

TM Yöntemi ile Üretilmiş Al Matrisli Kompozitlerde Presleme Basıncının ve B₄C Oranının Sertlik ve Aşınma Davranışı Üzerine Etkisi

Yahya Hışman ÇELİK¹, Erol KILIÇKAP², Burak YENİGÜN³

¹Batman Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Batman, Türkiye

²Dicle Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Diyarbakır, Türkiye

³Batman Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Batman, Türkiye

yahyahisman.celik@batman.edu.tr

(Geliş/Received: 14.05.2017; Kabul/Accepted: 02.10.2017)

Özet

Toz metalürjisi (TM) yöntemi sayesinde metal tozlarının istenilen şekle çok kısa zamanda dönüştürülmesi ekonomik anlamda seri imalatı mümkün kılmaktadır. Bu durum, malzemelerde talaşlı işleme ihtiyacını ortadan kaldırarak karmaşık ve boyutsal hassasiyeti yüksek olan parçaların üretilmesine olanak sağlamaktadır. Özellikle alüminyum ve alaşımları, ticari alanlarda vazgeçilmez malzemeler olarak TM yöntemi ile üretimde yerini almıştır. Bu çalışmada, TM yöntemiyle üretilmiş B₄C takviyeli Al matrisli kompozitlerin farklı presleme basıncına (400 ve 475 MPa) ve takviye oranına (takviyesiz ve ağırlıkça % 4, 8 ve 12 takviyeli) bağlı olarak mikroyapı, sertlik ve aşınma davranışları incelenmiştir. Numunelerin aşınma deneyleri özel olarak imal edilen test düzeneği ile 0,50 m/s sabit kayma hızında, farklı uygulama yüklerinde (5, 10 ve 15 N) ve farklı kayma mesafelerinde (250, 500 ve 750 m) yapılmıştır. Ayrıca üretilen kompozitlerin mikroyapısal değişimlerini belirlemek için optik mikroskop ve SEM görüntüleri incelenmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda, kompozit numunelerde presleme basıncının ve takviye oranının artması ile sertlik değerlerinin arttığı ve aşınma kayıplarının azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca kayma mesafesi ve uygulanan yükün artması ile aşınma miktarının arttığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Aşınma, B₄C, Kompozit, Sertlik, Toz Metalürjisi.

The Effect of Contact Pressure and B₄C Ratio on Hardness and Wear Behaviours in Al-Matrix Composites Produced by PM Method

Abstract

The conversion of metal powders into a desired shape in a very short time thanks to the powder metallurgy (PM) method is economically enabled mass production. This situation allows producing of parts with complex and high dimensional accuracy by eliminating the machining needs. Particularly aluminium and its alloys have taken place as indispensable materials in commercial areas in production with PM method. In this study, microstructure, hardness and wear behaviours depending on different contact pressure (400 and 475 MPa) and reinforcement ratio (unreinforced and weight % 4, 8 and 12 reinforced) of Al matrix composites reinforced with B₄C produced by PM method were investigated. Wear experiments of these specimens were performed with specially manufactured test equipment at different application loads (5, 10 and 15 N), different sliding distances (250, 500 and 750 m) and a constant sliding velocity of 0.50 m/s. In addition, optical microscope, SEM images were investigated to determine the microstructural changes of the manufactured composite. In result of experimental studies, it was determined that the hardness values increased and the wear loss decreased with increasing the contact pressure and reinforcement ratio in composite specimens. It was also seen that the amount of wear increased with increasing of the sliding distance and the applied load.

Keywords: Wear, B₄C, Composite, Hardness, Powder Metallurgy.

1. Giriş

Seramik takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin üretilmesinde toz metalürjisi (TM) ve sıvı üretim teknikleri olmak üzere iki tip üretim

tekniki kullanılmaktadır. TM ile üretimde, takviye parçacıkları matris içerisinde homojen olarak dağılır ve yoğunlukları teorik olarak hesaplanan yoğunluklara yakın bir değerdedir. Ancak bu teknikte kompozit malzemeler farklı

