GU J Sci, Part C, 5(2): 223-230 (2017)

Gazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Dergisi

PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

dergipark.gov.tr/http-gujsc-gazi-edu-tr

Akımsız Ni-B Kaplanmış Demir Esaslı Toz Metal Kompaktların Sertlik ve Yapısal Özelliklerine Isıl İşlemin Etkisi

Ulaş MATİK[1,*]

[1]*Karabük Üniversitesi, TOBB Teknik Bilimler MYO, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 78050, Merkez/KARABÜK*

Makale Bilgisi

Başvuru: 23/10/2016
Düzeltme: 07/03/2017
Kabul: 13/04/2017

Anahtar Kelimeler

Akımsız kaplama
Ni-B kaplama
Isıl ,şlem
Sertlik
Toz Metalürjisi

Keywords

Electroless coating
Ni-B coating
Heat treatment
Hardness
Powder Metallurgy

Öz

Demir esaslı toz metal (TM) kompaktlar üzerine akımsız kaplama yöntemi ile kaplanan Ni-B alaşımının morfolojisi, yapısı ve mikro sertliği incelendi. Kaplanmış numunelerin bir kısmına farklı sıcaklıklarda (300, 400 ve 500 °C) 1 saat süre ile izotermal ısıl işlem uygulandı. Kaplamaların fazları ve morfolojisi x-ışını kırınım analizi (XRD) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelendi. Faz dönüşüm davranışı ve sıcaklıkları diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) analizi ile belirlendi. Ni-B kaplamalar ve TM kompaktların mikrosertlikleri Qness Q10 micro vickers test cihazı kullanılarak ölçüldü. Sonuçlar, Ni-B kaplamanın kaplanmış halde amorfsu bir yapıya sahip olduğunu, fakat ısıl işlem sonucu kristal yapıya dönüştüğünü gösterdi. Nikel matriste nikel borürlerin (Ni_2B, Ni_3B) çökeldiği ve bu çökeltilerin sertlik artışına neden olduğu tespit edildi. Maksimum sertlik 400 °C'de ısıl işlem uygulanmış Ni-B kaplamada elde edildi.

The Influence of Heat-treatment on Hardness and Structural Characteristics of Electroless Ni-B Deposited Ferrous Powder Metal Compacts

Abstract

The Ni-B alloy deposited on ferrous powder metal compacts by electroless coating method and its morphology, structure and microhardness were investigated. Some of the coated specimens were heat treated at different temperatures (300, 400 and 500 °C) as isothermal for 1 h. The phases and morphology of coatings were examined by x-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscope (SEM). Phase transformation behavior was studied by differential scanning calorimetry (DSC). Microhardness of Ni-B coatings and PM compacts were evaluated using a Qness Q10 micro Vickers tester. The results showed that, Ni-B coating had an amorphous structure in the coated state but after heat treatment, it turned into a crystalline structure. It was found that nickel borides (Ni_2B, Ni_3B) precipitated in the nickel matrix. It was determined that precipitation has caused the increase of hardness. The maximum hardness was provided in the heat treated Ni-B coating at 400 °C.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Toz metalürjisi bazı küçük yapısal parçaların üretimi için tercih edilen ve hızla büyüyen bir teknolojidir [1]. TM parçalar çalışma şartlarında yaygın olarak aşınma, yuvarlanma ve kayma gibi etkilere maruz kalmaktadırlar [2]. Bu sebeple, sertlik ve aşınma direnci bu parçalar için önemli mekanik özelliklerdendir [3]. Demir esaslı TM parçaların aşınma direncini arttırmak amacıyla matris yapının sert partiküllerle takviye edilmesi, alaşımlama, ısıl işlem ve çeşitli yüzey uygulamaları yaygın olarak kullanılmaktadır. TM parçaların yüzey sertliği ve aşınma direncini arttırmak için uygulanan diğer bir yöntem ise akımsız kaplama tekniğidir [1,4,5].

