

Fe İçerisindeki Mg Elementinin Borlama İşlemine Etkisinin Araştırılması

Investigation of Surface Properties of Boronized Fe-Mg Alloy

İsmail YILDIZ¹, Atila Gürhan ÇELİK², *İbrahim GUNES²

¹ Afyon Kocatepe Üniversitesi, İncehisar Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 03750, Afyonkarahisar/Türkiye

² Giresun Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 28200, Giresun/Türkiye

Özet

Bu çalışmada, borlanmış %90-%10 Fe-Mg ve %95-%5 Fe-Mg alaşımlarının mikroyapısal özellikleri araştırılmıştır. Fe-Mg tozları soğuk olarak preslendikten sonra Argon atmosferine sahip tüp fırın içerisinde 620 °C sıcaklıkta sinterlenmiştir. Üretilen numunelere sırasıyla gözeneklilik ve yoğunluk testleri uygulanmıştır. %90-%10 Fe-Mg ve %95-%5 Fe-Mg alaşımları 800 ve 900°C'de 2 ve 6 saat süreyle ticari Ekabor II bor tozu kullanılarak borlanmıştır. Borlama sonrası numunelerde 0.30-0,68 µm arasında değişen yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiştir. Borlanan numunelerin mikro yapı ve borür tabakaları optik mikroskop vasıtasıyla görüntülenmiştir. XRD analizi sonucunda numunelerde Fe, FeB, Fe₂B fazları ve 45-85 µm arasında değişen borür tabaka kalınlıkları elde edilmiştir. Borlama sıcaklık, süresine bağlı olarak numunelerin mikro sertlik değerlerinin 1346-1758 HV_{0,05} arasında değiştiği görülmüştür. Borlama sıcaklık ve süresinin artmasıyla birlikte numunelerin hem borür tabaka kalınlıklarında hem de mikro sertlik değerlerinde artışlar elde edilmiştir. Mg ilavesi borür tabaka kalınlıklarına ve sertlik değerlerine etki ettiği görülmüştür. Ayrıca Mg ilavesi mikro yapıda gözenekli bir yapı oluşmasına da neden olmuştur.

Anahtar Kelimeler: Fe-Mg alaşımları, Borlama, XRD, Sertlik, Yüzey pürüzlülüğü

Abstract

In this study, microstructural properties of boronized 90%-10% Fe-Mg and 95%-5% Fe-Mg alloys were investigated. After the Fe-Mg powders were cold pressed, they were sintered at 620°C in an Argon atmosphere tube furnace. Porosity and density tests were applied to the produced samples, respectively. 90%-10% Fe-Mg and 95%-5% Fe-Mg alloys were boronized using commercial Ekabor II boron powder for 2 and 6 hours at 800 and 900°C. Surface roughness values varying between 0.30-0.68 µm were obtained in the samples after boronizing. The microstructure and boride layers of the boronized samples were examined under an optical microscope. As a result of XRD analysis, Fe, FeB, Fe₂B phases and boride layer thicknesses varying between 45-85 µm were obtained. It was observed that the micro hardness values of the samples varied between 1346-1758 HV_{0.05} depending on the boronization temperature and time. With the increase in boronization temperature and time, both the boride layer thickness and the micro hardness values of the samples increased. It has been observed that the addition of Mg has an effect on the boride layer thickness and hardness values. In addition, the addition of Mg caused a porous structure in the microstructure.

Keywords: Fe-Mg Alloys, Boronizing, XRD, Hardness, Surface roughness.

