



Araştırma Makalesi / Research Article

h-BOR NİTRÜR TAKVİYESİ İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ TİTANYUM METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF THE MECHANICAL BEHAVIOR OF TITANIUM METAL MATRIX COMPOSITES REINFORCED WITH h-BORON NITRIDE

İsmail TOPCU¹

<https://doi.org/10.55071/ticaretfbid.1254936>

Sorumlu Yazar / Corresponding Author
ismail.topcu@alanya.edu.tr

Geliş Tarihi / Received
22.02.2023

Kabul Tarihi / Accepted
09.07.2023

Öz

Titanyum ve titanyum alaşımları, yüksek özgül dayanımları ve çeşitli endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanıldıkları için yoğun ilgi çekmiştir. Seramik parçacıklarla güçlendirilmiş titanyum metal matrisli kompozitler (TMMC'ler), öncelikle yüksek özgül E-modülleri, toklukları, yüksek sıcaklıkları, yüksek özgül dayanımları, iyi korozyon dirençleri ve iyi aşınma dirençleri nedeniyle havacılık, ulaşım ve endüstriyel sektörlerdeki yapısal uygulamalar için önemli bir potansiyele sahiptir. TMMC'lerde SiC, Bu çalışmada Titanyuma hegzagonal h-BN takviyesi ve toz metalurji prosesi üretim yöntemi ile dinamik yükler altındaki yoğunlukları ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Üretilen kompozitlerde takviye h-BN oranları ilk deneyde hacimce %10, %15 ve %20 olarak seçilmiştir. Bilyeli değirmende dört saat karıştırıldıktan sonra tozlar tek eksenli cihazda preslenmiş, daha sonra farklı sıcaklıklarda sinterlenmiştir. 1300 °C'de yüksek saflıkta argon atmosferinde 1 saat süre ile bekletilmiştir. Sinterleme işlemi öncesi yüksek saflıkta argon atmosferinde 600°C'de bağlayıcı uzaklaştırılmıştır. h-BN içeriğinin ve sinterleme sıcaklığının mekanik özellikler ve yoğunluklar üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen verilere göre; h-BN takviye oranının artışı ile kompozitlerin sertliğinin azaldığını ancak sinterleme sıcaklığının artırılması ile sertlik değerlerinin iyileştirilebileceği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: h-BN, mekanik özellikler, Ti6Al4V, toz metalurjisi.

Abstract

Titanium and titanium alloys have attracted interest because they offer high specific strengths and are widely used across various industrial applications. Titanium metal matrix composites (TMMCs) reinforced with ceramic particles have considerable potential for structural applications in the aerospace, transportation and industrial sectors primarily because of their high specific modulus, toughness, elevated temperature, high specific strength, good corrosion resistance and good wear resistance. In this work, hexagonal boron nitride (h-BN)-embedded TMMCs (Ti6Al4V/h-BN) composites were prepared using a conventional powder metallurgy process and their densities and mechanical properties under dynamic loadings were investigated. In manufactured composites proportions of reinforced BN were chosen for first experiment to be 10%, 15%, and 20% by volume. After mixing an planetary ball mill for four hours, the powders were pressed by uniaxial, then they were sintered at temperatures of 1300 °C under the high purity argon atmosphere for an hour. Before the sintering process, binder was removed at 600°C under the high purity argon atmosphere. Effects of h-BN content and sintering temperature on the mechanical properties and densities were primary interest. The results suggested that an increase in h-BN content reduced the hardness of the composites, but that the hardness could be improved by increasing the sintering temperature.

Keywords: h-BN, mechanical properties, powder metallurgy, Ti6Al4V.

¹Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Rafet Kayış Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Antalya, Türkiye.
ismail.topcu@alanya.edu.tr, Orcid.org/0000-0002-2998-6569.

1. GİRİŞ

Toz Metalurjisi, elementel veya ön alaşımlı tozları bir arada harmanlayarak, bu karışımı bir kalıpta sıkıştırarak ve preslenmiş parçayı kontrollü bir atmosfer fırınında sinterleyerek veya ısıtarak metalürjik parçacıkları birbirine bağlayarak, güvenilir ağ şekilli bileşenler üretmenin oldukça gelişmiş bir yöntemidir. P/M süreci, nihai boyutlarda basit veya karmaşık parçalar üretmede oldukça uygun maliyetli olan avantajlı bir imalat yöntemidir (Koczak & Premkumar, 1989).

Geleneksel metalik malzemeler bu tür gereksinimleri nadiren karşılar. Bununla birlikte, metal matrisli kompozitler alanındaki son gelişmeler bu zorluğun üstesinden gelmiştir. Son yıllarda geliştirilen birçok metal matrisli kompozit, çeşitli özellik gereksinimleri kombinasyonlarını karşılayacak özelliklere sahiptir. Titanyum bazlı kompozitler, bu tür metal matrisli kompozitlerin önemli bir grubunu oluşturur (Chandrasekar ve ark. 2007, Alman ve ark.1999). Seramik parçacıklarla güçlendirilmiş titanyum metal matrisli kompozitler (TMMC'ler), öncelikle yüksek özgül modülleri, toklukları, yüksek sıcaklıkları, yüksek özgül dayanımları, iyi korozyon dirençleri ve iyi aşınma dirençleri nedeniyle havacılık, ulaşım ve endüstriyel sektörlerdeki yapısal uygulamalar için önemli bir potansiyele sahiptir (Mosleh ve ark 2009).

