



Atomik olarak eşit miktarda demir ve krom içeren Fe-Cr ikili alaşımanın borlanması

Boronizing of equiatomic Fe-Cr binary alloy

Yücel GENÇER^{1*}, Mehmet TARAKÇI¹

¹Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Gebze Teknik Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye.
gencer@gtu.edu.tr, mtarakci@gtu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 26.10.2016, Kabul Tarihi/Accepted: 09.02.2017

* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2017.82956

Özel Sayı Makalesi/Special Issue Article

Öz

Bu çalışmada, kontrollü atmosferde eşit miktarda demir ve krom içeren sentetik Fe-Cr ikili alaşımı hazırlanmıştır. Hazırlanan bu Fe-Cr numuneler kutu borlama yöntemi ile 800 °C, 900 °C ve 1000 °C'de 6 sa. süre ile kaplanmıştır. Oluşturulan kaplamanın kimyasal ve faz içeriği, mikroyapısı, kaplama kalınlığının sertliği; X-ray kırınımı, optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu, mikrosertlik cihazı ile karakterize edilmiştir. Her üç sıcaklıkta da kaplama tabakasının altlık malzemeye mükemmel yapıştığı ve borür tabakanın Fe₂B ve CrB fazlarından oluştuğu tespit edilmiştir. Borür tabaka düz bir morfoloji de olup sıcaklığın artmasıyla CrB fazının ağırlıklı bulunduğu iğnemsî çökeltilerden oluşan bir geçiş bölgesi oluşmuş ve sıcaklık artışına bağlı olarak bu çökeltilerin miktarı artmıştır. Borlama sıcaklığı ile yoğun borür kaplama kalınlığı artmıştır. Borür tabaka sertliği ise sıcaklıktan bağımsız olarak 2500 ile 3500 HV arasında bulunmuştur.

Anahtar kelimeler: Fe-Cr alaşımı, Kutu borlama, Demir borür, Krom borür, Sertlik

Abstract

In this study, equiatomic Fe and Cr binary alloy was prepared under controlled atmosphere. The Fe-Cr alloy was coated with pack boriding method for the duration of 6 h at 800 °C, 900 °C and 1000 °C. Chemical and phase content, microstructure, hardness of the formed boride layer were studied by using XRD, SEM-EDS, microhardness measurement device. Perfect adhesion of coating to substrate and formation of compact boride layer composed of Fe₂B and CrB phases on the substrate were observed. The increase of temperature resulted in formation of transition zone with CrB precipitates whose amount increased with temperature. The treatment temperature resulted in increasing of main boride coating thickness. Boride layer hardness was changed between 2500 HV and 3500 HV independent from boronizing temperature.

Keywords: Fe-Cr alloy, Pack boriding, Iron boride, Chromium boride, Hardness

1 Giriş

Borlama, metal ve alaşımlarının mekanik zorlama, korozyon gibi servis ömrünü etkileyen dış etkenlere karşı malzemenin direncini ve servis ömrünü artıran termo-kimyasal bir yüzey modifikasyon prosedir [1]. Günümüzde daha çok çeliklerin yüzey özelliklerini geliştirmek amaçlı uygulanan yöntem olan borlama sayesinde metal yüzeyinde FeB ve/veya Fe₂B tabakaları sentezlenebilmektedir [2]-[5]. Bor kaynağından bor atomunun serbest hale geçişi, altlık malzemeye bor elementinin yayını ve meydana gelen reaksiyonlar sonucunda borür bileşiklerinin oluşumu ile ilgili mekanizma literatürde yer bulmuştur [6]. Yüzeyde borür bileşiklerin oluşturduğu kalınlığı, sertliği, aşınma ve korozyon direnci, gözenekli yapısı, yüzey pürüzlülüğü proses süresine, sıcaklığına, bor kaynağına ve altlık malzemenin kimyasal kompozisyonuna bağlıdır [2]-[8]. Bu değişkenlerden altlık malzemenin kompozisyonu kontrol edilmesi proses değişkenlerinden bağımsız olduğundan, çelik içerisindeki alaşım elementlerinin oluşturulan borür tabakasına etkisinin anlaşılması önemlidir. Çelik içerisinde bulunan Mo, Si, Ni, C, Ti, V ve Cr gibi alaşım elementlerinin borlama sonunda elde edilen kaplamaya etkisi özellikle son yıllarda araştırma konusu olmuştur [3]-[5],[9]-[13]. Bu kapsamda çelik için en önemli alaşım elementlerinden olan kromun borlama üzerine yalın etkisinin belirlenmesi için saf demir içerisine atomik olarak %5, 10, 15, 25 ve 30 oranlarında krom ilave edilerek Fe-Cr ikili alaşımları borlanmıştır [12]-[15]. Yapılan bu çalışmalarda Fe-Cr içerisindeki krom miktarındaki artışa bağlı olarak borür tabaka kalınlığının düştüğü, malzeme

