



Yeni ZK60 SiC/AlN takviyeli kompozitlerin mikroyapı karakterizasyonu ve aşınma özellikleri

Microstructure characterization and wear properties of the new ZK60 SiC/AlN reinforced composites

Khaled Saleh Aldoukali Matoug^{1*}, İsmail Esen¹, Abdulmuaen mm Sager², Hayrettin Ahlatcı³, Bengü Akın⁴

¹Makine Mühendisliği Bölümü, Karabük Üniversitesi, Karabük, Türkiye.

khaled.matoug45@yahoo.com, iesen@karabuk.edu.tr

²Makine Mühendisliği Bölümü, Elmergib Üniversitesi, Alkomis, Libya.

amsager@elmergib.edu.ly

³Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Karabük Üniversitesi, Karabük, Türkiye.

hahlatci@karabuk.edu.tr

⁴Kardemir AŞ, Karabük, Türkiye.

bakin@kardemir.com

Geliş Tarihi/Received: 11.07.2025

Düzeltilme Tarihi/Revision: 18.06.2025

doi: 10.5505/pajes.2025.58201

Kabul Tarihi/Accepted: 21.07.2025

Araştırma Makalesi/Research Article

Özet

Bu çalışmada, takviye edilmemiş ZK60 alaşımı ve %0.2 ila %0.5 arasında değişen oranlarda alüminyum nitrid (AlN) nano partikülleri dahil edilmiş %15 silisyum karbür (SiC) parçacıklarıyla takviye edilmiş ZK60 matris kompozitinin mikro yapısı, mekanik özellikleri ve aşınma davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. SiC ve AlN, ana alaşım olarak birincil toz magnezyum ile öngörülen miktarlarda mekanik olarak karıştırıldı, 500 MPa basınç altında ardından kompaktlar üretildi ve sinterlendi. Bundan sonra, yarı katı erime sıcaklığındaki mekanik bir karıştırıcı, sıkıştırılmış ve sinterlenmiş takviye malzemelerini ZK60 metal matrisine karıştırdı. Eriyikler 30 dakika homojenleştirildi ve kompozit numuneler yapmak için metal kalıplara döküldü. 410 °C'de 24 saatlik homojenizasyondan sonra, kompozit numuneler 320 °C'de 16:1 oranında 0,3 mm/sn'de ekstrüde edildi. %15 SiC ile takviye edilen ZK60 matrisi, ilave AlN içeriğinin artmasıyla tane boyutunda bir azalma gösterdi. Döküm ZK60 alaşımının tane boyutu, %15 SiC ve %0.5 AlN eklenmesiyle %26 oranında azalırken, ekstrüzyon işleminden sonra aynı kompozitin tane boyutu %28 oranında azaldı. ZK60 matrisine döküm yoluyla %15 SiC ve %0.5 AlN eklenmesiyle sertlikte %37 oranında bir iyileşme sağlandı. Ekstrüde edilmiş ZK60 alaşımıyla karşılaştırıldığında, ekstrüde edilmiş ZK60 + %15SiC + %0.5 nano AlN kompoziti sertlikte ve basınç dayanımında %21 oranında iyileşme gösterdi. Ekstrüde edilmiş ZK60+15%SiC+%0.5 nano AlN kompozitinin aşınma hızı, ekstrüde edilmiş ve takviye içermeyen ZK60 alaşımınıninkinden %37 daha düşüktür. Nano AlN ilaveli kompozitlerde mekanik özelliklerin ve aşınma direncinin artması, tane boyutunun iyileştirilmesine ve nanopartiküller tarafından dislokasyon hareketinin engellenmesine atfedilmektedir.

Anahtar kelimeler: ZK60/AlN/SiC, mikro yapı, mekanik özellikler, aşınma

Abstract

This study examined the impact of incorporating aluminum nitride (AlN) nanoparticles, ranging from 0.2% to 0.5%, on the microstructure, mechanical characteristics, and wear behavior of and ZK60 matrix composite reinforced with 15% silicon carbide (SiC) particles and unreinforced ZK60 alloy. SiC and AlN were mechanically mixed in prescribed amounts with primary powder magnesium as the main alloy, then compacts were produced and sintered under 500 MPa pressure. After that, a mechanical mixer at semisolid melting temperature mixed the compacted and sintered reinforcement materials into the ZK60 metal matrix. The melts were homogenized for 30 min and poured into metal molds to make composite samples. After 24 h of homogenization at 410 °C, the composite samples were extruded at 0.3 mm/s at 320 °C with a ratio of 16:1. The ZK60 matrix reinforced with 15% SiC exhibited a reduction in grain size with an increase in the additional AlN content. The grain size of the cast ZK60 alloy decreased by 26% with the incorporation of 15% SiC and 0.5% AlN, while that of the grain size after the extrusion process was reduced by 28%. The addition of 15% SiC and 0.5% AlN to the ZK60 matrix by casting resulted in a 37% improvement in hardness. In comparison to the extruded ZK60 alloy, the extruded ZK60+15%SiC+0.5% nano AlN composite exhibited enhancements in hardness and compressive strength by 21%. The wear rate of the extruded ZK60+15%SiC+%0.5 nano AlN composite is 37% inferior than that of the extruded and unreinforced ZK60 alloy. The enhancement of mechanical characteristics and wear resistance in composites with nano AlN additions is ascribed to the refinement of grain size and the obstruction of dislocation movement by nanoparticles.

Keywords: ZK60/AlN/SiC, microstructure, mechanical properties, wear.

1 Giriş

ZK60 magnezyum alaşımı, benzersiz özellikleri ve potansiyel uygulamaları nedeniyle çeşitli disiplinlerde kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Çalışmalar, ZK60 alaşımının, Eşit Kanallı Açısız Presleme (ECAP) gibi işlemler yoluyla süper plastik süneklik elde edebildiğini, mikrometre altı seviyede tane incelmeye ve gelişmiş süper plastik özelliklere yol açtığını göstermiştir Figueiredo ve Langdon [1]. Ek olarak, alaşımın iyi

in vitro ve in vivo bozunma oranları göstermesi, onu biyolojik olarak parçalanabilir uygulamalar için umut verici bir aday haline getirmektedir [2]. Ayrıca ZK60 alaşımı, saf magnezyumla karşılaştırıldığında daha hızlı bozunma oranları sergilemekte olup, bu durum simüle edilmiş vücut sıvılarındaki korozyon davranışı açısından araştırılmıştır [2]. Ortopedik uygulamalar için ZK60 alaşımının korozyon direncini ve hücre uyumluluğunu geliştirmek amacıyla hidroksiapatit kaplamaların geliştirilmesi gibi çeşitli yüzey modifikasyon

*Yazışılan yazar/Corresponding author

teknikleri araştırılmıştır [3]. Zk60 üzerindeki mikro ark oksidasyon kaplamalarının korozyon performansları [4] tarafından sunulmuştur. Ayrıca çalışmalar [5-7], ısıtma işlemi, kriyojenik işlem ve neodimyum gibi elementlerin eklenmesi gibi işlemler yoluyla ZK60 alaşımının mekanik özelliklerinin artırılmasına odaklanmıştır.

ZK60 alaşımının mikro yapısı ve mekanik özellikleri, yüksek basınçlı burulma, termoelektrik birleştirme derin çekme işlemleri ve homojenizasyon işlemlerinin alaşım üzerindeki etkilerini araştırarak araştırmalarla kapsamlı bir şekilde incelenmiştir [8-10]. Ek olarak, ZK60 magnezyum alaşımının korozyon davranışı, sönümleme performansı ve dinamik sıkıştırma davranışına ilişkin araştırmalar, malzeme özellikleri ve potansiyel uygulamaları hakkında değerli bilgiler sağlamıştır [11-13]. Biyomedikal mühendisliği alanında ZK60 alaşımı, biyoyoumluluğu ve tıbbi implantlara uygunluğu açısından değerlendirilmiştir. Çalışmalar, in vivo (canlı içindeki) performansını değerlendirmek için ZK60 alaşımının bozunma davranışını ve kemik tepkisini Poli-L-Laktik Asit (PLLA) gibi diğer malzemelerle karşılaştırmıştır [14]. Ayrıca alaşım, ön çapraz bağ rekonstrüksiyonu için biyo-transfiks çivi sistemlerinde kullanılmış olup, ortopedik uygulamalardaki potansiyelini vurgulamaktadır [15].