Bn, iyi fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı günümüzde birçok uygulamada kullanılan sentetik bir refrakter malzemedir (Lian, ve ark Topcu ve ark 2019, Topcu ve ark 2020). BN, altıgen BN (hBN), kübik BN (cBN), turbostratik BN (tBN), vurtzitik BN (wBN), eşkenar dörtgen BN (rBN) ve patlayıcı BN (eBN) gibi çeşitli kristal yapılarda başarıyla sentezlenip elde edilmiştir. Bor nitrür (BN), son derece yüksek erime sıcaklığı, termal şok direnci, kimyasal inert ligi, toksik olmaması ve çevre güvenliği nedeniyle yapısal uygulamalar için umut verici bir malzeme olarak kabul edilmiştir (German, 2005, Topcu ve ark.2021, Şahin ve ark 2020). Özellikle BN'nin erimiş metal tarafından zayıf ıslana bilirligi çok yi bir özelliğidir. Bu nedenle BN bazlı kompozitler, çelik ve demir dışı metallerin üretim endüstrisinde kullanılabilir (Lavemia ve ark 1991). Hem bir refrakter hem de bir yağlayıcıdır (Huda ve ark 1995, Topcu ve ark, 2018). h-BN, mükemmel yağlama özellikleri sağlayan grafit benzer bir kristal yapıya sahiptir (Lian ve ark, 2010).

Toz metalürjisi (T/M) teknolojisi, işlemenin en aza indirilmesini ve böylece maliyetlerin düşürülmesini sağlayan net şekilli bileşenlerin üretilmesi için kullanışlı yöntemdir (Wang ve ark, 2012). Toz teknolojileri, yalnızca taklit edileme yetenekleri nedeniyle değil, aynı zamanda tasarım özellikleri nedeniyle de mühendisler için önemlidir (German, 2005).

Kompozit numune üretiminde dört temel parametre söz konusudur. Öğütme, karıştırma, sıkıştırma ve sinterleme (Wang ve ark, 2012). Yaygın olarak kullanılan; Al, Ti, Mg, Ni, Cu, Pb, Fe, Ag, Zn, Sn ve süper alaşımları kullanılmaktadır. Al, Ti ve Mg alaşımları diğerlerine göre geniş uygulama alanlarına sahiptir (Topcu,2020).

Tablo 1. Yaygın olarak kullanılan metallerin ve alaşımlarının bazı tipik özellikleri

| Metaller | Yoğunluk (gr/cm ³) | Young Modülü (GPa) | Akma Dayanımı (MPa) | Çekme Dayanımı (MPa) |
|-----------------|--------------------------------|--------------------|---------------------|----------------------|
| Alüminyum | 2.7 | 70 | 40 | 200 |
| Bakır | 8.9 | 120 | 60 | 400 |
| Nikel | 8.9 | 210 | 70 | 400 |
| Ti-6Al-4V | 4,33 | 110 | 900 | 1000 |
| Paslanmaz Çelik | 7,69 | 195 | 240 | 365 |
| Karbon Çeliği | 7.9 | 210 | 250 | 420 |

Kompozit malzeme yapısal uygulamalarda kullanılacaksa, takviye malzemesinin yüksek mukavemete, elastik modüle ve düşük yoğunluğa sahip olması gerekir. Köşeli parçacıklar stres konsantrasyonuna neden olduğundan ve sünekliği azalttığından, parçacığın parçacık şekli mekanik özellikler üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir (Lian ve ark, 2010).

Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen kompozitler farklı takviye ve üretim yöntemler ile iyileştirilen özelliklerinden dolayı genel kompozitlerden ayrılmaktadır. Toz metalurjisinde ana matriks ve takviye malzeme olarak metal tozları kullanılarak üstün özelliklerle kompozitlerin üretilmesini ifade eder. Toz metalurjisi endüstriyel talepleri karşılayabildiğinden ve üretimde yüksek kolaylık sağladığından uygun bir üretim tekniğidir (Sahin, 2022). Toz metalurjisi, sıkıştırılabilir metal tozlarını güçlü ve yüksek performanslı parçalara dönüştürmek için kullanılan süreçlerin bir sonucudur. Bu yöntem, süresiz toz parçacıkları ile takviye edilmiş kompozitlerin hazırlanmasında yaygın olarak kullanılırken sinterleme prosesinde kullanılan yöntem sıvı sinterleme tekniği alaşımların ıslana bilirliliğinin düşük olması nedeniyle benimsenen ileri bir tekniktir. diğer tekniklerle karşılaştırıldığında, nispeten düşük enerji tüketimi ve düşük maliyet, ile bu yöntemin yaygınlaşmasını sağlayan bir avantajdır. Toz metalurjisi, yüksek erime noktasına sahip metallerin ve kompozitlerin üretilmesine olanak sağlamaktadır. Bu yöntemde yoğunluk farklılıklarından kaynaklanan oksidasyon, ayrışma, gaz absorpsiyonu ve alaşımlama gibi problemler ortadan kaldırılabilmektedir (Topcu, 2020).

