



Investigation of wear behavior of Ti-6Al-4V/CNT composites reinforced with carbon nanotubes

İsmail Topcu^{1,2*}, Arif N. Güllüoğlu², M. Kemal Bilici³, H. Özkan Gülsoy⁴

¹Department of Metallurgy & Materials Engineering, Alanya Alaaddin Keykubat University, Alanya, 07752, Antalya, Turkey

²Department of Metallurgy & Materials Engineering, Marmara University, 34722, İstanbul, Turkey

³Department of Jewellery and Jewellery Design, Marmara University, 34722, İstanbul, Turkey

⁴Department of Metallurgy & Materials Engineering, Marmara University, 34722, İstanbul, Turkey

Highlights:

- The highest wear resistance has been obtained in the case of adhesive wear at Carbon Nanotube 4 % content.
- The results showed that addition of carbon nanotube up to 4wt% lowered wear loss and increased wear resistance.
- Increasing volume percent of CNT and sintering temperature increased the hardness of the composite. But, the effect of sintering temperature over 1275 °C is lost after 4-5 volume % of CNT.

Graphical/Tabular Abstract

In this study, the effects of different production conditions and high sintering temperature on microstructure, density and wear resistance of Multi-wall carbon nanotubes (CNTs) powders reinforced with Titanium (Ti-6Al-4V) powder were examined. The powders produced by mechanical alloying were compressed with Cold Isostatic Press. The samples were sintered at 1275 °C for 60 minutes, under high vacuum (1.2 10⁻⁵ mbar). The wear test was carried out on a pin-on-disc wear tester under constant load. It is observed that the wear rate of the reinforced Ti6Al4V / CNT composites decreases with increasing CNT ratio and adds an added value to the wear behavior. As a result, in experimental studies, it is seen that the corrosion resistance of the composite is increased according to the % v / v CNT ratio reinforced by increasing by volume.

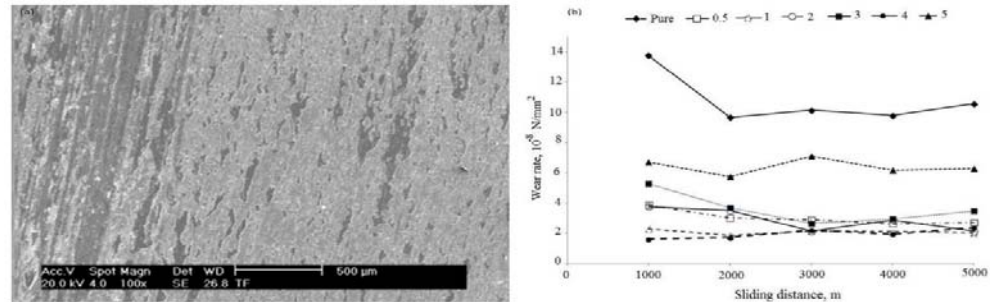


Figure A. a) Worn surfaces of titanium matrix composites b) Wear rate of titanium matrix composites

Keywords:

- Carbon nanotubes
- Wear
- Sintering

Article Info:

Research Article

Received: 31.03.2018

Accepted: 27.05.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.460542

Purpose: The aim of this study was to investigate the effect of Ti6Al4V powders, which were annealed at different ratios (0.5% -5%) by volume, on Ti6Al4V / CNT composites wear behavior.

Theory and Methods:

It has a particle size distribution of D10= 58,27 μ, D50 =110,65 μ, D90=171,39 μ with a density of 4.43 g/cm³ as raw material. MWCNTs reinforcement material were with a density of 2.31 g/cm³. The average particle size of MWCNTs powders were about 10-30 nanometers. Different volume percentage of MWCNTs (0.5 to 5 v/v%) were dispersed into Ti-6Al-4V powders inside glass containers and mixed with the help of a turbula ball mill using alumina balls of same sizes. Specimens were by CIP using a 250 MPa moulding machine. Samples were sintered at 1275 °C by heating rate of 10 °C/min under 1.2x10⁻⁵ mbar under vacuum for 60 min.

Results:

As expected, the reinforcements CNT was effective in improving the wear resistance and friction properties of Ti6Al4V. In the literature review, it is very clear why low doped composites have lower wear resistance, why they increase with increasing contribution tend ratio.

Conclusion:

As a result of the tests of produced composites, it was observed that the hardness values of the composites increased, the densities decreased and the wear resistance improved.

Correspondence:

Author: İsmail Topcu

e-mail:

ismail.topcu@alanya.edu.tr

phone: +90 242 510 6120



Karbon nanotüp takviyeli Ti-6Al-4V/KNT kompozitlerin aşınma davranışlarının incelenmesi

İsmail Topcu^{1,2*}, Arif N. Güllüoğlu², M. Kemal Bilici³, H. Özkan Gülsoy⁴

¹Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Alanya, Antalya, 07452, Türkiye

²Marmara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Kadıköy, İstanbul, 34722, Türkiye

³Marmara Üniversitesi, Uygulamalı Bilimler Yüksekokulu, Kuyumculuk ve Mücevherat Tasarımı Bölümü, Kadıköy, İstanbul, 34722, Türkiye

⁴Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Kadıköy, İstanbul, 34722, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- En yüksek aşınma direnci %4 KNT takviyesi yapılan bileşimde ortaya çıkmıştır.
- Sonuçlar, %4'e varan oranlarda karbon nanotüp aşınmasının yıpranma kaybını ve artan aşınma direncini gösterdi.
- KNT ve sinterleme sıcaklığının artan hacimce yüzdesi, kompozitin sertliğini artırdı. Ancak, sinterleme sıcaklığının 12750C'nin üzerindeki etkisi, %4-5 KNT'den sonra kaybolmuştur.

