

Elektriksiz MgB₂/SiO₂ Kompozit Kaplamaların Karakterizasyonu

Ferhat Bülbül¹

Selçuk Avcı²

Özet

Elektriksiz kaplamalar düşük maliyetli bir proses sunması ve pürüzlü ve karmaşık geometriye sahip parçalarda üniform bir film kalınlığına sahip sert yüzeyler sunması nedeniyle geniş bir uygulama alanına sahiptir. Bu yöntemle genellikle elektriksiz nikel kaplama olarak bilinen Ni-P ve Ni-B kaplamalar üretilmekte ve alternatif diğer kaplama türleri için de arayışlar devam etmektedir. Arayışa konu olan kaplama yapılarından biri de MgB₂'dir. Fakat MgB₂ kaplamalar genellikle elektriksiz kaplama yöntemleri dışında farklı daha pahalı yöntemlerle üretilmekte ve bu kaplamaların özellikle süper iletkenlik ve diyamanyetiklik özellikleri üzerinde araştırmalar yapılmaktadır. MgB₂ kaplamaların elektriksiz kaplama yöntemiyle üretilmesine yönelik çalışmaların sayısı yok denecek kadar azdır.

Bu çalışmada, elektriksiz kaplama yöntemi kullanılarak AISI 1020 çelik taban malzemeler üzerinde 95°C'lik bir banyo sıcaklığında takviyesiz olarak MgB₂ kaplama seramik kaplama ve 5, 10 ve 15 g/l SiO₂ nanopartikül miktarlarında takviyeli olarak MgB₂/SiO₂ kompozit kaplamalar üretilmiştir. Üretilen kaplamaların yapısal ve ıslanabilirlik karakteri, mekanik ve sürtünme davranışı araştırılarak, MgB₂ kaplamalara eklenen SiO₂ takviyelerinin bu özellikler üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. SiO₂ takviyeli MgB₂/SiO₂ kompozit kaplamalarda, artan SiO₂ takviye miktarı, kristalografik anlamda kaplamalarda amorflaştırma yönünde bir etkisi olduğu, sertliği artırırken ve sürtünme katsayısında bir azalmaya sebep olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca üretilen takviyesiz ve takviyeli kaplamaların süperhidrofilik karakterde olduğu tespit edilirken, her iki durumda da süperhidrofilik yapı elde edildiğinden

1 Prof. Dr., Erzurum Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, ferhat.bulbul@erzurum.edu.tr, 0000-0003-3060-1619

2 Arş. Gör., Atatürk Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, savci.1106@gmail.com, 0000-0002-8696-4016

dolayı, SiO₂ takviyesinin ıslanma açısına bariz bir etkisinin olup olmadığı net olarak tespit edilememiştir. Fakat çelik taban malzeme ile kaplanmış yüzeyler bakımından bir kıyaslama yapıldığında, sürtünme katsayısındaki azalma ile düşük temas açısı birbirlerini destekleyici niteliktedir.

1. Giriş

Uzun zamandan beri, metaller, seramikler ve polimerler dahil olmak üzere katı yüzeyleri fiziksel ve kimyasal olarak değiştirmek için yüzey modifikasyon teknikleri kullanılmıştır. Çeşitli modifikasyon yaklaşımları sayesinde malzeme özellikleri geliştirilmiş ve uygulanabilirliği önemli ölçüde genişletilmiştir[1]. Karbon çelikleri, öncelikle seramik veya kompozit malzemelerden üretilmiş tribolojik kaplamalar kullanılarak aşınmaya karşı korunabilir[2]. Yüksek sertlik, mükemmel korozyon direnci ve iyi tribolojik özelliklerin gerekli olduğu uygulamalarda Ni-B bazlı seramik veya kompozit kaplamaların kullanımı giderek artmaktadır. Elektriksiz kaplama, çelik yüzeylerin kaplanması için popüler bir yöntem olup verimliliği ve basitliği nedeniyle birçok uygulamaya sahiptir. Elektriksiz işlem, bir metalin çözülmüş iyonlarının başka bir metalin yüzeyine çöktürülmesidir. Bu işlem ile aktifleştirilmiş metal yüzey üzerinde bir elektrik potansiyeline ihtiyaç duyulmadan kaplama katmanları oluşturulabilmektedir [3]. Elektriksiz kaplamadaki ilerlemeler, yeni alaşımların ve prosedürlerin oluşturulması nedeniyle uygulama alanının genişlediği ve genişlediği hem bileşenlerin üretiminde hem de bakımda endüstride iyi tanınmaktadır.

Nanoyapılarla ilişkili özelliklerin kullanılması, halihazırda havacılık, biyomedikal, kimya endüstrisi ve otomotivde geniş bir uygulama yelpazesine sahip olan elektriksiz kaplamaların performansını ve dayanıklılığını artırabileceğinden, nano-kristalin tozlar kullanılarak seramik nanoyapılı kaplamaların üretimi daha da yaygınlaşmıştır. Geleneksel muadillerine göre mükemmel özellikleri nedeniyle son yıllarda teknolojik açıdan ilgi çekicidir.

Genel olarak elektriksiz kaplamalar dört gruba ayrılabilir: saf nikel ve siyah nikel kaplamalar, alaşımlı ve çok unsurlu alaşım kaplamalar, kompozit kaplamalar ve elektriksiz nanokaplamalar [4]. Kaplama banyosunda kullanılan maddelere göre elektriksiz nikel kaplama teknikleri saf Ni, Ni-B ve Ni-P olarak sınıflandırılmaktadır. Elektriksiz nikel kompozit kaplamalar, küçük, ikinci faz parçacıklarının elektriksiz bir çözeltiden metal bir matrise aynı anda dahil edilmesiyle üretilir. Bu parçacıklar, artan sertlik ve mukavemete sahip yüzeyler sağlamak için PTFE, grafit, HBN ve MoS₂ gibi yumuşak bir katı yağlayıcı veya SiC, WC, Al₂O₃, Si₃N₄, TiO₂ ve diğerleri gibi sert bir seramik olabilir [5]. Böylece elektriksiz Ni-B kaplamanın sertliğinin ve aşınma direncinin artmasına katkıda bulunur. AISI 304 paslanmaz çelik

üzerine Ni-B/SiO₂ kaplamanın yapısal ve sertlik özelliklerinden daha önceki çalışmamızda kısaca bahsedilmişti [6].

