

PAPER DETAILS

TITLE: Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen Al-MgO Kompozitlerin Özelliklerine Sinterleme
Sıcaklığının Etkisi

AUTHORS: Mikail ASLAN,Engin ERGÜL,Abdulaziz KAYA,Halil Ibrahim KURT,Necip Fazil YILMAZ

PAGES: 1131-1139

ORIGINAL PDF URL: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/1120279>



Makale / Research Paper

Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen Al-MgO Kompozitlerin Özelliklerine Sinterleme Sıcaklığının Etkisi

Mikail ASLAN^{1a}, Engin ERGÜL^{2b}, Abdulaziz KAYA^{1c}, Halil İbrahim KURT^{1d}, Necip Fazıl YILMAZ^{3e}

¹Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Gaziantep Üniversitesi, Gaziantep, Türkiye

²İzmir Meslek Yüksekokulu, Dokuz Eylül Üniversitesi, 35380, İzmir, Türkiye

³Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Gaziantep Üniversitesi, 27310, Gaziantep, Türkiye
*hiakurt@gmail.com

Received/Geliş: 26.05.2020

Accepted/Kabul: 01.07.2020

Öz: Bu çalışmada, Al-MgO kompozitler toz metalurjisi yöntemiyle üretilmiştir. Kompozitlerde MgO güçlendirici olarak ağırlıkça %10 oranında ilave edilmiş olup güçlendiricinin ortalama çapı <40 nm boyutundadır. Kompozitler, karıştırma, sıkıştırma ve 5 saat sinterleme süresi ile farklı sinterleme sıcaklıklarına (500 °C – 550 °C – 600 °C) tabi tutulmuşlardır. Kompozitlerin mikroyapıları optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) aracılığıyla incelenmiştir. Kompozitlerin teorik yoğunlukları karışım kanununa göre ve ölçülen yoğunlukları Arşimed prensibine göre araştırılmıştır. Teorik yoğunluk değerleri ve ölçülen yoğunluk değerleri kullanılarak ürünlerin porozite içeriği belirlenmiştir. Ayrıca kompozitlere sertlik testi uygulanarak mekanik özellikleri araştırılmıştır. MgO nano partikül ilavesi, alüminyum matrisinin sertliğini önemli derecede arttırmıştır. Maksimum sertlik değeri Al-MgO kompozitte 104 HB olarak ölçülmüştür. Tane büyümesinin, sertlikte liner büyümeyi engellediği görülmüştür. Artan sıcaklıkla kompozitlerde tane büyümesi meydana gelmekte, porozite içeriği azalmakta ve sertlikte farklı değerler elde edilmektedir. Maksimum relatif yoğunluk 600 °C sinterleme sıcaklığı ile elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Al; kompozit; MgO; toz metalurjisi.

Effect of Sintering Temperature on the Properties of Al-MgO Composites Fabricated by Powder Metallurgy Method

Abstract: In this study, Al - MgO composites were produced by powder metallurgy method. In composites, MgO was added as a reinforcement at a rate of 10% by weight, and the average diameter of the reinforcement was <40 nm. The composites are subjected to mixing, compression and sintering time of 5 hours with different sintering temperatures (500 °C – 550 °C – 600 °C). Microstructures of composites were examined by optical microscope and scanning electron microscope (SEM). The theoretical densities of the composites were investigated according to the mixture law and the measured densities according to the Archimedes principle. Porosity content of the composites was determined using theoretical density values and measured density values. The mechanical property of composites was investigated by applying hardness test. Hardness of Al matrix improved dramatically with addition of MgO nano-particles. The maximum hardness value was obtained in Al-MgO composite as 104 HB. Grain growth has been shown to inhibit liner growth in hardness. Grain growth occurs in composites with increasing temperature, porosity content decreases and different values are obtained in hardness. The maximum relative density was obtained with sintering temperature of 600 °C.

Keywords: Al; Composites; MgO; Powder metallurgy

1. Giriş

Kompozit malzemeler, başka şekilde elde edilemeyen özelliklerin bir kombinasyonunu elde etmek için iki veya daha fazla malzeme veya fazın birlikte kullanılmasıyla üretilmektedir. Farklı

Bu makaleye atıf yapmak için

Aslan, M., Ergül, E., Kaya, A., Kurt, H.,ılmaz, N., F., "Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen Al-MgO Kompozitlerin Özelliklerine Sinterleme Sıcaklığının Etkisi" El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi 2020, 7(3); 1131-1139.

How to cite this article

Aslan, M., Ergül, E., Kaya, A., Kurt, H.,ılmaz, N., F., "Effect of Sintering Temperature on the Properties of Al-MgO Composites Fabricated by Powder Metallurgy Method" El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2020, 7(3); 1131-1139.

