

FERRİTİK-PERLİTİK KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRİN ADHESİF AŞINMA DAYANIMI ÜZERİNDE BORLAMA YÜZEY İŞLEMİNİN ETKİSİ

Ferhat GÜL

Döküm Eğitimi ABD, Teknik Eğitim Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Beşevler, Ankara
fgul@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 21.05.2009 ; Kabul/Accepted: 23.12.2009)

ÖZET

Bu çalışmada ferritik-perlitik küresel grafitli dökme demir malzemenin adhasif aşınma direnci üzerinde borlama ısıl işleminin etkisi araştırılmıştır. Borlama ısıl işlemi, 960 °C'de 6 saat Ekabor II borlama malzemesinde gerçekleştirilmiştir. Adhasif aşınma testleri disk üzerinde pim tipi aşınma cihazında 60 N yük altında 1 m/sn kayma hızında ve 3600 m, 7200 m, 10800 m ve 21600 m kayma mesafesinde gerçekleştirilmiştir. Adhasif aşınma test sonuçları, borlanmış küresel grafitli dökme demirin adhasif aşınma direncinin, dökülmüş haldeki ferritik-perlitik küresel grafitli dökme demirinkine göre 50 kat daha yüksek olduğunu göstermektedir.

Anahtar Terimler: Küresel grafitli dökme demir, borlama, aşınma.

EFFECT OF BORONIZING SURFACE TREATMENT ON THE ADHESIVE WEAR BEHAVIOR OF FERRITIC-PEARLITIC DUCTILE IRON

ABSTRACT

In this study, effect of boronizing surface treatment on adhesive wear behavior of ferritic-pearlitic ductile iron was studied. Boronizing was performed in Ekabor II boronizing agent at 960 °C for 6 hours. Adhesive wear test was performed on pin on disc type wear tester under the load of 60 N, at sliding speed of 1 m/s for 3600 m, 7200 m ve 10800 m ve 21600 m sliding distance. Adhesive wear test results show that, wear resistance of boronized ductile iron is 50 times higher than those of ferritic-pearlitic ductile iron as-cast.

Keywords: Ductile iron, boronizing, wear.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Borlama, malzemelerin aşınma direncini ve yüzey sertliklerini arttıran, iyi bilinen termokimyasal bir işlemdir [1]. Borlama ısıl işlemi farklı metalik malzemelere kolaylıkla uygulanabilir [2]. Borlayıcı malzemenin kimyasal bileşimine ve ısıl işlem şartlarına bağlı olarak çelik yüzeyinde oluşmuş borür tabakası Fe₂B tekfazı veya ikili Fe₂B+FeB fazlarına sahiptir [1-3]. Borlama işlemi katı, sıvı, gaz ortamlarda yapılabildiği gibi, elektroliz yöntemi ile de yapılmaktadır [4]. Bazı çalışmalarda, plazma destekli borlama yöntemi kullanılmaktadır [5]. Borlanmış çeliğin kimyasal bileşiminin, borür kalınlığı için önemli olduğu gözlenmiştir [1,6,7]. Düşük karbonlu çeliklerde bor atomu çelik içerisine kolaylıkla difüze edebilir ve çelik üzerinde oluşmuş borür tabaka kalınlığı alaşımli çelikten

daha fazla olur [1]. Borlama yüzey işleminde zaman ve sıcaklık anahtar role sahiptir [1,2]. Öte yandan karbürleme ve nitrokarbürleme ile kıyaslandığı zaman borlamada oluşan tabakasının kalınlığının az olduğu ve bu işlemin hafif yüklerde mükemmel aşınma direnci sağladığı belirtilmektedir [8]. AISI 403 paslanmaz çeliklerine krom kaplama ve borlama işleminin birlikte uygulanması yüzey sertliğinin 2500 Hv'e kadar yükselmesini sağladığını, dubleks tabakanın içerisinde FeB, Fe₂B, CrB bulunduğunu, dubleks işlemin normal borlamaya göre 1,5 kat aşınma dayanımını geliştirdiğini, oksidasyonu ise 4 kat yavaşlattığını ortaya koymaktadır. Xia ve arkadaşları [9] tarafından AISI 1045 çeliğine bor ve lantanyumun birlikte difüze edilme işlemi neticesi, borlanmış malzemeye göre çok daha iyi aşınma direnci gösterdiği belirlenmiştir. AISI 4140 malzemeye borlama işleminden sonra yapılan kısa

sürekli oksitleme işlemi, aşınma direncinde ve sürtünme katsayısında çok önemli derecede gelişme sağlamaktadır [10]. Genel olarak yapılan bazı çalışmalarda borlama işlemi ile çelik malzemelerin abrasif [1, 11, 12], adhesif [2, 3, 5, 8, 9, 13, 14, 15] aşınma direncinin gelişmesi incelenmiş, küresel grafitli dökme demirin borlanması [14,16,17] ile ilgili sınırlı sayıda çalışma bulunmasına rağmen, gerek çelik gerekse küresel grafitli dökme demir için sözkonusu çalışmaların tümünde kayma mesafesi sınırlı tutularak, malzemelerin uzun kayma mesafesinde göstermiş olduğu tribolojik performans incelenmemiştir.

