



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



## Borlanmış % 5 Mg katkılı Ni-Mg alaşımının yüzey özelliklerinin incelenmesi

### *Investigation of surface properties of boronized Ni-Mg alloy added 5% Mg*

Yazar(lar) (Author(s)): İsmail YILDIZ<sup>1</sup>, İbrahim GÜNEŞ<sup>2</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0002-9207-591X

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0001-7595-0121

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Yıldız İ. ve Güneş İ., “Borlanmış % 5 Mg katkılı Ni-Mg alaşımının yüzey özelliklerinin incelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 23(1): 97-104, (2020).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.512600

# Borlanmış % 5 Mg Katkılı Ni-Mg Alaşımının Yüzey Özelliklerinin İncelenmesi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

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

<sup>1</sup>İscehisar Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Türkiye

<sup>2</sup>Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 14.01.2019 ; Kabul/Accepted : 04.03.2019)

## ÖZ

Bu çalışmada, % 95 Ni ve % 5 Mg içeren Ni-Mg alaşımının borlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Alaşım malzemesini üretmek için toz metalurjisi yöntemiyle Ni ve Mg metal tozları uygun kaplar içerisinde homojen bir şekilde karışması için tek faza sahip elektrik motorlu döner bir karıştırıcıda 24 saat süreyle karıştırılmıştır. Karıştırılan tozlar özel olarak tasarlanmış silindirik kalıplara dökülerek 300 bar basınç altında preslendikten sonra Ar atmosferi ortamında tüp fırın içerisinde 530 °C sıcaklıkta sinterleme işlemine tabi tutulmuşlardır. Sinterlenerek üretilen numunelere sırasıyla sertlik ve yoğunluk testleri uygulanmıştır. Ayrıca, sinterlenerek üretilmiş numunelere kapalı fırın ortamında 900 ve 1000 °C sıcaklıklarda 1.5 – 4.5 saat sürelerde ticari Ekabor tozu kullanılarak borlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Borlanan numunelerin borür tabaka kalınlıkları optik mikroskop yardımıyla ölçülmüştür. Borlama işlemi sonucunda elde edilen borür fazları XRD analizi ile belirlenmiştir. Borlanmış Nikel-Magnezyum numunelerinin XRD analizi sonucunda Ni<sub>3</sub>B, Ni<sub>2</sub>B, NiB ve Mg fazları elde edilmiştir. Artan borlama sıcaklığı ve süresine bağlı olarak elde edilen Ni-Mg numuneler üzerinde farklı kalınlıklarda borür tabakaları ölçülmüştür. Mg içeriğinin borlama olayına yardımcı olması ve borür tabakalarının büyümesine etki etmesinin dışında mikroyapıda gözenekli bir yapı oluşmasına neden olmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Nikel, Mg, borür tabakası, mikroyapı, fazlar.

## Investigation of Surface Properties of Boronized Ni-Mg Alloy added 5% Mg

### ABSTRACT

In this study, Boronation of Ni-Mg alloy containing 95% Ni and 5% Mg was carried out. In order to produce the alloy material, Ni and Mg metal powders were mixed in a single-phase powder mixer for 24 hours to mix homogeneously in suitable containers by powder metallurgy method. Mixed powders were poured into specially designed cylindrical molds and pressed under 300 bar pressure and then sintered at 530 °C in tube furnace under Ar atmosphere. The samples produced by sintering were subjected to hardness and density tests respectively. In addition, sintered samples were made by using commercial Ekabor powder at a temperature of 900 and 1000 °C for 1.5-4.5 hours. The boride layer thickness of the boronized samples was measured by means of an optical microscope. Boron phases were determined by XRD analysis. Boronized Nickel-Magnesium samples yielded Ni<sub>3</sub>B, Ni<sub>2</sub>B, NiB and Mg phases as a result of XRD analysis. The boride layers with different thicknesses were measured on the Ni-Mg samples obtained depending on the increasing boring temperature and time. It has caused a porous structure in microstructure in addition to the fact that Mg content helps to boron and affects the growth of boride layers.

**Keywords:** Nickel, Mg, boride layer, microstructure, phases.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Borlama, malzeme yüzeylerinde sert bor tabakaları oluşturmak için ana malzeme yüzeyine bor atomlarının difüzyonunu içine alan termokimyasal bir difüzyon işlemidir [1-4]. Yani borlama işlemi, bor atomlarının metalik malzemelerin yüzeyinden içeriye doğru difüzyonu ile gerçekleşmektedir. Borlama sonucu malzeme yüzeyinin yüksek sertlik, yüksek aşınma ve korozyon direnci gibi özellikler kazandığı belirlenmiştir. Bütün bu olumlu özelliklere karşın, borlamanın tek dezavantajı borlanmış tabakanın sertliğinden dolayı kırılabilir olmasıdır [5-7].

Son yıllarda, mekanik alaşımlama (MA) yöntemi vasıtasıyla hazırlanan bazı amorf Mg-Ni alaşımlarının oda sıcaklığında büyük miktarda hidrojen emebileceği ve deşifre edebileceği sonucuna varıldı [8-10]. Mekanik alaşımlama, elektrokimyasal testler sırasında büyük bir boşaltma kapasitesine ve yüzey aktivitesine sahiptir [11-13]. Ancak, zayıf döngüsel performans, düşük döngüsel yaşam gibi etkenler bu alaşımların birçoğunu ticari bataryalarda kullanımlarını engellemiştir [14,15].

Bor tabakası oluşumu borlamanın yapıldığı sıcaklığa, gerçekleştirilen işlem zamanına ve borlanan malzemenin özelliklerine bağlıdır. Borlama yönteminde bor atomlarının sıcaklıkla malzeme yüzeyinde difüzyonu sonucunda, malzemenin dış yüzeyinde (üst tarafta) borür tabakası, onun altında geçiş bölgesi, en altta da ana yapı (matris) oluşmaktadır [16,17].