Magnezyum diborür (MgB₂), 39 K gibi nispeten yüksek bir kritik sıcaklık, geniş bir kritik alan, uzun bir tutarlılık uzunluğu, derin bir manyetik penetrasyon ve yüksek bir kritik akım gibi üstün özelliklerinden dolayı son yıllarda büyük ilgi görmüştür [7]–[13]. Film tabanlı sistemlerde olası kullanımları konusunda araştırmacılar arasında büyük ilgi oluştu. MgB₂ filmlerinin sentezi için, elektrokimyasal sentez, elektroforez bazlı yöntemler, sol-jel sentezi, moleküler ışın epitaksisi, iyon ışın sentezi ve darbeli lazer kaplama dahil olmak üzere çeşitli yöntemler geliştirilmiştir [14]–[22]. Bu tekniklerin, yüksek sıcaklıklara ve yüksek basınçlara duyulan ihtiyaç, tekdüze olmayan kaplama üretimi potansiyeli ve ürettikleri yüksek işlem maliyetleri dahil olmak üzere birtakım dezavantajları vardır [7]. MgB₂ seramik malzemesi kullanılarak yüksek kaliteli süper iletken MgB₂ filmleri üretilmeye çalışıldı. Ancak MgB₂ kaplamaların elektriksiz kaplama yöntemiyle üretilmesine yönelik çalışmaların sayısı birkaçı geçmemiştir [7], [23]–[25] ve zaten herhangi bir takviye ile kaplama çalışması da şu ana kadar mevcut değildir.

Bu çalışmanın amacı, AISI 1020 çelik taban malzemeler üzerinde üretilen elektriksiz MgB₂/SiO₂ kompozit kaplamaların yapısal özelliklerini, mekanik davranışını, tribolojik davranışını ve ıslanabilirlik özelliklerini karakterize etmek ve böylece MgB₂ kaplamalara eklenen SiO₂'nin bu özellikler üzerindeki etkilerini değerlendirmektir.

2. Malzeme ve yöntem

2.1. Malzeme

Taban malzeme olarak AISI 1020 çelik numuneler (15x15x5mm) kullanıldı. Bu taban malzemeler, 1200 mesh SiC zımpara kâğıdı ile ve ardından 0,05 m parçacık boyutlu alümina tozu ile parlatılarak R_a < 0,1'den daha düşük bir yüzey pürüzlülüğüne ulaştırıldı. Kullanılan çelik taban malzemenin kimyasal bileşimi Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. AISI 1020 çeliğine ait kimyasal kompozisyon

Taban malzeme	C	Si	S	Mo	Al	Cu	Mn	P	Cr	Ni
AISI 1020	0.207	0.102	0.006	0.019	0.017	0.1	0.441	0.007	0.095	0.078

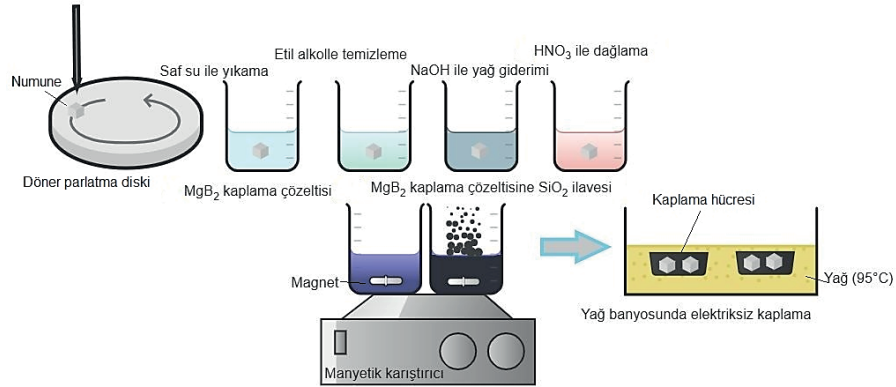
2.2. Kaplama işlemi

Çizelge 2’de AISI 1020 çelik taban malzemeler üzerine yapılan kaplama öncesi işlemler ve bu işlemlerden sonra takviyesiz ve SiO₂ takviyeli MgB₂ kaplama sürecindeki şartlar verilmiştir.

Çizelge 2. Kaplama öncesi ve sırasında uygulanan deneysel şartlar

Bileşenler	İşlevi
Metalik iyonlar	Kaplanacak metal kaynağı
İndirgeyici madde	Elektron kaynağı
Bileşik yapıcı madde	Metalle bir bileşik (kompleks) oluşturur, metalik iyon kararlılığı artırır.
Dengeleyici	Kararlılığı artırır
Kaplama öncesi yapılan işlemler	
Mekanik parlatma	$R_a \leq 0,1 \mu\text{m}$ olacak şekilde 1200 mesh zımpara ve alümina ile parlatma ve temizleme (saf su ile durulama)
Alkol ile yüzey temizleme	Yaklaşık 1 dakika boyunca oda sıcaklığında (25°C) saf etanol içinde karıştırma
Alkalin çözeltisinde temizleme	2 d 25°C’de 50g/L NaOH çözeltisi içerisinde bekletme
Asitle dağlama	10-30 s 25°C’de 50 ml/L HNO ₃ çözeltisi içerisinde bekletme
Kaplama çözeltisi bileşenleri ve şartları	
Miktar (100 ml)	Çözelti Bileşeni
1.2 g	Magnezyum diborür (MgB ₂)
2.08 g	Sodyum hipofosfit (NaPO ₂ H ₂)
0.5 g	Sodyum suksinat (C ₄ H ₄ Na ₂ O ₄)
2.4 g	Sodyum asetat (C ₂ H ₃ NaO ₂)
8 ml	Dimetil sulfoksit ((CH ₃) ₂ SO)
pH	~7
Banyo Sıcaklığı, °C	95
Kaplama Süresi, d	60
Takviye edilen SiO ₂ miktarı, g/l	5, 10 ve 15

