



Boro-sinterleme işleminin ham T/M parçaların mikroyapı ve sertlik özelliklerine etkilerinin incelenmesi

Sinan Aksöz^{1*}, Yavuz Kaplan², Engin Tan³

¹Pamukkale Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Kınıklı Kampüsü, Denizli, Türkiye, ORCID ID orcid.org/0000-0003-4324-5043

²Pamukkale Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine ve İmalat Mühendisliği Bölümü, Kınıklı Kampüsü, Denizli, Türkiye, ORCID ID orcid.org/0000-0002-3144-9332

³Pamukkale Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Kınıklı Kampüsü, Denizli, Türkiye, ORCID ID orcid.org/0000-0003-4441-3678

MAKALE BİLGİSİ

Makale geçmişi:
İlk gönderi 26 Kasım 2018
Revize gönderi 28 Mayıs 2019
Kabul 29 Mayıs 2019
Online 30 Haziran 2019

Araştırma Makalesi

DOI: [10.30728/boron.487811](https://doi.org/10.30728/boron.487811)

Anahtar kelimeler:

T/M,
Boro-Sinterleme,
Saf demir,
FeB ve Fe₂B fazları

ÖZET

Bu çalışmada; yüksek saflıkta demir (Fe) tozları preslenmiş ve katı ortamda 4 ve 6 saat boyunca 950°C'de ve 1050°C'de Boro-Sinterleme işlemine (B/S) tabi tutulmuştur. Toz Metalürjisindeki (T/M) ana adımlardan biri olan sinterleme işlemi, borlama işlemi ile aynı anda gerçekleştirilmiştir. Bu sayede borlama ve sinterleme işlemleri tek adımda tamamlanmış ve mikroyapıdaki muhtemel oksit fazları da azaltılmıştır. B/S işleminden sonra sertlik ölçümleri microvickers (HV0.05) yöntemi ile yapılmış ve sertlik profilleri ve kaplama özellikleri incelenmiştir. Numuneler optik mikroskop (OM) ve alan emisyon taramalı elektron mikroskobu (FESEM) ve enerji dağıtıcı spektroskopisi (EDS) ile mikroyapı analizlerine tabi tutulmuştur. Çalışma sonucunda, yüksek saflıkta Fe tozları kullanarak T/M yöntemiyle üretilen numunelere B/S işlemi uygulanarak homojen bir mikroyapının elde edilebileceği belirlenmiştir. Elde edilen sertlik profillerinden mikroyapıda istenen koşulları sağlamak için B/S işleminin başarıyla uygulanabileceği görülmüştür.

Investigation of the effects of boro-sintering process on the microstructure and hardness properties of raw P/M parts

ARTICLE INFO

Article history:
Received 26 November 2018
Revised form 28 May 2019
Accepted 29 May 2019
Available online 30 June 2019

Research Article

DOI: [10.30728/boron.487811](https://doi.org/10.30728/boron.487811)

Keywords:

P/M,
Boro-Sintering,
Pure iron,
FeB and Fe₂B phases

ABSTRACT

In this study; high purity iron (Fe) powders were pressed and subjected to Boro-Sintering (B/S) at 950 °C and 1050 °C for 4 and 6 hours in solid medium. The sintering process, which is one of the main steps in Powder Metallurgy (P/M), was carried out simultaneously with the boriding process. By this way the boriding and sintering processes (B/S) were completed in a single step and the possible oxide phases in microstructure were also decreased. After B/S process, hardness measurements were carried out by microvickers (HV0.05) method and hardness profiles and coating qualities were investigated. Samples were subjected to microstructure analyses by optical microscopy (OM) and field emission scanning electron microscopy (FESEM) and energy dispersive spectroscopy (EDS). As a result of the study, it was determined that a homogeneous microstructure could be obtained by applying B/S process to the samples produced by P/M method using high purity Fe powders. It was seen that B/S process can be applied successfully to provide the desired conditions in the microstructure from the obtained hardness profiles.

1. Giriş (Introduction)

Toz Metalürjisi (T/M) net şekle yakın parçaların üretiminde tercih edilen düşük maliyetli, etkili bir imalat yöntemidir [1]. T/M yöntemi yüksek hassasiyet ve iyi mekanik özellik gerektiren ürünlerin imalatında döküm gibi geleneksel imalat yöntemleriyle kıyaslandığında seri üretim için daha esnek ve uygulanabilir. Özellikle otomotiv sektöründeki yüksek performans

gerektiren dişli, piston kolu ve mil yatağı gibi mekanik parçalar için tercih edilmektedir [2–5]. Demir esaslı T/M parçaların üretiminde kullanılan yöntemlerin başında geleneksel presleme-sinterleme yöntemi gelmekte olup [6], Fe alaşımlarının kullanım yaygınlığı nedeniyle Fe alaşımlarının T/M yöntemi ile üretimine yönelik birçok yeni teknik geliştirilmekte ve bu yöntemlerin kullanım alanları giderek artmaktadır [7]. Fe ve alaşımlarının T/M yöntemi ile üretimi, gelişen teknoloji

*Sorumlu yazar: saksoz@pau.edu.tr

ile kullanım şartlarına bağlı olarak, üretilen parçaların mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi ile doğrudan ilişkilidir [8]. T/M işlemi genel olarak dört aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamalar; metal tozlarının üretimi, tozların karıştırılması, kalıp içerisinde preslenmesi ve sinterleme işlemleridir. Toz parçacıklarının arasında sıkı bağ oluşturulması, preslenen toz metal ham parçaların, ergime sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta ısıtılması yani sinterlenmesiyle sağlanmaktadır [9].