Mekanik alaşımlama (MA), elementel tozlardan başlayarak ticari olarak yararlı malzemelerin hem denge hem de denge dışı fazlarını sentezlemek için basit ve kullanışlı bir tekniktir. Aynı zamanda önemli teknik avantajları olan ekonomik bir süreçtir. Mekanik alaşımlamanın en büyük avantajlarından biri, normalde karışmayan elementlerin alaşımlaması gibi başka hiçbir teknikle mümkün olmayan yeni alaşımların sentezidir. Bunun nedeni, mekanik alaşımlamanın tamamen katı hal işleme tekniği olması ve bu nedenle faz diyagramlarının getirdiği sınırlamaların burada geçerli olmamasıdır. Mekanik alaşımlama (MA) normalde kuru, yüksek enerjili bir bilyeli öğütme tekniğidir ve ticari olarak faydalı ve bilimsel olarak ilginç çeşitli materyaller üretmek için kullanılmıştır. Şekil.2. MA sürecini kullanan bir üretim proses şemasıdır. Hammaddeler, kullanılan değirmen tipi, karıştırma işlemi ve ısıl işlemin detayları istenen ürün tipine göre değişir, ancak işleme süreci genelde benzerdir. Bazı küçük adımların eklenmesi veya bazılarında değiştirilmesi mümkündür. MA'nın asıl süreci, tozların doğru oranda karıştırılması ve tozun öğütme atmosferi (genellikle çelik bilyeler) ile değirmene yüklenmesi ile başlar (Suryanarayana, 2004).

Öğütme/Karıştırma teknikleri elde edilmesi gereken özelliklere sahip kompozitleri oluşturmak için gelişmiştir. Başarılı bir teknik, alaşımlı bir bileşik parçacık oluşturmak için karıştırılan bilyeler arasındaki aşınma hareketini kullanan mekanik alaşımlamadır (Lavemia & Srivatsan, 1991). Öğütme, sert bilyeler, çubuklar veya çekiçler kullanılarak yapılan mekanik darbeyi ifade eder ve kırılabilir malzemelerden toz üretmeye yönelik klasik bir yaklaşımdır. En basit cihaz, Şekil.2'de gösterildiği gibi, bilyeler ve öğütülecek malzeme ile dolu silindirik bir kavanozdan oluşan bir kavanoz değirmendir. Kavanoz döndükçe, toplar sürekli olarak toz halindeki malzeme ile çarpışır ve onu daha da küçük parçacıklara ayırır. Kırılabilir bir malzemeyi öğütme yoluyla kırmak için gereken darbe gerilimi, malzemenin kusurlu yapısı ve çatlak ilerlemesine karşı hassasiyet ile ilgilidir. Daha büyük, kırılma için daha az darbe gerilimi gerektirir. Öğütme sırasında parçacık boyutu küçüldükçe gerekli stres arttı (Dorr, 1986).

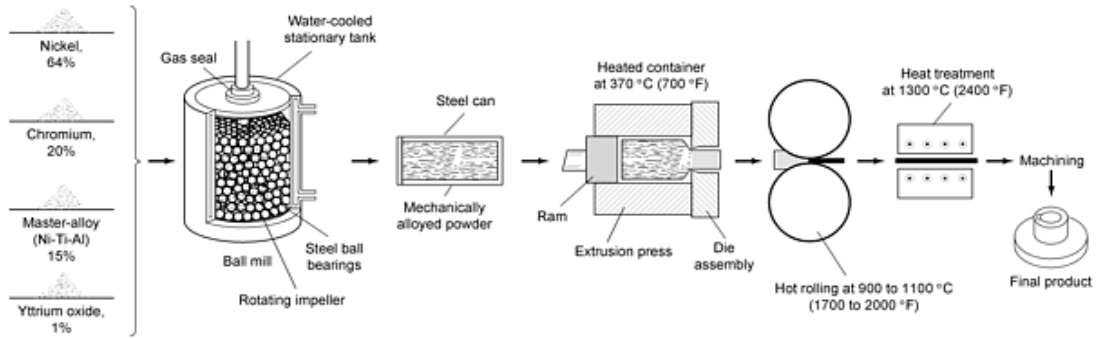
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Malzemeler ve uygulanan işlemler