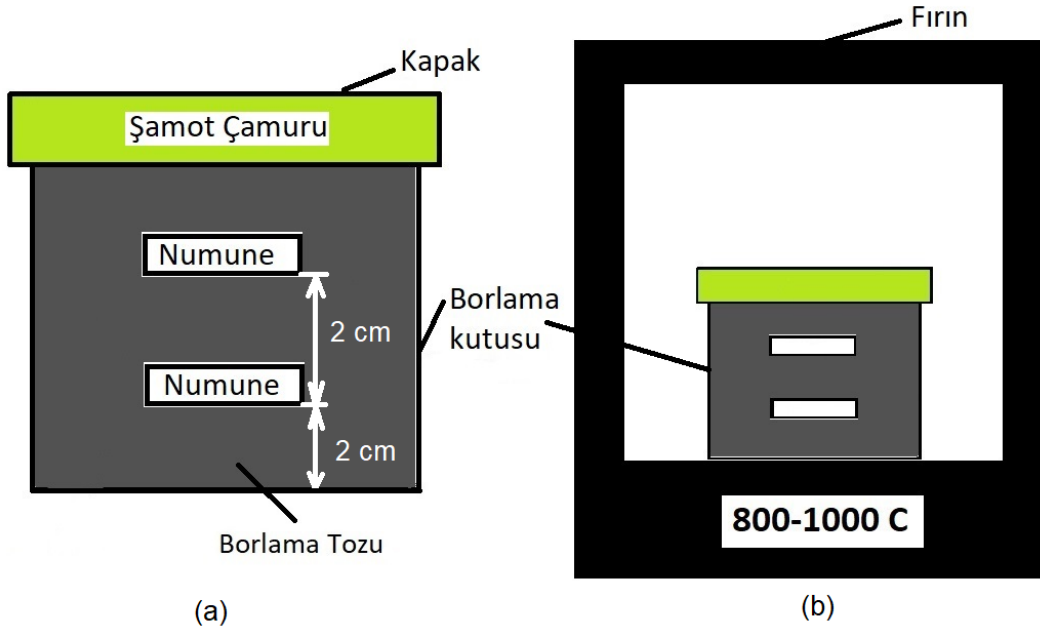
\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : iyildiz@aku.edu.tr

Borlama genel olarak çelikler, dökme demirler, nikel, kobalt, titanyum, molibden esaslı alaşımlar ile sinterlenmiş karbür gibi birçok demir esaslı ve demir dışı metallere başarılı bir şekilde uygulanmaktadır. Borlama malzeme niteliğine göre 700-1100 °C sıcaklık aralıklarında, yaklaşık olarak 1-12 saat süre ile katı, sıvı, gaz veya plazma ortamında gerçekleşmektedir [18-20]. Bu konuda daha önce literatürde çalışma yapılmamıştır. Çalışmanın amacı, Ni elementi ile Mg elementinin alaşım yaparak borlanabilirlik yönü ve alaşım içerisinde nasıl bir yapı oluşturacağını araştırmaktır. Literatürde de Mg'un toz metalürjisinde oksitlenme ve genişleme özellikleri gösterdiği için bu elementin kullanımının zor olduğu anlaşılmıştır. Gerçekleştirilen çalışmada, % 95 Ni ile % 5 Mg alaşımlarının sinterleme yöntemiyle üretimi yapılmıştır. Uygun kaplar içerisinde konulan numunelerin üst ve alt taraflarına ticari Ekabor II tozu konularak fırın atmosferinde farklı sıcaklık aralıkları uygulanarak borlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı sonucu borür tabaka kalınlıkları ölçülmüş, oluşan fazlar belirlenmiş ve borlama işleminin gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Sonuçlar literatürle karşılaştırılmıştır.

## 2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

Bu çalışmada, % 95 Ni-% 5 Mg alaşım malzemelerini elde etmek için % 99 saflığa sahip Ni ve Mg metal tozları kullanılmıştır. Ni-Mg metalik tozların sinterleme sonrasında tane yapılarının iyi bir şekilde yapışması için tozlar tek fazlı karıştırıcıda 24 saat süreyle karıştırma işlemi yapılmıştır. Birbiriye karışan tozlar, dairesel şekle sahip olmaları için özel olarak tasarlanmış soğuk kalıba dökülerek tek eksenli preste yaklaşık 300 bar basınç altında preslenmiştir. Preslenerek elde edilen numunelerin dayanımlarını arttırmak için koruyucu atmosferik ortama sahip tüp fırında 530 °C sıcaklıkta 2 saat süreyle sinterleme işlemi uygulanmıştır.

Sinterlenerek elde edilen numunelere borlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Borlama işleminde, özel olarak hazırlanmış kare ya da dikdörtgen bir kap kullanılmaktadır. Kabin içerisine numunelerin altına ve üzerine ticari Ekabor II toz karışımları dökülmüştür. Kabin üzeri ve kapağı şamot çamuru ile hava almayacak şekilde kapatılmıştır. Fırın ortamında 900 ve 1000 °C sıcaklıklarda 1,5 ve 4,5 saat süre aralığında ısıtmaya tabi tutulmuşlardır. Bu süreler sonrasında numuneler fırından çıkarılarak soğumaya bırakılmıştır (Şekil 1).



