

AKÜ FEMÜBİD 14 (2014) 015701 (1-8)
DOI: 10.5578/fmbd.7356

AKU J. Sci.Eng.14 (2014) 015701 (1-8)

Araştırma Makalesi / Research Article

Borlanmış AISI 5140 ve AISI 420 Çeliklerinin Difüzyon ve Adhezyon Davranışlarının İncelenmesi

Nusrettin BARUT¹, Demet YAVUZ¹, Yusuf KAYALI²

¹Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Bölümü ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı,

²AfyonKocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü,

*Corresponding author. Nusrettin BARUT

Tel: +90 272 228 14 46 Fax: +90 272 228 14 49

nusrettinbarut@hotmail.com

Geliş Tarihi:18.02.2013; Kabul Tarihi:05.03.2014

Özet

Bu çalışmada AISI 5140 ve AISI 420 çelikleri 1123, 1173 ve 1223 K sıcaklıklarında 2,4 ve 6 saat süreyle kutu borlama yöntemi ile borlanmış. Deneyler sonucunda, çelik yüzeylerinde oluşan borür tabakalarının morfolojisi optik mikroskopu ile incelenmiştir. Sertlik değerleri, mikro-sertlik cihazı ile ölçülmüş ve tabaka üzerinde oluşturulan fazlar XRD yöntemi ile belirlenmiştir. XRD analizinde FeB, Fe₂B, CrB ve MnB fazlarının borür tabakasının üzerinde olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, borlanmış çeliklerde elde edilen borür tabakasının kalınlık değerleri, borlama süresi ve sıcaklığın artmasıyla artışı olarak değişmiştir. AISI 5140 ve AISI 420 çeliklerin orijinal sertlik değerleri, sırasıyla 265 HV_{0,05} ve 340 HV_{0,05} iken, borlama işlemi sonucunda, 1843 HV_{0,05} ve 1972 HV_{0,05} kadar artışı görülmüştür. AISI 5140 ve AISI 420 çelikler üzerindeki borür tabakasının oluşturulup, borür tabakasının kalınlığı ve büyüme kinetikleri incelenmiştir. Borlanmış AISI 5140 çelik ve AISI 420 çeliklerinin aktivasyon enerjileri, sırasıyla (Q) 194, 951 ve 206,161 kJ/mol, olarak tespit edilmiştir. Borür tabakasının yapışma özelliklerini Daimler-Benz Rockwell-C adhezyon yöntemi ile analiz edilmiştir. Adhezyon test sonuçlarına göre, borür tabakasının yapışma direnci ile borlama sıcaklığı ve borlama süresinin artışı ile azalmıştır.

Anahtar kelimeler

'AISI 5140', 'AISI 420', 'Borlama', 'Rockwell-C indantasyon', 'Difüzyon'.

Investigation of the Kinetics of Borided AISI 420 and AISI 5140 Steels

Abstract

In this study, AISI 5140 steel and AISI 420 stainless steel were pack borided at 1123, 1173 and 1223 K for retention times of 2, 4 and 6 h. The morphology of the boride layers formed on the steel surfaces as a result of the experiments was investigated by optical microscopy. The hardness values were measured by a micro-hardness device and the phases formed on the layer were determined by the XRD method. The XRD analysis revealed that FeB, Fe₂B, CrB and MnB phases had formed on the boride layer. The results indicate that the boride layer thickness in all the steel samples had an increase as a function of increasing boriding time and temperature. In addition, the boride layer thickness values changed depending on the chemical composition of the steels. While the original hardness values of AISI 5140 and AISI 420 steels were 265 HV_{0,05} and 340 HV_{0,05} respectively, as a result of boriding, they increased up to 1843 HV_{0,05} and 1972 HV_{0,05}. Activation energies (Q) of borided AISI 5140 steel and AISI 420 stainless steel used in the current study were determined as 194.951 and 206.161 kJ/mol, respectively. The growth kinetics of the boride layers forming on the AISI 5140 steel and AISI 420 steels and thickness of boride layers were also investigated. The adhesion properties of the boride layer were analyzed by performing the Daimler-Benz Rockwell-C adhesion method. According to the adhesion test results, the adhesion resistance of the boride layer decreased with the increase in the boriding temperature and time.

Keywords

'AISI 5140', 'AISI 420', 'Boriding', 'Rockwell-C Indentation', 'Diffusion'.