yüzeyinde oluşan borür tabakanın dış kısmı FeB fazından, iç kısmı ise Fe₂B fazından oluştuğu ve buna ek olarak borür tabakası içerisinde ve kaplama-altlık ara yüzeyinde (Fe,Cr)B yapısında iğnemsî yapıların varlığı raporlanmıştır [12]-[14]. Bu çalışmada ise literatürde rapor edilmeyen atomik olarak eşit miktarda Fe ve Cr içeren Fe-Cr ikili alaşımı sentetik olarak üretilmiş, farklı sıcaklıklarda aynı sürede yapılan kutu borlama tekniği ile kaplanarak karakterize edilmiş ve bu alaşımanın borlama davranışı ortaya çıkarılmıştır.

2 Deneysel çalışma

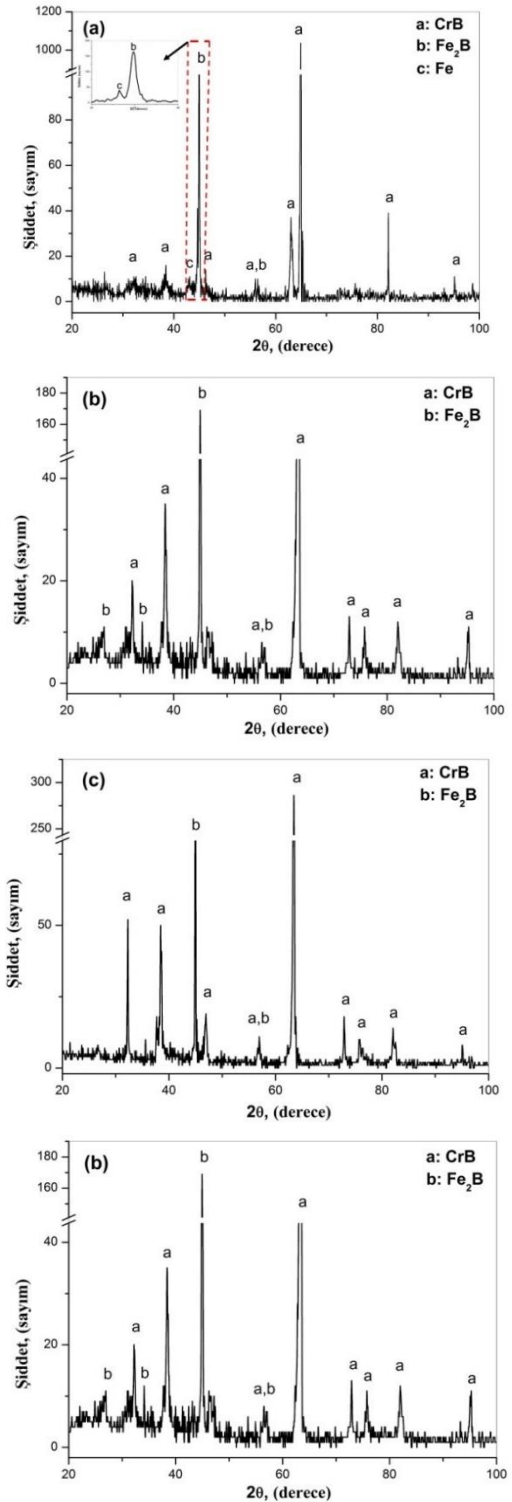
Atomik olarak eşit miktarda alaşım oluşturmak üzere %99.97 saflıktaki demir ve %99.8 saflıktaki krom metal parçaları kontrollü atmosfer altında ark ergitme fırınında ergitilmiştir. Boyu 50 mm, genişliği ve kalınlığı 10 mm olan Fe-Cr ikili alaşımı hazırlanmıştır. Bu alaşım, dilimlenerek bir kenarı 10 mm ve kalınlığı 5 mm olan kare kesitli borlama numuneleri hazırlanmıştır. Numunelerin kare yüzeyleri 80-1200 grit zımparalar ile aşındırılmıştır. Daha sonra numunelerin aşındırılmış yüzeyleri elmas pasta (3 µm) ile parlatılmıştır. Fe-Cr alaşımı alümina pota içerisindeki ticari Ekabor II tozuna gömülmüş ve potanın üst kısmına oksit giderici toz konularak potanın kapağı sıkıca kapatılmıştır. Fe-Cr alaşımını içeren pota elektrik direnç prensibiyle ısıtılan kutu fırına yerleştirilerek, 800±5 °C'de 6 sa. süreyle borlama işlemi yapılmıştır. Hazırlan diğer Fe-Cr alaşımları ise benzer şekilde aynı süre boyunca 900±5 °C ve 1000±5 °C'de borlanmıştır. X-ışınları kırınımı cihazı (Bruker D8) ile Cu-Kα ışını kullanılarak borlanan bu Fe-Cr numunelerin faz incelenmesi yüzeyden yapılmıştır. Ayrıca,

