



**Makale / Research Paper**

**%3,0 Mg içeren Borlanmış Co-Mg Alaşımının Yüzey Özelliklerinin İncelenmesi**

İsmail YILDIZ<sup>1\*</sup>, İbrahim GÜNEŞ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Afyon Kocatepe Üniversitesi, İncehisar Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 03750, Afyonkarahisar/TÜRKİYE

<sup>2</sup>Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Bilimi Mühendisliği Bölümü, 03200 Afyonkarahisar/TÜRKİYE  
[iyildiz@aku.edu.tr](mailto:iyildiz@aku.edu.tr)

**Received/Geliş:** 22.04.2019

**Accepted/Kabul:** 17.06.2019

**Öz:** Bu çalışmada, %97 Co ve %3 Mg içeren Co-Mg alaşımına borlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Co-Mg alaşım malzemesini üretmek için toz metalurjisi (TM) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde, Co ve Mg metal tozları kapalı kaplar içerisinde homojen bir şekilde karıştırılarak şekillendirilmeleri için özel olarak tasarlanmış silindirik kalıplara dökülmüştür. Tek eksenli preste 300 bar basınç altında preslendikten sonra Argon gazı atmosferi ortamında 530 °C sıcaklıkta sinterlenmiştir. Sinterlenerek üretilen numunelere sırasıyla sertlik, yoğunluk ve yüzey pürüzlülüğü testleri uygulanmıştır. Sertlik testi sonrası 123 HV<sub>0,05</sub> değeri elde edilirken ölçülen yoğunluk değeri ise 4,95 gr/cm<sup>3</sup> olarak bulunmuştur. Bu işlemler sonrasında numuneler kapalı fırın ortamında 850 ve 900 °C sıcaklık ve 1.5-4.5 saat değişen sürelerde borlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlem sonrasında SEM ve XRD analiz çalışmaları yapılmıştır. Analiz sonrasında borür tabakaları 850 °C sıcaklıkta 1,5 saat sürede 55 µm olarak bulunurken en yüksek 900 °C sıcaklık 4,5 saat sürede 140 µm olarak ölçülmüştür. Borlanmış Kobalt-Magnezyum alaşımlarına uygulanan XRD analizi sonucunda CoB, Co<sub>2</sub>B ve Co fazları elde edilmiştir. Mg elementinin hızlı bozulma özelliğinden dolayı yapılar kısmende olsa boşluklar oluşmuştur.

**Anahtar kelimeler:** Alaşım, borlama, sinterleme, faz.

**Investigation of Surface Properties of Boriding Co-Mg Alloy Containing 3.0% Mg**

**Abstract:** In this study, Co-Mg alloying containing 97% Co and 3% Mg was performed. Powder metallurgy (TM) method was used to produce Co-Mg alloy material. In this method, the Co and Mg metal powders are poured into cylindrical molds, which are specially designed to be shaped by mixing homogeneously in closed containers. It was pressed under 300 bar pressure in uniaxial press and sintered at 530 °C in atmosphere of Argon gas atmosphere. Sintered samples were subjected to hardness, density and surface roughness tests respectively. After the hardness test, it was found that the value of HV<sub>0,05</sub> was 123 and the measured density value was 4.95 gr/cm<sup>3</sup>. After these processes, samples were subjected to boring in 850 and 900 °C temperature and 1.5-4.5 hours in closed oven environment. After this process, SEM and XRD analyzes were conducted. After the analysis, the boride layers were measured as 55 µm in 850 °C for 1.5 hours and the highest 900 °C temperature was measured as 140 µm in 4.5 hours. As a result of XRD analysis applied to boriding Cobalt-Magnesium alloys CoB, Co<sub>2</sub>B and Co phases were obtained. Due to the rapid deterioration of the Mg element, some gaps were formed in the structures.

**Keywords:** Alloy, boriding, sintering, phase.

*Bu makaleye atıf yapmak için*

Yıldız, İ., Güneş, İ., “%3,0 Mg içeren Co-Mg Alaşımının Borlama Özelliklerinin İncelenmesi” El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi 2019, 6(3), 533-542.

*How to cite this article*

Yıldız, İ., Güneş, İ., “Investigation of Boriding Properties of Co-Mg Alloy with 3.0% Mg” El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2019, 6(3); 533-542.

## 1. Giriş

Yüzey dayanımını artırma yöntemlerinden olan borlama, malzemelerin yüzey direncini artırma konusunda en etkili yöntemlerden biridir [1-3]. Yüksek aşınma ve oksidasyon direnci diğer yöntemlere göre borlamada en büyük avantajlar arasındadır [4,5]. Borlama; bor atomlarının metal/alaşım yüzeyine difüzyonu yoluyla yüzeylerde bir borür tabakasının elde edilmesi şeklindedir. Bor sıcaklığı, çeliğin kimyasal bileşimi, bor materyali ve işlemin delme süresi gibi özellikler FeB, Fe<sub>2</sub>B ve CoB, Co<sub>2</sub>B gibi metalik borürlerin oluşumu ile karakterize edilir.

Co bazlı alaşımlar yüksek yorulma dayanımı, aşınma ve korozyon direnci gibi özellikler gösterir. CoCrMo alaşımları, plastik parçaların enjeksiyonla kalıplanması için aletlerin imalatında, hava ve karada çalışan gaz türbinlerinin (yük taşıma, valfler, valf yuvaları ve burçlar manşonlarının) performansında ve çoğunlukla yapay kalça eklemlerinde, diş protezlerinde ve diz eklemleri gibi uygulamalarda kullanılmaktadır [10-13]. CoCrMo alaşımlarında nitrüleme, karbürleme ve sertleştirme gibi yüzey işlemlerinin uygulanması aşınma ve korozyon direncini arttırmaktadır [14-16].

