



# Fonksiyonel Derecelendirilmiş TiB<sub>2</sub>/Al Kompozitlerin Abrasif Aşınma Davranışları Üzerine Deneysel Bir Çalışma

Ömer Savaş<sup>1\*</sup>, Ömer Faruk Demirok<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Yıldız Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi, Türkiye, osavas@yildiz.edu.tr, (ORCID: 0000-0001-7454-1457)

<sup>2</sup> Yıldız Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi, farukdemirok@gmail.com

(İlk Geliş Tarihi 19 Kasım 2019 ve Kabul Tarihi 19 Aralık 2019)

(DOI: 10.31590/ejosat.648682)

**ATIF/REFERENCE:** Savaş, Ö. & Demirok, Ö.F. (2019). Fonksiyonel Derecelendirilmiş TiB<sub>2</sub>/Al Kompozitlerin Abrasif Aşınma Davranışları Üzerine Deneysel Bir Çalışma. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (17), 972-981.

## Öz

Bu çalışma, Fonksiyonel derecelendirilmiş TiB<sub>2</sub> takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin üretimi ve abrasif aşınma özelliklerinin araştırılmasına yöneliktir. Kompozitlerin üretiminde, takviye fazının oluşturulması in-situ tekniği ile yapılmış ve kompozitlerin nihai şekillerinin verilmesi ve fonksiyonel olarak derecelendirilmesi savurma döküm tekniği ile yapılmıştır. Üretilen kompozitlerin özelliklerinin araştırılmasında optik, SEM, XRD, sertlik ve abrasif aşınma testleri kullanılmıştır. Çalışmada abrasif aşınma testleri üç farklı yük (1, 2 ve 3 N), üç farklı hız (1.5, 3.5 ve 5.5 m/s) ve 100 m kayma mesafesinde 350 grid zımpara kağıdı altında yapılmıştır.

Yapılan testler sonucunda üretilen kompozitlerin TiB<sub>2</sub>'ce zengin ve fakir iki farklı bölgeye sahip olduğu görülmüştür. TiB<sub>2</sub>'ce zengin bölgelerin abrasif aşınma özelliklerinin TiB<sub>2</sub>'ce fakir bölgelere göre daha iyi olduğu tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Abrasif aşınma; Fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme, in-situ TiB<sub>2</sub>.

## An Experimental Study on Abrasive Wear Behavior of Functionally Graded TiB<sub>2</sub>/Al Composites

### Abstract

In this study, it is aimed to produce functionally graded TiB<sub>2</sub> reinforced aluminum matrix composites (FG TiB<sub>2</sub>/Al) materials and to investigate abrasive wear properties. In the production of composites, the reinforcement phase was formed by in-situ technique and the final shapes and functional grading of the composites were done by centrifugal casting technique. Optical, SEM, XRD, hardness and abrasive wear tests were used to investigate the properties of the composites. In this study, abrasive wear tests were performed under three different loads (1, 2 and 3 N), three different speeds (1.5, 3.5 and 5.5 m / s) and 350 grit sandpaper at 100 m distance.

As a result of the tests, it was found that the composites had two different regions which are TiB<sub>2</sub>-rich and TiB<sub>2</sub>-poor. Abrasive wear properties of TiB<sub>2</sub>-rich regions were found to be better than TiB<sub>2</sub>-poor regions.

**Keywords:** Abrasive wear, Functionally graded materials, In situ TiB<sub>2</sub>.

\* Sorumlu Yazar: Yıldız Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi, Gemi Makineleri İşletme Müh. Bölümü, İstanbul, Türkiye, ORCID: 0000-0001-7454-1457, [osavas@yildiz.edu.tr](mailto:osavas@yildiz.edu.tr)

## 1. Giriş

Mevcut monolitik alaşımlarının her ne kadar alaşımlama, ısıl işlem gibi çeşitli mukavemet artırıcı mekanizmalar ile mukavemetleri artırılrsa da yine de yüksek spesifik özellikleri sergileyememektedir. Son 20 yılda yapılan araştırmalarda bu problemi aşmak amacı ile yapılan çalışmaların çoğunluğu kompozitler üzerine olmuştur. (Miracle, 2005)(Rosso, 2006)(Tjong & Ma, 2000).

Yapılan literatür çalışmalarında artan takviye oranına bağlı olarak üretilen kompozit malzemelerin elastik modülleri, mukavemetleri ve aşınma direncinin arttığı görülmektedir. Ancak artan takviye oranı ile birlikte kompozitin gevrekleştiği ve kırılma tokluğu önemli oranda düşürdüğü görülmektedir. Kırılma tokluğunun düşük olması özellikle tekrarlı yüklere maruz kalan makine parçalarının kullanım ömrünü önemli oranda düşürdüğü görülmektedir. Hem kırılma tokluğunun ve hem de aşınma direncinin artırılması fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit malzemelerle sağlanabilmektedir (Naebe & Shirvanimoghaddam, 2016)(Singh et al., 2017)(Rajan & Pai, 2011). Fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit malzemelerde, takviye oranı kalıp dış cidarından içeriye doğru fonksiyonel olarak artma veya azalmaktadır. Bu durumda kompozitin özelliklerinin makro ölçüde değişimine neden olmaktadır(Watanabe, Zhou, Sato, Fujii, & Inamura, 2017)(Niu, Zhang, & Yang, 2012). Yani takviye oranı yüksek olan kısımlarda aşınma direnci yüksek olurken takviye oranının düşük olduğu kısımlarda ise kırılma tokluğunun yüksek olduğu görülür.

Önceki çalışmada in-situ TiB<sub>2</sub> partiküllerinin oluşturulmasında Al-Ti-B sistemlerinin kullanıldığı belirtilmiştir (Tjong & Ma, 2000). Birçok çalışmada Al-Ti-B sisteminin oluşturulmasında K<sub>2</sub>TiF<sub>6</sub> and K<sub>B</sub>F<sub>4</sub> tuzları ve alüminyum alaşımlarının dökümünde tane inceltici olarak kullanılan Al-B ve Al-Ti mastır alaşımının da kullanıldığı rapor edilmiştir (Tee, Lu, & Lai, 1999)(Lu, La, & Chen, 1997)(Lai, Su, Teo, & Feng, 2001)(Tee, Lu, & Lai, 2010)(Zhang et al., 2017)(Gao et al., 2017)(Auradi & Kori, 2008; Ding, Xia, & Zhao, 2014; Fan et al., 2015).