Akımsız kaplama; sulu bir çözeltide indirgeyici madde ile metal tuzu arasındaki kimyasal reaksiyon sonucu metal iyonlarının altlık bir malzeme üzerine metal atomu halinde biriktirilmesi tekniğidir [6]. Akımsız Ni–B kaplamalar yüksek sertlik ve süper aşınma direncine sahiptir [7]. Akımsız Ni-B kaplamaların yapısı kaplanmış halde genellikle amorfsu ve nanokristal fazların karışımından oluşur ve kaplamanın bor

*İletişim yazarı, e-mail: matik@karabuk.edu.tr

içeriğinin artması ile amorfsu faz miktarı da artar [8]. Ayrıca, kaplamanın sertliği bor içeriğine bağlıdır ve kaplamadaki bor miktarı arttıkça sertlikte artar [9–11]. Isıl işlem ise kaplamanın sertlik ve yapısında dolayısıylada mekanik özellikleri üzerinde güçlü etkiye sahiptir [12]. Optimum ısıl işlem (genellikle 400 °C'de 1 saat) kaplamanın sertliğinde önemli bir artış meydana getirmektedir ve 1200 HV_{100} sertlik değerine ulaşıldığı rapor edilmektedir [10].

Yapılan çalışmada, akımsız Ni-B kaplama ve kaplamanın kristalizasyon özelliklerinden faydalanılarak demir esaslı TM parçaların yüzey sertliğinin iyleştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla, akımsız Ni-B kaplanmış ve farklı sıcaklıklarda 1 saat süreyle izotermal ısıl işlem uygulanmış toz metal kompaktlara çeşitli test ve analizler uygulanarak ısıl işlemlerin kaplamanın yapısı ve sertlik özellikleri üzerindeki etkileri incelendi.

2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

TM kompaktların hazırlanması amacıyla yüksek saflıktaki (< %0.01 C, kalan Fe) atomize demir tozuna (ASC 100.29, Höganäs, Sweden) ağırlıkça % 0,5 oranında grafit (ρ = 2 g/cm^3, Alfa Aesar) ilave edildi. Tozlar homojen bir karışım elde etmek amacıyla üç eksenli karıştırıcıda (Turbula T2F) 60 dakika süreyle karıştırıldı. Bu karışım tozlar, tek eksenli presleme ile 800 MPa basınç altında, Ø12x12 mm boyutlarında preslenerek ham kompaktlar elde edildi. Ham kompaktlar atmosfer kontrollü fırın kullanılarak yüksek saflıkta argon atmosferi altında 1120 °C'de 45 dakika süreyle sinterlendi. Sinterlenmiş kompaktların yoğunluk değerleri yüksek hassasiyetli (±0,0001 g) terazi (Precisa XB220 A) ve yoğunluk kiti kullanılarak belirlendi. TM kompaktların ölçülen ($\rho_{Deneysel}$) ve teorik (ρ_{teorik}) yoğunluk değerlerine bağlı, ortalama gözenek miktarları Eş. 1'e göre hesaplandı.

$$\%\ Gözenek = \left(1 - \frac{\rho_{Deneysel}}{\rho_{Teorik}}\right) x100 \qquad 2.1$$

Kaplama işlemlerinden önce, TM kompaktlar sırasıyla 800, 1000 ve 1200 mesh zımpara kâğıtları ile polisaj yapıldıktan sonra 2 dakika süreyle alkol içerisinde ultrasonik yağ alma işlemine tabi tutuldu. Alkol içerisinde yağlardan arındırılan kompaktlar 60 °C sıcaklıktaki alkali çözeltiyle (50 g/l NaOH ve 10 g/l Na_3PO_4) 1 dakika süreyle yıkandı. Alkali temizleme işleminden sonra saf su ile yıkanan kompaktlar oda sıcaklığındaki asit çözeltisine daldırıldı. TM kompaktların pürüzlü yüzeylerini daha düzgün hale getirmek ve Ni-B kaplama ile kompakt arasındaki bağ kuvvetini arttırmak amacıyla, Ni-B kaplama işleminden önce 10 dakika süreyle düşük fosforlu Ni-P kaplama işlemi uygulandı. Ni-P çözeltisinden çıkartılan numuneler saf su ile yıkandıktan sonra doğrudan Ni-B kaplama çözeltisine daldırılarak 90 dakika süreyle kaplama işlemine tabi tutuldu. Ni-P ve Ni-B kaplama banyolarının kimyasal kompozisyonları ve çalışma parametreleri sırasıyla Tablo 1 ve Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. *Ni-P kaplama banyosu ve çalışma parametreleri*

$NiCl_2 \cdot 6H_2O$	35 g/l
$NaH_2PO_2 \cdot H_2O$	10 g/l
$Na_3C_6H_5O_7 \cdot 2H_2O$	65 g/l
NH_4Cl	50 g/l
NH_4OH	pH için
pH	9
Sıcaklık	82 °C
Zaman	10 min.

