



BOR DERGİSİ

JOURNAL OF BORON

<http://dergipark.gov.tr/boron>



Al-7Si%10B₄C kompozit malzeme üretiminde farklı sinterleme sıcaklıklarının mikroyapı ve sertlik üzerine etkisi

Niyazi Yılmaz Çolak^{1*}, Hüseyin Turhan²

¹Bitlis Eren Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, 13000 Bitlis Türkiye, ORCID ID orcid.org/0000-0003-1310-1639

²Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 23117 Elazığ Türkiye, ORCID ID 0000-0002-9467-3091

MAKALE BİLGİSİ

Makale geçmişi:

İlk gönderi 04 Mart 2018
Revize gönderi 26 Şubat 2019
Kabul 08 Mart 2019
Online 16 Mart 2019

Araştırma Makalesi

DOI: 10.30728/boron.401290

Anahtar kelimeler:

Al-Si,
B₄C,
MMK,
Toz Metalurjisi

ÖZET

Bu çalışmada, Al-7Si%10B₄C metal matrisli kompozit malzeme (MMK), Al-%7Si toz karışımını içerisine ağırlıkça %10 oranında B₄C ilave edilerek toz metalurjisi yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Hazırlanan toz karışımları, 450 MPa basınç altında soğuk presleme işlemine tabi tutulmuş ve argon gazı atmosferinde farklı sinterleme sıcaklıklarında (550 °C, 570 °C ve 590 °C) 60 dakika süre ile sinterlenmiştir. Farklı sinterleme sıcaklıklarında üretilen Al7Si%10B₄C kompozit malzemelerin mikro yapıları, SEM+EDS, X-ışını kırınımı (XRD) ve sertlik ölçümü ile karakterize edilmiştir. Çalışma sonucunda, sinterleme sıcaklığının artması ile matris fazında Al_{3,21}Si_{0,47} ve matris-takviye arasında ise AlB₁₂, AlB₁₀, faz ve bileşikler oluştuğu görülmüştür. Ayrıca sıcaklık değerlerindeki artışa bağlı olarak sertlik değerlerinde görülür bir artış olduğu belirlenmiştir.

The effect of different sintering temperatures on microstructure and hardness in Al-7Si%10B₄C composite material production

ARTICLE INFO

Article history:

Received 04 March 2018
Revised form 26 February 2019
Accepted 08 March 2019
Available online 16 March 2019

Research Article

DOI: 10.30728/boron.401290

Keywords:

Al-Si,
B₄C,
MMC,
Powder Metallurgy

ABSTRACT

In this study, Al-7Si%10B₄C metal matrix composite material (MMC) was produced by adding 10 wt. % B₄C in weight into the Al-%7Si powder mixture, using powder metallurgy method. The prepared powder mixtures were subjected to cold press under a pressure of 450 MPa and sintered for 60 minutes at different sintering temperatures (550 °C, 570 °C and 590 °C) in an argon gas atmosphere. Microstructures of Al7Si%10B₄C composite materials produced at different sintering temperatures were characterized by SEM+EDS, X-ray diffraction (XRD) and hardness measurements. As a result of the study, it was observed that Al_{3,21}Si_{0,47} in matrix phase and AlB₁₂, AlB₁₀, phase and compounds between matrix and reinforcement were formed by increasing the sintering temperature. Furthermore, it was determined that there is a significant increase in hardness values due to the increase in temperature values.

1. Giriş (Introduction)

Metal matrisli kompozitler, mukavemet ağırlık oranı, yüksek spesifik sertlik, yüksek sertlik, yüksek plastik akma mukavemeti, iyi termal genleşme, termal kararlılık, sürünme direnci ve iyi oksidasyon ve korozyon direnci gibi avantajlı özellikleri nedeniyle otomotiv, balistik endüstriler, altyapı, hava-uzay araçları, su altı araçları ve derin okyanus ekipmanları gibi birçok uygulama alanında kullanılmaktadır [1]. Mevcut metal matrisli kompozitler arasında, parçacık takviyeli alüminyum matris kompozitler, nispeten düşük maliyet, düşük yoğunluk, üstün fiziksel ve çevresel direnç, yüksek sertlik,

iyi aşınma direnci, yüksek mukavemetli ağırlık oranı ve diğer mekanik özellikleri ile ön plana çıkmaktadır [2-4].

Uçak, otomotiv, inşaat, paketleme, elektronik ve askeri sanayilerdeki yapısal uygulamalar için istenilen malzeme olması nedeniyle Alüminyum matris kompozitlerin kullanımı kısa sürede ivme kazanmıştır [5,6]. Alüminyum (Al) ve alaşımları, aşınma davranışını ve mekaniksel dayanımı geliştirmek için seramiklerle takviye edilerek alüminyum matrisli kompozitler oluşturulur. Kompozit malzemede takviye elemanlarının esas fonksiyonları; yükü taşıyarak matrisin rijitlik ve dayanımını artırmaktır [7].

