



Elektrik Akımı Destekli Sinterleme Yöntemi ile Üretilen Bronz Esaslı Seramik Takviyeli Fren Balatalarının Tribolojik Özelliklerine B₂O₃ Etkisi

Makale Bilgisi / Article Info
Alındı/Received: 23.06.2023x
Kabul/Accepted: 07.03.2024
Yayımlandı/Published: 29.04.2024

B₂O₃ Effect on Tribological Properties of Bronze Based Ceramic Reinforced Brake Pads Produced by Electric Current Assisted Sintering Method

Nuri ERGİN^{1*}, Bora ÇALIŞKANÖZTÜRK¹, Yasin ÇİPİL¹, Necati KOÇAK¹, Mehmet UYSAL², Özkan ÖZDEMİR¹

¹ Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

² Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

Öz

Bu çalışma kapsamında başta tanklar olmak üzere zorlu arazi şartlarında görev yapan askeri araçlar için balata üretimi hedeflenmiştir. Toz boyutları 3-45 µm aralığında değişim gösteren Bronz (Cu, %11 Sn), Al₂O₃, B₂O₃ ve grafit tozu başlangıç malzemesi olarak kullanılarak, 900-1200A akım aralığında 8 dakika bekleme süresi ile Elektrik Akımı Destekli Sinterleme (ECAS) yöntemiyle bronz esaslı balata imalatı gerçekleştirilmiştir. Üretilen numunelerin özellikleri; metalografik (SEM) incelemeler, faz analizi (XRD, SEM-EDS), yoğunluk, sertlik ve aşınma çalışmaları ile belirlenmiştir. Ağırlıkça %2, %4 ve %6 B₂O₃ ilaveli numunelerde sırasıyla %98.26, %98.97, %98.08 nispi yoğunluklar elde edilirken, sertlik değerleri 258, 402 ve 385 Hv olarak belirlenmiş ve sürtünme katsayısı yaklaşık 0.67, 0.51 ve 0.72 olup aşınma oranları ise yaklaşık 0.83, 0.46 ve 1.1 mm³/Nm olarak tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler ECAS; Balata; B₂O₃; Aşınma

1. Giriş

Ekonomi, trafik güvenliği gibi farklı yönleri ile ele alınan ulaşım faaliyetleri, tüm sanayi kolları ile yakından ilişkilidir ve sağladığı katma değer sayesinde günümüz araştırma konuları arasında yer almaktadır. Genel olarak ulaşım türleri incelendiğinde, deniz taşımacılığı haricindeki tüm ulaşım türlerinin vazgeçilmez ve hayati önem taşıyan unsurları fren sistemleridir. Bu mekanizma içerisinde fren balataları aşınmaya maruz kalan zor çalışma koşullarında aktif olarak görev alan parçalar olup, yıllardır üzerinde çalışılan ve halen çalışılmakta olan mühendislik ürünüdür. Bir fren balatası tasarlanırken, sürtünmeye maruz kalan elamanların performansları test edilerek en uygun kompozisyona sahip bileşimlerin belirlenmesi sağlanmaktadır. Genel itibarıyla fren balataları yapısal,

Abstract

Within the scope of this study, it is aimed to produce brake pads for military vehicles operating in difficult terrain conditions, especially tanks. Using Bronze (Cu, 11% Sn), Al₂O₃, B₂O₃ and graphite powder, whose powder sizes vary between 3-45 µm, as starting materials, bronze-based brake pads were manufactured by the ECAS method with a waiting time of 8 minutes in the current range of 900-1200A. Properties of the produced samples; It was determined by metallographic (SEM) examinations, phase analysis (XRD, SEM-EDS), density, hardness and wear studies. While relative densities of 98.26%, 98.97% and 98.08% were obtained in samples with 2%, 4% and 6% B₂O₃ by weight, respectively, the hardness values were determined as 258, 402 and 385 Hv, the friction coefficient was approximately 0.67, 0.51 and 0.72, and the wear rates were approximately It was determined as 0.83, 0.46 and 1.1 mm³/Nm.

Keywords ECAS, Brake Pad; B₂O₃; Wear

bağlayıcılar, yağlayıcılar, aşındırıcılar ve dolgu elemanları olmak üzere "farklı grup malzemelerden oluşmakta ve bu malzemelerin üretimlerinde genellikle toz metalurjisi tekniği kullanılmaktadır (Mohanty, *et. al.* 2007, Cho, *et. al.* 2005). Herhangi bir sistemi tasarlamak için güç, dayanıklılık, performans ve diğer özellikleri veren bir malzeme seçmek önemlidir (Abdel-Rahim and Darwish 2010). Fren sisteminde ilk olarak ahşap ve deri gibi organik malzemeler kullanılmıştır. Çalışma koşullarının ağırlaşması ile yetersiz kalan bu organik malzemelerin yerini reçine bağlayıcı asbest esaslı malzemeler almıştır (Mahdribin 1995). Uzun yıllar kullanılmakta olan bu malzemeler sabit sürtünme katsayısı, düşük aşınma oranı, düşük gürültü ve titreşim önleme, güvenli kullanım için yüksek direnç ve zor koşullarda kullanılabilirlik gibi fren

