

**AA2014-B₄C METAL MATRİSLİ KOMPOZİTİNİN TOZ METALURJİSİ VE
İNFİLTRASYON YÖNTEMİYLE ÜRETİLEBİLİRLİĞİ, KARAKTERİZASYONU
VE AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Ufuk TAŞCI

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METAL EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAYIS 2012
ANKARA**

Ufuk TAŞCI tarafından hazırlanan “AA2014-B₄C METAL MATRİSLİ KOMPOZİTİNİN TOZ METALURJİSİ VE İNFİLTRASYON YÖNTEMİYLE ÜRETİLEBİLİRLİĞİ, KARAKTERİZASYONU VE AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Bülent BOSTAN

Tez Danıőmanı, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Metal EĞitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Abdülmecit GÜLDAŐ

İmalat Mühendisliği,

Doç. Dr. Bülent BOSTAN

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

Yrd. Doç. Dr. Ahmet GÜRAL

Metal EĞitimi Anabilim Dalı, G.Ü

Tarih: 15/05/2012

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıŐtır.

Prof. Dr. Bilal TOKLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Ufuk TAŞCI

**AA2014-B₄C METAL MATRİSLİ KOMPOZİTİNİN TOZ METALURJİSİ VE
İNFİLTRASYON YÖNTEMİYLE ÜRETİLEBİLİRLİĞİ,
KARAKTERİZASYONU VE AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Ufuk TAŞCI

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Mayıs 2012**

ÖZET

Bu çalışmada, partikül takviyeli metal matriksli kompozit malzeme üretilmesine yönelik olarak, İnfiltrasyon ve Toz Metalurjisi (TM) yöntemleri kullanıldı. Toz Metalurjisi yönteminde, gaz atomizasyon yöntemi ile üretilmiş , ortalama toz boyutu 90,66 µm olan toz metal AA 2014 alaşımı ve toz boyutu 10 µm' dan küçük olan B₄C tozu çalışmalarda kullanıldı. AA 2014 - B₄C tozları %1, 2, 4, 8 takviye oranlarında 1 saat süreyle karıştırılmıştır. İnfiltrasyon yönteminde ise takviye elemanı B₄C'ün tane büyüklüğü 53 µm olarak belirlenmiştir. Sıvı matriks içerisine % 1, 2, 4, 8 oranlarında B₄C takviyesi 750 °C sıcaklıkta 550 mmHg vakum altında 3 dakika süreyle takviye edilmiştir.

TM çalışmalarında, AA 2014 - B₄C tozların preslenmesinde optimum presleme kuvveti 700 MPa olarak seçilmiştir. Deney numunelerine 560 °C sıcaklıkta 1 saat süreyle sinterleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan bütün deney numuneleri belirtilen sabit presleme basıncı ve sinterleme sıcaklığında üretilmiştir. TM ve infiltrasyon yöntemi ile üretilen numunelerin sinterleme öncesi ve sonrası yoğunluk değerleri ölçülmüştür. Elde edilen verilerde, yapılan sinterleme sıcaklığı ve süresine bağlı olarak gözeneklilik azalıp taneler birleşerek yoğunluk kısmi olarak artmıştır.

Yapılan sertlik sonuçları incelendiğinde TM ve infiltrasyon yöntemleri ile üretilen numuneler de, takviye oranının artışına bağlı olarak sertliklerin arttığı tespit edilmiştir.

TM ve infiltrasyon yöntemi ile üretilen numunelere pin-on disk üzerinde kayma hızı 1 m/s olacak şekilde, 30 N yük ve 1500 metre kaydırma mesafesi ile aşınma testi yapılmıştır. Aşınma oranları tüm numunelerde ağırlık kaybı olarak belirlenmiştir.

Yapılan çalışmalar göz önünde bulundurulduğunda, takviye oranının artışına bağlı olarak, gerek infiltrasyon işleminde gerekse toz metalurjisi yöntemiyle üretilen kompozit malzemelerde, takviye/matriks ara yüzey etkileşimi ve belirlenen diğer parametrelerin mikro yapı ve mekanik özellikler açısından etkileri araştırılmıştır. Bu etkilerin belirlenmesi amacıyla, Optik Mikroskop, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Enerji Dağılım Spektrometresi (EDS) kullanılmıştır.

Bilim Kodu : 710.1.092
Anahtar kelimeler : Toz Metalurjisi, İnfiltrasyon, Karakterizasyon, Aşınma
Sayfa Adedi : 109
Tez Yöneticisi : Doç. Dr. Bülent BOSTAN

**PRODUCIBILITY OF AA2014-B₄C METAL MATRIX COMPOSITE BY
POWDER METALLURGY AND INFILTRATION
METHOD, CHARACTERIZATION AND RESEARCH OF WEAR
(Yüksek Lisans Tezi)**

Ufuk TAŞCI

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
MAY 2012**

ABSTRACT

In this study, infiltration and powder metallurgy methods were used in order to produce metal matrix composite material with particle reinforced. Powder metal AA 2014 alloy produced by gas atomization in powder metallurgy method which has 90,66 μm of mean particle size and B₄C powder whose size smaller than 10 μm ' were used in this study. AA 2014 - B₄C powders, were mixed for one hour in 1, 2, 4, 8 % at reinforced ratio, respectively. Particle size of reinforced element B₄C was determined as 53 μm in infiltration method. B₄C powder was reinforced into the liquid matrix at 1, 2, 4, 8 % ratios, 750 °C temperatures, under the vacuum of 550 mmHg for 3 minutes period.

In the PM studies, optimum pressing force was selected as 700 MPa at powder pressing of AA 2014 - B₄C. Experimental samples were carried out sintering at 560 °C temperatures for one hour period. All of the experimental samples used in experimental studies were produced at specified fixed pressing pressure (force) and sintering temperature. The density values of produced samples by PM and infiltration method were measured before and after sintering. It is concluded from the experimental results increases density particularly by decreases porosity combining grain related to sintering temperature and time.

When the results of hardness were investigated, in the samples which were produced by PM and infiltration methods, an increased hardness determined according to increasing the reinforced ratio.

Samples produced by the method of infiltration, on the pin-on disk sliding speed 1 m/s , wear testing was performed with a 30 N load and 1500 meters scrolling distance. Wear ratios determined as weight loss at all of the samples.

Considering the studies conducted, according to increasing the reinforced ratio, both in the infiltration process and composite materials produced by powder metallurgy, reinforce/matrix interface interaction and the other parameters were investigated in terms of macro structure and mechanical properties. In order to determine these effects, Optical Microscopy, Scanning Electron Microscopy (SEM) and Energy Dispersive Spectrometer (EDS) were used.

Science Code : 710.1.092
Key Words : Powder Metalurgi, Infiltration, Characterition, Wear
Page Number : 109
Adviser : Doç. Dr. Bülent BOSTAN

TEŞEKKÜR

Tüm çalışmalarım esnasında, ilgi ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyip bana rehberlik eden, tecrübeleri ile bana yol gösteren saygıdeğer hocam Doç. Dr. Bülent BOSTAN' a, Yrd. Doç. Dr. Ahmet GÜRAL'a, deneysel çalışmalarım için destek veren Prof. Dr. Süleyman TEKELİ, Doç. Dr. Dursun ÖZYÜREK ve değerli arkadaşlarım Alper Melih ATAÇ, Alper CALAM, Murat AKIN, Hakan GÖKMEŞE, Onur ALTUNTAŞ, Taha Alper YILMAZ, Osman ALTINOLUK, Uğur GÖKMEN, Sinan AKSÖZ'e ve her zaman beni destekleyen sevgili eşim Sıla DOĞAN TAŞCI ve kızım Zeynep Alya TAŞCI' ya, yanımda olan sevgili aileme teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xiv
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xv
RESİMLERİN LİSTESİ	xviii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xx
1. GİRİŞ	1
2. KOMPOZİT MALZEMELER.....	4
2.1. Kompozitler.....	4
2.2. Kompozitlerin Sınıflandırılması.....	4
2.3. Metal Matrisli Kompozitler.....	6
2.3.1. MMK'ler için matris malzemeler.....	6
2.3.2. MMK'ler için takviye elemanları.....	7
2.4. Kompozit Üretim Yöntemleri	8
2.4.1. Sıvı hal işlemleri	8
2.4.2. Katı hal işlemleri	10
2.4.3. İn-situ işlemler	12
3. ALÜMİNYUM MATRİSLİ B ₄ C TAKVİYELİ KOMPOZİTLER.....	13
3.1. B ₄ C Tozu ve Özellikleri	15
3.2. Alüminyum Matrisli – B ₄ C Takviyeli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri	15

	Sayfa
3.2.1. İnfiltrasyon yöntemi ile üretimi	15
3.2.2. Döküm yöntemi ile üretimi.....	16
3.2.3. Toz metalurjisi yöntemi ile üretimi	16
3.3. Alüminyum-B ₄ C Kompozitleri- Literatürdeki Çalışmalar.....	16
4. TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİ.....	19
4.1. Toz Özellikleri ve Karakterizasyonu.....	19
4.2. Toz Metalurjisi İmalat Safhaları.....	20
4.2.1. Toz üretimi	20
4.2.2. Tozların ve/veya alaşımların karıştırılması	24
4.2.3. Tozların preslenmesi (Yoğunlaştıma Safhaları).....	25
4.2.4. Sinterleme	29
4.2.5. Son işlemler	30
5. İNFİLTASYON YÖNTEMİ	31
5.1. Vakum İnfiltrasyon.....	32
5.2. Basınçlı İnfiltrasyon	34
5.3. Basınçsız İnfiltrasyon	36
5.4. İnfiltrasyonu Etkileyen Faktörler	38
5.4.1. Takviye tane boyutu	38
5.4.2. İnfiltrasyon süresi	38
5.4.3. İnfiltrasyon sıcaklığı	38
5.4.4. Takviye hacim oranı	39
5.4.5. İnfiltrasyon basıncı	41

	Sayfa
5.4.6. Alaşım.....	42
5.4.7. Islatma	42
6. AŞINMA.....	45
6.1. Tribolojik Sistem.....	47
6.2. Aşınma Mekanizmaları	48
6.2.1. Adhesiv (Yapışmalı) aşınma mekanizması	48
6.2.2. Abrasiv aşınma mekanizması	50
6.2.3. Yorulma aşınması	52
6.2.4. Erozif aşınma	53
6.2.5. Öğütmeli aşınma.....	53
6.2.6. Oymalı aşınma (Gouging wear)	54
6.2.7. Kazımalı aşınma (Fretting wear)	55
6.2.8. Tribosüblimasyon ve difüzyon aşınması	55
6.2.9. Termal aşınma (Termal etkenler)	56
6.3. Aşınma Testleri ve Ölçüm Yöntemleri	57
6.3.1. Ağırlık farkı metodu	57
6.3.2. Kalınlık farkı metodu.....	60
6.3.3. İz değişiminin ölçülmesi metodu.....	60
6.3.4. Aşınmanın radyo-izotoplarla ölçülmesi yöntemi	60
6.3.5. Ultrasonik yöntemle aşınmanın tespiti yöntemi	61
6.3.6. Optik yöntemle aşınmanın tespiti	61
6.3.7. Mekanik ölçüm yöntemiyle aşınmanın tespiti.....	61
7. MALZEME VE METOD	63

	Sayfa
7.1. Deneysel Malzeme	63
7.2. İnfiltrasyon Yöntemi İle AA2014- B ₄ C Kompozitinin Hazırlanması.....	66
7.2.1. İnfiltrasyon işleminin uygulanması	67
7.2.2. Sıcaklığın kontrolü	68
7.2.3. Vakumun uygulanması	68
7.2.4. İnfiltrasyon işlemi	67
7.3. Toz Metalurjisi Yöntemi ile AA2014-B ₄ C Kompozitinin Hazırlanması.....	70
7.4. Sinterleme İşlemleri	71
7.5. Metalografik Çalışmalar	72
7.6. Yoğunluk Ölçümleri.....	72
7.7. Kuru Sürtünmeli Aşınma İşlemleri	73
8. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	76
8.1. TM İle Üretilen Numunelerinin Karakterizasyonu	77
8.2. Sinterleme Sonrası TM ve İnfiltrasyon Kompozit Malzemelerinde EDS Yöntemi İle Element Analizleri.....	86
8.3. Yoğunluk	89
8.4. Sertlik	92
8.5. Kuru Sürtünme Aşınma Davranışları	93
8.6. Aşınma Yüzeyleri.....	94
9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	97
9.1. Sonuçlar	97
9.2. Öneriler.....	99
KAYNAKLAR	100

ÖZGEÇMİŞ 109

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Al-MK'lerde başlıca kullanılan takviye malzemeleri.....	14
Çizelge 7.1. Gaz atomizasyon yöntemi ile üretilmiş AA2014 tozu ve B ₄ C özellikleri	63
Çizelge 7.2. Numune karışım oranlarının ağırlıkları	66
Çizelge 8.1. Toz yöntemi ile üretilen numunelerin sinterleme öncesi ve sonrası yoğunlukları.....	90
Çizelge 8.2. İnfiltrasyon yöntemi ile üretilen numunelerin sinterleme öncesi ve sonrası yoğunlukları	90

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Takviye elemanının şekline göre kompozit çeşitleri	6
Şekil 3.1. Al-B ₄ C tozlarının karışım süresinin görünür yoğunluk ve akış oranlarına etkisi.....	18
Şekil 4.1. Bilyalı değirmende toz öğütümü.....	21
Şekil 4.2. Elektroliz ile toz üretimi	22
Şekil 4.3. Kimyasal yöntemle demir tozu üretimi	23
Şekil 4.4. Düşey gaz atomizasyon ünitesi	24
Şekil 4.5. Tek etkili preslemenin aşamaları	26
Şekil 4.6. Tek etkili preslemede oluşan basınç dağılımları.....	27
Şekil 4.7. Tek etkili presle imal edilmiş parçada yoğunluk dağılımı.....	28
Şekil 4.8. Sinterleme sırasında meydana eden olayların şematik gösterimi	29
Şekil 4.9. Katı hal sinterlemesinin aşamaları	30
Şekil 5.1. Sıvı matrisin gözenekli bir yapıda şematik olarak yükselmesi.....	32
Şekil 5.2. Vakum infiltrasyon yöntemi	33
Şekil 5.3. Basınçlı infiltrasyon yöntemi	34
Şekil 5.4. Orta basınçlı infiltrasyon yöntemi	35
Şekil 5.5. Savurma basınçlı infiltrasyon tekniği	36
Şekil 5.6. Basınçsız infiltrasyon yöntemi.....	37
Şekil 5.7. Takviye tozlarının cam kap içerisinde oluşturdukları dolu hacim ve gözenekler.....	40
Şekil 5.8. Bir sıvı damlasının katı bir yüzeyle temasıyla oluşan yüzey gerilimleri ve temas açısı	43
Şekil 6.1. Tribolojik sistemin şematik gösterimi	45

Şekil	Sayfa
Şekil 6.2. Tribolojik sisteme giren enerji dağılımı.....	48
Şekil 6.3. Adhesiv aşınmanın meydana gelişinin şematik olarak gösterimi	50
Şekil 6.4. Abrasiv aşınma şeması.....	51
Şekil 6.5. İki elamanlı abrasiv aşınma	51
Şekil 6.6. Üç elamanlı abrasiv aşınma	52
Şekil 6.7. Bir kesici uçta meydana gelen kendi kendine bilenmesinin oluşum mekanizması	54
Şekil 6.8. Yüzeyler arası malzeme transferi.....	56
Şekil 7.1. AA 2014 matriks malzemesinin toz boyut analizi.....	65
Şekil 7.2. B ₄ C toz malzemesinin XRD analiz sonucu	65
Şekil 7.3. Vakum infiltrasyon deney düzeneği	68
Şekil 7.4. TM yöntemi ile üretilmiş AA2014-B ₄ C alaşımının preslenmesinde kullanılan metal kalıp	71
Şekil 7.5. Aşınma test cihazının şematik görüntüsü	74
Şekil 8.1. Yürütülen deneysel çalışma sıralaması.....	76
Şekil 8.2. Resim 8.9' daki 1 nolu bölgeye ait EDS analizi	87
Şekil 8.3. Resim 8.9' daki 2 nolu bölgeye ait EDS analizi	87
Şekil 8.4. Resim 8.9' daki 3 nolu bölgeye ait EDS analizi	88
Şekil 8.5. Resim 8.10' daki 1 nolu bölgeye ait EDS analizi	88
Şekil 8.6. Resim 8.10' daki 2 nolu bölgeye ait EDS analizi	89
Şekil 8.7. Toz yöntemi ile üretilen numunelerin sinterleme öncesi ve sonrası yoğunlukları	91
Şekil 8.8. İnfiltrasyon yöntemi ile üretilen numunelerin sinterleme öncesi ve sonrası yoğunlukları	91
Şekil 8.9. Toz ve infiltrasyon yöntemi ile üretilen numunelerin sertlik sonuçları.....	92

Şekil**Sayfa**

Şekil 8.10. Toz ve infiltrasyon yöntemi ile üretilen numunelerin ağırlık kayıpları... 93

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 7.1. AA 2014 matriks malzemesinin SEM görüntüleri.....	64
Resim 7.2. Başlangıç tozlarının SEM görüntüleri	64
Resim 7.3. Sıcaklık kontrol ünitesi ve deney düzeneği	69
Resim 7.4. 160 tonluk pres cihazı	71
Resim 7.5. Sinterleme ısı işlemi uygulanan fırın	72
Resim 8.1. TM yöntemiyle üretilen AA 2014 matriksli %1 B ₄ C takviyeli kompozit mikro yapıları	78
Resim 8.2. TM yöntemiyle üretilen AA 2014 matriksli %2 B ₄ C takviyeli kompozit mikro yapıları	79
Resim 8.3. TM yöntemiyle üretilen AA 2014 matriksli %4 B ₄ C takviyeli kompozit mikro yapıları	80
Resim 8.4. TM yöntemiyle üretilen AA 2014 matriksli %8 B ₄ C takviyeli kompozit mikro yapıları	81
Resim 8.5. İnfiltasyon yöntemiyle üretilen AA 2014 matriksli %1 B ₄ C takviyeli kompozit mikro yapıları	82
Resim 8.6. İnfiltasyon yöntemiyle üretilen AA 2014 matriksli %2 B ₄ C takviyeli kompozit mikro yapıları	83
Resim 8.7. İnfiltasyon yöntemiyle üretilen AA 2014 matriksli %4 B ₄ C takviyeli kompozit mikro yapıları	84
Resim 8.8. İnfiltasyon yöntemiyle üretilen AA 2014 matriksli %8 B ₄ C takviyeli kompozit mikro yapıları	85
Resim 8.9. TM kompozit numunesinin SEM görüntüsü	86
Resim 8.10. İnfiltasyon kompozit numunesinin SEM görüntüsü	88
Resim 8.11. %1 takviye malzemesi	94
Resim 8.12. %2 takviye malzemesi	95

Resim	Sayfa
Resim 8.13. %4 takviye malzemesi	95
Resim 8.14. %2 takviye malzemesi	95

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
Al	Alüminyum
B₄C	Borkarbür
B	Bor
C	Karbon
Si	Silisyum
Cr	Krom
Fe	Demir
Zn	Çinko
Cu	Bakır
Mg	Magnezyum
Mn	Mangan
Ni	Nikel
Si	Silisyum
Cr	Krom
Ti	Titanyum
W	Tungsten
Kısaltmalar	Açıklama
MMK	Metal Matrisli Kompozit
Al-MK	Alüminyum Matrisli Kompozitler
TM	Toz Metalurjisi
MA	Mekanik alaşımlama
T-H	Takviye-Hacim Oranı

1. GİRİŞ

Malzeme bilimi alanındaki bilimsel araştırmalar devamlı olarak malzeme özelliklerinin gelişimi ve malzemelerin performanslarını artırmak içindir. Mekanik, kimyasal ve fiziksel özellikler hakkındaki bilimsel geliştirmeler, kimyasal iyileştirmeler ve geleneksel termal, mekanik ve termomekanik işlem metotlarını geliştirmeye yöneliktir. Gelişmeler daima geleneksel malzeme tasarımıından “daha yüksek sıcaklıklara dayanabilen, daha güçlü, daha katı ve daha hafif” olarak tasarlanma yönünde istenmektedir ve malzemelerin özelliklerini geliştirme yönündedir. Yüksek teknoloji endüstrileri bu istekleri canlandırmaya izin vermektedir [1].

Yirminci Yüzyıl’ın ikinci yarısından sonra, geleneksel malzemelerin hızla gelişen teknolojinin ihtiyaçlarını karşılayamaz hale gelmesiyle, malzeme bilimi alanındaki araştırmalar hız kazanmış ve geleneksel malzemelere oranla daha üstün özelliklere sahip yeni malzemeler üreilmeye başlanmıştır. Bu yeni malzemelerden birisi de kompozitlerdir. Kompozit malzemelerin düşük yoğunluğa karşı sergiledikleri mükemmel dayanım özellikleri, farklı birleşim ve geometrilerde üretilebilmeleri, yorulma, tokluk, yüksek sıcaklık, oksitlenme ve aşınma dayanımlarının yüksek olması nedeniyle demiryolu, otomotiv, denizcilik, havacılık, tıp, uzay ve spor gibi endüstriyel alanlarda gün geçtikçe kullanımları artmaktadır [2].

Kompozit malzemelerin üretiminde bütün mühendislik malzemeleri yaygın olarak kullanılmakta ve her geçen gün farklı takviye elemanları denenmektedir. Alüminyum, magnezyum, silisyum ve alaşımları Metal Matrisli Kompozit (MMK) üretiminde, hafif ve sünek olmalarından dolayı en çok kullanılan matris malzemeleridir. Doğada çok bulunan, işleme kolaylığı olan, hafif, korozyon direnci ve takviye edilebilirlik gibi özelliklere sahip alüminyum gibi malzemeler genel tercih sebebini oluşturmaktadır. Kompozit malzemelerin bu özellikleri, takviye elemanı sayesinde daha da geliştirilerek, yüksek çekme mukavemeti, ergime sıcaklığı, ısıl kararlılık, kolay üretilebilirlik gibi özelliklerinin artırılması söz konusudur.

Alüminyum matrisli kompozitlerin üretilmesinde SiC, Al₂O₃, C, SiO₂, MgO, TiC ve B₄C gibi farklı takviye elemanları kullanılmaktadır [3].

Al-B₄C kompozitleri üzerinde özellikle otomotiv endüstrisindeki uygulamalarda yapılan çalışmalar yeni olmakla birlikte artmaya başlamıştır. Bu kompozitlerin üretimindeki ana sorun, matris metali ile takviye partikülleri arasındaki düşük ıslanmadır. Üretim yöntemlerinden biri olan infiltrasyon yöntemi uygulama koşullarının zorluğuna sahip olup, döküm yöntemi ıslanılabilirliğin en düşük elde edildiği yöntemdir. Bunun yanında toz metalurjisi (TM) yöntemiyle teorik olarak ara yüzey kinetiğinin kontrolü iyi bir şekilde sağlanabilmektedir. Bu yüzden TM ile yapılan çalışmalar ara yüzeydeki ıslatalabilirlik seviyelerini arttırmak üzerine yoğunlaştırılmış olup, gelişmiş fiziki ve mekanik özellikleri verecek olan ekonomik bir yöntem henüz standartlaştırılamamıştır.

Toz metalurjisi gibi yeni üretim tekniklerinin kullanımları yaygınlaşmaya başlamıştır. TM yöntemiyle üretilmiş malzemelerin yüksek kullanım özelliklerini geleneksel metotlarla üretmek neredeyse imkânsızdır. Katı hal metotlarının başında gelen TM yöntemi diğer metotlardan en önemli üstünlüğü denge diyagramlarındaki şartların dışında hemen her tür malzemeye uygulanabilirliğidir. Teknolojik açıdan çok önemli malzeme çeşitleri üretilebilmektedir [4].

İnfiltrasyon yöntemiyle MMK malzeme üretimi oldukça ekonomik bir yöntemdir. Yüksek teknolojilere ve pahalı gereçlere ihtiyaç duyulmaz [5]. MMK'lerde özellikle alüminyum matrisli kompozitlerin üretilmesinde sıvı hal işlemlerinden infiltrasyon yöntemi birçok uygulamada kullanılmaktadır [6,7]. İnfiltrasyon yönteminde % 50'ye varan takviye-hacim (T-H) oranlarında MMK'ler basınçlı, basınçsız ve vakum infiltrasyon yöntemiyle üretilebilmektedir. İnfiltrasyon yönteminde kılcal basınç, infiltrasyon süresi, sıvı metal sıcaklığı, alaşım, takviye hacim oranı ve parçacık boyutu, işlem parametreleri olarak ele alınmaktadır. Sıvı hal işlemleri katı hal işlemlerine göre daha ekonomik olmasına rağmen, birçok seramik malzemenin alüminyum matris tarafından ıslatılması oldukça zordur. Bu durum seramik ile metal ara yüzeyinde ıslatmama, boşluk ve eksik infiltrasyona sebep olmaktadır [8].

Bu çalışmada toz metalurjisi ve vakumlu infiltrasyon yöntemi ile üretilen Al-B₄C kompozitlerinin üretimi gerçekleştirilmiştir. Her iki üretim metodu ile üretilen Al-B₄C kompozitleri 560°C'de sinterleme işlemi yapılmıştır. Sinterlenen Al-B₄C kompozitleri metalografik işlemlerden geçirilerek mikroyapı, tarama elektron mikroskobu (SEM), EDS ve optik mikroskop ile karakterize edilerek, sertlik ve aşınma gibi mekanik özellikleri test edilmiştir.

2. KOMPOZİT MALZEMELER

2.1. Kompozitler

Kompozit malzeme iki ya da daha fazla değişik malzemenin en iyi özelliklerini yeni ve tek bir malzemede toplamak amacıyla, makro düzeyde birleştirilmesi ile oluşturulan malzemeler olarak adlandırılır [1]. Kompozitler hakkında uygun bir ortak tanım yoktur. Fakat herhangi bir tanım genellikle şu noktaları içermelidir.

1. Kompozit, iki ya da daha fazla fiziksel olarak ayrı ve mekaniksel olarak ayrılabilir malzemelerden meydana gelir.
2. Kompozit, iki farklı malzemenin birisinin (takviye malzemesi) diğeri (matris malzemesi) içerisinde dağılımıyla meydana gelir.
3. Kompozitlerin özellikleri kompoziti meydana getiren malzemelerin özelliklerinden çok farklıdır. Bazı durumlarda özellikleri çok üstündür.

Mühendislikte, metaller, plastikler ve seramikler olmak üzere üç grup malzeme yaygın olarak kullanılmaktadır. Kompozitlerin üretiminde hemen hemen bütün mühendislik malzemeleri matris malzemesi olarak kullanılırken gün geçtikçe farklı takviye elemanları denenmektedir. Kompozit malzeme genellikle parçacık veya elyaf şeklindeki takviye elemanlarıyla güçlendirilmiş bir bağlayıcı (matris) malzemedir müttesektedir [2].

2.2. Kompozitlerin Sınıflandırılması

Kompozitler genellikle kullanılan matris malzemesi ve takviye elemanının şekline ve cinsine göre sınıflandırılırlar. Matris malzemesine göre kompozitler;

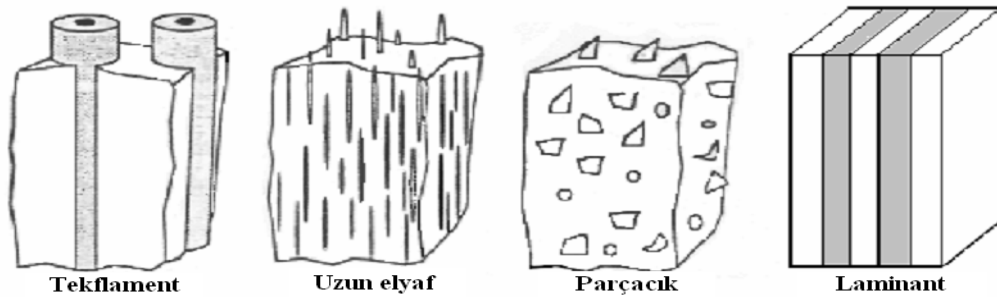
- a. Polimer matrisli kompozitler
- b. Seramik matrisli kompozitler
- c. Metal matrisli kompozitler

Polimer matrisli kompozitler, düşük yoğunluk, ekonomiklik, kolay üretilebilirlik, mekanik özelliklerinin iyi olmaları ve yalıtkanlık gibi özelliklerinden dolayı endüstride yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Kompozit malzemelerin sıcaklık dayanımını büyük oranda matris malzemesi belirler. Plastik esaslı kompozitlerin ısı dayanımlarının düşük olması onların bir dezavantajıdır. Plastik esaslı kompozitler; yayma yöntemi, basma kalıplama ve transfer kalıplama, soğuk pres kalıplama, helisel sarma, torba kalıp ve profil çekme yöntemleri kullanılarak üretilirler [3].

Seramikler ergime sıcaklıkları yüksek, yoğunlukları ve ısı genleşme katsayıları düşük, yalıtkan ve sert malzemelerdir. Ancak aşırı derecede gevrek malzemelerdir. Kimyasal ve ısı etkilere karşı dirençleri yüksektir. Metaller saf halde yumuşak ve dayanımları düşük ancak alaşım yapılmak suretiyle sınırsız özellikler elde edilebilir. Metaller çoğunlukla seramik, nadiren refrakter takviye elemanları ile güçlendirilerek metal matrisli kompozit malzemeler üretilmektedir. Şekil 2.1'de takviye elemanının şekline göre kompozit çeşitleri görülmektedir.

Takviye elemanının şekline göre kompozitler;

- a. Tekfilament
- b. Uzun ve kısa elyaf (Fiber)
- c. Parçacık
- d. Laminant (Katmerli), olarak sınıflandırılırlar.



Şekil 2.1. Takviye elemanının şekline göre kompozit çeşitleri [3].

Kompozit malzemeleri detaylı olarak belirtmek için kullanılan matris ve takviye elemanını belirterek ifade edilmesi yaygın bir uygulamadır. (Al matris, Ti matris SiC fiber, Al₂O₃ parçacıklı veya Al / SiC kompozitler gibi)

2.3. Metal Matrisli Kompozitler

Metal matrisli kompozitler (MMK), ana yapıyı metalin oluşturduğu ve takviye elemanı olarak da seramik ya da refrakter bir takviye elemanın kullanıldığı kompozitlerdir. Bu malzemelerin seçiminde hemen hemen hiçbir sınırlama yoktur. Deneysel çalışmalara bakıldığında çok farklı türlerin kullanıldığı göze çarpar. Son 45-50 yıldır MMK'ler ile ilgili pek çok araştırma yapılmış ve literatürde olumlu şekilde yer almıştır [4-10]. Ancak bunların optimum kullanım şartlarının belirlenmesinde ve pratikte kullanılmasında temel bazı şartlar aranır. Bunları şöyle sıralamak mümkündür;

1. Yüksek elastikiyet modülü.
2. Yüksek mukavemet.
3. Yüksek tokluk ve darbe özellikleri.
4. Yüksek elektrik ve termal iletkenlik.
5. Isıl şoklar ve sıcaklık değişikliklerine karşı düşük hassasiyet ve iyi sürünme direnci.
6. Sürekli mükemmel özellik.
7. İyi yüzey dayanımı ve yüzey çatlaklarına karşı düşük hassasiyet.
8. Tasarım, üretim, biçimlendirme, birleştirme ve son işleme bakımından mükemmel teknolojik birikim [11-18].

2.3.1. MMK'ler için matris malzemeler

Matris malzemeleri takviye elemanlarını bir arada tutarak birkaç kritik fonksiyonu da yerine getirirler. Matris malzemeleri takviye elemanlarına yük aktarımı yaparlarken takviye elemanlarını aşınmaya ve korozyona karşı korurlar. Takviye elemanlarından kırılğan çatlakların yayılmasını engeller. Matris malzemeleri kayma, basma,

akma, sürünme, dielektrik ve termomekanik özelliklerini de belirler [19]. Kompozit malzemelerde matristen beklenen özellikler başta hafiflik olmak üzere korozyon direnci, kırılma tokluğu ve takviye elemanı ile uyumluluğudur.

Metal matrisli kompozitler için hemen hemen bütün mühendislik malzemeleri matris olarak kullanılabilir. Bunların başlıcaları Al, Ti, Mg, Cu, Fe, Co, Mo, ve Ni gibi metaller ile bunların alaşımlarıdır. Alüminyumun hafifliği, işleme kolaylığı, korozyon direnci ve takviye elemanı ile uyumluluğu, en yaygın kullanılan matris malzemesi olmasında etkili olmuştur. Alüminyumun düşük ergime sıcaklığı yüksek sıcaklıklarda kullanımını sınırlandırmaktadır. Bu durumlarda titanyum ve alaşımları çok kullanılan matris malzemelerdir. Ayrıca özellikleri takviye elemanı sayesinde daha da geliştirilerek, yüksek çekme mukavemeti, ergime sıcaklığı, termal kararlılık, kolay üretilebilirlik özelliklerinin artırılması söz konusudur.

Ayrıca magnezyumun da matris malzemesi olarak kullanılması her geçen gün yaygınlaşmaktadır. Mg ve alaşımları düşük yoğunluklarından dolayı otomotiv ve uzay sanayinde kullanılmaktadır. Mekanik ve fiziksel özellikleri kullanılmasına sınırlama getirmekle birlikte, seramik parçacıklarla kullanılarak bu sınırlamalara rağmen aşınma direnci ve genişleme özellikleri geliştirilerek mühendislik malzemesi olarak kullanılmaktadır [20].

2.3.2 MMK'ler için takviye elemanları

Kompozit malzemelerde takviye elemanının görevi yükü taşıyarak matrisin dayanımını arttırmaktır. Kompozitlerde takviye elemanları tekflament, kısa fiberler (viskerler), uzun fiberler veya parçacıklar şeklinde bulunabilirler. Yüksek elastikiyet modülü, düşük yoğunluk, yüksek çekme mukavemeti, termal kararlılık, matris malzemesi ile uyumluluk takviye elemanlarından beklenen özelliklerdir [21-26].

Metal matrisli kompozitlerde kullanılan başlıca takviye elemanları Al_2O_3 , SiC, B_4C , TiB_2 , TiC, WC, W, ve C dir.