ORCID: ^a 0000-0003-0578-5049, ^b 0000-0003-3347-5400, ^c 0000-0001-8767-1998, ^d 0000-0002-5992-8853 ^e 0000-0002-0166-9799

malzemeler kullanılarak yüksek sertlik, dayanım, minimum hafiflik, yüksek sıcaklık performansı, korozyon direnci veya iletkenlik kombinasyonları verecek şekilde kompozit malzemeler üretilebilirler. Kompozitler, ayrıca farklı malzemelerin uyum içinde nasıl çalışabileceğini de vurgulamaktadır. Makro ölçekte kompozit olan bir malzeme örneği çelik betonarmedir. Mikro ölçekte olan kompozitler arasında karbon veya cam elyaf takviyeli plastikler gibi malzemeler bulunur [1]. Birçok kompozit malzeme sadece iki fazdan oluşur; bunlardan biri sürekli olan ve genellikle dağınık faz olarak adlandırılan diğer fazı çevreleyen matristir. Kompozitler, ilave fazların veya güçlendiricilerin özelliklerine, nispi miktarlarına ve fazın morfolojisine bağlı olarak değişik karakteristikler gösterirler [2]. Güçlendirici faz lif, partikül veya diğer çeşitli geometriler halinde olabilirler. Matris fazı ve güçlendirici faz genellikle birbirleri içerisinde çözünmezler, ancak yüksek mekanik özellikler elde etmek için arayüzlerinde güçlü bir uyumluluk olması gerekir [3]. Kompozitler, matris türüne göre seramik matrisli (CMCs), polimer matrisli (PMCs) ve metal matrisli kompozitler (MMCs) olmak üzere üç sınıfa ayrılırlar. Metal matrisli kompozitler, bir metal matris ile bir güçlendirici fazdan oluşur. Matris malzemesi genellikle yumuşak ve düşük mukavemetli olurken, güçlendirici faz sert ve daha yüksek mekanik özellik sergiler. Saf metallere kıyasla, MMC'ler daha yüksek spesifik mukavemet, sertlik, daha yüksek çalışma sıcaklığı ve aşınmaya karşı daha yüksek direnç gösterirler [4-14]. Bu malzemelerin polimer-matrisli kompozitlere göre avantajlarından bazıları, daha yüksek çalışma sıcaklıkları ve organik sıvılar tarafından bozulmaya karşı daha fazla direnç içermeleridir[15]. Bu tür kompozitlerin ideal özelliklere sahip olabilmesi için matris türü, güçlendirici türü, uygun üretim yöntemi, güçlendirici oranı, boyutu ve homojen dağılımı ile iyi ara-yüzey özellikleri elde edilebilmelidir. MMC'yi üretmek için kullanılan yöntemlerin başında vorteks, toz metalurjisi, sızma (infiltrasyon), döküm vb. gibi bir dizi üretim yöntemi gelmektedir [16-20].

Alüminyum ve alaşımları MMC'lerin üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun nedeni alüminyum esaslı MMC'lerin hafif, ekonomik açıdan uygun, çeşitli işleme teknikleriyle üretime uygun ve yüksek mukavemet ve iyi korozyon direncine sahip olmasıdır. Alüminyum metal matris kompozitlerde kullanılan bazı önemli takviye malzemeleri parçacıklı, whisker veya elyaf formunda olan karbon / grafit, silisyum karbür, alümina, zirkonya ve zirkondur [21-25]. Sadece ağırlıkça % 2,0 nano boyutlu SiC parçacıkları ile A356 alaşımının akma mukavemetinde % 50'den fazla iyileşme gözlenmiştir [26]. Zhao ve arkadaşları [27], alüminyum matris nano-kompozitlerin özelliklerini ve deformasyon davranışını incelemişlerdir. Nano-kompozitlerin uzama, çekme ve akma mukavemetinin, mikro boyutlu parçacıklarla güçlendirilen kompozitlere göre daha yüksek oranda arttığını bildirmişlerdir. Al-Cu alaşımı ile karşılaştırıldığında, Pr_xO_y and La_xO_y ilave edilmiş numunenin çekme mukavemeti ve sünekliği sırasıyla % 24,3 ve % 42,5 artmıştır. Hem mukavemet hem de süneklikteki iyileşme daha ince tane yapısına, dendritlere, daha homojen bir dağılıma, çökeltileri ve intermetalik bileşiklere bağlandığı ifade edilmiştir [28]. Hibrid Al-SiC-Gr kompozitler, Al-SiC kompozitlere göre sertlik, çekme mukavemeti ve aşınma direnci gibi üstün mekanik özelliklere sahip olduğu daha üstün olduğu bildirilmiştir [29].

MgO (magnezyum oksit), iyi ıslatılabilirlik, yüksek sertlik, korozyona karşı yüksek direnç, yüksek basma mukavemeti ve geri dönüştürülebilir özelliklerine sahip, doğada bol miktarda bulunan hafiftir bir bileşiktir ve çok çeşitli uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [30, 31]. MgO gibi güçlendirici parçacıklar, yüksek mekanik özellikleri nedeniyle geleneksel alüminyum esaslı kompozitler için potansiyel bir alternatif olarak kullanılmaktadır [32]. Bu çalışmada, MgO nano partikül ilave edilmiş alüminyum matrisli kompozitler toz metalurjisi yöntemiyle üretilmiş ve kompozitlerin mikroyapı ve mekanik özelliklerine sinterleme sıcaklığının etkisi araştırılmıştır.