balatalarından beklenen tüm özellikleri karşılayamamaktadır. Ayrıca asbest mineralinin kanserojen yapısı açısından insan sağlığına olumsuz etkilerinden dolayı son zamanlarda çoğu ülkede asbest esaslı fren balataların üretimine izin verilmemektedir (Kato and Akira 1994). Buna karşın, bazı üreticiler ya başka malzemelere geçmek istemedikleri için ya da çok daha üstün modern sürtünme malzemelerine geçmek için gerekli teknolojiye sahip olmadıkları için temel malzeme olarak hala asbest kullanıyorlar (Blau 2001). Asbest esaslı balatalara göre yüksek hızda daha fazla enerji emmesi, daha yüksek aşınma direnci sergilemesi, daha iyi yüksek sıcaklık kararlılığına sahip olması ve sürtünme katsayılarının sıcaklık ve basınçla daha az değişim göstermesi sebebiyle metalik fren balataları daha çok ön plana çıkmaktadır (Liu and Rhee 1978, Boz ve Kurt 1999). Bronz ve demir esaslı olmak üzere iki ana gruba ayrılan metalik fren balatalarında servis şartlarına bağlı olarak, 1000°C den yüksek olduğu yerlerde demir, yüksek sürtünme şartlarının olduğu yerlerde yaygın olarak bakır ve bronz esaslı balatalar tercih edilmektedir (Morshed *et. al.* 2004, Albayrak B. 2009). Kurt ve Boz (2005) çalışmalarında bronz esaslı fren balatalarında aşınma oranının daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir.

Yapılan bu çalışmada bronz, matris olarak kullanılırken; sertliği artırma ve sertlik değerini çevre koşullarına bağlı olarak koruma, yoğunluğu azaltarak ağırlık tasarrufu sağlama gibi özelliklerinden dolayı B₂O₃ ve benzer özelliklere sahip Al₂O₃ aşındırıcı takviye elemanı olarak, grafit tozu ise yağlayıcı olarak kullanılmıştır. Üretilen numunelerin karakterizasyonu metalografik (SEM) incelemeler, faz analizi (XRD, SEM-EDS), yoğunluk, sertlik ve aşınma çalışmaları ile belirlenmiştir.

2. Materyal ve Metot

Balataların üretiminde başlangıç malzemesi olarak, partikül boyutları 3-45 µm aralığında değişim gösteren atomizasyon yöntemi ile üretilmiş Bronz (Cu, %11 Sn), mekanik yöntemlerle elde edilmiş Al₂O₃, B₂O₃ ve grafit tozları kullanılmıştır.

Tablo 1. Tozların karışım oranları

Malz.	Kullanılan Tozlar ve Karışım Oranları
1.	79% Bronz, 16% Al ₂ O ₃ , 2% B ₂ O ₃ , 3% Grafit
2.	77% Bronz, 16% Al ₂ O ₃ , 4% B ₂ O ₃ , 3% Grafit
3.	75% Bronz, 16% Al ₂ O ₃ , 6% B ₂ O ₃ , 3% Grafit

Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen numunelerin özelliklerini etkileyen en önemli parametrelerden biri olarak kabul edilen başlangıç tozlarının yüzey morfolojileri

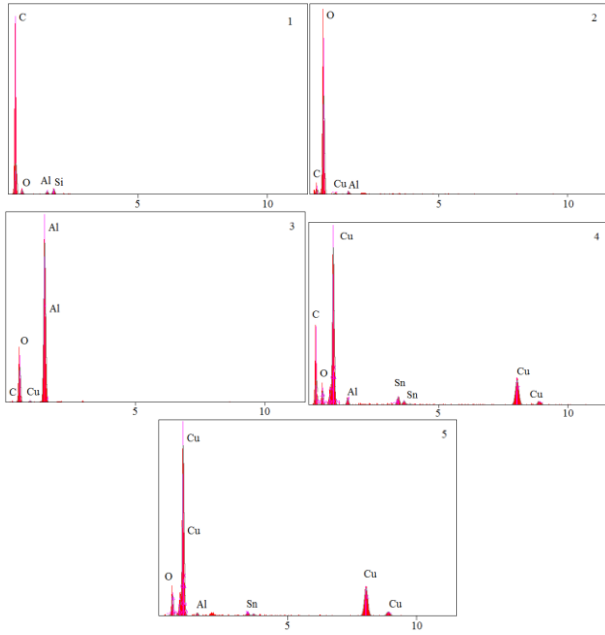
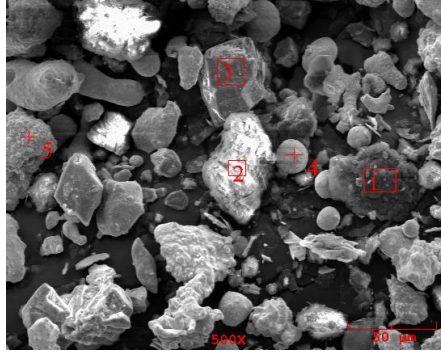
SEM analizleri yapılarak belirlenmiştir. Yapılan çalışmada B₂O₃ miktarı değişken parametre olduğundan, takviye miktarlarına göre ayarlanıp uygun bileşim oranına göre hazırlanan toz karışımlar gezegensel bilyalı değirmende 1/30 toz/bilya ağırlık oranı olacak şekilde 600 rpm hızda 4 periyot set olarak 4 saat sürede karıştırılmıştır. Hazırlanan toz karışımların ön şekillendirme işlemlerinin yapılabilmesi ve sonrasında elektrik akımı tatbik edilerek üretimlerin gerçekleştirilmesi için yüksek sıcaklık takım çeliklerinden elde edilmiş tek kullanımlık kalıplar kullanılmıştır.