SiC (silisyum karbür), çeşitli avantajları nedeniyle metal matrisli kompozitler (MMK'lar) için umut verici bir takviye olarak geniş çapta tanınmaktadır. SiC, farklı metal malzemeleri güçlendirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır [16]. Alüminyum matrislerle kimyasal olarak uyumludur, metaller arası fazlar oluşmadan güçlü bir bağ oluşturur. SiC ayrıca iyi termal iletkenlik ve uygun maliyetli işlenebilirlik gibi avantajlar da sunar [17]. SiC takviyeli MMK'lar, yüksek elastik modül, spesifik mukavemet, sertlik, yorulma direnci ve aşınma direnci dahil olmak üzere üstün mekanik özellikler sergiler ve bu da onları otomotiv ve havacılık gibi endüstrilerdeki hafif uygulamalar için çekici kılar [18].

Çalışmalar, SiC takviyeli MMK'ların mükemmel tribolojik özelliklere sahip olduğunu, yüksek mukavemet ve aşınma direnci sağladığını göstermiştir [19]. Matris alaşımına SiC parçacıklarının eklenmesi, abrazyif aşınmayı önemli ölçüde etkiler ve bu da SiC'nin bir takviye malzemesi olarak etkinliğini gösterir [20]. SiC takviyeli MMK'lar aynı zamanda korozyon dirençleri açısından da araştırılmıştır ve zorlu ortamlarda korozyona karşı direnç konusunda umut verici sonuçlar göstermektedir [21].

Ayrıca, SiC fiber takviyeli kompozitler, gelişmiş mekanik özellikler ve hasar toleransı nedeniyle yapısal uygulamaları açısından öne çıkmaktadır [22]. Uzun SiC fiber takviyeli MMK'ların enine mukavemetinin, arayüz faktörlerine atfedilen boylamsal mukavemetlerinden daha üstün olduğu rapor edilmiştir [23]. SiC takviyeli MMK'lar, sıvı metalurji, kıvılcım plazma sinterleme ve hızlı dirençli sinterleme gibi çeşitli teknikler kullanılarak üretilmiştir ve bu da SiC'nin bir takviye malzemesi olarak çok yönlülüğünü ortaya koymaktadır [24-26].

Alüminyum Nitrür (AlN), olağanüstü özelliklerinden dolayı MMK'lar için takviye malzemesi olarak kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Ye ve ark. [27], alüminyum alaşımlarında AlN'nin yerinde sentezi için sıvı nitrürlemenin etkinliğini göstererek, kompozit üretim potansiyelini ortaya koydu. Ayrıca Sun ve ark. [28], sıvı-katı reaksiyon prosesi yoluyla AlN takviyeli alüminyum kompozitlerin hazırlanmasına yönelik bir yöntem geliştirdi ve bu yöntemin, çekme mukavemetinde önemli bir iyileşme sağladı ve aşınma direncini iyileştirdiği rapor edildi. Giannopoulou ve ark. [29], karşılaştırmalı olarak saf Mg ve M-

Zn-Y matrise karıştırmalı döküm yöntemi ile %1.5 AlN ilave etmişler ve mikroyapı ve mekanik özelliklerindeki değişimi incelemişlerdir. Bu çalışmada ise AlN + SiC karma kompozitlerin üretimi ve mikroyapı davranışı incelenmiştir. %15 SiC ile birlikte %0.2 ile 0.5 AlN takviyeli ZK60 matrisli kompozitlerin ekstrüzyon sonrası mekanik ve aşınma davranışı özel olarak karşılaştırılmıştır.

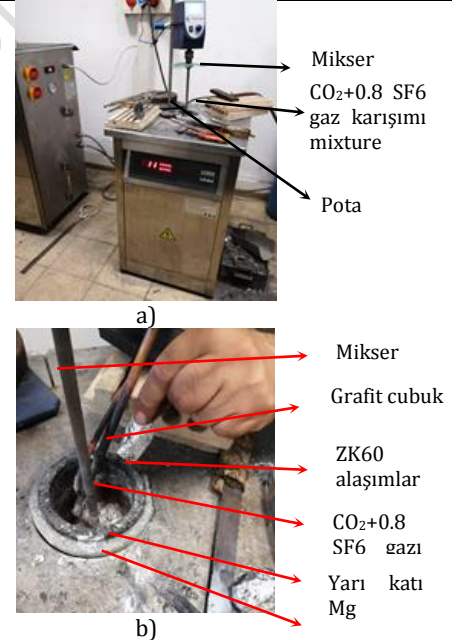
2 Deneysel Yöntem

Tablo 1, %0.5/0.2 AlN + %15 SiC nano, %15 SiC ile desteklenen ZK60 alaşımı ve takviyesiz ZK60 kompozitlerinin bileşimlerini listelemektedir.

Tablo 1. İncelenen ZK60 ve ZK60 matris kompozitlerinin 1000g için gram olarak ifade edilen bileşimi.

Table 1. Composition of the examined ZK60 and ZK60 matrix composites, expressed in grams per 1000gr.

Alaşım ve Kompozitler	Zn (gr)	Zr (gr)	Mg (gr)	AlN (gr)	SiC (gr)	Mg (gr)
ZK60 + %15 SiC ve %0.5 AlN nano.	60	5	114	5	150	731
ZK60 + %15 SiC ve %0.2 AlN nano.	60	5	114	2	150	733
ZK60 + %15 SiC	60	5	114	0	150	735
ZK60	60	5	0	0	0	935



Şekil 1. Alaşım metodolojisi; a) Grafit pota; b) Eritme ve karıştırma sistemi.

Figure 1. Alloy methodology; a) Graphite crucible; b) Melting and mixing system.

Amaçlanan kompozitler için Tablo 1'de gösterilen bileşimlere sahip ilk ana takviye kompaktları yapıldı. V tipi çelik bilyeli öğütme mikseri kullanılarak, tüm kompozitlerin ortalama 50 µm boyutlu SiC ve 800 nm boyutlu AlN takviye karışımları ilk önce bir saat boyunca birleştirilir. Master-kompakt karışımlar 500 MPa basınç altında kalıplandıktan sonra 460°C'de bir saat sinterlenir. Daha sonra standart bileşimlere sahip ZK60 alaşımları, gaz korumalı indüksiyonlu eritme fırınında düşük basınçlı döküm (LPDC) yöntemi kullanılarak yapıldı. Ergitme işlemi boyunca (Şekil 1), ortamın atmosferle temasını önlemek için potaya sürekli olarak CO2+0.8 SF6 gaz karışımı verilir. Pota

eriği, grafit bazlı bir mekanik karıştırıcı (Şekil 1a ve 1b) kullanılarak karıştırılır.

Grafit pota başlangıçta saf magnezyum ile doldurulup ve magnezyum tamamen eridikten sonra yüzde 0.5 Zr ve yüzde 6 Zn ilave edilmiştir. Karışım, sıcaklık yarı katı bir duruma (yaklaşık 450 °C) düşene kadar mekanik bir karıştırıcı ile 200 d/d'da 30 dakika boyunca karıştırıldı. Ezilmiş kapsüllerin eklenmesi ve iki saat karıştırılmasının ardından karışım fırında 750°C'ye ısıtılmıştır. Erimiş karışımlar daha sonra son olarak 200 mm yüksekliğinde ve 32 mm çapında bir metal kalıba döküldü. Özel bir kum karışımına batırılan döküm numuneleri, atmosfer kontrollü bir fırında 420°C'de 24 saatlik bir homojenizasyon sürecine tabi tutuldu. Şekil 2a ve 2b sırasıyla sıkıştırılmış kompakt kapsül ve döküm sonrasında elde edilen ZK60 kompozitlerinin bir örneğini göstermektedir [30]. Bu homojenizasyon ısıl işleminde, literatürde bulunan ve önerilen sıcaklık ve süre kullanılmıştır [30,31,32]. Homojenleştirilmiş takviyesiz ve AlN + SiC karma takviyeli kompozitlerden hazırlanmış 50 mm uzunluğunda 30 mm çapında bilet kütükleri 320 °C'de 0.3 mm/s sabit sürüş hızı ve 16:1 deformasyon oranıyla 10 mm çıkış çaplı olarak ekstrüzyona tabi tutuldu. Kompozitlerin metalografik inceleme için yüzey hazırlığı, SiC kağıdı (600-2500 grit) ile aşındırılması ve ardından 1 µm alümina macunu ile parlatılmasını içermektedir. Parlatma işleminin ardından numuneler, 100 ml etil alkol, 10 ml damıtılmış su, 5 ml asetik asit ve 6 g pikrik asitten oluşan bir çözelti içerisinde aşındırılarak mikroyapılar görünür hale getirildi.



a)



b)

Şekil 2 a) SiC+AlN'ye sahip sıkıştırılmış kompakt kapsüllerin bir örneği; b) dökümün bir örneği [30].

Figure 2 a) An example of compressed compact capsules with SiC+AlN; b) a sample of the casting [30].