Borlama demir esaslı metallere, demir dışı metallere ve sermetlere uygulanabilen termokimyasal bir yüzey sertleştirme işlemidir. İşlem genellikle 700-1000°C sıcaklık aralığında 1-12 saat arası sürelerde malzemenin bor kaynağı; katı, sıvı, gaz veya pasta ortamlarında bekletilmesiyle gerçekleşir [10]. Borlama işlemi ile yüzeyde oluşturulan bor tabakası yüksek sertlik değerlerine (1450-5000 HV) ulaşmakta ve parça bu sertliği yüksek sıcaklıklarda koruyabilmektedir. Yüksek yüzey sertliği ve düşük sürtünme katsayısı kombinasyonu ile adezyon ve abrazyon aşınması başta olmak üzere, korozyon ve yüksek sıcaklık oksidasyonu hasarına karşı da önemli dayanım borlama işlemi ile elde edilebilmektedir [11].

T/M yöntemi ile üretilen parçalarda borlama işlemi genellikle sinterleme sonrası ayrı bir işlem olarak uygulanmaktadır. T/M yöntemi ile üretilen parçaların sinterleme aşamasında aynı zamanda borlanması işlemi ise Boro-Sinterleme (B/S) olarak adlandırılmaktadır [12]. B/S konusunda yapılan çalışmalar literatürde oldukça yenidir. B/S'nin en önemli avantajı mikroyapı özelliklerini olumlu yönde etkilemesi ve proses işlem basamaklarını azaltarak maliyet ve zamanda iyileşme sağlamasıdır. Bu çalışmada, yüksek saflıktaki Fe tozları preslenerek ham numuneler üretilmiş ve üretilen numuneler 950°C ve 1050°C'de 4 ve 6 saat, B/S işlemine tabi tutulmuştur. Bu sayede hem yapıda oluşması muhtemel oksit en aza indirilmiş, hem de tek seferde sinterleme ve borlama işlemi gerçekleştirilerek T/M yöntemi ile üretimde yeni bir yaklaşım ortaya konulmaya çalışılmıştır.

2. Malzemeler ve yöntemler (Materials and methods)

2.1. T/M numunelerin hazırlanması (Preparation of P/M samples)

Bu çalışmada, yüksek saflıktaki Fe tozları kullanılarak T/M yöntemi ile parça üretimi gerçekleştirilmiştir. Kullanılan Fe tozları gaz atomizasyon yöntemi ile üretilmiş,

≤50µm boyutunda, düzensiz ve küresel şekilli toz yapısına sahiptir. Ham numunelerin üretiminde optimum basınç değeri yaklaşık 780 MPa basınç olarak bulunmuş ve bütün numuneler bu basınç altına hidrolik preste soğuk olarak preslenerek, yaklaşık Ø10x10mm çapında numuneler elde edilmiştir. Presleme işleminde kullanılmak üzere, AISI D3 (1.2080) takım çeliğinden kalıp ve zımbalar imal edilmiştir. Presleme işlemi ile tozlara ham mukavemet kazandırılmış, bununla birlikte B/S aşamasında parçaların şekil ve boyutlarını koruyabilmesi sağlanmıştır.

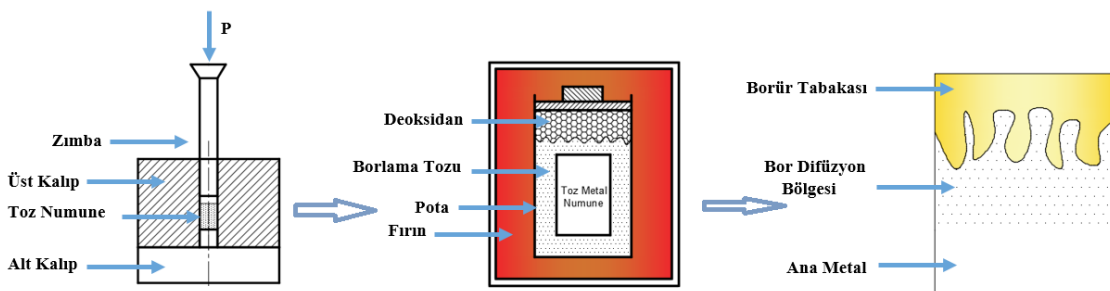
2.2. Ham numunelere B/S işleminin uygulanması (Application of B/S process to raw samples)

B/S işlemi %40 B₂C (Bor Karbür), %40 SiC (Silisyum Karbür) ve %20 Al'dan (Alüminyum) oluşan toz karışımında 950°C ve 1050°C'de 4 ve 6 saat süreyle gerçekleştirilmiştir. Borlama karışımındaki B₂C bor kaynağı, SiC aktivatör ve Al ise deoksidan olarak kullanılmıştır. Aktivatörler borür tabakasının düzenli büyümesini sağlarken deoksidanlar ise borlama sıcaklığındaki oksijeni tutarak oksitlenmeyi engeller. Borlama karışımında kullanılan tozların tane büyüklüğü ≤50µm'dir. Hazırlanan karışım ile koruyucu gaz atmosferi ya da vakum ortamına ihtiyaç duyulmamıştır. B/S işleminin şematik gösterimi Şekil 1.'de verilmiştir.

2.3. Mikrosertlik ve mikroyapı analizi (Microhardness and microstructure analysis)

B/S işlemi sonrası sertlik ölçümleri HV0,05 mikrosertlik skalasında gerçekleştirilmiştir. Her deney için en az 3 ölçüm yapılmış ve ortalama değerleri alınmıştır. Mikroyapı analizi için, numune yüzeyleri 200, 400, 600, 800, 1000 ve 1200'lük zımparalarla zımparalanmış ve 3 µm ve 6 µm'lik elmas solüsyonlarla parlatılmıştır. Zımparlama ve parlatma işlemi sonunda numuneler %5 Nital çözeltisiyle dağlanmışır.