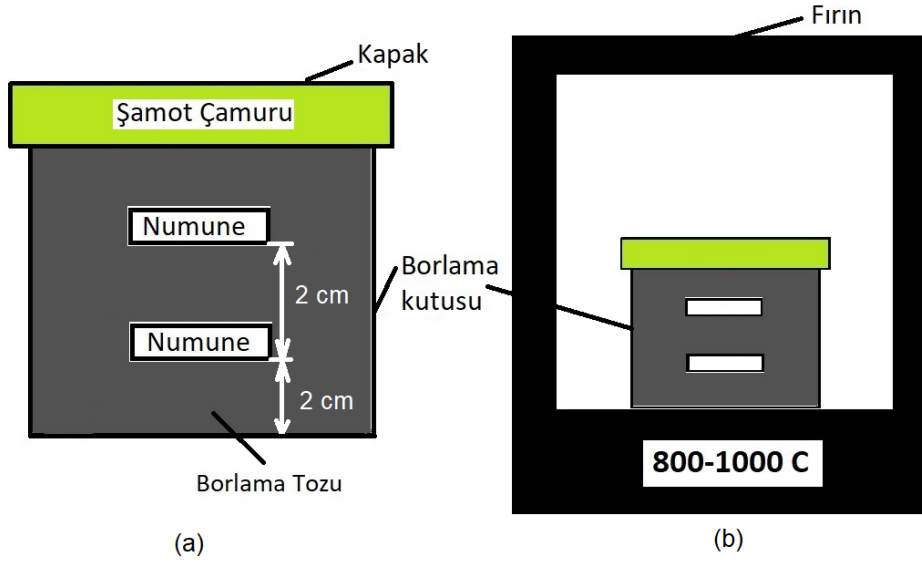
Borlama, çok sağlam bir yüzey iyileştirme yöntemidir. Bu yöntemin kinetiği [17], borlanmış katmanın yapışması [18], korozyon davranışı, abrazif aşınma davranışı [19-21] ve kayma aşınması gibi davranışları üzerine birtakım araştırmalar yapılmıştır. Endüstride borlama, demir alaşımlarının sertlik ve aşınma direncini arttırmak için sıklıkla uygulanır [22]. Bor difüzyonu, demir alaşımının kristal kafesinde, sıcaklık, zaman ve ortamın bor potansiyeli gibi proses parametrelerine bağlı olarak FeB ve Fe<sub>2</sub>B demir borürlerinin oluşumuna yol açar [23-25].

Bu çalışmada, borlanmış Co-Mg alaşımlarının aşınma davranışları incelenmiştir. Sinterlenerek üretilen alaşımlar kutu borlama yöntemiyle borlanmıştır. Borlanmış numunelere aşınma testi gerçekleştirilmiştir. Aşınan yüzeylere metalografik analiz olarak SEM ve XRD yapılmış ve yüzeylerde oluşan yapılar tespit edilmiştir.

## 2. Malzeme ve Yöntem

Bu çalışmada, %97 Co - %3 Mg kompozisyonunu oluşturmak için % 99,5 saflıkta Co ve Mg metal tozları tercih edilmiştir. Co-Mg metalik tozlar tane yapılarının birbiri içerisinde iyi bir şekilde karışması için 24 saat süreyle tek faza sahip elektrik motoruna sahip karıştırıcıda karıştırılmıştır. Elde edilen toz karışımlar, geometrik şekil almaları için soğuk metal kalıba dökülmüş ve tek eksene sahip preste yaklaşık olarak 30 N kuvvet uygulanarak şekillenmiştir. Şekillenmiş numuneler koruyucu atmosferik gaz ortamına sahip fırın içerisinde 530 °C sıcaklıkta 2 saat süreyle sinterlenmiştir.

Sinterleme sonrasında elde edilen numunelere borlama yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntem, fırın atmosferi ortamında silindirik ya da dikdörtgen şekilli kapalı kutular içerisine numunelerin etrafını saracak şekilde alt ve üst kısımlarına Ekabor II toz karışımları dökülmüştür. Her bir numune arasında yaklaşık olarak 2 cm boşluk bırakılmıştır. Buradaki amaç ise her numunenin sıcaklıkla tozların numunelere nüfuz etmesini sağlamaktır. Borlama işleminde sıcaklıkla numunelerin oksitlenmemesi için kutuların kapakları şamot çamuru ile kapatılmış ve yalıtım yapılmıştır (Şekil 1). Numuneler fırın ortamında 850 ve 900 °C gibi değişen sıcaklıklarda, 1,5 ve 4,5 saat süre aralıklarında ısıtılmışlardır. Daha sonra numuneler fırından çıkarılarak soğumaya bırakılmıştır. Borlama işlemi sonrasında bu numuneler üzerinde metalografik analiz olarak XRD ve SEM analizi gerçekleştirilmiş, mikrosertlik testi uygulanmıştır.



**Şekil 1.** Fırın içerisinde borlama işleminin yapılışı (a: Numune kutusunun hazırlanması, b: Numunenin fırınlanması).

XRD analiz çalışmasında, alfa ışını, 0,02 °/dk tarama hızı ve 2 Theta tarama açısı uygulanmıştır. Mikrosertlik testinde ise, yüzeyden içeriye doğru 5 farklı ölçüm yapılmış ve sonuçların ortalaması alınmıştır.