Metalografik olarak hazırlanan ZK60 + %0,5 AlN + %15 SiC'nin döküm, homojenizasyon ve ekstrüzyon sonrası mikro yapısı Nikon optik mikroskobu ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX) ile donatılmış Carl Zeiss Ultra Plus taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelendi ve sertlik değerleri 187.5 N kuvvet ve 2.5 mm'lik bilya kullanan Brinell sertlik aleti kullanılarak ISO 6506/ASTM E10 standardına uygun olarak ölçüldü. Ölçüm güvenilirliğini/izlenebilirliğini artırmak ve sertlik değerlendirmesinde tekrarlanabilirliğini garantilemek için en az 5 ölçüm ve standart sapma hesaplandı. 10 mm çapında ve 12

mm uzunluğunda en az 5 silindir numunenin basma mukavemetlerini belirlemek için Zwick Roel 600 kN test cihazında ve ASTM E8/ISO 6892-1 standardı kullanılarak 0.5 mm/dakika hızla basma testine tabi tutuldu. ISO 1518 standardında tanımlanan kuru kaymalı aşınma test ekipmanı kullanılarak ekstrüzyon numuneleri üzerinde aşınma testi yapıldı. Karşı yüzey olarak AISI 52100 çelik bilye kullanıldı ve kuru kayma koşullarında kayma mesafesini 1000 m olarak ayarlandı. Ayrıca 100 mm/s kayma hızında 20N kuvvet uygulandı.

3 Sonuçlar ve tartışma

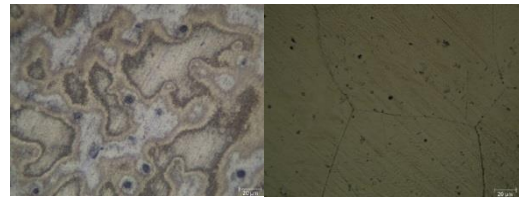
3.1 Mikroyapısal Karakterizasyon

Takviyesiz ZK60 numunelerinin X-ışını floresansı (XRF) ile tespit edilen imyasal bileşimi Tablo 2'de ve optik mikroskop görüntüleri Şekil 3'te sunulmaktadır, Şekil 3a: döküm sonrası, Şekil 3b: homojenizasyon sonrası ve Şekil 3c: ekstrüzyon sonrası. ZK60 numunelerinden %15 SiC ile güçlendirilmiş olanı ise Şekil 4'te Şekil 4a'da dökümden sonra, Şekil 4b'de homojenizasyondan sonra ve Şekil 4c'de ekstrüzyondan sonra görülmektedir. ZK60 numunelerinden %0.2 AlN ve %15 SiC ile güçlendirilmiş olanı ise Şekil 5, Şekil 5a'da sırasıyla döküm sonrası, Şekil 5b: homojenizasyon sonrası ve Şekil 5c: ekstrüzyon sonrası görülmektedir. Son olarak %0.5 AlN ve %15 SiC ile güçlendirilmiş ZK60 numunelerinin görüntüleri Şekil 6'da Şekil 6a: dökümden sonra, Şekil 6b: homojenizasyondan sonra ve Şekil 6c: ekstrüzyondan sonra sunulmaktadır.

Tablo 2. İncelenen ZK60 matrisin XRF ile tespit edilen kimyasal bileşimi.

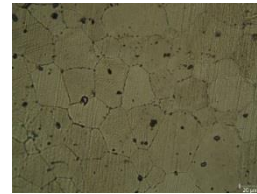
Table 2. Chemical composition of the examined ZK60 matrix detected by X-ray fluorescence (XRF).

Kimyasal Bileşim (%ağ.)			
Alaşım	Zn	Zr	Mg
ZK60	6.310	0.565	Kalan



a)

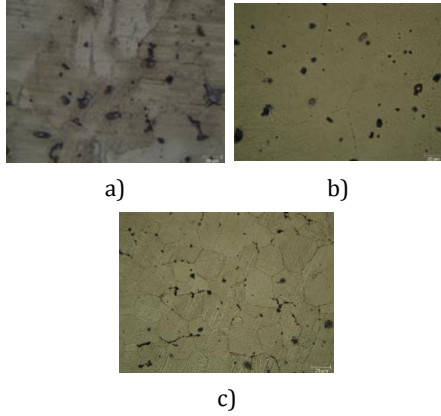
b)



c)

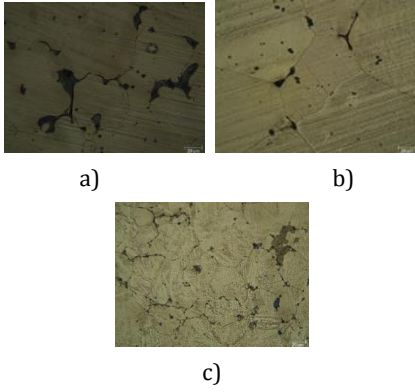
Şekil 3. ZK60: (a) 500X'te döküldükten sonra; homojenizasyondan sonra (b) 500 X'te; ekstrüzyondan sonra (c) 500 X'te. (X: büyütme oranı).

Figure 3. ZK60: (a) after casting at 500X; after homogenization (b) at ratio).500 X; after extrusion (c) at 500X. (X: magnification).



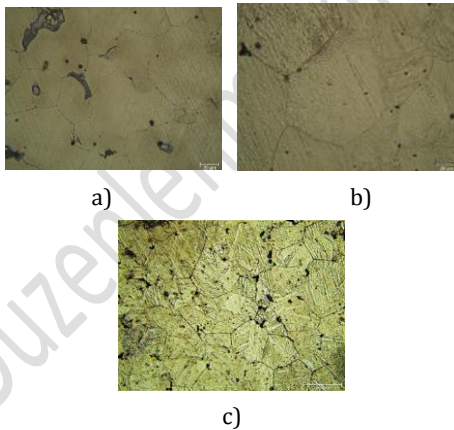
Şekil 4. ZK60 + %15 SiC: dökümden sonra (a) 500 X'te; homojenizasyondan sonra (b) 500 X'te; ekstrüzyondan sonra (c) 500 X'te.

Figure 4. ZK60 + 15% SiC: after casting (a) at 500 X; after homogenization (b) at 500 X; after extrusion (c) at 500X.



Şekil 5. ZK60 + %0.2AlN+%15 SiC: dökümden sonra (a) 500 X'te; homojenizasyondan sonra (b) 500 X'te; ekstrüzyondan sonra (c) 500 X'te.

Figure 5. ZK60 + 0.2%AlN+15% SiC: after casting (a) at 500 X; after homogenization (b) at 500 X; after extrusion (c) at 500X.



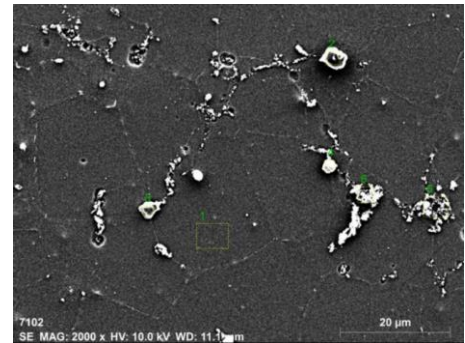
Şekil 6. ZK60 + %0.5AlN+%15 SiC dökümden sonra (a) 500 X'te; homojenizasyondan sonra (b) 500 X'te; ekstrüzyondan sonra (c) 500 X'te.

Figure 6. ZK60 + 0.5%AlN+15% SiC after casting (a) at 500 X; after homogenization (a) at 500 X; after extrusion (c) at 500 X.

Bir yazılım görüntü işleme programı ile, beş testin sonuçlarının ortalamasını alarak ASTM standardına (ASTM E112) uygun olarak tane boyutu hesaplandı. Takviyesiz ZK60 döküm numunelerinin ortalama tane boyutu 65 μm iken, %0.5 AlN + %15 SiC, %0.2 AlN + %15 SiC ve %15 SiC, takviyelerinin tane boyutları sırasıyla 48, 62 ve 60 μm 'dir. Bununla birlikte, takviyesiz ZK60'ın ortalama tane boyutu, ekstrüde edilmiş numuneler için 32 μm iken %0.5 AlN + %15 SiC, %0.2 AlN + %15 SiC ve %15 SiC ile güçlendirilmiş ZK60 için sırasıyla 23, 25 ve 28 μm 'dir. Siyah parçacıkların SiC olduğu düşünülmekte olup, SiC ve AlN eklendiğinde ekstrüde edilmemiş ZK60 alaşımındaki α -Mg tane boyutunun küçüldüğü görülmektedir. Ek olarak, dinamik yeniden kristalleşme nedeniyle sıcak ekstrüzyon işleminde numunelerin tamamında tane boyutunda gözle görülür bir düşüş ve tane sayısında bir artış olduğu gözlemlendi.

