

Toz Metalurjisi Yöntemi ile WC Takviyeli CuNiSi Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu

Mehmet AKKAŞ^{1,*}, Khalid Fouzi Ihmeda BOUSHIHA¹, Tarek Mousa K. TABONAH¹

¹Kastamonu Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Kastamonu, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 05.03.2021
Kabul: 18.04.2021

Anahtar Kelimeler:

Toz metalurjisi
CuNiSi kompozit
WC takviye
Karakterizasyon

ÖZET

Teknoloji ve endüstride artan talebe bağlı olarak daha üstün özelliklere sahip malzemelere olan gereksinim her geçen gün artmaktadır. Bu gereksinim ile birlikte bilim adamları yeni ve üstün özelliklere sahip malzeme üretimi için çeşitli çalışmalar yapmaktadırlar. Metal matrisli kompozitler, genel olarak toz metalurjisi yöntemi ile oldukça başarılı bir şekilde üretilmektedirler. Bu çalışmada, toz metalurjisi (TM) yöntemi ile CuNiSi toz karışımına, ağırlıkça farklı oranlarda WC parçacıkları takviyesi yapılarak, kompozit numuneler üretilmiştir. Hazırlanan CuNiSi ve WC toz karışımları 600 MPa basınç altında soğuk preslenerek ham numune haline getirilmiştir. Ham numune haline getirilen numuneler atmosfer kontrollü fırında 900 °C sıcaklıkta 1 saat süre ile sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. Üretilen numunelerin mikroyapılarını belirleyebilmek için taramalı elektron mikroskobu (SEM-EDS), üretilen numunelerin içyapılarında oluşan fazları belirleyebilmek için X-Işını Kırınım yöntemi (XRD) analizi ve WC parçacıklarının sertlik üzerine etkisini belirleyebilmek amacıyla mikrosertlik (HV_{0.05}) testi yapılmıştır. Mikroyapı sonuçlarından, WC partiküllerinin yapı içerisinde homojen olarak dağıldığı tespit edilmiştir. Üretilen numunelerde artan WC miktarına bağlı olarak sertlik değerlerinde artış olmuştur. Bunun yanı sıra, deneyler sonucunda en yüksek sertlik değeri % 10 WC ilave edilen numunede 117 HV_{0.05} olarak ölçülmüştür.

Production and Characterization of WC Reinforced CuNiSi Composites by Powder Metallurgy Method

ARTICLE INFO

Received: 05.03.2021
Accepted: 18.04.2021

Keywords:

Powder metallurgy
CuNiSi composite
WC reinforcement
Characterization

ABSTRACT

Due to the increasing demand in technology and industry, the need for materials with superior properties is increasing day by day. With this requirement, scientists carry out various studies for the production of new and superior materials. Metal matrix composites are generally produced very successfully by powder metallurgy method. In this study, composite samples were produced by reinforcing different proportions of WC particles by weight to the CuNiSi powder mixture by powder metallurgy (TM) method. Prepared CuNiSi and WC powder mixtures were turned into raw samples by cold pressing under 600 MPa pressure. The samples that were turned into raw samples were subjected to sintering process in an atmosphere controlled furnace at 900 °C for 1 hour. Scanning electron microscopy (SEM-EDS) to determine the microstructure of the samples produced, X-Ray Diffraction method (XRD) analysis to determine the phases formed in the internal structures of the produced samples, and the microhardness (HV_{0.05}) test to determine the effect of WC particles on hardness. From the microstructure results, it was determined that the WC particles were homogeneously distributed in the structure. Due to the increasing amount of WC in the samples produced, there was an increase in the hardness values. Besides, as a result of the experiments, the highest hardness value was measured as 117 HV_{0.05} in the sample added with 10% WC.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Hızla gelişen teknoloji ile geleneksel malzemelerin yerini daha spesifik özelliklere sahip olan yeni malzemeler almaktadır. Bu sebepten dolayı hızla gelişen teknolojiye, endüstri sanayisinin ham

* Sorumlu yazar, e-posta: mehmetakkas@kastamonu.edu.tr

maddesi olan malzemelerde de geliştirme yapmak zorunlu hale gelmiştir. Malzeme alanında çalışma yapan bilim adamları genellikle doğal ve alaşım maddelerinden daha üstün özelliklere sahip olan yeni malzemeleri araştırmaya yönelmişlerdir. Bu yeni malzemeler diğer geleneksel malzemelerden farklı olarak, üstün özelliklere sahip kompozit malzemeler üretilmiştir. Kompozit malzemeler geleneksel malzemelere göre birçok avantaja sahiptir. Kompozit malzemelerin en üstün özellikleri hafif ve yüksek mukavemete sahip olmalarıdır [1,2].