2. Malzeme ve Yöntem

Al-MgO kompozitleri üretmek için, matris malzemesi olarak %99,80 saflıkta alüminyum (40-60 μm) ve takviye olarak MgO nano parçacıklar (<40 nm) kullanılarak kompozitler toz metalurjisi

yöntemiyle üretilmişlerdir. Alüminyum tozu ve magnezyum oksit nano-partikülleri (Nanografi A.Ş.) firmasından tedarik edilmiştir.

Takviye (%10) ve matris tozlarını tarttıktan sonra, tozlar bir beherin içine konulmuş ve karıştırma işlemi, 30 dakika boyunca etanol içerisinde manyetik bir karıştırıcı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen süspansiyon oda sıcaklığında etanolün uzaklaşması için yeterli süre bekletilerek toz karışımı tamamen kurutulmuştur. Toz karışımı, 30 mm çapındaki silindirik kalıpta 190 MPa presleme basıncında tek yönlü olarak preslenmiştir. Preslenen numuneler farklı sıcaklıklarda (500, 550 ve 600°C) hava atmosferinde 5 saat boyunca sinterlenmiştir. Numunelerin kütle yoğunluğu, Arşimet yöntemi ile ölçülmüştür.

$$\delta d = [\delta a / (\delta a - \delta w)] \quad (1)$$

Burada δd : Kompozitin ölçülen yoğunluğunu, δa : Kompozitin havadaki ağırlığını ve δw : Kompozitin sudaki ağırlığını göstermektedir.

Daha sonra teorik yoğunluk ve ölçülen yoğunluk değerleri kullanılarak porozite içeriği araştırılmıştır.

$$\%P = ((\delta t / \delta d) - 1) * 100 \quad (2)$$

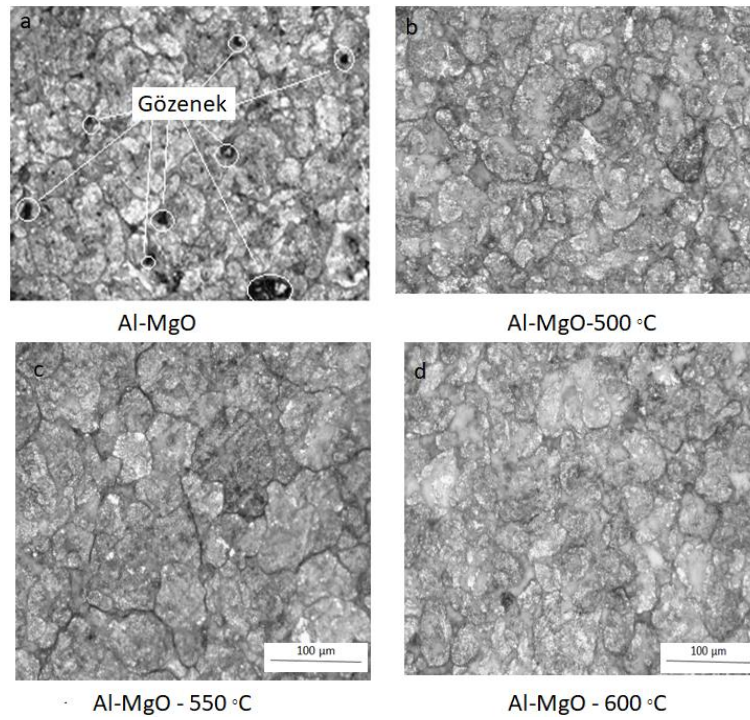
Burada P: Porozite içeriğini, δd : Kompozitin ölçülen yoğunluğunu, δt : Kompozitin teorik yoğunluğunu göstermektedir.

Sinterlenen numunelerdeki mikroyapı ve faz dağılımı, optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelemiştir. Sertlik ölçümleri Rockwell skalası kullanılarak ölçülmüştür ve sonuçlar Brinell skalasına çevrilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