Kim ve Park [33] C-Mn çeliğinde, AlN çökmesinin önemli tane incelmeye yol açtığını beyan etmişlerdir. AlN ile Al ve/veya Mg-Al matris arasındaki uyumsuzluk derecesinin var olması [34] ve/veya AlN çökeltilerinin yüzey enerjilerinin düşük [35] olması AlN çökeltilerinin üzerinde özellikle Mg atomlarının heterojen olarak çekirdeklenme eğilimine yol açtığını bulmuşlardır. % 6'nın altında yapı uyumsuzluğu ve/veya düşük yüzey enerjisi matris ile kohezyon bağ yapısının güçlenmesine yol açtığı belirtilmiştir.

Şekil 7, %15SiC takviyeli ZK60 kompozitin 2kX büyütmede SEM görüntülerini ve EDX analizini göstermektedir. Ve Tablo 3, Şekil 7'de 1-6 ile işaretlenmiş seçilen bölgelerin temel spektrum tepkisini sunmaktadır. Tablo 3'de listelendiği gibi Şekil 7'deki 1. bölgede %8.45 Zn, %4.48 C, %87.15 Mg elementlerinin varlığı ana matrisi belirtir. Şekil 7'de 2 ile gösterilen bölge %13.22 C ve %36.19 Si içermektedir ve bu da kompozitteki SiC parçacıklarının yapısını kanıtlamaktadır. Ayrıca SiC partikülünün tane sınırlarında bir miktar Zr bulunmaktadır. %29.59 Si, %55.6 Mg ve %11.9 C elementlerinden oluşan spektrumla 3. bölge SiC parçacığını temsil eder ve benzer şekilde 4. bölge de SiC parçacığını temsil eder. 5. bölge MgZn intermetalik varlığını, 6. bölge ise az miktarda ince taneli SiC parçacıklarının varlığını gösterir. V tipi karıştırıcı kullanılarak yapılan toz karıştırma işleminde, bazı SiC parçacıkları karıştırıcıdaki çelik bilyalar tarafından doğal olarak inceltilmiştir.



Şekil 7. Ekstrüzyona tabi tutulmuş ZK60+%15SiC numunesinin SEM mikro yapıları ve 2kX büyütmede görüntü EDX analizi (EDX spektral analizi ile inceleme için 6 bölge gösterilmiştir).

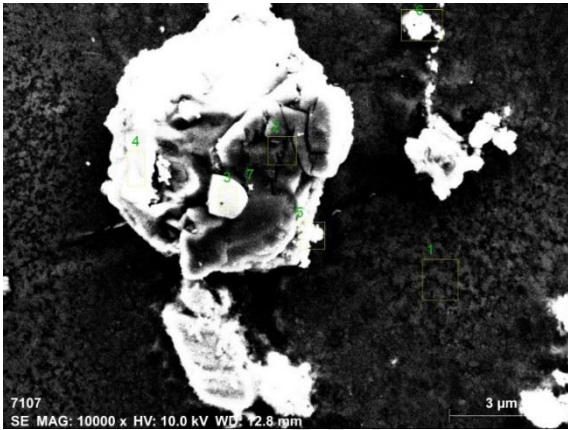
Figure 7. EDX analysis of microstructure of ZK60+15%SiC sample and image at 2kX (SEM) after extrusion, (6 regions are shown for examination by EDX spectral analysis).

Tablo 3. ZK60+15%SiC için, Şekil 8'deki bölgelerin spektral analiz sonuçları.

Table 3. For ZK60 plus 15%SiC, results of EDX for the zones in Fig. 8

Spektrum	Zn	Si	Mg	Zr	C
1	8.40	0.00	87.15	0.00	4.46
2	2.18	36.19	47.16	1.25	13.22
3	1.75	32.97	57.79	0.27	7.23
4	2.89	29.59	55.60	0.02	11.90
5	7.43	0.09	83.64	0.25	8.58
6	7.10	0.43	80.20	0.00	12.27
Ortalama	4.96	16.55	68.59	0.20	9.61

Bilyalı öğütme, seramik nano parçacıkları (AlN ve SiC) içeren ZK60 matris kompozitlerinin üretiminde toz karışımlarını inceltmek, uygun yüzeyler üretmek ve homojenleştirmek için kullanışlı bir tekniktir. SiC-AlN karışımlarının genişletilmiş bilyalı öğütülmesi katı çözelti oluşumunu destekler, mikro yapısal homojenliği artırır ve mekanik özellikleri iyileştirir [36].



Şekil 8. %15SiC+0.5AlN takviyeli ZK60'ın SEM görüntüleri ve 10kX büyütmede görüntü EDX analizi (EDX spektral analizi ile incelenmek üzere 7 bölge gösterilmiştir).

Figure 8. EDX analysis of microstructure of ZK60+15%SiC sample and image at 10kX (SEM) after extrusion, (7 regions are shown for examination by EDX spectral analysis).

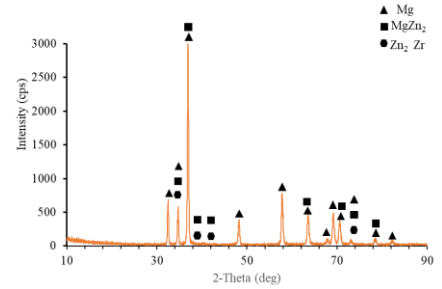
Tablo 4, ZK60 kompozit numunesinin Şekil 8'de gösterilen SEM görüntüsünde 1'den 7'ye kadar numaralandırılmış %15 SiC ve %0,5 AlN içeren bölgeleri için EDX spektrum analizi bulgularını sunmaktadır. Tablo 4'teki elementel tepki spektrumu analizi sonuçlarından görüldüğü gibi bölge 1 ana matris malzemesidir ve az miktarda MgZn₂ intermetalik içerir. 2, 3 ve 7. bölgeler, 4. bölgedeki SiC parçacığına bağlı AlN nano parçacık takviyelerinin varlığını kanıtlamaktadır. 5. bölge ise ana matris ile SiC parçacığı ve AlN nano parçacığının sınırını temsil etmektedir. Bölge 6, ana matris ve az miktarda ince SiC ve AlN parçacıklarıdır.

Tablo 4. ZK60+%15SiC+0.5AlN için Şekil 4a'daki bölgelerin spektral analiz bulguları.

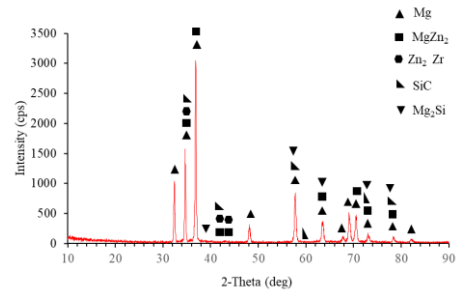
Table 4. For ZK60+15%SiC+0.5AlN, findings of spectral analysis of the zones in Figure 9

Spektrum	Mg	Al	Zn	Si	N	C
1	82.86	1.06	7.55	0.19	1.81	6.53
2	1.52	62.65	1.27	0.08	31.35	3.13
3	0.94	60.78	0.27	6.21	20.18	11.63
4	7.18	5.66	1.28	53.86	3.19	28.82
5	83.89	11.70	1.49	0.00	0.00	2.92
6	71.06	2.65	7.04	1.44	2.68	15.14
7	0.79	58.82	0.79	0.13	36.72	2.75
Ortalama	35.46	29.05	2.81	8.84	13.70	10.13

Şekil 9, takviyesiz ZK60 ve ZK60 + %0.2AlN + %15SiC kompoziti için XRD analizinin sonuçlarını göstermektedir. ZK60 alaşımı α-Mg ana matrisine ek olarak MgZn₂ ve Zn₂Zr intermetaliklerine (Şekil 9a) sahiptir. Ancak Şekil 9b'de ZK60 + %15 SiC + %0.2 AlN kompoziti için XRD sonuçları, α-Mg ana matrisi ve MgZn₂, Mg₂Si ve Zn₂Zr intermetalikleri ile SiC parçacığı ve AlN nano parçacığının fazlarını kanıtlamaktadır. Benzer kimyasal bileşime sahip ZK60 alaşımının ve AlN ile SiC takviyeli kompozitlerinin korozyon davranışını inceleyen Sager ve arkadaşları [30], AlN ilaveleri ağırlıkça %0.2'den ağırlıkça %0.5'e çıktığında ZK60+%15SiC + 0,5AlN kompozitinin XRD sonuçlarında 35°, 59° ve 70° açılarda yeni piklerin belirlendiğini rapor etmişlerdir.



a)



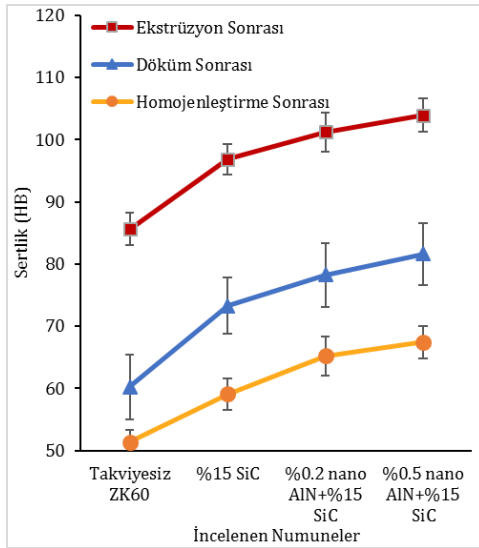
b)

Şekil 9 (a) Takviyesiz ZK60 alaşımının ve (b) ZK60 + %0.2AlN + %15SiC kompozitinin XRD desenleri [30].

