

# Al-B<sub>4</sub>C Kompozitlerinin Fren Diski Olarak Kullanılabilirliğine Genel Bir Bakış

Fatih TOPTAN, Filiz KUMDALI, Işıl KERTİ  
Yıldız Teknik Üniversitesi

## ÖZET

Son yirmi yılda alüminyum matrisli kompozitler (Al-MMK), otomotiv endüstrisinde, hafiflikleri, yüksek mukavemetleri, yüksek elastiklik modülleri ve üstün aşınma dayanımları sebebiyle geniş ölçüde araştırılmaktadır. Al-MMK'lerin potansiyel uygulamalarından biri de fren diskleridir. Bu yazıda, Al-B<sub>4</sub>C kompozitlerinin fren diskisi olarak kullanılabilirliği ve bu malzemelerin üretiminde karşılaşılan, B<sub>4</sub>C (bor karbür) ile sıvı alüminyum metali arasındaki ıslatma problemi incelenecektir.

## Al-B<sub>4</sub>C Composites as a Brake Disc Material – An Overview

### ABSTRACT

During the last two decades, aluminium matrix composites (Al-MMCs) have been widely investigated in automotive industry due to their lightweight, high specific strength, high modulus and good wear resistance. One of the potential applications for Al-MMCs is brake discs. This paper investigates the use of Al-B<sub>4</sub>C composites as a brake disc material and the wetting problem between B<sub>4</sub>C (boron carbide) and liquid aluminium metal.

### 1. Giriş

Alüminyum alaşımları; düşük yoğunlukları, çökme sertleşmesi ile dayanımlarını artırabilme kabiliyetleri, yüksek korozyon dayanımları, yüksek ısı ve elektrik iletkenlikleri, kolay işlenebilirlikleri ve tedarik kolaylıkları sebebiyle, rekabet halinde olduğu malzemelere kıyasla avantaj sağlayarak gelişmiş uygulamalarda kullanılır hale gelmiştir [1,2]. Alüminyum parçalar, pek çok otomobilde pistonlar, silindir başlıkları, motor blokları, karbüratörler gibi çeşitli yerlerde kullanılmaktadır [3].

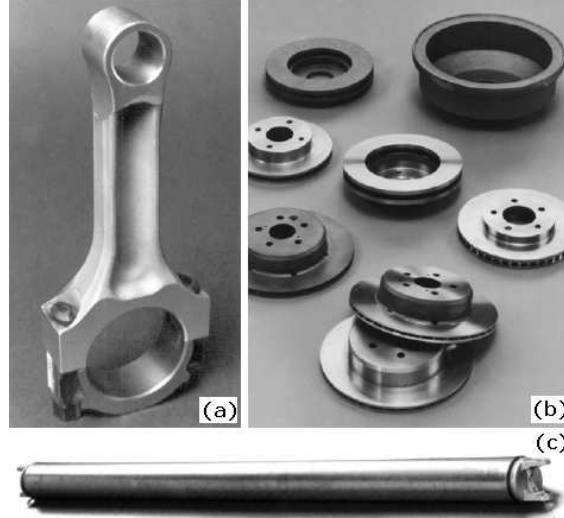
Otomobillerde her 100 kg'lık ağırlık düşüşü, 100 km başına 0,6 litre yakıt tasarrufunu beraberinde getirmektedir. Avrupa Alüminyum Birliği'nin (European Aluminium Association, EAA) verilerine göre, orta boyutta bir otomobilde (1.400 kg) alüminyum kullanılarak 300 kg ağırlık tasarrufu yapılabilir ki bu toplam ağırlığın %20'sine karşılık gelmektedir. Böylece, bir otomobilin kullanım ömrü boyunca yaptığı yakıt tasarrufu 3.000 litreye kadar çıkabilirken, çevreye yaydığı emisyonlar da % 20 oranında azalabilmektedir [4].

Otomotiv endüstrisinin hafif malzeme arayışlarında, alüminyumun eksiklikleri; mekanik dirençleri, yüksek rijitlikleri, matris malzemesinin yoğunluk değerine yakın düşük yoğunlukları (alüminyum için 20°C'da 2.70 g/cm<sup>3</sup> [5]), matris malzemesi olarak kullanılan metallere göre daha yüksek sıcaklıklarda kullanılabilmeleri ve iyi aşınma dirençleri sebebiyle metal matrisli kompozitler (MMK) kullanılarak giderilmeye çalışılmaktadır [6].

### 2. Alüminyum Matrisli Kompozitler (Al-MMK)

Al-MMK'lerin, öne çıkan üstün özellikleri; yüksek elastiklik modülü, yüksek mukavemet, yüksek yorulma direnci, yüksek aşınma dayanımı, yüksek rijitlik, yüksek sıcaklıkta kararlılık, yüksek mukavemet/ağırlık oranı, düşük ısıl genleşme katsayısı ve düşük yoğunluktur [7-15].