aşamalardan geçirilerek üretilir. Sıvı üretim teknikleri ise daha düşük maliyette olmasına rağmen takviye parçacıkları matris içerisinde homojen olarak dağılmamakta ve yüksek erime sıcaklıklarından dolayı ara yüzeyde istenmeyen kimyasal reaksiyonlar oluşabilmektedir [1,2]. Yıllık metal matrisli kompozit üretiminin % 69'unu Al matrisli kompozitler oluşturmaktadır. Al alaşımlarının aşınma direnci; yük taşıyıcı ve aşındırıcı eleman olarak görev yapan seramik elyafların veya parçacıkların bir araya getirilmesiyle iyileştirilir [3]. Seramik parçacıklarıyla güçlendirilmiş Al metal matrisli kompozitler (Al-MMK); otomobil, uçak ve MMK'nin düşük yoğunluğunun büyük yararlar sağladığı diğer uygulamalarda aşınmaya dayanıklı, sürtünmeli malzemeler olarak ticari kullanım bulmaya başlamıştır [4]. Al-MMK'ler üzerine yapılan bazı çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Shorowordi ve ark., [4] karıştırma döküm yöntemi ve ardından sıcak ekstrüzyon yöntemi ile üretilen ve farklı temas basınçları altında aşındırılan Al/B₄C ve Al/SiC kompozit malzemenin tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Al/B₄C ve Al/SiC kompozitlerdeki aşınma oranının artan temas basıncı ile arttığını ve yüksek temas basınçlarında sürtünme katsayısının çok az miktarda azaldığını bulmuşlardır. Ipek [5] sıvı döküm yöntemi ile üretilen B₄C ve SiC takviyeli Al 4147 alaşım matrisli kompozitlerin adhezif aşınma davranışlarını incelemiştir. Alaşım matrisindeki ağırlıkça B₄C parçacık oranının artmasıyla Al/B₄C kompozitin aşınma direncini önemli ölçüde arttırdığını gözlemlemiştir. Topcu ve ark., [6] TM yöntemi ile üretilen B₄C parçacık takviyeli Al matrisli kompozitlerin takviye oranına bağlı mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmalarında kompozitlerdeki takviye oranının artmasıyla malzemenin darbe enerjisinin azaldığını ve sertlik değerinin arttığını gözlemlemiştir. Baradeswaran ve Elaya Perumal [7] döküm yöntemi ile üretilen Al 7075 parçacık takviyeli kompozit malzemede B₄C parçacık takviyesinin mekanik ve tribolojik davranışlara etkisini incelemişlerdir. Varol ve ark., [8] TM yöntemi ile Al2024/B₄C parçacık takviyeli kompozitlerin üretiminde; öğütme zamanı, parçacık boyutu ve parçacık miktarının kompozitlerin fiziksel ve mekanik özelliklerine

etkisini yapay sinir ağlarını kullanarak araştırmışlardır. Öğütme zamanının artması kompozitin sertliğini artırırken bağlı yoğunluğunun azalmasına neden olduğunu gözlemlemiştir. Harichandran ve Selvakumar [9] karıştırma ve ultrasonik kavitasyon yardımcı döküm yöntemleri ile üretilen Al/B₄C kompozit malzemede mikro ve nano B₄C parçacıklarının mekanik özelliklere etkisini incelemişlerdir. Mikro ve nano kompozitlerin mekanik özelliklerini değerlendirmek için çekme, sertlik, darbe ve aşınma testleri gerçekleştirmişlerdir. Çekme sonuçlarından % 6'ya kadar nano B₄C takviyeli kompozitler içeren numunelerin özelliklerinin, mikro B₄C takviyeli kompozitlerden daha iyi olduğunu gözlemlemiştir. Ayrıca nano kompozitlerin süneklik ve darbe enerjisinin mikro B₄C parçacık takviyeli kompozitlerinkinden daha iyi olduğunu tespit etmişlerdir. Hariprasad ve ark., [10] karıştırma döküm tekniği ile üretilen % 5 Al₂O₃ ve dört farklı (% 0, 3, 5 ve 7) B₄C parçacık takviyeli Al 5083 matrisli kompozitin aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Al₂O₃ ve B₄C parçacık takviye oranının artmasıyla kompozit malzemedeki aşınma direncinin arttığını tespit etmişlerdir. Kumar Bodukuri ve ark., [11] TM yöntemi ile üretilen Al/SiC/B₄C MMK'larda B₄C parçacık oranındaki artışın, MMK'ların mikrosertlik değerini önemli derecede arttırdığını tespit etmişlerdir. Seçilmiş ve Çelik [12], TM yöntemiyle üretilen B₄C takviyeli Al-MMK'lerde takviye oranının sertlik ve mikroyapıya etkisini incelemişlerdir. Siddesh Kumar ve arkadaşları [13], karıştırma döküm tekniği ile ürettikleri Al2219, Al2219/B₄C ve Al2219/B₄C/MoS₂ hibrit kompozitlerin aşınma davranışlarını incelemişlerdir. B₄C ve MoS₂ takviyelerinin hibrit kompozitin aşınma direncini arttırdığını tespit etmişlerdir. Thirumalai Kumaran ve arkadaşları [14], karıştırma döküm yöntemi ile üretilen AA6351 metal matrisli B₄C ve SiC parçacık takviyeli kompozitlerin takviye oranının aşınma davranışları üzerine etkilerini incelemişlerdir. Kompozit içerisindeki B₄C parçacık oranının artmasıyla aşınma oranının önemli ölçüde düştüğünü, dolayısıyla daha yüksek yük ve kayma hızı koşullarında B₄C parçacık oranı yüksek olan kompozitlerin iyi aşınma direnci davranışı sergilediğini gözlemlemiştir. Mazahery ve Shabani [15], kaplanmış B₄C takviyesiyle

