T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALÜMİNYUM MATRİSLİ B_4C PARTİKÜL TAKVİYELİ AŞINMA DİRENCİ YÜKSEK KOMPOZİT MALZEMELERİN AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

FATİH YÜKSEL

YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
MALZEME PROGRAMI

DANIŞMAN
YRD. DOÇ. DR. IŞIL KERTİ

İSTANBUL, 2014

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALÜMİNYUM MATRİSLİ B_4C PARTİKÜL TAKVİYELİ AŞINMA DİRENCİ YÜKSEK KOMPOZİT MALZEMELERİN AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Fatih YÜKSEL tarafından hazırlanan tez çalışması 24/11/2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Yrd. Doç. Dr. Işıl KERTİ

Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Yrd. Doç. Dr. Işıl KERTİ

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Sibel DAĞLILAR

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Yrd. Doç. Dr. Burcu D. ÇORBACIOĞLU

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü' nün 2010-07-02-YL04 numaralı YÜLAP projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Alüminyum matrisli B_4C partikül takviyeli aşınma direnci yüksek kompozit malzemelerin aşınma özelliklerinin incelendiği bu çalışmamda pek çok kişinin değerli katkıları bulunmaktadır.

Öncelikle, yanında çalışmaktan onur duyduğum ve ayrıca tecrübelerinden yararlanırken göstermiş olduğu hoşgörü ve anlayıştan dolayı değerli hocam, tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. Işıl Kerti`ye teşekkür ederim.

Bu çalışmada benden yardımlarını esirgemeyen Dr. Fatih Toptan`a yönlendirmeleri ve benimle paylaştığı değerli bilgileri için teşekkür ederim.

Yıldız Teknik Üniversitesi değerli öğretim görevlilerinden Doç. Dr. Sibel Dağlılar ve Yrd. Doç. Dr. Ahmet Sağın`a; deney çalışmalarım esnasında göstermiş oldukları yardımlardan dolayı İstanbul Teknik Üniversitesi değerli öğretim görevlilerinden Prof. Dr. Servet Timur, Prof. Dr. Gültekin Göller, Prof. Dr. Hüseyin Çimenoğlu ve Doç. Dr. Kürşat Kazmanlı`ya destekleri için ve de Yıldız Teknik Üniversitesi labaratuar görevlileri Mehmet Çalışkan ve Şaban Ceylan'a yardımları için teşekkür ederim.

Bu süreçte beni her daim destekleyen değerli aileme şükranı borç bilir, sonsuz desteği için eşime teşekkür ederim.

Kasım, 2014

Fatih YÜKSEL

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ vii

KISALTMA LİSTESİ viii

ŞEKİL LİSTESİ ix

ÇİZELGE LİSTESİ xii

ÖZET xiii

ABSTRACT xv

BÖLÜM 1

GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 1
1.2 Tezin Amacı 2
1.3 Bulgular 2

BÖLÜM 2

ALÜMİNYUM MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELER 3

2.1 Kompozit Malzemeler 3
2.1.1 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması 4
2.1.1.1 Polimer Matrisli Kompozitler 4
2.1.1.2 Seramik Matrisli Kompozitler 5
2.1.1.3 Metal Matrisli Kompozitler 5
2.2 Alüminyum Matrisli Kompozit Malzemelerin Özellikleri 7
2.2.1 Alüminyumun Özellikleri 7
2.2.2 Bor Karbür(B_4C) 8
2.2.3 Islatılabilirlik 9
2.2.4 Alüminyum ile B_4C Arayüzeyinin İncelenmesi 10

BÖLÜM 3

TRİBOLOJİ 14

3.1 Sürtünme 14
3.2 Aşınma 15
3.2.1 Abrazif Aşınma 15
3.2.2 Adhezif Aşınma 17
3.2.3 Yorulma Aşınması 17

BÖLÜM 4

LİTERATÜR TARAMASI 19

BÖLÜM 5

DENEYSEL ÇALIŞMALAR 32

5.1 Malzemeler 32
5.2 Kompozit Malzemelerin Üretimi 34
5.3 Kullanılan Malzemelerin ve Üretilen Kompozit Malzemelerin Karakterizasyonu 36
5.4 Aşınma Testleri 37

BÖLÜM 6

SONUÇLAR VE TARTIŞMA 41

6.1 Kompozit Numunlerin Karakterizasyon Sonuçlarının İncelenmesi 41
6.2 Aşınma Test Sonuçları 44
6.3 Aşınma İzlerinin Karakterizasyonu 48

BÖLÜM 7

SONUÇLAR 62

KAYNAKLAR 64

ÖZGEÇMİŞ 67

SİMGE LİSTESİ

θ	Temas açısı
γ_{SV}	Katı-Gaz arayüzey enerjisi
γ_{LS}	Katı-sıvı arayüzey enerjisi
γ_{LV}	Sıvı-Gaz arayüzey enerjisi
E	Elastiklik modülü
ΔG	Gibbs serbest enerjisindeki değişim
ΔH	Reaksiyon entalpisindeki değişim
ρ	Yoğunluk
A	Havadaki ağırlık
B	Sıvıdaki ağırlık
d	Havanın yoğunluğu

KISALTMA LİSTESİ

COF	Sürtünme katsayısı
EDS	Enerji dağılımlı spektroskopi analizi
FEG-SEM	Alanemisyon tabancası – Taramalı elektron mikroskobu
MMK	Metal matrisli kompozitler
OECD	Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Komitesi
OM	Optik mikroskop
PMK	Polimer matrisli kompozitler
SE	SEM'de ikincil elektron modu
SEM	Tarama elektron mikroskobu
SMK	Seramik matrisli kompozitler
XRD	X-ışınları difraktometresi

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2. 1 Metal matrisli kompozit malzeme çeşitleri [11] 6
Şekil 2. 2 Islatılabilirliğin bir ölçüsü olan temas açısı (θ) ve üç yüzey enerjisi (katı/sıvı, sıvı/gaz ve katı/gaz) 10
Şekil 3.1 Abrazif Aşınma Mekanizması [16] 16
Şekil 3.2 İki cisimli ve üç cisimli abrasiv aşınma [11] 16
Şekil 3. 3 Yüksek temas basıncının oluşturduğu bölgesel plastik beformasyon nedeniyle oluşan adhezif aşınma a)Kaynamış pürüz, b) aşınma birikintileri [11] 17
Şekil 3. 4 Yorulma aşınmasının şematik gösterimi [16] 18
Şekil 4. 1 a) Ağırlıkça %10 takviyeli 65 N–0.6 m/s şartları altında aşınma testi yapılan numunenin aşınma yüzeyi görüntüsü b) Ağırlıkça %5 takviyeli 80 N–0.8 m/s şartları altında aşınma testi yapılan numunenin aşınma yüzeyi görüntüsü [5] 21
Şekil 4. 2 Hafif aşınma rejimindeki numunelerin aşınan yüzeylerinin SEM görüntüleri (a) B_4C-3 hacim%; (b) B_4C-6 hacim% [21] 24
Şekil 4. 3 Aşınma çeşitlerinin miroyapısı [22] 25
Şekil 4. 4 Kayma doğrultusu boyunca paralel kayma izleri ve karşı malzemeden demir transferini gösteren EDS analizleri [6,15] 29
Şekil 4. 5 Hafif koşullarda aşınmış hacimce %15 B_4C takviyeli kompozit yüzeyinde B_4C çıkıntılarının optik mikroskop görüntüleri [6,15] 30
Şekil 4. 6 Ağır koşullarda aşındırılmış hacimce %19 B_4C takviyeli kompozitin ikincil elektron SEM görüntüsünde görülen kraterler [6,15] 30
Şekil 4. 7 Hafif koşullarda aşındırılan %15 B_4C takviyeli numuneden alınan a) SE SEM görüntüsü ve b) SEM görüntüsünde pulsu parçacığın üzerinde kare ile belirtilen alandan alınan EDS analizi spektrumu [6,15] 31
Şekil 4. 8 a) Hafif koşullarda aşındırılan %15 B_4C takviyeli numuneden alınan BSE SEM görüntüsünde plastik deformasyon izleri ve b) ağır koşullarda aşındırılan %19 B_4C takviyeli numuneden alınan BSE SEM görüntüsünde çatlaklar [6,15] 31
Şekil 4. 9 a) AlSi9Cu3Mg-%15B_4C numunede aşınma yüzeyinde gevşek halde bulunan aşınma kırıntılarından alınan SE SEM görüntüsü ve b) bu görüntüden alınan EDS analizi spektrumu [6,15] 31
Şekil 5. 1 Kompozit üretiminde kullanılan B_4C partiküllerine ait XRD spektrumu 33
Şekil 5. 2 Kompozit üretiminde kullanılan B_4C partiküllerine ait partikül boyut dağılımı 33
Şekil 5. 3 K_2TiF_6 flaksına ait XRD spektrumu 33

Şekil 5. 4 a) Vakum kabini güç ünitesi ve hidrolik presin görüntüsü b) kokil kalıbın görüntüsü 34
Şekil 5. 5 Fırın tasarımının görüntüsü 35
Şekil 5. 6 BN kaplı grafit pota 35
Şekil 5. 7 İş akım şeması 37
Şekil 5. 8 CSM Instruments Tribometer aşınma cihazı 38
Şekil 5. 9 Karşı malzeme olarak kullanılan AISI 4140 çelik pim 39
Şekil 5. 10 Veeco Dektak 6m 2D profilometre 40
Şekil 5. 11 Profilometre ile alınan aşınma izilerini belirten görüntü 40
Şekil 6. 1 a) ağırlıkça %15 ve b)%20 B_4C partikül takviyeli kompozit numunelerin FEG-SEM görüntüleri 42
Şekil 6. 2 Matris ve takviye arayüzeyindeki sürekli reaksiyon tabakası 43
Şekil 6. 3 Ağırlıkça %15 B_4C partikül takviyeli kompozit numunenin x-ışını haritası 43
Şekil 6. 4 Ağırlıkça %20 B_4C partikül takviyeli kompozit numunenin x-ışını haritası 44
Şekil 6. 5 1 numaralı ağırlıkça %20 takviye B_4C partikül oranına sahip kompozit numunelere 3 cm/s kayma hızında 5 N yük altında 400 m mesafede yapılmış olan aşınma test grubunun sürtünme katsayısı grafiği 45
Şekil 6. 6 2 numaralı ağırlıkça %20 takviye B_4C partikül oranına sahip kompozit numunelere 5 cm/s kayma hızında 5 N yük altında 400 m mesafede yapılmış olan aşınma test grubunun sürtünme katsayısı grafiği 45
Şekil 6. 7 3 numaralı ağırlıkça %15 takviye B_4C partikül oranına sahip kompozit numunelere 3 cm/s kayma hızında 5 N yük altında 400 m mesafede yapılmış olan aşınma test grubunun sürtünme katsayısı grafiği 46
Şekil 6. 8 4 numaralı ağırlıkça %15 takviye B_4C partikül oranına sahip kompozit numunelere 3 cm/s kayma hızında 3 N yük altında 400 m mesafede yapılmış olan aşınma test grubun un sürtünme katsayısı grafiği 46
Şekil 6. 9 Sürtünme Katsayısı Grafiklerinin Karşılaştırılması 47
Şekil 6. 10 Numunelerdeki Hacim Kaybı Grafikleri 47
Şekil 6. 11 1 numaralı aşınma testinden alınan FEG-SEM görüntüsü a)SEI modunda b)Compo modunda 48
Şekil 6. 12 2 numaralı aşınma testinden alınan FEG-SEM görüntüsü a)SEI modunda b)Compo modunda 48
Şekil 6. 13 3 numaralı aşınma testinden alınan FEG-SEM görüntüsü a)SEI modunda b)Compo modunda 49
Şekil 6. 14 4 numaralı aşınma testinden alınan FEG-SEM görüntüsü a)SEI modunda b)Compo modunda 49
Şekil 6. 15 1 numaralı ağırlıkça %20 takviye B_4C partikül oranına sahip kompozit numunelere 3 cm/s kayma hızında 5 N yük altında 400 m mesafede yapılmış olan aşınma test grubundan alınmış FEG-SEM görüntüleri 50
Şekil 6. 16 2 numaralı ağırlıkça %20 takviye B_4C partikül oranına sahip kompozit numunelere 5 cm/s kayma hızında 5 N yük altında 400 m mesafede yapılmış olan aşınma test grubundan alınmış FEG-SEM görüntüleri 51
Şekil 6. 17 2 numaralı ağırlıkça %20 takviye B_4C partikül oranına sahip kompozit numunelere 5 cm/s kayma hızında 5 N yük altında 400 m mesafede yapılmış olan aşınma test grubundan alınmış FEG-SEM görüntüleri 52

Şekil 6. 18 2 numaralı ağırlıkça %20 takviye B_4C partikül oranına sahip kompozit numunelere 5 cm/s kayma hızında 5 N yük altında 400 m mesafede yapılmış olan aşınma test grubundan alınmış FEG-SEM görüntüleri 53
Şekil 6. 19 2 numaralı ağırlıkça %20 takviye B_4C partikül oranına sahip kompozit numunelere 5 cm/s kayma hızında 5 N yük altında 400 m mesafede yapılmış olan aşınma test grubundan alınmış FEG-SEM görüntüleri 54
Şekil 6. 21 2 numaralı ağırlıkça %20 takviye B_4C partikül oranına sahip kompozit numunelere 5 cm/s kayma hızında 5 N yük altında 400 m mesafede yapılmış olan aşınma test grubundan alınmış FEG-SEM görüntüsü ve noktasal EDS analizleri 55
Şekil 6. 22 2 numaralı ağırlıkça %20 takviye B_4C partikül oranına sahip kompozit numunelere 5 cm/s kayma hızında 5 N yük altında 400 m mesafede yapılmış olan aşınma test grubundan alınmış FEG-SEM görüntüleri 56
Şekil 6. 23 3 numaralı ağırlıkça %15 takviye B_4C partikül oranına sahip kompozit numunelere 3 cm/s kayma hızında 5 N yük altında 400 m mesafede yapılmış olan aşınma test grubundan alınmış FEG-SEM görüntüleri 57
Şekil 6. 24 3 numaralı ağırlıkça %15 takviye B_4C partikül oranına sahip kompozit numunelere 3 cm/s kayma hızında 5 N yük altında 400 m mesafede yapılmış olan aşınma test grubundan alınmış FEG-SEM görüntüleri 58
Şekil 6. 25 3 numaralı ağırlıkça %15 takviye B_4C partikül oranına sahip kompozit numunelere 3 cm/s kayma hızında 5 N yük altında 400 m mesafede yapılmış olan aşınma test grubundan alınmış FEG-SEM görüntüleri 59
Şekil 6. 26 3 numaralı ağırlıkça %15 takviye B_4C partikül oranına sahip kompozit numunelere 3 cm/s kayma hızında 5 N yük altında 400 m mesafede yapılmış olan aşınma test grubundan alınmış FEG-SEM görüntüleri 59
Şekil 6. 27 4 numaralı ağırlıkça %15 takviye B_4C partikül oranına sahip kompozit numunelere 3 cm/s kayma hızında 3 N yük altında 400 m mesafede yapılmış olan aşınma test grubundan alınmış FEG-SEM görüntüleri 60
Şekil 6. 28 4 numaralı ağırlıkça %15 takviye B_4C partikül oranına sahip kompozit numunelere 3 cm/s kayma hızında 3 N yük altında 400 m mesafede yapılmış olan aşınma test grubundan alınmış FEG-SEM görüntüleri 61

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2. 1 Metal matrisli kompozitlerde kullanılan takviyelere örnekler [11] 6
Çizelge 2. 2 Alüminyumun fiziksel özellikleri 8
Çizelge 2. 3 Bor karbürün fiziksel özellikleri [9] 9
Çizelge 2. 4 Al-B-C sisteminde rapor edilen ikili ve üçlü bileşikler [1] 11
Çizelge 2. 5 Al-B_4C karışımında belirtilen sıcaklıklarda oluşan fazlar [1] 12
Çizelge 4. 1 Hacim oranı ve partikül ilave verimi değerleri [4] 27
Çizelge 4. 2 Yoğunluk ve porozite değerleri [4] 27
Çizelge 5. 1 Matris alaşımının kimyasal bileşimi 32
Çizelge 5. 2 Aşınma test koşulları 39
Çizelge 6. 1 Kompozit Numunelerin Fiziksel Özellikleri 41
Çizelge 6. 2 Sürtünme katsayısı, pimlerin ağırlık kaybı, numunelernin ağırlık ve hacim kaybı değerleri 48

ÖZET

ALÜMİNYUM MATRİSLİ B_4C PARTİKÜL TAKVİYELİ AŞINMA DİRENCİ YÜKSEK KOMPOZİT MALZEMELERİN AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Fatih YÜKSEL

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Işıl KERTİ

Yapılmış olan çalışmada; alüminyum matrisli B_4C takviyeli kompozit malzemeler karıştırmalı döküm yöntemi ile iki farklı hacim oranında üretilmiş, üretilen kompozit malzemeler karakterize edilmiş ve kuru kayma aşınma davranışı disk üzerinde pim aşınma tesleri ile incelenmiştir.

Bu çalışmada, matris malzemesi olarak dökülebilirliği ile ön plana çıkan AlSi9Cu3Mg alaşımı kullanılmıştır. Takviye B_4C partiküllerinin kompozit malzeme içerisinde bölgesel birikmelerini engellemek amacı ile karıştırmalı döküm yöntemi tercih edilmiştir. Partikül ilave veriminin ve matris-takviye arayüzeyindeki bağ kuvvetinin arttırılması için, B_4C partikülleri K_2TiF_6 flaksı ile bilyalı değirmende karıştırılmış ve böylece matris-takviye arayüzeyinde titanyumca zengin bir reaksiyon tabakasının oluşması sağlanmıştır. Kompozit malzemenin üretimi vakum altında yapılarak ve döküm işleminde sıkıştırma uygulanarak porozite miktarı nispeten düşük olacak şekilde üretim işlemi gerçekleştirilmiştir.

Üretilen kompozit malzemelerin aşınma davranışı disk üzerinde pim testleri ile incelenmiştir. Bu testler disk olarak hazırlanmış kompozit malzemeye karşı AISI 4140 çelik pim kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Aşınma test sonuçları göz önüne alındığında sürtünme katsayısının hacim oranının artması ile arttığı tespit edilmiştir. Aşınma yüzeyinin mikroyapısı incelendiğinde adhesiv, abrasiv ve tabakalı aşınma izlerine rastlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kompozit malzeme, aşınma, B_4C

ABSTRACT

DETERMINATION OF WEAR PROPERTIES OF B_4C PARTICULATE REINFORCED HIGH WEAR RESISTANCE COMPOSITE MATERIAL

Fatih YÜKSEL

Department of Metallurgical and Materials Engineering

MSc. Thesis

Advisor: Assist. Prof. Dr. Işıl KERTİ

The studies conducted; aluminum matrix B_4C reinforced composite material were produced by stir casting method with two different volume ratio; produced composite materials were characterized and dry sliding wear properties were investigated by pin-on-disc tests.

In the present work, AlSi9Cu3Mg was used as a matrix material because of noticeable castability properties. The stir casting method was chosen because of preventing the regional aggregation of reinforcement B_4C particles in composite material. By mixing B_4C particles and K_2TiF_6 flux, matrix reinforcement interface was modified as a result titanium rich reaction layer was occurred however both particle addition yield and bond strength were increased.

The wear behavior of produced composite material was examined by pin-on-disc tests. These tests were performed to composite materials were prepared asa disk and AISI 4140 steel pins were used as a counter surfaces. Considering the wear test results of the friction coefficient increases with increasing volume fraction was determined. Analyzing the microstructure of the surface of the adhesive wear, abrasive wear and layered tracks were found.

Keywords: Composite materials, wear, B_4C

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Geleneksel malzemeler, hızla gelişen teknolojinin mühendislik uygulamalarında ihtiyaç duyulan özellikleri karşılayamamaktadır. Bu durum, farklı fiziksel özelliklerdeki malzemelerin bir arada kullanılması ile oluşturulan kompozit malzemelerin önem kazanmasına sebep olmuştur. Kompozit malzemeler, bileşenlerinin özelliklerinden farklı özelliklere sahiptir.

Metal matrisli kompozit malzemeler içerisinde düşük yoğunluğu ile alüminyum ön plana çıkmaktadır. Alüminyum matrisli kompozitlerde genellikle SiC, Al_2O_3 ve B_4C gibi sert seramik partiküller takviye malzemesi olarak kullanılmaktadır.

Metal matrisli kompozitlerin üretiminde sıvı faz üretim yöntemleri düşük maliyetleri nedeniyle tercih edilmektedir. Al-B_4C kompozitlerinin bu yöntemle üretim yapılabilmesi için Al-B-C üçlü faz sisteminin iyi incelenmesi ve Al-B_4C arasındaki düşük sıcaklıklardaki yetersiz ıslatma sorununun giderilmesi gerekmektedir.

1.1 Literatür Özeti

Al-B-C üçlü sisteminde 950°C üzerinde oluşmaya başlayan üçlü karbürlerin malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz etkilediği rapor edilmiştir [1]. Bununla beraber, Al ve B_4C arasında 1100°C altında zayıf ıslatılabilirlik olduğu, ıslatılabilirliği arttırmak için partiküllere ısıl işlem uygulanabileceği veya kaplanabileceği belirtilmiştir [2]. Döküm yöntemiyle üretilen AlB_4C kompozitlerine, K_2TiF_6 flaksı ilave edilerek TiC ve TiB_2 içeren reaksiyon tabakaları oluştuğu, oluşan reaksiyon tabakasının matris takviye arayüzeyinde bağ mukavemetini ve ıslatılabilirliği arttırdığı, buna bağlı olarak da partikül ilave veriminin arttığı ayrıca Al-B-C sisteminde oluşması beklenen üçlü

karbürlerin oluşmadığı rapor edilmiştir [3]. Ayrıca, K_2TiF_6 flaksı kullanılarak üretilen Al-B_4C kompozit malzemelerde, flaks kullanılmadan üretilen kompozit malzemelere göre partikül ilave veriminin yüksek olduğu ve porozite oranının düşük olduğu rapor edilmiştir [4]. Al-B_4C kompozit malzemelerine daha önceden yapılan aşınma testlerinde adhezif, abrazif ve yorulma aşınmalarına rastlanmıştır [5]. Al-B_4C kompozit malzemelerine uygulanan aşınma testlerinin sonuçlarında aşınma hızlarının artan hacim oranı, yük ve kayma mesafesi ile arttığı; artan kayma hızı ile azaldığı belirlenmiştir. Diğer taraftan sürtünme katsayının artan hacim oranı ve kayma mesafesi ile arttığı, artan kayma hızı ve yük ile azaldığı belirlenmiştir. Aşınma mekanizmasının adhezif, abrazif ve tabakalı aşınmanın bir kombinasyonu olduğu saptanmıştır [6].

1.2 **Tezin Amacı**

Bu çalışmada, matris malzemesi olarak düşük yoğunluğu ve yüksek dayanım/özgül ağırlık değerine sahip alüminyum, takviye malzemesi olarak da yüksek sertliği ile ön plana çıkan B_4C partikülleri kullanılarak kompozit malzemelerin üretimi, üretilen kompozit malzemelerin karakterizasyonu, aşınma testlerinin yapılması, aşınma test sonuçlarının ve aşınma test mekanizmasının araştırılması amaçlanmıştır.

1.3 **Bulgular**

Bu çalışmada; üretilen Al- B_4C kompozitlerine yapılan aşınma testlerinde artan kayma hızı ile ortalama sürtünme katsayısının ve aşınma miktarının azaldığı, karşı malzemede aşınma miktarının arttığı takviye partikül oranının azalması ile ortalam sürtünme katsayısının, aşınma miktarının ve karşı malzemenin aşınma miktarının azaldığı uygulanan yükün azalması ile numunenin aşınma miktarının azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca adhezif, abrazif ve tabakalı aşınma çeşitlerine rastlanmıştır.

BÖLÜM 2

ALÜMİNYUM MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELER

Alüminyum matrisli kompozit malzemeler matris malzemesi alüminyum olan ve genellikle seramik takviye malzemeleri ile desteklenerek darbe dayanımı, çekme dayanımı, eğme dayanımı ve aşınma dayanımı gibi özelliklerinin arttırılması için üretilen malzemelere denir. Bu bölümde kompozit malzemeler tanıtılacak, sınıflandırılacak ve alüminyum matrisli kompozit malzemelerden bahsedilecektir.

2.1 Kompozit Malzemeler

Farklı özellikte iki veya daha fazla bileşen içeren, bileşenlerinin arayüzeylerinde belirgin bağlar bulunan malzemeler kompozit malzeme olarak adlandırılır [7]. Kompozit malzemenin özelliğinin bileşen malzemelerin özelliklerinden daha üstün olması beklenir [8]. Kompozitler; sadece yapısal olarak değil, aynı zamanda, elektriksel, ısıl ve tribolojik özelliklerinden dolayı da kullanılır [9]. Kompozit malzeme temel olarak bir matris malzemesi ve matris malzemesinin çevrelediği, içerdiği ve bir arada tuttuğu takviye malzemesinden oluşur [8].

Kompozitin içerisindeki takviyelerin temel işlevleri; yük taşımak, sertlik, mukavemet, ısıl kararlılık ve diğer mekanik özellikleri sağlamak ve istenilen elektriksel özellikleri (iletkenlik veya yalıtkanlık gibi) sunmaktır. Matris malzemesinin temel görevleri ise; takviyelere bağlanarak bir arada tutmak, takviyelere yük aktarımı ve rijitlik sağlamak, takviyelerin ayrı ayrı hareket etmesine olanak tanımak ve böylece çatlak ilerlemesini durdurmak veya yavaşlatmaktır [8].

Kompozit malzemeler teknolojik problemlerin çözülmesinde çok uzun yıllardır kullanılmasına rağmen ancak 1960'lı yıllarda polimer matrisli kompozitler ile

endüstrinin ilgisini çekmiştir. Bundan sonra kompozit malzemeler yaygın mühendislik malzemesi halini almış ve otomotiv parçaları, spor malzemeleri, uçak parçaları, denizcilik ve petrol endüstrilerini de içeren çeşitli uygulamalar için tasarlanmış ve imal edilmiştir [8].

2.1.1 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler genellikle iki farklı şekilde sınıflandırılır. Birinci sınıflandırma matris malzemesine göre yapılır. Bu sınıflamaya göre polimer matrisli kompozitler (PMK), metal matrisli kompozitler (MMK) ve seramik matrisli kompozitler (SMK) olarak 3`e ayrılır [8, 9].

Sınıflandırmanın ikinci türü takviye malzemesinin şekline ve boyutlarına göre; partikül takviyeli, visker takviyeli, sürekli fiber takviyeli ve dokuma kompozitler olarak sınıflandırılabilir [9].