2.4. Kompozit Üretim Yöntemleri

Kompozit malzemelerin mekanik özellikleri matris ile takviye elemanı ikilisinin uyumlu ve iyi bir bağ oluşturmalarına bağlıdır. Bu bağların kalitesi matrisin takviye elemanını iyi ıslatabilmesinin yanı sıra seçilen üretim yöntemi ile de yakından ilgilidir. Üretim yöntemleri olarak;

- a. Sıvı hal işlemleri,
- b. Katı hal işlemleri,
- c. İn-situ işlemler olmak üzere üç ana grupta bahsedilebilir [19].

2.4.1. Sıvı hal işlemleri

Sıvı hal üretim işlemleri, ergitilmiş matris malzemelerinin takviye elemanları ile herhangi bir şekilde temasa geçirilerek aralarında bağ oluşturma işlemleridir [27]. Yaygın olarak kullanılan sıvı hal üretim işlemlerini şöyle sıralamak mümkündür.

1. İnfiltrasyon
2. Sıkıştırılmalı döküm
3. Basınçlı döküm
4. Yarı katı döküm
5. Karıştırmalı döküm
6. Püskürtme çökmesi

İnfiltrasyon yöntemi normal atmosferde veya vakumlanmış kalıplarda ön şekil verilmiş (preform) parçalar içerisinde sıvı metalin basınçlı veya basınçsız olarak doldurulması işlemidir [28]. Katılaşma sırasında gözeneklerin yüzeyleri çekirdekleşme bölgeleri olarak davranıp ince tanelerin oluşmasında yardımcı olur. Bu yöntemlerle özellikle magnezyum ve alüminyum alaşım matrisli kompozitler başarı ile üretilmektedir.

Sıkıştırılmalı döküm yönteminde, takviye elemanından oluşan blok parça kalıba yerleştirilerek sıvı metalin kalıp içerisine 70-100 MPa basınç altında dökülmesi ve basınç altında katılaştırılması ile kompozit malzeme üretilmektedir [2, 29]. Basınç altında döküm ve katılaşmadan dolayı parçalarda gözenek, gaz boşlukları ve çekme gibi döküm hataları yok denecek kadar azdır. Sistemin yüksek hidrolik basınç gereksinimi, büyük parçaların üretimine imkan vermemesi gibi dezavantajları söz konusudur. Basınçlı dökümde sıkıştırılmalı döküme benzer fakat kullanılan yükler daha düşüktür. Genellikle 10-15 MPa basınç bu tür dökümler için yeterli görülmekte ve büyük boyutlu parçaların üretilmesi mümkün olmaktadır [30].

Savurma döküm yönteminde de merkezkaç kuvvetinden yararlanılarak, sıvı metal döner kalıp içerisine basınçla gönderilir. Döküm parçaların basınç altında yönlü katılaşması sağlanır. Genellikle silindirik ve simetrik parçaların dökümü yatay eksenli olarak yapılırken, simetrik olmayan parçalar bir dikey yolluk etrafında sıralanarak dökülebilirler. Gaz boşlukları ve inkilüzyonlar merkezkaç kuvvetinin etkisiyle içyüzeyde toplanırlar. Yoğunluk farklılığının fazla olduğu metallerin dökümünde yaygın olarak segregasyon hatası görülmektedir [31-35].

Yarı katı döküm işleminde parçacıklar veya kısa fiberlerin sıvıya ilave edilip karıştırılması ve yarı katı hale getirilerek veya önceden yarı katı hale getirilmiş sıvı içerisine takviye elemanlarının katılarak dökülmesi işlemidir. Bu yöntemde parçacıkların yüzme ve çökme gibi problemlerinin en aza indirilmesi mümkündür [36].

Karıştırılmalı döküm yönteminde takviye elemanları sıvı metal içerisine ilave edilip karıştırılır ve homojen bir karışım sağlandıktan sonra kalıplara dökülerek katılaşmaya bırakılır. Homojen bir yapı elde edilirken gözenek ve boşluklar sistemin başlıca problemiştir.

Püskürtme çökmesinde bir atomizerden akan sıvı içerisine takviye elemanı tozlarının katılarak atomize edilen yarı katı damlacıkların bir kalıp üzerinde toplanması ile matris ve takviye elemanları karıştırılır. Toz metalürjisi tekniği

ile kompozit üretimi sağlanır. Atomize olan tozların hızlı soğumasından dolayı ince tane yapıları elde edilir. Bu metod da alüminyum gibi ergime derecesi nisbeten düşük olan metallere uygulanmalıdır. Son parçanın şekli ise atomize etme şartlarına, toplayıcı kalıp hareketine ve şekline bağlıdır [3].

2.4.2. Katı hal işlemleri

Katı hal üretim yöntemlerinde matris malzemesinin ergime sıcaklığı altındaki bir sıcaklıkta farklı işlemler uygulanarak kompozit malzeme üretilir. Katı hal üretim yöntemlerinin başlıcaları;

- 1- Toz metalürjisi
- 2- Difüzyonla birleştirme
- 3- Sıcak haddeleme

Toz metalürjisi yöntemi en yaygın kullanılan kompozit malzeme üretim tekniğidir. Bu yöntemle toz halindeki matris ve takviye elemanları birlikte karıştırılarak mekanik olarak alaşımlanır ve istenilen şekli oluşturmak için kalıba konularak preslenir. Preslemeden sonra sinterleme işlemi uygulanır. Sinterleme sonrasında püskürtme veya haddeleme gibi ikincil işlemler son şekil verme için gerekli olabilir.

% 15 SiC katkılı Al tozlarını MA yöntemiyle üretilmesi ve Al-SiC tozlarının mekanik alaşımlama değirmeninde öğütme zamanının kompozit toz yapısını etkisinin araştırılması adına yapılan bir çalışmada, artan alaşımlama süresi ile katmanlı bir yapı oluşmuş ve bu katmanlar arasına takviye SiC partikülleri giderek homojen bir yapı oluşturmuş ve kompozitlerin sertlik değerinde artış olduğu tespit edilmiştir. Optimum toz boyutuna erişilmediğinden daha uzun süreli MA işlemine ihtiyaç duyulduğunu belirtmişlerdir [37].

Yapılan bir çalışmada Al/SiC tozlarını 200 MPa preslemiş ve 600 °C sıcaklıkta 3 saat süreyle 1,5 MPa vakumda sinterleyerek homojen bir yapıda kompozit

üretmişlerdir. MA işleminden dolayı 10-100 µm büyüklüğündeki SiC tozlar Al tozları içerisinde homojen dağılmış ve SiC tozlar matris boşluklarını daha iyi doldurmuştur. Daha küçük SiC tozlarının daha az gözenek oluşturduğunu ve bu tozların öğütme işlemi sırasında daha az kırılma riski taşıdığını belirtmişlerdir [37-40].

Difüzyonla birleştirme yönteminde levha veya yaprak şeklindeki matris malzemeleri ile levha veya uzun fiber şeklindeki takviye elemanları üst üste konularak birlikte ergime sıcaklığının altında bir sıcaklıkta preslenerek difüzyon birleşmeleri sağlanır [41-43]. Matris ve takviye elemanlarının birleşecek yüzeylerinin düzgün, temiz ve oksitsiz olması difüzyonla birleşmenin başarısında önemli bir rol oynar.

Sıcak haddeleme işlemleri difüzyonla birleştirme işlemine benzer. Bu yöntemde levha halindeki matrisler ile bunların arasına konulan fiberler yüksek sıcaklıklarda haddelenir. Daha sonra basınç kaldırılır ve termal uzamalarda uyumsuzluklardan ileri gelen kalıcı gerilmeleri en aza indirmek için, komple parça yavaş şekilde soğumaya bırakılır [44, 45]. Geliştirilen yöntemlerle takviye fazının hacimsel oranı % 40'a kadar çıkarılmıştır [46-48].

Fiberlerin fiziksel buhar çökmesi (PVD) veya kimyasal buhar çökmesi (CVD) gibi teknikler ile kaplanarak birlikte preslenmeleri ile kompozit malzeme üretimi de yapılabilmektedir [1,3].

2.4.3. İn-situ işlemler

Bu tür kompozit üretim tekniklerinde malzeme içerisinde farklı fazların oluşturulması ve bu fazlardan birinin veya bazılarının matris; diğerlerinin de takviye elemanı olarak davranması ile kompozit üretimi sağlanır. Bu işlemlerde farklı birkaç yöntem kullanılır.

1. Ötektiklerin yönlü katılaştırılması
2. Tercihli yönlendirilmiş metal oksidasyonu
3. Ekzotermik reaksiyon işlemi

Ötektik bileşimde olan bir ergiyik kontrollü olarak katılaştırılırsa yan yana dizilmiş iki farklı fazda katılırlar. Fazlardan biri yeterli miktarda ise enerji bakımından fiber oluşturmaya elverişlidirler [48].

3. ALÜMİNYUM MATRİSLİ B₄C TAKVİYELİ KOMPOZİTLER

Uzun bir zamandır, MMK'ler de matris malzemesi olarak alüminyum alaşımları çok geniş olarak, hem araştırma ve geliştirmede hem de endüstriyel uygulamalarda kullanım alanı bulmaktadır. Bu alüminyum alaşımlarının düşük yoğunluğundan dolayı olmuştur. Dahası diğer düşük yoğunluklu metallerle (Mg, Ti gibi) karşılaştırıldığında daha ucuzdur. Ayrıca, gösterdiği iyi korozyon direnci, düşük elektriksel direnç ve mükemmel mekanik özelliklerinden dolayı metal matrislerde odak noktası olmuştur. Bu özelliklere ilaveten hafifliği, sinterlenmiş alüminyum ürünlerinin düşük kompaktlama basıncı ve düşük sinterleme sıcaklığından kaynaklanan enerji tasarrufu, otomotiv endüstrisinde alüminyum matrisli kompozitlerin, bazı demir bazlı parçaların yerine tercih edilmesine sebep olmuştur. Sonuçta alüminyum ve alaşımları, havacılıktan otomotiv sanayisine kadar olmak üzere birçok endüstriyel alanda yüksek kullanıma sahip olduğundan çok iyi bilinmektedir. Matris malzemesi olarak büyük ölçüde 2xxx, 6xxx ve 7xxx alüminyum alaşımları kullanılır. Son zamanlarda iyi ıslatma özelliğinden dolayı 8xxx alaşımları da araştırmacıların dikkatini çekmektedir [49].

Al-MK'de takviye malzemesi olarak SiC ve Al₂O₃ en yaygın kullanıma sahiptir. B₄C ise sahip olduğu yüksek sertlik ve mukavemet ile düşük yoğunluk özelliklerine rağmen yüksek maliyeti sebebiyle kompozitlerde kullanımı üzerinde fazla çalışılmamıştır. Çok az malzemedede bulunan, sıcaklıkla çekme mukavemetinin artması da B₄C'yi diğer takviye malzemelerine göre ön plana çıkarmaktadır [49,50].

Çizelge 3.1. Al-MK'lerde başlıca kullanılan takviye malzemeleri

Takviye Malzemesi	Yoğunluk ($\times 10^3 \text{ kgm}^{-3}$)	Isıl Genleşme Katsayısı (10^{-6} C^{-1})	Ergime Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Mukavemet (MPa)	Elastiklik Modülü (GPa)
Al_2O_3	3,98	7,92	2100	221 (1090 $^{\circ}\text{C}$)	379 (1090 $^{\circ}\text{C}$)
SiC	3,21	5,4	2750	-	324 (1090 $^{\circ}\text{C}$)
C	2,18	-1,44		-	690
SiO_2	2,66	<1,08	1710	-	73
AlN	3,26	4,84	2375	2069 (24 $^{\circ}\text{C}$)	310 (1090 $^{\circ}\text{C}$)
B_4C	2,52	6,08	2420	2759 (24 $^{\circ}\text{C}$)	448 (24 $^{\circ}\text{C}$)

B_4C takviyeli kompozitin proses problemleri ve mekanik özelliklerinin sınırlılıkları, Al'un katılımıyla önemli ölçüde azalabilmektedir. Al- B_4C kompozitlerinin parçacıklı olmasının amacı, daha büyük oranda içeriğe sahip olmak (hacimsel olarak > %55) tır. Güçlü bir iç yüzey bağlanmasını sağlamak için ve sinterleme sırasında sıvı artış aralığına izin vermek için, matris ile takviye partikülleri arasında ıslanma gerçekleşmesi gerekir. Eğer gerçekleşmezse birleşmeyi arttırmak için dış basınç uygulanmak zorundadır. Fakat her basınç tekniği bazı yüksek seramikli kompozitler (hacimsel olarak > %60) için uygun olmayabilir

Alüminyum matrisli kompozitlerde başlıca kullanılan üretim yöntemleri sıvı metal infiltrasyonu ve döküm yöntemleridir. Bunun yanında TM yöntemi, gerek nihai malzeme özelliklerinin kontrolünde sağladığı avantajlar gerekse yüksek sıcaklıklara çıkmayı gerektirmeyen proses şartlarıyla diğer yöntemlere göre avantajlıdır.

Al- B_4C kompozitlerinin üretimindeki ana sorun, matris metali ile takviye partikülleri arasındaki düşük ıslanmadır. Bu konudaki mevcut çalışmalar, matris metali ile takviye partikülleri arasındaki ıslatma sorunu üzerinde yoğunlaşmıştır. Islatma problemi takviye partiküllerine bazı önlemler uygulanarak aşılmaya çalışılmıştır. Literatürde Al- B_4C kompozitlerinin üretimi için önerilen infiltrasyon ve TM gibi yöntemler, nispeten iyi mekanik özellikler verse de işlem maliyetleri yüksek olmaktadır. Bunun yanında düşük sıcaklıklarda döküm yöntemi üzerine yapılan çalışmalarda genel olarak ara yüzeydeki ıslatılabilirlik problemlerinin aşılması

üzerinde yoğunlaştırılmış olup, gelişmiş fiziksel ve mekanik özellikleri verecek olan yöntem henüz standartlaştırılmamıştır. Araştırmacılar Al-B₄C kompozitlerinin aşınma uygulamaları için kullanılabilceğini belirtmekle birlikte, nihai üretim yöntemi ve mukavemet artırıcı yöntemler üzerinde yeterince sonuç ortaya koyulamamıştır [49,50].

3.1. B₄C Tozu ve Özellikleri

Alüminyum ve alaşımları, aşınma davranışını ve mekanik dayanımı geliştirmek için seramiklerle takviye edilirler. Alüminyumun kolay elde edilebilir olması, düşük yoğunluklu olması ve uygun üretim şartları altında B₄C ile tepkime oluşturması nedeniyle takviye elemanı olarak B₄C tercih edilmektedir. Düşük yoğunluklu Al kompozit üretmek amacıyla, rijitliği yüksek ve sert B₄C ile sünek alüminyum birleştirilir [51].

B₄C, elmas ve kübik yapılu bor nitrürden sonra bilinen en sert (9.5+Mohs skalasında) üçüncü malzemedir. Nötron absorpsiyonu, sürünme direnci ve darbe dayanımı isteyen uygulamalar için farklı avantajlara sahip, kovalent bağlı seramik yapıdadır. Ayrıca seramiklerin en hafifidir. Bu yüzden kompozitin toplam ağırlığını arttırmadan mekanik özelliklerini geliştirmede kullanılabilir. B₄C ile çalışılırken dikkat edilmesi gereken dezavantajı, B₄C'nin yüksek sertliğinden dolayı kompozitin ekstrüzyon yapabilme kabiliyetinin limitli olmasıdır. Tamamen yoğun mikroyapıların üretiminde karşılaşılan sorunlar ve gevrek kırılmaya karşı B₄C'ün aşırı hassasiyeti bu takviye malzemesinin sahip olduğu sınırlılıklardır [51].

3.2. Alüminyum Matrisli – B₄C Takviyeli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

3.2.1 İnfiltrasyon yöntemi ile üretimi

İnfiltrasyon yöntemi, Al-B₄C kompozitlerinin üretiminde sık kullanılan bir yöntemdir. Bununla birlikte; Al'un B₄C üzerindeki düşük ıslatabilirliği nedeniyle endüstride bu işlem çok yüksek sıcaklıklarda (1200 °C) uygulanmaktadır.

Gözenekli B₄C preformu, Al ile infiltre edilir. Yeterli ısıtmanın ardından başlayan infiltrasyon yüksek sıcaklıklarda meydana gelir. Yüksek içerikli B₄C kompozitlerinin imalatı için, metalle infiltrasyonda, seramik preformlar 800-900°C'de kısmen (bölgesel olarak) sinterlenir.

3.2.2 Döküm yöntemi ile üretimi

Döküm yöntemi, diğer MMK'lerde olduğu gibi, Al-B₄C kompozitlerinde de düşük maliyetli olması nedeniyle tercih edilebilir. Ancak Al ile B₄C arasındaki ıslanabilirliğin 1100°C' nin altındaki sıcaklıklarda düşük olması, Al-B₄C kompozitlerinin bu sıcaklıklarda döküm yoluyla üretiminin zor olduğu anlamına gelmektedir. B₄C partiküllerinin Al üzerindeki ıslatılabilirliğini artırmak ve sıvı alüminyum ile birleşebilirliğini kolaylaştırmak için, partiküller genellikle ısı işleme tabi tutulur veya kaplanırlar [49,50].

3.2.3 Toz Metalurjisi yöntemi ile üretimi

Toz metalurjisi yöntemi, matris alaşımı ve takviye elemanı tozlarının bir karıştırıcı yardımıyla karıştırılmasını, karıştırılan tozların preslenmesini ve sinterlenmesini içerir. Bu yöntem tamamen katı halde gerçekleştiğinden, gerekli sıcaklık diğer yöntemlerden daha düşüktür. Bu yöntemde, kuvvetli ara yüzey reaksiyonlarının oluşmaması ve matris-takviye elemanı arasında istenmeyen reaksiyonların minimize edilmesi yöntemin avantajıdır [49,50].

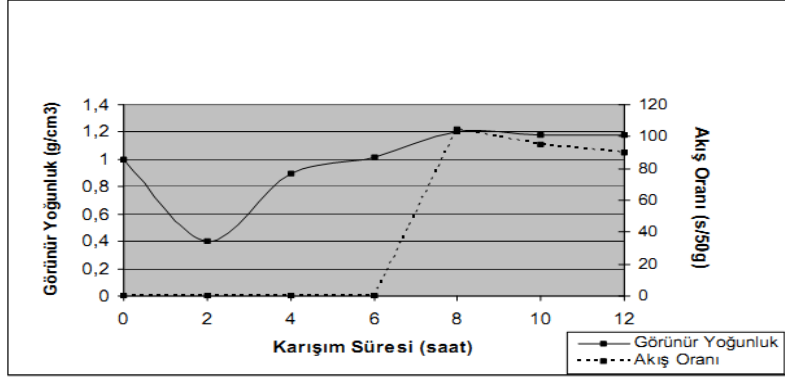
3.3 Alüminyum-B₄C Kompozitleri- Literatürdeki Çalışmalar

Literatürde henüz Al-B₄C kompozitleri ile ilgili yeterli bir çalışma bulunmamaktadır. Mevcut çalışmalar daha çok infiltrasyon ve döküm üzerine yoğunlaşmıştır. Bunun yanında toz metalurjisiyle yapılan çalışmalar ara yüzeydeki ıslatılabilirlik seviyelerini arttırmak üzerine yoğunlaştırılmış olup, gelişmiş fiziksel ve mekanik özellikler üzerine çalışmalar devam etmektedir [49,50].

Yapılan çalışma göstermiştir ki; bor karbür katılmış kompozitlerin proses problemleri ve mekanik özellik sınırlılıkları; metal bir fazın katılımıyla önemli ölçüde azaltılabilir. Düşük ergime noktalı metal bir faz (Al veya Al alaşımları) kullanılarak B_4C 'nin kırılma tokluğu artırılabilir [49].

Yapılan bir çalışmada; Al- B_4C kompozitleri, TM yöntemiyle üretilmiş, aşınma ve korozyon dirençleri araştırılarak optimum üretim parametreleri saptanmaya çalışılmıştır. Yapılan deneylerin sonucunda, B_4C takviye oranının artması ile aşınma direnci de artmıştır; fakat belirli bir takviye oranından sonra (%9 B_4C) kompozitin sertliği artmasına rağmen aşınma direnci düşmüştür. %9 B_4C içeren kompozite uygulanan ara deformasyon ile korozyon direnci artmıştır. B_4C içeriğinin artmasıyla korozyon direnci azalmıştır. Sertlik kriter alınarak yapılan değerlendirmede; optimum üretim parametrelerine 570 °C'de atmosferik ortam koşullarında, 12 saat süre ile yapılan sinterleme neticesinde ulaşılmıştır [52].

Yapılan diğer bir çalışmada; Al- B_4C kompozitleri üretiminde TM yöntemi kullanılmışlardır. Bu kompozitlerin üretiminde ana problem olan homojeniteyi, mekanik alaşımlama ile çözmeye çalışmışlardır. Al- B_4C toz karışımı 12 saat süreyle karıştırılmış ve her 2 saatte bir, karışım tozunun yoğunluk ve akış oranı ölçülmüştür. Şekil 3.1'de görüldüğü gibi; 2 saatlik karıştırma işleminde gevrek fazların çatladığı, sünek fazların deformasyona uğradığı görülmüştür; karışımın görünür yoğunluğu düşüktür. 4 saat sonunda uniform bir tane boyutuna ulaşılmış fakat yer yer ince parçalar görülmüştür. Bu ince parçalar kayboldukça görünür yoğunlukta artma gözlemlenmiştir. 8 saat sonunda tozların yeterince karıştığı, partiküllerarası birleşmelerin tamamlandığı ve görünür yoğunluğun sabit kaldığı; 12 saatlik karıştırma sonunda üretilen karışımda topaklaşmaların olduğu görülmüştür [49].



Şekil 3.1. Al-B₄C tozlarının karışım süresinin görünür yoğunluk ve akış oranlarına etkisi [49].

4. TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİ

Seramik partiküllerin sıvı alaşım tarafından ıslatılmasındaki güçlük nedeniyle ilk olarak geliştirilen kompozit üretim yöntemi Toz Metalurjisi (TM) dir. Bu yöntemde whisker veya partikül şeklindeki takviye malzemesi ile metal veya alaşım tozları karıştırılır. Bu karışım daha sonra soğuk ya da sıcak presleme ile kalıplanır. Soğuk preslemeden sonra ürün, partikül veya matris ara yüzey mukavemetinin artırılması amacıyla sinterlenir. Sinterleme sonrasında %75-85 yoğunluğa sahip ara ürün elde edilir. Bu ara ürün daha sonra dövülür, haddelenir ya da ekstrüze edilir.

TM yöntemi genelde, takviyelenecek parçacıklara sahip matris alaşımının tozlarının karışımını, preslenmesini ve katı hal sinterlemesini içerir. Bu, takviye ile matris arasındaki az reaksiyonun olduğu, diğer yöntemlerden daha düşük sıcaklıkların kullanılması anlamını taşır. İyi bir mikroyapı elde edebilmek için karışımda bütün parçacıkların homojen dağılması önemlidir [53].

TM, çeşitli metal işleme teknolojileri arasında en farklı üretim tekniğidir. Yüksek kaliteli ve karmaşık parçaların ekonomik olarak üretilmesi, TM’i cazip kılmaktadır. TM, farklı boyut, şekil ve paketlenme özelliğine sahip tozları hassas, sağlam ve yüksek performanslı parçalara dönüştürür. Bu işlem; şekillendirme veya presleme ve daha sonra parçacıkların sinterleme yoluyla ısıl bağlanması basamaklarını içerir. TM nispeten düşük enerji tüketimine, yüksek malzeme kullanımına ve düşük maliyete sahip otomatikleşmiş işlemleri verimlice kullanır [52,53].

4.1 Toz Özellikleri ve Karakterizasyonu

TM ile imal edilen parçaların özelliklerini büyük oranda bu parçaların imalinde kullanılan tozların sahip olduğu özellikler belirlemektedir. Bu nedenle tozların özelliklerinin önemi ve aldıkları rolün anlaşılması önemlidir. Sinterlenmiş parçaların özellikleri toz boyutu, boyut dağılımı ve yüzey şartları gibi toz özellikleri tarafından etkilenir. Tozların görünür yoğunluğu, yani preslenmemiş ve yerleşmemiş tozların

verilen hacminin kütlesi, önemli bir parametredir. Görünür yoğunluk tozlardaki boşluk derecesi ve toz şeklinin bir fonksiyonudur. Toz şeklinin karmaşıklaşması ve gözenekliliğinin artması görünür yoğunluğu düşürür. Görünür yoğunluğun düşmesi ise presleme aşamasında hacim azalmasını artırır ve böylece soğuk kaynak miktarını artırır. Neticede daha yüksek ham mukavemetli parça elde edilmiş olur. Parçanın sinterleme verimi de soğuk kaynak miktarının artmasından dolayı artacaktır. Kalıp içindeki tozların paketlenme verimliliği toz boyut dağılımına geniş ölçüde bağlıdır. Büyük tozlar arasında oluşan boşluklar küçük boyuttaki tozlar ile doldurulabilir.

Tozların fiziksel özelliklerinden olan toz şekli, toz boyut dağılımı ve spesifik yüzey alanı tozların, ham yoğunluğuna, sıkıştırılma işlemi sırasında kalıba akış davranışlarına, sıkıştırılabilirliğine ve sinterleme sonrası davranışlarına, örneğin dayanımlarına (green strenght) doğrudan etki etmektedir. Tozların saflığı da çok önemlidir. Müsaade edilebilecek yabancı madde seviyesi büyük oranda maddelerin tamamının yapı ve durumuna bağlıdır. Pek çok metal tozunun ince bir oksit tabakası ile kaplı olması presleme işlemine fazla etkili olmaz. Çünkü tozlar arası sürtünme ile bu tabaka kolayca yırtılır ve açığa çıkan metal yüzeyler hemen soğuk kaynak olurlar [54].

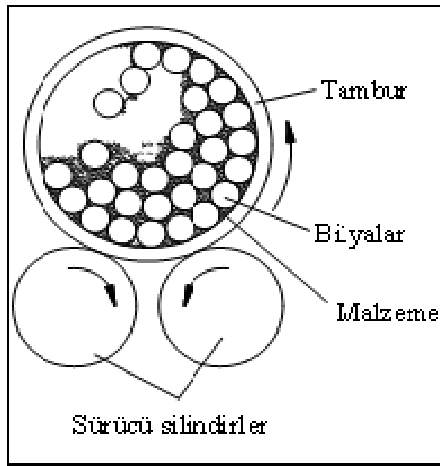
4.2 Toz Metalurjisi İmalat Safhaları

4.2.1 Toz üretimi

Hemen hemen bütün malzemeler toz haline getirilebilir, fakat tozları üretmek için seçilen metotlar malzeme özelliklerine bağlıdır. Öğütme, elektroliz, kimyasal indirgeme ve atomizasyon dört ana toz üretim metodudur. Bu üretim metotlarına ilave olarak, bazı seçilmiş malzemeler için özel toz üretim teknikleri de kullanılır. Endüstride kullanılan tozların % 60'dan fazlası atomizasyon yöntemi ile üretilmektedir [52,54,55].

Öğütme

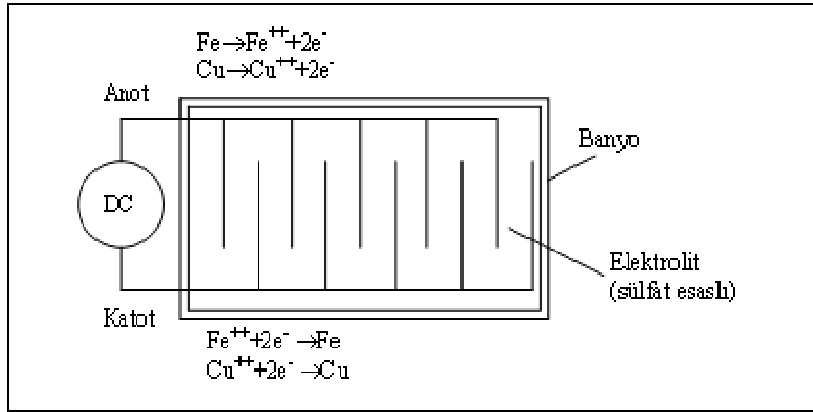
Metaller arası bileşikler, demir alaşımları, demir-krom, demir-silisyum v.b. gibi kırılgan malzemeler mekanik olarak bilyalı değirmenlerde öğütülürler (Şekil 4.1). Fakat öğütme işlemi bir çok sünek metal için uygun değildir; çünkü bu metaller kolayca kırılmazlar. Sünek tanecikler kırılma yerine birbirleri ile soğuk olarak kaynaklanır ve daha büyük tanecik oluştururlar. Günümüzde öğütme işlemi alüminyum gibi sünek metallere pul toz üretiminde de kullanılır. Bu durumda, soğuk kaynaklanmayı ve yapışmayı engellemek için yağlayıcılar kullanılır [52,55].



Şekil 4.1. Bilyalı değirmende toz öğütümü [56].

Elektroliz

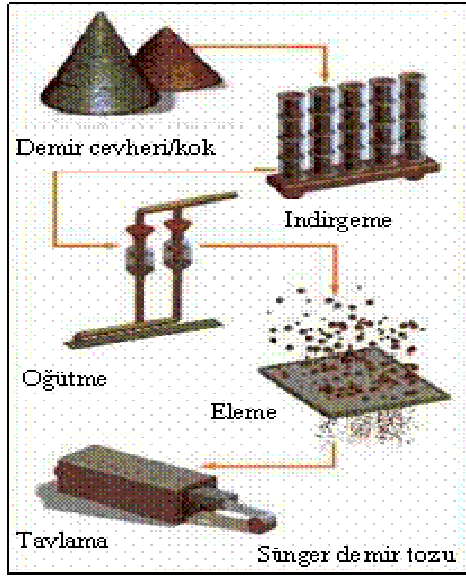
Elektrolitin kimyasal bileşimi ve mukavemeti, sıcaklık, akım yoğunluğu gibi şartları altında seçerek, birçok metal sünger veya toz durumunda katot üzerinde biriktirilmektedir. Sonraki aşamada yıkama, kurutma, indirgeme, tavlama ve öğütme yapılabilmektedir. Bu yöntemle üretilen metallerin başında bakır gelir, aynı zamanda krom ve magnezyum da bu yöntemle üretilir. Elektrolitik yöntemle üretilen tozların saflık değerleri yüksektir [52,55].



Şekil 4.2. Elektroliz ile toz üretimi [56].

Kimyasal İndirgeme

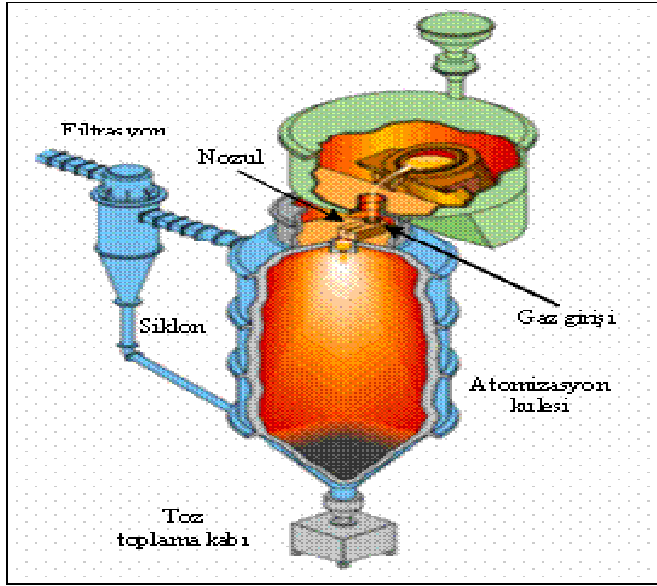
Demir tozlarının üretiminde, bu metot çok kullanılmaktadır. Bu yöntemde seçilen cevher öğütülür, kokla karıştırılır, karışım indirgemenin olduğu sürekli fırından geçirilir ve kek şeklinde sünger demir elde edilir. Sünger demir daha sonra öğütülür, metalik olmayan malzemelerden ayrılır ve elenir. Tozların saflığı ham malzemelere bağlıdır. Düzensiz süngerimsi tanecikler yumuşaktır ve kolayca preslenebilir ve böylece ham mukavemeti iyi olan ürünler oluşur. Benzeri şekilde refrakter metaller de oksitlerinin hidrojenle indirgenmesiyle üretilirler [52,55].



Şekil 4.3. .Kimyasal yöntemle demir tozu üretimi [56].

Atomizasyon

Bu yöntemde toz malzemeler sıvı metalin başka bir katı yüzeye çarpmadan önce küçük damlacıkların hızlı bir şekilde dağılarak katılaşması ile elde edilir (Şekil 4.2). Bu ise sıvı metalin, bir gaz veya sıvı akışkan jeti ile parçalanmasını sağlamak suretiyle gerçekleştirilir. Kullanılan gaz çeşitleri genellikle argon, azot veya hava, sıvı olarak ise su kullanılır. Püskürtme açısı ve konisi, akışkan hızı, debisi, akan metalin kalınlığı gibi birçok parametrenin kontrolü ile çok farklı boyutlarda toz üretimi mümkündür. Katılaşma hızına bağlı olarak parçacığın şekli küresel halden, su veya düşük ısı kapasiteli gaz kullanılması halinde ise daha düzensiz parçacığa kadar farklılık gösterebilir [52,53,55].



Şekil 4.4. Düşey gaz atomizasyon ünitesi [56].

Pratikte bu yöntem ergitilebilen bütün metallere uygulanabilir. Ticari olarak üretilebilen tozlar arasında, demir, takım çelikleri, alaşımlı çelikler, bakır, pirinç, bronz ve alüminyum, kurşun, kalay çinko ve kadmiyum gibi diğer düşük ergime dereceli metal tozları sayılabilir. Krom gibi kolay oksitlenebilen metaller içeren alaşımlar, argon gibi asal gaz altında gittikçe artan oranda üretilmektedir. Atomizasyon yönteminin avantajlarından biri de alaşım tozlarının ergitilmesinde rahatlıkla kullanılabilmesidir, bu yöntemle üretilen tozların bileşimleri her bir toz tanesinde aynı kalmaktadır [52,55].

4.2.2 Tozların ve/veya Alaşımların Karıştırılması

Karıştırma; tek tane boyut dağılımlı toz elde etmek, preslemeyi kolaylaştıracak yağlayıcıları ilave etmek amacı ile yapılır. İşlemin temel sebeplerinden biri, toz içerisindeki nem ve taşıma sırasındaki şartlara bağlı oluşan segregasyonu ortadan kaldırmaktır. Taşıma sırasında büyük tanelerin yukarıda kalması, presleme ve sinterleme aşamasında problem yaratır. Fazla nem miktarı sonucu oluşabilecek aglomerasyonu önlemek için karışım öncesinde düşük sıcaklıklarda kurutma yapılabilir [50].

