



Yerli Borlama Ajanı ile Yüzeyi Sertleştirilen AISI 1020 Çeliğinin İç Yapı ve Sertlik Davranışlarının İncelenmesi

Investigation of Microstructure and Hardness Behaviors of AISI 1020 Steel Surface Hardened with Local Boronizing Agent

Büyüamin Yamanel¹ , Osman Bican^{1*} , S. Uğur Bayça² 

¹Kırıkkale Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 71450 Kırıkkale, TÜRKİYE

²Kırıkkale Üniversitesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 71450 Kırıkkale, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 13/09/2022

Kabul / Accepted: 05/10/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2023

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2023

Öz

Bu çalışmada AISI 1020 çeliği 950 °C sıcaklıkta Baybora-2 borlama ajanı kullanılarak 2, 4 ve 6 saat sürelerde kutu borlama işlemine tabi tutulmuştur. Deney numunelerinin içyapıları optik mikroskop kullanılarak incelenmiştir. Borlama neticesinde yüzeyde oluşan borür tabakasının kalınlık ve sertliği Mikrovickers sertlik ölçme cihazı yardımıyla tespit edilmiştir. AISI 1020 çeliğinin içyapısının ferrit ve perlit yapılarından oluştuğu tespit edilmiştir. Bor tabakasının kalınlığının artan borlama süresi ile arttığı belirlenmiştir. Yapılan borlama işlemi neticesinde sertlik değerlerinde yaklaşık 13 katlık bir artış meydana gelmiştir. Yapılan deneyler sonucunda en yüksek sertlik değerleri 4 saatlik borlama neticesinde 2224 HV0,05 olarak ölçülmüştür. Ayrıca en fazla borür tabakası kalınlığı 6 saatlik borlama neticesinde 196,3µm olarak ölçülmüştür.

Anahtar Kelimeler

“AISI 1020, Borlama, Sertlik, İç Yapı, Optik”

Abstract

In this study, AISI 1020 steel was subjected to solid boronizing process at 950 °C using local Baybora -2 boronizing powder for 2, 4 and 6 hours. The internal structures of the samples were examined using an optical microscope. The thickness and hardness values of the boron layers formed on the surface as a result of boriding were determined by using Mikrovickers hardness measuring device. It has been determined that the internal structure of AISI 1020 steel consists of ferrite and pearlite structures. It was determined that the thickness of the boron layer increased with increasing boriding time. As a result of the applied boriding process, an increase of approximately 13 times has occurred in the hardness values. As a result of the experiments, the highest hardness values were measured as 2224 Hv0.05 after 4 hours of boriding. In addition, the largest boride layer was measured as 196.3µm after 6 hours of boriding.

Key Words

“AISI 1020, Boronizing, Hardness, Internal structure, Optical”

1.GİRİŞ

Makine parçalarında korozyon ve aşınmaya bağlı olarak önemli kayıplar meydana gelmektedir. Bu kayıpları engellemenin yolu malzeme yüzeylerinin iyileştirilmesidir. Yüzey işlemleri malzemelerin tribolojik özellikleri, oksidasyon, korozyon direnci ve yüksek sertlik kazanımıyla aşınmaya karşı korunmasında önemlidir (Castillejo FE vd. 2014). Sementasyon (Yada K vd. 2013) nitrürleme (Almeida EAS vd. 2015; Kumar A vd. 2014) ve borlama (Campos I vd. 2007; Piasecki A vd. 2016) yüzey iyileştirmek için en çok kullanılan yöntemlerdir. Bu yöntemlerden biri de borlama işlemidir (Meriç vd. 2006). Borlama işlemi borun yüksek sıcaklıkta malzeme yüzeyine difüzyonu şeklinde gerçekleşen termokimyasal bir yüzey kaplama işlemidir. Borlama yöntemleri içerisinde daha çok tercih edilen yöntem maliyet ve ekipman kolaylığı nedeniyle kutu borlamadır (Atik vd.2003; Özbek vd.2004; Bejar ve Moreno 2006; Çelikyürek vd. 2006; Ozdemir vd. 2009). Kutu borlama ile yüzey sertleştirme endüstride oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Atik vd. 2003).