### 3. Bulgular ve Tartışma

#### 3.1. Yüzey Pürüzlülüğü

Numunelere yüzey pürüzlülüğü ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümlerin ortalamaları ( $R_a$ ) alınmıştır.  $R_a$  değeri aşağıdaki denkleme göre hesaplanmıştır.

$$R_a (\mu\text{m}) = \left( \frac{P_{\text{alanı}} + Q_{\text{alanı}}}{L} \right) \cdot \frac{1000}{Vq} \quad (1)$$

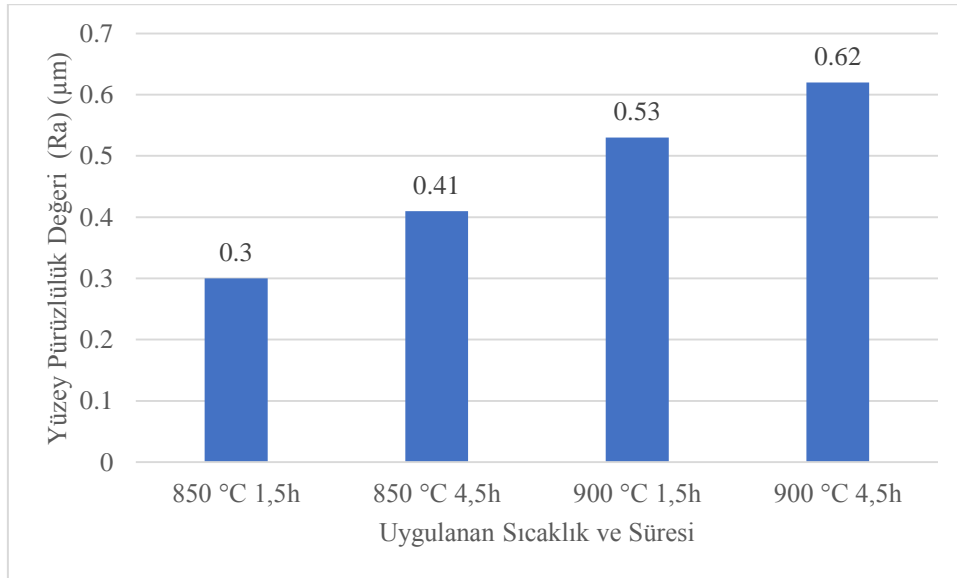
Burada;

P ve Q alanları ( $\text{mm}^2$ ), L uzunluğu (mm) ve Vq ise düşey büyültme değerini ifade etmektedir. Ölçüm PCE-RT1100 cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

Ölçüm neticesinde yüzey pürüzlülük değerlerinin 0.30 ile 0.62 arasında değiştiği tespit edilmiştir (Şekil 2).

#### 3.2. Yoğunluk

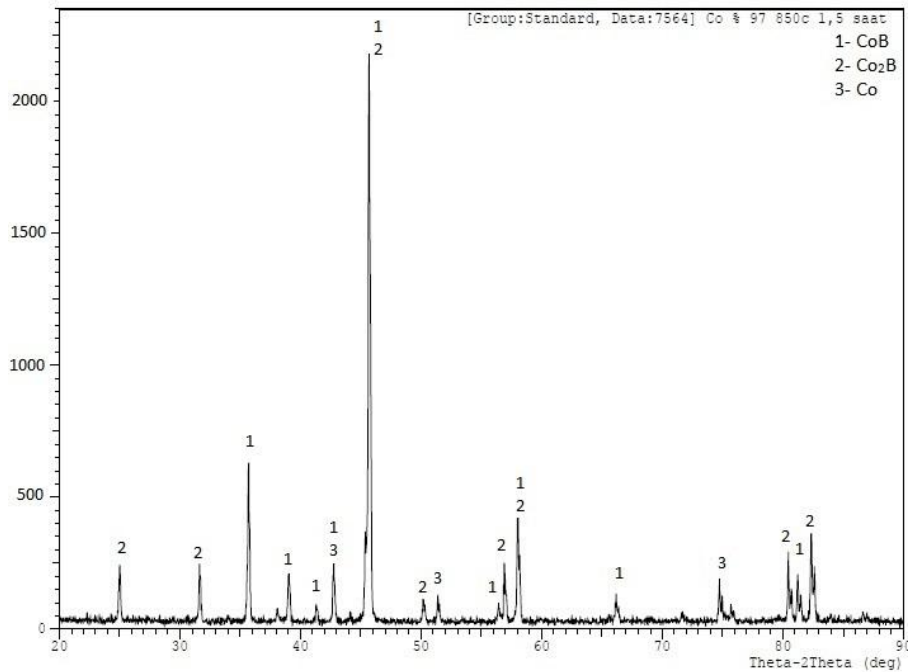
Sinterleme sonrasında üretilen malzemelere yoğunluk testi yapılmıştır. Yoğunluk  $d=m/V$  formülüne göre hesaplanmıştır. Burada m, sinterlenmiş numunenin kütlesi; v, sinterlenmiş numunenin hacmi olarak hesaplanmıştır. Hesaplama sonucunda yoğunluk değeri  $4,95 \text{ gr/cm}^3$  olarak bulunmuştur.



