

## KUTU VE PLAZMA PASTA BORLANMIŞ 21NiCrMo2 ÇELİĞİNİN YÜZEY KAREKTERİZASYONU

**İbrahim GÜNEŞ, Şükrü TAKTAK**

Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, 03200, Afyonkarahisar  
[igunes@aku.edu.tr](mailto:igunes@aku.edu.tr), [staktak@aku.edu.tr](mailto:staktak@aku.edu.tr)

(Geliş/Received: 15.02.2011; Kabul/Accepted: 12.01.2012)

### ÖZET

Bu çalışmada endüstride yatak çeliği olarak kullanılan 21NiCrMo2 çeliği ağırlıkça %100 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, %70 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + %30 SiC, %70 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + %30 B<sub>4</sub>C, %30 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + %70 SiC, %30 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + %70 B<sub>4</sub>C pasta karışımları kullanılarak plazma pasta borlanmıştır. Plazma pasta borlama (PPB) işlemi, 700, 750 ve 800 °C de 2, 5 ve 7 saat süresince %70H<sub>2</sub> – %30Ar gaz karışımında 10 mbar basınç altında yapılmıştır. Aynı çelik ticari Ekabor II tozuyla aynı sıcaklık (700, 750, 800°C) ve sürelerde (2, 5, 7 saat) elektrik resistanslı fırında kutu borlama işlemine tabi tutulmuştur. Elde edilen borür tabakalarının, SEM, EDX, X-ışını difraksiyon, mikrosertlik ve mikroyapı özellikleri incelenmiştir. X-ışını difraktometrik analizi sonucunda çeliğin yüzeyinde FeB ve Fe<sub>2</sub>B tabakalarının oluştuğu görülmüştür. B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pasta karışımları kullanarak plazma ortamında daha düşük sıcaklık ve sürelerde kutu borlama yöntemine göre daha kalın borür tabakaları elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Plazma pasta borlama, 21NiCrMo2, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, mikrosertlik.

## SURFACE CHARACTERIZATION OF PACK AND PLASMA PASTE BORONIZED OF 21NiCrMo2 STEEL

### ABSTRACT

In the present study, 21NiCrMo2 steel were plasma paste boronized by using 100 wt.% B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 70 wt.% B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 30 wt. % SiC, 70 wt.% B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 30 wt.% B<sub>4</sub>C, 30 wt. % B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 70 wt.% SiC, 30 wt.% B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 70 wt.% B<sub>4</sub>C pastes. This steel is popular bearing steel and have a widespread use in engineering applications. Plasma paste boronizing process was carried out in a dc plasma system at temperature of 700, 750 and 800 °C for 2, 5 and 7 h in a gas mixture of 70%H<sub>2</sub> - 30%Ar under a constant pressure of 10 mbar. Pack boronizing of same steel was also carried out at 700, 750 and 800 °C for 2, 5 and 7 h. The properties of boride layer were evaluated by SEM, EDX, X-ray diffraction, Vickers micro-hardness testing. X-ray diffraction analysis of boride layers on the surface of the boronized steel revealed FeB and Fe<sub>2</sub>B. Plasma paste boronizing process showed that since the plasma activated the chemical reaction more, a thicker boride layer was formed than conventional boronizing methods at same temperatures. It was possible to form boride layer with the same thickness at lower temperatures in plasma environment by using B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> paste mixture.

**Key Words:** Plasma paste boronizing, 21NiCrMo2, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Micro hardness.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Ülkemiz dünyada en fazla bor rezervine sahip ülkeler arasında başta gelmektedir. Bor bileşikleri üstün özelliklere sahip malzemeler olduklarından birçok araştırmacı bor ve bor bileşikleri üzerine çalışmalar yapmaktadır [1]. Özellikle son yıllarda metalik malzemelerin termo-kimyasal yöntemlerle kaplanması ilgi odağı olmuştur. Borlama işlemi bu yöntemlerden biri olup diğer difüzyon esaslı yüzey işlemlerine

kıyasla üstün özelliklere sahiptir [2]. Borlama termo-kimyasal bir difüzyon işlemi olup borun yüksek sıcaklıkta çeliğe yayımıdır. Borlama işlemi genellikle, 700–1000 °C sıcaklık aralığında 1-10 saat sürelerle çeşitli borlama ortamlarında gerçekleştirilmektedir. Borlama bütün çeliklere uygulanabildiği gibi demir dışı metal ve alaşımlarına da uygulanabilmektedir [3-4]. Borlama ortamı katı, sıvı gaz, pasta ve plazma olup bor kaynağı (B<sub>4</sub>C, Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>, H<sub>2</sub>B<sub>6</sub>), aktivatör (KBF<sub>4</sub>), dolgu malzemesi

ve deoksidadanlardan meydana gelmektedir. Burada aktivatörler tabakanın düzenli büyümesini sağlarken, dolgu ve deoksidad malzemeler işlem sıcaklığında oksijeni tutarak redükleyici bir ortam oluşturmakta ve ayrıca ortamdaki malzemelerin ana malzemeye yapışmasını önlemektedirler [2-4].

Katı borlama genellikle patentlerle korunan yaklaşık %5 B<sub>4</sub>C, %5 KBF<sub>4</sub> ve %90 SiC içeren karışımlar ile yapılmaktadır. Bu yöntemde toz karışım sızdırmaz bir kutuya doldurulur ve içine numune yerleştirilir. Kutu gerekli sıcaklığa kadar ısıtılır. Bu sıcaklıkta gerektiği kadar tutulur ve soğutulur [5]. Sıvı borlamada boraks, borik asit ve ferro silis karışımından oluşan erimiş tuz banyosuna numune daldırılır ve bu sıcaklıkta gerekli bir süre bekletilir. Gaz ve plazma borlamada BCl<sub>3</sub>, TMB (trimetil borat), TEB (trietil boran) ve BF<sub>3</sub> gibi bor kaynakları ile H<sub>2</sub> ile Ar gazları kullanılmaktadır [6-8]. Bu yöntemlerden sıvı borlamada erimiş tuz tabakası numune yüzeyine yapışır ve kalıntının temizlenmesi problem oluşturmaktadır. Katı borlamada numune yüzeyinin temizlenmesi gerekir. Ancak yapışma tam olmadığından numune yüzeyi kolaylıkla temizlenir. Gaz ve plazma borlamada malzeme yüzeyi temiz olmasına rağmen kullanılan gazların zehirli, pahalı ve patlayıcı olması dezavantajlarıdır.

