

Production and Aging Heat Treatment of Ceramic Reinforced Al6061 Matrix MMCs by Vacuum Infiltration Method

Nurcihan KISAOĞLU¹  Nimet KARDEŞ SEVER²  Hasan DURAN¹  Sinan AKSÖZ^{1,*} 

¹Pamukkale University, Faculty of Technology, Department of Metallurgical and Materials Engineering, 20160, Pamukkale/DENİZLİ

²Pamukkale University, Faculty of Technology, Department of Automotive Engineering, 20160, Pamukkale/DENİZLİ

Graphical Abstract

A vacuum infiltration unit was used to produce hybrid MMCs. The samples were examined metallurgically and mechanically.

Article Info:

Research article
Received: 25.11.2022
Revision: 20.12.2022
Accepted: 28.12.2022

Highlights

- Hybrid MMC
- Heat treatment

Keywords

Al6061
Ceramic reinforcement
Vacuum infiltration
Hybrid composite
Aging

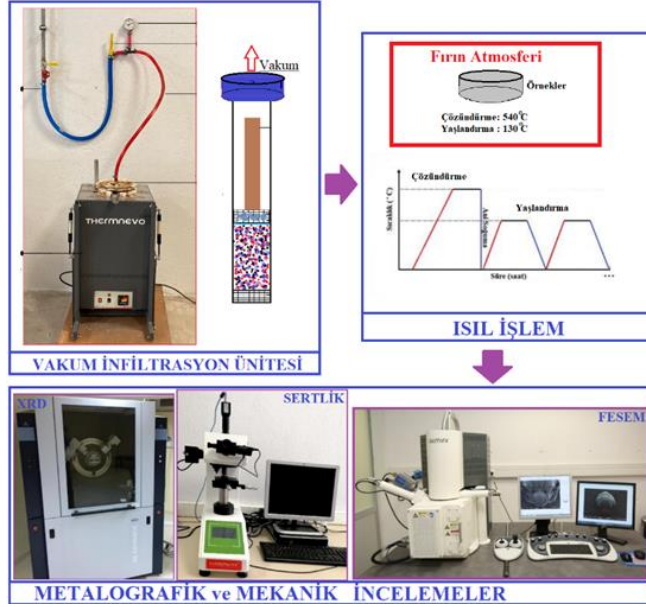


Figure A. Vacuum infiltration unit for the production of Al6061 MMCs

Purpose: The researchers aimed to produce hybrid MMCs by vacuum infiltration method. This method was a combination of powder metallurgy and casting processes. The main purpose of this study to distribute the ceramic reinforcements uniformly and to improve the mechanical properties by heat treatment.

Material and Method: The matrix material was Al6061 powder and the hybrid ceramic reinforcements were SiC, TiC and B₄C. The MMCs were produced by vacuum infiltration method. The produced samples were heat treated to improve mechanical properties. These samples were examined through FESEM, EDS, XRD and microhardness analysis.

Results: When the boron and silicon carbide hybrid structure hardness data were evaluated, the highest output was measured at 3% and 5% and the lowest output was measured at 10% reinforcement rates. For the titanium and silicon carbide hybrid structure, the highest hardness was at 3% and the lowest hardness was at 10% reinforcement rate. For the boron and titanium carbide hybrid structure, the highest hardness was at 1% and 5% and the lowest hardness was at 10% reinforcement rate.

Conclusion: In general, the hardness of hybrid structures was improved with dissolution and aging heat treatments. It has been observed that the added reinforcement contents and weight ratios affect the hardness.



Production and Aging Heat Treatment of Ceramic Reinforced Al6061 Matrix MMCs by Vacuum Infiltration Method

Nurcihan KISAOĞLU¹ Nimet KARDEŞ SEVER² Hasan DURAN¹ Sinan AKSÖZ^{1,*}

¹Pamukkale Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 20160, Pamukkale/DENİZLİ

²Pamukkale Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, 20160, Pamukkale/DENİZLİ

Abstract

In this study, hybrid reinforced composites with Al6061 matrix and different %wt. amounts TiC, SiC and B₄C were produced by vacuum infiltration method. After dissolution at 540°C for 3 hours, aging heat treatment was applied to the produced samples at 130°C with 3-hour intervals for a total of 24 hours. FESEM, EDS and XRD analyzes were performed to evaluate the homogeneity and wettability of hybrid composites after production and heat treatment. When the analysis results were evaluated; reinforcements in the produced composites were homogeneously dispersed in the matrix. These reinforcements exhibited good wettability in the structures produced in a ~ 420mmHg vacuum environment for 5 minutes at a melting temperature of 900°C. In addition, microhardness measurements were made after the heat treatments. Depending on the aging temperature applied after dissolution, it was observed that the hardness increased up to 18 hours and decreased after 18 hours. The growth of precipitates and the formation of intermetallics during heat treatment are thought to be the reason for the increase in hardness.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 25.11.2022
Düzeltilme: 20.12.2022
Kabul: 28.12.2022

Keywords

Al6061
Ceramic reinforcement
Vacuum infiltration
Hybrid composite
Aging

Anahtar Kelimeler

Al6061
Seramik takviye
Vakum infiltrasyon
Hibrit kompozit
Yaşlandırma

Seramik Takviyeli Al6061 Matrisli MMK'ların Vakum İnfiltrasyon Yöntemi ile Üretimi ve Yaşlandırma Isıl İşlemi