**Şekil 1.** Fırın içerisinde borlama işleminin yapılışı (a: Numune kutusunun hazırlanması, b: Numunenin fırınlanması) (Boronizing of process in the furnace) (a: Preparation of sample box, b: Firing of sample)

Borlanan numunelere yüzey pürüzlülük, yoğunluk, mikro sertlik, mikroyapı testlerinin yanı sıra XRD analizi uygulanmıştır. Yüzey pürüzlülük ölçümü Profilometre yardımıyla yapılmıştır. Farklı ölçümlerin ortalaması alınmıştır. Yoğunluk,  $d=m/v$  formülüne göre hesaplanmıştır. Burada m, sinterlenmiş numunenin kütlesi; v, sinterlenmiş numunenin hacmi olarak belirlenmiştir. Mikrosertlik testinde her bir numunede 5 farklı ölçüm yapılmış ve ortalaması alınmıştır. Mikroyapı testinde yüzeyde oluşan bor tabaka görüntüsü ve kalınlık ölçümü Nikon SMZ1000 marka optik mikroskopla

yapılmış ve görüntüler Clemex kamera ile ortaya çıkarılmıştır. Görüntü almadan önce borlanmış numuneler kesit bölgelerinden kesilerek kalıplara alınmış ve sırasıyla çeşitli boyutlardaki zımpara kağıtlarıyla zımparalanmıştır. Bu işlem sonrasında Alümina ile parlatılan numunelere Nital dağılayıcı uygulanarak tabaka bölgeleri elde edilmiştir.

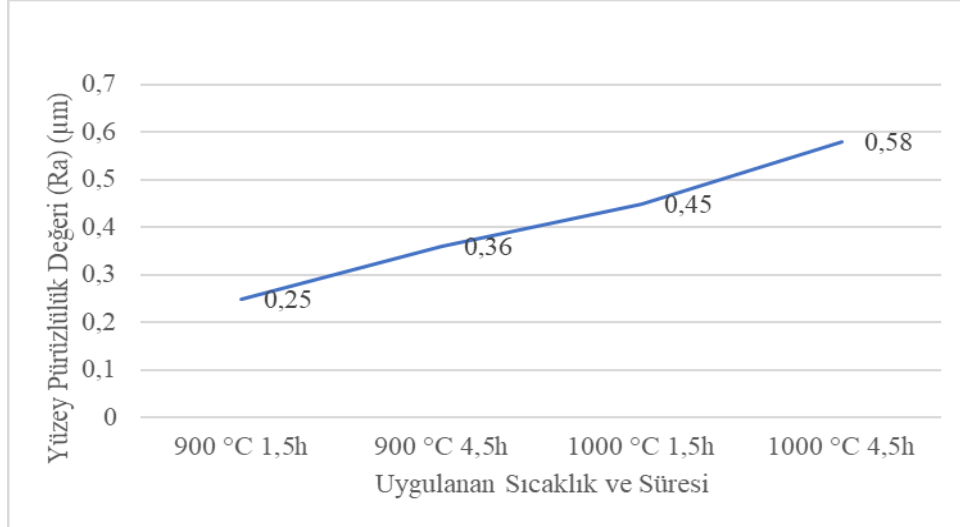
XRD analizinde, X-Işını olarak Cu K (alpha) tercih edilmiştir. Tarama hızı 0,02 °/dk ve tarama açısı ise 2 Theta olacak şekilde yapılmıştır.

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA (FINDINGS and DISCUSSION)

#### 3.1. Yüzey Pürüzlülüğü (Surface Roughness)

Numunelere yüzey pürüzlülüğü ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümlerin ortalamaları ( $R_a$ )

almıştır. Ölçüm neticesinde yüzey pürüzlülük değerlerinin 0.25 ile 0.58 arasında değiştiği tespit edilmiştir (Şekil 2).



**Şekil 2.** 900 ve 1000 °C sıcaklıklarda borlanmış numunelerde ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri (Surface roughness values measured in boronized samples at temperatures of 900 and 1000 °C)

Yüzey pürüzlülüğünün artmasıyla difüzyon alanı artış göstermiş ve buna bağlı olarak bor tabaka kalınlıkları da artmıştır. Borlama süre ve sıcaklığı bunun temel nedenidir.

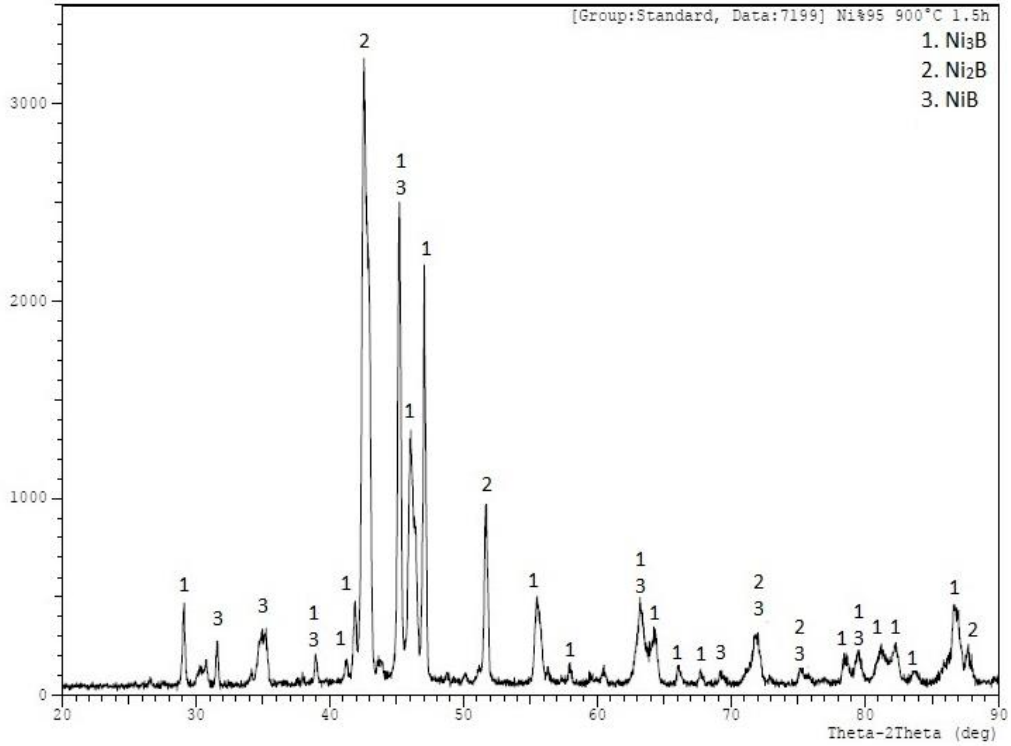
#### 3.2. Yoğunluk (Density)

Sinterleme sonrasında elde edilen numunelerin %95 Ni ve %5 Mg içeren numunenin yoğunluğu 4,78 gr/cm<sup>3</sup> bulunmuştur.