Bu amaçla bu çalışmada, küresel grafitli dökme demirin borlama işlemi öncesi ve sonrası mikroyapısal inceleme yapılmış ve uzun kayma mesafesi neticesinde aşınma direncinde meydana gelen değişimler incelenmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL PROCEDURE)

Bu çalışmada yaygın kullanımı nedeniyle kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilen ferritik-perlitik küresel grafitli dökme demir malzeme seçilmiştir. Test numuneleri 6 mm çapında 50 mm uzunluğunda işlenmiş, aşınma gerçekleştirilecek yüzeyde gerekli paralelliği sağlamak ve yüzeydeki işleme artıklarının temizlenmesi için yanal yüzeyler tornaya bağlanarak elle, alın yüzeyler ise aşınma cihazında olmak üzere 500 Mesh zımpara ile zımparalanmıştır.

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

C	Si	S	P	Mg	Cu
3,5	2,8	0,006	0,002	0,04	0,4

Hazırlanmış olan numuneler minimum 10 mm kalınlık oluşturacak şekilde borlama malzemesi Ekabor II ile örtülmüş, bunun dışına koruma amaçlı Ekrit örtü malzemesi kullanılarak 30 mm çapında çelik boru içerisine yerleştirilmiştir. Borlama ısı işlemi 960 °C'de 6 saat uygulanmış, daha sonra numuneler havada soğutulmuştur. Borlama işleminin aşınma direnci üzerinde etkisini belirlemek için aynı malzemenin borlama yapılmaksızın, aynı sıcaklık ve sürelerde ısıtılarak havada soğutulması ile normalizasyon numuneleri de elde edilmiş, borlu malzemeler ile normalize edilmiş küresel grafitli dökme demirin adhesif aşınma çalışmaları sürdürülmekte olup, elde edilecek bulgular bir sonraki çalışmada yayınlanacaktır.

Metaloğrafik inceleme için numuneler kesilip soğuk gömme işlemi ve ardından sırasıyla 220, 500, 800 ve 1200 Mesh zımpara ile zımparalandıktan sonra 0,5 µm elmas pasta kullanılarak polisaj işlemi yapılarak, % 2'lik nital ile dağlanmıştır. Mikroyapı ve aşınma yüzeyi incelemeleri için sırasıyla Prior marka optik mikroskop ve JEOL JSM-6060 LV marka tarama elektron mikroskobu kullanılmıştır. Sertlik testleri

için Instron Wolpert Marka Dia Testor 1551 model cihaz ve 5 Kg yük, mikrosertlik testleri için ise Shimadzu marka HMV model mikrosertlik cihazı ve 100 gr yük kullanılmıştır. X-ışını kırınım analizi için Rigaku D/Max-220 /PC Model XRD cihazı 200 VAC, Cu kaynaklı X ışını tüpü kullanılmıştır. X-ışını kırınım deseni verileri için Jade 3.1 yazılımı kullanılmıştır.

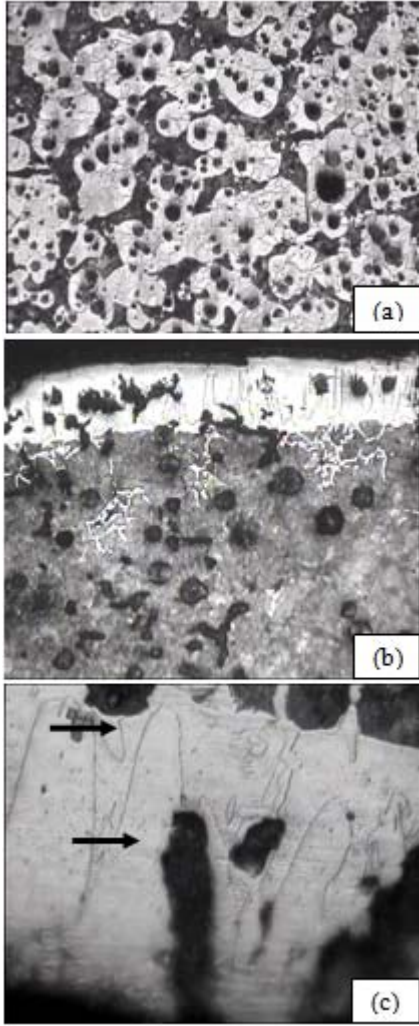
Aşınma testleri disk üzerinde pim tipi test cihazında 1 m/sn kayma hızında, 60 N yük altında gerçekleştirilmiş ve karşılık malzemesi olarak 62 Rc sertliğe sahip sertleştirilmiş ve taşlanmış 52100 çelik malzeme kullanılmıştır. Aşınma deneyleri 4 farklı aşamada gerçekleştirilmiştir. Bunlar 3600 m, 7200 m ve 10800 m olmak üzere ardışık olarak üç saat, daha sonra tek aşamada 10800 m olmak üzere toplamda 21600 m aşınma testi uygulanmıştır. Böylece 1'er saatlik süreler halinde 3 saat daha sonra 3 saatlik tek bir deney ile de toplam 6 saatlik testler gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde 60 N yük ve uzun kayma mesafesinde kuru kayma şartları altında dökülmüş haldeki ve borlanmış ferritik-perlitik küresel grafitli dökme demir malzemenin aşınma direnci belirlenmiştir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