Numunelerin nihai şekline uygun olarak talaşlı imalat yöntemleri ile elde edilen ve sonrasında taşlama işlemi ile yüzey pürüzlülüğü minimuma indirgenen kalıplar, ECAS prosesinde meydana yüksek ısıdan etkilenmemesi ve üretimi gerçekleştirilen numunelerin kalıplardan kolay çıkması için bor nitrür yağlayıcılar ile yağlanmıştır. Tüm bu işlemler sonrası kalıplara yerleştirilen numuneler tek eksenli hidrolik pres kullanılarak 250 MPa basınç altında şekillendirilip, ECAS prosesi için redresör problemleri arasına alınmıştır. 900-1200A akım aralığında 8 dakika bekleme süresi sonrası 30 mm çap ve 5 mm yüksekliğe sahip numuneler elde edilmiştir. Üretilen numunelerin karakterizasyon çalışmaları; standart numune hazırlama tekniklerine uygun olarak hazırlandıktan sonra metalografik (SEM) incelemeler, faz analizi (XRD, SEM-EDS), yoğunluk, sertlik ve aşınma çalışmaları ile belirlenmiştir. Aşınma testleri CSM Instruments SA marka (Avusturya) aşınma cihazında yapılmıştır. Sürtünme katsayısı eğrileri, cihazda bulunan program tarafından otomatik alınmıştır. Aşınma hızı hacimsel olarak hesaplanmıştır. Testlerden sonra, aşınmış malzemenin alanını hesaplamak için aşınma izleri yüzey profilometresi (KLA Tencor P6) ile ölçülmüştür. Aşınma hızı Eşitlik.1 ile hesaplanmıştır.

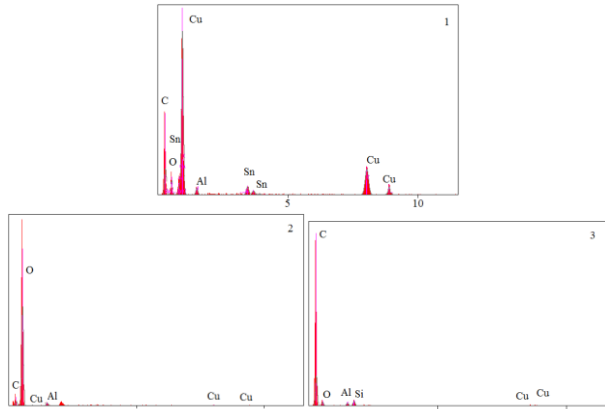
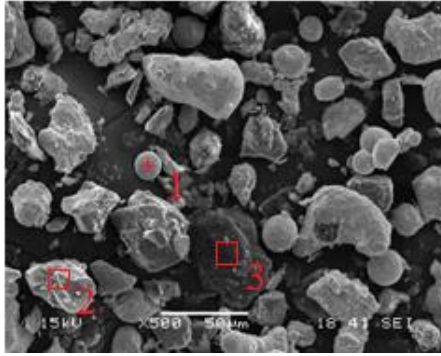
$$\text{Aşınma hızı} = V/FS \quad (1)$$

Burada; V mm³ cinsinden aşınma hacmi, F ise N cinsinden uygulanan yük ve S kayma mesafesidir. ECAS süreci şematik olarak Şekil 1'de gösterilmiştir. Tozları birleştirmek veya belirli ürünleri istenen şekle ve yoğunlukta sentezlemek ve aynı anda yoğunlaştırmak için mekanik basınçla birlikte aynı anda bir elektrik akımı uygular. Uygulanan elektrik akımı ve mekanik yük, sinterleme döngüsü boyunca sabit olabilir veya seçilen yoğunlaştırma aşamaları sırasında değişebilir.