(Zımpara ve alümina ile) mekanik parlatma



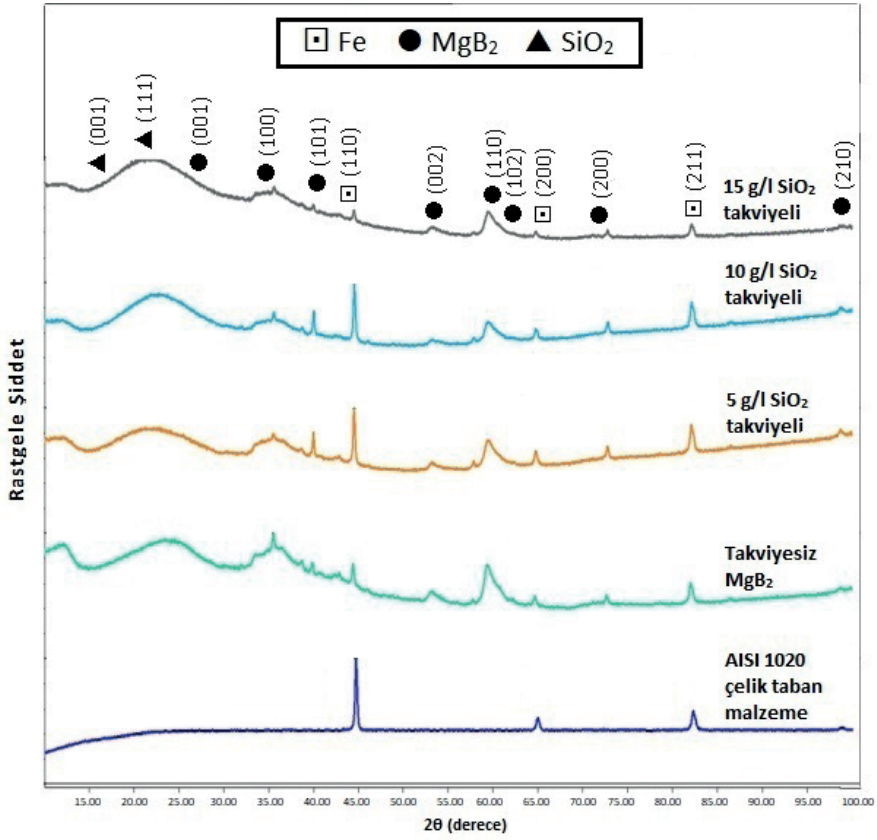
2.3. Karakterizasyon işlemleri

Üretilen kaplamaların kristalografik analizi $\lambda = 1.5405 \text{ \AA}$ (0,154 nm) dalga boyuna sahip Cu-K α kaynaklı Pananalytical Empyrean XRD (X ışını kırınım ölçer) cihazı ile, morfolojik analiz, film kalınlıklarının ölçülmesi ve elementel analiz Taramalı elektron mikroskop (SEM- Zeiss, Sigma 300)-EDS ile, numunelerin yüzey sertlikleri Hardway MHVD 1000 IS marka ve model mikrosertlik cihazı (25 gr yük, 7 s yükleme süresi) ile, tribolojik analizler TRD aşınma test cihazı ile (2 N yük) ve kaplama yüzeylerinin ıslatma açıları, KSV CAM-101 optik temas açısı ölçer kullanılarak araştırılmıştır.

3. Araştırma bulguları

3.1. XRD analizi

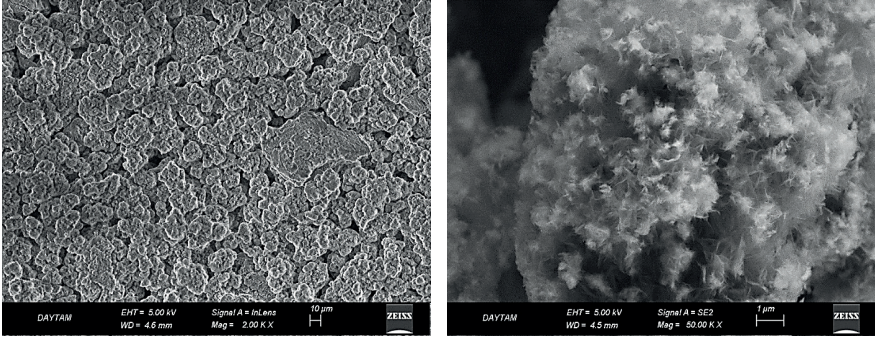
Şekil 1'de elektriksiz kaplama yöntemi ile üretilen kaplamaların XRD spektrumu verilmiştir. Taban malzeme olarak kullanılan AISI 1020 çeliğinde üç tane yüksek şiddetli karakteristik demir piki elde edilmiş ve piklerin düzlemleri sırasıyla yaklaşık $2\theta=45^\circ$ de (110), 65° de (200) ve 83° de (211)'dir. Sonuç literatürle uyumludur [26]–[29]. Çelik taban malzeme üzerine kaplanan takviyesiz MgB₂ seramik kaplamada, tabandan gelen sinyallerin azaldığı ve sırasıyla artan dereceye bağlı olarak MgB₂ esaslı (001), (100), (101), (002), (110), (102), (200) ve (210) düzlemlerine sahip kristal yapıların oluştuğu dikkat çekmektedir. Bu karakteristik pikler ilgili literatürde de elde edilmiştir [8], [30]–[42] SiO₂ seramik nanoparçacıkların matris yapıya girişiyle, $2\theta=20$ ile 30° derece arasındaki yayvan pikin tepe noktasında kısmen sola doğru kayma ve biraz daha genişleme gözlenmektedir. 15 g/l'ye kadar SiO₂ takviyesinin kaplama kristal yapısına belirgin etkisi çok net bir şekilde görülmemesine rağmen, 15 g/l takviyesinde hem çelik taban malzemedan gelen hem de MgB₂ esaslı fazların şiddet olarak bariz bir şekilde azaldığı ve MgB₂/SiO₂ kompozit yapısının amorf bir karakter sergilediği anlaşılmaktadır.



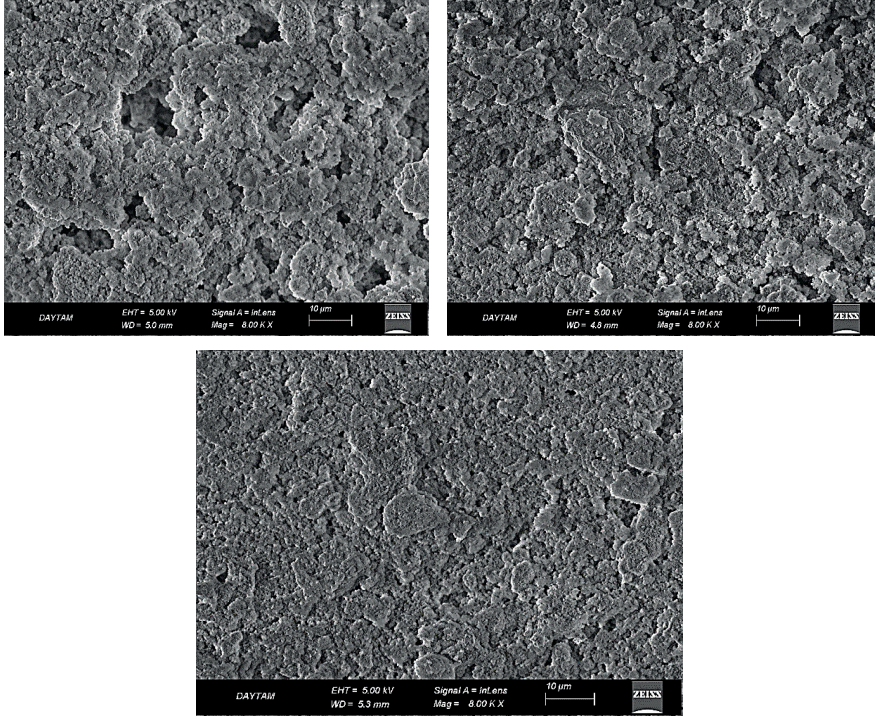
Şekil 1. Üretilen takviyesiz ve SiO₂ takviyeli kaplamaların karşılaştırmalı XRD spektrumları