*Sorumlu yazar: nycolak@beu.edu.tr

Bor karbür (B_4C) seramikleri, yüksek mukavemet, yüksek erime noktası, düşük yoğunluk ($2,52 \text{ g/cm}^3$), iyi aşınma direnci, iyi kimyasal stabilite, nötron absorpsiyonu, üçüncü en sert (elmas ve kübik bor nitürden sonra 9,5+Mohs skalasında) malzeme olması gibi cazip ve benzersiz özelliklere sahip seramik takviye fazıdır [8-10]. Olağanüstü özelliklerden dolayı, B_4C seramikleri, askeri, mühendislik ve nükleer enerji gibi çeşitli endüstriyel alanlarda kullanım potansiyelini göstermiştir [11].

B_4C 'yi bir metal ile birleştirmenin kırılma ile ilişkili problemleri hafifletebileceği bilinmektedir. Bu amaçla B_4C 'ye katılmada kullanılan en popüler metal alüminyumdur [12]. AlSi alaşımına, B_4C parçacıklarının eklenmesi ile matrisin mekanik özellikleri ve termal stabilite artmaktadır. Ayrıca B_4C nin, silisyum karbür (SiC) ve alüminyum oksit (Al_2O_3) gibi yaygın ticari seramik takviyelerden daha düşük yoğunluğa sahip olması ile daha yüksek spesifik rijitliği olan kompozitlerin üretilmesine neden olur [13]. Ayrıca, birçok araştırmacı Al'un düşük yoğunluğu ve iyi sünekliliğe sahip olması nedeniyle Al- B_4C kompozitlerinin mekanik özelliklerini geliştirmek için yoğunlaşmıştır [14,15]. Gómez ve ark. [16], Al- B_4C kompozitlerin sertlik ve mukavemetlerinin takviye hacim fraksiyonu ile birlikte arttığını ve maksimum değere %10 B_4C takviye oranında ulaşıldığını bildirmişlerdir. Alüminyum, B_4C 'yi yüksek sıcaklıklarda iyi ıslatır. Ergiyik alüminyumun B_4C ile temas etmesi durumunda Al_3BC , $AlB_{24}C_4$, AlB_{10} , $Al_8B_4C_7$, $Al_3B_{48}C_2$, b- AlB_{12} , AlB_2 , $AlB_{12}C_2$, $AlB_{48}C_2$, Al_4C_3 ve a- $AlB_{12.7}$ gibi çeşitli ikili ve üçüncül fazlar oluşması ile sonuçlanmıştır. Bunlardan en sık görülen Al_3BC fazıdır [17,18].

Yapılan çalışmada; toz metalurjisi yöntemi kullanılarak Al7Si matrise %10 B_4C takviye edilerek farklı sinterleme sıcaklıklarında kompozitlerin üretimi ve özelliklerinin incelemesi amaçlanmıştır. Sinterleme sıcaklıkları %7 Si içeren Al matris alaşımına göre belirlenmiştir. Numuneler, Al-Si denge diyagramına göre ötektik sıcaklığın ($577 \text{ }^\circ\text{C}$ 'nin) altında, ötektik sıcaklığa yakın ve üstünde olmak üzere üç farklı sinterleme sıcaklığında (550 - 570 - $590 \text{ }^\circ\text{C}$) sinterlenerek üretilmiştir. Üretilen kompozitlerin özellikleri, taramalı elektron mikroskobu (SEM), X ışını enerji dağılım spektrometresi (EDS), X ışınları kırınımından (XRD) faydalanılarak incelenmiş, numunelerin ölçülen yoğunluk ve mikro sertlik değerleri ile yorumlanmıştır.

Çizelge 1. Bor karbür (B_4C) tozunun kimyasal ve fiziksel özellikleri (Chemical and physical properties of boron carbide (B_4C) powder).

B: C Oranı	C	N	O	Fe	Si	Al	Diğer	Yoğunluk	Boyut Dağılımı		
3,85	%21,80	%0,70	%1	%0,05	%0,15	%0,05	%0,50	1,5-1,7 g/cm^3	90%	50%	10%
									6,5 μm	2,5 μm	0,4 μm

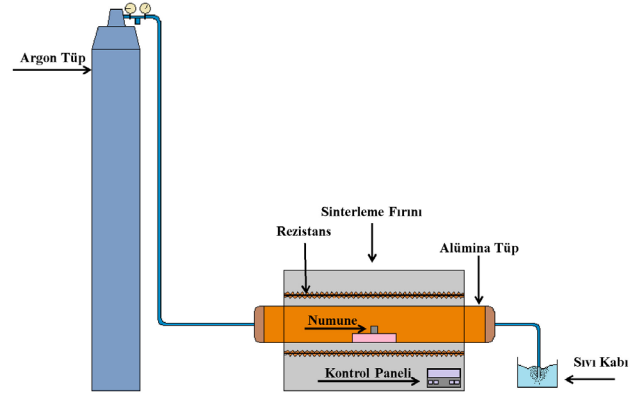
Çizelge 2. Alüminyum tozunun kimyasal ve fiziksel özellikleri (Chemical and physical properties of aluminum powder).