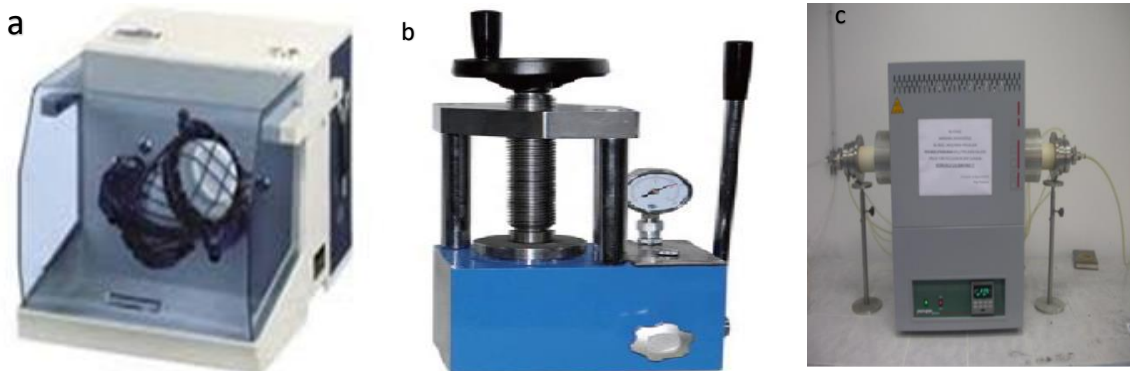
Bu çalışmada, ana matris olarak Ti6Al4V tozu (Coldstream SA, Ath, Belçika) kullanılmıştır. Ti6Al4V tozunun parçacık boyutları 45–150 μm aralığındaydı. H.C. tarafından sağlanan h-BN katı yağlayıcı tozlar. 7–11 μm aralığında parçacık boyutlarına sahip Starck Inc. (Almanya), Takviye malzemesi ana matrise hacimce %10-%20 arasında değişen oranlarda ilave edildi. Toz bileşenler belli bir zaman ve devirde planetary bilyeli değirmende karıştırıldı. Karışık tozlar daha sonra 12 mm çapında silindirik numuneler elde etmek için preslendi. Numunelerin ham yoğunluğu, teorik yoğunluğun yaklaşık %82'si kadardı. Yaş numuneler, 650 °C sıcaklıkta argon atmosferi altında bağlayıcıdan arındırıldı ve 1350°C'de argon atmosferi altında sinterlendi. Numuneler son olarak sinterleme fırınında soğutulmuştur. Ham ve sinterlenmiş yoğunluklar, Metal Tozu Endüstrileri Federasyonu (MPIF) Standardı 42'ye (2002) göre deneysel olarak belirlendi.

2.2. h-BN takviyeli titanyum matrisli numune üretimi

Kompozitlerin üretimi sırasında %10, %15 ve %20 hacimce h-BN ve %1 oranında Poli akrilonitril (PAN) bağlayıcı ile trubula aşındırmalı helezonik karıştırma cihazında Ti6Al4V tozuna takviye edilerek çalışmalar başlamıştır. Karıştırma süresi üç saattir. Bilyenin toza ağırlık oranı 3:1, öğütme hızı 200 rpm, bilye çapı: 10 mm alümina bilye. Toz malzemeler tek eksenli pres ile 30 MPa 'da kolayca preslenmiştir. Preslenen numuneler farklı zaman aralıklarında (1saat, 2saat, 3saat) ve 1350 °C de yüksek saflıkta argon atmosferinde sinterlendi. Çünkü diğer sinterleme atmosferlerinde numunelerin oksitlenmesi söz konusu olabilir.



Şekil 1. Toz metalürjisi ile mekanik alaşımlama akış prosesi (German,2005)