3.2. SEM mikroyapı

Şekil 2'de SiO₂ nanoparçacıklar ile takviye edilmeyen MgB₂ seramik kaplamaya ait ve Şekil 3'te SiO₂ takviyeli kaplamalara ait SEM mikroyapıları görülmektedir. Şekil 2a'da elde edilen MgB₂ mikroyapısına benzer mikro yapılar, birçok araştırmacı tarafından elde edilmiştir [36], [41]–[48]. Şöyle ki, mikroyapı gözenekli (gözenekler yaklaşık 10 nm) olup yuvarlak ve rastgele yönlendirilmiş taneler içermektedir. Daha yüksek büyütme görüntüde (Şekil 2b) ise, bu taneler üzerindeki tüysü görünümlü yapılar dikkat çekmektedir. Takviye miktarının artışıyla gözenekliliğin azaldığı daha yoğun bir yapıya bir geçiş fark edilmektedir (Şekil 3).



Şekil 2. SiO_2 nanoparçacıklar ile takviye edilmeyen MgB_2 seramik kaplamaya ait (a) 200X ve (b) 5000X büyütmede alınan SEM-mikroyapı görüntüleri



Şekil 3. SiO_2 takviyeli MgB_2 kaplamaların SEM görüntüleri

3.3. Sertlik testi

Çizelge 3'te üretilen kaplamaların mikrosertlik değerleri karşılaştırılmıştır. Buna göre çelik taban malzeme üzerinde MgB_2 seramik kaplamanın 1,5 kattan daha fazla bir sertlik artışına sebep olduğu ve takviye miktarı

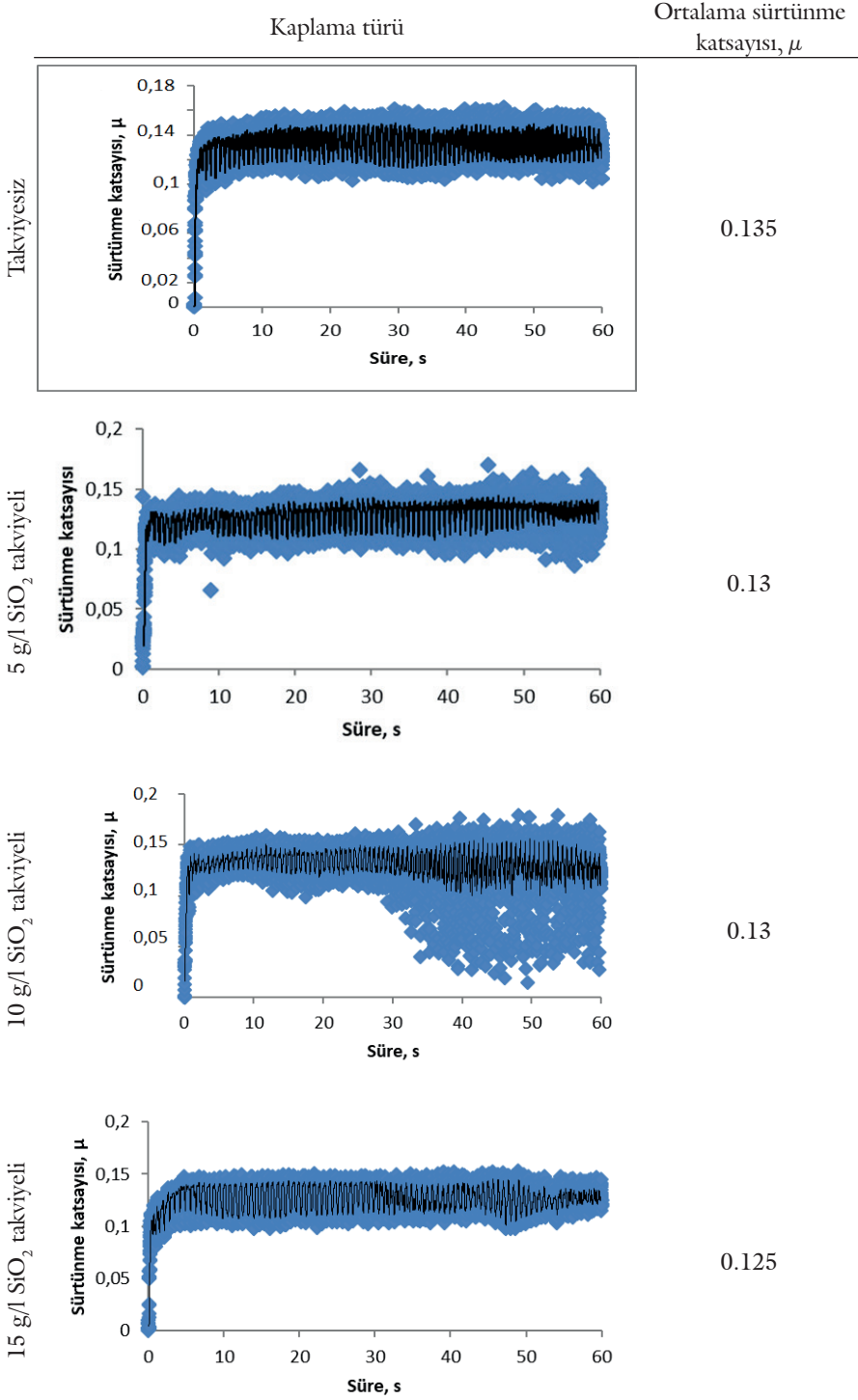
artışının da sertlik değerlerini artırdığı anlaşılmaktadır. Şöyle ki, 5 g/l'lik en düşük takviye miktarında, taban malzemeye göre yaklaşık 2 kat; 10 g/l'lik orta seviyeli takviye miktarında 2 kattan daha fazla ve 15 g/l'lik yüksek seviyeli takviye miktarında ise 3 kattan daha fazla olan bir sertlik artışı elde edilmiştir. Bu artış, Mg_xB_y matrisi içerisinde kovalent bir seramik bileşik olan SiO₂'nin birlikteliği ile oluşan yoğun seramik matrisli kompozit yapıya atfedilmektedir. Literatürde MgB₂'nin mekanik özelliklerini iyileştirmeye yönelik araştırmalar yok denecek kadar azdır. Zira süperiletken özelliği tanınan MgB₂'nin üzerinde çalışıldığı konular elektronik hedefli olmuştur. Fakat öte yandan, Koparan ve arkadaşları, geleneksel katı hal reaksiyon yöntemini kullanarak, farklı miktarlardaki Bi-2212 parçacıklarını ham MgB₂'a ilave ederek mekanik özelliklerdeki değişimi araştırmışlar ve ilave edilen parçacık miktarının artışına bağlı olarak, sertlikte artma olduğunu tespit etmişlerdir [36].

