



Matris yapısının ve borlama süresinin Cu-Ni-Mo alaşımlı Kgd'd'in aşınma davranışına etkisinin incelenmesi

Gülcan Toktaş^{1*}, Alaaddin Toktaş¹, Kenan Gülsün²

¹Balıkesir Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Balıkesir, 10145, Türkiye

²Balıkesir Elektromekanik Sanayii A.Ş., 10100, Balıkesir, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Alaşımlı KGDD'e farklı matris yapılar kazandırma
- Borlama işlemi ve borlanmış tabakanın özellikleri
- Borlanmış tabaka ve matris yapının aşınma davranışları

Makale Bilgileri

Geliş: 16.03.2016

Kabul: 29.11.2016

DOI:

10.17341/gazimmfd.322170

Anahtar Kelimeler:

Alaşımlı küresel grafitli
dökme demir,
matris yapı,
borlama süresi,
hacim kaybı

ÖZET

Bu çalışmada Cu-Ni-Mo alaşımlı küresel grafitli dökme demirin aşınma davranışı üzerine matris yapının (perlitik, temper martensitik ve ösferritik) ve 800°C'de borlama süresinin (3, 4,5 ve 6 h) etkileri araştırılmıştır. Aşınma testleri disk üzerinde ball tipi aşınma cihazında 6,8 N yük altında, 6,5 mm/s kayma hızında, oda sıcaklığında, kuru kayma şartlarında gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında sürtünme katsayıları elde edilmiştir. Matris yapıların ve borlanmış tabakaların sertlikleri, içyapıları ve aşınan yüzeylerin taramalı elektron mikroskop (SEM) incelemeleri yapılmıştır. Borlanmış tabakadaki bileşikler belirlemek amacıyla 800°C'de 6 h borlanan numunenin XRD incelemesi yapılmıştır. Borlama işlemiyle, yaklaşık olarak 37-61 µm arasındaki kalınlıklarda tek fazlı (Fe₂B) bor tabakaları elde edilmiştir. Borlama işlemi ile döküm yapısına göre yaklaşık 3 kat, temper martensitik matris yapısına göre ise 2 kat daha fazla aşınma direnci elde edilmiştir.

Effect of matrix structure and boriding time on the wear behaviour of Cu-Ni-Mo alloyed ductile iron

H I G H L I G H T S

- Gaining various matrix structures to alloyed ductile iron
- Boriding treatment and properties of borided layer
- Wear behaviour of borided layers and matrix structure

Article Info

Received: 16.03.2016

Accepted: 29.11.2016

DOI:

10.17341/gazimmfd.322170

Keywords:

Alloyed spheroidal graphite
cast iron,
matrix structure,
boriding time,
volume loss.

ABSTRACT

In this study, effects of matrix structure (pearlitic, tempered martensitic and ausferritic) and boriding time (3, 4,5 and 6 hours) at 800°C on the wear behaviour of Cu-Ni-Mo alloyed ductile iron were investigated. Wear tests were performed by ball on disc type wear tester under the load of 6.8 N, at sliding speed of 6.5 mm/s, at room temperature and dry sliding conditions. The friction coefficients were obtained during wear tests. The hardnesses, microstructures and worn surface examinations (SEM) of the matrix structures and borided layers were performed. XRD analysis were done on the specimen borided at 800°C for 6 hours to identify the compounds in borided layer. Single phased (Fe₂B) boride layers approximately in the range between 37-61 µm thicknesses were obtained by boronizing treatment. Wear resistances were increased 3 and 2 times according to as-cast and tempered martensitic structures, respectively, by boronizing.

* Sorumlu Yazar/Corresponding Author: gzeytin@balikesir.edu.tr / Tel: +90 266 612 1194 - 4102