Bu özellikleriyle Al-MMK'ler özellikle havacılık, uzay ve otomotiv gibi alanlarda büyük ilgi görmektedir [16]. Al-MMK'ler son yıllarda özellikle hafiflikleri, yüksek mukavemetleri, düşük ısı genleşme katsayıları ve iyi aşınma dirençleri gibi özellikleriyle otomobillerde motor pistonu, silindir gömleği, fren diski/kampanası gibi uygulamalarda kullanım alanı bulmaya başlamıştır (Şekil 1) [17].



Şekil 1. Al-MMK (a) piston kolu prototipi, (b) fren parçaları, (c) kardan mili [18]

## 2.1 Al-MMK'lerin Üretim Yöntemleri

Literatürde, partikül takviyeli Al-MMK'lerin üretim yöntemleri için yapılan gruplandırmalarda, yöntemler, katı ve sıvı durum prosesleri olarak gruplandırılırken [1, 2, 15, 19-24], bazı araştırmacılar, in-situ (yerinde çekirdeklenme) [2], püskürtme (sprey) [1,2, 24, 25], PVD (fiziksel buhar biriktirme) [20, 24] gibi yöntemleri ayrı birer başlık altında incelemişlerdir. Bu başlıklar altında pek çok yöntem incelenirken, ön plana çıkan ya da daha çok kullanılan yöntemler olarak infiltrasyon, sıkıştırma döküm (squeeze casting), karıştırmalı döküm (stir casting) gibi sıvı durum prosesleri [12, 22, 26, 27,], toz metalurjisi yöntemi [8, 28] ve püskürterek biriktirme (spray deposition) yöntemleri [8, 27] olarak görülmektedir.

Katı durum proseslerinde içinde en yaygın yöntem olan toz metalurjisi (T/M) yöntemi, kabaca, tozların karıştırılması, preslenmesi ve sinterlenmesi kademelerini içerir. Düşük sıcaklıklarda işlem yapılabilmesi, matris/takviye arasındaki istenmeyen fazların oluşumunun aza inmesi, takviye tozlarının üniform dağılım göstermesi, segregasyon ve porozite gibi katılaşma kusurlarının oluşmaması, son ölçülerde parça üretimini mümkün kılması gibi özellikler T/M yönteminin avantajları olarak öne çıkmaktadır [2, 21, 22]. Bu avantajların yanında, yöntemin, döküm, infiltrasyon gibi yöntemlere göre yüksek maliyetli olması, yüksek yatırım maliyeti ve uzun işlem süreleri gerektirmesi yöntemin dezavantajları olarak gösterilmektedir [2, 29,30].

Sıvı durum prosesleri genellikle, döküm yöntemlerinde olduğu gibi takviyenin sıvı alüminyuma ilavesi ya da vakum infiltrasyonunda olduğu gibi bir preforma infiltre edilmesi şeklinde uygulanmaktadır. Bu yöntemler basit ve düşük maliyetli olmaları, karmaşık üç boyutlu parçaların üretimini olanaklı kılmaları açısından oldukça caziptir. Temel dökümhane teknikleri, süreksiz takviyeli alüminyum kompozitlerinin üretimine kolaylıkla uyarlanabilir [2, 23, 25, 29]. Bu avantajlarına karşın, matris/takviye arayüzeyinde istenmeyen fazların oluşabilmesi ya da bağlanmanın istenilen düzeyde oluşmaması, porozite gibi döküm

kusurlarının oluşabilmesi, sıvı durum tekniklerinin dezavantajları olarak görülmektedir [2, 23, 26].

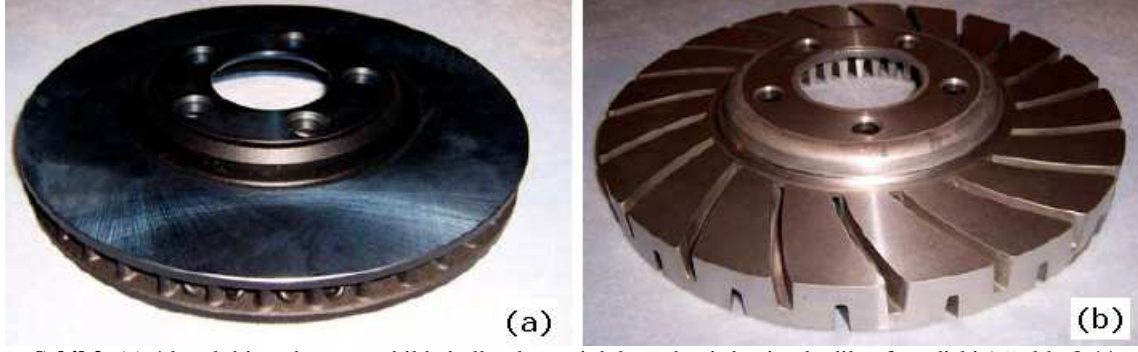
Sıvı durum prosesleri arasında, ergiyik metal karıştırma ya da karıştırmalı döküm, sıkıştırma ya da dövme döküm, basınçlı döküm, santrifüj döküm gibi yöntemler, özellikle yaygın döküm pratikleriyle yapılabildiğinden ve nispeten düşük maliyetlerde olmalarından dolayı ön plana çıkmaktadır [2, 15, 22, 26, 31-33].