Çizelge 3. Kaplamaların sertlik değerleri

İşlem durumu	Taban malzeme	Seramik kaplama	Kompozit kaplama		
Numune	AISI 1020 çeliği	Takviyesiz MgB ₂ kaplama	5 gr SiO ₂ takviyeli MgB ₂ kaplama	10 gr SiO ₂ takviyeli MgB ₂ kaplama	15 gr SiO ₂ takviyeli MgB ₂ kaplama
Mikrosertlik (HV0.1)	135	220	285	320	445

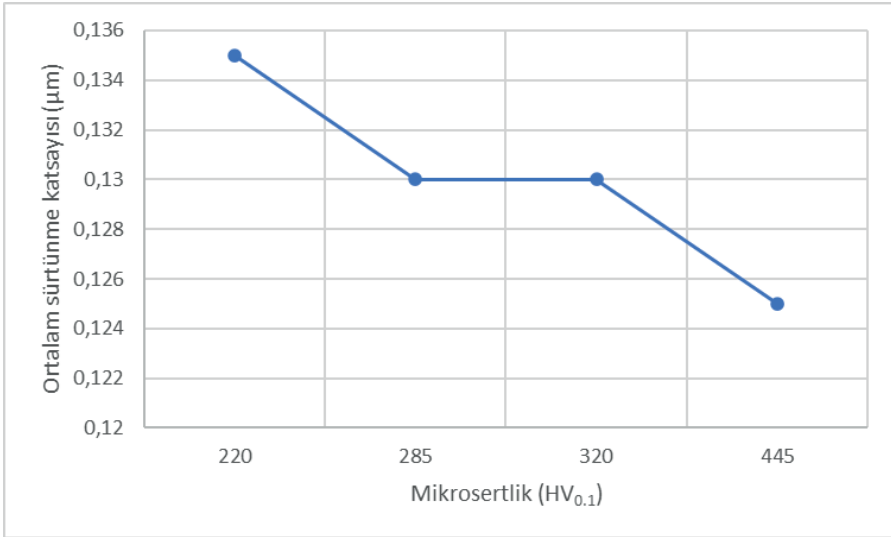
3.4. Aşınma testi

Şekil 4'te takviyesiz ve takviyeli kaplamalara ait sürtünme katsayısı grafikleri verilmiştir. Grafikleri oluşturan verilerin ortalaması alındığında takviyesiz MgB₂ seramik kaplamada 0,135 değerinde en yüksek sürtünme katsayısı elde edilirken, 15 g/l'lik takviye miktarında SiO₂ içeren kompozit filmde ise 0,125 değerinde bir sürtünme katsayısı değeri görülmüştür. Takviye miktarının artışıyla kaplamaların sürtünme değerlerinde azalmaya bir eğilim olduğu dikkat çekmektedir. Ayrıca eğriler incelendiğinde, 10 g/l'lik SiO₂ takviyesinde, sürtünme eğrisinde kararsız bölgeler göze çarpmaktadır. Bu kararsızlıkların arkasında ise, pin ile kaplama arasında aşınma ile kopan parçacıkların sürtünme açısından bir direnç oluşturması vardır.



Şekil 4. AISI 1020 çelik taban malzeme üzerine kaplanan MgB_2 ve MgB_2/SiO_2 kaplamaların sürtünme katsayısı-süre grafikleri

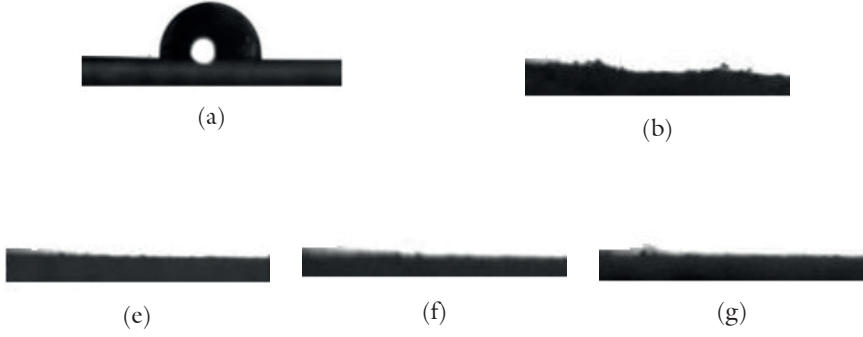
Kompozit yapılarda sertlik ve sürtünme katsayısı arasındaki ilişki, malzemenin bileşimi, yapısı ve yüzey özellikleri gibi bir dizi faktöre bağlı olarak değişebilir. Örneğin yapıyı oluşturan takviye ve matris malzemelerin türü ve oranları sertlik ve sürtünme katsayısı üzerinde etkili olabilir. İç yapının düzenliliği veya karışımın homojenliği, bu özellikleri etkileyebilir. Pürüzlü bir yüzey, genellikle daha yüksek bir sürtünme katsayısına neden olabilir. Yine malzeme yüzeylerinin birbirine temas ettiği koşullar (yağlayıcı, kimyasal ortam vs.) ve yük, hız, sıcaklık gibi test koşulları da önemli parametrelerdir. Şekil 5'te üretilen kaplamalarda sertlik ile sürtünme katsayısı arasındaki ilişki gösterilmiştir. Buna göre sertlik artışıyla sürtünme katsayısında kısmen azalma gözlenmektedir. Geleneksel sürtünme ve sertlik arasındaki ters orantı ilişkisini ortaya koyan bu sonuç, dolayısıyla ilgili literatürle [49]–[54] uyumludur.