2.1.1.1 Polimer Matrisli Kompozitler

Polimerler, metal ve seramiklere göre çok daha karmaşık yapıdaki malzemelerdir. Matris olarak kullanılan polimerler ucuz ve kolaylıkla üretilebilir malzemelerdir. Diğer taraftan düşük elastisite modülüne ve düşük kullanım sıcaklığına sahiptirler. Termoset ve termoplastikler olarak iki gruba ayrılan polimer matrisler genelde sürekli fiberlerle kullanılır. Bunlardan en önemli olanları sürekli fiberlerle takviye edilen polyester ve epoksi reçine matrislerdir. Epoksi reçine matrisli kompozitlerin en önemli uygulamalarının başında havacılık gelmektedir. Polimer matrisli kompozit malzemelerin kullanıldığı ortamlarda göz önüne alınması gereken en önemli faktörler sıcaklık ve nemdir. Özellikle bu iki faktörün beraber etkin olduğu şartlarda polimer matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerinde hidrotermal etkilerden dolayı düşüşler meydana gelmektedir. Polimer matrisli kompozitlerin üretilmesinde en çok bilinen ve en fazla kullanılan metotlardan bazıları; elle sıvama, telle sarma, kese kalıplama işlemi, sıvı akış tekniği, takviyeli reaksiyon enjeksiyon kalıplama, ekstrüzyon ve ısıl oluşum metotlarıdır. Polimerlerde kullanılan takviye malzemelerinden en önemli olanları; cam fiber, kevlar fiber, bor fiber ve karbon fiberlerdir [10].

2.1.1.2 Seramik Matrisli Kompozitler

Fiber takviyeli seramik matrisli kompozitler (SMK), yüksek sıcaklık yapı malzemesi olabilme özelliğinden dolayı 1980'lerden beri ilgi odağı olmuştur. Kompozitlerin görece bu yeni sınıfı; havacılıkta ve enerji üretiminde türbin motoru parçalarına, uzay araçları parçalarına ve çeşitli endüstriyel uygulamalara yönelik birçok araştırma konusunu oluşturmuştur. Günümüzde bu malzemeler mevcut alternatiflerinin içinde (göreceli olarak) daha pahalı kabul edilebilir. Tasarım yöntemlerindeki ilerleme yavaş gerçekleşmiştir. Seramik matrisli kompozit malzemelerin bu yavaş gelişiminin sebebi, matris ve takviyelerin her ikisinin ve de imalat için kullanılan üretim yöntemlerinin kimyalarının çok çeşitli olmasından kaynaklanmasıdır. SMK'ların kullanımını sınırlayan diğer faktörler ise maliyet ve ara yüzey kaplamaların zayıf oksidasyon direncidir [9].

2.1.1.3 Metal Matrisli Kompozitler

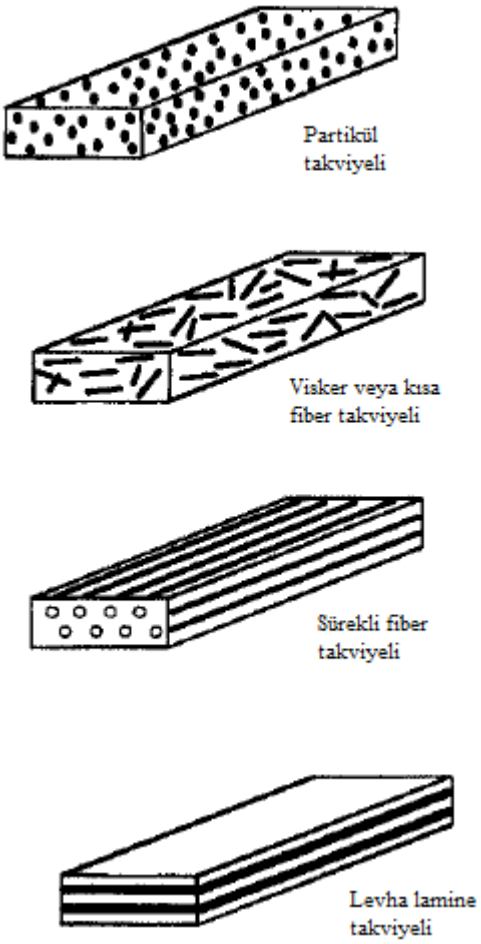
Metal matrisli kompozitler (MMK), diğer tüm kompozitler gibi, tek fazda elde edilemeyen özellikleri sağlamak için uygun dağılmış, kimyasal ve fiziksel olarak birbirinden farklı, en az iki fazdan meydana gelir. Genel olarak; metalik matris fazı ve bu faz içine dağılmış lifli veya partiküllü faz olmak üzere iki faz vardır [11]. Geleneksel yöntemlerle in situ olarak üretilmiş grafit içerikli dökme demir ve tungsten karbür gibi yüksek karbür içerikli çelikler de bu gruba girmektedir [8]. Örnek olarak; enerji iletim hatlarında kullanılan sürekli Al_2O_3 fiber takviye içeren alüminyum matrisli kompozitler, süper iletken mıknatıslar için Nb-Ti telcikler içeren bakır matrisli kompozitler, kesici takım ve petrol sondaj parçası olarak kullanılan tungsten karbür(WC)/kobalt(Co) partiküllü kompozitler, havacılık ve otomotiv ve uygulamalarında kullanılan SiC partikül takviyeli alüminyum matrisli kompozitler gibi [11].

Bütün metal matrisli kompzitlerde matris olarak metaller veya metal alaşımları kullanılır. Takviye malzemesi genellikle seramik olabildiği gibi nadiren de metalik olabilir. Metal matrisli kompozitler genellikle üçe ayrılır. Bunlar;

I) Partikül takviyeli metal matrisli kompozit malzemeler,

II) Kısa fiber veya visker takviyeli metal matrisli kompozit malzemeler,

III) Sürekli fiber veya levha takviyeli metal matrisli kompozit malzemelerdir [11].



Şekil 2. 1 Metal matrisli kompozit malzeme çeşitleri [11]

Şekil 2.1'den de görüldüğü gibi sürekli fiber takviyeli kompozit malzeme aralarında en anizotropik olanıdır. Çizelge 2.1'de partikül, kısa fiber veya visker ve sürekli fiberlerin uzunluk / çap (uzunluk / kalınlık) oranları verilmiştir [11].

Çizelge 2. 1 Metal matrisli kompozitlerde kullanılan takviyelere örnekler [11]

Takviye Türü	**Uzunluk / Çap Oranı**	**Örnekler**
Partikül	1- 4	SiC, $A1_20_3$, BN, B_4C, WC
Kısa fiber veya visker	10 – 10000	C, SiC, $A1_20_3$, $A1_20_3$+$Si0_2$
Sürekli fiber	>1000	SiC, Al_20_3, C, B, W, Nb-Ti, Nb_3Sn

Süreksiz takviyeli kompozitler (kısa fiber, visker veya partikül) aşağıda belirtilen üstünlüklere sahiptir:

- Partikül takviyeli kompozitlerin üretimi sürekli fiber takviyeli kompozitlerin üretimine göre daha ekonomiktir.
- Döküm ve toz metalurjisi gibi geleneksel metalürjik işleme tekniklerini takiben dövme, haddeleme ve ekstrüzyon gibi ikincil işlemler uygulanabilir.
- Takviyesiz metalden daha yüksek kullanım sıcaklığına sahiptir.
- Geliştirilmiş mekanik özelliklere sahiptir.
- Daha iyi aşınma direnci sağlar.

Metal matrisli kompozit malzemelerin döküm yolu ile üretilmesi toz metalurjisi yöntemi ile üretilmesinden daha ekonomik olmaktadır [11].

2.2 Alüminyum Matrisli Kompozit Malzemelerin Özellikleri

Alüminyum matrisli kompozit malzemeler; matris malzemesi alüminyum veya alüminyum alaşımı olan ve genellikle seramik takviye malzemeleri kullanılarak, çeşitli üretim yöntemleri ile üretilmiş malzemelerdir.

2.2.1 Alüminyumun Özellikleri

Alüminyum yerkabuğunun %8'ini oluşturarak, yeryüzünde en fazla bulunan elementlerin başında gelmektedir. Buna karşın oksijene olan ilgisinden dolayı üretimi diğer metallere göre daha geç olmuştur. Geç keşfedilmesine rağmen demir dışı metaller arasında en fazla kullanılan metallerden biridir. Alüminyum alaşımları, düşük yoğunluğu, yoğunluğa oranla mükemmel mukavemeti ve tokluğu ile yüksek korozyon direnci nedeniyle, otomotiv ve havacılık alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır [11]. Alüminyumun fiziksel özellikleri Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Alüminyum alaşımlarının birçoğunun yoğunluğu saf alüminyumun yoğunluğu olan 2700 kg m^{-3} değerine çok yakındır. Saf alüminyum 660°C'da ergir. Düşük yoğunluğu ile ön plana çıkan alüminyum alaşımları, göreceli olarak düşük ergime sıcaklığı ile matris malzemesi olarak tercih edilir. Ayrıca düşük ergime sıcaklığı ve düşük viskozitesi sayesinde döküm yöntemi ile üretilirken, düşük sinterleme sıcaklığı ile de toz metalürjisi yöntemi ile üretilirken kolaylık sağlar. Bu özelliklerine ek olarak yaşlandırma

ve çökelme sertleşmesi gibi ısıl işlemlerin uygulanabildiği alaşımlar ile de mekanik özellikler daha da arttırılabilir [11].

Çizelge 2. 2 Alüminyumun fiziksel özellikleri

Özgül Ağırlık	2700 kg m^{-3}
Erime Noktası	660 °C
Özgül ısı (100 °C'da)	938 J Kg^{-1} K^{-1}
Elektriksel İletkenlik (20 °C'da)	% 64.94 (uluslararası tavlı bakır standardına göre)
Ergime Gizli Isısı	397 kJ kg^{-1}

Alüminyum matrisli kompozit malzemeler; otomobiller için piston ve silindir parçaları, motor bloğu, biyel kolu, emme ve egzoz valfları, fren kampanası ve fren diskleri, demiryolu taşıtları için fren sistemleri başta olmak üzere aşınmaya ve yorulmaya maruz kalan çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır [8, 11, 12].

2.2.2 Bor Karbür(B_4C)

Bor karbür; elmas ve kübik bor nitrürden sonra en sert üçüncü malzeme olarak bilinir. Özgül ağırlığı 3210 kgm^{-3} olan SiC, 3510 kgm^{-3} olan elmas ve 3920 kg/m^{-3} olan Al_2O_3 gibi takviye malzemelerine kıyasla daha düşük özgül ağırlığa sahiptir. Sertliği ve yoğunluğunun yanı sıra yüksek darbe ve aşınma dayanımı, yüksek ergime noktası ve kimyasal dayanımı sayesinde B_4C alüminyum matrisli kompozit malzemelerde takviye malzemesi olarak tercih edilir [13]. B_4C'nin bazı özellikleri Çizelge 2.3'de verilmiştir.

Al/B_4C kompozitlerinin sıvı faz üretim yöntemleri ile üretilmesi için alüminyumun B_4C yüzeyini tamamen ıslattığı 1100°C'ın üzerine çıkılması gerekmektedir. Ancak bunun gibi yüksek bir sıcaklıkta alüminyum ve B_4C arasında kimyasal reaksiyonlar meydana gelmektedir ve zararlı yüksek sıcaklık fazları oluşmaktadır [13].

Çizelge 2. 3 Bor karbürün fiziksel özellikleri [9]

Kafes Sistemi	Rombohedral
Ergime Sıcaklığı (°C)	2450
Elastisite Modülü (E) (GPa)	450
Özgül Ağırlık (ρ) (kg m^{-3})	2520
Isıl İletkenlik Katsayısı (W m^{-1} K^{-1})	29
Mohs Sertliği	9,5
Knoop Sertliği	2800
Isıl Genleşme Katsayısı (10^{-6} K^{-1})	5
Poisson Oranı	0,21

2.2.3 Islatılabilirlik

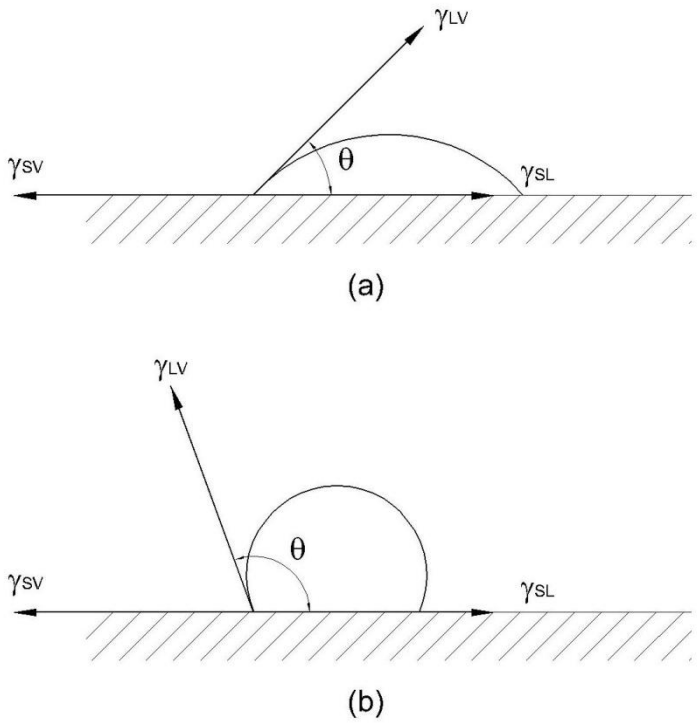
Islatılabilirlik, katı üzerine ergimiş damla bırakıldığında ergiyik ile katı arasındaki açının derecesi olarak tanımlanabilir [8]. Diğer bir ifadeyle ıslatılabilirlik, bir sıvının katı bir yüzey üzerinde yayılma kabiliyeti olarak tanımlanır [11]. Şekil 3.1'de katı yüzey üzerinde sıvı damlanın iki durumu gösterilmektedir. Burada üç farklı spesifik enerji terimi mevcuttur. γ_{SV} katı/gaz arayüzeyinin enerjisi; γ_{LS} sıvı/katı arayüzeyinin enerjisi ve γ_{LV} sıvı/gaz arayüzeyinin enerjisidir. Katı yüzey üzerine sıvı damla bırakıldığı zaman, katı/gaz arayüzeyi, sıvı/katı ve sıvı/gaz arayüzeyi olarak değişir. Termodinamik olarak eğer sistemin serbest enerjisinde azalma olursa sıvı yayılması meydana gelir. Islatılabilirlik için diğer bir önemli parametre ise temas (θ) açısıdır. Temas açısı sistemin ıslanabilirliğinin bir ölçüsüdür. Yatay yönlü kuvvetlerin dengesinden aşağıdaki (2.1) ve (2.2)'deki eşitlikleri yazabiliriz [8, 11].

$$\gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos\theta = \gamma_{SV} \quad (2.1)$$

$$\theta = \cos\text{-}1\ (\gamma SV - \gamma SL) / \gamma LV \quad (2.2)$$

Yukarıdaki eşitlikten θ'nın 0° olduğu durumda mükemmel ıslatma ve θ'nın 180° olduğu durumda ise ıslatmanın olmadığını söyleyebiliriz. 0°< 0 <180° olduğu durumda ise kısmi

ıslatma vardır. Bir sistemin temas açısı; sıcaklık, sitokiyometri, bekleme süresi, arayüzey reaksiyonları, absorbe gazların bulunması, pürüzlülük ve yüzey geometrisi ile değişebilir [8, 11].



Şekil 2. 2 Islatılabilirliğin bir ölçüsü olan temas açısı (θ) ve üç yüzey enerjisi (katı/sıvı, sıvı/gaz ve katı/gaz)

2.2.4 Alüminyum ile B_4C Arayüzeyinin İncelenmesi

Kompozit malzemeler için arayüzey takviye ile matris arasındaki bölge anlamına gelir. Bu bölgedeki bağlanma kompozit malzemenin özelliklerini belirlemede çok önemlidir [11]. Alüminyum ile B_4C arasında 1100°C sıcaklığın altında zayıf ıslanma görülmektedir [2]. Ancak bu sıcaklık değerinin üzerine çıkıldığı zaman çeşitli bileşikler oluşmaktadır [1]. Takviye malzemesi ile matris malzemesinin yüksek sıcaklıklarda uzun süre teması sonucu, takviye malzemesi ile matris malzemesi arasında reaksiyon oluşmakta ve bunun neticesinde arayüzeyde istenmeyen fazlar açığa çıkmaktadır [14]. Bu bileşikler mekanik özellikleri önemli ölçüde azaltmaktadır. Çizelge 2.4 ve 3.5'de alüminyum ile B_4C arasında meydana gelen bileşikler verilmiştir. Çizelge 2.5'de verilen bileşikler alüminyum ve B_4C partikül karışımının soğuk preslenmesi ve 160 saat belirtilen sıcaklıkta beklenmesi sonucunda meydana gelmiştir [1].

Çizelge 2. 4 Al-B-C sisteminde rapor edilen ikili ve üçlü bileşikler [1]

FORMÜL	ISIL KARARLILIK (^{0}C)	KAFES YAPISI	KAFES PARAMETRELERİ(nm)
Al_4C_3	2156	ROMBOHEDRAL	a = 0.33388 c = 2.4996
B_4C	2450	ROMBOHEDRAL	a = 0.5672 c = 1.225
AlB_2	892	HEGZAGONAL	a = 0.30054 c = 0.325 28
AlB_{12}	2050	TETRAGONAL	a = 1.016 c = 1.428
$Al_3B_{48}C_2$ (β-AlB_{12})	2027	TETRAGONAL	a = 0.882 c = 0.509
$AlB_{24}C_4$ (AlB_{10})	1727	ORTOROMBİK	a = 0.8881 b = 0.9100 c = 0.5690
$Al_8B_4C_7$ ($Al_8B_xC_6$)	1837	HEGZAGONAL	a = 0.59118 c = 1.5915
Al_3BC (X, Al_4BC)	1000	HEGZAGONAL	a = 0.6046 c = 1.1541

Alüminyum matrisli kompozitlerin başarısında, alüminyum matris ile takviye arasındaki arayüzeyin kontrol edilmesi oldukça önem taşımaktadır. Dikkat edilmesi gereken ana noktalar şunlardır:

• Özellikle düşük basınçta sıvı durum üretim yöntemleri kullanıldığında, üretimi kolaylaştırmak için iyi ıslatma gerekmektedir.

• Matris ve takviye malzemesi arasında, takviyenin özelliklerini kaybetmesini ve yeni gevrek fazların oluşumunu önlemek amacıyla gerçekleştirilen arayüzey reaksiyonları çok sınırlı bir düzeyde olmalıdır.

• Doğru bağlanma, istenilen özelliklerin dağıtımı açısından önemlidir [15].

Çizelge 2. 5 Al-B_4C karışımında belirtilen sıcaklıklarda oluşan fazlar [1]

Deney no	Sıcaklık (^{0}C)	Oluşan fazlar
1	627	Al, B_4C
2	647	Al, B_4C
3	677	Al, B_4C, Al_3BC, AlB_2
4	727	Al, B_4C, Al_3BC, AlB_2
5	777	Al, B_4C, Al_3BC, AlB_2
6	827	Al, B_4C, Al_3BC, AlB_2
7	877	Al, B_4C, Al_3BC, $Al_3B_{48}C_2$
8	927	Al, B_4C, Al_3BC, $Al_3B_{48}C_2$
9	1000	Al, B_4C, Al_3BC, $Al_3B_{48}C_2$

Matris malzemesi olarak seçilen alüminyum alaşımları için, ıslatma, takviye malzemesi ile arayüzey enerjisini düşürecek bir kimyasal reaksiyon ile geliştirilebilir. Ayrıca, sıvı alüminyumu kaplayan oksit yüzeyin engellenmesi de ıslatmayı artırabilir. Seramiklerin yani takviye malzemelerinin alüminyum tarafından ıslatılmasına etki eden parametreler sıcaklık (yükselen sıcaklıklar daha iyi ıslatma değerleri verirler), temas süresi (ıslatma uzun temas sürelerinde artar), çevredeki atmosferin basıncıdır (vakumda, adsorbe edilmiş gazlar uzaklaşır ve ıslatma davranışını iyileştirir). Bu koşullar, genelde zayıf olan ıslatmayı mekanik veya kimyasal olarak artırabilir [15].

1100°C altındaki sıcaklıklarda alüminyum ve B_4C arasındaki zayıf ıslatmayı iyileştirmek için partiküllere genellikle ısıl işlem uygulanır veya partiküller kaplanır. Titanyum ile kaplanan B_4C partiküllerinin yüzeyinde TiB_2 veya TiC oluşumu ile ıslanma iyileşir [2]. Geçiş metallerinin karbürleri, borürleri ve nitrürleri, bağlarının daha yüksek metalik karakter taşımasından dolayı, bir sıvı metal tarafından, kovalent ve iyonik bağlı seramiklere göre daha iyi ıslatılabilirler [3].

Al-B_4C kompozitlerinde ıslatılabilirliğini artırmada kullanılacak reaktif metallerin başında titanyum gelmektedir. Al-B_4C kompozitlerinin döküm yolu ile üretiminde, K_2TiF_6 flaksı kullanılarak, matris/takviye arayüzeyinde TiC ve TiB_2 içeren bir reaksiyon

tabakası oluşur ve bu reaksiyon tabakası ile hem ıslatılabilirlik, arayüzey bağ mukavemeti ve partikül ilave verimi artırılırken hem de bu reaksiyon tabakası ile Al-B_4C sisteminde oluşması beklenen arafazlar oluşmaz. Titanyum, bor karbür partiküllerinin spesifik yüzey alanlarına göre, belirli bir değere kadar arayüzeyde reaksiyon tabakası oluşumundan sonra, artan miktarlarda, alüminyum matris ile birleşerek yapıda Al_3Ti bileşiği oluşur. Titanyum K_2TiF_6 flaksı olarak ilave edilmektedir. Bunun sebebi potasyum ve florun oksit giderici olarak görev almasıdır [3].

Al-Ti-B_4C sisteminde TiB_2 ve TiC oluşumu reaksiyonu tüm sıcaklıklarda en düşük serbest enerjiye sahiptir ve bu bileşiklerin oluşması beklenmektedir. Bu reaksiyonlar 2.3-2.8 eşitliklerinde verilmektedir [3].

$$\frac{3}{4}Al + \frac{1}{4}Ti \rightarrow \frac{1}{4}TiAl_3 \quad (2.3)$$

$$\frac{10}{13}Al + \frac{3}{13}B_4C \rightarrow \frac{6}{13}AlB_2 + \frac{1}{13}Al_4C_3 \quad (2.4)$$

$$\frac{3}{4}Ti + \frac{1}{4}B_4C \rightarrow \frac{1}{2}TiB_2 + \frac{1}{4}TiC \quad (2.5)$$

$$\frac{3}{4}TiAl_3 + \frac{1}{4}B_4C \rightarrow \frac{1}{2}TiB_2 + \frac{1}{4}TiC + \frac{9}{4}Al \quad (2.6)$$

$$\frac{1}{2}AlB_2 + \frac{1}{2}Ti \rightarrow \frac{1}{2}TiB_2 + \frac{1}{2}Al \quad (2.7)$$

$$\frac{1}{4}Al_4C_3 + \frac{3}{4}Ti \rightarrow \frac{3}{4}TiC + Al \quad (2.8)$$

BÖLÜM 3

TRİBOLOJİ

Triboloji, etkileşim halindeki bağıl hareket eden yüzeylerin sürtünme, aşınma ve yağlama özelliklerini inceleyen bilim dalıdır. Triboloji kelimesi yunanca sürtünme veya kayma anlamına gelen **'tribos'** kelimesinden gelmektedir. Triboloji en eski bilim dallarından biridir. Eski uygarlıklar düşük sürtünme yüzeyli rulmanlar geliştirmeye çalışmışlardır. Bununla beraber canlılardaki eklemlerde birer tribolojik sistemdir. Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma (Organisation for Economic Cooperation and Development-OECD) komitesi tarafından 1967 yılında yeni bir bilim alanı olarak tanımlanmıştır [16]. İnsanoğlu günlük yaşantısında tribolojik olaylarla sıkça karşılaşır. Örnek olarak, kibritin yakılması, silginin yazıyı silmesi, buzun üzerinde kayılması günlük yaşantıdaki tribolojik olaylardır.

3.1 **Sürtünme**

Sürtünme, bir cismin başka bir cisim üzerindeki hareketine karşı dirençtir. Sürtünme kelimesi, birbirlerine göre bağıl olarak hareket eden cisimlerin veya maddelerin kinetik enerjilerinin kademeli olarak azalması olarak da tanımlanır. Sürtünme çeşitlerinin bazıları, katıların titreşimi sonucu meydana gelen 'içsel sürtünme', bir gaz ile katı arasında meydana gelen 'aerodinamik sürtünme', bir katı ile bir sıvı arasında meydana gelen 'viskoz sürtünme' ve katı iki cisim arasında meydana gelen katı sürtünmedir. Katı sürtünme de kendi içinde kayma sürtünmesi ve yuvarlanma sürtünmesi olarak ikiye ayrılır. Bazı durumlarda düşük sürtünme istenirken (rulmanlar, dişliler gibi) bazı

durumlarda ise yüksek sürtünme istenir (fren ve debriyaj sistemleri, yol yüzeyleri gibi). Burada önemli olan konu sürtünmeyi kontrol etmektir [16, 17].

3.2 Aşınma

İzafi olarak hareket eden cisimlerin temas eden yüzeylerinde malzeme kaybı ile sonuçlanan ağır hasarlar oluşur. Oluşan bu hasarlara **"aşınma"** denir. Aşınma temas eden iki katı cisim arasında malzeme transferi ile olursa 'adhezif aşınma' olarak adlandırılır. Kayma ve haddeleme işlemleri gibi tekrarlanan gerilmeye maruz kalan yüzeylerden parça kopması ile meydana gelen aşınma türü 'yorulma aşınması' olarak adlandırılır. Eğer malzeme sert partiküller içeriyorsa, malzemeler arasında sert partiküller bulunuyorsa veya sadece bir yüzey diğer yüzeye karşı destek olmadan kayma hareketi yapıyorsa çok hızlı aşınma meydana gelir ve bu aşınma türüne 'abrazif aşınma' denir. Aşınmanın diğer iki türü ise hızlı akan sıvıların neden olduğu 'erozyon aşınması' (parçacıkların çarpması nedeniyle) ve 'kavitasyon' aşınmasıdır. Bazı durumlarda malzeme temas eden yüzey ile kimyasal reaksiyona girebilir. Bu durum kimi zaman temas eden yüzeyler arasında yağlayıcı olarak görev alabilir. Bu tür aşınmaya 'korozif aşınma' denir. Eğer oksijen korozif etkiye sebep olursa bu tür aşınmaya 'oksidatif aşınma' denir. Temas eden cisimler arasında hareket genliği birkaç mikrometre ile sınırlı olduğunda, malzeme temas eden bölge içerisinde sürtünmelerden dolayı hasar görebilir ve deforme olabilir. Bu tür aşınmalara 'titreşimli aşınma' (freeting wear) denilmektedir. Diğer aşınma çeşitleri ise iki katı cismin çarpışması ile oluşan 'çarpma aşınması', temas yükünün ve hızının katının yüzeyinde ergimeye sebep olacağı kadar yükzek olması ile oluşan 'ergime aşınması' ve difüzyona sebep olabilecek kadar yüksek olması ile meydana gelen 'difüzyon aşınması' olarak verilebilir [16, 17]. Söz konusu aşınma çeşitlerinden adezif aşınma, yorulma aşınması ve abrazif aşınma çeşitleri daha detaylı olarak açıklanacaktır.