**Şekil 2.** 850 ve 900 °C sıcaklıklarda borlanmış numunelerde ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri

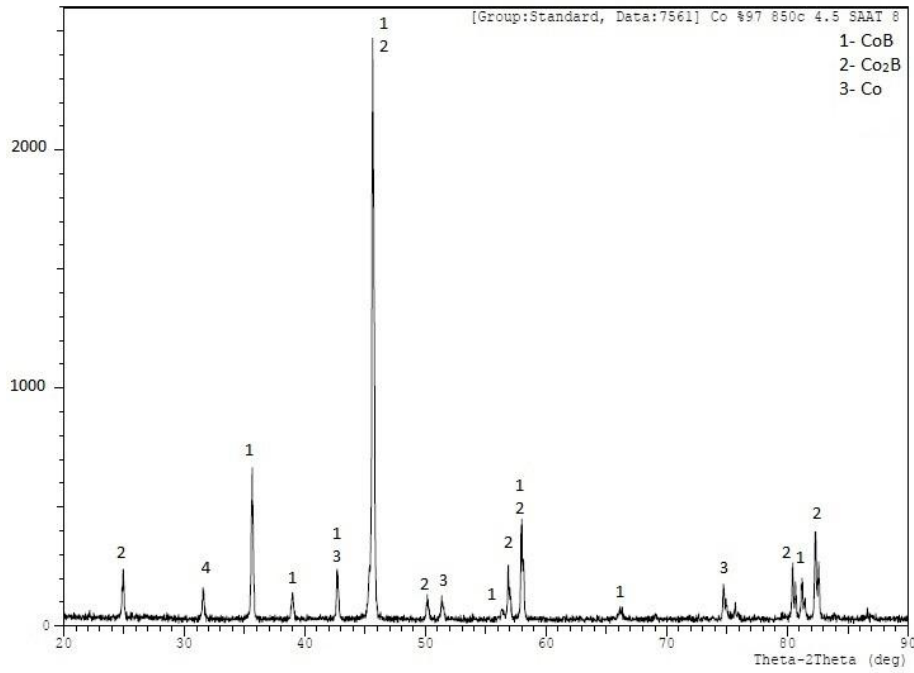
### 3.3. XRD Analizi

Şekil 3 ve 4'te 850 °C sıcaklık, 1,5 ve 4,5 saat sürede borlama işlemi yapılmış %97 Co-%3 Mg kompozisyonuna ait XRD analiz sonuçları görülmektedir. Şekil 3'de 850 °C sıcaklık ve 1,5 saat sürede yapılan borlama sonrasında CoB ve Co<sub>2</sub>B pik değerleri 2200 yoğunluk olarak ortaya çıkmıştır. Şekil 3'de 850 °C sıcaklık ve 1,5 saat sürede yapılan borlama sonrasında ise bu değer 2500 yoğunluğa kadar çıkmıştır.

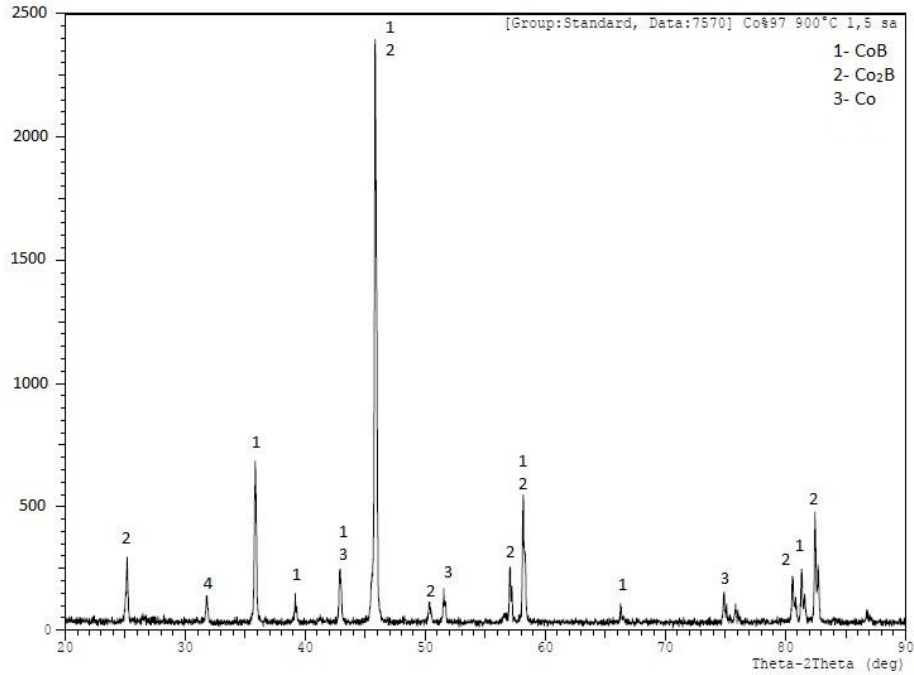


**Şekil 3.** %97 Co-%3 Mg kompozisyonuna 850 °C sıcaklıkta 1,5 saat sonrasındaki borlama yöntemi sonrası gerçekleşen XRD analiz sonucu

