

2nd International Symposium on Innovative Approaches in Scientific Studies

Farklı Şartlarda Borlanan Hardox 400 Çeliğinin Mekaniksel Özelliklerinin İncelenmesi

Mehmet TABUR¹, Mahmut İZCİLER²

¹Milli Eğitim Bakanlığı, Ankara, Türkiye

²Teknoloji Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye

(Alınış / Received: 09.01.2019, Kabul / Accepted: 24.10.2019)

Anahtar Kelimeler

Borlama,
Hardox 400 çeliği,
EKabor® 2,
Mekanik Özellikler

Özet: Bu çalışmada, aşınmaya dayanıklı Hardox 400 çeliğine 2, 4 ve 6 saat sürelerde; 850 °C, 900 °C ve 950 °C sıcaklıklarda kutu sementasyonu yöntemi uygulanarak bor difüze edilmiş ve çelik üzerinde oluşturulan borürlerin bazı mekanik özellikleri incelenmiştir. Borlama malzemesi olarak ticari şekilde piyasada bulunan EKabor® 2 tozu(bor karbür) kullanılmıştır. İşlem sıcaklık ve süresine bağlı olarak borür katmanının derinliği 80 µm ile 300 µm arasında değişmiştir. Daha uzun borlama süresinin daha kalın FeB, Fe₂B ve Fe₃B'den oluşan bir katman oluşmasını sağladığı görülmüştür. Ana malzeme üzerinde oluşan borürlerin düzgün ve dallı testere dişi biçiminde bir morfolojiye sahip olduğu Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) incelemeleri sonucu anlaşılmıştır. Vickers sertlik ölçümlerinde borür katmanı sertlikleri 2000 HVN değerinin üzerinde ölçülmüştür. Malzeme yüzeyindeki zırh katmanında x-ışını kırınım analizi ile FeB, Fe₂B ve Fe₃B borürleri teyit edilmiştir. Ayrıca bor katmanı kalınlıkları ve alaşım elementlerinin dağılımı enerji ayrıştırma sistemli x-ışını spektroskopisi (EDS) ile belirlenmiştir. Ayrıca zamana bağlı olarak bor difüzyonu yapılan numunelerin darbelere karşı direnç değerleri yapılan deneysel testler sonucunda bulunmuştur.

Some Mechanical Properties Examination of Hardox 400 Steel Boronized Under Different Conditions

Keywords

Boronizing,
Hardox 400 Steel,
Mechanical Properties,
EKabor® 2

Abstract: In this study, some mechanical properties of borides formed over wear resistant Hardox 400 steel were investigated. Boronizing of Hardox 400 steel was performed by means of pack cementation method. Commercial EKabor® 2 powder was used as boronizing agent. Boronizing process was carried out for 2, 4 and 6 hours at 850 °C, 900 °C and 950 °C, respectively. Depth of boride layers ranged between 80 µm and 280 µm, depending on the process temperature and time. It has been observed that longer boronizing durations provided formation of a thicker layer. SEM studies revealed that the borides formed on the steel substrate have uniform dendritic morphology. Hardness of the boronized layer, measured by Vickers indenter, was found to be over 2000 HVN. The presence of borides (FeB, Fe₂B and Fe₃B) were confirmed by x-ray diffraction analysis. The distribution of alloying elements in the boronized layer was determined by energy-dispersive x-ray spectroscopy (EDS) method.

1.Giriş

Hardox 400 çeliği, aşınma direnci oldukça yüksek olan bir malzemedir. Sağlamlığı ve aşınmaya karşı direnci ile orman endüstrisinden yol yapımına kadar birçok uygulama alanlarında ve endüstride, özellikle aşınmaya dayanıklı iş makinalarında, endüstriyel

tezgahların aşınmaya dirençli parçalarında ve savunma sanayinde kullanılmaktadır[1]. Borlama denildiğinde kastedilen işlem, çelik malzemelerin yüzeylerinde bir bor katmanı oluşturmak için difüzyonla yüzey sertleştirme tekniğidir. Malzeme yüzeylerinde oluşturulan sert ince zırh katmanı aşınmaya karşı kullanılan malzemenin direncini

oldukça fazla artırmaktadır. Çelik yüzeyinde demir borür oluşturulması borlama işlemlerinin en bilinenlerindedir [2]-[5]. Birçok uygulamada bileşenlerin kullanım ömürlerini aslında yüzey özellikleri belirler. Çeliklerin karbon, nitrojen ya da bor gibi elementlerin difüzyonuna dayalı ısıl kimyasal işlemlere dair önemli çalışma alanında, borlamanın yeri son derece önemlidir [6]. Borlamanın metallerin yüzey sertliğini ve aşınma dayancını ciddi şekilde artırmak için etkili bir yöntem olduğu pek çok çalışmada görülmüştür [7]-[9].

Borlama işlemi bor atomlarının numune yüzeyine difüzyonunu sağlayıp ana metal ile borürler oluşturmasını amaçlayan bir kimyasal ısıl işlemdir [2],[3],[10]-[14]. Borlama işlemiyle oluşan borürler çeliğin tribolojik davranışlarını geliştirir [15]. Çelik ürünlerinin borlanması işlemi genellikle 840 OC ile 1050 OC sıcaklık aralığında yapılır [10],[11]. Yüzeylerde bor zenginleştirilmesi işlemi için çeşitli teknikler mevcuttur [5],[16]. İşlem katı, sıvı, gaz [10],[11],[15]. plazma ve iyon implantasyonu ortamlarından herhangi biri kullanılarak yapılır [7],[17]. Kutu borlama karışımları kaynak olarak %5 B4C, aktifleştirici olarak %5 KBF4 ve seyreltici olarak %90 SiC içeren karışımlar ile yapılmaktadır [11],[18]. Borlama işleminde numune toz karışım içerisine yerleştirilip sızdırmaz bir kutuya konur ve kapatılır. Kutu istenilen sıcaklığa kadar ısıtılır. Bu sıcaklıkta gerektiği kadar tutulur ve soğutulur [11].