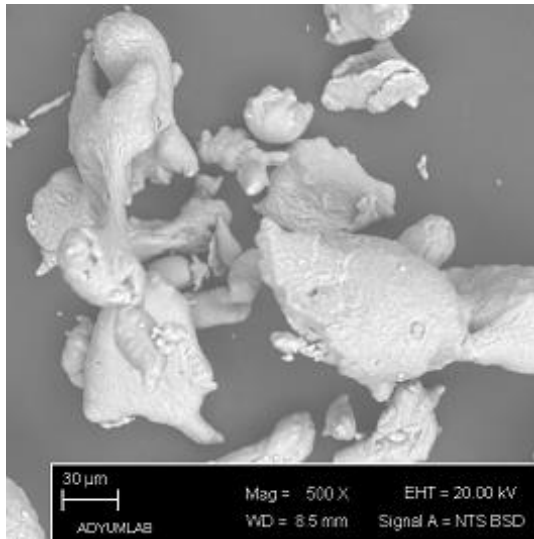
güçlendirilmiş Al-Si matrisinin aşınma davranışını incelemiştir. Siddhartha Prabhakar ve arkadaşları [16], Al/B₄C takviyeli MMK'lerin B₄C takviyesine, yüke, kayma hızına ve kayma mesafesine bağlı tribolojik davranışlarını incelemiştir. Hasırcı ve Gül [17], TM yöntemi ile üretilen Al matrisli B₄C parçacık takviyeli kompozitlerin kuru kayma koşullarındaki abrasif aşınma davranışlarını incelenmiştir. Al matris içerisine ilave edilen B₄C parçacıklarının iyi bir şekilde dağıldığı ancak takviye oranının artmasıyla dağılım düzeninin bir miktar azaldığını gözlemlemiştir. Rajesh ve arkadaşları [18], döküm yöntemi ile üretilen Al6061 matrisli B₄C seramik takviyeli kompozitin aşınma davranışını incelemiştir. Takviye oranının malzemenin yoğunluğu, sertliği, gözenekliği, uzaması ve mukavemeti gibi özelliklerini etkilediğini belirtmişlerdir. Shabani ve Mazahery [3], TiB₂ ile kaplanmış B₄C parçacıklarını farklı hacimlerde alüminyum alaşımına ilave ederek güçlendirilmemiş A356 alaşımının aşınma özelliklerini deneysel olarak araştırmışlardır. Karamış ve arkadaşları [19], TM yöntemi ile üretilen AA2124 metal matrisli farklı parçacık boyutlarına ve takviye oranına sahip SiC, B₄C veya Al₂O₃ takviye parçacıklı kompozitlerin tribolojik özelliklerini incelemiştir. SiC ve B₄C takviye oranına sahip kompozitlerin Al₂O₃

takviye oranına sahip kompozitlerden daha yüksek aşınma direnci gösterdiğini gözlemlemiştir. Uthayakumar ve arkadaşları [20], karıştırma döküm yöntemi ile üretilen Al 1100 alaşım matrisli % 5 SiC ve % 5 B₄C takviyeli hibrit kompozit malzemenin aşınma davranışlarını incelemiştir. Hibrit kompozit malzemelerin aşınma dirençlerinin oldukça iyi olduğunu tespit etmişlerdir.

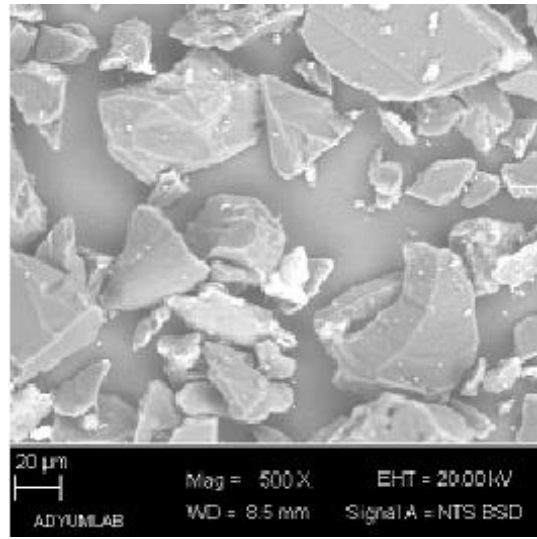
Yapılan çalışmalar incelendiğinde TM veya karıştırma döküm yöntemi ile üretilen Al matrisli seramik parçacık takviyeli çok sayıda çalışmanın olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışmada B₄C parçacık takviyeli Al-MMK'lerin TM yöntemi ile üretilmesinde presleme basıncının ve takviye oranının kompozitin sertliğine ve aşınma davranışlarına etkisi incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