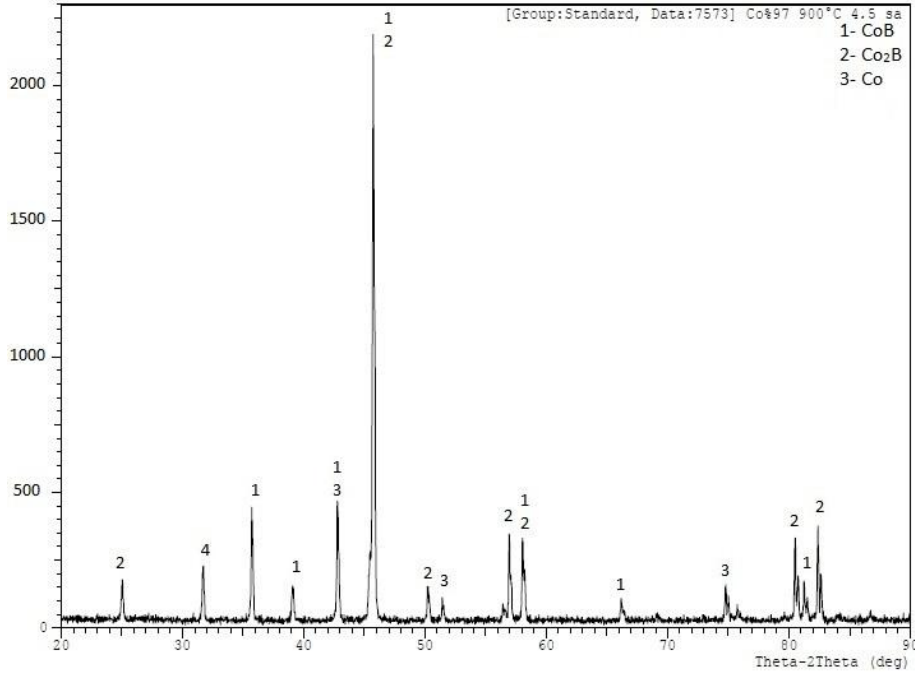
Bu durum sıcaklık ve sürenin artmasına bağlı olarak artış göstermiştir. Johnston vd., Campos-Silva vd. [26, 27] 950 ve 1000 °C'de borlama işlemini gerçekleştirmiş, CoB ve Co<sub>2</sub>B pik oranlarını 1500 yoğunluk değeri olarak bulmuşlardır. Bu çalışmada ise 2500 yoğunluk değeri bulunmuştur.



**Şekil 4.** %97 Co-%3 Mg kompozisyonuna 850 °C sıcaklıkta 4,5 saat sonrasındaki borlama yöntemi sonrası gerçekleşen XRD analiz sonucu



**Şekil 5.** %97 Co-%3,0 Mg kompozisyonuna 900 °C sıcaklıkta 1,5 saat sonrasındaki borlama yöntemi sonrası gerçekleşen XRD analiz sonucu



**Şekil 6.** %97 Co-%3 Mg kompozisyonuna 900 °C sıcaklıkta 4,5 saat sonrasındaki borlama yöntemi sonrası gerçekleşen XRD analiz sonucu

Şekil 5 ve 6'da 900 °C sıcaklık, 1,5 ve 4,5 saat sürede borlanmış %97 Co-%3 Mg kompozisyonuna gerçekleştirilen XRD analiz sonuçları görülmektedir. Sıcaklık ve süre artışına bağlı olarak CoB ve Co<sub>2</sub>B pik değerlerindeki yoğunluklarda da artışlar olmuştur. Sürelerin artışı sonuçları da etkilemiş ve pik yoğunlukları da değişmiştir. Bu durum borlamanın gerçekleştiğini göstermektedir. Al-Zain vd. [28] ve Choi vd. [29] yaptıkları çalışmada Co<sub>2</sub>B faz değerini 2500 yoğunluk değeri olarak bulmuşlardır. Yapılan bu çalışmada ise faz değerlerinin 1500 ve 2000 yoğunluk değeri olarak elde edilmesi çalışmanın gerçekleştiğini göstermektedir.