1. Giriş

Makine ve ekipmanlarının mekanik parçalarında servis sırasında aşınma ve korozyondan dolayı önemli ölçüde ekonomik kayıplar oluşur. Bu kaybı azaltmak amacıyla, malzeme yüzey bölgesinin özellikleri iyileştirilmelidir. Yüzey kalitesini artırmak için kullanılan yöntemlerden biri de borlamadır (Meriç et al. 2006). Borlama işlemi termokimyasal bir difüzyon işlemi olup borun yüksek sıcaklıkta çeliğe yayınımıdır (Atik et al. 2003, Özbek et al. 2004, Bejar and Moreno 2006, Çelikyürek et al. 2006, Ozdemir et al. 2009). Borlama işlemi genellikle 700-1000 °C aralığında 2-10 saat sürelerle çeşitli borlama ortamlarında gerçekleştirilir (Özbek et al. 2004, Bejar and Moreno 2006, Çelikyürek et al. 2006, Taktak 2007). Bu işlem, bir katı, sıvı veya gaz ortamı içinde yapılabilir. En sık kullanılan borlama metodu kutu karbürizasyona benzeyen kutu borlamadır. Kutu borlama, borlanacak malzemenin ısıl dirençli çelik kutulara yerleştirilmiş bor verici ortam olan bir toz karışımı içerisinde, belirli sıcaklık ve sürelerde bekletilmesiyle gerçekleşir. En sık kullanılan yöntem, sementasyon işlemi için kutu borlama olduğu benzer bir süreçtir. Kutu borlama, diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında basit ve maliyet etkinliği avantajına sahiptir (Atik et al. 2003, Özbek et al. 2004, Bejar and Moreno 2006, Çelikyürek et al. 2006, Ozdemir et al. 2009). Yaklaşık ağırlıkça %16.23 B içeren bor bakımından zengin olan FeB fazı ağırlıkça % 8.83 B içeren Fe₂B fazına göre daha kırılğan olduğu için istenen bir durum değildir (Ozdemir et al. 2009). Böylece, elde edilen borür tabakası tek fazlı (Fe₂B sadece) ya da çift fazlı (FeB ve Fe₂B) fazların meydana geldiği bir prosestir. Borlama işlemi ile malzeme yüzey sertliği (yaklaşık 2000 HV) yükseltilir, sertliğin yükselmesine bağlı olarak malzemenin adhesiv ve abrasiv aşınmaya karşı bir dirence sahip olur. Özellikle, borlama işlemi ile çelik yüzeylerinin sertleştirilmesi endüstrilerde geniş bir uygulama alanına sahiptir (Atik et al. 2003). Endüstri de borlama işlemi, tüm demir alaşımları, nikel alaşımları, titanyum alaşımları ve sermet (toz metal) malzemelere uygulanır. (Bejar and Moreno 2006, Çelikyürek et al. 2006). AISI 5140 ve AISI 420 çelikleri yaygın mühendislik malzemeleri olarak kullanılmaktadır. Ancak bu malzemelerin endüstride kullanılması için yüzey sertleştirme işlemine tabii tutulması gerekmektedir. En iyi yüzey sertleştirme yöntemleri arasında nitrürleme ve borlama işlemleri gelmektedir. Birçok çelik ve demir dışı metallerde borlama konusunda çalışmalar yapılmıştır. Ancak, adhezyon özellikleri ve kutu borlama işlemi kullanarak borlanmış AISI 5140

ve AISI 420 çeliklerin üzerinde oluşan Borürü tabakasının büyüme kinetiğinin incelenmesi konusunda fazla bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmanın amacı, sıcaklık, zaman ve kimyasal bileşim olarak test parametrelerini incelenerek çelik yüzeyinde kutu borlama yöntemi kullanarak oluşturulan borür tabakasının büyüme oranını belirlemektir. Ayrıca, borlanmış çeliklerde elde edilen borür tabakasının adhezyon (yapışma) davranışı araştırılmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Borlama İşlemi

Bu çalışmada altlık olarak kullanılan çeliklerin kimyasal bileşimleri Tablo 1 'de verilmiştir.

Tablo 1. Test materyallerinin kimyasal bileşimi (ağırlık%)

Çelik	C	Cr	Ni	Si	Mn	Mo	S	P
AISI 420	0.29	12.7	0.21	0.38	0.48	0.03	<0.005	0.02
AISI 5140	0.42	0.84	0.13	0.28	0.77	0.05	0.06	0.02

Test numuneleri Ø15x5 mm boyutlarında kesilerek metalografik olarak hazırlanmıştır. Kutu borlama işlemi, paslanmaz çelik pota içerisinde ticari bor tozu (Ekabor-2) içerisinde 1123, 1173 ve 1223 K sıcaklığında ve 2,4 ve 6 saat bekletme süresinde gerçekleştirilmiştir. Borlanmış numuneler, oda sıcaklığına kadar soğutuldu ve daha sonra test numuneleri kutudan çıkarılarak soğumaya bırakılmıştır. Borlanan numunelerden kesilen parçaların kesiti metalografik olarak hazırlanmıştır. Yüzeyler sırasıyla 120, 320, 400, 600, 800 ve 1200 gritlik zımparalardan geçirilerek zımparalandıktan sonra 1 µm'lık alümina ile parlatılmıştır. Daha sonra dağlanan numuneler optik mikroskop (Olympus BX-60) incelendi. Kaplama tabakasında oluşturulan Bor varlığı CuKα (λ = 1.5406 Å) radyasyonu kullanan X-ray difraksiyonu (Shimadzu XRD-6000) ile teyit edilmiştir. Borür kalınlığı optik mikroskoba (Olympus BX60) bağlı bir dijital kalınlık ölçüm cihazı ile ölçülmüştür. Sonuçlar bölümünde verilen kalınlık değerleri en az 10 ölçümün ortalamasıdır. Borlanmış numunelerin sertlik değerleri mikro-sertlik cihazında (Shimadzu HM-2) 50 gr. yük altında (10 saniye bekletilerek) yüzeyden

matrise doğru sertlik alınarak gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümleri, en az 7 farklı ölçümlerinin ve standart sapmalar ortalama değerleri dikkate alarak yapılmıştır.

2.2. Kinetik

Bu çalışmada borlama işleminin borlama sıcaklığı ve süresinin borür tabakasının büyüme kinetiği üzerine etkisi araştırılmıştır. Borlama işleminde elde edilen borür tabakası kalınlığı, borlama işleminin yapıldığı sıcaklığa ve işlem süresine bağlı olarak değişmektedir.

