, O., & Gurbuz, R. (2009). The Formation and Growth Behavior of Aluminium Boride Crystals in an Al – B Alloy, *144*, 140–144. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.144.140

Kayikci, Ramazan, & Savaş, Ö. (2015). Fabrication and properties of in-situ Al/AlB2 composite reinforced with high aspect ratio borides. *Steel and Composite Structures*, *19*(3), 777–787. https://doi.org/10.12989/scs.2015.19.3.777

Kerti, I. (1999). *Gaz Enjeksiyon ve Elementel Karbon İlavesi Yöntemleri İle TiC Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozit Üretimi*. İ.T.Ü.

Ko, M. (2006). Abrasive wear of Al 2 O 3 particle reinforced 2024 aluminium alloy composites fabricated by vortex method, *37*, 457–464. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.05.038

Koksal, S., Ficici, F., Kayikci, R., & Savas, O. (2012). Experimental optimization of dry sliding wear behavior of in situ AlB2/Al composite based on Taguchi's method. *Materials and Design*, *42*, 124–130. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.05.048

Koksal, S., Ficici, F., Kayikci, R., & Savas, O. (2014). Journal of Composite Materials. https://doi.org/10.1177/0021998313490584

Kumar, S., Chakraborty, M., Subramanya Sarma, V., & Murty, B. S. (2008). Tensile and wear behaviour of in situ Al-7Si/TiB2 particulate composites. *Wear*, *265*(1–2), 134–142. https://doi.org/10.1016/j.wear.2007.09.007

Kumar, S., Sarma, V. S., & Murty, B. S. (2007). Influence of in situ formed TiB2 particles on the abrasive wear behaviour of Al-4Cu alloy. *Materials Science and Engineering A*, *465*(1–2), 160–164. https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.02.117

Laden, K., Guerin, J. D., Watremez, M., & Bricout, J. P. (2000). Frictional Characteristics of Al-Sic Composite Brake Discs. *Tribology Letters*, *8*, 237–247.

Lakshmi, S., Lu, L., & Gupta, M. (1998). In situ preparation of TiB 2 reinforced Al based composites, *73*(April 1997), 160–166.

Lee, K. B., Sim, H. S., Kwon, H., & Cho, S. Y. (2001). Tensile Properties of 5052 Al Matrix Composites Reinforced With B4C Particles. *Metallurgical And Materials Transactions A*, *32 A*(2142–2147).

Mahendra, K. V, & Radhakrishna, K. (2015). Castable composites and their application in, *221*, 135–140. https://doi.org/10.1243/09544070JAUTO150

Meignanamoorthy, M., Ravichandran, M., Alagarsamy, S. V., Chanakyan, C., Dinesh Kumar, S., & Sakthivelu, S. (2020). Effect of various reinforcements on properties of metal matrix composites: A review. *Materials Today: Proceedings*, *1*(xxxx), 1–4. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.479

Miracle, D. B. (2005). SCIENCE AND Metal matrix composites – From science to technological significance, *65*, 2526–2540. https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.05.027

Mohan, S., Prakash, V., & Pathak, J. P. (2002). Wear characteristics of HSLA steel, *252*(June 2001), 16–25.

Mohanavel, V., Kumar, S. S., Sathish, T., & Anand, K. T. (2018). ScienceDirect Effect of ZrB 2 content on mechanical and microstructural characterization of AA6063 aluminum matrix composites. *Materials Today: Proceedings*, *5*(5), 13601–13605. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.02.356

Mustansar, C., Gupta, P., Engineering, M., Prakash, A., Shimla, G., & Pradesh, H. (2019). Advance research progresses in aluminium matrix composites :

manufacturing & applications. *Integrative Medicine Research*, *8*(5), 4924–4939. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.06.028

Naebe, M., & Shirvanimoghaddam, K. (2016). Functionally graded materials : A review of fabrication and properties. *Applied Materials Today*, *5*, 223–245. https://doi.org/10.1016/j.apmt.2016.10.001

Nami, H., Adgi, H., Sharifitabar, M., & Shamabadi, H. (2011). Microstructure and mechanical properties of friction stir welded Al / Mg 2 Si metal matrix cast composite. *Materials and Design*, *32*(2), 976–983. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.07.008

Neale, M. J. (1973). *The Tribology Handbook*. Oxford: Butterworth-Heinemann.