Numunelerin mikroyapı karakterizasyonu; Optik Mikroskop (OM), Alan Emisyon Taramalı Elektron Mikroskobu (FESEM) ve Element Dağılım Spektrometresi (EDS) analizleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. OM görüntüleri NIKON marka ECLIPSE-LV150NL model optik mikroskop ile, mikrosertlik ölçümleri HARDWAY marka DV-1AT-4.3 model mikrosertlik cihazıyla gerçekleştirilmiştir. FESEM ve EDS analizleri için Zeiss marka SUPRA 40VP model taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır.



Şekil 1. B/S işleminin şematik gösterimi (Schematic representation of B/S process).

3. Sonuçlar ve tartışma (Results and discussion)

3.1. Mikroyapı analizi (Microstructure analysis)

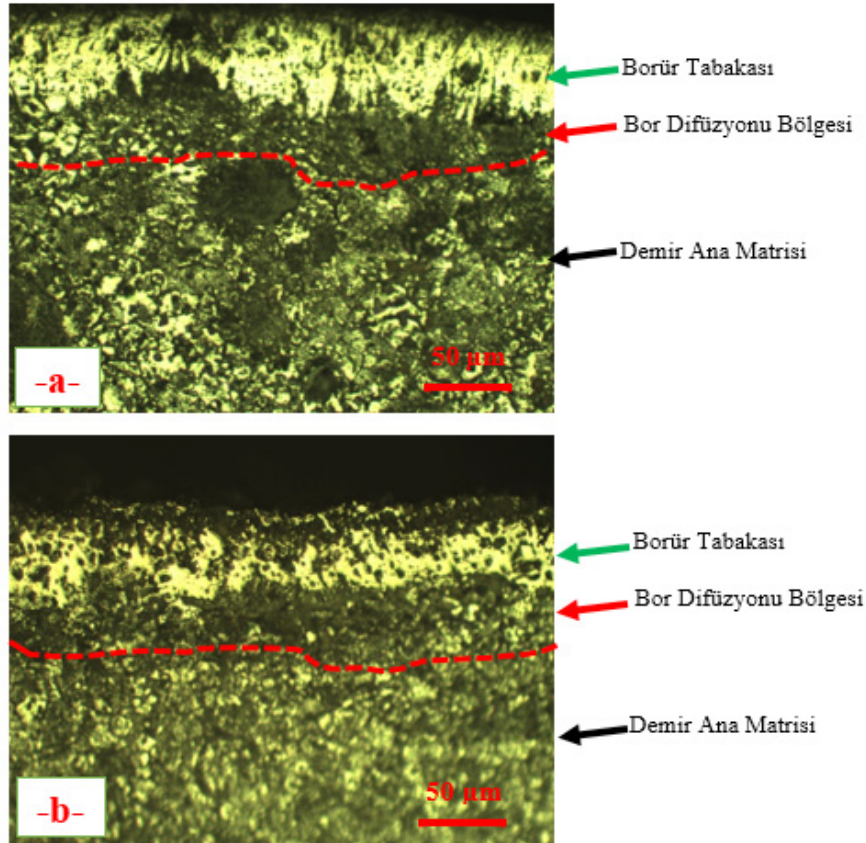
950°C ve 1050°C'de 6 saat B/S işlemi uygulanan numunelerin OM görüntüleri Şekil 2'de verilmiştir.

Şekil 2'de görüldüğü üzere 950°C ve 1050°C'de 6 saat süre ile gerçekleştirilen B/S işlemi sonucunda, bor tabakası yüzeyde homojen olarak elde edilmiştir. Demir esaslı malzemelerin borlanmasıyla yüzeyde iki fazlı FeB+Fe₂B veya tek fazlı FeB veya Fe₂B demir borürleri oluşur [13]. Demir borürler de kendi içerisinde iki farklı yapıda olabilir. Birincisi testere dişi görümlü yapı, ikincisi ise daha düz formda oluşan demir borür yapısıdır. Testere dişi görümlü yapı borür tabakasının ana malzemeye daha iyi tutunmasını sağladığı için düz olan borür yapısına göre daha iyi mekanik özellikler sergiler [14-23]. 950°C'de 6 saat B/S işlemi sonucu (Şekil 2.a) daha dişli bir yapı elde edilirken, 1050°C'de 6 saat B/S işleminde (Şekil 2.b) daha düz bir borür tabakası elde edilmiştir. Borlama işleminde, bor atomlarının metal yüzeye difüzyonu ara yer atomu olarak gerçekleşir ve yüzeyde sert bir borür tabakası oluşur [24-28]. Borlama ve sinterleme işleminde çeper bölgelerde borlama mekanizması ile birlikte oluşan sinterleme işlemi aktif olarak rol oynadığı görülürken, iç bölgelerde T/M parça üretimindeki sinterlemede oluşan mekanizmanın hâkim olduğu görülmektedir [29]. Liu ve ark., bor tozlarını, Fe tozu ile üretilen alaşımlarda