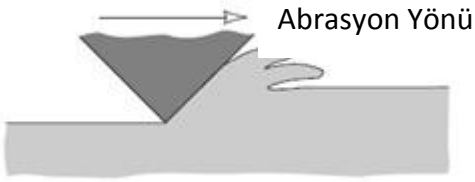
3.2.1 Abrazif Aşınma

Abrazif aşınma; sert partiküller veya sert çıkıntıların katı yüzeyine karşı yönde hareket etmesi ile meydana gelir. Aşınma; katı yüzey ile temas eden bileşen veya bileşenlerin arasında izafi hareket sonucunda katı yüzeyinde meydana gelen sürekli malzeme

kaybıdır [17]. Diğer bir deyişle abrazif aşınma; WC veya SiC gibi sert seramik partiküllerin birbirine karşı zıt yönde hareket eden cisimlerin arasında kalması sonucunda malzeme kaybının meydana gelmesine denir [11].

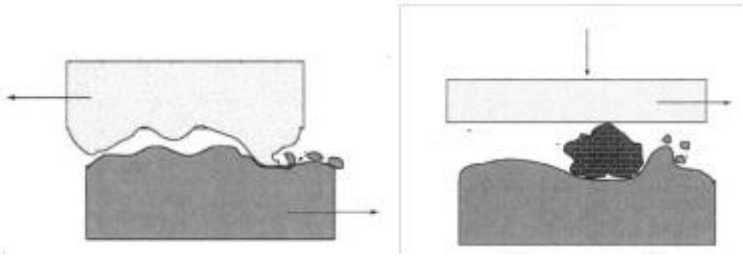
Partikül takviyeli metal matrisli kompozitler için abrazif aşınma evresinde abrazyon derecesi; uygulanan yük, hız, takviyenin hacim oranı ve boyutu, matris ve takviye arasındaki arayüzey bağ kuvvetinin bir fonksiyonudur [11].

Abrazif aşınma, 4 farklı mekanizma ile gerçekleşebilir. İlki kesme olarak adlandırılan sert ve keskin partikül veya çıkıntının daha yumuşak olan yüzeyi kesmesi ile meydana gelen klasik modeldir. Şekil 3.1 'de gösterilmiştir. Bu mekanizmada malzeme aşınma birikintisi olarak kesilerek yüzeyden uzaklaştırılır [16].



Şekil 3.1 Abrazif Aşınma Mekanizması [16]

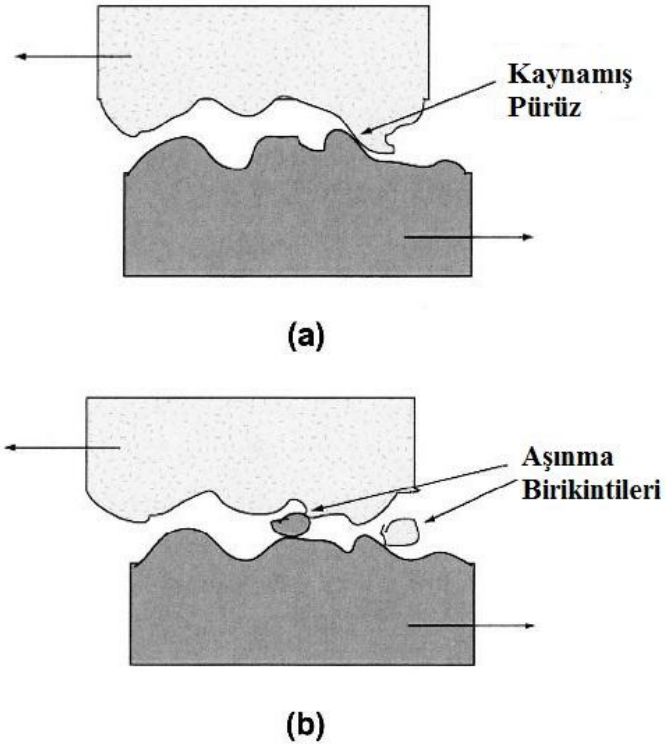
Literatürde abrazif aşınma iki cisimli abrazif aşınma ve üç cisimli abrazif aşınma olmak üzere iki temel çeşit ile belirtilmiştir. İki cisimli abrazif aşınmaya yüzey üzerindeki zımpara kâğıdının etkisi örnek olarak verilebilir. Sert ve rijit olarak sabit duran partiküllerin kesici takım gibi yüzey üzerinden geçmesi ile iki cisimli abrazif aşınma meydana gelir. Üç cisimli abrazif aşınmada, taneler sabit değildir ve yüzey üzerinde serbest olarak kayarlar. İki cisimli ve üç cisimli abrazif aşınma Şekil 3.2'de gösterilmektedir [16].



Şekil 3.2 İki cisimli ve üç cisimli abrasiv aşınma [11]

3.2.2 Adhezif Aşınma

Adhezif aşınma, geniş spektrumlu kararsız bir sürtünme katsayısı ve yüksek aşınma oranı ile tanımlanan yaygın bir aşınma türüdür [16]. Adhezif aşınma; yapışma, yüzeyden malzeme kalkması veya oyulma olarak da bilinir. Kayma sırasındaki deformasyon, adhezif aşınmanın ana mekanizmasıdır. Genel olarak, bölgesel plastik deformasyonlara sebep olan yüksek temas basınçları, iki yüzey arasında adhezif bağların oluşmasına yol açar. Devam eden kayma hareketi bağlanmış bölgedeki kesme geriliminin yumuşak malzemenin akma mukavemetinin aşılmasına kadar artar, yüzeyden malzeme ayrılması ile aşınma gerçekleşir [11,16].

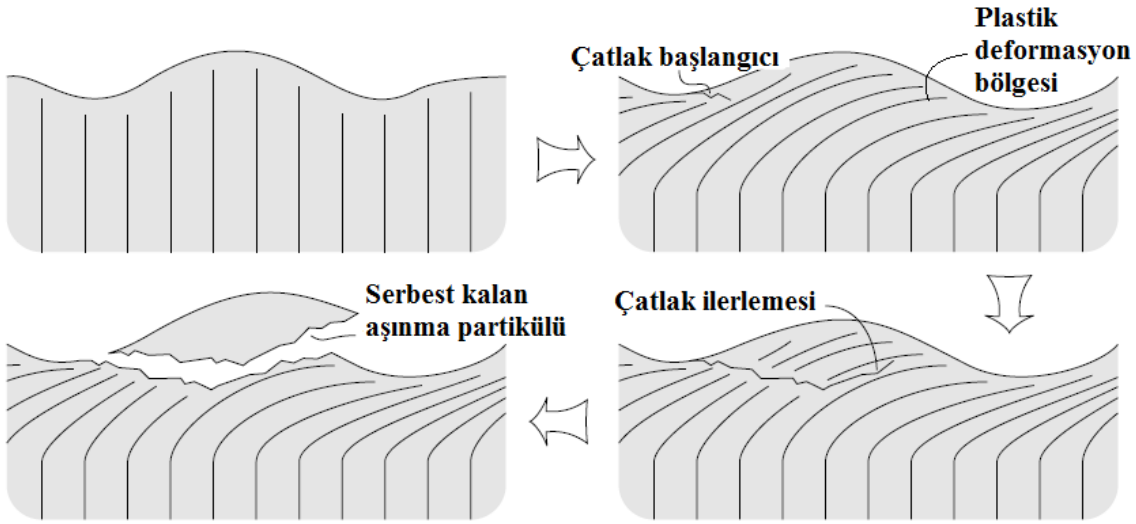


Şekil 3. 3 Yüksek temas basıncının oluşturduğu bölgesel plastik beformasyon nedeniyle oluşan adhezif aşınma a)Kaynamış pürüz, b) aşınma birikintileri [11]

3.2.3 Yorulma Aşınması

Pürüzler arasındaki temas; kayma ve yuvarlanma sırasında çok defa tekrarlanan, yüksek bölgesel gerilme ile yorulma çatlakları aşınma partiküllerini oluşturur ve yorulma aşınması olarak adlandırılır [16]. Diğer bir deyişle bir yüzey üzerinde tekrarlanan gerilmeler sonucunda yüzey altı çatlaklarının oluşumu ve ilerlemesi ile

yüzeyden parçaların uzaklaşması olarak adlandırılır [17]. Yorulma aşınması; çatlağın başlaması, çatlağın büyümesi ve kırılma ile meydana gelir. Aşınmış yüzey aşınmamış yüzeye kıyasla çok yüksek düzeyde plastik gerilme içerir [16]. Çatlak başlangıcı aşaması yüzeyin durumuna bağlıdır [17]. Çatlak başlangıcı zayıf yüzeylerde oluşmaya başlar, dislokasyonlar veya kayma düzlemleri gibi zayıf düzlemler boyunca aşağıya doğru ilerler. Oluşan birincil çatlak kendisi ilerleyebildiği gibi yüzey altındaki ikinci bir çatlak ile de birleşerek büyüyebilir. Büyüyen çatlak tekrar yüzeye eriştiği zaman aşınma partikülü serbest kalır ve aşınma gerçekleşmiş olur [16]. Geliştirilmiş tokluk ve yüksek sertlik yorulma aşınmasına uygulanan en yaygın metalurjik çözümlerdir [17].



Şekil 3. 4 Yorulma aşınmasının şematik gösterimi [16]

BÖLÜM 4

LİTERATÜR TARAMASI

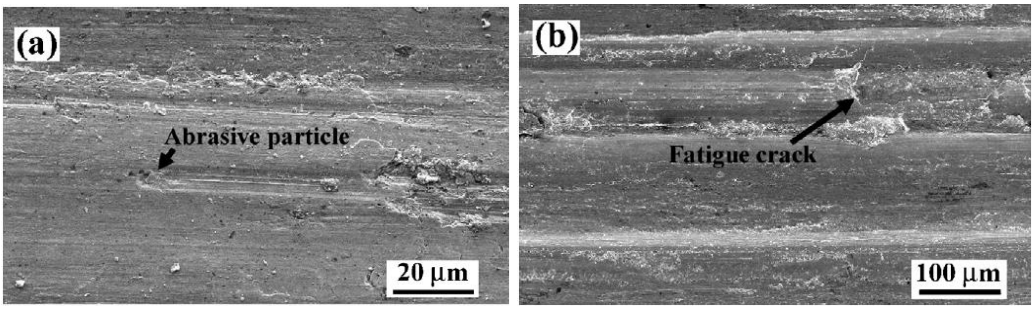
Kuru kayma şartlarında, malzemelerin yüksek aşınma direncine sahip olması istikrarlı ve kararlı bir aşınma tabakası (tribolayer) ve ince, her açıdan eşit boyutlu aşınma birikintileri (debris) ile yakından ilişkilidir. Adhesiv aşınma için kayma hızı, aşınan yüzeyin sertliği, takviyenin kırılma tokluğu ve morfolojisi aşınma sisteminde önemli parametrelerdir [12].

Alüminyum matrisli metal matrisli kompozitlerin sürtünme ve aşınma davranışı takviye partikülünün cinsine, partikül boyutuna ve oranına bağlıdır. Eğer takviye partikülünün oranı MMK içerisinde düşük ise kompozitin sürtünme katsayısı yüksektir. Eğer takviye partikül matris ile iyi bağlanırsa seramik partikülün hacim oranının artması ile kompozitin aşınma direnci artar [18].

İpek yaptığı çalışmasında; aşınmanın 3 evrede gerçekleştiğini belirtmiş ve bunları ilk, hafif ve ağır evreler olarak adlandırmıştır. Aşınmanın ilk evresinde, malzeme yüzeyinde bulunan ince atmosferik tabakanın katı yağlayıcı olarak rol oynadığını, ikinci aşama olan hafif aşamada bu ince tabakanın katı yağlayıcı olarak rol almadığını ve bu aşamada partikül oranı, matris ve karşı yüzey tarafından aşınmanın kontrol edildiğini saptamıştır. Bu ikinci aşama sırasında B_4C partiküllerinin aşınma direncini arttırdığının açıkça görüldüğünü rapor etmiştir. Al/B_4C kompozitlerinin aşınma oranı metal matrisli kompozitlerdeki B_4C miktarı arttıkça azaldığı, % 10 B_4C içeren kompozitin aşınma direncinin %15 B_4C içeren kompozit malzemeden belirgin olarak az olduğu ancak % 15 B_4C içeren kompozit malzeme ile %20 B_4C içeren kompozit malzeme arasında belirgin bir fark olmadığını saptamıştır. Kompozitin aşınma yüzeyini incelediğinde adhezif ve abrazif aşınmanın yanı sıra, yivler, bölgesel plastik deformasyonlar ve yırtılmalar

saptamıştır. Ancak kompozit yüzeyinde mikro çatlakların olduğuna dair herhangi bir kanıt bulamamıştır. Ayrıca test şartları altında sürtünme kuvvetinin partikülleri yerinden çıkarmadığı ve sıyrılma problemine sebep olmadığını saptamıştır. Bundan dolayı aşınma kaybının çok fazla olmamasına rağmen yüzey pürüzlülüğü artmıştır. Aşınma mekanizması B_4C içeriğinin artması ile adhezif- abrazif rejimden hafif adhezif rejime geçtiğini belirtmiştir [18].

Tang vd.; Al-5083 matris ve ağırlıkça %5 ile %10 B_4C takviye malzemesi kullanarak ürettiği kompozit malzemelere, 0,6-1,25 m/s hız aralığında ve 3,98-6,37 MPa temas basıncında kuru kayma şartlarında disk üzerinde pim aşınma testleri uygulamıştır. Kompozit numune pim olarak hazırlanmış, karşı malzeme olarak da AISI 1045 çeliğinden hazırlanmış disk kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, aşınma genel olarak iki aşamada meydana gelmiştir. Birinci aşama ilk baştan 500 veya 1000 m'ya kadar devam etmiştir. Bu bölümde %5 takviyeli bütün numunelerde ve %10 takviyeli bazı numunelerde düşük aşınma oranı ve sürtünme katsayısı bulunmuştur. Birinci aşamadan ikinci aşamaya geçişte aşınma oranında ve sürtünme katsayısında belirgin bir artış gözlenmiş ancak ikinci aşama devam ederken aşınma oranında ve sürtünme katsayısında belirgin değişiklikler olmamıştır. Ağırlıkça %10 takviyeli kompozit malzemenin başlangıçtaki sürtünme katsayısı %5 takviyeli kompozit malzemeninkinden daha yüksek olduğu bulunmuştur. Her iki takviye oranında da aşınma testleri sonunda yüzeyleri incelendiğinde benzer özelliklere rastlanmış ve abrazif aşınma, yorulma aşınması ile adhezif aşınma saptanmıştır. Şekil 4.1'de verilmiş olan mikroyapı görüntülerinden abrazif aşınma ve yorulma aşınması rahatlıkla görülmektedir. Ağırlıkça %10 takviyeli, 65 N–0,8 m/s şartları altında 3000 m aşınma testi uygulanan numunenin kesit görüntüsü incelendiğinde yüzeyden yaklaşık 40 µm kalınlığında plastik deformasyona uğramış bölge saptanmıştır. Bu bölgenin elementel haritası incelendiğinde, demir ve oksijence zengin bölge görülmektedir. Bu durum çelik disk yüzeyinden malzeme transferi olduğunu göstermektedir. Bu duruma bakılarak adhezif aşınmanın gerçekleştiği rahatlıkla söylenebilir [5].



Şekil 4. 1 a) Ağırlıkça %10 takviyeli 65 N–0.6 m/s şartları altında aşınma testi yapılan numunenin aşınma yüzeyi görüntüsü b) Ağırlıkça %5 takviyeli 80 N–0.8 m/s şartları altında aşınma testi yapılan numunenin aşınma yüzeyi görüntüsü [5]

İlk aşamada nispeten düşük sürtünme katsayısı ile aşınmanın ilk olarak B_4C ile çelik disk yüzeyi arasında olduğu tahmin edilmektedir. B_4C ile çelik yüzey arasındaki sürtünme katsayısı 0,29'dur. İkinci aşamaya geçildiğinde, yüzeye demir yapışması söz konusu olmakta ve buna bağlı olarak da sürtünme iki metalik yüzey arasında meydana gelmektedir. Bu durumda sürtünme katsayısının artışına sebep olmaktadır. Aşınan numunelerden alınan kesitlerin elementel haritalarında demire rastlanması bu durumu doğrular niteliktedir [5].

Adhezif, abrazif ve yorulma aşınmasının bir arada gerçekleştiğini belirtmiştir. Aşınma oranının ilk 500 m'de az olmasının sebebi sürtünme katsayısının az olmasından kaynaklandığını belirtmiştir. İkinci aşamada elementel harita aşınma yüzeyinde yetersiz bor tabakasını ve demirce zengin bölgeyi göstermiştir. Bundan dolayı da aşınma iki metal yüzeyi arasında gerçekleştiğini belirtmiştir. Sürtünme katsayısının artışını da buna bağlamıştır. Yine bu ikinci aşamada sert B_4C partikülleri yerinden çıkmış ve B_4C partikülleri içeren aşınma ürünleri oluşmuştur. Bu da yorulma çatlaklarına sebep olduğunu belirtmiştir. 3000m'deki ortalama uzunluk kaybı ve sürtünme katsayısı yukarıdaki şekilde kayma mesafesi ve yükün fonksiyonu olarak verilmiştir. Artan kayma hızı ve yük ile ortalama uzunluk kaybı artmış ve sürtünme katsayısı azalmıştır. Aşınmanın birinci aşamasından ikinci aşamasına geçilirken aşınma mekanizması da abrazif aşınmadan adhezif aşınmaya geçtiğini belirtmiştir [5].

Sert partiküller kompozitin yüzeyini ve matrisi sert temaslara karşı çıkıntılar ile korur ve sonuçta az aşınma ve düşük sürtünme katsayısı meydana gelir. Benzer tribo koşullar altında uygulanan yük, kritik bir değerin üzerine çıkarsa kompozitin aşınma oranının

alaşımın aşınma oranına eşit veya daha fazla olduğu belirtilmiştir. Partiküllerin kırılması, parçalanması ve uzaklaşması bu duruma sebep olmaktadır. Buna da bir çeşit aşınma delaminasyonu yol açmaktadır. Sert ve dayanıklı seramik takviyeli kompozitin sakıncası bu fazların abrazif partikül olarak yüzeyler arasında rol almasıdır. Dahası takviye partiküllerin aşınma birikintisi olarak yuvarlanması ile üç boyutlu abrazyon meydana gelir ve temas eden yüzeylerin daha fazla aşınmasına sebep olur. Ancak bu durum kayma hızı, uygulanan yük ve sürtünme ısısına bağlıdır. Metallerin ve alaşımların aşınması sırasında numune yüzeyinde mekanik olarak karışmış tabaka oluşur ve bu tabaka malzemenin aşınma davranışını belirler. Bu tabakalar; uygulanan yük ve yüksek sürtünme ısısı altında karşı yüzeye malzeme transferi, aşınma birikintilerinin oluşumu, temas yüzeyleri üzerinde bu malzemelerin karışması ve sıkışması nedeniyle oluşur [19].

Diğer taraftan araştırmacılar alüminyum matrisli kompozitlerdeki sürtünme katsayısının alaşıma göre daha yüksek olduğunu belirtmiştir. Bunun sebebi olarak da karşı yüzey üzerine sert dispersoidlerin daha derin penetrasyonu ve dispersoidin kırılması ve parçalanması ile temas yüzeylerine hapsolmasının olabileceğini belirtmiştir [19].

Uygulanan basıncın artması ile karşı yüzeyin sert pürüzlerinin yumuşak yüzeye nüfuzu artar ve de yumuşak yüzeyin pürüzleri deformasyona uğrar ve kırılır. Bu da uygulanan yük ile aşınma oranının arttığını gösterir. Uygulanan basıncın artması ile yüzeyde ve yüzey altında deformasyon ve mikro çatlaklar artar. Ayrıca uygulanan basıncın artması ile mekanik olarak karışmış tabaka deforme olur [19].

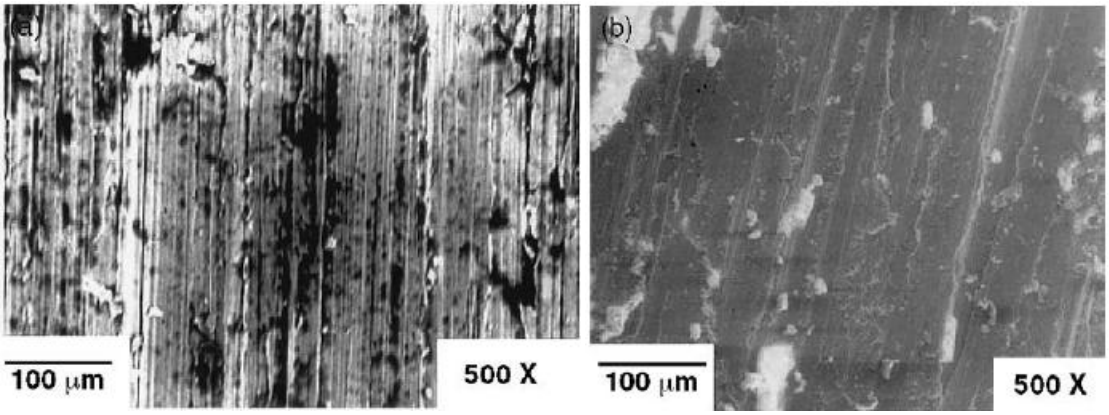
Rao vd. en yüksek sıvanma basıncı değerini ağırlıkça 25 % SiC takviyeli, 7010 matrisli kompozit malzeme için 2,6 MPa olarak bulmuştur [20].

Genellikle, numunenin sıvanmasından önce, uygulanan yükün artması ile aşınma katsayısı düşer. Bunun sebebi yüzeyin daha kararlı, düzgün ve sert mekanik karışmış tabaka ile kaplanmasıdır. Bu durum daha az aşınma partikülünün oluşmasına sebep olur. Uygulanan yükün artması ile sıcaklık artar, bu da malzemeyi daha plastik hale getirir. Bundan dolayı daha az aşınma partikülü oluşur. Kayma sırasında yeniden oluşan partiküller sıkışırlar. Sıvanma sırasında mekanik olarak karışmış tabaka kararsız hale gelir ve aşınma ile ortaya çıkan malzeme karşı yüzeye maruz kalır. Yüksek sıcaklıktan

dolayı yeni maruz kalan malzemede bölgesel ergimeler oluşur ve karşı yüzeye yapışır. Bunun sonucunda daha fazla aşınma partikülü oluşur veya daha yumuşak alüminyum alaşımı matris karşı yüzeye transfer olur [20].

Joel Hemanth, karıştırmalı döküm yöntemi ile ürettiği, kriyojenik şartlar altında katılaştırdığı Al-12%Si alaşımını matris olarak kullandığı, hacimce %3-12 arasında B_4C takviyeli kompozit malzemelerin kuru kayma şartları altında, sertleştirilmiş AISI 4140 çelik diski karşı malzeme olarak kullanarak disk üzerinde pim aşınma testi ile tribolojik özelliklerini araştırmıştır. Aşınma testlerinde 10, 20, 30 N yük ve 0,3-1,8 m/s arasında 6 farklı kayma hızı uygulamıştır. Katılaşma esnasındaki kriyojenik etkinin matris ve partiküller arasında kuvvetli bağlara sebep olduğunu ve partikül ile matris arasındaki ıslatılabilirliği de iyileştirdiğini saptamıştır. En düşük ağırlık olan 10 N yük uygulayarak yaptığı testte, kompozit malzemelerde yüksek sürtünme katsayısı ile hafif aşınma rejimi tespit etmiştir. Yüksek hacim oranlı metal matrisli kompozitler (hacimce 9 % B_4C) kararlı hal hafif aşınma sergilemiştir ve testlerin hiçbir aşamasında ağır aşınma gözlenmemiştir. Ağır aşınma rejiminde metal matrisli kompozitlerin aşınma oranları artan hacim oranı ile azalmaktadır. Düşük aşınma oranına (hafif aşınma rejimi) geçiş artan hacim oranı ile hızlanmaktadır. En düşük yükü ve hızı uyguladığında (10 N – 0,3 m/s) takviyesiz alaşımda hafif aşınma rejiminde çok yüksek sürtünme katsayısına (1,0) rastlamıştır. Kayma hızı arttıkça sürtünme katsayısında azalma gözlemlemiştir. Bütün kompozit numunelerde 10 N yük altında 0,8 olan sürtünme katsayısı kayma hızının artması ile 0,45 değerine düşmüştür [21].

%3 ve %6 hacimce partikül içeren numunelerde hafif aşınma rejimindeki aşınan yüzeylerin SEM görüntüleri incelendiğinde tamamen düz ve pürüzsüz olduğu görülmüş ve kayma yönü doğrultusunda aşınma oluklarına rastlanmıştır (şekil 4.2). Ayrıca bu numunelerde yüzey altında plastik akma gözlenmemiştir. Hacimce 9 % partikül takviyeli metal matrisli kompozitin yüzeyinin pürüzlü olduğunu ve gevrek kırılmaların meydana geldiğini saptamıştır [21].