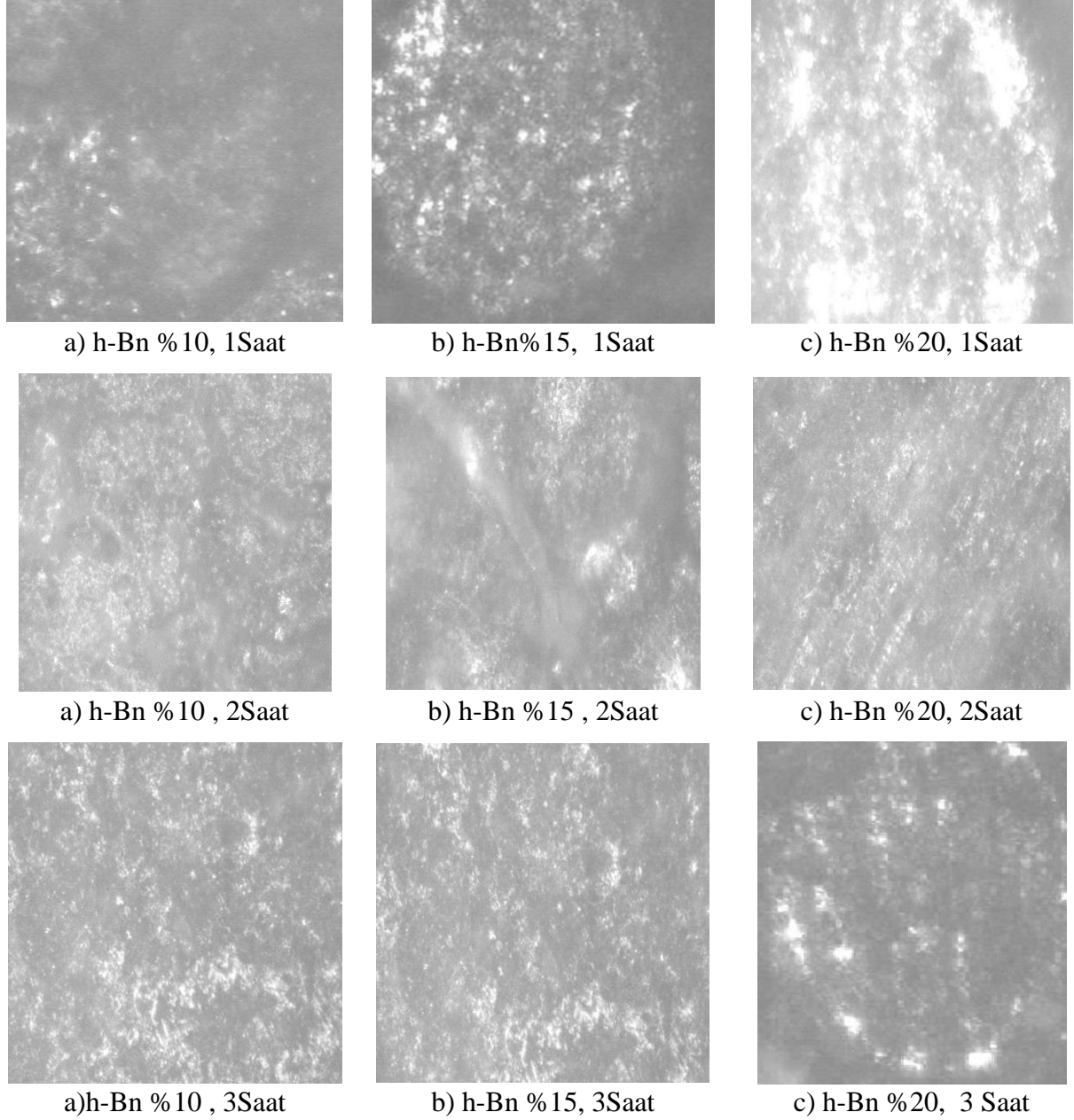
Şekil 2. a) Karıştırma cihazı

b) Pres cihazı

c) Sinterleme fırını

2.3. Mikroskopik inceleme

İncelenen kompozitlerin boyuna kesitlerinden elde edilen metalografik numuneler incelenmek üzere hazırlandı. Tüm numuneler 240, 500, 800 ve 1000 mesh SiC zımpara kağıtları ile özenli bir şekilde zımparalandı. Daha sonra numuneler Al₂O₃ pastası çuhada parlatıldı. Kompozitlerin mikro yapıları LEICA optik mikroskobu ile incelendi.



Şekil 3. Farklı oranlarda 20x (büyütme) ile h-BN ile takviye edilen Ti6Al4V kompozit numunelerinin farklı sinterleme zamanları ile elde edilen mikroyapı görüntüleri

2.4. Sertlik ve testleri

Numunelerin mekanik özellikleri sertlik ölçümleri ile belirlendi. Instron universal sertlik test cihazı kullanılarak metalografik olarak hazırlanmış numunelere sertlik testleri yapılmıştır. Kompozitlerin sertliğini bulmak için Vickers 136° elmas uç ve 300 gr test yükü uygulanarak ölçümler yapıldı. Üretilmiş numune kompozit malzeme olduğu için sertlik izinin homojen olarak

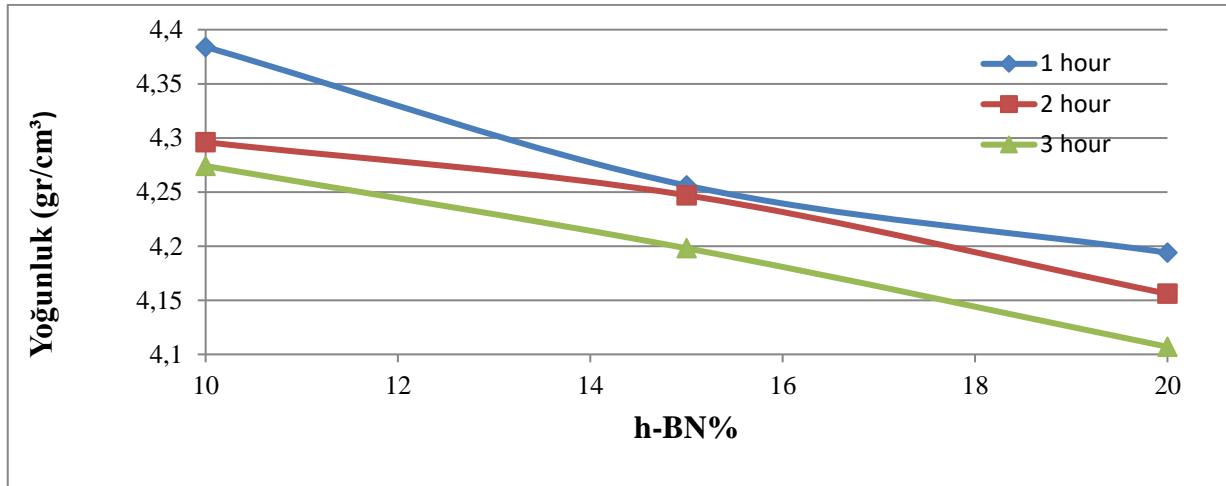
alınması için hem matrisi hem de takviye malzemesinin ölçülmesi gerekmektedir. Sertlik değeri kompozitin kütle sertliğini temsil etmesi için sertlik ölçümleri birbirini izleyen 20 ölçümün ile yapılmıştır. Elde edilen sertlik ölçümü sonuçları 20 değerlerin ortalamasıdır.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Elde edilen numuneler, toz metalürjisi ile üretilmiş, h-BN ile güçlendirilmiş Ti6Al4V tozudur. Tozların özellikleri bir önceki bölümde verilmiş ve farklı miktarlarda h-BN içeren kompozitlerin 350 °C de sinterlenmiş ve ortalama yoğunluk değerleri Tablo.2'de listelenmiştir. Malzemelerin teorik yoğunluğu: Ti6Al4V alaşımı 4,43 gr/cm³, h-BN 2,28 gr/cm³.