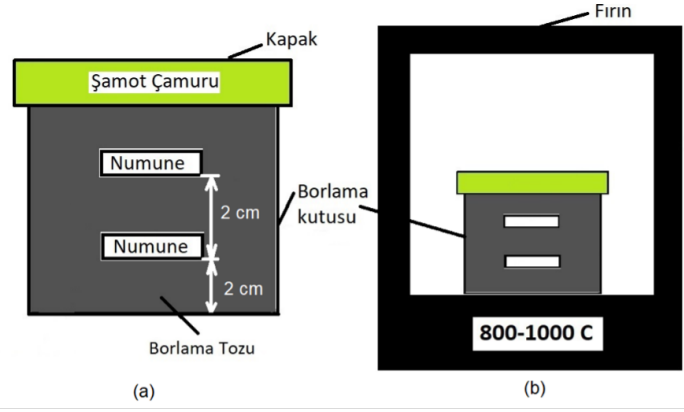
1. Giriş

Borlama, bor tozlarını uygulanacak malzeme yüzeyine difüzyonu ile malzemenin dayanımını artıran termokimyasal yüzey iyileştirme yöntemidir. Bu işlem, genellikle 800-1100 °C sıcaklıklar aralığında ve 1-8 saat arası değişen sürelerde uygulanır [1-4]. Borlama, malzeme yüzeyinde sertlik özelliklerinin yanı sıra aşınma ve korozyon dayanımını arttırtırken, yüksek sıcaklık uygulamalarında malzeme yüzeyini korur ve olası oluşabilecek erozyona karşı da örtü görevi görmektedir [5-8]. Demir esaslı alaşımlarda borlama işlemi sonucunda FeB ve Fe₂B borür fazlarından biri veya her ikisi de ortaya çıkmaktadır [9,10]. Bu fazlar, kolonsal yani dik olacak şekilde oluşmakta ve ana malzemenin yüzey sertliğini artırarak aşınma direnci sağlamaktadır [11-13]. Magnezyum alaşımları, insanlar için klinik çalışmalarında biyolojik bozulabilir gövde uygulamalarında kullanılmaktadır [14-16]. Yapılan çalışmalar, düşük bozulma oranı ve Mg alaşımlarının mekanik özelliklerini iyileştirmede önemli aşamalar kaydetmiştir. Ayrıca Mg esaslı alaşımlar, düşük fiyat ve yüksek depolama kapasitesine sahip olmalarından dolayı tercih edilmektedir [17-19].

Bu çalışmanın amacı, Mg elementinin Fe elementi ile alaşım yapma özelliğini belirlemek ve elde edilen alaşımın borlanabilirlik yönünü araştırmaktır. Mg ile ilgili çalışmalar incelendiğinde, Mg'un hava ile çok çabuk oksitlenme ve genleşme özelliği gösterdiği için kullanımı çok dikkat gerektirdiği anlaşılmıştır. Bu çalışmada ilk önce 90%-10% Fe-Mg ve 95%-5% Fe-Mg karışım oranlarında toz metalurjisi yöntemiyle numuneler üretilmiştir. Daha sonra numuneler elektrik rezistanslı bir fırında ticari Ekabor II bor tozuyla 800 ve 900 °C'de 2 ve 6 saat süresince borlama işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlem sonrasında metalografik analizler yapılmış ve borlama işleminin gerçekleşip gerçekleşmediği gözlemlenmiştir. Sonuçlar literatürdeki benzer çalışmalarla kıyaslanmıştır. %90-%10 Fe-Mg ve %95-%5 Fe-Mg alaşımları 800 ve 900 °C'de 2 ve 6 saat süreyle ticari Ekabor II bor tozu kullanılarak borlanmıştır. Borlama sonrası numunelerde 0,30-0,68 µm arasında değişen yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiştir. Borlanan numunelerin mikro yapı ve borür tabakaları optik mikroskop vasıtasıyla görüntülenmiştir. XRD analizi sonucunda numunelerde Fe, FeB, Fe₂B fazları ve 45-85 µm arasında değişen borür tabaka kalınlıkları elde edilmiştir. Borlama sıcaklık, süresine bağlı olarak numunelerin mikro sertlik değerlerinin 1346-1758 HV_{0,05} arasında değiştiği görülmüştür. Borlama sıcaklık ve süresinin artmasıyla birlikte numunelerin hem borür tabaka kalınlıklarında hem de mikro sertlik değerlerinde artışlar elde edilmiştir. Mg ilavesi borür tabaka kalınlıklarına ve sertlik değerlerine etki ettiği görülmüştür. Ayrıca Mg ilavesi mikro yapıda gözenekli bir yapı oluşmasına da neden olmuştur.

2. Materyal ve Metot

90%-10% Fe-Mg ve 95%-5% Fe-Mg kompozisyona sahip malzeme elde etmek için Fe ve Mg tozları TM (Toz Metalurjisi) metodu üretilmiştir. Fe ve Mg tozları plastik kaplar içerisine konularak döner bir karıştırıcı vasıtasıyla karıştırılmış ve özel olarak tasarlanmış numune üretme kalıbına dökülerek tek eksenli preste 300 bar basınçta preslenmiştir. Kalıp içerisinde şekillendirilen numuneler, Ar gazı kullanılarak fırında 620°C'de ve 2 saat süreyle sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. Fırından çıkartılan numuneler oda sıcaklığına kadar soğumaya bırakılmıştır. Bu işlemde, ağız kapalı paslanmaz çelik kutu içerisine numuneler Şekil 1'deki gibi yerleştirilerek kutunun kapağı kapatılıp içeriye oksijen girmemesi için kapak ağızı şamot çamuru ile sıvanmıştır. Numuneler üzerine ticari Ekabor II bor tozu kullanılarak 800 ve 900 °C'de 2 ve 6 saat süresince borlama işlemine tabi tutulmuşlardır.



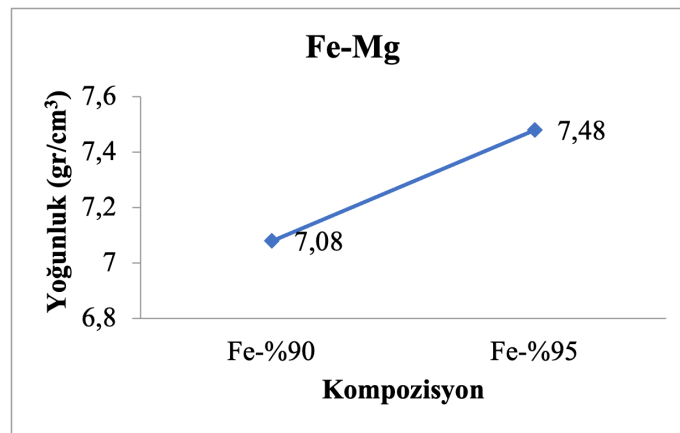
Şekil 1. Borlama işlemi, a) Borlama kutusunun hazırlanması, b) Numunenin borlanması.