Şekil 4. 2 Hafif aşınma rejimindeki numunelerin aşınan yüzeylerinin SEM görüntüleri (a) B_4C-3 hacim%; (b) B_4C-6 hacim% [21]

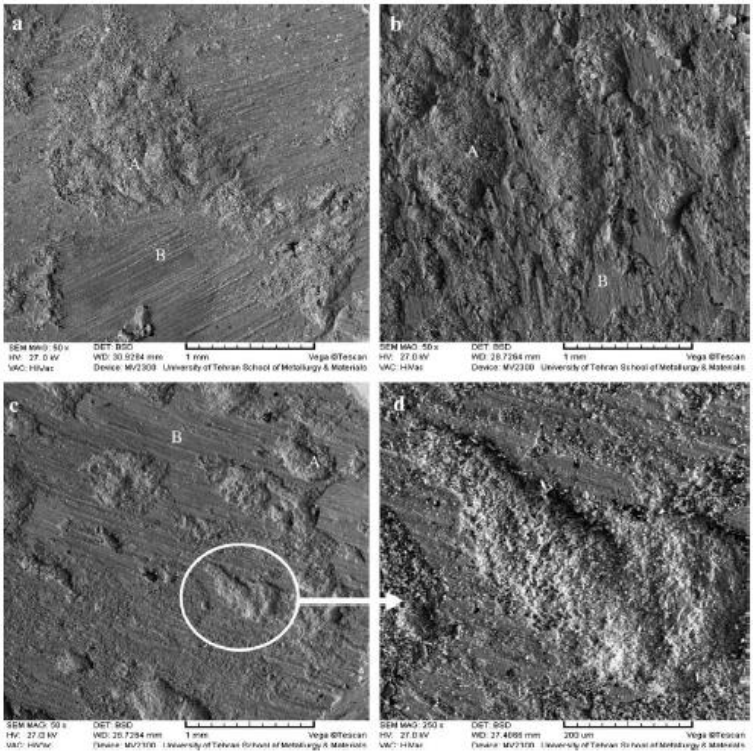
Bu çalışmada aşınma mekanizması iki biçimde öne sürülmektedir. Birinci biçimde adhezif aşınma düşük partikül içeriği ile metal matrisli kompozitte ve takviyesiz malzemede görülmektedir. Metal matrisli kompozitteki partikül içeriği arttıkça bu aşınma tarzı kaybolmaktadır. Diğer taraftan ikinci biçim olan abrazif aşınma gömülmüş sert partiküllerin aşınma yüzeyinde ortaya çıkması ve iki yüzey arasında parça kopması ile yüksek hacim içerikli metal matrisli kompozitlerde rastlandığını belirtmiştir [21].

İki cisimli aşınmada, testler süresince uygulanan yükün büyük bir kısmı numuneye aktarılır ve malzemenin aşınması yüksek basınç altında gerçekleşir. Bu durum, dispersoid ilaveli şiddetli aşınmadan hafif aşınmaya geçiş yükündeki artış vasıtasıyla belirlenmiş deney sonuçları ile desteklenmektedir. Bu açıklamalar, hafif aşınmadan şiddetli aşınmaya geçişte yükteki artışı gösteren daha önceki raporları ile uyumludur [21].

Kompozitteki sert partiküller matris üzerinde tümsek gibi davranır ve yükün büyük bir kısmını taşıyarak aşınmaya karşı matrisi korur. Matris alaşımı içerisindeki B_4C partiküllerinin takviyesi aşınma oranının azalmasına sebep olur. Aşınma oranı uygulanan yük, mikroyapı ve malzemenin sertliğine bağlıdır. Uygulanan yükün artması ile daha fazla malzeme yüzeyden uzaklaşır ve aşınma oranı artar [21].

Lashgari vd. yaptığı çalışmada tane küçültücü olarak % 0,5 stronsiyum ilave ettiği A 356 alüminyum alaşımını matris olarak kullandığı ve karşı malzeme olarak DIN 100Cr6 çelik disk kullandığı araştırmalarında disk üzerinde pim aşınma testlerini 0,5 m/s hızda 20, 40, 60 N yükler altında gerçekleştirerek aşınma mekanizmasını incelemiştir. 20 N yük

uygulandığında aşınma yüzeyinde iki farklı bölge bulmuştur. Bu bölgeler boşluklar veya kraterler ve pürüzsüz yüzeylerdir. Şekil 4.3'de A ile gösterilen bölgeler boşluklar ve kraterlerin olduğu bölgeler, B ile gösterilen bölgeler pürüzsüz yüzeyleri göstermektedir. Pürüzsüz bölgelerde yüzeyde ince oluklar gözlenmektedir. Bu durumda bu bölgelerde abrazif aşınma olduğunu akla getirmektedir. Kayma sırasında mikro kaynakların oluşumu ve kırılmasına bağlı olarak krater veya boşluk şeklinde adhezif aşınma gözlendiğini belirtmiştir. Alüminyum matrisin kırılması, B_4C partikülleri, ötektik silisyum, Sr-intermetalik bileşiği gibi küresel partiküllerin yanı sıra çelik karşı yüzeyden demir ve Cr transferi gözlenmektedir [22].



Şekil 4. 3 Aşınma çeşitlerinin miroyapısı [22]

Toptan vd. son yıllarda alüminyum matrisli kompozitlerin otomotiv endüstrisinde hafiflik, yüksek mukavemet ve aşınma davranışları konularının araştırıldığından ve fren diskleri için potansiyel malzeme olduklarından bahsetmiştir [23]. Bu uygulama için Al matris ile birlikte B_4C partikülerinin kullanılabileceğini ancak B_4C ile sıvı alüminyum metali arasında ıslatma problemi olduğunu belirtmiştir [23]. Al-B_4C kompozitlerinin üretiminde yüksek takviye oranı ve 1100°C altında sıvı alüminyum metali, takviye malzemesi B_4C'nin yüzeyi ile etkili bağlanmayı sağlayamamakta ve kompozitten beklenen mekanik özellikleri sağlayacak şekilde ıslatamadığını belirtmektedir [23].

Döküm yöntemlerinin kompozit malzemelerin üretiminde nispeten ekonomik olduğunu söylerken buna ilaveten takviye malzemesi ile matris malzemesinin yüksek sıcaklıklarda uzun süre teması sonucu takviye malzemesi ile matris malzemesi arasında reaksiyon oluşmakta ve bu durum sonucunda arayüzeyde istenmeyen fazlar meydana geldiğini, bununla birlikte matrisin takviyeyi yeterince ıslatabilmesi için partiküllere ısıl işlem uygulanması veya kaplanması gerektiğini belirtmiştir [14]. Metal matrisli kompozitlerin üretiminde; özellikle sıvı durum proseslerinde, matris ile takviye arasındaki kimyasal uyumun büyük önem taşıdığını söylemiştir [24]. K_2TiF_6 flaksı kullanılarak takviye matris arayüzeyinde etkin bir bağlanma olduğunu ifade etmiştir. 1-7 μm, < 10 μm ve 22-59 μm B_4C partikül boyutuna sahip takviye malzemeler ile çalışmıştır. Aşınma yüzeyleri incelendiğinde 22-59 μm ortalama B_4C tane boyutlarına sahip numunelerde aşınma direncinin daha yüksek olduğunu tespit etmiştir [24]. Partikül ilave verimini arttırmak ve matris içerisinde homojen bir dağılım sağlamak amacı ile indüktif karıştırma, mekanik karıştırma, dönen tablet ve vorteks yöntemleri ile üretim yapılmıştır. Bu üretim yöntemleri sonucunda vorteks ile üretilen numunelerin nispeten daha homojen olduğu ve sertlik değerlerinin daha yüksek olduğu saptanmıştır [25]. Matris takviye arayüzeyindeki ıslatma probleminin çözülmesi için K_2TiF_6 flaksı kullanılarak arayüzeyde titanyum ihtiva eden bir bölge oluşturulmuş ancak Ti/B_4C oranı ağırlıkça 1/5'tir ve kullanılan partikül boyutuna bağlı olarak arayüzeyde Ti ihtiva eden tabakadan arta kalan fazla titanyum matris içerisinde Al-Ti bileşikleri halinde yer yer çökeldiği tespit edilmiştir [24]. Büyük partikül boyutlu B_4C (>20μm) ilavesi ile üretilen kompozitlerin, küçük partikül boyutlarına sahip kompozitlere göre yapıda daha homojen dağıldığı tespit etmiştir [26]. 0,129m^2/g spesifik yüzey alanına ve 52 μm ortalama partikül boyutuna sahip B_4C partiküllerinden ziyade; 0,253 m^2/g spesifik yüzey alanına ve 32 μm ortalama partikül boyutuna sahip B_4C partikülleri ile artan yüzey alanına bağlı olarak arayüzey reaksiyon tabakası aynı şekilde oluşmaya devam ederken matriste bulunan Al_3Ti fazının azaldığı tespit edilmiştir. 32 μm partikül boyutuna sahip B_4C partikülleri ile Ti/ B_4C oranı 0,1 ile yapılan dökümlerde arayüzey reaksiyon tabakası oluşurken Al_3Ti fazının çok az miktarda oluştuğu tespit edilmiştir [3,27]. Gevrek Al_3Ti fazını tamamen matristen yok etmek için Ti/ B_4C oranı 0,07 olan numuneler üretilmiş, üretilen numunelerde Al_3Ti fazını saptamamış ancak arayüzey

reaksiyon tabakasının B_4C partiküllerinin etrafını tamamen sarmadığını saptamıştır [3,27]. AA1070 ve AA6063 alüminyum alaşımları Ti/ B_4C oranı 0,1 olacak şekilde K_2TiF_6 flaksı kullanarak 850°C'da üretilmiş, 500rpm'de karıştırarak üretilen kompozitlere %10 B_4C+K_2TiF_6 flaks karışımı ilave edilmiştir. Yalnız AA6063 matrisliler 510°C'de 24 saat çözeltiye alınmış ve suda soğutulmuş, ardından 180°C'de 4 saat yaşlandırılmıştır. Isıl işlem uygulanmış ve uygulanmamış numunelerde reaksiyon sonrasında herhangi bir fark saptanmamıştır [28]. Ağırlıkça %10, %15, %20 oranlarında B_4C içeren AlSi9Mg alaşımı kullanılarak hem K_2TiF_6 flaksı kullanılarak, hem de kullanılmayarak 850±5°C'de 500 devir/dakikada vorteks oluşturularak takviye ilave edilerek kompozitler üretilmiştir. K_2TiF_6 flaksı kullanılarak üretilen kompozitlerde Ti/ B_4C oranı 0,1 olarak numuneler hazırlanmıştır. Döküm sonrasında 100MPa basınç altnda numunelerin katılaşması sağlanmıştır. Çizelge 4.1 ve çizelge 4.2'den de anlaşılacağı gibi K_2TiF_6 flaksı kullanıldığında kompozit malzemeler yüksek hacim oranında üretilebilmiş, yüksek partikül ilave verimi ve düşük porozite değerlerine ulaşılmıştır [4].

Çizelge 4. 1 Hacim oranı ve partikül ilave verimi değerleri [4]

Numune	**Nominal Hacim Oranı (%)**	**Gerçek Hacim Oranı (%)**	**Standart Sapma**	**Partikül İlave Verimi (%)**
AlSi9Mg-%10 B_4C	10,53	7,17	6,71	68,07
AlSi9Mg-%15 B_4C	15,75	9,47	7,74	60,10
AlSi9Mg-%20 B_4C	20,94	12,07	5,69	57,64
AlSi9Mg-%10 B_4C+K_2TiF_6	10,89	11	3,73	100,97
AlSi9Mg-%15 B_4C+K_2TiF_6	16,26	13,54	5,23	83,27
AlSi9Mg-%20 B_4C+K_2TiF_6	21,57	18,10	8,96	83,92

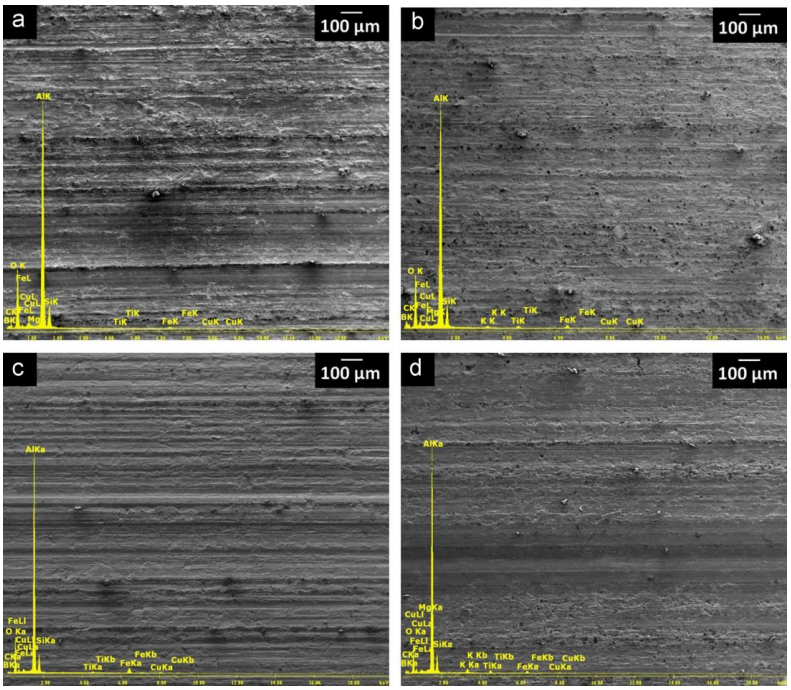
Çizelge 4. 2 Yoğunluk ve porozite değerleri [4]

Numune	Teorik Yoğunluk (g/cm^3)	Deneysel Yoğunluk (g/cm^3)	Porozite (%)
AlSi9Mg-%10 B_4C	2,6589	2,6237	1,32
AlSi9Mg-%15 B_4C	2,6565	2,6111	1,65
AlSi9Mg-%20 B_4C	2,6520	2,5752	2,83
AlSi9Mg-%10 B_4C+K_2TiF_6	2,6976	2,6614	1,34
AlSi9Mg-%15 B_4C+K_2TiF_6	2,6966	2,6589	1,40
AlSi9Mg-%20 B_4C+K_2TiF_6	2,69533	2,6734	0,982

Ortalama 32 μm partikül boyutuna sahip B_4C ile takviye edilen AlSi9Mg alaşımının matris olarak kullanıldığı çalışmada K_2TiF_6 flaksı kullanılarak B_4C tozlarının ıslatılabilirliği iyileştirilmeye çalışılmıştır. %10, 15 ve 20 (ağ.) B_4C partilülleri ile takviye edilen alüminyum matrisli kompozit BN kaplı grafit pota ile indüksiyon ocağında üretilmiştir. Ti/B_4C oranı 0,1 olan flaks takviye karışımı 850°C'da 1000 rpm ile karıştırılarak ilave edilmiştir ve 100 MPa basınç altında katılaştırılmıştır. Bu çalışmada arayüzeyde TiC ve TiB_2 oluşumunun ıslatma kabiliyetini iyileştirdiği, artan takviye hacim oranı ile kompozitin aşınma direncinin ve sertliğinin arttığı ve aşınma mekanizmasının adhezif, abrazif ve yorulma aşınmasının bir kombinasyonu olduğunu rapor etmiştir [29].

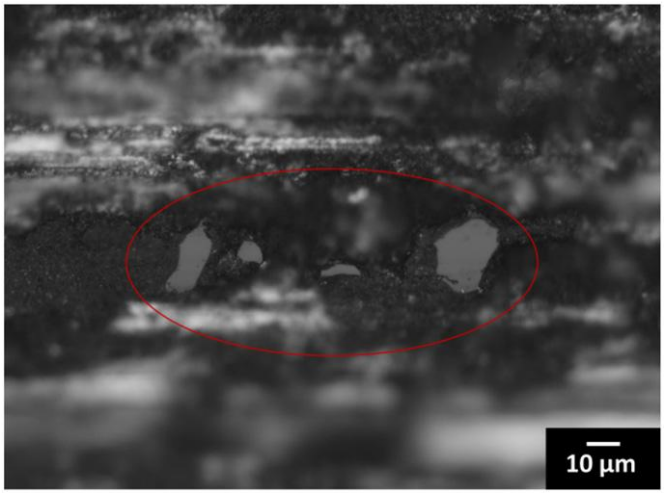
Yaptığı diğer bir çalışmada AlSi9Cu3Mg alaşımı ve ortalama 32 μm partikül boyutuna sahip takviye kullanarak kompozit malzemeler üretmiştir. Hacimce %15 ve 19 B_4C takviyesine sahip kompozitlerde ıslatılabilirliği arttırmak ve reaksiyon bariyeri oluşturmak için K_2TiF_6 flaksını kullanmıştır. BN kaplı grafit pota ile 2,5 mbar vakum atmosferinde indüksiyon fırınında döküm yapılmış ve 104 MPa basınç altında katılaştırılmıştır. Ti/B_4C oranı 0,1 olarak seçilmiştir. 850°C'da 1000rpm vorteks ile karıştırılırken takviye ilave edilmiştir. Üretilen kompozitlere AISI 4140 çelik pim

kullanılarak ileri-geri hareketli (reciprocating) aşınma testleri uygulamıştır. Bu çalışmanın sonucunda aşınma hızlarının artan hacim oranı, yük ve kayma mesafesi ile arttığı; artan kayma hızı ile azaldığı belirlemiştir. Diğer taraftan sürtünme katsayının artan hacim oranı ve kayma mesafesi ile arttığı, artan kayma hızı ve yük ile azaldığı belirlemiştir. Aşınma mekanizmasının adhezif, abrazif ve tabakalı aşınmanın bir kombinasyonu olduğunu belirtmiştir. Şekil 4.4 'de Kayma doğrultusu boyunca paralel kayma izleri ve karşı malzemeden demir transferini gösteren EDS analizlerini görteren görüntü yer almaktadır [6,15].

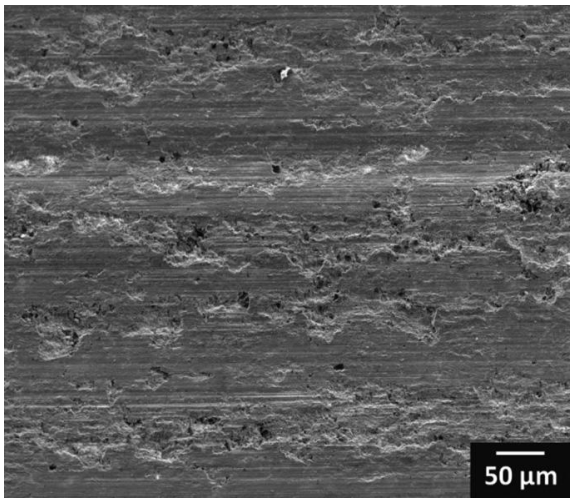


Şekil 4. 4 Kayma doğrultusu boyunca paralel kayma izleri ve karşı malzemeden demir transferini gösteren EDS analizleri [6,15]

Şekil 4.5'de sadece hafif koşullarda yapılan aşınma testlerinde hacimce %15 takviyeli kompozit yüzeyinde B_4C çıkıntılarının optik mikroskop görüntüleri, ağır koşullarda aşındırılmış hacimce %19 B_4C takviyeli kompozitin ikincil elektron SEM görüntüsünde görülen kraterler, kayma sırasında oluşan mikro kaynaklar ile malzemenin kırılmasını ve böylelikle meydana gelen bölgesel adhezif aşınma görüntülerini göstermektedir. Şekil 4.6'da; ağır koşullarda aşındırılmış %19 B_4C takviyeli kompozit malzemenin aşınma yüzeyi görülmektedir. Bu aşınma yüzeyinde kayma sırasında meydana gelen mikrokaynakların kırılması ile oluşan bölgesel adhezif aşınmayı işaret eden kraterler ve boşluklar rapor edilmiştir [6,15].

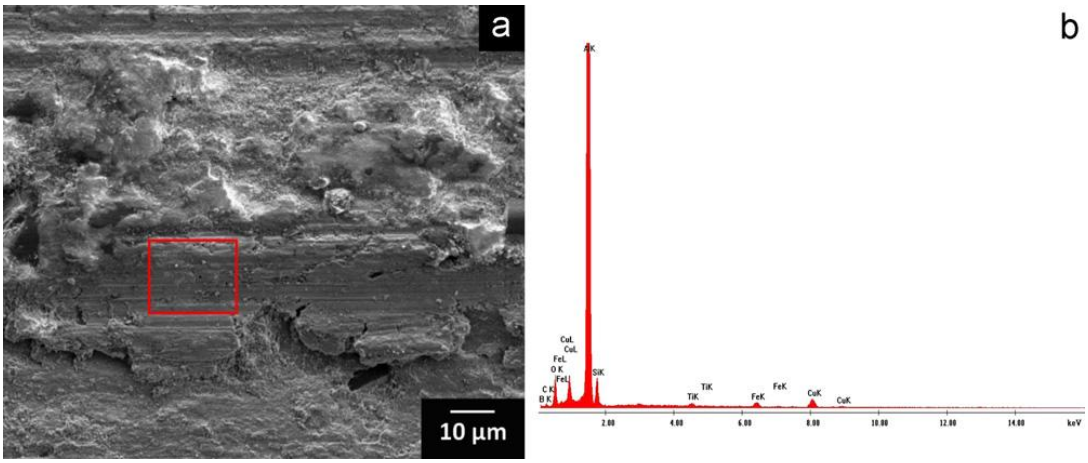


Şekil 4. 5 Hafif koşullarda aşınmış hacimce %15 B_4C takviyeli kompozit yüzeyinde B_4C çıkıntılarının optik mikroskop görüntüleri [6,15]

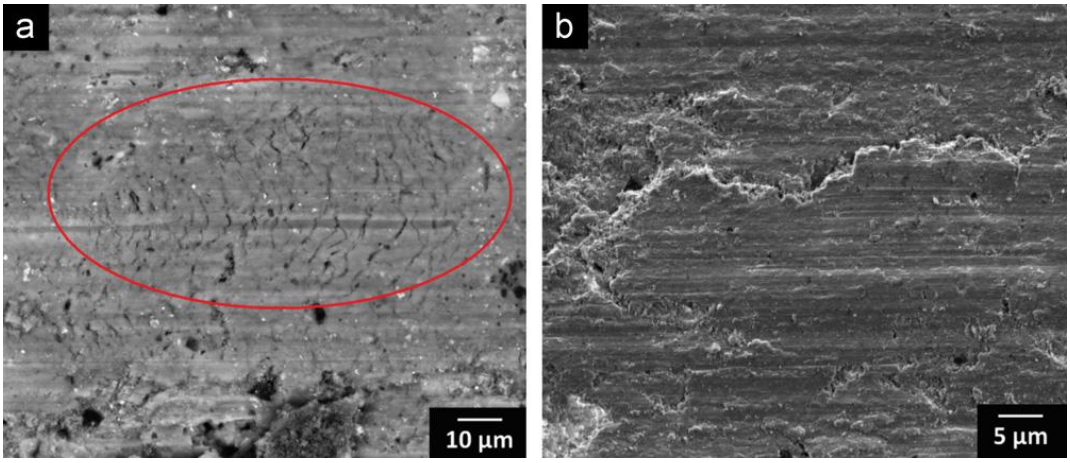


Şekil 4. 6 Ağır koşullarda aşındırılmış hacimce %19 B_4C takviyeli kompozitin ikincil elektron SEM görüntüsünde görülen kraterler [6,15]

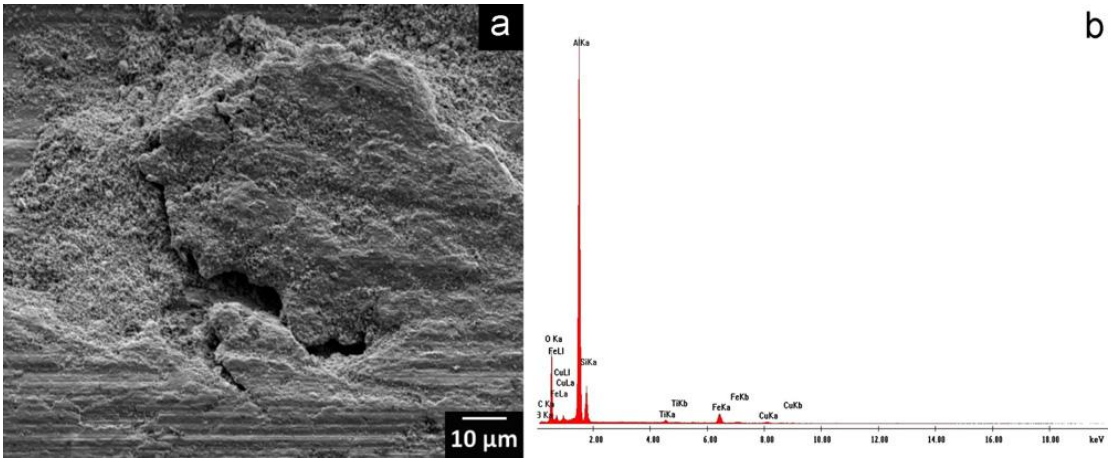
Şekil 4.7a'da yüzeyden kopmak üzere olan geniş pulsu parçaya ait SEM görüntüsü verilmiştir. Şekilde işaretli alandan alınan EDS analizi (Şekil 4.7 b) göstermektedir ki pulsu parça alüminyumun yanı sıra karşı malzemeden transfer olan Fe ve oksitleri de içermektedir. Şekil 4.8a, aşınma yüzeylerindeki plastik deformasyon izlerinin olduğu, Şekil 4.8b'de ise aşınma yüzeylerindeki çatlakların görüldüğü rapor edilmiştir. Şekil 4.9'da, aşınma yüzeyinde gevşek halde bulunan aşınma kırıntılarının SEM görüntüsü ve EDS analizi verilmiştir. EDS analizlerinde aşınma yüzeyinde gevşek halde bulunan aşınma kırıntılarının Al ve Fe yanında oksitleri de içerdiği belirtilmiştir. Gevşek aşınma kırıntılarının, aşınma tabakası ile aynı yapı ve kompozisyonda olduğunu rapor edilmiştir [6,15].



Şekil 4. 7 Hafif koşullarda aşındırılan %15 B_4C takviyeli numuneden alınan a) SE SEM görüntüsü ve b) SEM görüntüsünde pulsu parçacığın üzerinde kare ile belirtilen alandan alınan EDS analizi spektrumu [6,15]



Şekil 4. 8 a) Hafif koşullarda aşındırılan %15 B_4C takviyeli numuneden alınan BSE SEM görüntüsünde plastik deformasyon izleri ve b) ağır koşullarda aşındırılan %19 B_4C takviyeli numuneden alınan BSE SEM görüntüsünde çatlaklar [6,15]



Şekil 4. 9 a) AlSi9Cu3Mg-%15B_4C numunede aşınma yüzeyinde gevşek halde bulunan aşınma kırıntılarından alınan SE SEM görüntüsü ve b) bu görüntüden alınan EDS analizi spektrumu [6,15]

BÖLÜM 5

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan malzemler hakkında bilgi verilmiş, üretim yöntemi açıklanmış ve kompozit malzemenin karakterizasyonu ve aşınma testleri sırasında izlenilen yöntem ve kullanılan cihazlar tanıtılmıştır.