Katılma zamanının kısa olması, döküm hatalarının miktarı az olması ve yüksek takviye oranlarına çıkılabilmesine izin vermesi, basınçlı döküm yönteminin, öne çıkan özellikleridir [2]. Öne çıkan bir diğer yöntem de sıkıştırma döküm yöntemidir. Döküm boşluklarının giderilebilmesi, hızlı bir yöntem olması, farklı takviye malzemeleriyle rahatlıkla uygulanabilmesi yöntemin avantajları olarak görülmektedir. Bu yöntem, otomotiv sektöründe halen uygulanmaktadır;. Toyota bu yöntemle piston, Honda ise silindir gömleği üretmiştir [2, 21].

Al-MMK'lerin sıvı durum üretim tekniklerinde en çok kullanılan yöntemlerden bir diğeri de karıştırmalı döküm yöntemidir. Ergiyik karıştırma teknikleri, tek başına 'karıştırmalı döküm' olarak bir yöntemde uygulanabileceği gibi, diğer yöntemlerden önce de uygulanabilmektedir [2,31]. Malzeme ve koşul seçiminde esnek olması, geleneksel döküm teknikleriyle uygulanabilir olması, düşük maliyetli olması gibi avantajlarıyla karıştırmalı döküm ticari olarak uzunca bir süredir uygulanmaktadır [2, 15, 22, 26, 31]. Ne var ki bu yöntem tek başına kullanıldığında, partiküllerin homojen bir şekilde dağılmaması, matris malzemesinin takviye partiküllerini etkili bir şekilde ıslatamaması, arayüzey reaksiyonlarının oluşması ve buna bağlı olarak matris-takviye arasındaki bağın istenilen seviyede oluşmaması, porozite gibi döküm kusurlarının oluşması gibi istenmeyen durumlarla karşılaşılabilir [33].

### **3. Al-MMK'lerin Fren Diski Olarak Kullanılabilirliği**

Günümüzde disk frenler, otomobil ve tren gibi araçları durdurmada en yaygın ekipmandır [34]. Otomobillerde ağırlığı azaltma yönündeki çalışmalarda, hedef alınan parçalardan biri de fren sistemleridir. Fren sistemleri halen epey ağır malzemelerden imal edilmektedir. Otomobillerde fren diski malzemesi olarak genellikle gri dökme demir kullanılmaktadır. Son yıllarda üreticiler, binek otomobiller için daha hafif ve daha üstün özelliklere sahip olan Al-MMK fren diski ve kampanaları üretmeye başlamışlardır. Al-MMK'ler, dökme demire göre oldukça hafif olmaları (ağırlık kazancının % 45 ila % 61 arasında olduğu rapor edilmiştir [3, 35-39]), yüksek ısıl iletkenlikleri, spesifik ısıları ve dökme demire göre oldukça üstün olan mekanik özellikleri ve aşınma dirençleriyle, fren sistemlerinde disk malzemesi olarak cazip hale gelmektedir (Şekil 2) [37, 40, 41].



**Şekil 2.** (a) 4 kapılı bir sedan otomobilde kullanılan, gri dökme demirden imal edilen fren diski (ağırlık: 8,44 kg.) ve (b) aynı otomobil için özel olarak tasarlanan, Al-SiC kompozit malzemeden imal edilen fren diski prototipi (ağırlık: 3,32 kg) [42]

Ne var ki, Al-MMK malzemelerin fren sistemlerinde yaygın bir şekilde kullanımının önünde bazı engeller bulunmaktadır. Öncelikle, bu malzemenin üretiminde karşılaşılan, matris malzeme ile takviye malzemesi arasındaki 'ıslatma' sorununa, en azından bazı takviye malzemeleri için, literatürde, etkili bir çözüm getirilemediği görülmektedir. Bu konuya, ilerleyen bölümlerde değinilecektir. Diğer bir engel ise maliyet sorunu olarak gösterilmektedir [35, 43]. Ancak, Al-MMK'lerin, fren diski olarak yaygın bir şekilde kullanılabilirliğinin önüne maliyet engelini koyan araştırmacılara karşı görüşte bulunan araştırmacılar da bulunmaktadır. Al-MMK konusunda araştırmalar yapan Warren H. Hunt, Jr. ve Darrell Herling; Varuzan Kevorkijan'ın, Al-MMK'lerin, fren diskleri için dökme demir muadilleriyle maliyet yönünden rekabet edebilir olmadığı yönündeki ifadeleri kullandığı makalesine [35], aynı dergiye gönderdiği cevap yazısında [39] bunun aksi görüşler ileri sürmektedir. Hunt ve Herling, ABD Enerji Bakanlığı'nın 'Freedom-CAR' programı çerçevesinde Pacific Northwest National Laboratory'de (PNNL) yürütülen çalışmalar sonucunda, uygun özellikte Al-MMK fren diskini düşük maliyetle üretebildiklerini belirtmektedir. Hunt ve Herling, bu konudaki çalışmalarına, direkt sıkıştırma döküm yöntemi ile devam ettiklerini belirtmektedir