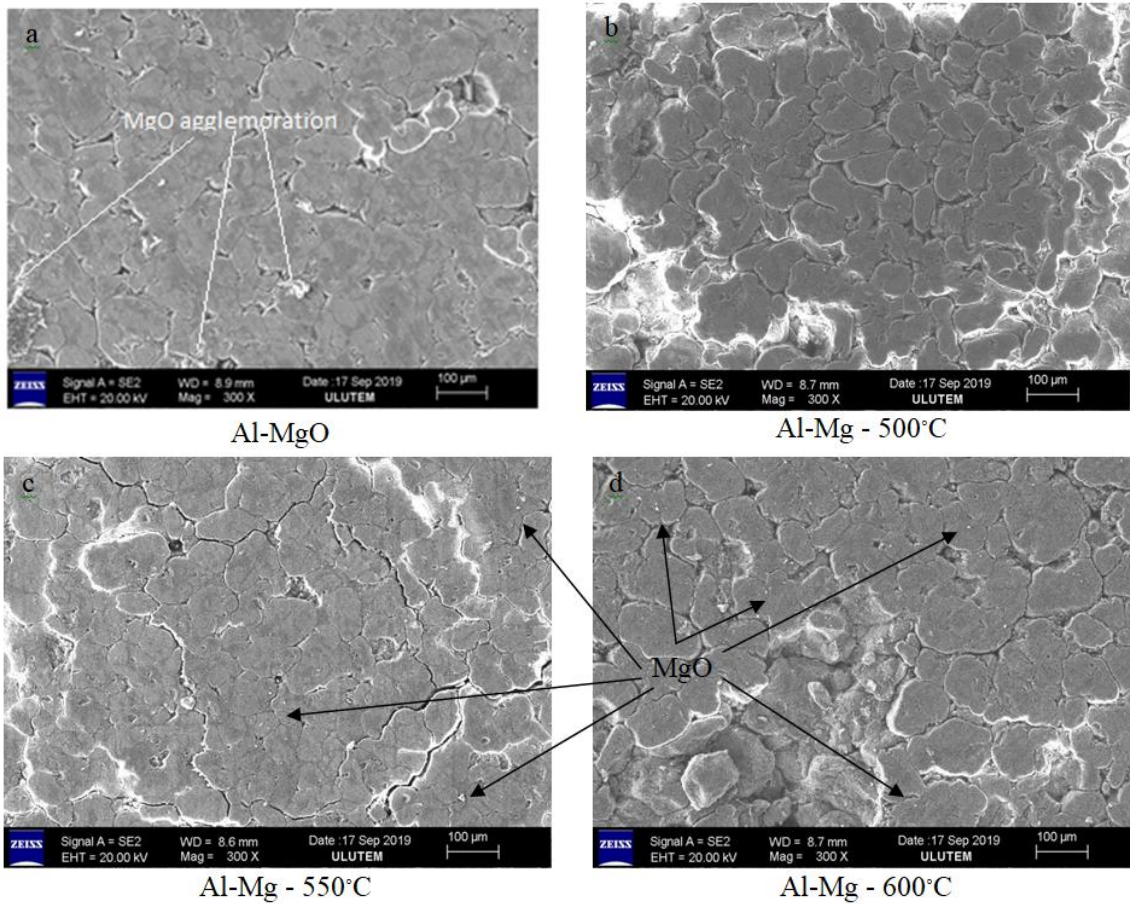
Ağırlıkça %10 MgO nano parçacığı içeren kompozitin mikroyapısına sinterleme sıcaklığının etkisi Şekil 1'deki optik mikroskop görüntülerinde verilmiştir. Üretilen kompozitler, toz metalürji yöntemiyle üretildiğinden dolayı oluşan gözenek oranı fazladır. Malzemenin mekanik özellikleri oluşan gözeneklerden etkilendiğinden dolayı önemlidir [33]. Sinterlenme sıcaklığı uygulanmadan üretilen malzemedeki gözenek sayısı Şekil 3' de gösterildiği gibi oldukça fazladır. Gözenek oranının fazla olmasının nedeni, MgO nanoparçacıklar ile Al tozları arasındaki farklı fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerdir [34]. Seramik MgO parçacıkları yüksek gözenekliliğe sebep olan parçacıkların düzenlenmesine, deformasyonuna ve difüzyonuna engel teşkil eder fakat bilinen bir gerçektir ki takviye edilen malzemenin boyutunun azaltılması genellikle malzemenin gözenek oranının azaltılmasına yardımcı olur. Sinterleme sıcaklığı olarak Al parçacıklarının erime noktasına yakın sıcaklıkları (500, 550 ve 600 °C) seçerek malzemenin gözenek oranının etkili bir şekilde azaltılmasını sağlamaya çalışılmıştır. Ayrıca, Şekil 1 (a-d) görüldüğü gibi sinterleme sıcaklığının artmasıyla kompozitin tane boyutunun arttığı görülmektedir.

Kompozitlerin mikroyapısal analizi SEM'de yapılmıştır ve Şekil 2'de farklı sinterleme sıcaklıklarında, SEM görüntüleri verilmiştir. Sinterleme süresince yüzeyde bulunan MgO nanoparçacıkları malzemenin içerisine doğru yayılım göstermektedir. Bunun sonucu olarak MgO nano parçacıkları özellikle yüzeyde homojen olarak dağılmamaktadır. Bunun nedeni MgO nano parçacıklarının yüzey/hacim oranının ve yoğunluğunun Al mikro parçacıklarından büyük olmasından dolayı kaynaklanabilir. Spesifik yüzey alanındaki artış parçacıklar arasındaki sürtünmeyi artırarak parçacıkların homojen olarak dağılmasını engellemektedir [35-37].