1000 °C'de borlanan numunenin borür tabakasının iç bölgesinde oluşması muhtemel farklı fazların tespiti için bu numunenin yüzeyindeki borür tabakanın yaklaşık olarak yarısı aşındırılarak aynı şartlarda yine yüzeyden XRD analizi yapılmıştır. Borlanan numunelerin kare yüzeyi iki eşit dikdörtgen olacak şekilde hassas kesici ile dilimlenmiştir. Borür tabakayı ortaya çıkaracak şekilde dilimlenmiş numuneler kalıba alınmış, Fe-Cr altlıkların hazırlanmasına benzer şekilde aşındırılmış ve elmas pasta (3 µm) ile parlatılmıştır. Numunelerin kesitten incelemesi öncelikle Nikon marka optik mikroskop (OM) altında yapılmıştır. Kaplamaların mikrosertlik değerleri optik mikroskoba bağlı Mitutoyo mikrosertlik cihazı ile 30 g yükün 10 s süreyle uygulanmasıyla Vicker sertlik izleri oluşturulmuştur. Kesitleri ortaya çıkarılmış borür kaplı Fe-Cr numuneler, altın kaplandıktan sonra SEM (Philips XL-30 FEG SEM) ile mikroyapıları incelenmiş ve kaplama kalınlığı ölçülmüştür. Ayrıca, bu numunelerin borür tabakasında oluşturulmuş 5 Vickers izinin boyutları SEM altında ölçülerek ortalaması alınıp Fe-Cr alaşımı yüzeyindeki borür tabakanın mikrosertlik değerleri tespit edilmiştir. Borür tabaka kimyasal bileşimi SEM'e bağlı elektron dağılım spektrometresi (EDS) ile tespit edilmiştir.