Tablo 2. *Ni-B kaplama banyosu ve çalışma parametreleri*

$NiCl_2 \cdot 6H_2O$	30 g/l
$C_2H_8N_2$	90 g/l
NaOH	90 g/l
$NaBH_4$	1.2 g/l
Tl_2SO_4	14 mg/l
pH	14
Sıcaklık	95 °C
Zaman	90 min.

Kaplama işlemlerinden sonra, ısıl işlemin kaplamanın yapısı ve sertliği üzerindeki etkilerini tespit etmek amacıyla kaplanmış numunelerin bir kısmına 300, 400 ve 500 °C'de 1 saat süreyle izotermal ısıl işlem uygulandı.

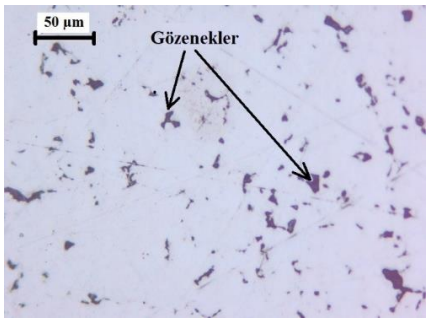
Kaplamaların yapısı, morfolojisi ve kimyasal kompozisyonları taramalı elektron mikroskobu (SEM), (Carl Zeiss ULTRA FESEM) ile analiz edildi. Kaplamanın kristalleşme sıcaklığı diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC), (TA Instruments TG/DTA Q600) analizi ile belirlendi. DSC analizi Ar atmosferi altında, 40-520 °C sıcaklık aralığında ve 10 °C/min ısıtma hızında gerçekleştirilmiştir. Kaplanmış ve ısıl işlem uygunmış kaplamaların faz ve bu fazlara ait kristal kafes yapıları X-ışını kırınım analizi (XRD), (Rigaku Ultra IV XRD) Cu Kα radyasyonu uygulanarak tespit edildi. Kaplamaların sertlikleri Qness Q10 Micro Vickers Tester mikrosertlik cihazı ile kaplama kesitlerine 10 s süreyle 100 gf yük uygulanarak ölçüldü.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Ağırlıkça %0,5 grafit ilave edilerek üretilen TM kompaktların kimyasal kompozisyonu Tablo 3'te verilmiştir. Elde edilen kompaktların kimyasal bileşimi başlangıç tozlarına oldukça yakın değerlerde elde edilmiştir. Bu sonuç, üretim süreçlerinin başarılı bir şekilde gerçekleştirildiğinin ve bu süreçlerden kompaktların kimyasal yapısının olumsuz yönde etkilenmediğinin bir kanıtı olarak değerlendirilebilir. Şekil 1'de TM kompaktların optik mikroskopla elde edilmiş mikro yapısı görülmektedir. Şekil 1'de de görüldüğü gibi TM kompaktlar oldukça küçük boyutlu ve homojen şekilde dağılmış gözenekli bir yapıya sahiptir. Kompaktların hesaplanan teorik yoğunluğu yaklaşık 7,77 g/cm^3 iken, yoğunluk ölçümleri gerçek yoğunluğun yaklaşık 7,34 g/cm^3 olduğunu göstermiştir. Bu sonuç, kompaktların ortalama %5,5 oranında gözenek ihtiva ettiğini göstermektedir.

Tablo 3. *TM kompaktların kimyasal kompozisyonu*

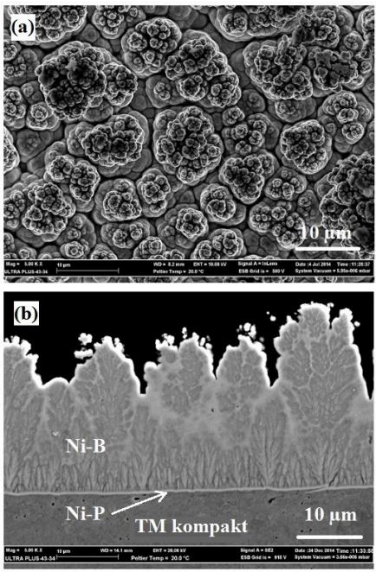
Elementler (wt.%)									
C	**Si**	**Mn**	**Cr**	**Ni**	**Cu**	**Al**	**P**	**S**	**Fe**
0,63	0,21	0,10	0,05	0,03	0,08	0,16	<0,001	0,03	Bal.