Figure 9 XRD patterns of (a) unreinforced ZK60 alloy and (b) ZK60 + %0.2AlN + %15SiC composite [30].

3.2 Sertlik testi Sonuçları

Şekil 10'da dökülmüş, ekstrüzyona tabi tutulmuş ve SiC ve AlN ile güçlendirilmiş ZK60 numuneleri için Brinell sertlik testinin sonuçları sunulmaktadır. Buna karşılık, ZK60'ın döküm halindeki sertlik testi sonuçları ZK60 + %15SiC için 60.23, 73.33, %0.5AlN + %15SiC için 81.61 ve %0.5AlN + %15SiC takviyeleri için 78.29 HB'dir. Ekstrüzyon sonrasında takviyesiz ZK60'ın 85.65 HB olan sertlik değeri, daha sonra yapılan sertlik ölçümlerine göre %15SiC ile güçlendirilerek 96.86 HB'ye, yüzde 0.2 AlN ile güçlendirilerek 101.23 HB'ye, yüzde 0.5 AlN ile güçlendirilerek 103.94 HB'ye yükseldi. Ekstrüzyonda numunelerin yüksek deformasyonu sonucu oluşan ince taneli yapı, numunelerin mekanik özelliklerini ve sertlik değerlerini de arttırmaktadır. Ayrıca ilave edilen donatı miktarı, donatı miktarıyla doğru orantılı olarak sertliği arttırmıştır. Yapıya daha sert parçacıkların eklenmesi, AlN parçacıklarının tane sınırlarında etkin çözünen madde ayrılması [37] ve ekstrüzyon deformasyon işlemiyle takviye parçacıklarının homojen dağılmasının [38] sertliğin artmasının nedenleri olduğu varsayılmaktadır.

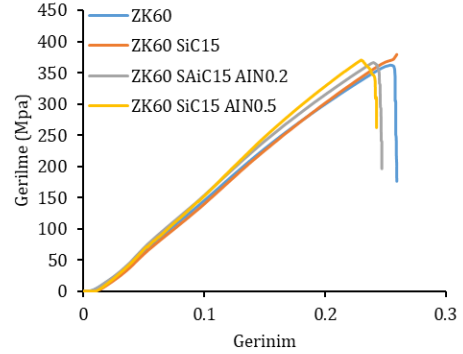


Şekil 10 Numunelerin Sertlik sonuçları.
Figure 10 Hardness results of the samples

3.3 Basma testi sonuçları

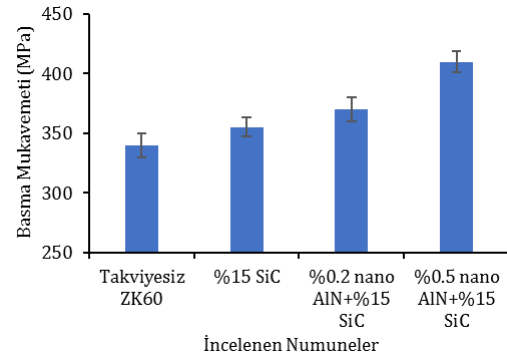
Takviyelerin numunenin mekanik davranışları üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla bütün numuneler için basma testleri yapıldı ve gerilme gerinim sonuçları Şekil 11'de sunulmaktadır. Maksimum kırılma gerilmelerine göre takviyesiz ZK60 ve güçlendirilmiş kompozitlere ait en az 5 çubuğun standart sapmasını belirten hata çubuklarıyla basma testi sonuçları Şekil 12'de verilmektedir. Takviyesiz ZK60'ın basma testi sonucu 340 MPa, Takviyeli SiC15'in takviyesi için 355 MPa'la, %0.2AlN + %15SiC takviyesi için ise 370 MPa'la yükseltildi. Son olarak %0.5AlN + %15SiC için 410 MPa'la yükseldi. Şekil 12'deki basma testi sonuçlarına göre ZK60'a eklenen takviyeler ile basma dayanımı artmıştır. %0.5 AlN + %15 SiC ile güçlendirilmiş ZK60'ın basınç dayanımındaki yüzde artış, takviyesiz ZK60'a göre %20.5'tir. Takviye parçacıklarının eklenmesi, parçacıklar ana matris boyunca eşit olarak dağıldığından ve daha tok bir yapıya sahip olduğundan mukavemette bir artışa neden olur. Kompozitlerin son özellikleri karıştırma işlemi ve parçacık boyutundan büyük

ölçüde etkilenir; artan SiC konsantrasyonu tipik olarak alüminyum bazlı kompozitlerde artan sertliğe ve basma mukavemetine yol açar [39, 40]. Moazami-Goudarzi ve Akhlaghi'ye göre [41], SiC nanopartikül katkılı kompozitin matrisine %1 Mg eklenmesi, daha iyi mekanik özelliklere sahip homojen bir karışımla sonuçlanmıştır. Ayrıca mikro yapıya eklenen parçacıkların dislokasyon yoğunluğunun artması da mukavemetin artmasında etkili olmaktadır. Ayrıca nano boyuttaki takviyeler yüksek dislokasyon yoğunluğuna sahip olup stres altında dislokasyonların deformasyon hareketini engellemektedir [42].



Şekil 11 Basma testi sonuçları.
Figure 11 Compression test results.

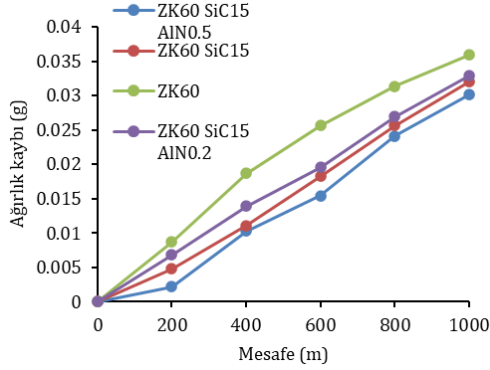
Güçlendirme mekanizmaları arasında Orowan güçlendirmesi, termal uyumsuzluk güçlendirmesi ve Hall-Petch güçlendirmesi bulunur ve parçacık dağılımı baskın mekanizmayı etkiler [43]. Nanopartiküllerin düzgün dağılımı, optimum güçlendirme etkileri için çok önemlidir [44]. SiC ve TiC gibi hibrit nanopartikül takviyesi, gelişmiş çekme dayanımı, mikro sertlik ve tane incelmeye yol açabilir [45]. Grafen nanopartiküllerinin eklenmesi de elastik modül, akma dayanımı, nihai çekme dayanımı ve Vickers sertliğinde iyileştirmelerle umut verici sonuçlar göstermiştir [46]. Alüminyum matrisli kompozitlerde, AlN nanopartikülleri üç boyutlu bir ağ yapısı oluşturarak mukavemeti önemli ölçüde iyileştirmiştir [47]. AA6351 alüminyum alaşımlı kompozitlerde, AlN partiküllerinin düzgün dağılımı, takviyesiz alaşıma kıyasla gelişmiş mekanik özelliklere yol açmıştır [48]. Giannopoulou ve ark. [29], AlN nano-partiküllerinin Mg matrisi boyunca düzgün dağılım gösterdiğini ve bunun sonucunda tane incelmeye, tane sınırlarının güçlendirilmesi ve dislokasyon hareketinin engellenmesi yoluyla gelişmiş mukavemete yol açtığını belirtmişlerdir.



Şekil 12. Maksimum basınç dayanımlarının karşılaştırılması.
Figure 12. Comparison of maximum compressive strengths.