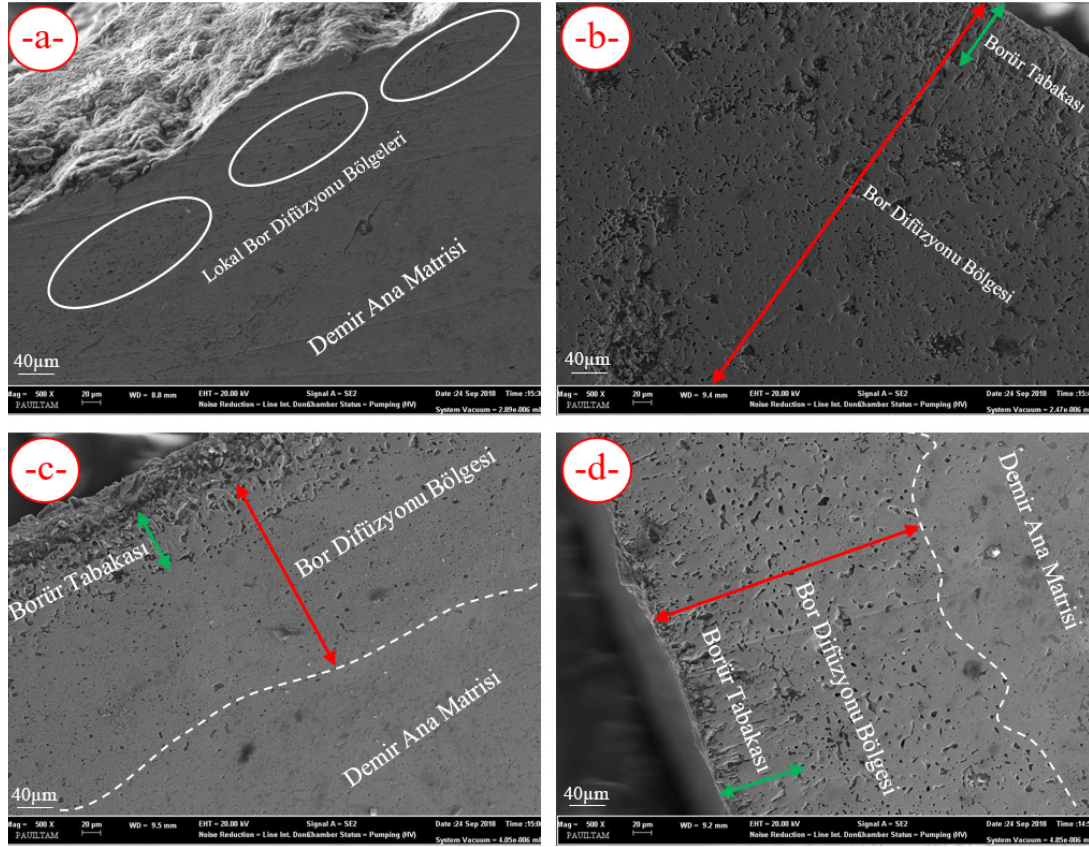
sinterleme işlemini yoğunlaştırmayı teşvik etmek için sıvı faz oluşturmuşlar ve böylelikle yoğunluk artışını sağlayabilmişlerdir. Yapıda bulunan karbon oranının yoğunluğu doğrudan etkilediğini ve artan karbon oranının yoğunluğu düşüreceğini göstermişlerdir [30]. Bu nedenle iç bölgelerde borlama mekanizmasının etkin olmayışı ile karbon içeriğinin bu bölgelerde azalmasına ve gözenekli yapının giderilmesi sağlanabilmiştir. Özellikle 1050°C'de sinterleme ile istenilen son nihai yapı elde edilmiştir (Demir ana matrisi bölgesi – Şekil 3 c ve d) [31].

Şekil 3-6'da farklı süre ve sıcaklıklarının mikroyapıya etkilerini incelemek üzere gerçekleştirilen FESEM ve FESEM görüntüleri üzerinden alınan EDS analizleri verilmiştir. Şekil 3.a'da görüldüğü üzere, 950°C ve 4 saat parametrelerinde bor tabakası görülememektedir. Ancak yapıda yaklaşık 50µm derinliğine kadar ince bir katman olarak oluşmuştur. Bu sonuç sertlik analiz sonuçlarında daha detaylı olarak değerlendirilecektir. Aynı sıcaklıkta sürenin artmasıyla birlikte Şekil 2.a ve Şekil 3.b'de görüldüğü üzere numunelerin yüzeyinde bor tabakası oluşumu daha net bir şekilde görülebilmektedir.

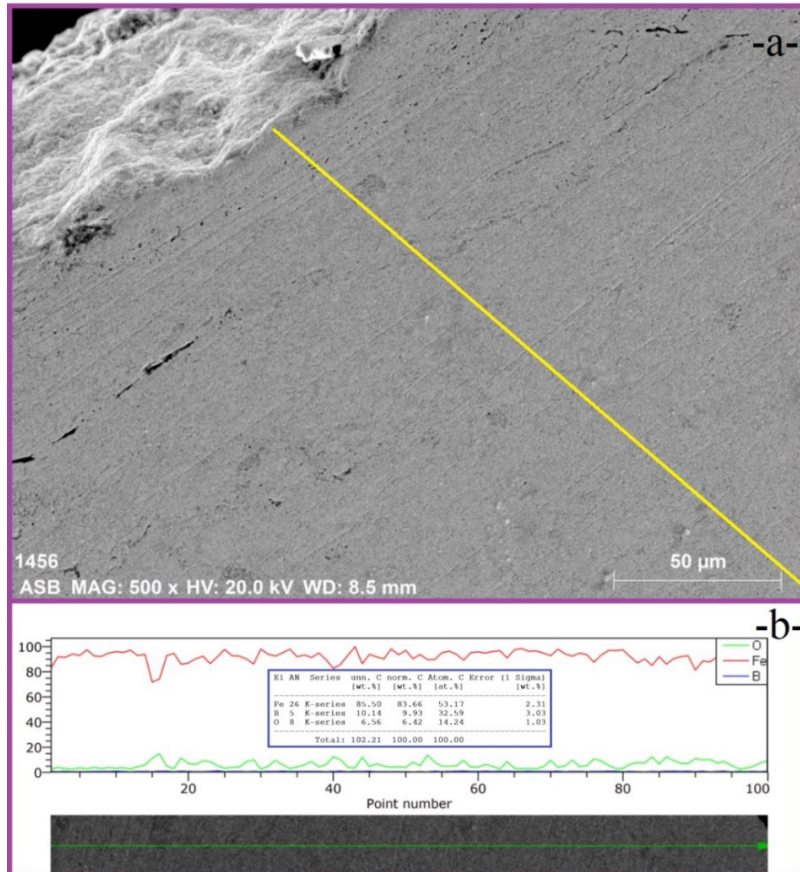
1050°C'de 4 ve 6 saat süre ile B/S uygulanan numunelerin yüzeyinde bor difüzyonuna bağlı olarak daha süresiz bir mikroyapı oluştuğu görülmüştür (Şekil 3 c ve d). Özellikle 6 saat B/S uygulanan numunenin yüzeyinde 80µm'ye yakın bor tabakası oluştuğu