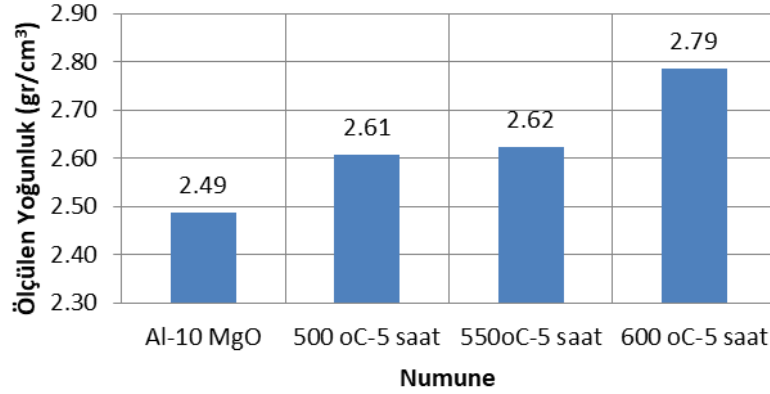
Şekil 3. Al-MgO kompozitinin 5 saat süreyle değişik sıcaklıklardaki sinterleme sonucu mikro yapıları a) Al-MgO, b) Al-MgO - 500°C, c) Al-MgO - 550°C, d) Al-MgO - 600°C

Şekil 2’de görüldüğü gibi ayrıca MgO parçacıklarının kümelenmesine veya topaklanmasına sebep olmaktadır.

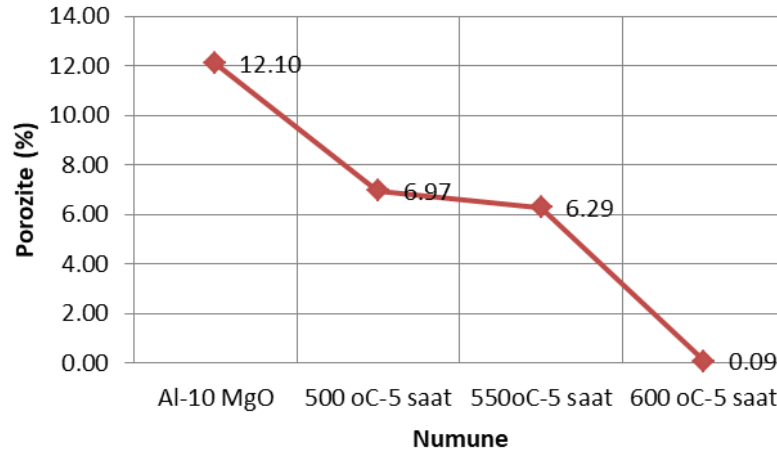


Şekil 2. Al-MgO kompozitinin 5 saat süreyle değişik sıcaklıklardaki sinterleme sonucu SEM yapıları a) Al-MgO, b) Al-MgO - 500°C, c) Al-MgO - 550°C, d) Al-MgO - 600°C

Sinterlenme sıcaklığının yoğunluk ve poroziteye etkisi Şekil 3-5'te verilmektedir. Beklenildiği gibi sinterleme sıcaklığının artmasıyla yoğunluk artmakta ve gözeneklilik oranı azalmaktadır. Sinterleme sıcaklığı atomik difüzyon hızını artırarak kompozitin ıslanabilirliği ve sinterleme yeteneğini artırmaktadır [34, 38, 39]. Bunun sonucu olarak kompozitteki gözenek oranları azalmıştır. Kompozitin yoğunluğundaki en küçük artış oranı 550 °C'den 600 °C ye geçişte görülmüştür (Şekil 3). Sinterleme sıcaklığının artması gözenek yüzde oranlarının azalmasına sebep olması yoğunluğun doğrudan gözenek sayısı ile ilişkili olduğu sonucuna varılmıştır. Porozite içeriğindeki en düşük azalma 500 den 550 °C ye geçişte görüldü (Şekil 4). Malzemenin gözenek oranını en aza indirmek için 5 saat sinterleme süresinde 600 °C sinterleme sıcaklığı olduğu görülmüştür. Ayrıca, relatif yoğunluk değerleri hesaplanmış ve Şekil 5'de verilmiştir. Maksimum relatif yoğunluk 600 °C'de elde edilmiştir ki, bu minimum porozite içeriği demektir.