S. Sasikumar (Sasikumar, Ramkumar, Iniyar, Gowthaman, & Sivasankaran, 2014) ve arkadaşları yaptıkları çalışmada alüminyum matrise ağırlıkça %3 TiB<sub>2</sub> ilavesi ile sertlik değeri 180 RHA'dan 210 RHA'ya yükseldiğini rapor etmişlerdir. K. L. Tee (Tee et al., 2010) arkadaşları alüminyum matrise % 15 TiB<sub>2</sub> ilavesi ile çekme gerilmesinin %56,5, akma gerilmesinin %65,7 ve elastik modülün % 21,5 oranında artırdığını rapor etmişlerdir. K. Krishnamurthy (Krishnamurthy, Ashebre, Venkatesh, & Suresha, 2017) ve arkadaşları ise 6063 alüminyum alaşımına TiB<sub>2</sub> ilavesi ile spesifik aşınma hızının azaldığını göstermişlerdir. Kumar (Kumar, Sarma, & Murty, 2007) ve arkadaşları Al-5Cu matrise TiB<sub>2</sub> ilavesi ile abrasif aşınma direncinin iyileştiğini belirtmişlerdir. A. Sreenivasan (Sreenivasan, Vizhianb, Shivakumar, Munirajua, & Raguramand, 2011) arkadaşları ile 6061 alaşımına %15 TiB<sub>2</sub> ilavesiyle aşınma hızının önemli oranda azaldığını rapor etmişlerdir.

S. Kumar (Kumar, Subramaniya Sarma, & Murty, 2010) and M. F. Forster (Forster, Hamilton, Dashwood, & Lee, 2003) ve arkadaşları TiB<sub>2</sub> partikül takviyeli fonksiyonel derecelendirilmiş alüminyum matrisli kompozitleri savurma döküm yöntemi ile ürettiklerini rapor etmişlerdir. Yapılan çalışmalarda takviye oranının savurma yönünde değiştiği ve kompozitlerin özelliklerinin yöne bağlı olarak değiştiğini belirtmişlerdir.

Bu çalışmada amacımız fonksiyonel derecelendirilmiş TiB<sub>2</sub> takviyeli alüminyum matrisli kompozit malzemelerin üretimi ve abrasif aşınma özelliklerinin incelenmesine yöneliktir. Çalışmada kompozit üretiminin ilk aşamasında TiB<sub>2</sub> takviye fazlarının, in-situ (yerinde reaksiyon) tekniği kullanılarak sıvı alüminyum içerisinde kendiliğinde oluşturulması sağlanacak ve üretimin son aşamada ise savurma döküm tekniği ile kompozitler kalıp dış cidarından içeriye doğru fonksiyonel olarak derecelendirilmesi sağlanacaktır. Kompozitlerin abrasif aşınma özellikleri pin-on-disk yöntemi kullanılacak ve sonuçlar aynı şartlarda aşınma testine tabi tutulmuş AISI 1020 çeliği ile kıyaslanacaktır.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu

Yapılan çalışmada kompozitlerin üretimini iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada in-situ TiB<sub>2</sub> borür yapılarının oluşturulması ve ikinci aşamada, savurma döküm tekniği kullanılarak fonksiyonel derecelendirilmiş kompozitlere nihai şekillerinin verilmesidir.

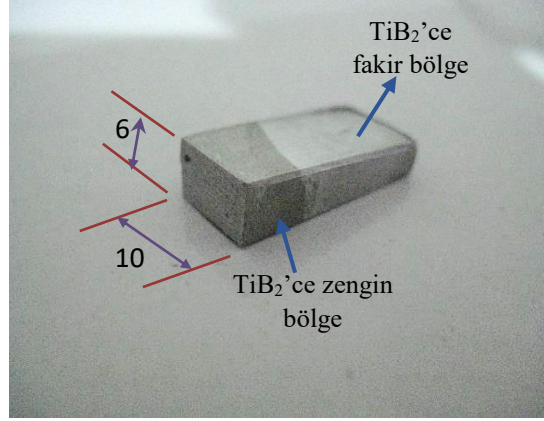
İn-situ TiB<sub>2</sub> borür yapılarının sentezlenmesinde Al-T-B sistemi kullanılmıştır. Sistemin oluşturulmasında Ti ve B verici olarak alüminyum alaşımların dökümünde kullanılan ticari Al-10Ti ve Al-2B mastır alaşımları seçilmiştir. 1200 °C'de ağırlıkça %3 ve %1,3 sırası ile B ve Ti içerecek şekilde Al-Ti-B çözeltisi hazırlanmıştır ve bu sıcaklıkta bir saat beklenmesinin ardından TiB<sub>2</sub> borür yapılarının sıvı alüminyum içerisinde çekirdeklenmesi ve büyümesi için 900 °C'de 30 dakika beklenmiştir. Bu sıcaklıkta matris çeşitliliği sağlamak amacı ile bazı çözeltiler %99,99 safiyete sahip bakır çubuklar kullanılarak çözelti %5 oranında bakır ile alaşımlanmıştır. Dökümlerde kullanılan potaların sıvı alüminyumla reaksiyona girmemesi için bütün kalıplar alkol esaslı sprey bor nitrür ile kaplanmıştır.

Fonksiyonel derecelendirilmiş kompozitlerin nihai şeklinin verilmesi amacı ile 900 °C'de hazırlanmış 150 gr'lık (Al<sub>(sıvı)</sub>+TiB<sub>2(katı)</sub>) çözelti başka bir pota içerisine alınarak 1500 rpm dönme hızında 2 dakika savurma işlemine maruz bırakılarak havada katılaştırılmıştır.

Mikro yapısal analiz için Clemex Vision görüntü analiz sistemi ile donatılmış bir Olympus optik mikroskop kullanılmıştır. Kompozitlerin takviye oranları yoğunluk değişimine göre teorik olarak hesaplanmıştır. Yoğunluk testleri Arşimet yöntemi ile yapılmıştır.

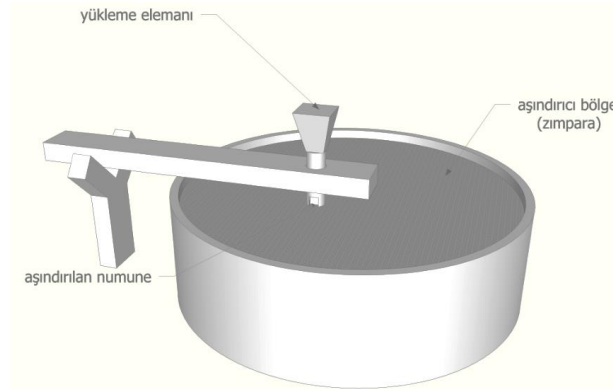
## 2.2. Aşınma Testleri

Aşınma testleri amacı ile fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit malzemeden alınan aşınma test numune görüntüsü ve ölçüleri Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Aşınma Test Numunesi

Kompozit malzemelerin aşınma testlerinde abrasif aşınma yöntemi ve Pin-On-Disk sistemi kullanılmıştır. Abrasif aşınma testleri için kullanılan temsili Pin-On-Disk düzeneği Şekil 2’te görülmektedir.