Son yıllarda plazma borlama üzerine çalışmalar giderek artmaktadır [9-13]. Plazma borlama işlemi, geleneksel borlama işlemlerine göre çok üstün avantaja sahiptir. Örneğin plazma borlama işleminde oluşturulan yüksek enerji sayesinde geleneksel borlama işlemlerinden daha düşük sıcaklıklarda çalışılabilmekte ve distorsiyon (biçim bozulması) minimum seviyeye düşürülebilmektedir. Bunun yanında plazma borlama işleminde gaz karışım oranlarını değiştirerek FeB miktarını azaltmak veya tek tabakalı Fe<sub>2</sub>B tabakası oluşturmak mümkündür [8, 10]. Fakat plazma borlamada bor kaynağı olarak kullanılan gazların (B<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, BCl<sub>3</sub>) pahalı, zehirli ve patlayıcı nitelikte olması bir dezavantajdır. Ayrıca, BCl<sub>3</sub> ortamında yapılan plazma borlama işlemlerinde, borür tabakası büyümesinin ve sertliğin kutu ve pasta borlamaya nazaran düşük olması ve borür tabakasında gözeneklerin olması büyük bir problem teşkil etmektedir [9, 12-13].

Plazma destekli pasta borlama yüzey işlemi ile plazma borlama işlemindeki dezavantajlar yok edilebilmektedir. Kullanılan pastanın çevreye zararsız bor hammaddeleri olması, gazların ise genelde inert karakterde olan hidrojen, argon ve azot olması bu işlemi avantajlı kılmaktadır. Plazma pasta borlamada kullanılan B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bor pastasının ülkemizde çok miktarda bulunması, ucuz olması ve değerlendirilmesi açısından bu yöntem (PPB) oldukça önem taşımaktadır. Bu konuda yapılan çalışmada Yoon ve

arkadaşları [6], boraks (Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>) ve amorf bor karışımından oluşan pastayı 304 paslanmaz çeliğin üzerine sürerek Ar/H<sub>2</sub> plazmasında değişik sıcaklıklarda borlamışlar ve tabakanın difüzyon kinetiğini ve morfolojisini incelemişlerdir. Ayrıca, optimum borür tabaka kalınlığı için değişik boraks ve amorf bor bileşikleri içeren pasta kullanmışlardır. Çalışmalar sonucunda % 70 boraks ve % 30 amorf bor içeren pastanın en yüksek kalınlığı verdiğini ve % 100 boraks içeren pastanın da paslanmaz çelikte borür tabakası oluşturduğunu ifade etmişlerdir. Difüzyon kinetiği çalışmaları sonucunda plazma pasta borlama ile gerçekleştirilen borür tabakasının diğer borlama ortamlarına nazaran daha kalın ve aktivasyon enerjisinin de daha küçük olduğunu vurgulamışlardır. Güneş ve diğerleri [14] çeşitli alaşım elementi içeren bazı çeliklerin yüzeyine %100 boraks pastası biriktirerek plazma ortamında pasta borlamışlar ve kutu borlamaya göre daha düşük sıcaklık ve sürelerde daha kalın borür tabakaları elde etmişlerdir.

Bu çalışmada 21NiCrMo2 çeliği üzerine farklı % B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pasta karışımları, (%100 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, %70 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + %30 SiC, %70 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + %30 B<sub>4</sub>C, %30 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + %70 SiC, %30 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + %70 B<sub>4</sub>C) biriktirilerek farklı sıcaklık ve sürelerde, plazma pasta ve ticari Ekabor II tozuyla kutu borlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen borür tabakalarının mikroyapı, XRD, SEM, EDX ve mikrosertlik özellikleri incelenerek iki yöntem birbiriyle mukayese edilmiştir.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

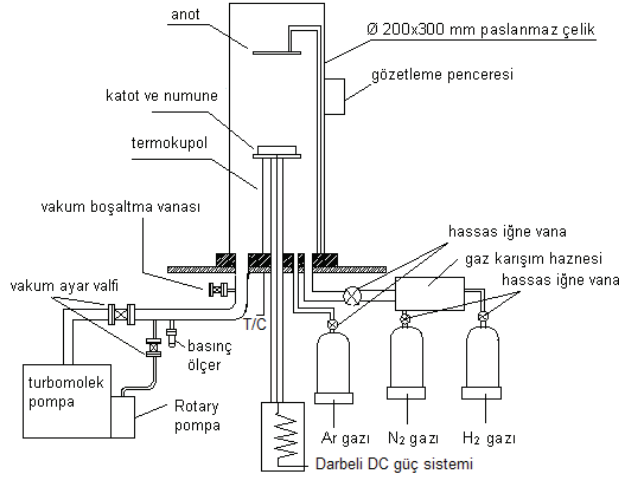
Deneysel çalışmada kullanılan Ø18x6 mm boyutlarındaki 21NiCrMo2 çeliğinin kimyasal bileşimi (% ağırlık olarak) Çizelge 1'de verilmiştir. Hazırlanan numuneler plazma cihazının (Şekil 1) vakum haznesine yerleştirilmiş ve hazne basıncı 2 x10<sup>-2</sup> mbar vakuma getirilmiştir. Numuneler 10 mbar basınç altında %70 H<sub>2</sub> - %30 Ar gaz karışımında üç farklı sıcaklık (700, 750 ve 800 °C) ve sürelerde (2, 5 ve 7 saat) plazma pasta borlanmıştır. Aynı sıcaklık ve sürelerde ticari Ekabor II tozuyla kutu borlama işlemi gerçekleştirilmiştir. İki farklı yöntem birbiriyle karşılaştırılarak kıyaslanmıştır.

Borlanmış numuneler kesitten SiC kesme diski ile kesilerek kalıplanmış, 240-1000 grit SiC zımparadan geçirilerek zımparalanmış ve 0.1 µm alümina süspansiyonda parlatılmıştır. Metalografik olarak hazırlanan numuneler, % 3'lik nitelle dağlandıktan sonra taramalı elektron mikroskobu (Leo 1430 VP), ve XRD analizinde (Shimadzu XRD-6000) yardımıyla karakterize edilmiştir. XRD analizinde CuK<sub>α</sub> (λ = 1,5418 Å) radyasyonu kullanılmıştır.

**Çizelge 1.** 21NiCrMo2 çeliğinin kimyasal bileşimi (Chemical compositions of 21NiCrMo2 steel) (wt. %)

Çelik	C	Cr	Ni	Si	Mn	Mo	S	P
21NiCrMo2	0,19	0,4	0,4	0,15	0,7	0,15	0,04	0,03

Tabakalarının kalınlığı optik mikroskoba bağlı bir aparat yardımıyla ölçülmüştür. Kaplanmış numunelerin sertlik değerleri mikrosertlik cihazında (Shimadzu HM-2) Knoop ucu ile 50 gr. yük altında ölçülmüştür.