3.1. Mikroyapı ve Sertlik Sonuçları (Results of Microstructure and Hardness)

Dökülmüş haldeki ve borlanmış ferritik-perlitik küresel grafitli dökme demir malzemelerin mikroyapı görüntüleri Şekil 1 a, b ve c'de verilmiştir. Şekil 1a'da döküm hali ile küresel grafitli dökme demirin, ferritik-perlitik matriks içerisinde homojen şekilde dağılmış grafit kürelerinden meydana geldiği görülmektedir. Borlanmış ferritik-perlitik küresel grafitli dökme demirin mikroyapısı incelendiğinde yüzeyde bir borür tabakasının meydana geldiği (Şekil 2b), öte yandan yüksek büyütmede bu tabakanın iki bölgeden meydana geldiği ve iki faz bölgesinin testere dişi şeklinde dallantılı bir yapı sergilediği görülmektedir (Şekil 1c). Borür tabakasının daha ilerisinde beyaz çizgiler halinde görülen fazın yavaş soğuma nedeniyle oluşmuş ferrit olduğu düşünülmektedir. Ancak söz konusu fazın çok az miktarda ve belirli bölgelerde bölgesel olarak oluştuğu tespit edilmiştir. Daha önce yapılan çalışmalarda da benzer fazın görüldüğü ve borür tabakası ile matriks arasında silisyumca zengin bir ferrit alanı belirlenmiştir [14]. Bir başka çalışmada ise karbon ve silisyum atomlarının borür tabakası içerisinde önemli derecede çözünmediği, borlama işlemi sırasında borür tabakasından matrikse doğru itildiği, borlama prosesi sırasında silisyum atomlarının içeriye doğru difüze olduğu ve borlanmış tabakanın önünde silisyumca zengin bir faz oluştuğu belirtilmektedir [18].

Söz konusu borür tabakalarının numunenin dış kısmında FeB, iç kısmında Fe₂B oluştuğu daha önce



Şekil 1. a) Döküm durumu X 70 b) borlanmış KGDD malzemenin X70, c) Testere dişi formundaki borür tabakalarının mikroyapısı, X280 (Microstructure of a) as-cast, b) boronized ductile iron c) boride layer with sawtooth morphology)

yapılan çalışmalarda da [14,15,17] belirtilmektedir. Bu oluşan iki fazın mikrosertlik ölçümü yapılmış ve borür tabakalarının dışardan içeriye doğru sertliğinin azaldığı ve fazların sertlik değerlerinin literatürde [14] FeB ve Fe₂B fazları için verilen sertlik değerlerine yakın olduğu belirlenmiştir. Ferritik-perlitik küresel grafitli dökme demir matris yapısı 193 HV5 sertliğe sahip iken, Tablo 2'de görüldüğü gibi aynı matrisin borlanması neticesi meydana gelen normalizasyon işlemi sonucu oluşan perlitik matris nedeniyle sertlik değerinin 313 HV5 değerine ulaştığı belirlenmiştir. Söz konusu matris sertliğindeki bu artış, malzemenin bor tabakalarının aşınmasından sonra da malzemenin yüksek aşınma direnci göstermesini temin edecektir. Öte yandan yapılan mikrosertlik çalışmaları ile borlanmış küresel grafitli dökme demir malzemenin dış ve iç yüzeyinde meydana gelen borid tabakalarının ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Buna göre borid tabaka kalınlığının yaklaşık 100 µm kalınlığa sahip olduğu, en dışta bulunan en sert tabakanın 2000 HVN sertliğe

sahip olduğu, iç kısmın mikrosertliğinin matriske doğru sürekli olarak düştüğü Şekil 2'de gösterilmiştir.

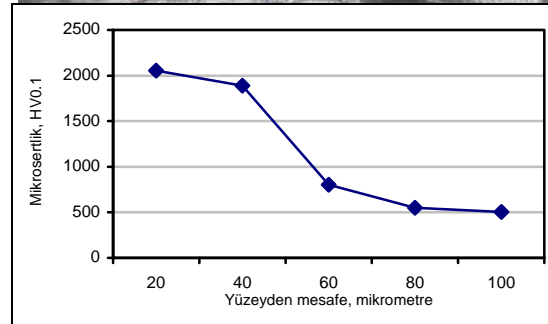
Tablo 2. Dökülmüş halde ve borlanmış KGDD malzemelerin matris sertlik değerleri, HV5 (The hardness of as-cast and boronized ductile iron)

Malzeme	Sertlik HV5			Ortalama
KGDD	195	190	196	193
Borl. KGDD	324	295	322	313

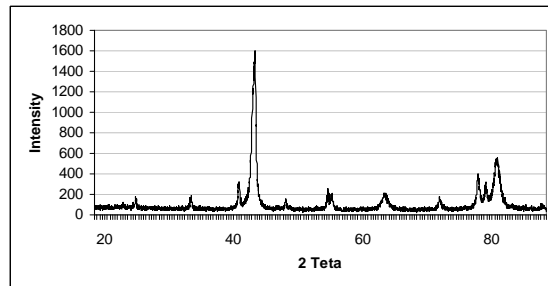
Buna göre mikrosertlik testi sonuçları borlanmış malzemede yüzey tabakalarının ana malzemeden çok daha yüksek sertliği sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Öte yandan borlanmış ferritik perlitik küresel grafitli dökme demirin x-ışını kırınım analizi sonucu Şekil 3'de gösterilmiştir. Analiz sonucuna göre FeB ve Fe₂B fazlarının yapıda bulunduğu tespit edilmiştir.