Toz bileşimlerinin birbiri içerisinde homojen bir dağılım oluşturacak şekilde karıştırılması evresi, TM ile parça üretiminde başlangıç kademesini oluşturmaktadır. Bu safhada, elemental metal tozları ve/veya mekanik özellikleri iyileştirmek amacıyla bazı alaşımsal ilaveler, uygun karıştırıcılarda harmanlanır veya mekanik olarak alaşımlamaya tabi tutulur [52].

Bunu sağlamak için tozlar hassas bir şekilde tartılır, yağlayıcı ve diğer katlı ilaveleriyle bir karıştırıcıya verilir. Karışımı oluşturan tozların tane boyutları ve şekilleri, katkı maddelerinin miktarı karışım kalitesini önemli ölçüde etkilemektedir. Yağlayıcı ilavesiyle ön şekillendirme esnasında kalıp ve zımba aşınmaları azalacak, tozun şekillenmesi kolaylaşacak ve numune kalıptan kolay çıkarılabilecektir.

Karıştırıcı tipi ve karışımın süresi de karışım kalitesini etkileyen faktörlerdendir. Karıştırıcı olarak bilyalı değirmenler, atritör kullanılır. Karışımın süresi, karışımın homojen olarak elde edilebilmesi için önemlidir. Belirli bir zamandan sonra karışım süresi etkili olmamaktadır [54].

4.2.3 Tozların Preslenmesi (Yoğunlaştırma Safhaları)

Tozların preslenmesinde ana amaç, ham yoğunluk ve dayanımın elde edilmesidir. Sıkıştırma, bir yük altında serbest yapıdaki toz partiküllerinin istenilen şekle ve forma dönüştürülmesi için yoğunluk kazandırma işlemi olarak tanımlanabilir. Değişik sıkıştırma teknikleri olmakla beraber en yaygın sıkıştırma yolu, bir çelik veya sert bir metal kalıp içerisinde 300-800MPa basınç altında aksinel preslemedir. Presleme sonrası parça kalıptan çıkarılabilecek yeterli mukavemete sahiptir. TM üretim yöntemi ile elde edilen malzemenin dayanımı presleme ve sinterleme sonrası yoğunluğu ile doğrudan ilgilidir.

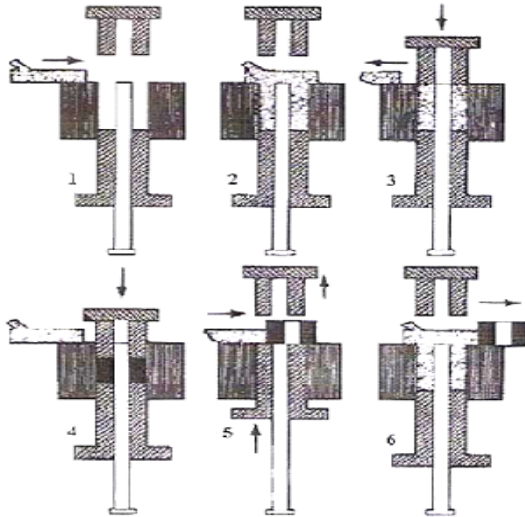
Presleme esnasında tozlar, kalıba doldurulma sırasında sadece yerçekiminin etkisi altında serbest, düzensiz ve gelişigüzel köprücükler kurarak yığılırlar. Bu arada toz partikülleri arasında büyük boşluklar vardır. Kalıbın titreştirilmesi sonucu tozlar kalıp içerisinde daha yüksek yoğunluklu olarak düzene girerler. Bu birinci safha

“paketlenme safhası” olarak adlandırılır. Bundan sonra kalıbın ve presin hareketleri sonucunda tozlar sıkışmaya başlarlar.

Belirli bir basınçtan sonra toz partikülleri ilk önce elastik daha sonra plastik şekil değişikliğine uğrarlar. Şekil değiştirme kabiliyeti olmayan metal tozları ise kırılırlar. Toz taneciklerinin yüzeylerindeki kayma deformasyonu sonucu meydana gelen bu şekil değişiklikleri toz partiküllerine etki eden simetrik ve asimetrik kuvvetler sonucudur. Bu deformasyonlar sonucu toz partikülleri birbirlerine kenetlenerek kümeler oluştururlar. Bir yandan da oksit tabakaları kırılır. Bu safhaya “elastik ve plastik şekil değiştirme safhası” adı verilir.

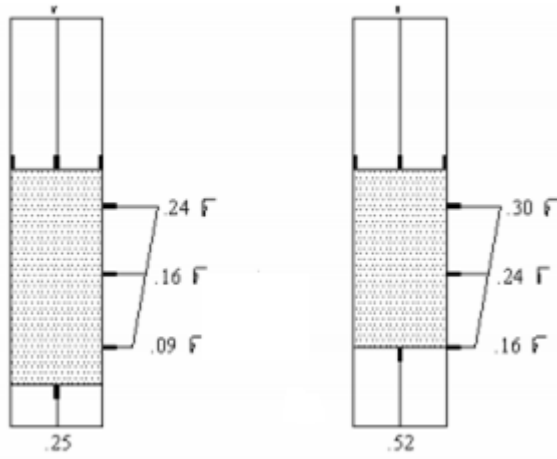
Mekanik kenetlenme olayı esnasında şekil değiştirmiş olan toz partiküllerinin birbirlerine değme alanları da artmıştır. Sıkıştırma sonucu partiküller arası adhezyon kuvveti artar ve şekil değiştirme yeteneği kalmayan tozlar soğuk kaynak olur ve sıkıştırma işlemi tamamlanmış olur [54,55].

Presleme tek etkili ya da çift etkili yapılabilir. Şekil 4.5’de tek etkili preslemenin aşamaları görülmektedir.



Şekil 4.5 Tek etkili preslemenin aşamaları [55].

Tek etkili presleme yönteminde üst zımba hareketli ve alt zımba sabittir. Tozlar kalıba doldurulduktan sonra kuvvet, sadece bir yönden uygulanır. Kuvvetin en az iletilebildiği kısım kalıbın ortasında bulunur. Dolayısıyla bu bölgede düşük yoğunluklu koniye benzer toz katmanları oluşur. Maksimum yoğunluk basıncın uygulandığı tarafta, üst zımbanın alt yüzeyi çevresince oluşur. Bu, tek etkili preslemenin dezavantajıdır. Bu nedendir ki, bu tip presleme tekniği, ince ve tek kademeli parçaların imalatında kullanılır. Kalınlığı (yüksekliği) fazla olan parçaları bu yöntemle imal etmek uygun değildir [55].

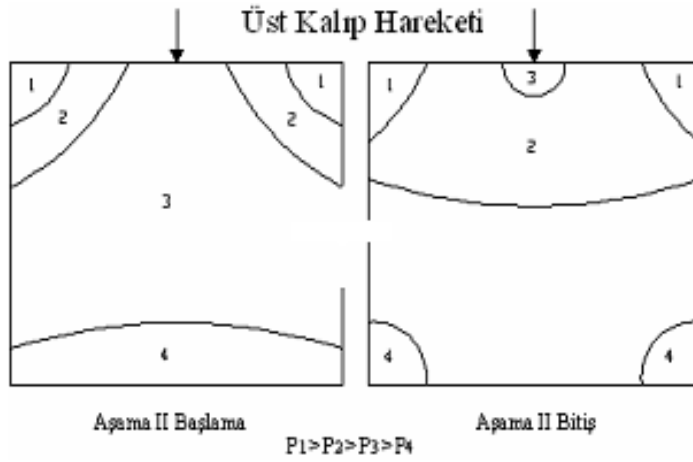


Şekil 4.6 Tek etkili preslemede oluşan basınç dağılımları [55].

Metal kalıplarda preslemede dikkate alınması gerekli faktörlerden bir tanesi, toz ve kalıp duvarı arasındaki sürtünmedir. Tek eksenli presleme de dikey doğrultuda deformasyonun başlamasıyla, tozlar arası ve toz-kalıp duvarı arasında oluşan sürtünme düzensiz bir basınç dağılımına neden olmaktadır. Bu durum Şekil 4.6'da görülmektedir. Sonuç olarak uygulanan yük düzenli olarak kalıp içerisindeki toza uygulanmamaktadır. Dolayısıyla iş parçasındaki yoğunluk homojen bir dağılım göstermemektedir.

Yoğunluk, hareketli zımbaya yakın bölgelerde daha yoğun olmakta ve sabit zımbaya doğru giderek azalmaktadır. Bu amaçla sürtünmeyi en aza indirmek, üniform bir yoğunlaşma elde edebilmek ve sıkıştırabilirliği arttırmak için yağlayıcılar kullanılır. En çok kullanılan yağlayıcılar çinko stearat, stearik asit ve asetonur. Kalıp

duvarlarının tozlardan çizilmemesi ve aşınmaması için çok sert olması gereklidir. Bundan dolayı genellikle çok sert metal kalıplar kullanılmaktadır [55].



Şekil 4.7 Tek etkili presle imal edilmiş parçada yoğunluk dağılımı [55].

Tozlar bir metal kalıba dolduruldukları zaman belirli bir yoğunluk alırlar. Bu görünür yoğunluk toz şekline, tane büyüklüğüne ve dağılımına, katkı maddelerine ve kısmen de kalıp şekline bağlıdır. Basınç artıkça, kompakt yoğunluğu da artar veya alternatif olarak gözeneklilik azalır. Sonuç olarak tozlarda, uygulanan yükten dolayı deformasyonla birlikte ham yoğunluk meydana gelir. Pişirme öncesi ham yoğunluğun, kompaktın elle taşınabilmesi (dağılmaması) yeterli olmaktadır. Şekil 4.7'de tek eksenli kalıpta preslenen kompaktta meydana gelen yoğunluk dağılımı görülmektedir [55].

Çift Etkili Presleme: Çift etkili preslemede alt ve üst zımba hareketlidir, kalıp ise sabittir. Bu yöntem yükseklikleri bir hayli fazla ve tek kademeli parçaların sıkıştırılmasında kullanılır. Ayrıca ince parçaların imalatı da bu yöntemle gerçekleştirilebilir. Yöntemin özelliği, parça içinde yoğunluk dağılımının homojene yakın olmasıdır.

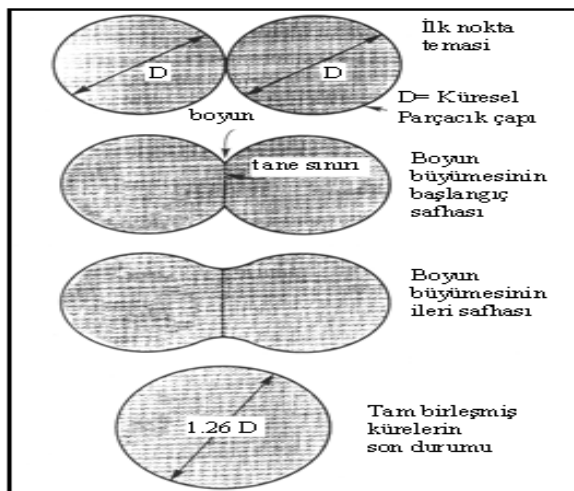
İzostatik Presleme: Bu sistemde sıkıştırma basıncı bir gaz ya da sıvı yardımıyla parçaya her yönden ve eşit olarak uygulanır. Bütün yönlerde eşit yoğunluk, eşit büzülme ve eşit mukavemet sağlanır.

Sıcak Presleme: Bu yöntemde parçanın preslenmesi ve sinterlenmesi birlikte gerçekleştirilir. Bu yöntemle gerek tozlar gerekse daha önce ön şekillendirme yapılmış parçalar preslenebilir [52,54].

4.2.4 Sinterleme

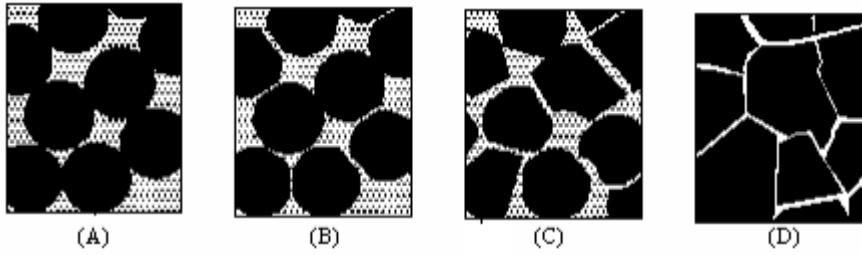
Tüm toz metal ve seramik parçalar, mukavemet kazandırmak amacıyla yüksek sıcaklıklarda sinterlemeye tabi tutulurlar. Sinterleme TM'nin en önemli üretim süreçlerinden birisidir ve bir ısıl işlemdir. Bu işlemde ön şekil verilmiş tozların belli bir sıcaklık ve sürede birbirlerine bağlanması, koherent bir kütleye dönüşmesi sağlanır. Ön şekillendirilmiş toz kütlelerine en az iki fazlı bir malzeme diye, yani katı ve gözenek diye yaklaşım yapılabilir. Bunların her biri kendi morfolojisine, boyut dağılımına, şekil ve miktarlara sahiptirler

Sinterleme, gözenekli yapıda bir şekil kazandırılmış tozların spesifik yüzey alanının küçülmesi, partikül temas noktalarının büyümesi ve buna bağlı olarak gözenek şeklinin değişmesine ve gözenek hacminin küçülmesine neden olan ısıl olarak aktive edilmiş malzeme taşınımı olayı olarak tanımlanabilir (Şekil 4.8). Sinterleme ile partikül temas noktaları artmakta ve atomlar ile iyonlar arasında fiziksel bir bağ oluşmaktadır. Bu tür bağ oluşumu, kristal kafes sistemi içerisindeki yüksek dayanımlı atomsal bağlanma ile benzeştir. [52,55].



Şekil 4.8 Sinterleme sırasında meydana gelen olayların şematik gösterimi [56].

Sinterleme sıcaklığı malzemenin ergime sıcaklığının altında seçilirse ‘katı faz sinterlemesi’ adını alır. Bu sinterleme de yüzeysel taşınım, buharlaşma yoğunlaşması, yüzeysel yayınma ve yayınma taşınmasıdır (Şekil 4.9). Hacim taşınımları ise latis yayınması, tane sınırı yayınması ve plastik akıştır. Hacimsel taşınım yoğunlaşmayı yani büzülmei gerçekleştirirken yüzeysel yayınımlar kaynaşmayı sağlayıcı ve tozlar arasındaki bağları kuvvetlendirici etki yapar [50].



Şekil 4.9 Katı hal sinterlemesinin aşamaları; A:Yapışma B: Başlangıç safhası C:Ara aşama D:Son aşama [55].

Sinterleme sıcaklığı bileşenlerden en az birinin ergime sıcaklığının üzerine alınırsa ‘sıvı faz sinterlemesi’ adı verilir. Bu sinterlemede asıl amaç çok yüksek yoğunluklar elde etmektir [50].

4.2.5 Son İşlemler

Sinterleme sonrası isteğe göre şu işlemler yapılabilir: Yapıda oluşan porların doldurulması, yağ emdirme, tekrar presleme ve/veya tekrar sinterleme, yüzey sertleştirme, yüzey kaplama, son işlemler (talaş kaldırma, montaj, ısıl işlem vb.) [52].

5. İNFİLTASYON YÖNTEMİ

Sıvı matrisin gözenekli bir yapı içerisinde infiltrasyonu basınç veya vakum yardımıyla elde edilir. Ayrıca sıvı damlacıkları katıyı ıslattığı zaman dışardan bir etki olmaksızın, gözenekli bir yapı içerisinde sıvının kendi kendine infiltrasyonu gerçekleşir [20, 57-59].

Sıvı metal matrisin gözenekli seramik takviyeye infiltrasyonu, yüzeye sızma prensibine, kılcallık etkisine dayanmaktadır. Genellikle metal oksitlerde temas açısı 90°'den büyüktür. Bu nedenle, ıslatma kriteri olarak katı yüzeyde bulunan kılcal aralıklara ve pürüzlü yüzeylere metal sızmasını sağlamak için dış basıncı gerekli kılmaktadır [60, 61].

$$\Delta p = \frac{-2Df}{r} \quad (5.1)$$

Burada, r, kılcallık yarıçapı, $Df = \gamma_{sb} \cos \theta$, γ_{sb} , sıvı-buhar yüzey gerilimi, ve θ , sıvı matris ile takviye arasındaki temas açısıdır.

Liplike-Young eşitliğinden Eş.5.2'de infiltrasyon için gerekli basınç;

$$\Delta p = \frac{-2\gamma_{sb} \cdot \cos \theta}{r} \quad (5.2)$$

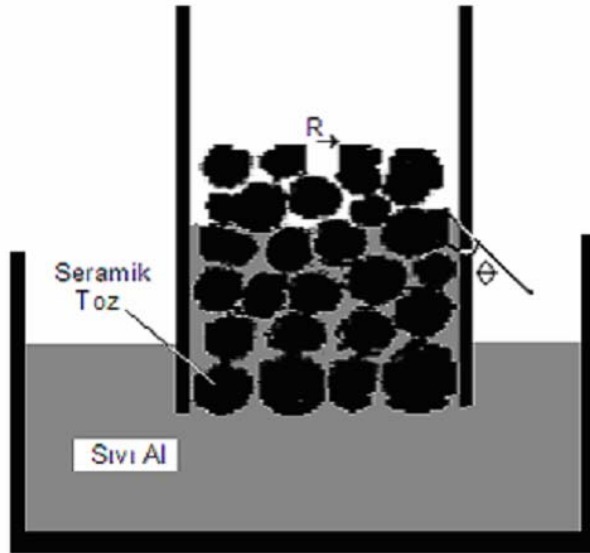
Burada r, kılcallık yarıçapıdır.

Belli takviye hacim oranında sıkıştırılmış tozlardan oluşan blok parçanın içerisinde, sıvı matrisin infiltrasyonu için matematiksel ifade Eş.5.3'de verilmiştir.

$$\Delta p = \frac{6\lambda\gamma_{sb} \cdot \cos \theta (1-w)}{d \cdot w} \quad (5.3)$$

Denklemleri ile belirlenir. r D infiltrasyonunun gerçekleşebilmesi için gerekli eşik basınçtır. w , takviyedeki gözenek oranı, d , ortalama parçacık çapı, g_{sb} ve θ sırasıyla, sıvı-buhar yüzey gerilimi ve sıvı matris ile takviye arasındaki temas açısıdır. l ise geometri faktörüdür. Denklem, takviye hacim oranı ve ortalama parçacık boyutunun bir fonksiyonu olarak ifade edilmektedir [2, 4, 62, 63].

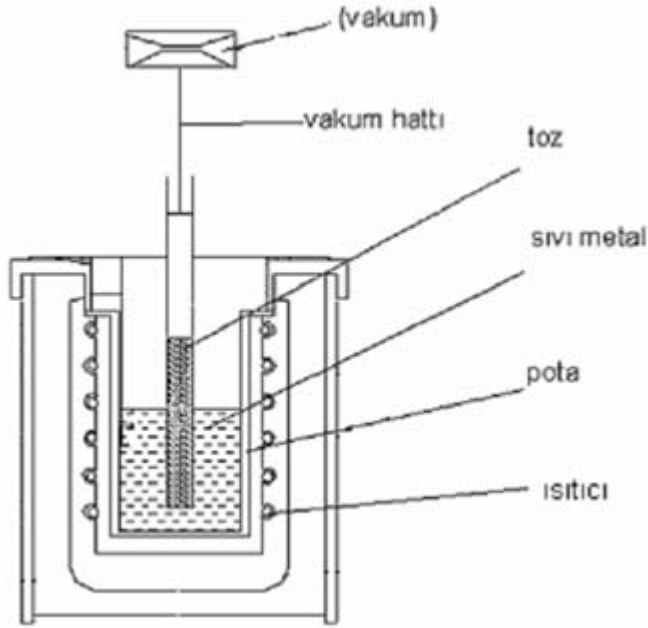
Şekil 5.1'de sıvı matrisin gözenekli bir yapıda, takviye parçacıklarının arasındaki kılcal boşluklarda ilerlemesi şematik olarak görülmektedir.



Şekil 5.1. Sıvı matrisin gözenekli bir yapıda şematik olarak yükselmesi [64].

5.1. Vakum İnfiltasyon

Vakum infiltasyon yönteminde sıvı matris, negatif bir basınç uygulanarak gözenekli takviye içerisine infiltre olmaktadır [2]. Yöntem basit ve oldukça ekonomiktir. Şekil 5.2'de şematik olarak vakum infiltasyon yöntemi görülmektedir.



Şekil 5.2. Vakum infiltrasyon yöntemi [64].

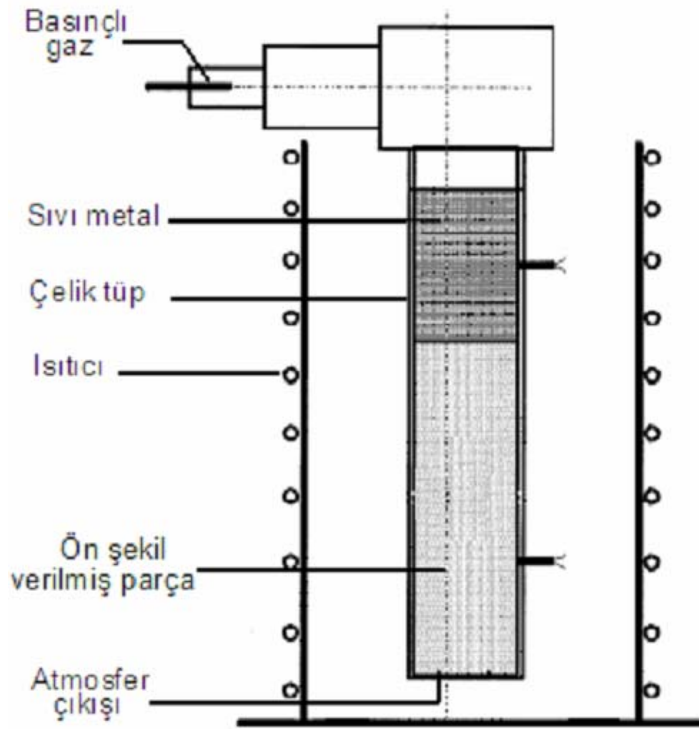
Özellikle Al alaşımlarında sıvı matrisin yüzeyinde oksit tabakası oluşması, takviyenin ıslatılmasını zorlaştırdığından infiltrasyonu olumsuz etkilemektedir. Bu durum sıvı matrise, takviyeyi ıslatma kabiliyetini arttırıcı elementler ilavesiyle ve seramik takviyenin Cu ve Ni gibi elementlerle kaplanmasıyla aşılmaktadır [2, 65 , 66].

Yapılan bir çalışmada % 55'e varan takviye hacim oranına kadar SiC tozlara % 9,42 Si, % 0,36 Mg'lu alüminyum alaşımını vakum infiltrasyon yöntemi kullanarak başarı ile infiltre edilmiştir. İnfiltrasyon davranışı sıcaklık, süre, SiC tozların oksidasyonu, takviye hacim oranı gibi değişik parametrelerden etkilenmiştir [67].

Yüksek takviye hacim oranındaki SiC blok parçalara 400-500 mmHg vakum değerinde, düşük takviye hacim oranındaki tozlara ise 200 mmHg vakum değerinde tam infiltrasyon elde etmişlerdir. 640 ve 800 °C sıcaklıklarda 120-180 saniye optimum infiltrasyon süresi olarak belirlenmiştir. Artan sıcaklık ve sürelerde infiltrasyon oranının arttığı belirtilmiştir.

5.2. Basınçlı İnfiltrasyon

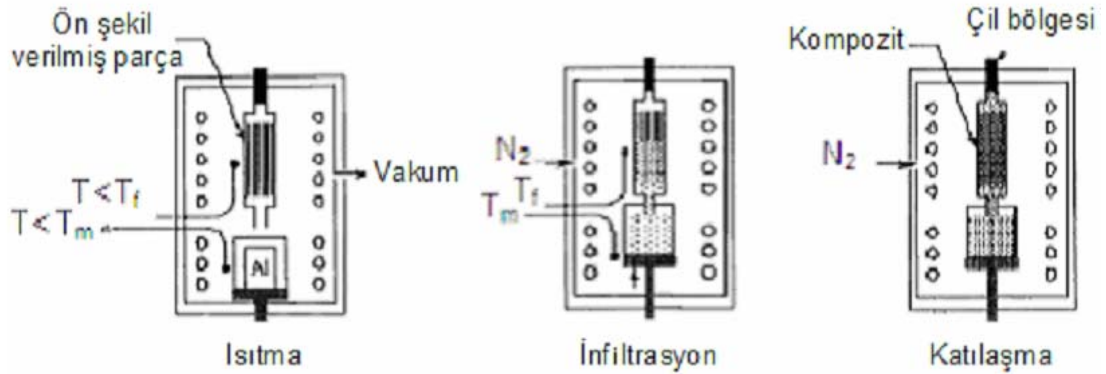
Basınçlı infiltrasyon yönteminde sıvı matris, ön şekillendirilmiş blok parça veya yatak içerisine basınçlı gaz ile iletilerek kompozit malzemeler üretilmektedir [67-69]. Şekil 5.3'de basınçlı infiltrasyon yöntemi şematik olarak gösterilmektedir. Şekilde çelik tüp içerisine yerleştirilen seramik takviyeye sıvı metal belirli basınçtaki gaz yardımı ile infiltre olmaktadır. İnfiltrasyonu kolaylaştırmak için kalıbın alt kısmında gaz çıkışı sağlayacak kanal bulunmaktadır. Basınçlı infiltrasyon yönteminde infiltrasyon basıncı, takviye hacim oranı, kalıp ön ısıtma sıcaklığı, takviye parçacık boyutu, infiltrasyon süresi ve sıvı metal sıcaklığı işlem parametreleri olarak ele alınmaktadır [3, 69].



Şekil 5.3. Basınçlı infiltrasyon yöntemi [64].

Bu yöntemde vakum destekli yüksek basınç kullanılarak sıvı matris fiber takviyelere başarı ile infiltre olmakta ve kompozitler basınç altında katılaşmaktadır. Ancak yüksek basınç uygulanmasının, zaman zaman fiberlerde deformasyona sebep olduğu belirtilmiştir [70].

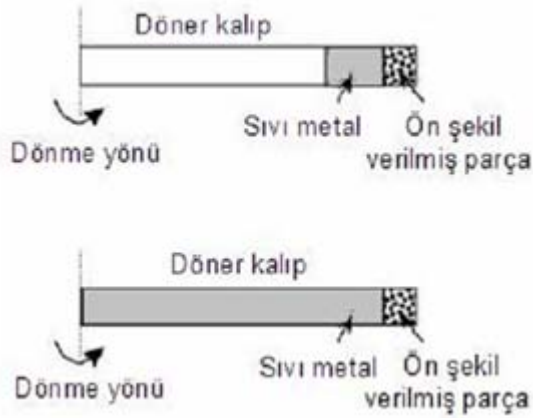
Bu durumu ortadan kaldırmak için orta basınçlı infiltrasyon tekniği geliştirilmiş ve fiber takviyelere sıvı Al matris başarı ile infiltre edilmiştir [71]. Şekil 5.4'de orta basınçlı infiltrasyon yöntemi şematik olarak görülmektedir.



Şekil 5.4. Orta basınçlı infiltrasyon yöntemi [71].

Şekil 5.4'de görüldüğü gibi infiltrasyon 3 aşamada gerçekleşmektedir. Birinci aşamada fiber takviye, sıvı matris sıcaklığının üzerinde bir sıcaklığa ısıtılmaktadır (T_f ve T_m sırasıyla 730 ve 700°C). İkinci aşamada 10 bar basıncındaki azot gazı yardımıyla sıvı alüminyum matris, 10 saniye süreyle alümina fiberlere infiltre olmaktadır. Son aşamada ikinci aşamanın hemen ardından gözeneklerin azaltılması için 90 bar basınçtaki azot gazı verilerek sıvı matrisin katılaşması sağlanmaktadır [71].

Basınçlı infiltrasyon yöntemi kullanılarak metal matrisli kompozit malzeme üretilmesinde farklı bir yöntem geliştirilmiştir [72]. Yöntemde metal matrisli kompozitler, yüksek basınç kullanılarak savurma tekniğiyle üretilmektedir. Şekil 5.5'da savurma basınçlı infiltrasyon tekniği görülmektedir.



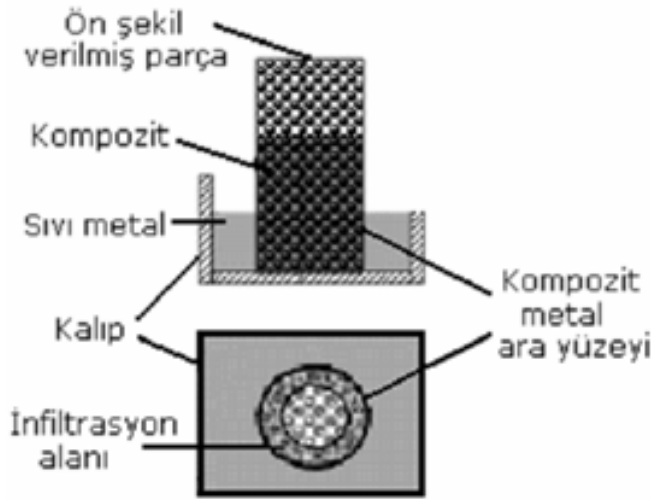
Şekil 5.5. Savurma basınçlı infiltrasyon tekniği [71].

Yöntemde döner kalıbın dip kısmına sıkıştırılan seramik tozlara, savurma basıncı uygulanarak sıvı matris infiltre edilmektedir. Kalıp dönme hızı, savurma kuvvetini etkilediğinden önemli işlem parametresidir [72].

5.3. Basınçsız İnfiltrasyon

Basınçsız infiltrasyon yönteminde sıvı metal parçacık takviye içerisine, basınç uygulanmaksızın kendi kendine infiltre olabilmektedir. Basınçsız infiltrasyonda sıvı matrise Mg ilavesi ve azot atmosferi infiltrasyonu kolaylaştırmaktadır. Mg, sıvı alüminyumun seramik parçacıkları ıslatmasını geliştirerek infiltrasyonu sağlamaktadır [2, 73].

Şekil 5.6'de basınçsız infiltrasyon yöntemi şematik olarak görülmektedir. Yöntemde sıvı ingot yatak içerisine yerleştirilen blok parçaya azot atmosferinde sıvı matris infiltre olmaktadır. Sıcaklık, parçacık büyüklüğü, Mg içeriği, takviye hacim oranı, süre ve seramik takviyenin kaplanması işlem parametreleridir [59].



Şekil 5.6. Basınçsız infiltrasyon yöntemi [64].

Alaşım seramik sistemi 800-1000°C arasında ısıtılmaktadır ve infiltrasyonun gelişimini sağlayan reaksiyon denklemi;



İnfiltrasyon sırasındaki reaksiyon denklemi ise; şekilde yazılabilir [3]. İnfiltrasyon sıcaklığında Mg buharlaşır. Takviye yüzeyini kaplayan magnezyum nitrit (Mg_3N_2) oluşturmak üzere azot atmosferi ile Mg reaksiyona girer. (Mg_3N_2) sıvı matrisin takviye faza dışardan bir etki olmaksızın infiltrasyonuna imkan sağlayan bir bileşiktir [3].



Sıvı matrisin takviyeyi iyi ıslatabilmesi için uygun sıcaklık ve atmosfere ihtiyaç duyulur. 850-900 °C sıcaklık ve Ar ortamı Mg/TiC sisteminde kompozitlerin basınçsız infiltrasyon yöntemi ile üretilmesinde optimum parametrelerdir. Yöntemde kompozitler son ölçüye yakın olarak üretilirler [20].

5.4. İnfiltrasyonu Etkileyen Faktörler

5.4.1. Takviye tane boyutu

Takviye parçacıkları arasında oluşan infiltrasyon öncesi boşluklar, takviye tane büyüklüğüne bağlı olarak infiltrasyonu etkilemektedir. Büyük tane boyutuna sahip takviye elemanları arasında, infiltrasyon öncesi boşlukların büyük olmasıyla sıvı matrisin bu gözeneklere infiltrasyonu kolaylaşmaktadır.

5.4.2. İnfiltrasyon süresi

İnfiltrasyonun gerçekleşebilmesi için diğer işlem parameterelerine bağlı olmakla birlikte bir kuluçka süresine ihtiyaç duyulmaktadır [59].

Yapılan bir çalışmada Al-Si-Mg/SiC kompozitleri basınçsız infiltrasyon yöntemi ile üretmişler ve artan infiltrasyon sıcaklıklarında kuluçka süresinin azaldığını tespit etmişlerdir. Kuluçka süresinin sıcaklığa bağlı bir periyot olduğunu, ancak sıcaklık ve zaman parametrelerinin ortak etkisinin göz ardı edileceğini belirtmişlerdir [59].

Yapılan bir diğer çalışmada, % 55' e varan takviye hacim oranlarındaki SiC tozlara vakum infiltrasyon yöntemi ile % 9,42 Si, % 0,36 Mg' lu alüminyum alaşımını başarı ile infiltre etmişlerdir. Sıcaklığa bağlı olmakla birlikte, 120-180 saniye optimum infiltrasyon süresi olarak belirtilmiştir. İnfiltrasyon oranının artan infiltrasyon sürelerinde arttığını tespit etmiştir [67].

5.4.3. İnfiltrasyon sıcaklığı

Sıcaklık, infiltrasyon yönteminde en önemli üretim parametrelerinden biridir. Artan infiltrasyon sıcaklıklarında, sıvı matrisin, akıcılığı artarak, takviye taneleri arasındaki gözeneklerden infiltre olması kolaylaşmaktadır.

Yapılan çalışmalarda da düşük hacim oranındaki SiCp/Al-10 Si kompozitlerinin vakum infiltrasyonunda, 660°C ve 180 saniyede 50 mm infiltrasyon elde ederken

sıcaklığın 600°C sıcaklığa düşürülmesiyle infiltrasyonun zorlaştığını ve zayıf infiltrasyon meydana getirdiğini belirtmişlerdir [74].