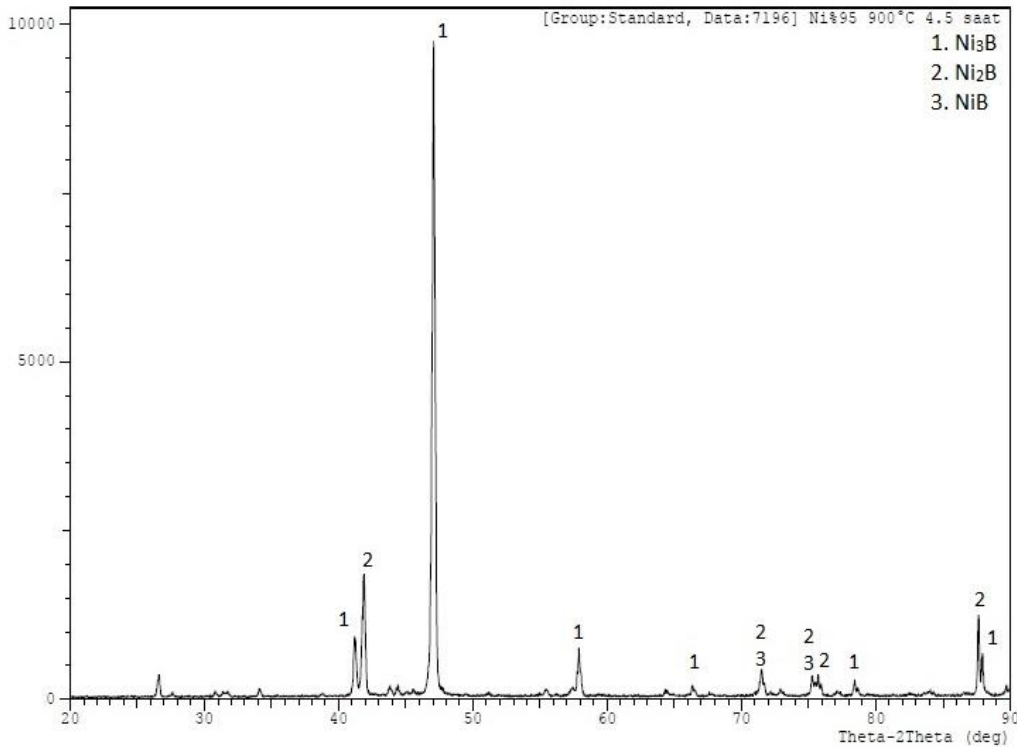
#### 3.3 XRD Analizi (XRD Analysis)

Şekil 3 ve 4'te 900 °C sıcaklıkta 1,5 ve 4,5 saat sürede Ni %95-Mg %5 kompozisyonuna yapılan XRD analiz sonuçları görülmektedir. Sonuçlarda en yüksek faz değerlerine Ni<sub>2</sub>B ve Ni<sub>3</sub>B pikleri sahiptir. Bu faz değerlerini takiben NiB değeri gözlemlenmiştir. 900 °C sıcaklık ve 4,5 saat süre sonrası borlanan numunede Ni<sub>3</sub>B faz değerleri 4000 değerden 10000 değerlerine yükselmiştir. Bu değerdeki artış bile borlamanın olduğunu göstermektedir. Literatürde yüksek oranda Nikel elementi içeren alaşımların borlanması üzerine çok az sayıda çalışma bulunmaktadır [6-8,21,22]. Mg