TM yöntemi ile B₄C parçacık takviyeli Al matrisli (Al/B₄C) kompozitlerin üretilmesinde presleme basıncının ve takviye oranının sertlik ve aşınma davranışları üzerine etkilerini belirlemek için 25-44 µm boyuta ve % 99.9 saflığa sahip B₄C tozu ile 1-210 µm ve % 99 saflığa sahip Al tozu temin edilmiştir. Temin edilen tozlara ait SEM görüntüleri Şekil 1'de verilmiştir.



a) Saf Al tozu



b) B₄C tozu

Şekil 1. Tozların SEM görüntüleri

Tozlar 1 mg hassasiyete sahip hassas terazi ile tartılıp içerisine yağlayıcı olarak 5/1000

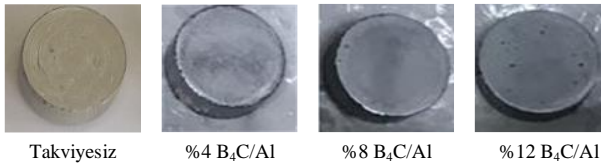
oranında çinko stearat tozu ilave edilmiştir. Tozların karışım oranları takviyesiz Al, ağırlıkça

% 4, 8 ve 12 B₄C/Al olacak şekilde hazırlanmıştır. Tozlar 5 mm çapındaki çelik bilyeler yardımı ile mekanik karıştırma cihazında (Planetary Ball Mill, XQM-2) 300 dev/dak dönme devrinde 20 dakika boyunca karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi sonucunda tozların homojen olarak dağıldığı gözlemlenerek tozlar 20 mm çapında silindirik kalıp içerisinde 400 ve 475 MPa basınçlar altında preslenmiştir. Bu doğrultuda farklı presleme basıncındaki saf Al ile farklı takviye oranına sahip Al/B₄C kompozitler Nabertherm Marka fırında 580°C sıcaklıkta 120 dakika boyunca argon gazı ortamında sinterlenmiştir. Sinterlenerek kompozit haline getirilen numunelerin yüzeyleri PRESI MINITEC 233 parlatma cihazında sırasıyla 120, 240, 400, 600, 800 ve 1200 boyuttaki zımpara kâğıtları, HS-V 3 parlatma keçesi, 3 mikron elmas süspansiyon ve alkol kullanılarak temizlenmiştir. Numunelerin optik görüntüleri NADE marka NMM-800 TRF model optik mikroskopla 5X büyültme ile incelenmiştir. Çalışmada kullanılan cihazların görüntüleri Şekil 2’de verilmiştir.

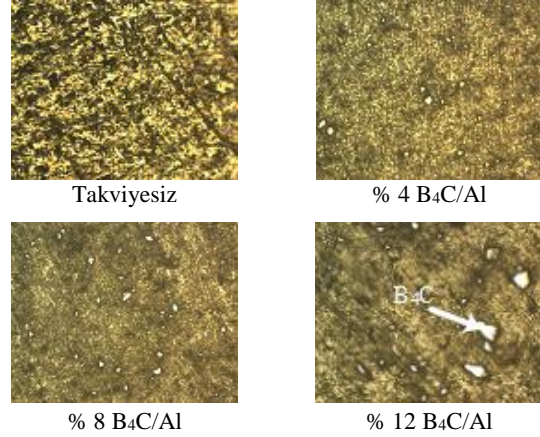


Şekil 2. Çalışmada kullanılan cihazlar

Al/B₄C kompozit numunelere ait resimler ve optik görüntüleri sırasıyla Şekil 3 ve Şekil 4’de verilmiştir.