Maliyet konusunda bir ilave de Al-B<sub>4</sub>C malzemeler için yapmak gerekebilir. B<sub>4</sub>C tozlarının maliyetinin, SiC veya Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> gibi takviye malzemelerine kıyasla daha yüksek olması sebebiyle B<sub>4</sub>C takviyeli Al-MMK'ler üzerinde yapılan araştırmaların nispeten sınırlı kaldığı belirtilmektedir [44]. Türkiye'nin büyük bor rezervleri düşünüldüğünde, bor karbürün de Türkiye'de üretilebilmesiyle, bu dezavantaj hem maliyet hem de bu malzemelerin üretimi yönündeki bilgi kazanımlarıyla Türkiye için avantaja dönüşebileceği düşünülmektedir.

#### 4. Al-B<sub>4</sub>C Kompozitleri

Al-MMK'lerde takviye olarak Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiC, TiC ve B<sub>4</sub>C gibi malzemeler kullanılmaktadır [7, 9, 17, 27, 45, 46]. Bu takviyeler arasında B<sub>4</sub>C, etkili bir takviye malzemesinden beklenen yüksek sertlik, düşük yoğunluk (2510 kg m<sup>-3</sup>), yüksek rijitlik, iyi değerlerdeki ısıl kararlılık ve kimyasal inertliğiyle, alüminyum ve alaşımları için cazip bir takviye malzemesidir. B<sub>4</sub>C'ün bu özelliklerini Al-MMK'lerin diğer üstün özellikleriyle birleştiren Al-B<sub>4</sub>C kompozitleri, özellikle fren diski gibi aşınmaya dayanıklı uygulamalarda kullanım için araştırılan bir malzemedir [41, 47-49].

Al-B<sub>4</sub>C kompozitleri, üstün özellikler sunmasına karşın, yaygın olarak kullanılmasının önünde bazı engeller bulunmaktadır. Bu engellerden biri ekonomik, diğeri ise teknik engellerdir: B<sub>4</sub>C tozlarının maliyetinin, SiC veya Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> gibi takviye malzemelerine kıyasla daha yüksek olması, B<sub>4</sub>C takviyeli Al-MMK'ler üzerinde yapılan araştırmaların nispeten

sınırlı kalmasına yol açmaktadır [44]. Al-MMK'lerin düşük sıcaklıklarda uygulanan düşük maliyetli üretim yöntemleriyle üretilmesinin önünde de ıslatılabilirlik engeli bulunmaktadır. 1000°C'in altındaki sıcaklıklarda, alüminyumun B<sub>4</sub>C üzerindeki ıslatılabilirliği düşük seviyelerdedir [50].

#### 4.1 Al-B<sub>4</sub>C Arayüzeyi

Al-B<sub>4</sub>C kompozitlerinin üretiminde, diğer pek çok Al-MMK'lerde olduğu gibi, karşılaşılan temel sorun, özellikle ağırlık %10'un üzerindeki takviye oranları ve 1100°C ve altı gibi düşük sıcaklıklar için alüminyum metalinin takviye malzemesi olan bor karbür yüzeyini, etkili bağlanmayı sağlayabilecek ve bunun sonucunda kompozitin istenilen mekanik özelliklere sahip olmasını sağlayacak şekilde ıslatamamasıdır.

Al-MMK'lerin mukavemeti, matris ile takviye malzemesi arasındaki bağın kuvvetine bağlıdır. Güçlü bir arayüzey, yükün takviye malzemesinden matris malzemesine iletilmesini ve matris malzemesinde dağıtılmasını sağlar. Rijitlik, kırılma tokluğu, yorulma, ısıl genleşme katsayısı, ısıl iletkenlik ve sürünme gibi özellikler de arayüzeyin doğasından etkilenmektedirler [27]. Al-MMK'lerde, döküm sırasında partikül takviyeleriyle sıvı alüminyum metali arasında istenilen bağlanmanın oluşabilmesi için temel koşul, matris metalinin takviye partiküllerini iyi bir şekilde ıslatabilmesidir [17, 51]. Takviye partiküllerinin yüzeylerinin ergiyik metal tarafından ıslatılması, bir MMK tasarlarırken düşünülmesi gereken en önemli noktadır [52].

Al-MMK'lerde arayüzeyde oluşan bağlar temel olarak mekanik bağ ve kimyasal bağ olmak üzere iki ana grupta incelenmektedir. Mekanik bağlanma, matris ile takviyenin, kenetlenmesiyle, kimyasal etkilerin yokluğunda meydana gelir ve bu fiber takviyeli kompozitlerin üretiminde önem taşır. Kimyasal bağlanma ise, matris ve takviyenin atomlarının direkt kontak kurmasıyla oluşur ve elektronların değiş tokuşuyla sonuçlanır. Bu türden bir bağlanma metalik, iyonik ya da kovalent olabilir. Metalik bağ, diğerlerinden daha sünek olduğundan, MMK'lerde istenen bağıdır [27].