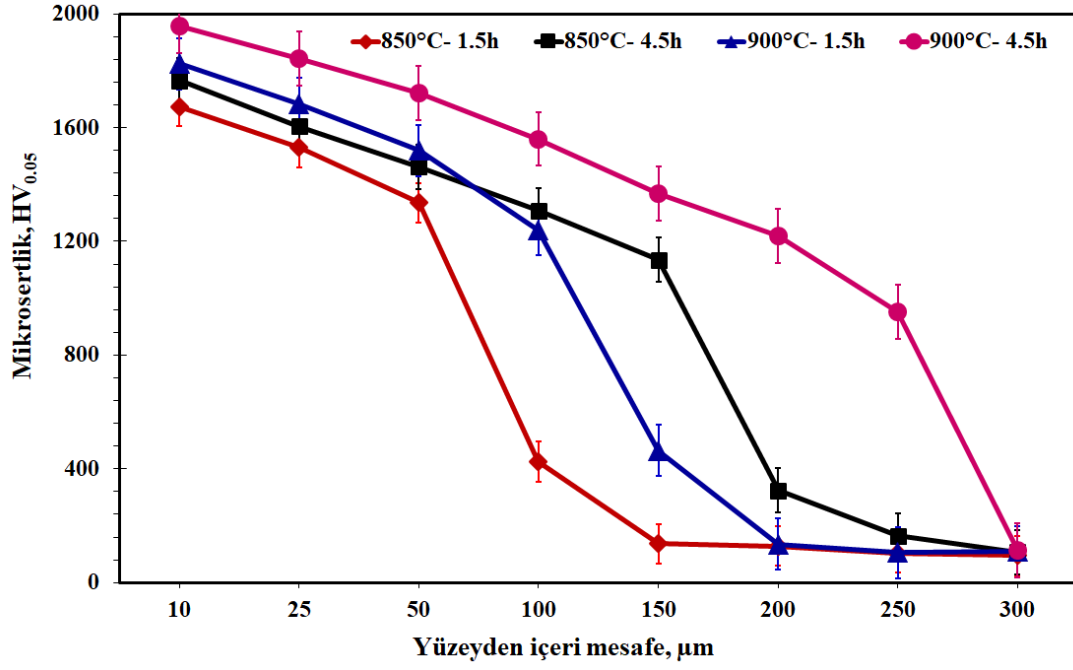
### 3.4. Mikroyapı

Şekil 7'de 850 ve 900 °C'de borlanmış % 97 Co ile % 3 Mg alaşımlarının mikroyapı görüntüleri görülmektedir. Sıcaklık ve süre artışına bağlı olarak tabaka kalınlıklarında artışlar olmuş, difüzyon bölgeleri ise çok belirgin bir şekilde oluşmuştur. Bu durum, Şekil 7d'de çok net görünmektedir. Ana malzemeye bor tabakaları daha fazla yayılmış ve difüzyon bölgesini daha belirgin hale getirmiştir. Ölçüm sonrasında tabaka kalınlıkları 850 °C sıcaklık 1,5 saat sürede 55 µm, 4,5 saat sürede ise 72 µm olarak ölçülmüştür. 900 °C sıcaklıkta 1,5 saat sürede yapılmış borlama sonucunda ise 86 µm, 4,5 saat sürede ise 140 µm olarak bulunmuştur. Sıcaklık ve süre artışına bağlı olarak borür tabakalarda bozulmalar meydana gelse de 900 °C en iyi bor sıcaklığı olarak gözlemlenmiştir.

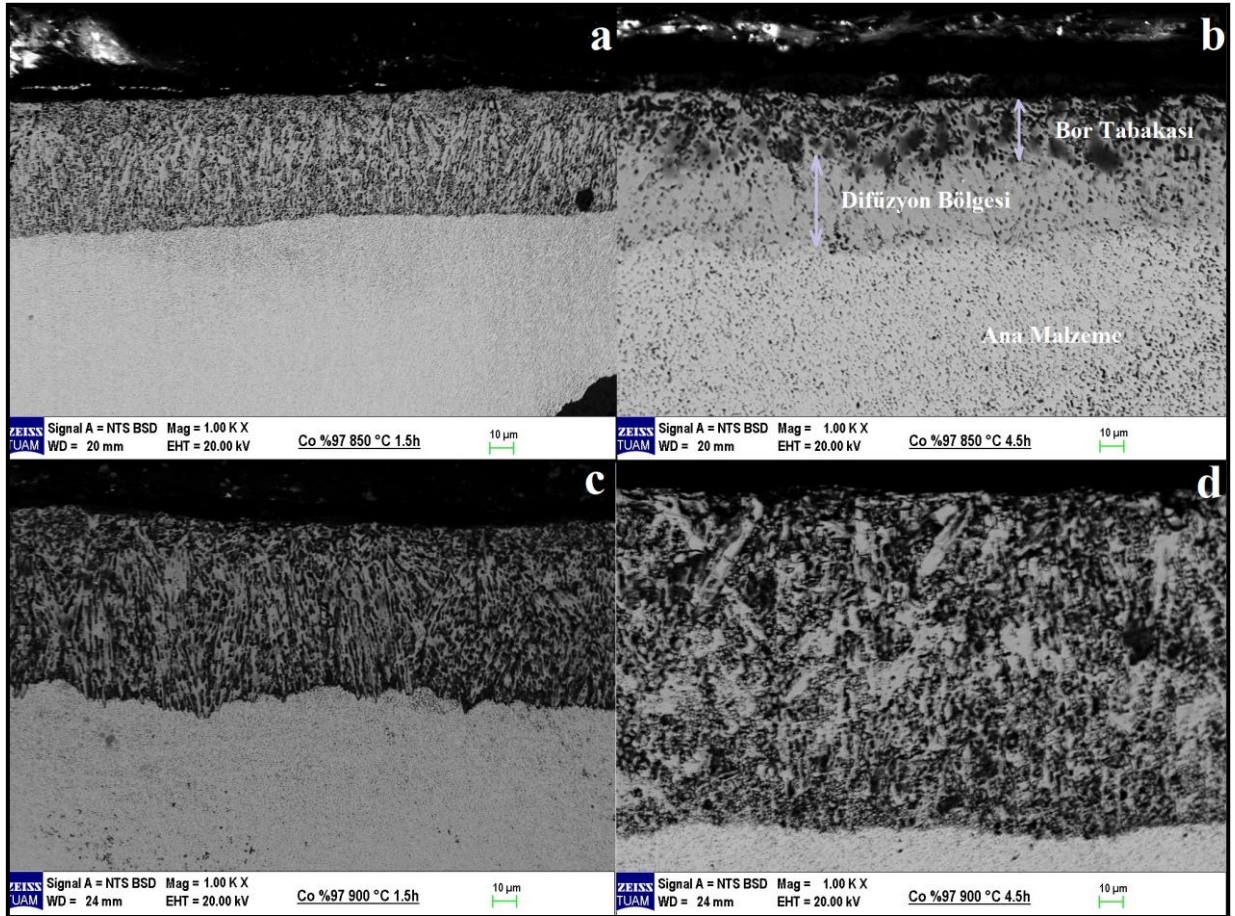
### 3.5. Mikrosertlik

Şekil 8'de, borlanmış % 97 Co ile % 3 Mg alaşımının mikrosertlik değerleri görülmektedir. Borlama sıcaklık ve süresinin artmasıyla sertlik değerlerinde artışlar elde edilmiştir. 850 ve 900 °C'de 1.5 ve 4.5 saat süreyle borlanmış numunelerde sırasıyla, 1674±28 HV<sub>0.05</sub>, 1765±37 HV<sub>0.05</sub>, 1825±56 HV<sub>0.05</sub> ve 1956±70 HV<sub>0.05</sub> sertlik değerleri elde edilmiştir.