Borlama işleminde diğer sertleştirme yöntemlerinden sementasyon ve nitrürlemeye oranla daha yüksek sertlik elde edilir (Baştürk vd. 2006). Borlama ile ilgili yapılan bir çalışmada sertlik değerinin 2000HV' ye kadar çıktığı görülmüştür (Çelikyürek vd. 2006). Borlama ile yüksek aşınma ve korozyon direnci sağlanır. Karmaşık şekilli parçalara uygulanması ve elde edilen yüksek sertlik nedeniyle malzeme ömrünü artırır. Birçok malzeme çeşidine; demir ihtiva eden malzemelere, demir içermeyen malzemelere uygulanabilir. Genellikle 850-1050°C sıcaklıklarda ve 1-12 saat süreyle uygulanabilir (Sinha vd. 1991). Borlama işlemi neticesinde malzeme yüzeyinde oluşan borür tabakası malzemenin aşınma davranışını iyileştirir (Maragoudakis vd. 2002). Yüzeyde oluşan bu borür tabakasının özellikleri çok yüksek sertlik değerlerine (1400-5000°C) ve ergime noktasına (1450-1550°C) sahip olmasıdır (Sinha vd. 1991; Maragoudakis vd.2002). Borlama işlemi difüzyon mekanizmasına bağlı bir işlem olduğu için sıcaklıkla beraber yüzeyde oluşan borür fazları büyümektedir. Borlama neticesinde yüzeyde bor içeren tabaka meydana gelir. Ortaya çıkan bu tabaka içinde ya Fe₂B ya da Fe₂B+FeB fazları birlikte bulunabilir. Yapıda FeB fazı gevrek ve iç gerilmelere sebep olduğu için istenmemektedir (Selçuk vd,1995). FeB ve Fe₂B fazları basma ve çekme gerilmeleri uyguladığı için malzeme yüzeyinde çatlaklara sebep olmaktadır. Bu nedenle tek faz Fe₂B yapısı istenmektedir (Özbek, 1999;Karamış vd.1995). Borlama işlemi için kullanılan malzemenin yapısına bağlı olarak sertlik değeri değişebilir (Göy,1984; Reddy A. V., 2004). Düşük alaşıma sahip çelikler uygun maliyetleri, kolay bulunabilmeleri ve çok yönlü kullanımlarından dolayı büyük öneme sahiptir. Yüksek alaşımlı çelikler içerdikleri alaşımlar nedeniyle bu çeliklere oranla pahalıdır. Yüzey işlemleri sayesinde düşük alaşımlı çeliklerin yüzeyleri iyileştirilebilir (Beliardouh NE vd. 2014).

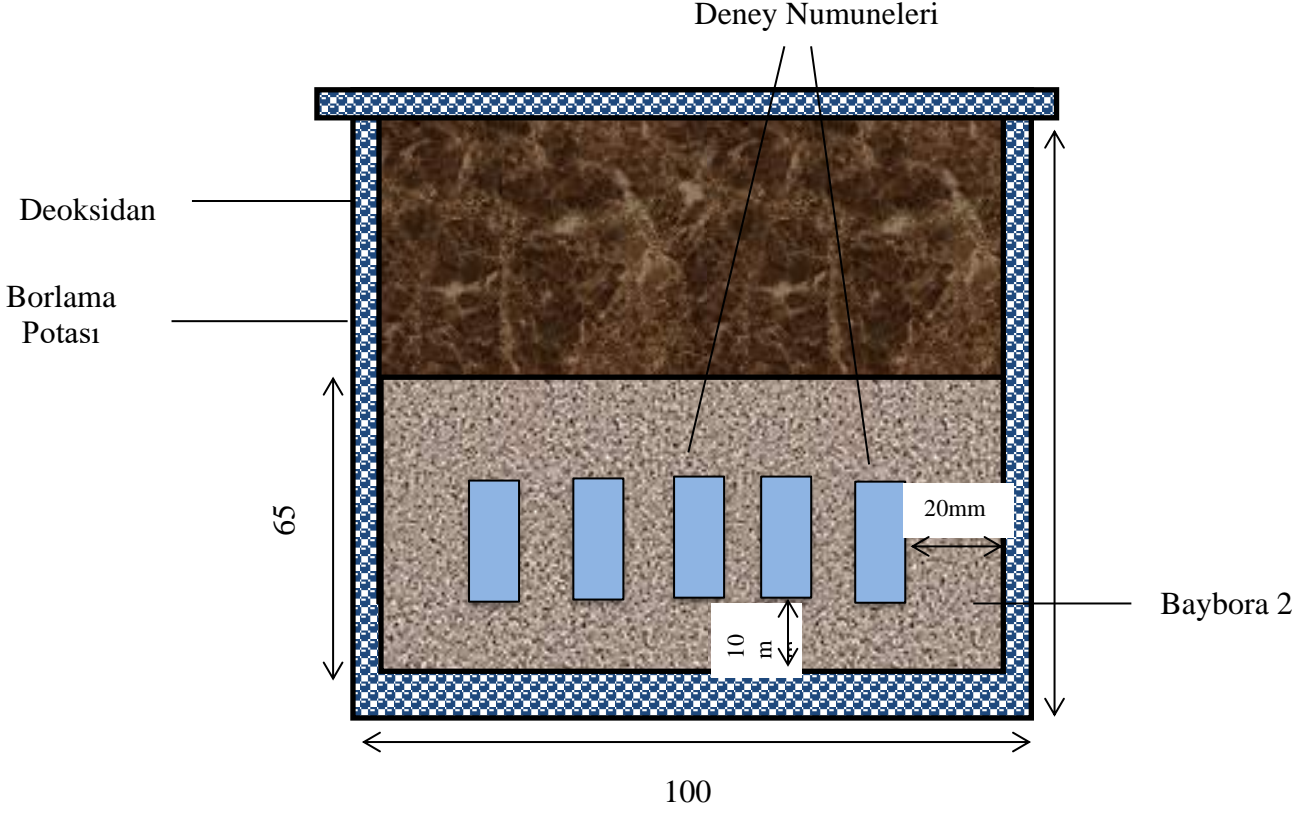
Bu çalışmada sertleştirilmemiş büyük kesitli takım tezgâhları ana milleri, orta sertlikte ve aşınmaya dayanıklı dişlilerde, sertleştirilmiş pimler ve zincirler başta olmak üzere piyasada çok yaygın olarak kullanılan AISI 1020 çeliği tercih edilmiştir. AISI 1020 çeliğine farklı sürelerde yerli borlama tozu kullanılarak katı borlama işlemi uygulanmış ve çeliğin yapısal ve mekanik özellikleri araştırılmıştır.