3.2 Adhesiv Aşınma Testi Sonuçları (Results of Adhesive Wear Tests)

Disk üzerinde pim tipi aşınma cihazı kullanılarak yapılan aşınma testleri sonucu elde edilen aşınma



Şekil 2. Mikrosertlik izlerindeki değişimi gösteren borür tabakaları ve mikrosertlik değerleri Boride layer showing microhardness indenter variation and microhardness values)

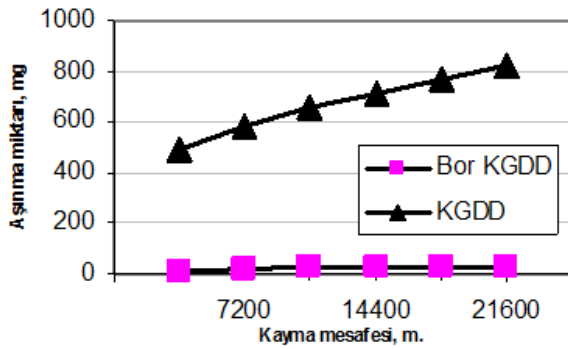


Şekil 3. Borlanmış KGDD'in XRD modeli (XRD pattern of boronized ductile iron)

Tablo 3. Kayma mesafesine bağlı olarak malzemelerin aşınma miktarları (Wear loss of materials depending on sliding distance)

Kayma mesafesi, m	Borlanmış KGDD		KGDD	
	Miktar mg	Kümülatif mg	Miktar, mg	Kümülatif mg
0 - 3600	11,1	11,1	494	494
3600 - 7200	10	21,1	91	585
7200 - 10800	2,5	23,6	72,9	657,9
10800 - 21600	3,7	27,3	162	819,9

sonuçları, gerek miktar gerekse kümülatif olarak Tablo 3'de verilmiştir. Elde edilen bu aşınma verilerinin kümülatif değişimi Şekil 4'de gösterilmiştir. Daha

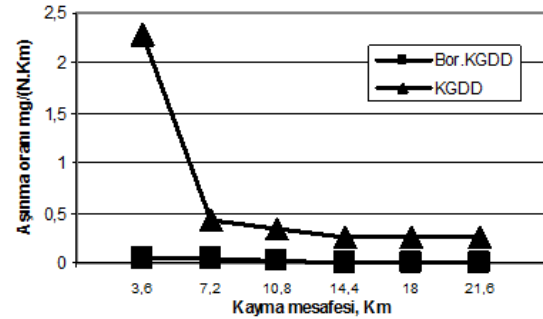


Şekil 4. 60 N yük altında kayma mesafesine göre kümülatif aşınma miktarı (Cumulative wear under load of 60 N depending on sliding distance)

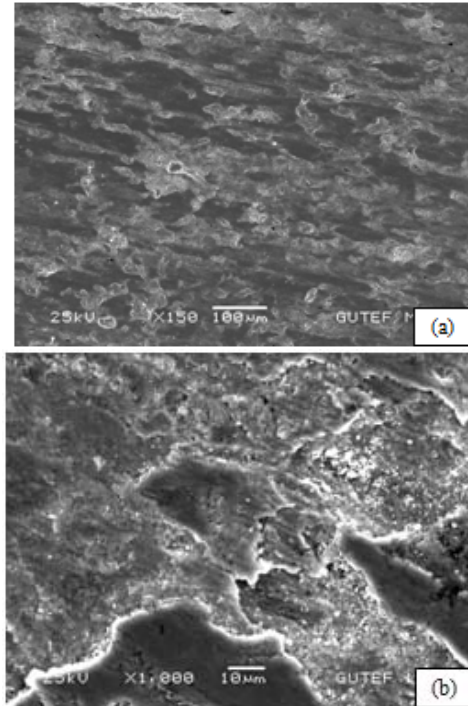
önce yapılan çalışmalarda da [1,8,11] borlama, karbürleme gibi işlemler neticesi elde edilen aşınma değerleri aşınma miktarı olarak verilmiştir. Her ne kadar bu tür yüzey işlemi sonucu oluşan fazlar ve bu fazların yoğunlukları bilinmesine rağmen, aşınmanın hangi aşamasında hangi fazın aşındığı tam olarak bilinmemektedir. Ayrıca testere dişi formundaki borür fazlarının Şekil 2c'de görüldüğü gibi testere dişlerinin iri olması ve ferritik-perlitik matriksten farklı olarak tüm tabaka boyunca yer alabildiği dikkate alındığında, aşınmanın hacimsel kayıp yerine ağırlık kaybı olarak belirtilmesi yararlı bulunmuştur. Malzemelerin aşınma miktarı incelendiğinde dökülmüş haldeki malzemenin ilk 3600 m aşınma mesafesinde yüksek aşınma gösterdiği ve ikinci 3600-7200 m arasındaki aşınma mesafesine göre yaklaşık olarak 5 kat daha fazla aşınma gösterdiği görülmektedir. Öte yandan 7200-10800 m arasındaki kayma mesafesinde ise aşınma miktarındaki azalmanın yavaşladığı dikkate çekmektedir. Özellikle bu süreçte perlit fazının yüksek adhesif aşınma direncinin yanı sıra, ferrit fazının gösterdiği deformasyon nedeniyle meydana gelen sertleşmenin birinci 3600 m'de olmasa bile 2. ve 3. 3600 m aşınmaları için aşınma direncine katkı sağladığı düşünülmektedir. Daha sonraki 10800 m kayma mesafesinde ise aşırı pekleşme gösteren ferrit fazının delaminasyon mekanizması ile ayrılması neticesi aşınma miktarında bir miktar artış olduğu düşünülmekle beraber, malze-