Bor elementinin çelik içerisine difüzyonu ile demir borürleri oluşur (FeB, Fe2B) ve borür katmanının kalınlığını işlemin sıcaklığı ve süresi belirler [18]-[20]. Her iki katman da difüzyon doğrultusunda konumlanmış kolon biçimli kristal yapıya sahip olur [20]. Ağırlıkça % 16,23 B içeren bor bakımından zengin olan FeB (ortorombik) fazı tercih edilmemektedir. Çünkü ağırlıkça % 8,83 B içeren Fe2B (tetragonal) fazına göre daha kırılımandır [11],[20],[22]. Borür katmanları testere dişi biminde olmasından dolayı ana malzemeye daha iyi yapışır. Borlanmış katmanın kırılma dayanımının katman kalınlığı ile arttığı yapılan bilimsel çalışmalarda belirlenmiştir [23],[24]. Ayrıca FeB ve Fe2B fazları birbirinden farklı ısıl genleşme katsayılarına sahip olduklarından (IGK; $\alpha_{FeB}=23 \times 10^{-6}/^{\circ}C$, $\alpha_{Fe2B}=7.85 \times 10^{-6}/^{\circ}C$), çift fazlı katmanların FeB / Fe2B faz ara yüzeylerinde mikro çatlak oluşumlarına sıklıkla rastlanır. Bu çatlaklar mekanik bir yük uygulandığında sıklıkla pullanmaya yol açar [20],[22],[25].

Borlama işleminin yüzey sertleştirme işlemi olan karbürleme ve nitrürleme ile karşılaştırıldığında, borlanmış olan çeliklerin diğer işlemlere göre gelişmiş tribolojik karakteristikleri olduğu belirlenmiştir [11],[23],[25]-[27]. Borlanmış çelik yüzeyler yüksek sertlik, mükemmel aşınma, iyi korozyon ve güçlü kimyasal kararlılıktadır. [17],[28]. Borlamanın diğer yüzey sertleştirme metodlarına

göre avantajları arasında, yüzey katmanının çok sert olması, sürtünme katsayısının çok düşük olması, borlamadan sonra herhangi bir fazladan ısıl işlem gerekmemesi, borlamanın bazı asitler, bazlar, metal çözeltileri ve yüksek sıcaklıkta gerçekleşen oksitlenmeye çok ciddi dayançlı olması sayılabilir [23],[29].

Bu çalışmada borlanmış ve borlanmamış hardox 400 çeliğinin mekanik özellikleri incelenmiştir. Hardox çeliklerinin yüksek sertliği kesintisiz bir ısıl işlemle sağlanmaktadır. Hardox çeliğinin sertliği aşınma dayancının iyi bir ölçüsüdür. Bu malzeme ile yapılan ürünlerin uzun ömürlü olmasını sağlayan en önemli özelliği bu plakaların tam sertleştirilmiş olmasıdır. Hardox 400 çeliklerinin çarpma mukavemeti ve elastik esnekliği çok yüksektir [30].

Bu çalışmada, borlanmış hardox 400 çeliğinin bazı mekanik özelliklerini, örneğin borür katmanının morfolojisini, alaşım elementlerinin dağılımını, kırılma dayancını, vs. açığa kavuşturmayı amaçlamaktayız. Borlanmış hardox 400 çeliğinin sertlik ölçümleri Vickers sertlik ölçüm cihazında yapılmıştır. Mikro yapı incelemeleri de Taramalı Elektron Mikroskopunda (SEM) yapılmıştır. Sertlik ölçümleri Vickers sertlik ölçme cihazında 100 g yük uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Alaşım elementlerinin yüzeyden iç kısma dağılımını belirlemek için ise enerji ayrışma sistemli x-ışını spektroskopisi (EDS) kullanılmıştır.

2. Deneysel Detayları

2.1. Test Malzemeleri

Bu çalışmada kullanılan test malzemeleri aşınmaya dirençli hardox 400 çeliğidir. Test malzemesinin kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilmiştir. Test edilen malzeme 10 mm kalınlığındaki hardox 400 çelik plakalardan, 6 mm çap ve 50 mm uzunlukta hazırlanmış silindirik pim şeklindedir.

Çizelge 1. Borlanmış Hardox 400 çeliğinin kimyasal analizi (% ağırlık)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B
0,12	0,50	1,40	0,008	0,002	0,04	0,05	0,013	0,002

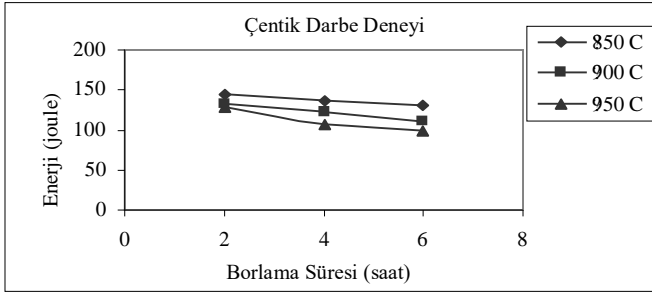
2.2. Borlama İşlemi

Numunelere katı ortamda kutu sementasyonu ile borlama işlemi yapılmıştır. Çeliğin borlanması bor karbürün (B4C) bor kaynağı olarak kullanılması yaygın bir uygulamadır [4],[5],[31]-[33]. Bu durum çeliğin karbürlenmesine yol açmaz. Ancak, borlama yapılırken üst katmanlardaki karbon, bor tarafından iç kısımlara itilir. Numunelerin borlama işlemi 1200 oC sıcaklık kapasiteli ± 5 oC hassasiyetli mikro işlem