Al	Pb	As	Fe	Yoğunluk	Boyut Dağılımı
\geq %97.0	\leq 0.03	\leq %0.0005	\leq % 1.0	2.70 g/cm^3	\leq 50 μm

2. Malzemeler ve yöntemler (Materials and methods)

Bu çalışmada kullanılan numuneler toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiştir. Deney numunelerinin üretiminde kimyasal ve fiziksel özellikleri Çizelge 1'de verilen B_4C tozu ve Çizelge 2'de verilen Al tozu kullanılmıştır.

Numune üretimi için alüminyum-silisyum esaslı (ağırlıkça; Al %93, Si %7) matrise %10 B_4C parçacık takviye edilerek planeter tip değirmende paslanmaz çelik öğütme hücresi içerisinde 45 dakika süre ile 10 mm çapında paslanmaz çelik bilye, 10:1 bilye/toz oranı, %50 kap doluluk oranı ve topaklanmaları önleme amacı ile 1 ml etanol kullanılarak toz karışımları hazırlanmıştır. Toz karışımları 450 MPa basınç ile soğuk preslenerek $\varnothing 10 \times 10 \text{ mm}$ boyutlarında ham numuneler üretilmiştir. Üretilen ham numuneler 550°C , 570°C ve 590°C sıcaklıklarına 30 dk. sürede çıkılmış, 60 dk. bekleme süresi ile Şekil 1'de şematik olarak verilen atmosfer kontrollü fırın ile argon gaz atmosferinde sinterlenmiştir.



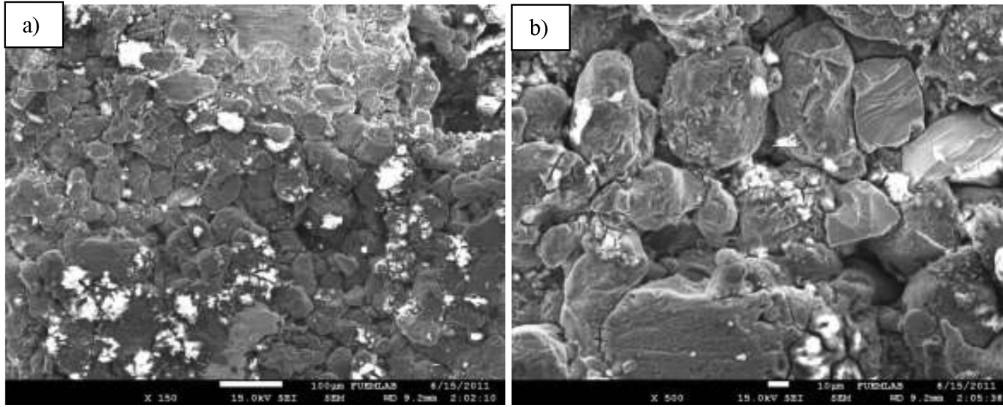
Şekil 1. Sinterleme fırınının şematik gösterimi (Schematic representation of the sintering furnace).

Üretilen numuneler mikroyapı incelemeleri için standart metalografik işlemlerle hazırlandıktan sonra, KELLER (1 ml HF, 1,5 ml HCl, 2,5 ml HNO_3 , 95 ml H_2O) dağılayıcısı ile 30 sn. kimyasal dağlama işlemi yapılmıştır. Dağlanan numunelerin mikroyapıları taramalı elektron mikroskobu (SEM+EDS) ile incelenmiştir. Ayrıca sinterlenen numuneler X-ışını kırınımı (XRD) ve sertlik ölçümleri ile karakterize edilmiştir. Yoğunluk ölçümleri Arşimet prensibine göre 3 numuneden ölçüm alınmış ve ortalaması alınarak belirlenmiştir. Sertlik ölçümleri Vickers sertlik ölçümü ile 5 N yük altında 10 sn. süre ile 5 farklı noktadan ölçülmüş ve ortalaması alınmıştır.