Kinetik çalışmaları Eşitlik 1'de verilen Arrhenius denkleminde göre ilerlemektedir (Efe et al. 2008).

$$D=Do. \exp(Q/R.T) \quad (1)$$

Do: Difüzyon sabiti (cm^2 / sn), Q: Aktivasyon enerjisi (J/mol), T: Sıcaklık ($^{\circ}\text{K}$) ve R: Gaz sabiti ($8,314 \text{ J/mol.}^{\circ}\text{K}$)'dir.

Öncelikle Eşitlik 2 yardımıyla çizilen (x^2-t) diyagramlarının eğiminden difüzyon katsayıları hesaplanmıştır (Kayali 2013).

$$x^2= D.t \quad (2)$$

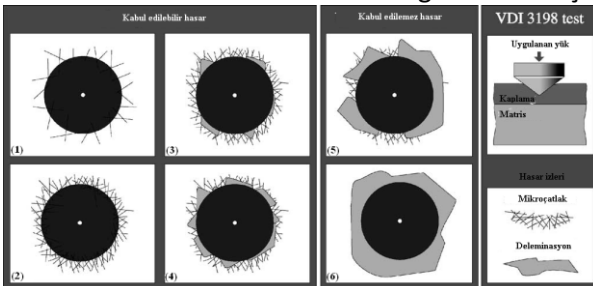
x: Borür tabaka kalınlığı (cm), D: Difüzyon katsayısı (cm^2/sn) ve t: Borlama işlem süresi (sn)

Eşitlik 2'den, Eşitlik 3 elde edilir. $1/T$ ile $\ln D$ arasında çizilen diyagramın eğiminden Q aktivasyon enerjisi değerleri hesaplanmıştır. Diyagramlarda elde edilen eğrilerin ordinat kesim noktası frekans faktörü değerini (Do), eğrinin eğiminden aktivasyon enerjisi (Q) tespit edilmektedir (Yu et al. 2006, Efe et al. 2008, İpek et al. 20129).

$$\ln D=\ln Do-Q/R.T \quad (3)$$

2.3. Adhezyon Testleri

Borlanmış numunelerdeki borür tabakalarının adhezyon davranışı Daimler-Benz Rockwell-C indentasyon testi (VDI 3198) ile belirlenmiştir. Test sonucu ortaya çıkan hasar görünüşlerinin haritaları Şekil 1'de gösterilmiştir. Bu haritaya göre 1-4 şekiller adhezyon bakımından kabul edilebilir. 5 ve 6 ise kabul edilemez olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 1. VDI 3198 indentasyon testinin prensipleri

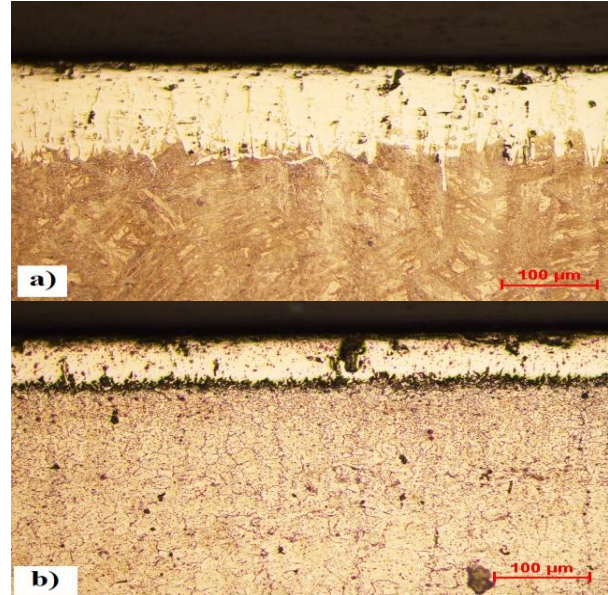
(Vidakis et al.2003).

Farklı sıcaklık ve sürelerde borlanan numunelerin yüzeyinde Daimler-Benz Rockwell-C test tekniği ile 1471 N (150 kg) yük uygulanarak 3 iz oluşturulmuştur. Oluşturulan izlerden uygun olanı SEM'de görüntülenerek Daimler-Benz VDI 3198 standartlarına göre kabul edilebilir olup olmadığı değerlendirilmiştir.

3. Deneysel Bulgular ve Tartışma

3.1 Borür Tabakalarının Karakterizasyonu

1223 K 6 saat borlanmış AISI 5140 ve AISI 420 çeliklerin mikro yapı resimleri Şekil 2'de görülmektedir.



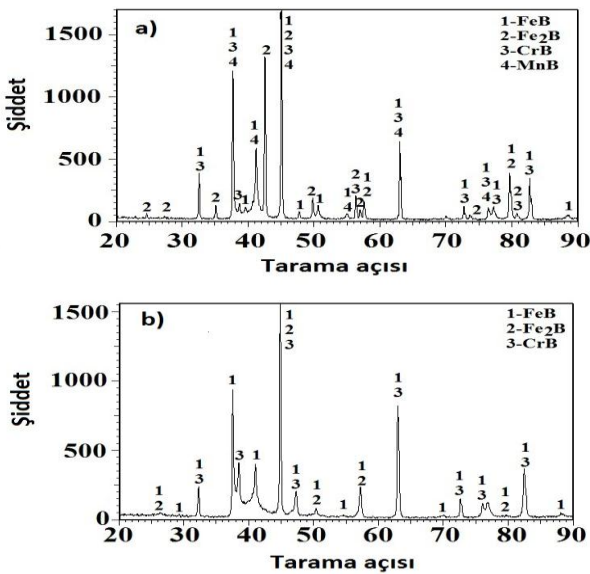
Şekil 2. 1223 K 6 saat Borlanmış a) AISI 5140 ve b) AISI 420 Çeliklerin Tabakasının Optik Mikroskop Görüntüsü.