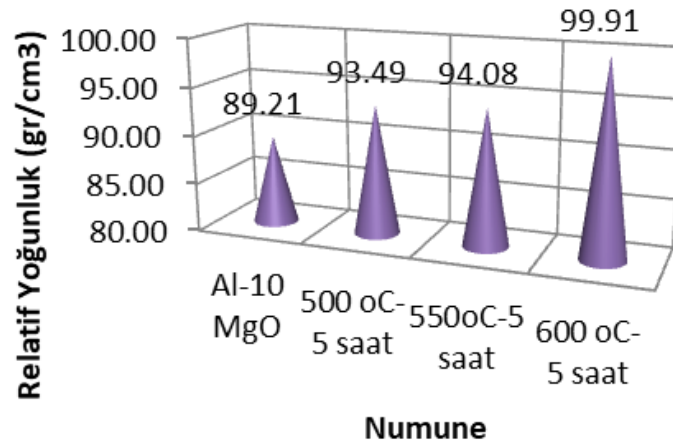


Şekil 3. Al-MgO kompoziti ile 5 saat süreyle değişik sıcaklıklardaki sinterleme sonucu yoğunluk değişimi



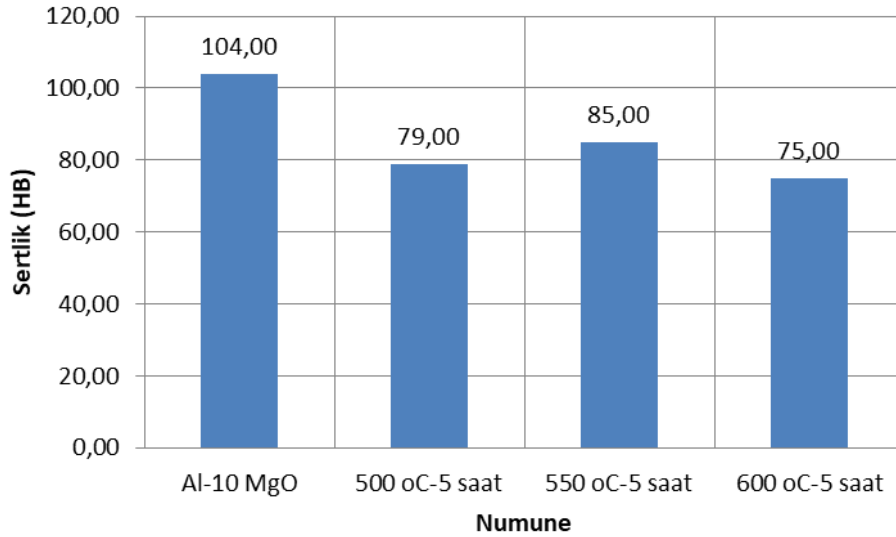
Şekil 4. Al-MgO kompoziti ile sinterleme sıcaklığının gözenekliliğe etkisi.

Üretilen kompozitlerin sertlik değeri üzerine sinterleme sıcaklığının etkisi Şekil 8' de değerlendirilmiştir. Toz metalürjisi yöntemiyle üretilen alüminyumun sertliği yaklaşık olarak 30 HB değeridir [33]. %10 MgO ilavesi ile üretilen kompozitin sertliğinde belirgin bir artış görülmüştür. Sinterleme işlemiyle gözenek oranının azalmasına rağmen sertlik değeri aynı şekilde liner olarak gelişmemiştir. Al matriksin sertliğini artırıcı MgO nano parçacıklarının yüzeyde daha önce belirtilen sebeplerden dolayı azalmasından ve yüzeyde mevcut olan MgO nano parçacıklarının homojen dağılmamasından dolayı malzemenin sertliği sinterleme işlemiyle artmamaktadır. Bazı bölgelerde özellikle tane sınırları üzerinde görülen topaklanmalar sinterleme süresince tane sınırları arasında zayıf bağlara sebep olduğundan istenilen mekanik özellikler elde edilmemiştir.



Şekil 5. Al-MgO kompoziti ile sinterleme sıcaklığının relatif yoğunluğa etkisi.

Nitekin verilen sinterleme sıcaklıkları içerisinde en yüksek sertlik değeri 550 °C’de sıcaklıkta elde edilmiştir. Sinterleme sıcaklığıyla birlikte meydana gelen tane büyümesi sertliğin artmasına engel olarak düşünülmektedir. Benzer sonuçlar literatürde de görülmektedir [40].



Şekil 6. Al-MgO kompozitinde sinterleme sıcaklığının relatif yoğunluğa etkisi

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, karıştırma, sıkıştırma ve sinterleme işlemlerinden oluşan geleneksel toz metalurjisi tekniği uygulanarak Al-MgO kompozitler üretilmiştir. Takviye edici olarak MgO nanoparçacığı (ortalama çapı <40 nm) ağırlıkça %10 oranında alüminyum matrisine ilave edilmiştir. Kompozitlerin mikroyapıları optik mikroskop ve SEM analizleri ile, fiziksel özellikleri yoğunluk ve porozite ile mekanik özellikleri sertlik testi ile incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir:

- Sinterlemeden önce üretilen kompozitte gözenek sayısı fazladır. Gözenek sayısının fazla olması MgO nanoparçacıkları ile Al tozları arasındaki ergime noktası ve basınç dayanımının çok farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Seramik MgO parçacıkları yüksek gözenekliliğe sebep olan parçacıkların düzenlenmesine, deformasyonuna ve difüzyonuna engel teşkil etmektedir.