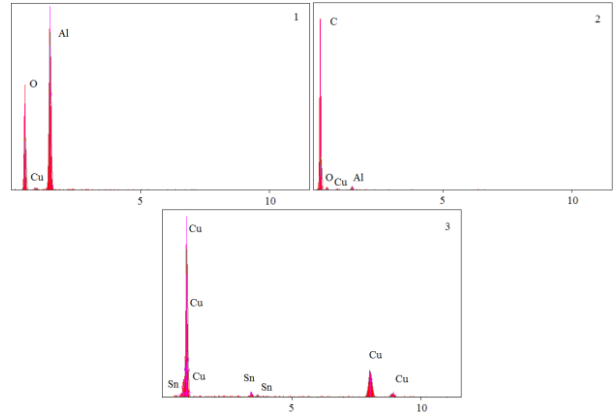
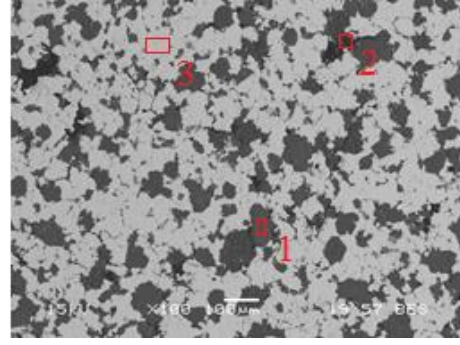
Numunelerin nihai şekline uygun olarak elde edilmesi amacıyla öncelikle üretim kalıpları tasarlanmıştır. Kalıp şekillendirmeleri talaşlı imalat yöntemleri ile



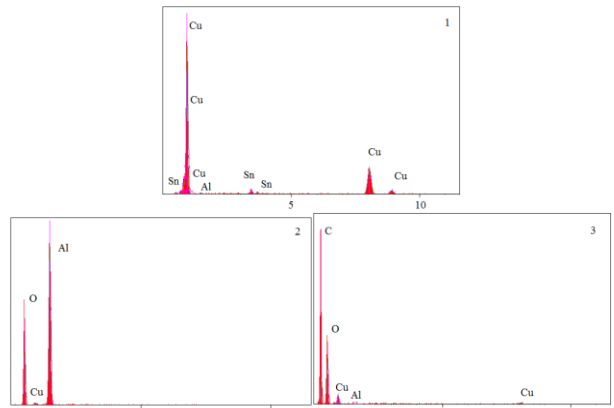
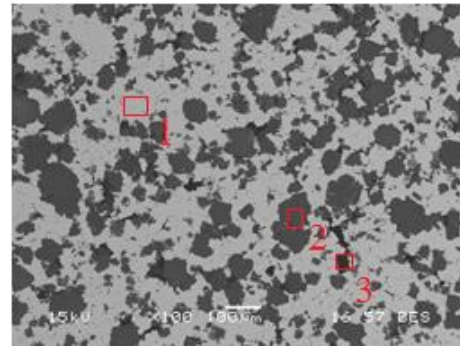
Şekil 4. %4 B_2O_3 ihtiva eden toz karışımın SEM-EDS görüntüsü



Şekil 5. %6 B_2O_3 ihtiva eden toz karışımın SEM-EDS görüntüsü



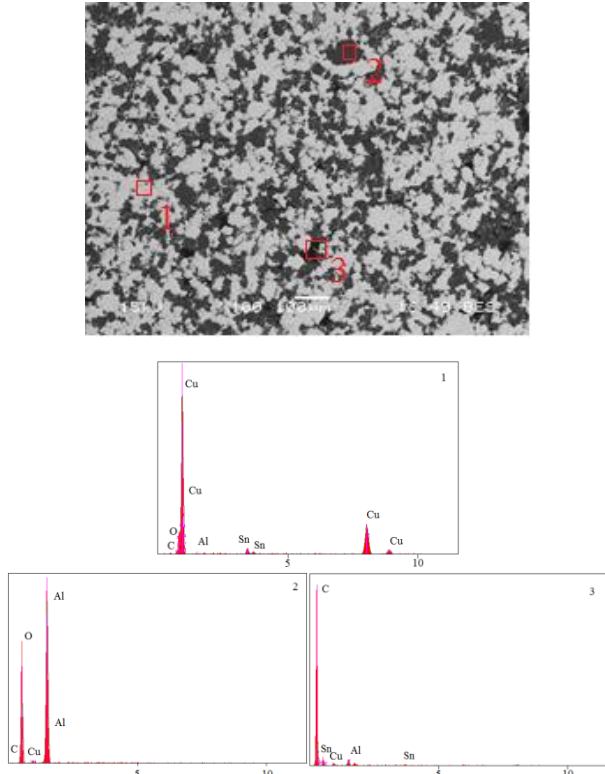
Şekil 6. %2 B_2O_3 ihtiva eden balata numunesinin SEM-EDS görüntüsü



Şekil 7. %4 B_2O_3 ihtiva eden balata numunesinin SEM-EDS görüntüsü

Numunelerde oluşan faz yapılarını tespit etmek amacıyla XRD analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre B_2O_3 miktarının ağırlıkça % 2, 4 ve 6 oranında değişmesi ve ana

yapının aynı olması dolayısıyla XRD paternleri benzer olup, sadece şiddetlerinde artışlar belirlenmiştir.

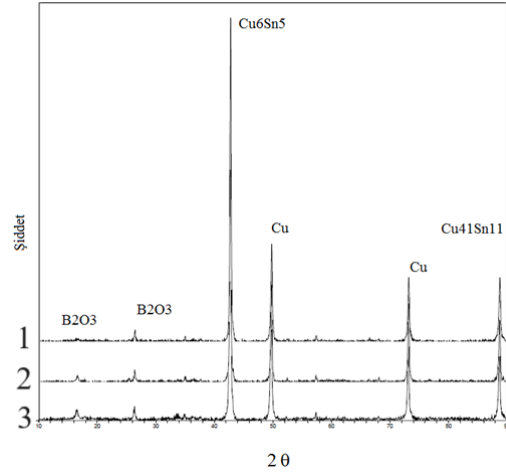


Şekil 8. %6 B₂O₃ ihtiva eden balata numunesinin SEM-EDS görüntüsü

Archimed prensibine göre ölçülen numunelerin nispi yoğunlukları Tablo 2’de verilmiştir. Üretilen numunelerin nispi yoğunluklarının %90’ın üzerinde olduğu belirlenmiştir. Numunelerin nispi yoğunluklarının geleneksel toz metalurjisine göre yüksek olmasının nedeni tercih edilen üretim yöntemi olan ECAS tekniğindedir. Bu teknikte, işlem süresince elektrik akımı ile eş zamanlı olarak tek eksenli preste mekanik basınç uygulanmaktadır. Yanmaz ve Şahin (2023), B₄C-ZrB₂ kompozitini spark plazma sinterleme (SPS) yöntemi ile üretmiş ve %99,23 nispi yoğunluğa ulaşmışlardır. Spark plazma sinterleme tekniği ECAS yönteminin bir alt dalıdır (Cordier et. al. 2012). SPS tekniğinde AC akım kullanırken, bu çalışmada DC akım kullanılmıştır. Genel itibari ile yoğunluklar birbirine yakın olmakla birlikte en iyi nispi yoğunluğa sahip numunenin homojen bir mikroyapı dağılımına sahip olan %4 B₂O₃ takviyeli numune olduğu tespit edilmiştir. En düşük nispi yoğunluğun %6 B₂O₃ takviyeli numunede olmasının nedeni kompozit malzemede B₂O₃ partiküllerinin kısmi olarak topaklanmasıdır.

Numunelerin sertlik değerlerinin tespit edilmesi, mekanik özellikleri ile ilgili bilgi vermesi açısından oldukça önemlidir. Sertlik ölçümleri mikrosertlik cihazında Vickers sertlik ucu kullanılarak yapılmıştır. Numunelerin sertlik değerleri, metalografik olarak hazırlanmış numunelerden

500 gr yük altında 6 farklı ölçümün ortalaması alınarak tespit edilmiş ve bulunan sertlik değerleri Tablo 3’de verilmiştir.



Şekil 9. Farklı B₂O₃ oranlarında takviye edilen bronz kompozit malzemelerin XRD paternleri (1) %2 B₂O₃ (2) %4 B₂O₃ (3) %6 B₂O₃ takviyeli

Tablo 2. Numunelerin nispi yoğunlukları

Malzeme	Nispi Yoğunluk(%)
79% Bronz, 16% Al ₂ O ₃ , 2% B ₂ O ₃ , 3% Grafit	98.26
77% Bronz, 16% Al ₂ O ₃ , 4% B ₂ O ₃ , 3% Grafit	98.97
75% Bronz, 16% Al ₂ O ₃ , 6%B ₂ O ₃ , 3% Grafit	98.08

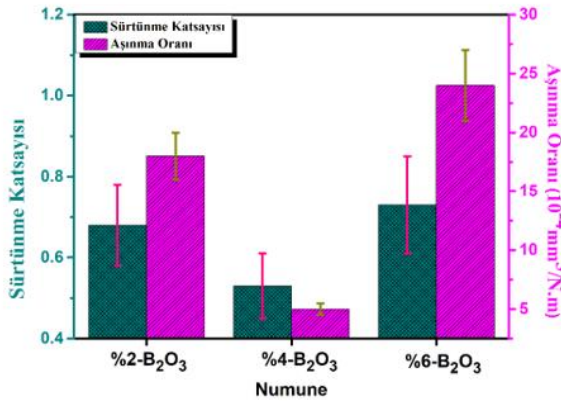
Matrise ilave edilen takviye elemanın hacimce yüzde oranı ve metal matris içindeki dağılımı sertlik üzerinde büyük etkisi olduğu literatürden bilinmektedir (Chak et. al. 2020). Sur ve Kayabaşı (2019)’da yaptığı çalışmada seramik partiküllerin metal matrisine göre daha sert olması ve seramik partiküllerin homojen bir şekilde metal matrisinde dağıldığını bildirmiştir. Dahası seramik partiküllerin varlığı, dislokasyonların hareketini etkili bir şekilde engelleyerek matrisin sertliğini arttırdığı düşünülmektedir. Benzer bir çalışmada takviyesiz matris alaşımının sertlik değeri seramik partikül ilavesi ile artmıştır (Soy 2009). Yapılan bu çalışmada en yüksek sertlik değerinin %4 B₂O₃ takviyeli numuneye ait olduğu belirlenmiştir.

Tablo 3. Üretilen numunelerin sertlik değerleri

Malzeme	Sertlik Değeri (Hv)
79% Bronz, 16% Al ₂ O ₃ , 2%B ₂ O ₃ , 3%Grafit	258
77% Bronz, 16%Al ₂ O ₃ , 4%B ₂ O ₃ , 3%Grafit	402
75% Bronz, 16% Al ₂ O ₃ , 6%B ₂ O ₃ , 3%Grafit	385

Aşınma deneyleri 1 N yük altında kuru kayma koşulunda M50 çelik bilyeye karşı yapılmıştır. Farklı B₂O₃ oranlarında takviye edilen bronz kompozit malzemelerin sürtünme

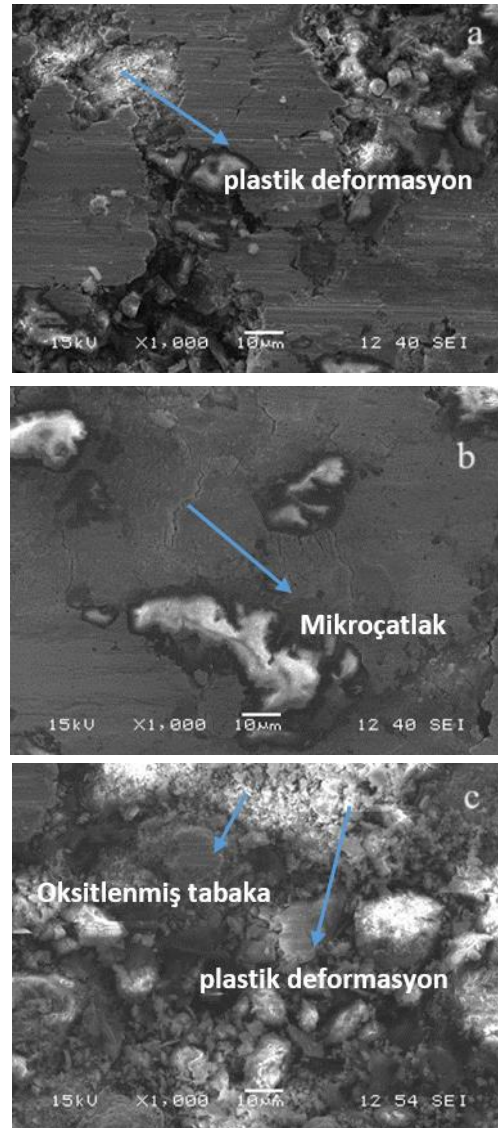
katsayısı ve aşınma hızı sonuçları Şekil 10'da verilmiştir. Şekil 10'dan görüldüğü gibi ağırlıkça %2, %4 ve %6 B₂O₃ oranlarında üretilen kompozit malzemelerin sürtünme katsayısı değerleri sırasıyla yaklaşık 0.67, 0.51 ve 0.72. En düşük sürtünme katsayısı değeri ağırlıkça %4 B₂O₃ oranında üretilen bronz kompozit malzemesinde elde edilmiştir. Sonuçlar uygun oranda bor oksit ilavesinin, sürtünme katsayısının azaltılmasında önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Şekil 10'dan görüldüğü gibi ağırlıkça %2, %4 ve %6 B₂O₃ oranlarında üretilen kompozit malzemelerin aşınma oranları sırasıyla yaklaşık 0.83, 0.46 ve 1.1 mm³/Nm'dur. En iyi aşınma performansı ağırlıkça %4 B₂O₃ oranında üretilen bronz kompozit malzemesi göstermiştir. Ağırlıkça % 4 B₂O₃ oranında üretilen bronz kompozit malzemesinin en iyi aşınma performansı sergilemesinin sebebi birkaç mekanizmadan dolayı olabilir. İlk olarak B₂O₃ ilavesi ile kompozit malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirmiş ve böylece aşınma sırasında meydana gelen plastik deformasyona karşı direnç oluşturmuştur. Sonuç olarak kompozit malzemenin sertliğinde meydana gelen artış, aşınma hızının düşmesine neden olmuştur. Bu durum literatürde Archard'ın teorisi olarak bilinmektedir. Archard'ın denklemi, kompozit malzemenin aşınma oranı, kuvvet ve sertlik ile doğrudan ilişkisi olduğunu kabul etmektedir. Ayrıca bronz matris içindeki sert bor oksit takviyelerin varlığı; karışık malzeme – kompozit malzeme (metal-metal teması) arasında teması engellediği için kompozit malzemelerin aşınma direncini önemli ölçüde geliştirmiştir.



Şekil 10. Numunelerin aşınma oranları ve sürtünme katsayıları

Farklı B₂O₃ oranlarında üretilen bronz kompozit malzemelerin aşınma sonrası elde edilen aşınma izlerinin SEM yüzey görüntüleri Şekil 11'de verilmiştir. %2 ağırlıkça B₂O₃ oranında üretilen bronz kompozit malzemelerinin aşınma yüzeyleri incelendiğinde mikro çatlak oluşumun söz konusu olduğu görülmektedir. Metal matris içerisine ilave edilen bor oksit miktarının yetersiz olması nedeniyle ara yüzeyde oluşan deformasyonu önleme yetersiz kaldığı

görülmektedir. SEM aşınma izlerinden, artan bor oksit miktarıyla kompozit malzemelerin aşınma yüzeyinde oluşan deformasyonların azaldığı görülmektedir. Ağırlıkça %4 oranında ilave edilen bor oksit ile matris arasındaki ara yüzeyin iyi olması, takviye elemanının aşınma esnasında gelen yükü çok iyi taşıyarak malzemenin aşınma direncini iyileştirmiştir. Ayrıca aşınma yüzeyinde sürtünme dolayısıyla oluşan ısı nedeniyle bölgesel oksidasyonların meydana geldiği görülmektedir. Aşınma yüzeyinde oluşan bu kararlı oksit tabakası doğal katı yağlayıcı etkisi göstererek sürtünmeyi azalttığı düşünülmektedir.



Şekil 11. Farklı oranlarda takviye edilen B₂O₃ ilaveli bronz esaslı kompozit malzemelerin aşınmış yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri (a) %2 B₂O₃ (b) %4 B₂O₃ (c) %6 B₂O₃ takviyeli

Gültekin (2007) yaptığı çalışmada % 20 SiC partikül takviyeli Al-Si disk ve ağırlıkça % 1-5 grafit partikül takviyeli bakır matriksli balata malzemelerinin aşınma özelliklerini çalışmıştır. Aşınma testleri sonucunda sürtünme ısısından dolayı aşınma yüzeyinde oluşan oksit

tabakasının, matriksten daha sert olduğu ve aşınma yüzeyi üzerinde koruyucu bir tabaka gibi davranarak sürtünme katsayısı ve aşınma değerlerini düşürdüğü bildirmiştir (Gültekin 2007). Uyyuru vd.(2007)nin yaptığı farklı bir çalışmada ise, kayma arayüzeyinde kararlı oksit tabakasının oluştuğu ve bu oksit tabakasının yağlayıcı olarak davranarak, matris malzemesinin aşınma performansını iyileştirdiğini vurgulamışlardır(Uyyuru et. al. 2007). Yorulma aşınması sonucu yüzeyde mikro çatlak oluşumu görülmüştür. Ağırlıkça %6 bor oksit takviyesiyle bor oksitin matris içinde topaklandığı, matris ile takviye elemanı arasındaki zayıf ara yüzeyden dolayı, aşınma sırasında partiküllerin yerlerinden çıkarak üç gövdeli aşınmaya sebep olduğu görülmüştür. Üç gövdeli aşınma ile ara yüzeydeki gerilim artmaktadır. Artan gerilim ile oluşan deformasyon, çatlak oluşumu sonucu delemineasyona neden olduğu belirlenmiştir. Şekil 11’ de görüldüğü gibi aşınma yüzeyinde çok ciddi plastik deformasyonun meydana geldiği, bu durumun sürtünme katsayısı sonuçlarıyla uyumlu olduğu görülmüştür. Burada hâkim olan aşınma mekanizması ise yorulma aşınması-delemineasyon aşınma olarak düşünülmektedir.

Kurt ve Boz (2005) çalışmalarında Bronz tozları 350, 500 ve 600 MPa basınç altında sıkıştırılarak 810 °C sıcaklıkta amonyak atmosferinde 75 dakika sinterlenmiştir ve yapılan incelemelerde bronz esaslı fren balatalarının aşınma oranının daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Karadeniz (2023) doğa dostu bir fren balatası tasarlamış, bor oksit, boraks, kolemanitten oluşan bor malzemeyi takviye elemanı olarak kullanmış ve tribolojik özelliklerini incelemiştir. Elde edilen sonuçlara göre bor türevli malzemelerin kararlı bir sürtünme katsayısı ve özgül aşınma oranının da düşük olması sebebiyle avantajlı olduğunu bildirmiştir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

1. Bronz esaslı seramik takviyeli fren balataları 250 MPa ön şekillendirme işlemini takiben 900-1200A akım aralığında 8 dakika bekleme süresinde ECAS prosesi ile başarılı bir şekilde üretilmiştir.
2. Yapılan mikroyapı incelemeleri ve EDS çalışmalarından açık renkli bölgenin bronzdan oluşan matris yapısı olduğu koyu renkli bölgelerin ise oksitlerden oluşan takviye fazı olduğu belirlenmiştir. XRD çalışmalarından B₂O₃ miktarının artması ile paternlerin şiddetlerinin arttığı ancak ana faz yapısının değişmediği görülmüştür.
3. Belirlenen üretim şartları (900-1200 amperde 8 dakika bekleme süresi) sonucu 75% Bronz, 16% Al₂O₃, 3%

Grafit ve ağırlıkça %2, %4 ve %6 B₂O₃ numunelerinin nispi yoğunlukları sırasıyla 98.26, 98.97, 98.08 olarak tespit edilirken sertlik değerleri sırasıyla 258, 402 ve 385 olarak belirlenmiştir.

4. Üretilen malzemelerin sürtünme katsayısı değerleri sırasıyla yaklaşık 0.67, 0.51 ve 0.72 olup aşınma oranları ise sırasıyla yaklaşık 0.83, 0.46 ve 1.1 mm³/Nm’dur.
5. Sonuç olarak aşınmaya karşı en iyi numunenin ağırlıkça %4 B₂O₃ içeriğine sahip numune olduğu tespit edilmiştir.

Etik Standartlar Bildirgesi/ Declaration of Ethical Standards

Yazarlar tüm etik standartlara uygun hareket etmişlerdir.

Yazarlık Katkı Beyanı/ Credit Authorship Contribution Statement

- Yazar-1: Kaynaklar, Araştırma, Deney, Yazma – orijinal taslak
Görselleştirme, Yazma – orijinal taslak, Analiz ve yorumlama
Yazar-2: Araştırma, Deneyleme, orijinal taslak,
Yazar-3: Araştırma, Görselleştirme, orijinal taslak
Yazar-4: Araştırma, Kaynaklar, Deney, Yazma, Orijinal taslak
görselleştirme
Yazar-5: Doğrulama, Analiz ve yorumlama, Araştırma, Kaynak sağlama,
Veril iyileştirme, Yazma/orijinal taslak,
Yazar-6: Yazma/inceleme ve düzenleme, Görselleştirme, Veril iyileştirme

Çıkar Çatışması Beyanı/Declaration of Competing Interest

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Verilerin Kullanılabilirliği/ Data Availability

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

Teşekkür / Acknowledgement

Bu çalışma, TÜBİTAK tarafından, 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında desteklenmiştir (1919B012000003).

5. Kaynaklar

- Abdel-Rahim, Y.M., Darwish, S.M., 2010. Generalized braking characteristics of friction pad synthetic graphite composites. *Tribology International*, **43**, 838–843.
<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2009.12.003>
- Albayrak, B., 2009. Bronz Balataların Üretimi ve Performans Testleri. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 113.
- Blau, P.J., 2001. Compositions, functions, and testing of friction brake materials and their additives. Oak Ridge National Lab., Oak Ridge, 38 .
- Boz, M., and Kurt, A., 2000. Relationship between density and friction coefficient in powder metal bronze brake lining. In Proceedings of the second international

- conference on P/M, Cluj-Napoka, Romania, 181-187.
[https://doi.org/10.1016/S0026-0657\(01\)80393-3](https://doi.org/10.1016/S0026-0657(01)80393-3)
- Chak, V., Chattopadhyay, H., Dora, T. L., 2020. A review on fabrication methods, reinforcements and mechanical properties of aluminum matrix composites. *Journal of Manufacturing Processes*, **56**, 1059-1074.
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.05.042>
- Cho, M.H., Kim, S.J., Kim, D., Jang, H. 2005. Effects of ingredients on tribological characteristics of a brake lining: an experimental case study. *Wear*, **258**, 1682-1687.
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.11.021>
- Cordier, A., Kleitz, M., Steil, C., 2012. Welding of yttrium-doped zirconia granules by electric current activated sintering (ecas): protrusion formation as a possible intermediate step in the consolidation mechanism. *Journal of the European Ceramic Society*, **32**, 1473–1479.
<https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2011.12.022>
- Gültekin, D., 2007. Metal matriksli kompozit fren diski, balatası üretimi ve karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 231.
- Karadeniz, Ç., 2023. Mekanik alaşımlı bor türev takviyeli fren balatalarının tribolojik performanslarının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Iğdır Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Iğdır, 130.
- Kato, T., Akira, M., 1994. The wear of aramid fiber reinforced brake pads: the role of aramid fibers. *Tribology Transactions*, **37**, 559 – 565.
<https://doi.org/10.1080/10402009408983329>
- Kurt, A., Boz, A., 2005. Wear behaviour of organic asbestos based and bronze based powder metal Brake Linings, *Materials and Design*, **26**, 717-721.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2004.09.006>
- Liu, T., Rhee, S. K., 1978. High temperature wear of semimetallic disc brake pads. *Wear*, **46**, 213-218.
[https://doi.org/10.1016/0043-1648\(78\)90122-9](https://doi.org/10.1016/0043-1648(78)90122-9)
- Mohanty, S., Chugh, Y.P., 2007. Development of fly ash-based automotive brake lining. *Tribology International*, **40**, 7, 1217-1224.
<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2007.01.005>
- Mahdribin ZB, 1995. Analysis of disc brake squeal using the finite element method. PhD, thesis, University of Leeds, England, 286.
- Morshed, M.M., Haseeb A.S.M.A., 2004. Physical and chemical characteristics of commercially available brake shoe lining materials: a comparative study. *Journal of Materials Processing Technology*, **155**, 1422–1427.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.232>
- Soy, U., 2009. SiC/B₄C takviyeli metal matriks kompozit üretimi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 296.
- Sur, G., Kayabaşı, İ., 2019. Hafif metal matrisli kompozit malzeme üretim sisteminin tasarım, imalat ve performansının incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, **7**, 63-79.
<https://doi.org/10.29109/gujsc.414933>
- Uyyuru, R.K., Surappa, M.K., Brusethaug, S., 2007. Tribological behavior of Al–Si–SiC_p composites / automobile brake pad system under dry sliding conditions. *Tribology International*, **40**, 365-373.
<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2005.10.012>
- Yanmaz, L., and Sahin, C., F., 2023. Investigation of the density and microstructure homogeneity of square-shaped B₄C-ZrB₂ composites produced by spark plasma sintering method. *Journal of the European Ceramic Society*, **43**, 1295–1302.
<https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2022.11.026>