Ekabor II bor tozuyla borlanan numuneler, kesitten kesilerek kalıplanmış ve gerekli 240-1200 grid'lik zımparalama kademesinden geçirilmiştir. Parlatma işlemi 1µm alümina süspansiyon ile gerçekleştirilmiştir. Dağlayıcı olarak %3'lük nital (%3 Nitrik asit, %97 Etanol) kullanılmıştır. Borlanmış numuneler üzerinde yoğunluk, yüzey pürüzlülüğü, XRD, mikroyapı ve mikrosertlik testleri gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı analizleri Nikon SMZ1000 marka optik mikroskopta incelenmiş ve borür tabaka kalınlıkları ölçülmüştür. Borlanmış numunelerin yüzeyinde oluşan fazların analizi Shimadzu XRD-6000 model X-ışınları cihazı yardımıyla tespit edilmiştir. X-ışını radyasyonu olarak $CuK\alpha$ radyasyonu kullanılmış olup numune yüzeyleri 2θ , 20-90 derece arasında taranmıştır. Rugosimeter marka profilometre yardımıyla numunelerin borlama sonrası yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. $d=m/v$ formülüne göre numunelerin yoğunlukları hesaplanmıştır. Burada m, sinterlenmiş numunenin kütlesi; v, sinterlenmiş numunenin hacmidir. Numunelerin yüzeylerinde oluşan borürlerin sertlik ölçümleri SHIMADZU HMV-2 model sertlik cihazı ile yüzeyden merkeze doğru 50 gr. yük altında vickers yöntemiyle ölçülmüştür.

3. Deneysel Sonuçlar

3.1. Yoğunluk

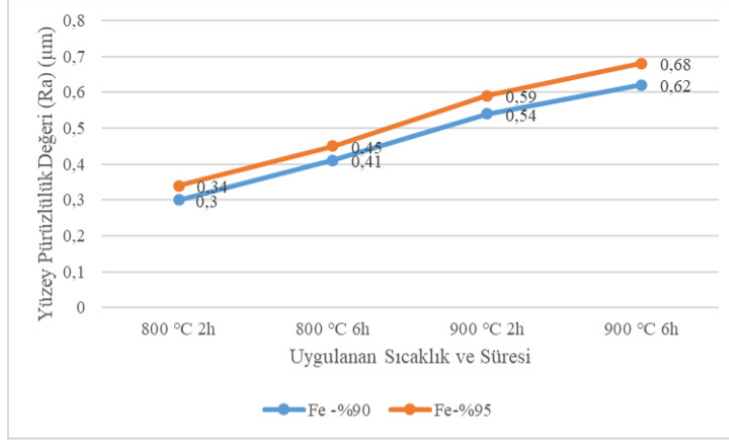
Şekil 2'de sinterleme sonucu üretilen numunelerin yoğunluk sonuçları görülmektedir. Kompozisyon farklılığına göre yoğunluk sonuçlarında artışlar olmuştur. %10 Mg- %90 Fe numunesinin yoğunluk değeri $7,08 \text{ gr/cm}^3$ iken, %5 Mg-%95 Fe numunesinin yoğunluk değeri $7,48 \text{ gr/cm}^3$ olarak elde edilmiştir.



Şekil 2. Yoğunluk Sonuçları

3.2. Yüzey Pürüzlülüğü

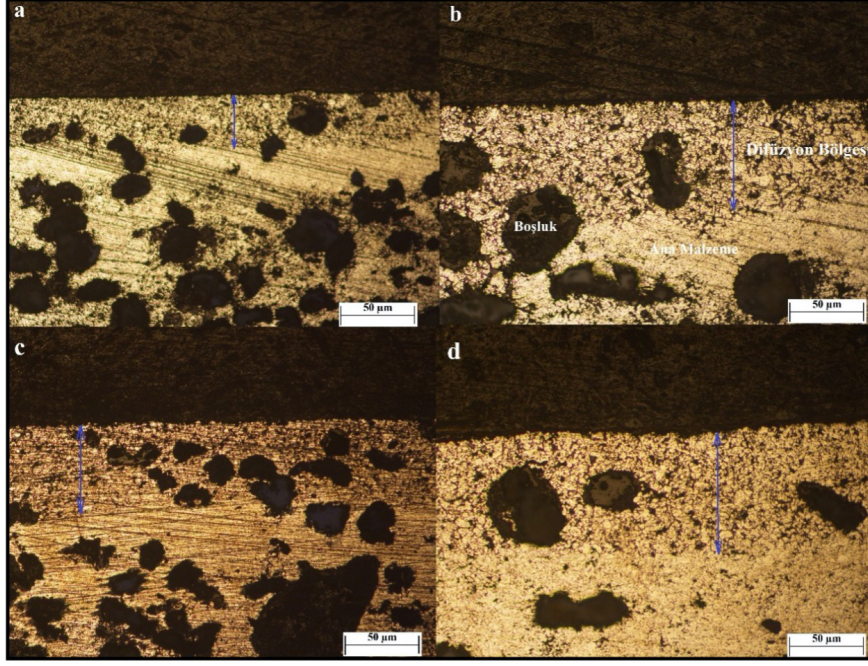
Numuneler üzerinde 8 farklı noktadan yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinin ortalamaları alınmıştır. Ortaya çıkan sonuçlar neticesinde yüzey pürüzlülük değerlerinin %10 Mg- %90 Fe numunelerinde 0,30-0,62 μm , %5 Mg- %95 Fe karışımında 0,34-0,68 μm arasında değiştiği tespit edilmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. Borlanmış numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri

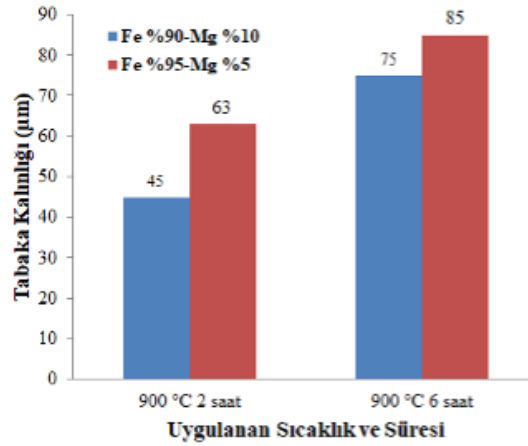
3.3. Borlama İşlemi ve Mikroyapı

800 ve 900°C'de 2 ve 6 saat süresince borlanmış numunelerin mikroyapıları Şekil 4'te, borür tabaka kalınlıkları ise Şekil 5'te verilmiştir. 900°C'de 2 ve 6 saat borlama sonucunda %10 Mg- %90 Fe alaşımında sırasıyla 45 μm ve 75 μm borür tabakası kalınlığı elde edilirken, %5 Mg- %95 Fe alaşımında aynı sıcaklık ve sürede sırasıyla 63 μm ve 85 μm borür tabakası kalınlığı elde edilmiştir (Şekil 5). Borlama sıcaklık ve süresinin artmasıyla birlikte borür tabaka kalınlıklarında artışlar meydana gelmiştir. % Mg oranının azalmasıyla birlikte % Fe oranı artmaktadır. Mg borür atomlarının numune içerisine difüzyon olmasını engellediği tespit edilmiştir. Ayrıca borlama sıcaklığının yüksek, Mg'un erime sıcaklığının düşük olmasından dolayı mikro yapıda gözeneklik oluşmuştur (Şekil 4). Uygulanan borlama sıcaklık ve süresine bağlı olarak tabaka kalınlıklarındaki artış ve difüzyon bölgeleri belirgin bir şekilde görülmektedir (Şekil 4). Ayrıca 800 °C'de borlanan numunelerde borür tabakalarının oluşmadığı tespit edilmiştir. Bu deneysel çalışma sonrasında Fe-Mg alaşımlarının borlanabilmesi için sıcaklığın 800°C'de üzerinde olması gerektiği sonucuna varılmıştır. Borlama sıcaklık ve süresinin artmasıyla borür tabaka kalınlığının arttığı görülmüştür. Daha yüksek sıcaklık ve borlama sürelerinde yüksek tabaka kalınlıklarına ulaşılmıştır. Bu durum literatürle uyum göstermektedir [20-25].



Şekil 4. Borlanmış Fe-Mg alaşımlarının mikro yapıları a) %10 Mg- %90 Fe; 900 °C- 2 saat , b) %10 Mg- %90 Fe; 900 °C- 6 saat c) %5 Mg- %95; 900 °C- 2 saat d) %5 Mg- %95; 900 °C- 6 saat