Son zamanlarda uygulanan metotlar arasında toz metalurjisi (TM) ile üretilen CuNiSi alaşımları dikkate değer bulunmuştur. TM yöntemiyle alaşımın kimyasal kompozisyon kontrolü sağlanabilmektedir. Toz metalurjisi, döküm, talaşlı imalat, sıcak ve soğuk presleme gibi üretim yöntemlerine alternatif olarak geliştirilmiştir [3]. Toz metalurjisi yöntemi ile kompozitler elde edilerek malzemelere aşınma direnci, korozyon direnci, yüzey sürtünmesi ve yüzey gerilimlerinin arttırılması gibi özellikler kazandırılabilir. Mühendislik uygulamalarında kullanılan malzeme grupları içerisinde kompozit malzemeler vazgeçilmez bir yere sahiptir [4]. Dayanım/ağırlık oranının yükselmesiyle daha ince ve hafif kompozitlerin geliştirilmesi neticesinde üretim ve işletme giderlerinin birim maliyetinin düşürülmesi sağlanmaktadır [5]. Hafiflik ve sağlamlık oranı açısından başarılı olan CuNiSi alaşımları ile çok iyi mekanik özelliklere sahip kompozit malzemeler üretilmektedir. Bu çalışmanın amacı, toz metalurjisi yöntemiyle üretilen CuNiSi alaşımına WC parçacıklarının ilavesinin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisini araştırmaktır. Sabit presleme basıncında preslenen ve farklı sıcaklıklarda sinterlenen CuNiSi alaşımının mikroyapı ve mekanik özelliklerindeki değişim karşılaştırılmıştır [6,7].

Bakır ve Nikel, yüksek çözünürlüğe sahip demir, krom ve kobalt gibi çeşitli elementlerle alaşımlanabilen elementlerdir. Ni esaslı alaşımlar, gaz türbini parçaları, tıbbi uygulamalar ve nükleer sistemleri gibi çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu alaşımlar, aşınma direnci, korozyon ve termal yorulma problemlerini çözebilir. Bu özellikler, yeni Cu ve Ni esaslı alaşımların geliştirilmesine öncülük etmektedir. Birbiriyle temas halinde olan ve aşınmaya maruz kalan rulman, dişli ve kam gibi makine parçalarının geliştirilmesi hayati öneme sahiptir. Günümüzde, aşınma oranlarını azaltmak için yeni malzemelerin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Öte yandan, triboloji çalışmaları, sürtünme olayları, yağlama ve aşınmayı içeren olayları analiz ederek ve araştırarak makine parçalarının sürtünme ve aşınmasını azaltmak için farklı yollara odaklanmaktadır [8,9].

CuNiSi ve alaşımları mükemmel ısı direnci, korozyon direnci, tokluk ve mukavemet gibi sahip oldukları özelliklerinden dolayı uzay-havacılık, otomotiv ve biyomedikal gibi alanlarda yüksek mühendislik alaşımları olarak tercih edilmektedir [10-12]. Buna ek olarak, bu malzemeler makine teçhizat ve yapı malzemeleri, medikal aygıtlar ve araçlar gibi endüstriyel ve tıbbi uygulamaların yanısıra elektronik aygıtlar uzay araçları gibi ileri düzey uygulamalarda ve süper elastik gözlük çerçeveleri telefon antenleri gibi günlük hayatı kolaylaştıran birçok üründe kullanılmaktadırlar. Son yıllarda robotik alanda yapılan uygulamalarda yaygınlaşmaktadır. Fakat CuNiSi ve alaşımlarının endüstride kullanımında mekanik özellikleri ve aşınma özellikleri bakımından problemlerle karşılaşmaktadır [13]. Bu problemlerden dolayı CuNiSi alaşımının mekanik özellikleri ve aşınma özellikleri düşük olduğu için toz metalurjisi yöntemi ile bu alaşıma WC parçacıkları takviye ederek üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretimi gerçekleştirilen numunelerin aşınma direnci ve mekanik özellikleri artacağından dolayı endüstride ihtiyaç olan bir açık kapatılmış olacaktır. Bu çalışmada literatür araştırmaları sonucu, WC takviyeli CuNiSi kompozit malzemelerin üretilebilirliği ile ilgili bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu amaçla, literatürdeki bu boşluğu doldurabilmek amacıyla toz metalurjisi yöntemiyle WC takviyeli CuNiSi kompozit malzemelerin üretimi çalışılmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Bu çalışmada, kullanılan Bakır (Cu), Nikel (Ni), Silisyum (Si) ve Tungsten karbür (WC) tozları Nanografi firmasından temin edilmiştir. Cu, Si ve WC tozları % 99,9 saflıkta ve ortalama 44 mikron tane büyüklüğündedir. Ni tozu % 99,95 saflıkta ve ortalama 44 mikron tane büyüklüğündedir. Temin edin bu tozlar ile CuNiSi alaşımına farklı oranlarda (ağırlıkça % 2.5, 5 ve 10) WC parçacıkları ilave