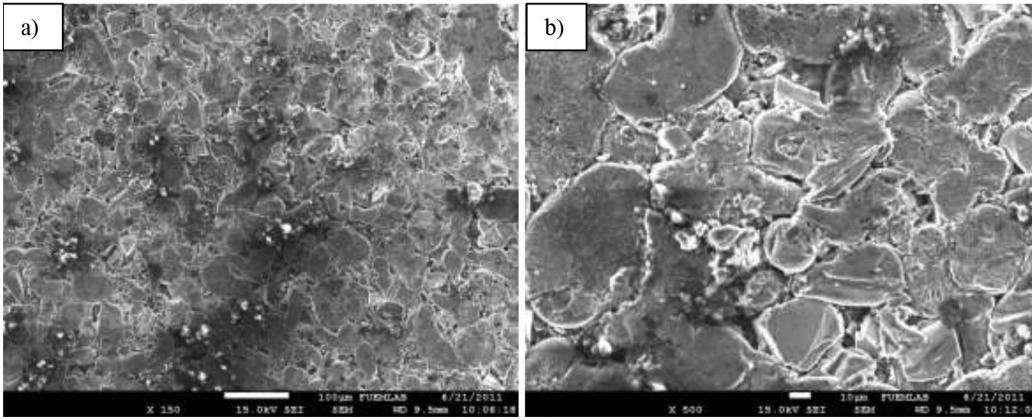
3. Sonuçlar ve tartışma (Results and discussion)

Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen $Al_7Si\%10B_4C$ kompozitlerinin mikroyapı resimleri Şekil 2-4'te verilmiştir. SEM fotoğrafları incelendiğinde sinterlemenin başarılı olarak gerçekleştiği görülmektedir. Uygulanan sinterleme sıcaklıklarının hepsinde B_4C partiküllerinin homojen bir dağılım gösterdiği ve topaklanmaların olmadığı görülmüştür. Numunedeki toz taneciklerinin sinterleme sıcaklığının etkisi ile birbirleriyle etkileşimlerinin arttığı ve tane yapısının değiştiği görülmektedir. Sinterleme sıcaklığındaki artış ile birleşme eğiliminin arttığı ve tanelerinde buna bağlı olarak büyüdüğü görülmektedir.

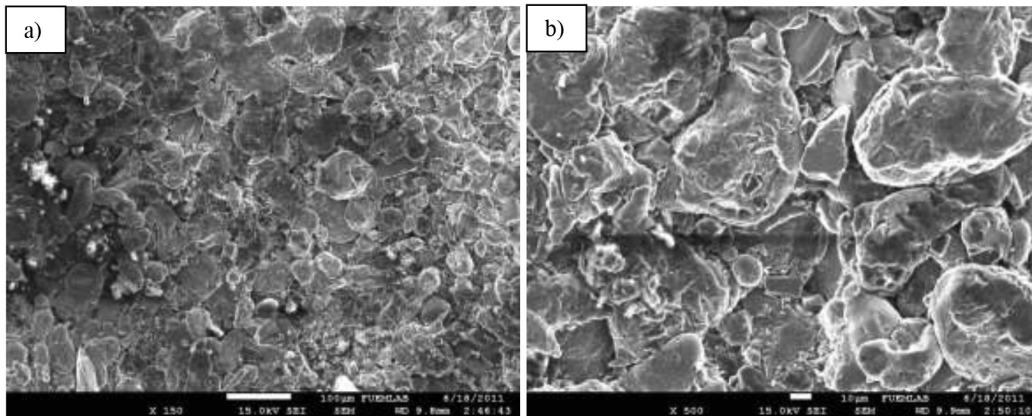
Mikro yapı fotoğrafları ve EDS analiz sonuçlarından görüleceği üzere B_4C takviye fazı matris fazı olan Al-Si içerisinde eşit ve düzenli bir şekilde yerleşmiştir. Bu durumun mekanik alaşımlama esnasında ve tozların preslenmesi sırasında oluştuğu düşünülmektedir. Mekanik alaşımlama esnasında şekil değiştirmiş olan toz partiküllerinin birbirlerine değme alanları büyür ve sıkıştırma sonrası partiküller arası adhezyon kuvveti artar. Böylece şekil değiştirme yeteneği kalmayan tozlar soğuk kaynak olur [19]. Al- B_4C kompozitlerde matris fazı olan alüminyum, bor karbür parçalarının etrafını sararak kırılğan olan takviye fazını mukavemetli hale getirir [20].