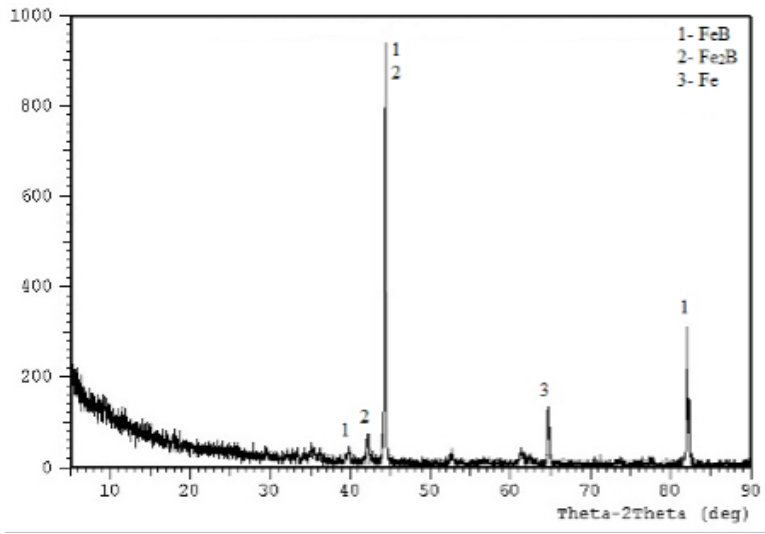
Yapılan çalışmalarda Tabur ve arkadaşları (2009) AISI 8620 çeliğini 850°C’de 6 saat Ekabor II bor tozuyla borlamışlar ve 150 µm kalınlığında borür tabakası elde etmişlerdir [21]. Bindal ve Üçışık (2008) %0,3 karbonlu ve % 0,02 fosforlu sade karbonlu çeliği boraks, borik asit ve ferrosilisyumla sıvı ortamda 1/2 ile 10 saat süreyle borlamışlar ve 30-160 µm kalınlığında borür tabakası elde etmişlerdir [22]. Er ve Par (2006) SAE 950 %0,85 C’lu ve düşük alaşımlı çeliği 950°C’de 2, 4 ve 6 saat süreyle borlamışlar sırayla 75, 87 ve 122 µm kalınlığında borür tabakaları elde etmişlerdir [23]. Özdemir ve arkadaşları (2008) AISI 316 paslanmaz çeliği 800, 875 ve 950°C’de 2, 4 ve 8 saat süreyle Ekabor tozuyla borlamışlar ve borlama sıcaklığı ve süresine bağlı olarak borür tabakasının 7-87 µm arasında değiştiğini tespit etmişlerdir [24]. Gunes ve Kanat (2016) AISI D6 çeliğini 850 ve 1050°C’de 2 ve 8 saat süreyle borlamışlar ve işlem süre ve sıcaklığına göre 13.54-164.42 µm arasında değişen borür tabaka kalınlıkları elde etmişlerdir [25].



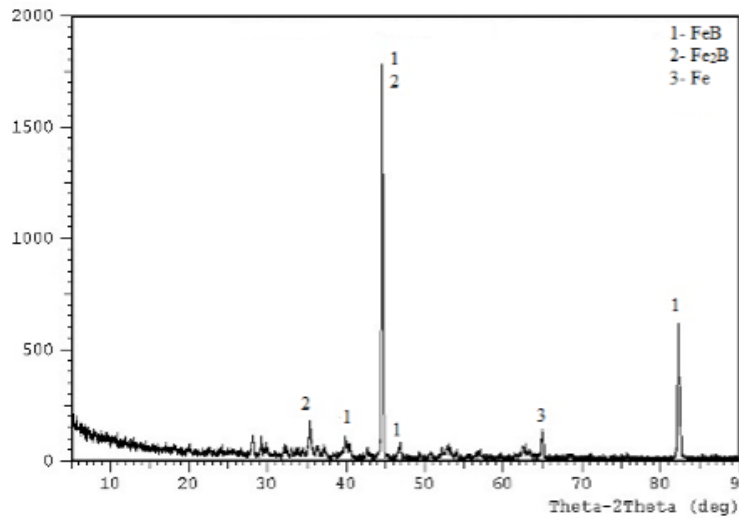
Şekil 5. Fe-Mg alaşımlarının borür tabaka kalınlıkları

3.4. XRD Analizi

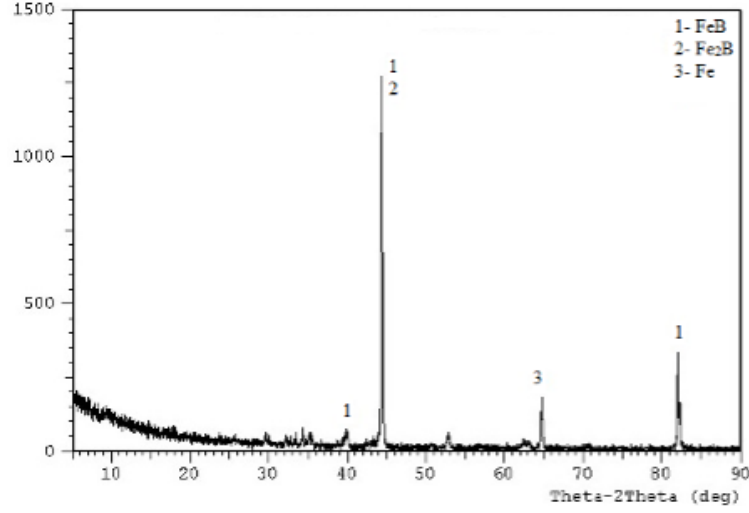
Borlanmış numunelerin XRD analizleri Şekil 6-9'da verilmiştir. Numunelerin Fe içerikli olmasından dolayı Fe, FeB ve Fe₂B fazları elde edilmiştir. Sonuç olarak Fe-Mg alaşımının borlanabilirdiği ve borür fazlarının elde edildiği görülmüştür. XRD analizlerinde % Fe oranının artmasıyla birlikte FeB fazının Fe₂B fazına göre daha baskın hale geldiği tespit edilmiştir. Artan Fe oranı FeB fazı oranını arttırmıştır. Literatürde Fe'in borlanmış ve demir üzerinde FeB ve Fe₂B fazları elde edilmiştir [2,18,20]. Literatürdeki çalışmalarda Fe₂B fazı baskın olarak görülürken yapılan bu çalışmada ise Fe₂B ile birlikte FeB fazının daha baskın olduğu görülmüştür. Borlama süresinin artmasıyla birlikte borür fazların pik şiddetlerinde artışlar meydana gelmiştir. Gunes yaptığı çalışmada plazma pasta borlanmış AISI 8620 çeliğinin XRD piklerini incelemiş, sıcaklık ve sürenin artmasıyla Fe₂B fazında azalma, FeB fazında ise artışın meydana geldiği tespit etmiştir [26].