edilerek toz metalurjisi yöntemiyle üretimi amaçlanmıştır. Bu amaçla, öncelikle CuNiSi alaşımı için tozlar Tablo 1’de verilen ağırlıkça %’de kimyasal bileşimine göre tartılarak hazırlanmıştır.

Tablo 1. CuNiSi kompozit karışımının kimyasal bileşimi (Chemical composition of CuNiSi composite mixture)

Elementler	Cu (ağ%)	Ni (ağ%)	Si (ağ%)
CuNiSi alaşımının hazırlanması	95	4	1

Hazırlanan CuNiSi alaşımına WC ilaveleri Tablo 2’de verilen %’de kimyasal bileşimine göre tartılarak hazırlanmıştır.

Tablo 2. Kompozit malzemelerin üretim parametreleri (Production parameters of composite materials)

Numune No	CuNiSi (ağ%)	WC (ağ%)	Sıcaklık (°C)
1	100	-	
2	97.5	2.5	900
3	95	5	
4	90	10	

Hazırlanan tozlar Kastamonu Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarında bulunan üç boyutlu turbula ile 1 saat süreyle karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi sonrasında tozlar aynı laboratuvarında bulunan pres ile presleme işlemi yapılmıştır. Soğuk presleme işleminde presleme basıncı olarak 600 MPa basınç uygulanmıştır. Presleme işlemi Specac marka GS15011 modeli hidrolik ham numune presi ile yapılmıştır. Presleme işleminde kalıp olarak, 13 mm çapında silindir şeklinde bir kalıp kullanılmıştır.

Üretilen ham numunelerin sinterleme işlemi Kastamonu Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarlarında bulunan atmosfer kontrollü ısıtma işlem fırını (Protherm) ile yapılmıştır.

Sinterleme işlemi toplam 240 dakikada tamamlanmıştır. Numunelerin içerisindeki yağ vb. atıkların dışarı atılması amacı ile 10 °C/dakika hızla sinterleme sıcaklığı olan 900 °C sıcaklığa 90 dakikada yükseltilmiştir. Daha sonra sinterleme sıcaklığı 900 °C’de 60 dakika sabit sıcaklıkta bekletilmiştir. Numunelerin soğuma işlemi 90 dakikada oda sıcaklığına kadar atmosfer kontrollü altında fırın içerisinde gerçekleştirilmiştir.