Öz

Bu çalışmada, vakum infiltrasyon yöntemiyle Al6061 matrisli, % ağırlıkça farklı miktarlarda TiC, SiC ve B₄C içeren hibrit takviyeli kompozitler üretilmiştir. Üretilen numunelere, 540°C sıcaklıkta 3 saat çözündürme işlemi sonrasında 130°C sıcaklıkta, 3'er saat aralıklarla toplam 24 saat yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmıştır. Üretim ve ısıl işlemlerden sonra hibrit kompozitlere homojenliğini ve ıslatılabilirliğini değerlendirmek için FESEM, EDS ve XRD analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçları değerlendirildiğinde; üretilen kompozitlerdeki takviyeler matris içinde homojen olarak dağılmıştır. Bu takviyeler 900°C eritme sıcaklığında, 5 dakika süreyle ~ 420mmHg vakum ortamında üretilen yapılarda iyi ıslatılabilirlik sergilemiştir. Ayrıca ısıl işlemlerden sonra mikro sertlik ölçümleri yapılmıştır. Çözündürme sonrası uygulanan yaşlandırma sıcaklığına bağlı olarak sertliğin 18 saate kadar arttığı, 18 saat süreden sonra ise düştüğü görülmüştür. Sertliğin artmasının nedeninin ısıl işlem sırasında çökeltilerin büyümesi ve intermetaliklerin oluşması olduğu düşünülmektedir.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son yıllarda mühendisler ve araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda, çeliğin yerini alabilecek alternatif malzemeler geliştirilmiştir. Kompozitler, polimerler, magnezyum (Mg) ve alüminyum (Al) alaşımları bu malzemelere örnek olarak gösterilmektedir [1]. Alternatif malzemeler arasında çelikten sonra en çok kullanılan malzeme grubu Al ve alaşımları olmuştur. Yeryüzünde çok bulunması, geri dönüştürülebilir olması ve kolay şekillendirilmesi tercih edilme sebeplerinin arasında yer almaktadır [2]. Aynı zamanda Al ve alaşımları düşük yoğunluk, yüksek korozyon dayanımı, yüksek mukavemet, iyi elektriksel iletkenlik ve düşük maliyetli olmaları sayesinde birçok kullanım alanında yer bulmaktadır.

Otomotiv, havacılık, uzay, inşaat, elektronik ve makine sektörleri kullanım alanlarının başında gelmektedir [3]. Otomotiv sanayinde, otomobil gövde ve panellerinde genellikle Al-Mg-Si (Silisyum) alaşımı tercih edilmektedir [4]. 6061 Al alaşımı Al-Mg-Si alaşımlarından biridir. Uygulanan çözündürme ve yaşlandırma ısıl işlemleri ile de istenilen dayanıma ulaşabilmektedir [5].

Al6061, esas alaşım elementinin Mg ve Si olduğu ve 6XXX serisinde en yaygın kullanılan Al alaşımıdır. İyi derecede korozyon direnci ve dayanıma sahiptir. Bunun yanı sıra iyi kaynak edilebilirlik özelliği ile savunma sanayinde, gemi inşa sektöründe, köprülerde, kazan imalatında ve borularda yaygın olarak kullanılmaktadır [6]. Al6061 alaşımının kullanım alanlarında teknolojik gelişmeler ile birlikte kompozit malzeme üretimi üzerine çalışmalar yapılmaya başlanmıştır.

Al ve alaşımları sahip oldukları yüksek özgül mukavemet sayesinde, günümüzde birçok farklı alanda kullanıma sahiptir [7]. Ancak sahip oldukları özelliklerin iyileştirilmesi için, Al ve alaşımlarına günümüzde farklı seramik içeriklerin (SiC, TiC v.b.) ilavesi ile mekanik özelliklerin iyileştirilmesi ve kullanım alanlarının artırılması için çalışmalar yapılmaktadır [8]. İçerisinde iki ve daha fazla içeriğe sahip bu metal matrisli kompozitler (MMK'lar) için hibrit kompozitler terimi kullanılmakta olup mühendislik alanında ve akademik çalışmalarda kullanımı giderek artmaktadır. İlave edilen sert seramik içerikler sayesinde Al matrisli yapısal kompozitler üzerine yapılan araştırmalar hız kazanmıştır. Al matris yapısına ilave edilen farklı içeriklere ve boyutlara sahip takviyeler sayesinde, malzemenin yoğunluğunu önemli ölçüde değiştirmeden (düşük yoğunluk) kompozitlerin özgül mukavemetinde ve modülünde önemli artışlar sağlanabilmiştir [9, 10]. Bu sayede Al ve alaşımlarında geleneksel yöntemler ile elde edilemeyen mekanik özellikler ve geleneksel yöntemlerde karşılaşılan problemler (homojen dağılmama gibi), için ikincil işlemler yerine, doğrudan üretim sağlanabilecektir [11].