menin başlangıç deneylerine kıyasla yüksek aşınma direncine sahip olduğu anlaşılmaktadır. Şöyleki 10800-2160 m kayma mesafesinde 162 mg aşınmanın meydana geldiği düşünülecek olursa, son safhada her 3600 m için aşınma miktarının yaklaşık 54 mg'a düştüğü görülmektedir.

Kayma mesafesine bağlı olarak aşınma direncinin gelişmesi, benzer şekilde borlanmış küresel grafitli dökme demir malzemede de gerçekleşmiştir. Söz konusu malzeme ile ilgili tek aşamada gerçekleştirilecek şekilde 50 Km gibi daha uzun kayma mesafeli deneyler devam etmekte olup, bu şekilde borür tabakalarının daha uzun kayma mesafelerinde aşınmaya karşı direncinin belirlenmesi, diğer yandan da bu kayma mesafelerinde tabakanın görevini sürdürüp sürdürmediğinin tespit edilmesi amaçlanmaktadır. Öte yandan Şekil 5'de test sonuçları aşınma oranı açısından



Şekil 5. 60 N yük altında kayma mesafesine bağlı olarak malzemelerin aşınma oranı (Wear rate of materials under load of 60 N depending on sliding distance)

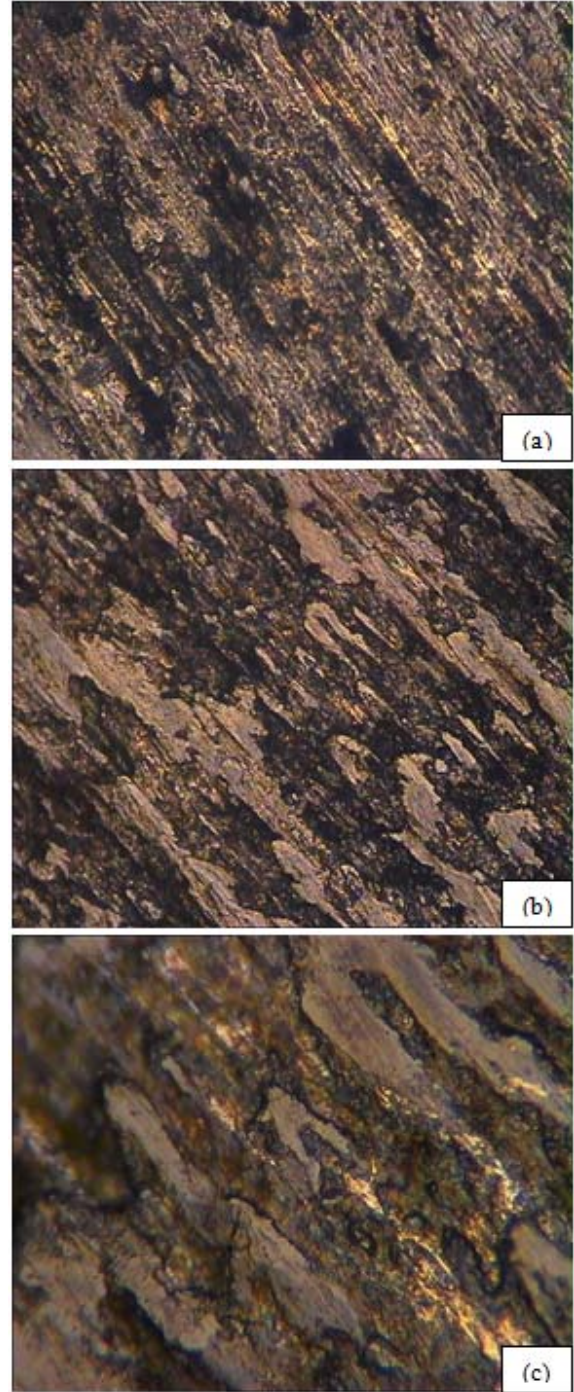


Şekil 6. 60 N yük ve toplam 21600 m kayma mesafesinde aşınmış KGDD malzemenin aşınma yüzeyi SEM görüntüsü, a) X 150, b) X1000 (SEM appearance of worn surface of ductile iron worn under load of 60 N a) X150 b) X1000)