Şekil 1*. TM kompaktın optik görüntüsü*

Ni-B kaplanmış numunelerin yüzey ve kesit SEM görüntüleri Şekil 2'de görülmektedir. Şekil 2-b'de verilen kaplama kesitinden de anlaşılacağı üzere Ni-B kaplama sütun şeklinde büyüme özelliği göstermektedir. Sütun şeklindeki bölgeler, kimyasal indirgenme esnasında atomsal birikmenin daha hızlı olduğu bölgeler olarak değerlendirilebilir. Atomsal birikmenin homojen şekilde meydana gelmemesinden dolayı da oldukça pürüzlü ve birçok araştırmacı tarafından ifade edilen karnabahar benzeri [13–17] bir yüzey görünümü sergilemektedir (Şekil 2-a). Ni-B kaplamaların bu sütun şeklindeki yapısı aşınma koşullarında temas yüzey alanını küçültmekle birlikte pürüzlü yüzeydeki boşluklara yerleşecek yağlayıcılar sürtünme katsayısını da düşürmektedir [10]. Ni-B kaplama ile TM kompakt arasında yer alan Ni-P kaplama ise oldukça uyumlu ve üniform kaplama kalınlığına sahip bir ara yüzey meydana getirmiştir. Kaplama kalınlıkları değerlendirildiğinde 10 dakikalık kaplama işlemi sonucunda Ni-P kaplamada yaklaşık 0,43 µm, Ni-B kaplamada ise 90 dakikalık kaplama işlemi sonucunda üniform olmamakla beraber yaklaşık 20 µm kaplama

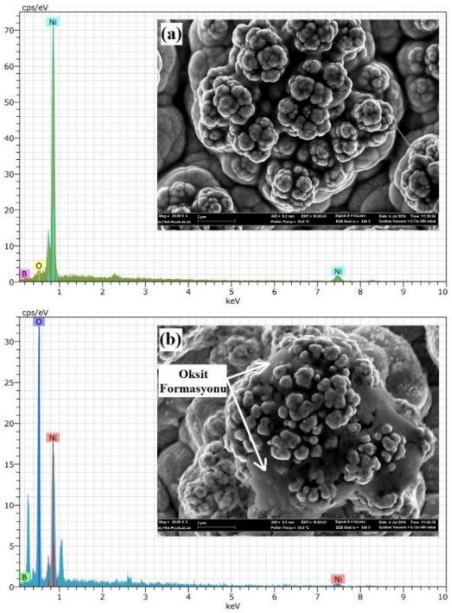
kalınlığı elde edilmiştir. Ancak Ni-B kaplamada sütun şeklindeki bölgelerde 27 µm kaplama kalınlığına sahip bölgelerin mevcudiyeti de tespit edilmiştir.



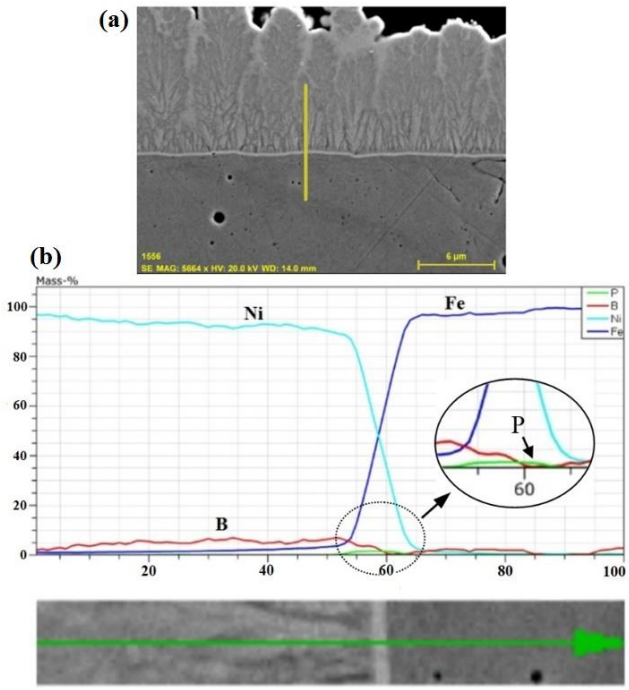
Şekil 2. *Ni-B kaplanmış TM kompaktların yüzey ve kesit morfolojisi*