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 31.03.2018

Kabul: 27.05.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.460542

Anahtar Kelimeler:

Karbon nanotüp,
aşınma,
sinterleme

ÖZET

Bu çalışma da mekanik alaşımlama yöntemiyle Titanyum (Ti-6Al-4V) tozuna takviye edilen Karbon Nanotüplerin farklı üretim sinterleme koşullarının mikroyapı, yoğunluk ve aşınma direnci üzerine etkileri incelenmiştir. Mekanik alaşımlama ile üretilen tozlar, soğuk izostatik pres kalıbı ile 250 MPa basınç altında sıkıştırılarak silindirik kompozit numuneler elde edilmiştir. Üretilen ham numuneler, 1275°C'de 60 dakika süre ile yüksek saflıktaki argon ortamı ve yüksek vakum (1,2 10⁻⁵ mbar) altında sinterlenmiştir. Ti-6Al-4V/KNT metal matrisli kompozitin aşınma davranışı pin-on-disk aşınma test cihazı kullanılarak incelendi. Farklı sinterleme sıcaklıklarında elde edilen Ti-6Al-4V /KNT alaşımlarının aşınma davranışları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Uygun koşullar altında takviyeli Karbon Nano Tüp 'ün aşınma oranını iki dereceden fazla azaltabileceği görülmüştür. Bu geliştirilmiş aşınma performansını takviye oranları ile ilişkilendiren çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Ti-6Al-4V kompozitlerin aşınma deney sonuçları, karbon nano tüp oranlarının değişimi ile farklı aşınma türlerinin oluştuğu ve aşınma direncini arttırdığı gözlenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda aşınma direnci doğrudan hacimce takviye edilen % v/v Karbon Nano Tüp oranları ile değiştiği ve artan takviye oranına bağlı olarak arttığı ancak %5 KNT oranı ile malzemede artan aglomerasyon sonucu bu özelliklerde azalış görülmüştür.

Investigation of wear behavior of Ti-6Al-4V/CNT composites reinforced with carbon nanotubes

H I G H L I G H T S

- The highest wear resistance has been obtained in the case of adhesive wear at Carbon Nanotube 4% content.
- The results showed that addition of carbon nanotube up to 4wt% lowered wear loss and increased wear resistance.
- Increasing volume percent of CNT and sintering temperature increased the hardness of the composite. But, the effect of sintering temperature over 1275°C is lost after 4-5 volume % of CNT.

Article Info

Research Article

Received: 31.03.2018

Accepted: 27.05.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.460542

Keywords:

Carbon nanotubes,
wear,
sintering

ABSTRACT

In this study, the effects of different production conditions and different sintering conditions on microstructure, density and wear resistance of Multi-wall carbon nanotubes (CNTs) powders reinforced with Titanium (Ti-6Al-4V) powder by mechanical alloying were examined. The powders produced by mechanical alloying were compressed with a Cold Isostatic Press die under a pressure of 250 MPa in this molding machine to obtain cylindrical composite specimens. These raw specimens were extruded at 1275°C for 60 minutes in a high purity argon atmosphere and high vacuum (1.2 10⁻⁵ mbar). The erosive wear behavior of the Ti-6Al-4V / CNTs metal matrix composite was studied using a pin-on-disc wear tester. The abrasion behavior of a Ti-6Al-4V / CNTs alloy after various heat treatments has been studied on abrasive wear. Under appropriate conditions it has been shown that reinforced CNTs can reduce the wear rate by more than two orders of magnitude. Various investigations have been carried out detailing the reinforcement rates of this improved wear performance. The friction and wear data show a clear surplus value added to the composite Ti-6Al-4V wear modes. As a result, in the experimental studies made, it is seen that the wear resistance increase according to the v/v % CNTs ratio which is directly supplemented to the volume. However, this properties had been decrease with the %5 CNTs ratio.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: itopcu@marmara.edu.tr, gulluoglu@marmara.edu.tr, mkbilici@marmara.edu.tr, ogulsoy@marmara.edu.tr / Tel: +90 242 510 6120
1442

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Titanyum alaşımlarının havacılık, otomotiv ve biyomedikal endüstrilerinde çok çeşitli uygulamaları vardır. Ağırlıkça %6 Alüminyum ve %4 Vanadyum içeren Ti-6Al-4V alaşımı, ısı işlem kabiliyeti, yeterli mekanik dayanımı, iyi korozyon direnci ve biyouyumluluk nedeniyle uçak, türbin ve cerrahi implantlarda kullanılmıştır [1, 2]. Titanyum alaşımları, mükemmel mekanik özelliklere, paslanmaz çelikten daha yüksek özgül mukavemete ve paslanmaz çelikten daha iyi korozyon direncine sahip oldukları için birçok endüstriyel alanda yaygın şekilde kullanılmaktadır [3]. Bu malzemeler ve Metal Matrisli Kompozitlerin (MMK) üretiminde Toz metalurjisi (TM) tekniği kullanılmıştır [4, 5].

Metal Matris Kompozitlerinde takviye edilen bu elementlerce, özelliklerinin iyi yönde değiştirebilir ve böylece bunların uygulamaları genişletilebilir. Kompozitlerin özelliklerinin değiştirilebilmesi için boyut ve takviye miktarının oranları iyi kontrol edilmesi çeşitli avantajlar sunar [6]. Hafif, yüksek dayanımlı malzemelere olan ihtiyaç, uçağın keşfedilmesinden beri bilinmektedir. Bir malzemenin mukavemeti ve sertliği arttıkça, belirli bir yük taşıyıcı uygulama için gerekli olan malzemenin boyutları ve bunun sonucunda kütle azalır. Bu, uçak ve otomobillerde, yük artışı ve yakıt verimliliğinin iyileştirilmesi gibi birçok avantaja yol açmaktadır [7, 8]. Titanyum alaşımın matrislere uyumluluğundan dolayı titanyum karbür (TiC) ve karbür oluşturuca takviyeler kullanılmalıdır [9]. Titanyum alaşımlarına karbon eklenmesiyle, titanyum bileşimindeki aşırı karbon kırılğan titanyum karbit oluşturduğu için mekanik mukavemeti azaltmaktadır. Karbon nanotüp (KNT), bileşik olağanüstü termal iletkenlik, mekanik ve elektriksel özelliklerinden dolayı malzeme veya dolgu malzemesi olarak kullanılmaya başlanmıştır [10-12].

Küresel petrol kaynakları düşüşle birlikte, motorların yakıt verimliliğinde artış çok arzu edilmektedir. Bir yapıya hem mukavemet hem de sertlik kazandırmada metallerin ve alaşımların yetersizliği Metal Matris Kompozitlerinin gelişimine yol açmıştır. Bundan dolayı mukavemet ve süneklik metal matris tarafından sağlanır; mukavemet ve/veya sertlik, takviye, ya seramik ya da yüksek sertlikte metal esaslı parçacık ya da fiberdir. Metal Matris Kompozitleri, düşük termal genleşme katsayısı ve yüksek termal iletkenlik özelliklerine sahip olacak şekilde tasarlanabilir ve bu da onları elektronik uygulamalarında kullanıma uygun hale getirir [13-15].