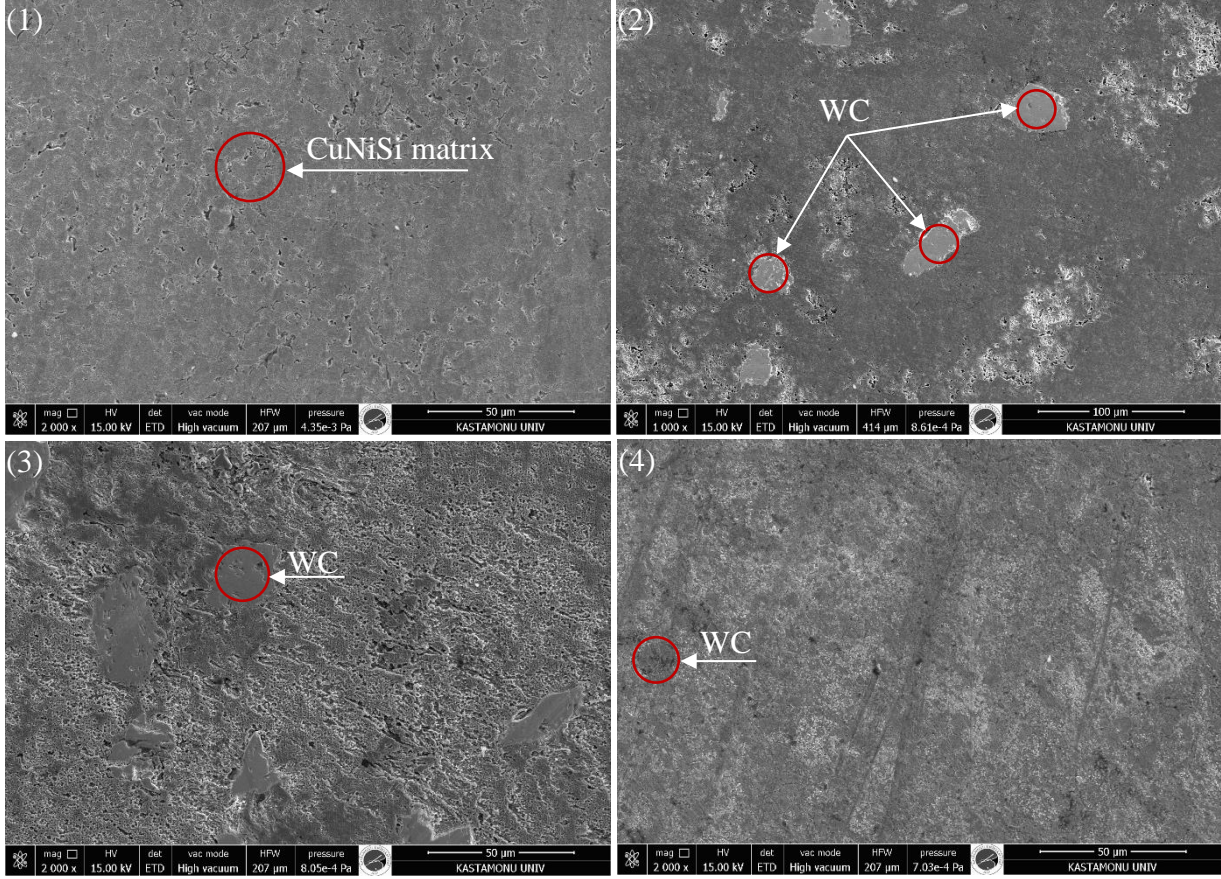
Sinterleme işlemi sonrasında numunelerinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve Enerji Dispersive Spektrum (EDS) analizleri için numunelere metalografik işlemler uygulanmıştır. Bu uygulanan metalografik işlemler sırasıyla zımparalama, parlatma ve dağlama olarak yapılmıştır. Numunelerin yüzeylerine 120, 200, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 mesh zımparalar ile sırasıyla zımparalama işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra numunelerin yüzeyleri sırasıyla 3 ve 1 µ elmas süspansiyonlar ile parlatılmıştır. Son olarak ise, dağlama reaktifine daldırma yöntemi ile dağlama işlemine tabi tutulmuşlardır.

Numuneler dağlama işlemine tabi tutulduktan sonra taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Kastamonu Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarlarında bulunan “FEI QUANTA 250 FEG” marka cihazdan alınmıştır. Numunelerin XRD ölçümleri Kastamonu Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarlarında bulunan Bruker D8 Advance marka cihaz ile yapılmıştır. X-ışını difraksiyonu (XRD), kristalin atomik ve moleküler yapısını incelemek için kullanılan bir yöntemdir.

Sinterleme sonrasında, deney numunelerine metalografik işlem basamakları sırasıyla uygulandıktan sonra, bu çalışmada üretilen numuneler için artan WC miktarına bağlı olarak ortaya çıkan sertlik değerlerinin nasıl etkilendiği mekanik bir özellik olarak araştırılmıştır. Numunelerin sertlik ölçümlerinde mikrosertlik ölçüm metodu kullanılmıştır. Bu ölçümler, Kastamonu Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarlarında bulunan SHIMADZU marka HMV-G21 model mikrosertlik ölçüm cihazı kullanılarak yapılmıştır. Mikrosertlik ölçümleri Vickers sertlik testi ile 50 gr. yük altında 16 saniye süre uygulanarak yapılmıştır. Numunelerde sertlik ölçümlerinin sağlıklı bir şekilde belirlenebilmesi için en az 5 noktadan ölçüm alınmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Toz metalürjisi yöntemiyle üretilen kompozitlerin SEM görüntüleri alınmış ve elde edilen görüntülere göre değerlendirmeler yapılmıştır. Şekil 1'de verilen 1 numaralı numunenin SEM görüntüleri incelendiğinde CuNiSi matrix yapısı açıkça görülmektedir. Ek olarak, 2, 3 ve 4 numaralı numunelerden alınan SEM görüntüleri incelendiğinde WC parçacıklarının homojen bir şekilde dağıldığı görülmektedir. CuNiSi ve WC 'ün iç yapıda homojen bir şekilde dağılması üç boyutlu turbula ile karıştırma ve sinterleme işleminden kaynaklandığı düşünülmektedir [14,15].