AISI 5140 çelik kaplama-matris ara yüzey morfolojisinin kolonsal bir yapı sergilediği, ara yüzey ve matrisin belirgin bir şekilde birbirinden ayrılığı açıkça görülmektedir (Şekil 2 (a)) (Özbek et al. 2004). Elde edilen borür tabakası, tüm örneklerde muntazam bir kalınlığa sahip olduğu gözlenmiştir. AISI 420 paslanmaz çelik yüzeyleri üzerinde oluşturulan bor tabakasının morfolojik inceleme sonucunda, pürüzsüz ve düz bir yapı sergilediği optik mikroyapılarında görülmektedir (Şekil 2b). Borlanmış AISI 5140 çeliğine göre, oluşan borür tabakası düz ve daha ince bir yapıdadır.

Bunun nedeni olarak AISI 420 paslanmaz çeliğinin yüksek miktarda alaşım elementlerine (Cr, Ni) sahip olmasından dolayı difüzyon işleminin zorlaşması gösterilmektedir (Meriç et al. 2000, Özbek et al. 2002). Çelikteki Cr bileşimi arttığı zaman çelikte oluşan borür tabakası daha da incelmekte ve matris ile borür tabakası arasındaki ara yüzey gittikçe düzleşmektedir (Özbek vd. 2002, Taktak 2006, Taktak 2007). Kromun atom numarası (24), demirin atom numarasından (26) düşük olduğundan, ana malzemeden ziyade borür tabakasında (Fe,Cr)B ve (Fe, Cr)₂B'de daha fazla çözünür ve yüzeye doğru yayılmaktadır. Ayrıca matristeki Cr ve Ni miktarı arttıkça, borür tabakası/matris arayüzeyi kolonsal yapıdan düz hale gelmektedir. Ayrıca kaplamalardaki porozitelerin artmasının nedeni, alaşım elementlerinin borür tabakası içerisinde demir atomlarının yerini almasıdır (Meriç et al. 2000, Efe et al. 2008). Cr elementi tercihli olarak demir-borür'e girip borlama esnasında yüzeye doğru yarken, aksine Ni tabaka altında konsantre olur ve düşük nikel borürlerin oluşmasına neden olur. Bundan dolayı mikroyapı özellikleri; kimyasal bileşime, borlama sıcaklığına ve borlama süresine bağlıdır (Sinha 1991, Özbek vd. 2004, Efe vd. 2008).

3.2 X-Işını Kırınım Analizi

Şekil 3'de 900 °C'de 4 saat borlanmış AISI 5140 ve AISI 420 çeliklerinin X-ışınları difraksiyon paterni görülmektedir. Çeliklerin XRD analizi, çeliğin kimyasal bileşimine bağlı olarak FeB, Fe₂B, CrB ve MnB fazları üzerinde borür tabakasının olduğunu göstermektedir.

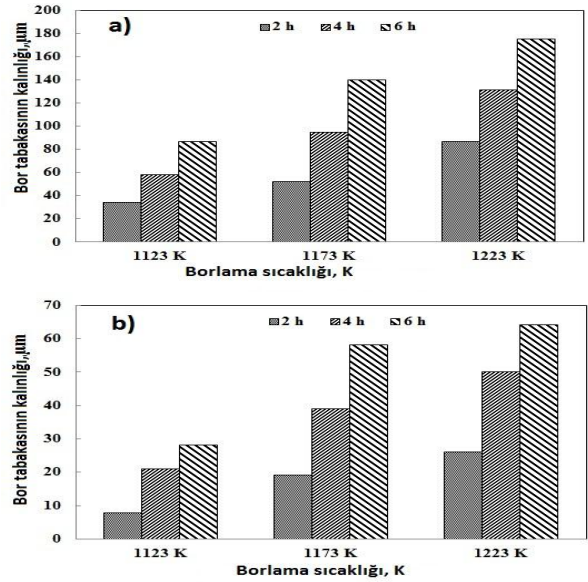


Şekil 3. 1173 K'de 4 saat süreyle Borlanmış a) AISI 5140 ve b) AISI 420 Çeliklerin X-ışınları difraksiyon analizi

paterni.

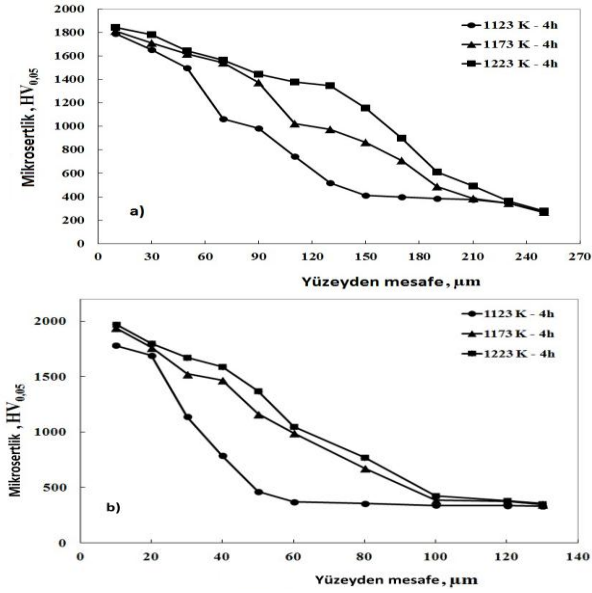
3.3 Borür Tabakasının Kalınlığı ve Sertliği

Borlama işleminin sonucunda borür tabakasının kalınlık değerleri, borlama süresi, borlama sıcaklığına ve çeliklerin kimyasal bileşimine bağlı olarak değiştiği tesbit edilmiştir [Çelikyürek et al. 2006, Taktak 2007, İpek et al. 2012, Kayali 2013]. AISI 5140 ve AISI 420 çeliklerinin borür tabakası kalınlık değerleri sırası ile 33,8-175 µm, 7,7-64 µm arasında değişmektedir. Şekil 4, borlama süresi ve sıcaklığına bağlı olarak borür tabakası kalınlığı değerlerindeki değişiklikleri gösterilmiştir.