Bu çalışmanın amacı, %0,5 -%5 KNT ilavelerinin Ti6Al4V alaşımının aşınma özelliklerine etkisini araştırmaktır. Karakterizasyon işlemi için metalografik teknikler kullanılmıştır. KNT'li sinterlenmiş her örnekte, disk üzerinde ve diskle aşınma testleri yapıldı. Taramalı elektron mikroskopu (SEM), optik mikroskopi, X-ray ile karakterize edildi. Sertlik ve yoğunluk testleri yapılarak bu numunelerin yıpranmış yüzeyleri tarama altında analiz edildi.

2. DENEYSEL METHOD (EXPERIMENTAL METHOD)

2.1. Malzemeler ve Hazırlama Teknikleri (Materials and Preparation Techniques)

Bu çalışmada, Amerikan menşeli, Phelly Materials Company firması tarafından %99,99 saflık, 4,43 g/cm³ yoğunluk ve 45-180 µm nominal boyuta sahip atomize yöntemle üretilmiş Ti-6Al-4V tozları ana matris olarak kullanıldı. Takviye malzemesi olarak yine Amerikan menşeli Chep Tüpleri Şirketi ve Choggo Şirketi tarafından üretilen 2,31 g/cm³ yoğunluk ve ortalama 10-30 nm boyutlarında KNT parçacıkları kullanıldı.

2.2. Karakterizasyon (Characterization)

SEM, malzeme bilimi alanında mikroyapısal özelliklerin incelenmesi ve analizi için kullanılabilen en etkili görüntüleme yöntemlerinden biridir. SEM, yüksek enerjili bir elektron demeti ile numune yüzeyini tarayarak görüntüler. Sinterlenmiş numunelerin toz morfolojileri ve mikroyapıları taramalı elektron mikroskopu (SEM, JEOL Ltd., JSM5910LV) kullanılarak incelendi. Saf Ti-6Al-4V tozu ve KNT tozuna sahip fazların tanımlanması Rigaku X Ray difraktometre kullanılarak gerçekleştirildi. Cu / Ka radyasyonu, 2° lik bir ışın açısı ile, kırınım açısı 5-120° arasında, adım artışı 0,02° ve sayma süresi 1 s şartlarında gerçekleştirildi. Enerji Dağılımlı Spektrometre (EDS, OXFORD Industries INCAX-sight 7274, (133-eV çözünürlük) ve analiz edildi.

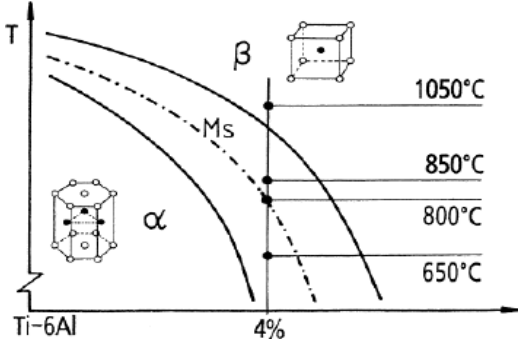
2.3. Kompozitlerin Üretimi (Production of Composites)

Ti-6Al-4V ve farklı oranlarda (%0,5 - 5 v/v) KNT takviyesi ile Toz Metalurjisi (TM) yöntemi ile farklı içerikli kompozit numuneler imal edilmiştir. Kompozitlerin üretimi sırasında hacimce %0,5 - 5 v/v KNT ile Ti6Al4V'e takviye edildi. Mekanik alaşımlama zamanı yaklaşık olarak beş saat öngörüldü. Ti-6Al-4V / KNT kompozit tozu ağırlığının ana kütleyle oranı 1: 6 ve devir hızı 400 rpm, kullanılan alümina bilye çapı 10 mm. İşlem sırasında KNT'nin seramik davranışından dolayı toz parçaları, soğuk izostatik basma (SİP) 205 MPa ile kolaylıkla preslendi. Sinterleme atmosferi olarak yüksek vakum (1,2 10⁻⁵ mbar) ortam seçildi, Ti-6Al-4V alaşımı 845°C de alfa (α) ve 950°C de beta (β) fazına geçmektedir. Amaç yüksek mukavemet olduğu için sinterleme sıcaklığı 1275°C seçilmiştir. Ti6Al4V alaşımının alfa ve beta faz geçiş sıcaklıkları Şekil 1'deki faz diyagramında görülmektedir [16].

2.4. Sertlik ve Yoğunluk Deneyleri (Hardness and Density Experimentals)

Üretilmiş olan bütün kompozit numunelerin mekanik özellikleri sertlik ölçümleri ile belirlendi. Sertlik testleri, Mikro-sertlik Test Makinesi (FM-700, Future Tech Corp.) kullanılarak metalografik işlemler sonucu hazırlanan numuneler üzerinde gerçekleştirildi. Kompozitlerin sertliği Vickers 136° yöntemi kullanılarak 500 g yükte (HV (0,5)

ölçülmüştür. Sinterlenmiş numunelerin yoğunlukları, Archimedes yöntemi ile ölçülmüştür (Switzerland- Presciva XB 320 M).



Şekil 1. Ti-6Al-4V alaşımı alfa ve beta faz geçiş diyagramı (Ti6-Al-4V alloy alpha and beta phase transition diagram)

2.5. Metalografik İnceleme (Investigation of Metallography)

Metalografik muayene için kullanılan numunelerin her biri TM ile üretilerek sinterlenmiş numunelerindedir. Optik inceleme için numunelerin dağlanması için kroll reaktifi (3 mL HF, 100 mL H₂O içinde 6 mL HNO₃) kullanıldı. İncelenen kompozitlerin uzunlamasına kesitlerinden metalografik numuneler hazırlanmıştır. Tüm numuneler, 240, 500, 800 ve 1000 gözlü SiC zımpara kağıtları ile hafifçe zımparalanıp ardından kroll solüsyonları ile dağlandı. Kompozitlerin mikroyapıları Optimus Optik mikroskopu (OP) ile incelendi. Numune hazırlama işlemi sonrası (X50, X100 ve X200) her bir numune için metalografik farklı büyütme, görüntü yönündeki kesitlerden bakıldı.