3.4 Aşınma testi sonuçları

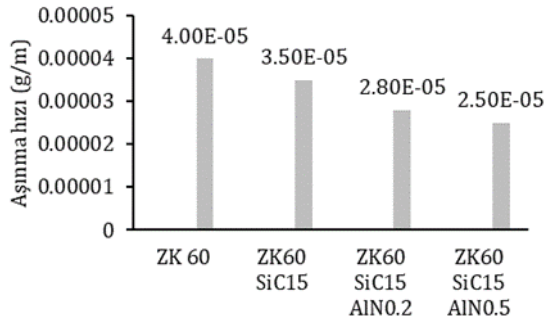
1000 m mesafe boyunca, 20 N yük ve 0.1 mm/s hızda ekstrüzyona tabi tutulan malzemeler üzerinde gerçekleştirilen karşılıklı aşınma testinin ardından numunelerin ağırlık kaybı ve kayma mesafesi Şekil 13'de gösterilmektedir. Aşınma oranları aşağıdaki terimlerle hesaplanır: Metre başına hacim kaybı. 1000 m kayma testi sonrasında ZK60'ın ağırlık kaybı 0.0359 gram olarak ölçülmüştür. ZK60 + %15SiC takviyeli kompozitin ağırlık kaybı 0.033, ZK60 + %0.2 AlN + %15SiC takviyeli kompozitin ağırlık kaybı 0.032, son olarak ZK60 + %0.5 AlN + %15SiC takviyeli kompozitin ağırlık kaybı ise 0.0301 gramdır. Böylece takviye elemanları ilave miktarına bağlı olarak aşınma direncini artırmıştır.



Şekil 13. Takviyesiz ZK60 ve takviyeli kompozitlerin kuru aşınma testi sonuçları.

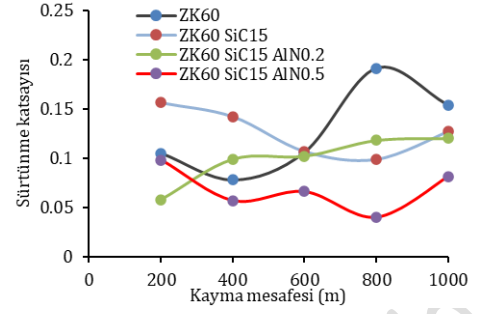
Figure 13. Results of dry wear test for ZK60 and reinforced composites

Şekil 13'den hesaplanan aşınma oranları (g/m) Şekil 14'de gösterilmektedir. 20 N yük altında ZK60 + %0.5 AlN + %15SiC, ZK60 + %0.2 AlN + %15SiC, ZK60 + %15SiC ve takviyesiz ZK60'ın aşınma oranları sırasıyla 2.5×10^{-5} , 2.8×10^{-5} , 3.5×10^{-5} ve 4×10^{-5} gram/metre olarak ölçülmüştür. Şekil 15'de sürtünme katsayısının kayma mesafesine bağlı değişiminin karşılaştırmaları sunulmaktadır. Numunelerin ortalama sürtünme katsayıları ZK60 + %0.5 AlN + %15SiC, ZK60 + %0.2 AlN + %15SiC, ZK60 + %15SiC kompozitleri ve takviyesiz ZK60 alaşımı için sırasıyla 0.068, 0.099, 0.126 ve 0.126'dır. Karma Al₂O₃/SiC nanopartikülü [49], karma çok duvarlı karbon nanotüpler/B4C partikül [50], TiC partikül [51] takviyeli sırasıyla seramik esaslı, ZK60 kalite Mg ve Al-12%Si alaşım matrisli kompozitlerde takviye oranının artması ile aşınma hızının azaldığını rapor etmişlerdir. Ayrıca sürtünme katsayısındaki dalgalanmanın sebebinin kayma mesafesi ile uniform olmayan yüzeyle karşılaşmaya bağlamışlardır [49-51].



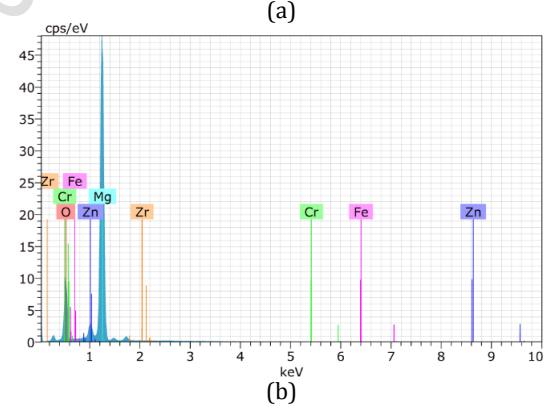
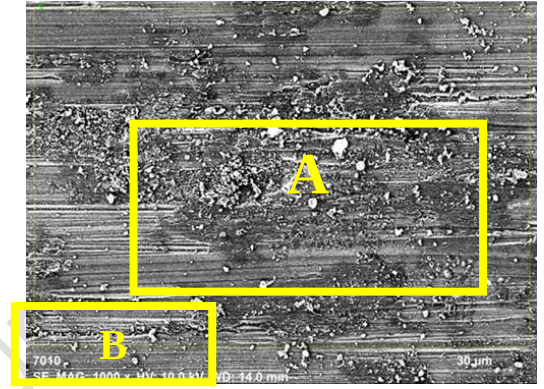
Şekil 14. Tüm kompozitlerin hesaplanan aşınma hızları (g/m).

Figure 14. For all composites, the results of wear rates of (g/m).



Şekil 15. Tüm numuneler için sürtünme katsayısının kayma mesafesine bağlı değişiminin karşılaştırılması.

Figure 15. Friction coefficient change depending on sliding distance.

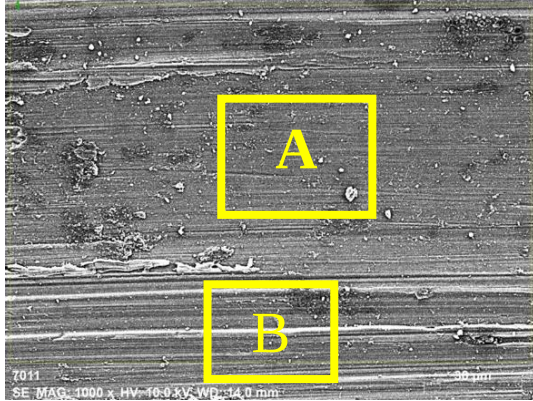


Şekil 16. Güçlendirilmemiş ZK60'ın aşınmış yüzeyi: (a) 1 kX'te SEM görüntüsü; (b) temel spektrum tepki grafiği.

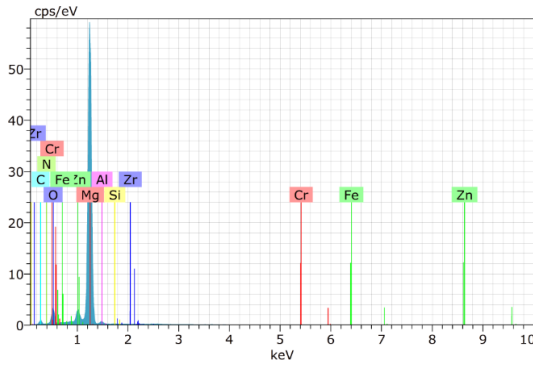
Figure 16. Worn surface of unreinforced ZK60: (a) SEM image at 1 kX; (b) baseline spectrum response plot.

Aşınmış numunelerin yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri Şekil 16a ve Şekil 17a'da gösterilmektedir. Şekil 16a ve 16b'de takviyesiz ekstrüzyon edilmiş ZK60'ın SEM ve genel elementel spektrum tepki grafiği verilmektedir. Şekil 17a'da ekstrüde edilmiş ZK60 + %0.5AlN + %15SiC alaşımının 1kX'teki SEM görüntüsü ve Şekil 17b de ise aşınmış yüzeyin elementel spektrumu sunulmuştur. SEM görüntülerinde adeziv ve abrazyon aşınma mekanizmaları Şekil 16a'da sırasıyla A ve B olarak etiketlenmiştir. Yapışma aşınma mekanizması (A) Al elementi ve karşı yüzeyden eser miktarda Fe ve Cr elementleri ve Tablo 5'te verilen diğer alaşım elementleri bakımından zenginleştirilmiştir. EDX sonuçlarına göre (Şekil 17a), yapışma aşınma mekanizması katmanının (A) Al elementi ve karşı yüzeyden eser miktarda Fe ve Cr elementleri ve Tablo 5'te verilen diğer alaşım elementleri açısından zenginleştiğini

göstermektedir. ZK60 alaşımının SEM görüntülerinde (Şekil 17a) ve güçlendirilmiş ZK60 + %0.5AlN + %15SiC kompozitinin sonucunda adeziv aşınmanın azaldığı görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 17. Güçlendirilmiş ZK60 + %0.5AlN + %15SiC'in aşınmış yüzeyi: (a) 1 kX'te SEM görüntüsü; (b) temel spektrum tepki grafiği.