Şekil 2. Abrasif aşınma için kurulan düzeneğin temsili görüntüsü

Aşınma testlerinde aşındırıcı olarak 320 grid’lik zımpara kâğıtları seçilmiş ve testler 1 N, 2 N ve 3 N altında, 1,5 m/sn, 3,5 m/sn ve 5,5 m/sn kayma hızlarında ve 100 metre kayma mesafede gerçekleştirilmiştir. Üretilen kompozitlerin aşınma performanslarının kıyaslanması amacı ile AISI 1040 çeliği de aynı ölçülerde hazırlanmış ve aynı şartlarda abrasif aşınma testin tabi tutulmuştur. Abrasif aşınma test parametreleri Tablo 1’de görülmektedir.

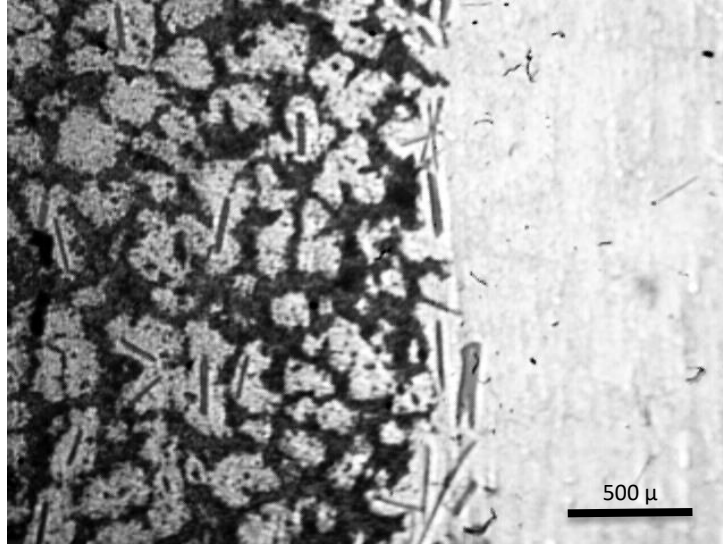
Tablo 1. Abrasif aşınma test parametreleri

Deney parametreleri	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Yük, N	1	2	3
Hız, m/s	1,5	3,5	5,5
Zımpara, grid	320		
Yol, m	100		

## 3. Araştırma Sonuçları ve Tartışma

Savurma işlemi sonrasında saf Al ve Al-Cu Martisli TiB<sub>2</sub> partikül takviyeli iki tip fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit malzeme üretilmiştir. Üretilen kompozit malzemelerin TiB<sub>2</sub> ile güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş iki farklı bölgeye sahip

olduğu görülmüştür. Şekil 3’de üretilen Kompozitlerin  $TiB_2$  ile güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş ara bölgenin mikro yapı görüntüsü verilmiştir. Şekilde  $TiB_2$ ’ce zengin bölgelerde ağ şeklinde siyah renkte  $TiB_2$  partiküllerinin yer aldığı,  $TiB_2$ ’ce fakir bölgelerde ise bu ağ yapının yer almadığı dikkati çekmektedir. Bu sonuç S. Kumar (Kumar et al., 2010) ve M. F. Forster (Forster et al., 2003)ve arkadaşlarının çalışmalarına benzerlik içermektedir. Şekilde ayrıca güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş iki bölgenin birbirinden keskin bir şekilde ayrıldığı görülmektedir.



Şekil 3. Üretilen kompozite ait mikro yapı görüntüsü

Yapılan yoğunluk analizleri neticesinde alüminyum matrisli kompozitte güçlendirilmemiş bölgelerin yoğunluğu  $2,69 \text{ g/cm}^3$ , Al-Cu matrisli kompozitlerde  $2,85 \text{ g/cm}^3$  olarak ölçülmüştür. Buna karşın güçlendirilmiş bölgelerde yoğunluk değerleri Alüminyum matrisli kompozit için  $2,98 \text{ g/cm}^3$ , Al-Cu matrisli kompozit için  $3,03 \text{ g/cm}^3$  olarak ölçülmüştür. Ölçülen bu yoğunluk değerleri kullanılarak karışım kuralına göre takviye oranları teorik olarak hesaplanmıştır. Takviye oranları güçlendirilmiş bölgelerde her iki kompozit için yaklaşık olarak %10 olarak bulunmuştur.

Mikro yapı analiz sonuçlarına göre  $TiB_2$ ’ce fakir bölgelerde  $TiB_2$  borür yapılarının hiç görülmemesi nedeniyle bu bölgeler matris olarak ( saf Al ve Al-Cu) değerlendirilmiş ve  $TiB_2$ ’ce zengin bölgelerde % 10 oranında  $TiB_2$  borür yapısı olması nedeniyle bu bölgeler kompozit ( $TiB_2/Al$  ve  $TiB_2/Al-Cu$  kompozitleri) olarak değerlendirilmiştir.

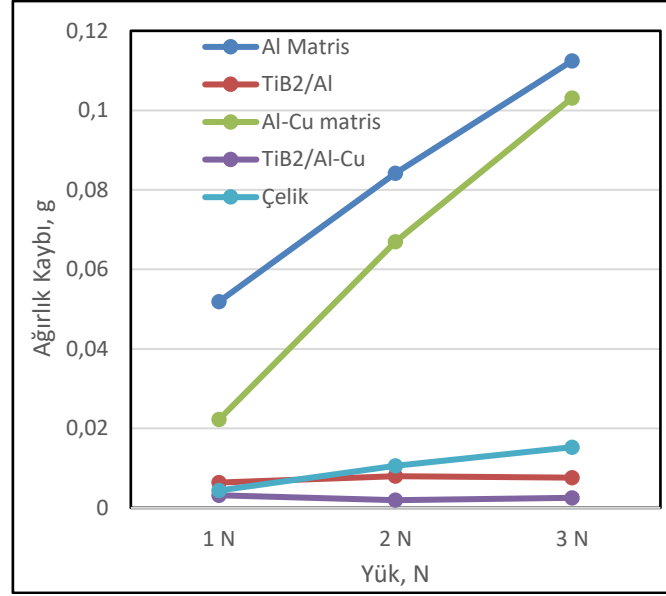
Tablo 2’de kompozitlerin  $TiB_2$ ’ce zengin ve fakir bölgeleri ve çelik malzemeye ait aşınma testleri neticesinde alınan ortalama ilk ağırlık, son ağırlık ve onların farkları deney parametreleri ile birlikte verilmiştir. Tabloda genel olarak  $TiB_2$ ’ce fakir olarak isimlendirilen saf Al ve Al-Cu matris bölgelerinin aşınma oranlarının  $TiB_2$ ’ce zengin olan  $TiB_2/Al$  ve  $TiB_2/Al-Cu$  kompozit bölgelerine göre daha düşük olduğu dikkati çekmektedir. Tabloda ayrıca artan yüklerle birlikte aşınma miktarlarının arttığı görülmektedir. Genel olarak Al-Cu matrisli kompozitlerin ve çelik malzemenin aşınma miktarının saf alüminyum matrisli kompozitlere göre daha düşük olduğu görülmektedir. En yüksek aşınma miktarı  $5,5 \text{ m/s}$  hızında ve  $3 \text{ N}$  yük altında yapılan  $TiB_2$ ’ce fakir (saf Al matrisli) bölgesinde ortalama  $0,1771 \text{ gr}$  olarak ölçülmüştür. En düşük aşınma miktarı ise  $TiB_2$ ’ce zengin ( $TiB_2/Al-Cu$  kompozit) bölgesinde  $3,5 \text{ m/s}$  kayma hızında ve  $2 \text{ N}$  yük altında yapılan deneyde ortalama  $0,0011 \text{ gr}$  olarak ölçülmüştür.