2.6. Aşınma Testi (Wear Test)

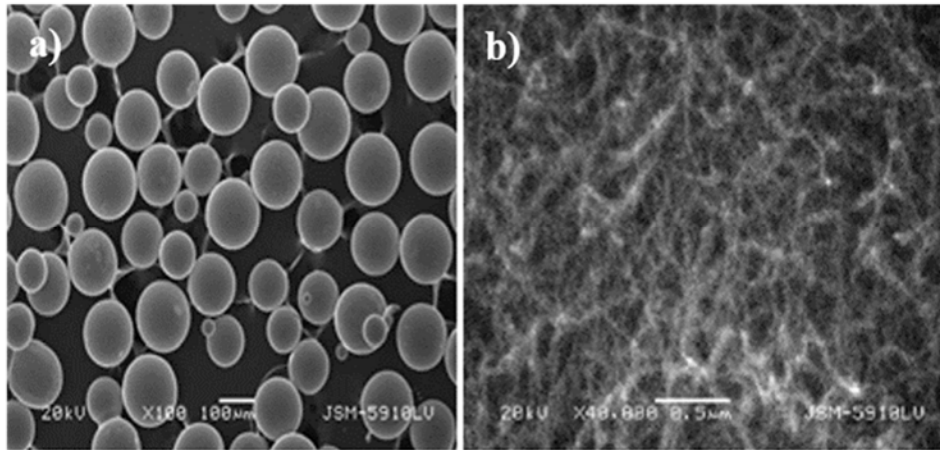
Aşınma testleri, oda sıcaklığında bir yağlayıcı olmadan, karşı yüzey olarak 62 HRC sertlik derecesinde sürekli olarak

dönen bir D2 takım çeliği plakasına sahip standart bir pin-on-disk makinesi üzerinde gerçekleştirildi. Aşınma testi için numune pimi Ø10x10 mm boyutlarında ve aşınma yüzeyi 0,159 nm Ra'lık bir pürüzlüğe kadar parlatıldı. Test, her numune için tekrarlanabilirliği sağlamak için üç deneme ile gerçekleştirildi. Disk yüzeyi taşlanmış ve 0,830 um Ra'lık bir pürüzlülük elde edilmiştir. Tüm aşınma testleri için sırasıyla kayma hızı, kayma mesafesi ve yük, 1,04 m / s, 1000 m ve 9,8 N'da sabit tutulmuştur. Tüm aşınma numuneleri dikkatlice temizlenip ve kurutulmuştur. Numuneler, ± 0,0001 gram hassasiyette ağırlık kaybını ölçmek için testten önce ve sonra etanol ile temizlenmiştir. Aşınma sonuçlarında iyi tekrarlanabilirlik sağlamak için her test koşulunda en az üç test gerçekleştirilmiştir [17]. Aşınma yüzeyleri yüksek çözünürlüklü SEM kullanılarak yapılmıştır.

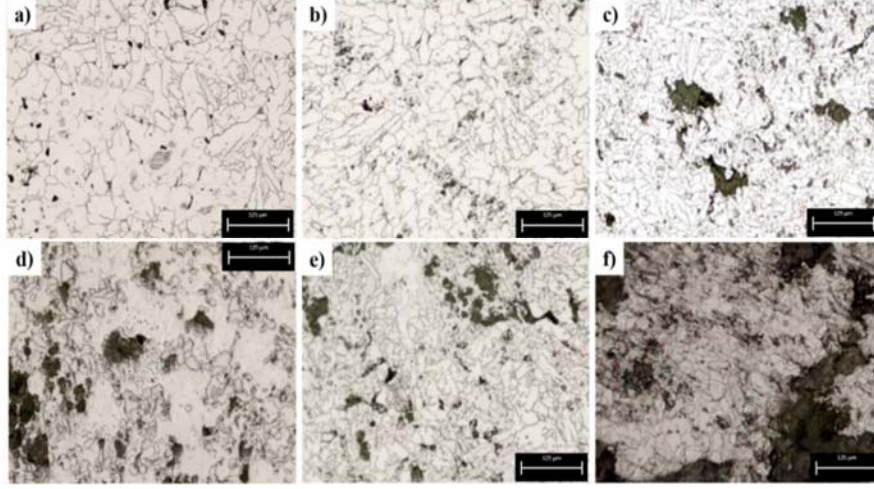
3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Farklı oranlarda takviyeli Ti-6Al-4V ve KNT tozlarına ait SEM de çekilmiş olan resim görüntüleri Şekil 2'de gösterilmektedir, Burada da görüleceği üzere kullanılmış olan Ti-6Al-4V alaşımı tozları düzgün şekilli olup tane boyut dağılımı ortalama 145 mikron civarındadır.

Numune hazırlama işlemi sonrası üretilen her bir kompozit numune için ayrı ayrı farklı büyütme, görüntü yönündeki kesitlerden bakılıp elde edilen görüntüler Şekil 3'de görülebilir. Şekiller de takviye oranına bağlı olarak özellikle düşük takviye oranına sahip numunelerde Ti-6Al-4V'un Alfa ve Beta fazları net olarak görülmektedir. Ayrıca yapıda gri ve daha koyu alanlarda mevcuttur. Gri alanlar oluşan karbür yapılarını nispeten daha koyu bölgelerde artan KNT miktarı ile birlikte aglomerasyon ve porozitenin yoğun olduğu bölgeye tekabül etmektedir. Özellikle %5 KNT oranına sahip numunede yoğunluk ve sertlik değerlerinden de anlaşılacağı üzere artan KNT yüzdesi ile porozite miktarı artmıştır. Görüldüğü gibi sadece gri alanlarda TiC yapıları bulunmaktadır. Gri alan, artan KNT oranına bağlı olarak optimum olarak artmıştır.



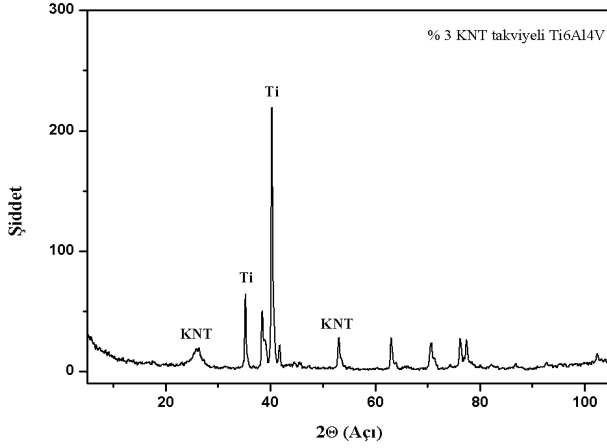
Şekil 2. Ti-6Al-4V ve KNT tozlarının SEM fotoğrafları a) Ti-6Al-4V ve b) KNT (SEM photos of Ti-6Al-4V and CNT powders a) Ti-6Al-4V and b) CNT)



Şekil 3. Ti-6Al-4V a)%0,5 KNT takviyeli MMK b) %1 KNT takviyeli MMK c) %2 KNT takviyeli MMK d) %3 KNT takviyeli MMK e) %4 KNT takviyeli MMK ve f) %5 KNT takviyeli MMK farklı takviyeli malzemelerin optik mikroskobu fotoğrafları.