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Borlama; demir esaslı ve demir dışı alaşımlara uygulanabilen difüzyon esaslı termo-kimyasal bir yüzey sertleştirme işlemidir [1]. Yüzeyi borlanacak malzemenin 700-1200°C arasında bor bakımından zengin katı, sıvı veya gaz ortamlarında, bor atomlarının yüzeye yayınmasına yetecek bir süre bekletilmesi ile yapılır [2]. Borlama işlemiyle; borlama sıcaklığına, süresine, borlanan malzemenin kimyasal bileşimine ve borlama ortamının bor potansiyeline bağlı olarak yüzeyde tek fazlı (Fe₂B) veya çift fazlı (FeB/Fe₂B) borlanmış tabaka meydana gelir [3]. Demir borürler; hem yüksek sertlik gibi seramiklerin, hem de yüksek ısıl ve elektriksel iletkenlik gibi metallere tipik özelliklerine sahiptirler [4]. Genellikle, tek fazlı (Fe₂B) borlanmış tabakanın oluşumu endüstriyel uygulamalarda daha çok tercih edilir [5]. Yaklaşık % 16,23 B içeren FeB fazı % 8,8 B içeren Fe₂B fazından daha gevrek olduğundan ve bu fazların ısıl genleşme katsayıları arasındaki büyük farktan dolayı, FeB fazında artık çeki gerilmesinin meydana gelmesinden borlanmış tabakada FeB fazının oluşması istenmez. Ayrıca, her iki fazın ısıl genleşme katsayıları arasında büyük fark - FeB için $23 \times 10^{-16}/^{\circ}\text{C}$ ve Fe₂B için $7,85 \times 10^{-16}/^{\circ}\text{C}$ - iki fazın ara yüzeyinde çoğunlukla çatlak oluşumuna sebep olur [6]. Borlama işlemi ile malzeme yüzeyinde 2000 Hv değerine kadar yüksek sertlik elde edilerek malzemenin aşınmaya karşı direnci büyük oranda geliştirilebilir [7]. Borlama ile yüksek sertlik ve mükemmel aşınma direnci elde edilirken aynı zamanda malzemenin korozyona karşı direnci de artar [4]. Özellikle otomotiv ve tarım endüstrisinde geniş kullanım alanına sahip küresel grafitli dökme demirlerin (KGDD) de yüzeyleri borlama işlemiyle sertleştirilebilir. KGDD'ler yüksek mukavemet ve tokluk, kolay işlenebilirlik ve düşük üretim maliyeti gibi üstün özelliklere sahiptirler. Bilindiği üzere KGDD'ler, çelikler gibi uygulanan değişik ısıl işlemler ile matris faz yapıları değişebilen malzemelerdir. Döküm yoluyla ferritik, perlitik ve değişik oranlarda ferritik-perlitik matrisler elde edilirken, sertleştirme + temperleme ısıl işlemiyle temper martensitik, ostemperleme ısıl işlemiyle ösferritik (karbonca zengin östenit + iğnesel ferrit) matris yapıları elde edilir. Kullanım alanının geniş olması, içyapının ve dolayısıyla özelliklerinin ısıl işlemlerle geliştirilebilir olması nedeniyle, KGDD'in borlanması üzerine daha önce pek çok araştırmalar ve çalışmalar yapılmıştır. Şen vd. [4], perlitik küresel grafitli dökme demir yüzeyini 950°C'de 2 ile 8 h arasında borlamışlar, borlama zamanı ile bor tabaka kalınlığının arttığını ve kırılma tokluğunun FeB miktarının artmasıyla birlikte azaldığını bildirmişlerdir. Şen vd. [8], üç farklı alaşımdaki KGDD'i değişik sıcaklık ve sürelerde borlayarak, borlanmış tabakanın yapısal analizini incelemişler, C ve Si atomlarının borlanmış tabaka ile dökme demir ara yüzeyinde yoğunlaştığı, KGDD'de Cu miktarı arttıkça ara yüzeyde oluşan C ve Si bakımından zengin bölgenin azaldığı sonucuna varmışlardır. Kayalı ve Yalçın [9], KGDD'i 900°C'de 1, 3 ve 5 h borlama işleminin ardından 250-400°C arasındaki sıcaklıklarda 1 h temperlemişler ve boro-temperleme işlemi ile elde edilen

matris ve borlanmış tabakayı iç yapısal olarak incelemişlerdir. Geleneksel ostemperleme yöntemiyle karşılaştırdıklarında, boro-temperleme ile elde edilen alt ve üst ösferritik oluşum sıcaklıklarının daha düşük olduğu sonucunu bulmuşlardır. Genellikle daha önce yapılan çalışmalarda borlama parametreleri (sıcaklık ve süre) değiştirilerek, malzeme yüzeyinde oluşan borlanmış tabaka incelenmiştir. Bu çalışmada; savunma sanayiinde tank yenileştirme için krank mili imalatında kullanılan Cu, Ni ve Mo alaşımlı KGDD'de borlama süresinin, meydana gelen borlanmış tabakanın morfolojisine etkisi ile birlikte aşınma davranışı üzerine etkisinin incelenmesi hedeflenmiştir. İlave olarak, alaşımlı KGDD'e ısıl işlemler ile farklı matris yapılar kazandırılarak, matris yapının da aşınma davranışına etkisi incelenerek, KGDD'in aşınma direnci açısından borlanmış yüzey ve matris yapı karşılaştırması amaçlanmıştır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL PROCEDURES)

Bu çalışmada kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilen döküm yapısı perlitik olan alaşımlı KGDD kullanılmıştır. Numuneler 15 mm çapında ve 20 mm uzunluğunda kesilerek, yüzeyler 400 Mesh zımpara ile zımparalanmışlardır. Yüzeyleri düzleştirilen numuneler, aralarında birer cm boşluk bırakılarak paslanmaz çelik kutu içine yerleştirilmiş, boşluklar tane büyüklüğü 75-106 µm arasındaki Ekabor II (B₄C - SiC - KBF₄) tozu ile doldurulmuş ve numuneler ısıl işlem fırınına konmuşlardır. Borlama işlemi 800°C'de 3, 4,5 ve 6 h sürelerde yapılmış ve numuneler çelik kutu içinde havada soğutulmuşlardır.

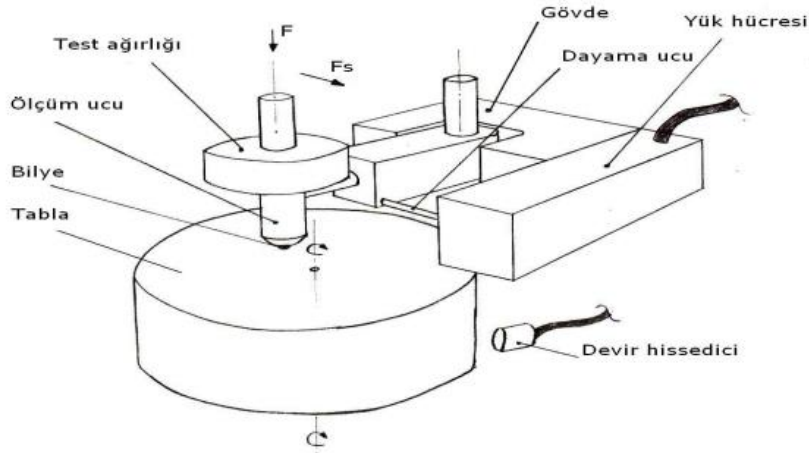
Tablo 1. KGDD malzemenin kimyasal bileşimi, % (Composition of ductile iron, %)

C:	3,73	Mg:	0,044
Si:	2,55	Cu:	1,03
Mn:	0,30	Ni:	1,25
P:	0,045	Mo:	0,18
S:	0,023	Cr:	0,032