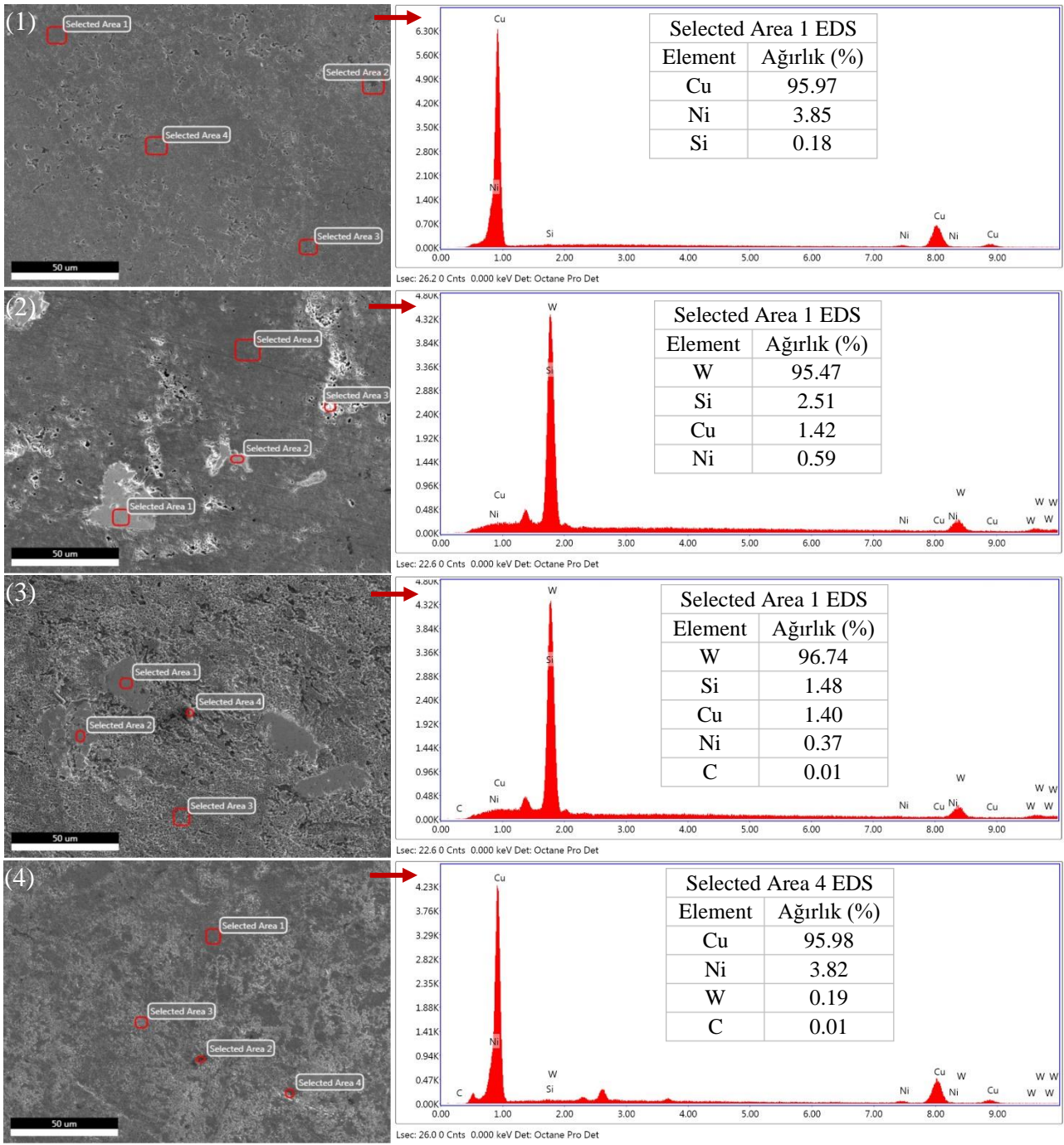


Şekil 1. Üretilen numunelerin SEM görüntüleri (SEM images of produced samples)