Şekil 4. Sıcaklık ve süreye bağlı olarak a) AISI 5140 ve b) AISI 420 Çeliklerinin borür tabaka kalınlıklarının artışı.

AISI 5140 çeliğin yüzeyinde oluşan borür tabakasının kalınlığı, AISI 420 paslanmaz çelikten daha fazladır. AISI 5140 çeliğinin alaşım elementlerinin miktarı, AISI 420 paslanmaz çeliğinden daha azdır. AISI 420 borür tabakası kalınlığı AISI 5140 çelikten daha düşük olmasının nedeni, AISI 420 çeliğinin içindeki Cr gibi alaşım elementlerinden kaynaklandığı düşünülmektedir (Taktak 2007, Kayali 2013).



Şekil 5. 1123 K, 1173 K ve 1223 K 'de 4 saat borlanmış a) AISI 5140 ve b) AISI 420 Çeliklerinin yüzeyden içeri doğru Mikro-sertlik dağılımı.

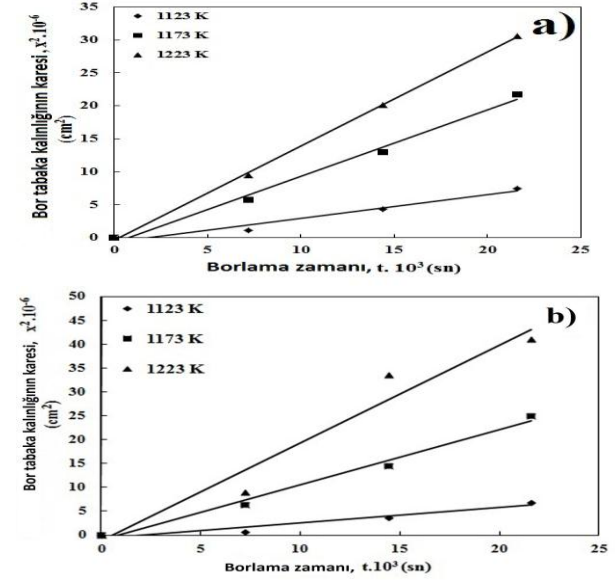
AISI 5140 ve AISI 420 çeliklerinin yüzey sertlik değerleri borlama işlemi sonucunda 4-6 kat artmıştır. Sertlik değerlerindeki artış borlama süresi ve sıcaklığına bağlı olarak farklılık gösterir (Çelikyürek et al. 2006, Taktak 2006, Taktak 2007, İpek et al. 2012, Kayali 2013). Şekil 5’de yüzeyden içeriye doğru gidildikçe çeliklerin sertlik dağılımını göstermektedir. Borür tabakasının sertliği yüzeyden içeri doğru sertlik değerleri dağılımında görüldüğü gibi, yüksek sertlik değerleri borür tabakası boyunca elde edilmiş ve matrise ulaştığında ani bir düşüş göstermiştir. Borlanmamış AISI 5140 ve AISI 420 çeliklerin sertlik değerleri 265HV_{0.05}, 340 HV_{0.05} farklı olsa da borlama sonrası çeliklerin sertlik değerleri, sıcaklık ve zamana bağlı olarak 976HV_{0.05}’den 1972 HV_{0.05} değişmektedir.

3.4 Kinetik

Şekil 6’da 1123, 1173 ve 1223 K’de 2, 4 ve 6 saat süresince kutu borlama yöntemiyle borlanmış AISI 5140 ve AISI 420 çeliklerinin borlama işlemi sonucunda oluşan borür tabaka kalınlığının karesi ile borlama süresi (x^2-t) değişimini veren diyagram ve Tablo 2’de bu diyagram yardımıyla belirlenen difüzyon katsayılarının değerleri verilmiştir. Şekil 6’da görüldüğü gibi, borür tabaka kalınlığı ile borlama süresi arasında yaklaşık olarak parabolik bir ilişki mevcuttur.

Her iki çelik için borlama sıcaklığının 1123 K’den 1223 K’ye yükselmesiyle birlikte difüzyon katsayısı

değerlerinde artış meydana gelmesi literatürle uyumludur (Şen et al. 2005, Taktak 2006, Uslu et al. 2007, Efe et al. 2008, Kayali et al. 2012, Kayali 2013). Sıcaklığın artmasıyla birlikte difüzyon işlemi hızlandığından dolayı daha kalın borür tabakaları elde edilmiştir.

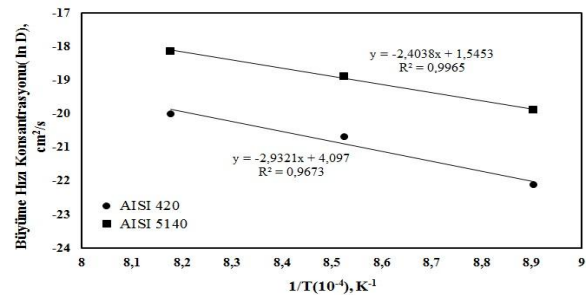


Şekil 6. a) AISI 5140 b) AISI 420 Çeliklerinin (x^2-t) diyagramı.