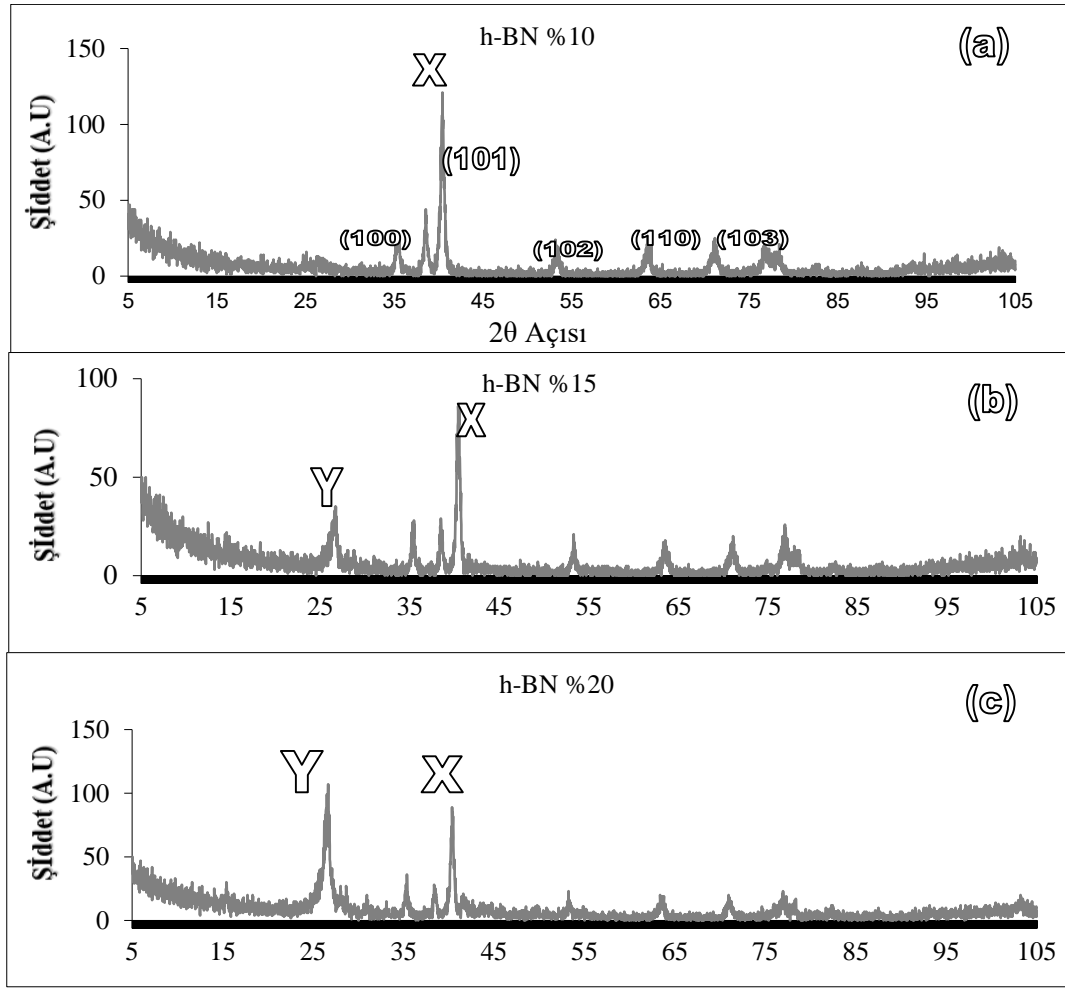
Tablo 2. Kompozit numunelerin saatin fonksiyonu olarak yoğunluğu

| Malzeme | Yoğunluk (gr/cm ³) | | |
|-------------------|--------------------------------|--------|--------|
| | 1 Saat | 2 Saat | 3 Saat |
| Takviye h-BN % 10 | 4,384 | 4,296 | 4,274 |
| Takviye h-BN % 15 | 4,256 | 4,247 | 4,198 |
| Takviye h-BN % 20 | 4,194 | 4,156 | 4,107 |



Şekil 4. h-BN içeriğinin ağırlık yüzdesine göre yoğunluğu

Yoğunluk testleri üç farklı sinterleme sıcaklığı ve üç farklı takviye oranı ile elde edilmiş olan kompozit numunelerin 300 gr ağırlık ölçümü ile bütün numune yüzeyi taranarak gerçekleştirilmiştir. Numunelerin ortalama sertlik değerleri Tablo 2'de listelenmiştir ve h-BN'nin hacimce yüzdesi ve sinterleme zamanı kompozitlerin yoğunluk değerinde azalma olduğu görülmüştür. Bu durum üretilen numunenin zamana göre içyapıdaki poroziteyi elemine etmiş ancak düşük yoğunluğa sahip artan takviye h-BN oranı ile de yoğunluğunun azaldığı Şekil 4'te görülmektedir. BN ve Ti alaşımından elde edilen XRD desenleri Şekil.5'te verilmiştir.