Şekil 5. Sertlik-sürtünme katsayısı ilişkisi

3.5. Temas açısı ölçümü

Şekil 6'da üretilen kaplamaların ıslanabilirlik özelliklerini ifade eden görüntüleri verilmiştir. Taban malzeme olarak kullanılan AISI 1020 çeliğinde yaklaşık olarak 93° bir temas açısı ölçülürken takviyesiz ve takviyeli kaplamaların hepsinde 5°den düşük temas açıları ölçülmüş kaplamaların hepsinin süperhidrofilik özellikte olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 6. İslanma açısı ölçümleri

a) AISI 1020 taban malzeme, b) Takviyesiz MgB_2 kaplama, c) 5 g/l SiO_2 takviyeli MgB_2 kaplama, d) 10 g/l SiO_2 takviyeli MgB_2 kaplama, e) 15 g/l SiO_2 takviyeli MgB_2 kaplama

Birçok araştırmacı tarafından yapılan çalışmalar neticesinde, sürtünme katsayısı ile ıslanabilirlik ilişkisi değerlendirilmiş ve ıslanabilirliğin artması ile sürtünme katsayısının azaldığı ifade edilmiştir [55], [56]. Zhang ve arkadaşları, hidrofilik yüzeylerde temas açısının artışıyla sürtünme katsayısının arttığı, hidrofobik yüzeylerde ise temas açısının artışıyla sürtünme katsayısının azaldığını not etmişlerdir [56]. Bu çalışmada takviyesiz ve takviyeli kaplamaların hepsi için ıslanabilir bir özellik elde edildiğinden, takviye miktarına göre bir karşılaştırma yapmak mümkün değildir. Fakat ıslanabilirliği kaplanmış malzemelere göre düşük olan çelik taban malzemede daha yüksek sürtünme katsayısı elde edildiği ve azalan temas açısına göre sürtünme katsayısının azaldığı kaplamalar için benzer bir ilişkiden söz edilebilir. Fakat öte yandan sürtünme katsayısı ve temas açısı arasındaki ilişki, yüzeyin kimyasal ve fiziksel özelliklerine, sıvının türüne ve koşullarına da bağlıdır. Genel olarak, yüksek sürtünme katsayısına sahip bir yüzey, daha az ıslanabilir olma eğilimindedir ve sıvı bu yüzeyde daha az yayılır, yani hidrofobik bir yüzey eğilimi gösterir. Düşük sürtünme katsayısına sahip bir yüzey ise daha fazla ıslanabilir olma eğilimindedir ve sıvı bu yüzeyde daha fazla yayılır. Ancak bu ilişki karmaşık olabilir ve yüzeyin mikro yapıları, kimyasal kaplamaları ve yüzey enerjisi gibi faktörler de etkileyici olabilir. Bu nedenle, spesifik bir uygulama veya sistem için sürtünme katsayısı ile temas açısı arasındaki ilişkiyi daha ayrıntılı bir şekilde incelemek gerekir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, elektriksiz kaplama yöntemi kullanılarak AISI 1020 çelik taban malzeme üzerine kaplanan seramik MgB₂ kaplamanın özellikleri ve MgB₂ kaplamalara ilave edilen SiO₂ nanoparçacık takviyesinin araştırılan yapısal, sertlik, sürtünme ve ıslanma özellikler üzerine etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenmiştir:

- SiO₂ takviyesinin, kaplamaların yapısını etkileyerek amorflaşmaya neden olduğu, sertliği artırdığı ve sürtünme katsayısını azalttığı anlaşılmıştır.
- Hem takviyesiz hem de takviyeli kaplamaların ıslanabilirlik özellikleri süperhidrofiliktir, fakat ve bu yüzden SiO₂ takviyesinin ıslanma açısına etkisi tam olarak tespit edilememiştir.
- Çelik taban malzemesi ile kaplanmış yüzeylerde sürtünme katsayısındaki azalma ve ıslanabilirlik özelliği birbirini destekler yönde olmuştur.
- Sonuç olarak, elektriksiz kaplama yönteminin sadece nikel kaplamalar değil, MgB₂ kaplamaların üretiminde de potansiyel bir yöntem olabileceği ve farklı nanoparçacıkların katılmasının bu kaplamaların mekanik ve tribolojik vd. özelliklerinin daha da iyileştirilmesi yönünde bir potansiyel olabileceği sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] V. Shibe and V. Chawla, "A Review of Surface Modification Techniques in Enhancing the Erosion Resistance of Engineering Components," *International Journal of Research in Mechanical Engineering & Technology*, vol. 4, no. 2, 2014.
- [2] S. D. Cramer and B. S. Covino, *ASM Handbook Vol. 13c: Corrosion: Environments and Industries*, vol. 13. 2006.
- [3] V. Vitry, J. Hastir, A. Mégret, S. Yazdani, M. Yunacti, and L. Bonin, "Recent advances in electroless nickel-boron coatings," *Surface and Coatings Technology*, vol. 429. 2022. doi: 10.1016/j.surfcoat.2021.127937.
- [4] J. Sudagar, J. Lian, and W. Sha, "Electroless nickel, alloy, composite and nano coatings - A critical review," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 571. 2013. doi: 10.1016/j.jallcom.2013.03.107.
- [5] A. Sharma and A. K. Singh, "Electroless Ni-P and Ni-P-Al₂O₃ nanocomposite coatings and their corrosion and wear resistance," *J Mater Eng Perform*, vol. 22, no. 1, 2013, doi: 10.1007/s11665-012-0224-1.
- [6] D. Ekmekci and F. Bülbül, "Preparation and characterization of electroless Ni-B/nano-SiO₂, Al₂O₃, TiO₂ and CuO composite coatings," *Bulletin of Materials Science*, vol. 38, no. 3, 2015, doi: 10.1007/s12034-015-0912-1.
- [7] K. S. Vijayaragavan, S. K. Putatunda, A. Dixit, and G. Lawes, "Electroless deposition of superconducting MgB₂ films on various substrates," *Thin Solid Films*, vol. 519, no. 2, 2010, doi: 10.1016/j.tsf.2010.08.107.
- [8] J. Nagamatsu, N. Nakagawa, T. Muranaka, Y. Zenitani, and J. Akimitsu, "Superconductivity at 39 K in magnesium diboride," *Nature*, vol. 410, no. 6824, 2001, doi: 10.1038/35065039.
- [9] D. C. Larbalestier *et al.*, "Strongly linked current flow in polycrystalline forms of the superconductor MgB₂," *Nature*, vol. 410, no. 6825, 2001, doi: 10.1038/35065559.
- [10] M. Kambara *et al.*, "High intergranular critical currents in metallic MgB₂ superconductor," *Supercond Sci Technol*, vol. 14, no. 4, 2001, doi: 10.1088/0953-2048/14/4/101.
- [11] V. Ferrando *et al.*, "Upper critical fields of MgB₂ thin films," in *Physica C: Superconductivity and its Applications*, 2004. doi: 10.1016/j.physc.2004.02.059.
- [12] C. B. Eom *et al.*, "High critical current density and enhanced irreversibility field in superconducting MgB₂ thin films," *Nature*, vol. 411, no. 6837, 2001, doi: 10.1038/35079018.