Bu çalışmada; vakum infiltrasyon yöntemi kullanılarak Al6061 matris içine B₄C, SiC ve TiC seramik takviyelerin farklı % ağırlık oranlarında yerleştirilmesiyle oluşmuş hibrit kompozit üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen hibrit MMK'ların mekanik özelliklerini iyileştirmek için çözündürme ve yaşlandırma ısıl işlemleri uygulanmıştır. Uygulanan ısıl işlemlerden sonra MMK içindeki takviyelerin homojenliğini, ıslatılabilirliğini incelemek için FESEM, EDS ve XRD analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca sertlik ölçümleri yapılmıştır.

2. MATERYAL VE METOTLAR (MATERIALS AND METHODS)

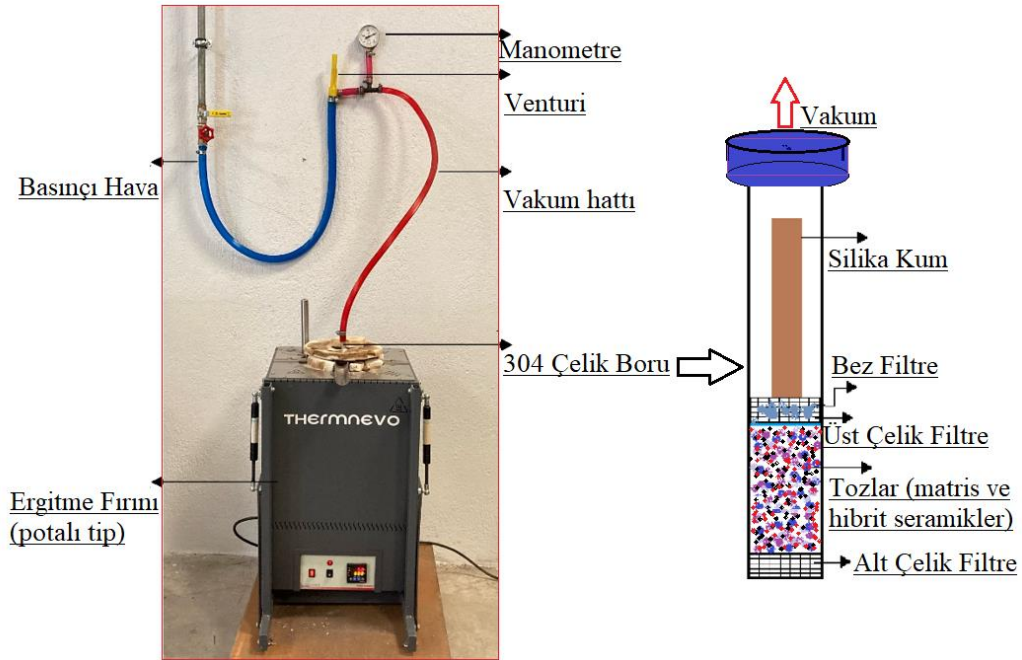
İnfiltrasyon işlemi için Al6061 matrisinin hem toz hem de kütük hali kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan Al6061 matris tozu, gaz atomizasyon yöntemi ile üretilmiş olup yüksek saflığa (%99) sahiptir. Al6061 tozunun ortalama toz boyut dağılımı 20µm'dir. Al6061 toz için seçilen üretim yönteminin gaz atomizasyon olması ve 40µm altı tozların kullanımı sayesinde tüm tozlar küresel şekle sahip olarak yer almaktadır [12].

Çalışmada kullanılan Al6061 kütük malzemesi AVAS METAL San. Tic. A.Ş., Al6061 tozu ve seramik tozları yurt dışından İSM DIŞ Tic. firması tarafından temin edilmiştir. Al6061 malzemesine ait T/M ve ingot Al6061 içerikleri incelendiğinde yaklaşık olarak; ağ. %1,1 Mg, 0,65 Cu, 0,7 Si, 0,1 Ti, 0,5 Fe, 0,25 Zn, 0,1 Cr ve geri kalan Al içeriğine aittir. İnfiltrasyon yöntemi için Al6061 tozları ve B₄C+SiC, TiC+SiC ve B₄C+TiC hibrit takviyeleri homojen karışım için %40 doluluk oranına sahip silindirik kapta 120 dak. oda sıcaklığında karıştırma işlemine tabi tutulmuştur. Ayrıca matris içerisine takviye edilen tozlar % ağırlıkça ilave edilmiştir. Tablo 1'de takviye ağırlık oranları ve hibrit yapı elde etmek için seramik takviyelerin karışımı verilmiştir.

Tablo 1. Matris malzemesine eklenen seramik takviyelerin % ağırlık oranları

Matris	Seramik takviyeler	Toplam % ağırlık takviye oranları
Al6061	Bor Karbür (%50) + Silisyum Karbür (%50)	1, 3, 5 ve 10
	Titanyum Karbür (%50) + Silisyum Karbür (%50)	1, 3, 5 ve 10
	Titanyum Karbür (%50) + Bor Karbür (%50)	1, 3, 5 ve 10