- MgO nanoparçacıkları homojen olarak dağılmamaktadır. Bunun nedeni MgO nanoparçacıklarının yüzey/hacim oranının ve yoğunluğunun Al mikro parçacıklarından büyük olmasıdır ve bu, homejen dağılımı engellemektedir.
- Beklenildiği gibi sinterleme sıcaklığının artmasıyla yoğunluk artmakta ve porozite oranı azaltılmaktadır.
- MgO nano partikülün alüminyumun sertliğini arttırmıştır. Farklı sinterleme sıcaklıkları arasında en yüksek sertlik değeri 550 °C'de sinterlenen numunede 85 HB olarak elde edilmektedir. Düşük sertlik değeri tane büyümesine ve sert seramik MgO nanopartikülün alüminyumun difüzyonunu engellemesine dayandırılmaktadır.

Teşekkür

10-12 Ekim 2019 tarihlerinde Gaziantep Üniversitesi'nde düzenlenen konferansta sunulan çalışmamın seçimi için TICMET19 organizasyon komitesine teşekkürlerimi sunmak istiyorum.

Referanslar

- [1]. Callister Jr, W.D. and D.G. Rethwisch, Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach. 2012: John Wiley & Sons.
- [2]. Callister, W. and D. Rethwisch, The structure of crystalline solids. Materials science and engineering: an introduction. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2007: p. 38-79.
- [3]. Groover, M.P., Fundamentals of modern manufacturing: materials processes, and systems. 2007: John Wiley & Sons.
- [4]. ALTUNPAK, Y. and H. AKBULUT, □-Al₂O₃ Kısa Fiber Takviyeli LM 13 Alüminyum Alaşımının Eğilme Dayanımına Yaşlandırma Isıl İşeminin Etkisi. El-Cezeri Journal of Science and Engineering. **6**(1): p. 175-180.
- [5]. Chawla, N. and Y.L. Shen, Mechanical behavior of particle reinforced metal matrix composites. Advanced engineering materials, 2001. **3**(6): p. 357-370.
- [6]. EKREM, M., Hekzagonal Bor Nitrür Nanoplate-Nano Ag/Epoksi Kompozitler: Üretimi, Mekanik ve Termal Özellikleri. El-Cezeri Journal of Science and Engineering. **6**(3): p. 585-593.
- [7]. Eltaher, M., et al., Effect of Al₂O₃ particles on mechanical and tribological properties of Al-Mg dual-matrix nanocomposites. Ceramics International, 2020. **46**(5): p. 5779-5787.
- [8]. Harish, P., et al., Characterization of Mechanical and Tribological Properties of Aluminium alloy based Hybrid Composites Reinforced with Cotton Shell Ash and Silicon Carbide. 2019.
- [9]. Kumar, V.M. and C. Venkatesh, A comprehensive review on material selection, processing, characterization and applications of aluminium metal matrix composites. Materials Research Express, 2019. **6**(7): p. 072001.
- [10]. Namdeo, D.S., G. Subhash, and V. Jagadale, An Experimental Study of Effect of Silicon Carbide on Mechanical Properties of Aluminium Based Composite, in Techno-Societal 2018. 2020, Springer. p. 823-830.
- [11]. Ozden, S., R. Ekici, and F. Nair, Investigation of impact behaviour of aluminium based SiC particle reinforced metal-matrix composites. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2007. **38**(2): p. 484-494.
- [12]. Rajaravi, C. and P. Lakshminarayanan, Experimental and Finite Element Analysis of Fracture Toughness on Al/SiCp MMCs in Different Conditions. International Journal of Engineering and Management Research (IJEMR), 2015. **5**(6): p. 320-324.
- [13]. Reddy, A.P., P.V. Krishna, and R. Rao, Mechanical and Wear properties of aluminum-based nanocomposites fabricated through ultrasonic assisted stir casting. Journal of Testing and Evaluation, 2020. **48**(4).
- [14]. Song, Y., et al., Effect of carbon-fibre powder on friction and wear properties of copper-matrix composites. Materials Science and Technology, 2020. **36**(1): p. 92-99.