- [13] S. H. Moon *et al.*, “High critical current densities in superconducting MgB₂ thin films,” *Appl Phys Lett*, vol. 79, no. 15, 2001, doi: 10.1063/1.1407854.
- [14] A. B. Jadhav and S. H. Pawar, “Electrochemical synthesis of superconducting magnesium diboride films: A novel potential technique,” *Supercond Sci Technol*, vol. 16, no. 7, 2003, doi: 10.1088/0953-2048/16/7/303.
- [15] Y. Bin Zhu *et al.*, “Fabrication of MgB₂ superconducting thick films by electrophoresis technique,” *Physica C: Superconductivity and its Applications*, vol. 371, no. 1, 2002, doi: 10.1016/S0921-4534(02)01138-3.
- [16] M. Nath and B. A. Parkinson, “A simple sol-gel synthesis of superconducting MgB₂ nanowires,” *Advanced Materials*, vol. 18, no. 14, 2006, doi: 10.1002/adma.200600122.
- [17] K. Ueda and M. Naito, “As-grown superconducting MgB₂ thin films prepared by molecular beam epitaxy,” *Appl Phys Lett*, vol. 79, no. 13, 2001, doi: 10.1063/1.1405421.
- [18] N. Peng *et al.*, “Ion beam synthesis of superconducting MgB₂ thin films,” *Appl Phys Lett*, vol. 82, no. 2, 2003, doi: 10.1063/1.1537870.
- [19] S. F. Wang *et al.*, “Superconducting MgB₂ thin films grown by pulsed laser deposition on Al₂O₃(0001) and MgO(100) substrates,” *Supercond Sci Technol*, vol. 14, no. 11, 2001, doi: 10.1088/0953-2048/14/11/301.
- [20] W. Dai *et al.*, “High-field properties of carbon-doped MgB₂ thin films by hybrid physical-chemical vapor deposition using different carbon sources,” *Supercond Sci Technol*, vol. 24, no. 12, 2011, doi: 10.1088/0953-2048/24/12/125014.
- [21] A. V. Pogrebnnyakov *et al.*, “Carbon-doped MgB₂ thin films grown by hybrid physical-chemical vapor deposition,” in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2005. doi: 10.1109/TASC.2005.848871.
- [22] P. Kúš, A. Plecenik, L. Satrapinsky, Y. Xu, and R. Sobolewski, “Superconducting properties of MgB₂ thin films prepared on flexible plastic substrates,” *Appl Phys Lett*, vol. 81, no. 12, 2002, doi: 10.1063/1.1507828.
- [23] V. R. Nagarajan, S. K. Putatunda, P. Kharel, and G. Lawes, “Synthesis of superconducting thin films of Magnesium Diboride by electroless plating,” *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 24, no. 6, 2009, doi: 10.1080/10426910902769046.
- [24] S. K. Putatunda, K. S. Vijayaragavan, and G. Lawes, “Deposition of superconducting thin films of magnesium di-boride on various substrates by electroless plating process,” in *Materials Science Forum*, 2010. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.654-656.1840.
- [25] F. Bülbül, M. Güney, and S. Jafarpour, “The synthesis of super-hydrophilic and hard MgB₂ coatings as an alternative to electroless nickel coatings,” *Kovove Materialy*, vol. 56, no. 4, 2018, doi: 10.4149/km_2018_4_223.

- [26] D. M. Marulanda Cardona, J. Wongsan-Ngam, H. Jimenez, and T. G. Langdon, "Effects on hardness and microstructure of AISI 1020 low-carbon steel processed by high-pressure torsion," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 6, no. 4, 2017, doi: 10.1016/j.jmrt.2017.05.002.
- [27] A. Galiotto, A. R. Rosso, E. A. Dos Santos De Almeida, A. P. Krelling, J. C. G. Milan, and C. E. Da Costa, "Characterization of different surface layers produced by solid boron-nitro-carburizing thermochemical treatment on AISI 1020," *Materials Research*, vol. 22, no. 5, 2019, doi: 10.1590/1980-5373-MR-2019-0316.
- [28] D. Aryanto, T. Sudiro, and A. S. Wismogroho, "Correlations between Structural and Hardness of Fe-50%Al Coating Prepared by Mechanical Alloying," *PISTON: Journal of Technical Engineering*, vol. 1, no. 2, 2019, doi: 10.32493/pjte.v1i2.3185.
- [29] U. K. Chanda, S. P. Padhee, A. K. Pandey, S. Roy, and S. Pati, "Electrodeposited Ni-Mo-Cr-P coatings for AISI 1020 steel bipolar plates," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 41, 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.06.014.
- [30] U. Lamichhane, G. C. Dannangoda, M. A. Hobosyan, R. A. Shohan, A. Zakhidov, and K. S. Martirosyan, "Twisted laminar superconducting composite: MgB₂ embedded carbon nanotube yarns," *Bulletin of Materials Science*, vol. 44, no. 4, 2021, doi: 10.1007/s12034-021-02571-7.
- [31] Z. Q. Ma and Y. C. Liu, "Low-temperature synthesis of MgB₂ superconductors," *International Materials Reviews*, vol. 56, no. 5-6, 2011. doi: 10.1179/1743280411Y.0000000002.
- [32] P. P. S. Bhadauria, A. Gupta, H. Kishan, S. Sharma, and A. V. Narlikar, "Band Modification Effect on the Normal and Superconducting State Properties of Bulk MgB₂," *J Supercond Nov Magn*, vol. 30, no. 2, 2017, doi: 10.1007/s10948-016-3809-3.
- [33] J. Longji Dadiel, M. Muralidhar, and M. Murakami, "Flux Pinning and Superconducting Properties of MgB₂-Diamond Nanocomposites," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2018. doi: 10.1088/1742-6596/1054/1/012052.
- [34] H. R. Liu *et al.*, "The effect of graphene coated Si, Ti and Nb additions on the superconducting properties of MgB₂ bulks," *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 29, no. 9, 2018, doi: 10.1007/s10854-018-8773-1.
- [35] M. Muralidhar and M. Murakami, "Progress in Critical Current Density (J_c) in Sintered MgB₂ Bulks," *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, vol. 31, no. 9, 2018. doi: 10.1007/s10948-018-4777-6.
- [36] E. T. Koparan *et al.*, "Changes in mechanical and structural properties of Bi-2212 added MgB₂ superconductors," *Journal of Materi-*