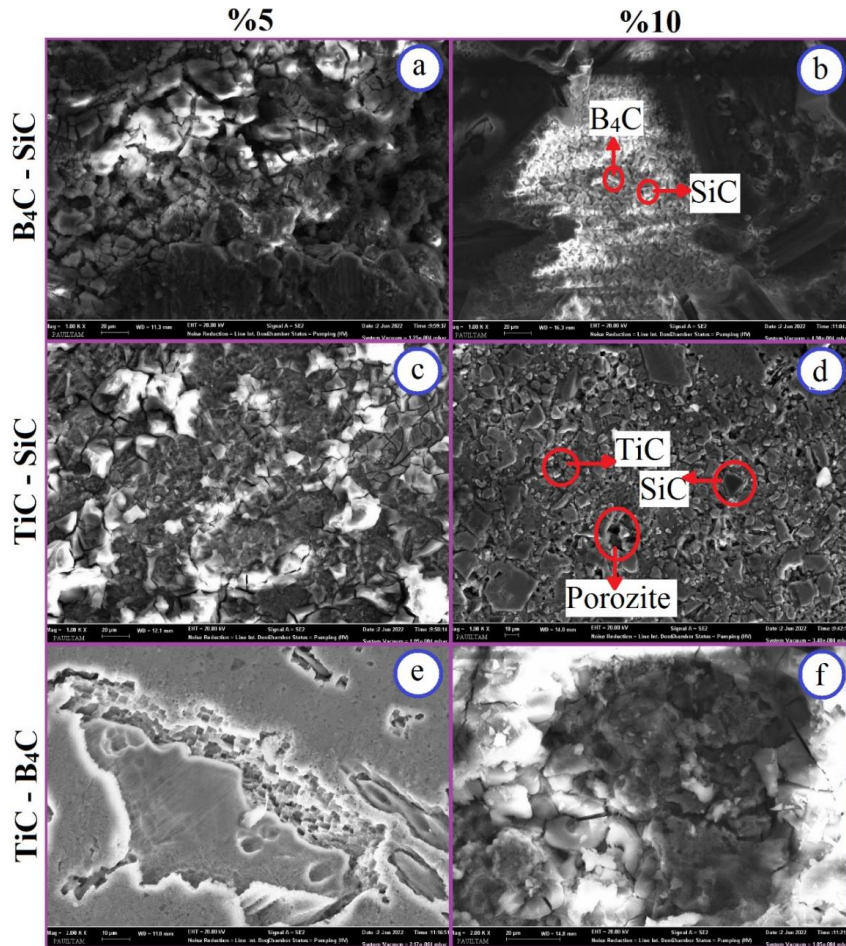
Şekil 1’ de görülen vakum infiltrasyon düzeneği Pamukkale Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Döküm Laboratuvarına tez kapsamında kurulmuştur. Düzenekte basınçlı hava, venturi kanal tasarımı eklenerek negatif basınca (vakuma) dönüştürülmüştür. İnfiltrasyon sürecinde fırın sıcaklığı 750°C ile 1000°C aralığı için denemeler yapılmış ve optimum fırın ertme sıcaklığı 900°C olarak belirlenmiştir. Hibrit MMK’lar, paslanmaz çelik boru içinde bulunan toz karışımlarının sıvı metal matrise daldırılmasıyla elde edilmiştir (Şekil 1.b). Toz karışımlarının vakum hattına ve potaya geçişini engellemek için filtreler kullanılmıştır. Hızlı katılaşmaları önlemek amacıyla paslanmaz çelik boru pota içerisine yerleştirilmeden önce 150°C’ye ısıtılmıştır. Paslanmaz çelik boru yerleştirildikten sonra 5 dakika süreyle ~ 420mmHg büyüklüğünde negatif basınca tabi tutulmuş ve böylece sıvı metalin hibrit toz karışımına infiltre edilmesi sağlanmıştır.

**Şekil 1.** T/M ve ertme ünitesinin birlikte yer aldığı vakum infiltrasyon sistemi

Elde edilen hibrit MMK'lardan alınan örnekler yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. Numuneler 540°C'de 3 saat çözündürme ısıl işlemine tabi tutulmuş, çözündürme sonrasında 130°C'de 3'er saat arayla toplamda 24 saate kadar yaşlandırılmıştır. Her bir ısıl işlem sonrasında numunelere 5 adet mikro sertlik testi uygulanarak sertlikleri ölçülmüş ve ortalama sertlik değerleri hesaplanmıştır. Sertlik ölçümlerinde, Hardway DV1AT-4.3 marka mikro sertlik cihazı (HV0.1) kullanılmıştır.