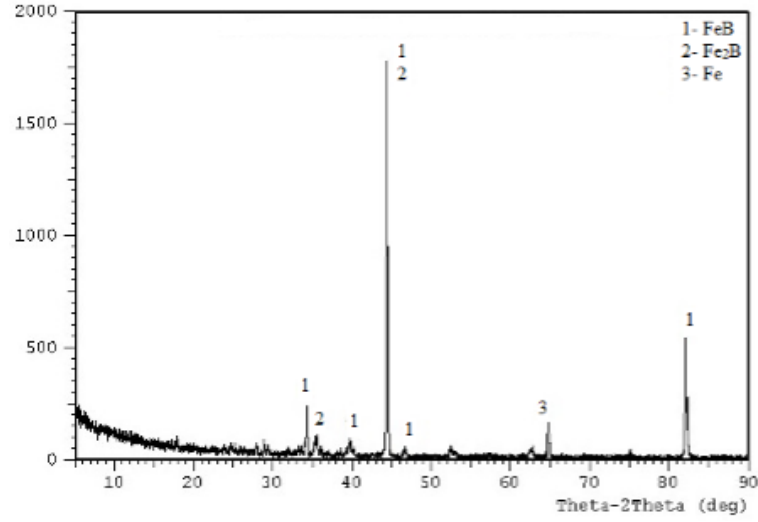
Şekil 6. 900 °C'de 2 saat borlanmış %90 Fe - %10 Mg alaşımının XRD analizi



Şekil 7. 900 °C'de 6 saat borlanmış %90 Fe - %10 Mg alaşımının XRD analizi



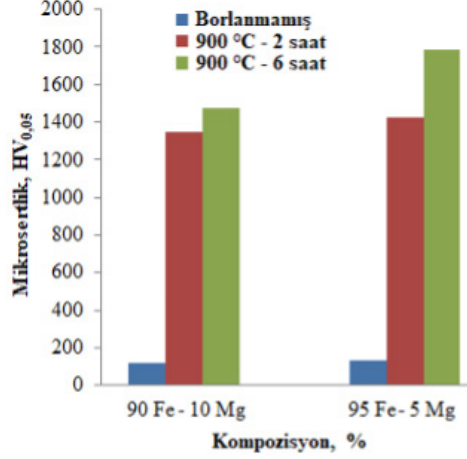
Şekil 8. 900 °C'de 2 saat borlanmış %95 Fe - %5 Mg alaşımının XRD analizi



Şekil 9. 900 °C'de 6 saat borlanmış %95 Fe - %5 Mg alaşımının XRD analizi

Borlama öncesi ve sonrası numunelerin yüzey sertlik değerleri Şekil 10'da verilmiştir. Borlama süresinin artmasıyla Fe-Mg alaşımlarının sertlik değerlerinde artışlar görülmüştür. Borlama sonucunda oluşan FeB ve Fe₂B fazlarından dolayı yüzey sertliklerinin borlanmamış numunelere göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu durum termokimyasal kaplamalarda geçerli olan sıcaklık ve sürenin etkisi ile bor atomunun daha fazla malzeme içerisine difüzyon olması sonucu borlanan numunelerin tabaka kalınlık ve sertlik değerlerinde artışlar meydana getirmiştir. %90 Fe-%10 Mg içeren numunelerin 900°C'de 2 ve 6 saat borlama işlemi sonrasında sırasıyla 1346 ve 1472 HV_{0,05} sertlik değeri elde edilirken, %95 Fe-%5 Mg numunelerinde 1428 ve 1758 HV_{0,05} sertlik değerleri elde edilmiştir. Mg ilavesi numunelerde gözenekli bir yapı oluşmasına neden olmuştur. Bundan dolayı numunelerin sertlik değerlerinin borlanmış saf demirin sertlik değerlerinden bir miktar daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Genel ve arkadaşları (2003) AISI W1 çeliğini 850, 900, 950, 1000 ve 1050°C'de 1-8 saat boyunca Ekabor I tozuyla kutu borlama sonucunda 1800 HV sertlik değeri elde etmişlerdir [27]. Genel (2006) H13 çeliğini Ekabor I tozuyla 800, 900 ve 1000°C'de 1-5 saat süresince borlamış ve 1650-2000 HV arasında değişen sertlik değeri elde etmiştir [28]. Özdemir ve arkadaşları (2008) AISI 316 paslanmaz çeliği 800, 875 ve 950°C'de 2, 4 ve 8 saat süresince Ekabor I tozuyla kutu borlamışlardır. Borlama sonucunda 1700 HV borür tabaka sertlik değeri elde etmişlerdir [24]. Özbek ve arkadaşları (2002) AISI 316L