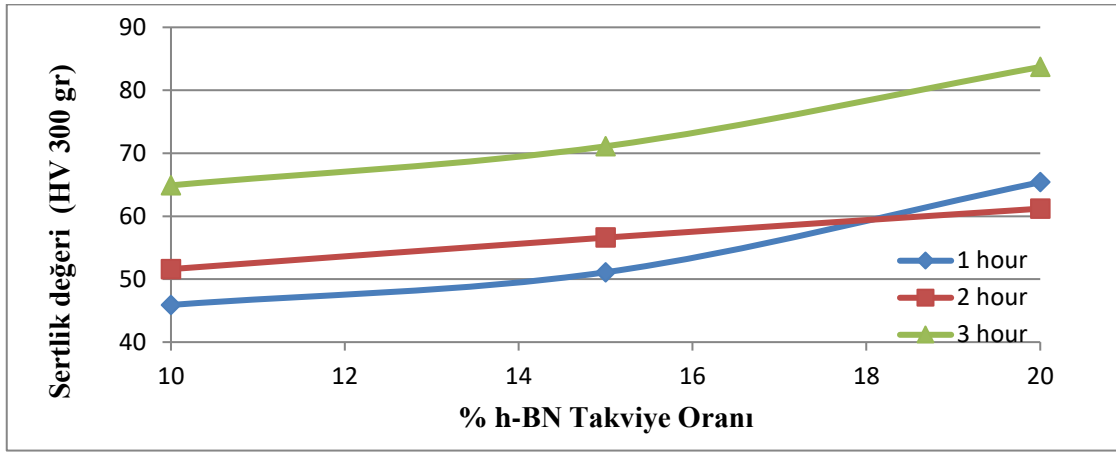


Şekil 5. Farklı hacimde; a) %10h-BN, b) % 15 h-BN, c) %20 h-BN içeren Ti6Al4V alaşım tozunun XRD modelleri

Karakterizasyon testleri üç farklı süresi, üç farklı takviye oranı ve 1350 °C de üretilmiş olan kompozit numunelerin 105 derece ve 20 hassasiyetle taranması ile edilmiştir. Burada ana pik (101) de 39,45(X) derecede görülmüştür. Artan h-Bn oranı ile özellikle %10 ve %15 takviyeli numunelerde sırası ile 26,34 derecede 18,5(Y), 39,6 (Y), 116(Y) Şiddetine sahip pikler görülmüştür. Buda bize elde etmek istediğimiz metal matrisli kompozit üretiminin başarılı sonuç verdiği göstermektedir. Söz konusu sonuçlar Şekil 5’de görülmektedir.

Tablo 3. Farklı sinterleme saatlerine sahip BN'nin sertlik değeri

| Malzeme | Sertlik Değeri (HV 300 gr) | | |
|-------------------|----------------------------|--------|--------|
| | 1 Saat | 2 Saat | 3 Saat |
| Takviye h-BN % 10 | 45,9 | 51,6 | 64,9 |
| Takviye h-BN % 15 | 51,1 | 56,6 | 71,1 |
| Takviye h-BN % 20 | 65,4 | 61,2 | 83,7 |



Şekil 6. Farklı zaman ve farklı % h-BN oranı ile etkilenen kompozit malzemenin sertliği

Vickers sertlik testleri üç farklı sinterleme sıcaklığı ve üç farklı takviye oranı ile elde edilmiş olan kompozit numunelerin 300 gr ağırlık ölçümü ile bütün numune yüzeyi taranarak gerçekleştirilmiştir. Numunelerin ortalama sertlik değerleri Tablo 3'de listelenmiştir ve h-BN'nin hacim yüzdesi arttıkça ve farklı saatlerde kompozitin sertliğinin arttığı Şekil 6'da görülmektedir.

4. DEĞERLENDİRME

- Mevcut çalışmada, farklı h-BN oranları ile güçlendirilmiş Ti6Al4V numunelerinin yoğunluk ve sertlik özellikleri, sıcaklık ve zamanın bir fonksiyonu olarak incelenmiştir.
- Mevcut çalışmanın sonuçları şu şekilde ifade edilebilir;
- Numunelerin yoğunlukları teorik yoğunluğa azalarak yaklaşır.
- Tüm farklı h-BN içerikleri için sinterleme süresi artar.
- Mikroskopik resimler, h-BN parçacıklarının özellikle matris içinde homojen bir şekilde dağıldığını ve ayrışma olmadığını gösterdi. Ancak h-BN partiküllerinin uç kısımlarında porozite varlığı mevcuttur. Ayrıca öğütme işlemlerinden dolayı gözenekler oluşmuştur.
- XRD, artan h-BN içeriğinin, h-BN'nin ana pikinin alanında bir artışa neden olduğunu verir.
- Sıkıştırma tekniği olarak HIP veya CIP kullanan literatürleri araştırdık. Ayrıca h-BN Islatmayan bir malzemedir. Islatmayan araçlar MA tekniği ile kolayca birleşmiyor ve bağlayıcı kullanılmak zorundadır. Bu bağlayıcı, sinterleme işleminden önce çıkarılır. Bağlayıcı uzaklaştırıldığında numune içerisinde porozite oluşabileceği için bağlayıcı giderme prosesinde parametreler dikkatli seçilmelidir. Söz konusu prosesten sertlik ve yoğunluk değerleri etkilenir.
- Artan h-BN hacim yüzdesi ve sinterleme süresi arttıkça kompozitin sertliği de artmaktadır. BN ilavesiyle sertliğin artması, dispersiyon güçlendirme etkisine bağlanabilir.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