Al-Al₂O₃/SiC kompozitleri basınçlı infiltrasyon yöntemiyle üretilmesi hakkında yapılan bir çalışmada, infiltrasyon sıcaklığının infiltrasyon için önemli bir parametre olduğunu belirtmişler ve artan infiltrasyon sıcaklıklarında kompozitlerin yoğunluğu artarak, kopma özelliklerinin arttığını tespit etmişlerdir. % 13 T-H oranında 800 °C sıcaklık ve 3 MPa infiltrasyon basıncında 558 MPa kopma gerilimi elde edildiğini belirtmişlerdir [64].

Yapılan bir diğer çalışmada ise, Al-B₄C kompozitlerini basınçsız infiltrasyon yöntemiyle üretilmiş, 1000-1400°C sıcaklıkta ön şekillendirilmiş parçalara Al-Cu alaşımı infiltre edilmiş ve artan infiltrasyon sıcaklıklarında Al B₁₂ C₂ bileşiğinin oluştuğunu belirtilmiştir [75].

5.4.4. Takviye hacim oranı

Kompozit malzeme, takviye malzemesinin matris malzemesi içerisinde dağılımıyla meydana gelir. Kompozit malzeme içerisinde, takviye malzemesinin hacimce miktarına, takviye hacim oranı ifadesi kullanılmaktadır. İnfiltrasyon yönteminde takviye-hacim oranı infiltrasyon davranışını ve kompozitlerin özelliklerini belirleyen parametrelerden biridir.

Kompozitlerin, gözeneklilik, sertlik, çekme dayanımı ve aşınma gibi özellikleri takviye hacim oranı ile doğrudan ilgilidir. Ayrıca infiltrasyon ile kompozit üretiminde T-H oranının önemli bir etkisi vardır. Şekil 5.7' de görüldüğü gibi takviye tozları cam kap içerisine yerleştirildiğinde oluşan hacim; Eş.5.6' de verilen takviye tozlarının hacmi ve gözenek hacminin toplamına eşittir:



Şekil 5.7. Takviye tozlarının cam kap içerisinde oluşturdukları dolu hacim ve gözenekler [64].

$$V = V_{\text{takviye}} + V_{\text{gözenek}} \quad (5.6)$$

Kompozit malzemelerde T-H oranları Eş.5.6 ve Eş.5.7' de ifade edildiği gibi hesaplanır. Takviye tozlarının oluşturduğu hacim ise Eş.5.7'de görüldüğü gibi takviye ağırlığının özgül ağırlığa bölünmesine eşittir:

$$V_{\text{takviye}} = m / d \quad (5.7)$$

T-H oranı ise Eş.5.8'da görüldüğü gibi takviyenin oluşturduğu hacmin toplam hacme oranına eşittir:

$$\text{T-H oranı} = V_{\text{takviye}} / V_{\text{kompozit}} \quad (5.8)$$

Bir başka ifade ile cam kap içerisinde takviye tozlarının gerçek ağırlığının teorik ağırlığına oranı % T-H oranını vermektedir.

Takviyenin kompozit içersindeki oranı ise Eş.5.9'de görüldüğü gibi hesaplanır:

$$W_k = W_f \cdot V_f + W_m \cdot V_m \quad (5.9)$$

Burada;

W_k: Kompozitlerin ağırlığı W_f: Fiber ağırlığı V_f: Fiber hacmi

W_m: Matris ağırlığı V_m: Matris hacmi

Al-% 9,42 Si-% 0,36 Mg/SiC kompozitlerin vakum infiltrasyon yöntemiyle üretilmesi hakkında yapılan bir çalışmada, kompozitlerin yoğunluklarının artan T-H oranıyla arttığını tespit edilmiştir [67].

Yapılan bir diğer çalışmada, düşük hacim oranındaki SiCp/Al-10 Si MMK'leri vakum infiltrasyon yöntemiyle üretmişlerdir. Bu yöntemle düşük takviye hacim oranındaki kompozitlerin düşük sıcaklık ve sürede üretilmelerinin mümkün olabileceğini belirtmişlerdir. Kontrollü azot atmosferi blok parça içerisinde Mg tozu kullanımının, yöntemin gereksinimi olduğunu belirtmişlerdir. % 10 SiCp içeren toz karışım için 600 °C sıcaklık ve 120 saniyelik infiltrasyon süresinin uygun şartlar olduğunu ve takviye hacim oranının artmasının infiltrasyon mesafesini önemli derecede azalttığını belirtmişlerdir [74-76].

5.4.5. İnfiltrasyon basıncı

İnfiltrasyon yönteminde basınç miktarı, sıvı matrisin blok parça içerisindeki kılcal boşluklardan ilerlemesini ve gözenekleri doldurmasını önemli ölçüde etkilemektedir. İnfiltrasyon, önceden belirtildiği gibi takviye parçacıkları arasında matrisin kılcal basınç ile ilerlemesiyle oluşmaktadır. Ancak bu işlemin olabilmesi için matris-takviye uyumu ve gözenek boyları etkili olmaktadır. Bu uygunluğun olmadığı yerlerde kılcal basınca yardımcı olmak üzere infiltrasyona karşı kuvvetleri yenmek için dışardan basınç uygulanması gerekli olabilmektedir.

Yapılan bir çalışmada, Al(Al₂O₃)p sisteminde basınçlı infiltrasyon yöntemiyle kompozit malzeme üretmişlerdir. Artan basınç değerlerinde infiltrasyon mesafesi artarken, kompozitlerin % gözenek miktarında azalma olduğunu tespit etmişlerdir. 63-90 µm boyutundaki alümina tozlarda 0,3 MPa basınçta gözenek miktarının maksimum % 2,4 değerine ulaştığı belirtilmiştir [69].

Al-% 9,42 Si-% 0,36 Mg/SiC kompozitleri vakum infiltrasyon yöntemiyle üretilmesi hakkında yapılan bir çalışmada ise, yüksek takviye hacim oranlarında 400-500 mmHg vakum değeri infiltrasyon için yeterli olurken, düşük T-H

oranlarında gerekli vakum değerinin 200 mmHg değerinde olduğunu belirtmiştir [67].

Al-Al₂O₃/SiC kompozitleri basınçlı infiltrasyon yöntemiyle üretilmesi hakkında yapılan bir çalışmada ise, Sonuç olarak artan basınç değerlerinde kompozitlerin yoğunlukları ve dayanımlarının arttığını belirtmişlerdir [64].

5.4.6 Alaşım

MMK'lerde takviye ile matris malzemesinin uyumu kompozitlerin özelliklerini etkileyen parametrelerden biridir. İnfiltrasyon yönteminde sıvı matrisin takviyeyi ıslatma kabiliyeti, infiltrasyon mesafesini önemli ölçüde etkilemektedir. Al matrisli kompozit malzemelerin infiltrasyonunda birçok araştırmada, sıvı matrisin Mg içeriğinin infiltrasyonu arttıran etki gösterdiği belirtilmiştir [67].

5.4.7. Islatma

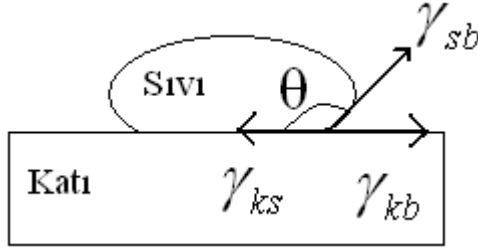
Islatma özelliği, sıvı matris ve takviyenin oluşturduğu serbest enerji değişimine bağlıdır. İki elektriksel yüzey birbirine yeteri kadar yaklaştığı zaman fiziksel çekim kuvveti mevcut olur ve bu durum katı bir yüzeyin sıvıyla ıslatılması halinde daha iyi anlaşılır [3].

İki yüzey fiziksel temas halinde olduğu zaman gerçek molekülse temas, toplam yüzeyin sadece küçük bir kısmında meydana gelir. Ayrıca katı yüzeyindeki kirlilik ve oksitler kuvvetli bir yapışmaya engel olacaktır [57].

Takviye yüzeyinin etkili ıslanması için sıvı matris katı yüzeyinin her noktasına temas etmelidir. Bir sıvının katılaşması esnasında yapılan iş Eş.5.10'daki Püpre denklemi ile ifade edilir [60].

$$W_A = \gamma_{sb} + \gamma_{kb} + \gamma_{ks} \quad (5.10)$$

Burada; WA , sıvının katılaşması esnasındaki yapılan iş, γ_{sb} , sıvının serbest enerjisi, γ_{kb} , katının serbest enerjisi, γ_{ks} , sıvı-katı arayüzeyi serbest enerjisidir. Şekil 5.8'da bir sıvı damlasının katı üzerine düşmesiyle oluşan yüzey gerilimleri ve temas açısı şematik olarak görülmektedir.



Şekil 5.8. Bir sıvı damlasının katı bir yüzeyle temasıyla oluşan yüzey gerilimleri ve temas açısı .

Bileşenler arasındaki maksimum bağ, arayüzey serbest enerjisi en aza indirildiğinde ortaya çıkar. Şekil 5.8'da görüldüğü gibi düzgün bir katı yüzey üzerine düşen sıvı damlasının fiziksel durumu Young denklemi ile ifade edilir [62, 63].

$$\gamma_{kb} = \gamma_{ks} + \gamma_{kb} \cos\theta \quad (5.11)$$

Eş 5.11 ve Eş 5.12 birleştirildiğinde sıvının katılaşma esnasında yapılan iş;

$$WA = \gamma_{sb} + (1 + \cos\theta) \quad (5.12)$$

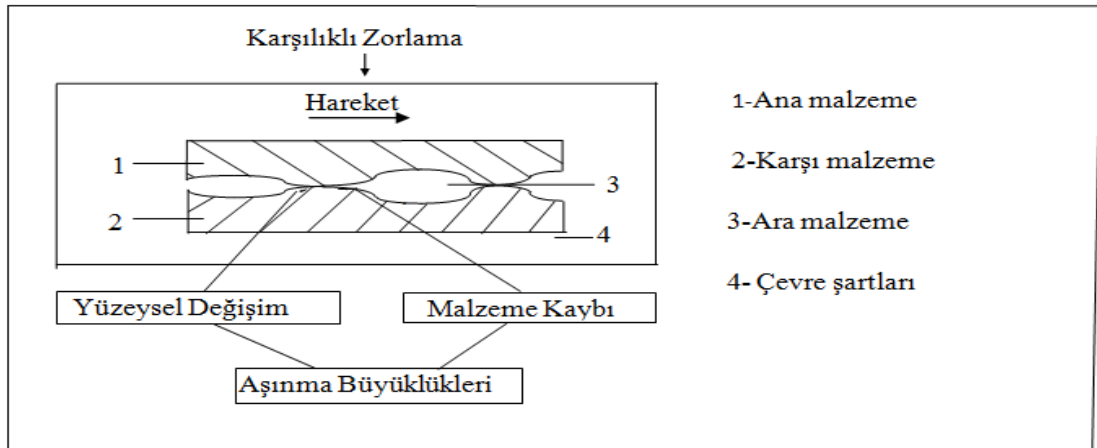
denklemi ile ifade edilir. Böylece sıvı ve katı arasında oluşan bağ, sıvının yüzey gerilimi ve temas açısıyla ilgilidir. Küçük temas açıları iyi ıslanabilirlik, büyük temas açıları ise kötü ıslanabilirliği sergilemektedir.

$\theta = 0^\circ$ tam ıslatma, $\theta = 180^\circ$ ıslatmanın olmadığını $\gamma_{kb} < \gamma_{ks}$ olursa θ , 90° den büyük olacağından ıslatma olmaz. $\theta < 90^\circ$ ise ıslanabilirliğin iyi olduğu söylenebilir [3, 61]. Seramik takviyenin çeşitli metallerle kaplanması, sıvı matrisle alaşım elementi ilavesi, ısıtma işlem uygulanması arayüzey enerjisini ve sıvı matrisin yüzey gerilimini düşürerek ıslatma özelliğini arttırmaktadır [3, 77].

Yapılan bir çalışmada ise, B_4C , TiC , TiB_2 ve SiC tozlarla 15 MPa basınçta % 50-75 takviye hacim oranlarında blok parçalar elde etmişler. $800^\circ C$ sıcaklıkta basınçsız infiltrasyon yöntemiyle blok parçalara argon ve magnezyum buharı atmosferinde Mg ve alaşımı infiltre etmişlerdir. Islatma açısını 15° - 20° arasında tespit etmişlerdir. B_4C parçacıklarda, arayüzeyde MgO ve Mg_2C_3 oluştuğunu belirtmişlerdir [78].

6. AŞINMA

Aşınma genellikle temas eden yüzeylerden mekanik etkilerle malzeme kaybı olarak tanımlanır. Alman DIN 50320 normuna göre aşınma, “Kullanılan malzemelerin başka malzemelerle (katı, sıvı, gaz) teması neticesinde mekanik etkenlerle yüzeyden küçük parçacıkların ayrılması sonucu meydana gelen ve istenmeyen yüzey bozulmasıdır” şeklinde tanımlanmaktadır. Aşınma olayını analiz edebilmek için aşınma olayını oluşturan temel unsurların bilinmesi gerekir. Tribolojik sistemi oluşturan bu unsurlar Şekil 6.1’de verilmiştir.



Şekil 6.1. Tribolojik sistemin şematik gösterimi [79].

Aşınma, genellikle önceden bilinen bir hasar tipidir. Birbiriyle temasta olan malzeme yüzeyleri, oksit filmleri ve yağlayıcılar ile korunmaktadır. Fakat mekanik yüklemeler altında oksit tabakasının veya yağlamanın bozulması, iki yüzeyin birbiriyle temasına neden olur. Bu temasla oluşan sürtünme, malzemelerin çalışma şartlarındaki ömrünü ve performansını sınırlayan aşınmaya neden olur [80]. Sürtünerek çalışan bütün makine elemanlarında kaçınılmaz ve karmaşık (kompleks) olan bir sistem özelliği gösteren aşınma, büyük miktarlarda malzeme ve enerji kaybına neden olmaktadır [79]. Oluşan hasar, uygun malzeme seçimi, yağlama ve yerinde yapılan tasarım ile en aza indirilebilir.

Aşınma, çeşitli yönleri ile korozyona benzer. Bu iki hasar tipi de zamanla kendiliğinden gelişir, her ikisinin de oluşumu önceden bir derecede bilinebilir, her ikisinin de çeşitli tipleri vardır. Aşınma da korozyon gibi bir yüzey olayı olduğundan, yüzeyi etkileyen her şey aşınma davranışını da etkiler.

Aşınma, temelde bir yüzey hasarıdır. Aşınma hasarları kapsamına giren yüzeyden malzeme kaybı, kayma, kırılma, talaş oluşumu, yorulma, kimyasal çözünme ve difüzyon yoluyla gerçekleşebilir.

Aşınma olayında, oluşan hasarı değerlendirmek oldukça önemlidir. Yüzeyde oluşan hasar tipleri ve her bir hasarı önlemek amacıyla kullanılacak koruma yöntemi, uygulamadan uygulamaya farklılık gösterir. Örneğin tüketilebilir veya zamanla tüketilmesi fazla önem taşımayan parçalarda önemli olan, sistemde baskın durumda bulunan aşınma mekanizmasını önlemektir. Bu durumda, yüzeyde oluşan aşınma parçaları çok fazla önem taşımaz. Fakat dönen yataklar, baskı silindirleri gibi yüzey topografyasının öneminin yüksek olduğu uygulamalarda, yüzeyde oluşan parçacıklar hatta yüzey çatlakları bile, çalışan parçanın verimini olumsuz yönde etkilerler. Ayrıca aşınma, dış etkiler altında temas yüzeylerinde meydana gelen fiziki değişmelerin sonucu gerçekleşir. Mühendislik malzemesinde görülen yıpranmanın aşınma sayılabilmesi için bazı şartların gerçekleşmesi gerekir. Bunlar;

1. Mekanik bir etken olması,
2. Sürtünmenin (bağlı hareketin) olması,
3. Yavaş ve devamlı olması,
4. Malzeme yüzeyinde değişiklik meydana getirmesi,
5. İsteğimiz dışında meydana gelmesidir.

İstenmeden meydana gelen aşınma olayı, çeşitli makine ve teçhizatın kullanımı sırasında çok büyük ekonomik kayıplara (enerji, işgücü, malzeme vs.) neden olmaktadır. Örneğin; 1987 yılında yüksek işleme maliyeti 70 milyar dolar/yıl ve takım maliyeti ise 900 milyon dolar/yıl gibi çok yüksek değerlere ulaşmıştır [81].

Aşınma rejimleri: Hafif Aşınma, (aşınma parçacıkları: küçük (0.01- 0.02 μm),

(yüzey: parlak), (bu aşınmanın hasarı), (işletme koşullarında kabul edilebilir boyuttadır), şiddetli aşınma, (aşınma parçacıkları: büyük ($>1 \mu\text{m}$), (yüzey: pürüzlü ve çizikli).

Bu aşınmanın hasarı, işletme koşullarında kabul edilemez boyuttadır. Aşınma, ne bir malzeme ve ne de bir malzemenin yüzey özelliğidir. Bir sistem özelliğidir. Bu nedenle çok değişkenli bir fonksiyon olan aşınmanın sürekli incelenmesi gerekir.

6.1. Tribolojik Sistem

Triboloji, “bir izafi hareket içinde bulunarak birbirlerine etki eden yüzeylerin ve bunlarla ilgili olayların bilimi veya tekniği” olarak tanımlanmaktadır. Triboloji; sürtünme, aşınma ve yağlamanın bilimsel incelenmesini ve tribolojik bilgilerin teknik uygulanmasını içermektedir [82].

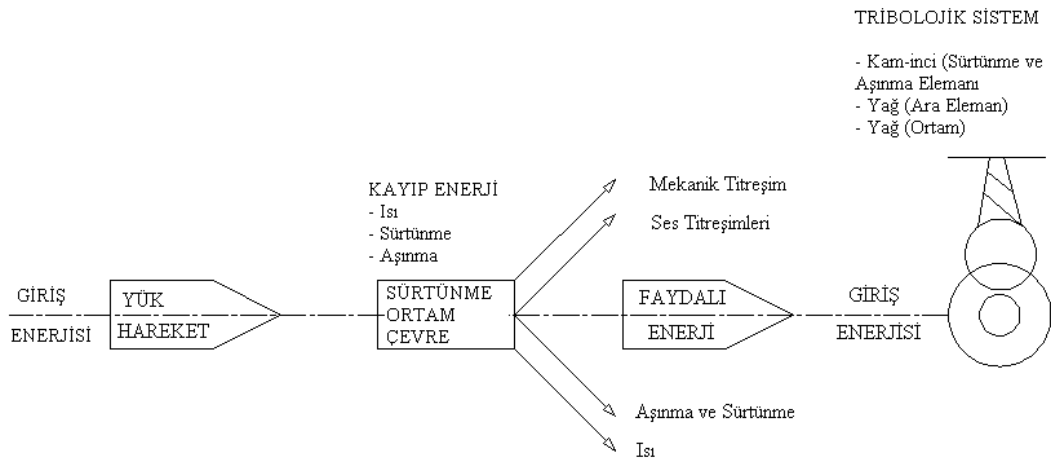
İçinde aşınma ve sürtünme olaylarının gerçekleştiği teknik sistemlere tribolojik sistem denilmektedir. Mühendislik malzemelerinin aşınma davranışlarının araştırılmasında mekanik sistemleri bir tribolojik sistem olarak dikkate almak gerekir. Yani aşınma olayı bir sistem bütünlüğü içinde ele alınmalıdır [83,84]. Şekil 6.2’de bir tribolojik sisteme giren enerji dağılımı görülmektedir.

Tribolojik sistemi oluşturan unsurlar, ana malzeme (aşınan), karşı malzeme (aşındıran), ara malzeme, yük, hareket ve çevreden oluşmaktadır. Bir tribolojik sistem bu unsurların birçoğunu içinde bulundurur. Aşınma çiftini oluşturan ana malzeme ve karşı malzeme aralarında belirli bir ara malzeme varken az veya çok yük altında hareket ettiklerinde aşınma başlar. Ana malzeme; metal, mineral, plastik, kauçuk, ağaç, deri v.s. gibi aşınma karakteristiğine önem verilen katı cisimdir.

Aşındıran malzeme ise metal, mineral, plastik, ağaç v.s. şeklinde katı olabileceği gibi sıvı veya gazlarla karışım durumunda da olabilir. Ara malzeme ise yağlar, aşınma parçacıkları v.b. olabildiği gibi bazen hiçbir madde olmayabilir. Endüstride çoğu zaman aşınma parçacıkları yüzeylerden temizlenememektedir. Böyle durumlarda

arada yağlayıcı da yoksa teknik de kuru sürtünmeden söz edilir. Çevre, çalışma ortamıdır. Yükleme darbeleri, darbesiz, sabit, değişken v.s. şeklinde veya bunların birden fazlasının bir arada bulunması halinde olabilmektedir. Hareket ise kayma, yuvarlanma, kaymalı yuvarlanma, darbe şeklinde olabilir [85-87].

Tribolojik sistemde ortaya çıkan aşınma mekanizmaları da farklıdır. Adhesiv aşınma, abrasiv aşınma, yorulma aşınması, tribooksidasyon aşınması gibi mekanizmalarla tanımlanan aşınma, tribolojik sistem içerisinde genellikle tek başlarına bulunmazlar ve etkin oranları kesin olarak belirlenemez. Ancak etken olan aşınma mekanizmasına göre önlemler yoğunlaştırılabilir [88, 89].



Şekil 6.2. Tribolojik sisteme giren enerji dağılımı [89].

6.2. Aşınma Mekanizmaları

6.2.1. Adhesiv (Yapışmalı) aşınma mekanizması

Kayarak sürtünme yapan, metalografik yapıları birbirine benzeyen iki metalin yüzeyleri arasında adhesiv çekim kuvveti söz konusudur. Bu kuvvetin oluşması moleküllerin yaklaştırılmasına bağlıdır. Temas halindeki yüzeyler pürüzlerle etkileştiklerinden, metal ağırlığı veya etkiyen bir kuvvet, temasla olan çok küçük pürüz tepelerine çok yüksek basınç olarak etkir. Bu basınç, bu noktalardaki gerilme

pürüzlerin akma sınırını aşınca plastik deformasyona, pürüzlerin birbirini çizmesine, yarmasına ve sıvanıp kaynaklaşmalarına neden olurlar. Ayrıca pürüzlerin deformasyonu ile oluşan mikro adhesiv temas yüzeyi boyunca yayılır. Çiftin karşılıklı hareket etmesi halinde de yüzeyde bulunan absorbe olmuş sıvı veya gaz molekülleri ve oksit tabakaları parçalanarak aşınma çiftinde soğuk kaynaklaşmayı oluşturur. Kayma hareketi sırasında bu noktalar koparak yenme ve aşınmaya neden olurlar. Bu tip malzeme kaybı adhesiv aşınmayı oluşturur [90].

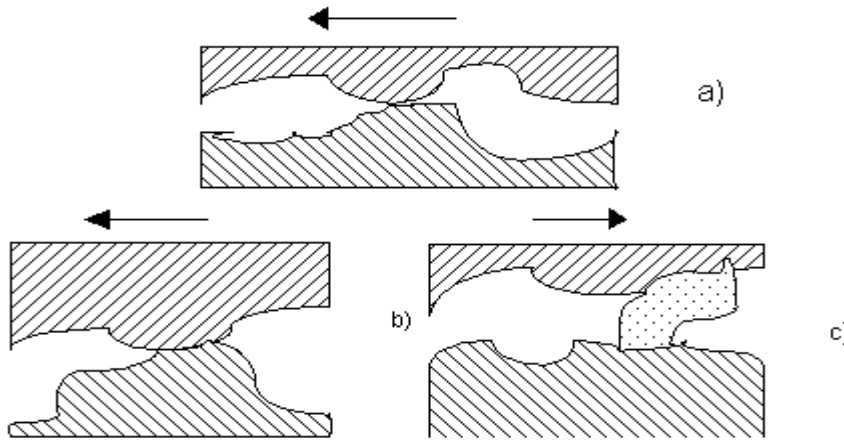
Aşınma çiftinin yüzeyleri arasındaki tutunma kuvvetleri (adhesiv bağ mukavemetleri) eşit büyüklükte ise veya adhesiv bağ mukavemeti, büyük ise pürüz kopar ve malzeme kaybına neden olur. Eğer adhesiv bağ kuvveti pürüz mukavemetinden küçükse, pürüz kaynak noktasından kopar ve hiç bir malzeme kaybına neden olmaz. Adhesiv aşınması sırasında iki sürtünme yüzeyi arasında üçüncü bir cisim meydana gelmektedir. Özellikle adhesiv aşınmada kırılan parçalar ara yüzey de serbest kalabileceği gibi metallere birine bağlı kalarak da taşınabilirler [86].

Adhesiv aşınma sırasındaki oksitlenme olayını, korozif aşınma karıştırmamak gerekir. Yukarıda bahsedilen parçalanma malzeme moleküllerinin direk temasa geçmelerine imkân verir.

Bunun neticesinde de bölgesel kaynak bağları oluşur (soğuk kaynaklanma). Bu sırada eğer izafi hareket de varsa yüzeydeki sıcaklık yükselir ve ergime noktasına kadar ulaşabilir. Böylece kaynama yerinden veya metal yüzeyinden bir miktar parça kopar. Bu metalik parçacıklar, ara yüzeyde serbest parçacıklar halinde kalabilecekleri gibi metallere birine bağlı şekilde de bulunabilirler. Her iki durumda da malzeme kaybı (aşınma) meydana gelmekle beraber, ikinci durumda malzemelerin birinden diğerine malzeme transferi söz konusudur [90].

Kristalografik olarak benzer kafes yapılı malzemelerde adhesiv aşınma mekanizmasını açıklanabilmesine rağmen farklı yapıdaki malzemeler arasındaki aşınma, adhezyonla başlamaz. Bu gibi malzemelerde Şekil 6.3'te görüldüğü gibi

yüksek gerilme ve basıncın etkisiyle pürüzler birbirine geçerek plastik şekil değiştirir. İzafi hareket başladığında zayıf olan malzemenin pürüzleri kopar ve serbest tanecikler meydana gelir. Eğer sıcaklık yükselirse atomik difüzyonla bölgesel kaynak bağları meydana gelir, Difüzyon az ise kaynama olmayacağından kırılan parçacıklar serbest hale geçerler.



Şekil 6.3. Adhesiv aşınmanın meydana gelişinin şematik olarak gösterimi
a) İki çıkıntının buluşması ve bağ oluşturması
b) Bağın koparak bir yüzden diğerine malzeme transferinin oluşumu
c) Uzanmış olan çıkıntının diğer yüzeydeki çıkıntıyla etkileşimi sonucunda da yüzeyde kırıntı oluşumu [90].

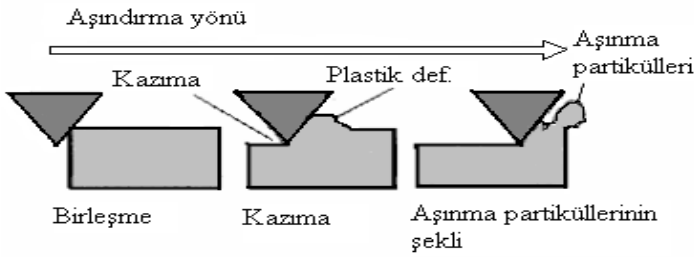
6.2.2. Abrasiv aşınma mekanizması

Abrasiv aşınma, uygulanan yük ve hareketin etkisiyle, sürtünen iki cisimden daha sert olanının, pürüzleri veya taneleri vasıtasıyla diğerini çizerek üzerinden mikro talaş kaldırması olayıdır. Bu tarif, katı/katı, katı/mineral, katı/sıvı gibi birçok sürtünme elemanlarında meydana gelen abrasif aşınmayı kapsar.

Sürtünen cisimlerin, doğrudan olarak karşılıklı etkileşimleri sonunda meydana gelen abrasiv aşınma, iki cisimli abrasiv aşınman olarak tanımlanmaktadır. Eğer ara yüzeyde sürtünme elemanlarını çizerek tahrip eden sert tanecikler de bulunuyorsa bu tür aşınmada ‘Üç Cisimli Aşınma’ denir. Bu tanecikler ara yüzeye dışarıdan girebilecekleri gibi aşınma enkazları da olabilirler [91].

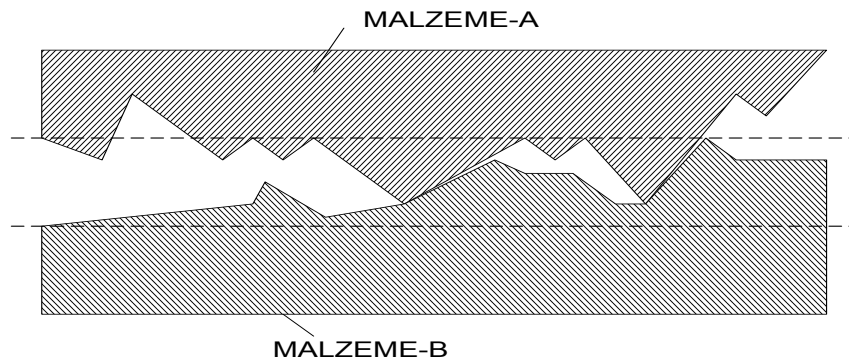
Genellikle aşınma mekanizmaları, metal/metal sürtünmelerinde iki cisimli abrasiv veya adhesiv olarak başlayıp üç cisimli abrasiv olarak devam eder. Üçüncü cisim olarak ortaya çıkan toz, mineral taneleri, çizilme sonunda serbest hale gelen mikro talaşlar ve parçalanmış oksit parçacıkları olabilir. Üçüncü cisim abrasiv aşınma, aşınmayı hızlandırır. Bir sistem içinde yüksek hızlı parçacıkların akışı, erozyon olarak bilinen abrasiv aşınmanın özel şeklini ortaya çıkarır [92, 93].

Abrasiv aşınma, kesilme, kazınma ve tekrarlanan deformasyon gibi yüzeyi tahrip eden çeşitli mekanizmalar ile meydana gelir. Abrasiv aşınma için en önemli şart, sürtünme sırasında, abrasivin sertliğinin aşınma malzemesi sertliğinden daha fazla olması gerekir. Abrasiv Aşınma şeması Şekil 6.4'te gösterilmektedir [94].

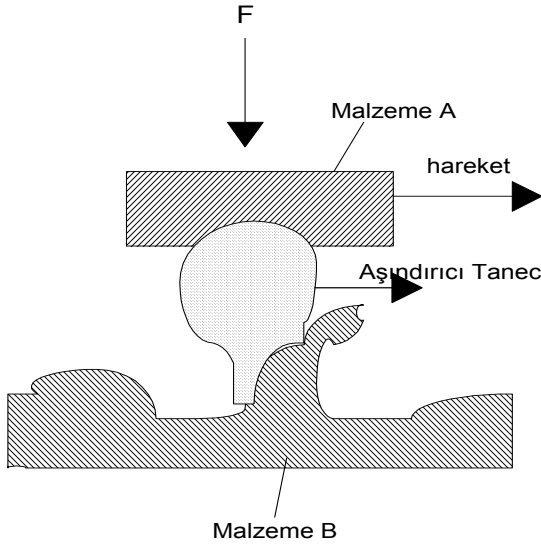


Şekil 6.4. Abrasiv aşınma şeması [94].

Bu tip aşınmada sert ve keskin parçacık, malzeme yüzeyinden mikron boyutlu talaş kaldırma etkileri gösterirler. Bu aşınma, iki elamanlı ve üç elamanlı olmak üzere ikiye ayrılır. Bu mekanizma Şekil 6.5 ve 6.6'da gösterilmektedir.



Şekil 6.5. İki elamanlı abrasiv aşınma [94].



Şekil 6.6. Üç elemanlı abrasiv aşınma [94].

İki elemanlı abrasiv aşınma, sürtünen elemanların doğrudan birbiriyle etkileşimleri sonucu meydana gelir. Üç elemanlı abrasiv aşınmada ise, aşınan ve aşındıran malzeme arasında serbest ara malzeme olması söz konusu olabileceği gibi, aşınma sonucu yüzeylerden ayrılan parçacıkların birer ara malzeme gibi davranmaları da üçüncü eleman olarak görev yapabilir.

Metal-metal sürtünmelerinde aşınma iki elemanlı abrasiv veya adhesiv olarak başlayıp, üç elemanlı abrasiv olarak devam eder. Bu durumda araya giren toz, mineral taneleri, çizilme sonucu serbest hale geçen mikro taşlar ve parçalanmış oksit parçaları üçüncü elemanı (ara malzemeyi) oluşturabilir. Serbest hale geçen mikro talaş parçaları, genellikle ana malzemeden daha sert olduklarından dolayı aşınmayı hızlandırır.

6.2.3. Yorulma aşınması

Mühendislik malzemelerinde yorulma olayı, tekrarlanan zorlanmalar altında ve zamanla meydana gelir. Yorulma aşınması mekanizması malzemenin yüzeyinden başlar. Yüzey bölgesi titreşimli bir zorlanmaya maruz kaldığında veya sürtünme elemanları tekrarlanan gerilimlerle etkileştiklerinde bu gerilmelerin sebep oldukları

mikro çatlaklar vasıtasıyla yorulma aşınması denilen pulcuklar şeklinde malzeme ayrılmaları meydana gelir. Bu olay esnasında içyapıda parçalanmalar ve yırtılmalar meydana gelerek yüzeyden kısmi kopmalar olur [95].

Maksimum kopma gerilmelerinin bulunduğu yerde plastik deformasyon ve dislokasyon olaylarına bağlı olarak çok küçük boşluklar meydana gelmektedir. Bu boşluklar zamanla yüzeye doğru ilerlemekte, büyümekte ve nihayet yüzeyde küçük çukurlar meydana gelmektedir. Pitting adı verilen bu aşınma tipi, daha çok dişli çarklarda, rulmanlı yataklarda ve kam mekanizmaları gibi yuvarlanma hareketi yapan elemanların yüzeylerinde meydana gelir [95].