kontrollü, elektrik rezistanslı, dijital göstergeli 200x150x250 mm kapasiteli fırında gerçekleştirilmiştir. Kutu borlama işleminde borlanacak tüm numuneler toz karışım içerisine yüzeylerden 10 mm'den az olmayacak şekilde yerleştirilmiş ve paslanmaz çelik kap içerisine kapatılmıştır. Borlama ısıl işlemi normal atmosfer basıncında 850 oC, 900 oC, 950 oC sıcaklıkta, 2, 4 ve 6 saat sürelerde yüksek borlama potansiyeline sahip Ekabor-II ile yapılmış, borlama esnasında oksijen ortamından korumak için argon gazı kullanılmıştır ve ardından havada soğutulmuştur.

2.3. Mekanik Testler ve Özelliklerinin Tespiti

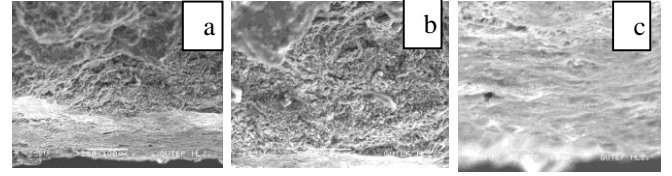
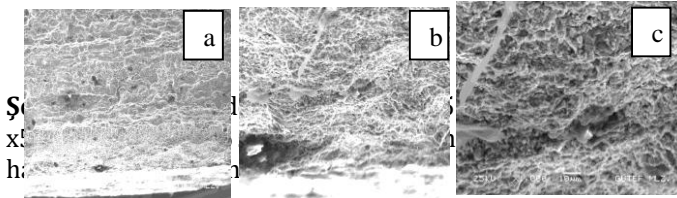
Borlanmış ve borlanmamış numunelerin çentik darbe deneyleri normal oda sıcaklıklarında Instron Wolpet PW30 Çentik Darbe Cihazı ile gerçekleştirilmiştir. 850 OC , 900 OC , 950 OC'de 2, 4 ve 6 saat sürelerdeki numunelerden her birinden üçer tane hazırlanmıştır. Bu üç numunenin ortalama değerleri alınarak darbe deneyi grafiği elde edilmiştir.



Şekil 1. Hardox 400 çentik darbe deneyi sonuçları.

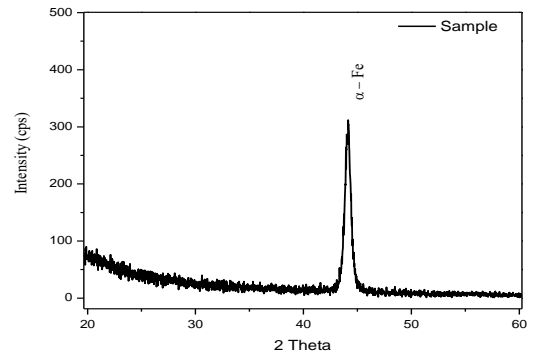
İşlemsiz Hardox 400'ün darbe direnci 149,5 Joule olarak bulunmuştur. Şekil 1'de de görüldüğü gibi her bir işlem süresi için 950 oC sıcaklıkta borlanan Hardox 400 çeliğinin yüzeyinde oluşan borürlerin kırılma dayanımının 850 oC sıcaklıkta borlanan Hardox 400 çeliğinin yüzeyinde oluşan borürlerin kırılma dayanımından düşük olduğu gözlemlenmiştir. Borlama süresinin artmasının numunelerin kırılma dayanımı üzerinde olumsuz etkisi olduğu söylenebilir. Süre arttıkça kırılma dayanımı azalmaktadır.

Borlamanın en büyük etkisi sertlik üzerine olup, ana malzeme cinsine ve yüzeyde oluşacak FeB ve Fe2B fazlarına bağlıdır. FeB fazı, Fe2B fazından daha sert ve gevrek [2],[3],[23]. Şekil 2-3'de görüldüğü gibi borlama sıcaklığı ve süresine bağlı olarak, kırılma tokluğu değerlerinin düşmesi muhtemelen daha gevrek karaktere sahip olan FeB fazının oluşumunun artması ve FeB-Fe2B ara yüzeyinde her iki fazın farklı özelliklere sahip olmasından kaynaklanmaktadır.

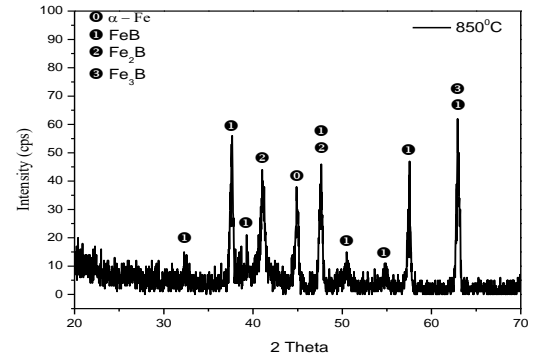


Şekil 3. a) 950 oC' de 6 saat x250 b) 950 oC' de 6 saat x500 c) 950 oC' de 6 saat x1000 büyütmede borlanmış hardox 400 çeliğinin SEM görüntüleri.