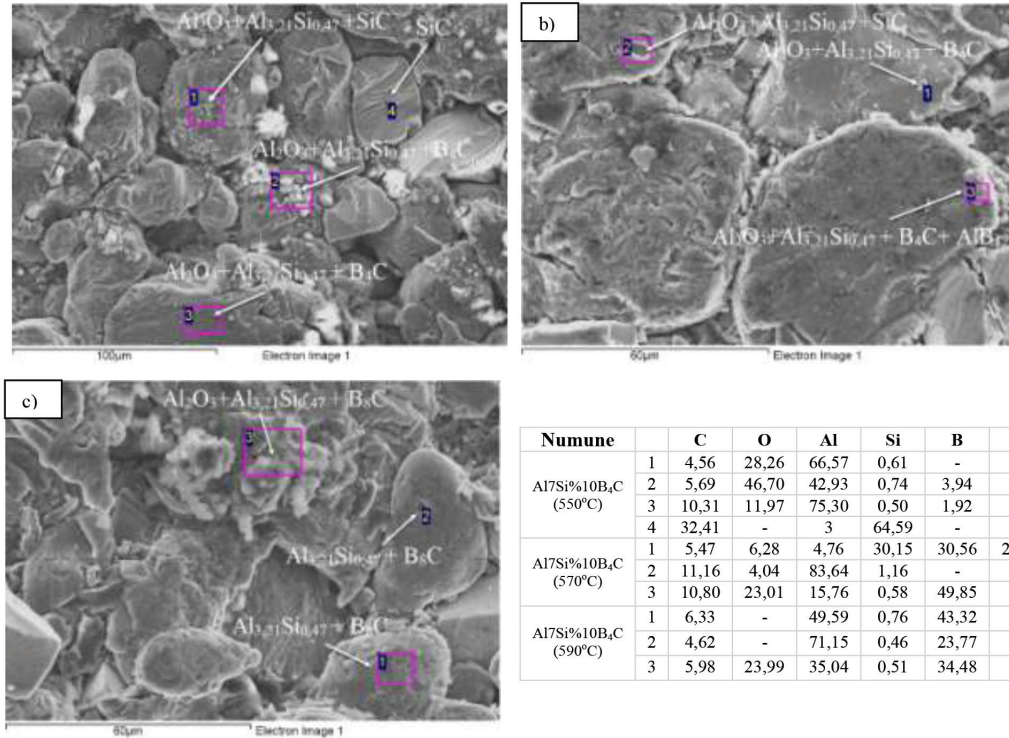
Şekil 2. 550°C'de sinterlenen $Al_7Si\%10B_4C$ SEM görüntüleri a) X150, b) X500 ($Al_7Si\%10B_4C$ SEM images sintered at 550 °C a) X150, b) X500).



Şekil 3. 570 °C'de sinterlenen $Al_7Si\%10B_4C$ SEM görüntüleri a) X150, b) X500 ($Al_7Si\%10B_4C$ SEM images sintered at 570 °C a) X150, b) X500).



Şekil 4. 590°C'de sinterlenen $Al_7Si\%10B_4C$ SEM görüntüleri a) X150, b) X500 ($Al_7Si\%10B_4C$ SEM images sintered at 590 °C a) X150, b) X500).

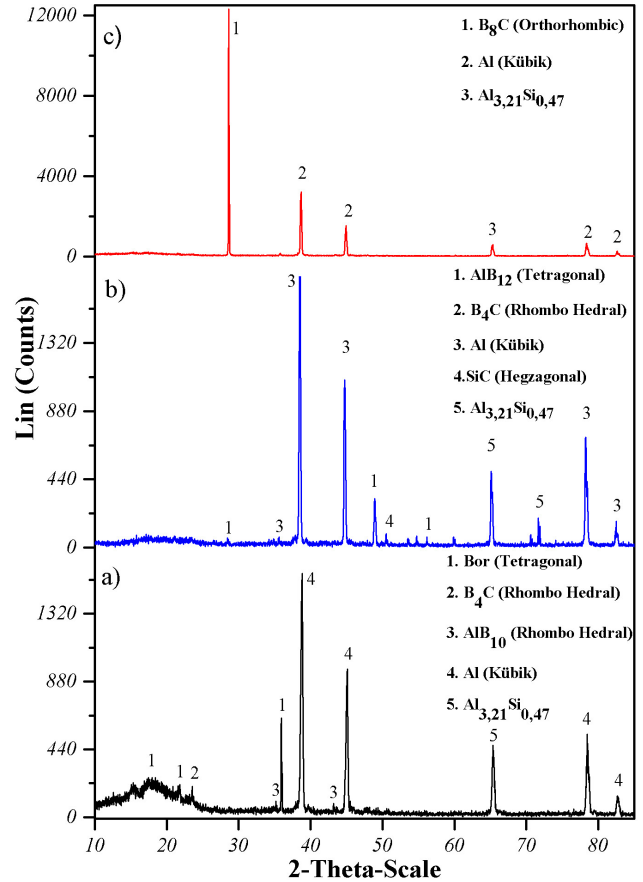


Şekil 5. Deney numunelerine ait EDS analiz noktalarını gösteren SEM fotoğrafı (X3000) a) Al₇Si%10B₄C-550 °C, b) Al₇Si%10B₄C-570 °C c) Al₇Si%10B₄C-590 °C (SEM photograph showing the EDS analysis points of the test samples (X3000), a) Al₇Si%10B₄C-550 °C, b) Al₇Si%10B₄C-570 °C c) Al₇Si%10B₄C-590 °C).