En yüksek sertlik değeri 900 °C'de 4.5 saat süre sonrasında borlanmış numunede elde edilirken en düşük sertlik değeri 850 °C'de 1.5 saat süre sonrasında elde edilmiştir. Borlanmamış numunenin sertliği ise, 123 HV<sub>0.05</sub> olarak tespit edilmiştir. Borlama işlemi % 97 Co ile % 3 Mg alaşımının sertlik değerinde önemli derecede artış sağlamıştır.



Şekil 7. Borlanmış % 97 Co ile % 3 Mg alaşımının mikroyapı görüntüleri (a: 850 °C 1,5 saat, b: 850 °C 4,5 saat, c: 900 °C 1,5 saat, d: 900 °C 4,5 saat)



Şekil 8. Borlanmış % 97 Co ile % 3 Mg alaşımının mikrosertlik değerleri

#### 4. Sonuçlar

Yapılan çalışmanın amacı, Co-Mg alaşımının borlama sonrasındaki etkilerini araştırmaktır. Bu kapsamda alaşım içerisindeki malzemelerin ergime sıcaklıkları dikkate alınarak malzeme üretimi gerçekleşmiş ve literatürde yapılan çalışmalara bakılarak borlama sıcaklık ve süresi uygulanmıştır. Bu işlemler sonrasında elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- 850 ve 900 °C'de 1,5-4,5 saat süreyle borlama deneyi sonucunda sırasıyla, 55 µm, 72 µm, 86 µm ve 140 µm kalınlıklarında borür tabakaları elde edilmiştir.
- Borlama sonrasında numunelere XRD analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda CoB, Co<sub>2</sub>B ve Co faz değerleri ortaya çıkmıştır.
- % 97 Co ve % 3 Mg içeren numunelerin yoğunluğu 4,95 gr/cm<sup>3</sup> olarak elde edilmiştir.
- Sinterleme sonrasında elde edilen numunelerin yüzey pürüzlülük ölçüm neticesinde değerlerinin 0.30 ile 0.62 arasında değiştiği tespit edilmiştir.
- Sinterleme sonucunda malzemelerde 123±9 HV<sub>0,05</sub> sertlik değeri elde edilmiştir.
- 850 ve 900 °C'de 1.5 ve 4.5 saat süreyle borlanmış numunelerde sırasıyla, 1674±28 HV<sub>0,05</sub>, 1765±37 HV<sub>0,05</sub>, 1825±56 HV<sub>0,05</sub> ve 1956±70 HV<sub>0,05</sub> sertlik değerleri elde edilmiştir.
- Borlama sonrasında en yüksek sertlik değeri 900 °C'de 4.5 saat süre borlanmış numunede elde edilirken, en düşük sertlik değeri ise 850 °C'de 1.5 saat sürede borlanmış numunede elde edilmiştir.
- Uygulanan borlama işleminde sıcaklık ve süre artışına bağlı olarak borür tabaka kalınlıklarında artışlar olmuştur. En iyi bor sıcaklığı 900 °C olarak gözlemlenmiştir.

Mg elementi hava ile çok çabuk bozulabilen bir malzemedir. Gerçekleşen çalışmada bu malzeme ortamdaki uzaklaşarak yapıda bozulmalar meydana getirmiştir. Çok yüksek vakum ortamında alaşım üretimi yapılması daha uygun olacaktır.

#### Teşekkür

Gerçekleştirilen bu çalışma, Afyon Kocatepe Üniversitesi BAPK 17.MYO.05 no'lu proje ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonuna çok teşekkürler.

#### Kaynaklar

- [1]. Meneses-Amador, A., Sandoval-Juárez, D., Rodríguez-Castro, G. A., Fernández-Valdés, D., Campos-Silva, I., Vega-Morón, R. C., Arciniega-Martínez, J. L., Contact fatigue performance of cobalt boride coatings, *Surface & Coatings Technology*, 2018, 353, 346-354.
- [2]. Erdoğan, A., Investigation of high temperature dry sliding behavior of borided H13 hot work tool steel with nanoboron powder, *Surface & Coatings Technology*, 2019, 357, 886-895.
- [3]. Gunes I., Yıldız I., Rate of Growth of Boride Layers on Stainless Steels, *Oxidation Communications*, 2015, 38, 2189-2198.
- [4]. Rai, D., Singh, B., Singh, J., Characterisation of wear behaviour of different microstructures in Ni-Cr-Mo-V steel, *Wear*, 2007, 263, 821-829.
- [5]. Grushko, B., Kowalski, W., Mi, S. B., A study of the Al-Co-Cr alloy system, *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 739, 280-289.
- [6]. Johnston, J. M., Jubinsky, M., Catledge, S. A., Plasma boriding of a cobalt-chromium alloy as an interlayer for nanostructured diamond growth, *Applied Surface Science*, 2015, 328, 133-139.