2.DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1.Kimyasal bileşim ve İyapı İncelemesi

Öncelikli olarak deney aşamalarında kullanılmak üzere piyasadaki AISI 1020 çeliği numuneler temin edilmiştir. Üniversal torna tezgahı yardımıyla silindirik şeklindeki numuneler $\phi 14 \times 20$ mm olacak şekilde işlenmiştir. Deney aşamaları için hazır hale getirilen numunelerin kimyasal bileşimini belirlemek için optik emisyon argon spektrometresi kullanılmıştır. Katı borlama işlemi 950°C sıcaklıkta ve 2, 4 ve 6 saatlik üç farklı sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Katı borlama prosesi için Şekil 1 de şematik resmi verilen paslanmaz çelikten imal edilen pota kullanılmıştır. Bu çalışmada, yerli ve patentli Baybora-2 (Bayça, 2020) borlama tozu kullanılmıştır.

Borlama deneyinde, 6 adet deney numunesi 400 gr Baybora-2 tozu ile kapatılmıştır. Pota içerisinde kalan kısım ekrit malzeme ile doldurularak potanın ağız sıkı şekilde kapatılmıştır. 4,3 kW güce sahip bir ısıtma işlemi fırını kullanılarak katı borlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Fırın sıcaklığı 950 °C sıcaklığa ulaştıktan sonra 2, 4 ve 6 saat sürelerde beklenerek borlama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Borlama işlemi tamamlandıktan sonra borlama potası ısıtma fırınından çıkartılarak durgun havada soğumaya bırakılmıştır. Soğuyan pota içerisinden numunelere Tablo 1 de gösterilen kodlar verilmiştir. Deney numuneleri kesme cihazı yardımıyla kesilmiş ve bakalit alma cihazı yardımıyla bakalite alınmıştır. Sonrasında numuneler sırayla 240, 400, 600, 800 ve 1000 mesh aşındırıcı kağıtlar ile zımparalanmıştır. Yüzey parlatma işlemi 9 µm,6 µm,3 µm ve 1 µm luk solüsyonlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Dağlama işlemi % 2'lik nital çözeltisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Dağlama sonrasında numuneler etil alkol yardımıyla temizlenip Nikon Eclipse MA 100 Markalı mikroskop kullanılarak iyapı incelemeleri yapılmıştır.



Şekil 1. Borlama Potası

Tablo 1. Borlama grubu

NUMUNE KODU	MALZEME	İŞLEM SICAKLIĞI(°C)	İŞLEM SÜRESİ(Saat)
B-2		950	2
B-4	AISI 1020	950	4
B-6		950	6

2.2.Mekanik Testler

950°C sıcaklıkta 2, 4 ve 6 saat sürelerde kutu borlama işlemine tabi tutulmuş AISI 1020 çeliğinin sertlik ölçümleri yüzey altı boyunca incelenmiştir. Sertlik ölçümlerinde K.Ü Mühendislik – Mimarlık fakültesi metalografi laboratuvarında bulunan Durometria markalı sertlik ölçme cihazı kullanılmıştır. Ölçümler en dış kısımdan başlayarak 50 µm'lik aralıklarla 50 gr yük altında uygulanmıştır. Her bir deney numunesi için 5 ölçüm yapıp ortalamaları alınmıştır.