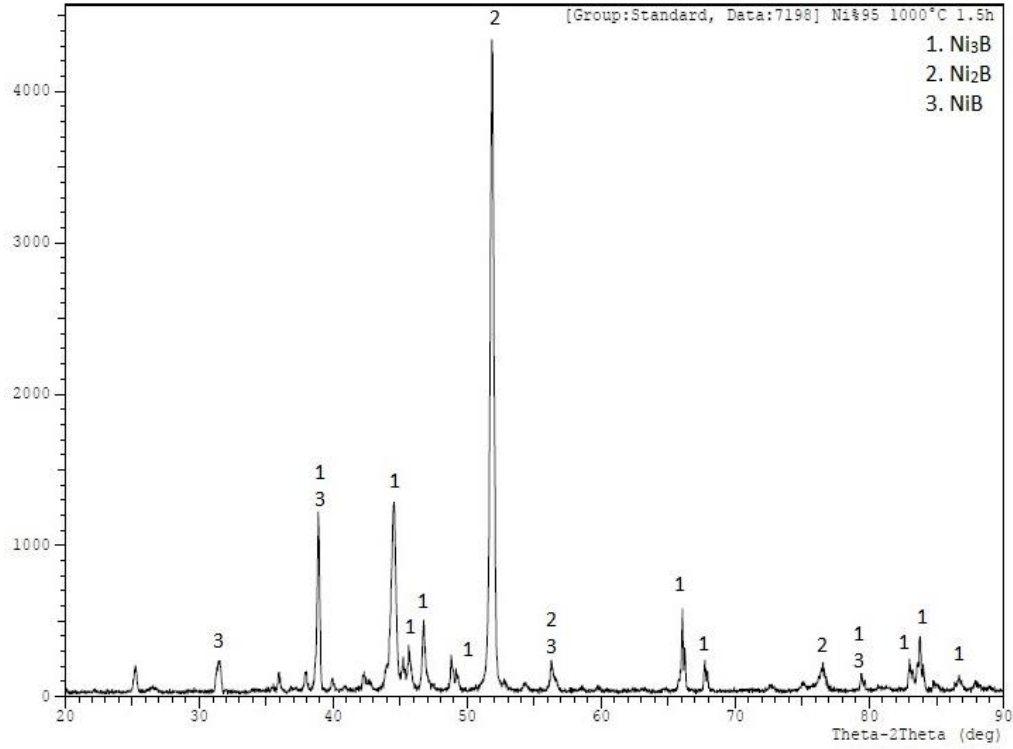
elementinin etkisi ise hiç araştırılmamıştır. Literatürdeki çalışmalarda XRD analizlerinde genellikle daha baskın NiB fazı elde edilirken, bu çalışmada Ni<sub>3</sub>B ve Ni<sub>2</sub>B fazlarının diğer fazlara (NiB, Ni<sub>3</sub>B<sub>4</sub>) oranla daha baskın olduğu görülmüştür. Elde edilen Ni<sub>3</sub>B ve Ni<sub>2</sub>B fazlarının NiB fazına göre göre daha tok bir yapıda olduğu bilinmektedir [8,21]. Ueda vd arkadaşlarının yaptıkları çalışmada [21], XRD analizi sonucu Ni<sub>3</sub>B, Ni<sub>2</sub>B ve NiB pik değerlerini elde etmişlerdir. Ni<sub>3</sub>B faz değerini ortalama 5000 olarak bulmuşlardır. Şekil 5 ve 6'da 1000 °C sıcaklıkta 1,5 ve 4,5 saat sürede borlanmış Ni %95 Mg %5 kompozisyonuna yapılan XRD analiz sonuçları görülmektedir. Bu sonuçlarda ise, 5000-5500 pik değerleri elde edilmiştir. Gunes vd. %99 saflığında Nikel elementini 850-950 °C'de 2 ve 6 saat süresince kutu borlama yapmışlar ve NiB, Ni<sub>2</sub>B, Ni<sub>3</sub>B, Ni<sub>4</sub>B<sub>3</sub> pik sonuçlarını bulmuşlardır [6]. Anthymidis vd. arkadaşlarının yaptıkları çalışmada [22], Ni<sub>3</sub>B ve Ni<sub>2</sub>B faz değerlerini bulmuşlardır. Gerçekleştirilen çalışmada, Ni<sub>3</sub>B ve Ni<sub>2</sub>B faz değer sonuçları Nikel ile borlamanın gerçekleştiğini göstermektedir.



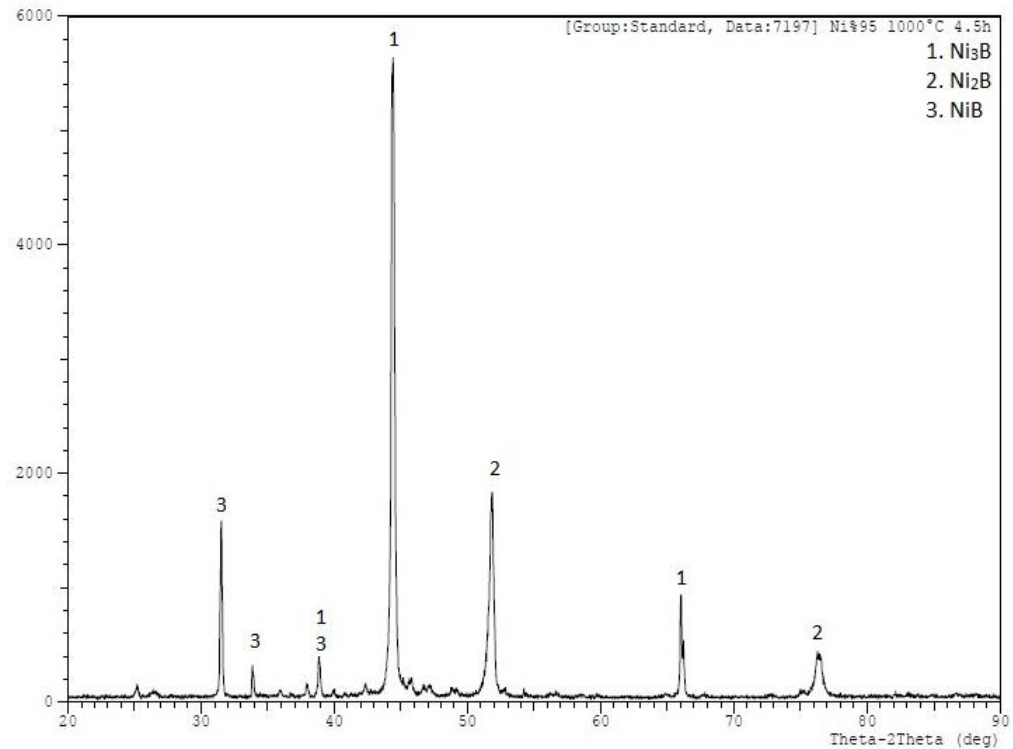
**Şekil 3.** Ni %95-Mg % 5 kompozisyonuna 900 °C sıcaklıkta 1,5 saat sürede gerçekleşen borlama işlemi sonrası yapılan XRD analiz sonucu (XRD analysis performed after boronizing process which was carried out at temperature of 900 °C and 1,5 hours to Ni %95-Mg % 5 composition)



**Şekil 4.** Ni %95-Mg % 5 kompozisyonuna 900 °C sıcaklıkta 4,5 saat sürede gerçekleşen borlama işlemi sonrası yapılan XRD analiz sonucu (XRD analysis performed after boronizing process which was carried out at temperature of 900 °C and 4,5 hours to Ni %95-Mg % 5 composition)