(Ti-6Al-4V (a) 0.5% CNT reinforced MMC (b) 1% CNT reinforced MMC (c) 2% CNT reinforced MMC (d) 3% CNT reinforced MMC (e) 4% CNT reinforced MMC (f) 5% CNT reinforced MMC with optical microscopy photographs of different reinforced materials)

Farklı oranlarda takviyeli MMC numunelerden %3 v/v takviye edilmiş Ti-6Al-4V/KNT numunesi X-ışını kırınımları Şekil 4'de gösterilmektedir



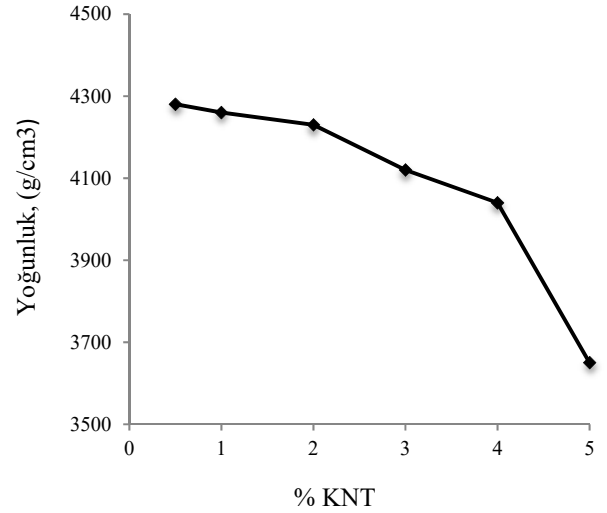
Şekil 4. %3 v/v oranında KNT ile takviye edilmiş Ti-6Al-4V/KNT tozunun XRD analizi (XRD pattern of 3% content CNTs particles in Ti-6Al-4V Matrix)

Şekil 4'te de görüleceği üzere % v/v hacimce artan KNT oranı ile yapılan mekanik alaşımlama sonucunda üretilen kompozit malzemenin yapılan incelemesinde 36,4⁰ ve 40,7⁰ açılardaki piklerin Ti-6Al-4V'ye ve 25,42⁰ ve 53⁰ açılardaki piklerin ise KNT'ye ait olduğu ve KNT ye ait piklere ait hem pik şiddeti hemde pik alanının oluştuğu açıkça görülmektedir. Üretilmiş olan Ti-6Al-4V/KNT numunelerinin yoğunlukları ölçülüp literatürle uyumlu olarak %94 ile %98,5 oranları arasında kaldığı gözlemlenmiştir. Bu oran farkının başlıca nedeni hem KNT nin yoğunluğunun düşük olması hem de KNT'nin oran olarak artmasındandır. Yoğunluk hesaplamaları Eş. 1'de sunulmuştur. Eş. 1 ifadelerinde; VL=gevşek tozun hacmi,

VC=sıkıştırılmış tozun hacmi, ρG=ham yoğunluk ve ρA=görünür yoğunluktur.

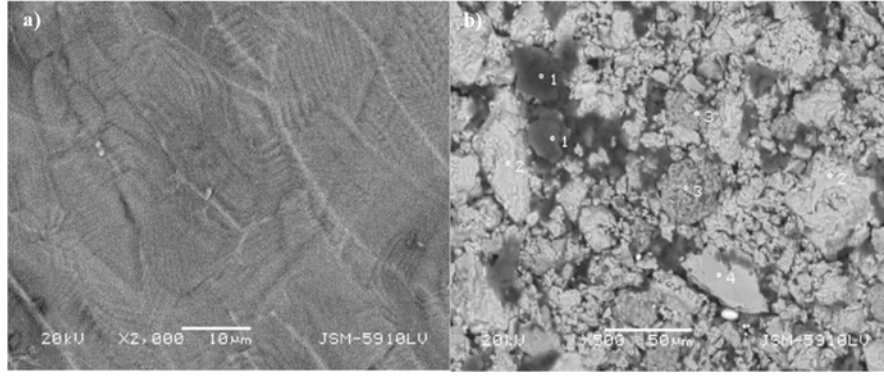
$$C_R = V_L / V_C = \rho_G / \rho_A \quad (1)$$

Ti-6Al-4V/KNT kompozit numunelerinin en düşük yoğunluğu hacimce en yüksek KNT oranına sahip olan %5 içerikli numunedir. Farklı oranlarla takviye edilerek üretilen kompozitlerin yoğunluk değerleri Şekil 5'de gösterilmiştir.



Şekil 5. %0,5-5 v/v oranlarında KNT ile takviye edilerek üretilen numunelerin yoğunluk değerleri. (CNT % reinforced by the density of different exchange rates)

Üretilen numunelerin yoğunluğunun, %0,5-5 v/v farklı KNT içerikli üretilen kompozit numunelerinin artan % KNT oranları ve sinterleme sıcaklığının da etkisiyle düştüğü görülmektedir. Farklı % KNT bileşime sahip yapılarıdaki TiC

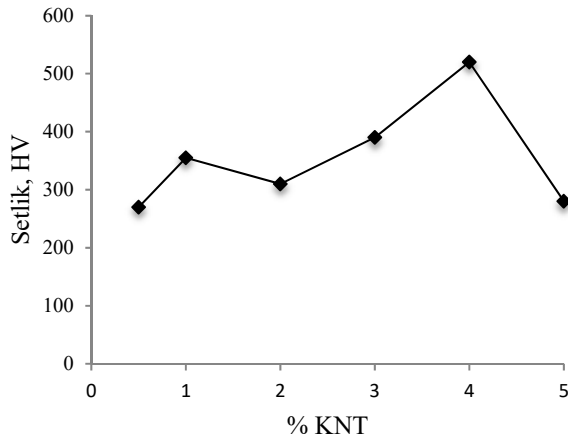


Şekil 6. Farklı oranlardaki % KNT Kompozit numunesindeki TiC a) ve aglomerasyon b) görüntüsü
(% In different ratios TiC (a) and agglomeration (b) image in composite specimen)

Şekil 6a ve Aglomerasyon görüntüleri Şekil 6b'de görülmektedir.

Teste tabii bu numuneler TM ile Ti-6Al-4V ve KNT'ün farklı oranlar ile takviye edilerek üretilmiş olan Ti-6Al-4V/KNT metal matrisli kompozit numunelerdir. Deney sonucunda üretilen numunelerden beklenti uygulanan yüksek sinterleme sıcaklığı ve artan KNT oranı ile yoğunluğun literatürle paralel bir şekilde (%97,5) istenilen seviyeye ulaşmasıdır.