Tablo 2. Abrasif aşınma deney parametreleri ve sonuçları

Deney no.	Malzeme	Deney Koşulları			Sonuçlar		
		Hız, m/sn	Yük, N	Yol, m	İlk ölçüm, gr	İkinci ölçüm, gr	Ağırlık farkı
1	$TiB_2$ ’ce fakir bölge (Al Matris)	1,5	1 N	100	5,146	5,0638	0,0822
2		1,5	2 N	100	4,405	4,3408	0,0642
3		1,5	3 N	100	4,3408	4,2914	0,0494
4		3,5	1 N	100	4,5161	4,4956	0,0205
5		3,5	2 N	100	4,7223	4,6270	0,0953
6		3,5	3 N	100	4,6270	4,5161	0,1109
7		5,5	1 N	100	2,0058	1,9528	0,0530
8		5,5	2 N	100	2,0988	2,0058	0,0930
9		5,5	3 N	100	2,2759	2,0988	0,1771

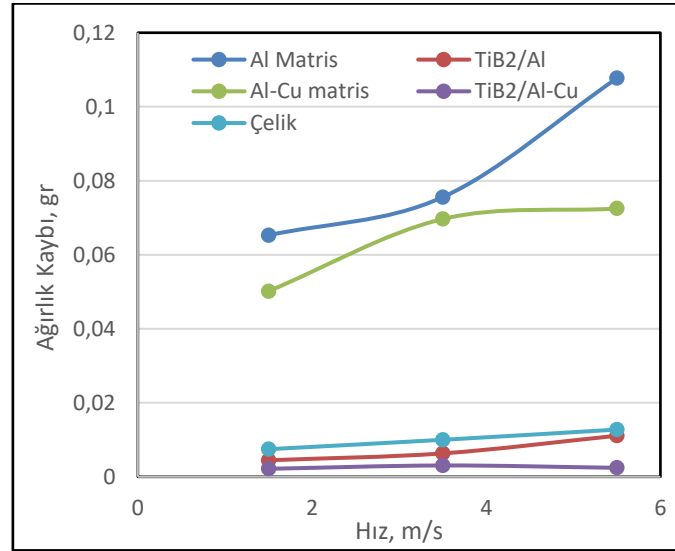
10	TiB <sub>2</sub> 'ce zengin bölge (TiB <sub>2</sub> /Al Kompoziti)	1,5	1 N	100	4,1798	4,1783	0,0015
11		1,5	2 N	100	4,1917	4,1869	0,0048
12		1,5	3 N	100	4,1869	4,1798	0,0071
13		3,5	1 N	100	4,2010	4,1962	0,0048
14		3,5	2 N	100	4,2152	4,2098	0,0054
15		3,5	3 N	100	4,2098	4,2010	0,0088
16		5,5	1 N	100	4,2345	4,2217	0,0128
17		5,5	2 N	100	4,2550	4,2413	0,0137
18		5,5	3 N	100	4,2413	4,2345	0,0068
19	TiB <sub>2</sub> 'ce fakir bölge (Al-Cu Matris)	1,5	1 N	100	4,5624	4,5462	0,0162
20		1,5	2 N	100	4,6967	4,6387	0,0580
21		1,5	3 N	100	4,6387	4,5624	0,0763
22		3,5	1 N	100	4,7636	4,7381	0,0255
23		3,5	2 N	100	4,9471	4,8773	0,0698
24		3,5	3 N	100	4,8773	4,7636	0,1137
25		5,5	1 N	100	2,6825	2,6575	0,0250
26		5,5	2 N	100	2,7556	2,6825	0,0731
27		5,5	3 N	100	2,8750	2,7556	0,1194
28	TiB <sub>2</sub> 'ce zengin bölge (TiB <sub>2</sub> /Al-Cu Kompoziti)	1,5	1 N	100	5,2307	5,2278	0,0029
29		1,5	2 N	100	5,2278	5,2256	0,0022
30		1,5	3 N	100	5,2256	5,2242	0,0014
31		3,5	1 N	100	5,2422	5,2372	0,0050
32		3,5	2 N	100	5,2349	5,2338	0,0011
33		3,5	3 N	100	5,2338	5,2307	0,0031
34		5,5	1 N	100	5,2438	5,2422	0,0016
35		5,5	2 N	100	5,2485	5,246	0,0025
36		5,5	3 N	100	5,2460	5,2428	0,0032
37	Çelik	1,5	1 N	100	7,5972	7,5937	0,0035
38		1,5	2 N	100	7,6161	7,6085	0,0076
39		1,5	3 N	100	7,6085	7,5972	0,0113
40		3,5	1 N	100	7,6379	7,6373	0,0006
41		3,5	2 N	100	7,6673	7,6543	0,0130
42		3,5	3 N	100	7,6543	7,6379	0,0164
43		5,5	1 N	100	7,6866	7,6776	0,0090
44		5,5	2 N	100	7,7159	7,7047	0,0112
45		5,5	3 N	100	7,7047	7,6866	0,0181

Şekil 4'de Saf Al ve Al-Cu matris alaşımları, TiB<sub>2</sub>/Al ve TiB<sub>2</sub>/Al-Cu kompozitlerin ve çelik malzemenin artan yüke göre ağırlık kayıpları görülmektedir. Şekilde artan yük ile ağırlık kayıplarının bütün malzemeler için arttığı görülmektedir. Yükün artması ile en fazla aşınma kaybının sırasıyla saf Al ve Al-Cu matris malzemede olduğu görülmektedir. En düşük aşınma miktarı ise sırası ile TiB<sub>2</sub>/Al-Cu, çelik ve TiB<sub>2</sub>/Al malzemelerde olduğu görülmektedir.