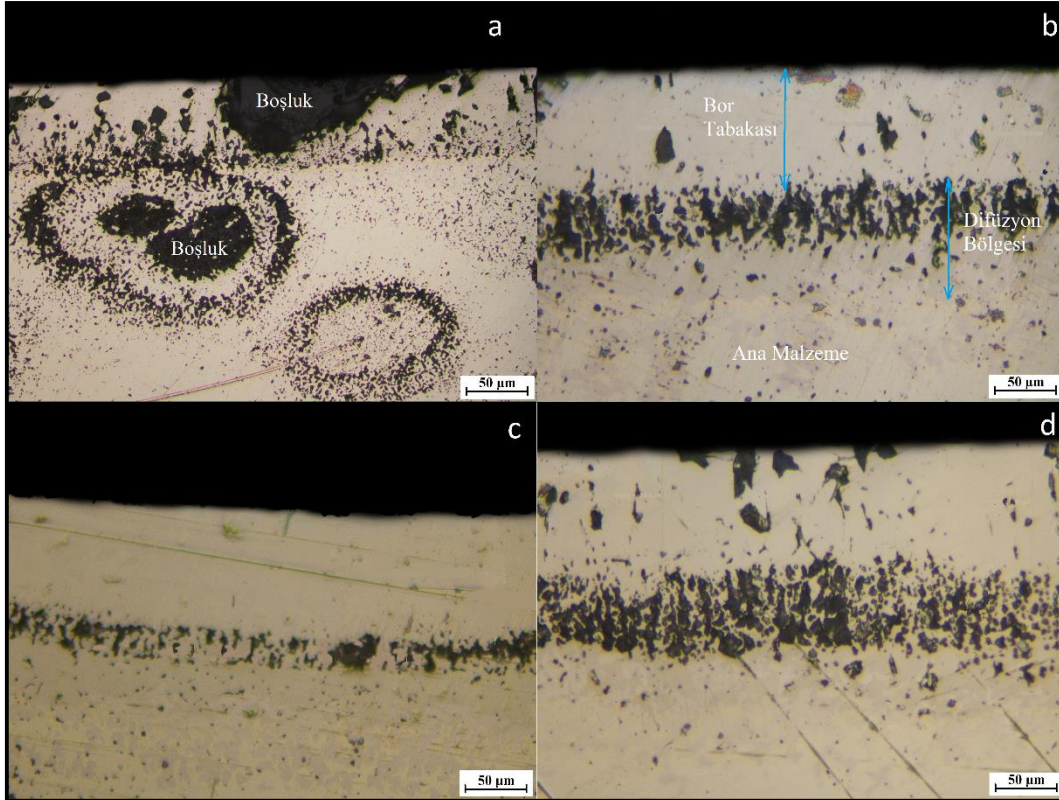


**Şekil 5.** Ni %95-Mg % 5 kompozisyonuna 1000 °C sıcaklıkta 1,5 saat sürede gerçekleşen borlama işlemi sonrası yapılan XRD analiz sonucu (XRD analysis performed after boronizing process which was carried out at temperature of 1000 °C and 1,5 hours to Ni %95-Mg % 5 composition)



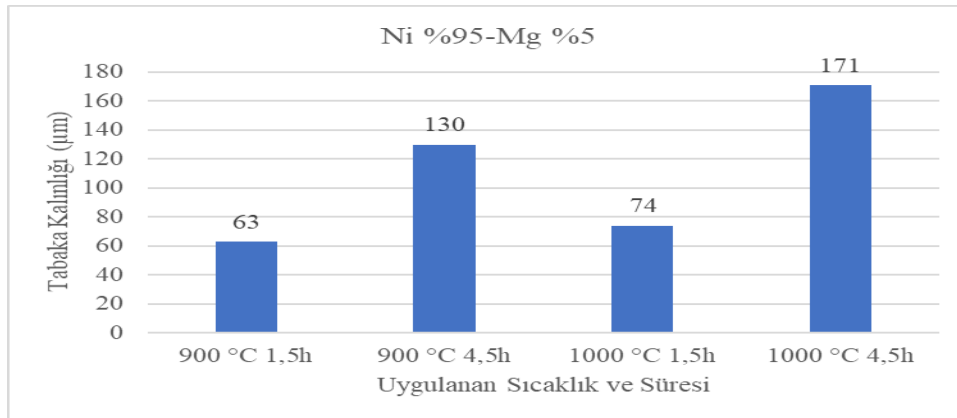
**Şekil 6.** Ni %95-Mg % 5 kompozisyonuna 1000 °C sıcaklıkta 4,5 saat sürede gerçekleşen borlama işlemi sonrası yapılan XRD analiz sonucu (XRD analysis performed after boronizing process which was carried out at temperature of 1000 °C and 4,5 hours to Ni %95-Mg % 5 composition)

### 3.4 Mikroyapı (Microstructure)



**Şekil 7.** Borlanmış % 95 Ni ile % 5 Mg alaşımının mikroyapı görüntüleri (a: 900 °C 1,5 saat, b: 900 °C 4,5 saat, c: 1000 °C 1,5 saat, d: 1000 °C 4,5 saat) (Microstructure images of boronized 95% Ni and 5% Mg alloy) (a: 900 °C 1,5 hour, b: 900 °C 4,5 hour, c: 1000 °C 1,5 hour, d: 1000 °C 4,5 hour)

Şekil7’de 900 ve 1000 °C



**Şekil 8.** 900 ve 1000 °C sıcaklıklarda borlanmış numunelerde ölçülen bor tabaka kalınlıkları (Boron layer thicknesses measured at borided samples at temperatures of 900 and 1000 °C)