Numunelere ait EDS analiz noktalarını gösteren SEM fotoğrafı Şekil 5'te verilmiştir. EDS analizleri numune üzerindeki farklı noktalardan alınmıştır. Matris ve takviye üzerinde farklı bölgelerden alınan EDS analizleri incelendiğinde; yapı içerisinde alüminyum (Al), silisyum (Si), karbon (C), bor (B), oksijen (O) ve demir (Fe) elementleri tespit edilmiştir. EDS sonuçlarında yapıda oksijen kirlenmesine rastlanmıştır. Bunun nedeni kompozitin yapısında bulunan elementlerin oksijene olan eğilimleridir. Alüminyumun oksijene karşı afinitesi yüksektir, ortamda ki hava ile temas eden alüminyum oksijen ile reaksiyona girer ve bir oksit film tabakası (Al₂O₃) oluşturur [21].

Numunelerden alınan XRD analizi sonuçları Şekil 6'da verilmiştir. XRD grafikleri incelendiğinde 550°C' de sinterlenen Al₇Si%10B₄C numunesinde Bor (Tetragonal), B₄C (Rhombic Hedral), AlB₁₀ (Rhombic Hedral), Al (kü-bik), Al_{3,21}Si_{0,47} faz ve bileşiklerinin oluştuğu tespit edilmiştir. 570 °C'de sinterlenen Al₇Si%10B₄C numunesinde AlB₁₂ (Tetragonal), B₄C (Rhombic Hedral), Al (kü-bik), SiC (Hegzagonal), Al_{3,21}Si_{0,47} faz ve bileşiklerinin oluştuğu tespit edilmiştir. 590 °C' de sinterlenen Al₇Si%10B₄C numunesinde B₈C (Orthorhombic), Al (kü-bik), Al_{3,21}Si_{0,47} faz ve bileşiklerinin oluştuğu tespit edilmiştir. Matris fazını oluşturan Al, takviye B₄C'ü ısılatmış ve AlB₁₀, AlB₁₂ ikili fazlarının oluşmasını sağlamıştır. Al_{3,21}Si_{0,47} intermetalik bileşiği matrisi oluşturan Al ve Si arasındaki reaksiyondan kaynaklanmaktadır.

Pyzik ve Beaman [22], yaptıkları çalışmada B₄C takviyeli Al kompozitlerde Al-B-C fazı gelişiminin 450 °C'de başladığını Al₄BC oluştuğunu, 600 °C'nin üzerindeki ısı



Şekil 6. Deney numunelerine ait XRD analiz grafiği a) Al₇Si%10B₄C-550 °C b) Al₇Si%10B₄C-570 °C c) Al₇Si%10B₄C-590 °C (XRD analysis graph of the test specimens a) Al₇Si%10B₄C-550 °C b) Al₇Si%10B₄C-570 °C c) Al₇Si%10B₄C-590 °C).

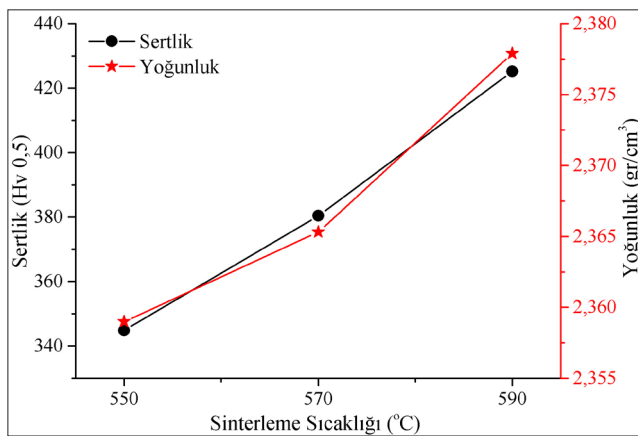
Çizelge 3. Numunelerin sinterleme sonrası yoğunluk değerleri (Density values of samples after sintering).

Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Matris Alaşımı		Takviye	Numune Teorik Yoğunluk (gr/cm ³)	Sinterlenmiş Numune Yoğunluk (gr/cm ³)	Numune Doluluk Oranı (%)
	Al (%)	Si (%)	B ₄ C (%)			
550	83,7	6,3	10	2,5666	2,3590	91,91
570	83,7	6,3	10	2,5666	2,3653	92,16
590	83,7	6,3	10	2,5666	2,3779	92,65

uygulamalarında ise AlB₂, Al₄BC, AlB₂₄C₄ ve Al₄C₃ gibi fazların oluşabildiğini belirtmişlerdir. Viala ve ark. [18] yaptıkları çalışmada ise 1141 ± 4 K sıcaklıklarda reaksiyon ürünleri olarak Al₃BC ve AlB₂ oluştuğunu, 1141 K'den daha yüksek sıcaklıklarda Al₃BC ve AlB₂'nin yerini Al₃B₄₈C₂, b-AlB₁₂ fazlarının aldığı belirtilmiştir.