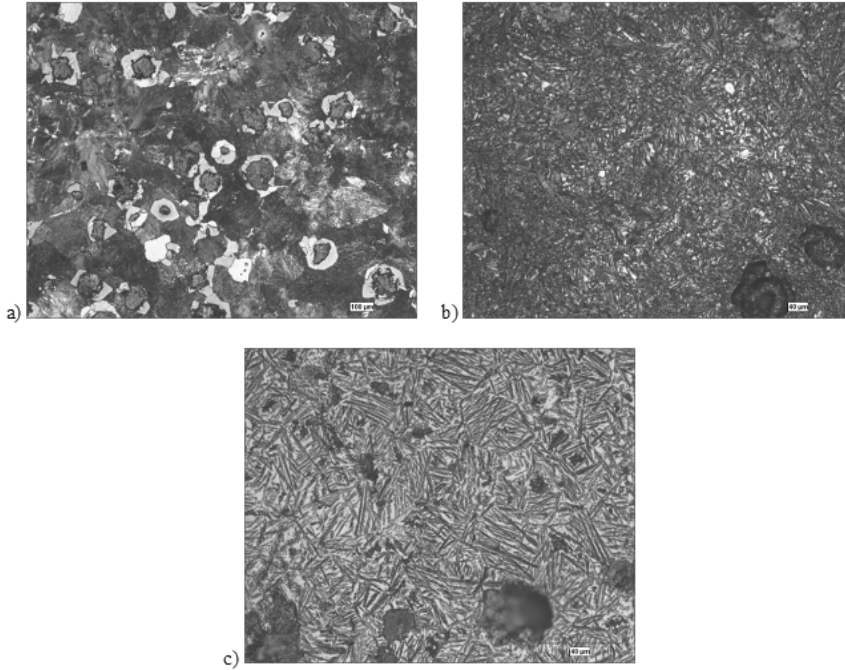
Borlanmış KGDD'in aşınma özelliklerini matris yapıları ile karşılaştırmak için döküm halindeki KGDD'e su verme + temperleme ve ostemperleme ısıl işlemleri uygulanmıştır. Temperlenmiş martensit yapısı elde etmek için numuneler 900°C'de 1 h östenitlendikten sonra 80°C'deki yağda (izorapid) soğutulup, 400°C'de 1 h temperlenmiş ve havada soğutulmuşlardır. Ösferritik (karbonca zengin östenit ve ferrit) yapı için ise numuneler 900°C'de 1 h östenitlendikten sonra 300°C'de tuz banyosunda (AS 135) 1 h temperlenmiş ve havada soğutulmuşlardır. Numunelerin matris ve borlanmış yüzey sertlikleri Metkon marka sertlik ölçüm cihazında 5 adet ölçüm ortalaması alınarak HV₁ olarak ölçülmüştür. Borlama süresinin (3, 4,5 ve 6 h) ve matris yapısının (döküm/perlitik, temper martensitik ve ösferritik) alaşımlı KGDD'in aşınma davranışına etkilerini incelemek amacıyla ball-on disk tipi aşınma deneyleri uygulanmıştır. Ball on disk aşınma deneyleri; 21±1 °C ortam sıcaklığında, % 45±5 nem ortamında, 6,8 N sabit yük altında ve 6,5 mm/s

sabit sürtünme hızında, kuru kayma şartlarında Ermir AŞ. (Bursa) de gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan aşınma cihazının şematik resmi Şekil 1’de verilmiştir. Aşındırıcı olarak 5 mm çapında ve 68 HRC sertliğindeki tungsten karbür bilye kullanılmıştır. Deneylerin öncesinde ve sonrasında aşınma yüzeyleri etil alkol ile temizlenip kurutulduktan sonra 10^{-4} g hassasiyetindeki terazi ile aşınma numunelerinin kütleleri ölçülmüştür. Elde edilen kütle kayıpları yoğunluk hesabı yardımıyla hacim kayıplarına dönüştürülmüştür. Deney sırasında yük hücresi tarafından ölçülerek bilgisayara aktarılan sürtünme kuvveti yardımıyla sürtünme katsayıları elde edilmiştir. Her bir şart için (matris yapı ve borlama süresi) üçer adet numunelerle aşınma

deneyle gerçekleştirilmiştir. Döküm (perlitik), temper martensitik ve östempelenmiş iç yapıları ile borlanmış tabaka kalınlıkları Nikon marka Eclipse MA100 model optik mikroskop yardımıyla incelenmiştir. Numune yüzeyleri standart metalografik yöntemlerle hazırlanmış ve % 5’lik nital çözeltisi ile dağlanmışlardır. 800°C’de 6 h borlanan numune yüzeyindeki bileşikleri belirlemek amacıyla Panalytical X’pert PRO MPD model X ışını kırınımı (XRD) cihazı ile Cu X-ışını tüpü ($\lambda=1,5405$ Angstrom) kullanılarak noktasal faz analizi yapılmıştır. Aşınan yüzeyler alkol ve vakum altında temizlendikten sonra Zeiss marka Evo40 model SEM (taramalı elektron mikroskobu) ile incelenmiştir.