Ozdin, K. (2007). Wear resistance of aluminium alloy and its composites reinforced by Al 2 O 3 particles, *183*, 301–309. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.10.021

Pai, B. C., Ramani, G., Pillai, R. M., & Satyanarayana, K. G. (1995). Role of Magnesium in Cast Aluminium Alloy Matrix Composites. *Journal of Material Science1*, *30*, 1903–1911.

Peng, H. X., & Fan, Z. (2000). Novel MMC Microstructures Prepared by Melt Infiltration of Reculated Ceramic Performs. *Material Science and Technology*, *16*, 903–907.

Peng, H. X., Fan, Z., & Evans, J. R. G. (2001). Bi-continuous metal matrix composites, *303*, 37–45.

Pramod, S. L., Bakshi, S. R., & Murty, B. S. (2014). Aluminum-Based Cast In Situ Composites : A Review. https://doi.org/10.1007/s11665-015-1424-2

Prasad, S. V, & Asthana, R. (2004). Aluminum metal – matrix composites for automotive applications : tribological considerations, *17*(3).

Prater, T. (2013). Author ' s Accepted Manuscript COMPOSITES FOR USE IN AEROSPACE STRUC-. *Acta Astronautica*. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2013.07.023

Radhika, N., & Raghu, R. (2018). Effect of Centrifugal Speed in Abrasive Wear Behavior of Al-Si5Cu3/SiC Functionally Graded Composite Fabricated by Centrifugal Casting. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, *71*(3), 715–726. https://doi.org/10.1007/s12666-017-1204-9

Radhika, Nachimuthu, & Raghu, R. (2016). Effect of Abrasive Medium on Wear Behavior of Al/AlB_2 Functionally Graded Metal Matrix Composite. *Tribology Online*, *11*(3), 487–493. https://doi.org/10.2474/trol.11.487

Ramesh, C. S., Pramod, S., & Keshavamurthy, R. (2011). A study on microstructure and mechanical properties of Al 6061 – TiB 2 in-situ composites. *Materials Science & Engineering A*, *528*(12), 4125–4132. https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.02.024

Rawal, S., & Al, B. (2001). Metal-Matrix Composites for, (April), 14–17.

Ray, S. (1993). Synthesis of The Cast Metal Matrix Particulate Composites. *Journal*

of Material Science, *28*, 5397–5413.

Rohatgi, P. (1991). Cast Aluminium Matrix Composites for Automotive Applications. *JOM*, *43*, 10–15.

Rohatgi, P. (1992). *Cast Metal Composites*. ASM Handbook.

Rohatgi, P. (2001). Cast metal matrix composites: Past, present and future. *Transactions of the American Foundry Society and the One Hundred Fifth Annual Castings Congress*, 1–25.

Ross, P. J. (1988). *Taguchi Techniques for Quality Engineering*. New York: McGraw-Hill.

Rosso, M. (2006). Ceramic and metal matrix composites : Routes and properties, *175*, 364–375. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.04.038

Salih, O. S., Ou, H., Sun, W., & Mccartney, D. G. (2015). A review of friction stir welding of aluminium matrix composites. *JMADE*. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.07.071

Salman, Ö., & Durak, E. (2011). *Yağlama Yağı İçin Bitkisel Yağların ve Esterlerinin Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi*. Süleyman Demirel Üniversitesi.

Sarıtaş, S. (1995). Engineering Metallurgy and Materials, 5–30.

Savaş, Ö. (2010). *Alüminyum Esaslı İn-Situ Borür Takviyeli Kompozitlerin Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi*. Sakarya Üniversitesi.

Savaş, Ö. (2019). The production and properties of Al3Ti reinforced functionally graded aluminum matrix composites produced by the centrifugal casting method. *Materials Research Express*, *6*(12), 10–12. https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab562c

Savaş, Ö. (2020). Application of Taguchi's method to evaluate abrasive wear behavior of functionally graded aluminum based composite. *Materials Today Communications*, *23*(October 2019). https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.100920

Savas, Ö., & Kayikci, R. (2013). A Taguchi optimisation for production of Al – B master alloys using boron oxide, *580*, 232–238. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.05.112

Savaş, Ö., & Kayikci, R. (2013a). Production and wear properties of metal matrix composites reinforced with boride particles. *Materials and Design*, *51*, 641–647. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.04.049

Savaş, Ö., & Kayikci, R. (2013b). Production of AlB 2 / Al composites by squeeze-filtering casting AIB 2 / Al kompozitlerinin sıkıştırma -filtreleme döküm yöntemi ile üretimi, (November), 216–219.