Farklı sinterleme sıcaklıkları uygulanarak üretilen numunelerin yoğunluk ölçüm sonuçları Çizelge 3'te verilmiştir. Sonuçlara göre, sinterleme sıcaklığındaki artış ile numunelerin sinterleme sonrası yoğunlukları ve % doluluk oranları artmıştır. En yüksek sinterleme sonrası yoğunluk değeri 590 °C de sinterlenen Al7Si%10B₄C numunesinde 2,3779 gr/cm³ ayrıca aynı numunede % doluluk oranının ise % 92,65 olduğu görülmüştür. Sinterleme sıcaklıklarındaki artış matris fazını oluşturan Al-Si'un yüzey enerjisini artırmış ve sinterlemenin daha yoğun oluşmasını sağlamıştır. Al-B₄C Kompozitlerde sıcaklık artışı Al'u hareketlendirerek gözenekleri doldurur ayrıca Al ve B₄C arasında oluşan bileşiklerde kompozitlerin bağlı yoğunluğunu etkilemektedir [23].

Sinterleme sıcaklığına bağlı olarak sertlik ve sinterlenen numunelerden ölçülen yoğunluk değişimlerini gösteren grafik Şekil 7'de verilmiştir. Grafik incelendiğinde, Al7Si%10B₄C kompozitlerde sinterleme sıcaklarındaki artışın sertlik değerlerini de artırdığı görülmektedir, en yüksek sertlik değeri 590 °C de sinterlenen Al7Si%10B₄C numunesinde 425,2 Hv olarak tespit edilmiştir. Numunelerde artan sinterleme sıcaklığı ile porozite oranı düşmüş ve yoğunluk değerleri artmıştır, ayrıca artan sinterleme sıcaklığı matris-takviye arası reaksiyonu etkileyerek sertlik değerlerini artırmıştır.



Şekil 7. Al7Si%10B₄C kompozitinin sinterleme sıcaklığının sertlik ve yoğunluğa etkisi (Hardness and density effect of sintering temperature of Al7Si%10B₄C composites).

4. Sonuçların değerlendirilmesi (Conclusions)

1. Al-7Si matrisli ve ağırlıkça %10 B₄C takviye katkılı kompozitler; 450 MPa basınçta soğuk preslenmiş ve 550, 570, 590 °C'de argon atmosferi ortamında sinterlenerek üretilebilmiştir.
2. Al7Si%10B₄C kompozit malzemelerde sinterleme sıcaklığının etkisi, XRD, SEM, mikro sertlik deneyleri yapılarak analiz edilmiş ve farklı sinterleme sıcaklıkları öngörülen etkiyi sağlamıştır.
3. SEM incelemelerinde tüm numunelerde matris içerisinde takviye partikül dağılımının iyi olduğu görülmüş, sinterleme sıcaklığındaki artış ile tozlardaki bağlanmanın da arttığı görülmüştür.
4. X ışınları kırınımı (XRD) tayini ile numunelerde B₄C, B₈C, Al_{3,21}Si_{0,47}, AlB₁₀, AlB₁₂ faz ve bileşikleri tespit edilmiştir.
5. SEM ve EDS analizlerinden görüldüğü üzere B₄C takviye fazları Al matris tarafından sarılmıştır.
6. Sinterleme sıcaklığındaki artış numunelerin gerçek - teorik yoğunluk değerlerini artırmıştır. En yüksek gerçek yoğunluk değeri 590 °C'de sinterlenen Al7Si%10B₄C numunesinde 2,3779 gr/cm³, teorik yoğunluğun ise % 92,65 olduğu görülmüştür.
7. Sinterleme sıcaklığındaki artış ile sertlik artmıştır, en yüksek sertlik değeri 590 °C'de sinterlenen numunede 425,2 HV olarak ölçülmüştür.

5. Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma FÜBAP tarafından 2093 no'lu araştırma projesi kapsamında desteklenmiştir.