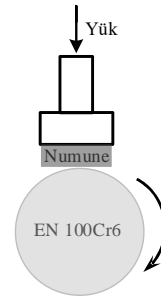


Şekil 3. Al/B₄C kompozitlere ait resimler



Şekil 4. Al/B₄C kompozitlerin optik görüntüleri

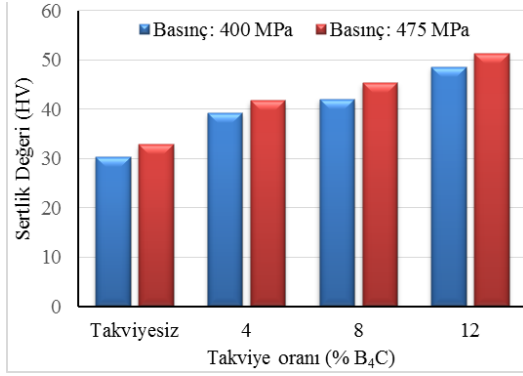
Sertlik deneyleri Shimadzu HMV mikrosertlik ölçüm cihazında gerçekleştirilmiştir. Kompozit numunelerin farklı noktalarına 1 N’luk yük 15 saniye boyunca uygulanarak elde edilen izin büyüklüklerine bağlı olarak alınan ortalama değere göre sertlik değerleri tespit edilmiştir. Aşınma deneyleri ise JETCO JML-3010Y torna tezgâhına bağlanan özel aşınma deney düzeneği ve aşındırıcı olarak kullanılan EN 100Cr6 rulman çeliği ile yapılmıştır. Şekil 5’de kompozitlerin aşınma deneyinin yapılması için hazırlanan deney düzeneği gösterilmiştir. Aşınma deneyleri kuru kayma şartları altında, 0,50 m/s sabit kayma hızında, 5, 10 ve 15 N yüklerde, 250, 500 ve 750 m kayma mesafelerinde gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneyi yapılan numunelerin SEM görüntüleri de incelenmiştir.



Şekil 5. Aşınma deney düzeneği

3. Sonuçlar

Farklı presleme basınçlarında TM yöntemi ile üretilen saf Al ile B₄C parçacık takviyeli Al matrisli kompozit numunelerin aşınma davranışlarını belirlenmeden önce, bu numunelerin sertlikleri tespit edilmiştir (Şekil 6).



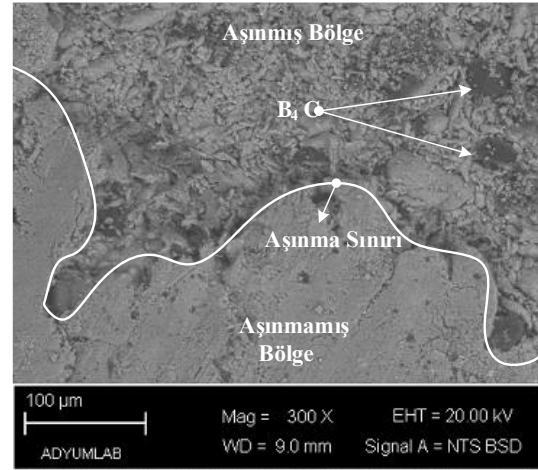
Şekil 6. Basınç ve takviye oranına bağlı sertlik değerleri

Şekil 6’da görüldüğü gibi sertlik değeri, presleme basıncı ve takviye oranı ile değişmektedir. Hem presleme basıncının hem de takviye oranının artması sertlik değerini arttırmıştır. En düşük sertlik değeri, preleme basıncının 400 MPa olduğu takviyesiz Al’den 30,4 HV, en yüksek sertlik değeri ise presleme basıncının 475 MPa olduğu % 12 B₄C takviyeli Al matrisli kompozitten 51,3 HV olarak ölçülmüştür. Sertliğin değişmesine en büyük katkıyı takviye oranının değişmesi sağlamıştır. Çünkü takviye elemanı olarak kullanılan B₄C oldukça sert bir yapıya sahiptir ve ilave edildiği malzemenin sertlik değerini artırır. Baradeswaran ve Elaya Perumal [7] ve Mazahery ve Shabani’de [15] kompozit malzemeye ilave edilen takviye elemanının oranındaki artışın sertliği önemli ölçüde arttırdığını belirtmişlerdir. Orhan ve ark. [21] ve Guo ark. [22] presleme basıncının artmasının tozlar arasındaki gözenekli

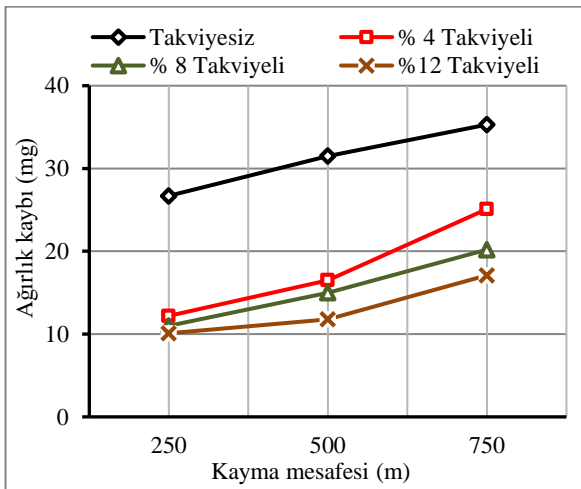
yapıyı azaltarak, sertlik değerinin artmasına katkı sağladığını ifade etmişlerdir.