paslanmaz çeliğini boraks, borik asit ve ferrosilisyumla 850, 900, 950 ve 1000°C'de 2, 4 ve 6 saat süreyle borlamışlar ve 1500 HV sertlik değeri tespit etmişlerdir [29]. Gunes yaptığı çalışmada yüksek alaşımlı soğuk iş takım çeliğini ticari Ekabor II bor tozuyla 850, 900 ve 950°C'de 2, 4 ve 6 süresince borlamış ve 1806-2342 HV_{0,05} arasında değişen sertlik değerleri elde etmiştir.



Şekil 10. Borlama öncesi ve sonrası alaşımların yüzey mikro sertlik değerleri

4. Sonuç ve Öneriler

DeneySEL işlemler sonrasında numunelere uygulanan analiz ve test sonuçları borlama aşağıda verilmiştir:

- %10 Mg- %90 Fe numunesinin yoğunluk değeri 7,08 gr/cm³ iken, %5 Mg-%95 Fe numunesinin yoğunluk değeri 7,48 gr/cm³ olarak elde edilmiştir.
- Yüzey pürüzlülük değerleri %10 Mg- %90 Fe karışımlarında 0.30-0.62 µm, %5 Mg- %95 Fe karışımlarında ise 0,34-0,68 µm arasında değiştiği tespit edilmiştir
- %90 Fe-%10 Mg içeren numunelerde 900°C'de 2 ve 6 saat borlama işlemi sonrasında 45 ve 75 µm, %95 Fe-%5 Mg içeren numunelerde ise sırasıyla 63 ve 85 µm borür tabakası elde edilmiştir.
- Borlama sonrasında FeB, Fe₂B ve Fe fazları elde edilmiştir.
- Borlama sıcaklık ve süresinin artmasıyla borür tabaka kalınlığının arttığı görülmüştür.
- Mg borür atomlarının numune içerisine difüzyon olmasını engellediği tespit edilmiştir.
- Yüksek borlama sıcaklığında, Mg'un erime sıcaklığının düşük olmasından dolayı mikro yapıda gözeneklik oluşturduğu görülmüştür.
- Borlama sonucunda numunelerin sertlik değerlerinde artışlar görülmüştür. %90 Fe-%10 Mg içeren numunelerde 900°C'de 2 ve 6 saat borlama işlemi sonrasında 1346 ve 1472 HV_{0,05} ve %95 Fe-%5 Mg içeren numunelerde 1428 ve 1758 HV_{0,05} sertlik değerleri elde edilmiştir.
- Mg ilavesi borür tabakalarında gözenekli bir yapının oluşmasına neden olmuştur. Hem borür tabaka kalınlığını hem de mikro sertlik değerlerini negatif yönde etkilemiştir.
- DeneySEL çalışma sonrasında Fe-Mg alaşımlarının borlanabilmesi için sıcaklığın 800°C'de üzerinde olması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Teşekkür

Gerçekleştirilen bu çalışma, Afyon Kocatepe Üniversitesi BAPK 17.KARİYER.61 no'lu proje ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonuna çok teşekkürler.