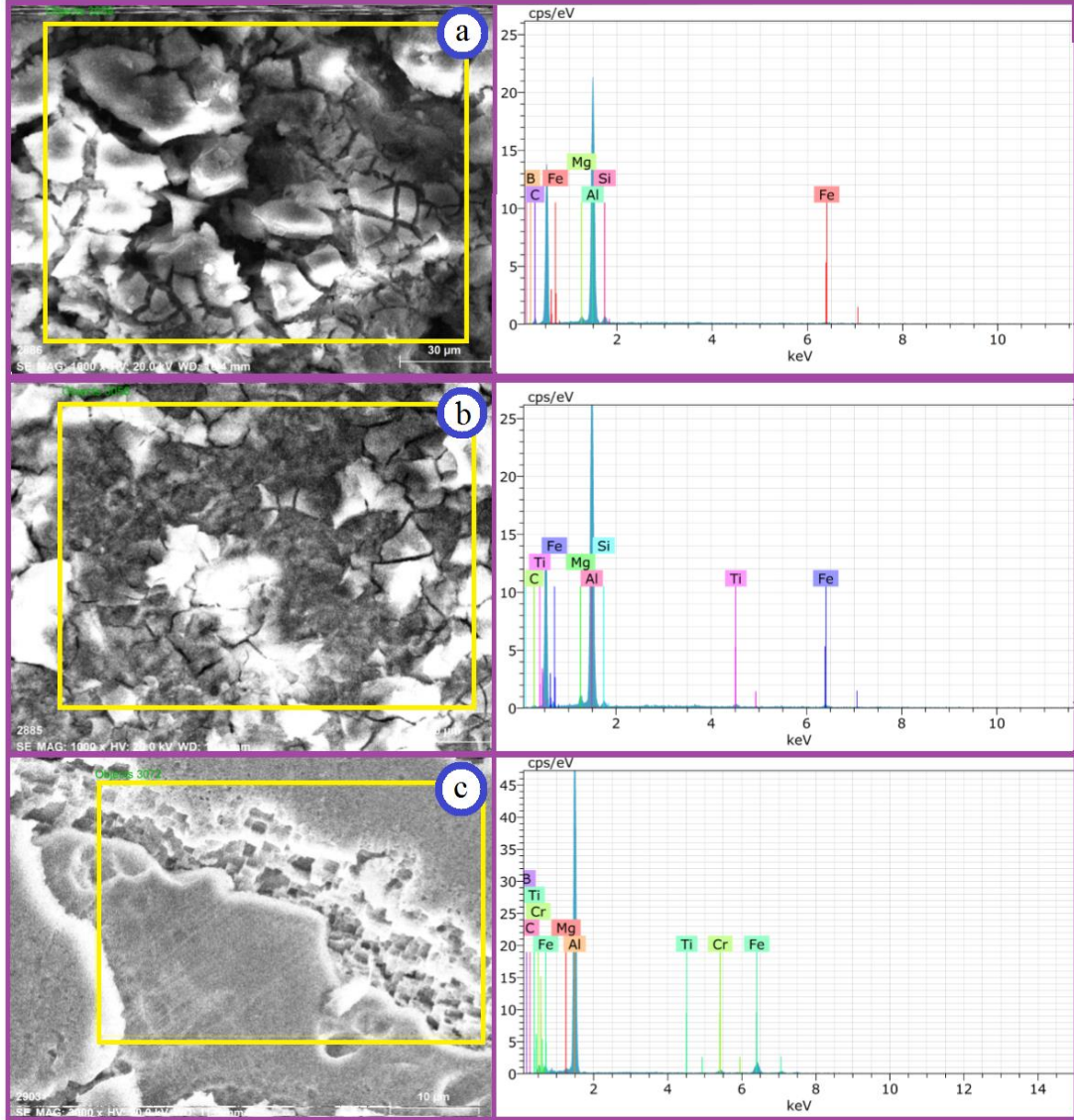
3. BULGULAR (RESULTS)

Vakum infiltrasyon yöntemi ile üretilen B₄C-SiC-TiC takviyeli Al6061 matrisli MMK'ların FESEM görüntüleri Şekil 2'de yer almaktadır. Üretilen hibrit MMK'larda tercih edilen toz boyutlarının küçük olmasından dolayı %1 ve %3 takviye ağırlık oranlarında istenilen homojenlik elde edilememiştir. Daha yüksek takviye oranları için homojen dağılım elde edilebilmiştir. Bunun yanı sıra takviye oranı %10 seviyesine çıkarıldığında porozitelerin ve topaklanmaların oluştuğu görülmüştür [13, 14]. Seramik takviyelerin genelde tane sınırlarına yöneldiği görülmüş, matrisin tane boyutuna etkisi olmadığı düşünülmektedir.



Şekil 2. Hibrit MMK'lara ait FESEM görüntüleri

Her biri ayrı olarak %5 oranında Al6061 matrise seramik takviyelerin (Bor, Silisyum ve Titanyum Karbürler) eklenmesiyle oluşturulmuş hibrit MMK'lara ait EDS verileri Şekil 3'de yer almaktadır. Tablo 2'de verilen EDS oranları seramik takviyelerin (B, Ti, Si) ve matriste yer alması gereken elementlerin (Mg, Si, vb.) varlığını göstermektedir. EDS verilerinde ana yapının Al ağırlıklı olduğu (ağ. %60'ın üzerinde) ve yapıda takviyelerden gelen (B₄C, SiC, TiC) C içeriğinin yer aldığı görülmektedir [13].