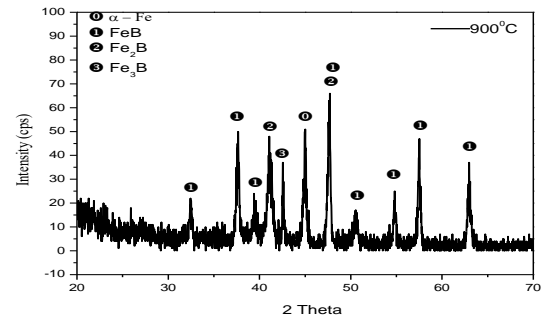
Borlanmamış ve borlanmış numuneler x-ışını kırınım analizi ile incelenmiştir (XRD). Test malzemelerinin yüzeylerinde oluşan borürler FeB-Fe2B ve Fe3B x-ışını kırınım cihazı ile Şekil 4-7'te görüldüğü gibi elde edilmiştir.



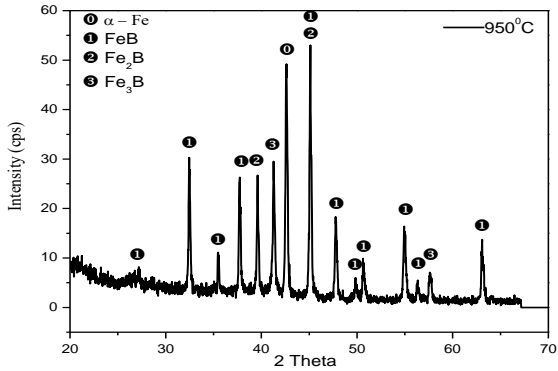
Şekil 4. İşlemsiz numunenin x-ray analizi.



Şekil 5. 850 oC'de 6 saat borlanmış numunenin x-ray analizi.



Şekil 6. 900 oC'de 6 saat borlanmış numunenin x-ray analizi.



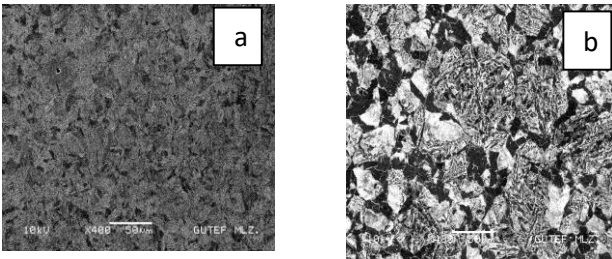
Şekil 7. 950 oC'de 6 saat borlanmış numunenin x-ray analizi.

Şekil 4 incelendiğinde borlanmamış Hardox 400 çelik numunenin α -Fe olduğu analiz sonuçlarından anlaşılmaktadır. Şekil 5,6,7 incelendiğinde borlanmış numunelerin yüzeylerinde FeB-Fe₂B ve Fe₃B borürlerin oluştuğu, fazla borlama süresinin ve yüksek sıcaklığın FeB'nin fazla oluşmasına neden olduğu x-ışını kırınım analiziyle görülmüştür.

3. Bulgular ve Değerlendirme

3.1. Mikro yapı

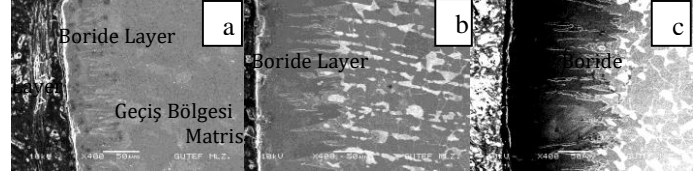
Deneyde kullanılan numuneler sırasıyla 200, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 grit abrasiv kağıtlar ile işlem yapıldıktan sonra 3 μ m'lik elmas pasta ile yüzeyler parlatılmış ve %2 nital çözeltisinde dağlanmıştır. İşlemsiz (Şekil 8-a) HARDOX 400 plakalarının SEM fotoğrafında görüldüğü gibi numune homojen bir yapıya sahip olup istenilen düzeyde tam olarak sertleştirilmiştir. 950 oC de 6 saat borlanmış numunenin orta kısımdaki bir noktadan çekilmiş SEM görüntüsü incelendiğinde (Şekil 8-b) tane büyümesinin olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni, bu bölgedeki sıcaklığın rekristalizasyon sıcaklığına ulaşması sonucu atomların yeniden düzenlenmesi ile açıklanabilir.



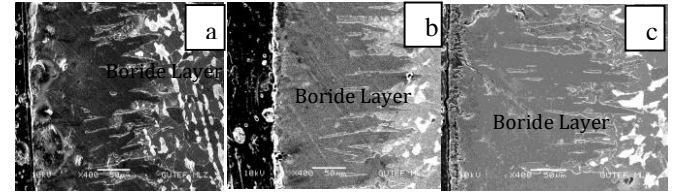
Şekil 8. (a) İşlemsiz hardox 400 çeliğinin mikro yapısı x400, (b) 950 oC 6 saat borlanmış numunenin ortadan çekilmiş mikroyapısı x400.

Borlanmış çeliklerin kesit yüzeyleri JEOL JSM-6060 LV Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) cihazı ile

incelenmiştir. SEM incelemelerinde borlanmış çeliklerin yüzeylerindeki borürlerin düzgün dallı bir morfolojiye sahip oldukları görülmüştür. Bor katmanlarının kalınlığının borlama süresine ve sıcaklığa bağlı olarak arttığı görülmüştür [18],[19]. Şekil 9-10.

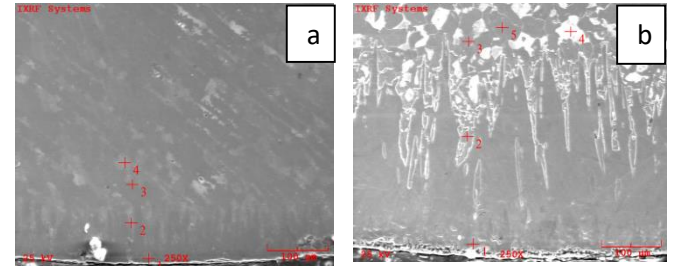


Şekil 9. (a) 850 oC'de 2saat (b) 900 oC'de 2 saat (c) 950 oC'de 2 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin x400 büyütmede SEM görüntüsü.