Al-MMK'lerin üretiminde, matris/takviye arayüzeyinde oluşan reaksiyonların takibi son derece önemlidir. Al-B-C üçlü sisteminde, en az dokuz faz belirlenmiştir. Bunlar, seramik fazların metal matris tarafından ıslatılabilirliğini artırmaya katkıda bulunabilirken, arayüzey mukavemetini olumsuz şekilde etkileyecek reaksiyon ürünlerinin oluşmasına da sebep olabilir. Bu yüzden, Al-B<sub>4</sub>C kompozitlerinin üretimi sırasında, proses şartlarını, istenmeyen fazların oluşumunu engelleyecek şekilde düzenlemek oldukça büyük önem taşımaktadır [2, 53, 54].

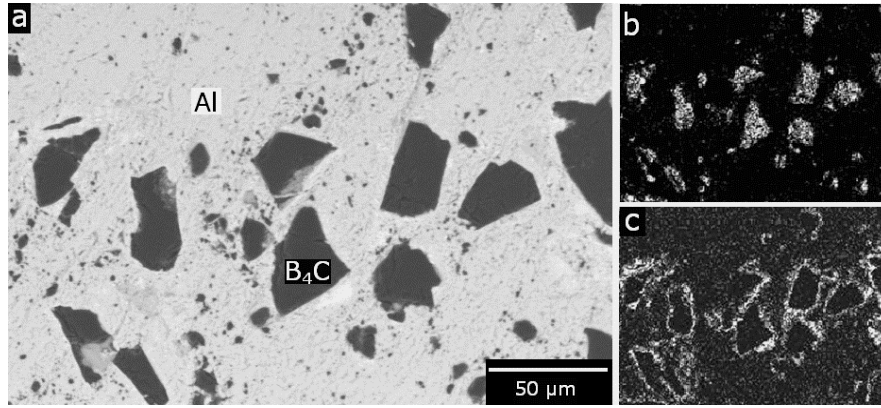
Yükselen sıcaklıklar, ıslanmaya olumlu etkide bulursa da, işlem maliyetlerini yükseltmektedir. Buna karşılık, 1100°C'in altındaki sıcaklıklarda Al ile B<sub>4</sub>C arasındaki düşük ıslanma sebebiyle, bu sıcaklıklarda Al-B<sub>4</sub>C kompozitleri, parçacıkları sıvı faz içinde karıştırma yöntemiyle üretimi zordur. Bu zorluğu aşmak; partiküllerin ıslatılabilirliğini artırmak ve alüminyum ile birleşebilirliğini kuvvetlendirmek için genellikle partiküllerin ısıl işleme tabi tutulması veya kaplanması gibi yöntemlere başvurulmaktadır [2, 47].

Örneğin, B<sub>4</sub>C partiküllerinin titanyum tozu ile kaplanması ve reaksiyona sokulması, kompleks titanyum borür ve titanyum karbür yüzey tabakalarının oluşmasıyla sonuçlanır. Bu reaksiyon ürünleri, bağlardaki metalik karakteri artırarak bağlanmayı kuvvetlendirir [47, 50]. Kennedy ve Brampton (2000), bu amaçla, K-Al-Ti-F flaksı kullanarak Al-B<sub>4</sub>C kompozitlerini düşük sıcaklıklarda üretmiş ve ıslatılabilirlik açısından olumlu sonuçlar almışlardır [47]. Ne var ki,

bu çalışmada, partikül oranı ağı. %5'tir ve bu da, pek çok uygulama için istenilen mekanik özelliklere ulaşılmasına yeterli olmayacak bir partikül oranıdır.

Shorowordi vd. (2003) ise, B<sub>4</sub>C partiküllerine ısı işlem uygulayarak ve 30 dk. gibi nispeten yüksek karıştırma süreleri kullanarak Al-B<sub>4</sub>C kompozitlerini karıştırmalı döküm yöntemiyle üretmiştir. Shorowordi vd., aynı yöntemin uygulandığı Al-SiC ve Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kompozitlerine göre Al-B<sub>4</sub>C kompozitleri için daha kuvvetli bir arayüzey elde ettiklerini ve Al-B<sub>4</sub>C yüzeyinde reaksiyon ürünü gözlemediklerini rapor etmişlerdir [55]. Ne var ki, bu çalışmada da B<sub>4</sub>C takviye oranı hacmen %13'tedir.

Kerti ve Toptan (2005), Al-B<sub>4</sub>C kompozitleri, K<sub>2</sub>TiF<sub>6</sub> flaksı kullanılarak, 1100°C ve altındaki sıcaklıklarda döküm yöntemi kullanılarak üretmiştir [46]. İlerleyen çalışmalar sonucunda, ağı. %5 ve %10 takviye oranlarında, ıslatma açısından olumlu sonuçlar alındığı, ne var ki ağı. %15 takviye oranına çıkıldığında, matris/takviye arayüzeyinde ıslanmanın yeterli düzeylerde kalmadığı görülmüştür (Şekil 3) [56]. Hâlbuki aşınma direncinin yüksek olması için, partikül takviye oranının yeterli derecede yüksek olması gerekmektedir [57].