6.2.4. Eroziyon aşınma

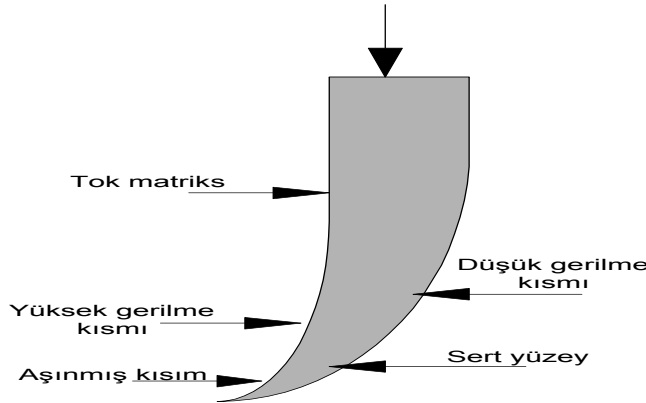
Erozyon ortamı ile malzeme yüzeyi arasındaki hızın çok yüksek olması nedeniyle meydana gelen bozunma olayı olarak tarif edilebilir. Gaz veya sıvı ortamında taşınan abrasiv tanelerin yüzeye belirli bir açıda çarpması ile oluşan enerji, katı cismin basınç mukavemetini aştığı zaman, cismin yüzeyinde plastik deformasyon meydana gelerek yüzeyde kırılmalara sebep olur ve yüzeyde aşınma meydana gelir. Bu şekilde meydana gelen aşınmaya erozyon aşınması denir. Yumuşak malzemeler erozyon aşınmasına çok elverişlidir. Aşındırıcı parçaların büyüklüğü, hızı, şekli, sertliği ve çarpma açısının değeri erozyon aşınma mekanizmasını etkileyen önemli faktörlerdir [96, 97].

6.2.5. Öğütmeli aşınma

Öğütmeli aşınma, yüksek basınçlar altındaki parçacıkların metal yüzeyleri ile düşük hızlarda karşılaşmaları sonucunda, metal yüzeyinde parçacıkların kesilerek veya çok sayıda ufak çizikler açılarak kopartılması ile meydana gelir. Bu yüksek basınç ve düşük hız kombinasyonu, genellikle hafriyat çalışmalarında kullanılan buldozer ve kepçe gibi ağır iş makinelerinin çalışma koşullarında meydana geldiği için, bu araçların kesici uç yüzeylerinde bu hasar türü meydana gelir. Kepçelerde kullanılan

kesici ve batıcı uçların, öğütmeli aşınma sonucunda şekil değişimi meydana gelerek körlenme oluşur.

Bu tip aşınmayı engellemek için yapılan girişimlerin başarısızlığa uğraması nedeniyle, malzemenin kontrollü olarak aşındırılması yoluna gidilmeye çalışılmıştır. Kontrollü aşınma ile malzeme kendi kendine bilenerek, körlenme sebebiyle meydana gelen performans düşüklüğü önlenebilir. Bu mekanizma ile meydana gelen kendi kendine bilenmenin oluşumu, Şekil 6.7’de şematik olarak gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, kesici takım malzemesinin düşük gerilmeli yüzeyine sert metal takviyesi yapılarak aşınma hızı azaltılmıştır. Diğer yüzeyde ise hem malzeme sertliğinin düşük olması, hem de yüksek gerilme etkisinde kalması nedeniyle aşınma hızı, diğer yüzeye göre daha fazladır. Meydana getirilen bu farklı aşınma hızları nedeniyle, malzeme kendi kendine keskinleşir [97].



Şekil 6.7. Bir kesici uçta meydana gelen kendi kendine bilenmesinin oluşum mekanizması [97].

6.2.6. Oymalı aşınma (Gouging Wear)

Oymalı aşınma, malzeme yüzeyinin çok yüksek gerilmelerdeki çarpma durumlarında, yüzeyden bir parçanın kesilerek veya oyularak kopmasıyla meydana gelir. Bu tip aşınmaya genellikle hafriyat, madencilik, petrol kuyularını delme işlemi ve benzeri koşullarda çalışan malzemelerin kesme ve delme görevi yapan kısımlarında görülür. Bu işlemler sırasında sert abrazif parçacıkların çok yüksek gerilmeler altında malzeme yüzeyine çarpmaları ile yüzeylerde hızlı bir şekilde hasar

oluşumu meydana gelir. Oymalı aşınma diğer aşınma türlerine göre çok daha hızlı olarak geliştiğinden, bu aşınmaya uğrayan parçaların yenileriyle değiştirilerek kullanılması daha ekonomik olmaktadır [98].

6.2.7. Kazımalı aşınma (Fretting wear)

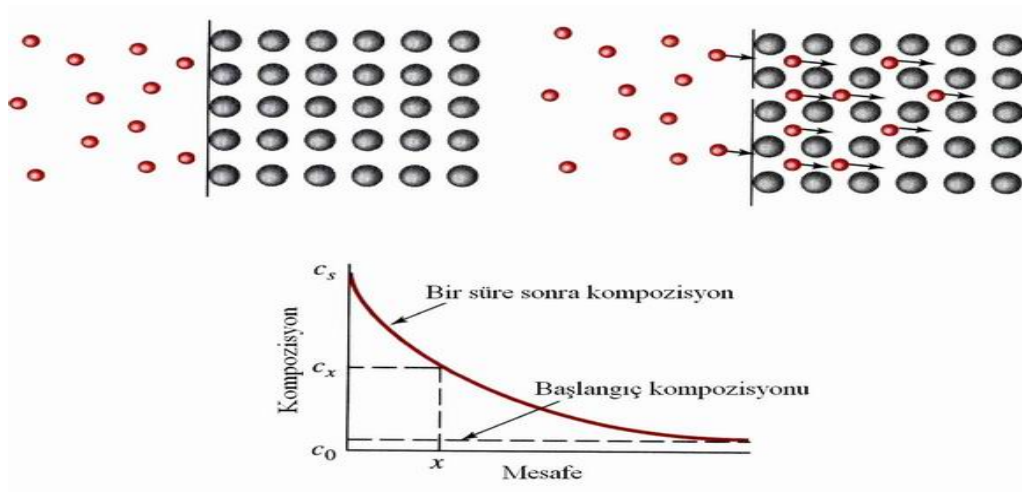
Kazımalı aşınma, karşılaşılan yüzeylerde mikro kaynaşmanın meydana geldiği adhezif aşınmaya bir miktar benzemektedir. Aralarındaki fark ise, şu şekilde açıklanabilir: Adhezif aşınma, birbirleri üzerinde kayan yüzeylerde meydana gelirken, kazımalı aşınma birbirlerine göre hareket etmeyen yüzeylerde meydana gelir. Ancak kazımalı aşınma, hareketin az olduğu (vibrasyon) meydana geldiği sistemlerde, mikro kaynaşmanın oluşmasıyla meydana gelir.

Kazımalı aşınma vibrasyonlu ortamlarda çalışan somun, perçin gibi bağlantı elemanlarıyla gelişmiş sistemlerde, otomobil şaftlarının birleşme noktalarında ve yataklarda en yaygın olarak kullanılan hasar oluşum mekanizmasıdır. Kazımalı aşınma, temas yüzeylerinde yorulma otomobil şaft gibi parçalarda önemli bir problemdir. Gerçekte, şaftlarda meydana gelen yorulma kırılmalarının nedeni kazımalı aşınma meydana getirmektedir [98].

6.2.8. Tribosüblimasyon ve difüzyon aşınması

Sürtünme ısı ile yüzey bölgesi sıcaklığının çok yükselmesi halinde ortaya çıkar. Yüksek sıcaklıkta atom veya moleküllerin malzeme içine girmesi difüzyon esasına ve çevreye transferi tribosüblimasyon esasına dayanan aşınma mekanizmalarıdır [99].

Birbirleriyle temas halinde bulunan yüzeyler arasında, sürtünmeden dolayı sıcaklık yükselmesi ile birlikte, temas yüzeyinde bulunan atomların kristal kafes içinde atom yoğunluğu yüksek olan bölgelerden düşük olan bölgelere doğru hareket etmeleriyle meydana gelir. Şekil 6.8’de yüzeyler arası malzeme transferi görülmektedir [99].



Şekil 6.8. Yüzeyler arası malzeme transferi [99].

Sistem çalışırken uygulanan kuvvetle yüzeylerin teması sağlanarak, malzeme yüzeylerinde gerilme yığılmaları ve sıcaklığın artışı ile birlikte temas noktalarında akma ve sürünme başlar. Bunun sonucunda temas noktaları plastik şekil değiştirmeye maruz kalır ve bunun sonucunda da temas alanları büyür.

Yüzeyler arası atom alışverişi meydana gelerek mukavemeti düşük olan bir yüzey tabakası meydana gelir. Bu tabaka, sürtünme ve izafi (bağlı) hareketin devam etmesiyle birlikte esas malzeme yüzeyinden koparak malzeme kaybına sebep olur. Bu şekilde meydana gelen aşınmaya difüzyon aşınması denir. Bu aşınma mekanizması fren balatalarında, uzay ve havacılıkta kullanılan araçlar ve takım tezgâhlarında görülür. Demiryollarında kullanılan fren pabuçları ile tekerlek arasındaki sürtünmeden dolayı difüzyon aşınması meydana gelebilir. Sıcaklığın yükselmesi ve yeterli zaman sonunda sürtünme yüzey bölgesinde atom veya moleküllerin çevreye transfer olması ile “tribosüblimasyon aşınması” meydana gelir [99].

6.2.9. Termal aşınma (Termal etkenler)

Mekanik ve kimyasal aşınma mekanizmalarının oluşumunu kolaylaştıran ve bu mekanizmalarla eş zamanlı işleyen bir oluşumdur. Bu mekanizmada sıcaklık etkisi ile atomik hareketler hızlanır. Malzemenin yumuşaması ile atomik aşınma

gerçekleşir. Termal şok ve yüksek sıcaklıkta ki oksidasyonda termal aşınmaya sebep olur [98, 99].

6.3. Aşınma Testleri ve Ölçüm Yöntemleri

Aşınma deney yöntemlerini genel olarak iki grupta toplamak mümkündür. Bunlar;

A) Yağlamalı ve yağlamasız bir ortamda ana ve karşı malzemenin (metal-metal) aşınma değerlerinin ölçüldüğü testler.

B) Katı, sıvı ve gaz halinde ki maddelerin etkisi altında yalnız karşı malzemenin aşınma değerinin ölçüldüğü testler.

ASLE (Amerikan Society Of Lubrication Engineers, 1978) tarafından yüz kadar test sistemi belirlenmiştir. Bu aşınma testlerinde, aşınma ölçüm yöntemleri olarak bilinen ağırlık farkı, kalınlık farkı, iz değişimi ve radyoizotop metotları gibi metotlar kullanılmaktadır. Bu metotlar aşağıda sırayla açıklanmaktadır [98]. Bir sürtünme sisteminde, aşınma miktarlarını ölçmek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Sürtünme elemanlarının malzeme özelliklerine ve sistemin yapısına bağlı olarak yöntem seçimi yapılmalı veya beklenenleri yerine getirecek şekilde yöntem kombinasyonu geliştirilmesi yoluna gidilmelidir [100].

Bir ölçme yönteminden beklenen temel özellikler; Yüksek hassasiyet, kolay, seri uygulama ve ekonomik olmasıdır.

Aşınma testlerinin uygulanmasında farklı metotlar uygulanmaktadır. Bunlardan en yaygın olarak kullanılanları aşağıda açıklanmıştır.

6.3.1. Ağırlık farkı metodu

Ekonomik olması ve ölçülen büyüklüğün alet duyarlılık kapasitesi dâhilinde bulunması sebebiyle en çok kullanılan yöntemdir. Deney numunelerinin her ölçüm

için yerinden çıkartılıp ölçme yapılması, yani numune yerindeyken üzerinden ölçü alınamaması bu yöntemin dezavantajıdır.

Ağırlık kaybının ölçülmesi 10^{-3} veya 10^{-4} gr hassasiyetinde oldukça duyarlı bir terazi ile yapılır. Aşınma miktarı gram (g) veya miligram (mg) cinsinden ifade edilirse, metre veya kilometre (km) olarak tespit edilen sürtünme yoluna göre birim sürtünme yoluna karşılık gelen ağırlık kaybı miktarı (g/km), (mg/m) ile ifade edilebilir. Ağırlık kaybı birim alan için hesap edilecekse (g/cm^2) gibi bir birim kullanılabilir. Ağırlık kaybı hacimsel aşınma miktarı olarak belirtilmek istendiğinde, yine ağırlık kaybından hareketle kullanılan malzemenin yoğunluğu ve deney numunesi üzerine etki eden yükleme ağırlığı hesaba katılmak suretiyle birim yol ve birim yükleme ağırlığına karşılık gelen hacim kaybından da gidilerek de bulunabilir. Bu tanımlamalara göre ağırlık farkı ölçme metodunda en çok kullanılan bağıntılar şunlardır [98];

$$W_a = \frac{\Delta G (mg)}{d.P.S \left(\frac{gr}{cm^3} \cdot N.m \right)} \quad (6.1)$$

Burada;

W_a : Aşınma oranı ($\text{mm}^3/\text{N.m}$)

ΔG : Ağırlık kaybı (mg)

P : Yükleme ağırlığı (N)

S : Kayma yolu (m)

d : Yoğunluk (gr/cm^3) olarak verilmiştir. Aşınma oranının (W_a) ters değeri de aşınma direnci (W_t) olarak gösterilir.

$$W_a = \frac{1}{W_t \left(\frac{N.m}{mm^3} \right)} \quad (6.2)$$

Başka bir bağıntı olarak da, bir kilometre kayma yoluna tekabül eden yükseklik kaybı bağıntısı vardır ki, genellikle iki elemanlı abrasiv aşınmanın hesaplanmasında kullanılır.

$$W_a = \frac{10^4 \cdot \Delta G(\text{gr})}{A \cdot d \cdot s(\text{cm}^2 \cdot \text{gr} / \text{cm}^2 \cdot \text{km})} \quad (6.3)$$

Burada;

W_a : Bir kilometre aşınma yoluna karşılık gelen yükseklik kaybı (μm)

ΔG : Ağırlık kaybı (gr)

A : Aşınma yüzeyi (cm^2)

d : Yoğunluk (gr/cm^3)

S : Kayma yolu (km) olarak alınır.

Deney malzemesi yükseklik kaybının, referans malzemesinin yükseklik kaybına oranı, aşınma orantı sayısını (W_a) verir.

$$W_a = \frac{V_s(\text{testnumunesi})}{V_s(\text{Fe37})} \quad (6.4)$$

Bu orantı sayısının ters değeri de bağıl aşınma direnci (R) olarak kullanılır.

$$R = \frac{1}{W_a} \quad (6.5)$$

Üç elemanlı abrasiv aşınmada ise, genellikle DIN 50320'de verilen boyutsuz aşınma oranı formülü yaygın olarak kullanılır [101].

Hassas bir terazi yardımı ile test başındaki ve sonundaki ağırlık farkı (ΔG) ölçülerek aşınma sonucu oluşan malzeme kaybı bulunur. Sürtünme elemanın özgül ağırlığı (d)

ve sürtünme yüzeyinin büyüklüğü (A) üzerinden bu yöntemle bulunan aşınma miktarı diğer metotların sonuçları ile karşılaştırılabilir. Burada;

$$\Delta H = \frac{AG}{d.A} \quad (6.6)$$

şeklindedir [101].

6.3.2. Kalınlık farkı metodu

Aşınma esnasında oluşacak boyut değişikliğinin başlangıç değeriyle karşılaştırılması sonucu elde edilir. Kalınlık farkı olarak tespit edilen bu değerden gidilerek hacimsel kayıp ve birim hacimdeki aşınma miktarı hesaplanır. Kalınlık, hassas ölçüm aletleriyle $\pm 1\mu\text{m}$ duyarlıkta ölçülmelidir [100,101].

6.3.3. İz değişiminin ölçülmesi metodu

Sürtünme yüzeyi bölgesinde geometrisi belli bir iz (küre, daire vb.) oluşturulur ve test boyunca bu izin boyutunun (çapının) değişimi ölçülür. Uygulamada en çok kullanılan alet vickers sertlik ölçme cihazıdır. Elmas piramit (tepe açısı 136°) bıraktığı izin köşegenlerinin değişimi mikroskop yardımı ile büyütülerek ölçülebilir [99].

6.3.4. Aşınmanın radyo-izotoplarla ölçülmesi yöntemi

Diğerlerine göre daha yeni, fakat hassasiyeti çok fazla olan bir yöntemdir. Sürtünme yüzey bölgesinin proton veya yüklü α parçacıkları ile bombardıman edilerek radyoaktif hale getirilmesi esasına dayanır. Aşınma sonucu radyoizotopların yüzey bölgesinden ayrılmasıyla ortaya çıkacak aktivite değişimi ölçülür. Diğer yöntemlere göre yaklaşık olarak 1000 kat daha fazla hassas oluşu yöntemin en önemli özelliğidir. Test süresi ve masraflarının çok yüksek olduğu teknik sistemlerde (otomobil endüstrisinde) ve diğer yöntemlerin uygulanmadığı “açık” sistemlerde (normal

işletmelerdeki ray-tekerlek aşınması gibi) radyo metrik yöntemlerle ölçme ekonomik, hatta tek yöntemdir. Fakat bu yöntem belirtilen örnekler gibi özel problemlerin çözümü dışında kullanılacak kadar ucuz ve teknik uygulama bakımından yaygın değildir [100,101].

6.3.5. Ultrasonik yöntemle aşınmanın tespiti yöntemi

Ultrasonik aşınma yöntemi, bölüm kalınlığı ölçülecek malzemeye yüksek frekansta ses dalgaları gönderilmesiyle yapılmaktadır. Dalgaları gönderme ve alma arasında geçen zaman kalınlığı belirler. Bu yöntem aşağıdaki belirtilen özelliklere ve avantajlara sahiptir: Parçaları temizleme büyük zaman kaybına yol açar (özelliklerde kovanlarda ve pabuçlarda). Bu yöntem parçaların etrafında biriken kirlenmelere bağlı olarak ölçme hatalarını önler, Teknik elemanlar arasında ki ölçme tekniği farklılıklarına bağlı olarak hataları giderir, Çok sayıda parça için bilgi depolar ve Otomatik aşınma yüzdesi ve tasarlanmış ömür hesapları için bilgisayar programları mevcuttur [101,102].

6.3.6. Optik yöntemle aşınmanın tespiti

Optik yöntemle aşınmayı ölçmenin birçok yöntemi vardır. Bunlardan biri yüzey üzerine boyutu belli olan bir mikro sertlik çukuru oluşturularak, aşınma sonrasında bu çukurun boyutundaki azalmayı incelemekten ibarettir. Optik yöntemin yatay saptanabilirlik sınırı 10^{-4} cm civarında olup 1/5 meylinde bir çukur (iz) için 10^{-5} cm'lik bir derinlik sınırı söz konusudur. Böylece de yukarıda sözü edilen profilometre yönteminin sınırlamalarıyla aynı sınırlamalarda aşınma ölçümü yapılabilir [102].

6.3.7. Mekanik ölçüm yöntemiyle aşınmanın tespiti

Genellikle mekanik ölçüm büyük boyutlu kayar parçalara (örneğin otomobil motoru silindirleri) uygulanır ve saptanabilen minimum aşınma miktarı çok daha büyük olur.

İş makinelerinin büyük ve sürekli aşınmaya maruz kalan parçalarının kontrolünde işletme şartlarında en uygun yöntemdir [102].

Aşınmayı ölçmenin yöntemi ise, özellikle aşınmanın dar bir bantta meydana gelmesi halinde, bir profilometre ile şeridin bir profilini çıkartmak ve kazınmış malzeme miktarını tahmin etmekten ibarettir. 3 cm uzunluk, 10^{-2} cm genişlik ve 10 mikro inçlik bir şeritte 10^{-5} gr. bir ağırlık kaybı saptanabilir [102].

7. MALZEME VE METOD

Bu çalışmada, AA2014 tozlarına parçacık B₄C ilave ile elde edilen metal matrisli kompozit (MMK) karakterizasyonu ve aşınma özellikleri incelenmiştir. MMK üretiminde toz metalurjisi ve infiltrasyon yöntemleri kullanılmıştır.

7.1. Deneysel Malzeme

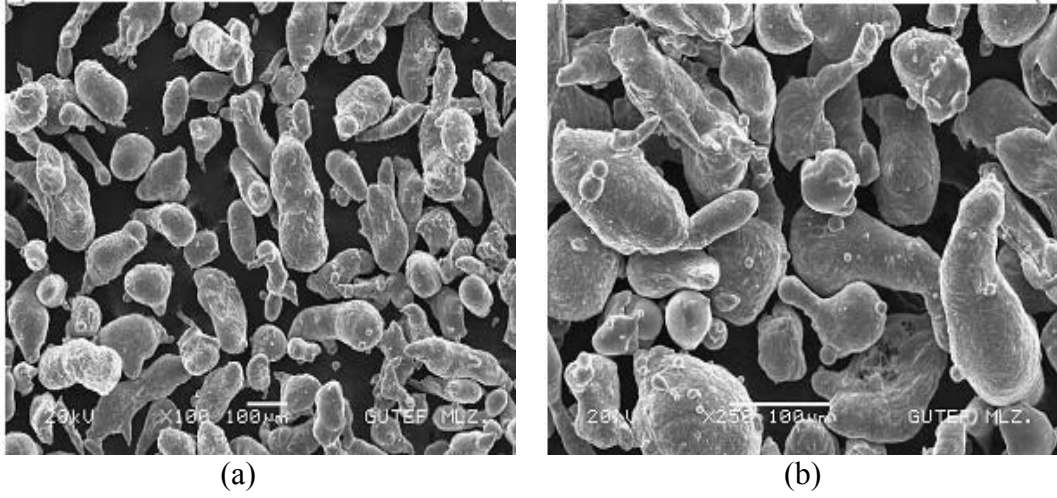
Deneysel çalışmalarda kullanılan AA 2014 alaşımına ait tozlar gaz atomizasyon yöntemi ile G.Ü.T.E.F malzeme laboratuvarında üretilmiştir. İnfiltrasyon numuneleri ise Kırıkkale Üniversitesi Malzeme ve Metalurji Mühendisliği laboratuvarında elde edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan AA2014 alaşımının kimyasal bileşimleri Çizelge 7.1’de verilmiştir.

Çizelge 7.1. Gaz atomizasyon yöntemi ile üretilmiş AA2014 tozu ve B₄C özellikleri

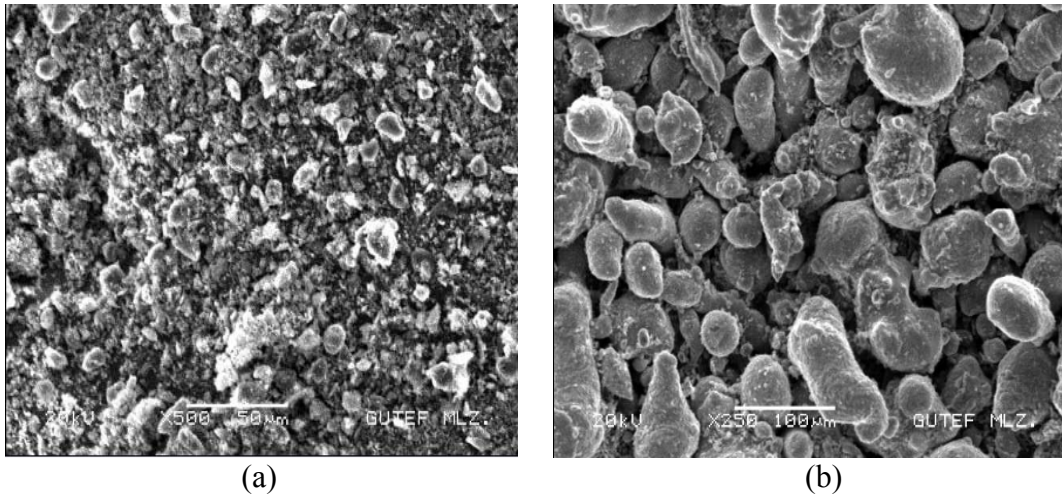
İÇERİK	Al	Cu	Si	Mn	Mg	Fe	Zn	Cr	Ti
Ağırlıkça %	93,5	4,06	0,6	0,57	0,56	0,47	0,106	0,03	0,01

Takviye Malzemesi	Yoğunluk (x10 ³ kgm ⁻³)	Isıl Genleşme Katsayısı (10 ⁻⁶ C ⁻¹)	Ergime Sıcaklığı (0C)	Mukavemet (MPa)	Elastiklik Modülü (GPa)
B ₄ C	2,52	6,08	2420	2759 (24 ⁰ C)	448 (24 ⁰ C)

Aluminyum matrisli parçacık takviyeli kompozit malzeme üretimi için deneysel çalışmalarda başlangıç malzemesi olarak AA 2014 toz metal alaşımı kullanılmıştır. Bu alaşımın tozunun SEM görüntüleri (Resim 7.1) verilmiştir.



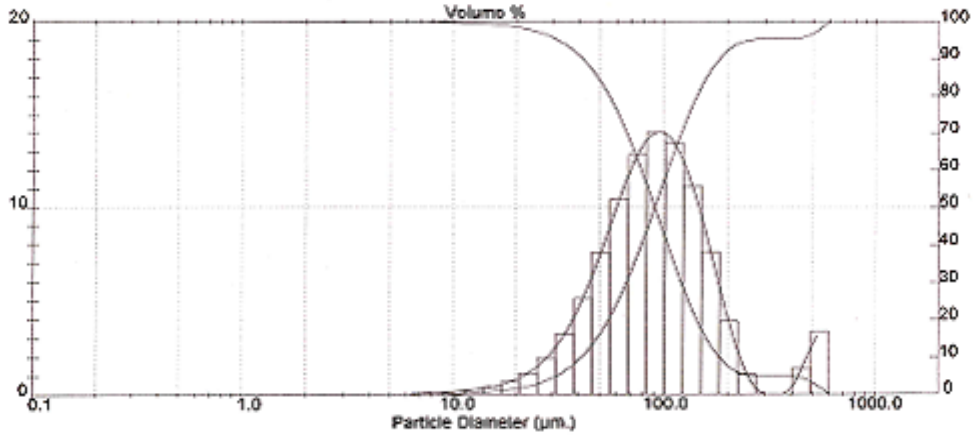
Resim 7.1. AA 2014 matris malzemesinin SEM görüntüleri; a) X100, b) X250



Resim 7.2. Başlangıç tozlarının SEM görüntüleri; a) B₄C, b) %2 AA 2014-B₄C karışım tozu

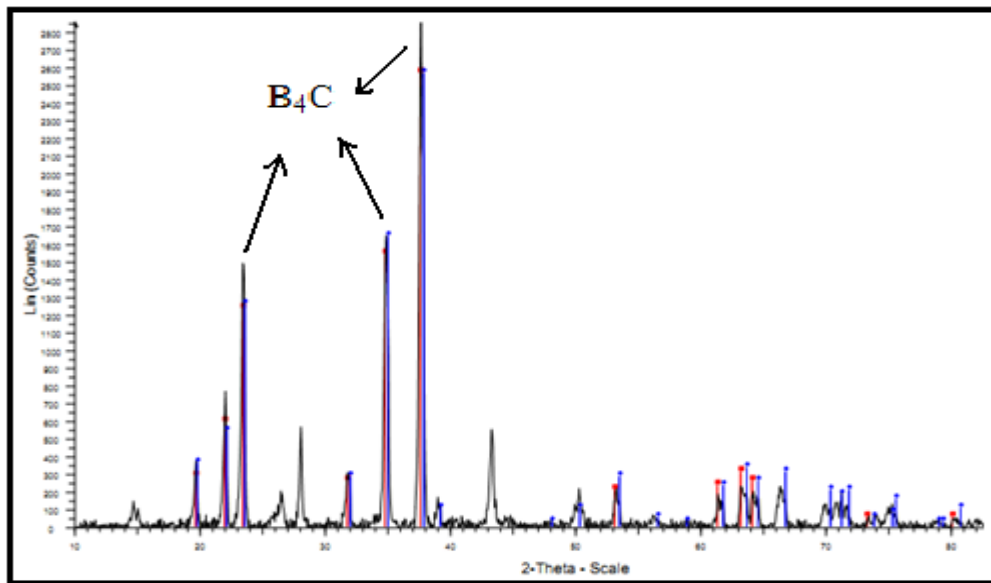
Deneysel çalışmalarda kullanılan gaz atomize tozların SEM görüntüleri incelendiğinde toz şekillerinin küresel, göz yaşı damlası ve çubuksu olduğu görülmektedir. Kullanılan AA 2014 tozlarına Gazi Üniversitesi Mimarlık Mühendislik Fakültesi, Makine Eğitimi Bölümünde Malvern Mastersizer E ver 1,2, b boyut analizi cihazında toz boyut analizi yapılmış, Şekil 7.1' deki gibi toz boyut dağılım sonuçları elde edilmiştir. Toz boyutu analizi sonuçlarına göre, kullanılan tozların %10'nun ortalama toz tane boyutu $d(0.1) = 41.28 \mu\text{m}$, %90'nın ortalama toz

tane boyutu $d(0.9)= 181.83$ olarak belirlenmiştir. Matris malzemesi olarak kullanılan AA 2014 alaşımının ortalama toz boyutu $d(0.5)= 90,66\mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür.



Şekil 7.1. AA 2014 matris malzemesinin toz boyut analizi

Üretilen kompozit malzemede, havacılık ve savunma sanayinde yaygın olarak kullanılan B_4C parçacık takviye malzemesi sağladığı üstün özelliklerinden dolayı seçilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan B_4C toz malzemesinin SEM görüntüleri (Resim 7.2 (a)) ve XRD analiz sonuçları (Şekil 7.2)' de verilmiştir. XRD sonuçlarına bakıldığı zaman, kullanılan B_4C tozunun güvenilirliği, yüksek şiddetli piklerle kanıtlanmıştır.



Şekil 7.2. B_4C Toz malzemesinin XRD analiz sonucu

Toz metalurjisi ve infiltrasyon işlemi için hazırlanan AA2014 tozların harmanlanması ağırlıkları tartılarak yapılmıştır. Toz tartımı işlemleri, Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, malzeme laboratuvarındaki Precisa XB200h marka 1/10000 hassasiyetteki elektronik terazide gerçekleştirilmiştir. Tozların karıştırılması işlemi, her takviye hacim oranı için ayrı ayrı olacak şekilde hesaplanarak, Gazi Üniversitesi Metal Eğitimi Bölümü Laboratuvar'ında bulunan, karıştırma (Turbola) cihazı kullanılarak yapılmıştır.

7.2. İnfiltrasyon Yöntemi İle AA2014 - B₄C Kompozitinin Hazırlanması

Metal matrisli kompozitlerin üretiminde kullanılacak olan takviye elemanı B₄C'ün tane büyüklüğü 53 µm olarak belirlenmiştir. Vakumlu infiltrasyon yöntemi ile MMK üretiminde kullanılacak olan AA2014 alaşımı ve B₄C tozları Çizelge 7.2'de verilen oranlarda, ikişer adet olmak üzere toplam 8 adet numune hazırlanmıştır. Tozların karıştırılması işlemi, her takviye oranı için ayrı ayrı olacak şekilde hesaplanarak, Gazi Üniversitesi Metal Eğitimi Bölümü Laboratuvar'ında bulunan, karıştırma (Turbola) cihazı kullanılarak yapılmıştır. Karıştırma işlemi her takviye oranı için 1 saat süreyle 60 devir/dakika' da gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 7.2. Numune karışım oranlarının ağırlıkları

Takviye oranı	B ₄ C (g)	AA2014 (g)
%1 B ₄ C	0,02	1,98
%2 B ₄ C	0,04	1,96
%4 B ₄ C	0,08	1,92
%8 B ₄ C	0,16	1,84

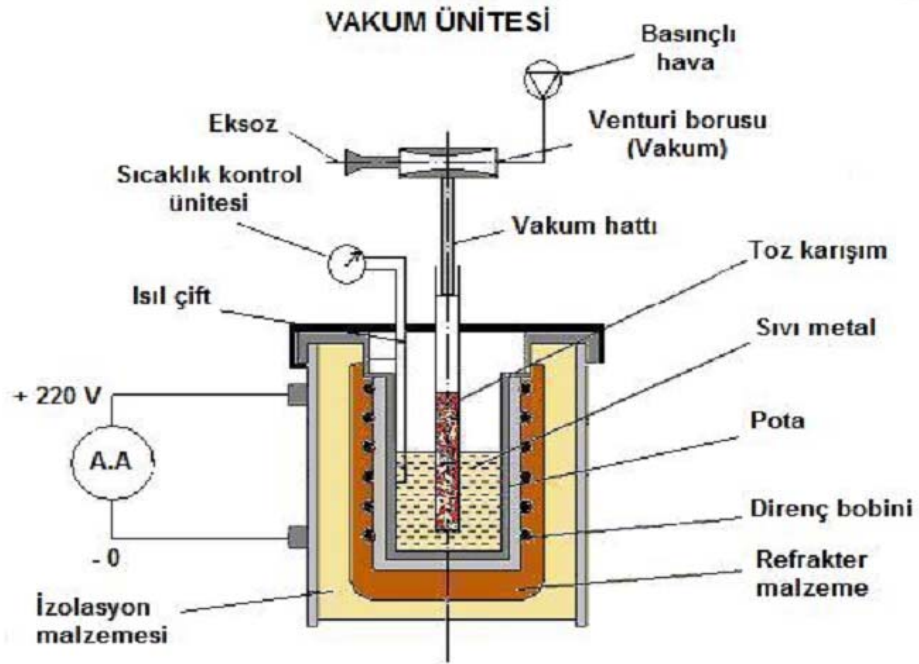
Vakumlu infiltrasyon deneyinde, 30 mm çapında, 1 x 300mm kesitinde AISI 304 kalitesinde paslanmaz boru kullanılmıştır. Paslanmaz borunun alt kısmına, AA2014-B₄C toz karışımının alta dökülmesini engelleyecek şekilde 75 µm göz açıklığına sahip paslanmaz çelik filtre yerleştirilmiştir. % 1, % 2, %4 ve %8 takviye hacim oranlarında hazırlanmış olan toz karışımları 80 mm yükseklik oluşturacak şekilde

boru içerisine serbest halde doldurulmuştur. Boru içerisindeki toz karışım üzerine bir filtre daha yerleştirilerek, bilezik yardımıyla bir miktar sıkıştırılmıştır. Daha sonra boru içerisine yaklaşık 70 mm yükseklik oluşturacak şekilde kuru silisyum kumu doldurularak aynı filtreden yerleştirilip sıkıştırılmıştır (Şekil 7.3).