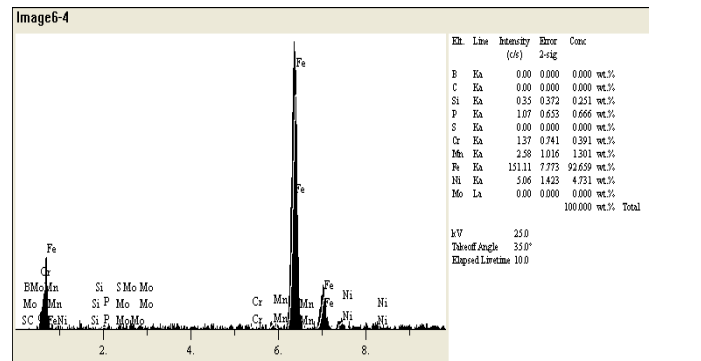
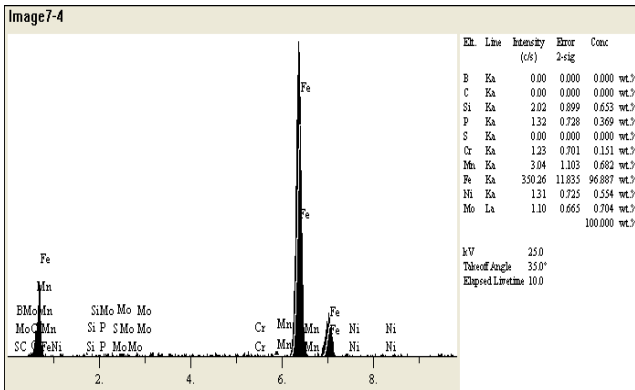
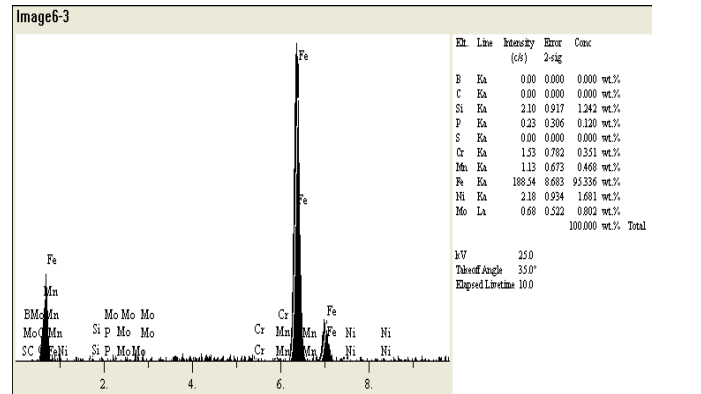
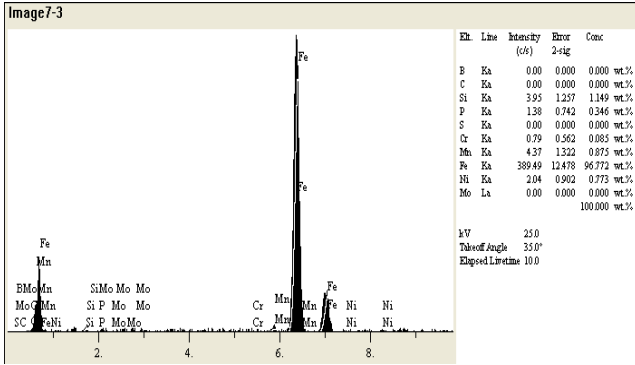
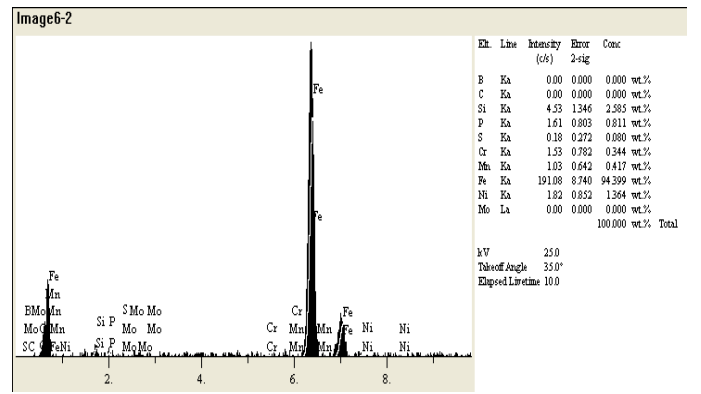
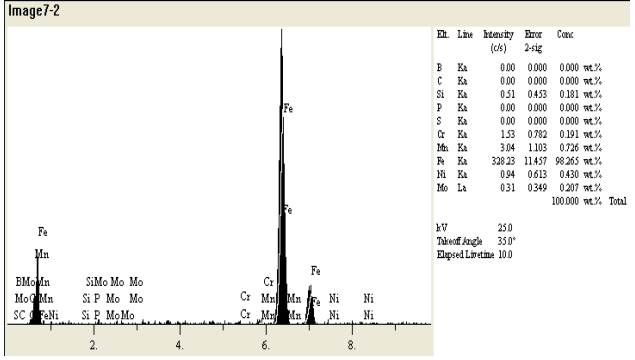
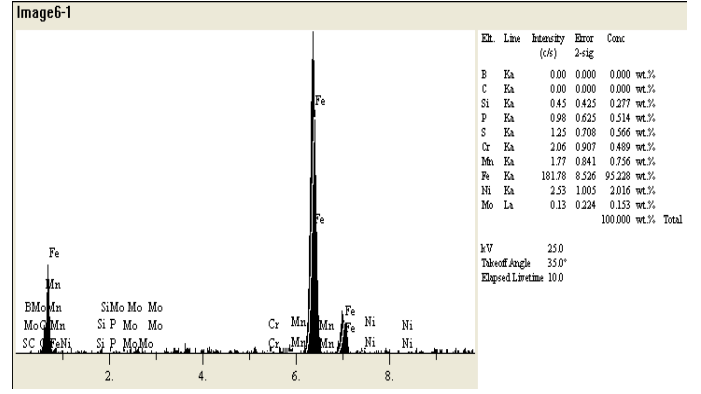
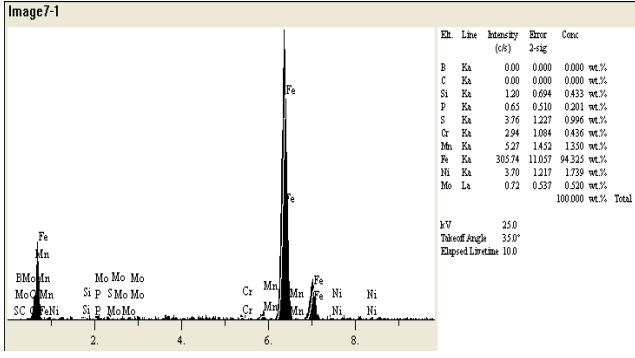