Isıl işlem uygulanmış (500 °C) ve uygulanmamış numune yüzey mofolojilerine ait SEM görüntüleri Şekil 3'te verilmiştir. Uygulanan ısıl işlemler kaplama morolojinde önemli bir değişikliğe neden olmazken özellikle 500 °C'de ısıl işlem uygulanmış numune yüzeylerinde (Şekil 3-b) oksit film oluşumları tespit edilmiştir.

Ni-B/Ni-P/TM kesitinin çizgisel EDX analizi Şekil 4'te verilmiştir. EDX sonuçlarına göre Ni-P kaplama ağırlıkça % 4,8 P ve % 95,2 Ni içerirken, Ni-B kaplama ağırlıkça % 5,7 B ve % 94,3 Ni içermektedir. EDX sonuçları ayrıca Ni-B kaplamanın kimyasal kompozisyonunun kaplama kesiti boyunca homojen bir dağılım göstermediğini de ortaya koymaktadır. Kimyasal kompozisyondaki bu farklılıklar, kaplama çözeltisinin tazeliğini zamanla kaybetmesi ve çalışma parametrelerinde ki (sıcaklık, pH vb.) değişikliklerden ileri gelmektedir [18].

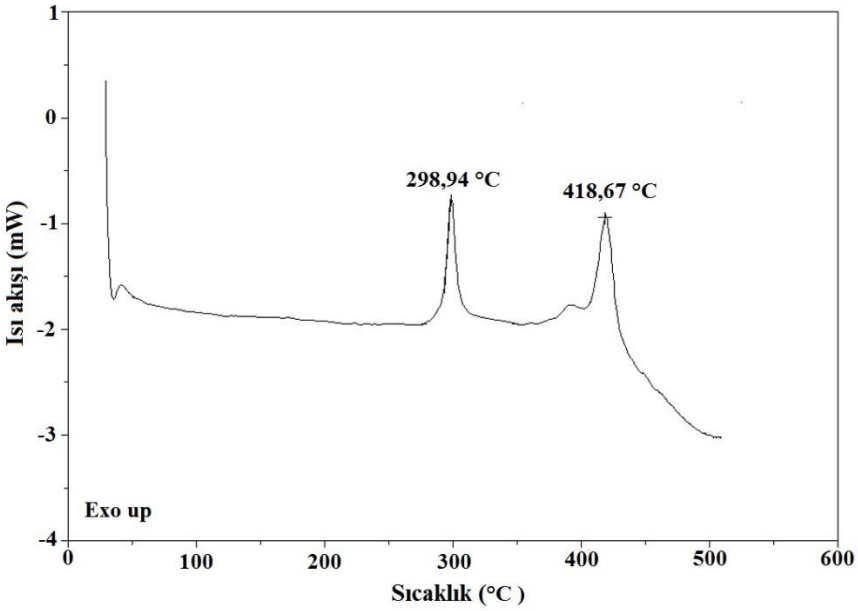


Şekil 3. *Ni-B kaplamanın (a) kaplanmış ve (b) 500 °C'de ısıl işlem uygulanmış haldeki yüzey morfolojisi ve EDX analizi*

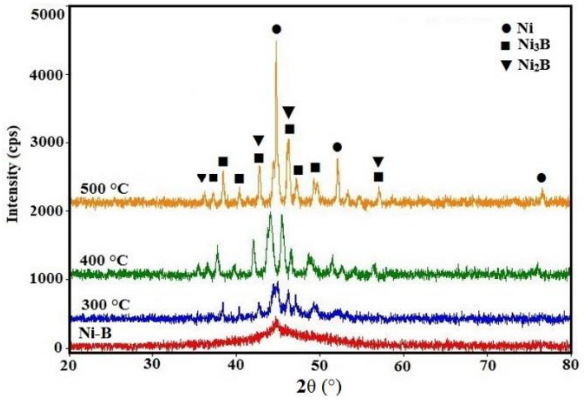


Şekil 4. *Ni-B/Ni-P/TM kompakt ara yüzeyinin (a) SEM görüntüsü ve (b) EDX analizi*