Üretilmiş ve metalografik olarak hazırlanmış olan kompozit numuneler sertlik testinde baskılayıcı izi hem matris hem de takviye malzemesini kapsadığından emin olmak için çok yoğun ve sık aralıklarla 10 ardışık ölçüm yapıp bunların ortalaması alınarak değerlendirildi. Elde edilmiş olan sertlik değeri kompozitin bütününe ortalama sertliğini belirtmektedir. Sertlik ölçümleri Şekil 7'de verilmiştir.



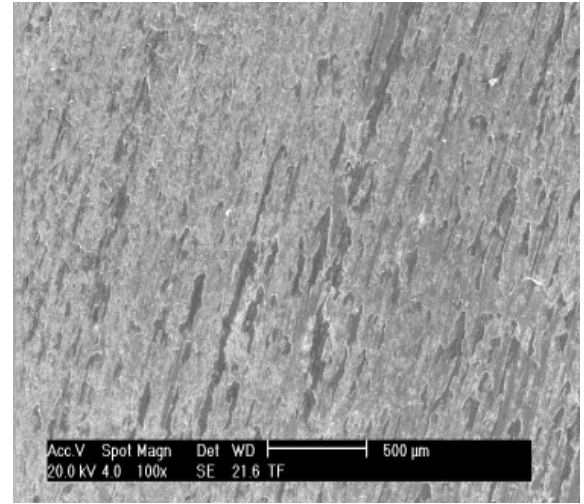
Şekil 7. %0,5-5 v/v oranlarında KNT ile takviye edilerek üretilen Ti-6Al-4V/KNT kompozit numunelerinin sertlik değerleri

(The hardness versus different CNTs content (0.5- 5%))

KNT'nin hacimce yüzdesinin artması, bileşiğin sertliğini arttırmıştır. Ancak numunelerin sertlik değeri KNT'nin %5 oranlarından sonra düşmüştür. Farklı takviye oranlarına

sahip numunelerin ölçülen sertlik ölçümlerinde farklılık gözlemlenmiştir. Kompozit sertliği takviye KNT'lerin titanyum ile oluşturmuş oldukları karbür (TiC) fazları sertlik değerini artırmış, buna karşılık nispeten daha düşük sertlik değerleri de ana matriste artan KNT miktarı ile birlikte aşırı doymuş, aglomerasyona uğramış aşırı porpziteli faz farklılığının KNT materyalinin oluşturduğu matris materyalinden kaynaklandığı öngörülmektedir [17].

Liu ve Dupont gibi araştırmacılar artan % KNT içeriğiyle sertlik değerinin arttığını ve bu parametrenin karbürün karbon içeriğiyle doğrusal olarak değiştiğini varsayımlardır. Aynı varsayımı kullanarak, bu çalışmada, karbür tabakasında oluşan Titanium Karbür (TiC) mevcuttur. Karbürize edilmiş tabaka, diğer numunelere kıyasla daha fazla yüzey gerilimlerine sahip olmuş ve sertlik artışı sağlamıştır [18]. Şekil 8'de Sertlik artışına sebep olan TiC yüzey tabakası görülmektedir.



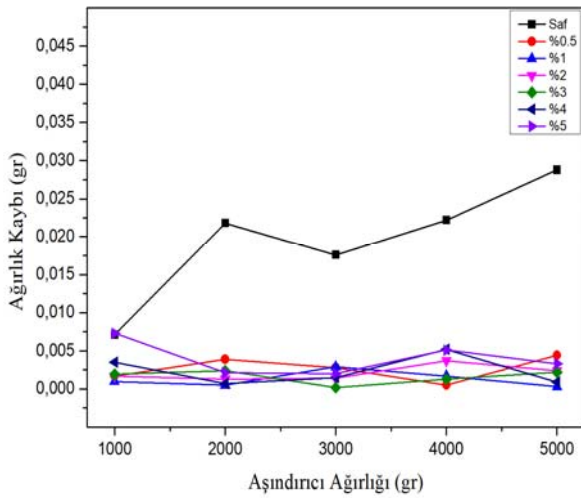
Şekil 8. Titanyum matris kompozitin TiC yüzeyi
(TiC surface of titanium matrix composite)

Aynı şekilde üretilmiş ve yüzeyleri metalografik olarak hazırlanmış olan kompozit numuneler aşınma testine tabi tutuldu. Farklı aşınma hem katedilen yol hemde ağırlığı kaybı olarak hesaplandı. Aşınma oranı aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

$$W_s = \frac{\Delta m}{q \cdot L \cdot F_N} 10^9 \quad (2)$$

Eş. 2 ifadelerinde, W_s : Aşınma oranı, mm^3 / Nm , D_m : N devirlerinin aşınma testi sırasında test örneklerinin kütle kaybı, g, q : Test materyallerinin yoğunluğu, g/cm^3 . L : Toplam kayma mesafesi, m ve F : Pimin üzerindeki normal kuvvet, N.

Toplam kayma mesafesi otomatik kayıt cihazında izlenmiştir. Tüm örneklerin aşınmış yüzeyleri SEM kullanılarak incelendi ve aşınma testinde farklı ağırlıklar kullanıldı. Şekil 9'da gösterildiği gibi, aşınma miktarı %4 KNT oranına kadar artmış fakat %5 Knt oranı ile de azalmıştır.



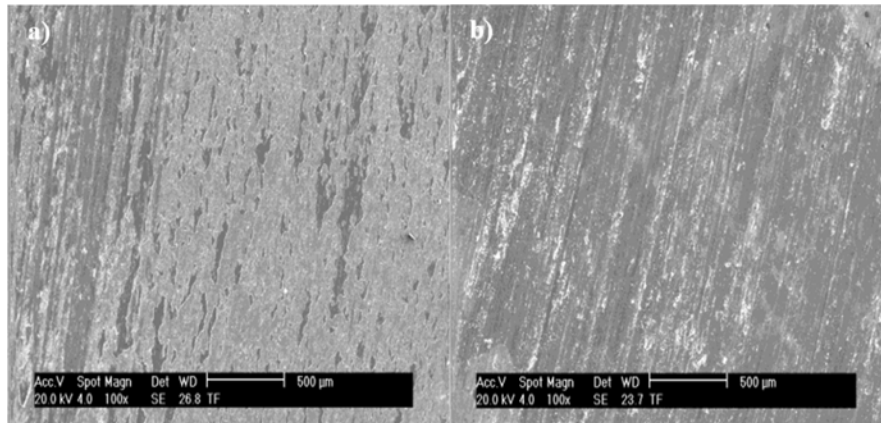
Şekil 9. Ti-6Al-4V ve Farklı % (%0,5-5 v/v) KNT takviyesi ile değişik aşınma ağırlıkları ile ölçülen aşınma kaybı (Variation of wear loss with sliding distance for samples)