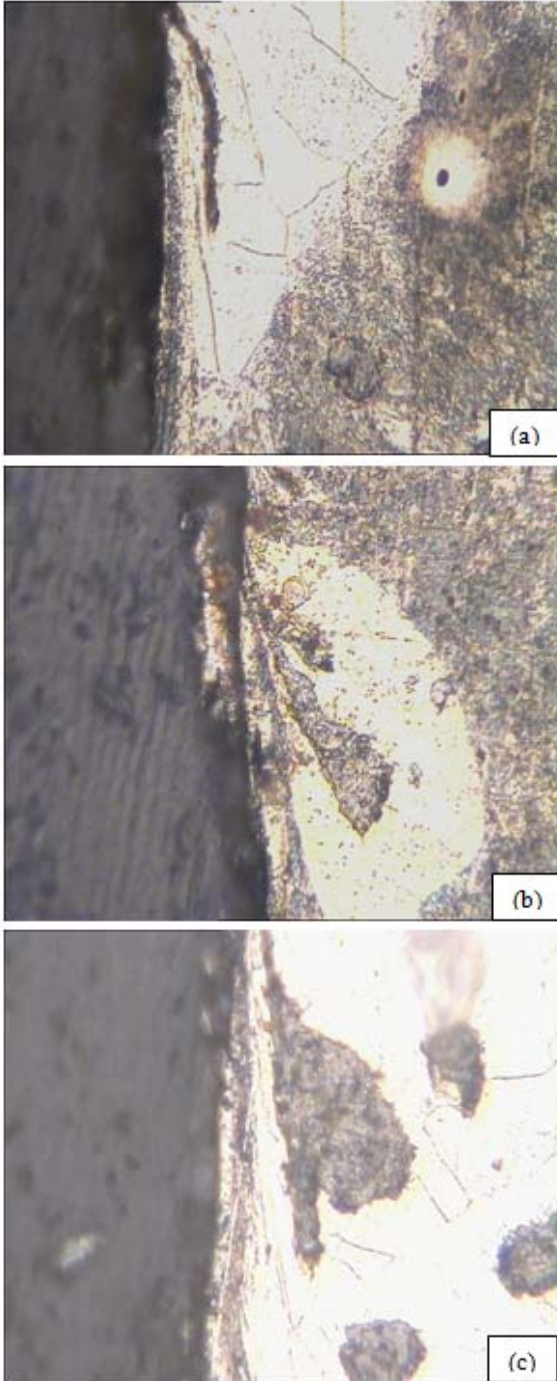
incelendiğinde, yol arttıkça her iki malzemenin de aşınma oranı ciddi anlamda azalma göstermiştir. Şekil 6'da dökülmüş haldeki ferritik-perlitik küresel grafitli dökme demir malzemenin aşınma yüzeyi tarama elektron mikroskobu görüntüsü incelendiği zaman, dökülmüş haldeki numunede yoğun şekilde kopmaların meydana geldiği ve aşınma sonuçlarını destekleyici şekilde aşırı aşınmanın meydana geldiği görülmektedir. Şekilden belirli bölgelerin deformasyon sertleşmesi göstererek daha sonra tabaka oluşumu ile ana gövdeden ayrıldığı düşünülmektedir. Daha önce yapılan çalışmalarda [19,20] özellikle 60 N'a yakın yüklerde ferritik-perlitik küresel grafitli dökme demir malzemenin aşınma yüzeyinde grafit küresi ile birlikte ferrit fazının aşırı deformasyon sergilediği, aşınma yüzey altı görüntülerinden tespit edilmiştir. Her iki çalışmada da uygulanan yükün sırasıyla 35- 40 N'dan 55-60 N'a çıkmasıyla ferrit fazı ve içerisinde bulunan grafit küresinin deformasyonunun arttığı gözlenmiştir. Abedi ve arkadaşları [20] yaklaşık 15-35 N gibi düşük yükler altında oksidasyon aşınmanın meydana geldiğini ve perlitik fazın ferritik fazdan daha fazla oksidasyon eğilimine sahip olduğunu belirtmektedir. Buna karşılık yaklaşık 55 N yük altında ise aşınma hasarının sünek ferrit fazının ve içerisinde bulunan grafit fazının kararsızlığı ve yüzeye doğru çatlak oluşturması neticesi meydana gelen delaminasyonun aşınma oranını arttırdığı ifade edilmektedir. Grafit-matriks arayüzeyinde gerilim yığılmasının gözlenen delaminasyonun oluşumunun ana sebebi olduğu ifade edilmektedir. Mevcut çalışmada da özellikle yüksek büyütmede tabaka ayrışması şeklinde meydana gelen bu kopmanın (delaminasyon) büyük bir oyuk oluşturduğu Şekil 6(b)'de açıkça görülmektedir. Daha önce yapılan ön çalışmalardan dökülmüş haldeki perlitik küresel grafitli dökme demir malzemenin ferritik küresel grafitli dökme demirden daha yüksek aşınma dayanımına sahip olduğu bilinmektedir [19]. Bu amaçla aşınmış numune yüzeyi % 2'lik nital ile dağlanarak aşınma yüzeyinde fazların durumu incelenmiş ve Şekil 7'de görüldüğü gibi ferrit fazının yoğun bir şekilde aşınma yüzeyine sıvanmış olduğu, bu fazların içerisinde grafit kürelerinin yer aldığı, zaman zaman da kırılarak çıktığı veya ferrit ile beraber sıvandığı dikkat çekmektedir. Öte yandan perlit fazında belirgin deformasyonun bulunmadığı, ancak aşınma sürecinde uygulanan yüke önemli dayanım göstererek malzemenin aşınma direncini önemli derecede geliştirdiği, diğer taraftan yapıda bulunan grafitin sağladığı doğal yağlama özelliğinin malzemenin aşınma direncine önemli katkı sağladığı düşünülmektedir. Daha önceki çalışmalarda [20] grafit kürelerinin temas yüzeylerini azaltacak şekilde sürtünme katsayısını azaltan katı bir yağlayıcı olarak görev yaptığı, ancak 100 °C altında yağlayıcı olduğu, yüksek yüklerde veya uzun kayma mesafelerinde etkisini kaybedeceği belirtilmektedir. Bu durumda daha fazla yapışmanın ve delaminasyonun meydana gelerek aşınmanın artacağı belirtilmektedir. Şekil 8'de görülen aşınma yüzeyaltı görüntüleri incelendiği zaman,