- als Science: Materials in Electronics*, vol. 27, no. 6, 2016, doi: 10.1007/s10854-016-4531-4.
- [37] E. Sadeghi, N. S. Peighambaroust, M. Khatamian, U. Unal, and U. Aydemir, "Metal doped layered MgB₂ nanoparticles as novel electrocatalysts for water splitting," *Sci Rep*, vol. 11, no. 1, 2021, doi: 10.1038/s41598-021-83066-7.
- [38] Y. Yang, M. D. Sumption, and E. W. Collings, "Influence of Metal Diboride and Dy₂O₃ Additions on Microstructure and Properties of MgB₂ Fabricated at High Temperatures and under Pressure," *Sci Rep*, vol. 6, 2016, doi: 10.1038/srep29306.
- [39] M. Rafieezad, Ö. Balcı, S. Acar, and M. Somer, "Review on magnesium diboride (MgB₂) as excellent superconductor: Effects of the production techniques on the superconducting properties," *Journal of Boron*, vol. 2, no. 2, 2017.
- [40] Q. Cai, Y. Liu, J. Xiong, and Z. Ma, "Enhancement of critical current density in MgB₂ bulks burying sintered with commercial MgB₂ powder," *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 29, no. 12, 2018, doi: 10.1007/s10854-018-9088-y.
- [41] M. Higuchi, M. Muralidhar, M. Jirsa, and M. Murakami, "Microstructure and critical current density in MgB₂ bulk made of 4.5 wt% carbon-coated boron," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2017. doi: 10.1088/1742-6596/871/1/012059.
- [42] E. I. Kuznetsova, T. P. Krinitsina, M. V. Degtyarev, and Y. V. Blinova, "Structure of MgB₂ Ceramics Synthesized with Excess of Magnesium after Cold Deformation and Annealing," *Physics of Metals and Metallography*, vol. 120, no. 9, 2019, doi: 10.1134/S0031918X19090060.
- [43] S. S. Arvapalli, M. Muralidhar, and M. Murakami, "High-Performance Bulk MgB₂ Superconductor Using Amorphous Nano-boron," *J Supercond Nov Magn*, vol. 32, no. 7, 2019, doi: 10.1007/s10948-018-4919-x.
- [44] H. Liu *et al.*, "Improved Superconducting Properties in Graphene-Doped MgB₂ Prepared by Coating Method," *J Supercond Nov Magn*, vol. 31, no. 4, 2018, doi: 10.1007/s10948-017-4309-9.
- [45] Q. Zhao *et al.*, "Analysis of the co-doping effect of graphene and nano-Ni on grain connectivity and critical current density in MgB₂ superconductors," *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 30, no. 10, 2019, doi: 10.1007/s10854-019-01326-9.
- [46] A. Bateni, E. Erdem, W. Häßler, and M. Somer, "High-quality MgB₂ nanocrystals synthesized by using modified amorphous nano-boron powders: Study of defect structures and superconductivity properties," *AIP Adv*, vol. 9, no. 4, 2019, doi: 10.1063/1.5089488.

- [47] S. D. Yudanto *et al.*, "Improvement in the Crystallographic Phase Content and Superconducting Properties of Mechanically Alloyed MgB₂," *J Supercond Nov Magn*, vol. 32, no. 9, 2019, doi: 10.1007/s10948-019-5061-0.
- [48] M. Capra *et al.*, "Weak acid leaching of MgB₂ to purify magnesiothermic boron powder," *Mater Today Commun*, vol. 26, 2021, doi: 10.1016/j.mtcomm.2020.101731.
- [49] S. C. Bellemare, M. Dao, and S. Suresh, "Effects of mechanical properties and surface friction on elasto-plastic sliding contact," *Mechanics of Materials*, vol. 40, no. 4–5, 2008, doi: 10.1016/j.mechmat.2007.07.006.
- [50] M. Chandross and N. Argibay, "Friction of Metals: A Review of Microstructural Evolution and Nanoscale Phenomena in Shearing Contacts," *Tribology Letters*, vol. 69, no. 4. 2021. doi: 10.1007/s11249-021-01477-z.
- [51] "Relation between friction and hardness," *Proc R Soc Lond A Math Phys Sci*, vol. 212, no. 1111, 1952, doi: 10.1098/rspa.1952.0234.
- [52] S. Li, X. Yang, Y. Kang, Z. Li, and H. Li, "Progress on Current-Carry Friction and Wear: An Overview from Measurements to Mechanism," *Coatings*, vol. 12, no. 9. 2022. doi: 10.3390/coatings12091345.
- [53] C. Trevisiol, A. Jourani, and S. Bouvier, "Effect of hardness, microstructure, normal load and abrasive size on friction and on wear behaviour of 35NCD16 steel," *Wear*, vol. 388–389, 2017, doi: 10.1016/j.wear.2017.05.008.
- [54] A. Li and I. Szlufarska, "How grain size controls friction and wear in nanocrystalline metals," *Phys Rev B Condens Matter Mater Phys*, vol. 92, no. 7, 2015, doi: 10.1103/PhysRevB.92.075418.
- [55] M. Pang, X. Liu, and K. Liu, "Effect of wettability on the friction of a laser-textured cemented carbide surface in dilute cutting fluid," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 9, no. 12, 2017, doi: 10.1177/1687814017738154.
- [56] Z. Zhang, Z. Cui, H. Wang, C. Jiang, J. Zhao, and L. Ren, "Tribological performance of microstructured surfaces with different wettability from superhydrophilic to superhydrophobic," *Biosurf Biotribol*, vol. 6, no. 4, 2020, doi: 10.1049/bsbt.2020.0023.