Tablo 2. Deney numunelerinin farklı sıcaklıklardaki difüzyon katsayısı ve Aktivasyon değerleri.

Çelikler	Büyüme oranı sabiti			Aktivasyon enerjisi (kJ/mol)
	Sıcaklık, K			
	1123 K	1173 K	1223 K	
AISI 5140	23.068×10^{-10}	62.729×10^{-11}	127.190×10^{-10}	194.951
AISI 420	2.505×10^{-10}	10.383×10^{-11}	15.237×10^{-10}	206.161

Eşitlik 3’den faydalanarak $\ln D$ ile $1/T$ arasında çizilen diyagramın eğiminden aktivasyon enerjisinin (Q) değeri hesaplanmıştır. Şekil 7’de Kutu borlama yöntemiyle borlanmış AISI 5140 ve AISI çeliklerinin $\ln D-1/T$ diyagramı verilmiştir. Diyagramdan elde edilen eğrilerin ordinatı kesim noktası frekans değerini (D_0), eğrinin eğiminden aktivasyon enerjisi (Q) hesaplanmaktadır (Tablo 2).



Şekil 7. Borlanmış çeliklerin $\ln D-1/T$ grafiği.

AISI 420 için hesaplanan aktivasyon enerji değeri AISI 5140 çeliğinden daha yüksek çıkmıştır. AISI 420 paslanmaz çeliğin hesaplanan aktivasyon enerjisi yüksek krom içeriği nedeniyle AISI 5140 çeliğinden daha yüksektir. Bu durum, alaşım elementinin artmasıyla aktivasyon enerjisini arttırmakta ve dolayısıyla tabaka kalınlığı azalmaktadır. Alaşım elementleri bor atomlarının yüzeye doğru difüzyon hızını düşürür ve böylece borür tabakasının oluşmasını zorlaştırır (Şen vd. 2005, Taktak 2006, Uslu vd. 2007, Efe vd. 2008). Düşük aktivasyon enerjisinde daha yüksek tabaka kalınlığı elde edilmiştir (Celebi et al 2005, Bejar and Moreno 2006). Bu çalışmada elde edilen aktivasyon enerjisi değerleri çeliklerin kimyasal bileşimine uygun olarak değişir. AISI 420, gibi alaşım elementlerinin yüksek miktarda olduğu paslanmaz çeliklerin bor tabaka kalınlığı azalır borlama sırasında aktivasyon enerjisi artar (Efe et al 2008, Özbek and Bindal 2011, Kayali 2013). Buna ek olarak, aktivasyon enerjisini etkileyen diğer bir faktör borlama yöntemidir. Tablo 3'te görüldüğü gibi, bu çalışmada hesaplanan değerler, literatürde bildirilen değerlerle uyumludur (Yoon et al 1999, Şen vd. 2005, Taktak, 2006; Efe et al 2008).

Tablo 3. Farklı çeliklerde ve ortamlarda yapılmış borun difüzyonu için aktivasyon enerjilerinin karşılaştırılması.

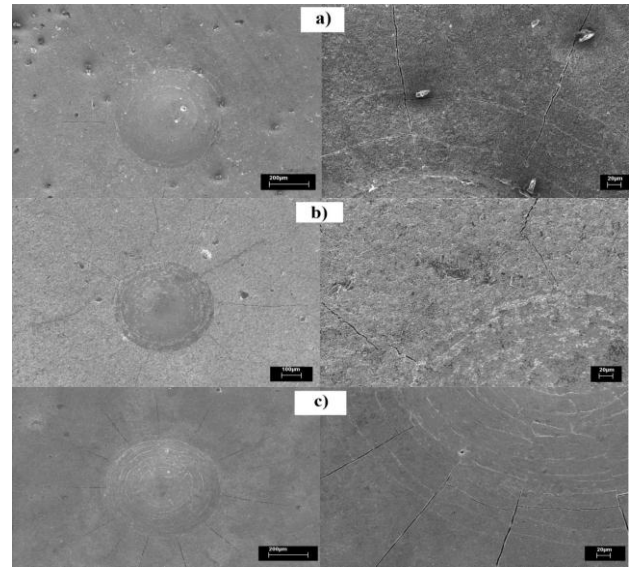
Çelik	Sıcaklık Değişimi (K)	Borlama Ortamı	Aktivasyon Enerjisi (kJ/mol)	Kaynaklar
AISI 304	1023-1223	Plazma Pasta Borlama	123	Yoonet.al. 1999
AISI 5140, 4340, D2	1123-1223	Sıvı Borlama	223, 234, 170	Şen vd. 2005
AISI H13, 304	1073-1223	Sıvı Borlama	244,37-253,35	Taktak 2006
31CrMoV9, 34CrAlNi7	1123-1223	Kutu Borlama	230-270	Efe vd. 2008
AISI 5140, AISI 420	1123-1223	Kutu borlama	194.951-206.161	Bu çalışmada

3.5 Daimler-Benz Rockwell-C Adhezyon Testi

Rockwell-C yöntemi ile indentasyon testi Şekil 1'deki haritaya göre Daimler Benz tarafından çıkarılmıştır. Bu haritalarda dört kabul edilebilir iki kabul edilemez hasar vardır. Borlanmış numunelere VDI 3198 adhezyon testine göre yüzeyine Rockwell-C uç batırılmış ve elde edilen izlerin SEM mikroskobu ile çekilmiş resimleri karşılaştırılmıştır. Genelde adhezyon mukavemet kalitesi Şekil 1.1-1.4 yeterli olarak tanımlanırken, Şekil 1.5-1.6 yetersiz

olarak tanımlanır (Benz 1992, Vidakis et al. 2003).