3 Deneysel sonuçlar ve tartışma

Şekil 1'de Fe-Cr alaşımının 800 °C, 900 °C ve 1000 °C sıcaklıklarda yapılan borlama işlemi sonrasında yüzeyden alınan XRD sonuçları verilmiştir. Her üç sıcaklıkta yapılan borlama işlemi sonrasında borür tabakanın yüksek oranda CrB ve Fe₂B fazlarından oluştuğu görülmektedir. Bu iki faza ilave olarak 800 °C'de borlanan numunenin XRD spektrumunda Fe fazına ait bir pikin olduğu görülmektedir (Şekil 1a). Fe fazın ait bu pikin altlık malzemeden kaynaklandığı düşünülmüştür. Zira bu sıcaklıkta oluşan borür tabaka yeterince kalın olmadığı için altlıktan XRD sinyali alınmaktadır. Her iki borür fazın çok kristalli ve kristalografik olarak rast gele bir yönelime sahip olduğu farklı düzlemlerden elde edilen kırınım piklerinden anlaşılmaktadır. Her ne kadar Fe ve Cr metallerin ikili faz diyagramları incelendiğinde yüksek sıcaklıkta birbiri içerisinde tam katı eriyik oluştursa da düşük sıcaklıklarda bir faz ayrışması meydana gelmekte ve Fe-Cr alaşımı yüzeyinde borlama sonrası oluşan borür tabakanın yapısında CrB ve Fe₂B fazlarının ayrı ayrı oluşmasına neden olmaktadır. 900 °C'de borlanan numunenin XRD spektrumunda 20-50° arası incelendiğinde az miktarda amorf yapının bulunduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca 1000 °C'de numunenin yüzeyinde oluşan borür tabakanın yarısı aşındırılarak elde edilen XRD spektrumu da Şekil 1d'de verilmiştir. Bu numune için yapılan XRD analizinde kaplamanın içerdiği fazların değişmediği yani CrB ve Fe₂B fazlarından meydana geldiği dolayısıyla borür tabakanın faz bileşiminin kalınlık boyunca değişmediği anlaşılmıştır. Ayrıca bu alaşım üzerine yapılan borür kaplamanın içerisine doğru ilerledikçe, Fe alaşımları için genelde literatürde raporlanan tercihli bir kristal yönelim olmadığı görülmektedir [12]-[14]. Bu da atomik olarak eşit miktarda Fe ve Cr içeren Fe-Cr alaşımındaki Cr elementinin B elementi ile yapmış olduğu CrB bileşiğinin, B elementinin borür tabaka içerisindeki tercihli olarak bazı kristal yönlerinde hızlı difüzyonunu ve dolayısıyla tercihli olarak belirli yönelimlerinde kristal büyümesini engellemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Dolayısıyla, bu iki borür fazı oluşturan Cr ve Fe elementleri az miktarda da olsa yer alan

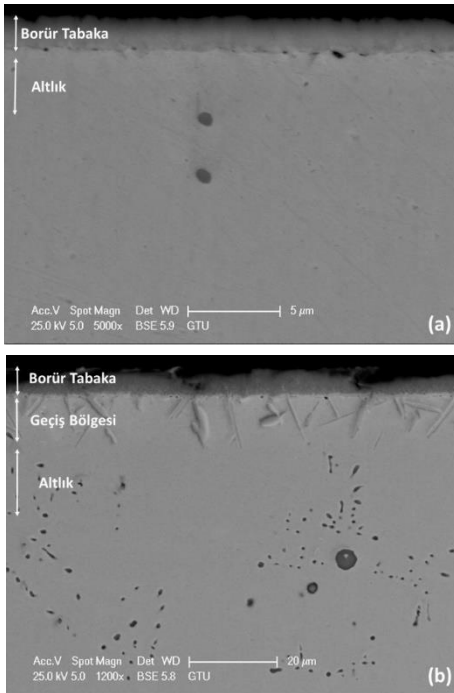
element olarak (Cr, Fe)B ve (Fe, Cr)₂B borür fazları içerisinde bulunmakta olduğu kanaati oluşmuştur.



Şekil 1: Farklı sıcaklıklarda 6 saat süre ile borlanmış Fe-Cr ikili alaşımının yüzeyinden alınan XRD spektrumu; (a): 800 °C, (b): 900 °C, (c): 1000 °C ve (d): 1000 °C (aşındırılmış).