- [15]. Rosso, M., Ceramic and metal matrix composites: Routes and properties. *Journal of materials processing technology*, 2006. **175**(1-3): p. 364-375.
- [16]. Manu, K.S., et al., Liquid metal infiltration processing of metallic composites: a critical review. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2016. **47**(5): p. 2799-2819.
- [17]. Talaş, Ş. and G. Oruç, Characterization of TiC and TiB₂ reinforced Nickel Aluminide (NiAl) based metal matrix composites cast by in situ vacuum suction arc melting. *Vacuum*, 2020. **172**: p. 109066.
- [18]. Cuevas, A.C., et al., Metal matrix composites: wetting and infiltration. 2018: Springer.
- [19]. Hashim, J., L. Looney, and M. Hashmi, Metal matrix composites: production by the stir casting method. *Journal of materials processing technology*, 1999. **92**: p. 1-7.
- [20]. Evangelista, E. and S. Spigarelli, Constitutive equations for creep and plasticity of aluminum alloys produced by powder metallurgy and aluminum-based metal matrix composites. *Metallurgical and materials transactions A*, 2002. **33**(2): p. 373-381.
- [21]. Rajan, T., R. Pillai, and B. Pai, Reinforcement coatings and interfaces in aluminium metal matrix composites. *Journal of materials science*, 1998. **33**(14): p. 3491-3503.
- [22]. Abdizadeh, H. and M.A. Baghchesara, Investigation on mechanical properties and fracture behavior of A356 aluminum alloy based ZrO₂ particle reinforced metal-matrix composites. *Ceramics International*, 2013. **39**(2): p. 2045-2050.
- [23]. Dash, K., B.C. Ray, and D. Chandra, Synthesis and characterization of copper–alumina metal matrix composite by conventional and spark plasma sintering. *Journal of Alloys and compounds*, 2012. **516**: p. 78-84.
- [24]. Mohan, B., A. Rajadurai, and K. Satyanarayana, Electric discharge machining of Al–SiC metal matrix composites using rotary tube electrode. *Journal of materials processing technology*, 2004. **153**: p. 978-985.
- [25]. Shirvanimoghaddam, K., et al., Carbon fiber reinforced metal matrix composites: Fabrication processes and properties. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2017. **92**: p. 70-96.
- [26]. Yang, Y., J. Lan, and X. Li, Study on bulk aluminum matrix nano-composite fabricated by ultrasonic dispersion of nano-sized SiC particles in molten aluminum alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 2004. **380**(1-2): p. 378-383.
- [27]. Zhao, Y.-T., et al., In situ (Al₂O₃+ Al₃Zr) np/Al nanocomposites synthesized by magneto-chemical melt reaction. *Composites Science and Technology*, 2008. **68**(6): p. 1463-1470.
- [28]. Zhao, H., et al., High strength and good ductility of casting Al–Cu alloy modified by PrxOy and LaxOy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2011. **509**(5): p. L43-L46.
- [29]. Ravindran, P., et al., Investigation of microstructure and mechanical properties of aluminum hybrid nano-composites with the additions of solid lubricant. *Materials & Design*, 2013. **51**: p. 448-456.
- [30]. ME, N.K., H. Bhaskar, and T. Kiran, Characterization of Za-27 Alloy Reinforced with MgO Particles by Stir Casting Technique.
- [31]. Pilarska, A.A., Ł. Klapiszewski, and T. Jesionowski, Recent development in the synthesis, modification and application of Mg (OH) 2 and MgO: A review. *Powder Technology*, 2017. **319**: p. 373-407.
- [32]. Franco-Madrid, J., et al., Microstructural and Mechanical Behavior in the Al 2024 Alloy Modified With Addition of CeO 2. *Microscopy and Microanalysis*, 2017. **23**(S1): p. 1650-1651.
- [33]. Abdizadeh, H., R. Ebrahimifard, and M.A. Baghchesara, Investigation of microstructure and mechanical properties of nano MgO reinforced Al composites manufactured by stir casting and powder metallurgy methods: A comparative study. *Composites Part B: Engineering*, 2014. **56**: p. 217-221.
- [34]. Baghchesara, M.A., H. Abdizadeh, and H.R. Baharvandi. Effects of MgO nano particles on microstructural and mechanical properties of aluminum matrix composite prepared via

- powder metallurgy route. in *International Journal of Modern Physics: Conference Series*. 2012. World Scientific.
- [35]. Kemaloglu, S., G. Ozkoc, and A. Aytac, Properties of thermally conductive micro and nano size boron nitride reinforced silicon rubber composites. *Thermochimica Acta*, 2010. **499**(1–2): p. 40-47.
- [36]. Martone, A., et al., Reinforcement efficiency of multi-walled carbon nanotube/epoxy nano composites. *Composites science and technology*, 2010. **70**(7): p. 1154-1160.
- [37]. Yang, G.H., *Nanotechnology and Advanced Materials*. 2012: Trans Tech Publications Limited.
- [38]. Yuan, Y. and T.R. Lee, Contact Angle and Wetting Properties, in *Surface Science Techniques*, G. Bracco and B. Holst, Editors. 2013, Springer Berlin Heidelberg. p. 3-34.
- [39]. Vettivel, S., N. Selvakumar, and P.V. Ponraj, Mechanical behaviour of sintered Cu-5% W nano powder composite. *Procedia engineering*, 2012. **38**: p. 2874-2880.
- [40]. Abdallah, A., et al. Effect of alloy composition on the mechanical properties and fracture behavior of tungsten heavy alloys. in *The International Conference on Applied Mechanics and Mechanical Engineering*. 2014. Military Technical College.