Şekil 10. (a) 850 oC'de 6saat (b) 900 oC'de 6 saat (c) 950 oC'de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin x400 büyütmede SEM görüntüsü.

Borlanmış yüzeyde üç farklı bölge gözlenmiştir. Bunlar (i) FeB ve Fe₂B borürleri içeren katman, (ii) Borür katmanının altında kalan ve borun çelik ile katı hal çözeltisi yaptığı, borürlerden düşük sertliğe sahip olup ana metalden daha yüksek sertlik sergileyen difüzyon bölgesi, (iii) bor'dan etkilenmeyen matris şeklindedir [10]. Alaşım elementlerinin dağılımı en üst yüzey katmanından itibaren EDS spektrumu ile belirlenmiştir. Şekil 11-13.



Şekil 11. (a) 850 oC'de 2 saat (b) 950 oC'de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin EDS yapılmış noktaların x250 büyütmede SEM görüntüsü.



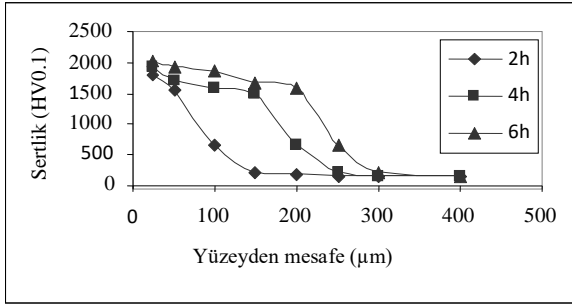
Şekil 12. 850 °C' de 2 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin mikroyapısının EDS yapılmış noktaların x250 büyütmede SEM görüntüsü.

Şekil 13. 950 °C' de 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin mikroyapısının EDS yapılmış noktaların x250 büyütmede SEM görüntüsü.

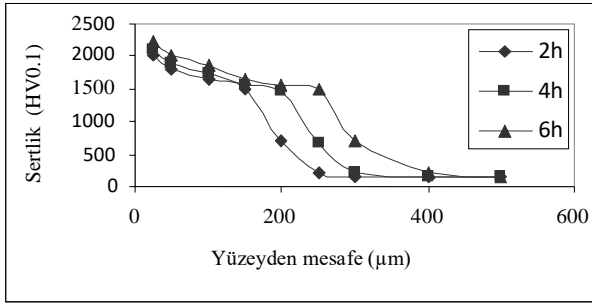
Şekil 12 ve 13'te Borlama işlemi sonucunda oluşan borür katmanlarında, yapılan x-ışını spektroskopisi (EDS) analizlerinde FeB-Fe2B ve Fe3B fazlarının oluştuğu görülmüştür.

3.2. Sertlik ve Borür Katmanı

Borlanmış Hardox 400 çeliğinin yüzeyinde oluşan borürlerin sertlikleri ana malzemenin sertliğinden çok daha yüksektir. Bunun sebebinin XRD ile teyit edildiği üzere (Şekil 4-7) FeB ve Fe₂B'nin varlığından olduğu görülmüştür. Sertlik değerleri Vickers sertlik ölçüm cihazında 100 g yük uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Borlanmamış Hardox 400 çeliğinin sertliği 470 HVN0.1 ölçülürken, borür katmanı sertlik değeri 2200 HVN olmuştur. Şekil 14-15



Şekil 14. 850 °C'de 2, 4 ve 6 saat borlanmış numunelerin mikro sertlikleri.

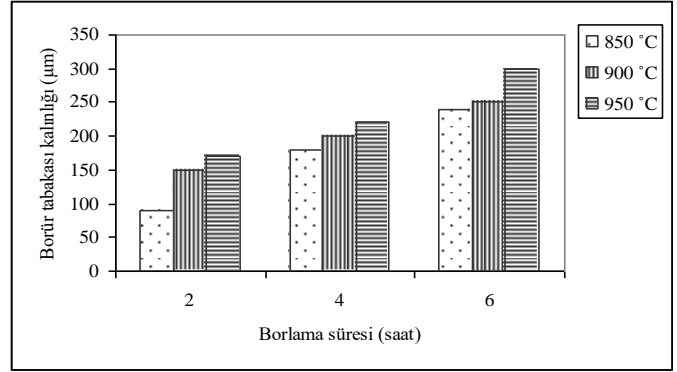


Şekil 15. 950 °C'de 2, 4 ve 6 saat borlanmış numunelerin mikro sertlikleri.