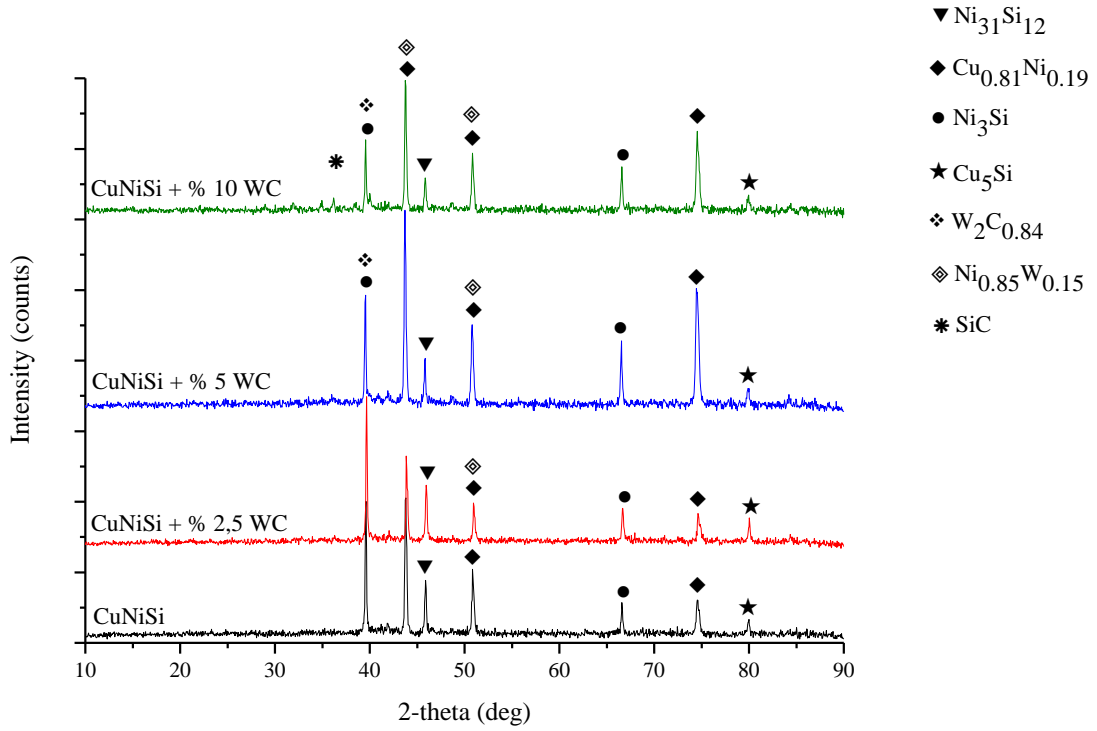
Üretilen numunelerin SEM-EDS analizleri Şekil 2'de verilmiştir.

EDS analizi numune üzerinden elementel kompozisyonu belirlemek için kullanılan bir yöntemdir. Numune üzerine taramalı elektron demeti gönderilerek gerçekleştirilen bir analizdir. Şekil 2'de verilen EDS analiz sonuçları, üretilen numunelerin kimyasal bileşimlerini desteklemektedir. Üretilen numunelerin içyapılarında farklı oranlarda Cu, Ni, Si, W ve C olduğu tespit edilmiştir.

Toz metalürjisi yöntemi ile üretilen kompozitlerin XRD grafikleri Şekil 3'te verilmiştir.



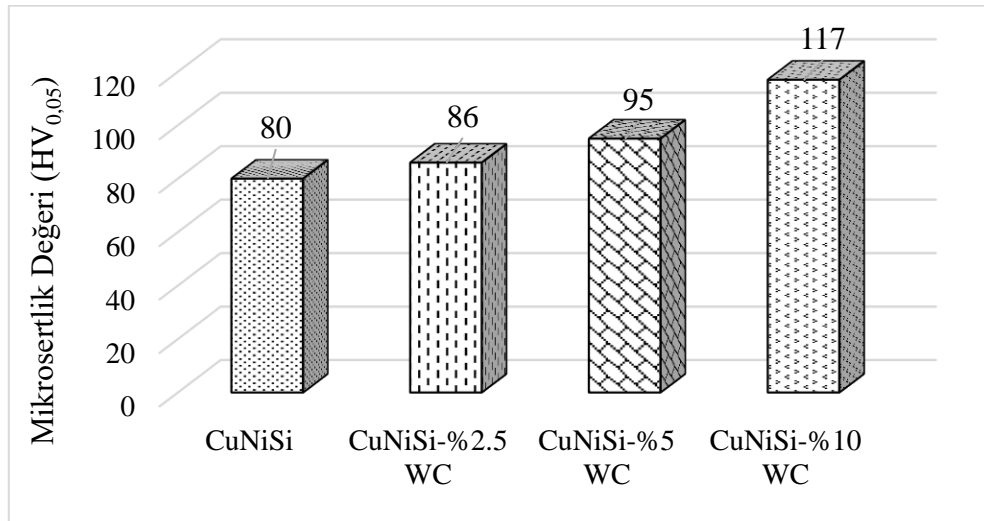
Şekil 2. Üretilen numunelerin SEM-EDS analiz sonuçları (SEM-EDS analysis results of produced samples)