Şekil 5'te Ni-B kaplamanın 10 °C/min ısıtma hızında ki DSC termal analiz eğrisi görülmektedir. Ni-B kaplamanın DSC eğrisi, biri 298 °C'de diğeri 418 °C'de olmak üzere iki ekzotermik pike sahiptir. Birinci ekzotermik pik Ni ve Ni_3B fazlarının [11,16], ikinci ekzotermik pik ise Ni_2B fazının oluşumunu göstermektedir [12,16,19–22]. Literatür çalışmaları ekzotermik pik sayısının kaplamanın bor içeriğine bağlı olarak değiştiğini göstermektedir. Ağırlıkça %5'ten daha fazla bor içeren kaplamalarda, yaklaşık 300 °C'de Ni ve Ni_3B oluşumlarının yanı sıra, 400 °C'nin üzerinde Ni_2B faz oluşumu meydana gelmektedir [15, 18]. Bu nedenle, DSC analiz sonucu kaplamanın % 5'ten daha fazla bor içerdiğinin bir kanıtı olarak değerlendirilebilir. Sıcaklığa bağlı faz oluşumları XRD analiz sonuçlarında da görülebilir (Şekil 6).



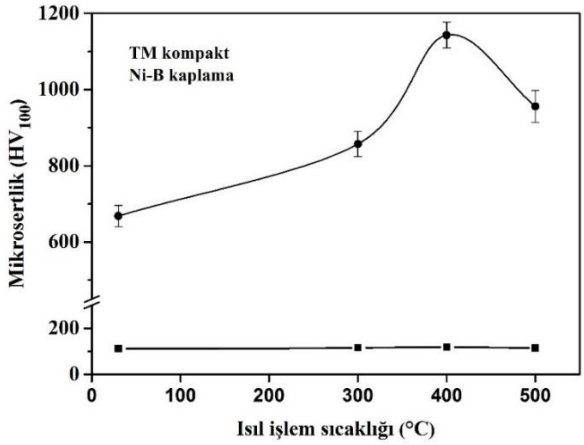
Şekil 5. *Ni-B kaplamanın DSC eğrisi*



Şekil 6. *Ni-B kaplamaların XRD kırınım desenleri*

Şekil 6'da kaplanmış ve ısıl işlem uygulanmış koşullardaki Ni-B kaplamanın XRD kırınım desenleri karşılaştırılmaktadır. Şekil 6'da görüldüğü gibi, kaplanmış haldeki Ni-B kaplamanın XRD kırınım analizinde amorfsu maddelerde elde edilen 35° ile 55° geniş ve basık bir pik elde edilmiştir. Ayrıca geniş pik üzerinde yaklaşık 45°'de kristalin nikele ait küçük bir pikin varlığı da dikkat çekmektedir. Buda Ni-B kaplamanın kaplanmış halde amorfsu ve kristal fazların karışımından oluştuğunu göstermektedir. Amorfsu Ni-B kaplama 300 °C'de ısıl işlem uygulandıktan sonra yüzey-merkezli-kübik Ni ve ortorombik kristal kafes yapısına sahip Ni_3B fazları halinde kristalize olmaktadır. 400 °C'de uygulanan ısıl işlem Ni ve Ni_3B yansımalarının daha keskin hale gelmesine ve tetragonal Ni_2B fazının oluşumuna neden olmaktadır. 500 °C'de ki ısıl işlemden sonra, Ni, Ni_3B ve Ni_2B yansımaları daha keskin hale gelmekte ve çok iyi bilinen kırınım piklerine dönüşmektedir. Şekil 6 ayrıca, kaplamadaki amorfsu fazın ısıl işlem sıcaklığının artmasına bağlı olarak azaldığını ve 500 °C'de tamamen kristalize olduğunu da göstermektedir.