6. Kaynaklar (References)

- [1] Cerit A. A., Karamis M. B., Nair F., Yıldızlı K., Effect of reinforcement particle size and volume fraction on wear behaviour of metal matrix composites, Journal of Balkan Tribological Association, 12 (4), 482-489, 2008.
- [2] Jiang L., Wen H., Yang H., Hu T., Topping T., Zhang D., Schoenung J. M., Influence of length-scales on spatial distribution and interfacial characteristics of B₄C in a nanostructured Al matrix, Acta Mater., 89, 327-343, 2015.
- [3] Li M., Ma K., Jiang L., Yang H., Lavernia E. J., Zhang L., Schoenung J. M., Synthesis and mechanical be-

- havior of nanostructured Al 5083/n-TiB₂ metal matrix composites, *Mater. Sci. Eng., A*, 656, 241-248, 2016.
- [4] Casati R., Vedani M., Metal matrix composites reinforced by nano-particles a review, *Metals*, 4 (1), 65-83, 2014.
- [5] Sharifi E. M., Karimzadeh F., Enayati M. H., Fabrication and evaluation of mechanical and tribological properties of boron carbide reinforced aluminum matrix nanocomposites, *Mater. Des.*, 32 (6), 3263-3271, 2011.
- [6] Aluminija V. H. K. N. O., Wear behaviour of B₄C reinforced hybrid aluminum-matrix composites, *Materiali in tehnologije*, 49 (1), 9-13, 2015.
- [7] Çolak N.Y. , Turhan H. , Toz Metalurjisi Yöntemi ile Üretilen Al-Si/B₄C Kompozit Malzemenin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28 (2), 259-266., 2016.
- [8] Toptan F., Kilicarslan A., Karaaslan A., Cigdem M., Kerti I., Processing and microstructural characterisation of AA 1070 and AA 6063 matrix B₄Cp reinforced composites, *Mater. Des.*, 31, 87-91, 2010.
- [9] Mohanty R. M., Balasubramanian K., Seshadri S. K., Boron carbide-reinforced aluminium 1100 matrix composites: fabrication and properties, *Mater. Sci. Eng. A*, 498 (1-2), 42-52, 2008.
- [10] Topçu I., Gülsoy H. O., Kadioğlu N., Güllüoğlu A. N., Processing and mechanical properties of B₄C reinforced Al matrix composites, *J. Alloys Compd.*, 482 (1-2), 516-521, 2009.
- [11] Lü P., Yue X. Y., Yu L., Ru H. Q., Effect of in situ synthesized TiB₂ on the reaction between B₄C and Al in a vacuum infiltrated B₄C-TiB₂-Al composite, *J. Mater. Sci.*, 44 (13), 3483-3487, 2009.
- [12] Ghasali E., Alizadeh M., Ebadzadeh T., hossein Pakseresht A., Rahbari A., Investigation on microstructural and mechanical properties of B₄C-aluminum matrix composites prepared by microwave sintering, *J. Mater. Res. Technol.*, 4 (4), 411-415, 2015.
- [13] Hu H. M., Lavernia E. J., Harrigan W. C., Kajuch J., Nutt S. R., Microstructural investigation on B₄C/Al-7093 composite, *Mater. Sci. Eng., A*, 297(1-2), 94-104, 2001.
- [14] Jung J., Kang S., Advances in Manufacturing Boron Carbide-Aluminum Composites, *J. Am. Ceram. Soc.*, 87 (1), 47-54, 2004.
- [15] Frage N., Levin L., Frumin N., Gelbstein M., Dariel M. P., Manufacturing B₄C-(Al, Si) composite materials by metal alloy infiltration, *J. Mater. Process. Technol.*, 143, 486-490, 2003.
- [16] Gomez L., Busquets-Mataix D., Amigo V., Salvador M. D., Analysis of boron carbide aluminum matrix composites, *J. Compos. Mater.*, 43(9), 987-995, 2009.
- [17] Halverson D. C., Pyzik A. J., Aksay I. A., Snowden W. E., Processing of Boron Carbide-Aluminum Composites, *J. Am. Ceram. Soc.*, 72 (5), 775-780, 1989.
- [18] Viala J. C., Bouix J., Gonzalez G., Esnouf C., Chemical reactivity of aluminium with boron carbide, *J. Mater. Sci.*, 32 (17), 4559-4573, 1997.
- [19] Kumdalı F., Alüminyum Matrisli B₄C Takviyeli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemi İle Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008.
- [20] Alp E., Karaçay E., Cabbar H. C., Düşük sıcaklıkta bor karbür üretimi ve karakterizasyonu, *Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University*, 28 (2), 2013.
- [21] Güler M., Alüminyum alaşımlarında inklüzyon çeşitleri ve önleyici faaliyetler, *Metalurji*, 184 (07), 36-42, 2017.
- [22] Pyzik A. J., Beaman D. R., AlB₄C Phase Development and Effects on Mechanical Properties of B₄C/Al Derived Composites, *J. Am. Ceram. Soc.*, 78 (2), 305-312, 1995.
- [23] Zhang L., Wang Z., Li Q., Wu J., Shi G., Qi F., Zhou X., Microtopography and mechanical properties of vacuum hot pressing Al/B₄C composites, *Ceram. Int.*, 44 (3), 3048-3055, 2018.