Şekil 1. Ball-on disk aşınma cihazı şematik resmi (Schematic picture of ball-on disc wear tester)

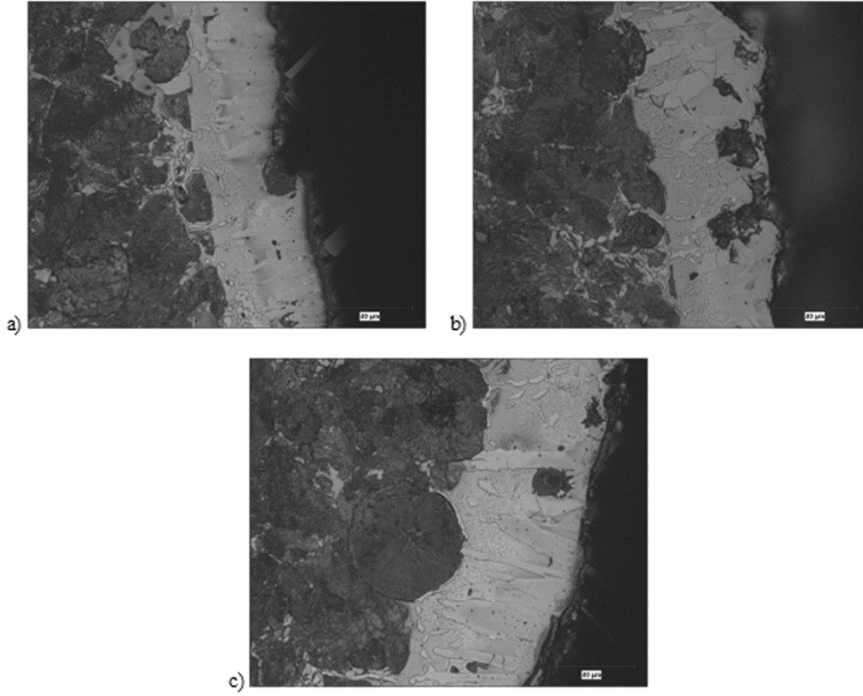


Şekil 2. KGDD’in a) döküm b) temper martensitik ve c) östempelenmiş iç yapı görüntüleri (Microstructures of ductile iron a) as-cast, b) hardened + tempered and c) ausferrite)

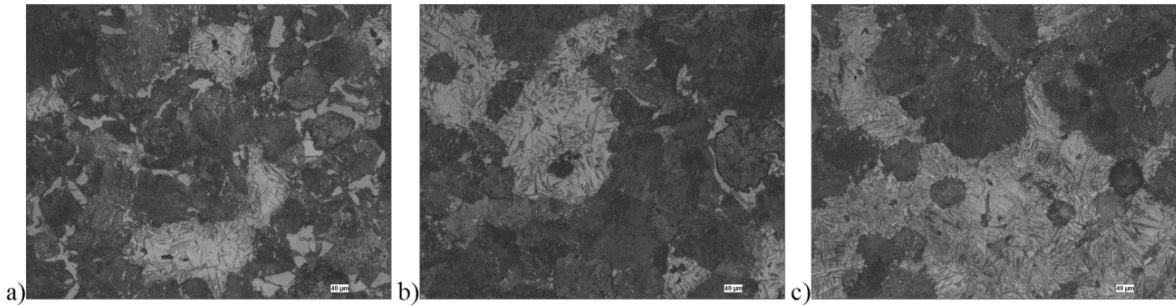
3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Alaşımli KGDD'in döküm yapısı (perlitik) ve ısı işlemlerle elde edilen temper martensitik ve ösferritik iç yapıları Şekil 2'de verilmiştir. Şekil 2a incelendiğinde; döküm yapısının grafit kürelerinin etrafını çevreleyen ferrit fazı (beyaz alanlar) ile birlikte perlitik matris yapısına sahip olduğu görülmektedir. Şekil 2b'de az miktar kalıntı ostenit (beyaz alanlar) ile birlikte matris yapıya iğnesel martensitin hakim olduğu görülmektedir. Şekil 2c'de ise 300 °C'de 1 h östemperleme işlemi ile matris yapıda iğnesel ferrit (koyu kısımlar) ile karbonca zengin ostenit (beyaz kısımlar) fazlarının birlikte bulunarak ösferritik yapıyı meydana getirdiği gözlenmiştir. Alaşımli KGDD'in 800°C'de 3, 4,5 ve 6 h sürelerde borlanması sonucu borlanmış tabakaları gösteren iç yapı görüntüleri Şekil 3'te verilmiştir. Şekil

incelendiğinde borlama süresi ile birlikte borlanmış tabaka kalınlığının arttığı net olarak görülmektedir. Ayrıca, daha önce konu ile ilgili yapılmış çalışmada [10] olduğu gibi borlanmış tabakada testere dişi formundaki oluşumlar gözlenerek, bu oluşumların borlama süresinin artması ile daha belirgin hale geldiği görülmektedir. Şekilden borlanmış tabaka içinde kalan grafit kürelerinin borlama işleminden etkilenmediği ve formlarının değişmediği görülmüştür. Bu durum literatürle uygunluk göstermektedir [11]. Borlanmış tabaka ile matris ara yüzeyinde bazı bölgelerde az miktarda düzensiz ve çizgisel beyaz alanlar gözlenmiştir. Literatürde [12] bu oluşumun silisyum bakımından zengin ferrit fazı olabileceği belirtilmiştir. Bunun nedeni; borlama işlemi sırasında yüzeye yayılan bor atomlarının yüzeydeki C, Si ve Al elementlerini iç kısımlara doğru düzensiz olarak itmesine, borlanmış tabaka-matris ara yüzeyinde silisyumca zengin bölgelerin oluşmasına ve silisyumun da ferrit



Şekil 3. Borlama zamanına göre borlanmış tabaka yapıları a) 3 b) 4,5 c) 6 h
(Boride layer structures formed by boronizing periods a) 3 b) 4,5 c) 6 hours)



Şekil 4. 800°C'de borlama işlemi sonrası matris yapıları a) 3 b) 4,5 ve c) 6 h
(Matrix structure after boriding at 800°C a) 3 b) 4,5 and c) 6 hours)