Figure 17. Worn surface (a) SEM at 1 kX: (b) general spectrum for ZK60 + %0.5AlN + %15SiC

Tablo 5. Şekil 16a için genel EDX analizi sonuçları.

Table 5. Overall EDX analysis results for Figure 16a.

Element	Atomik bileşim [%]
Cr	0.02
Mg	64.73
Zr	0.03
Zn	2.66
Fe	0.01
O	32.55
Total	100.00

4 Sonuçlar

Üretilen %0.2-0.5 AlN nanopartikül ve %15 SiC partikül ile güçlendirilmiş ZK60 magnezyum alaşım kompozitlerinin mikroyapısı, sertliği, basma mukavemeti ve aşınma özelliklerine ilişkin aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir.

• ZK60 alaşımının döküm mikro yapısı kaba α -Mg'den oluşur. Döküm numuneleri için ZK60 + %0.5AlN + %15SiC, ZK60 + %0.2AlN + %15SiC, ZK60 + %15SiC ve takviyesiz ZK60'ın ortalama tane boyutlarının sırasıyla 48 μ m, 62 μ m, 60 μ m ve 65 μ m olduğu ve %0.5AlN ilavesi ile %26 tane incelmesi

görüldü. Ancak ekstrüzyona tabi tutulan numuneler ZK60 + %0.5AlN + %15SiC, ZK60 + %0.2AlN + %15SiC, ZK60 + %15SiC ve takviyesiz ZK60'ın ortalama tane boyutları sırasıyla 23 μ m, 25 μ m, 28 μ m ve 32 μ m olup en fazla tane incelmesi %28 ile ZK60 + %0.5AlN + %15SiC kompozitinde gözlenmiştir.

• Döküm ZK60 + %0.5AlN + %15SiC, ZK60 + %0.2AlN + %15SiC, ZK60 + %15SiC ve takviyesiz ZK60 için sertlik testi sonuçları sırasıyla 82, 78, 73 ve 60 HB'dir. Ekstrüzyon sonrası sertlik değerleri ZK60 + %0.5AlN + %15SiC, ZK60 + %0.2AlN + %15SiC, ZK60 + %15SiC ve takviyesiz ZK60 için 104, 101, 97 ve 86 HB olarak ölçülmüştür. Döküm ve Ekstrüzyon durumunda en yüksek sertlik değeri ZK60 + %0.5AlN + %15SiC kompozitinde elde edilmiş olup bu oran sırasıyla %37 ve %21'dir. Takviyesiz ZK60'ın basma testi sonucu 340 MPa olup, SiC15 takviyesiyle 355 MPa'la, SiC15 AlN0.2 takviyesiyle ise 370 MPa'la yükseltildi. Son olarak SiC15 AlN0.5 için 410 MPa'la %21 yükseldi.

• Ekstrüze edilmiş durumlarda ZK60 + %0.5AlN + %15SiC, ZK60 + %0.2AlN + %15SiC, ZK60 + %15SiC ve takviyesiz ZK60'ın aşınma hızları sırasıyla 2.5e-5, 2.8e-5, 3.5e-5, ve 4e-5 g/m olup kıyaslamalı olarak ZK60 + %0.5AlN + %15SiC kompozitin aşınma hızı %37 daha düşüktür.

5 Conclusions

The following conclusions can be drawn regarding the wear, compressive strength, microstructure and hardness properties of the produced ZK60 magnesium alloy composites reinforced with 0.5-0.2% AlN nanoparticles and 15% SiC particles.

• The casting microstructure of ZK60 alloy consists of coarse α -Mg. For the casting samples, the average grain sizes of ZK60 + 0.5% AlN + 15% SiC, ZK60 + 0.2% AlN + 15% SiC, ZK60 + 15% SiC and unreinforced ZK60 were 48 μ m, 62 μ m, 60 μ m and 65 μ m, respectively, and 26% grain refinement was observed with the addition of 0.5% AlN. However, the average grain sizes of the extruded samples ZK60 + %0.5AlN + %15SiC, ZK60 + %0.2AlN + %15SiC, ZK60 + %15SiC and unreinforced ZK60 are 23 μ m, 25 μ m, 28 μ m and 32 μ m, respectively, and the highest grain refinement of 28% was observed in the ZK60 + %0.5AlN + %15SiC composite.

• Hardness test results for cast ZK60 + %0.5AlN + %15SiC, ZK60 + %0.2AlN + %15SiC, ZK60 + %15SiC and unreinforced ZK60 are 82, 78, 73 and 60 HB, respectively. The hardness values after extrusion were measured as 104, 101, 97 and 86 HB for ZK60 + 0.5%AlN + 15%SiC, ZK60 + 0.2%AlN + 15%SiC, ZK60 + 15%SiC and unreinforced ZK60. The highest hardness value in the Cast and Extruded cases was obtained in the ZK60 + 0.5%AlN + 15%SiC composite, which was 37% and 21%, respectively. The compression test result of unreinforced ZK60 was 340 MPa, which was increased to 355 MPa with SiC15 reinforcement and 370 MPa with SiC15 AlN0.2 reinforcement. Finally, it increased by 21% with 410 MPa for SiC15 AlN0.5.

• In the extruded condition, the wear rates of ZK60 + 0.5%AlN + 15%SiC, ZK60 + 0.2%AlN + 15%SiC, ZK60 + 15%SiC and unreinforced ZK60 are 2.5e-5, 2.8e-5, 3.5e-5, and 4e-5 g/m, respectively, and comparatively, the wear rate of ZK60 + 0.5%AlN + 15%SiC composite is 37% lower.

6 Yazar katkı beyanı

Bu çalışmada Yazar 1, Yazar 3, Yazar 4 ve Yazar 5 araştırma, deneylerin yapılması ve taslak makalenin yazılmasında görev almışlardır. Yazar 2 fikrin oluşması, süpervizyon ve sonuçların yayına dönüştürülmesinde görev almışlardır.