Vickers sertlik testleri, TM kompaktların ve Ni-B kaplamanın ortalama sertlik değerlerinin sırasıyla 112 ve 668 HV_{100}, olduğunu ortaya koymaktadır (Şekil 7). Bütün ısıl işlem sıcaklık değerlerinde TM kompaktların sertliğinde kayda değer bir değişim gözlenmemiştir. Ni-B film kaplanmış halde yumuşak yüzey-merkezli-kübik Ni fazında borun bir nano yapılı aşırı doymuş katı çözeltisi iken 300 °C'de intermetalik Ni_3B fazının oluşumu nedeniyle sertlik artmaktadır. Ni-B kaplamanın sertliği 400 °C uygulanan ısıl işlem sonucu en yüksek değerine (1143 HV_{100}) ulaşmaktadır. 400 °C'de sertlikte meydana gelen bu artışa intermetalik Ni_3B ve Ni_2B fazlarının oluşumu sonucu meydana gelen çökelme sertleşmesi neden olmaktadır. 500 °C'de uygulanan ısıl işlem kaplamadaki mikro gerilmelerin azalmasına ve tane büyümesine neden olduğundan kaplamanın sertliği azalmaktadır [4]. Fakat meydana gelen tane büyümesi sınırlı bir şekilde meydana gelmekte ve tane boyutu nanokristal seviyesinde kalmaktadır [10]. Buda sertliğin aşırı düşmesini engellemektedir. Literatür çalışmalarında kaplanmış halde Ni-B kaplamaların sertliğinin 500-1170 HV_{100} arasında değiştiği rapor edilmektedir. Kaplamaların sertlikleri kompozisyon, ısıl işlem koşulları, sertlik ölçüm metodu ve altlık malzeme gibi değişkenlere bağlı olarak geniş bir aralıkta değiştiğinden, bu değerleri karşılaştırmak oldukça zor görünmektedir [10].



Şekil 7. *Mikrosertliğin ısıl işlem sıcaklığına bağlı değişimi*

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, demir esaslı TM kompaktlar üzerine kaplanmış Ni-B kaplamanın sertlik ve yapısal özelliklerine sıcaklığın etkisi incelendi. Elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Ni-P ve Ni-B alaşım kaplamalar akımsız kaplama tekniği ile başarılı bir şekilde demir esaslı TM kompaktlar üzerine kaplanmaktadır.
- Ni-B kaplama sütun şeklinde bir büyüme gösterirken, karnabahara benzer bir yüzey morfolojisine sahiptir.
- Ni-B kaplamalar kaplanmış halde amorfsu ve kristalin fazların karışımında bir yapıya sahiptir.
- Amorfsu Ni-B kaplama ısıl işlem sonrası yüzey-merkezli-kübik Ni, ortorombik Ni_3B ve tetragonal Ni_2B şeklinde kristalize olmaktadır.
- Ni-B kaplamaların sertliği 400 °C'de uygulanan 1 saatlik izotermal ısıl işlem sonrası maksimum değerine ulaşmaktadır (1143 HV_{100}).
- Isıl işlemler sonrası nikel matris yapıda nikel borür fazların çökelmesi sertlikte artışa neden olmaktadır.
- 500 °C'de uygulanan ısıl işlem kaplamada tane büyümesine ve mikro gerilmelerin azalmasına neden olduğundan sertliğin düşmesine neden olmaktadır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışmadaki test ve analizler Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Biriminin finansal desteği ile gerçekleştirilmiştir (Proje No: KBÜ-BAP-14/1-DS-058)

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] M. Etaat, M. Emamy, M. Ghambari, and E. Fadaei, Surface treatment and nickel plating of iron powder metallurgy parts for corrosion protection. Materials and Design, 30:9 (2009) 3560–3565.

[2] S. Senthur Prabu, S. Prathiba, M. A. Asokan, A. Jain, N. K. Jain, and P. K. Chourasiya, Investigations on dry sliding wear behaviour of Sintered/Extruded P/M Alloy Steels (Fe-C-W-Ti). Procedia Engineering, 97 (2014) 2119–2126.

[3] K. V. Sudhakar, P. Sampathkumaran, and E. S. Dwarakadasa, Dry sliding wear in high density Fe–2%Ni based P/M alloys. Wear, 242:1–2207–212, 2000.

[4] U. Matik, Structural and wear properties of heat-treated electroless Ni-P alloy and Ni-P-Si3N4 composite coatings on iron based PM compacts. Surface and Coatings Technology, 30:2 (2016) 528–534.