Uygulanan yük 10 N'ye sabit olduğu için, gözlemlenen malzeme kayıplarında, kompozitlerdeki KNT'lerin % hacimce oranı, sırasıyla, 0,5, 1, 2, 3, 4 ve 5 v / v'a arttırılmıştır. Şekil 9'da görüldüğü gibi, alaşımdaki KNT % oranının artmasıyla numunelerin aşınma oranı azalmaktadır. Kayma

mesafesi arttıkça yıpranma kaybı artmış ve kayma mesafesi arttıkça aşınma oranı azaltılmıştır. Özellikle, saf Ti6Al4V ve %0,5 v/v KNT takviyeli kompozit malzemenin aşınma performansı pekiyi olmamasına rağmen, artan %4'e kadar artan KNT miktarı ile aşınma kaybının gözle görülür biçimde azaltıldığı tespit edilmiştir. En az malzeme kaybı, %4 v / v KNT içeren kompozitte gözlenmiştir. Geliştirilmiş aşınma direnci, sert TiC fazının ve kompozit içindeki tutulmuş KNT'lerin varlığına bağlanabilir. KNTs hacimce oranının %5 olması, gözlemlenen aşınma hacmi kaybını arttırmıştır. Bu, kompozitin aşınma direncinin, içinde daha fazla TiC fazının varlığına rağmen, %2,3 ve 4 KNT ihtiva eden kompozitlerden daha kötü olduğunu göstermektedir. Daha yüksek yollarda, aşınma direncinin, muhtemelen Ti-6Al-4V matrisinin yükün KNT takviyesine etkili bir şekilde aktarılması için azaltılmış kapasitesine bağlı olarak düştüğü görülmüştür. Aşınma testleri sırasında sert TiC arayüz fazları kırıldığında, yük taşıma kapasiteleri azalır. Bu nedenle, takviye ve matris arasındaki bağlanma olumsuz etkilenir ve malzemenin aşınma direncini azaltır. Bununla birlikte, genellikle kompozit numunelerdeki geliştirilmiş aşınma direnci, KNT'lerin ve sert TiC arayüzü ürününün benzersiz özelliklerinin sinerjik etkisine bağlanmıştır [19].

Kuru sürtünme koşullarında 10 N uygulanan yük altında test edilen yıpranmış numune yüzeylerinin SEM görüntüleri sırasıyla şekil 10a %4 KNT ve şekil 10b %5 KNT içeriği ile üretilmiş malzeme yüzeylerini 'de göstermektedir.

Daha büyük ortalama pürüzlülük karbürize tabakanın (TiC) düzensizliğini gösterir ve tabakanın yüzeyinde stres konsantrasyonlarının varlığına katkıda bulunabilir. Uygulanan yük, sırasıyla farklı oranlardaki KNT içeren kompozitlerin (Şekil 10a ve şekil 10b), kendilerinde KNT'lerin hacim oranı arttıkça, yapışkanlı aşınmanın ilerleyici şiddetini göstermiştir. Bu, matris ile matris arasındaki KNT'lerin daha yüksek takviye hacimce oranına sahip olan takviye ile matris arasındaki zayıf arayüz ve metalurjik bağlanmanın daha önceki önermesini desteklemektedir. Revankar ve ark. [20] yakın tarihli bir çalışmada, aşınma davranışlarının genellikle Ti6Al4V



Şekil 10. Titanyum matris kompozitlerin aşınmış yüzeyleri a) %4 KNT b) %5 KNT (Worn surfaces of titanium matrix composites; (a) 4% CNT and 5% CNT content)

alaşımının kayması sırasında üretilen ve / veya aktarılan metal kalıntıları tarafından oluşturulduğunu ileri sürdüler. Bunlar sırasıyla topraklanmış, karıştırılmış, sıkıştırılmış ve bazen yıpranmış yüzeylerde sinterlenmiştir. Metal döküntüleri, bu aktiviteler sırasında oksijenle reaksiyona girer; bu, aşınmış numune yüzeylerinde gözlenen oksit tabakalarının nedeni olabilir. Bununla birlikte, bu çalışmanın sonuçları, Chauhan ve Dass tarafından [21] bildirilen aksine, düşük uygulanan normal yüklerde Ti6Al4V alaşımının kuru kayma aşınması sırasında oksidatif aşınmanın meydana geldiği belirtilmiştir. KNT %4'ten sonra aşınma mekanizması değişti ve saf, 0,5, 1 ve 5 % KNT takviyeli malzemelerde yapışkanlı aşınma elde edildi. Diğer kompozitlerde takviye KNT, Aşınma mekanizması aşınmayapışkanlı aşınma değilde aşınma olarak değişmiştir. Bu nedenle, en yüksek sertliğe sahip olan CNT%5, en yüksek aşınma direncine ulaşamamıştır. Bu, katkı maddelerinin eklenmesinin belirli bir konumda olması gerektiğini göstermektedir.

Beklendiği gibi, güçlendirmelerin KNT eklenmesi titanyumun aşınma direncini ve sürtünme özelliklerini iyileştirmede etkili olmuştur. Literatür taramasında düşük katkı kompozitlerin neden daha düşük aşınma direncine sahip olduğu artan katkı ile neden arttığı ve belli bir orandan sonra da neden tekrar azalma eğilimine girdiği çok net açıklanmıştır.

4. SİMGELER (SYMBOLS)

EDS	: Enerji Dağılımlı Spektrometre
HV	: Vickers sertlik ölçüm yöntemi
KNT	: Karbon Nanotüp
MMK	: Metal Matris kompozit
Op	: Optik Mikroskop
SEM	: Taramalı Elektron mikroskobu
SİP	: Soğuk İzostatik Pres
TM	: Toz metalurjisi
XRD	: X ışınları Difraktometresi
V_L	: Gevşek tozun hacmi,
V_C	: Sıkıştırılmış tozun hacmi,
ρ_G	: Ham yoğunluk
ρ_A	: Görünür yoğunluktur.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, farklı Çok duvarlı karbon nanotüp oranlarıyla takviye edilerek üretilmiş kompozit (Ti-6Al-4V/KNT) numunelerin yoğunluğu, sertliği, mikroyapı ve aşınma davranışları araştırılmıştır. Bu çalışmanın bulguları; numunelerin yoğunluğu teorik yoğunluğa, tüm farklı çok duvarlı karbon nanotüp içerikleri için artan % KNT oranı ile istenen seviyelere (%94 – 98,5) yaklaşmıştır.