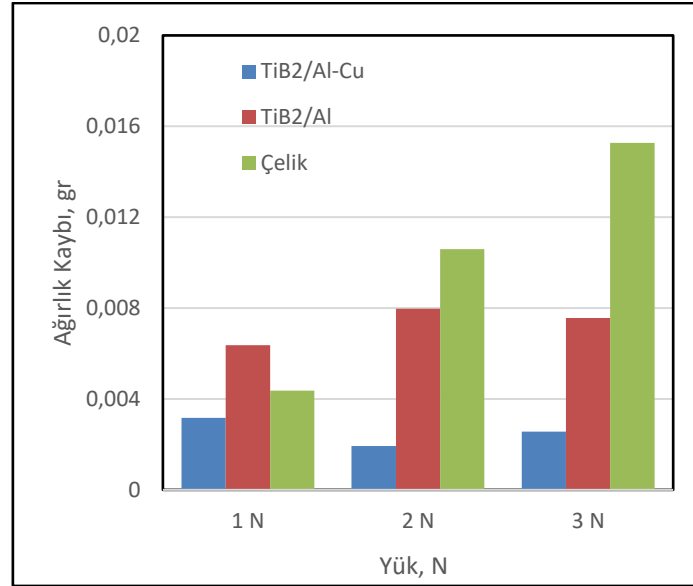
Şekil 4. TiB<sub>2</sub>/Al ve TiB<sub>2</sub>/Al-Cu kompozitlerin ve çelik malzemenin artan yüke bağlı ağırlık kaybı değişim grafiği

Şekil 5’de alüminyum ve Al-Cu matrisli bölgelerin ( TiB<sub>2</sub>/Al ve TiB<sub>2</sub>/Al-Cu kompozitlerin) ve çelik malzemenin hızı bağlı olarak çizilmiş ağırlık kaybı grafiği görülmektedir. Şekil 5’de açıkça kayma hızının artmasına göre aşınma kayıplarının arttığı göze çarpmaktadır. Ağırlıkça aşınma miktarlarında artan hızı bağlı olarak aşınma miktarlarında en yüksek artışı matris malzemelerde olduğu görülmektedir. Aşınma miktarlarında en düşük aşınma kaybı ise TiB<sub>2</sub> ile güçlendirilmiş bölgelerde ve çelik malzemede olduğu dikkati çekmektedir. Şekil 5’de aşınma miktarının en yüksek seviyelerde gözlemlendiği alüminyum matrisinde, kayma hızının 1,5m/sn’den 5,5m/sn’ye yükseltilmesi ile aşınma kayıplarının 0,065 gr seviyelerinden 0,10 gr seviyelerine yükseltti görülmektedir. en düşük aşınma kaybının gözlemlendiği TiB<sub>2</sub> ile güçlendirilmiş Al-Cu matrisle bölgede (TiB<sub>2</sub>/Al-Cu kompozitör), kayma hızının 1,5m/sn.den 5,5m/sn’ye yükseltilmesi sonucunda aşınma kayıpları 0,0021 gr’dan 0,0024 gr’a yükseldiği göze çarpmaktadır.



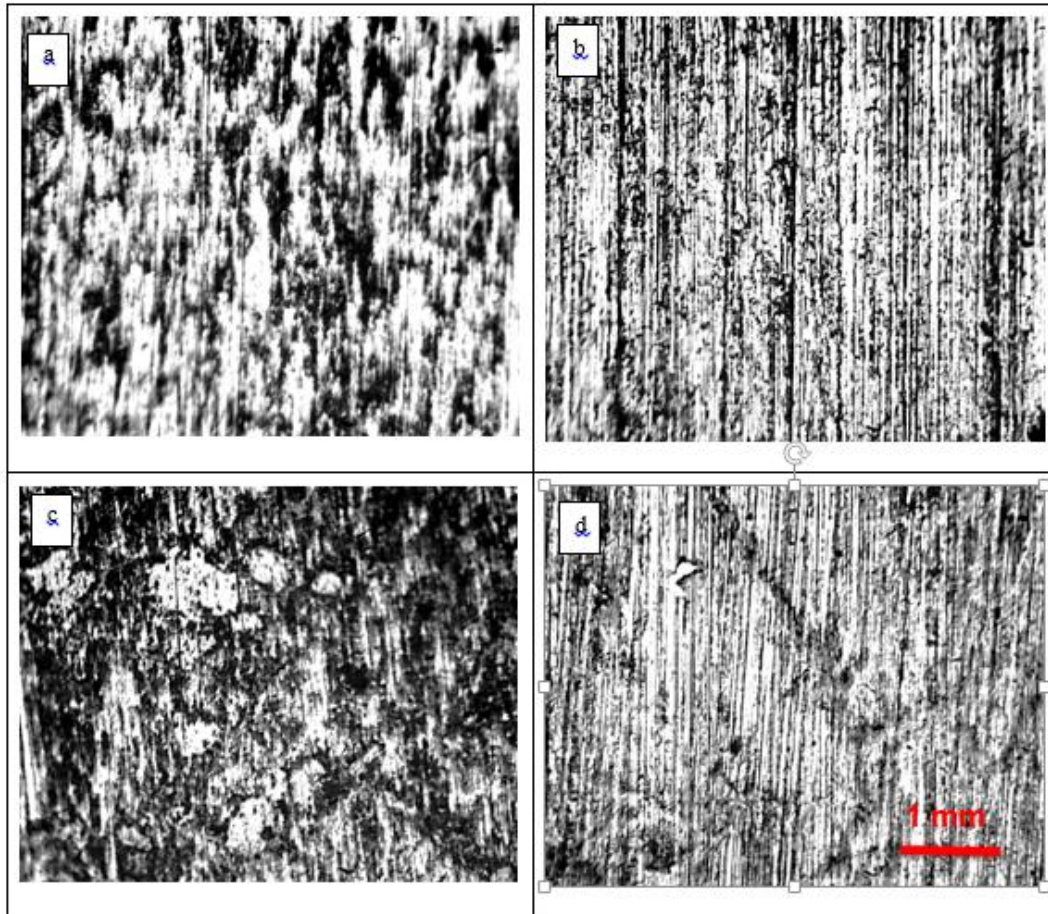
Şekil 5. TiB<sub>2</sub>/Al ve TiB<sub>2</sub>/Al-Cu kompozitlerin ve çelik malzemenin artan hızı bağlı ağırlık kaybı değişim grafiği

Şekil 6’de TiB<sub>2</sub>/Al ve TiB<sub>2</sub>/Al-Cu kompozitlerin, çelik malzemenin artan yüke bağlı ağırlık kaybının kolonsal grafik gösterimi verilmiştir. Şekil 6’da açık bir şekilde yükün artması ile çelik malzemede ağırlık kayıplarının 0,004 gr seviyelerinden 0,016 gr seviyelerine yükseldiği göze çarpmaktadır. TiB<sub>2</sub>/Al ve TiB<sub>2</sub>/Al-Cu kompozitlerin ise artan yükle birlikte ağırlık kayıplarının önemli oranda değişmediği görülmektedir. Aşınma kayıpları TiB<sub>2</sub>/Al kompoziti için 0,007 gr seviyelerinde iken TiB<sub>2</sub>/Al-Cu kompoziti için bu değer 0,002 gr seviyelerindedir. Grafikte en yüksek ağırlık kaybının bütün yükler için çelik malzemede olduğu dikkati çekmektedir. Kompozit malzemelerin ağırlık kayıplarının çeliğe malzemeye nazaran düşük olmasının nedeni matris içerisindeki %15 oranındaki TiB<sub>2</sub> partikülleridir.