5.1 **Malzemeler**

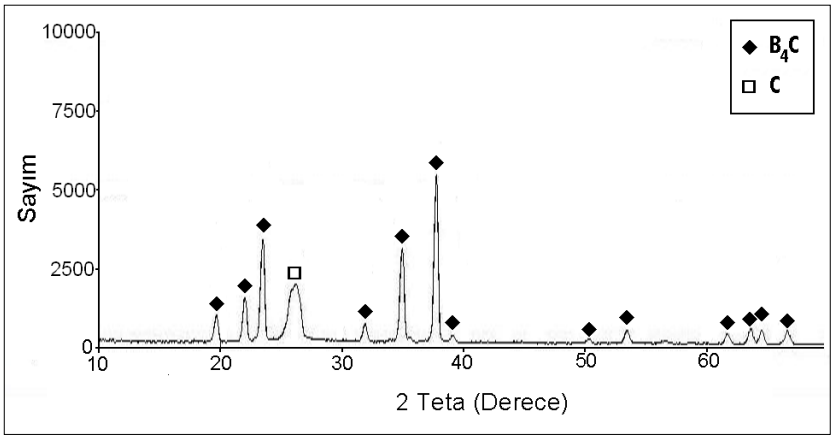
Kompozit malzemelerin üretiminde matris malzemesi olarak AlSi9Cu3Mg(Fe) alaşımı kullanılmıştır. Alaşımın kimyasal bileşimi Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5. 1 Matris alaşımının kimyasal bileşimi

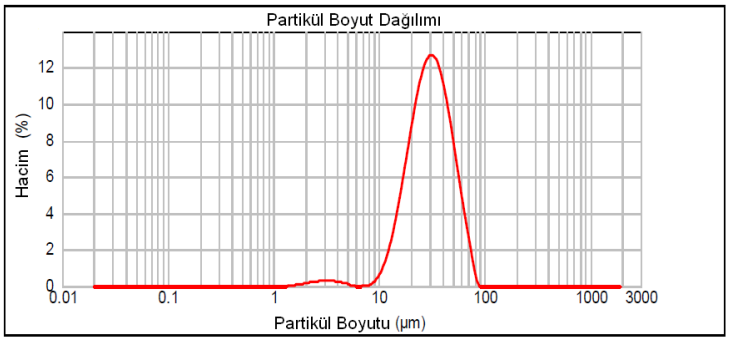
Alaşım	Al	Si	Fe	Mn	Cr	Ni	Cu	Mg	Pb	Sn	Ti	Zn
AlSi9Cu3Mg	82,8	10,14	1,29	0,432	0,021	0, 032	2,99	1,49	0,372	0,008	0,084	0,616

Kompozit malzemelerin üretiminde takviye malzemesi olarak ortalama tane boyutu 32 µm olan B_4C partikülleri kullanılmıştır. Kullanılan B_4C partiküllerinin spesifik yüzey alanı 0,253m^2/g'dır. Kompozit üretiminde kullanılan B_4C partiküllerinin XRD spektrumları Şekil 5.1'de ve de partikül boyut dağılımları Şekil 5.2'de verilmiştir.

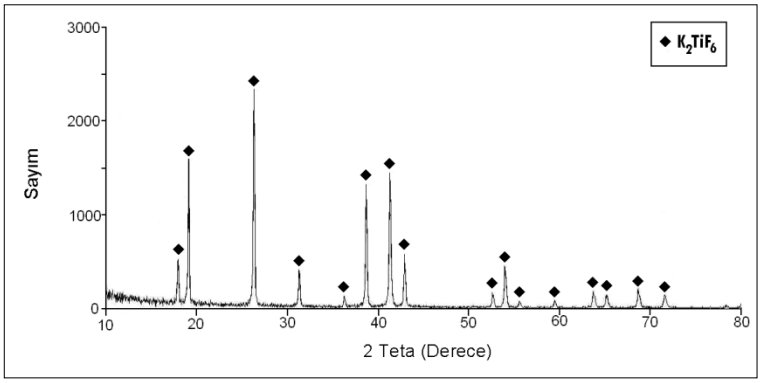
Matris ve takviye arasındaki ıslatılabilirliği arttırmak için K_2TiF_6 flaksı kullanılmıştır. Kullanılan flaksın XRD spektrumu Şekil 5.3'de verilmiştir.



Şekil 5. 1 Kompozit üretiminde kullanılan B_4C partiküllerine ait XRD spektrumu



Şekil 5. 2 Kompozit üretiminde kullanılan B_4C partiküllerine ait partikül boyut dağılımı



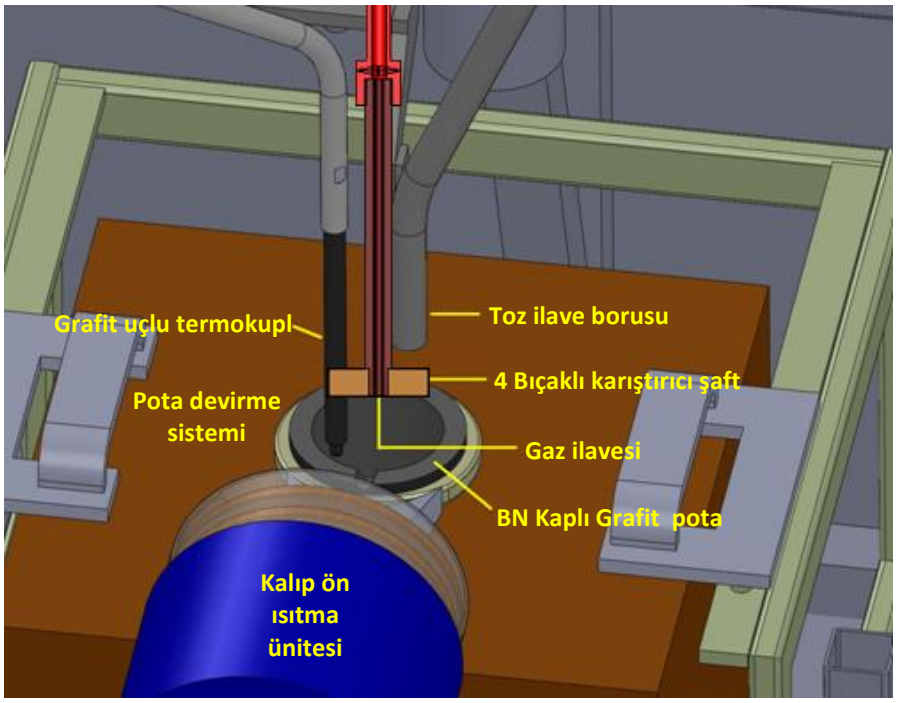
Şekil 5. 3 K_2TiF_6 flaksına ait XRD spektrumu

5.2 **Kompozit Malzemelerin Üretimi**

Kompozit üretimde K_2TiF_6 flaksı kullanılarak, B_4C ve alüminyum matris arasında reaksiyon tabakası oluşması, oluşan reaksiyon tabakasının alüminyum ile B_4C arasında bir bariyer oluşturması ve ayrıca alüminyum matris ile B_4C partiküllerinin bağ mukavemetinin arttırılması ve de ıslatılabilirliğin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca flaks içerisindeki K ve F elementlerinin oksit giderici özelliğinden yararlanılması düşünülmüştür. İlk olarak B_4C partikülleri ve K_2TiF_6 flaksı alümina bilyeler kullanılarak bilyalı değirmende 150 devir/dakikada 3 saat süre ile karıştırılmıştır. Daha sonra karışımdaki nemi gidermek amacıyla 105 °C sıcaklıkta 1 saat boyunca tozlar bekletilmiştir. İkinci aşamada yaklaşık olarak 775 gram ağırlığındaki matris malzemesi, Şekil 5.6'da gösterilen BN kaplı grafit pota kullanılarak, Şekil 5.4 a ve Şekil 5.5'de gösterilen özel tasarımlı vakum indüksiyon ocağında 2,5 mb vakum ortamında ergitilmiştir. Ergiyik matris malzemesi 850°C 'a ulaştığında K_2TiF_6 – B_4C partikül karışımı yaklaşık 25 g/dk hız ile BN kaplı 4 bıçaklı çelik karıştırıcı ile en fazla 1000 devir/dakikada karıştırılırken ilave edilmiştir. İlave edildikten sonra yaklaşık 4 dk beklenmiş ve 300° C sıcaklığa ön ısıtılmış Şekil 5.4 b'de gösterilen kokil kalıba dökülmüştür. Daha sonrasında 104 MPa basınç altında 1 dk süre ile bekletilerek basınç altında katılaşması sağlanmıştır. Bu üretim yöntemi ile ağırlıkça %15 ve %20 takviyeli olmak üzere iki farklı partikül oranına sahip MMK üretilmiştir. İş akım şeması Şekil 5.7'de görülmektedir.



Şekil 5. 4 a) Vakum kabini güç ünitesi ve hidrolik presin görüntüsü b) kokil kalıbın görüntüsü



Şekil 5. 5 Fırın tasarımının görüntüsü



Şekil 5. 6 BN kaplı grafit pota

5.3 Kullanılan Malzemelerin ve Üretilen Kompozit Malzemelerin Karakterizasyonu

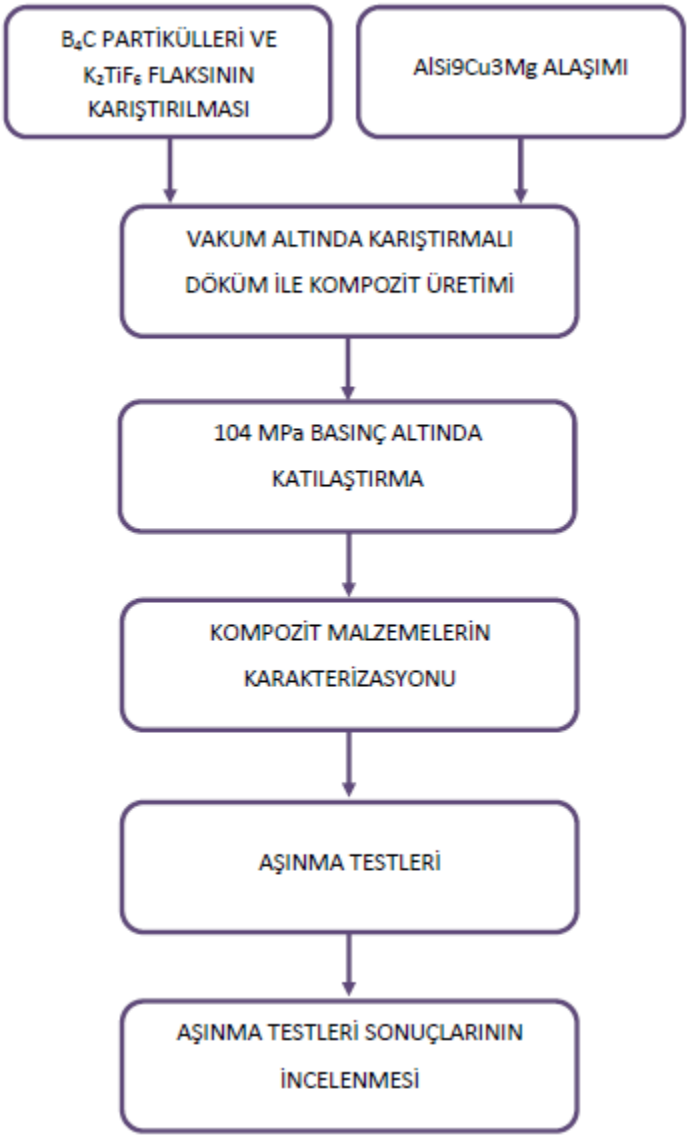
Takviye malzemesi olarak kullanılan partiküllerin boyut ve yüzey alanı ölçümleri Quantha Chrome 2200e marka ve BET model cihazda yapılmıştır. Matris malzemesi olarak kullanılan alaşımın spektral analizleri Hilger Analytical Polyvac optik emisyon spekrometresi kullanılarak yapılmıştır.

Üretilmiş olan kompozit malzemeler elmas disk kullanılarak diskler şeklinde kesilmiş, elmas zımparalar ile zımparalanmış ve solüsyonlar ile parlatılarak numune hazırlama işlemi yapılmıştır. Hazırlanan numuneler Leica ICM 1000 optik mikroskobu ile metalografik olarak incelenmiş, QWin-V 2.8 görüntü analiz programı ile hacim oranları hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar yapılırken her disk numunenin yüzeyinden 10 ölçüm toplamda da üretilmiş her kompozit numuneden 60 ölçüm alınmıştır.

Üretilmiş olan kompozit malzemeler JEOL JSM 7000F FEG-SEM ile mikroyapısal olarak incelenmiş ve EDS analizleri yapılmıştır.

Kompozit malzemelerin yoğunluğu üretilmiş olan her kompozit numuneden 2 farklı ölçüm alınarak hesaplanmıştır. Yoğunluk hesabı için kullanılan formül 5.1 eşitliğinde verilmiştir. Bu formülde; ρ numunenin yoğunluğu (g/cm^3), A havadaki ağırlık (g), B sıvıdaki ağırlık (g), ρ_0 sıvının yoğunluğunu (g/cm^3) ve d havanın yoğunluğunu (g/cm^3) göstermektedir.

$$\rho = \frac{A}{A-B} \times (\rho_0 - d) + d \qquad (5.1)$$



Şekil 5. 7 İş akım şeması

Hesaplanan yoğunluk ve numunelerin teorik yoğunluk değerleri kullanılarak numunelerdeki porozite oranları hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda kullanılan teorik yoğunluklar hesaplanırken, flaks ile ilave edilen titanyumun tamamen TiC ve TiB_2 olarak reaksiyon oluşturduğu kabul edilmiştir. Bu kabulden yola çıkılarak matris, takviye ve flaks göz önüne alınarak karışımlar kuralı ile teorik yoğunluk değeri hesaplanmıştır.

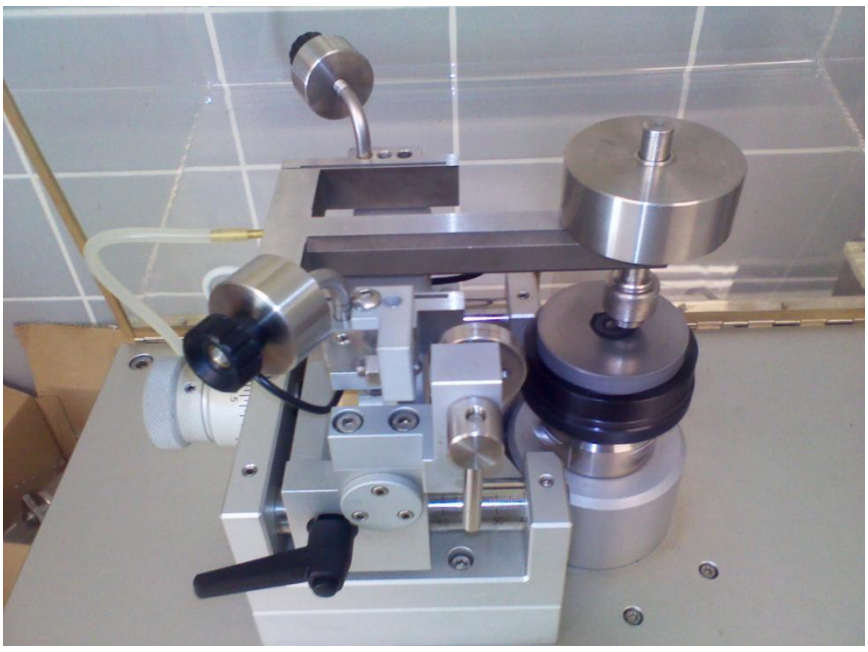
5.4 **Aşınma Testleri**

Aşınma testleri Şekil 5.8'de görüntülenen CSM Instruments Tribometer aşınma cihazında disk üzerinde pim aşınma testi yöntemi ile yapılmıştır. Disk üzerinde pim

aşınma testlerinde normal yük pim vasıtası ile dönen disk üzerine uygulanır. Kayma hareketi tek yönde olabileceği gibi çift yönde ileri-geri şeklinde de olabilir. Test kuru ortamda uygulanacağı gibi yağlayıcılı ortamda da uygulanabilir. Genellikle öncesinde ve sonrasında ağırlığı ölçülerek ağırlık kaybından yola çıkılarak aşınma oranı 5.2 eşiitliğindede verilen formül ile hesaplanabilir. Bununla beraber 5.3 eşitliğinde verilen formül ile de hacimce aşınma oranı hesaplanabilir [11]. Aşınma testleri uygulanırken ağırlıkça %20 takviyeli ve %15 takviyeli disk halinde hazırlanmış ve karakterizasyon için belirtilmiş numune hazırlama işlemlerinin uygulandığı kompozit malzemelere, karşı malzeme olarak Şekil 5.9'da gösterilen Ø 2,5 mm AISI 4140 çelik pim kllanılarak; 4 farklı koşulda ve her koşul için tekrar edilebilirlik göz önüne alınarak 3 tekrarda aşınma testleri yapılmıştır. Aşınma testlerinin koşulları Çizelge 5.2'de verilmiştir. Parametreler belirlenirken hızın, yükün ve takviye hacim oranının aşınma davranışına etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. 1 numaralı test ile 2 numaralı test arasında hızın etkisi, 1 numaralı test ile 3 numaralı test arasında takviye hacim oranının etkisi,3 numaralı test ile 4 numaralı test arasında uygulanan yükün etkisi araştırılmıştır.

$$aşınma\ oranı = \frac{ağırlık\ kaybı}{kayma\ mesafesi} \tag{5.2}$$

$$aşınma\ oranı = \frac{hacim\ kaybı}{kayma\ mesafesi} \tag{5.3}$$

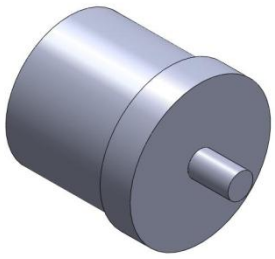


Şekil 5. 8 CSM Instruments Tribometer aşınma cihazı

Çizelge 5. 2 Aşınma test koşulları

Test Numarası	Takviye Oranı (%ağırlık)	Takviye Oranı (%hacim)	Kayma Hızı (cm/s)	Aşınma Test Yükü (N)	Aşınma Test Mesafesi (m)
1	20	22,12	3	5	400
2	20	22,12	5	5	400
3	15	16,7	3	5	400
4	15	16,7	3	3	400

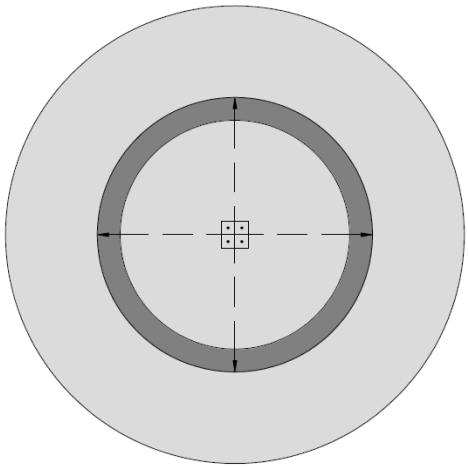
Aşınma testlerine başlamadan önce pimler ve diskler izopropil alkol ile 10 dakika ultrasonik karıştırıcıda yıkanarak yüzeyleri temizlenmiştir. Her aşınma testine başlamadan önce ve test bitiminde hem pimlerin hem de disk halinde hazırlanmış olan kompozit numunelerin ağırlıkları 0,1 mg hassasiyetli terazi ile ölçülmüştür. Daha sonra aşınma testleri uygulanmıştır. Aşınma testlerinden sonra hem pimler hem de disk numuneler aşınma testlerine başlamadan önce olduğu gibi 10 dakika süre ile izopropil alkol ile ultrasonik karıştırıcıda temizlenmiştir. Aşınma izlerindeki hacim kayıpları 2,5 μm yarıçaplı uç ile 5 mg yük altında Şekil 5.10'da görülen Veeco Dektak 6m 2D profilometre ile Şekil 5.11'de belirtildiği gibi 90° döndürülerek her bir test sonucundan toplamda 4 ölçüm alınmıştır ve hacim oranı kayıpları eşitlik (5.4) ile hesaplanmıştır. Sonrasında aşınma yüzeyleri JEOL JSM 7000F FEG-SEM taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir.



Şekil 5. 9 Karşı malzeme olarak kullanılan AISI 4140 çelik pim



Şekil 5. 10 Veeco Dektak 6m 2D profilometre



Şekil 5. 11 Profilometre ile alınan aşınma izilerini belirten görüntü

$$A_w = \sum_{i=0}^{n} 0.5(Y_i + Y_{i-1})(X_i - X_{i-1}) \quad (5.4)$$

BÖLÜM 6

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde üretilmiş kompozit malzemelerin mikroyapı incelemeleri, porozite miktarı, partikül ilave verimi, sertlik sonuçları ve aşınma test sonuçları ile karşılaşılan aşınma çeşitleri incelenecektir.

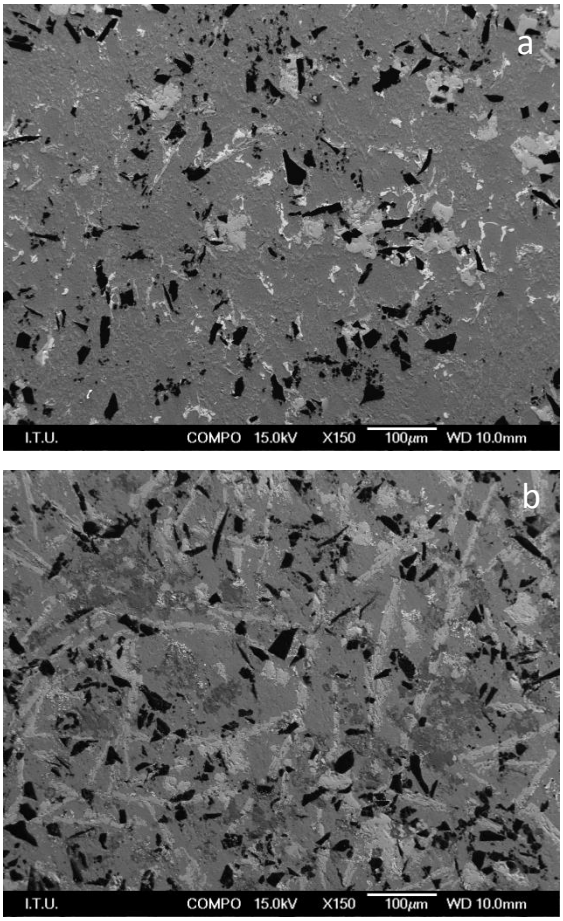
6.1 Kompozit Numunlerin Karakterizasyon Sonuçlarının İncelenmesi

Bölüm 5.3'de belirtilmiş yöntemler ile hesaplanan ve tespit edilen partikül ilave verimi, porozite, sertlik, yoğunluk ve hacim oranı değerleri çizelge 6.1'de verilmiştir.

Çizelge 6. 1 Kompozit Numunelerin Fiziksel Özellikleri

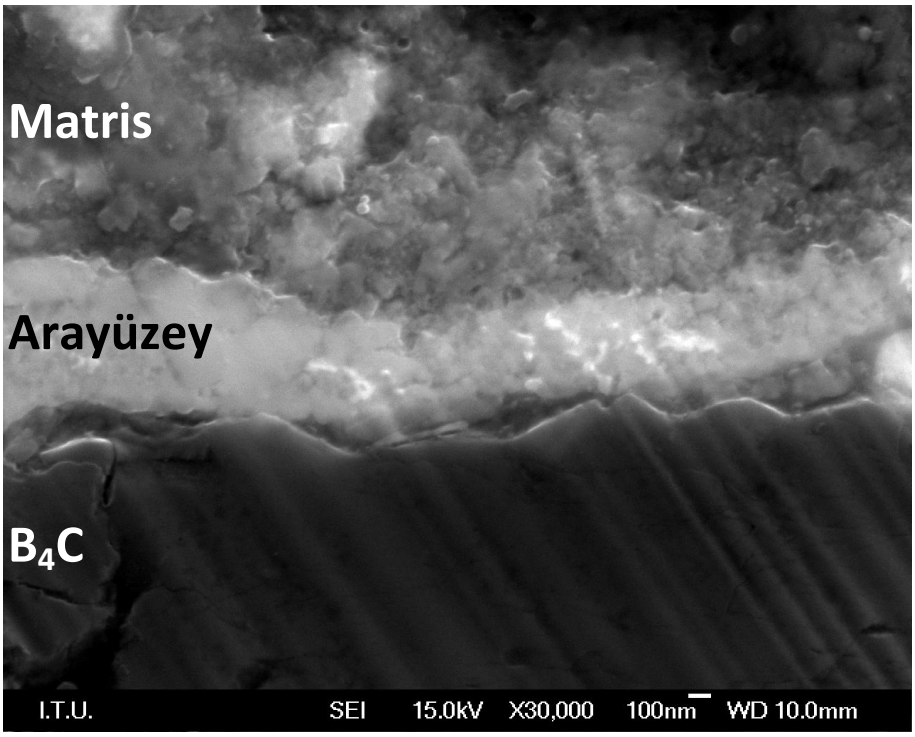
Kompozi Numune	1	2
Nominal Partikül Oranı (%ağ.)	15	20
Nominal Hacim Oranı (%)	16,7	22,12
Deneysel Hacim Oranı (%)	15,15±3,71	19,07±5,93
Partikül İlave Verimi (%)	90,72	86,21
Teorik Yoğunluk (g/cm^3)	2,7468	2,7434
Deneysel Yoğunluk (g/cm^3)	2,7188±0,0132	2,7003±0,0139
Porozite (%)	1,02	1,57
Sertlik (HV05)	124,14±2,878	137,41±2,268

Belirtilmiş şartlarda üretilmiş olan kompozit numunelere ait SEM görüntüleri Şekil 6.1'de görülmektedir. Bu görüntüler takviye partiküllerin yapı içerisinde göreceli olarak homojen dağıldığını göstermektedir.