Şekil 2, 800-1000 °C'de borlanan Fe-Cr alaşımının kesitlerinden alınan SEM mikrograflarını göstermektedir. 800 °C'de borlanan Fe-Cr alaşımı üzerine yapılan kaplamada borür tabakasının

kompakt bir yapıda olduğu ve bu borür tabakanın atlık malzemeye çok iyi bağlandığı görülmektedir (Şekil 2a). Benzer şekilde 900 °C ve 1000 °C'de borlanan Fe-Cr numunelerin borür tabakası da taraksı bir morfolojiye sahip değildir (Şekil 2b-c). Dolayısıyla literatürde belirtilen demir esaslı malzemelere ait taraksı yapı her üç sıcaklıkta borlanan Fe-Cr alaşımlarında oluşmamıştır. Genelde alaşım elementinin miktarına ve cinsine bağlı olarak bu taraksı yapının, V, Ti, Mo gibi bazı elementlerin demirdeki miktarına bağlı olarak Fe-M (M=V, Ti, Mo) üzerinde oluşan borür tabakanın düzleştiği raporlanmıştır [3]-[5]. Ancak, Fe-Mn üzerine yapılan bir çalışmada ise taraksı morfolojinin değişmediği belirtilmiştir [2]. Demir içerisine krom ilave edilerek elde edilen alaşımların borlanması sonucu ise yüzeyde oluşan taraksı yapı morfolojisi çok yüksek oranlarda Cr içeren (%25'e kadar) altlıklarda kısmen bozulmuştur. Ancak bu çalışmada olduğu gibi çok yüksek oranda Cr içeren Fe-Cr alaşımında taraksı yapı tamamen kaybolduğu görülmüştür (Şekil 2). Fe-Cr alaşımının özellikle yüksek sıcaklıkta borlanması sonucu iğnemi yapıların olduğu ana borür tabaka ile altlık arasında bir geçiş oluşmuştur (Şekil 2b-c). Bu yapı literatürde raporlanan bu çalışmaya göre daha düşük oranda krom içeren Fe-Cr borlanmasında da rastlanmıştır [12]-[14]. Benzer şekilde Fe-Ti, Fe-Mo gibi alaşımların borür tabakası altında bu geçiş bölgesinin olduğu raporlanmıştır [3],[4].

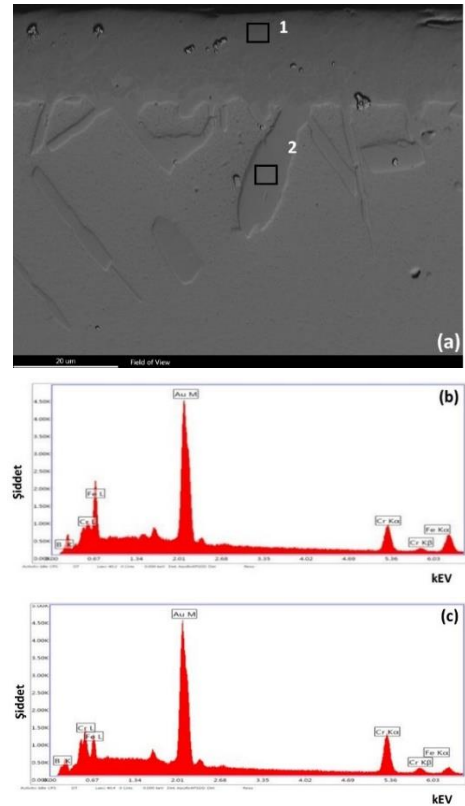


Şekil 2: Farklı sıcaklıklarda borlanan Fe-Cr alaşımının kesitten alınan SEM görüntüleri; (a): 800 °C, (b): 900 °C ve (c): 1000 °C (mikrosertlik izleri ile birlikte).

Fe-Cr alaşımının 1000 °C borlanması sonrasında elde edilen kaplamanın kesitten alınan tipik bir SEM görüntüsü ile birlikte borür tabakanın belirli bölgelerinden alınan SEM-EDS spektrumları Şekil 3'te verilmiştir.