Şekil 3. 22–59 μm B<sub>4</sub>C tane boyutuna ve ağı. % 10 takviye oranında B<sub>4</sub>C ile takviye edilen Al-MMK'nin (a) SEM görüntüsü ve bu görüntüye ait (b) B ve (c) Ti elementel haritaları [56]

## 5. Sonuç

Otomotiv sektörünün, geleneksel malzemeler yerine hafif malzemeleri geçirme arayışlarında üzerinde en çok çalışılan yerlerden biri de fren sistemleridir. Al-B<sub>4</sub>C kompozitleri, fren sistemleri için ümit verici bir malzemedir. Ne var ki, Al ile B<sub>4</sub>C arasında düşük sıcaklıklarda ıslatılabilirliğin düşük olması, bu malzemenin düşük sıcaklıklarda, yüksek hacim oranlarında ve düşük maliyetlerde üretimini güçleştirmektedir. Literatürde yapılan çalışmalara bakıldığında, düşük maliyet sunan yöntemlerin takviye hacim oranlarının, bu malzemenin fren diski olarak kullanılabilmesine imkân verecek oranlara ulaşamadığı görülmektedir. Bu da, mevcut üretim tekniklerine ya da ön işlemlere ilaveten, düşük sıcaklıklarda Al ile B<sub>4</sub>C arasındaki ıslatılabilirliği artırabilecek yeni tekniklerin geliştirilmesine ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir.

## Kaynaklar

[1] Cayron, C., TEM Study of interfacial reactions and precipitation mechanisms in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> short fiber or high volume fraction SiC particle reinforced Al-4Cu-1Mg-0.5 Ag squeeze-cast composites, Lausanne, EPFL, 2000, <http://cimewww.epfl.ch/people/cayron/Fichiers/thesebook-chap2.pdf> (15.05.2002)

[2] Froyen, L., Verlinden, B., Aluminium Matrix Composites Materials, TALAT Lecture 1402, European Aluminium Association, 1994, <http://www.eaa.net/education/TALAT/lectures/1402.pdf> (16.11.2005)

- [3] Huang, S. X., Paxton, K., A Macrocomposite Al Brake Rotor for Reduced Weight and Improved Performance, JOM, 50 [8] 26-28 (1998).
- [4] EAA (European Aluminium Association), Aluminium in the Automotive Industry, <http://www.eaa.net/downloads/auto.pdf> (12.08.2006)
- [5] <http://www.world-aluminium.org/production/processing/properties.html> (20.07.2006)
- [6] Sallit, I., Richard, C., Adam, R., Robbe-Valloire, F., Characterization Methodology of a Tribological Couple: Metal Matrix Composite/Brake Pads, MATERIALS CHARACTERIZATION 40:169–188 (1998)
- [7] Hunt, Jr., W. H., Herling, D. R., Aluminum Metal Matrix Composites, <http://www.colorado.edu/AcademicAffairs/engineering/ASEN/asen4012/MaterialsPapers/Aluminum%20MMC.pdf> (19.12.2005)
- [8] Yu, X. X., Lee, W. B., The design and fabrication of an alumina reinforced aluminum composite material, Composites: Part A 31 (2000) 245–258
- [9] Min, Z., Gaohui, W., Zuoyong, D., Longtao, J., TiB<sub>2</sub>P/Al composite fabricated by squeeze casting technology, Materials Science and Engineering A 374 (2004) 303–306
- [10] Bedir, F., Alüminyum Kompozitlerinin Üretimi, Karakteristik Özellikleri ve Endüstriyel Uygulamaları, Mühendis ve Makina Cilt : 47 Sayı: 554 s. 28-35
- [11] Cavaliere, P., Mechanical properties of Friction Stir Processed 2618/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/20p metal matrix composite, Composites: Part A 36 (2005) 1657–1665
- [12] Bindumadhavan, P. N., Wah, H. K., Prabhakar, O., Assessment of particle–matrix debonding in particulate metal matrix composites using ultrasonic velocity measurements, Materials Science and Engineering A323 (2002) 42–51
- [13] Zhou, Y., Zhang, J., North, T. H., Wang, Z., The mechanical properties of friction welded aluminium-based metal–matrix composite materials, Journal of Materials Science 32 (1997) 3883-3889
- [14] Matsuda, N., Kikuchi, K., Ishikawa, S., Saitoh, M., The effect of atmosphere on the creep deformation of a particle reinforced aluminum alloy matrix composites, Materials Science and Engineering A, Volumes 387-389, 15 December 2004, Pages 643-646
- [15] Surappa, M. K., Aluminium Matrix Composites: Challenges and Opportunities. Sadhana 28(1-2) (2003) pp. 319-334
- [16] Tsunemichi, I., JianFu, M., Shangli, D., Ichinori, S., Naobumi, S., Gilles, L., High strain rate superplasticity of TiC particulate reinforced 2014 aluminum alloy composites, Materials Science and Engineering A, 364 (2004) 281-286
- [17] Shorowordi, K. M., Laoui, T., Haseeb, A. S. M. A., Celis, J. P., Froyen, L., Microstructure and interface characteristics of B<sub>4</sub>C, SiC and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> reinforced Al matrix composites: a comparative study, Journal of Materials Processing Technology 142 (2003) 738-743
- [18] Hunt, Jr., W.H., Miracle, D.B., Automotive Applications of Metal-Matrix Composites, Composites, Volume 21, ASM Handbook , Edited by D.B. Miracle and S.L. Donaldson, 2001, p 1029-1032
- [19] Srivatsan, T.S., Ibrahim, I.A., Mohamed, F.A., Lavernia, E.J., Processing Techniques For Particulate-reinforced Metal Aluminium Matrix Composites, Journal of Materials Science, 25 (1991) 5965-5978
- [20] Mortensen, A., Marchi, C.S., Degischer, H.P., Glossary of Terms specific to Metal Matrix Composites, MMC-Assess Consortium, 2000, [http://mmc-assess.tuwien.ac.at/public/v1\\_glossary.pdf](http://mmc-assess.tuwien.ac.at/public/v1_glossary.pdf) (01.05.2006)