Şekil 7’de % 12 B₄C takviyeli Al matrisli kompozit numune üzerinde aşınma deneylerinin yapıldığı bölge ile aşınmamış bölgenin SEM görüntüsü verilmiştir. Tozlar mekanik karıştırma cihazında karıştırılarak hazırlandığı için numune içerisinde takviye elemanının homojen olarak dağıldığı görülmüştür. Ayrıca aşınma ile birlikte numune yüzeylerinde çizikler, çatlaklar ve çukurlaşmalar gözlemlenmiştir.

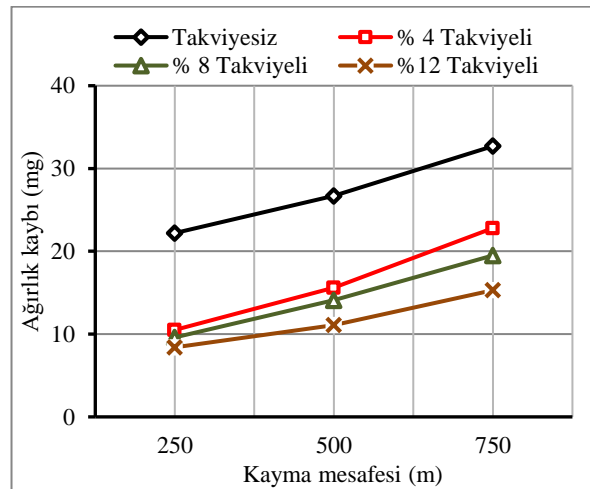
Takviyesiz ve farklı B₄C takviyeli Al matrisli kompozitlerin kuru kayma şartları altında kayma mesafesine bağlı ağırlık kaybı değişimi Şekil 8’de, takviye oranına ve yüke bağlı ağırlık kaybı değişimi Şekil 9’da verilmiştir.



Şekil 7. % 12 B₄C takviyeli numuneye ait aşınma SEM görüntüsü

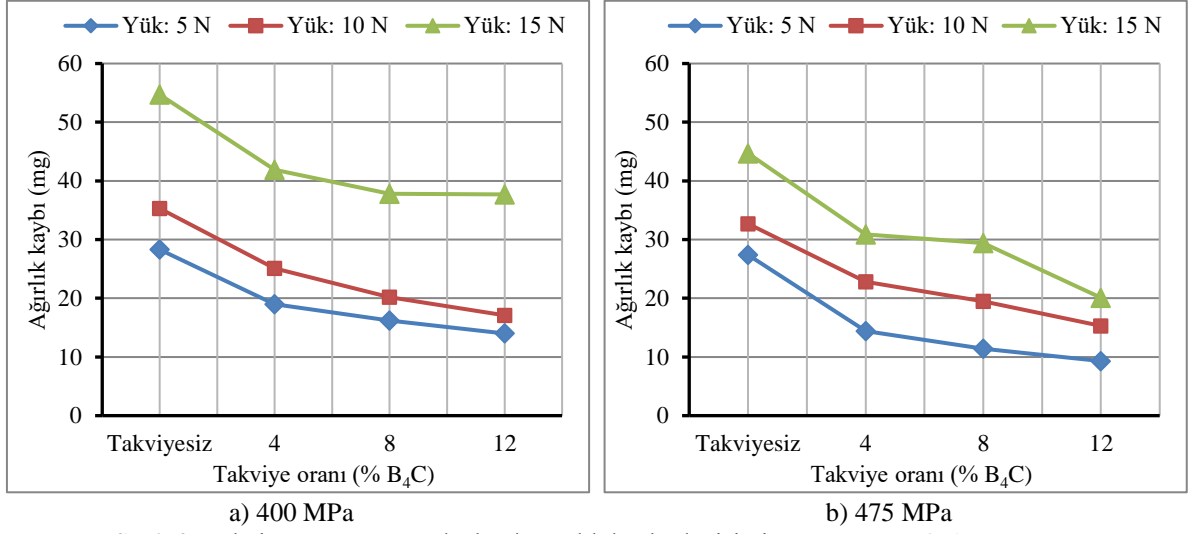


a) 400 MPa



b) 450 MPa

Şekil 8. Kayma mesafesine bağlı ağırlık kaybı değişimi (Yük: 10 N)

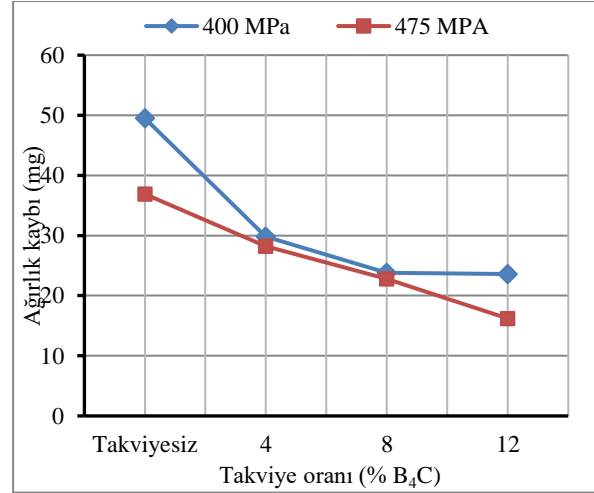


Şekil 9. Takviye oranına ve yüke bağlı ağırlık kaybı değişimi (Kayma mesafesi: 750 m)