Sertlik grafiklerinden de görüleceği gibi borürlerin sertliği matrisin sertliğinden oldukça yüksektir. Sertliğin matrise doğru gittikçe düştüğü görülmektedir [34]. Bunun nedeninin matriste sıcaklık ve süreye bağlı olarak tane büyümesinin olduğu ve borlamanın etkisinin giderek azaldığının neden olduğu söylenebilir. Sertlik dağılım diyagramında üç bölge vardır ve bunlar (i) borürlerden müteşekkil borürler, (ii) bor bakımından zengin geçiş bölümü, (iii) matris şeklindedir [10].

Borlama işlemi ısıl kimyasal bir difüzyon işlemi olduğundan, borür katman kalınlığı hem sıcaklık hem de zamana bağlı olarak artacaktır [7],[10]. Sıcaklığın artırılması ile borür katman kalınlığı artmıştır. Diğer yandan, borlama süresini artırmak sureti ile borür katmanı kalınlığı artış göstermiştir. 850 °C'de 2 saat borlanan numunenin borür katman kalınlığı 80 µm iken, 950 °C'de 6 saat borlanan numunenin borür katman kalınlığı 300 µm olarak ölçülmüştür. Şekil 9,10,16'da görüldüğü gibi borür katmanının kalınlığı işlem sıcaklığına, ana malzemenin kimyasal kompozisyonuna ve borlama süresine bağlıdır. İşlem

süresi ile katman kalınlığı arasında neredeyse parabolik bir ilişki vardır.



Şekil 16. 850 °C, 900 °C, 950 °C'de 2, 4 ve 6 saat borlanmış Hardox 400 çeliğinin borür katman kalınlıklarının karşılaştırılması.

4. Değerlendirme

Bu çalışmada Hardox 400 çeliğinin farklı sıcaklık ve sürelerde borlanması suretiyle elde edilen numunelerin mekaniksel özellikleri incelenmiş ve aşağıda belirtilen bulgulara ulaşılmıştır.

Borlama işlemi sonucunda oluşan borür katmanlarında, yapılan x-ışını spektroskopisi (EDS) analizlerinde FeB-Fe₂B ve Fe₃B fazlarının olduğu görülmüştür.

Farklı süre (2,4,6 saat) ve sıcaklıklarda gerçekleştirilen borlama işlemlerinde oluşan borür katmanlarının testere dişi şeklinde ve yükseklikleri değişen dallantılara sahip olduğu gözlemlenmiştir. Isıl işlem süresi ile katman kalınlığının arttığı ve borür katmanının kalınlığının zamana ve sıcaklığa bağlı olarak (850°C, 900°C ve 950°C) 80 µm'den 300 µm ye ulaştığı görülmüştür.

Aşınmaya dayanıklı Hardox 400 çeliğinin yüzeylerinde oluşan borürlerin mikro sertliği ana malzemenin matrisinin sertliğinden çok daha yüksektir. Borür katmanında mikro sertlik değerinin 2200 HVN olmasına rağmen, matrisin mikro sertlik değerinin 170 HVN değerinde olduğu görülmüştür.

950 °C sıcaklıkta borlanan Hardox 400 çeliğinin yüzeyinde oluşan borürlerin kırılma dayanımının 850 °C sıcaklıkta borlanan numune yüzeyinde oluşan borürlerin kırılma dayanımından düşük olduğu gözlemlenmiştir. Borlama süresinin artmasının numunelerin kırılma dayanımı üzerinde olumsuz etkisi olduğu ve borlama süresinin artması ile kırılma dayanımının azaldığı görülmüştür.

Bilindiği gibi sertlik arttıkça kırılma dayanımı düşer yapılan deneysel incelemelerde 850°C sıcaklıkta borlanan çeliğin yüzeyinde oluşan borürlerin kırılma

dayancının 950oC sıcaklıkta borlanan çeliğin kırılma dayancından daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

Borlama işlemine müteakip, taramalı elektron mikroskobu incelemelerinde borür katmanı altında sıcaklığın etkisi ile çeliğin ana mikroyapısında tane boyutlarında büyüme olduğu görülmüştür. Bu durum, bu bölgedeki sıcaklığın rekristalizasyon sıcaklığına ulaşması sonucu atomların yeniden düzenlenmesi ile açıklanabilir.

950oC sıcaklıkta ve 6 saat sürede borlanan çeliğin bor katmanı kalınlığının 300 µm olurken 850oC'de 225 µm ve 900oC'de 250 µm olduğu belirlenmiştir. Isıl işlem süresi ve sıcaklık artışı ile borür katman kalınlığı arasında parabolik bir ilişkinin olduğu tespit edilmiştir.