- [21] Technologies Research Corporation (TRC) and Aluminum Metal Matrix Composites Consortium (ALMMC Consortium), Aluminum Metal Matrix Composites Technology Roadmap, Michigan USA, 2002, <http://www.almmc.com/ALMMCRoadmapMay2002.pdf> (06.04.2006)
- [22] Naher, S., Brabazon, D., Looney, L., Development and Assessment of a New Quick Quench Stir Caster Design for the Production of Metal Matrix Composites, *Journal of Materials Processing Technology*, 166(3) (2005) 430-439
- [23] Zulfia, A., Atkinson, H. V., Jones, H., Effect of hot isostatic pressing on cast A357 aluminium alloy with and without SiC particle reinforcement, *Journal of Materials Science* 34 (1999) 4305 – 4310
- [24] Sundararajan, V., Aluminum Composites In Aerospace Applications, <http://home.att.net/~s-prasad/almmc.htm> (22.05.2006)
- [25] Clyne, T. W., <http://www.msm.cam.ac.uk/mmc/publications/journal/twc008.pdf> (20.07.2006)
- [26] Wannasin, J., Flemings, M. C., Fabrication of metal matrix composites by a high-pressure centrifugal infiltration process, *Journal of Materials Processing Technology* 169 (2005) 143–149
- [27] Rajan, T. P. D., Pillai, R. M., Pai, B. C., Review Reinforcement coatings and interfaces in aluminium metal matrix composites, *Journal of Materials Science* 33 (1998) 3491-3503
- [28] Yu, P., Mei, Z., Tjong, S. C., Structure, thermal and mechanical properties of in situ Al-based metal matrix composite reinforced with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and TiC submicron particles, *Materials Chemistry and Physics* 93 (2005) 109–116
- [29] Mitra, R., Chalapathi Rao, V. S., Maiti, R., Chakraborty, M., Stability and response to rolling of the interfaces in cast Al–SiCp and Al–Mg alloy–SiCp composites, *Materials Science and Engineering A* 379 (2004) 391–400
- [30] Siva Kumar, K., Balakrishna Bhat, T., Ramakrishnan, P., Shock synthesis of 2124Al–SiCp composites, *Journal of Materials Processing Technology* 85 (1999) 125–130
- [31] Sur, G., Şahin, Y., Gökkaya, H., Ergimiş Metal Karıştırma ve Basınçlı Döküm Yöntemi ile Alüminyum Esaslı Tanecik Takviyeli Kompozitlerin Üretimi, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. Cilt 20, No 2*, 233-238, 2005
- [32] Sevik, H., Kurnaz, S. C., Properties of alumina particulate reinforced aluminum alloy produced by pressure die casting, *Materials & Design*, Volume 27, Issue 8, 2006, pp. 676-683
- [33] Zhou, W., Xu, Z. M., Casting of SiC reinforced metal matrix composites, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 63, Issues 1-3, January 1997, Pages 358-363
- [34] Bettge, D., Starcevic, J., Topographic properties of the contact zones of wear surfaces in disc brakes, *Wear* 254 (2003) 195–202
- [35] Kevorkijan, V., Engineering Wear-Resistant Surfaces in Automotive Aluminum, *JOM*, Volume 55, Number 2, 1 February 2003, pp. 32-34
- [36] [http://www.usitc.gov/secretary/fed\\_reg\\_notices/Safeguard\\_201\\_204\\_421/I0613aa1.pdf](http://www.usitc.gov/secretary/fed_reg_notices/Safeguard_201_204_421/I0613aa1.pdf) (14.08.2006)
- [37] Shorowordi, K. M., Processing and tribological characterization of aluminium based metal matrix composites for brake disc/drum applications, <http://www.mtm.kuleuven.ac.be/Research/SURF/webkms.htm> (14.08.2006)
- [38] [http://www.usitc.gov/secretary/fed\\_reg\\_notices/Safeguard\\_201\\_204\\_421/I0613aa1.pdf](http://www.usitc.gov/secretary/fed_reg_notices/Safeguard_201_204_421/I0613aa1.pdf) (14.08.2006)
- [39] Hunt, Jr., W. H., Herling, D., Cost-Effective Composites, *JOM*, April 2003, p. 6  
[http://doc.tms.org/ezMerchant/prodtms.nsf/ProductLookupItemID/JOM-0304-6/\\$FILE/JOM-0304-6F.pdf?OpenElement](http://doc.tms.org/ezMerchant/prodtms.nsf/ProductLookupItemID/JOM-0304-6/$FILE/JOM-0304-6F.pdf?OpenElement) (12.08.2006)