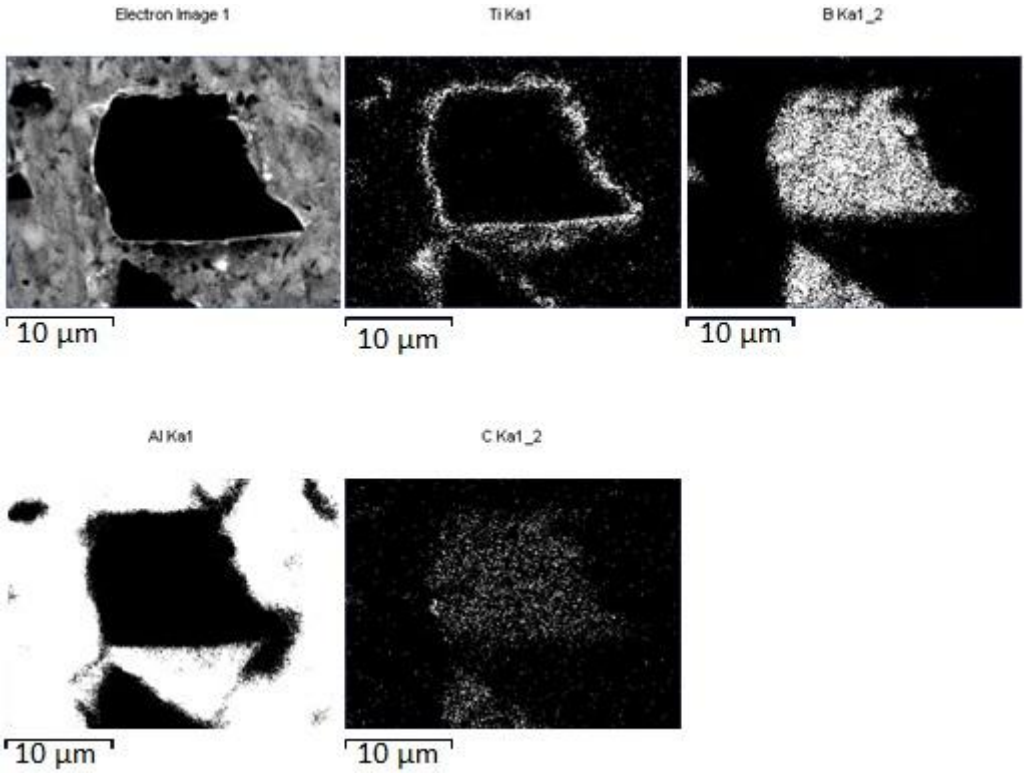


Şekil 6. 1 a) ağırlıkça %15 ve b)%20 B_4C partikül takviyeli kompozit numunelerin FEG-SEM görüntüleri

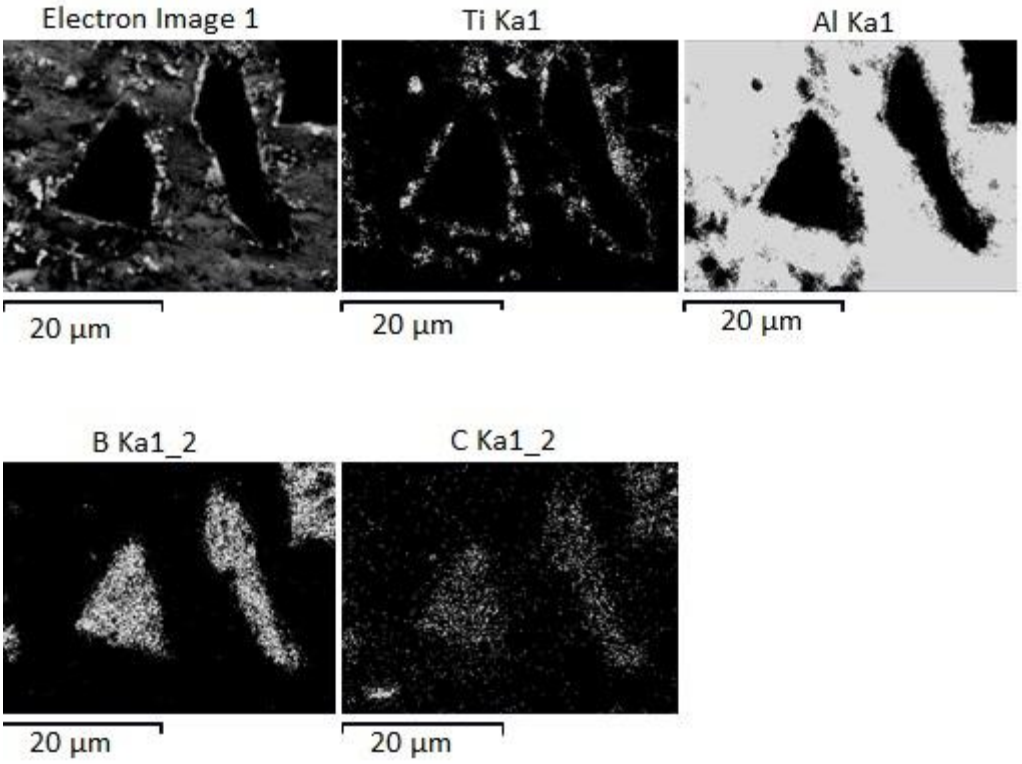
K_2TiF_6 flaksı kullanılarak; titanyumun matris ile takviye arasında sürekli bir reaksiyon tabakası oluşturması, ıslatılabilirliğin ve bağlanmanın arttırılmasını; K ve F'nin de alüminyum yüzeyinde bulunan oksit kalıntılarının giderilmesi sağlanmıştır. Şekil 6.2'deki FEG-SEM görüntülerinde matris ve takviye arayüzeyindeki reaksiyon tabakası görülmektedir. Ayrıca Şekil 6.3 ve 6.4'deki x-ışını haritalarından TiC ve TiB_2 içeren reaksiyon tabakasının sürekli olduğu görülmektedir. Bu sürekli reaksiyon tabakasının oluşması ile matris takviye arayüzeyinde bağlanma ve ıslatılabilirlik artmış ve buna bağlı olarak da partikül ilave verimi artmıştır.



Şekil 6. 2 Matris ve takviye arayüzeyindeki sürekli reaksiyon tabakası



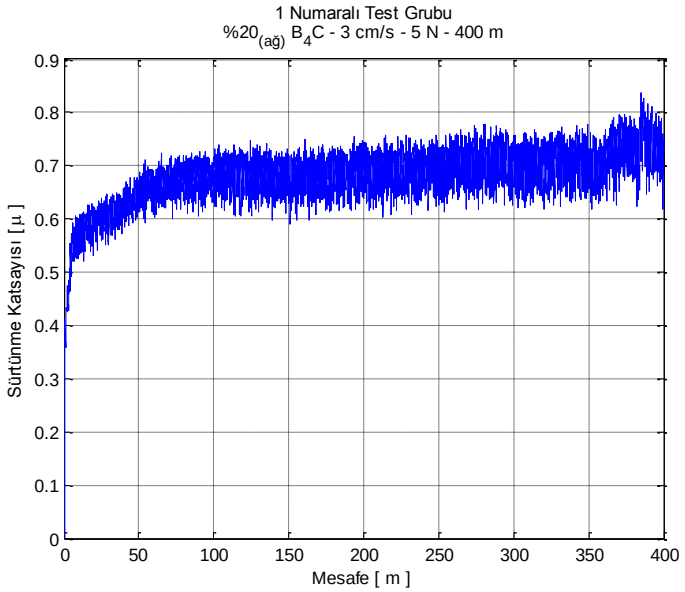
Şekil 6. 3 Ağırlıkça %15 B_4C partikül takviyeli kompozit numunenin x-ışını haritası



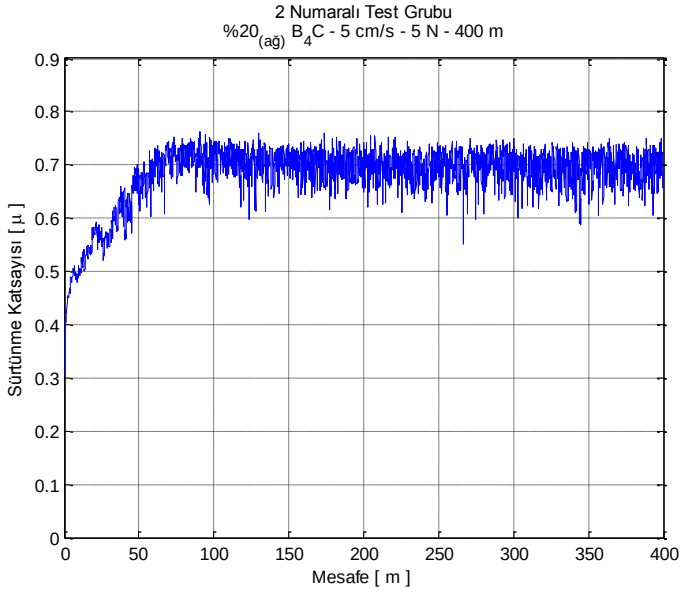
Şekil 6.4 Ağırlıkça %20 B_4C partikül takviyeli kompozit numunenin x-ışını haritası

6.2 **Aşınma Test Sonuçları**

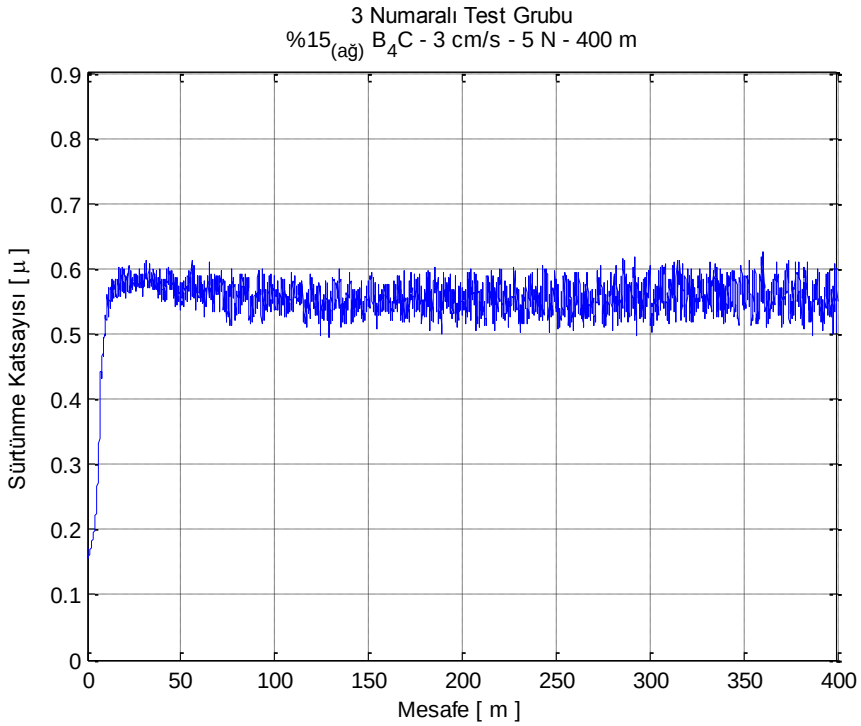
Çizelge 5.2'de belirtilen koşullarda yapılan aşınma testlerinden elde edilen sürtünme katsayısı grafikleri Şekil 6.5-6.8'de sunulmuştur. Şekil 6.9'da bütün koşullarda yapılan aşınma testlerinin sürtünme katsayısı grafikleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekil 6.10'da aşınma testleri sonunda elde edilen hacim kayıpları verilmiştir. Çizelge 6.2'de testlerin ortalama sürtünme katsayısı, pimin ağırlık kaybı, numunenin ağırlık ve hacim kaybı değerleri, verilmiştir. Bu değerler; ağırlık oranı olarak %20 B_4C takviye partikülü içeren kompozit malzemenin 5 N yük altında 400 m mesafede yapılan aşınma testlerinde kayma hızının 3 cm/s'den 5 cm/s'ye çıkması ile aşınma miktarında ve sürtünme katsayısında azalma olduğunu, 5 N yük altında 3 cm/s kayma hızında 400 m mesafede yapılan aşınma testlerinde B_4C takviye ağırlık oranının %15'den %20'ye artması ile aşınma miktarının ve sürtünme katsayısının arttığını, ağırlık oranı olarak da %15 B_4C partikül takviyeli kompozit malzemelerin 3 cm/s kayma hızında 400 m mesafede yükün 3 N'dan 5 N'a artması ile aşınma miktarının da arttığını buna karşılık sürtünme katsayısının azaldığını göstermektedir.



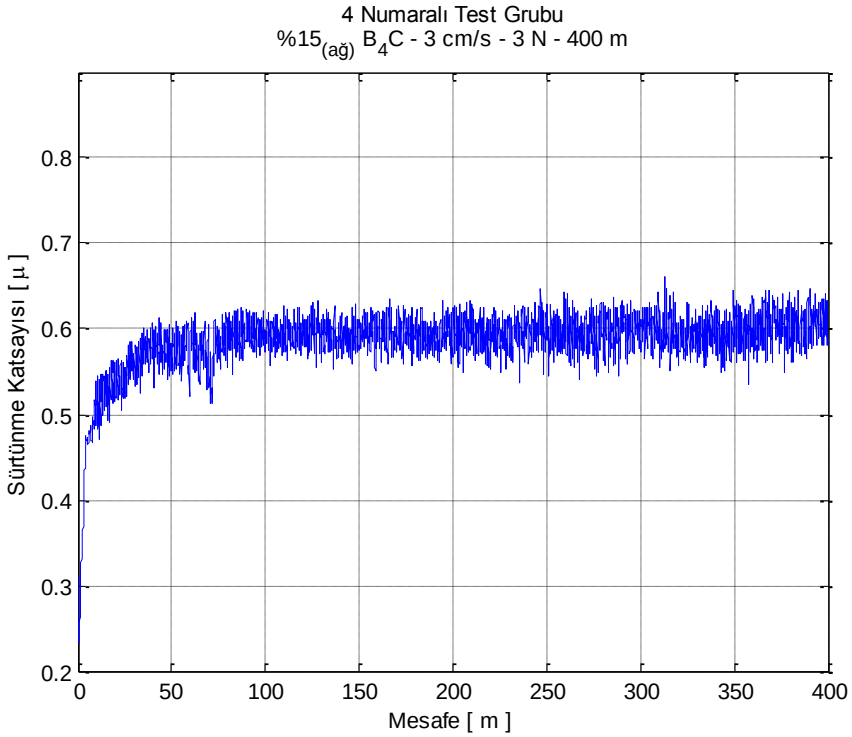
Şekil 6. 5 1 numaralı ağırlıkça %20 takviye B_4C partikül oranına sahip kompozit numunelere 3 cm/s kayma hızında 5 N yük altında 400 m mesafede yapılmış olan aşınma test grubunun sürtünme katsayısı grafiği



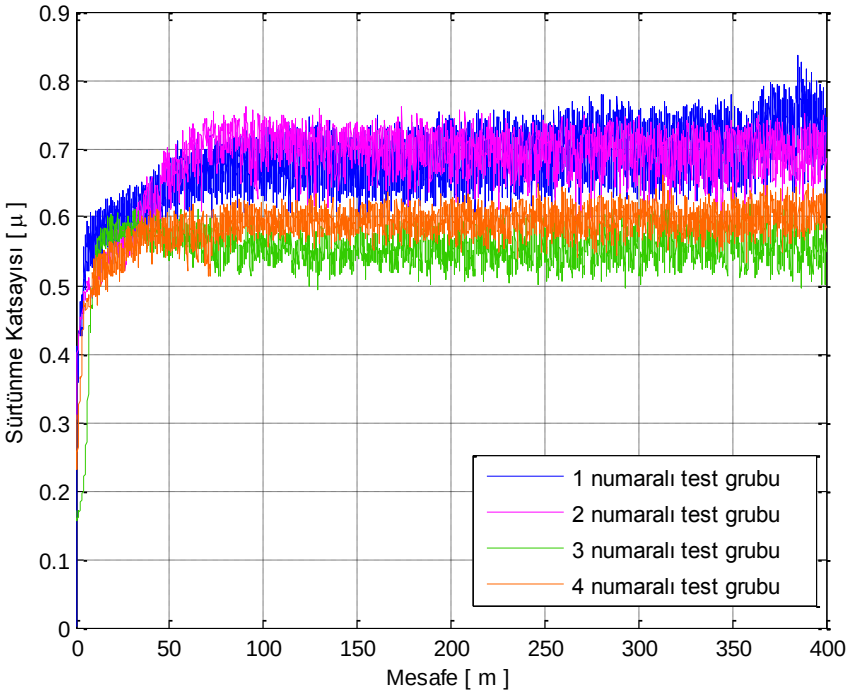
Şekil 6. 6 2 numaralı ağırlıkça %20 takviye B_4C partikül oranına sahip kompozit numunelere 5 cm/s kayma hızında 5 N yük altında 400 m mesafede yapılmış olan aşınma test grubunun sürtünme katsayısı grafiği



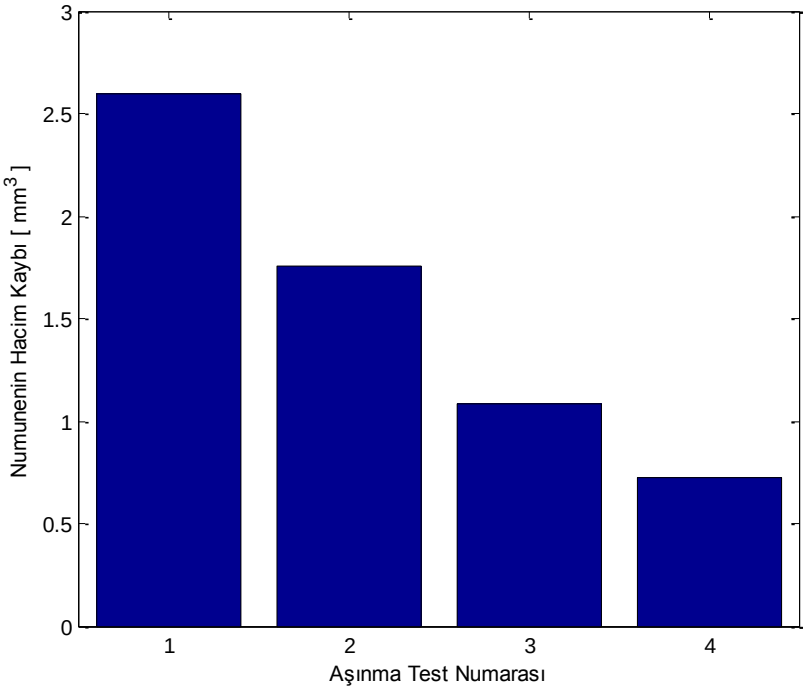
Şekil 6. 7 3 numaralı ağırlıkça %15 takviye B_4C partikül oranına sahip kompozit numunelere 3 cm/s kayma hızında 5 N yük altında 400 m mesafede yapılmış olan aşınma test grubunun sürtünme katsayısı grafiği



Şekil 6. 8 4 numaralı ağırlıkça %15 takviye B_4C partikül oranına sahip kompozit numunelere 3 cm/s kayma hızında 3 N yük altında 400 m mesafede yapılmış olan aşınma test grubun un sürtünme katsayısı grafiği



Şekil 6. 9 Sürtünme Katsayısı Grafiklerinin Karşılaştırılması



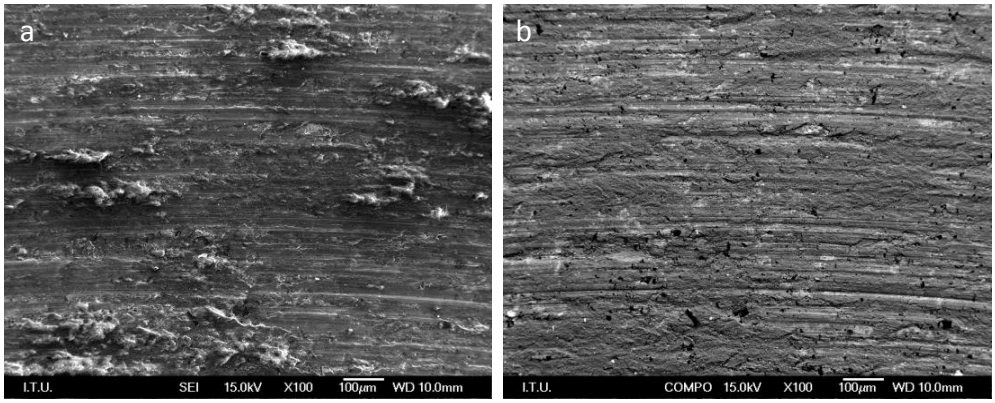
Şekil 6. 10 Numunelerdeki Hacim Kaybı Grafikleri

Çizelge 6. 2 Sürtünme katsayısı, pimlerin ağırlık kaybı, numunelernin ağırlık ve hacim kaybı değerleri

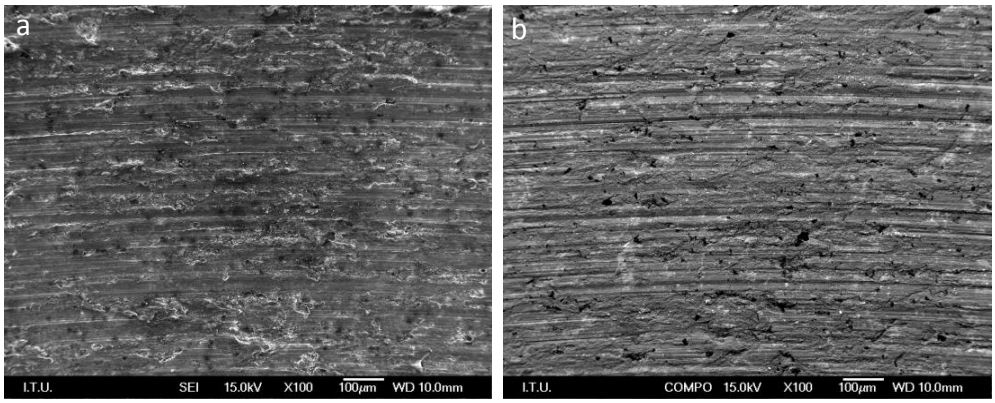
Aşınma Test Numarası	Ortalama Sürtünme Katsayısı	Numunenin Ağırlık Kaybı (mg)	Numunenin Hacim Kaybı (mm^3)	Pimin Ağırlık Kaybı (mg)
1	0,6874±0,008	8,9	2,599	1,8
2	0,6646±0,027	6,7	1,755	3,2
3	0,5561±0,023	4,3	1,087	0,6
4	0,5946±0,024	2,8	0,722	0,9

6.3 **Aşınma İzlerinin Karakterizasyonu**

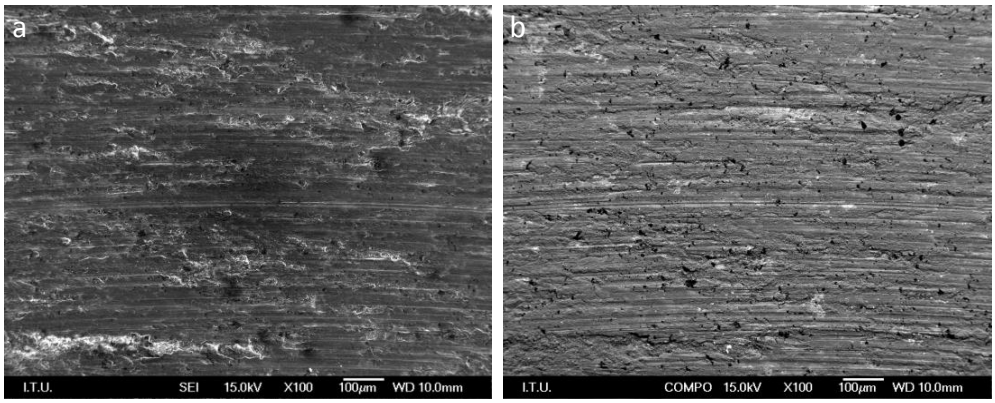
Bu bölümde; aşınma testine tabi tutulan kompozit malzemelerin aşınma yüzeyleri incelenecektir.