3. Sonuçlar ve Tartışma

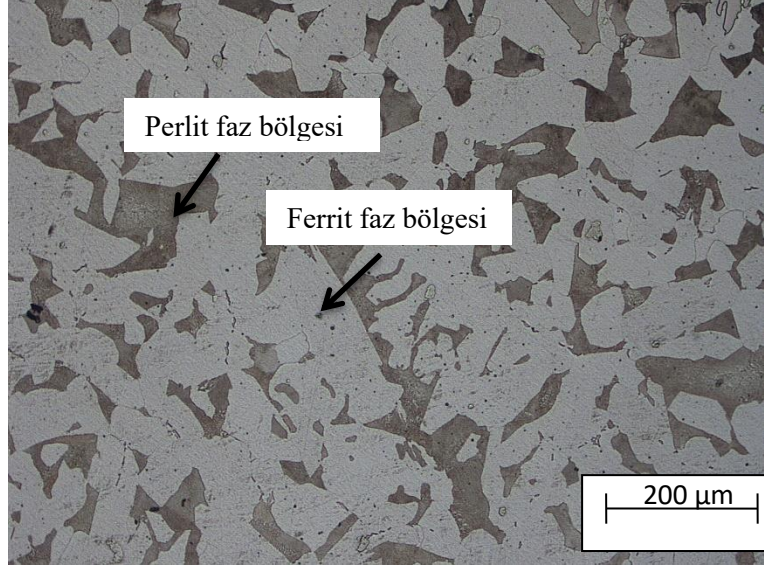
Tablo 2' de deneylerde kullanılan AISI 1020 çeliğinin kimyasal bileşim verilmiştir. AISI 1020 çeliğinin kimyasal bileşimi deney aşamalarından önce argon optik emisyon spektrometresi kullanılarak belirlenmiştir.

Tablo 2. AISI 1020 Çeliğine Ait Kimyasal Bileşim

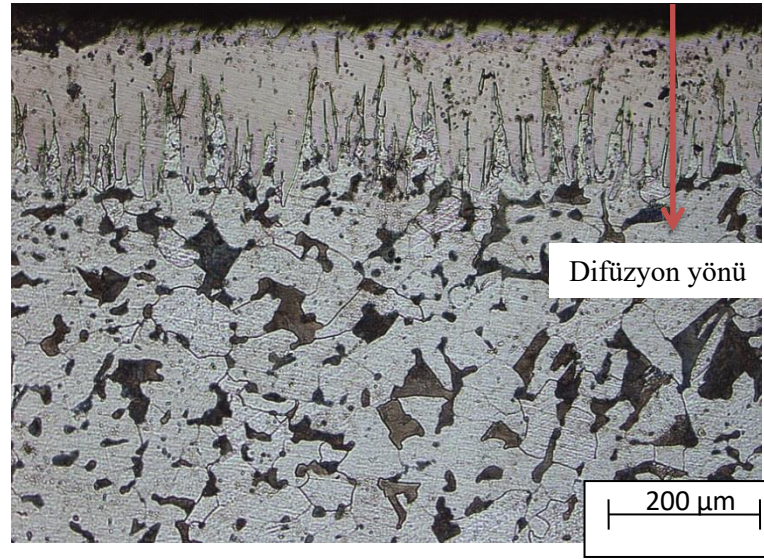
%C	%Mn	%P	%S	%Si	%Cr	%Fe
0,215	0,45	0,045	0,045	0,4	-	98,845

3.1. İç Yapı İncelemeleri

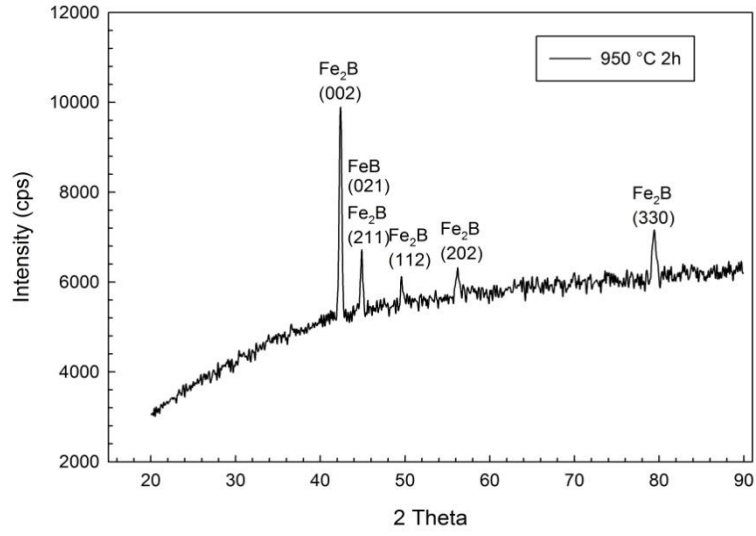
Borlama işlemine tabi tutulmamış dökülmüş durumda bulunan AISI 1020 çeliğine ait içyapı görüntüsü optik mikroskop kullanılarak elde edilmiştir. İçyapının perlit ve ferrit faz bölgelerinden oluştuğu belirlenmiştir.