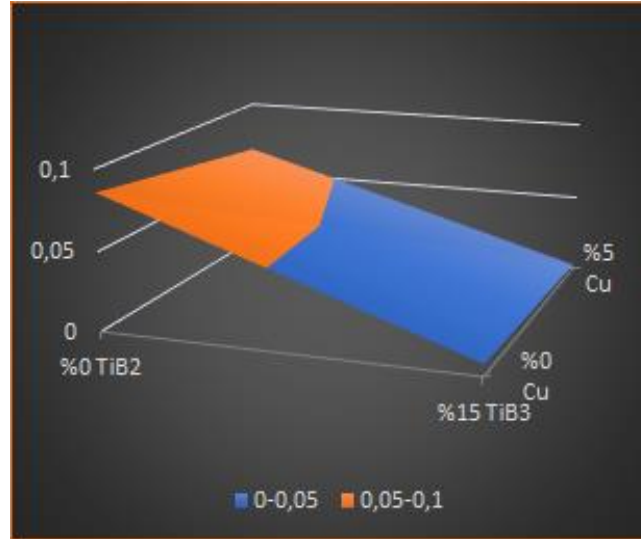


Şekil 6. TiB<sub>2</sub>/Al ve TiB<sub>2</sub>/Al-Cu kompozitlerin ve çelik malzemenin artan yüke bağlı ağırlık kaybının kolonsal grafik gösterimi

Şekil 7'de Aşınma izlerinin incelenmesi amacıyla TiB<sub>2</sub>/Al ve TiB<sub>2</sub>/Al-Cu kompozitlerine ait TiB<sub>2</sub>'ce zengin ve fakir bölgelerden alınan mikro yapı görüntüleri verilmiştir. Mikro yapı görüntüleri 5,5 m/s hız ve 3 N yük altında yapılan deney numunelerinden alınmıştır. Mikro yapı görüntülerinde TiB<sub>2</sub>'ce fakir bölgedeki aşınma izlerinin daha derin olduğu, TiB<sub>2</sub>'ce zengin bölgede ise aşınma izlerinin daha yüzeysel olduğu görülmektedir. En düşük derinliğe sahip izler, %15 TiB<sub>2</sub> takviyesi içeren Al-Cu matrisli bölgede olduğu, en yüksek aşınma iz derinlikleri ise TiB<sub>2</sub> borür yapılarını içermeyen (Al matrisli) bölgede olduğu görülmektedir.



Şekil 7. (a) TiB<sub>2</sub>/Al kompoziti (TiB<sub>2</sub>'ce zengin bölge), (b) Al Matris (TiB<sub>2</sub>'ce fakir bölge), (c) TiB<sub>2</sub>/Al-Cu kompoziti (TiB<sub>2</sub>'ce zengin bölge) ve (d) Al-Cu matrisine (TiB<sub>2</sub>'ce fakir bölgeye) ait aşınma izleri optik görüntüsü



Şekil 8. Alüminyuma TiB<sub>2</sub> ve Bakır ilavesinin ağırlık kayıplarına etkisi

Şekil 8'de alüminyum içerisine %15 TiB<sub>2</sub> ve %5 bakır ilavesinin ağırlık kayıpları üzerine etkisi gösterilmektedir. Grafik, 320 grid zımpara altında ve 100 m kayma mesafesinde yapılan aşınma testlerinden elde edilen sonuçlarının ortalamaları alınarak hazırlanmıştır. Hazırlanan grafik açıkça matris içerisinde artan TiB<sub>2</sub> ve Cu miktarı ile aşınma kayıplarının azaldığını göstermektedir. Aşınma miktarının düşürülmesinde matris içerisine %15'lik TiB<sub>2</sub> ilavesinin ağırlık kayıplarının azaltılması üzerinde %5 bakır ilavesine göre daha etkili olduğunu göze çarpmaktadır. Saf alüminyum matrise %15 TiB<sub>2</sub> ilavesi ile ağırlık kayıplarının 0,08 gr'dan 0,03 gr'a düştüğü gözlemlenmesine karşın %5'lik bakır ilavesi ile 0,08 gr'dan 0,06 gr'a düştüğü görülmektedir. Grafikte en düşük aşınma kaybı hem TiB<sub>2</sub> hemde Cu ilavesinde 0,001 gr olduğu görülmektedir.

Sonuçlarda artan yük ve artan kayma hızı ile kompozitlerin abrasif aşınma kayıplarının arttığı görülmektedir (Şekil 4 ve Şekil 5). Uygulanan yük ile aşınma miktarının artmasının muhtemel nedeni aşınan yüzeylerin SiC aşındırıcı partiküllerin daha çok penetre olmasıdır. Penetrasyonun artması ile daha derin izlerinin oluşması ve aşınma ile birlikte daha çok malzeme kaybı olmaktadır. Bu sonuçlar kompozit malzemelerin aşınma davranışları üzerine yapılan çalışmalarla paralellik göstermektedir (Ozdin, 2007)(Ko, 2006)(N. Radhika & Raghu, 2018). Artan hızla birlikte aşınma miktarının artması, aşınma testleri sırasında oluşan sürtünmeden dolayı aşınan yüzeylerin ısınmasından kaynaklanmaktadır. Yüzeylerinin ısınması aşındırıcı partiküllerinin daha çok nüfuz etmesine neden olarak aşınma kayıplarının artmasına neden olmuştur. Fıçıcı ve arkadaşları AlB<sub>2</sub> takviyeleri kompozitlerin aşınma davranışı üzerine yaptıkları çalışmada artan kayma hızı ile aşınma yüzeylerinde oluşan ısı ile aşınma miktarının arttığını rapor etmişlerdir(Ficici, 2016).