[5] D. Singh and R. K. Dube, Electroless nickel coating of sintered iron compacts. Powder Metallurgy, 38:1 (1995) 52–54.

[6] W. Sha, X. Wu, and K. G. Keong, Electroless copper and nickel–phosphorus plating Processing, characterisation and modelling. Woodhead Publishing Limited, 2011.

[7] B. Oraon, G. Majumdar, and B. Ghosh, Improving hardness of electroless Ni–B coatings using optimized deposition conditions and annealing. Materials & Design, 29:7 (2008) 1412–1418.

[8] V. Vitry, A.-F. Kanta, and F. Delaunois, Mechanical and wear characterization of electroless nickel-boron coatings. Surface and Coatings Technology, 206:7 (2011) 1879–1885.

[9] P. Sahoo and S. K. Das, Tribology of electroless nickel coatings - A review. Materials and Design, 32:4 (2011) 1760–1775.

[10] V. Vitry and F. Delaunois, Nanostructured electroless nickel-boron coatings for wear resistance. in Anti-Abrasive Nanocoatings, Elsevier, 2015.

[11] U. Matik and R. Çıtak, Influence of the heat treatment on hardness and adhesive wear performance of Ni-P deposit with low phosphorus content. Materials Testing, 57:5 (2015) 431–436.

[12] M. Anik, E. Körpe, and E. Şen, Effect of coating bath composition on the properties of electroless nickel-boron films. Surface and Coatings Technology, 202:9 (2008) 1718–1727.

[13] F. Delaunois, J. P. Petitjean, P. Lienard, and M. Jacob-Duliere, Autocatalytic electroless nickel-boron plating on light alloys. Surface and Coatings Technology, 124:2–3 (2000) 201–209.

[14] K. Brunelli, M. Dabalà, F. Dughiero, M. Magrini, M. Dabala, F. Dughiero, and M. Magrini, Diffusion treatment of Ni-B coatings by induction heating to harden the surface of Ti-6Al-4V alloy. Materials Chemistry and Physics, 115:1 (2009) 467–472.

[15] K. Krishnaveni, T. S. N. Sankara Narayanan, and S. K. Seshadri, Electrodeposited Ni–B coatings: Formation and evaluation of hardness and wear resistance. Materials Chemistry and Physics, 99:2–3 (2006) 300–308.

[16] I. Baskaran, R. Sakthi Kumar, T. S. N. Sankara Narayanan, and A. Stephen, Formation of electroless Ni–B coatings using low temperature bath and evaluation of their characteristic properties. Surface and Coatings Technology, 200:24 (2006) 6888–6894.

[17] F. Bülbül and L. E. Bülbül, Fabrication of antibacterial and hydrophilic electroless Ni–B coating on 316L stainless steel. Applied Physics A, 122:1, (2016) 1-15.

[18] V. Vitry, A.-F. Kanta, and F. Delaunois, Initiation and formation of electroless nickel–boron coatings on mild steel: Effect of substrate roughness. Materials Science and Engineering: B, 175:3(2010) 266–273.

[19] T. S. N. Sankara Narayanan and S. K. Seshadri, Formation and characterization of borohydride reduced electroless nickel deposits. Journal of Alloys and Compounds, 365:1–2 (2004) 197–205.

[20] S. Pal, N. Verma, V. Jayaram, S. K. Biswas, and Y. Riddle, Characterization of phase transformation behaviour and microstructural development of electroless Ni-B coating. Materials Science and Engineering A, 528:28 (2011) 8269–8276.

[21] H. H. Li, H. H. Li, W. Dai, and M. Qiao, Preparation of the Ni-B amorphous alloys with variable boron content and its correlation to the hydrogenation activity. Applied Catalysis A: General, 238:1 (2003) 119–130.

[22] X. Cheng, Q. Rao, and H. Yang, A Controllable Method of the Preparation of Electroless Nickel-Boron Films on Ag Substrate. Metal Finishing, 110:1 (2012) 22–26.

[23] T. S. N. Sankara Narayanan and S. K. Seshadri, Formation and characterization of borohydride reduced electroless nickel deposits. Journal of Alloys and Compounds, 365:1–2 (2004) 197–205.