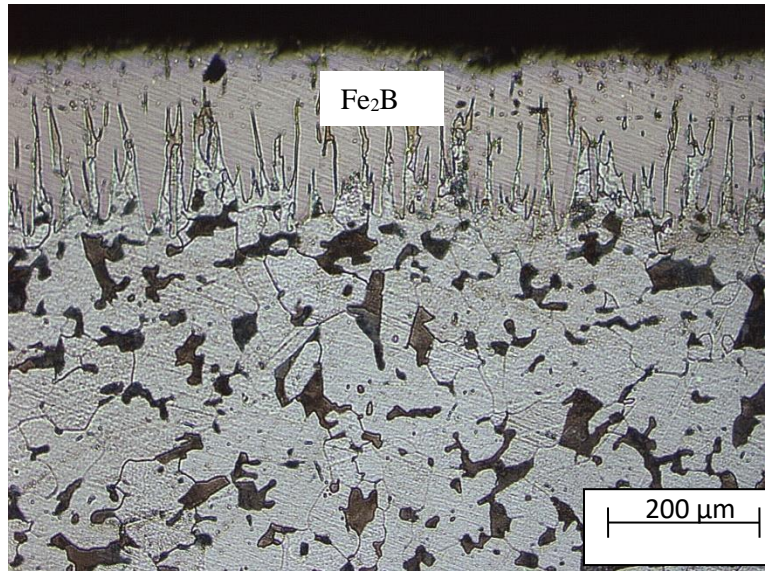
Şekil 2. İşlem görmemiş AISI 1020 çeliğinin optik görüntüsü



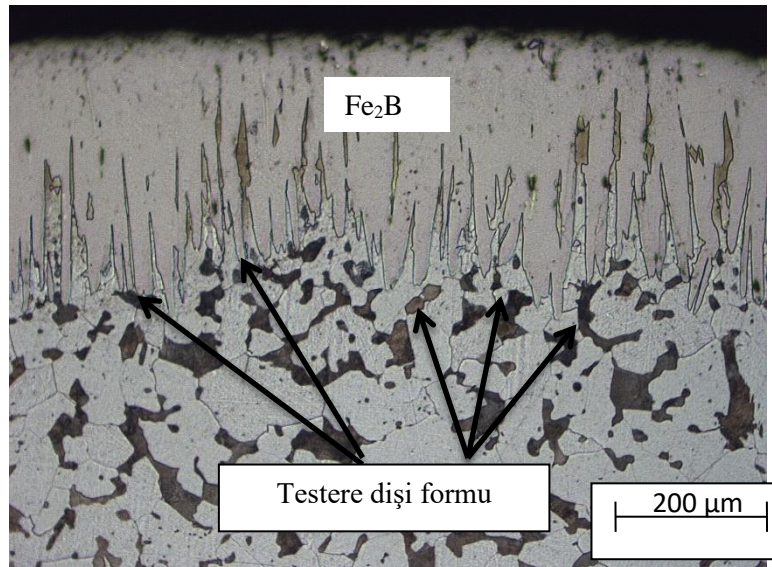
Şekil 3a. B2 Numunesine Ait Optik Görüntü



Şekil 3b. B2 Numunesine Ait XRD analizi



Şekil 4. B4 Numunesine Ait Optik Görüntü



Şekil 5. B6 Numunesine Ait Optik Görüntü

950 °C sıcaklıkta 2, 4 ve 6 saat yerli borlama tozu ile borlanmış AISI 1020 çeliğine ait numunelerin optik görüntüleri ve XRD analizi Şekil 3a-b, Şekil 4 ve Şekil 5' de verilmiştir. Numunelerin iç yapılarının ferrit(beyaz bölgeler), perlit(koyu bölgeler) ve yüzeyde meydana gelen borür tabakalarından oluştuğu gözlenmiştir. Borlama işlemi difüzyon mekanizmasıyla gerçekleşen bir termokimyasal işlemidir. Yüzeyde sıcaklık yardımıyla ilk borür çekirdeğinin oluşumu ile başlar. Oluşan borür çekirdeğinin numune yüzeyinden içeri doğru hareket etmesi sayesinde yüzeyde borür tabakası meydana gelmektedir. Oluşan borür tabaka kalınlığını sıcaklık ve süre parametreleri etkilemektedir. Artan sıcaklık ve süreye bağlı olarak malzemenin yüzey kısmından içeri doğru olan difüzyon miktarı artmaktadır. Difüzyon miktarının artışına bağlı olarak yüzeyde meydana gelen borür tabakası kalınlığı artmaktadır. Bu çalışmada artan borlama süresine bağlı olarak yüzeyde meydana gelen borür tabaka kalınlığı artmıştır. Meydana gelen bu borür tabakası testere dişi formunda ya da düz bir formda olabilir. Çelik içerisinde alaşım miktarı arttıkça borür tabakası testere dişi formundan düz forma geçmektedir. Borür tabakası içerisinde farklı ısıl genleşme katsayılarına sahip FeB ve Fe₂B fazları oluşmaktadır. İlk oluşan faz bor elementi ile bileşik oluşturma eğilimi fazla olan Fe₂B fazı sonra ise ortamda bor elementinin olması durumunda oluşan FeB fazıdır. Bunlardan sertlik değeri daha fazla olan ama daha kırılmalı olan yapı FeB fazı iken aşınmaya dayanıklı olan daha mukavim olan faz ise Fe₂B'dir. İkisinin birlikte borür tabakasında olması aşınma direncini azaltacağı için tek fazlı Fe₂B fazı istenmektedir. Bu çalışmada katı borlama neticesinde yüzeyde oluşan borür tabakası testere dişi formunda oluşmuştur. Bu durumun kullanılan çeliğin düşük karbonlu ve alaşımsız çelik olmasından dolayı oluştuğu söylenebilir. Borür tabakasında Fe₂B tek fazlı yapı oluşmuştur. Artan borlama süresi ile beraber meydana gelen testere dişleri büyümüş ve ana matrise yapışmıştır.