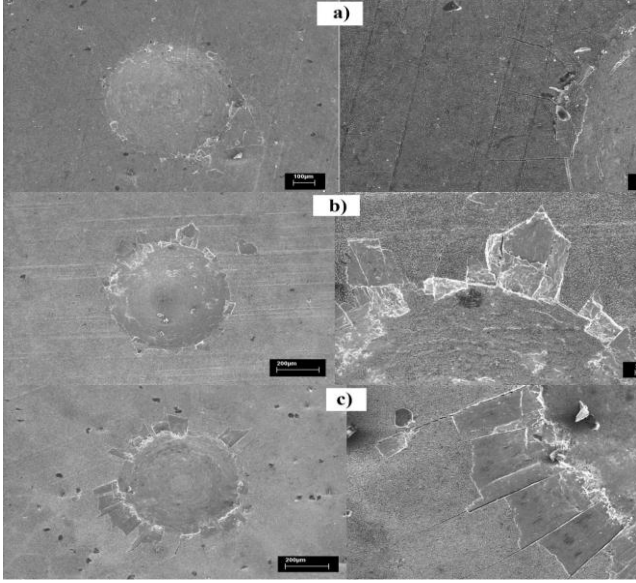
Şekil 8a' incelendiğinde oluşan mikro-çatlaklar Daimler-Benz tarafından geliştirilen haritanın Şekil 1.1'e benzediği için kaplamanın yapışması iyi olduğu söylenebilir. Bu nedenle, kabul edilebilir bir kaplamadır. Şekil 8 (b) 'de mikro-çatlakların sayısı biraz artmasına rağmen kaplama kabul edilebilir bir kaplamadır. Şekil 8 (c) 'de ise birçok mikro-çatlak olmasına rağmen haritaya göre Şekil 1.2 benzemektedir. AISI 5140 çeliğine borlama işlemi sonucunda elde edilen borür tabakasının Şekil 1 göre kaplamanın çok iyi olduğu görülmektedir.



Şekil 8. a) 1123 K, b) 1173 K ve c) 1223 K de 4 saat borlanmış AISI 5140 çeliğinin Daimler-Benz Rockwell-C adhezyon testi sonrası İndentasyon izlerinin SEM görüntüleri.

Şekil 9a'da AISI 420 çeliğinin düşük sıcaklıklarda borlanmasıyla mikro-çatlaklar ve delaminasyonların meydana geldiğini ve kaplamanın yapışma Daimler-Benz tarafından geliştirilen haritada Şekil 1.3 'de benzediği ve kabul edilebilir bir kaplama olduğu tesbit edilmiştir. Borlama sıcaklığının artmasıyla mikro-çatlaklar ve delaminasyon sayısı artmaktadır ve Şekil 1.4' de uygun olduğu gözlenmiştir (Şekil 9b). Borlama sıcaklığının 1223 K sıcaklığında yapılmasıyla birlikte birçok mikro-çatlaklar ve büyük delaminasyonlar oluşmuştur. Haritaya göre Şekil 1.5'e bezediği için kabul edilemez bir kaplamadır (Verein Deutscher Ingenieure 1991). Şekil 8 ve 9'da görüldüğü gibi, tüm çeliklerin bor tabakalarının yapışma kalitesi borlama süresi ve sıcaklık artışı ile azalmıştır (Taktak and Taşgetiren 2006). Taktak (2007) de AISI H13 ve AISI 304

çeliklerine sıvı borlama yöntemi ile 800-950 °C'de 3, 5 ve 7 saat sürelerde borlayarak, Daimler-Benz Rocwell-C adhezyon testi ile borür tabakasının adhezyonunu incelemiştir. Bu inceleme sonucunda borlama sıcaklığı ve süresinin artmasıyla, sert ve gevrek olan FeB fazının derinliğinin artmasından dolayı borür tabakasının adhezyonunun azalmakta olduğunu belirlemiştir.



Şekil 9. a) 1123 K, b) 1173 K ve c) 1223 K de 4 saat borlanmış AISI 420 çeliğinin Daimler-Benz Rockwell-C adhezyon testi sonrası İndentasyon izlerinin SEM görüntüleri.

4. SONUÇ

Bu çalışmadan aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

AISI 420 paslanmaz çeliklerin düz ve pürüzsüz morfolojisinde bor tabakası görüldü. AISI 5140 çeliğin yüzeyinde oluşturulan Bor tabakası ise bir testere dişi morfolojisi şeklinde gözlemlenmiştir. AISI 5140 çelik ve AISI 420 paslanmaz çelik üzerinde elde edilen borür tabakasında FeB, Fe₂B, CrB ve MnB fazlarından oluşmaktadır.

AISI 420 paslanmaz çelik yüzeyi üzerinde oluşturulmuş borür tabakasının kalınlığı AISI 5140 çelikten daha düşüktür. Borlama süresi ve sıcaklığının yanında AISI 420 paslanmaz çeliğin borür tabakası kalınlığı, alaşım elemanlarının (özellikle Cr) miktarında bir artış ile azalmıştır.

Borlama işlemi ile AISI 5140 ve AISI 420 çeliklerin yüzey sertlikleri yaklaşık olarak 4-6 kat artmıştır.