SEM resimleri, çok duvarlı karbon nanotüpo tozlarının ana matriste belli oranlarda iken (%4'e kadar) homojen olarak dağıldığını ve belirli bir bölgede ayrışma olmadığını göstermiştir. Bununla birlikte, %4'ten-sonra da karbon nanotüpo tozlarının sebep olduğu gözenekli yapı varlığı

görülmüştür. XRD, artan KNT içeriğinin, bu takviyenin ana pik alanında artış olduğunu göstermektedir. KNT'ün hacimce yüzdesinin (%4'e kadar) artması ve yüksek sinterleme sıcaklığının etkisi ile metal matrisli kompozitin sertliğini ve aşınma direncini artmıştır. Ancak, sinterleme sıcaklığının 1275°C'de etkisi ile, KNT'nin hacimce %5'te oranına sahip kompozit numunede aşırı doymuş bir yapıdan dolayı oluşan gözenekli yapı ile sertlik ve aşınma direnci artışı kaybolmaktadır. KNT eklenerek sertliğin artması dispersiyon güçlendirme etkisine bağlanabilir. Literatürde yapılmış çalışmalara da refere edilerek yapılan aşınma testinde, takviye edilen KNT'lerin aşınma direnci üzerinde olumlu bir etkiye neden olduğu ve aşınma direncini iyileştirdiği düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma, Marmara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi Programı (FEN-K-070317-0107) tarafından desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Jackson A G., Motteff J., Froes F H., Advanced titanium-alloy department via powder metallurgy, J. Met. 31, 145-145, 1979.
2. Alman D E., Hawk J A., The abrasive wear of sintered titanium matrix-ceramic particle reinforced composites, Albany Research Center, USA, 21, 225-229, 1999.
3. Chuvildeev V., Panov D., Boldin M., Nokhrin A., Blagoveshchensky Y V., Sakharov V., Shotin S., Kotkov D., Structure and properties of advanced materials obtained by Spark Plasma Sintering, Acta Astronautica, 109, 172-176, 2015.
4. Budinski K G., Tribological properties of titanium alloys, in: K.C, Wear of Materials, Am. Soc. Mech. Eng., New York, 11,289-299, 1991.
5. Anzawa S., Takizawa H., Tanimoto T., Ogawa A., Development of high strength MWCNT reinforced titanium alloy matrix composites, The 11th world conference on titanium program -149, 2007.
6. Wang L., Lang Z B., Shi H P., Properties and forming process of prealloyed powder metallurgy Ti-6Al4V alloy, Trans. Nonferr. Met. Soc. China. 17, 639-643, 2007.
7. Hagiwara M., Kaieda Y., Kawabe Y., Miura S., Fatigue property enhancement of alpha-beta titanium alloys by blended elemental P/M approach, ISIJ Int. 31, 922-930,1991.
8. Yamada M., An overview on the development of titanium alloys for non-aerospace applications in Japan, Mater. Sci. Eng. A 213, 8-15, 1996.
9. Waterhouse R B., Iwabuchi A, High temperature fretting wear of four titanium alloys, Wear 106, 303-313,1985.
10. Ranganath S., A review on particulate-reinforced titanium matrix composites, J. Mater. Sci.32 1-16, 1997.

11. Cai A W., Feng X., Sui J., Preparation of multi-walled carbon nanotube-reinforced TiNi matrix composites from elemental powders by spark plasma sintering, *Rare Metals*, 31, 48-50, 2012.
12. Gülsoy H.Ö., Gülsoy N., Çalışıcı R., Particle morphology influence on mechanical and biocompatibility properties of injection molded Ti alloy powder, *Bio-medical materials and engineering*, 24, 1861-1873, 2014.
13. Akbulut H., Kara Y., Mechanical behavior of helical springs made of carbon nanotube additive epoxy composite reinforced with carbon fiber, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32 (2), 417-428, 2017
14. Fırat F.K, and Eren A. Investigation of FRP Effects on Damaged Arches in Historical Masonry Structures. *Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University*, 30 (4), 659-670, 2015.
15. Nutt S R., Ruff A W., A study of the friction and wear behavior of titanium under dry sliding conditions, *Wear of Materials*, Am. Soc. Mech. Eng. New York, 426–433, 1983.
16. Kayacan M.C., Delikanlı Y.E., Duman B., Özsoy K., Examining of mechanical properties of transitive (variable) porous specimens produced by SLS using ti6Al4v alloy powder, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 33 (1) 127-143, 2018.
17. Soorya P K., Gopala P M., Anburoseb D., Kavimania V., Mechanical, corrosion and wear characteristics of powder metallurgy processed Ti-6Al-4V/B4C metal matrix composites, *Ain Shams Engineering Journal*, <https://doi.org/10.1016/j.asej.2016.11.003>, 2016.
18. Munir K S., Oldfield D T., Wen C., Role of Process Control Agent in the Synthesis of Multi-Walled Carbon Nanotubes Reinforced Titanium Metal Matrix Powder Mixtures, *Advanced Engineering Materials*, 18, 294-303, 2016.
19. Munir K S., Qian M., Li Y., Oldfield D T., Kingshott P., Zhu D M., Wen C., Quantitative Analyses of MWCNT-Ti Powder Mixtures using Raman Spectroscopy: The Influence of Milling Parameters on Nanostructural Evolution, *Advanced Engineering Materials*, 17, 1660-1669, 2015.
20. Gülsoy H.Ö., Bilici M K., Bozkurt Y., Salman S., Enhancing the wear properties of iron based powder metallurgy alloys by boron additions, *Materials and Design* 28, 2255–2259, 2007.
21. Revankar G.D., Shetty R., Rao S.S., Gaitonde V.N., Wear resistance enhancement of titanium alloy (Ti-6Al-4V) by ball burnishing process, *Journal of Materials Research and Technology*, 6, 13-32, 2017.
22. Dass K., Chauhan S.R., Gaur B., Evaluation of Mechanical, Friction, and Wear Characteristics of Nano-Ti6Al4V Filled Ortho Cresol Novalac Epoxy Composites under Dry Sliding Condition, <https://doi.org/10.1002/adv.p.21491>, 2014