Boru içerisine doldurulan SiO_2 kumu, vakumlama sırasında sıvı matris malzemesinin vakum hattına ulaşarak zarar vermesini engellemek amacıyla taşımaktadır. Aynı şekilde boru içerisine yerleştirilen ilk filtre AA2014- B_4C toz karışımının SiO_2 kumuna karışmasını engellemek için tasarlanmıştır. Üst kısımdaki filtre ise, SiO_2 kumunun vakumlama sırasında emiş borusuna ve vakum ünitesine girmesini önlemek amacıyla yerleştirilmiştir. Son olarak, deney borularının üst kısmına, vakum ünitesinin bakır borusu ile deney borusunun irtibatını sağlamak ve sızdırmazlığı temin etmek için, ısıya dayanıklı teflon tapalar geçirilerek deney boruları infiltrasyona hazır hale getirilmiştir (Şekil 7.3).

7.2.1. İnfiltrasyon işleminin uygulanması

Vakumlu infiltrasyon deneyleri, Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünde malzeme laboratuvarında bulunan vakum infiltrasyon ünitesinde yapılmıştır. Deneyin yapılmasında matris malzemesi AA2014'ün ergitilmesinde bir başka çalışmada kullanılmış Şekil 7.3'de görülen ergitme ocağı ve deney düzeneği kullanılmıştır.



Şekil 7.3. Vakum infiltrasyon deney düzeneği [67].

Şekil 7.3’de görülen deney düzeneğinin içerisine, AISI 304 kalitesinde paslanmaz çelikten imal edilmiş, 2 litre sıvı metal alabilecek kapasiteye sahip pota yerleştirilmiştir. Pota içerisine matris malzemesi olan % 99,7 safiyete sahip AA2014 tozları, tartılarak doldurulmuştur. Ocak yakılarak matris malzemesinin ergitilmesine başlanmıştır.

7.2.2. Sıcaklığın kontrolü

Matris malzemesi olan AA2014’ün ergime sıcaklığı 660 °C olmakla birlikte, ocak içerisindeki sıvı metalin sıcaklığının 800 °C’a çıkması beklenmiştir. Sıcaklık kontrolü sıvı metale daldırılan, Cr -Ni esaslı ısı çifti (termokupul) kullanılarak sıcaklık değerleri elektronik göstergeden takip edilmiştir. Isıl çift ile elektronik sıcaklık göstergesi arasında kontaktör bağlantısı yapılarak, matris malzemesinin sıcaklığı ± 5 °C’da sabit tutulmuştur. Resim 7.3’de sıcaklık kontrol ünitesi ile birlikte deney düzeneği görülmektedir.



Resim 7.3. Sıcaklık kontrol ünitesi ve deney düzeneği

7.2.3. Vakumun uygulanması

İnfiltrasyon deneyinde gerekli olan vakum, 10 bar basınç üretebilen kompresöre bağlanan, ventury prensibi ile çalışan vakum cihazı ile elde edilerek, el ile kontrol edilebilen, akış kontrol valfine bağlı manometrenin göstergesinden ölçülmüştür.

İnfiltrasyon deneyleri, 500 mmHg - 600 mmHg vakum değeri aralığında yapılmıştır. Vakum değerleri ± 10 mmHg'da sabit tutulmuştur. İnfiltrasyon esnasında oluşabilecek sıcak havanın vakum ünitesini olumsuz etkilememesi için vakum cihazı ile deney borusu arasındaki bağlantı, 1 m uzunluğundaki 6 mm çapında bakır boru ile sağlanmıştır. Bakır vakum borusu, paslanmaz çelik deney borusunun üst kısmına yerleştirilen, 300 °C'a dayanabilen teflon tapa içerisinden sızdırmazlık sağlanacak şekilde geçirilerek vakum hattı tamamlanmıştır.

7.2.4. İnfiltrasyon işlemi

İnfiltrasyon için hazırlanan, içerisi doldurulmuş deney boruları, pota içerisindeki sıvı metal sıcaklığına ve istenilen vakum değerine ulaşıldığında, sıvı metal içerisine daldırılmaya başlanmıştır. Her deney borusu ile ayrı ayrı olmak üzere 8 adet infiltrasyon deneyi yapılmıştır. Deney işlemleri normal atmosfer şartları altında gerçekleşmiştir.

İlk olarak % 1 takviye hacim oranındaki numune sıvı matris malzemesine daldırılarak, 300 mmHg vakum değerinde, 3 dakika süre ile bekletilerek çıkartılmıştır. Deney borusu 1 saat kendi halinde soğumaya bırakıldıktan sonra içerisi açıldığında infiltrasyonun ve ıslatmanın tam oluşmadığı görülmüştür. Bundan sonraki deneylerde, sıvı metal içerisine daldırılan deney borularına 3 dakika süre ile yaklaşık 550 mmHg değerinde vakum uygulanmıştır. 750 °C sıcaklıkta %1, %2, %4 ve %8 B₄C içeren sıvı matris ile infiltrasyon deneyleri yapılmıştır.

Belirlenen vakum süresi sonunda deney boruları pota içerisinden çıkartılarak, kendi halinde soğumaya bırakılmıştır. Soğuma sonunda açılan borular içerisinden çıkartılan malzemelerin tam infiltre olduğu ve MMK malzemenin istenilen mesafede, başarılı bir şekilde üretildiği görülmüştür.

Boruların içerisindeki kompozit malzemelerin çıkartılması işlemi universal torna tezgahında yapılmıştır. Bu işlem, paslanmaz çelik borunun kesit kalınlığı kadar talaş kaldırmak suretiyle kompozit malzemenin ortaya çıkarılması şeklinde yapılmıştır.

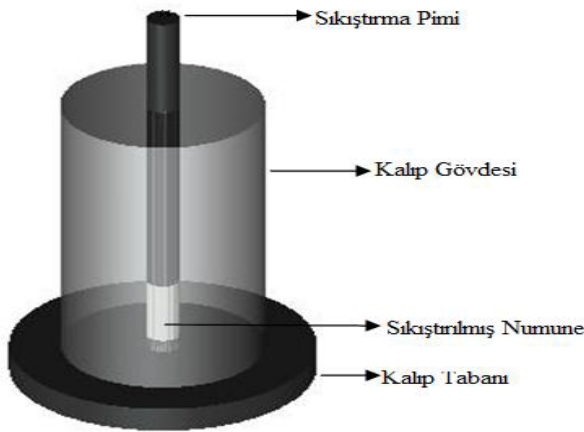
7.3. Toz Metalurjisi Yöntemi ile AA2014 - B₄C Kompozitinin Hazırlanması

Bu çalışmada AA2014-B₄C alaşım tozları ön denemeler sonrasında tespit edilen presleme basıncı olan 700 MPa kullanılmıştır. Soğuk presleme işlemi Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Malzeme Laboratuvarlarında bulunan 160 tonluk 'Hidrolik San' marka preste yapılmıştır (Resim 7.4).



Resim 7.4. 160 tonluk pres cihazı

Tozların soğuk preslenmesi işlemlerinde 10 mm iç çapında 40 mm dış çapında ve 120 mm yüksekliğinde takım çeliğinden yapılarak sertleştirilmiş metal zımba kullanılmıştır (Şekil 7.4). Yağlayıcı olarak çinko stearat ilave edilen tozlar metal kalıp içerisine konularak ön şekillendirme işlemine tabi tutulmuştur.



Şekil 7.4. TM yöntemi ile üretilmiş AA2014-B₄C alaşımının preslenmesinde kullanılan metal kalıp

7.4. Sinterleme İşlemleri

Soğuk preslenen numuneler yine Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Malzeme laboratuvarında bulunan ve 1600 °C sıcaklık kapasiteli Protherm marka fırında yapılmıştır (Resim 7.5). Sinterleme işlemleri, 560 °C olarak seçilmiştir.

Numuneler 560°C'ye 10 °C/min ısıtma hızında ısıtılmış ve bu sıcaklıkta 1 saat bekletilerek sinteleme gerçekleştirilmiştir. Sinterleme işleme inert gaz ortamında yapılmıştır.



Resim 7.5. Sinterleme ısıl işlemi uygulanan fırın

7.5. Metalografik Çalışmalar

Metalografik işlemler için numunelere, klasik zımparalama ve polisaj işlemleri uygulanmıştır. Bu işlemler G.Ü.T.E.F. Malzeme Anabilim Dalı laboratuvarında bulunan PRESİ MECAPOL P 262 model polisaj cihazında yapılmıştır. Daha sonra numuneler Keller (%95 alkol+%5 HCl) dağlayıcısı kullanılarak dağlanmış ve mikroyapıları taramalı elektron mikroskobu (JEOL JSM-6060) ile optik mikroskopta (Leica) belirlenmiştir.

7.6. Yoğunluk Ölçümleri

İnfiltrasyon ve toz metalurjisi yöntemi ile üretilen numunelerin yoğunlukları, arşimet prensibi ve digital terazide ağırlıkları tartılarak mikrometre ile de boyutları ölçülerek ağırlık/hacim oranları hesaplanarak belirlenmiştir. İki ölçüm sonucundaki değerlerde

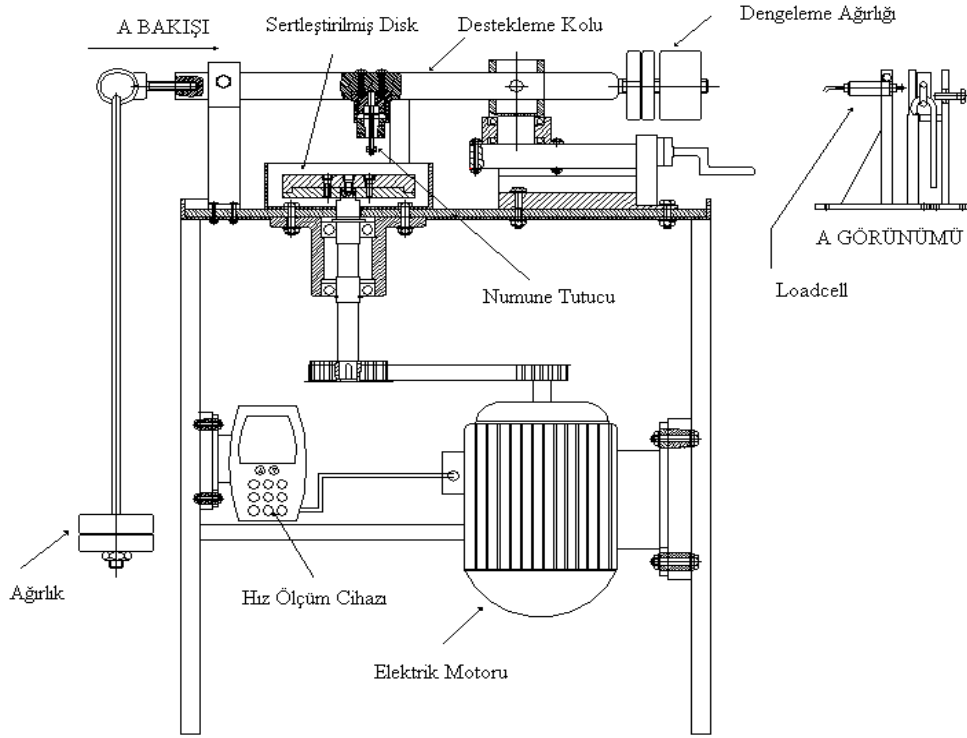
farklılık olmadığından dolayı ölçümler ağırlık/hacim oranı belirlenerek elde edilmiştir.

7.7. Kuru Sürtülmeli Aşınma İşlemleri

Aşınma deneylerinde kullanılan pin-on-disk tipi standart deney sisteminin şematik görüntüsü şematik olarak Şekil 7.5 'de verilmiştir.

Deney cihazının başlıca önemli parçaları şunlardır; 1,5W'lık 3 faz AC motor, hız kontrol cihazı, düşey dönel hareketi sağlayan sertleştirilmiş disk, destekleme kolu, numune tutma mekanizması, yük hücresi (ESİT STCS 50 kg Cs Loadcell) tablo dengeleme parçası ve ağırlıktır. Şekil 7.5'te görüldüğü gibi numune ile kayış kasnak sistemi 1/3 oranında çalışacak döner disk 1,5 KW'lık 1500 devir/dakika AC motor ile tahrik edilmektedir. Diskin salgısız dönebilmesi için motordan hareketi alan mil 2 noktadan rulman ile yataklanmıştır.

Numunelerin bağlandığı ve yükün asılacağı taşıyıcı kol tek noktadan yataklanmıştır. Numune bağlama aparatı kol üzerine monte edilmiştir. İki ucunda ağırlık bulunan taşıyıcı kolun bir tarafındaki ağırlık sisteme ağırlık asılmadan önce numune üzerine gelen yükü sıfırlamaktadır. Taşıyıcı kolun diğer ucuna asılan ağırlıklar ile de numune üzerine istenilen kuvvet uygulanabilmektedir.



Şekil 7.5. Aşınma test cihazının şematik görüntüsü

Taşıyıcı kolun bağlandığı yatak hem kendi ekseninde dönebilmekte hem de ileri geri hareket edebilmektedir. Hareketli yatağın ileri geri hareketi ile disk üzerine gelen numune disk merkezinden uzaklaşıp yaklaşabilmektedir. Diski döndüren elektrik motoruna bağlanan hız kontrol cihazı motorun değişken devirlere ayarlanabilmesini sağlamaktadır.

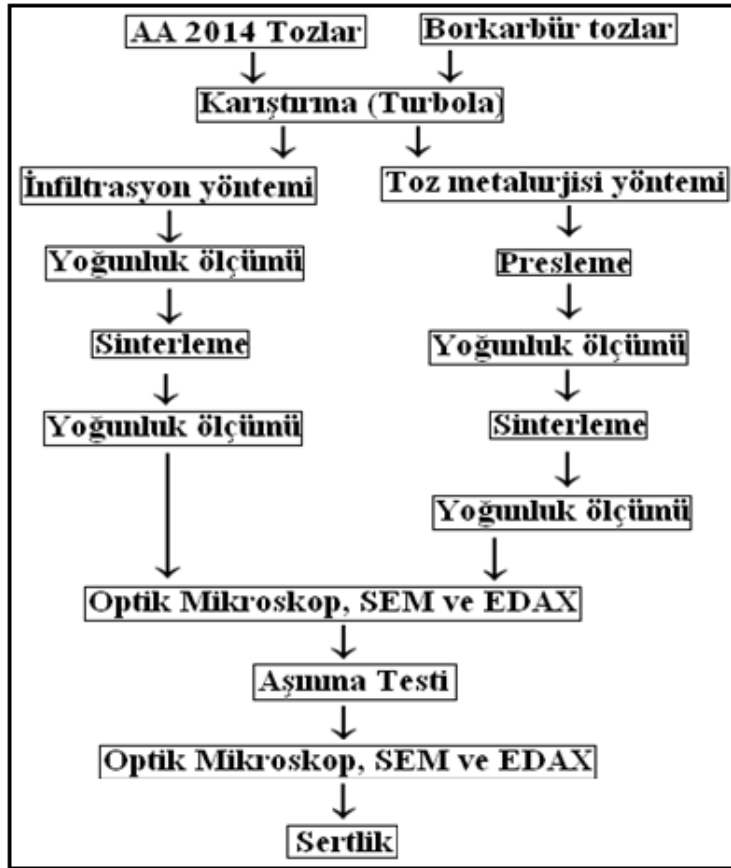
Aşınma testlerinde diskin ve numune yüzeylerinin temiz ve kuru olması gerekmektedir. Bu nedenle teste başlamadan önce her numune ve disk yüzeyi aseton ile temizlenmiştir. Her numune farklı bir iz oluşturacak şekilde yerleştirilerek, her test için aynı yüzey kalitesi sağlanmıştır. Tüm izler kullanıldıktan sonra disk yeniden taşlanarak teste hazır hale getirilmelidir.

Döner disk malzemesi 58 HRC sertliğine sahip ve 230 mm çapında, 20 mm kalınlığında Ç 4140 çeliğidir. Sertleştirme işleminden sonra disklere düzlem taşlama işlemi yapılmıştır. Aşınma testleri 30N yük ve 1500 metre kaydırma mesafesinde yapılmıştır.

Test cihazının devrinin ölçülmesi için ‘ COMPACT’ MARKA (Advent optical tach meter) takometre (0–1000 devir/dakika, 0-5 V çıkış) kullanılmıştır. Aşındırılan numuneler 1/10000 hassasiyetindeki ‘ PRESICA ‘ marka terazide tartılarak ağırlık kayıpları belirlenmiştir.

8. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışma kapsamında partikül takviyeli kompozit malzeme üretimi ve üretken kompozitin kuru sürtünme aşınma özelliklerinin araştırılmasına yönelik çalışmalar yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda kompozit malzeme eldesi için başlangıç malzemesi olarak, gaz atomize AA 2014 toz metal alaşımı (ortalama toz boyut $90,66\mu\text{m}$) ve yapıyı güçlendirmek amacıyla B_4C (ortalama toz boyutu $<10\ \mu\text{m}$) takviye malzemesi olarak kullanılmıştır. Kompozit malzeme üretilebilirliği açısından farklı yöntemler uygulanmıştır. Bu yöntemler sırasıyla toz metalurjisi ve infiltrasyon olarak, deney numuneleri üretimi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Üretim amaçlı optimum şartlar belirlendikten sonra, iki farklı yöntemle deney numuneleri üretimi yapılmıştır. Malzeme, mikroyapı ve mekanik özelliklerin belirlenmesi için yapılan çalışmalar Şekil 8.1' de verilen deneysel çalışma akış şeması altında gösterilmiştir.



Şekil 8.1. Yürütülen deneysel çalışma sıralaması

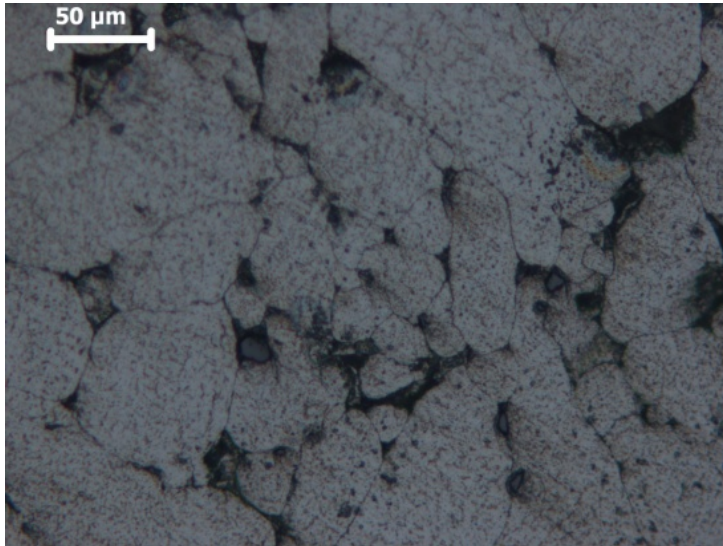
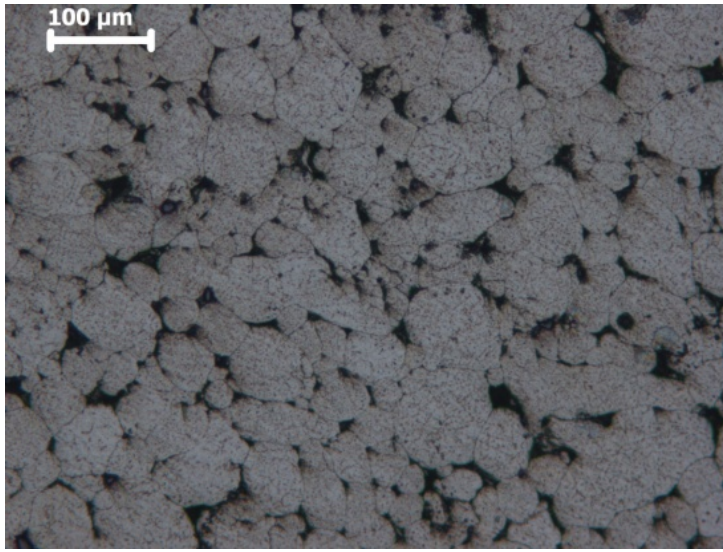
8.1. TM İle Üretilen Numunelerinin Karakterizasyonu

AA 2014 Toz metal matris malzemesi ile %1, 2, 4 ve 8 B₄C takviye hacim oranları kullanılmak suretiyle kompozit malzeme üretimleri gerçekleştirilmiştir. Kompozit malzeme üretilebilirliği ve malzeme özellikleri anlamında, TM ve infiltrasyon üretim parametreleri optimum seviyeye getirilerek üretilen deney numuneleri özellikleri karşılaştırılmıştır. Bu amaçlı daha önce yapılan çalışmalardan ve deney numunelerinin kontrolleri sırasında elde edilen veriler değerlendirilerek kompozitler üretilmiştir. Buna yönelik olarak toz üretiminde etkin olan parametrelerden presleme basıncı, sinterleme süresi ve sinterleme sıcaklıkları değiştirilerek optimum şartlar belirlenmiştir. İnfiltrasyon numuneleri içinde hem infiltrasyon parametreleri olan vakumlama basıncı, ergimiş metalin sıcaklığı ve vakumlama süreleri değiştirilerek optimum şartlar belirlenmeye çalışılmıştır. Her iki işlem için optimum şartlar deneysel yöntem bölümünde bahsedilen şartlarla sınırlıdır.

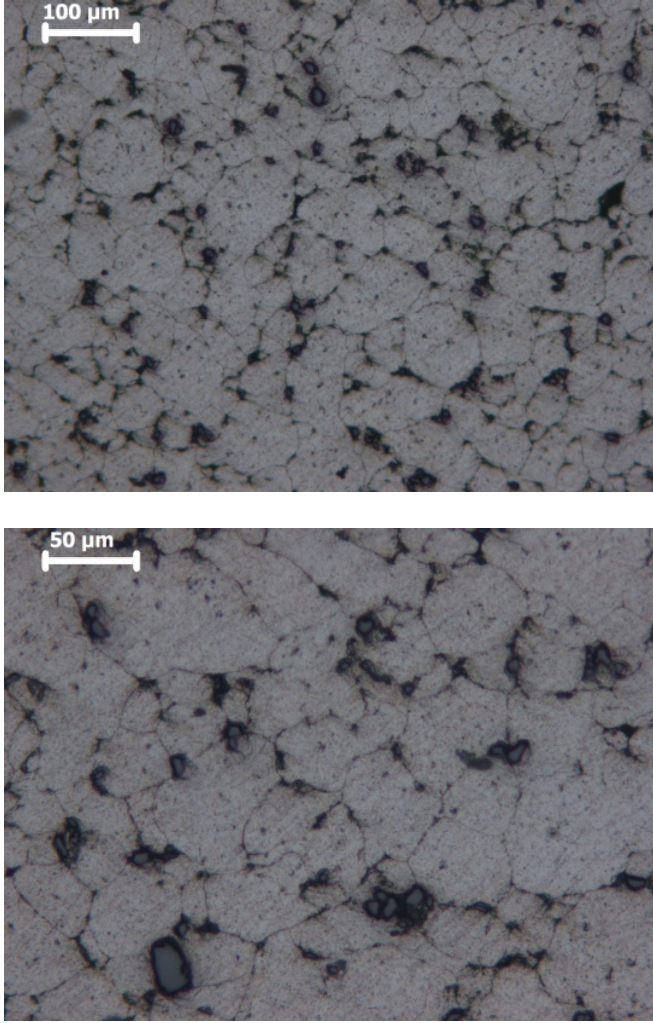
Deney numunelerinin üretilmesi için kullanılan birinci aşamada, TM yöntemi kullanılarak çalışmalar yürütülmüştür. Matris malzemesi ve takviye malzemesi arasındaki homojenizasyonun sağlanması açısından toz malzemeler 1 saat süreyle Turbola cihazında karıştırılmıştır. Karışımı sağlanan tozlar yapılan ön denemeler sonrasında 700MPa optimum presleme basıncı altında preslenmiştir. Bu basınçtan daha düşük presleme basınçlarında yapılan çalışmalarda, deney numunelerinin yüzeylerinde yetersiz birleşme ve dökülmeler meydana gelmiştir. Daha yüksek presleme basınçlarında ise kılcal çatlaklar meydana gelmiştir. Bilinen bir sonuç olarak presleme basıncının etkinliği, devamındaki sinterleme işlemlerindeki gerek gözenek-yapı etkileşimi gerekse matris/takviye ara yüzeyinde uygun olan ıslatabilirliğin sağlanması açısından önemlidir.

Presleme işlemi sonrasında elde edilen deney numunelerine atmosfer kontrollü fırında yüksek saflıktaki Argon gazı kullanılarak sinterleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Optimum sinterleme sıcaklığını belirlemek için 550, 560, 570, 580, 590 ve 600°C sıcaklıklarda 1 saat süreyle sinterleme çalışmaları yapılmış, sinterleme öncesi ve sonrasındaki yoğunluklar ve gözenek-yapı etkileşimi dikkate

alınarak, uygun sinterleme işlemi 560°C sinterleme sıcaklığında 1 saat süre olduğu bulunmuştur. Tozların optimum presleme işlemi ile birlikte temas yüzeyinin artırılması ve devamındaki sinterlenmesiyle birlikte yoğunluk sonuçlarında da artış olduğu tespit edilmiştir. Resim 8.1, 8.2, 8.3 ve 8.4 optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde, sinterleme işleminin etkisiyle beraber gözeneklerin tane sınırlarında, kapalı küresel şeklini aldığı ve bir çoğunda ise tane içlerine doğru ilerlediği görülmektedir.



Resim 8.1. TM yöntemiyle üretilen AA 2014 matrisli %1 B₄C takviyeli kompozit mikroyapıları



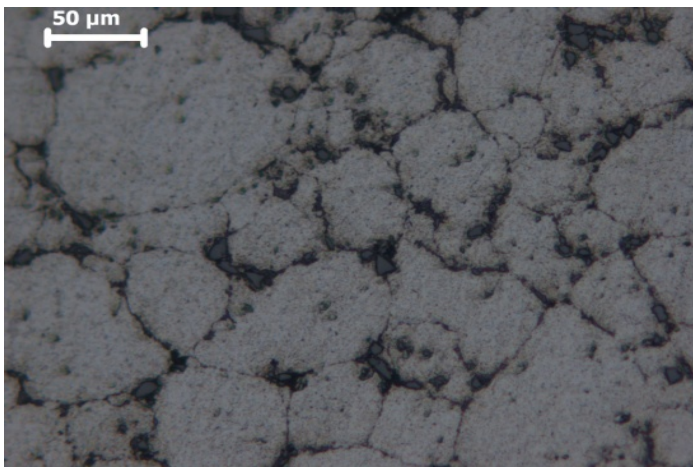
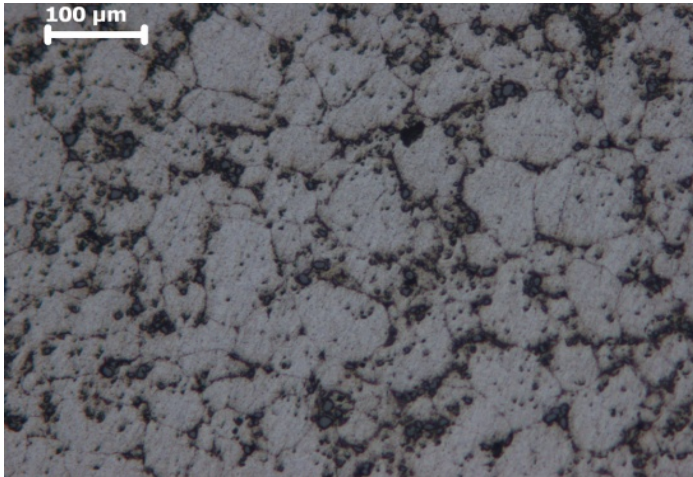
Resim 8.2. TM yöntemiyle üretilen AA 2014 matrisli %2 B₄C takviyeli kompozit mikroyapıları

Optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde, artan takviye hacim oranlarında bile B₄C' ün yapıda homojen bir şekilde dağıldığı görülmektedir. Bu durum Resim 8.1 Resim 8.4 mikroyapılar incelendiğinde, düşük ve yüksek takviye oranlarındaki dağılımın malzeme özellikleri açısından istenen bir durum olduğunu ortaya çıkarmıştır. Artan takviye oranlarına bağlı olarak kompozit mikroyapıları kıyaslandığında, takviye dağılımı açısından benzer bir durum sergiledikleri görülmüştür. Özellikle B₄C' ün tane sınırlarına yerleştiği tespit edilmiştir.

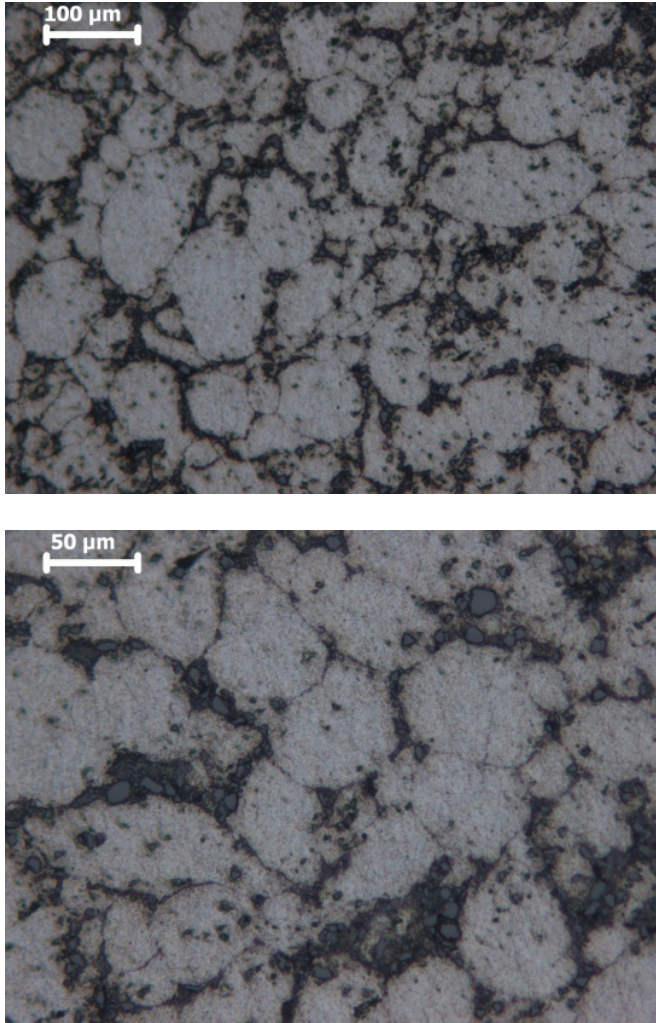
Takviye edilen B₄C %8 oranında olduğu durumlarda (Resim 8.4), kompozit bütününde bazı bölgelerde parçacıklar topaklanma eğilimine girmiştir.

Mikroyapıların elde edilmesinde yapılan metalografik incelemelerde zımparalama ve parlatma işlemi sırasında yüzeyden kopan B_4C parçacıkların yapıda bazen tekrar yüzeye yapışarak bazen de yüzeyden koparak yüzeyde çiziklere yol açtığı tespit edilmiştir ve temiz görüntülerin alınmasını engellemiştir.

TM yöntemiyle kompozit malzeme üretiminde kullanılan matris/takviye ıslatabilirliğinin etkin parametrelerinden olan matris takviye toz boyutlarının birbiriyle orantılı olması gereklidir. Bu bağlamda deneysel çalışmalarda kullanılan takviye ve matrisin farklı toz boyutlarına sahip olması durumu aşınma ve sertlik sonuçlarını etkilediği düşünülmektedir. Artan takviye oranlarında B_4C 'ün Al matris yapısında gözeneklere yerleştiği görülmüştür (Resim 8.3 ve Resim 8.4).



Resim 8.3. TM yöntemiyle üretilen AA 2014 matrisli %4 B_4C takviyeli kompozit mikroyapıları

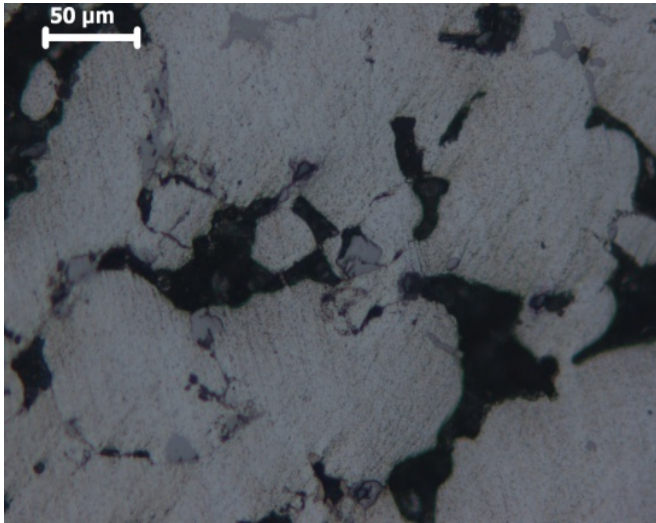
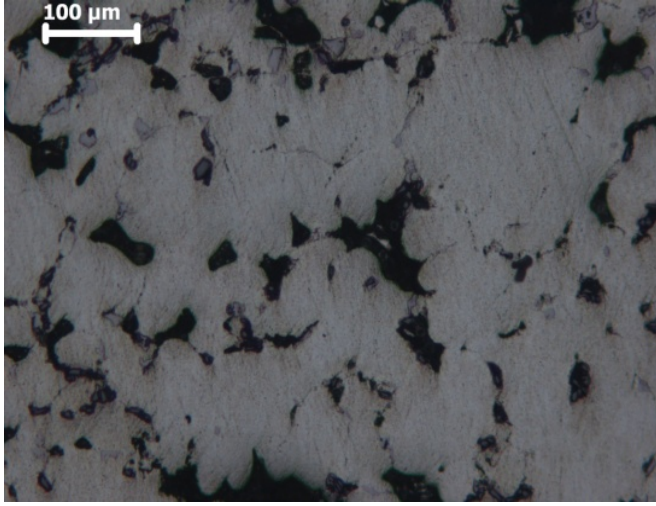


Resim 8.4. TM yöntemiyle üretilen AA 2014 matrisli %8 B₄C takviyeli kompozit mikroyapıları

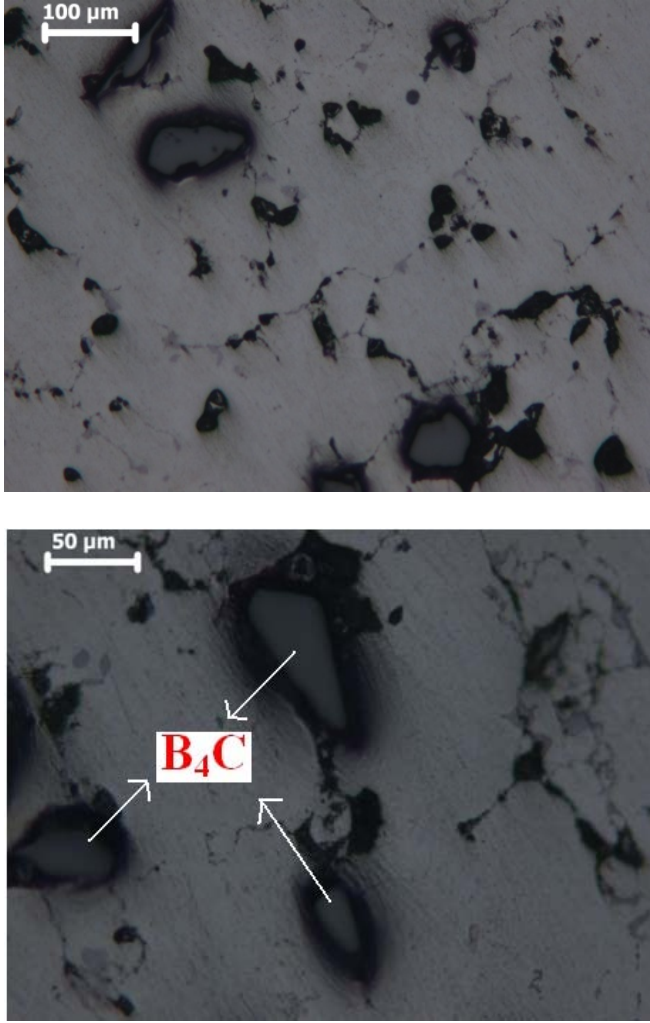
Yapılan çalışmalarda TM yöntemi kullanılarak AA 2014-B₄C kompozit malzeme üretilebilirliği, mikroyapısal açıdan gösterilmiştir. Kompozit malzemelere uygulanan sinterleme işlemi ile birlikte, B₄C parçacıklarının hem matris malzemesi hem de arayüzey etkileşimi ile birlikte malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirmiştir.