Şekil 3. Üretilen kompozitlerin XRD grafikleri (XRD graphs of manufactured composites)

Şekil 3'te verilen XRD grafikleri incelendiğinde $Ni_{31}Si_{12}$, $Cu_{0.81}Ni_{0.19}$, Ni_3Si , Cu_5Si , $W_2C_{0.84}$, $Ni_{0.85}W_{0.15}$ ve SiC fazlarının oluştuğu tespit edilmiştir. Buna ek olarak, $Ni_{31}Si_{12}$ fazının baskın olduğu açıkça görülmektedir. Sinterleme işlemi sırasında $CuNiSi$ ve WC parçacıkları arasında $W_2C_{0.84}$, $Ni_{0.85}W_{0.15}$ ve SiC fazları oluşmuştur. Genel olarak, verilen XRD grafikleri incelendiğinde ilave WC miktarı arttıkça, $Cu_{0.81}Ni_{0.19}$, $Ni_{0.85}W_{0.15}$ ve SiC fazlarının şiddetinin arttığı tespit edilmiştir. Buna ek olarak, WC ilaveli bu numunelerin WC fazlarıyla ilişkili katı çözeltiler oluşturduğu düşünülmektedir [16,17].

Şekil 4'te üretilen numunelerin mikrosertlik grafiği verilmiştir.



Şekil 4. Üretilen kompozitlerin mikrosertlik değerleri (Microhardness values of produced composites)

Kompozitlerin mikrosertlik ölçümleri $100 \mu m$ aralıklarla bir çizgi boyunca numune yüzeyinden alınmıştır. 1. numunenin sertliği yaklaşık $80 HV_{0.05}$ 'dir. 2. numunenin sertlik değeri $86 HV_{0.05}$ olarak tespit edilmiştir. 3. numunenin sertlik değeri $95 HV_{0.05}$ olarak tespit edilmiştir. Son olarak, 4.

numunenin sertlik değeri 117 HV_{0.05} olarak tespit edilmiştir. WC takviyeli numunelerin sertliği takviyesiz numuneden daha yüksektir. Bu artış, karbür ve oluşan sert fazların varlığı ile ilişkilidir. WC'ün eklenmesi, W₂C_{0.84}, Ni_{0.85}W_{0.15} ve SiC fazlarının oluşumuna neden olmuştur ve sonuç olarak sertlikteki artışa katkıda bulunmuştur [18-20].