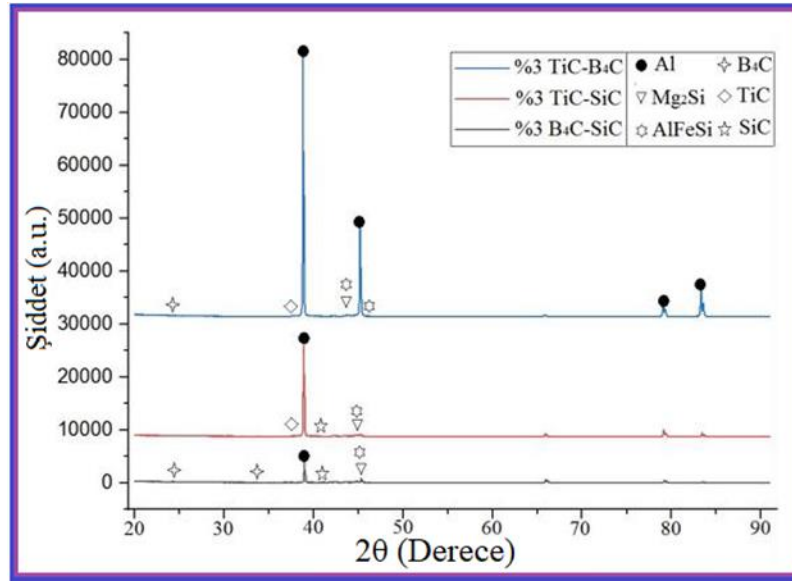


Şekil 3. Hibrit MMK'lara ait EDS analizi; a) %5 bor ve silisyum karbür, b) %5 titanyum ve silisyum karbür, c) %5 bor ve titanyum karbür

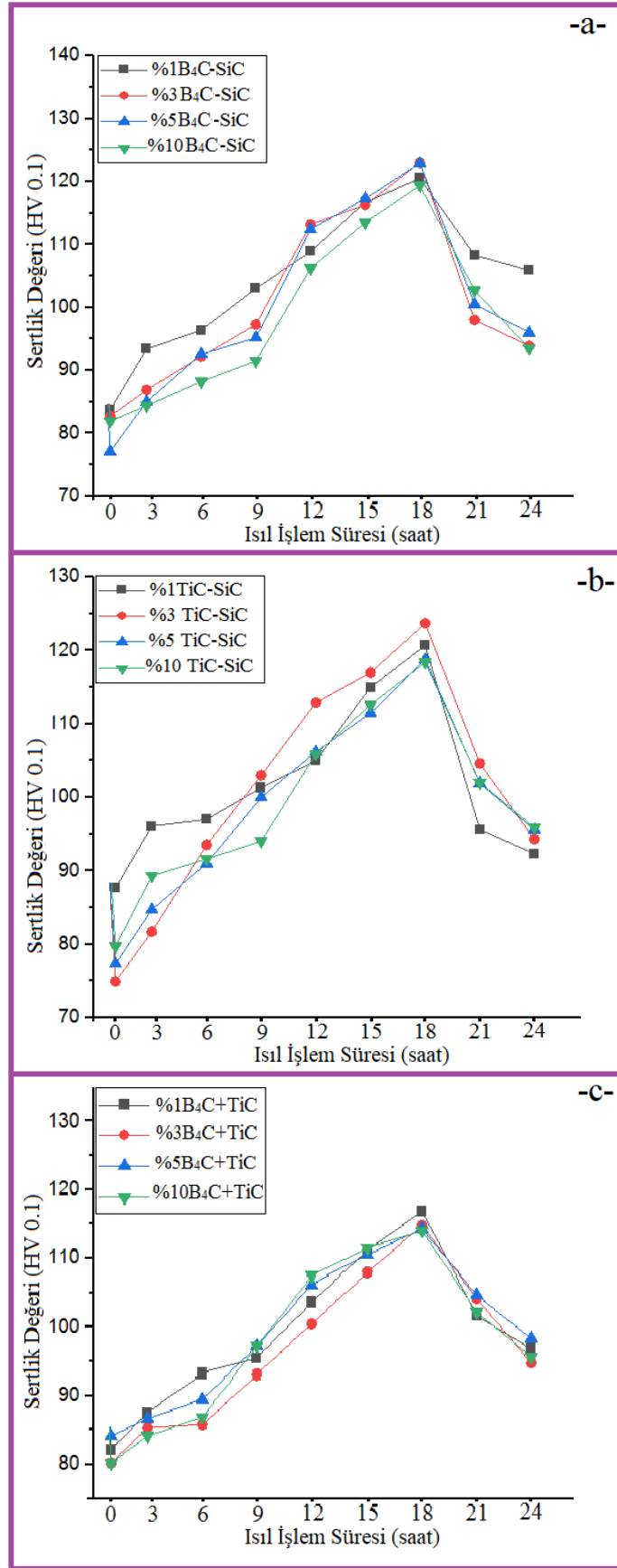
Tablo 2. Element dağılım oranları (%ağ. ve %at.)

Elementler	%5 B-Si		%5 Ti-Si		%5 Ti-B	
	% ağırlık	% atom	% ağırlık	% atom	% ağırlık	% atom
Al	62,98	45,59	76,9	66,57	68,24	61,11
Ti	0	0	2,12	1,04	0	0
Si	2,9	2,01	2,28	1,9	0	0
B	2,79	5,04	0	0	7,77	17,37
Fe	2,08	0,73	2,88	1,2	14,28	6,18
Mg	1,14	0,92	1,5	1,43	0,68	0,66
C	28,11	45,71	14,32	27,86	6,77	13,63
Cr	0	0	0	0	2,26	1,05
Toplam:	100	100	100	100	100	100