çekirdekleşmesine katkıda bulunmasından bu bölgelerde yavaş soğumanın etkisiyle silisyum bakımından zengin ferrit bölgelerinin oluşmasına bağlanmıştır [2]. Bu durum konu ile yapılmış bir çalışmada X ışını difraksiyonu yöntemiyle de görüntülenmiştir [13]. 800°C’de 3, 4,5 ve 6 h borlama işlemi neticesinde KGDD’in matris yapısında ağırlıklı olarak perlit fazının yanında bir miktar ösferrit yapısı gözlenmiştir (Şekil 4). Borlama süresi arttıkça ösferrit bölgelerinin arttığı görülmüştür. Bu yapının varlığının KGDD’in mekanik özelliklerinde bir miktar artışa neden olması beklenir. Nitekim; Ünlü ve Yılmaz [14] borlama ile demir esaslı malzemelerin çekme ve akma değerlerinin %10-20 ve yorulma dayanımının %25 oranında arttığını ifade etmişlerdir. Tablo 2 ve 3’te sırasıyla matris yapısına ve borlama süresine bağlı olarak KGDD’in yüzey sertlikleri HV₁ olarak verilmiştir. Tablo 2’den temper martensitik yapı KGDD’in sertliğinin daha yüksek olduğu ve Tablo 3’ten borlama süresi ile birlikte yüzey sertliğinin de arttığı gözlenmiştir. Borlanmış tabakada elde edilen sertlik değerleri daha önce yapılan çalışmaların sonuçlarına nazaran nispeten daha düşük elde edilmiştir. Bunun nedeni; çalışmamızda kullanılan borlama sıcaklığı ve süresi, KGDD’in bileşimi, kullanılan borlama ortamı ve yüzeyde oluşan borlanmış tabaka morfolojisi gibi pek çok parametreye bağlanabilir. Şen vd. [15], yüksek borlama sıcaklıklarında ve uzun borlama sürelerinde daha sert (1920-2140 Hv_{0,1} arasında) FeB fazından oluşan en dış tabakanın kalınlığının arttığı sonucunu bulmuşlardır. Çalışmamızda kullanılan düşük borlama sıcaklığı (800°C) dikkate alındığında borlanmış tabakada FeB/Fe₂B çift fazlı tabakadan ziyade tek fazlı ve daha düşük sertliğe sahip

(1160-1920 Hv_{0,1} arasında) Fe₂B fazının oluştuğu söylenebilir.

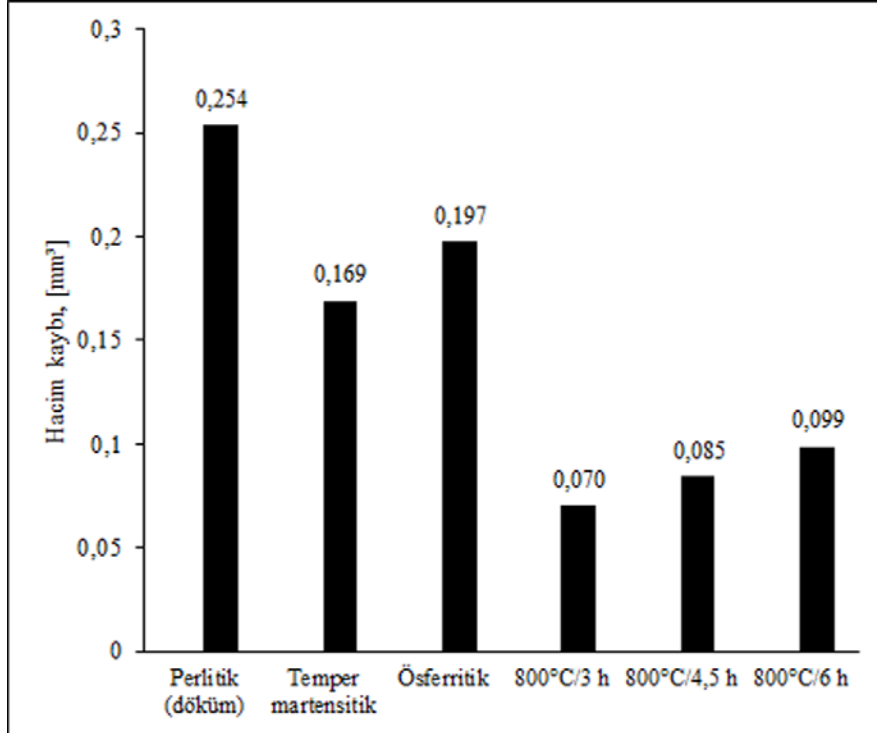
Tablo 2. Matris yapıların sertlik değerleri
(Hardness values of matrix structures)

Matris yapı	Sertlik [HV ₁]
Perlitik (döküm)	413
Temper martensitik	614
Ösferritik	464

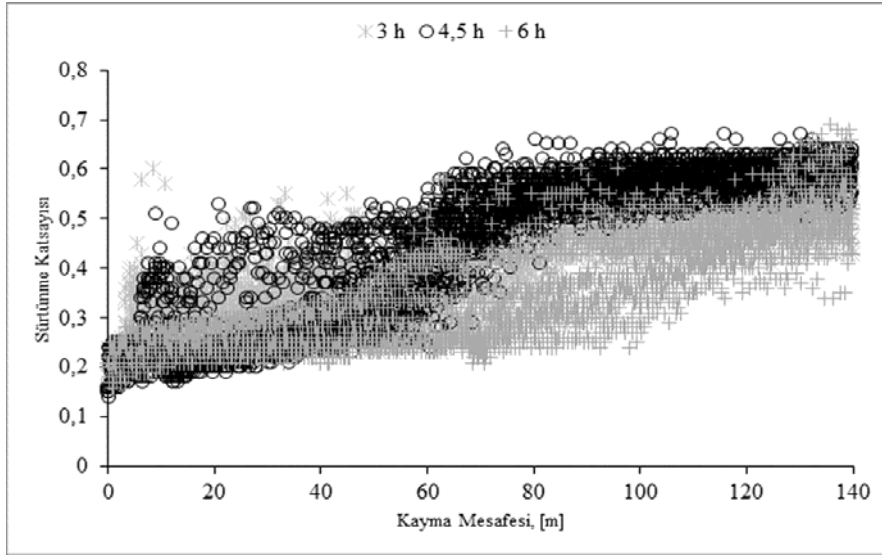
Tablo 3. Borlama süresine bağlı olarak sertlik değerleri
(Hardness values related with the boronizing period)