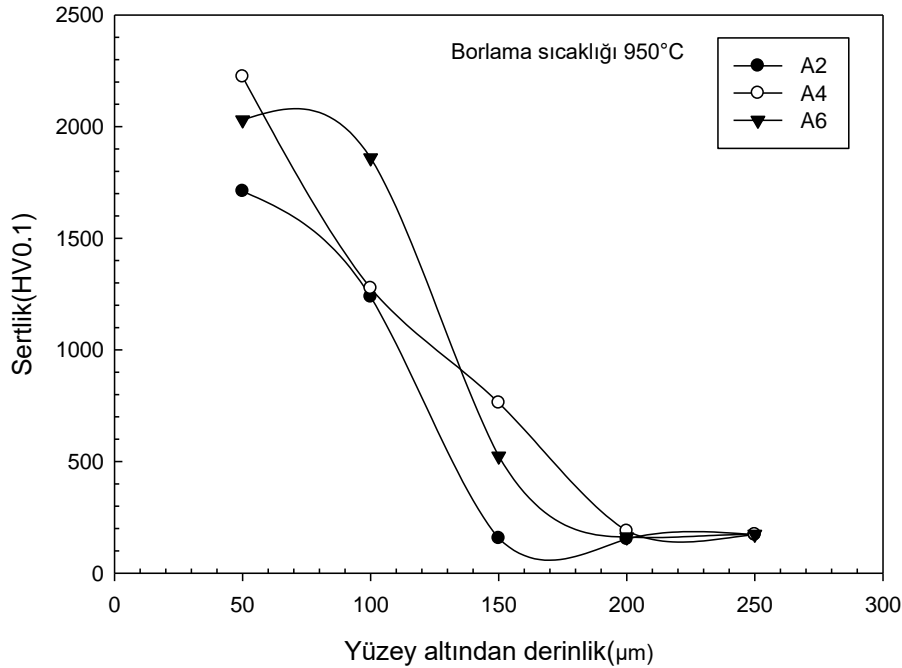
3.2.Mekanik Testler

Yerli Baybora-2 tozu ile 950°C sıcaklıkta 2, 4 ve 6 saat kutu borlama işlemine tabi tutulmuş AISI 1020 çeliğine ait numunelere ait yüzey altında meydana gelen sertliğin yüzey kısmından içeri doğru değişimleri Şekil 6' da verilmiştir.

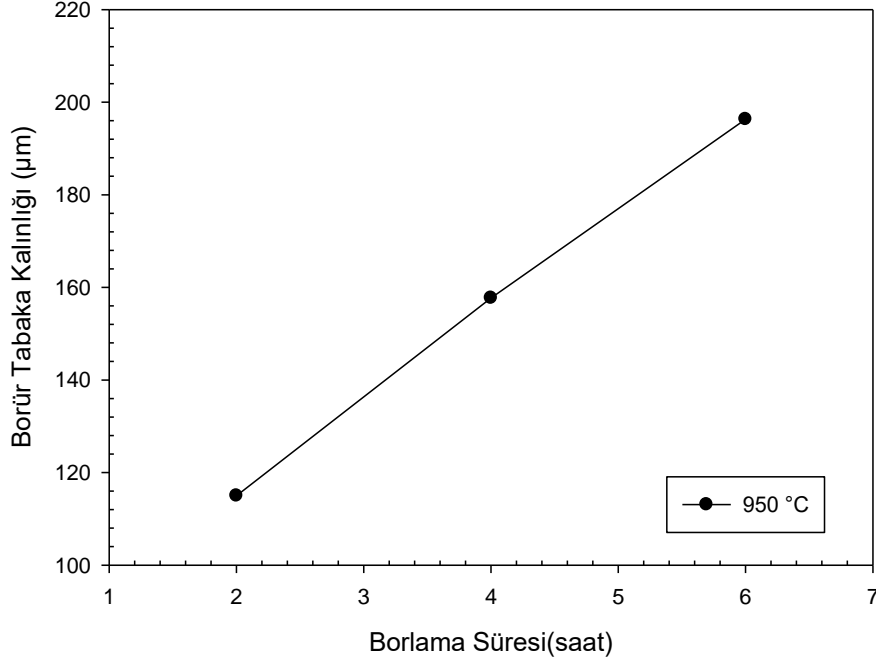
AISI 1020 çeliğinin sertliği 170 HV0,05 olarak ölçülmüştür. Borlama işlemine tabi tutulmuş AISI 1020 çeliği numunelerin sertliği işlem uygulanmamış numunelerle karşılaştırıldığında sertlikte yaklaşık 13 katlık bir artış meydana gelmiştir. En yüksek sertlik değeri 4 saatlik borlama neticesinde 2224 HV0,05 olarak ölçülmüştür. Borlanmış bütün numunelerin sertlik değerlerinde yüksek miktarlarda artış meydana gelmiştir. 6 saatlik borlama neticesinde yüzeyde yüksek sertlik değerleri elde edilmiştir. Borlanmış numuneler arasında en düşük sertlik değerleri ise 2 saatlik borlama neticesinde olduğu belirlenmiştir.