- [40] Straffelini, G., Pellizzari, M., Molinari, A., Influence of load and temperature on the dry sliding behaviour of Al-based metal-matrix-composites against friction material, *Wear* 256 (2004) 754–763
- [41] Shorowordi, K. M., Haseeb, A. S. M. A., Celis, J. P., Velocity effects on the wear, friction and tribochemistry of aluminum MMC sliding against phenolic brake pad, *Wear* 256 (2004) 1176–1181
- [42] [http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/alm\\_04/3b\\_herling.pdf](http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/alm_04/3b_herling.pdf) (03.10.2006)
- [43] Nakanishi, H., Kakihara, K., Nakayama, A., Murayama, T., Development of aluminum metal matrix composites (Al-MMC) brake rotor and pad, *JSAE Review* 23 (2002) 365–370
- [44] Zhang, H., Ramesh, K. T., Chin, E.S.C., High Strain Rate Response of Aluminium 6092/B<sub>4</sub>C Composites, *Materials Science and Engineering, A* 384 (2004) 26-34.
- [45] Kerti, I., Production of TiC reinforced-aluminum composites with the addition of elemental carbon, *Materials Letters* 59 (2005) 3795 – 3800
- [46] Toptan, F., Kerti, I., B<sub>4</sub>C ile Takviye Edilen Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Döküm Yöntemi ile Üretimi, 12.Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi (28 Ekim-2 Kasım, İstanbul) Bildiriler Kitabı s. 808-812
- [47] Kennedy, A. R., Brampton, B., The Reactive Wetting and Incorporation of B<sub>4</sub>C Particles into Molten Aluminium, *Scripta Materiala*, 44 (2001)1077-1082
- [48] Viala, J.C., Bouix, J., Gonzales, G., Esnouf, C., Chemical Reactivity of Aluminium with Boron Carbide, *Journal of Materials Science*, 32 (1997) 4559-4573
- [49] Aizenshtein, M., Froumin, N., Shapiro-Tsoref, E., Dariel, M. P., Frage, N., Wetting and interface phenomena in the B<sub>4</sub>C/(Cu–B–Si) system, *Scripta Materiala* 53 (2005) 1231–1235
- [50] Lee, B.-S., Kang, S., Low-temperature processing of B<sub>4</sub>C-Al composites via infiltration technique, *Materials Chemistry and Physics* 67 (2001) 249-255
- [51] Candan, E., Effect of Alloying Elements to Aluminium on the Wettability of AL/SiC System, *Turkish J. Eng. Env. Sci.* 26 (2002) , 1 - 5.
- [52] Fujii, H., Nakae, H., Okada, K., Interfacial Reaction Wetting in the Boron Nitride/Molten Aluminium System, *Acta metall. mater.* 41(10) (1993) 2963–2971
- [53] Oh, S.-Y., Cornie, J.A., Russel, K.C., Wetting of Ceramic Particulates with Liquid Aluminium Alloys: Part II. Study of Wettability, *Metallurgical Transactions A*, 20A (1989) 533-541
- [54] Halverson, D.C., Pyzik, A.J., Aksay, I.A., Snowden, W.E., Processing of Boron Carbide-Aluminium Composites, *J. Am. Ceram. Soc.*, 72 (5) (1989) 775-780
- [55] Shorowordi, K. M., Laoui, T., Haseeb, A. S. M. A., Celis, J. P., Froyen, L., Microstructure and interface characteristics of B<sub>4</sub>C, SiC and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> reinforced Al matrix composites: a comparative study, *Journal of Materials Processing Technology* 142 (2003) 738–743
- [56] Toptan, F., Alüminyum Matrisli B<sub>4</sub>C Takviyeli Kompozitlerin Döküm Yöntemi ile Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ FBE, 2006
- [57] Rohatgi, P.K., Liu, Y., Ray, S., Friction and Wear of Metal-Matrix Composites, Volume 18, *ASM Handbook*, Edited by S.D. Henry, 1992, p. 801-811