- [7]. Yıldız, I., Gunes, I., Ulker, Ş., Borlanmış Fe-Mg Alaşımının Aşınma Davranışının İncelenmesi, 1st International Symposium on Light Alloys and Composite Materials, 2018, 367-368, Karabuk.
- [8]. Rodríguez-Castro, G. A., Reséndiz-Calderon, C. D., Jiménez-Tinoco, L. F., Meneses-Amador, A., Gallardo-Hernández, E. A., Campos-Silva, I. E., Micro-abrasive wear resistance of CoB/Co<sub>2</sub>B coatings formed in CoCrMo alloy, *Surface & Coatings Technology*, 2015, 284, 258-263.
- [9]. Çalık, A., Karakaş, M. S., Uçar, N., Ünüvar, F., Boriding kinetics of pure cobalt, *Kovove Materialy*, 2014, 52(2), 107-112.
- [10]. Campos-Silva, I., Bravo-Bárceñas, D., Cimenoglu, H., Figueroa-López, U., Flores-Jiménez, M., Meydanoglu, O., The boriding process in CoCrMo alloy: Fracture toughness in cobalt boride coatings, *Surface & Coatings Technology*, 2014, 260, 362-368.
- [11]. Seki, E., Kajima, Y., Takaichi, A., Kittikundecha, N., Cho, H. H. W., Htat, H. L., Doi, H., Hanawa, T., Wakabayashi, N., Effect of heat treatment on the microstructure and fatigue strength of CoCrMo alloys fabricated by selective laser melting, *Materials Letters*, 2019, 245, 53-56.
- [12]. Zhang, Q., Li, K., Yan, J., Wang, Z., Wu, Q., Bi, L., Yang, M., Han, Y., Graphene coating on the surface of CoCrMo alloy enhances the adhesion and proliferation of bone marrow mesenchymal stem cells, *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 2018, 497, 1011-1017.
- [13]. Langhorn, J., Borjali, A., Hippensteel, E., Nelson, W., Raeymaekers, B., Microtextured CoCrMo alloy for use in metal-on-polyethylene prosthetic joint bearings: Multi-directional wear and corrosion measurements, *Tribology International*, 2018, 124, 178-183.
- [14]. Liu, Y., Gilber, J. L., Effect of simulated inflammatory conditions and potential on dissolution and surface oxide of CoCrMo alloy: In situ electrochemical atomic force microscopy study, *Electrochimica Acta*, 2018, 262, 252-263.
- [15]. Shiri, S., Zhang, C., Odeshi, A., Yang, Q., Growth and characterization of tantalum multilayer thin films on CoCrMo alloy for orthopedic implant applications, *Thin Solid Films*, 2018, 645, 405-408.
- [16]. Zhang, M., Yang, Y., Song, C., Bai, Y., Xiao, Z., An investigation into the aging behavior of CoCrMo alloys fabricated by selective laser melting, *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 750, 878-886.
- [17]. Krelling, A. P., Teixeira, F., Edil da Costa, C., Santos de Almeida, E. A., Zappelino, B., Milan, J. C. G., Microabrasive wear behavior of borided steel abraded by SiO<sub>2</sub> particles, *Journal of Materials Research and Technology*, 2019, 8, 766-776.
- [18]. Krelling, A. P., da Costa, C. E., Milan, J.C.G., Almeida, E. A. S., Micro-abrasive wear mechanisms of borided AISI 1020 steel, *Tribology International*, 2017, 111, 234-242.
- [19]. Peruzzo, M., Serafini, F. L., Ordoñez, M. F. C., Souza, R. M., Farias, M. C. M., Reciprocating sliding wear of the sintered 316L stainless steel with boron additions, *Wear*, 2019, 422-423, 109-118.
- [20]. Gunes, I., Yıldız, I., Investigation of Adhesion and Tribological Behavior of Borided AISI 310 Stainless Steel, *Revista Materia*, 2016, 21, 61-71.
- [21]. B'ejar, M. A., Moreno, E., Abrasive wear resistance of boronized carbon and low-alloy steels, *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 173, 352-358.
- [22]. Tabur, M., Izciler, M., Gul, F., Karacan, I., Abrasive wear behavior of boronized AISI 8620 steel, *Wear*, 2009, 266, 1106-1112.
- [23]. Kulka, M., Makuch, N., Piasecki, A., Nanomechanical characterization and fracture toughness of FeB and Fe<sub>2</sub>B iron borides produced by gas boriding of Armco iron, *Surface & Coatings Technology*, 2017, 325, 515-532.

- [24]. Campos-Silva, I., Palomar-Pardavé, M., Pérez Pastén-Borja, R., Feridun, O. K., Bravo-Bárceñas, D., López-García, C. Reyes-Helguera, R., Tribocorrosion and cytotoxicity of FeB-Fe<sub>2</sub>B layers on AISI 316 L steel, *Surface & Coatings Technology*, 2018, 349, 986-997.
- [25]. Gök, M. S., Küçük, Y., Erdoğan, A., Öge, M., Kanca, E., Günen, A., Dry sliding wear behavior of borided hot-work tool steel at elevated temperatures, *Surface & Coatings Technology*, 2017, 328, 54-62.
- [26]. Johnston, J. M., Jubinsky, M., Catledge, S. A., Plasma boriding of a cobalt-chromium alloy as an interlayer for nanostructured diamond growth, *Applied Surface Science*, 2015, 328, 133-139.
- [27]. Campos-Silva, I., Bravo-Bárceñas, D., Cimenoglu, H., Figueroa-López, U., Flores-Jiménez, M., Meydanoglu, O., The boriding process in CoCrMo alloy: Fracture toughness in cobalt boride coatings, *Surface and Coating Technology*, 2014, 260, 362-368.
- [28]. Al-Zain, O. A., Al-Masoudi, Soliyman, R., Nano-Metal Borides of Cobalt, Nickel and Copper, *Journal of J Nanomedicine & Nanotechnology*, 2017, 8, 477.
- [29]. Choi, S., Lapitan Jr., L.D.S., Cheng, Y., Watanabe, T., Synthesis of cobalt boride nanoparticles using RF thermal plasma, *Advanced Powder Technology*, 2014, 25, 65-371.