Borlanmış çeliğin sertliğinin yüzey altı mesafesine göre değişimi incelendiğinde üç bölge belirlenmiştir. Borlama neticesinde oluşan sertliğin çok yüksek olduğu borür tabakası, sertliğin azalmaya başladığı geçiş bölgesi ve çeliğin kendi sertliğinin ölçüldüğü ana matristir. Geçiş bölgesinde sertlik değerleri düşmeye başlamıştır. Bu bölgede kısmen borür tabakası olduğu için borür tabakasındaki kadar yüksek sertlik değerleri ölçülmemiştir. Yüzeyde oluşan borür tabakalarında yüksek sertlik değerleri ölçülmüştür.

Ayrıca mikrosertlik ölçme cihazı kullanılarak numunelerin yüzeyinde meydana gelen borür tabakalarının kalınlığı ölçülmüştür. Borlama sıcaklığı yüzeyde oluşan borür tabakası kalınlığı Şekil 7' de verilmiştir.



Şekil 6. 950°C sıcaklıkta borlanmış çeliğin sertliğinin yüzey altı mesafesine göre değişimi



Şekil 7. 950°C sıcaklıkta borlama süresine bağlı olarak borür tabakası kalınlığı değişimi

Katı borlama işlemi difüzyon mekanizmasına bağlı termokimyasal bir işlemdir. Yüzeyde sıcaklıkla beraber ilk borür çekirdeği oluşur ve zamanla büyümeye başlar. Sıcaklık ve süreye bağlı olarak çeliğin yüzeyinden içeri doğru difüze olmaya devam eder. Literatür incelendiğinde difüzyon mekanizmasında en etkili iki faktör sıcaklık ve süredir. Sıcaklık ve sürenin artışı difüzyon miktarını artırmakta ve malzeme yüzeyinde meydana gelen borür tabakası kalınlığı artmaktadır. Bu çalışmada Şekil 7 incelendiğinde sabit sıcaklıkta artan süre ile beraber yüzeyde meydana gelen borür tabakasının arttığı görülmektedir. 2 saatlik katı borlama neticesinde yüzeyde meydana gelen borür tabaka kalınlığı 115µm olarak tespit edilmiştir. 4 saatlik borlama neticesinde 157,7µm olarak ölçülmüş olup 6 saatlik borlama neticesinde borür tabaka kalınlığı 196,3 µm olarak ölçülmüştür. Artan sıcaklıkla beraber yüzeyde meydana gelen borür tabaka kalınlığı artmıştır. En yüksek borlama kalınlığı 6 saatlik borlama sonucunda elde edilmiştir.

4.Sonuçlar

Bu çalışmada piyasada büyük kesitli takım tezgâhlarının ana millerinde, orta sertlikte ve aşınmaya dayanıklı dişlilerde, sertleştirilmiş pimler ve zincirlerde ve daha birçok alanda kullanılan düşük karbonlu sınıfta yer alan AISI 1020 çeliğine katı borlama işlemi yapılmıştır. Katı borlama işlemi 950°C sıcaklıkta 2, 4 ve 6 saat sürelerde Baybora-2 yerli borlama tozu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tüm bu işlemler sonucunda çeliğin içyapı, sertlik ve bazı mekanik özellikleri analiz edilmiştir. Katı borlama işlemi sonucunda yüzeyde oluşan borür tabakasının artan sıcaklıkla beraber arttığı en yüksek borür tabakasının 6 saatlik borlama neticesi sonucunda oluştuğu tespit edilmiştir. Sertlik ölçümleri neticesinde en yüksek sertlik değerleri borlanmış numunelerden elde edilmiştir. Borlama işlemine tabi tutulmuş AISI 1020 çeliği numunelerin sertliği işlem uygulanmamış numunelerle karşılaştırıldığında sertlikte yaklaşık 13 katlık bir artış meydana gelmiştir. En yüksek sertlik değerinin 4 saatlik borlama neticesinde oluştuğu belirlenmiştir. Yüzey altı sertlik grafiği incelendiğinde grafikte üç bölgenin oluştuğu görülmüştür. Bunlar en yüksek sertlik değerlerinin elde edildiği borür tabakası, sertliğin düşmeye başladığı geçiş bölgesi ve ana matristir. İçyapı incelemeleri neticesinde AISI 1020 çeliğinin içyapısının ferrit, perlit ve borür tabakalarından oluştuğu belirlenmiştir. Yüzeyde oluşan borür tabakasının testere dişi formunda oluştuğu ve yüzeye yapıştığı tespit edilmiştir. Baybora-2 yerli borlama tozu ile yapılan borlama neticesinde ithal borlama tozlarıyla yapılan çalışmalarla eşdeğer sonuçlar elde edildiği tespit edilmiştir.