Sharma, D. K., Mahant, D., & Upadhyay, G. (2020). Manufacturing of metal matrix composites: A state of review. *Materials Today: Proceedings*, (xxxx). https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.128

Sharma, P., Khanduja, D., & Sharma, S. (2014). Tribological and mechanical behavior of particulate aluminum matrix composites.

https://doi.org/10.1177/0731684414556012

Sıcakyüz, Ö. (2007). *Titanyum ve Titanyum Alaşımlarının Anodik Oksidasyon Davranışı ve Karakterizasyonu*. İ.T.Ü.

Steinman, A. E., Corthay, S., Firestein, K. L., Kvashnin, D. G., Kovalskii, A. M., Matveev, A. T., … Shtansky, D. V. (2018). Al-based composites reinforced with AlB 2 , AlN and BN phases : Experimental and theoretical studies. *Materials & Design*, *141*, 88–98. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.12.022

Surappa, M. K. (2003). Aluminium matrix composites : Challenges and opportunities, *28*(April), 319–334.

Tjong, S. C., & Ma, Z. Y. (2000). Microstructural and mechanical characteristics of in situ metal matrix composites, *29*(July), 49–113.

Toozandehjani, M., Kamarudin, N., Dashtizadeh, Z., Lim, E. Y., Gomes, A., & Gomes, C. (2018). Conventional and Advanced Composites in Aerospace Industry : Technologies Revisited, *5*(1), 9–15. https://doi.org/10.11648/j.ajae.20180501.12

Toptan, F., Kumdali, F., & Kert, I. Đ. (y.y.). Al-B 4 C Kompozitlerinin Fren Diski Olarak Kullanılabilirli ğ ine Genel Bir Bakı ş.

Torralba, J. M., Costa, C. E., & Velasco, F. (2003). P / M aluminum matrix composites : an overview, *133*, 203–206.

Udupa, G., Rao, S. S., & Gangadharan, K. V. (2014). Functionally graded Composite materials: An overwiew, *5*, 1291–1299. https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.442

Uygur, İ., & Saruhan, H. (2004). ALUMiNYUM ESASLI METAL MATRİS KOMPOZiT MALZEMELERiN MEKANİK ÖZELLİKLERİ Spesifik Elastıl : Modül (GPa / gmcA-3), (Mart), 167–174.

Wang, X. (2005). The formation of AlB 2 in an Al – B master alloy, *403*(April), 283–287. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2005.04.204

Williams, J. A. (2005). Wear and Wear Particles - Some Fundamentals. *Tribiology International*, *38*(10), 863–870.

Wohrer, L., Wosilait, A., & Economy, J. (1973). AlB2 flake reinforced composites. *18th national SAMPE symposium and exhibition*, *16*, 340–368.

Yılmaz, U., & Evci, C. (2015). Havacılık ve Savunma Sektöründe Kompozit Malzemelerin Geleceği Future Of Composıte Materıals In Aerospace and Defence Industry, *14*(2), 77–109.

Yu, P., Deng, C., Ma, N., & Ng, D. H. L. (2004). A new method of producing uniformly distributed alumina particles in Al-based metal matrix composite, *58*, 679–682. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2003.06.001

Yuan, L., Han, J., Liu, J., & Jiang, Z. (2016). Mechanical properties and tribological behavior of aluminum matrix composites reinforced with in-situ AlB2 particles. *Tribology International*, *98*, 41–47. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.01.046

Zhu, H. G., Ai, Y. L., Min, J., Wu, Q., & Wang, H. Z. (2010). Dry sliding wear behavior of Al-based composites fabricated by exothermic dispersion reaction in an Al – ZrO 2 – C system. *Wear*, *268*(11–12), 1465–1471. https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.02.023

Zhu, H., Wang, H., Ge, L., Xu, W., & Yuan, Y. (2008). Study of the microstructure and mechanical properties of composites fabricated by the reaction method in an Al – TiO 2 – B 2 O 3 system, *478*, 87–92. https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.05.076

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

İletişim Bilgisi: ermaninci.93@gmail.com

Makale

1. İnci, E., & Savaş, Ö. (2020). AlB_2 Matrisli Kompozitlerin Abrasif Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi Üzerine Deneysel Bir Çalışma. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*

*Makale, Ejosat Ağustos 2020 (19. Sayı) sayısında yayınlanacaktır.