Çalışmada matris içerisine ilave edilen TiB<sub>2</sub> ile aşınma kayıplarının azaldığı görülmektedir. Bunun muhtemel nedeni matris içindeki TiB<sub>2</sub> partikülleri sertlik artışına neden olarak aşındırıcı partiküllerinin aşınan yüzeylere penetrasyonunu azaltarak aşınma kayıplarının azalmasına neden olmuştur. TiB<sub>2</sub> takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin aşınma davranışı üzerine yapılan bir çok çalışmada TiB<sub>2</sub> partiküllerinin ilavesi ile kompozitlerin sertlik değerlerini artırmasına bağlı olarak kompozitlerin aşınma özelliklerinin iyileştiği rapor edilmiştir (Kumar et al., 2007)(Kumar, Chakraborty, Subramanya Sarma, & Murty, 2008)(Kumar, Subramanya Sarma, & Murty, 2009)(Krishnamurthy et al., 2017).

Şekil 7'de verilen aşınma izlerine ait optik görüntüler TiB<sub>2</sub> ile güçlendirilmiş bölgelerde aşınma kayıplarının daha düşük olmasının nedenini açıklamaktadır. Optik görüntülerde TiB<sub>2</sub> partikülleri ile güçlendirilmiş bölgelerde aşınma izleri daha ince ve yüzeysel iken güçlendirilmemiş bölgelerde daha kalın ve derin olduğu görülmektedir. Şekil 7b'de net bir şekilde görülen derin izler daha çok malzeme kaybına neden olması beklenirken, Şekil 7c'de görülen ince ve yüzeysel izlerin daha az malzeme kaybına neden olması beklenmektedir(Nachimuthu Radhika & Raghu, 2016)(Niu et al., 2012). Şekil 6'da görüleceği üzere alüminyum matrisli kompozitlere göre Al-Cu matrisli kompozitlerin daha az aşındığı görülmektedir. Bunun muhtemel nedeni alüminyum matrise ilave edilen %5 bakır alaşımının kompozitin sertliğinin artırmasından kaynaklanmaktadır. Bu sertlik artışı aynı şekilde aşındırıcı SiC partiküllerin aşınma yüzeylerine penetre olmasına engelleyerek aşınma kayıplarının daha az olmasına neden olmaktadır. Şekil 7a ve 7c'de verilen TiB<sub>2</sub>/Al ve TiB<sub>2</sub>/Al-Cu kompozitlere ait aşınma izleri bu sonuçları desteklemektedir. Şekildeki TiB<sub>2</sub>/Al-Cu kompozitlerine ait aşınma izlerinin TiB<sub>2</sub>/Al Kompozitlerine nazaran daha ince ve yüzeysel olduğu görülmektedir.

#### 4. Genel Sonuçlar

Fonksiyonel derecelendirilmiş TiB<sub>2</sub> takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin üretimi ve abrasif aşınma özelliklerinin deneysel araştırılmasına yönelik olarak yapılan bu çalışmada araştırma sonuçları aşağıda verilmiştir;

1. Üretilen Kompozitlerin TiB<sub>2</sub>'ce zengin ve fakir iki bölgeye sahip oldukları tespit edilmiştir. TiB<sub>2</sub>'ce zengin bölgelerde TiB<sub>2</sub> borür oranının yaklaşık ağırlıkça %10 civarında, TiB<sub>2</sub>'ce fakir bölgelerde ise %0 seviyelerinde olduğu tespit edilmiştir.
2. Sertlik testleri sonucunda TiB<sub>2</sub>/Al kompoziti için TiB<sub>2</sub>'de zengin ve fakir bölgelerde sırası ile ortalama 56,5 HB ve 19,0 HB, TiB<sub>2</sub>/Al-Cu kompoziti için TiB<sub>2</sub>'de zengin ve fakir bölgelerde sırası ile ortalama 115,3 HB ve 70,0 HB olarak tespit edilmiştir.



3. 320 grid zımpara kademesinde 1 N, 2 N ve 3 N yükler altında 100 m aşınma mesafesinde 1,5 m/sn, 3,5m/sn ve 5,5 m/sn hızlarda gerçekleştirilen abresif aşınma testleri sonucunda artan yük ve artan hıza bağlı olarak ağırlık kaybı miktarlarında artış gözlemlenmiştir. Çelik malzemenin ağırlık kaybı miktarının TiB<sub>2</sub>' ile güçlendirilmeyen bölgelerde (Al ve Al-Cu matris) daha düşük olduğu, %15 TiB<sub>2</sub> takviyeli bölgelerden (TiB<sub>2</sub>/Al ve TiB<sub>2</sub>/Al-Cu kompozit) ise daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.
4. Abrasif aşınma testleri sonucunda ortalama aşınma kayıplarının saf alüminyum içerisine ilave edilen %5 Cu ile daha düşük seviyelerde iken %15 TiB<sub>2</sub> ilavesi ile aşınma kaybının daha fazla düşüş olduğu görülmüştür. Alüminyuma TiB<sub>2</sub> ilavesi ile ortalama aşınma kayıplarının 0,08 gr'dan 0,03 gr'a kadar düşüş gözlenirken, %5'lik bakır ilavesi ile 0,08 gr'dan 0,06 gr değerine düşmüştür. Her ikisinin birden ilavesiyle ağırlık aşınma kayıplarının ortalama 0,001 gr'a kadar düştüğü tespit edilmiştir.

**Teşekkür:** Çalışmaya katkılarından dolayı TÜBİTAK 1919B011702249 numaralı 2209 – A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında desteklerinden dolayı teşekkür ederim. Ayrıca çalışmalarında desteklerini eksik etmeyen proje arkadaşlarım Mert BADEM, Sergen EVİRGEN ve A. Metehan KARADAĞ'a da teşekkür ederim.