Referanslar

Atık E, Yunker U, Meric C, 2003 “The effects of conventional heat treatment and boronizing on abrasive wear and corrosion of SAE 1010, SAE 1040, D2 and 304 steels”,

Almeida EAS, Milan JCG, da Costa CE. Acquired properties comparison of solid nitriding, gas nitriding and plasma nitriding in tool steels. Mater Res 2015;18:27–35. <http://dx.doi.org/10.1590/1516-1439.255513>.

Baştürk S., Erten M., Borlama ile yüzey sertleştirme çalışmaları, Mühendis ve Makine, 47 (563), Aralık 2006.

Bayça S.U., Powder boronizing agent for coating a metal with a metal boride layer, Patent no:PCT/TR2020/050185.

B'ejar M.A, Moreno E, 2006 Abrasive wear resistance of boronized carbon and low-alloy steels, Journal of Materials Processing Technology 173 352–358.

Beliardouh NE, Nouveau C, Walock MJ, Jacquet P. A study of the wear performance of duplex treated commercial low-alloy steel against alumina and WC balls. Surf Coat Technol 2014;259:483–94. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.10.042>.

Campos I, Farah M, Lopez N, Bermudez G, Rodriguez G, Villavelazquez C. Evaluation of the tool life and fracture toughness of cutting tools boronized by the paste boriding process. Appl Surf Sci 2008;254:2967–74. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2007.10.038>.

Castillejo FE, Marulanda DM, Olaya JJ, Alfonso JE. Wear and corrosion resistance of niobium-chromium carbide coatings on AISI D2 produced through TRD. Surf Coat Technol 2014;254:104–11. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.05.069>.

C. Meric, S. Sahin, B. Backir, N.S. Koksall, 2006. “Investigation of the boronizing effect on the abrasive wear behavior in cast irons” Materials and Design. 27 . 751-757.

Celikyurek I, Baksan B, Torun O, Gurler R, 2006 “Boronizing of iron aluminide Fe72Al28” Intermetallics. 14 136–141.

Göy, Z., Borlama, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 1984.

Karamış, B.M., Nair ,F., Selçuk., “ Borlanmış Malzemelerin Tribolojik Özellikleri.” 6.Denizli Malzeme Sempozyumu Bildiriler Kitabı , sayfa 446-454, Denizli, 12-14 Nisan 1995

Kumar A, Bhushan B. Nanomechanical, nanotribological and macrotribological characterization of hard coatings and surface treatment of H-13 steel. Tribol Int 2015;81:149–58. <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2014.08.010>.

Maragoudakis N. E., Stergioudis G., Omar H., Pavlidou E., Tsipas D.N., Boro-nitriding of steel US 37- 1, Materials Letters, 57, 949-953,2002.

Ozbek I, Bindal C,2011, 86(4), Kinetics of borided AISI M2 highspeed steel, Vacuum, 391-397. 2004

Ozdemir O, Omar M.A, Usta M, Zeytin S, Bindal C, Ucisik A.H, 2009 “An investigation on boriding kinetics of AISI 316 stainless steel”, Vacuum 83 175–179

Özbek,İ., “ Borlama Yöntemiyle AISI M50, AISI M2 Yüksek Hız Çeliklerinin ve AISI W1 Çeliğinin Yüzey Performansının Geliştirilmesi.” Doktora Tezi, SAÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya,1999

Piasecki A, Kulka M, Kotkowiak M. Wear resistance improvement of 100CrMnSi6-4 bearing steel by laser boriding using CaF2 self-lubricating addition. Tribol Int 2016;97:173–91. <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2016.01.028>.

Reddy A. V., Investigation of aeronautical and engineering component failures, CRC Press, p.57, 2004.

Selçuk,B., Ipek, M.B., “ AISI 5155 ve AISI 1020 Çeliklerinin Çekme Özelliklerine Borlamanın Etkisi.” 6.Denizli Malzeme Sempozyumu Bildirileri Kitabı, sayfa 60-69, Denizli, 12-14 Nisan 1995

Sinha A. K., Boriding (Boronizing), ASM Handbook, Vol 4, Heat treating, Materials Park, OH:ASM International, 1991.

Yada K, Watanabe O. Reactive flow simulation of vacuum carburizing by acetylene gas. Comput Fluids 2013;79:65–76.