Borür tabakanın yüzeye yakın bölgesinden (1 numaralı) (Şekil 3b) ve metal altlığa yakın (2 numaralı) çökeltilerden (Şekil 3c) alınan SEM-EDS spektrumları incelendiğinde her iki bölgenin kimyasal bileşiminin Fe, Cr ve B elementlerinden oluştuğu anlaşılmaktadır. Ayrıca yüzeye kaplanan altından dolayı bu

spektrumda bu elemente ait pik görülmektedir. SEM-EDS spektrumlarında 1 numaralı bölgede Fe elementine ait, 2 numaralı bölgede ise Cr elementine pik şiddetleri yüksek olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, yukarıda belirtildiği gibi Fe₂B ve CrB fazlarını oluşturan Cr ve Fe elementleri az miktarda da olsa yer alan elementi olarak (Cr, Fe)B ve (Fe, Cr)₂B borür fazları içerisinde bulunmakta olduğu kanaatini güçlendirmektedir. 2 numaralı bölgede Cr elementine ait pik şiddetinin daha fazla olması ise oluşana iğnemi çökeltilerin CrB ağırlıklı oluşan fazdan kaynaklandığı düşünülmektedir. Literatürde benzer bir çalışmada bu geçiş bölgesindeki çökeltilerin Cr ağırlıklı bir faz olduğu belirtilmiştir [16]. Ayrıca, diğer bazı Fe-M (M=Ti, Mo) alaşımlarının borlanması sonucu oluşan çökeltilerin demir içerisindeki alaşım elementinden kaynaklandığı raporlanmıştır [3], [4].

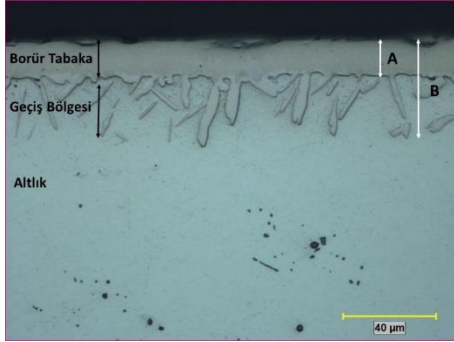


Şekil 3: Fe-Cr alaşımının 1000 °C'de borlanan numunenin kesitten alınan SEM mikrografı ve belirli bölgelerin EDS spektrumu; (a): SEM mikrografı, (b): '1' ile işaretli bölgenin spektrumu, (c): '2' ile işaretli bölgenin SEM-EDS spektrumu.

Fe-Cr alaşımının farklı sıcaklıklarda borlama sonucu oluşan kaplamaların ve kaplama ile altlık arasında kalan geçiş bölgesinin kalınlıkları ölçülmüştür. Şekil 4'te 1000 °C'de 6 sa. borlanan numunenin kesitten alınan OM görüntüsünde kalınlık ölçümünde esas alınan kaplama ve geçiş bölgesi gösterilmiş olup, bu gösterime göre elde edilen kaplama kalınlıkları Tablo 1'de verilmiştir.

Şekil 2'de kaplamanın SEM görüntüsünde de olduğu gibi (Şekil 2c) homojen kalınlıkta ve yoğun bir yapıda olduğu ve geçiş bölgesinde ise iğnemi karakterde çökeltiler olduğu görülmektedir. Yoğun borür tabaka kalınlığının ve toplam borür tabaka kalınlığının borlama sıcaklığı ile arttığı görülmektedir (Tablo 1). Ancak, 800 °C yapılan borlama işlemi sonrası geçiş bölgesinin ne OM ne de SEM tespit edilmediği

dolayısıyla geçiş bölgesinin bu sıcaklıkta oluşmadığı kanaatine varılmıştır (Şekil 2a). Kaplama kalınlığı ve geçiş bölgesinin oluşması, artan borlama sıcaklığıyla birlikte bor atomunun hem borür tabaka içerisinde ve hem de altlık metali içerisinde difüzyon hızı artmasından kaynaklandığı düşünülmüştür. Ancak altlık Fe-Cr alaşım içerisinde bor atomunun çapının küçüklüğünden kaynaklı difüzyon hızının daha yüksek olmasından dolayı geçiş bölgesinin kalınlığı, bor tabaka kalınlığından daha fazladır, yani bor atomu altlık içerisinde daha uzun mesafelere kadar yayılmıştır.