malzemenin aşınma sürecinde zaman zaman ferrit fazının aşırı sertleşmesi ve bunun sonucunda ayrılma göstermesi (Şekil 8a), zaman zaman da grafit kürelerinin akış yönünde şekil değişimi göstererek ayrılmalara neden olduğu belirlenmiştir (Şekil 8 b,c).

Şekil 9'da borlanmış ferritik-perlitik küresel grafitli dökme demir malzemenin aşınma yüzeyi tarama elektron mikroskobu görüntüsü verilmiştir. Aşınma yüzey-

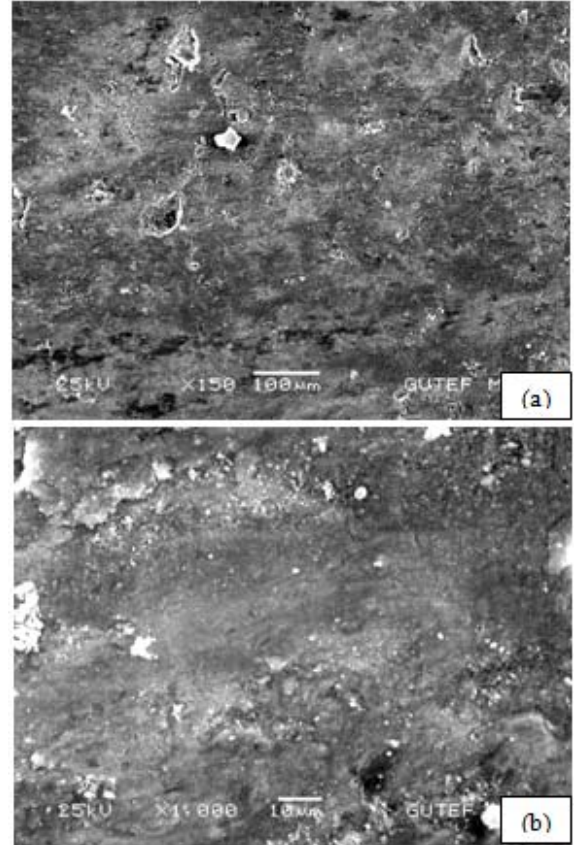


Şekil 7. 60 N yük ve toplam 21600 m kayma mesafesinde aşınmış KGDD malzemenin dağlanmış aşınma yüzeyi, a) X 35, b) X70 c) X280 (Optical micrograph of worn surface of ductile iron worn under load of 60 N and the sliding distance of 21600 m)



Şekil 8. 60 N yük ve toplam 21600 m kayma mesafesinde aşınmış KGDD malzemenin aşınma yüzeyaltı görüntüsü a), b) c) X280 (Optical micrograph of worn surface of ductile iron worn under load of 60 N and the sliding distance of 21600 m)

yi incelendiği zaman, yoğun bir deformasyon ve aşınmanın meydana gelmediği, 21,6 Km mesafeli kayma neticesinde borür tabakasının etkisini sürdürdüğü tespit edilmiştir. X 150 büyütmede ince kılcal çatlaklar, bazı aşınma kanalları mevcut olmasına rağmen, tabaka ayrışması şeklinde bir aşınmanın oluşmadığı dikkati çekmektedir. Bu da bu malzemenin bu yükler altında ve 21,6 Km gibi uzun kayma mesafesinde aşınma açısından mükemmel direnç gösterdiğini açıkça göstermektedir. Borlanmış KGDD malzeme özel-



Şekil 9. 60 N yük ve toplam 21600 m kayma mesafesinde aşınmış borlanmış KGDD malzemenin aşınma yüzeyi SEM görüntüsü, a) X 150, b) X1000 (SEM micrograph of boronized ductile iron worn under load of 60 N and at the sliding distance of 21600 m. a) X 150, b) X1000)

likle ilk 7200 m'den sonra aşınma kaybında önemli düşüş olduğu belirlenmiştir. Yapıda oluşan tabakalardan dış kısımda bulunan FeB fazının yüksek sertliği nedeniyle sahip olduğu kırılganlık nedeniyle başlangıçta bu tabakanın aşınıp daha sonra geride bulunan Fe₂B tabakasının daha tok olması nedeniyle 7200-21600 m kayma mesafelerinde daha iyi aşınma direnci sergilediği düşünülmektedir.

Daha önce yapılan çalışmalarda FeB fazının sert ve kırılgan ve Fe₂B fazından daha yüksek ısıl genleşme katsayısına sahip olması nedeniyle, çiftli FeB+Fe₂B borür tabakalarında çatlama gözlemlendiği belirtilmektedir[2].