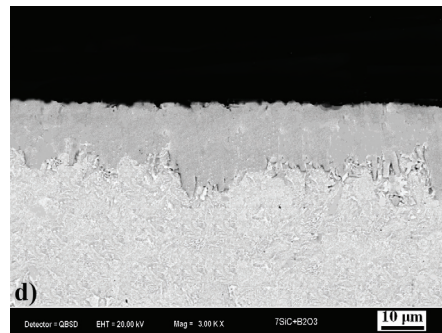
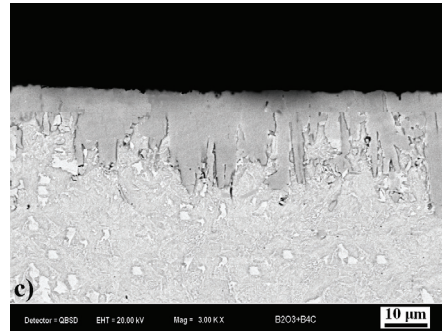
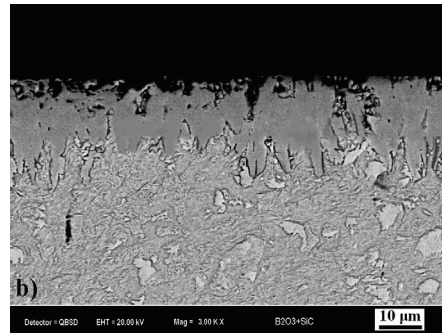
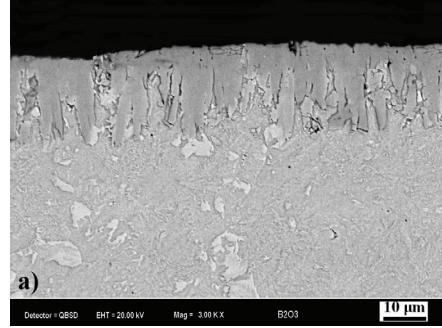


**Şekil 1.** Plazma pasta borlama cihazının şematik gösterimi (Schematic illustration of plasma paste boronizing device)

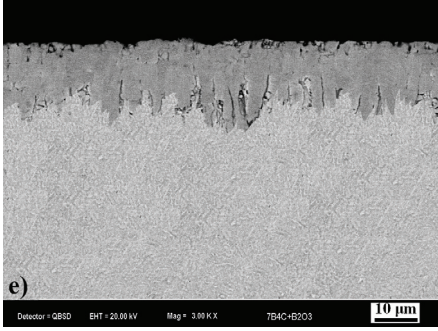
### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

#### 3.1 Yüzey Karakterizasyonu (Surface Characterization)

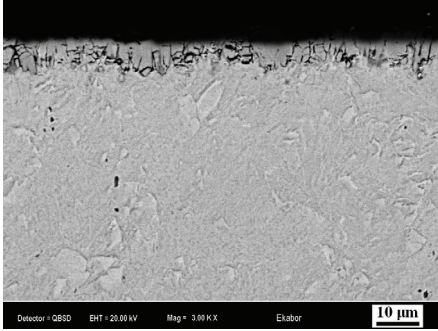
Şekil 2 ve 3'te 750°C 5 saat süreyle, farklı % pasta karışım oranlarında B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiC ve B<sub>4</sub>C tozlarıyla (% 100 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, % 70 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + % 30 SiC, %70 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + % 30 B<sub>4</sub>C, % 30 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + %70 SiC, %30 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + %70 B<sub>4</sub>C) plazma pasta ve ticari Ekabor II tozuyla kutu borlanmış 21NiCrMo2 çeliğinin SEM görüntüleri görülmektedir. Şekil 2 ve 3'te plazma pasta ve Ekabor II tozuyla kutu borlama sonucunda kolonsal bir yapıya sahip olan borür tabakaları elde edilmiştir. Bu kolonsallık borür tabakasının kendine has bir özelliğidir [15]. Şekil 4'te 750°C'de 5 saat süreyle % 100 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pasta karışımında plazma pasta borlanmış 21NiCrMo2 çeliğinin EDX analizi görülmektedir. Çelik yüzeyinin borür tabakasıyla kaplanmış olduğu EDX analiziyle tespit edilmiştir.



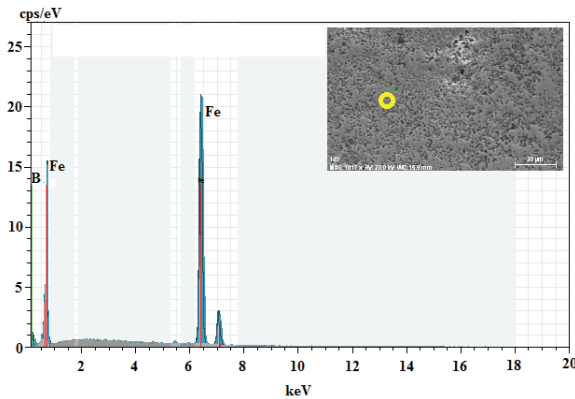
**Şekil 2.** 750 °C'de 5 saat süreyle farklı (ağırlıkça, %) B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pasta karışımlarında plazma pasta borlanmış 21NiCrMo2 çeliğinin SEM görüntüleri, a) 100 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, b) 70 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 30 SiC, c) 70 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + %30 B<sub>4</sub>C, d) 30 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 70 SiC, e) 30 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 70 B<sub>4</sub>C (SEM micrographs of plasma paste borided 21NiCrMo2 steel in different % B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> paste mixtures for 5 h at 750 °C.)



Şekil 2. (Devamı) (Continue)



Şekil 3. 750°C'de 5 saat süreyle Ekabor II tozuyla kutu borlanmış 21NiCrMo2 çeliğinin SEM görüntüsü. (SEM micrographs of boronized 21NiCrMo2 steel with Ekabor II powder for 5 h at 750 °C.)



Şekil 4. 750 °C'de 5 saat süreyle (ağırlıkça) % 100 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pasta karışımında plazma pasta borlanmış 21NiCrMo2 çeliğinin EDX analizi (EDX analysis of plasma paste boronized 21NiCrMo2 steel in different % B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> paste mixture for 5 h at 750 °C.)