7 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

8 Kaynaklar

- [1] Figueiredo, R.B. and Langdon, T.G. "Record Superplastic Ductility in a Magnesium Alloy Processed by Equal-Channel Angular Pressing". *Advanced Engineering Materials*, 10(1-2) 37-40 2008.
- [2] Huan, Z. et al. "In Vitro Degradation Behavior and Cytocompatibility of Mg-Zn-Zr Alloys". *Journal of Materials Science Materials in Medicine*, 21(9), 2623-2635 2010.
- [3] Wang, Q. et al. (2013). "In Vitro Corrosion and Cytocompatibility of ZK60 Magnesium Alloy Coated With Hydroxyapatite by a Simple Chemical Conversion Process for Orthopedic Applications". *International Journal of Molecular Sciences*, 14(12), 23614-23628 2013.
- [4] Xue, Y. et al. "Corrosion Performances of Micro-Arc Oxidation Coatings on Az31B, Az80 and Zk60 Cast Mg Alloys". *Progress in Canadian Mechanical Engineering*, York, Canada, May 18-20 2018
- [5] Chen, J. et al. "Effect of Heat Treatment on Mechanical and Biodegradable Properties of an Extruded ZK60 Alloy". *Bioactive Materials*, 2(1), 19-26 2017.
- [6] Lin, T. et al. "Improving mechanical properties of ZK60 magnesium alloy by cryogenic treatment before hot extrusion". *High Temperature Materials and Processes*, 39(1), 200-2008 2020.
- [7] Yu, K. et al. "Plastic Deformation Behavior of ZK60 Magnesium Alloy With Addition of Neodymium". *Journal of Central South University of Technology*, 15(4), 434-437 2008.
- [8] Torbati-Sarrafi, S.A. et al. "Orientation Imaging Microscopy and Microhardness in a ZK60 Magnesium Alloy Processed by High-Pressure Torsion". *Journal of Alloys and Compounds*, 12, 185-193 2017.
- [9] Zhan, L. et al. "Thermoelectric Coupling Deep Drawing Process of ZK60 Magnesium Alloys". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 126(7-8), 3005-3014 2023.
- [10] Liang, H. et al. "Homogenization Treatment and Heat Deformation Behavior of Cast ZK60 Magnesium Alloy". *Journal of Physics Conference Series*, 2459(1), 012308 2023.
- [11] Feng, X. et al. "Effects of Aging Process on the Damping Performance of ZK60 Magnesium Alloys Prepared by Large Strain Rolling". *Materials*, 13(23), 5574 2020.
- [12] Zhu, S. et al. "Dynamic Compression Behavior of ZK60 Magnesium Alloy Under Different Strain Rate". *Proceedings of the 5th International Conference on Civil Engineering and Transportation*, Paris, France 15 November 2015.
- [13] Chen, H. et al. "Effect of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Twin Roll Cast and Sequential Warm Rolled ZK60 Alloy Sheets". *Journal of Alloys and Compounds*, 476(1-2) 324-328 2009.
- [14] Qi, Z. et al. "Comparison of Degradation Behavior and the Associated Bone Response of ZK60 and PLLA in Vivo". *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 102(5), 1255-1263 2014.
- [15] Fu, Y. et al. "The Evaluation of a Degradable Magnesium Alloy Bio-Transfix Nail System Compounded With Bone Morphogenetic Protein-2 in a Beagle Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Model". *Journal of Biomaterials Applications*, 34(5), 687-698 2019.
- [16] Jin, W. and Zhou, Y. "Fabrication of Cu-Adhered Silicon Carbide Particles and Its Effect on Properties of Fe-Based Matrix Composites". *Materials Research Express*, 9(6), 066501 2022.
- [17] James, J. et al. "Comparative Study of Composites Reinforced With SiC and TiB₂". *Procedia Engineering*, 97, 1012-1017 2014.
- [18] Yang, Z. et al. "Effect of the Particle Size and Matrix Strength on Strengthening and Damage Process of the Particle Reinforced Metal Matrix Composites". *Materials*, 14(3) 675 2021.
- [19] Veličković, S. et al. "Tribological Characteristics of Al/SiC/Gr Hybrid Composites". *Matec Web of Conferences*, Zabore, Poland, 31 July 2018.
- [20] Dharmalingam, S. et al. "Analysis of Dry Sliding Friction and Wear Behavior of Aluminum-Alumina Composites Using Taguchi's Techniques". *Journal of Composite Materials*, 44(18)2161-2177
- [21] Abbass, M.K. et al. "Study of Corrosion Resistance of Aluminum Alloy 6061/SiC Composites in 3.5\% NaCl Solution". *International Journal of Materials Mechanics and Manufacturing*, 3(1), 31-35 2015.
- [22] Hu, Z. et al. "Study of Spark Plasma Sintered Nanostructured Ferritic Steel Alloy With Silicon Carbide Addition". *Materials Science and Engineering A*. 670, 75-80 2016.
- [23] Luo, L. "Modification of the Model for Calculating the Long SiC Fibre-Reinforced Metal Matrix Composites Transverse Strength and Study for Interfacial Influences". *Materials Research Express*, 10(9), 96507 2023.
- [24] Ravikumar, M.M. et al. "Investigations on Tensile Fractography and Wear Characteristics of Al7075-Al₂O₃-SiC Hybrid Metal Matrix Composites Routed Through Liquid Metallurgical Techniques". *Frattura Ed Integrità Strutturale*, 15(56), 160-170 2021.
- [25] Tatarko, P. et al. "Joining of CVD-SiC Coated and Uncoated Fibre Reinforced Ceramic Matrix Composites With Pre-Sintered Ti₃SiC₂ MAX Phase Using Spark Plasma Sintering". *Journal of the European Ceramic Society*, 36(16)3957-3967 2016.
- [26] Wang, M. et al. "Sintering and Mechanical Properties of (SiC + TiC_x)p/Fe Composites Synthesized From Ti₃AlC₂, SiC, and Fe Powders". *Materials*, 14(9), 2453 2021.

- [27] Ye, H.Z. et al. . "In Situ Synthesis of AlN in Mg–Al Alloys by Liquid Nitridation". *Journal of Materials Processing Technology*, 166(1), 79-85 2005.
- [28] Sun, K. et al. . "Dispersion and Preparation of Nano-AlN/Aa6061 Composites by Pressure Infiltration Method". *Nanomaterials*, 12(13), 2258 2022.
- [29] Giannopoulou, D. et al. "Influence of AlN Nanoparticle Addition on Microstructure and Mechanical Properties of Extruded Pure Magnesium and an Aluminum-Free Mg–Zn–Y Alloy". *Metals*, 9(6), 667 2019.
- [30] Sager, et al. "Characterization and corrosion behavior of composites reinforced with ZK60, AlN, and SiC particles". *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 41, 101389 2023.
- [31] Banijamali, S.M. et al. . "Effect of Ce Addition on the Tribological Behavior of ZK60 Mg-Alloy". *Metals and Materials International*, 27(8), 2732-2742 2021.
- [32] Zengin, H. et al. "Tensile and wear properties of as-cast and as-extruded ZK60 magnesium alloys containing minor Nd additions". *Materials Research Express*, 6(8), 86528 2019.
- [33] Kim, J. M. and Park, J. K. "On the AlN precipitation and grain refinement in the Al(N)-added medium C–Mn steels". *Philosophical Magazine Letters*, 97 (8), 320-327 2017.
- [34] Wang, Q. et al. "Effect of Preparation Parameter on Microstructure and Grain Refining Behavior of In Situ AlN–TiN–TiB₂/Al Composite Inoculants on Pure Aluminum". *Metals*, 7, 56 2017.
- [35] Liang, T. et al. "A first-principles study of the heterogeneous nucleation of Mg on AlN reinforcement particles". *Materialstoday Communications*, (34), 105277 2023.
- [36] Li, J.-F. et al. "Hot Isostatically Pressed SiC–AlN Powder Mixtures: Effect of Milling on Solid-Solution Formation and Related Properties". *J. Am. Ceram. Soc.*, 81 (6) 1445-1452
- [37] Stanford, N. et al. . "Solute segregation and texture modification in an extruded magnesium alloy containing gadolinium". *Scripta Materialia*, 65(10), 919-921 2011.
- [38] Caceres, C.H. et al. ."Grain size hardening in Mg and Mg–Zn solid solutions". *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science* 42(7), 1950-1959 2011.
- [39] Li, J. et al. "Rapid refinement of SiC particles by a novel milling process with balls of multiple size". *Journal of Materials Research and Technology*, 9 (4), 8667-8674 2020.
- [40] Sankhla, A. M. et al. "Effect of mixing method and particle size on hardness and compressive strength of aluminium based metal matrix composite prepared through powder metallurgy route". *Journal of Materials Research and Technology*, 18, 282-292 2022.
- [41] Moazami-Goudarzi M. and Akhlagh, F. "Effect of SiC Nanoparticles Content and Mg Addition on the Characteristics of Al/SiC Composite Powders Produced via In Situ Powder Metallurgy Method". *Particulate Science and Technology An International Journal*, 31 (3), 234–240 2013
- [42] Sandlöbes, S. et al. . "On the role of non-basal deformation mechanisms for the ductility of Mg and Mg–Y alloys". *Acta Materialia*, 59(2), 429-439 2011.
- [43] Guangjin, H. and Li, W. "Influence of nano particle distribution on the strengthening mechanisms of magnesium matrix composites". *Fuhe Cailiao Xuebao (Acta Materiae Compositae Sinica)* 30 (2), 105-110 2013.
- [44] Nie, K.B. et al. "Magnesium matrix composite reinforced by nanoparticles – A review". *Journal of Magnesium and Alloys* 9 (1), 57-77 2021.
- [45] Zhu, Z.-H. et al. "Synergistic effects of hybrid (SiC+TiC) nanoparticles and dynamic precipitates in the design of a high-strength magnesium matrix nanocomposite". *Materials Chemistry and Physics*, 259, 124048 2021.
- [46] Rashad, M. et al. "Development of magnesium-graphene nanoplatelets composite". *Journal of Composite Materials* 49 (3), 285-293 2014.
- [47] Ma, X. et al. "A Novel Al Matrix Composite Reinforced by Nano-AlNp Network". *Scientific Reports*, 6 (1), 34919 2016.
- [48] Mohanavel, V. et al. "Synthesis, characterization and properties of stir cast AA6351-aluminium nitride (AlN) composites" *Journal of Materials Research* 31, 3824–3831 2016.
- [49] Rodríguez, J. et al. "Sliding Wear of Alumina/Silicon Carbide Nanocomposites". *Journal of the American Ceramic Society*, 82 (8), 1959-2284 1999.
- [50] Behnamian, Y. et al. "Tribological behavior of ZK60 magnesium matrix composite reinforced by hybrid MWCNTs/B₄C prepared by stir casting method". *Tribology International*, 165, 107299 2022.
- [51] Yigezu, B.S. et al. "Effect of Sliding Distance, Applied Load, and Weight Percentage of Reinforcement on the Abrasive Wear Properties of In Situ Synthesized Al–12%Si/TiC Composites". *Tribology Transactions*, 56 (4), 546-554 2013.