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, toz metalurjisi (TM) yöntemi ile CuNiSi ve CuNiSi-WC kompozitler başarılı bir şekilde üretilmiştir. Üretilen numunelere, taramalı elektron mikroskobu (SEM-EDS), X-ışını difraktogramı (XRD) ve mikrosertlik testleri başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Deneysel sonuçların raporu aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- ✓ Numunelerden alınan SEM görüntülerinde WC parçacıklarının homojen bir şekilde dağıldığı rapor edilmiştir.
- ✓ EDS analiz sonuçlarında, üretilen numunelerin kimyasal bileşimlerini desteklenmiştir ve numunelerin içyapılarında farklı oranlarda Cu, Ni, Si, W ve C olduğu tespit edilmiştir.
- ✓ XRD grafiklerinde Ni₃₁Si₁₂, Cu_{0.81}Ni_{0.19}, Ni₃Si, Cu₅Si, W₂C_{0.84}, Ni_{0.85}W_{0.15} ve SiC pikleri tespit edilmiştir.
- ✓ Mikrosertlik testi sonucunda WC takviyeli numunelerin sertliği takviyesiz numuneden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. En iyi mikrosertlik değeri % 10 WC takviyeli numuneden alınmıştır ve sertlik değeri 117 HV_{0.05} olarak tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. A. Yönetken, Investigation of the production and mechanical properties of silicon carbide-reinforced composites, *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9(3): 1551-1558, 2019.
2. T. Çetin, M. Akkaş, Effect of WC reinforced on microstructure and mechanical properties of CuAlMn alloys produced by hot pressing method, *European Journal of Technique*, 10(1): 173-183, 2020.
3. U. Çalığılülü, M. Taşkın, H. Kejanlı, Soğuk presleme yöntemiyle üretilmiş Ni-Ti-Cu kompozitlerin TLP difüzyon kaynağında sıcaklığın birleşme üzerindeki etkisinin incelenmesi, *Engineering Sciences*, 3(4): 558-570, 2008.
4. A.İ. Kaya, Kompozit malzemeler ve özellikleri, *Putech & Composite Poliüretan ve Kompozit Sanayi Dergisi*, 29: 38-45, 2016.
5. M.A. Erden, Presleme basıncının toz metalürjisi ile üretilen alaşımsız çeliklerin mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkisi, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(1): 257-264, 2017.
6. X.S. Xie, S.Q. Zhao, J.X. Dong, G.D. Smith, S.J. Patel, An investigation of structure stability and its improvement on new developed Ni-Cr-Co-Mo-Nb-Ti-Al superalloys, *In Materials Science Forum*, 475: 613-618, 2005.
7. K. Wasaka, M. Yamaki, A modified dental cast investment for nickel base alloy: a preliminary study, *Journal of materials science letters*, 10: 1093-1094, 1991.
8. W.Y. Kim, H.S. Kim, T.Y. Ra, H.J. Bang, Y.G. Yoo, I.D. Yeo, High temperature mechanical properties of Ni-Al-Cr based alloys for advanced die-materials applications, *Journal of Materials Science and Technology*, 24: 305-308, 2008.
9. J.K. Tien, *Superalloys, supercomposites and superceramics*, Elsevier, 2012.
10. S. Jayachandran, K. Akash, S.M. Prabu, M. Manikandan, M. Muralidharan, A. Brolin, I.A. Palani, Investigations on performance viability of NiTi, NiTiCu, CuAlNi and CuAlNiMn shape memory alloy/Kapton composite thin film for actuator application, *Composites Part B: Engineering*, 176: 107182, 2019.
11. M. Barmouz, P. Asadi, M.B. Givi, M. Taherishargh, Investigation of mechanical properties of Cu/SiC composite fabricated by FSP: Effect of SiC particles' size and volume fraction, *Materials Science and Engineering: A*, 528: 1740-1749, 2011.
12. Y. Liang, Q. Zhao, Z. Zhang, X. Li, L. Ren, Effect of B₄C particle size on the reaction behavior of self-propagation high-temperature synthesis of TiC-TiB₂ ceramic/Cu composites from a Cu-Ti-B₄C system, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 46: 71-79, 2014.
13. C.A. Canbay, T. Polat, Thermal and structural alternations in CuAlMnNi shape memory alloy by the effect of different pressure applications, *Physica B: Condensed Matter*, 521: 331-338, 2017.

- 14.M.A. Korchagin, D.V. Dudina, B.B. Bokhonov, N.V. Bulina, A.V. Ukhina, I.S. Batraev, Synthesis of nickel boride by thermal explosion in ball-milled powder mixtures, *Journal of Materials Science*, 53: 13592-13599, 2018.
- 15.M. Akkaş, S. Islak, Microstructure, Wear and Corrosion Properties of NiB-TiC Composite Materials Produced By Powder Metallurgy Method. *Science of Sintering*, 51: 327-338, 2019.
- 16.M. Nazarian-Samani, A.R. Kamali, R. Mobarra, M. Nazarian-Samani, Phase transformations of Ni-15 wt.% B powders during mechanical alloying and annealing, *Materials Letters*, 64: 309-312, 2010.
- 17.E. Georgiza, V. Gouda, P. Vassiliou, Production and properties of composite electroless Ni-B-SiC coatings, *Surface and Coatings Technology*, 325: 46-51, 2017.
- 18.M. Akkaş, The mechanical and corrosion properties of WCCo–Al coatings formed on AA2024 using the HVOF method, *Materials Research Express*, 7(7): 076515, 2020.
- 19.C.E. Campbell, U.R. Kattner, A thermodynamic assessment of the Ni-Al-B system. *Journal of Phase Equilibria*, 20: 485, 1999.
- 20.K. Otsuka, X. Ren, Physical metallurgy of Ti–Ni-based shape memory alloys, *Progress in Materials Science*, 50: 511-678, 2005.