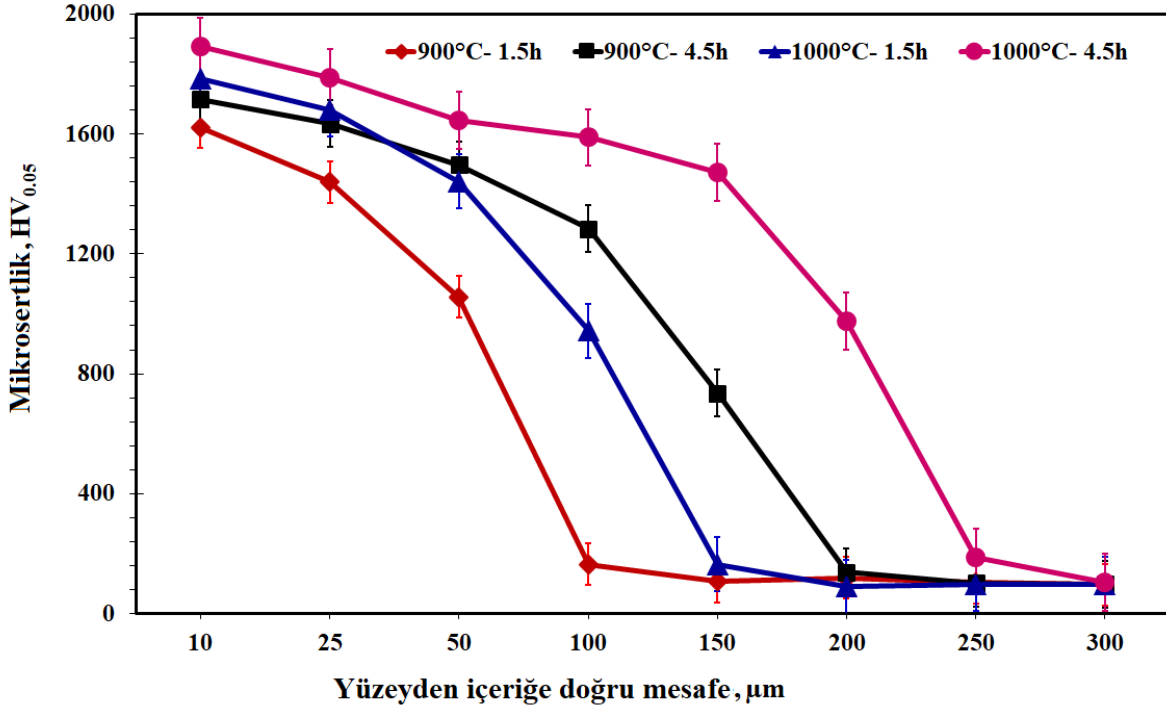
sıcaklıklarda borlanmış % 95 Ni ile % 5 Mg alaşımlarının mikroyapı görüntüleri görülmektedir. Borlama sıcaklığı ve sürelerinin artmasına bağlı olarak borür tabaka kalınlığı ve difüzyon bölgeleri çok belirgin bir şekilde gözükmemektedir. Tabaka kalınlıkları elde edilen görüntüler neticesinde ölçülmüştür (Şekil 8). Görüntüler incelendiğinde sıcaklık ve süre artışına bağlı olarak bor tabaka kalınlıkları artsa da bor tabakasının ve difüzyon

bölgesinin bozulmamasından dolayı 900 °C en iyi bor sıcaklığı olarak tespit edilmiştir. Yüksek sıcaklıklarda XRD piklerinde Mg gözlemlenmiştir. Borür tabakası ile matris arasındaki geçiş bölgesinde Mg elementine bağlı olarak gözenekli (boşluklu) bir yapı oluşmuştur. Bu durum, Mg’un düşük ergime derecesi, borlama işlem sıcaklığının ise yüksek olmasından dolayı ortaya çıkmıştır.

### 3.5. Mikrosertlik (Microhardness)

Şekil 9'da, borlanmış % 95 Ni ile % 5 Mg alaşımının mikrosertlik değerleri görülmektedir. Borlama sıcaklık ve süresinin artmasıyla sertlik değerlerinde artışlar elde edilmiştir. 900 °C ve 1000 °C'de 1.5 ve 4.5 saat süreyle borlanmış numunelerde sırasıyla, 1615±28 HV<sub>0.05</sub>, 1728±37 HV<sub>0.05</sub>, 1795±56 HV<sub>0.05</sub> ve 1864±70 HV<sub>0.05</sub>

sertlik değerleri elde edilmiştir. En yüksek sertlik değeri 1000 °C'de 4.5 saat süre sonrasında borlanmış numunede elde edilirken en düşük sertlik değeri 900 °C'de 1.5 saat süre sonrasında elde edilmiştir. Borlanmamış numunenin sertliği ise, 124 HV<sub>0.05</sub> olarak tespit edilmiştir. Borlama işlemi % 95 Ni ile % 5 Mg alaşımının sertlik değerinde önemli derecede artış sağlamıştır.



Şekil 9. Borlanmış % 95 Ni ile % 5 Mg alaşımının mikrosertlik değerleri (Microhardness values of boronized 95% Ni and 5% Mg alloy)

## 4. SONUÇLAR (RESULTS)

- 900 ve 1000 °C'de 1,5-4,5 saat süreyle borlama deneyi sonucunda sırasıyla, 63 µm, 130 µm, 74 µm ve 171 µm kalınlıklarında borür tabakaları elde edilmiştir.
- Borlama sonrasında numunelere XRD analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda Ni<sub>2</sub>B, Ni<sub>3</sub>B, NiB ve Mg faz değerleri ortaya çıkmıştır.
- %95 Ni ve %5 Mg içeren numunelerin yoğunluğu 4,78 gr/cm<sup>3</sup> olarak elde edilmiştir.
- Sinterleme sonrasında elde edilen numunelerin yüzey pürüzlülük ölçüm neticesinde değerlerinin 0.25 ile 0.58 arasında değiştiği tespit edilmiştir.
- Sinterleme sonucunda malzemelerde 124±9 HV<sub>0.05</sub> sertlik değeri elde edilmiştir.
- 900 °C ve 1000 °C'de 1.5 ve 4.5 saat süreyle borlanmış numunelerde sırasıyla, 1615±28 HV<sub>0.05</sub>, 1728±37 HV<sub>0.05</sub>, 1795±56 HV<sub>0.05</sub> ve 1864±70 HV<sub>0.05</sub> sertlik değerleri elde edilmiştir.
- Borlama sonrasında en yüksek sertlik değeri 1000 °C'de 4.5 saat süre borlanmış numunede elde edilirken, en düşük sertlik değeri ise 900 °C'de 1.5 saat sürede borlanmış numunede elde edilmiştir.