Kaynakça

- [1] H. Buglacki., M. Smajdor, "Mechanical properties of abrasion-resistant Hardox 400 steel and their welded joints", *Advances in Materials Since*, December, 4:2(4), 67-71 (2003)
- [2] B. Venkataraman, G. Sundararajan, "The high speed sliding wear behaviour of boronized medium carbon steel", *Surface and Coat. Technol.* 73 (1995) 177-184.
- [3] T.S. Eyre, "Effect of Boronising on friction and wear of ferrous metals", *Wear* 34 (1975) 383-397.
- [4] K.H. Habig, R. Chatterjee-Fischert, "Wear behaviour of boride layers alloyed steels", *Tribology International*, August 1981 209-215.
- [5] J. Subrahmanyam, K. Gopinath, "Wear studies on boronized mild steel", *Wear* 95 (1984) 287-292.
- [6] C. Martini, G. Palombarini, G. Poli, D. Prandstraller, "Sliding and abrasive wear behaviour of boride coatings", *Wear* 256 (2004) 608-613.
- [7] M.A. Bejar, E. Moreno, "Abrasive wear resistance of boronized carbon and low-alloy steels", *Journal Of Materials Processing Technol.* 173 (2006) 352-358.
- [8] C. Badini, C. Gianoglio, G. Pradelli, "The effect of carbon, chromium and nickel on the hardness of boride layers", *Surface and Coat. Technol.* 30 (1987) 157-170.
- [9] B. Selçuk, R. İpek, M.B. Karamış, "A study on friction and wear behaviour of carburised, carbonitrided and borided AISI 1020 and 5115 steels", *J. Mater. Process. Technol.* 141 (2003) 189-196.
- [10] M. Tabur, M. İzciler, F. Gul, I. Karacan., "Abrasive wear behavior of boronized AISI 8620 steel", *Vol. 266, Pg. 1106-1112, Wear*, 2009.
- [11] Vipin Jain, G. Sundararajan, "Influence of the pack thickness of the boronizing mixture on the boriding of steel", *Surface and Coat. Technol.* 149 (2002) 21-26.
- [12] İ.Özbek, S. Şen, M. İpek, C. Bindal, S Zeytin, A.H. Üçışık, "A Mechanical aspect of borides formed on the AISI 440C stainless-steel", *Vacuum* 73 (2004) 641-648.
- [13] Sang Yul Lee, Gwang Seok Kim, Bum-Suk Kim, "Mechanical properties of duplex layer formed on AISI 403 stainless steel by chromizing and boronizing treatment", *Surface and Coat. Technol.* 177-178 (2004) 178-184.
- [14] İ. Çelikyürek, B. Baksan, O. Torun, R. Gürler, "Boronizing of iron aluminate Fe₂Al₂O₃", *Intermetallics* 14 (2006) 136-141.
- [15] N.E. Maragoudakis, G. Stergioudis, H. Omar, E. Pavlidou, D.N. Tsipas, "Boro-nitriding of steel US 37-1", *Materials Letters* 57 (2002) 949-952.
- [16] S.C.Singhal, "A hard diffusion boride coating for ferrous materials", *Thin Solid Films* 45 (1977) 321-329.
- [17] P.X. Yan, Z.Q. Wei, X.L. Wen, Z.G. Wu, J.W. Xu, W.M. Liu, J. Tian, Post boronizing ion implantation of C45 steel, *Applied Surface Science* 195 (2002) 74-79.
- [18] O. Ozdemir, M. Usta, C. Bindal, A.H. Ucişik, Hard iron boride (Fe₂B) on 99.97 wt % pure iron, *Vacuum* 80 (2006) 1391-1395.
- [19] İ. Özbek, C. Bindal, Mechanical properties of boronized AISI W4 steel, *Surface and Coat. Technol.* 154 (2002) 14-20.
- [20] İ. Uslu, H. Cömert, M. İpek, O. Özdemir, C. Bindal, "Evaluation of borides formed on AISI P20 steel" *Materials and Desing*, (2005).
- [21] V.I. Dybkov, W. Lengauer, K. Barmak, Formation of boride layers at the Fe-10% Cr alloy-boron interface, *Journal of Alloys and Compounds* 398 (2005) 113-122.
- [22] A. Galibois, O. Boutenko, B. Voyzelle, Mecanisme de formation des couches borurees sur les aciers a haut carbone technique des pates, *Acta Metall.* 28 (1980) 1753.
- [23] C. Meriç, S. Şahin, B. Backir, N.S. Köksal, Investigation of the boronizing effect on the

abrasive wear behaviour in cast irons. *Materials and Design* 27 (2006) 751-757.

- [24] S.Şen, I. Özbek, U. Şen, C. Bindal, Mechanical behavior of borides formed on borided cold work tool steel, *Surface and Coat. Technol.* 135 (2001) 173-177.
- [25] O. Allaoui, N. Bouaouadja, G. Saindeman, "Characterization of boronized layers on a XC38 steel" *Surface & Coatings Technology* 201 (2006) 3475-3482.
- [26] H. Sert, A. Can, H. Arıkan, B. Selçuk, H. Toprak, "Wear behavior of different surface treated cam spindles", *Wear* 260 (2006) 1013-1019.
- [27] T. Makishi, K. Nakata, Surface hardening of nickel alloys by means of plazma nitriding, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Volume 35A January 2004-227.
- [28] Sang Yul Lee, Gwang Seok Kim, Bum-Suk Kim, "Mechanical properties of duplex layer formed on AISI 403 stainless steel by chromizing and boronizing treatment" *Surface and Coat. Technol.* 177-178 (2004) 178-184.
- [29] B. Selçuk, R. İpek, M.B. Karamış, V. Kuzucu, An investigation on surface properties of treated low carbon and alloyed steel (boriding and carburizing), *J. Mater. Process. Technol.* 103 (2000) 310-317.
- [30] Henryk Buglacki, Monika Smajdor, "Mechanical properties of abrasion-resistant hardox 400 steel and their welded joints", *Advances in Materials Science*, Vol. 4, No. 2 (4), December 2003.
- [31] B.S.Mann, "Boronizing of cast martensitic chromium nickel stainless steel and its abrasion and cavitation-erosion behaviour" *Wear* 208 (1997) 125-131.
- [32] O. Knotek, E. Lugscheider, K. Louschen, "Surface layers on cobalt base alloys by boron diffusion", *Thin Solid Films* 45 (1977) 331-339.
- [33] R.H. Biddulph, "Boronising for erosion resistance", *Thin Solid Films* 45 (1977) 341-347.
- [34] M. İzciler, M. Tabur "Abrasive Wear behaviour of 8620 Different Case Depth Gas Carburized Gear Steel" Vol 260-1,2, Pg. 90-98, 2006, *Wear*