Şekil 8’de görüldüğü gibi hem 400 MPa hem de 475 MPa basınç altında preslenerek üretilen tüm numuneler için kayma mesafesinin artması ağırlık kaybının artmasına neden olmuştur. Şekil 9’da ise uygulanan yükün artması ile ağırlık kaybının arttığı görülmektedir. Bir biri ile etkileşim halinde çalışan yüzeylerde bağlı hareketin sonucu olarak hasarlar oluşmaktadır. Bu hasarlar özellikle plastik deformasyonun sonucu olarak malzeme kaybı ve mikroçatlaklar olarak gözlemlenmektedir. Yükün ve kayma mesafesinin artması plastik deformasyonu arttırdığından dolayı kompozit malzemelerde ağırlık kaybı artmıştır.

Şekil 8 ve Şekil 9’da da görüldüğü gibi takviye oranının artması ise ağırlık kaybını azaltmıştır. Ağırlık kaybının azalmasına katkı sağlayan diğer etmen ise kompozit numunelerin üretilmesi esnasında kullanılan presleme basıncıdır. Şekil 10’da presleme basıncına ve takviye oranına bağlı ağırlık kaybı değişimi verilmiştir. Sert ve daha az gözenekli yapıya sahip olan makine elemanları, bir biri ile etkileşim halinde çalıştığı zaman daha az plastik deformasyona uğrar. Guo ve ark. [22] B₄C takviye elemanının oldukça sert ve iyi aşınma direncine sahip olduğundan dolayı bu takviye elemanları ile üretilen kompozitlerin aşınma dirençlerinin arttığını ifade etmişlerdir. Dolayısıyla aşınma direnci yüksek olan malzemelerde ağırlık kaybı azalmaktadır.

Minimum ağırlık kaybı presleme basıncının 475 MPa, uygulanan yükün 5N ve kayma mesafesinin 250 m olduğu durumda % 12



Şekil 10. Presleme basıncı ve takviye oranının ağırlık kaybına etkisi (Yük: 15 N, Kayma mesafesi: 500 m)

B₄C takviyeli Al matrisli kompozit numuneden 3,3 mg olarak elde edilmiştir. Maksimum ağırlık kaybı ise presleme basıncının 400 MPa, uygulanan yükün 15 N ve kayma mesafesinin 750 m olduğu durumda takviyesiz numuneden 54, 7 mg olarak elde edilmiştir.

4. Tartışma

TM yöntemiyle farklı presleme basınçlarında üretilmiş takviyesiz ve B₄C takviyeli Al matrisli kompozitlerin mikroyapıları, sertlik ve aşınma değerleri incelenmiştir. Çalışma sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- ✓ B₄C takviyesinin matris içerisinde homojen olarak dağıldığı görülmüştür.

- ✓ Presleme basıncının ve B₄C parçacık takviye oranının artması sertlik değerinin artmasına katkı sağlamıştır.
- ✓ En yüksek sertlik değeri 475 MPa presleme basıncında üretilen % 12 B₄C takviyeli Al matrisli kompozit numuneden 51,3 HV olarak elde edilmiştir.
- ✓ En düşük sertlik değeri 400 MPa presleme basıncında üretilen takviyesiz numuneden 30,4 HV olarak elde edilmiştir.
- ✓ Kompozit numunelerin sertlik değeri arttıkça aşınma kaybına bağlı olarak aşınma direncinin arttığı tespit edilmiştir.
- ✓ Presleme basıncının ve takviye oranının artması ile aşınma kaybının azaldığı görülmüştür.
- ✓ Kayma mesafesinin ve uygulanan yükün artması ile aşınmanın arttığı görülmüştür.
- ✓ En fazla aşınma miktarı 400 MPa presleme basıncında üretilen takviyesiz numuneden elde edilmiştir.
- ✓ En iyi aşınma direnci 475 MPa presleme basıncında üretilen % 12 B₄C takviyeli Al matrisli kompozit numuneden elde edilmiştir.