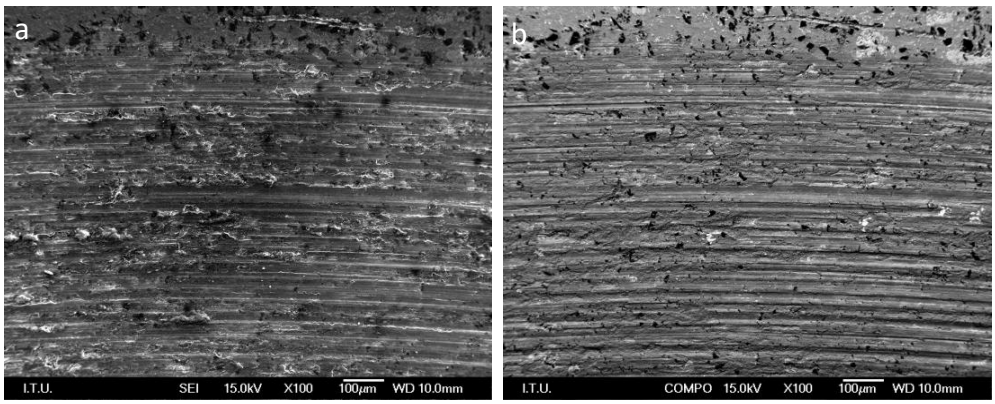
Şekil 6. 11 1 numaralı aşınma testinden alınan FEG-SEM görüntüsü a)SEI modunda b)Compo modunda



Şekil 6. 12 2 numaralı aşınma testinden alınan FEG-SEM görüntüsü a)SEI modunda b)Compo modunda

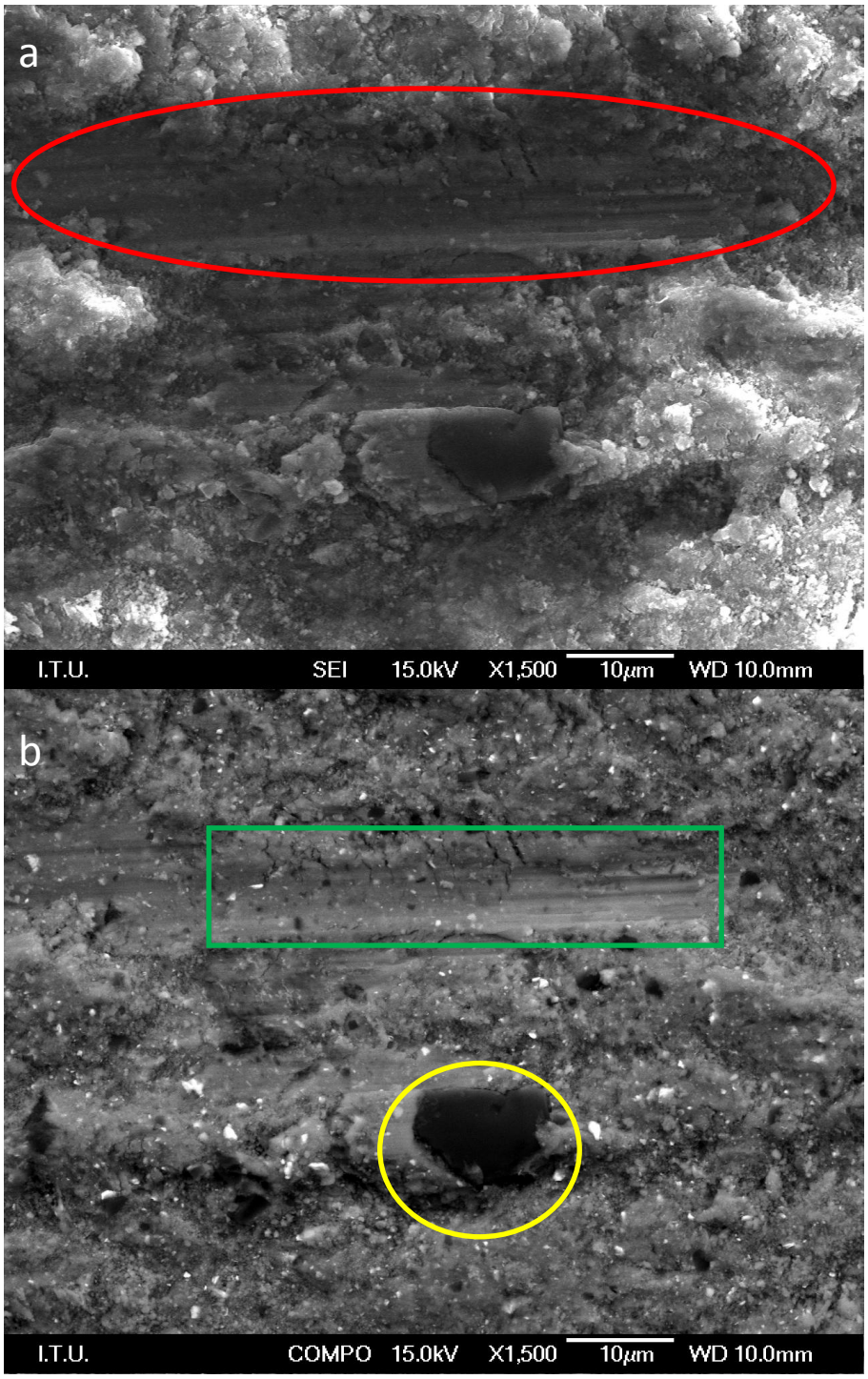


Şekil 6. 13 3 numaralı aşınma testinden alınan FEG-SEM görüntüsü a)SEI modunda b)Compo modunda



Şekil 6. 14 4 numaralı aşınma testinden alınan FEG-SEM görüntüsü a)SEI modunda b)Compo modunda

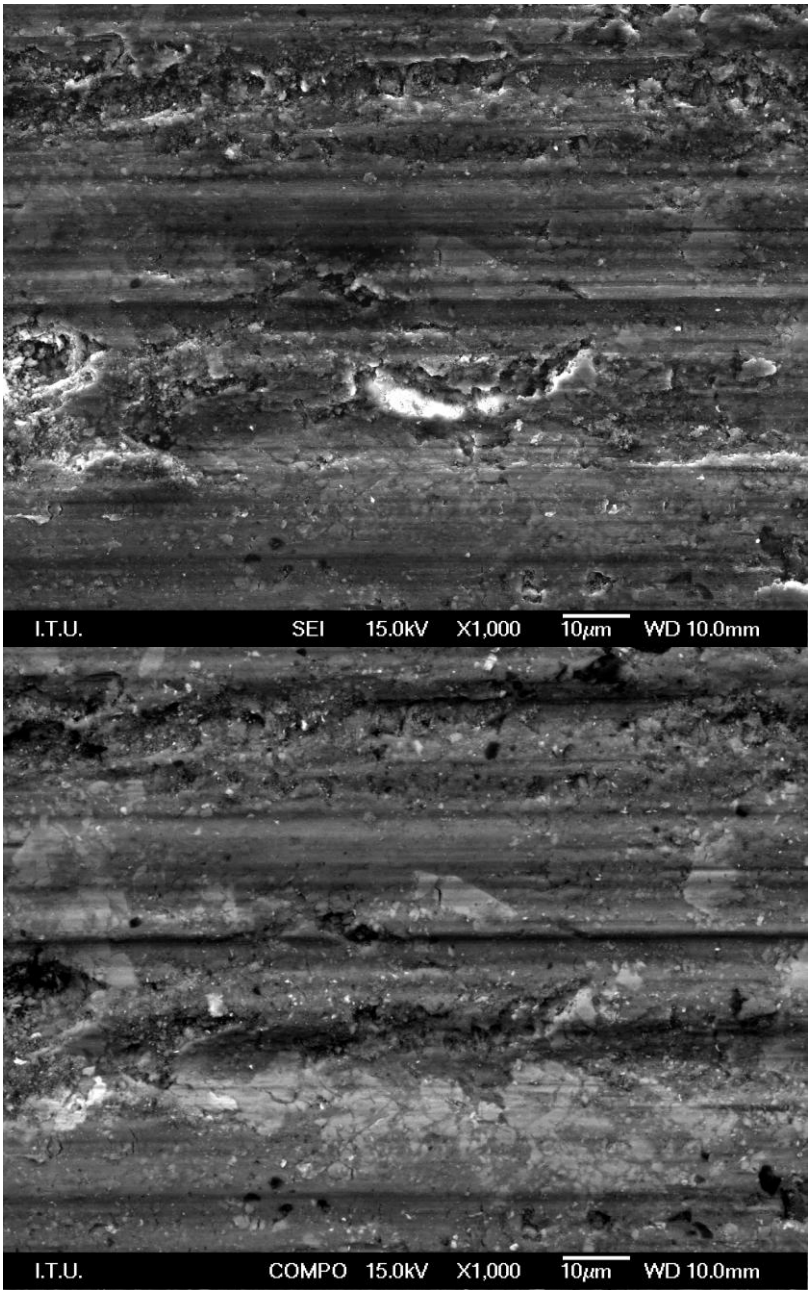
Şekil 6.10-6.14'de yer alan FEG-SEM görüntüleri 4 farklı koşulda gerçekleşen testlere ait düşük büyütmedeki genel yapının görüntüleridir. Bu görüntülerden 2 numaralı test grubunun daha düz bir yapıya sahip olduğu anlaşılmaktadır. 1 numaralı test grubu ile 3 numaralı test grubunun görüntüleri karşılaştırıldığında, yüzeye adhere olmuş aşınma kırıntıları haricinde 1 numaralı test grubunun daha düz bir yüzeyi olduğu görülmektedir. 3 numaralı test grubu ile 4 numaralı test grubunun görüntüleri karşılaştırıldığında ise 3 numaralı test grubunun yüzeyinin daha düz olduğu görülmektedir. Bütün test koşullarında abrazif aşınma izlerine rastlanmıştır.



Şekil 6. 15 1 numaralı ağırlıkça %20 takviye B_4C partikül oranına sahip kompozit numunelere 3 cm/s kayma hızında 5 N yük altında 400 m mesafede yapılmış olan aşınma test grubundan alınmış FEG-SEM görüntüleri

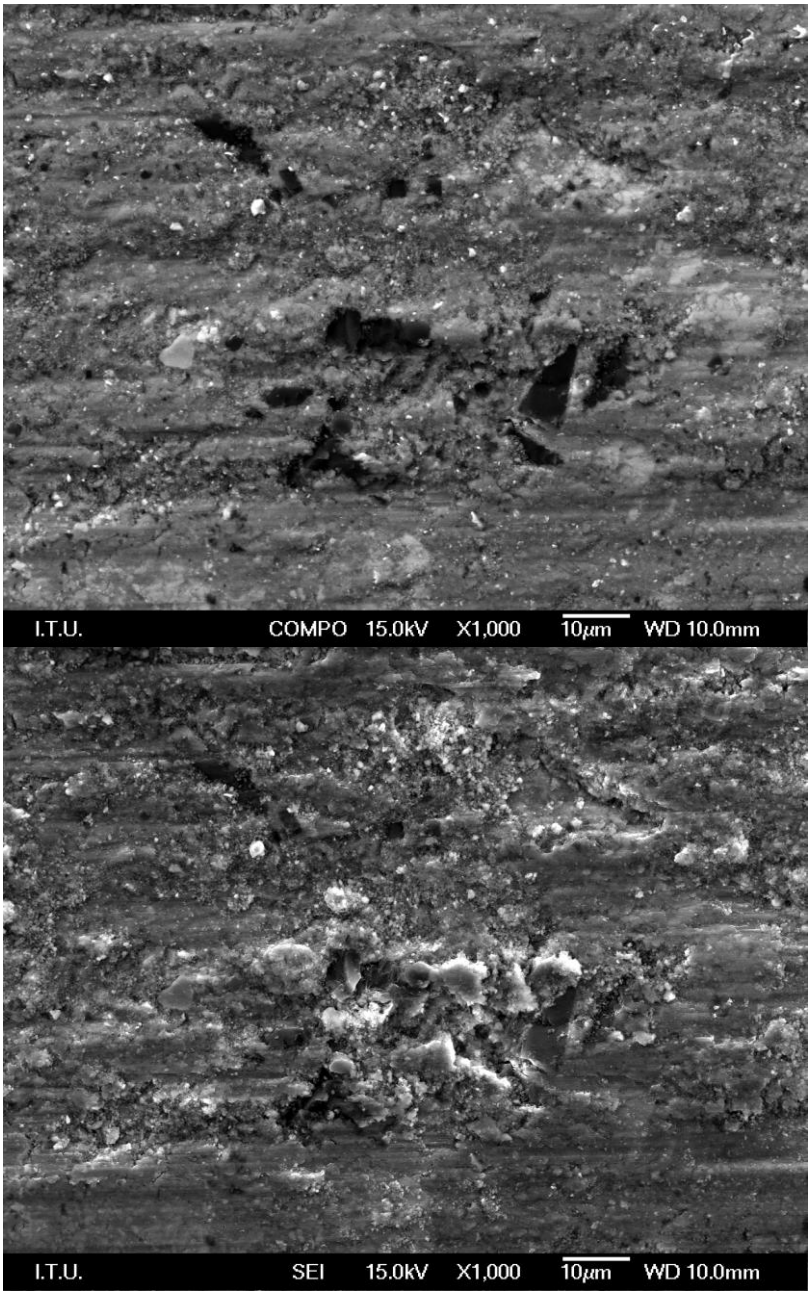
Şekil 6.15'de görülen FEG-SEM görüntüsü 1 numaralı ağırlıkça %20 takviye B_4C partikül oranına sahip kompozit numunelere 3 cm/s kayma hızında 5 N yük altında 400 m mesafede yapılmış olan aşınma test grubuna aittir. Bu görüntüde kırmızı ile

işaretlenmiş bölgede abrasif aşınma izi daha yakından görülmektedir. Ayrıca bu görüntüde yer yer gevşek aşınma kırıntıları dağınık olarak görülmektedir. Bununla beraber sarı ile işaretlenmiş bölgede yüzeye sıkıca tutunmuş takviye partikülü çıkıntı olarak bulunmaktadır. Yeşil kutu içerisinde kalan bölgede plastik deformasyon görülmektedir.



Şekil 6. 16 2 numaralı ağırlıkça %20 takviye B_4C partikül oranına sahip kompozit numunelere 5 cm/s kayma hızında 5 N yük altında 400 m mesafede yapılmış olan aşınma test grubundan alınmış FEG-SEM görüntüleri

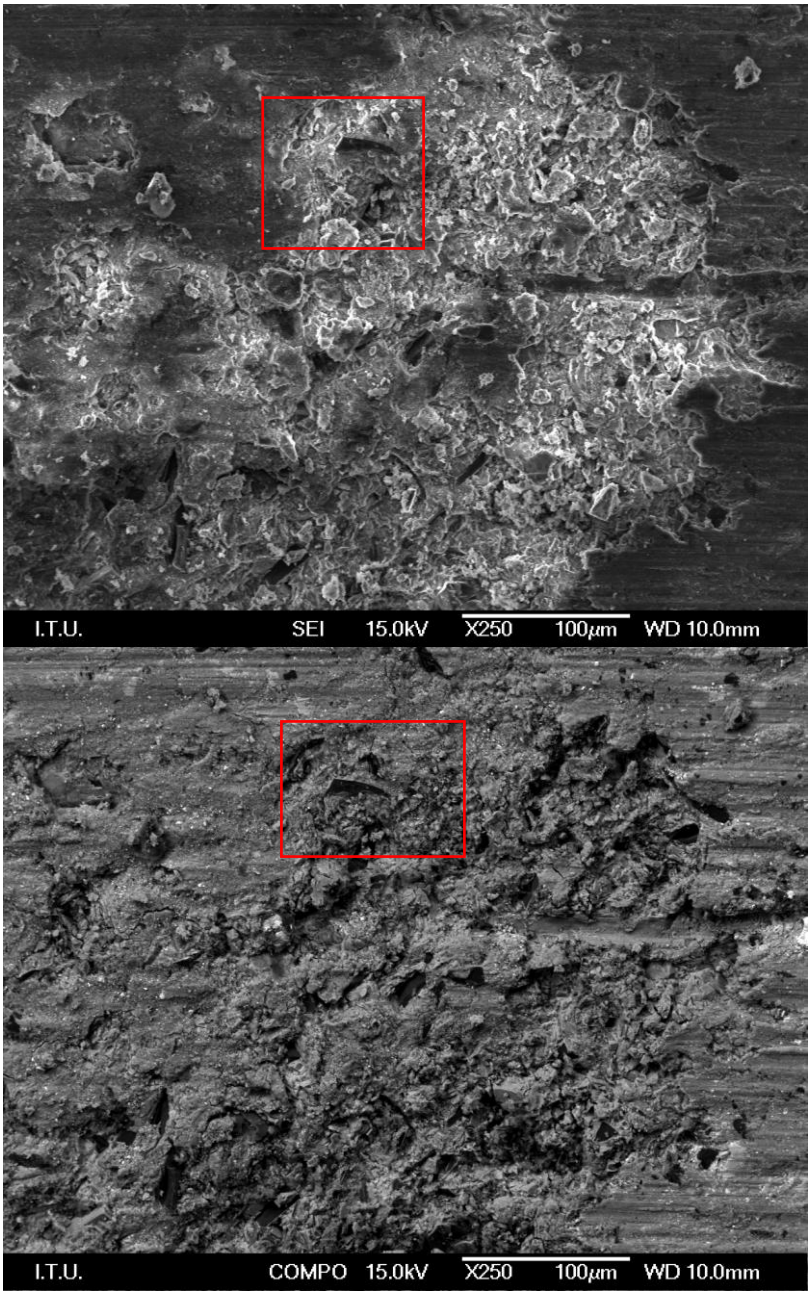
Şekil 6.16'da görülen FEG-SEM görüntüsü 2 numaralı ağırlıkça %20 takviye B_4C partikül oranına sahip kompozit numunelere 5 cm/s kayma hızında 5 N yük altında 400 m mesafede yapılmış olan aşınma test grubuna aittir. Bu görüntülerde kraterler adhezif aşınma bölgelerini göstermektedir.



Şekil 6. 17 2 numaralı ağırlıkça %20 takviye B_4C partikül oranına sahip kompozit numunelere 5 cm/s kayma hızında 5 N yük altında 400 m mesafede yapılmış olan aşınma test grubundan alınmış FEG-SEM görüntüleri

Şekil 6.17'de görülen FEG-SEM görüntüsü 2 numaralı ağırlıkça %20 takviye B_4C partikül oranına sahip kompozit numunelere 5 cm/s kayma hızında 5 N yük altında 400 m

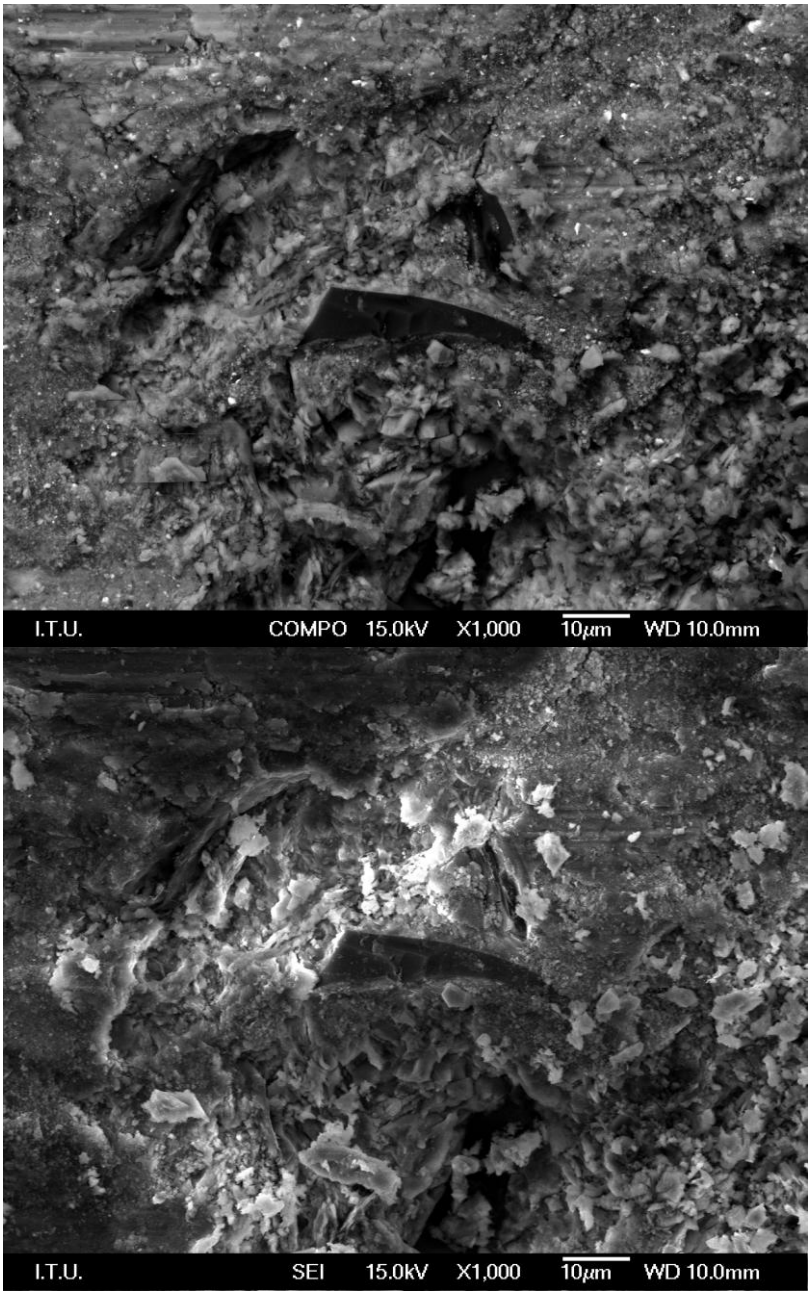
mesafede yapılmış olan aşınma test grubuna aittir. Bu görüntülerde takviye partiküller çıkıntı halinde belirgin olarak görülmektedir. Çıkıntı partiküllerin çevresinde gevşek aşınma kırıntılarının toplandığı saptanmıştır. Ayrıca adheziv aşınmayı gösteren kraterler mevcuttur.



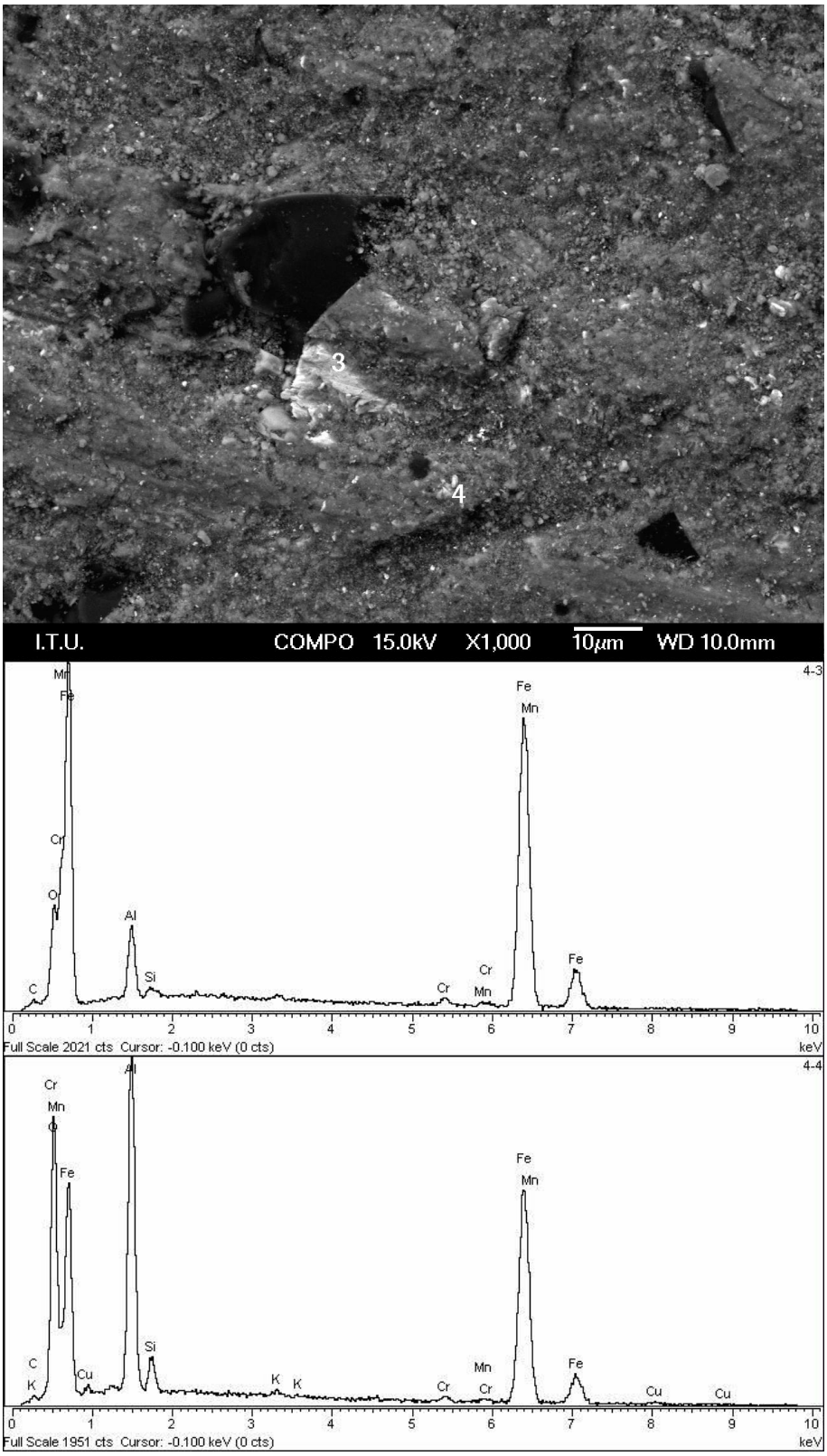
Şekil 6. 18 2 numaralı ağırlıkça %20 takviye B_4C partikül oranına sahip kompozit numunelere 5 cm/s kayma hızında 5 N yük altında 400 m mesafede yapılmış olan aşınma test grubundan alınmış FEG-SEM görüntüleri

Şekil 6.18'de görülen FEG-SEM görüntüsü 2 numaralı ağırlıkça %20 takviye B_4C partikül oranına sahip kompozit numunelere 5 cm/s kayma hızında 5 N yük altında 400 m

mesafede yapılmış olan aşınma test grubuna aittir. Bu görüntülerde gevşek aşınma birikintileri belirgin olarak görülmektedir. Şekil 6.19, Şekil 6.18'de kırmızı ile belirtilen bölgeyi göstermektedir. Takviye partiküller çıkıntı olarak bu bölgede bulunmaktadır. Çıkıntı partiküllerin etrafında gevşek aşınma kırıtıları toplanmıştır.

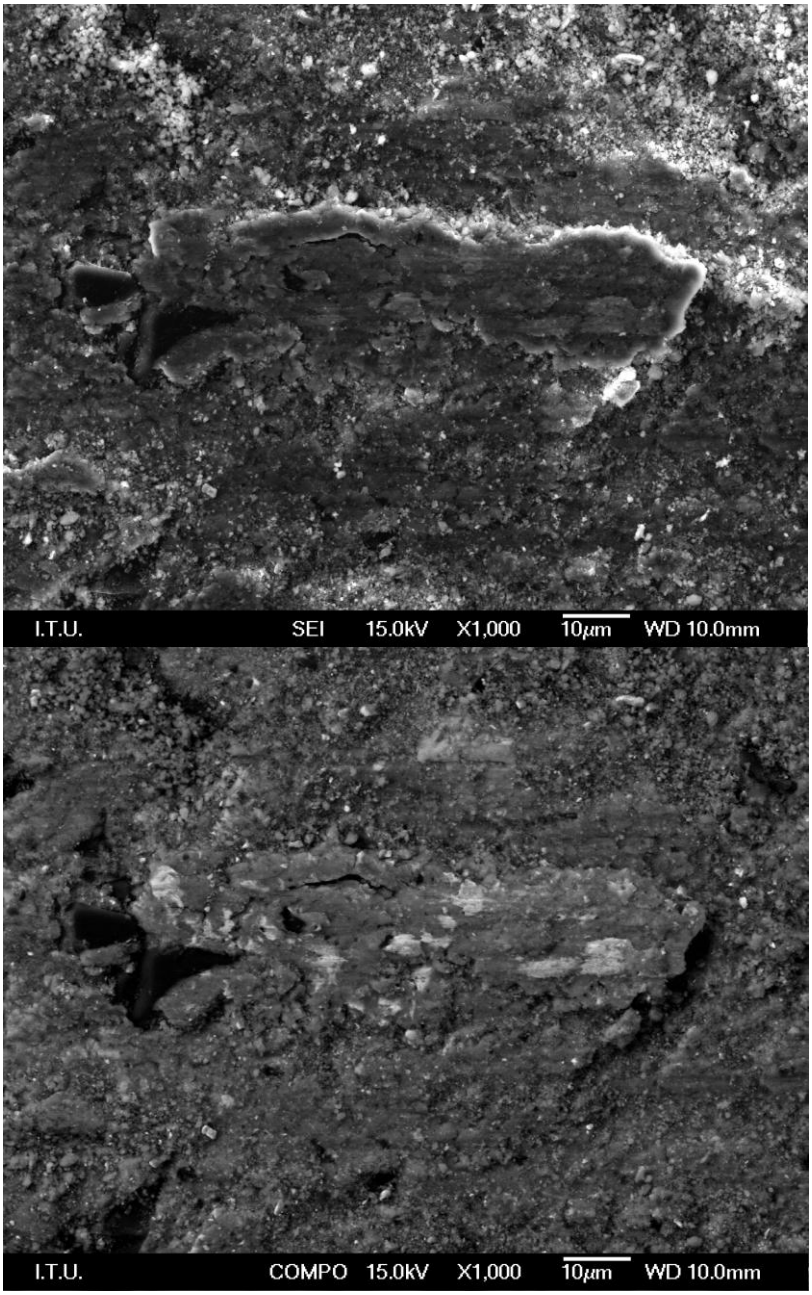


Şekil 6. 19 2 numaralı ağırlıkça %20 takviye B_4C partikül oranına sahip kompozit numunelere 5 cm/s kayma hızında 5 N yük altında 400 m mesafede yapılmış olan aşınma test grubundan alınmış FEG-SEM görüntüleri



Şekil 6. 20 2 numaralı ağırlıkça %20 takviye B_4C partikül oranına sahip kompozit numunelere 5 cm/s kayma hızında 5 N yük altında 400 m mesafede yapılmış olan aşınma test grubundan alınmış FEG-SEM görüntüsü ve noktasal EDS analizleri

Şekil 6.20'de görülen FEG-SEM görüntüsü 2 numaralı ağırlıkça %20 takviye B_4C partikül oranına sahip kompozit numunelere 5 cm/s kayma hızında 5 N yük altında 400 m mesafede yapılmış olan aşınma test grubuna aittir. Bu görüntülerde, 3 ve 4 numara ile belirtilen bölgelerin noktasal EDS analiz sonuçları verilmektedir. Bu analiz sonuçları göz önüne alındığında, AISI 4140 çelik pimden kompozit malzeme yüzeyine malzeme adhezyonunun olduğu görülmektedir.