Şekil 2. a) 950 °C ve b) 1050 °C'de 6 saat B/S uygulanan numunelerin OM görüntüleri (OM images of samples applied B/S for 6 hours at a) 950 °C and b) 1050 °C).



Şekil 3. a) 950°C'de 4 saat, b) 950°C'de 6 saat, c) 1050°C'de 4 saat, d) 1050°C'de 6 saat B/S uygulanan numunelerin FESEM görüntüleri (FESEM images of samples applied B/S at a) 950°C for 4 hours, b) 950°C for 6 hours, c) 1050°C for 4 hours, d) 1050°C for 6 hours).



Şekil 4. 950°C'de 4 saat B/S işlemi uygulanan numunenin a) FESEM görüntüsü b) EDS analizi (a) FESEM image, b) EDS analyses of sample applied B/S for 4 hours at 950°C).

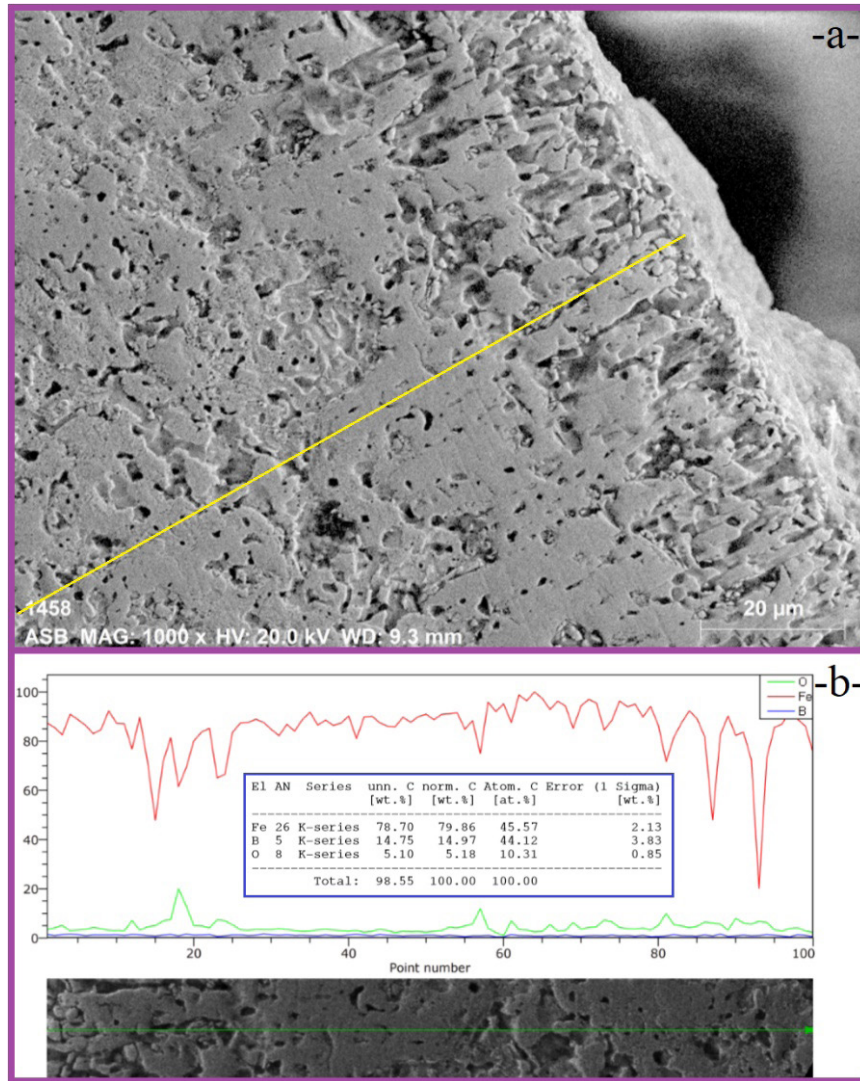
görülmektedir. Şekil 3'ten elde edilen verilere göre, T/M ile üretilmiş Fe tozlarına uygulanan B/S süresinin sıcaklıktan daha etkili olduğu söylenebilir. Şekil 4'te 950°C'de 4 saat borlanan numunenin FESEM görüntüsü (Şekil 4.a) ve görüntü üzerinden alınan çizgisel EDS analizi verileri yer almaktadır (Şekil 4.b).