Şekil 4'te %3 oranında seramik takviye eklenmiş hibrit MMK'lara ait XRD grafikleri verilmiştir. XRD analizleri değerlendirildiğinde, yapıda bulunması muhtemel Al matrisi ve Mg_2Si çökeltilerinin ve AlFeSi intermetaliklerinin yer aldığı görülmüştür. Ayrıca takviyelerden gelen B_4C , TiC ve SiC seramik karbürlere ait şiddetler yer almaktadır [13]. $900^\circ C$ 'de uygulanan ergitme yapıda α -AlFeSi intermetaliklerinin ve $540^\circ C$ 'de 2 saat uygulanan çözündürme + $130^\circ C$ 'de 18 saat yaşlandırma ise β -AlFeSi intermetaliklerinin oluşmasında etken rol oynamıştır [15]. Oluşması muhtemel α -AlFeSi ve β -AlFeSi intermetalikleri, sertlikteki artışlar için açıklayıcı olarak nitelendirilebilir [16]. Ayrıca takviye içerik ve oranları, yapıda oluşması muhtemel faz ve içeriklerin boyut ve şiddetine de doğrudan etki ettiği Şekil 4'de görülmektedir. Tuncay ve ark. yaptığı çalışmada Al alaşımı içeriğine Fe oranının artırılması ile oluşması muhtemel faz ve şiddetlerdeki değişimi açıklamıştır [17].



Şekil 4. Hibrit MMK'lara ait XRD analizi (ağ. %3 takviye oranı için)



Şekil 5. Hibrit MMK'lara sertlik analizleri

Üretilen hibrit MMK'lara uygulanan çözündürme ve yaşlandırma ısıl işlemi sonrasında her numune için alınan ortalama mikrosertlik verileri Şekil 5' de verilmiştir. Çözündürme sonrası yapılan ölçümlerde en düşük sertlik değerleri elde edilmiştir. Uygulanan yaşlandırma ısıl işlemi neticesinde oluşması muhtemel θ fazları ile sertlikte 18 saate kadar artış gözlemlenmiş, 18 saatin üzerinde yapılan yaşlandırma süreci aşırı yaşlanma ile sertlikte düşüş meydana gelmiştir. Aksöz ve ark. yaptıkları çalışmada yaşlandırma neticesinde sertlikte meydana gelen artışı ve sonrasındaki düşüşü benzer şekilde açıklamıştır [18]. Gündoğdu ve Özşarı yaptıkları basınçlı infiltrasyon sisteminde takviyelerinde sertlikte etkili olduğunu göstermiştir [19]. Kıymaz ve Özçatalbaş ise yaptıkları B₄C takviyesi ile Al6061 matrisli yapının mekanik özelliklerinin iyileştirilebileceğini göstermiştir [20].

Şekil 5.a'daki bor ve silisyum karbür hibrit yapısına ait sertlik verileri değerlendirildiğinde, en yüksek sertlik %3 ve %5 ve en düşük sertlik %10 takviye oranlarında ölçülmüştür. Şekil 5.b'deki titanyum ve silisyum karbür hibrit yapısına ait sertlik verileri değerlendirildiğinde, en yüksek sertlik %3 ve en düşük sertlik %10 takviye oranlarındadır. Şekil 5.c'deki bor ve titanyum karbür hibrit yapısına ait sertlik verileri değerlendirildiğinde, en yüksek sertlik %1 ve %5 ve en düşük sertlik %10 takviye oranlarındadır.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada geleneksel döküm ve T/M yöntemleri bir arada kullanılarak (vakum infiltrasyon yöntemi) seramik takviyeli Al6061 matrisli hibrit kompozitler üretilmiştir. Her iki yöntemdeki dezavantajlar giderilmiştir. Örneğin geleneksel döküm ile üretimde karşılaşılan heterojen dağılım problemi bu yöntemle üretilen hibrit kompozitlerde giderilmiştir. Üretim sonrası sertliği iyileştirmek için bu hibrit MMK'lara çözündürme ve yaşlandırma ısıl işlemleri uygulanmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

Şekil 2 ve 3'te görüldüğü üzere ağırlıkça %5'e kadar takviye içeren hibrit yapılarda ıslatılabilirliğin iyi olduğu, %10 olduğunda ise düştüğü görülmüştür. Ayrıca ağırlıkça %10 takviye oranında porozite ve topaklanma problemleri ortaya çıkmıştır. EDS verilerinde matris ve takviye seramiklere ait element piklerinin yer aldığı görülmüştür.

Şekil 3 ve 4'teki EDS ve XRD grafikleri beraber incelendiğinde, elementel piklerin, oluşması muhtemel Al matrisi, Mg₂Si çökeltisi, AlFeSi intermetalik bileşiği ve seramik takviyelere ait olduğu anlaşılmaktadır. Matris içinde yer alan çökelti ve seramik takviyeler sertliği olumlu olarak etkilemiştir.

Genel olarak çözündürme sonrası yaşlandırılan hibrit yapıların sertliği iyileşmiştir. Eklenen takviye içeriklerinin ve oranlarının sertliği etkilediği görülmüştür. Örnek olarak 18 saat yaşlandırma neticesinde en yüksek sertlik verisi ağırlıkça %5 B₄C+SiC hibrit seramik takviyesi için yaklaşık 125HV olarak ölçülmüştür. Aynı yaşlandırma süresi için en düşük sertlik ise ağırlıkça %10 B₄C+TiC hibrit seramik takviyesi için yaklaşık 112HV olarak ölçülmüştür. Oluşması muhtemel α -AlFeSi ve β -AlFeSi gibi intermetaliklerin ve Mg₂Si gibi çökelti sertliği 18 saate kadar artırdığı fakat 18 saatin üzerinde ise düşürdüğü düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

2021FEBE058 Kodlu PAÜ BAP Projeleri kapsamında tasarlanmış İnfiltrasyon Sistemi kullanılmıştır. Yazarlar, katkılarından dolayı 2021FEBE058 Kodlu Yüksek Lisans Projesini destekleyen PAU BAP birimine teşekkürlerini sunmaktadır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Benedyk, J.C. (2010). Aluminum alloys for lightweight automotive structures. Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles. Woodhead Publishing Limited.
- [2] Florea, R.S., Solanki, K.N., Bammann, D. J., Baird, J. C., Jordon, J. B., & Castanier, M. P. Resistance spot welding of 6061-T6 aluminum: Failure loads and deformation. Materials & Design, 34(624-630), (2012).