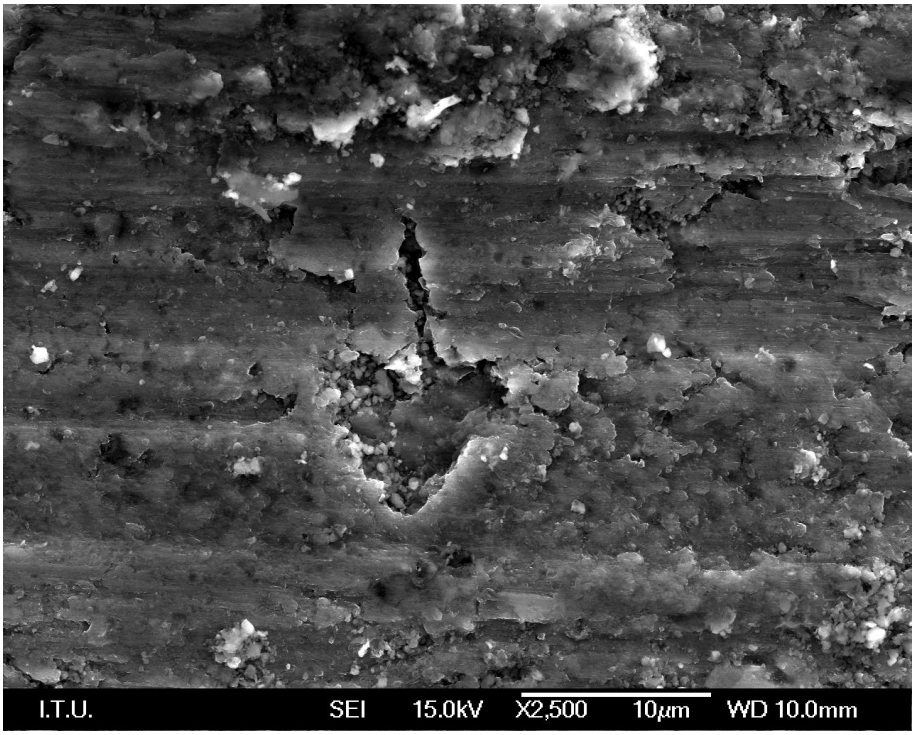
Şekil 6. 21 2 numaralı ağırlıkça %20 takviye B_4C partikül oranına sahip kompozit numunelere 5 cm/s kayma hızında 5 N yük altında 400 m mesafede yapılmış olan aşınma test grubundan alınmış FEG-SEM görüntüleri

Şekil 6.22'de görülen FEG-SEM görüntüsü 2 numaralı ağırlıkça %20 takviye B_4C partikül oranına sahip kompozit numunelere 5 cm/s kayma hızında 5 N yük altında 400 m mesafede yapılmış olan aşınma test grubuna aittir. Bu görüntülerde, kopmak üzere olan pulsu parçacık görülmektedir. Bu pulsu parçacıklar tabakalı aşınmanın bir kanıtı olarak ele alınmaktadır. Plastik deformasyon sonucunda oluşan çatlakların ilerlemesi ile tabakalı aşınma meydana gelir ve pulsu parçacıklar olarak yüzeyden uzaklaşır.



Şekil 6. 22 3 numaralı ağırlıkça %15 takviye B_4C partikül oranına sahip kompozit numunelere 3 cm/s kayma hızında 5 N yük altında 400 m mesafede yapılmış olan aşınma test grubundan alınmış FEG-SEM görüntüleri

Şekil 6.23'ea görülen FEG-SEM görüntüsü 3 numaralı aşınma test grubuna aittir. Bu görüntülerde, matriste bulunan takviye partikül ve etrafında toplanmış gevşek aşınma birikintileri görülmektedir.

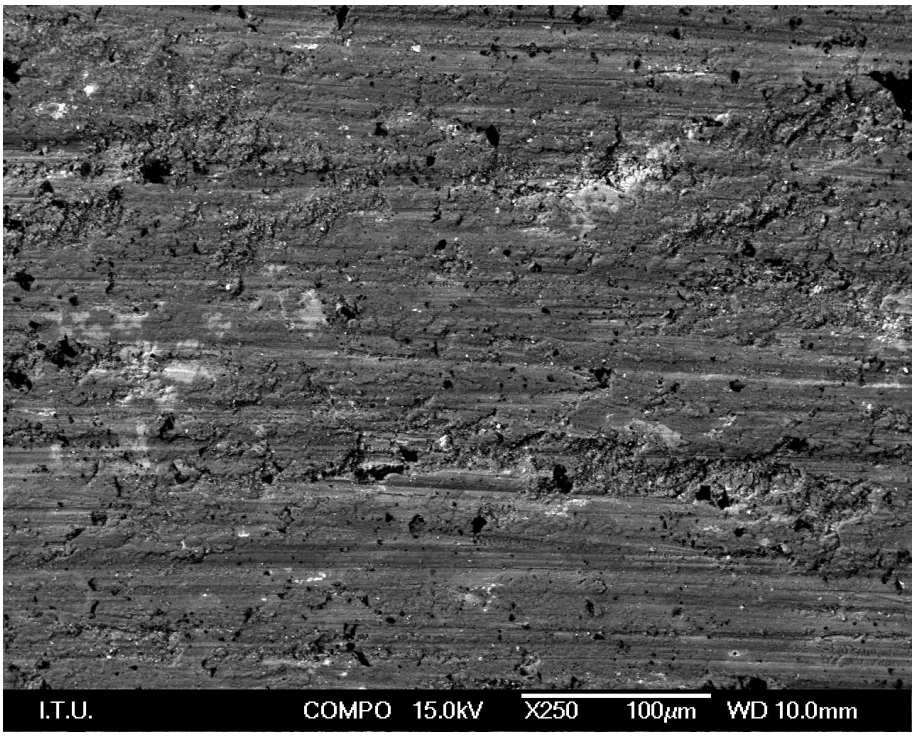


Şekil 6. 23 3 numaralı ağırlıkça %15 takviye B_4C partikül oranına sahip kompozit numunelere 3 cm/s kayma hızında 5 N yük altında 400 m mesafede yapılmış olan aşınma test grubundan alınmış FEG-SEM görüntüleri

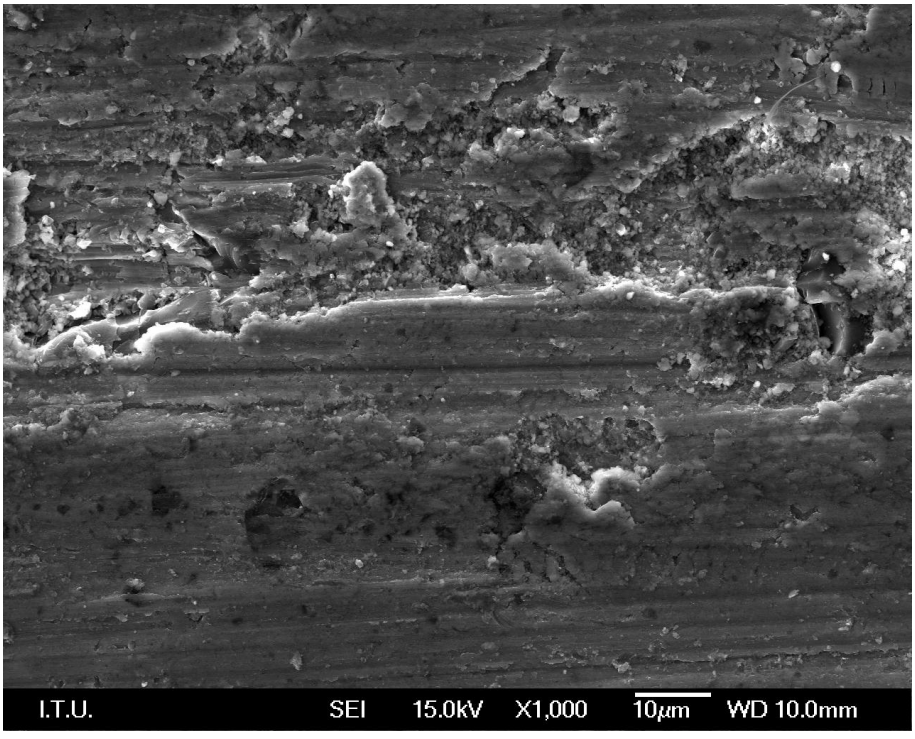
Şekil 6.24'de görülen FEG-SEM görüntüsü 3 numaralı aşınma test grubuna aittir. Şekil 6.24, şekil 6.23'de kırmızı ile işaretlenmiş bölgeye yakınlaşılarak elde edilmiştir. Bu görüntüde tabakalı aşınma izleri olan pulsu parçacıklar ve adheziv aşınma sebepli krater görülmektedir.

Şekil 6.25'de görülen FEG-SEM görüntüsü 3 numaralı aşınma test grubuna aittir. Bu görüntüde, adheziv aşınmanın izleri olan kraterler görülmektedir.

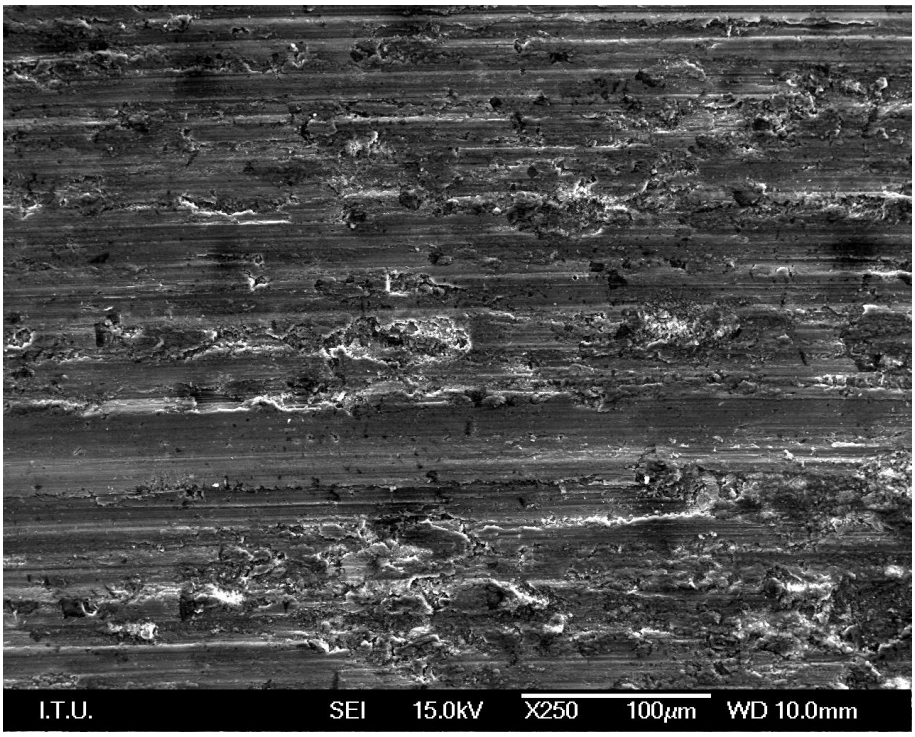
Şekil 6.26'da görülen FEG-SEM görüntüsü 3 numaralı aşınma test grubuna aittir. Bu görüntüde, kırmızı ile işaretlenmiş bölgede plastik deformasyon saptanmıştır. Tabakalı aşınmanın bir göstergesi olan çatlak görülmektedir.



Şekil 6. 24 3 numaralı ağırlıkça %15 takviye B_4C partikül oranına sahip kompozit numunelere 3 cm/s kayma hızında 5 N yük altında 400 m mesafede yapılmış olan aşınma test grubundan alınmış FEG-SEM görüntüleri



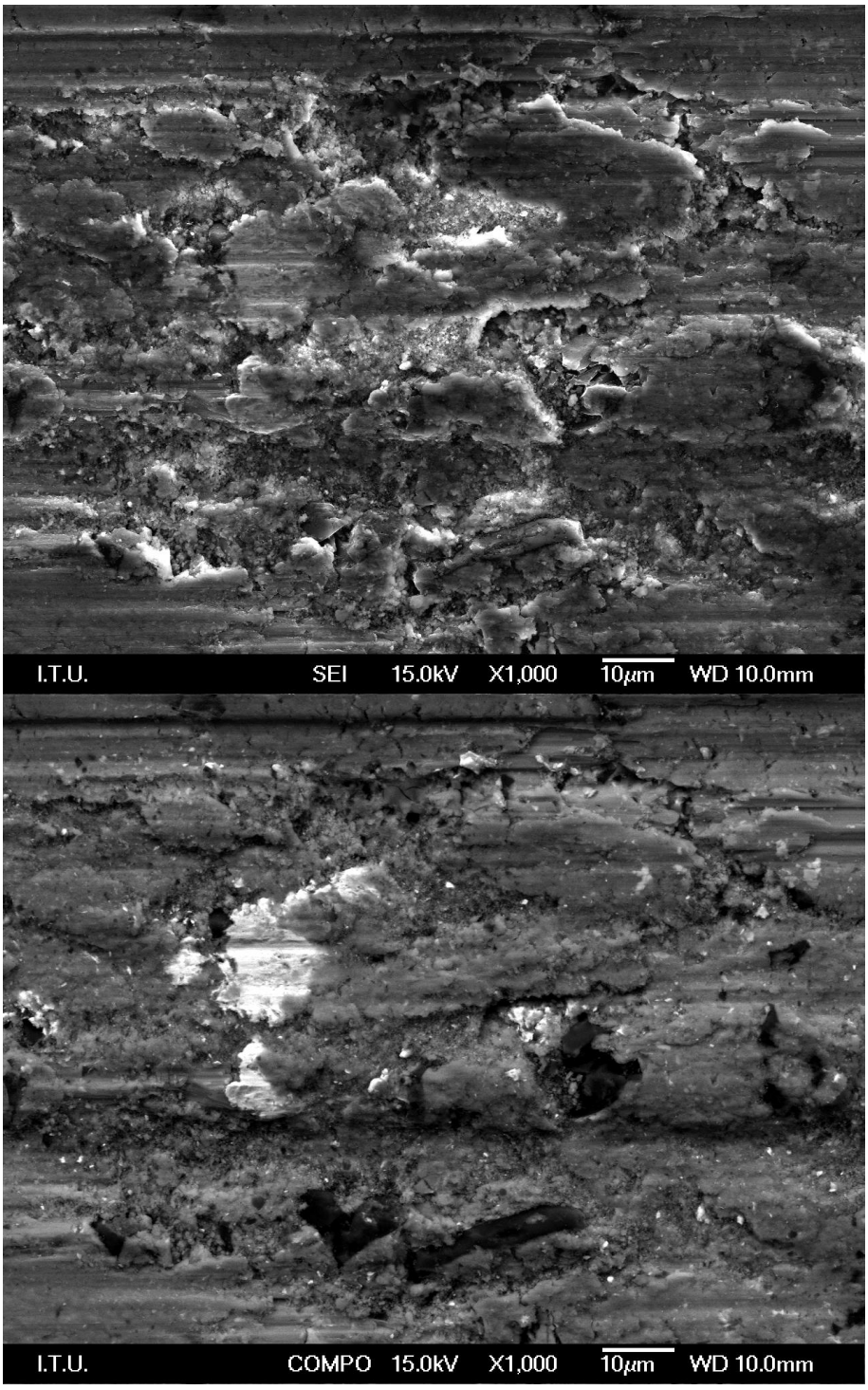
Şekil 6. 25 3 numaralı ağırlıkça %15 takviye B_4C partikül oranına sahip kompozit numunelere 3 cm/s kayma hızında 5 N yük altında 400 m mesafede yapılmış olan aşınma test grubundan alınmış FEG-SEM görüntüleri



Şekil 6. 26 4 numaralı ağırlıkça %15 takviye B_4C partikül oranına sahip kompozit numunelere 3 cm/s kayma hızında 3 N yük altında 400 m mesafede yapılmış olan aşınma test grubundan alınmış FEG-SEM görüntüleri

Şekil 6.27'de görülen FEG-SEM görüntüsü 4 numaralı aşınma test grubuna aittir. Bu görüntüde adheziv aşınma göstergesi olan kraterler mevcuttur.

Şekil 6.28'de görülen FEG-SEM görüntüleri 4 numaralı aşınma test grubuna aittir. Bu görüntülerde çıkıntı halindeki takviye partiküllerin etrafına toplanmış gevşek aşınma kırıntıları görülmektedir. Ayrıca plastik deformasyon bölgeleri ve çatlaklar görülmektedir.



Şekil 6. 27 4 numaralı ağırlıkça %15 takviye B_4C partikül oranına sahip kompozit numunelere 3 cm/s kayma hızında 3 N yük altında 400 m mesafede yapılmış olan aşınma test grubundan alınmış FEG-SEM görüntüleri

BÖLÜM 7

SONUÇLAR

Bu çalışmada; AlSi9Cu3Mg alüminyum alaşımı matris malzemesi olarak, ortalama partilül boyutu 32 µm olan B_4C partilülleri takviye malzemesi olarak kullanılarak ağırlıkça %15 ve %20 takviyeli kompozit malzemeler üretilmiş, üretilen kompozit malzemelerin karakterizasyonu yapılmış, daha sonrasında ise karşı malzeme olarak AISI 4140 çelik pim kullanılarak disk üzerinde pim aşınma testleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda açıklanmaktadır.

- Al-B_4C kompozitleri K_2TiF_6 flaksı kullanılarak, arayüzeyde sürekli bir reaksiyon tabakasının oluşması sağlanmış ve bu reaksiyon tabakası matris-takviye arasında ıslatma kabiliyetinin artmasına ve partikül ilave veriminin artmasına yardımcı olmuştur.
- Ağırlık oranı olarak %20 B_4C takviye partikülü içeren kompozit malzemenin 5 N yük altında 400 m mesafede yapılan aşınma testlerinde kayma hızının 3 cm/s'den 5 cm/s'ye çıkması ile aşınma miktarında ve sürtünme katsayısında azalma olduğu buna karşın karşı malzemede aşınma miktarının arttığı tespit edilmiştir.
- 5 N yük altında 3 cm/s kayma hızında 400 m mesafede yapılan aşınma testlerinde B_4C takviye ağırlık oranının %20'den %15'e azalması ile ortalama sürtünme katsayısının, aşınma miktarının ve karşı malzemenin aşınma miktarının azaldığı sonucuna ulaşılmıştır.

- Bütün test koşullarında aşınma çeşitleri olarak adhezif, abrazif ve tabakalı aşınma çeşitlerine rastlanmıştır.
- Ağırlıkça %15 B_4C takviye partikül içeren kompozit malzemeye 400 m mesafede 3 cm/s hız ile yapılan aşınma testlerinde uygulanan yükün 5N'dan 3N'a azalması ile numunenin aşınma miktarının azaldığı tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

[1] Viala, J. C., Bouix, J., Gonzales, G. ve Esnouf, C., (1997). "Chemical Reactivitiy of Aluminium with Boron Carbide", Journal of Materials Science, 32:4559-4573.

[2] Kennedy, A.R. ve Brampton, B., (2001). "The Reactive Wetting and Incorporation of B_4C Particles into Molten Aluminium", Scripta Materiala, 44:1077-1082

[3] Toptan, F., Kılıçarslan, A., Karaaslan, A. ve Kerti, I., (2009), "Ti İlavesi İle Üretilen Al-B_4C Kompozitlerinde Matris Takviye Arayüzeyinin Mikroyapısal Karakterizasyonu", 5. Uluslar arası İleri Teknolojiler Sempozyumu, 13-15 Mayıs 2009, Karabük

[4] Toptan, F., Çiğdem, M. ve Kerti, I., (2010), "Ti İlavesinin AlSi9Mg-B_4C_p Kompozitlerinde Islatılabilirliğe ve Partikül İlave Verimine Etkisi1", 15. Uluslararsı Metalurji ve Malzeme Kongresi, 11-13 Kasım 2010, İstanbul

[5] Tang, F., Wu, X., Ge, S., Ye, J., Zhu, H., Hagiwara, M. ve Schoenung, J., M., (2008), Dry Sliding Friction and Wear Properties of B_4C Particulate-Reinforced Al-5083 Matrix Composites, Wear, 264: 555-561

[6] Toptan, F., Kerti, I. ve Rocha, L.A., (2012), "Reciprocal Dry Sliding Wear Behaviour of B_4C_p Reinforced Aluminiumalloy Matrix Composites", Wear, 290–291, 74–85

[7] Vasiliev, V.V. ve Morozov, E.V., (2001). Mechanics and Analysis of Composites Materials, First Edition, Elsevier, Amsterdam

[8] Mazumdar, S.K., (2002). Composites Manufacturing, Third Edition, CRC Press, London

[9] ASM International Handbook Committee, (2001), ASM Metals Handbook, Composites, 21

[10] Ekinci, V.Ş., (2007). Alümina Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozit Malzeme Üretimi Ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara

[11] Chawla, N. ve Chawla, K.K., (2006). Metal Matrix Composites, First Edition, Springer, New York

[12] Deuis, R.L., Subramanian, C. ve Yellup J.M., (1997). "Dry Sliding Wear Of Aluminium Composites - A Review", Composites Science and Technology, 57:415-435.

[13] Ye, J., He, J. ve Schoenung, J.M., (2006). "Cryomilling for the Fabrication of a Particulate B_4C Reinforced Al Nanocomposite: Part I. Effects of Process Conditions on Structure", Metallurgical and Materials Transactions, 37A:3099-3109.

[14] Toptan, F. ve Kerti, I., (2005). "B_4C ile Takviye Edilen Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Döküm Yöntemi ile Üretimi", 12. Uluslararası Metalurji-Malzeme Kongresi, 28 Eylül-02 Ekim 2005, İstanbul.

[15] Toptan, F., (2011). Alüminyum Matrisli B_4C Partikül Takviyeli Aşınma Direnci Yüksek Kompozit Malzeme Üretimi, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[16] Stachowiak, G. W. ve Batchelor, A. W., (2011), Engineering Tribology, 3, Butterworth-Heinemann, Oxford.

[17] ASM International Handbook Committee, (1992), ASM Handbook Friction, Lubrication and Wear Technology, 18.

[18] Ipek, R., (2005), "Adhesive Wear Behaviour of B_4C and SiC Reinforced 4147 Al Matrix Composites (Al/B_4C-Al/SiC), Journals of Materials Processing Technology, 162-163: 71-75

[19] Rao, R. N, Das, S., Mondal, D. P. ve Dixit, G., (2009), "Dry Sliding Wear Behaviour of Cast High Strength Aluminium Alloy (Al-Zn-Mg) and Hard Particle Composites", Wear, 267, 1688-1695.

[20] Rao, R.N. ve Das, S., (2010), "Effect of matrix alloy and influence of SiC particle on the sliding wear characteristics of aluminium alloy composites", Materials and Design, 31, 1200–1207

[21] Hemanth, J., (2005), Tribological behavior of cryogenically treated B_4Cp/Al–12% Si composites, Wear, 258, 1732–1744

[22] Lashgari, H.R., Sufizadeh, A.R. ve Emamy, M., (2010), The effect of strontium on the microstructure and wear properties of A356–10%B_4C cast composites, Materials and Design, 31, 2187–2195

[23] Toptan, F., (2006). "Al-B_4C Kompozitlerinin Fren Diski Olarak Kullanılabilirliğine Genel Bir Bakış", Metalurji, 145:11-18.

[24] Kerti, I. ve Toptan, F., (2006), "Döküm Yöntemi ile Üretilen Al-B_4C Kompozitlerinin Mikroyapı ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi", 3. Uluslararası Bor Sempozyumu Bildiriler Kitabı", 02-04 Kasım 2006, Ankara.

[25] Toptan, F., Kılıçarslan, A., Karaaslan, A., Çiğdem, M. ve Kerti, I., "Al-B_4C Kompozitlerinin Döküm Yolu ile Üretiminde Takviye Partikül İlavesi Koşullarının Optimizasyonu", 14. Uluslararsı Metalurji ve Malzeme Kongresi, 16-18 Kasım 2008, İstanbul

[26] Kerti, I. ve Toptan. F., 2008, "Microstructural Variations in Cast B_4C-reinforced Aluminium Matrix Composites (AMCs)", Materials Letters, 62, 1215–1218

[27] Toptan, F., Kilicarslan, A. ve Kerti, I., (2009), "The Effect of Ti Addition on the Properties of Al-B_4C Interface: A Microstructural Study", MATERIAIS 2009, 5-8 April 2009, Lisbon

[28] Toptan, F., Kilicarslan, A., Karaaslan, A., Cigdem, M. ve Kerti, I., (2010), "Processing and microstructural characterisation of AA 1070 and AA 6063 matrix B_4C_p reinforced composites", Materials and Design, 31, 87–91

[29] Toptan, F., Kerti, I., Sagin, A., Cigdem, M., Daglilar, S. ve Yuksel, F., (2011), "Microstructural properties and wear behaviour of AlSi9Mg matrix B_4C_p reinforced composites", The Minerals, Metals & Materials Society,

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı	:Fatih YÜKSEL
Doğum Tarihi ve Yeri	:20.01.1986 / ÜSKÜDAR
Yabancı Dili	:İngilizce
E-posta	:fatihyksl@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	**Alan**	**Okul/Üniversite**	**Mezuniyet Yılı**
Lisans	Metalurji ve Malzeme Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2009
Lise	Fen Bilimleri	Ümraniye Anadolu Lisesi	2004

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	**Firma/Kurum**	**Görevi**
2012	K.D.S. Pres Döküm Sanayi ve Ticaret A.Ş.	Kalite Mühendisi
2014	K.D.S. Pres Döküm Sanayi ve Ticaret A.Ş.	Proje Mühendisi

YAYINLARI

Makale

1. Toptan, F., Kerti, I., Sagin, A., Cigdem, M., Daglilar, S. ve Yuksel, F., (2011), "Microstructural properties and wear behaviour of AlSi9Mg matrix B_4C_p reinforced composites", The Minerals, Metals & Materials Society,

Bildiri

2. Toptan, F., Yuksel, F. ve Kerti, I., (2010), Production and characterisation of AlSi9Mg matrix B4C particulate reinforced composites, 11th International Symposium on Multiscale, Multifunctional and Functionally Graded Materials, 26-29 September 2010, Guimarães, Portugal