FESEM üzerinden alınan EDS verileri, 950°C ve 4 saat B/S süresi içerisinde bor difüzyonunun gerçekleştiğini göstermektedir (Şekil 4.b). Bununla birlikte, B/S sıcaklık ve süresinin (950°C-4 saat) yüzeyde tabaka oluşması için yeterli olmadığı görülmektedir. Şekil 5'de 950°C'de 6 saat B/S uygulanan numunenin FESEM görüntüsü (Şekil 5.a) ve görüntü üzerinden alınan çizgisel EDS analizi verileri yer almaktadır (Şekil 5b).

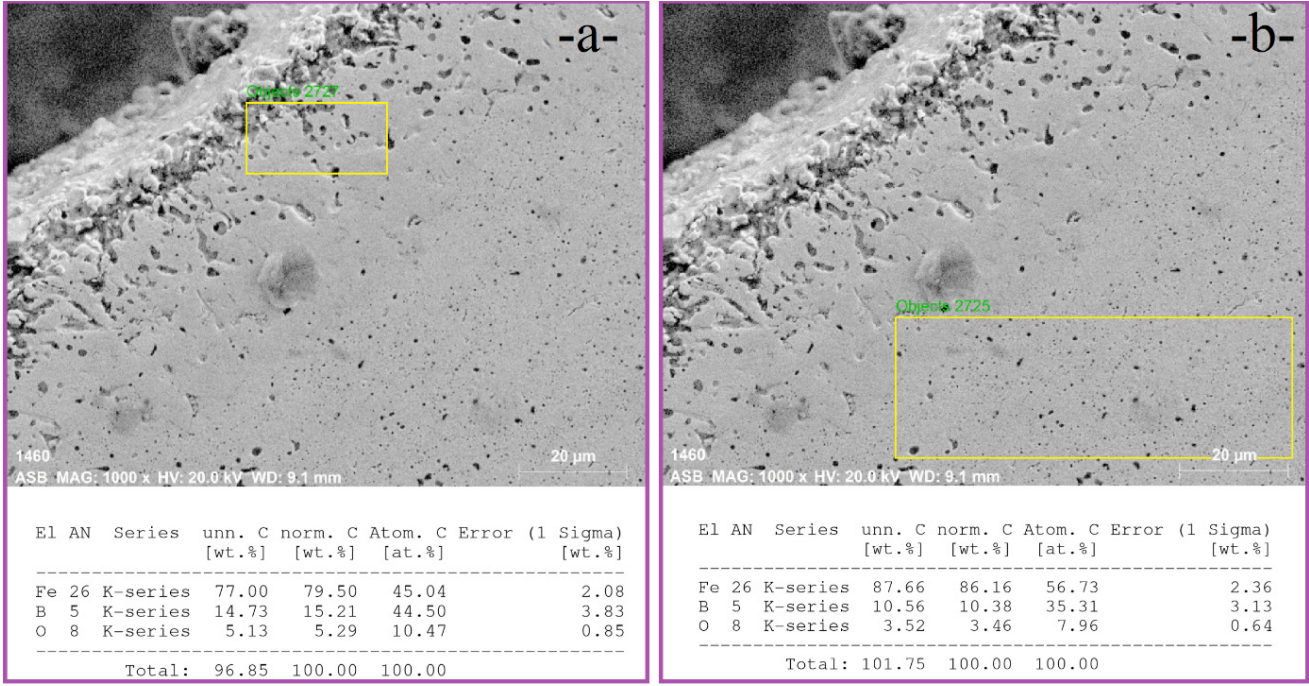
950°C'de 6 saat B/S numunenin yüzeyinde yaklaşık 40µm tabaka oluştuğu, bununla birlikte bor difüzyonunun merkeze doğru devam ettiği tespit edilmiştir (Şekil 5.a ve 2.a). EDS analizi verilerine göre, yapıda %79,86 Fe ve %14,97 B elementlerinin bulunduğu tespit edilmiştir. Bu değerler yapıda oluşması muhtemel

FeB ve Fe₂B gibi fazların varlığını ve B içeriğinin yapıda homojen olarak dağıldığını gösterir niteliktedir [32]. Buna göre, B elementinin mikroyapıda yüzeyden merkeze doğru homojen olarak yayıldığı ve T/M yöntemi ile homojen borür tabakasının elde edilebileceği söylenebilir. 1050°C'de 6 saat B/S numunede oluşan FeB tabakasının mikroyapıdaki dağılımını incelemek üzere gerçekleştirilen FESEM ve çizgisel EDS analizi verileri Şekil 6'da verilmiştir.

Parçanın yüzeyinde ağırlıkça B oranının %15,21 (Şekil 6.a), daha iç bölgeden alınan EDS analizi verisinde ise %10,38 olduğu görülmektedir (Şekil 6.b). Bu sonuçlar ile parçanın en dış kısmında bulunan tabakanın FeB fazına ait olduğu tespit edilmiştir. Sert bir faz olan FeB fazının parçanın iç kısımlarına doğru gidildikçe azalacağı ve bu sebeple de sertliğin düşeceği açıktır. Oluşan borür fazlarının genel itibari ile FeB ve Fe₂B fazlarına ait olduğu bilinmekte olup [33-34] bor difüzyonu süresinin arttırılmasıyla oluşacak borür tabakasının kalınlığının ve bor difüzyon bölgesinin artacağı bilinmektedir [35].