5. Kaynaklar

1. Bedir, F. (2007). Characteristic properties of Al-Cu-SiC_p and Al-Cu-B₄C composites produced by hot pressing method under nitrogen atmosphere. *Materials and Design*, **28**: 1238-1244.
2. Fattah-Alhosseini, A., Naseri, M., Alemlı, M.H. (2016). Corrosion behavior assesment of finely dispersed and highly uniform Al/B₄C/SiC hybrid composite fabricated via accumulative roll bonding process. *Journal of Manufacturing Processes*, **22**: 120-126.
3. Shabani, M.O., Mazahery, A. (2011). Modeling of the wear behavior in A356-B₄C composites. *Journal of Materials Science*, **46**:6700-6708.
4. Shorowordi, K.M., Haseeb, A.S.M.A., Celis J.P. (2006). Tribo-surface characteristics of Al-B₄C and Al-SiC composites worn under different contact pressures. *Wear*, **261**: 634-641.
5. Ipek, R. (2005). Adhesive wear behaviour of B₄C and SiC reinforced 4147 Al matrix composites (Al/B₄C-Al/SiC). *Journal of Materials Processing Technology*, **162**:71-75.

6. Topcu, I., Gulsoy, H.O., Kadioglu, N., Gulluoglu, A.N. (2009). Processing and mechanical properties of B₄C reinforced Al matrix composites. *Journal of Alloys and Compounds*, **482**:516-521.
7. Baradeswaran, A., Elaya Perumal, A. (2013). Influence of B₄C on the tribological and mechanical properties of Al 7075-B₄C composites. *Composites: Part B*, **54**:146-152.
8. Varol, T., Canakci, A., Ozsahin, S. (2013). Artificial neural network modeling to effect of reinforcement properties on the physical and mechanical properties of Al2024-B₄C composites produced by powder metallurgy. *Composites: Part B*, **54**:224-233.
9. Harichandran, R., Selvakumar, N. (2016). Effect of nano/micro B₄C particles on the mechanical properties of aluminium metal matrix composites fabricated by ultrasonic cavitation-assisted solidification process. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, **16**:147-158.
10. Hariprasad, T., Varatharajan, K., Ravi, S. (2014). Wear characteristics of B₄C and Al₂O₃ reinforced with Al 5083 metal matrix based hybrid composite. *Procedia Engineering*, **97**:925-929.
11. Bodukuri, A.K., Eswaraiyah, K., Rajendar, K. (2016). Fabrication of Al-SiC-B₄C metal matrix composite by powder metallurgy technique and evaluating mechanical properties. *Perspectives in Science*, **8**:428-431.
12. Seçilmiş, K., Çelik, Y.H. (2016). Investigation of hardness and microstructures of B₄C/Al composites in different reinforcing rates. *International Engineering Science and Education Conference*, (1-3 December 2016), Proceeding Book, Diyarbakır, 667-663.
13. Kumar, N.G.S., Ravindranath, V.M., Shankar, G.S.S. (2014). Dry sliding wear behaviour of hybrid metal matrix composites. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, **3**:554-558.
14. Kumaran, S.T., Uthayakumar, M., Aravindan, S., Rajesh, S. (2016). Dry sliding wear behaviour of SiC and B₄C-reinforced AA6351 metal matrix composite produced by stir casting process. *Journal of Materials: Design and Applications*, **230**:484-491.
15. Mazahery, A., Shabani, M.O. (2012). A comparative study on abrasive wear behavior of semisolid-liquid processed Al-Si matrix reinforced with coated B₄C reinforcement. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, **65**:145-154.

- 16.**Prabhakar, N.S., Radhika, N., Raghu, R. (2014). Analysis of tribological behavior of aluminium/B₄C composite under dry sliding motion. *Procedia Engineering*, **97**:994-1003.
- 17.**Hasırcı, H., Gül, F. (2010). B₄C/Al kompozitlerin takviye hacim oranına bağlı olarak abrasif aşınma davranışlarının incelenmesi. *SDU International Technologic Science*, **2**:15-21.
- 18.**Rajesh, G.L., Auradi, V., Kori, S.A. (2016). Mechanical behaviour and dry sliding wear properties of ceramic boron carbide particulate reinforced Al6061 matrix composites. *Transactions of the Indian Ceramic Society*, **75**:112-119.
- 19.**Karamış, M.B., Cerit, A.A., Selçuk, B., Nair, F. (2012). The effects of different ceramics size and volume fraction on wear behavior of Al matrix composites (for automobile cam material). *Wear*, **289**:73-81.
- 20.**Uthayakumar, M., Aravindan, S., Rajkumar, K. (2013). Wear performance of Al-SiC-B₄C hybrid composites under dry sliding conditions. *Materials and Design*, **47**:456-464.
- 21.**Orhan, A., Gür, A.K., Çalığülü, U. (2007). Al matrisli B₄C takviyeli kompozitlerin sıcak presleme yöntemiyle üretimi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, **4**:8-13.
- 22.**Guo, W.M., Zhang, Z.L., Li, J.X., You, Y., Wu, S.H., Lin, H.T. (2016). Improvement of densification and mechanical properties of Al₂O₃-B₄C ceramics. *Ceramics International*, **42**:11486–11489.