KAYNAKÇA

Alman, D.E. & Hawk, JA. (1999). The abrasive wear of sintered titanium matrix ceramic particle reinforced composites. *Wear*, 225–229, 629-639.

- Chandrasekar, P., Balusamy, V., Ravi Chandran, K.S. & Kumar, H. (2007). Laser surface hardening of titanium–titanium boride (Ti–TiB) metal matrix composites. *Scr Mater*, 56(7), 641-644.
- German, R.M. (2005). Powder metallurgy and particulate materials processing. *Metal powder industries federation*. Princeton USA.
- Huda, M.D. & Hashmi, M.S. (1995). Materials, Manufacturing and Mechanical Properties. *Key Engineering Materials*, 104- 107, 37-64.
- Koczak, M. J. & Premkumar, M. K. (1989). High performance powder metallurgy Aluminum alloys an overview. *Agard Conference Proceedings*, 444, 1-18.
- Lavemia, E.J, Srivatsan, T.S., Ibrahim, LA. & Mohammed, F.A. (1991). Processing techniques for particulate reinforced metal aluminium matrix composites, *Journal of Materials Science*, 26, 5965-5978.
- Lian, G. Zhang, X., Zhu, L., Tan, M., Cui, D. & Wang, Q. (2010). A facile solid state reaction route towards nearly monodisperse hexagonal boron nitride nanoparticles, *J. Mater. Chem.*, 20, 3736–3742.
- Michael, A., Jones, F. & David, R.H. (1992). Engineering materials 2 (with corrections ed.), *Pergamon Press*, Oxford.
- Mosleh, M., Atnafu, N.D., Belk, J.H. & Nobles, O.M. (2009). Modification of sheet metal forming fluids with dispersed nanoparticles for improved lubrication, *Wear*, 267, 1220–1225.
- Murad, M. S., Usta, A., Asmatulu, R. & Ceylan, M. (2022). Studying the electrochemical behaviors of anodized metallic implants for improved corrosion resistance. *İstanbul Commerce University Journal of Science*, 21(41), 117-135.
- O’Connell, T.E. (1983). Production of titanium aluminide products. Report AFWAL-TR-83-4050, Wright-Patterson AFB OH.
- Sahin, E.İ. (2022). Microwave electromagnetic shielding effectiveness of ZnNb₂O₆- chopped strands composites for radar and wideband (6.5-18 GHz) applications. *Lithuanian Journal of Physics*, 62, 127-136.
- Sahin, E.I., Emek, M., Ertug, B. & Kartal, M. (2020). Electromagnetic shielding effectiveness of Colemanite/PANI/SiO₂ composites radar and wider frequency ranges. *Beykent University Journal of Science and Engineering*, 13, 34-42.
- Topcu, İ. & Karaman, E. (2019). Çok duvarlı karbon nanotüp takviyeli düzenli/ düzensiz şekilli Ti-6Al-4V kompozitlerin aşınma davranışlarının incelenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7(3), 1249-1260.
- Topcu, İ. & Ceylan, M. (2020). Wear behavior of irregular shape Ti6Al4V powder reinforced with carbon nanotubes. *Journal of Ceramic Processing Research*, 21(5), 539-546.
- Topcu, İ. (2020). Determination of the mechanical properties of al/mwcnt composites obtained with the reinforcement of cu-coated multiwall carbon nanotubes (MWCNTs). *Materiali in Tehnologije*, 54(5), 689-695.

- Topcu, İ. Çetiner, B.N. Güllüođlu, A.N. & Özkan, H.G. (2018). Investigation of creep behavior of CNT reinforced Ti6Al4V under dynamic loads. *J. Chem. Soc. Pak.*, 42, 1-7.
- Topcu, İ., Ceylan, M. & Yılmaz, E.B. (2021). Experimental investigation on mechanical properties of Multi Wall Carbon Nanotubes (MWCNT) reinforced aluminium metal matrix composites. *Journal of Ceramic Processing Research*, 21(5), 596-601.
- Topcu, İ. Güllüođlu, A.N. Gulsoy, H.Ö. & Bilici, M.K. (2019). Karbon nanotüp takviyeli Ti-6Al-4V/KNT kompozitlerin aşınma davranışlarının incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(3), 1441-1450.
- Topcu, İ. (2020). Investigation of wear behavior of particle reinforced AL/B4C composites under different sintering conditions. *Journal of Technical Glasnic*, 14(1),7-14.