Şekil 4: Fe-Cr alaşımı üzerinde oluşana borür tabakanın kalınlık ölçümünde alınan bölgeler (1000 °C, 6 borlanan numune).

Şekil 2'de kaplamanın SEM görüntüsünde de olduğu gibi (Şekil 2c) homojen kalınlıkta ve yoğun bir yapıda olduğu ve geçiş bölgesinde ise iğnemi karakterde çöktiller olduğu görülmektedir. Yoğun borür tabaka kalınlığının ve toplam borür tabaka kalınlığının borlama sıcaklığı ile arttığı görülmektedir (Tablo 1). Ancak, 800 °C yapılan borlama işlemi sonrası geçiş bölgesinin ne OM ne de SEM tespit edilmediği dolayısıyla geçiş bölgesinin bu sıcaklıkta oluşmadığı kanaatine varılmıştır (Şekil 2a). Kaplama kalınlığı ve geçiş bölgesinin oluşması, artan borlama sıcaklığıyla birlikte bor atomunun hem borür tabaka içerisinde ve hem de altlık metali içerisinde difüzyon hızı artmasından kaynaklandığı düşünülmüştür. Ancak altlık Fe-Cr alaşım içerisinde bor atomunun çapının küçüklüğünden kaynaklı difüzyon hızının daha yüksek olmasından dolayı geçiş bölgesinin kalınlığı, bor tabaka kalınlığından daha fazladır, yani bor atomu altlık içerisinde daha uzun mesafelere kadar yayılmıştır.

Tablo 1: Farklı sıcaklıklarda borlanan Fe-Cr alaşımı üzerinde oluşan borür tabaka kalınlıkları (bkz Şekil 4) A Bölgesi: Yoğun borür tabaka, B Bölgesi: Yoğun borür tabaka+geçiş bölgesi.

Borlama Sıcaklığı (°C)	A-Bölgesi Kalınlığı (µm)	B-Bölgesi Kalınlığı (µm)
800	1.60 ± 0.18	-
900	5.71 ± 1.40	16.14 ± 2.84
1000	16.88 ± 1.50	46.60 ± 5.04

1000 °C'de borlanan Fe-Cr numunenin borür tabakasından elde edilen tipik Vickers mikrosertlik izleri ve tipik mikrosertlik değerleri Şekil 2c'de verilmiştir. Fe-Cr altlık için mikrosertlik değeri 170 HV olarak ölçülmesine rağmen, borür tabakanın mikrosertlik değerleri yaklaşık olarak 2650 HV ile 3240 HV arasında değiştiği belirlenmiştir. Bu değişim borür tabakayı oluşturan fazlardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Zira Fe₂B'nin tipik mikrosertlik değeri 1800-2000 HV civarındadır. Dolayısıyla yukarıda belirtildiği gibi (Cr, Fe)₂B ve (Fe, Cr)₂B borür fazlarının olduğu bölgede mikrosertlik göreceli olarak

yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Diğer sıcaklıklarda elde edilen borür tabakası kalınlığı sertlik ölçümleri için tutarlı sonuç vermediğinden dolayı bu çalışmada raporlanmamıştır. Ancak XRD, SEM, SEM-EDS sonuçları göz önüne alındığında 800 °C ve 900 °C'de borlanan Fe-Cr alaşımının borür tabakasının da benzer sertlik değerine sahip olduğu düşünülmektedir.