Çalışmanın ikinci aşamasında ise, infiltrasyon yöntemi kullanılarak AA 2014 matris malzemesi ve B₄C takviye elemanı ile parçacık takviyeli metal matrisli kompozitler üretilmiştir. İnfiltrasyon yönteminde küçük toz boyut aralıklarının kullanılması infiltrasyon işlemini olumsuz etkilediğinden, TM yönteminden farklı olarak deneysel çalışmalarda B₄C toz boyutunun ortalama 53µm kullanılması uygun görülmüştür.

İnfiltrasyon yönteminde %1, 2, 4 ve 8 B₄C toz malzemesine (550mmHg vakum altında 750 °C sıcaklıkta 3 dakika süreyle) AA 2014 sıvı matris yapısının infiltrasyonu sağlanmıştır(Resim 8.5 ve Resim 8.6).



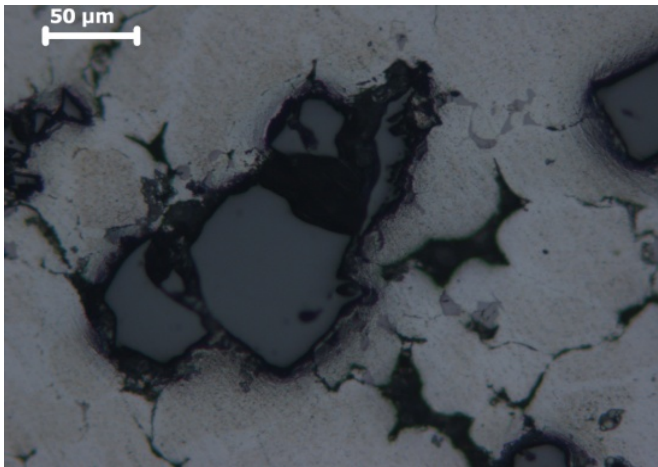
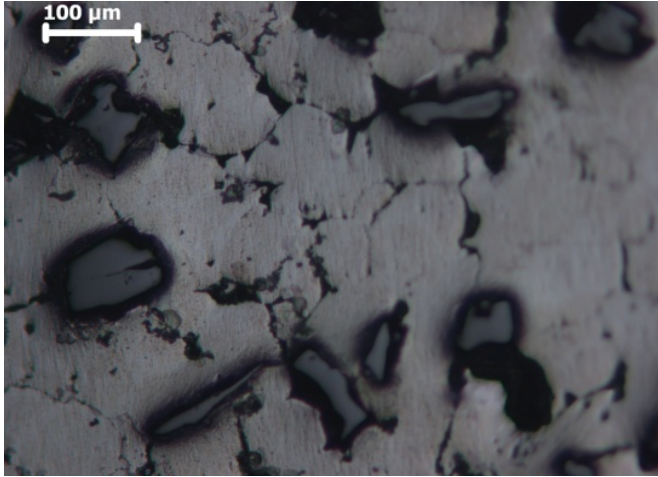
Resim 8.5. İnfiltrasyon yöntemi ile üretilen AA 2014 matrisli %1 B₄C takviyeli kompozit mikroyapıları



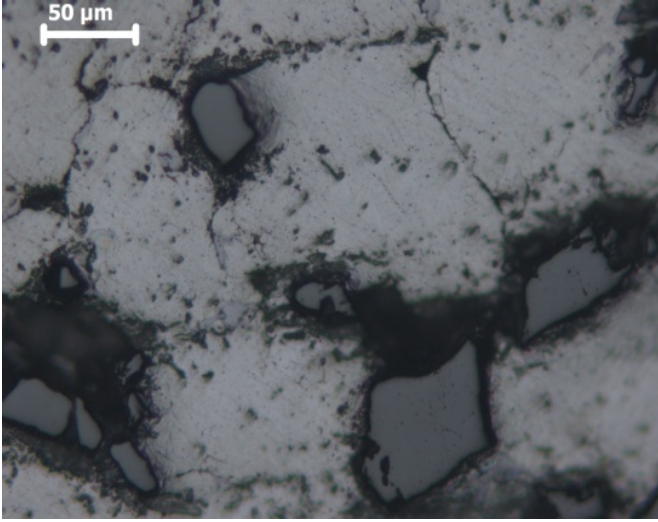
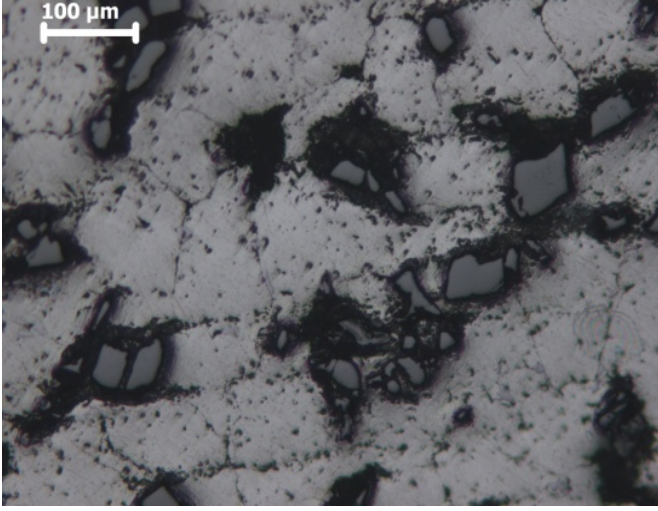
Resim 8.6. İnfiltrasyon yöntemi ile üretilen AA 2014 matrisli %2 B₄C takviyeli kompozit mikroyapıları

Resim 8.7 ve Resim 8.8'daki optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde, infiltrasyon yönteminde artan takviye oranına bağlı olarak B₄C'ün yapıda homojen bir yapı sergilediği görülmektedir. Ancak belirlenen sıvı matris sıcaklığı ve infiltrasyon süresinde üretilen kompozitlerde, gözenek miktarının arttığı tespit edilmiştir. Artan takviye hacim oranının etkisiyle gözeneklilik oluşumu, takviye/matris ara yüzey birleşme noktalarında yoğun bir şekilde görülmektedir. Bu durumun, %4 ve 8 B₄C gibi yüksek takviye oranlarında ara yüzey etkileşimi açısından olumsuz bir etki yaptığı düşünülmüştür. Ayrıca B₄C takviye malzemesinin köşeli/açısal bir yapıya da sahip olması, AA 2014 sıvı matris yapısında ara yüzey birleşmesinde yapıyı olumsuz etkilediği söylenebilir. Kompozit numunelerin

infiltrasyonu sonrasında çalışma yüksek sıcaklığının etkisiyle ve katılaşmanın bir sonucu olarak çekme ve gaz boşluklarının da, matris-takviye birleşme ara yüzlerinde gözeneklilik açısından olumsuz bir etki oluşturduğu gözlemlenmiştir. Artan sıcaklıklar özellikle sıvı matris malzemesinin yüzey gerilimi açısından, ara yüzey temasında birleşme noktalarında son derece önemlidir. Dolayısıyla üretilen kompozit numunelerin gözeneklilik artışında sıcaklığında etkin bir rol aldığı belirtilebilir. Üretimi gerçekleştirilen kompozit numunelerin sinterleme sonrasında da gözenek miktarında kayda değer bir değişim olmamıştır. Bu bağlamda özellikle %4 ve 8 B₄C takviye oranlarında B₄C taneleri ile metal matrisi arasında iyi bir birleşme sağlanmadığı, ara yüzey bağlarının kuvvetli olmadığı ve gözeneklilik açısından olumsuz etkisi şeklinde vurgulanmıştır.



Resim 8.7. İnfiltrasyon yöntemi ile üretilen AA 2014 matrisli %4 B₄C takviyeli kompozit mikroyapılar

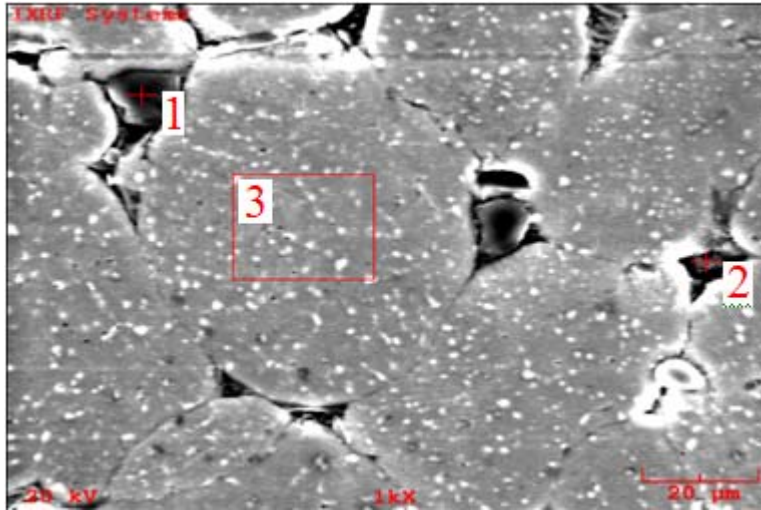


Resim 8.8. İnfiltrasyon yöntemi ile üretilen AA 2014 matrisli %8 B₄C takviyeli kompozit mikroyapıları

8.2. Sinterleme Sonrası TM ve İnfiltasyon Kompozit Malzemelerinde EDS Yöntemi İle Element Analizleri

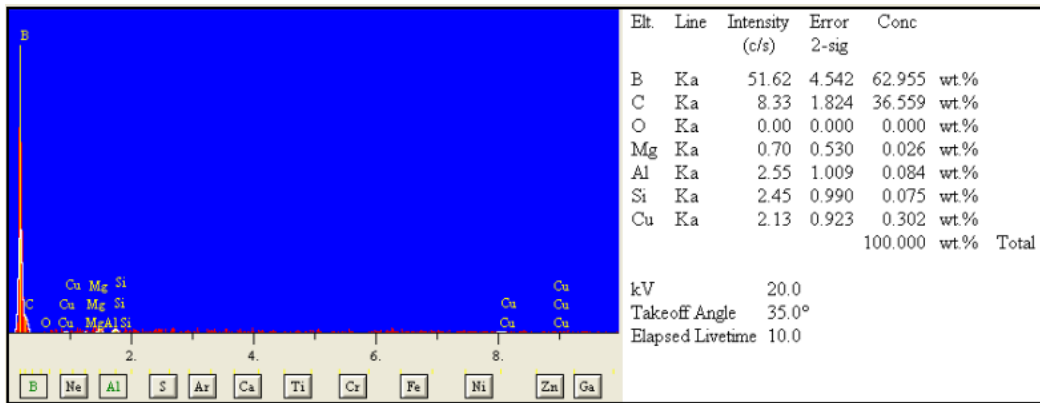
Yapılan deneysel çalışmalarda taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak TM ve İnfiltasyon yöntemi ile üretilen parçacık takviyeli metal matrisli kompozit malzemelerin EDS analizleri yapılmıştır. Yapılan analizlerde öncelikle matris/takviye uyumu gözetilerek B₄C varlığına yönelik çalışmalar yapılmıştır. Bor (B) elementinin varlığından yola çıkılarak B₄C tespit amaçlı analizler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca AA 2014 matris alaşımında varlığı bilinen Al, Cu, Mg ve Si gibi alaşım elementlerinin belirlenmesi için analizler gerçekleştirilmiştir.

TM yöntemi ve İnfiltasyon yöntemi sonrasında elde edilen kompozit numunelerin SEM görüntüleri üzerinden yapılan EDS analizleri incelendiğinde; Resim 8.9' daki 1. nokta ve Resim 8.10' deki 2. nokta analizlerine bakıldığı zaman, elementel B tespiti sonrasındaki yüzde değerleri (Şekil 8.2, Şekil 8.3 ve Şekil 8.6), B₄C takviye malzemesinin yapıdaki varlığını kuvvetlendirmiştir. Yapılan diğer nokta ve bölge analizleri sonrasında ise, Şekil 8.4 ve 8.5 üzerinden yapılan incelemeler sonrasında AA 2014 matris alaşımındaki oluşması muhtemel bakırca zengin bölgelerin ve diğer alaşım elementlerinin varlığı tespit edilmiştir.

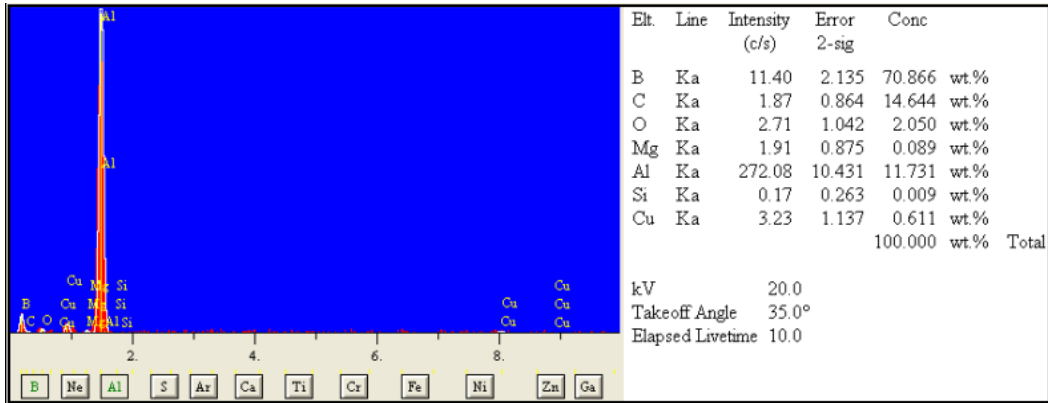


Resim 8.9. TM kompozit numunesinin SEM görüntüsü.

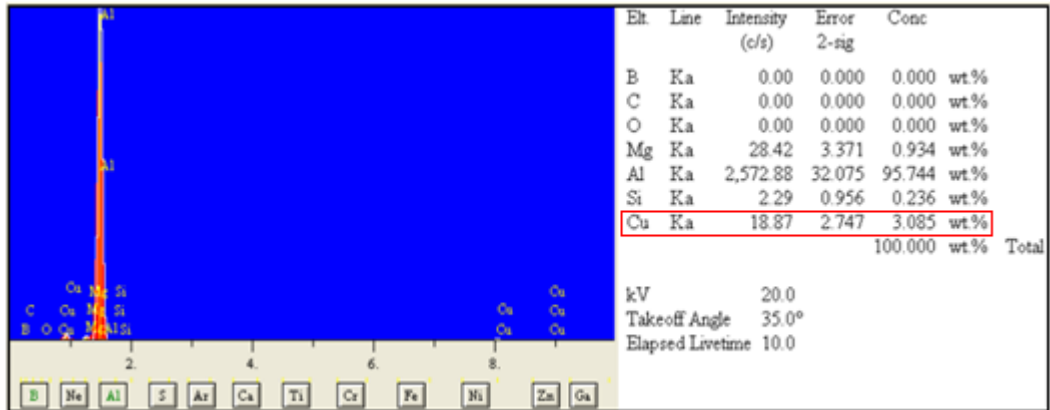
Kullanılan AA 2014 alaşımında bulunan Cu, Mg ve Si gibi alaşım elementlerinin alınan EDS sonuçlarında bölgesel farklılıklar göstermesi iki şekilde açıklanabilir; TM ve infiltrasyon yönteminde elde edilen numunelerde başlangıç tozunun kimyasal kompozisyonunda gaz atomizasyon sürecinde meydana gelen bileşim farklılıkları, ikincisi olarak alınan analizler sırasında uygulanan yöntemin noktasal ve bölgesel olmasından kaynaklandığı söylenebilir.



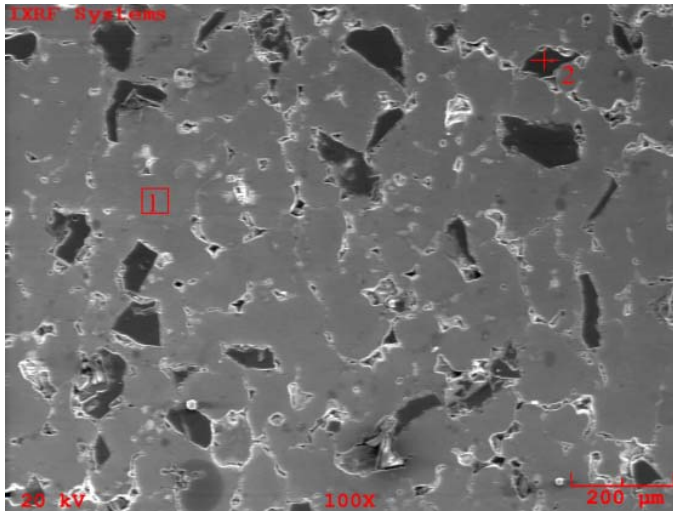
Şekil 8.2. Resim 8.9' daki 1 nolu bölgeye ait EDS analizi.



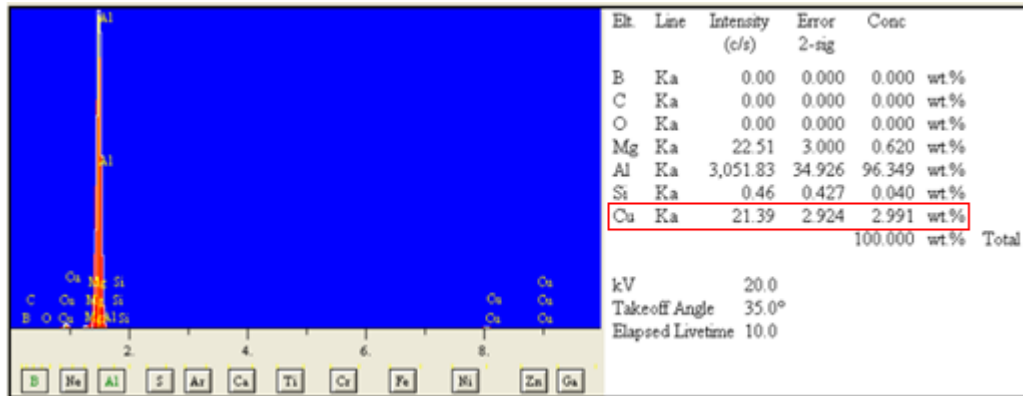
Şekil 8.3. Resim 8.9' daki 2 nolu bölgeye ait EDS analizi.



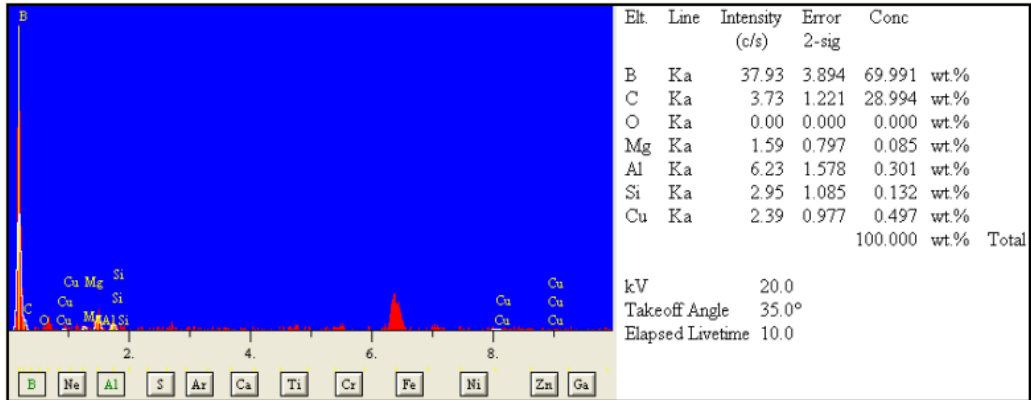
Şekil 8.4. Resim 8.9' daki 3 nolu bölgeye ait EDS analizi.



Resim 8.10. İnfiltrasyon kompozit numunesinin SEM görüntüsü.



Şekil 8.5. Resim 8.10' daki 1 nolu bölgeye ait EDS analizi.



Şekil 8.6. Resim 8.10' daki 2 nolu bölgeye ait EDS analizi.

8.3. Yoğunluk

Yoğunluk ölçümleri, toz presleme, infiltrasyon işlemleri, sinterleme öncesi ve sinterleme işleminden sonra yapılmıştır. Toz presleme ve infiltrasyon yöntemi ile üretilen numuneler sinterleme işlemi öncesi ve sonrası yoğunlukları karşılaştırılmıştır. Çizelge 8.1'de toz numunelerinin sinterleme işlemi öncesi ve sonrası yoğunlukları verilmiştir. Çizelge 8.2'de ise infiltrasyon yöntemi ile üretilen numunelerin sinterleme öncesi ve sonrası yoğunlukları verilmiştir. Aynı zamanda TM ve infiltrasyon yöntemi ile üretilen numuneleri kendi aralarında sinterleme öncesi ve sonrası yoğunluk değişimlerini kıyaslayabilmek için ise sonuçlar Şekil 8.7 ve Şekil 8.8'de verilmiştir.

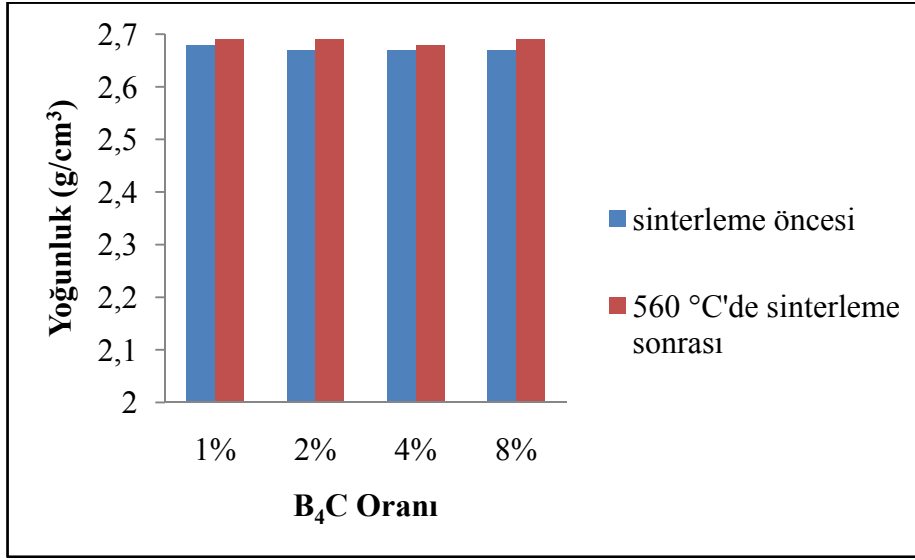
TM numunelerine göre infiltrasyon ile üretilen numunelerde sinterleme öncesi yoğunluklarda gözlenen farklılıkların üretim sürecinden kaynaklandığı düşünülmektedir. İnfiltrasyon numuneleri üretimi aşamasında her ne kadar tozlar homojen yerleştirilmeye özen gösterilse de dolunun tamamen serbest yapılmasından kaynaklanan heterojenliklerin yoğunluklardaki bu farklılıklara neden olduğu söylenebilir. Aynı zamanda B₄C toz şekillerinin keskin köşeli olması infiltrasyon sırasında olumsuz etkiye sebep olmuştur.

Çizelge 8.1. TM ile üretilen numunelerin sinterleme öncesi ve sonrası yoğunlukları

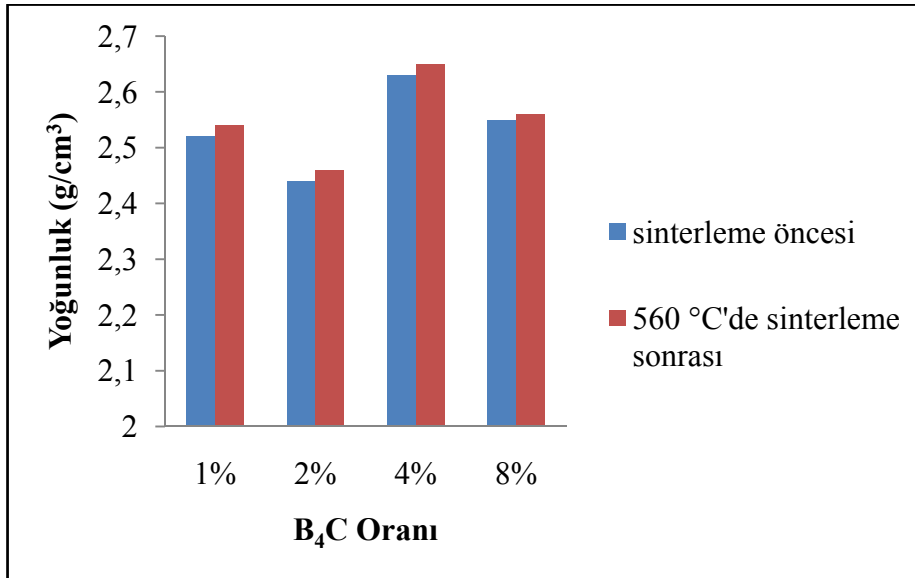
TM ile üretilen numuneler		
B ₄ C Oranı (%)	Sinterleme öncesi yoğunluk (g/cm ³)	Sinterleme sonrası yoğunluk (g/cm ³)
1	2,68	2,69
2	2,67	2,69
4	2,67	2,68
8	2,67	2,69

Çizelge 8.2. İnfiltrasyon yöntemi ile üretilen numunelerin sinterleme öncesi ve sonrası yoğunlukları

İnfiltrasyon ile üretilen numuneler		
B ₄ C Oranı (%)	Sinterleme öncesi yoğunluk (g/cm ³)	Sinterleme sonrası yoğunluk (g/cm ³)
1	2,52	2,54
2	2,44	2,46
4	2,63	2,65
8	2,55	2,56



Şekil 8.7. TM ile üretilen numunelerin sinterleme öncesi ve sonrası yoğunlukları



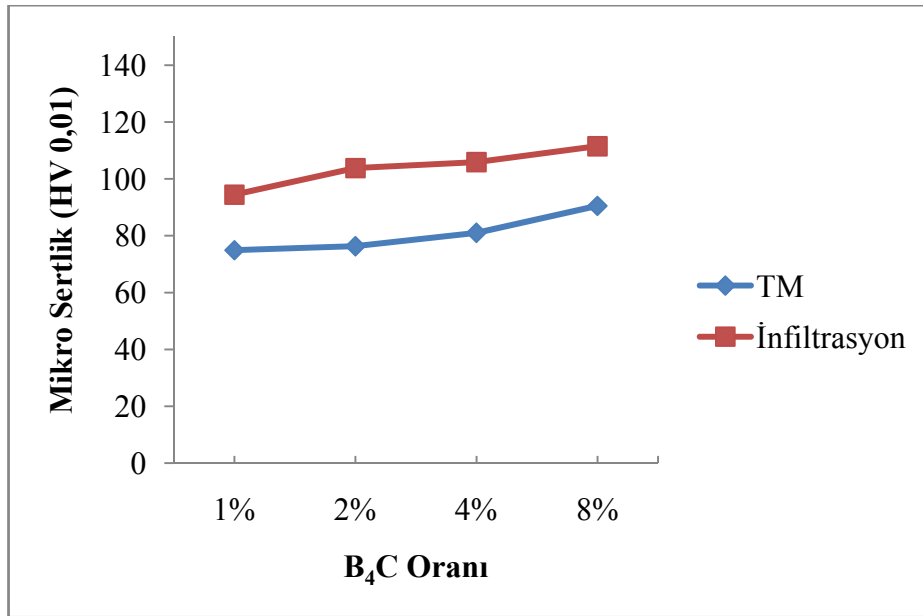
Şekil 8.8. İnfiltrasyon yöntemi ile üretilen numunelerin sinterleme öncesi ve sonrası yoğunlukları

TM ile üretilen numunelerin sinterleme öncesi ve sonrası yoğunluk değerleri (Şekil 8.7) ile infiltrasyon yöntemi ile üretilen numunelerin sinterleme öncesi ve sonrası yoğunluk değerlerine bakıldığında (Şekil 8.8), yapılan sinterleme sıcaklığı ve süresinde gözeneklilik azalıp taneler birleşerek yoğunluk kısmi olarak artmıştır.

8.4. Sertlik

TM ve infiltrasyon yöntemleri ile üretilmiş numunelerin vickers sertlik ölçümleri, sinterleme sonrası 100g yük altında her bir numune için 5 farklı bölgeden alınarak yapılmıştır.

Sertlik sonuçları incelendiğinde TM ve infiltrasyon yöntemleri ile üretilen numuneler kendi içlerinde değerlendirildiğinde, takviye oranının artmasına bağlı olarak sertliklerin hafif arttığı tespit edilmiştir.



Şekil 8.9. TM ve infiltrasyon yöntemi ile üretilen numunelerin sertlik sonuçları

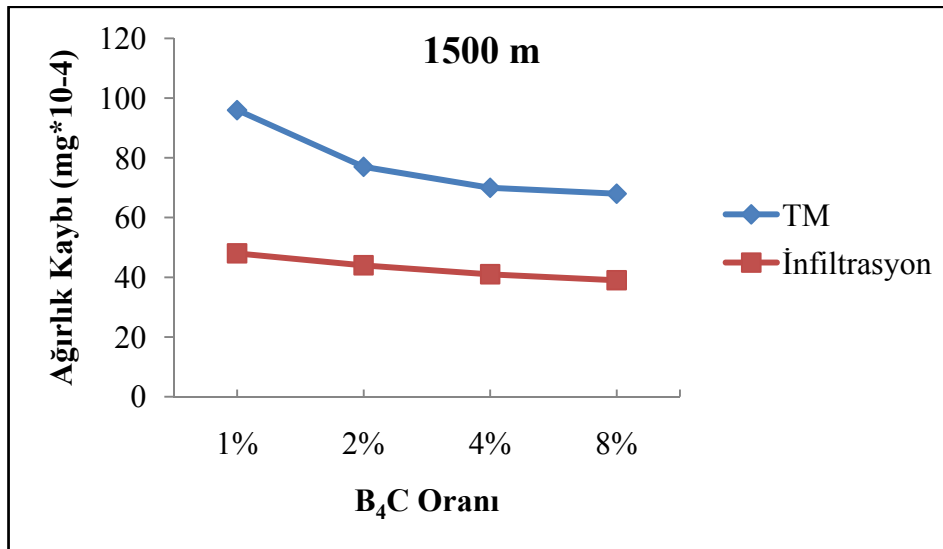
Sertlik sonuçlarına göre TM ve infiltrasyon yöntemleri ile üretilen numuneleri birbirleriyle karşılaştırılacak olursa, infiltrasyon yöntemi ile üretilmiş numunelerin sertlik değerlerinin TM numunelerinden daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Bunun nedenin makro düzeyde ergimiş sıvı metalin B₄C le oluşturmuş olduğu yapının daha rijit olduğuna bağlanabilir.

8.5. Kuru Sürtünme Aşınma Davranışları

Bu çalışmada TM ve infiltrasyon yöntemiyle hazırlanan numunelerin kuru sürtünmeli aşınma davranışları incelendi. Aşınma işleminde, numuneler pin-on disk üzerinde kayma hızı 1m/s olacak şekilde, 30N yük ve 1500 metre kaydırma mesafesi seçilmiştir. Aşınma oranları tüm numunelerde ağırlık kaybı olarak belirlenmiştir.

Şekil 8.10'da TM ve infiltrasyon yöntemi ile üretilen numunelerin 1500 metre kaydırma sonunda ağırlık kayıpları takviye malzemesi oranına bağlı olacak şekilde verilmiştir.

Uygulanan yük ve aşınma mesafesi sabit tutulmuştur. Şekil 8.10'da görüldüğü üzere takviye malzemesi oranına göre TM ve infiltrasyon yöntemi ile üretilen numunelerin aralarında bir karşılaştırma yapılırsa sürekli bir azalma olduğu görülmektedir. Bu da aşınmaya bağlı olarak doğal bir sonuçtur.