Kaynaklar

- [1] Campos-Silva, I., Ortiz-Domínguez, M., Lo'pez-Perrusquia, N., Meneses-Amador, A., Escobar-Galindo, R., Martínez-Trinidad, J., Characterization of AISI 4140 borided steels, Applied Surface Science, 2010, 256, 2372-2379.
- [2] Saygın, M., AISI 1020 Çeliklerinde Borlamanın Yorulma Dayanımına Etkisi. Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2014, 46s.
- [3] Gunes, I., Ozcatal, M., 2011, Investigation of the adhesion and wear properties of borided AISI H10 steel, Materiali in Tehnologije, 50, 269-274.
- [4] Gunes, I., Yıldız, I., Rate of Growth of Boride Layers on Stainless Steels, Oxidation Communications, 2015, 38, 2189-2198.
- [5] Kulka, M., Perte, A., The importance of carbon content beneath iron borides after boriding of chromium and nickel-based low-carbon steel, Applied Surface Science, 2003, 214, 161-171.
- [6] Hamayun, M.A., Abramchuk, M., Alnasir, H., Khan, M., Pak, C., Lenhert, S., Ghazanfari, L., Shatruck, M., Manzoor, S., Magnetic and magnetothermal studies of iron boride (FeB) nanoparticles, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2018, 451, 407-413.
- [7] Yıldız, I., Gunes, I., Ulker, Ş., Farklı Kompozisyonlardaki Fe-Mg Alaşımlarının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Mesleki Bilimler Dergisi, 2017, 6(3), 600-604.
- [8] Sashank, S., Babu, P. D., Marimuthu, P., Experimental studies of laser borided low alloy steel and optimization of parameters using response surface methodology, Surface & Coatings Technology, 2019, 363, 255-264.
- [9] Kulka, M., Makuch, N., Pertek, A., Piasecki, A., An Alternative Method of Gas Boriding Applied To The Formation of Borocarbured Layer, Materials Characterization, 2012, 72, 59-67.
- [10] Gunes, I., Yıldız I., (2015). Rate of growth of boride layers on steels, Oxidation Communications, 38(4A), 2189-2198.
- [11] Özyaydın, D., Toz Metalurjisi ile Üretilen Demir Esaslı Malzemelerde Borlamanın Mekanik Özelliklere Etkisi, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2015, 108s.
- [12] Ozdemir, O., Usta, M., Bindal, C., Ucisik, A. H., Hard iron boride (Fe₂B) on 99.97 wt% pure iron, Vacuum, 2006, 80, 1391-1395.
- [13] Keddam, M., Ortiz-Domínguez, M., Campos-Silva, I., Martínez-Trinidad, J., A simple model for the growth kinetics of Fe₂B iron boride on pure iron substrate, Applied Surface Science, 2010, 256, 3128-3132.
- [14] Mitani, H., Xub, Y., Hirano, T., Demura M., Tamura, R., Catalytic properties of Ni-Fe-Mg alloy nanoparticle catalysts for methanol decomposition, Catalysis Today, 2017, 281, 669-676.
- [15] Amram, D., Schuh, C. A., Interplay between thermodynamic and kinetic stabilization mec-

hanisms in nanocrystalline Fe-Mg alloys, *Acta Materialia*, 2018, 144, 447-458.

[16] Gunes, I., Yıldız, I., Investigation of Adhesion and Tribological Behavior of Borided AISI 310 Stainless Steel, *Revista Materia*, 2016, 21, 61-71.

[17] Xiao, X., Wang, X., Gao, L., Wang, L., Chen, C., Electrochemical properties of amorphous Mg-Fe alloys mixed with Ni prepared by ball-milling, *Journal of Alloys and Compounds*, 2006, 413, 312-318.

[18] Kadas, K., Vitos, L., Ahuja, R., Elastic properties of iron-rich hcp Fe-Mg alloys up to Earth's core pressures, *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 271, 221-225.

[19] Moravej, M., Prima, F., Fiset, M., Mantovani, D., Electroformed iron as new biomaterial for degradable stents: Development, process and structure-properties relationship, *Acta Biomaterialia*, 2010, 6, 1726-1735.

[20] Gunes, I., (2014). Tribological Properties and Characterisation of Plasma Paste Borided AISI 5120 Steel, *Journal of the Balkan Tribological Association*, 20, 351-362.

[21] Tabur, M., İzçiler, M., Gül, F., Karacan, İ., 2009, “ Abrasive wear behavior of boronized AISI 8620 steel”, *Wear*, Vol. 266, pp.1106-1112

[22] Bindal, C., Üçışık, A.H., 2008, “Characterization of boriding of 0.3% C, 0.02% P plain carbon steel”, *Vacuum*, 82, 90-94

[23] Er, U., Par, B., 2006, “ Wear of plowshare components in SAE 950C steel surface hardened by powder boriding”, *Wear*, Vol.261, pp.251-255.

[24] Özdemir Ö, Omar, M.A., Usta, M., Zeytin, S., Bindal, C., Ücisik, A.H., 2008, “An investigation on boriding kinetics of AISI 316 stainless steel”, *Vacuum*, Vol.83, pp.175-179.

[25] Gunes I., Kanat, S., 2016, Investigation of wear behavior of borided AISI D6 steel, *Materiali in Tehnologije*, 50, 505-510.

[26] Gunes I., AISI 8620 Çeliğinin değişik pasta karışımlarında plazma pasta borlanması ve yüzey özelliklerinin incelenmesi, *Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*, 2010, 237s.

[27] Genel, K., Ozbek, I. and Bindal, C., 2003, “Kinetics of Boriding of AISI W1 steel”, *Materials Science and Engineering*, Vol. 347, pp.311-314.

[28] Genel, K., 2006, “Boriding kinetics of H13 steel” *Vacuum*, Vol.80-5, pp.451-457

[29] Özbek, İ., Konduk, B.A., Bindal, C. ve Üçışık, A.H., 2002, “Characterization of Borided AISI 316L Steel Implant”, *Vacuum*, 65C, pp.521-525.

[30] Gunes, I., 2015, Boride layer growth kinetics of the borided high alloyed cold work tool steel, *Oxidation Communications*, 38, 157-165.