700, 750 ve 800°C'de 5 saat plazma pasta ve kutu borlama sonucunda elde edilen borür tabaka kalınlıkları Çizelge 2'de verilmiştir. PPB işlemi sonucunda en yüksek bor tabakası kalınlığı % 100 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'te elde edilirken en düşük borür tabakası %70 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + %30 B<sub>4</sub>C pasta karışımında ölçülmüştür. 700°C'de Ekabor II tozuyla kutu borlama sonucunda herhangi bir borür tabakasına rastlanmamıştır. Bor pasta karışımların hepsinde borlama süresi ve sıcaklığının artmasıyla birlikte borür tabaka kalınlıklarında artışlar meydana gelmiştir [16-19]. Yoon ve diğerleri [6], boraks (Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>) ve amorf bor karışımından oluşan pastayı 304 paslanmaz çeliğin

üzerine sürerek Ar/H<sub>2</sub> plazmasında değişik sıcaklıklarda borlamışlar ve tabakanın difüzyon kinetiğini ve morfolojisini incelemişlerdir. Ayrıca, optimum borür tabaka kalınlığı için değişik oranda boraks ve amorf bor bileşiklerini içeren pasta kullanmışlardır. Çalışmalar sonucunda % 70 boraks ve % 30 amorf bor içeren pastanın en yüksek kalınlığı verdiğini ve % 100 boraks içeren pastanın da paslanmaz çelikte borür tabakası oluşturduğunu ifade etmişlerdir. Plazmanın kimyasal reaksiyonu daha fazla etkinleşmesinden dolayı benzer sıcaklıklarda normal kutu borlamadan daha kalın borür tabakası oluşmaktadır. Aynı kalınlıktaki borür tabakasını plazma ortamında daha düşük sıcaklıkta oluşturmak mümkündür [6,14]. Difüzyon kinetiği çalışmaları sonucunda plazma pasta borlama ile gerçekleştirilen borür tabakasının diğer borlama [20-22] ortamlarına nazaran daha kalın ve aktivasyon enerjisinin de daha küçük olduğunu vurgulamışlardır [6, 14, 23]. Borlama sıcaklık ve süresinin artmasıyla beraber B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'e SiC ve B<sub>4</sub>C katılarak yapılan PPB işlemi sonucunda bu katkı tozlarının bor tabakasının büyümesinde katkı yaptığı tespit edilmiştir. Kutu borlamayla elde edilenden daha düşük sıcaklık ve daha kısa sürede PPB ile borür tabakası elde edilmiştir. Böylece PPB yöntemiyle sıcaklık ve süreden tasarruf sağlamanın yanında B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> gibi ülkemizde fazla bulunan bor kaynağının kullanılıyor olması bor tüketimine ve faydalı bir alanda kullanımına imkan sağlaması açısından oldukça önem taşımaktadır.

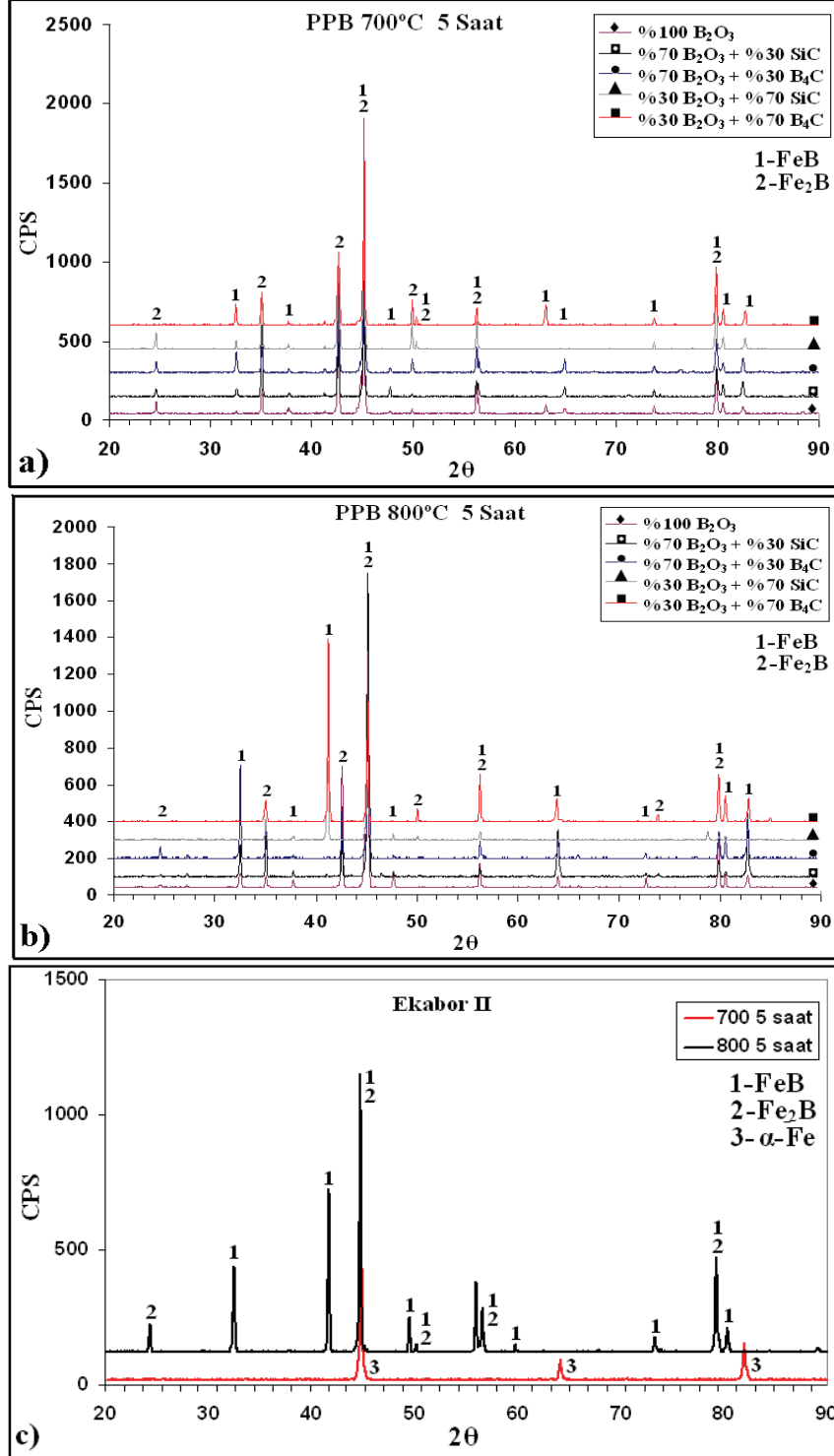
Çizelge 2. 700, 750 ve 800°C'de 5 Saat Plazma Pasta ve Kutu Borlanmış 21NiCrMo2 Çeliğinin Borür Tabaka Kalınlıkları (The boride layer thicknesses formed on plasma paste and pack boronized 21NiCrMo2 steel for 5 h at 700, 750 and 800 °C)