- Uygulanan borlama işleminde sıcaklık ve süre artışına bağlı olarak borür tabaka kalınlıklarında artışlar olmuştur. Buna karşın bor tabakasının ve difüzyon bölgesinin bozulmasından dolayı en iyi bor sıcaklığı 900 °C olarak gözlemlenmiştir.

## TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

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

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Sen S., Sen U. and Bindal C., "The growth kinetics of borides formed on boronized AISI 4140 steel", *Vacuum*, 77: 195-202, (2005).
- [2] Keddamm M., Kulka M., Makuch N., Pertek A. and Măldzinski L., "A kinetic model for estimating the boron activation energies in the FeB and Fe<sub>2</sub>B layers during the gas-boriding of Armco iron: Effect of boride incubation times", *Applied Surface Science*, 298: 155-163, (2014).
- [3] Makuch N. and Kulka M., "Microstructural characterization and some mechanical properties of gas-



- borided Inconel 600-alloy”, *Applied Surface Science*, 314: 1007-1018, (2014).
- [4] Kulka M., Dziarski P., Makuch N., Piasecki A. and Miklaszewski A., “Microstructure and properties of laser-borided Inconel 600-alloy”, *Applied Surface Science*, 284: 757-771, (2013).
- [5] Yıldız I., Gunes I. and Ulker Ş., “Borlanmış Fe-Mg Alaşımının Aşınma Davranışının İncelenmesi”, *Ist International Symposium on Light Alloys and Composite Materials*, Karabük, 138-141, (2018).
- [6] Gunes I., Keddami M., Chegroune R. and Ozcatil M., “Growth kinetics of boride layers formed on 99.0% purity Nickel”, *Bulletin of Materials Science*, 38: 1113-1118, (2015).
- [7] Sista V., Kahvecioğlu O., Kartal G., Zeng Q. Z., Kim J.H., Eryılmaz O. L. and Erdemir A., “Evaluation of electrochemical boriding of Inconel 600”, *Surface & Coatings Technology*, 215: 452-459, (2013).
- [8] Ağaoğlu G. H. and Orhan G., “Elaboration and electrochemical characterization of MgeNi hydrogen storage alloy electrodes for Ni/MH batteries”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 42: 8098-8108, (2017).
- [9] Gajdics M., Calizzi M., Pasquini L., Schafler, E. and Revesz A., “Characterization of a nanocrystalline MgeNi alloy processed by high-pressure torsion during hydrogenation and dehydrogenation”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 41: 9803-9809, (2016).
- [10] Tran X. Q., McDonald S. D., Gu Q. F. and Nogita K., “In-situ synchrotron X-ray diffraction investigation of the hydriding and dehydriding properties of a cast Mg-Ni alloy”, *Journal of Alloys and Compounds*, 636: 249-256, (2015).
- [11] Oh S., Kim M., Eom K., Kyung J., Kim D., Cho E. and Kwon H., “Design of MgeNi alloys for fast hydrogen generation from seawater and their application in polymer electrolyte membrane fuel cells”, 41: 5296-5303, (2016).
- [12] Knotek V., Ekrt O. and Vojtech D., “Electrochemical hydriding of MgeNi alloys compacted by spark plasma sintering”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 42: 23908-23914, (2017).
- [13] Santos S. F., de Castro J. F. R., Ishikawa T. T. and Ticianelli E. A., “Effect of transition metal additions on the electrochemical properties of a MgNi-based alloy”, *Journal of Alloys and Compounds*, 434-435: 756-759, (2007).
- [14] Fu H., Wu W., Dou Y., Liu B., Li H. and Peng Q., “Hydrogen diffusion kinetics and structural integrity of superhigh pressure Mg-5 wt%Ni alloys with dendrite interface”, *Journal of Power Sources*, 320: 212-221, (2016).
- [15] Meyer M., Mendoza-Ze’lis L., “Hydrogen diffusion kinetics and structural integrity of superhigh pressure Mg-5 wt%Ni alloys with dendrite interface”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 37: 14864-14869, (2012).
- [16] Gunes I. and Ulker Ş., “Investigation of tribological properties of boride layers formed on 99.0% purity nickel”, *Journal of the Balkan Tribological Association*, 4: 3703-3713, (2016).
- [17] Gunes I. and Yıldız I., “Investigation of Adhesion and Tribological Behavior of Borided AISI 310 Stainless Steel”, *Revista Materia*, 21: 61-71, (2016).
- [18] Ortiz-Domínguez M., Keddami M., Elias-Espinosa M., Ramírez-Cardona M., Arenas-Flores A., Zuno-Silva J., Cervantes-Sodi F. and Cardoso-Legorret E., “Characterization and boriding kinetics of AISI T1 steel”, *Metallurgical Research Technology*, 116: 102-113, (2019).
- [19] Barkat A., Hammou A. D. and Allaoui O., “Effect of Boriding on the Fatigue Resistance of C20 Carbon Steel”, *Acta Physica Polonica A*, 132: 813-815, (2017).
- [20] Shchukin V. G. and Marusin V.V., “Induction boriding of steels”, *Inorganic Materials: Applied Research*, 6: 382-387, (2015).
- [21] Ueda N., Mizukoshia T., Demizua K., Sonea T., Ikenaga A., Kawamoto M., “Boriding of Nickel By The Powder-Pack Method”, *Surface and Coatings Technology*, 126: 25-30, (2000).
- [22] Anthymidis K. G., Zinoviadis P., Roussos D., Tsipias D. N., “Boriding of Nickel in a Fluidized Bed Reactor”, *Material Research Bulletin*, 37: 515-522, (2002).