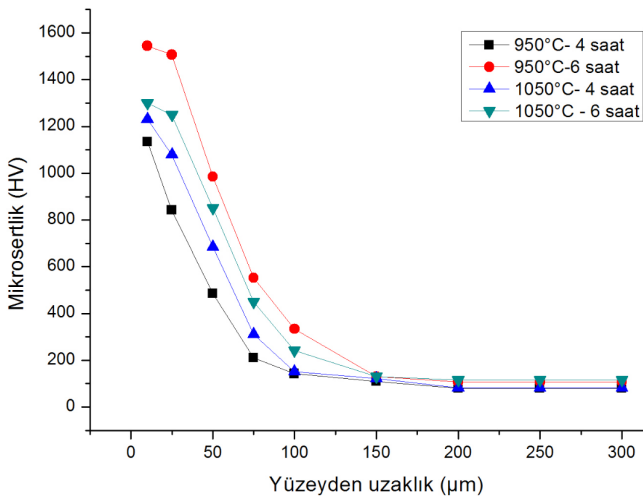
Şekil 5. 950°C'de 6 saat B/S uygulanan numunenin a) FESEM görüntüsü b) EDS analizi (a) FESEM image, b) EDS analyses of sample applied B/S for 6 hours at 950°C).



Şekil 6. 1050°C'de 6 saat B/S sonrası numunenin farklı bölgelerden alınan FESEM görüntüleri ve EDS analizi, a) Yüzey bölgesi, b) İç bölgeler (FESEM images and EDS analysis taken from different regions of the sample after 6 hours B/S at 1050°C, a) Surface region, b) Internal zones).

3.2. Mikrosertlik ölçüm sonuçları (Microhardness measurement results)

950°C'de 4-6 saat ve 1050°C'de 4-6 saat B/S sonrası numunelerin mikrosertlik sonuçları Şekil 7'de verilmiştir. Sonuçlara göre, en yüksek sertlik değeri 950°C'de 6 saat B/S uygulanan numunede ve en düşük sertlik değeri 950°C'de 4 saat B/S uygulanan numunede elde edilmiştir. Ayrıca bor difüzyon bölgesi boyunca (200µm) tüm mesafelerde en yüksek sertlik değerleri yine 950°C'de 6 saat B/S sonucu elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre, B/S işlemi uygulanan T/M parçalar için sürenin çok etkin bir parametre olduğu söylenebilir.



Şekil 7. B/S numunelerin mikrosertlik profili (Microhardness profile of B/S samples).

4. Sonuçların değerlendirilmesi (Conclusions)

Saf demir tozlarından T/M yöntemi ile üretilen numunelere farklı süre ve sıcaklıklarda uygulanan B/S işleminin mikro yapı ve sertlik özelliklerine etkileri aşağıda sunulmuştur;

- Çalışmada, yüksek saflıktaki Fe tozları kullanılarak T/M yöntemiyle üretilen ham numunelere B/S işlemi başarılı bir şekilde uygulanmıştır.
- B/S işlemi ile yapıda oluşması muhtemel borür fazlarının (FeB ve Fe₂B) daha homojen bir şekilde dağılabildiği ve numunenin iç bölgelerine (200µm) bor difüzyonunun gerçekleştirilebildiği tespit edilmiştir.
- Sertlik açısından en etkin B/S sıcaklığı ve süresi 950°C ve 6 saat olarak belirlenmiştir. Bu sıcaklık ve süredeki B/S işlemiyle yüzeyde yaklaşık 60µm kalınlığında borür tabakası elde edilmiştir.
- EDS incelemelerinde yapıda oluşan bor tabakalarının FeB ve Fe₂B fazlarına ait olduğu ve bu fazların da yapıda en dış katmandan içe doğru sertlikte bir artış sağladığı tespit edilmiştir.
- En yüksek sertlik değeri 950°C sıcaklıkta 6 saat B/S uygulanan numunenin yüzey bölgesinde 1544 HV olarak elde edilmiştir. Bu değer işlem öncesi sertliği yaklaşık 100 HV olan saf demirin sertliğinden 15 kat daha fazladır.
- B/S işlemi uygulanan T/M parçalar için sürenin

sıcaklıktan daha etkin bir parametre olduğu tespit edilmiştir.

- Bu sonuçlar doğrultusunda T/M yöntemiyle üretilen demir esaslı ürünlerin yüksek aşınma direnci istenen uygulamalarda kullanılabileceği öngörülmektedir.

Kaynaklar (References)