Borlanmamış AISI 5140 ve AISI 420 çeliklerin sertlik değerleri 265 HV_{0.05}, 340 HV_{0.05} farklı olsa da borlama sonrası çeliklerin sertlik değerleri, sıcaklık ve zamana bağlı olarak 976 HV_{0.05}'den 1972 HV_{0.05} değişmektedir.

AISI 5140 ve AISI 420 çeliklerin aktivasyon enerjileri sırasıyla 194,951 kJ/mol, 206,161 kJ/mol olarak tespit edilmiştir. Çeliklerdeki B atomlarının difüzyonu AISI 420 çeliğindeki yüksek alaşım elementlerinden dolayı AISI 5140 çeliğinden daha düşüktür.

Rockwell-C yöntemi ile indantasyon test sonuçlarında, düşük borlama sıcaklıklarda oluşan borür tabakasının adhezyonun daindentasyon izlerinde radyal çatlaklar görülmüştür. Borlama sıcaklığının ve süresinin artmasıyla tabakada daha derin kırıklar meydana geldiği belirlenmiştir. AISI 5140 çeliği adhezyon kalitesi AISI 420 paslanmaz çelikten kıyasla çok daha iyidir. Buna ek olarak, adhezyon kapasitesi borlama zaman ve sıcaklık artmasıyla birlikte azalmıştır.

5.KAYNAKLAR

- C. Meric, S. Sahin, B. Backir, N.S. Koksall, 2006. "Investigation of the boronizing effect on theabrasivewearbehavior in castirons" Materials and Design. **27** . 751-757.
- 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", Tribology International. **36**. 155–161.
- Özbek I, Sen S, İpek M, Bindal C, Zeytin S, Üçışık H.A, 2004 Mechanical aspect of borides formed on the AISI 440Cstainless-steel, Vacuum. **73**. 643–648.
- 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.
- Celikyurek I, Baksan B, Torun O, Gurler R, 2006 "Boronizing of iron aluminide Fe72Al28" Intermetallics. **14** 136–141.
- 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
- Taktak S. 2007. Some mechanical properties of borided AISI H13 and 304 steels: Materials and Design. 28; p. 1836–1843:
- Efe GÇ, İpek M, Özbek İ, Bindal C, 2008. Kinetics of borided 31CrMoV9 and 34CrAlNi7 steels. Materials Characterization. 59; p. 23-31:
- Yu, L.G., Khor K.A., Sundararajan, G., 2006, “Boride layer growth kinetics during boriding of molybdenum by the Spark Plasma Sintering (SPS) technology”, Surface & Coatings Technology, Vol. 201, pp. 2849-2853.
- İpek M, Efe G.C, Ozbek I, Zeytin S, Bindal C, 2012, Investigation of Boronizing Kinetics of AISI 51100 Steel, Journal Of Materials Engineering And Performance, **21(5)**, 733-738.
- Vidakis N, Antoniadis A, Bilalis N. 2003 The VDI 3198 indentation test evaluation of a reliable qualitative control for layered compounds: J Mater Process Technol. 481–5; p. 143–144:
- Özbek, İ., Konduk, B.A., Bindal, C., Ucisik, A.H., 2002, “Characterization of borided AISI 316 L stainless steel implant” Vacuum 65, pp.521–525.
- Meriç C, Şahin S, Yılmaz SS, 2000 Investigation of The Effect on Boride Layer of Powder Particle Size Used in Boronizing with Solid Boron-yielding Substances: Materials Research Bulletin. 35C; p. 2165-2172:
- Sinha A.K., 1991, “Boriding (Boronising)”, ASM Handbook, Vol. 4, J. Heat Treating, pp. 437–447.
- Taktak S. 2006, A study on the diffusion kinetics of borides on boronized Cr-based steels, J. Mater. Sci. **41(22)**, 7590-7596.
- Taktak S. 2007, Some mechanical properties of borided AISI H13 and 304 steels, Materials and Design **28(6)**, 1836-1843.
- Kayalı Y., 2013. Investigation of the Diffusion Kinetics of Borided Stainless Steels, The Physics of Metals and Metallography, Vol. 114 (12), 1061–1068,
- Şen, Ş., Şen, U. ve Bindal, C., 2005, “An Approach to Kinetic Study of Borided Steels”, Surface & Coatings Technology, Vol. 191, pp.274-285.
- Şen, Ş., 2005, “The Characterization of Vanadium Boride Coatings on AISI 8620 Steel, Surface & Coatings Technology, vol.90, pp.1- 6.
- Uslu, İ., Comert, H., İpek, M., Ozdemir, O., Bindal, C., 2007, “Evaluation of borides formed on AISI P20 steel” Materials and Design 28, 55–61.
- Ozbek I, Bindal C, 2011, 86(4), Kinetics of borided AISI M2 highspeed steel, Vacuum, 391-397.
- Kayalı Y., Güneş, İ., Ulu, S., 2012 Diffusion kinetics of borided AISI 52100 and AISI 440C steels, Vacuum, 86, 1428-1434, 2012.
- Yoon J.H, Jee Y.K, Lee S.Y, 1999, 112(1-3), Plasma paste boronizing treatment of the stainless steel AISI 304, Surf. Coat. Technol., 71-75.
- Daimler Benz adhesion test. Verein Deutscher Ingenieure (VDI) Richlinie 3198; p. 7: 1992.
- Taktak S, Tasgetiren S, 2006 Identification of delamination failure of boride layer on common Cr-based steels. Journal Of Materials Engineering And Performance. 15:5; p. 570-574:
- Verein Deutscher Ingenieure Normen, VDI 3198. Dusseldorf: VDI-Verlag; 1991.