Tabaka Kalınlıkları, (µm)					
Borlama Yöntemi	Karışımlar, (%)	Sıcaklık (°C)			Süre (saat)
		700	750	800	
Plazma Pasta	100 B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27	30,3	45,3	5
	70 B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 30 SiC	16	19,3	32	5
	70 B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 30 B <sub>4</sub> C	15,9	20,1	28,4	5
	30 B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 70 SiC	18,2	24,5	45	5
	30 B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 70 B <sub>4</sub> C	18	24,9	39	5
Kutu	Ekabor II	----	6,7	24,4	5

Şekil 5'te 700 ve 800°C'de 5 saat süresince plazma pasta ve kutu borlanmış 21NiCrMo2 çeliğinin XRD analizleri görülmektedir. Her iki borlama işlemi sonucunda çift fazlı (FeB+ Fe<sub>2</sub>B) borür tabakası elde edilmiştir. Plazma pasta borlama yöntemiyle borlanan numunelerde, FeB ve Fe<sub>2</sub>B faz şiddetinin Ekabor II tozuyla borlanan numunelere göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Plazma pasta ve kutu borlama

sıcaklığının artmasıyla birlikte FeB fazında artış görülürken, Fe<sub>2</sub>B fazında ise azalma meydana gelmiştir. SiC takviyeli B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pastalı numunelerde (B<sub>4</sub>C takviyeli B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pastalı numunelere göre) Fe<sub>2</sub>B fazının FeB fazına göre biraz daha baskın olduğu tespit edilmiştir. B<sub>4</sub>C takviyeli B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pastalı

numunelerde ise % B<sub>4</sub>C karışım oranının artması FeB fazını artırmıştır. % SiC miktarının artmasıyla birlikte FeB oranında azalma meydana gelmiştir. Ortamdaki bor konsantrasyonunun artması FeB fazı oluşumunu artırırken, bor atom potansiyelinin düşmesiyle tek bileşenli Fe<sub>2</sub>B fazı oluştuğu bilinmektedir [24, 25].



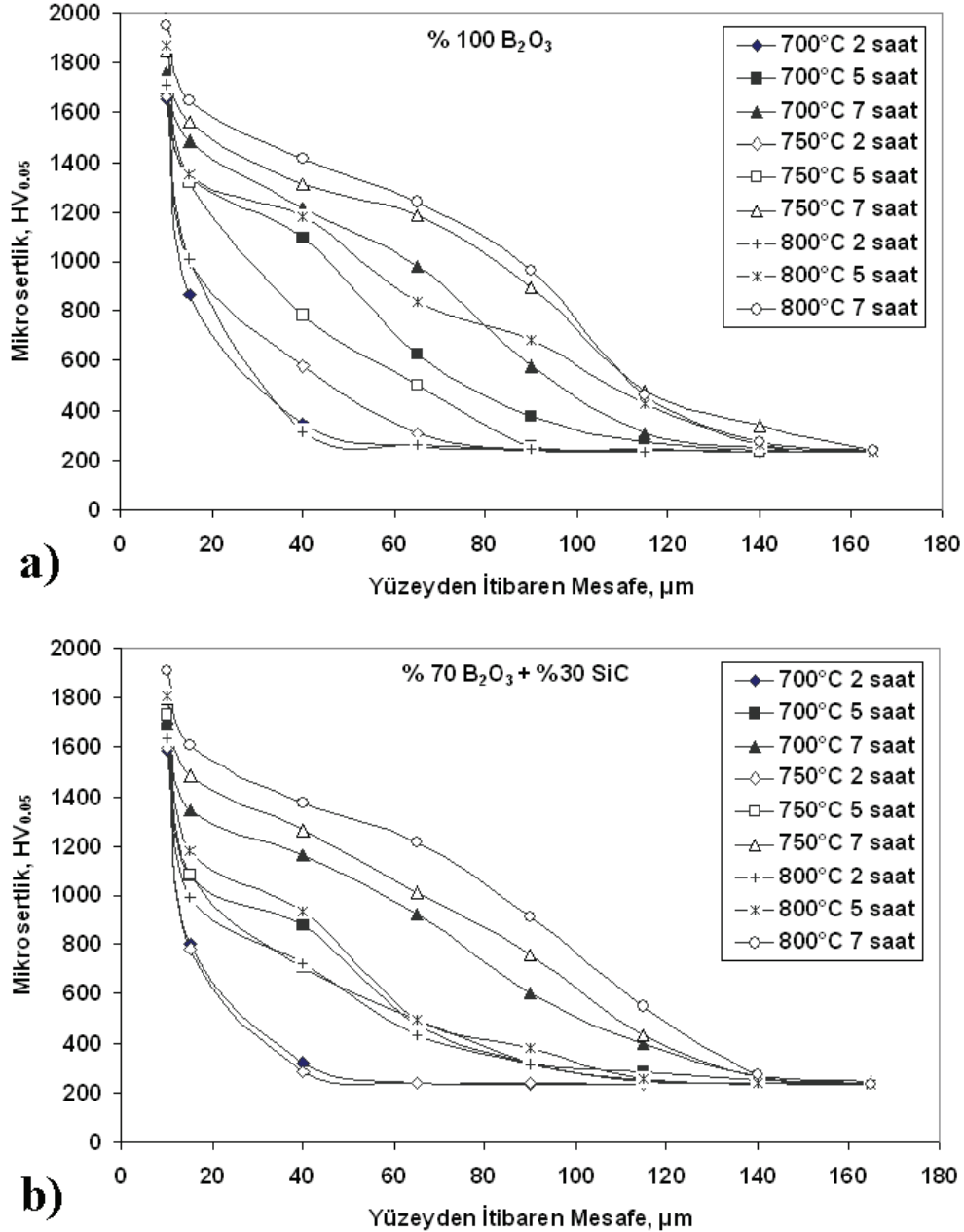
Şekil 5. Plazma pasta ve Ekabor II tozuyla kutu borlanmış 21NiCrMo2 çeliğine ait XRD paternleri a) 700°C PPB, b) 800°C PPB, c) Ekabor II (Kutu) (The X-ray diffraction patterns of plasma paste and pack boronized 21NiCrMo2 steel)