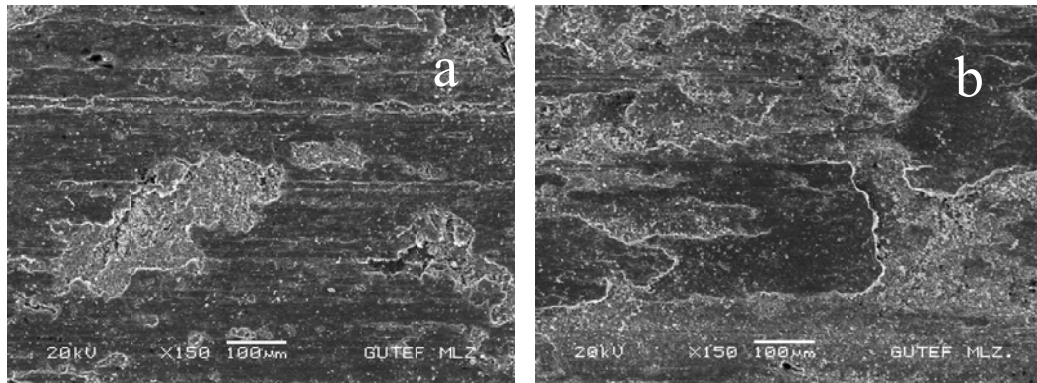
Şekil 8.10. TM ve infiltrasyon yöntemi ile üretilen numunelerin ağırlık kayıpları

Şekil 8.10'da görüldüğü üzere TM ve infiltrasyon yöntemi ile üretilen numuneler kendi içlerinde ve kendi aralarında değerlendirmeye tabi tutulduğunda, takviye malzemesi oranının artmasıyla, sertlikte artışın meydana gelmesi sonucunda aşınmaya olan direnç artarak, aşınma kaybının az olmasına neden olduğunu

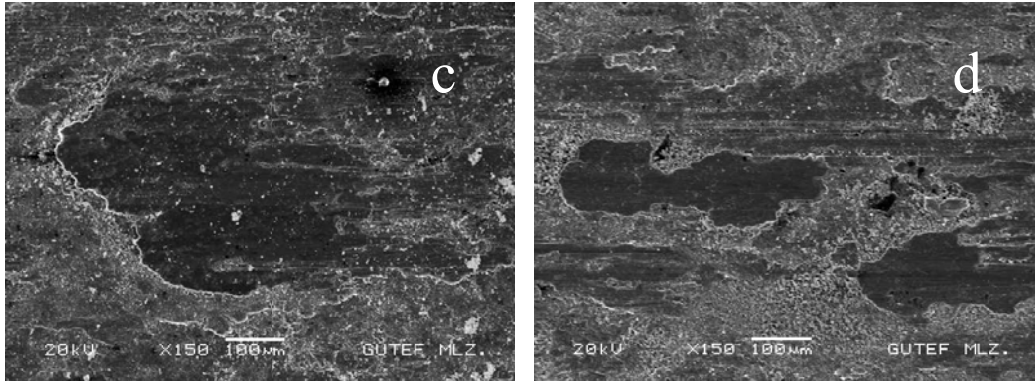
söyleyebiliriz. Ayrıca kuru sürtünmeli aşınma esnasında da dinamik sürtünme etkisinden dolayı yorulma ve/veya darbeli kırılma etkisiyle kütle kaybı daha az olacaktır. Bu çalışmada TM ve infiltrasyon yöntemiyle hazırlanan numunelerin aşınma özelliklerinin alaşımın takviye malzemesi oranı ile önemli ölçüde etkilendiği belirgin bir şekilde ortaya çıkmıştır. Diğer taraftan, bir alaşımda aşınma özelliklerinin belirlenmesinde tribolojik etkileşimler oldukça karmaşık ve daha detaylı bir çalışma gerektirir. Ancak bu alaşımlarda sabit tribolojik parametre şartlarına göre değerlendirme ileride daha ayrıntılı bir şekilde tartışıldığı gibi alaşımların sürtünme katsayısı ve aşınan yüzeylerin morfolojisine göre yapılmıştır.

8.6. Aşınma Yüzeyleri

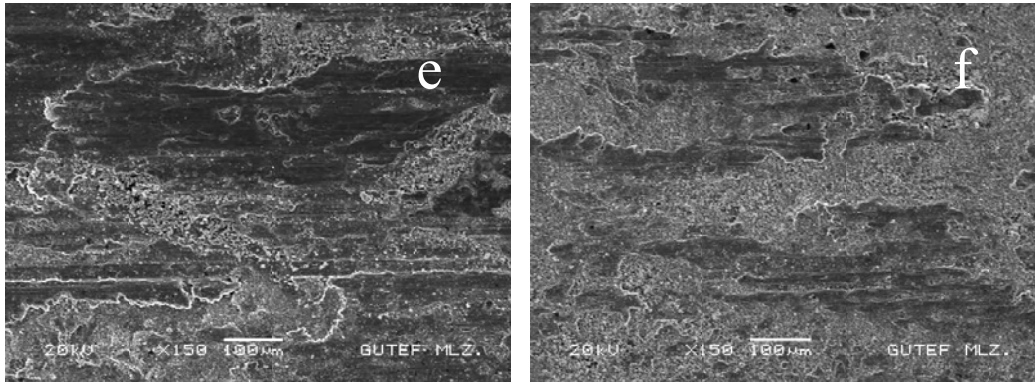
Aşınma testleri sonunda TM ve infiltrasyon yöntemleri ile üretilen numunelerin aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri Resim 8.11-8.14'de verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde, TM ve infiltrasyon yöntemleri ile üretilen numunelerin aşınma yüzeylerinde çizikler, sıvanma tabakaları, kavlamalar ve kopmalar gibi aşınmaya neden olan hasarların bulunduğu görülmektedir.



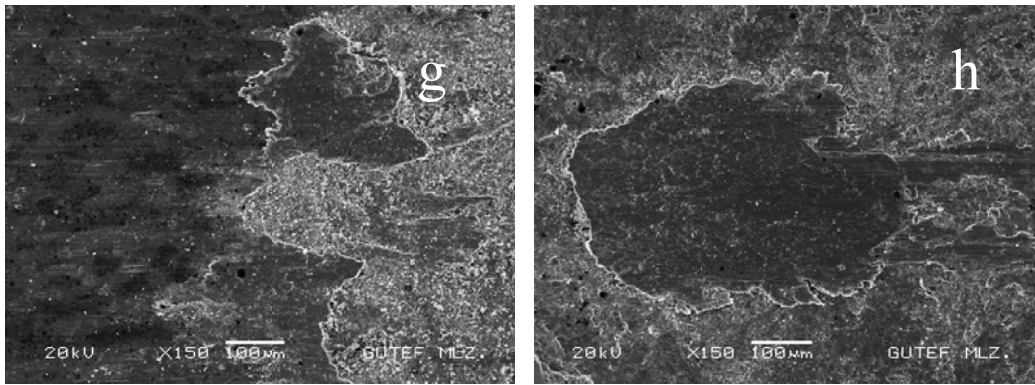
Resim 8.11. %1 takviye malzemesi a) TM b) İnfiltrasyon



Resim 8.12. %2 takviye malzemesi c) TM d) İnfiltrasyon



Resim 8.13. %4 takviye malzemesi e) TM f) İnfiltrasyon



Resim 8.14. %8 takviye malzemesi g) TM h) İnfiltrasyon

En fazla aşınma oranının gerçekleştiği TM yöntemi ile üretilen numunelerin aşınma yüzeyleri incelendiğinde (Resim 8.11 (a), Resim 8.12 (c), Resim 8.13 (e), Resim 8.14 (g)), abrasiv (aşınmalı) aşınmanın yoğun olduğu dikkati çekmektedir. Aşınmalı aşınma daha çok sürtünen malzemelerin ara yüzeyinde kopan küçük parçacıkların

malzemeyi derin çizik şeklinde kazınması ile kendini gösterir ki bu da aşınmanın aşınma sonrası ağırlık kaybının ve sürtünme katsayısının yüksek olmasına neden olmuştur. Ayrıca bu aşınmalarda yüzeye yapışmış durumda bulunan küçük aşınma parçacıklarının bulunduğu gözlenmiştir.

İnfiltrasyon yöntemi ile üretilen numunelerin aşınma yüzeylerinde ise (Resim 8.11 (b), Resim 8.12 (d), Resim 8.13 (f), Resim 8.14 (h)), TM yöntemi ile üretilen numunelerden daha az yırtılmalar ancak daha fazla sıvanmalar meydana gelmiştir. Bu da aşınma kaybını en aza indirmiştir. Çünkü infiltrasyon yöntemi ile üretilen numuneler, aşınma sonrası ağırlık kaybı ve sürtünme katsayısı TM yöntemi ile üretilen numunelere nazaran daha düşüktür. Yani kırılma ve kopma meydana gelmeden, aşınma yüzeyinde plastik deformasyon meydana geldiği söylenebilir.

Bu durum iki şekilde açıklanabilir; TM ile üretilen numunelerde B_4C parçacıklarının koparak hem kütle kaybına neden olması hemde sert olan bu parçacıkların yüzeyi kazıyarak aşınmayı hızlandırdığı söylenebilir. İnfiltrasyon numunelerinde kopan parçaların daha çok sıvanma şeklinde yüzeye yapışması ve de meydana gelen pekleşme ile hem sürtünme katsayısını düşüreceği hemde yapışan parçaların kütleli bir kaybın önüne geçeceği söylenebilir. Mikroyapı görüntüleri, kütle kayıpları ve aşınma katsayıları bu olguları destekler niteliktedir.

9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında TM yöntemi ve İnfiltrasyon yöntemi kullanılarak, takviye oranının artışıyla birlikte parçacık takviyeli metal matrisli kompozit malzemelerinin üretilebilirliği araştırılmıştır. Elde edilen deneysel bulgular ve değerlendirme aşamaları sonrasında aşağıdaki sonuçlar ve öneriler sunulmuştur;

9.1. Sonuçlar

1. Matris/takviye malzemesi ara yüzey birleşiminin, gözeneklilik ve yoğunluk etkileşiminin, presleme öncesi ve sonrasındaki işlemlerde etkin olduğu belirtilmiştir.
2. TM çalışmalarında yapılan ön denemeler sonrasında, parçacık takviyeli metal matrisli kompozit malzemelerinin üretilmesinde, optimum presleme basıncı olarak 700 MPa belirlenmiştir.
3. Kompozit malzemelerinin yüksek sıcaklık dayanımının sağlanması açısından ve farklı yöntemlerin kıyaslanması anlamında gözeneklilik-yapı, takviye-matris uyumluluğu dikkate alınarak, 560°C sıcaklıkta 1 saat süreyle sinterlemenin yeterli olduğu tespit edilmiştir.
4. TM ve İnfiltrasyon yöntemleriyle üretilen kompozit malzemelerinde artan (%1 - 8 oranlarında) B₄C takviye oranına bağlı olarak, mikroyapısal açıdan homojen bir dağılım sergilediği tespit edilmiştir.
5. İnfiltrasyon çalışmalarında takviye oranının artışıyla gözeneklilik oluşumu, takviye/matris ara yüzey birleşme noktalarında yoğun bir şekilde tespit edilmiştir.

6. İnfiltrasyon çalışma sıcaklığının ve süresinin etkisiyle beraber, klasik katılma modelinde olduğu gibi, katılma ve çekme büzülmesinden kaynaklı, ara yüzey birleşme noktalarında ve gözeneklilik oluşumunda ayrıca bir etkisi olduğu düşünülmektedir.
7. TM ve infiltrasyon çalışmaları sonrasında EDS analizleri yapılarak, B₄C takviyeli metal matrisli kompozit üretebilirliği görülmüştür.
8. Elde edilen kompozit malzeme yoğunluk değerlerinin, TM ve infiltrasyon çalışmaları sonrasında az bir miktar dahi olsa artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Ancak bu artışta sintelerin daha etkin olduğu söylenebilir.
9. Artan takviye oranının etkisiyle birlikte her iki yöntem sonrasında elde edilen kompozit malzemelerin sertlik değerlerinde artış olduğu belirlenmiştir.
10. Aşınma test sonuçları olarak TM ve infiltrasyon yöntemi ile üretilen kompozit malzemelerinin karşılaştırılması yapıldığında, TM yönteminde aşınma kaybının daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.
11. İnfiltrasyon yöntemi ile üretilen kompozitlerin sürtünme katsayı değerlerinin TM ile üretilenlere oranla daha düşük olduğu tespit edilmiştir.
12. TM ve infiltrasyon numunelerinde elde edilen aşınma, sertlik ve mikroyapı görüntüleri arayüzey uyumluluğunun iyi olmadığını göstermiştir.

9.2. Öneriler

1. Kompozit malzeme üretilebilirliği açısından B₄C takviye oranının ve artışının, farklı matris alaşımları üzerindeki etkisi araştırılabilir.
2. İnfiltrasyon yöntemiyle kompozit malzeme üretim parametreleri değiştirilerek etkileri incelenebilir.
3. TM yönteminde takviye-matris ara yüzey bağlarının iyi olmaması nedeni ile bu etkiyi minimize edebilecek sıcak presleme, haddeleme, ekstrüzyon gibi ikincil işlemler uygulanabilir.
4. Parçacık takviyeli metal matrisli kompozit malzemelerinin üretim parametreleri sabit tutularak, aşınma test uygulamalarında farklı yük ve aşınma mesafeleri kullanılarak, aşınma kayıpları, takviye-matris ilişkisi irdelenebilir.
5. TM ve infiltrasyon yöntemleri kullanılarak üretimleri gerçekleştirilen kompozit malzemelerinin, çalışmanın devamı olarak ayrıca işlenebilirlik özellikleri araştırılabilir.

KAYNAKLAR

1. Sarıtaş S., “Engineering Metallurgy And Materials”, *Ankara*, 5-30 (1995).
2. Cornie, J. A., et al., “Solidification processing of metal matrix composites”, *Ceramic Bulletin The American Ceramic Society*, 65: 293-303 (1986).
3. Şahin, Y., “Kompozit Malzemelere Giriş”, *Gazi Kitabevi*, Ankara, 91-134 (2000).
4. Ma, Q. S., Chen, Z. H., Zheng, W., Hu, H., “Processing and characterization of particles Si-O-C composites via pyrolysis of polysiloxane SiC or/and Al fillers”, *Ceramics International*, Elsevier, 31 (N) 8 : 1045-1051 (2005).
5. Bostan, B., Özdemir, A. T., and Kalkanlı, A., “Microstructure characteristics in Al-C system after mechanical alloying and high temperature treatment”, *Powder Metallurgy*, 47, (1): 37 (2004).
6. Stefanescu, D. M., et al., “Behavior of ceramic particles at the solid-liquid metal interface in metal matrix composites”, *Met. Trans.*, 19 (A): 2847-2854 (1988).
7. Zhou, W., Hu, W., and Zhang, D., “Study on the making of metal-matrix interpenetrating phase composites”, *Scripta Materials*, 39 (12): 1743-1748 (1998).
8. Yılmaz, M., Altıntaş, S., “Parçacık SiC takviyeli alüminyum esaslı kompozitlerin mikroyapı ve aşınma özellikleri”, *7. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi*, 4-8 Mayıs, Ankara, 1175-1181 (1993).
9. Gedeon, S. A. And Tangerini, I., “A new method for bonding metal matrix composite during casting”, *Mat. Sci. And Eng., Elsevier Sequoia*, A 144 : 237-241 (1991).
10. Berghezan, A., “Basic design concepts and spesific methods for the fabrication of metal matrix composites materials”, *Advance In Composite Materials*, ed., G. Piatti, 5-17 (1978).
11. Kreider, K. G., “In Composite Materials”, Ed by K. G. Kreider, *Academic Pres*, 4 : 1 (1974).
12. Kamat, S. V., “Fracture toughness of particulate-reinforced alumiium matrix composites”, Ph.D. Thesis, *The Ohio State University*, 22-38 (1988).

13. Alpas, A. T. And Zhang, J., “Effect of microstructure (particulate size and volume fraction) and counterface material on the sliding wear resistance of particulate reinforced aluminum matrix composites”, *Met. Trans.*, 25 (A): 969 (1994).
14. Gonzalez-Doncel, G. And Sherby, O. D., “High temperature creep behavior of metal matrix aluminum- SiC composites”, *Acta Metal Materials*, Pergamon Pres Ltd 41 : 2797 (1993).
15. Song, S. G et al., “Reinforcement shape effects on the fracture behavior and ductility of particulate-reinforced 6061-Al matrix composites”, *Met. Trans.*, V 27 : 3739 (1996).
16. Hadianfard, M. J., Healy, J. And Mai, Y. W., “The influence of temperature on the mechanical and fracture properties of a 20 V % ceramic particulate-reinforced Al matrix composites”, *J. Of Mat. Sci.*, Chapman & Hall, 3906 (1994).
17. Waku, Y., et al., “Influence of particle size and volume percent of flaky Mo particles on the mechanical properties of Al₂O₃/Mo composites”, *Met. And Mat. Trans.*, 27 (A): 3307 (1996).
18. Lillholt, H., “Mechanical behavior of composites”, *Advance in Composites Materials*, 209 (1978).
19. Hull, D., “An Introduction to Composite Materials”, *Cambridge University Pres*, 71-79 (1992).
20. Contreras, A., Lopez, V. H. And Bedolla, E., “Mg/TiC composites manufactured by pressureless melt infiltration”, *Scripta Materialia*, 51 : 249-253 (2004).
21. Alpas, A. T. And Zhang, J., “Wetting of ceramic particulates with liquid aluminum alloys; part 1, Experimental Techniques”, *Met. Trans.*, 20 (A): 527 (1989).
22. Roschen, S., “Discussion of behavior of ceramic particles at the solid-liquid metal interface in metal matrix composites”, *Met. Trans.*, 23 (A): 2326 (1992).
23. Taya, M., Arsenault, R. J., “Metal matrix composite”, *Thermomechanical Behavior*, Pergamon Pres, 34-42 (1989).
24. Clyne, T. W., Withers, P. J., “An Intruduction to Metal Matrix Composites”, *Cambridge Solid State Science Series*, Cambridge University Pres, 18-34 (1993).

25. ASM, “Composites”, *Engineered Materials Handbook*, 4 : 16-34 (1993).
26. Krader, G., Ed., “Metal Matrix Composite”, *Academic Pres*, 4 : 58-90 (1974).
27. Çıtak, R., “Metalik Baryum Alüminyum Başlangıç Tozlarının Düşük Sıcaklıkta Oksidasyonu ile Alüminyum Matrisli Kompozit Üretimi”, Doktora Tezi. *G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 26-39 (1998).
28. Chou, T. W. et al. 1987, “Non-linear elastic behaviour of flexible fibre composites” *Composite*, V 16 : 187 (1987).
29. Singh, J., et al., “Wear behavior of squeeze cast Al- Al₂O₃-MgO particulate MMC’s under dry sliding conditions”, *AFS Transactions*, 815 (1991).
30. Bhagat, R. B., “High Pressure İnfiltration Casting Manufacturing Net Shape Composites With a Unique Interface”, *Mat, Sci. And Eng.*, Elsevier Sequoia, A 144 : 243-250 (1991).
31. Simith, H. H., and Marchel, D. J., “Effect of Thermal and Thermomechanical Treatment on the Mechanical Properties of Centrifugally Cast Alloy 718” *Materials Science and Engineering*, A 102 : 161-168 (1988).
32. Çalın, R., “Savurma Dökümde Optimum Üretim Parametrelerinin Tespiti”, Yüksek Lisans Tezi, *G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 51-67 (1993).
33. Webster, P. D., “Fundamentals of Foundry Technology”, *Parcellis pres, Redhill*, 490-495 (1980).
34. Çavuşoğlu, E. N., “Döküm Teknolojisi”, *İ.T.Ü. İstanbul*, 173-181 (1982).
35. Akbulut, H., Durman, M., “SiC partikül takviyeli Al-Si metal matrisli kompozitlerin santrifüj dökümü”, *8. Uluslar arası Metalurji ve Malzeme Kongresi*, 6-9 Haziran, Ankara, 687-692 (1995).
36. Vives, C. Et al. “Fabrication of Metal Matrix Composites Using a Helical Induction Stirrer”, *Mat Sci and Eng., Elsevier Sequoia*, A 173 : 239 (1993).
37. Türker, M., vd., “Al-Sic Tozların mekanik alaşımlama değirmeninde öğütme zamanının kompozit toz yapısına etkisinin araştırılması”, *Uluslararası Katılımlı 2. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı*, 15-17 Eylül, ODTÜ, Ankara, 425-429 (1999).
38. Arık, H., Türker, M. Ve Sarıtaş, S., 1999, “Mekanik alaşımlama ile alüminyum matrisli Alüminyum karbür (Al₄C₃) kompozit malzeme üretimi”, *Uluslararası Katılımlı 2. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı*, 15-17 Eylül, ODTÜ, Ankara, 433-440 (1999).

39. Türker, M., “Effect of content on the sintering behavior of silver nanopowders produced by inert gas condensation”, *Turkish J. Eng.Env. Sci.*, Tübitak, 26 : 285-291 (2001).
40. Arik, H., “Production and characterization of in situ Al_4C_3 reinforced aluminum-based composite produced by mechanical alloying technique”, *Materials Design*, 25 : 31-40 (2003).
41. Gingu, O., Orban, R. L., Mangra, M., Sima, G., “New method Al/SiC composite elaboration by pm technology”, *Uluslararası Katılımlı 2. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı*, 15-17 Eylül, ODTÜ, Ankara, 323-327 (1999).
42. Hiçyılmaz, N., Aydın, Ş. Ve Sarıtaş, S., “Toz metalurjisi ile üretilmiş alüminyum esaslı tanecikli kompozitlerin mekanik özellikleri”, *Uluslararası Katılımlı 2. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı*, 15-17 Eylül, ODTÜ, Ankara, 621-629 (1999).
43. Tekeli, S., Çetinkaya, C., “Investigation of bonding strength of TZP/ Al_2O_3 composites diffusion bonded with similar or dissimilar materials”, *10. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi*, Bildiriler Kitabı, 24-28 Mayıs İstanbul, Cilt III ,1863-1866 (2000).
44. Clyne, T. W., Withers, P. J., “An Introduction to Composite Materials”, *Cambridge University Pres*, 319-351 (1993).
45. Ögel, B., Kaya, G., “Alüminyum-SiC kompozitlerin konvensiyonel sıcak presleme yöntemi ile üretimi”, *Uluslararası Katılımlı 2. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı*, 15-17 Eylül, ODTÜ, Ankara, 631-635 (1999).
46. Bedir, F., Ögel, B., “TiC ve SiC katkılı Al kompozitlerinin azot atmosferi altında sıcak preslenmesi”, *10. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi Bildiriler Kitabı Cilt III*, 24-28 Mayıs İstanbul, 1713-1719 (2000).
47. Gürhan, C., Ögel, B., Bor, Ş., “Bakır esaslı şekil bellekli alaşımların saf tozlardan sıcak preslenerek üretilmesi”, *10. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi Bildiriler Kitabı Cilt III*, 24-28 Mayıs İstanbul, 1721-1724 (2000).
48. Şimşir, M., Güngör, Ö., Ögel, B., “Al-Cu ve Al-Cu-Mg toz karışımlarının azot atmosferi altında sıcak presleme çalışmaları”, *10. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi Bildiriler Kitabı Cilt III*, 24-28 Mayıs, İstanbul, 1781-1788 (2000).
49. Toptan, F., “Alüminyum Matrisli B_4C Takviyeli Kompozitlerin Döküm Yöntemi ile Üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, *YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü* (2006).

50. Kumdalı, F., “Alüminyum matrisli B₄C takviyeli kompozitlerin toz metalurjisi yöntemi ile üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 11-17 (2008).
51. Yetgin, S.H., “Köken, A., Aydın, M., Ünal, R. (2005), Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilmiş Al-B₄C MMK’lerde Karıştırıcı Tipi ve Takviye Oranının Mekanik ve Mikroyapı Özelliklerine Etkisi”, *4. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı*, 18-22 Mayıs, Sakarya, 622-631.
52. Akın, G., “Toz Metalurjisi Yöntemiyle Alüminyum Matrisli Bor Karbür Takviyeli Kompozitlerin Üretilmesi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü* (2006).
53. Torralba, J.M., Costa, C.E., Velasco, F., “P/M Aluminum Matrix Composites: An Overview”, *Journal of Materials Processing Technology*, 133: 203-206 (2003).
54. Sağırlı, A., “Mekanik Ekzantrik Toz Metal Presi ve Toz Metal Teknolojisi”, Yüksek Lisans Tezi, *YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü* (1990).
55. Palacı, Y., “Alüminanın Özelliklerine, Şekillendirme Yönteminin, Katkıların ve Sinterleme Sıcaklığının Etkisi”, Doktora Tezi, *İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü* (2001).
56. İnternet: TTMD – Türk Toz Metalurjisi Derneği Online Yayını “Toz Metalurjisi”, Türk Toz Metalurjisi Derneği, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, *Makine Mühendisliği Bölümü*, www.turktoz.gazi.edu.tr, Ankara, (2003).
57. Lee, K. B., Lee, K. W., Heo, S. W., Kwon, H., “The effect of infiltration temperature and time on Al-Mg/SiC/sub p/ composites fabricated by pressureless infiltration method”, *J of Korean Institute of Metals and Materials*, V 36, n 2 : 242-248 (1998).
58. Kevorkian, V. M., “The reactive infiltration of porous ceramic media by a molten aluminum alloy”, *Composites Science and Technology*, 59 : 683-686 (1999).
59. Rodrigez-Reyes, M., Pech-Canul, M. I., Parras- Medecigo, E. E., Gorokhovskiy, A., “Effect of Mg loss the kinetics of pressureless infiltration in the processing Al-Si-Mg/SiCp composites”, *Materials Letters* 57 : 2081-2089 (2003).
60. Delennay, F., Froyen, L., Deruyttere, A., “Review the wetting of solids by molten metals and its relation to the preparation of the metal-matrix composites”, *J. Of Mat. Sci.*, 22 : 1-16 (1987).

61. Michaud, V., Mortensen, A., “Infiltration processing of fibre reinforced composites governing phenomena”, *Composites Part, A* 32 : 981-996 (2001).
62. Mortensen, A. And Cornie, J. A., “On the infiltration of metal-matrix composites”, *Met. Trans.*, 18 (A): 1160-1163 (1987).
63. Oh, S. Y., Cornie, J. A. And Russel, C., “Wetting of ceramic particulates with liquid aluminum alloys: part I. experimental techniques”, *Met. Trans.*, V 20 (A): 519-527 (1989).
64. Demir, A., Altinkok, N., “Effect of gas pressure infiltration on microstructure and bending strength of porous Al₂O₃/SiC-reinforced aluminium matrix composites”, *Composites Science and Technology*, 64 : 2067-2074 (2004).
65. Thakur, S. K., and Dhindaw, B. K., “The influence of interfacial characteristics between SiCp and Mg/Al metal matrix on wear coefficient of friction and microhardness”, *Wear*, 247: 191-201 (2000).
66. Asthana, R., and Rohatgi, P. K., “Solidification synthesis of pressure-infiltrated Al alloy 2104-SiC platelet composites”, *Mat. Sci. and Eng., A*, 144 : 169-178 (1991).
67. Acılar, M., “Al/SiC kompozitlerin vakum infiltrasyon yöntemi ile üretimi ve aşınma davranışlarının araştırılması”, Doktora Tezi, *G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 95-121 (2002).
68. Fletcher, T. R., Cornie, J. A. and Russell, K. C., “A capacitance technique for studying pressure infiltration”, *Mat. Sci. and Eng., A*, 144 : 159-163 (1991).
69. Elwahed, M., Asar, M., “Fabrication of matrix composite by infiltration process-part 2 Experimental study”, *J. Of Mat. Proc. Tech.*, 86 : 152-158 (1999).
70. Elomari, S., et al., “Thermal Expansion Behavior of Particulate Metal-Matrix Composites”, *Composites Science and Technology*, 58: 369-376 (1997).
71. Ducret, D., et al., “Characterization of anisotropic elastic constant of continuous alumina fibre reinforced aluminium matrix composite processed by medium pressure infiltration”, *Composites Part A* 31 : 45-55 (2000).
72. Wannasin, J., Flemings M. C., “Fabrication of metal matrix composites by a high-pressure centrifugal infiltration process”, *J. Of Materials Processing Technology*, Elsevier, 169: 143-149 (2005).

73. Parras- Medecigo, E., M., Pech-Canul, M. I., Rodrigez-Reyes, Gorokhovsky, A., “Effect of processing parameters on the production of blayer-graded Al/SiCp composites by pressureless infiltration”, *Materials Letters*, 56 : 460-464 (2002).
74. Acılar, M., Gül, F., “Abrasive wear behaviour of Al-10Si/30-55 vol% SiCp cıposites produced by vacuum infiltration technique”, *Materials and Design*, 20 : 1-10 (2004).
75. Arslan, G., Kara, F., Turan, S., “Quantitative phase analysis B₄C-Al composites and their effect on infiltration”, *10. Uluslar arası Metalurji ve Malzeme Kongresi*, Bildiriler Kitabı Cilt III, 24-28 Mayıs, İstanbul, 1847-1851, (2000).
76. Candan, E., Atkinson, H. V. and Jones, H., “Effect of ceramic particle size, and applied pressure on time to complete infiltration of liquid aluminium into SiC powder compacts”, *Mat. Sci and Eng.*, 35 : 4955-4960 (2000).
77. Oh, S. Y., Cornie, J. A. And Russel, C., “Wetting of ceramic particulates with liquit aluminum alloys: part I.I Study of wettability”, *Met. Trans.*, 20 A : 533 (1989).
78. Bronfenbrener, I., Moisa, S., Frage, N., Dariel, M.P., “Abrasive wear resistance of seramic-metal composites manufactured by infiltration of unsintered ceramic compacts with molten pure magnesium or magnesium-alloys”, *Third International Conference on Powder Metallurgy*, 7-9 July, Romania, 313-317 (2005).
79. Güldeş, A. M., “Aşınma Deney Aparatının Tasarımı, Üretimi ve Metal Matrisli Kompozitlerin Aşınma Davranışlarının Deneysel Olarak İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (1998).
80. Yılmaz, M., “Alüminyum Alaşımlarının Aşınma Davranışları”, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 25-35 (1996).
81. Afacan, S., “Mevcut Aşınma Deney Düzeneginin Denenip Optimize Edilmesi”, Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 45-55 (1997).
82. Pigors, O., “Abrasive Verschleißverhalten von Stählen bei Gleit- und Wölbewegungen”, *Schmierungstechnik*, Germany, 145-155 (1979).
83. Odabaş, D., TOPAL, E. S., “100Cr6 Çeliğinin İki Cisimli Abrasif Aşınma Davranışının Kuru veya Sıvı Sürtünme Şartlarında Deneysel Araştırılması” *6. Denizli Malzeme Sempozyumu*, Denizli, 396-405. (1995).

84. Ulusoy, E., , “Bazı Toprak İşleme Alet ve Makinelerinde İş Organlarının Aşınması Üzeinde Araştırmalar”, *Ege Üniversitesi, Ziraat Fakültesi Yayınları*, İzmir, 390:11 (1981).
85. Donald, R. A., “The Science and Engineering of Materials”, Third Edition, *PSW Publishing Company*, University of Missouri / Rolla, 123: 5-13 (1994).
86. Ertan, G., “İş Makinelerinde Aşınma Ömrü Kriterlerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 45-50 (1999).
87. *Uluslar Arası Metalürji ve Malzeme Kongresi*, İstanbul, 11-15 (1997).
88. Soydan, Y., Ulukan, L., “Sürtünme ve Aşınma Direnci Ölçme Yöntemleri”, **8. Uluslar arası Makine Tasarım ve İmalat Kongresi**, Ankara, 581-588 (1988).
89. Eyre, T. S., “Friction and Wear Control in Industry”, *Surface Engineering*, U.S.A, 143-148. (1991).
90. İpek, R., , “AISI 1020 Çeliğinin, Yüzey Sertleştirme İşlemleri Uygulanarak AISI 5155 Çeliğinin Yerine Kullanabilirliğinin Deneysel Araştırılması”, Doktora Tezi, *E. Ü. , Fen Bilimler Enstitüsü*, Kayseri, 75-80 (1992).
91. Karamış, M .B., , “Traktör Hızı ve Pulluk Çalışma Derinliğinin Uç Demiri Aşınma Hızına Etkileri ve Optimizasyonu”, *Tübitak, 2. Ulusal Makine Teorisi Sempozyomu*, Gaziantep , 668 – 677 (1986).
92. Habig, K. H., “Verschleiß UND Hörte von Werkstoffen” **Hanser–Verlag München – Wien.** (1980).
93. Kaya, H., “Malzeme”, *Ankara Erkek Teknik Öğretmen Okulu Yayınları 1. Gün Matbaası*, İstanbul, 40-55 (1961).
94. W. Weissbach’ın Werkstoffkundeund Werkstoffprüfung, “Malzeme Bilgisi ve Muayenesi”, Editör: ANIK, Selahaddin, *Kurtuluş Matbaası*, İstanbul, 65-70 (1977).
95. Koç R., “Vagon Boji Bagalarına Alternatif Polimer Malzemelerin Deneysel İncelenmesi”, Doktora Tezi, *SAÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü*, 90-105 (2004).
96. Armatlı, M., K., “Havacılık Kompozitleri ve Mukavemet- Maliyet Analizleri” *Gazi Üniversitesi Merkez Kütüphanesi*, Ankara, 68-75 (1999).
97. Karamış, M. B., “Abrasive Aşınma Mekanizmasında Yüzey Basıncının Aşınmaya Etkisi”, *2. Ulusal Makine Tasarım ve İmalat Kongresi*, Ankara, 493 – 500 (1986).

98. Yılmaz, T., , “İyonitürleme Yoluyla Sertleştirilmiş SAE 4140 Çeliğinin Aşınma Dayanımının İncelenmesi”, Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 60-75 (1992).
99. Mutlu, H., “Al – SiC Kompozitlerin Termomekaniksel İşlem Sonrası Aşınma Davranışlarının İncelenmesi”, Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 66-80 (1996).
100. Yılmaz, M., “Alüminyum Alaşımlarının Aşınma Davranışları”, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 80-95 (1996).
101. Afacan, S., “Mevcut Aşınma Deney Düzeninin Denenip Optimize Edilmesi”, Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 45-60 (1997).
102. Ertan, G., “İş Makinelerinde Aşınma Ömrü Kriterlerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 81-96 (1999).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : TAŞCI, Ufuk
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 10.08.1987, SAMSUN
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (312) 380 18 87
 Cep Tel : 0 530 611 96 33
 E-mail : ufuktasci@gazi.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi /Fen Bilimleri Enstitüsü/Metal Eğitimi	-
Lisans	Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi/Döküm Öğretmenliği	2010
Lise	Samsun Cumhuriyet Lisesi	2004

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2010-2011	Gazi Üniversitesi ATAMYO	Öğr. Görevlisi
2011-2012	Gazi Üniversitesi ATAMYO	Öğr. Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce