



Bakır matrisli hibrit kompozitlerde krom, bor ve bor karbür takviyelerinin tribolojik özelliklere etkisinin incelenmesi

Merve Horlu^{1*}, Cevher Kürşat Macit², Gamze İspirioğlu Kara³, Burak Tanyeri⁴, Bünyamin Aksakal⁴

¹Aisin Otomotiv Sanayi Ticaret A.Ş. Tuzla, İstanbul, 34953, Türkiye

²Firat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Elazığ, 23000, Türkiye

³Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Erzurum, 25000, Türkiye

⁴Firat Üniversitesi, Sivil Havacılık Yüksekokulu, Uçak Bakım ve Onarım Bölümü, Elazığ, 23000, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Makale Geçmişi:

İlk gönderi 11 Eylül 2023

Kabul 9 Ekim 2023

Online 29 Aralık 2023

Araştırma Makalesi

DOI: 10.30728/boron.1358658

Anahtar kelimeler:

Bakır

Bor

Bor Karbür

Hibrit Kompozit

Triboloji

Toz Metalurjisi

ÖZET

Bu çalışmada saf bakır (Cu) tozuna ağırlıkça sabit oranda Krom (Cr) (%1) ve ayrı olarak belirli oranlarda Bor (B) (%1, %2, %3) ile Bor karbür (B₄C) (%1, %2, %3) tozlarının eklenmesiyle hibrit bir karışım hazırlanmıştır. Cu tozunun Cr, B ve B₄C tozları ile karıştırılmasında toz metalurjisi üretim parametrelerinden yararlanılmıştır. Hazırlanan hibrit kompozitlerin, mikroyapı (X-Işını Difraktometresi (XRD), Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Enerji Dağılımı X-Işını (EDX)), sertlik ve kuru koşullar altında sabit kayma mesafesinde aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Her kompozit numune için ağırlık kaybı grafikleri oluşturulmuş ve sürtünme katsayısı değerleri hesaplanmıştır. Aşınma deneyleri sonrasında aşınma yüzeylerinde meydana gelen aşınma izleri SEM analizleri ile incelenmiştir. Sertlik ve aşınma testleri sonucunda en iyi sonuçları veren hibrit kompozit Cu-Cr-3B olurken, en düşük performans ise saf Cu numunesinde görülmüştür. Cu-Cr-3B kompozitinde Cu numunesine göre sertlik değerinde %32, aşınma ağırlığında ise %151 oranında daha iyi sonuç elde edilmiştir. Aşınma sonrası SEM görüntülerinde, B ve B₄C parçacıklarının aşınma yüzeyindeki direnci artırdığı gözlenmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlara göre ülkemiz için önemli bir yeri olan B ve B₄C'nin Cu matrisli kompozitlerin tribolojik özelliklerini artırdığı ve çalışmaların yeni hibrit karışımlarla devam edebileceğini göstermiştir.

Investigation of the effect of chromium, boron, and boron carbide reinforcements on tribological properties in copper matrix hybrid composites

ARTICLE INFO

Article History:

Received September 11, 2023

Accepted October, 2023

Available online December 29, 2023

Research Article

DOI: 10.30728/boron.1358658

Keywords:

Copper

Boron

Boron Carbide

Hybrid Composites

Tribology

Powder Metallurgy

ABSTRACT

In this study, a hybrid mixture was prepared by adding Chromium (Cr) (1%) in a fixed ratio by weight and Boron (B) (1%, 2%, 3%), and Boron carbide (B₄C) (1%, 2%, 3%) powders separately in certain ratios to pure copper (Cu) powder. Powder metallurgy production parameters were utilized for mixing Cu powder with Cr, B and B₄C powders. The prepared hybrid composites were tested for microstructure (X-Ray Diffraction (XRD), Scanning Electron Microscope (SEM), and Energy dispersive X-ray (EDX)), hardness, and wear at constant sliding distance under dry conditions. Weight loss plots and coefficient of friction values were generated for each composite sample. After the wear tests, the wear marks on the wear surfaces were analyzed by SEM analysis. As a result of hardness and wear tests, the hybrid composite Cu-Cr-3B gave the best results, while the pure Cu sample had the lowest performance. In Cu-Cr-3B composite, 32% better results were obtained in hardness value and 151% better results were obtained in wear weight compared to Cu sample. In the SEM images after wear, it was observed that B and B₄C particles increased the resistance on the wear surface. According to the results obtained in the study, it has shown that B and B₄C, which have an important place for our country, increase the tribological properties of Cu matrix composites and that studies can continue with new hybrid mixtures.

1. Giriş (Introduction)

Bakır (Cu) matrisli kompozitler, yüksek gerilme mukavemeti, yüksek Young modülü, aşınma direnci, iyi elektrik iletkenliği ve termal iletkenlik gibi üstün

mekanik ve fiziksel özelliklerinden dolayı geniş çapta araştırılmıştır. Bu nedenle, elektronik paketler, soğutucular ve yakıt hücresi elektrotları alanlarında kullanılmak üzere potansiyel yüksek performanslı malzemeler olarak kabul edilirler [1-4].

*Corresponding author: mervehorlu@gmail.com

Cu, otomotiv, elektrik ve elektronik sektörlerinde kullanılan çeşitli mühendislik malzemeleri için önemli özellikler taşımasına rağmen, uygulama alanlarında sınırlamaları vardır. Bu kısıtların üstesinden gelmek için temel faktör olan mekanik ve tribolojik özelliklerin iyileştirilmesi amacıyla doğru takviye elemanlarını seçmek gereklidir [5]. Özellikle bakır matrisli kompozitlerin yukarıda belirtilen özellikler için endüstride kullanılabilecek en uygun malzemeler olduğu ve daha uzun ömürlü kullanılabileceği düşünülmektedir.

Cu ve alaşımları, geleneksel ve ileri şekillendirme (aralarında karıştırmalı döküm, basınçlı döküm, toz metalurjisi (TM), basınçlı sıvı metal süzdürme tekniği, derin çekme, haddeleme, sıcak ekstrüzyon gibi sıcak ve soğuk şekillendirme) teknikleri ile rahat ve hızlı bir şekilde üretilmektedir. Son zamanlarda TM ile malzeme üretimi en hızlı büyüyen üretim yöntemlerinden biri haline gelmiştir. Metal matrisli kompozitlerin kristal kafes yapıları nedeniyle haddeleme ve ekstrüzyon gibi geleneksel yöntemlerle şekillendirilebilirliğinin kısıtlı olması, bu alaşımların farklı yöntemlerle şekillendirilmesi konusunda çalışmalar yapılmasını gerekli hale getirmiştir. TM üretim yöntemi, karışık metal tozlarının oda sıcaklığında veya yüksek sıcaklıkta, yapılacak parçanın şekil ve boyutlarına göre bir kalıpta preslenip kalıplanması ve ardından belirli bir sıcaklıkta sinterlenmesiyle gerçekleştirilen bir üretim yöntemidir [6-8]. Cu bazlı toz metalurjisi işlemlerinde, sürtünme bileşenleri olarak kullanılan tekli seramik partiküller, Cu matristeki eşit olmayan dağılım ve daha düşük bağlanma ara yüzü mukavemeti nedeniyle sürtünme performansının kararlılığını önemli ölçüde iyileştirmez. İki veya daha fazla parçacığın kullanılması, yüksek sıcaklıkta mükemmel sürtünme performansı elde etmek için performans ve yapının tamamlayıcısını sağlayabilirken, metal matrisin güçlü karbür oluşturu elementlerle (örneğin bor) alaşımlanması, Cu'nun ara yüzey yapısının iyileştirilmesine yarar sağlar [9].

Çalışmada takviye olarak kullanılan B_4C partiküllerinin, yüksek sıcaklıktaki bir ortamda kolayca oksitlenerek B_2O_3 çökmesine neden olduğu bilinmektedir [10]. Bu durum aşınma yüzeyinde sürtünme performansını artırmak için iyi bir yağlama filmi oluşturabilen akışkanlığa sahiptir [11]. Sathiskumar ve ark., takviye olarak kullanılan B_4C partiküllerinin aşınma mekanizması üzerindeki etkisini gözlemlenmiştir [12]. Aşınma üzerinde B_4C takviyesinin aşındırmaya bir direnç oluşturduğu görülmüştür. Balalan ve ark., B_4C içeriğinin (ağırlıkça %1,5-6) Cu matris kompozitlerin mikro yapısı üzerindeki etkisini araştırmış ve B_4C içeriğinin artmasıyla daha üstün aşınma direncinin oluştuğunu ortaya koymuştur [13].

Bor takviyeli Cu matrisli kompozitler yüksek sertlik, mukavemet ve termal stabilite gibi özelliklere sahip olabilir. Bor korozyona dayanıklı bir malzeme olduğundan, Cu matrisli kompozitlerde takviye malzemesi olarak kullanıldığında korozyon direncini artırabilir [12,13]. Oda sıcaklığında bor, metallerde

çok düşük çözünürlüğe sahiptir. Sertleşebilirlik ve dönüşüm özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olması sebebiyle metallerin yüksek sıcaklık direnci, yüksek mukavemet, yüksek elastikiyet, yüksek yüzey koruması, yüksek aşınma ve korozyon direnci, yüksek yapışma ve yapışma gibi özelliklerini geliştirmede büyük fayda sağlar [14].

Yapılan araştırmalarda Cu matrisli malzemelere katılan diğer bir takviye elemanı ise kromdur (Cr). Cr takviyeli kompozitler, farklı takviye kategorileri ile takviye edilmiş kompozitlere kıyasla üstün refrakterliği, sertleşebilirliği artırması, nispeten ucuz olması, kolayca geri dönüştürülebilir ve üstün tribolojik özellikleri olması nedeniyle diğer alaşım elementlerinden bir adım öndedir ve tercih edilmektedir [15].

Bu çalışmada ise, saf Cu tozuna ağırlıkça %1'de sabit kalacak şekilde Cr, ağırlıkça %1, %2 ve %3 oranlarında B_4C ve ağırlıkça %1, %2 ve %3 oranlarında B eklenerek yeni iki ayrı hibrit karışımı yapılmıştır. Literatür çalışmaları incelendiğinde Cu tozlarına bu çalışmadaki gibi Cr-B ve Cr- B_4C takviyeleriyle hibrit bir karışım yapılmadığı görülmüştür. Hazırlanan numunelerin mikroyapısı (SEM, EDX ve XRD), sertliği ve 10 N yük altında kuru şartlarda aşınma testleri yapılarak aşınma sonrası ağırlık kaybı miktarı, sürtünme katsayısı değişimi ve aşınma sonrası aşınma yüzey deformasyonunun SEM analizleri ile incelenmiştir.

2. Malzemeler ve Yöntemler (Materials and Methods)

2.1. Hibrit Kompozit Karışımların Hazırlanması (Preparation of Hybrid Composite Mixtures)

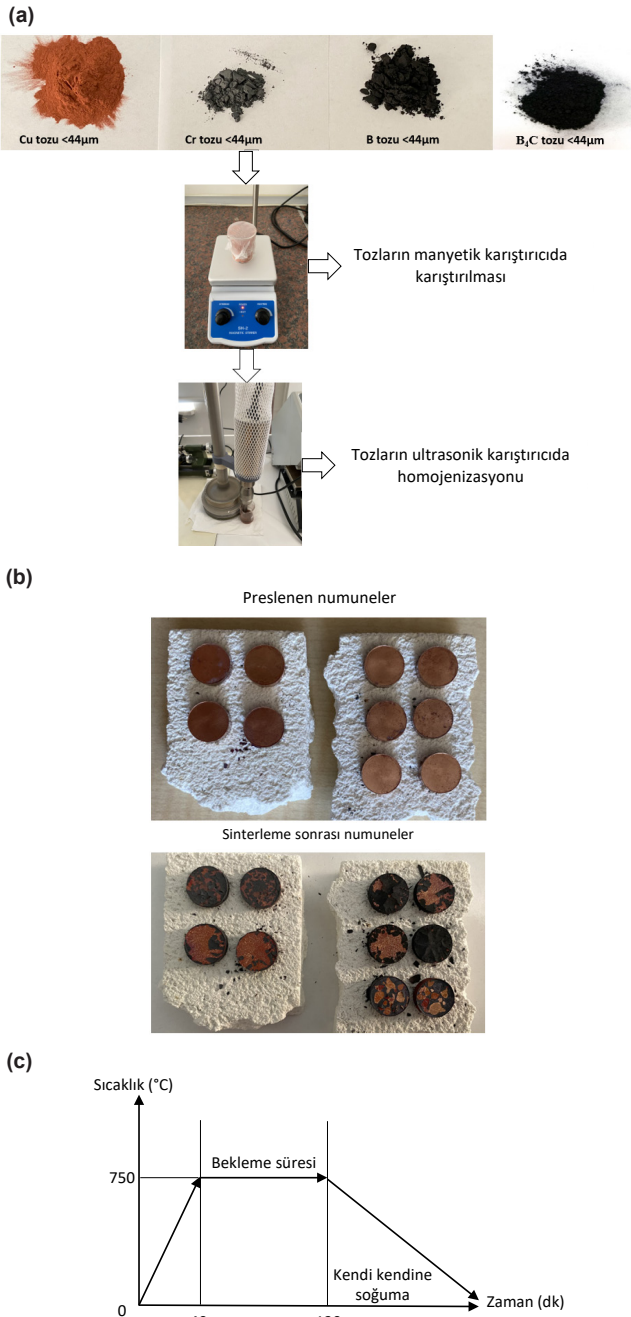
Çalışmada kullanılan tozların isimlendirilmesi ve ağırlıkça katkı miktarları Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan takviye elemanlarının ağırlıkça katkı miktarları ve isimlendirilmesi (Nomenclature and contribution amounts of the reinforcing elements used in the study).

Numune	Ağ. (%)			
	Cu	Cr	B_4C	B
Cu	100	-	-	-
Cu-Cr	99	1	-	-
Cu-Cr-1B	98	1	-	1
Cu-Cr-2B	97	1	-	2
Cu-Cr-3B	96	1	-	3
Cu-Cr-1B_4C	98	1	1	-
Cu-Cr-2B_4C	97	1	2	-
Cu-Cr-3B_4C	96	1	3	-

Hibrit kompozit karışımların hazırlanma aşamaları Şekil 1' de gösterilmiştir. Hazırlanan numuneler 12 mm çapa ve 5 mm et kalınlığına sahip olacak şekilde hazırlanmıştır. Matris malzeme ve takviye elemanları Nanografi (Ankara) firmasından satın alınmıştır. Kompozit malzemelerin birleştirilmesinde, tozlar ilk

olarak Şekil 1'deki karışım oranlarına göre tartımları yapılmıştır. Manyetik karıştırıcıda 750 rpm'de 75 dakika boyunca karıştırılmıştır. Karıştırma işleminden sonra karışımlar 25 ml etanol içerisinde 20 dakika boyunca ultrasonik homojenizatörde homojenize edilmiştir. Karıştırılan tozlar 24 saat boyunca 80°C'de vakumlu fırında kurutulmuştur. Birbirine yakın partikül boyutlarına sahip tozların homojen karışımı tamamlanmıştır. Karıştırma işleminden sonra kompozitler 35 MPa basınçta soğuk presleme tekniği ile preslenmiştir. Presleme sırasında tozların kalıp içerisinde daha kolay çıkması için kalıbın içi çinko stearat ($Zn(C_{18}H_{35}O_2)_2$) ile yağlanmıştır.



Şekil 1. a). Hibrit karışımların hazırlanması, b). Üretilen numuneler, c). Sinterleme sıcaklık-zaman grafiği (a). Preparation of hybrid mixtures, b). Produced samples, c). Sintering temperature-time graph.

Sinterleme sıcaklığı seçilirken matris malzeme ve takviye malzemeleri arasında kimyasal reaksiyonlara yol açabilen yüksek işleme sıcaklıkları benimsenir; böylece, kompozit malzeme ara yüzünün bağ kuvvetini ve özelliklerini değiştiren yeni bir intermetalik bileşik oluşur. Sinterleme işlemi Cu'nun ergime noktasından düşük olan 750°C'de argon atmosferinde 90 dakika bekleme süresinde gerçekleştirilmiş ve bu süre ile sıcaklık belirlenirken literatür çalışmalarından yararlanılmıştır [10,16,17]. Üretilen numuneler ve sinterleme zaman grafiği Şekil 1'de gösterilmiştir.

2.2. Karakterizasyon (Characterization)

Sinterlenmiş numuneler, mikroyapı ve sertlik testleri yapılmadan önce bakalite alınmıştır. Bakalit numunelerin mikroyapılarının daha net incelenebilmesi için zımparalama ve parlatma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Numuneler sırasıyla saf su ve alkol ile yıkanmıştır. Numunelerin mikroyapılarında Cu matris yapısı içerisinde dağılmış takviye element partiküllerinin belirlenmesi ve aşınma sonrası yüzeylerin incelenmesi için SEM ve EDX (Zeiss EVO MA10) analizleri yapılmıştır. Hazırlanan numunelerin faz tanımlaması için XRD (Rigaku RINT-2000 X) $2\theta=10$ ila 80° tarama aralığında ve 40 kV/40 mA ile gerçekleştirilmiştir.

2.3. Sertlik ve Aşınma (Hardness and Wear)

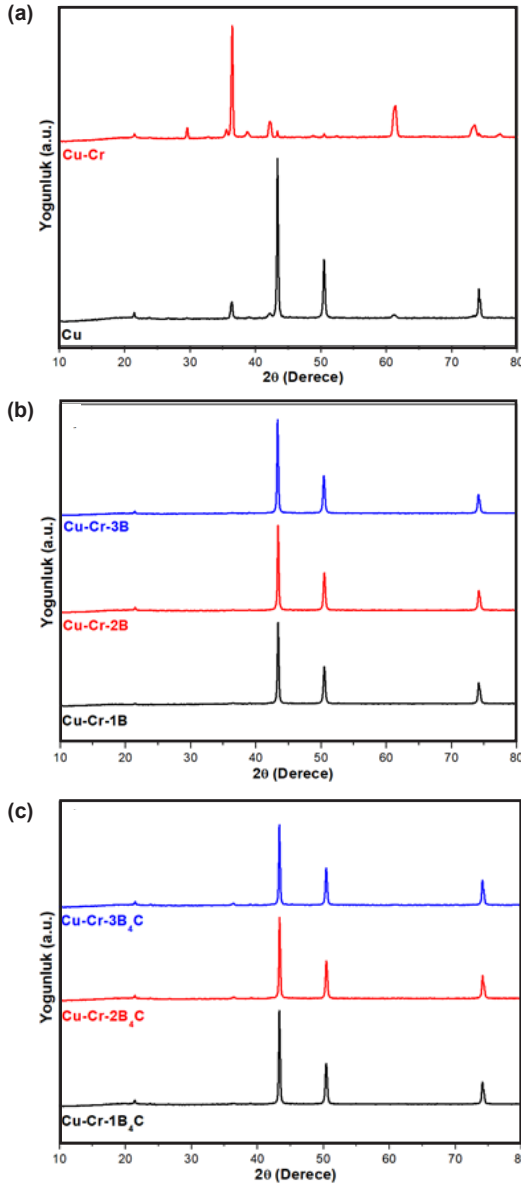
Sertlik testlerinde HV_{30} 'da 15 saniye bekleme süresinde 3 farklı noktadan alınan değerlerin ortalaması alınarak sertlik değerleri belirlenmiştir. Aşınma testleri pin-on-disk aşınma test cihazı ile 10 N yük, 50 mm/sn kayma hızı ve toplam 1000 metre kayma mesafesi altında kuru aşınma koşullarında çelik aşınma pimi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Toplam 1000 metre kayma mesafesinde, numunelerin ağırlık kaybı her 100 metrede bir 10^{-4} hassasiyet değerine sahip bir hassas terazide ölçülmüş, ölçülen değerler kaydedilmiş ve her numune için mesafeye göre ağırlık kaybı grafikleri oluşturulmuştur. Aşınma testlerindeki diğer işlem olan sürtünme katsayılarının belirlenmesi için her bir numune 1000 metre kayma mesafesi boyunca aşındırılmış ve kompozitlerin sürtünme katsayısı değerleri aşınma test cihazında kaydedilmiştir. Kaydedilen sürtünme katsayısı değerleri bilgisayara aktarılmış ve sürtünme katsayısı grafikleri oluşturulmuştur.

3. Sonuçlar ve Tartışma (Results and Discussion)

3.1. Mikroyapı (Microstructure)

Mikroyapı analizi için hazırlanan numuneler üzerinde ilk olarak XRD analizi gerçekleştirilmiştir. XRD analizleri Şekil 2' de gösterilmiştir. XRD analizleri bakalit alınmayan metalografik olarak hazırlanan ve sinterlenen numunelerden alınmıştır. XRD analizi sonucunda Cu matris yapısı içerisinde Cr, B ve B_4C takviye elamanlarının olduğu görülmüştür. XRD analizlerinde bakır (Cu), bakır oksit (CuO), bor (B), bor bakır (Cu-B), bor krom (Cr_2B), karbon (C), krom bor

karbür (Cr_7BC_4), bor krom (Cr_2B) ve krom (Cr) bileşik ve elementlerinin piklerinin oluştuğu gözlenmiştir.



Şekil 2. Hibrit kompozitlerin XRD kırınım desenleri a). Cu, Cu-Cr, b). Cu-Cr-1B, Cu-Cr-2B, Cu-Cr-3B, c). Cu-Cr-1B₄C, Cu-Cr-2B₄C, Cu-Cr-3B₄C (XRD diffraction patterns of hybrid composites a). Cu, Cu-Cr, b). Cu-Cr-1B, Cu-Cr-2B, Cu-Cr-3B, c). Cu-Cr-1B₄C, Cu-Cr-2B₄C, Cu-Cr-3B₄C).

Kompozitlerin 10 kat magnifikasyonlu SEM görüntüleri Şekil 3'te ve numune yüzeylerinden alınan EDX analiz sonuçları Tablo 2'de gösterilmiştir. SEM görüntüleri ve EDX analiz sonuçları takviye elemanlarının matris malzeme üzerinde homojen bir şekilde dağıldığını göstermektedir.

3.2. Sertlik (Hardness)

Numunelerin 3 farklı noktasından alınan sertlik değerlerinin ortalamaları Şekil 4'te gösterilmiştir. B ve B₄C takviye miktarının artması ile kompozitlerin sertlik değerlerinde önemli artışlar gözlenmiştir. En düşük sertlik değeri saf Cu numunesinde elde edilirken diğer

Tablo 2. EDX analiz sonuçları (EDX analysis results).

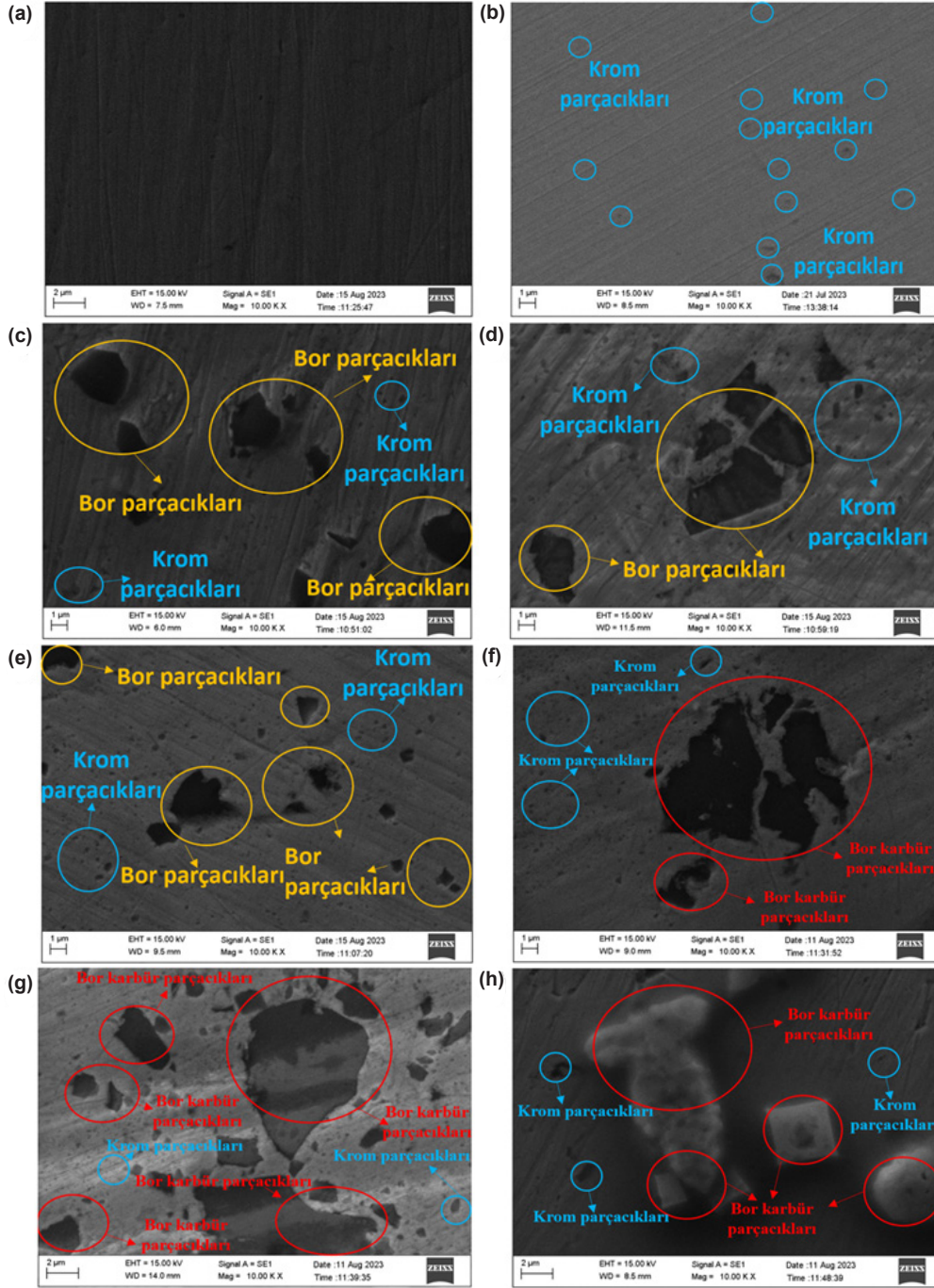
Numune	Ağ. (%)			
	Cu	Cr	C	B
Cu	100	-	-	-
Cu-Cr	98,91	1,09	-	-
Cu-Cr-1B	96,58	1,34	-	1,83
Cu-Cr-2B	94,51	2,03	-	3,46
Cu-Cr-3B	92,64	1,49	-	5,87
Cu-Cr-1B ₄ C	94,86	1,17	2,53	1,45
Cu-Cr-2B ₄ C	94,84	1,42	2,32	3,42
Cu-Cr-3B ₄ C	88,74	1,52	4,32	5,42

bütün hibrit kompozitlerde sertlik değerlerinin saf Cu'ya göre arttığı görülmüştür. Sertlik testlerinde en yüksek sertlik değeri Cu-Cr-3B kompozitinde elde edilmiştir. B, B₄C ve Cr takviyesinin metal matrisli kompozitlerde sertlik değerini arttırdığı literatür çalışmalarında da görülmektedir [9,11-15,18,19]. B ve B₄C takviye edilmesiyle metal matrisli kompozitlerin sertlik değerleri incelendiğinde, %10; B₄C takviyesiyle bakır-nikel tozları hazırlandığında sertlik değerlerinde ise %102,5'lik yüksek bir sonuç elde edilmiştir [22]. Diğer bir çalışmada ise 316L paslanmaz çeliğine ağırlıkça %0,6'lık B katkısı ile sertlik değerinde %61,25'lik bir artış görülmüştür [14].

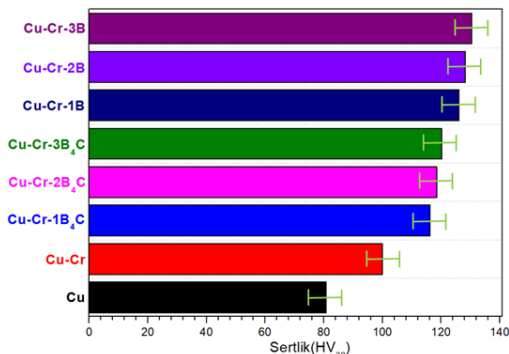
Şekil 5' de 10 N yük altında aşınma sonucundaki toplam aşınma ağırlık kayıpları gösterilmiştir. Aşınma testleri sonucunda en fazla ağırlık kaybı değeri saf Cu numunesinde gözlenirken, en az ağırlık kaybı Cu-Cr-3B kompozitinde gözlenmiştir. Cr ve artan B, B₄C katkıları sertlik sonuçlarına benzer şekilde hibrit kompozitlerin aşınma ağırlık kayıplarında da üstün sonuçlar elde edilmiştir [9,11-15,18,19]. Saf B kompozitlerinin B₄C kompozitlerine göre daha üstün sonuçlar vermesinde sinterleme sıcaklığı olarak seçilen 750°C'de B₄C ile Cu matris malzemenin kendi aralarında yeni bileşikler oluşturması ve B/C oranının miktarının sebep olduğu düşünülmektedir [20].

1000 metre kayma mesafesindeki aşınma testleri tamamlanan hibrit kompozitlerin sürtünme katsayısı değerleri Şekil 6'da gösterilmiştir. Sürtünme katsayısı sonuçlarında Cr, B ve B₄C katkılarının sürtünme katsayısı değerini düşürdüğü ve sürtünmeye karşı direncin arttığı gözlemlenmiştir. B ve B₄C katkısının Cu matrisine sıkı bir şekilde bağlanmasıyla köprü görevi görür ve yalnızca mekanik bağlanma yerine kimyasal bağların oluşmasına yol açar; sonuç olarak ara yüzey tabakaya aşınma esnasında zarar vermek için daha fazla enerji tüketilmesi gerekir. B ve B₄C, kırılğan Cu matrisini ve kompozitlerini belirli bir dereceye kadar kırılmaya karşı koruyabilen oldukça yüksek bir dayanıma sahiptir. Literatür çalışmaları incelendiğinde Cr, B ve B₄C katkısının aşınma özellikleri üzerinde olumlu etkisi olduğu görülmüştür [9,11-15,18,19].

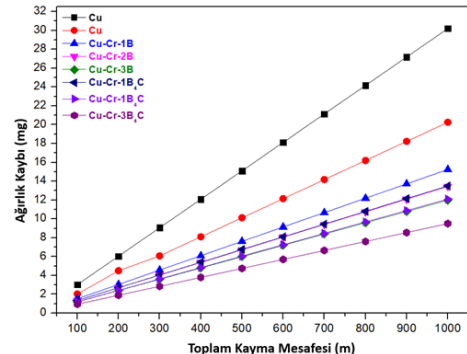
Aşınma sonrası hibrit kompozitlerdeki aşınma izlerini incelemek için alınan SEM görüntüleri



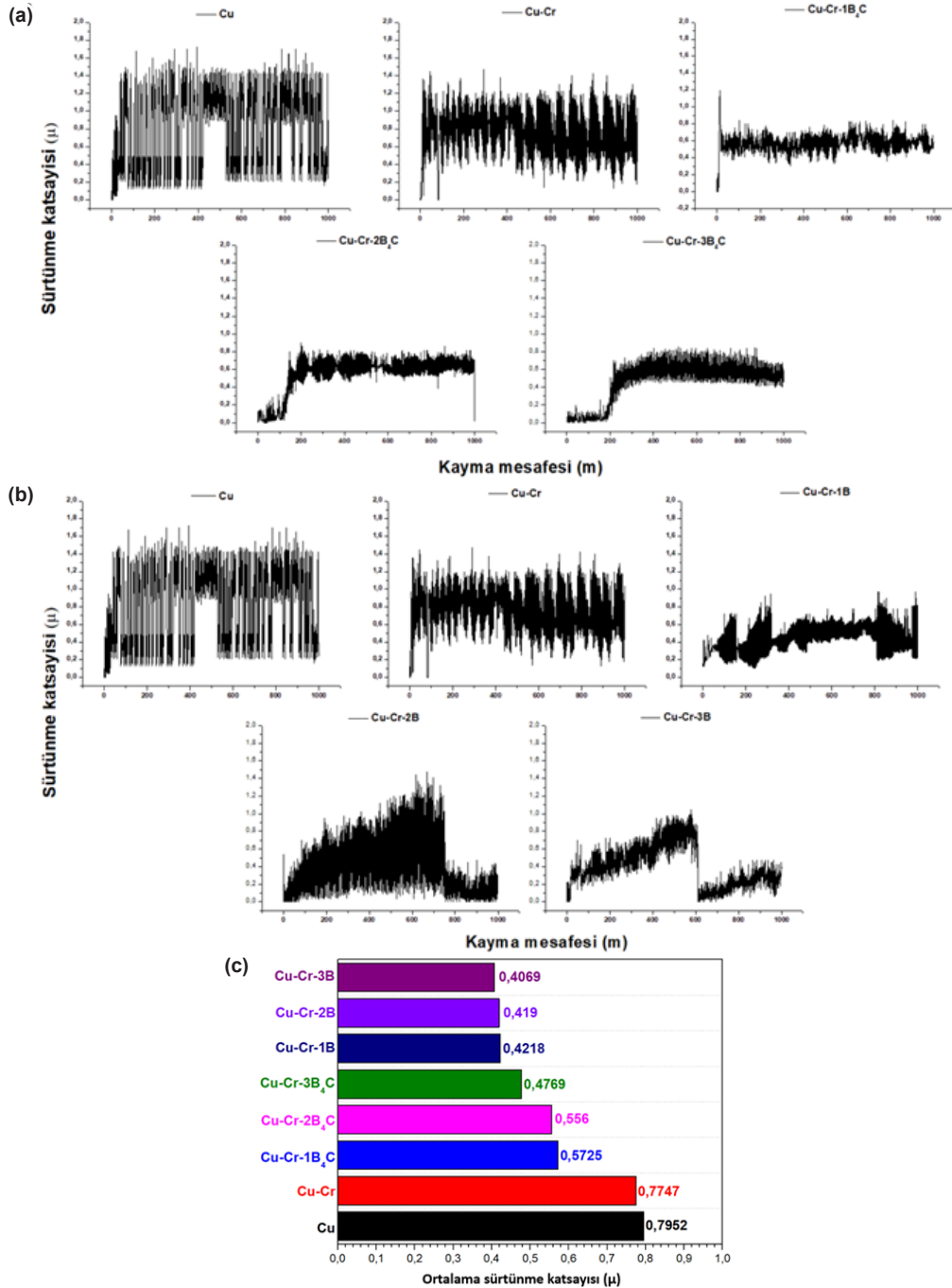
Şekil 3. Hibrit kompozitlerin SEM görüntüleri a). Cu, b). Cu-Cr, c). Cu-Cr-1B, d). Cu-Cr-2B, e). Cu-Cr-3B, f). Cu-Cr-1B₄C, g). Cu-Cr-2B₄C, h). Cu-Cr-3B₄C (SEM images of hybrid composites a). Cu, b). Cu-Cr, c). Cu-Cr-1B, d). Cu-Cr-2B, e). Cu-Cr-3B, f). Cu-Cr-1B₄C, g). Cu-Cr-2B₄C, h). Cu-Cr-3B₄C).



Şekil 4. Numunelerin sertlik değerleri (Hardness values of the samples)



Şekil 5. Aşınma sonrası meydana gelen toplam ağırlık kayıpları (Total weight loss after wear).



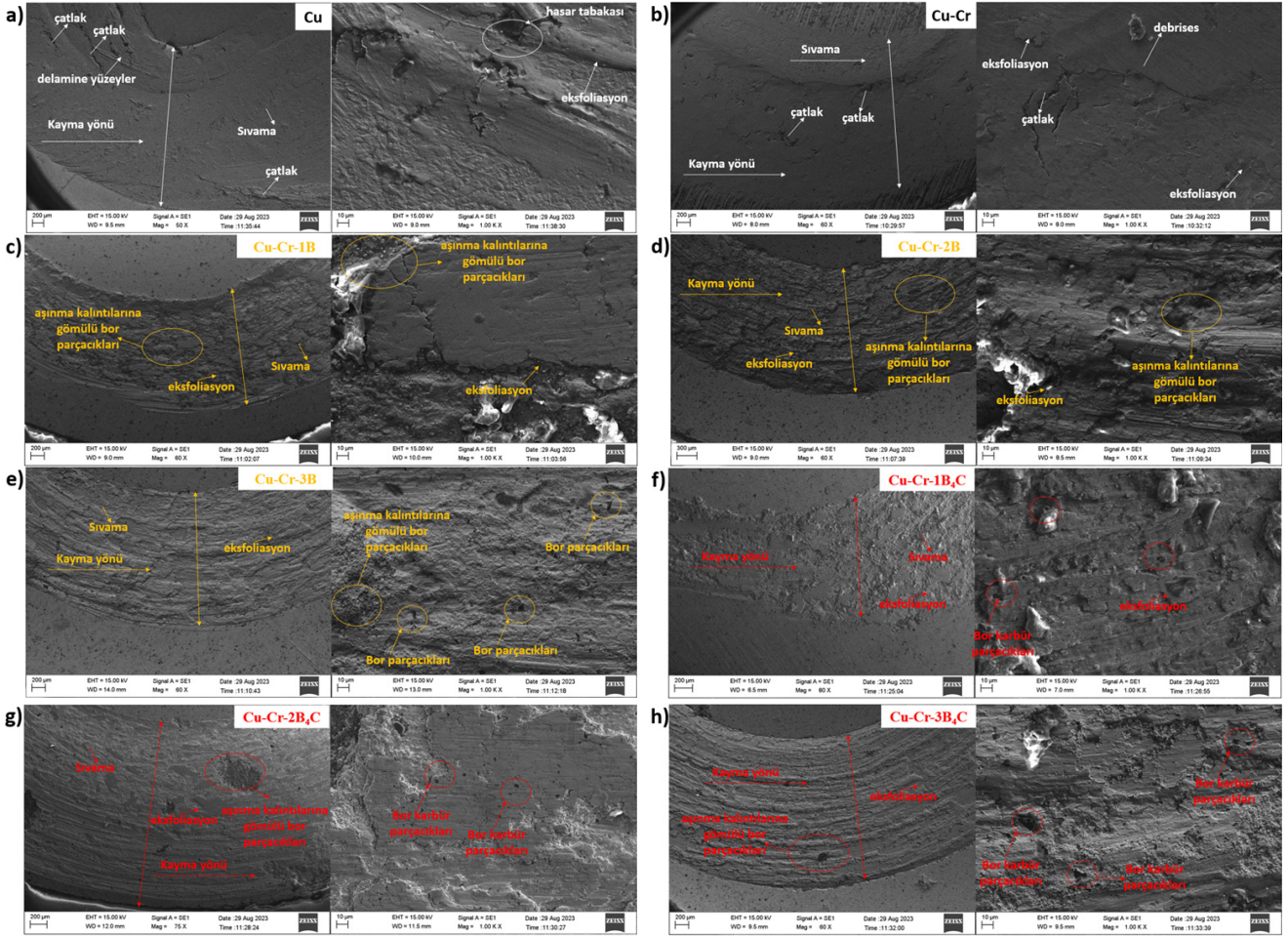
Şekil 6. a). Cr-B₄C takviyeli kompozitlerin b). Cr-B takviyeli kompozitlerin sürtünme katsayıları değerleri ve c). Üretilen bütün kompozitlerin ortalama sürtünme katsayıları (Friction coefficient values of a). Cr-B₄C reinforced composites b). Cr-B reinforced composites and c). Average friction coefficients of all composites produced).

Şekil 7' de gösterilmiştir. SEM görüntülerinde saf Cu numunesinin yüzeyinde aşınma sonrası derin çatlaklar ve izler olduğu gözlemlenmiştir. Bor katkısının artması ile aşınma yüzeylerinde daha yoğun B partiküllerinin olduğu ve aşınmaya karşı direnci artırdığı gözlemlenmiştir. Saf Cu ve Cu-Cr numunelerinde görülen çatlakların B ve B₄C takviyeli aşınma yüzeylerinde görülmediği, numunelerin daha az deforme olduğu ve aşınma derinliğinin azaldığı gözlemlenmiştir. B₄C takviyesinin aşındırıcı uç ile Cu matris arasındaki aşınmayı artırıcı bir direnç sergilediği düşünülmektedir [11-17]. Sürtünme katsayısı değerlerindeki azalmanın temel nedeninin

ise, kayma aşınması sırasında B miktarının artmasıyla kompozitlerin pim yüzeyinde ince bir yağlayıcı film oluşturması olduğu düşünülmektedir [19]. Ayrıca B, aşınma meydana gelen yüzeylerde grafit benzeri bir yapı oluşturabilir, böylece sınır yağlama rejiminde düşük sürtünmeyi kolaylaştırmıştır [21,22].

4. Sonuçlar (Conclusions)

Üretilen Cu matrisli Cr, B ve B₄C takviyeli kompozitlerin mikroyapı, sertlik, aşınma ve sürtünme katsayısı özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Yapısal ve morfolojik analizler sonucunda XRD analizlerinde matris



Şekil 7. Aşınma sonrası SEM görüntüleri a). Cu, b). Cu-Cr, c). Cu-Cr-1B, d). Cu-Cr-2B, e). Cu-Cr-3B, f).Cu-Cr-1B₄C, g). Cu-Cr-2B₄C, h). Cu-Cr-3B₄C (SEM images after wear a). Cu, b). Cu-Cr, c). Cu-Cr-1B, d). Cu-Cr-2B, e). Cu-Cr-3B, f).Cu-Cr-1B₄C, g). Cu-Cr-2B₄C, h). Cu-Cr-3B₄C).

malzemenin ve takviye elemanlarının karakteristik piklerini koruduğu ve her bir kompozisyonun arasında yeni bileşiklerin oluştuğu gözlemlenmiştir. SEM görüntülerinde ise takviye elemanlarının matris yapı üzerinde homojen bir şekilde dağıldığı görülmüştür. Çalışmadaki tüm takviyeli kompozitlerin sertlik değerleri saf Cu numunesine göre önemli ölçüde artmıştır. En yüksek sertlik değerine sahip Cu-Cr-3B hibrit kompozitinde saf Cu numunesine göre %61,26'lık daha yüksek bir değer elde edilmiştir. Ağırlıkça yüzde 3 B₄C takviyesinde ise saf Cu numunesine kıyasla sertlik değerinde %48,66'lık bir artış görülmüştür. Cr, B ve B₄C takviyeleri hibrit kompozitlerin aşınma direncini artırmıştır. Saf Cu numune ile karşılaştırıldığında, Cu-Cr-3B kompoziti %217 daha düşük toplam ağırlık kaybı ve %95,86 daha düşük sürtünme katsayısı değeri ile en iyi sonuçları elde etmiştir.

Kaynaklar (References)

[1]. Liu, Q., He, X. B., Ren, S. B., Zhang, C., Ting Ting, L., & Qu, X. H. (2014). Thermophysical properties and microstructure of graphite flake/copper composites processed by electroless copper coating. *Journal of Alloys and Compounds*, 587, 255-259. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.09.207>.

- [2]. Tjong, S. C., & Ma, Z. Y. (2000). Microstructural and mechanical characteristics of in situ metal matrix composites. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 29(3-4), 49-113. [https://doi.org/10.1016/S0927-796X\(00\)00024-3](https://doi.org/10.1016/S0927-796X(00)00024-3).
- [3]. Xiaosong, J., Liu, W., Li, J., Shao, Z., & Zhu, D. (2015). Microstructures and mechanical properties of Cu/Ti3SiC2/C/MWCNTs composites prepared by vacuum hot-pressing sintering. *Journal of Alloys and Compounds*, 618, 700-706. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.08.221>.
- [4]. Yoo, S. J., Han, S. H., & Kim, W. J. (2013). A combination of ball milling and high-ratio differential speed rolling for synthesizing carbon nanotube/copper composites. *Carbon*, 61, 487-500. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.04.105>.
- [5]. Thankachan, T., & Prakash, K. S. (2017). Microstructural, mechanical and tribological behavior of aluminum nitride reinforced copper surface composites fabricated through friction stir processing route. *Materials Science and Engineering: A*, 688, 301-308. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.02.010>.
- [6]. Kumar Bhoi, N., Singh, H., & Pratap, S. (2020). Synthesis and characterization of zinc oxide reinforced aluminum metal matrix composite produced by microwave sintering. *Journal of Composite*

- Materials*, 54(24), 3625-3636. <https://doi.org/10.1177/0021998320918646>.
- [7]. Tandon, R., & Madan, D. (2014). Emerging applications using magnesium alloy powders: a feasibility study. In Alderman, M., Manuel, M.V., Hort, N., & Neelameggham, N.R. (Eds.). *Magnesium Technology 2014* (pp. 21-25). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48231-6_7.
- [8]. Burke, P., Kipouros, Y. G., Judge, W. D., & Kipouros, G. J. (2019). Surprises and Pitfalls in the Development of Magnesium Powder Metallurgy Alloys. In Dobrzanski, L. A., Bamberger, M., & Totten, G. E. (Eds.). *Magnesium and Its Alloys* (pp. 337-373). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781351045476>.
- [9]. Weber, L., & Tavangar, R. (2007). On the influence of active element content on the thermal conductivity and thermal expansion of Cu-X (X=Cr, B) diamond composites. *Scripta Materialia*, 57(11), 988-991. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2007.08.007>.
- [10]. Islak, S., Kir, D., & Buytoz, S. (2014). Effect of sintering temperature on electrical and microstructure properties of hot pressed Cu-TiC composites. *Science of Sintering*, 46(1), 15-21. <https://doi.org/10.2298/SOS14010151>.
- [11]. Zhang, D., He, X., Liu, Y., Bai, F., & Wang, J. (2021). The effect of in situ nano-sized particle content on the properties of TiCx/Cu composites. *Journal of Materials Research and Technology*, 10, 453-459. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.12.037>.
- [12]. Uzunsoy, D. (2010). Investigation of dry sliding wear properties of boron doped powder metallurgy 316L stainless steel. *Materials & Design*, 31(8), 3896-3900. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.02.053>.
- [13]. Hsu, C. Y., Yeh, J. W., Chen, S. K., & Shun, T. T. (2004). Wear resistance and high-temperature compression strength of Fcc CuCoNiCrAl 0.5Fe alloy with boron addition. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 35, 1465-1469. <https://doi.org/10.1007/s11661-004-0254-x>.
- [14]. Li, J., Gan, L., Liu, Y., Mateti, S., Lei, W., Chen, Y., & Yang, J. (2018). Boron nitride nanosheets reinforced waterborne polyurethane coatings for improving corrosion resistance and antifriction properties. *European Polymer Journal*, 104, 57-63. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2018.04.042>.
- [15]. Sreenivasa, R., & Mallur, S. B. (2021). Sliding wear behavior of Cu+ Sn+ Cr composites by Taguchi technique. *Journal of Bio-and Tribo-Corrosion*, 7, 1-8. <https://doi.org/10.1007/s40735-020-00465-5>.
- [16]. Pham, V. T., Bui, H. T., Tran, B. T., Nguyen, V. T., Le, D. Q., Than, X. T., & Phan, N. M. (2011). The effect of sintering temperature on the mechanical properties of a Cu/CNT nanocomposite prepared via a powder metallurgy method. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 2(1), 15006. <https://doi.org/10.1088/2043-6262/2/1/015006>.
- [17]. Kumar, N., Bharti, A., Dixit, M., & Nigam, A. (2020). Effect of powder metallurgy process and its parameters on the mechanical and electrical properties of copper-based materials: Literature review. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 59, 401-410. <https://doi.org/10.1007/s11106-020-00174-1>.
- [18]. Sathiskumar, R., Murugan, N., Dinaharan, I., & Vijay, S. J. (2013). Characterization of boron carbide particulate reinforced in situ copper surface composites synthesized using friction stir processing. *Materials Characterization*, 84, 16-27. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2013.07.001>.
- [19]. Balalan, Z., & Gulan, F. (2019). Microstructure and mechanical properties of Cu-B4C and CuAl-B4C composites produced by hot pressing. *Rare Metals*, 38(12), 1169-1177. <https://doi.org/10.1007/s12598-019-01287-2>.
- [20]. Deepa, J. P., Resmi, V. G., Rajan, T. P. D., Pavithran, C., & Pai, B. C. (2011). Studies on the effect of processing parameters on electroless coating of copper on boron carbide particles. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 64, 47-51. <https://doi.org/10.1007/s12666-011-0009-5>.
- [21]. Shah, F. U., Glavatskih, S., & Antzutkin, O. N. (2013). Boron in tribology: from borates to ionic liquids. *Tribology Letters*, 51, 281-301. <https://doi.org/10.1007/s11249-013-0181-3>.
- [22]. Zuo, H., Wei, W., Yang, Z., Li, X., Ren, J., Xian, Y., ... & Wu, G. (2021). Performance enhancement of carbon/copper composites based on boron doping. *Journal of Alloys and Compounds*, 876, 160213. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.160213>.