4 Genel sonuçlar

1. Farklı sıcaklıklarda 50Fe-50Co yüzeyinde oluşan borür tabakanın Fe₂B ve CrB fazlarından oluştuğu tespit edilmiştir,
2. Oluşan borür tabaka düz bir morfoloji de olup sıcaklığın artmasıyla CrB fazının ağırlıklı bulunduğu iğnemi çöktillerden oluşan bir geçiş bölgesi oluşmuş ve sıcaklığın artmasıyla bu çöktillerin miktarı artmıştır,
3. Borür tabaka sertliğinin, 2650 HV ile 3240 HV arasında değiştiği belirlenmiştir,
4. Borlama sıcaklığı ile yoğun borür kaplama kalınlığı artmıştır.

5 Teşekkür

Bu makalenin hazırlanmasındaki katkılarından dolayı Z. Çağatay Öter, Sezgin Cengiz ve Yunuz Azaklı'ya teşekkür ederiz.

6 Kaynaklar

- [1] Sinha AK. "Boriding (Boronizing)". *ASM Handbook*, 417, 1991.
- [2] Gencer Y. "Influence of manganese on pack boriding behaviour of pure iron". *Surface Engineering*, 27(8), 634-638, 2011.
- [3] Gencer Y, Tarakci M, Calik A. "Effect of titanium on the boronizing behaviour of pure iron". *Surface & Coatings Technology*, 203(1-2), 9-14, 2008.
- [4] Azakli Y, Cengiz S, Tarakci M, Gencer Y. "Characterisation of boride layer formed on Fe-Mo binary Alloys". *Surface Engineering*, 32(8), 589-595, 2016.
- [5] Gunduz KO, Gencer Y, Tarakci M, Calik A. "The effect of vanadium on the boronizing properties of pure iron". *Surface & Coatings Technology*, 221, 104-110, 2013.
- [6] Azakli Y, Tarakci M. "Microstructural characterisation of borided binary Fe-W alloys". *Surface Engineering*, doi:10.1080/02670844.2016.1263712.
- [7] Ozbek I, Bindal C. "Kinetics of borided AISI M2 high speed steel". *Vacuum*, 86(4), 391-397, 2011.
- [8] Gunes I, Ulker S, Taktak S. "Plasma paste boronizing of AISI 8620, 52100 and 440C steels". *Materials & Design*, 32(4), 2380-2386, 2011.
- [9] Tarakci M, Gencer Y, Azakli Y, Sahinturk, U. "Surface modification of Fe-8Si alloy by boronizing and its characterization". *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 28(3), 645-655, 2013.
- [10] Brakman CM, Gommers AWJ, Mittemeijer EJ. "Boriding of Fe and Fe-C, Fe-Cr, and Fe-Ni alloys; boride-layer growth Kinetics". *Journal of Materials Research*, 4(6), 1354-1370, 1989.
- [11] Carbuicchio M, Palombarini G. "Effects of alloying elements on the growth of iron boride coatings". *Journal of Materials Science Letters*, 6(10), 1147-1149, 1987.

- [12] Dybkov VI, Sidorko VR, Khoruzha VG, Samelyuk AV, Goncharuk LV. "Interaction of 25% chromium steel with boron powder". *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 50(7-8), 564-571, 2011.
- [13] Dybkov VI, Goncharuk LV, Khoruzha VG, Samelyuk AV, Sidorko VR. "Growth kinetics and abrasive wear resistance of boride layers on Fe-15Cr alloy". *Materials Science and Technology*, 27(10), 1502-1512, 2011.
- [14] Dybkov VI. "Thermochemical Boriding of Fe-5% Cr Alloy". *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 54(11-12), 652-664, 2016.
- [15] Dybkov VI, Sidorko VR, Goncharuk LV, Khoruzha VG, Samelyuk AV. "Microstructure, growth kinetics, and abrasive wear resistance of boride layers on Fe-30% Cr alloy". *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 51(9-10), 518-530, 2013.
- [16] Dybkov VI, Lengauer W, Gas P. "Formation of Boride Layers at the Fe-25% Cr Alloy-Boron Interface". *Journal of Materials Science*, 41(15), 4948-4960, 2006.