## Kaynakça

- Auradi, V., & Kori, S. A. (2008). Influence of reaction temperature for the manufacturing of Al-3Ti and Al-3B master alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 453(1–2), 147–156. doi:10.1016/j.jallcom.2006.11.119
- Ding, W., Xia, T., & Zhao, W. (2014). Performance comparison of Al-Ti master alloys with different microstructures in grain refinement of commercial purity aluminum. *Materials*, 7(5), 3663–3676. doi:10.3390/ma7053663
- Fan, Z., Wang, Y., Zhang, Y., Qin, T., Zhou, X. R., Thompson, G. E., ... Hashimoto, T. (2015). Grain refining mechanism in the Al/Al-Ti-B system. *Acta Materialia*, 84(November), 292–304. doi:10.1016/j.actamat.2014.10.055
- Ficici, F. (2016). The experimental optimization of abrasive wear resistance model for an in-situ AlB<sub>2</sub>/Al-4Cu metal matrix composite. *Industrial Lubrication and Tribology*, 68(6), 632–639. doi:10.1108/ILT-12-2015-0198
- Forster, M. F., Hamilton, R. W., Dashwood, R. J., & Lee, P. D. (2003). Centrifugal casting of aluminium containing in situ formed TiB<sub>2</sub>. *Materials Science and Technology*, 19(9), 1215–1219. doi:10.1179/026708303225005872
- Gao, Q., Wu, S., Lü, S., Xiong, X., Du, R., & An, P. (2017). Improvement of particles distribution of in-situ 5 vol% TiB<sub>2</sub> particulates reinforced Al-4.5Cu alloy matrix composites with ultrasonic vibration treatment. *Journal of Alloys and Compounds*, 692, 1–9. doi:10.1016/j.jallcom.2016.09.013
- Ko, M. (2006). Abrasive wear of Al 2 O 3 particle reinforced 2024 aluminium alloy composites fabricated by vortex method, 37, 457–464. doi:10.1016/j.compositesa.2005.05.038
- Krishnamurthy, K., Ashebre, M., Venkatesh, J., & Suresha, B. (2017). Dry Sliding Wear Behavior of Aluminum 6063 Composites Reinforced with TiB<sub>2</sub> Particles. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 05(02), 74–89. doi:10.4236/jmmce.2017.52007
- Kumar, S., Chakraborty, M., Subramanya Sarma, V., & Murty, B. S. (2008). Tensile and wear behaviour of in situ Al-7Si/TiB<sub>2</sub> particulate composites. *Wear*, 265(1–2), 134–142. doi:10.1016/j.wear.2007.09.007
- Kumar, S., Sarma, V. S., & Murty, B. S. (2007). Influence of in situ formed TiB<sub>2</sub> particles on the abrasive wear behaviour of Al-4Cu alloy. *Materials Science and Engineering A*, 465(1–2), 160–164. doi:10.1016/j.msea.2007.02.117
- Kumar, S., Subramaniya Sarma, V., & Murty, B. S. (2010). Functionally graded Al alloy matrix in-situ composites. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 41(1), 242–254. doi:10.1007/s11661-009-0063-3
- Kumar, S., Subramanya Sarma, V., & Murty, B. S. (2009). Effect of temperature on the wear behavior of Al-7Si-TiB<sub>2</sub> in-situ composites. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 40(1), 223–231. doi:10.1007/s11661-008-9696-x
- Lai, M. O., Su, Y., Teo, H. L., & Feng, C. F. (2001). In situ TiB<sub>2</sub> reinforced Al alloy composites, 45, 1017–1023.
- Lu, L., La, M., & Chen, F. L. (1997). Al-4 wt % Cu COMPOSITE REINFORCED PARTICLES WITH IN-SITU TiB<sub>2</sub>, 45(10).
- Miracle, D. B. (2005). SCIENCE AND Metal matrix composites – From science to technological significance, 65, 2526–2540. doi:10.1016/j.compscitech.2005.05.027
- Naebe, M., & Shirvanimoghaddam, K. (2016). Functionally graded materials: A review of fabrication and properties. *Applied Materials Today*, 5, 223–245. doi:10.1016/j.apmt.2016.10.001
- Niu, L. Bin, Zhang, J. M., & Yang, X. L. (2012). In-situ synthesis of Al 3Ti particles reinforced Al-based composite coating. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 22(6), 1387–1392. doi:10.1016/S1003-6326(11)61330-7
- Ozdin, K. (2007). Wear resistance of aluminium alloy and its composites reinforced by Al 2 O 3 particles, 183, 301–309. doi:10.1016/j.jmatprotec.2006.10.021

- Radhika, N., & Raghu, R. (2018). Effect of Centrifugal Speed in Abrasive Wear Behavior of Al-Si<sub>5</sub>Cu<sub>3</sub>/SiC Functionally Graded Composite Fabricated by Centrifugal Casting. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 71(3), 715–726. doi:10.1007/s12666-017-1204-9
- Radhika, Nachimuthu, & Raghu, R. (2016). Effect of Abrasive Medium on Wear Behavior of Al/AlB<sub>2</sub> Functionally Graded Metal Matrix Composite. *Tribology Online*, 11(3), 487–493. doi:10.2474/trol.11.487
- Rajan, T. P. D., & Pai, B. C. (2011). Processing of Functionally Graded Aluminium Matrix Composites by Centrifugal Casting Technique. *Materials Science Forum*, 690, 157–161. doi:10.4028/www.scientific.net/msf.690.157
- Rosso, M. (2006). Ceramic and metal matrix composites: Routes and properties. *Journal of Materials Processing Technology*, 175(1–3), 364–375. doi:10.1016/j.jmatprotec.2005.04.038
- Sasikumar, S., Ramkumar, K. R., Iniyar, S., Gowthaman, M., & Sivasankaran, S. (2014). Study of mechanical and machining behavior of AA 7075-3 % TiB<sub>2</sub> in-situ composite, 3(3), 1229–1233.
- Singh, R., Bhavar, V., Kattire, P., Thakare, S., Patil, S., & Singh, R. K. P. (2017). A Review on Functionally Gradient Materials (FGMs) and Their Applications. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 229(1), 0–9. doi:10.1088/1757-899X/229/1/012021
- Sreenivasan, A., Vizhianb, S. P., Shivakumarc, N. D., Munirajua, M., & Raguramand, M. (2011). A study of microstructure and wear behaviour of TiB<sub>2</sub> / Al metal. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 8, 1–8.
- Tee, K. L., Lu, L., & Lai, M. O. (1999). In situ processing of Al – TiB<sub>2</sub> composite by the stir-casting technique, 90, 513–519.
- Tee, K. L., Lu, L., & Lai, M. O. (2010). In situ stir cast Al–TiB<sub>2</sub> composite: processing and mechanical properties . *Materials Science and Technology*, 17(2), 201–206. doi:10.1179/026708301101509863
- Tjong, S. C., & Ma, Z. Y. (2000). Microstructural and mechanical characteristics of in situ metal matrix composites. *Materials Science and Engineering R: Reports*, 29(3), 49–113. doi:10.1016/S0927-796X(00)00024-3
- Watanabe, Y., Zhou, Q., Sato, H., Fujii, T., & Inamura, T. (2017). Microstructures of Al-Al<sub>3</sub>Ti functionally graded materials fabricated by centrifugal solid-particle method and centrifugal in situ method. *Japanese Journal of Applied Physics*, 56(1), 0–11. doi:10.7567/JJAP.56.01AG01
- Zhang, H., Geng, J., Li, X., Chen, Z., Wang, M., Ma, N., & Wang, H. (2017). The micro-arc oxidation (MAO) behaviors of in-situ TiB<sub>2</sub>/A201 composite. *Applied Surface Science*, 422, 359–371. doi:10.1016/j.apsusc.2017.06.043