- [1] German R., Powder Metallurgy, Science, Metal Powder Industries Federation, Princeton, NJ p.2, 1984.
- [2] Salak A., Ferrous Powder Metallurgy, Cambridge International Science Publishing, Cambridge, 1995.
- [3] Hadrboletz A., Weiss B, Fatigue behavior of iron based sintered material: A review. *Int. Mater. Rev.*, 42 (1), 1-44, 1997.
- [4] Naransimhan K. S., Sintering of powder mixtures and the growth of ferrous powder metallurgy, *Mater. Chem. Phys.*, 67 (1-3), 56-65. 2001.
- [5] German R. M., Powder Metallurgy of Iron and Steel, New York, John Wiley & Sons Inc., 1998.
- [6] Aneta S.N., The effect of the addition of boron on the densification, microstructure and properties of sintered 17-4 PH stainless steel, *Tech. Trans. Mech.*, 85-96, 2-M, 2014.
- [7] Simchi A., Pohl H. Effects of laser sintering processing parameters on the microstructure and densification of iron powder, *Mater. Sci. Eng. A*, 359 (1-2), 119-128, 2003.
- [8] Bayramlı E., Gölgeioğlu Ö., Bülent E. H., Powder metal development for electrical motor applications, *J. of Mater. Process. Technol.*, 161, (1-2), 83-88, 2005.
- [9] ASM Handbook, Vol. 7, Powder Metallurgy., ASM International, USA, 1998.
- [10] Sinha A. K., Boronizing, Heat Treating, ASM Int, 437-447, 1991.
- [11] Matuschka A. G., Boronizing C. Hanser, Munchen, 1980.
- [12] Günen A., Koç V., Kanca E., Gök M. S., Kurt B., Kırar E., Demir M. Effect of boro-sintering process on microstructure and phase formations of P/M AISI 1010 Steel" *The Int. Conf. on Mater. Sci., Mech. Auto. Eng. Techno. in Çeşme-Izmir (IMSMATEC'18)*, 10-12 Nisan, 2018.
- [13] Subrahmanyam J., Gopinath K., Wear studies on boronized mild steel, *Wear*, 95, 287-292, 1984.
- [14] Kusmanov S. A., Tambovskiy I. V., Sevostyanova V. S., Savushkina S.V., Belkin P.N., Anode plasma electrolytic boriding of medium carbon steel, *Surf. Coat. Technol.*, 291, 334-341, 2016.
- [15] Piasecki A., Kulka M., Kotkowiak M., Wear resistance improvement of 100CrMnSi₆₋₄ bearing steel by laser boriding using CaF₂ self-lubricating addition, *Tribol. Int.*, 97, 173-191, 2016.
- [16] Elia-Espinosa M., Ortiz-Domínguez M., Keddám M., Gómez-Vargas O. A., Arenas-Flores A., Barrientos-Hernández F. R., West A. R., Sinclair D. C., Boriding kinetics and mechanical behaviour of AISI O1 steel, *Surf. Eng.*, 31 (8), 588-597, 2015.
- [17] De Oliveira P. G. B., Aureliano R. T., Mariani F. E., Totten G., Casteletti L. C. Boriding of AISI 440B stainless steel and coating characterization, *Proc. of the 29th ASM Heat Treat. Soc. Conf.* 2017.
- [18] Yang H., Wu X., Cao G., Yang Z., Enhanced boronizing kinetics and high temperature wear resistance of H13 steel with boriding treatment assisted by air blast shot peening, *Surf. Coat. Technol.*, 307, 506-516, 2016.
- [19] Prince M., Arjun S. L., Surya Raj G., Gopalakrishnan P., Experimental Investigations on the Effects of Multicomponent Laser Boriding on steels. *Mater. Today: Proc.*, 5 (11), 25276-25284, 2018.
- [20] Keddám M., Espinosa M. E., Domínguez M. O., Simón-Marmolejo I., Pack-boriding of AISI P20 steel: Estimation of boron diffusion coefficients in the Fe₂B layers and tribological behaviour, *Int. J. of Surf. Sci. Eng.*, Vol. 11, No. 6, pp. 563-585, 2017.
- [21] Özsoy A., Çeliğin borlanması borür tabakası, geçiş zonu ve ana matriksin özelliklerinin iyileştirilmesi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Eskişehir, 1991.
- [22] Topuz P., DIN 1.2842 çeliğinin borlanması ile oluşan borür tabakası üzerine borlama sıcaklık ve süresinin etkileri, *BORON*, 1 (1) 15-19, 2016.
- [23] Meriç C., Şahin S., Yılmaz S. S., Investigation of the effect on boride layer of powder particle size used in boronizing with solid boron-yielding substances, *Mater. Res. Bull.*, 35, 2165-2172, 2000.
- [24] Fichtl W., Boronizing and its practical applications, *Mater. in Eng.*, 2, 276-286, 1981.
- [25] Chatterjee-Fischer R., Nitriding and nitrocarburizing Part V., *Hart. -Tech. Mitt.*, 36 (5), 248-254, 1981.
- [26] Dearnley P., Bell T., Engineering the surface with boron based materials, *Surf. Eng.*, 1 (3), 203-217, 1985.
- [27] Fichtl W. J. G., Saving Energy and Money by Boronizing, *Japan Heat Treat. Assoc.*, Tokyo, 25 November 1988.
- [28] Galibois A., Boutenko O., Voyzelle B., Mécanisme de formation des couches borurees sur les aciers a haut carbone technique des pates, *Acta Metall.*, 28, 1753, 1980.
- [29] Sarasola M., Go´mez-Acebo T., Castro F., Microstructural development during liquid phase sintering of Fe and Fe-Mo alloys containing elemental boron additions, *Powder Metall.*, 48 (1), 59-67, 2005.
- [30] Liu J., Cardamone A., Potter T., German R. M., Semel F. J., Liquid phase sintering of iron-carbon alloys with boron additions, *Powder Metall.*, 43, (1), 57-61, 2000.
- [31] Mxolisi Brendon Shongwe M. B., Diouf S., Durowoju M. O., Olubambi P. A., Effect of sintering temperature on the microstructure and mechanical properties of Fe-30%Ni alloys produced by spark plasma sintering, *J. of Alloys Compd.*, 649, 824-832, 2015.
- [32] He X., Xiao H., Ozaydin, F. M., Balzuweit K., Liang H., Low temperature boriding of high-carbon steel, *Surf. Coat. Technol.*, 263, 21-26, 2015.

- [33] Sen S., Sen U., Bindal C., The growth kinetics of borides formed on boronized AISI 4140 steel, Vacuum, 77, 195-202, 2005.
- [34] Carbuicchio M., Palombarini G., Effects of alloying elements on the growth of iron boride coatings, J. of Mater. Sci. Lett., 6 (10), 1147-1149, 1987.
- [35] Şeşen F. E., Özgen Ö. S., A study on electrothermochemical boronizing of an IF steel, J. of Eng. Nat. Sci., 32, 334-347, 2014.