- [3] Siddiqui, R.A., Abdullah, H.A., & Al-Belushi, K. R. Influence of aging parameters on the mechanical properties of 6063 aluminium alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 102(1-3)(234-240), (2000).
- [4] Wang, N., Zhou, Z., & Lu, G. Microstructural Evolution of 6061 Alloy during Isothermal Heat Treatment. *Journal of Materials Science and Technology*, 27(1)(8–14), (2011).
- [5] Buha, J., Lumley, R. N., & Crosky, A. G. Microstructural development and mechanical properties of interrupted aged Al-Mg-Si-Cu alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 37(10)(3119-3130), (2006).
- [6] Dietrich, G. A. (1998). *Aluminum: technology, applications, and environment. A profile of a modern metal.*
- [7] Gopalakrishnan, S., & Murugan, N. Prediction of tensile strength of friction stir welded aluminium matrix TiCp particulate reinforced composite. *Materials & Design*, 32(1)(462-467), (2011).
- [8] Naseri, M., Hassani, A., & Tajally, M. An alternative method for manufacturing Al/B4C/SiC hybrid composite strips by cross accumulative roll bonding (CARB) process. *Ceramics International*, 41(10)(13461-13469), (2015).
- [9] Kim, H. H., J. S. S. Babu, and C. G. Kang. "Fabrication of A356 aluminum alloy matrix composite with CNTs/Al₂O₃ hybrid reinforcements." *Materials Science and Engineering: A* 573(92-99), (2013).
- [10] Ashuri, H., & Hassani, A. Characterization of severely deformed new composites fabricated by powder metallurgy including a stage of mechanical alloying. *Journal of alloys and compounds*, 617(444-454), (2014).
- [11] Pramod, S. L., Bakshi, S. R., & Murty, B. S. Aluminum-based cast in situ composites: a review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 24(6)(2185-2207), (2015).
- [12] Tsaknopoulos, K., Walde, C., Champagne, V. et al. Gas-Atomized Al 6061 Powder: Phase Identification and Evolution During Thermal Treatment. *JOM* 71(435–443), (2019).
- [13] Halil, K., İsmail, O., Sibel, D., & Ramazan, Ç. Wear and mechanical properties of Al6061/SiC/B4C hybrid composites produced with powder metallurgy. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(6) (5348-5361), (2019).
- [14] Maurya, N. K., Maurya, M., Srivastava, A. K., Dwivedi, S. P., & Chauhan, S. Investigation of mechanical properties of Al 6061/SiC composite prepared through stir casting technique. *Materials Today: Proceedings*, 25(755-758), (2020).
- [15] Belmares-Perales, S., Castro-Román, M., Herrera-Trejo, M., & Ramírez-Vidaurre, L. E. Effect of cooling rate and Fe/Mn weight ratio on volume fractions of α -AlFeSi and β -AlFeSi phases in Al– 7.3 Si– 3.5 Cu alloy. *Metals and Materials International*, 14(3), 307-314, (2008).
- [16] Alvarez-Antolin, F., Asensio-Lozano, J., Cofiño-Villar, A., & Gonzalez-Pociño, A. Analysis of Different Solution Treatments in the Transformation of β -AlFeSi Particles into α -(FeMn) Si and Their Influence on Different Ageing Treatments in Al–Mg–Si Alloys. *Metals*, 10(5), 620, (2020).
- [17] Tunçay, T., & Bayoğlu, S. The effect of iron content on microstructure and mechanical properties of A356 cast alloy. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 48(2), 794-804, (2017).
- [18] Aksöz, S., Özdemir, A. T., Çalın, R., Altınok, Z., & Bostan, B. Sinterleme, Yaşlandırma Ve Kriyojenik Isıl İşlemlerinin AA2014-B4C Kompozit Yapısına ve Mekanik Özelliklerine Etkileri. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28(4), (2013).

- [19] Gündođan, K., & ÖZSARI, A. R. B. Basınçlı İnfiltrasyon Yöntemiyle Üretilen AA2024 ve AA6061 Matrisli, B4C ve SiC Takviyeli Kompozit Malzemelerin Mikroyapı, Mekanik ve Isıl İletkenlik Özelliklerine Basıncın Etkisi. *International Journal of Engineering Research and Development*, 11(2) (657-669), (2019).
- [20] Kıymaz, T., & Özçatalbaş, Y. B4C Takviye Oranı ve İkincil Sinterleme İşlemlerinin Al6061 Matrisli MMKp Malzemelerin Özelliklerine Etkisi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 8(3) (601-615), (2020).