Borlama süresi [h]	Sertlik [HV ₁]	Tabaka kalınlığı [µm]
3	1280	37
4,5	1321	46
6	1355	61

Ayrıca Tablo 3’te, borlama süresine bağlı olarak borlanmış tabaka kalınlıkları da verilmiştir. Borlama süresinin artması, borlanan tabaka kalınlığının da 37–61 µm arasında artmasına sebep olmuştur. Bu sonuç daha önce konu ile ilgili yapılmış çalışmanın sonucuna uygunluk göstermektedir [16]. Farklı matris yapılı ve 800°C’de değişik sürelerde borlanmış KGDD numunelerin aşınma deneyleri sonucunda elde edilen hacim kayıpları Şekil 5’te verilmiştir. Matris yapılar içinde en yüksek sertliğe sahip olan temper martensitik yapı 0,169 mm³ hacim kaybı ile en az aşınan yapı olmuştur. Bu değer, döküm (perlitik) yapısındaki hacim kaybının 2/3’ü kadardır. Ösferritik dökme demirde elde edilen hacim kaybı 0,197



Şekil 5. Matris yapılar ve borlanmış yüzeylerde meydana gelen hacim kayıpları
(Volume losses occurred at matrix structures and borided surfaces)

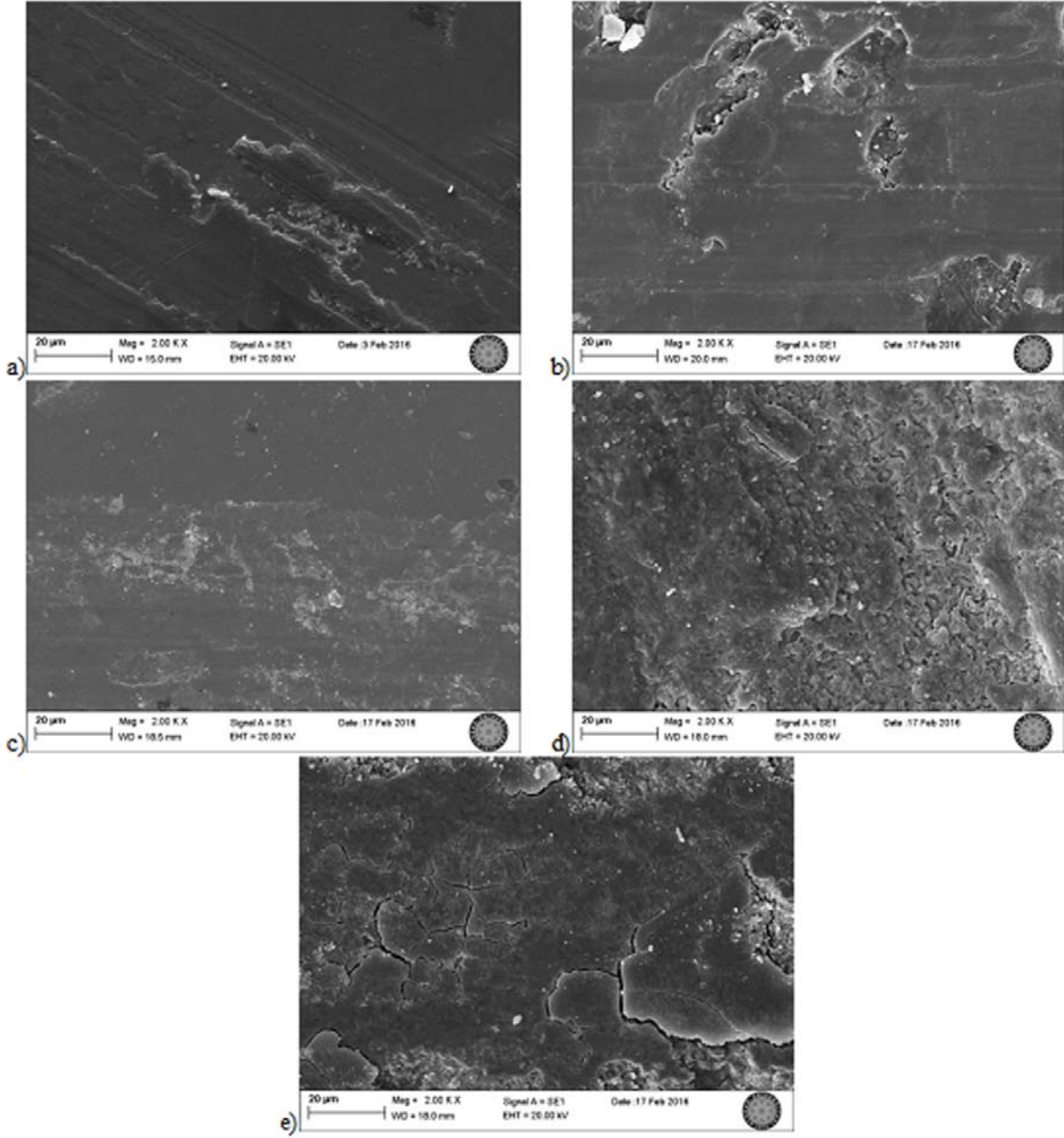


Şekil 8. Borlama süresi ile sürtünme katsayısının değişimi (Variation of friction coefficient by boronizing period)

ise 2 kat daha fazla aşınma direnci sağlanmıştır. Şekil 6 incelendiğinde; borlanmış tabakada Fe_2B bileşiğinin varlığı görülürken, FeB bileşiğine ise rastlanmamıştır. Şen vd. [19] farklı % Cu (% 0,01, % 0,3 ve % 0,98) içeriklerine sahip KGDD'in borlanması ile ilgili yaptıkları çalışmalarında, % Cu miktarı arttıkça oluşan borlanmış tabakanın kalınlığının azaldığını, tabakanın sadece Fe_2B bileşiğinden oluştuğunu bildirmişlerdir. Çalışmamızda kullanılan KGDD'in % Cu miktarı yüksek (% 1,03) olduğundan, elde edilen borlanmış tabakada FeB bileşiğinin olmaması uygun ve beklenen bir sonuçtur. Ayrıca, Mu ve Shen [5] düşük bor potansiyeline sahip borlama ortamlarının tek fazlı Fe_2B tabakasının oluşmasına neden olduğunu bildirmişlerdir. Çalışmalarında elde ettikleri tek fazlı borlanmış tabakanın oluşumunu borlama ortamının bileşimine ve ortamdaki SiC tozunun indirgeyici madde olarak rol oynamasına bağlamışlardır. Çalışmamızda elde edilen bor tabaka sertliklerinin nispeten düşük olması (Tablo 3) da, Fe_2B fazının daha düşük sertliğe sahip olması nedeniyle XRD grafiğinde sadece Fe_2B bileşiğinin gözlemlendiğini doğrulamaktadır.

Döküm (perlitik), temper martensitik ve ösferritik matrisli dökme demir numunelerle yapılan aşınma deneylerinde elde edilen sürtünme katsayılarının kayma mesafesine bağlı olarak değişimi Şekil 7'de verilmiştir. Sürtünme katsayısı değerleri, döküm (perlitik) yapıyla numunelerle en az (yaklaşık 0,1), temper martensitik yapıyla numunelerle ise en fazla (yaklaşık 0,3) elde edilmiştir. Borlama süreleri ile sürtünme katsayılarındaki değişimin, matris yapılarındaki kadar aralarında belirgin fark olmadığı, fakat daha geniş aralıklarda olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 8). Şekil 7 ve 8 karşılaştırıldığında, matris yapıyla KGDD'in sürtünme katsayısı değerlerinin aşınmanın ilk safhalarındaki dalgalanmadan sonra hemen hemen sabitlendiği ve kararlı bir aşınma sergilediği görülmüştür. Bunun aksine, borlanmış KGDD'de sürtünme katsayısı değerlerinin sürekli bir artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Bunun nedeni, matris yapıların sertliklerinin borlanmış yüzey sertliklerine nazaran ortalama

1/2-1/3 oranında daha az olması ile matris yapıların daha kolay ve çabuk aşınarak, yüzeylerindeki grafit kürelerinin matristen daha kolay ayrılmasına ve grafitin katı yağlayıcı özelliğine bağlanabilir. Bilindiği gibi grafit hegzagonal kristal yapıya sahiptir. Karbon atomlarının birbirine bağlandığı düzlemlerde kuvvetli bağlar, düzlemler arasında ise zayıf bağlar mevcuttur. Sürtünme kuvvetinin etkisiyle düzlemler arasındaki zayıf bağlar kolaylıkla kopar ve ayrılan karbon düzlemleri (grafit) sürtünen yüzeylerde kolayca kayarak katı yağlayıcı görevi görür [20]. Döküm (perlitik), temper martensitik, ösferritik matris yapıyla ve borlanmış yüzeylerin SEM aşınma görüntüleri Şekil 9'da verilmiştir. Döküm yapısında belirgin bir plastik deformasyonla birlikte adhesif tipte aşınma mekanizmasının yüzeye hakim olduğu görülmüştür (Şekil 9a). Temper martensitik yapıda, mikro çizikler ve grafit küreleri etrafında başlayan mikro çatlakların aşınmada etken olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 9b). Ösferritik yapıda ise yüzeydeki belirgin plastik deformasyona bağlı olarak aşınmanın adhesif tipte olduğu söylenebilir (Şekil 9c). $800^{\circ}C$ 'de 3 h borlanan KGDD numunenin aşınma yüzeyi görüntüsünde, plastik deformasyon, çukur oluşumu ve katmanlı (tabakalı) aşınmanın olduğu söylenebilir (Şekil 9d). Tabakalı aşınma; tekrar eden plastik deformasyon sonucu yüzey altında çatlakların oluşması ve devam eden deformasyon ile bu çatlakların büyüyerek birbirine bağlanması ile yüzeyden nispeten büyük boyutlu tabaka halinde malzeme kaybına sebep olur [21]. 6 h borlanan numunenin aşınma yüzeyinde büyük miktarda ve büyük boyutlu çatlakların olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 9e). Bunun sebebi daha önce de belirtildiği gibi borlama sırasında yüzeyde oluşan demir oksitler (Şekil 6) ve bu oksitlerin aşınma esnasında uygulanan gerilme ile çatlayarak yüzeyden ayrılmak istemesine bağlanabilir. Borlanmış ve matris yapıların aşınma yüzeyleri karşılaştırıldığında, adhesif tipte aşınma mekanizmasının borlanmış yüzeylerde daha az olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebi konu ile ilgili bir çalışmada [22] borlanmış tabakanın katı, yağlayıcı ve seramik yapısına bağlanmıştır.



Şekil 9. Aşınma yüzelerinin SEM görüntüleri a) döküm/perlitik, b) temper martensitik, c) ösferritik, d) 3 hve e) 6 h borlanmış (SEM images of worn surfaces a)as-cast/pearlitic, b) tempered martensite, c) ausferritic, d) 3 hours and e) 6 hours boronized)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Döküm (perlitik), temper martensitik, ösferritik matris yapılarına sahip ve döküm yapının 800°C’de 3, 4,5 ve 6 h borlandığı Cu-Ni-Mo alaşımlı KGDD’e uygulanan ball on disk tipi aşınma deneyleri ile aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir: Borlama süresi ile bor tabaka kalınlığı 37-61 µm ve borlanan yüzeylerin sertliği de 1280-1355 HV₁ aralığında değişmiştir. Ekabor II borlama tozu kullanılarak borlanan Cu, Ni ve Mo alaşımlı KGDD yüzeyinde tek fazlı Fe₂B bileşiği meydana gelmiştir. Matris yapılar içinde en az hacim kaybı temper martensitik yapıda, borlanan yüzeylerde ise 3 h borlama işleminde elde edilmiştir. 6 h borlanan KGDD’in

yüzey sertliğinin daha fazla olmasına rağmen hacim kaybının 3 ve 4,5 h borlanan numunelerden daha fazla olduğu, borlanmış tabakada demir oksitlerin oluştuğu ve aşınma yüzey görüntülerinde önemli ölçüde çatlak oluşumu ile tabaka halinde aşınma olduğu görülmüştür.

Borlama işlemi ile Cu-Ni-Mo alaşımlı KGDD’de döküm yapısına göre yaklaşık 3 kat, temper martensitik matris yapısına göre ise 2 kat daha fazla aşınma direnci sağlanmıştır. Temper martensitik yapı hariç matris yapıların aşınma mekanizmalarının plastik deformasyon esaslı adhesif türde, borlanmış yüzeylerde ise daha çok tabakalı aşınma türünde olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Cengiz S., Gençer Y., Influence of copper amount on the pack boronizing behaviour of Fe-Cu binary alloys, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 30 (3), 339-349, 2015.
2. Casteletti L.C., Lombardi A.N., Totten G.E., *Boriding*, Encyclopedia of Tribology, Wang, Q.J., Chung, Y.W., Springer, USA, 249-254, 2013.
3. Şeşen F.E., Özgen, Ö.S., A study on electrothermochemical boronizing of an IF steel, *J. Eng. Nat. Sci.*, 32, 334-347, 2014.
4. Şen U., Şen S., Yılmaz F., An evaluation of some properties of borides deposited on boronized ductile iron, *J. Mater. Process. Technol.*, 148, 1-7, 2004.
5. Mu D., Shen B., The kinetics and dry-sliding wear properties of boronized gray cast iron, *Adv. Mater. Sci. Eng.*, <http://dx.doi.org/10.1155/2013/751971>, article ID 751971, 7 pages, 2013.
6. Özdemir Ö., Usta M., Bindal C., Üçışık A.H., Hard iron boride (Fe₂B) on 99,97wt% pure iron, *Vac.*, 80, 1391-1395, 2006.
7. Castro G.A.R., Tinoco L.F.J., Mendez I.A.V., Amador A.M., Gutierrez H.M., Silva I.C., Damage mechanisms in AISI 304 borided steel: scratch and daimler-benz adhesion tests, *Mater. Res.*, 18 (6), 1346-1353, 2015.
8. Şen U., Şen S., Yılmaz F., Structural characterization of boride layer on boronized ductile irons, *Surf. Coat. Technol.*, 176, 222-228, 2004.
9. Kayalı Y., Yalçın Y., The effects of boro-tempering heat treatment on microstructural properties of ductile iron, *Mater. Des.*, 32, 1414-1419, 2011.
10. Gül F., Çetin M., Küresel grafitli dökme demirin adhesif aşınma davranışı ve sürtünme kuvveti üzerine borlama süresinin etkisi, 6th International Advanced Technologies Symposium, Elazığ/Turkey, 303-306, 2011.
11. Meriç C., Şahin S., Backır B., Köksal N.S., Investigation of the boronizing effect on the abrasive wear behavior in cast irons, *Mater. Des.*, 27, 751-757, 2006.
12. Gül F., Effect of boronizing surface treatment on the adhesive wear behavior of ferritic-pearlitic ductile iron, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 25 (2), 389-395, 2010.
13. Keddani M., Azouani O., Allaoui O., Schisseh A., Characterization and boriding kinetics of EN-GJS-400-15 cast iron, *Journées Annuelles de la SF2M 2015*, Matériaux et conversion d'énergie, Posters, Paris, 26-28 Octobre 2015.
14. Ünlü B.S., Yılmaz S.S., Bor ve borlamanın kullanım alanları, *Mühendis ve Makine*, 47 (552), 48-54, 2006.
15. Şen U., Şen S., Köksal S., Yılmaz F., Fracture toughness of borides formed on boronized ductile iron, *Mater. Des.*, 26, 175-179, 2005.
16. Kayalı Y., Yalçın Y., Taktak Ş., Adhesion and wear properties of boro-tempered ductile iron, *Mater. Des.*, 32, 4295-4303, 2011.
17. Mohamed I.A., Ibraheem A.A., Khashaba M.I., Ali W.Y., Influence of heat treatment on friction and wear of ductile iron: I. role of copper and molybdenum", *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2 (3), 23-30, 2013.
18. Barrau O., Boher C., Vergne C., Rezai-Aria F., Gras R., Investigations of friction and wear mechanisms of hot forging tool steels, 6th International Tooling Conference, Karlstad, Sweden, 81-94, 10-13 September, 2002.
19. Şen U., Şen S., Yılmaz F., Effect of copper on boride layer of boronized ductile cast irons, *Vac.*, 72, 199-204, 2004.
20. Wang H.D., Graphite solid lubrication materials, *Encyclopedia of Tribology*, Wang, J.Q. and Chung, Y.W., Springer Press, New York, 1550, 2013.
21. Devaraju A., A critical review on different types of wear of materials, *Int. J. Mech. Eng. Technol.*, 6 (11), 77-83, 2015.
22. Ünlü B.S., Atik E., Investigation of tribological properties of boronized Fe-based SAE 1020 and TS-DDK 40 journal bearings at high loads, *Mater. Des.*, 31, 2690-2696, 2010.