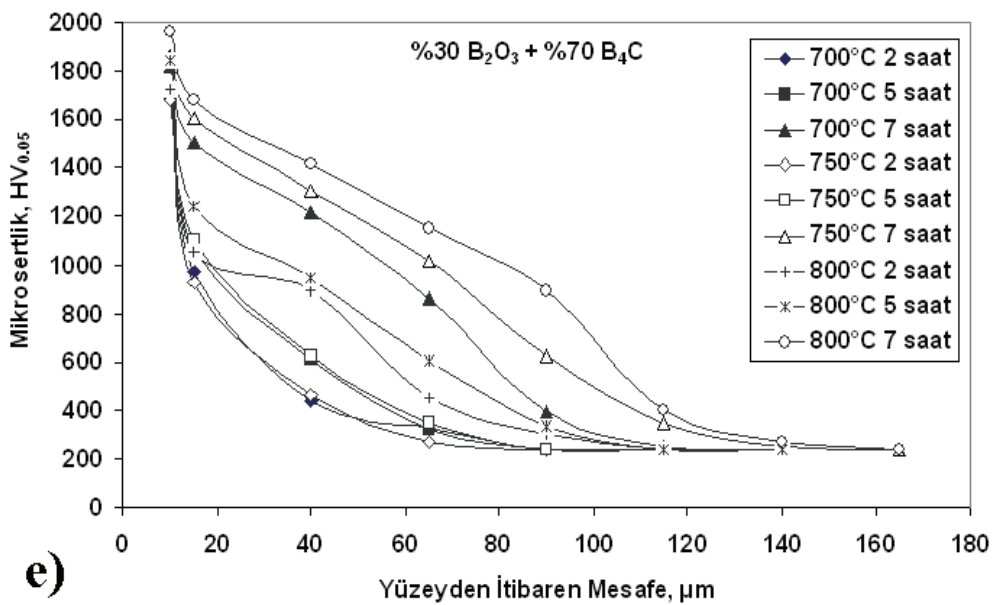
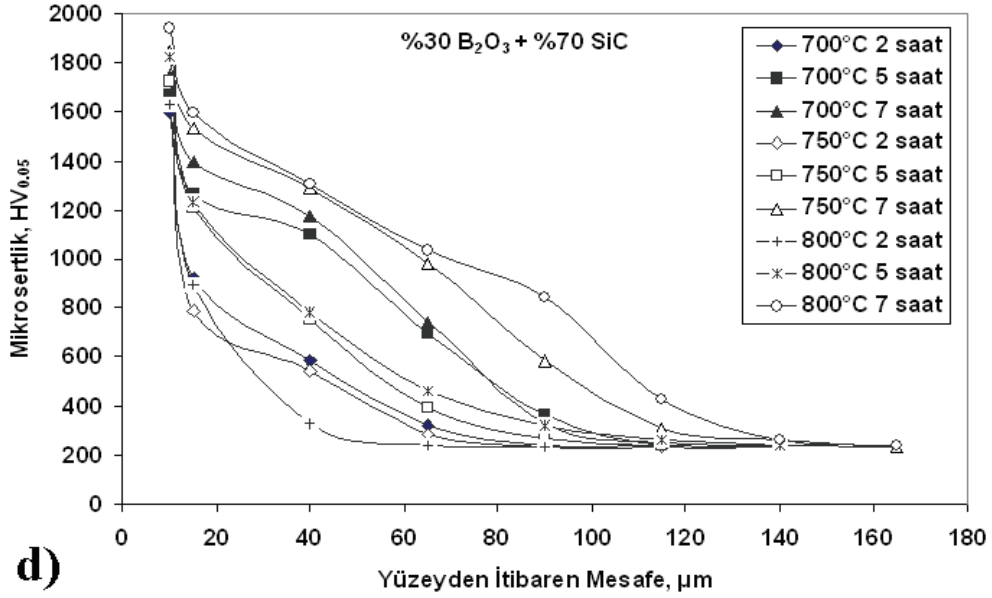
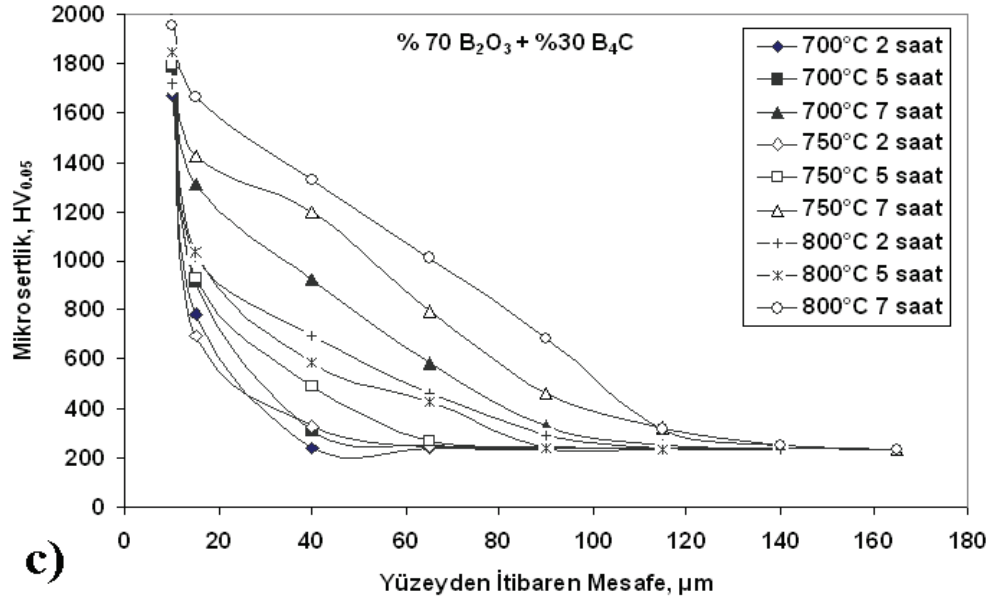
### 3.2 Mikrosertlik (Microhardness)

Şekil 6'da 700, 750 ve 800°C'de 2, 5 ve 7 saat süresince farklı % B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> karışımlarda plazma pasta, Şekil 7'de Ekabor II tozuyla kutu borlanmış 21NiCrMo2 çeliğine ait yüzeyden içeriye doğru sertlik dağılımlarını gösteren grafikler verilmiştir.

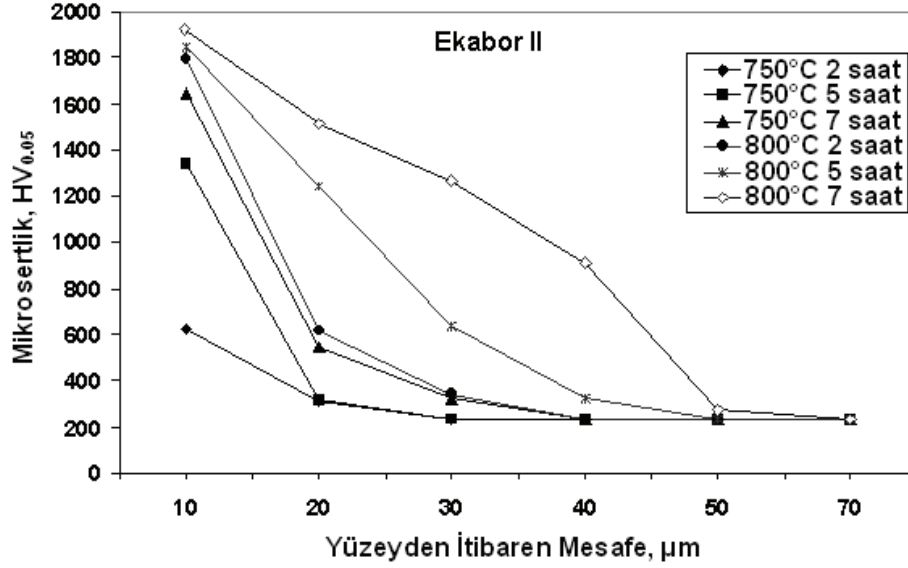
Ekabor II ve plazma pasta borlama sonucunda oluşan FeB ve Fe<sub>2</sub>B fazından dolayı yüzey sertliklerinin yüksek olduğu görülmektedir. FeB fazının Fe<sub>2</sub>B fazına göre daha yüksek sertlik değerlerine sahip olduğu bilinmektedir [4, 26, 27].



**Şekil 6.** Farklı % B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pasta karışımlarında plazma pasta borlanmış 21NiCrMo2 çeliğinin yüzeyden içeriye doğru sertlik dağılımı, a) 100 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, b) 70 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 30 SiC, c) %70 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + %30 B<sub>4</sub>C, d) 30 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 70 SiC, e) 30 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 70 B<sub>4</sub>C (From surface to core hardness distribution of the steel plasma paste boronized 21NiCrMo2 steel in different % B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> paste mixtures)



Şekil 6. Devamı (Continue)



**Şekil 7.** Ticari Ekabor II tozuyla farklı sıcaklık ve sürelerde kutu borlanan 21NiCrMo2 çeliğinin yüzeyden içeriye doğru sertlik dağılımı (From surface to core hardness distribution of the steel pack boronized 21NiCrMo2 steel in different temperature and times)

700°C'de 2 saat PPB sonucunda en düşük sertlik 1583 HV<sub>0,05</sub> %70 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + %30 SiC karışımli bor pastasında elde edilirken, en yüksek 1992 HV<sub>0,05</sub> ile 800°C'de 7 saat PPB %30 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + %70 B<sub>4</sub>C pastasında elde edilmiştir. Ticari Ekabor II tozuyla 800°C'de 7 saat kutu borlama sonucunda 1951 HV<sub>0,05</sub> sertlik değeri elde edilmiştir. Borlama sıcaklığının ve süresinin artmasıyla birlikte FeB fazından dolayı numunelerin sertlik değerlerinde artış meydana gelmiştir [28-31].

% B<sub>4</sub>C miktarının B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pastasında artmasıyla numunelerin sertlik değerlerinde artışlar meydana gelmiştir. SiC takviyeli B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pasta karışımlar, B<sub>4</sub>C takviyelilere göre daha düşük sertlik değerlerine sahip oldukları gözlenmiştir. B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozuna B<sub>4</sub>C ilave edilmesiyle numune yüzeylerindeki sertlik değerlerinde artış meydana getirmiştir. Silisyum borür tabakası içinde çözünmeyerek genellikle difüzyon bölgesinde bulunur ve ferrit fazı meydana gelmesine sebep olur. Borlama sırasında çeliğin iç kısımlarına doğru itilerek borür tabakası ile metal ara yüzeyinde mekanik özellikleri olumsuz yönde etkileyen bileşiklerin oluşmasına neden olur [28, 32-34].

Plazma pasta borlama işlemiyle daha düşük sıcaklık ve sürelerde geleneksel borlama yöntemlerine göre daha büyük borür tabakaları elde edilebildiğinden dolayı mikrosertlik değerlerinin geleneksel borlamaya [35,36] göre biraz daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

- Farklı % B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pasta karışımlarıyla plazma ortamında plazma pasta ve ticari Ekabor II tozuyla elektrik rezistanslı bir fırında 700, 750 ve 800°C'de

2, 5 ve 7 saat süresince 21NiCrMo2 çeliği başarıyla borlanmıştır.

- Metalografik incelemeler sonucunda, kaplama/matris ara yüzeyi ve matrisin belirgin olarak birbirinden ayrıldığı ve borür tabakasının kolosal bir yapıya sahip olduğu gözlenmiştir.
- Her iki yöntemde borlama işlem sıcaklık ve süresinin artmasıyla birlikte numunelerin tabaka kalınlıklarında artışlar gözlenmiştir.
- Plazmanın kimyasal reaksiyonu daha fazla etkinleştirmesinden dolayı benzer sıcaklıklarda PPB yöntemiyle, normal kutu borlamadan daha kalın borür tabakası elde edilmiştir.
- X-ışınları difraksiyon analizi sonuçlarında, plazma pasta ve Ekabor II tozuyla kutu borlama sonucunda çift fazlı yapı (FeB + Fe<sub>2</sub>B) elde edilmiştir.
- 800°C'de 7 saat süresince plazma pasta borlama yöntemiyle 1992 HV<sub>0,05</sub> sertlik değeri elde edilirken, ticari Ekabor II tozuyla kutu borlama sonucunda 1951 HV<sub>0,05</sub> sertlik değeri elde edilmiştir.
- Plazma pasta borlama yöntemiyle, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> gibi ülkemizde fazla bulunan bor kaynaklarının kullanılıyor olması bor tüketimine ve bor kaynaklarının faydalı bir alanda kullanımına imkan sağlayacaktır.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışma "2009- Ç0246" numaralı BOREN projesi olarak Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü tarafından desteklenmiştir.



**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

1. Goeuriot F. P., Thevenot, J., Driver, H., "Surface Treatment of Steels: Boridif, a New Boriding Process", **Thin Solid Films**, 78, 67-76, 1981.
2. Bozkurt, N., **Bor Yayını ile Çeliklerde Yüzey Sertleştirme**, Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 1984.
3. Ozbek I., Akbulut H., Zeytin S., Bindal C., Ucısık A.H., "The Characterization of Borided %99,5 Purity Nickel", **Surface and Coatings Technology**, 126:166-170, 2000.
4. Sinha, A.K., 1991, Boriding, ASM Handbook, 4:437-447.
5. Ozbek, I., Konduk, B. A., Bindal, C., Ucısık, A.H., "Characterization of Borided AISI 316 L Stainless Steel Implant", **Vacuum**, 65, 521-525, 2002.
6. Yoon, J. H., Jee, Y. K., Lee, S. Y., "Plasma Paste Boronizing Treatment of the Stainless Steel AISI 304", **Surface and Coatings Technology**, 112, 71-75, 1995.
7. Pertek, A., Kukla, M., "Characterization of Complex (B+C) Diffusion Layers Formed on Chromium and Nickel-Based Low Carbon Steel", **Applied Surface Science**, 202, 252-260, 2002.
8. Küper A., Qiao, X., Stock, H.R., Mayr, P., "A Novel Approach to Gas Boronizing", **Surface and Coatings Technology**, 130, 87-94, 2000.
9. Nam, K. S., Lee, K. H., Lee, S. R., Kwon, S. C., "A Study on Plasma-Assisted Boriding of Steels", **Surface and Coatings Technology**, 98, 886-890, 1998.
10. Hunger, H. J., Löbig, G., "Generation of Boride Layers on Steel and Nickel Alloys by Plasma Activation of Boron Trifluoride", **Thin Solid Films**, 310, 244-250, 1997.
11. Filep, E., Farkas, S., "Kinetics of plasma-assisted boriding", **Surface and Coatings Technology**, 199, 1-6, 2005.
12. Cabeo, E. R., Laudien, G., Biemer, S., Rie, K.-T., Hoppe, S., "Plasma-Assisted Boriding of Industrial Components in a Pulsed d.c. Glow Discharge", **Surface and Coatings Technology**, 116-119, 229-233, 1999.
13. Bartsch, K., Leonhardt, A., "Formation of Iron Boride Layers on Steel by d.c.-Plasma Boriding and Deposition Processes", **Surface and Coatings Technology**, 116-119, 386-390, 1999.
14. Güneş, I., Ulker, U., Taktak, S., "Plasma Paste Boronizing of AISI 8620, 52100 and 440C steels" **Materials and Design**, Inpress.
15. Kulka, M., Pertek, A., "The Importance of Carbon Content Beneath Ironborides After Boriding Of Chromium and Nickel-based Low-carbon Steel", **Applied Surface Science**, 214, 161-171, 2003.
16. Tabur, M., İzçiler, M., Gul, F., Karacan, I., "Abrasive Wear Behavior of Boronized AISI 8620 Steel", **Wear**, 266, 1106-1112, 2009.
17. Oliveria, C. K. N., Casteletti, L. C., Lombardin, A., Totten, G. E., Heck, S. C., "Production and Characterization of Boride Layers on AISI D2 Tool Steel", **Vacuum**, 84, 792-796, 2010.
18. Lou, D. C., Akselsen, O. M., Solberg, J. K., Onsoien, M. I., Berget, J., Dahl, N., "Silicon-Boronizing of Nimonic 90 Superalloy", **Surface and Coatings Technology**, 200, 3582-3589, 2006.
19. Sahin, S., "Effects of Boronizing Process on the Surface Roughness and Dimensions of AISI 1020, AISI 1040 and AISI 2714", **Journal of Materials Processing Technology**, 209, 1736-1741, 2009.
20. Er, U., Par, B., "Wear of Plowshare Components in SAE 950C Steel Surface Hardened by Powder Boriding", **Wear**, 261, 251-255, 2006.
21. Meriç, C., Şahin, S. ve Yılmaz, S. S., "Investigation of The Effect on Boride Layer of Powder Particle Size Used in Boronizing with Solid Boron-Yielding Substances", **Materials Research Bulletin**, 35, 2165-2172, 2000.
22. Atik, E., Yunker, U., Meric, C., "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, 2003.
23. Bejar, M. A., Henríquez, R., "Surface Hardening of Steel by Plasma-Electrolysis Boronizing", **Materials and Design**, 30, 1726-1728, 2009.
24. Chen, X. J., Yu, L. G., Khor, K. A., Sundararajan, G., "The Effect of Boron-Pack Refreshment on the Boriding of Mild Steel by the Spark Plasma Sintering (SPS) Process", **Surface and Coatings Technology**, 202, 2830-2836, 2008.
25. Yu, L. G., Chen, X. J., Khor, K. A., Sundararajan, G., "FeB/Fe<sub>2</sub>B Phase Transformation During SPS Pack-Boriding: Boride Layer Growth Kinetics", **Acta Materialia**, 53, 2361-2368, 2005.
26. Bindal, C., **Ticari Karbon Çelikleri ve Düşük Alaşımli Çeliklerin Yüzeyine Borlamayla Seramik Kompozit Kaplama ve Bazı Malzeme Özelliklerine Etkileri**, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1991.
27. Sen, S., Ozbek, I., Sen, U., Bindal, C., "Mechanical Behavior of Borides Formed on Borided Cold Work Tool Steel", **Surface and Coatings Technology**, 135, 173-177, 2001.
28. Ozbek, I., Bindal, C., "Mechanical Properties of Boronized AISI W4 Steel", **Surface and Coatings Technology**, 154, 14-20, 2002.
29. Sen, S., Sen, U., Bindal, C., "The Growth Kinetics of Borides Formed on Boronized AISI 4140 Steel", **Vacuum**, 77, 195-202, 2005.
30. Culha, O., Toparli, M., Sahin, S., Aksoy, T., "Characterization and Determination of Fe<sub>2</sub>B Layers' Mechanical Properties", **Journal of Materials Processing Technology**, 206, 231-240, 2008.

31. Sahin, S., Meriç, C., Saritas, S., “Production of Ferroboron Powders by Solid Boronizing Method”, **Advanced Powder Technology**, 21, 483-487, 2010.
32. Baştürk, S., Erten, M., “Borlama ile YüzeY Sertleştirme Çalışmaları”, **Mühendis Makine Dergisi**, Cilt 47, Sayı 563, 2006.
33. Çelebi, F. G., **31CrMoV9 ve 34CrAlNi7 Çeliklerinin Borlama Kinetiklerinin İncelenmesi**, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2005.
34. Şen, Ş., **Termokimyasal Borlama İşlemi ile AISI 5140, AISI 4140 ve AISI 4340 Çeliklerinin YüzeY Performanslarının Geliştirilmesi**, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 1998.
35. Bindal, C., Üçışık, A. H., “Characterization of Boriding of 0.3% C, 0.02% P Plain Carbon Steel”, **Vacuum**, 82, 90-94, 2008.
36. Ozdemir, Ö., Omar, M. A., Usta, M., Zeytin, S., Bindal, C., Ücisik, A. H., “An Investigation on Boriding Kinetics of AISI 316 Stainless Steel”, **Vacuum**, 83, 175-179, 2008.