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Ferritik-perlitik KGDD malzemenin 960 °C'de 6 saat borlanması sonucu aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Borlama işleminden sonra numunenin havada soğutulması iç kısımlarda perlitik matriks oluşumunu temin etmiştir.
2. Borlama işlemi ile ferritik-perlitik KGDD malzemenin yüzeyinde dıştan içe doğru azalan sertlikteki testere dişi formundaki borür tabakalarının meydana geldiği tespit edilmiştir.

3. Sözkonusu borür tabakalarının çelik malzemeden farklı olarak testere dişlerinin daha iri olduğu ve içteki borür tabakasının yüzeye kadar ulaştığı belirlenmiştir.
4. KGDD malzemenin borlama işlemi ile 3,6 Km kayma mesafesinde 50 kat, 21,6 Km'lik kayma mesafesinde sonucunda yaklaşık olarak 43 kat aşınma direncinin arttığı belirlenmiştir.
5. Malzemelerin aşınma yüzey görüntülerinden borlama işlemi ile ferritik-perlitik küresel grafitli dökme demir malzemenin aşınma karakteristiğinin değiştiğini ve uzun kayma mesafesinde 60 N gibi nispeten yüksek yük uygulamaları altında mükemmel aşınma direnci sergilediğini ortaya koymaktadır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Bejar, M.A. Moreno, E., "Abrasive wear resistance of boronized carbon and low-alloy steels", **Journal of Materials Processing Technology**, 173, 352–358, 2006.
2. Allaoui, O. Bouaouadja, N. Saindennan, G., "Characterization of boronized layers on a XC38 steel", **Surface & Coatings Technology**, 201, 3475–3482, 2006.
3. Kulka, M. Pertek, A., "The importance of carbon content beneath iron borides after boriding of chromium and nickel-based low-carbon steel", **Applied Surface Science**, 214, 161–171, 2003.
4. BAŞTÜRK, S. ERTEN, "M. Borlama İle Yüzey Sertleştirme Çalışmaları", **Mühendis ve Makina**, 47, 563, 57-74.
5. Kuper U, A. Qiao, X. Stock, H.R., "Mayr, P. A novel approach to gas boronizing", **Surface and Coatings Technology**, 130, 87-94, 2000.
6. Usta, M. Ozbek, I. Bindal, C. Ucisik, A. H. Ingoled, S. Liang, H., "A comparative study of borided pure niobium, tungsten and chromium", **Vacuum**, 80, 1321–1325, 2006.
7. Uzunov, N. Ivanov, R., "Aluminothermic powder boriding of steel", **Applied Surface Science**, 225, 72–77, 2004.
8. Selcuk, B. Ipek, R. Karamis, M.B., "A study on friction and wear behaviour of carburized, carbonitrided and borided AISI 1020 and 5115 steels", **Journal of Materials Processing Technology**, 141, 189–196, 2003.
9. Xia, Yan-qiu, Liu, Wei-Min, Yu, Lai-Gui, Han, Ning Xue, Qun-Ji, "Investigation on the tribological properties of boron and lanthanum permeated mild steel", **Materials Science and Engineering**, A354, 17-23, 2003.
10. Sen, S. Sen, U. Bindal, C., "Tribological properties of oxidised boride coatings grown on AISI 4140 steel", **Materials Letters**, 60, 3481–3486, 2006.
11. Mann, B.S., "Boronizing cast martensitic chromium nickel stainless steel and its abrasion and cavitation-erosion behaviour", **Wear**, 208, 125-131, 1997.
12. C.K.N. Oliveira, C.L. Benassi a, L.C. Casteletti, "Evaluation of hard coatings obtained on AISI D2 steel by thermo-reactive deposition treatment", **Surface & Coatings Technology**, 201, 1880–1885, 2006.
13. Bourithis, L. Papadimitriou, G., "Boriding a plain carbon steel with the plasma transferred arc process using boron and chromium diboride powders: microstructure and wear properties", **Materials Letters**, 57, 1835– 1839, 2003.
14. Sen, U. Sen, S. Yilmaz, F., "An evaluation of some properties of borides deposited on boronized ductile iron", **Journal of Materials Processing Technology**, 148, 1–7, 2004.
15. Yul Lee, Sang Kim, Gwang Seok, Kim, Bum-Suk, "Mechanical properties of duplex layer formed on AISI 403 stainless steel by chromizing and boronizing treatment", **Surface and Coatings Technology**, 177–178, 178–184 2004.
16. Çelikyürek, İ. Baksan, B. Gürler R., "Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Borlanması", **Uluslararası Bor Sempozyumu**, Eskişehir, 231-235, 23-25 Eylül 2004.
17. Sen, U. Sen, S. Yilmaz, F., "Effect of copper on boride layer of boronized ductile cast irons", **Vacuum**, 72, 199–204, 2004.
18. Sen, U. Sen, S., "The fracture toughness of borides formed on boronized cold work tool steels", **Materials Characterization**, 50, 261–26, 2003.
19. Şenel L., Çetin M., Gül, F., "Farklı Matriks Mikroyapılarına Sahip Kgd'd'in Kuru Kayma Aşınmasının Değerlendirilmesi", **3rd International Advanced Technologies Symposium**, Ankara, 154-166, 18-20 August 2003.
20. Abedi, H. R. Fareghi, A. H. Kheirandish, Saghafian, SH., "Sliding wear behavior of a ferritic-pearlitic ductile cast iron with different nodule count", **Wear**, Article in Press.