

KURU KAYMA ŞARTLARINDA MATRİS YAPISININ KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRİN SÜRTÜNME KATSAYISINA VE PİM SICAKLIĞINA ETKİSİ

Melik ÇETİN ve Ferhat GÜL

Metal Eğitimi Bölümü, Karabük Teknik Eğitim Fakültesi, ZKÜ, 78050, Balıklarkayası Yerleşkesi, Karabük
Metal Eğitimi Bölümü, Teknik Eğitim Fakültesi, Gazi Üniversitesi, 06500, Teknikokullar, Ankara
melikcetin@gmail.com, fgul@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 13.06.2006; Kabul/Accepted: 30.10.2006)

ÖZET

Bu çalışmada, matris yapısının küresel grafitli dökme demirin (KGDD) aşınma davranışına, aşınma sırasında oluşan sürtünme katsayısına ve pim sıcaklığına etkisi araştırılmıştır. Aşınma testleri disk üzerinde pim türü cihazda, 1 m s⁻¹ kayma hızında, 20, 40 ve 60 N yük ve 3,6 km kayma mesafesinde, normal atmosfer şartlarında ve oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Aşınma yüzeyleri tarama elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Uygulanan yükün artmasına bağlı olarak döküm durumu ferritik KGDD'in aşınma hızı artarken, döküm durumu perlitik KGDD numunenin aşınma hızı azalmaktadır. Testler, döküm durumu perlitik KGDD'nin sürtünme katsayısı ve sürtünme sıcaklığının, döküm durumu ferritik KGDD'den daha yüksek olduğunu göstermiştir. Deneysel sonuçlar, döküm durumu perlitik ve ferritik KGDD'lerin sürtünme katsayısının azalmasıyla, sürtünme sıcaklığının arttığını ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Küresel grafitli dökme demir, aşınma.

EFFECT OF THE MATRIX STRUCTURE ON THE FRICTION COEFFICIENT AND PIN TEMPERATURE OF DUCTILE IRON UNDER DRY SLIDING CONDITIONS

ABSTRACT

In this study, the effect of the matrix structure on the dry sliding wear behaviour, friction coefficient and pin temperature of ductile irons was investigated. Wear tests were carried out at normal atmospheric conditions and room temperature on a pin on disc type tester at constant sliding speed (1ms⁻¹) and sliding distance (3.6 km) under various sliding loads in a range of 20 to 60 N. The worn surfaces were examined by scanning electron microscopy (SEM). Wear rate of as-cast ferritic ductile irons increased with increasing test load, whilst that of as-cast pearlitic irons decreased. Tests revealed that, as-cast pearlitic ductile iron exhibited higher friction coefficient and friction temperature than as-cast ferritic ductile iron. The experimental results showed that the friction temperature increased with decreasing the friction coefficient of as-cast ferritic and pearlitic ductile irons.

Keywords: Ductile iron, wear.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Sürtünme, sanayide kullanılan her bir teknik sistemde karşımıza çıkan kaçınılmaz bir olgudur. Sürtünmeyi tanımlamak için sürtünme katsayısının anlaşılması gerekmektedir. Sürtünme katsayısı sadece malzemenin yüzey topografyasına bağlı olmayıp aynı zamanda hız, yük, sıcaklık ve bu parametrelerin kombinasyonuna bağlıdır [1-3]. Sürtünme veya çevre

şartlarından kaynaklanan sıcaklık aşınmayı etkileyen en önemli parametrelerden birisidir. Sıcaklığın artmasıyla birlikte malzemede oluşan kayıplar da artmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda malzemenin mikroyapısı ve sertliği değişime uğrayacağından oluşacak aşınma da değişime uğrayacaktır [4]. Sanayide; otomotiv motor parçaları ve hadde merdanelerinde yaygın olarak kullanılan küresel grafitli dökme demir (KGDD) malzemelerin

kullanımı sırasında oluşan sürtünmeye bağlı olarak meydana gelen sıcaklık değişiminin bilinmesi, bu malzemenin kullanıldığı yerlerde daha iyi servis şartlarının belirlenmesinde önemli bir parametredir. KGDD malzemeler, dövme çelik ve temper dökme demir gibi diğer birçok metal alaşımına göre yüksek dayanım ve tokluk gibi üstün özellikleri sebebiyle günümüzde endüstrinin vazgeçilmez malzemelerinden birisidir. Ayrıca KGDD malzemeler hala 21 yüzyılda önemli bir yapı malzemesidir [5]. Bu malzemenin endüstride yaygın olarak kullanılmasının önemli sebeplerinden birisi, hem dökülmüş halde, hem de ısıtım işlemi yapılmış şartlarda kullanıma elverişli olmasıdır [5-7]. Küresel grafitli dökme demirlerin aşınma davranışları, matris yapısı ve sertlik ile doğrudan ilişkilidir [8-15]. Döküm durumu perlitik mikroyapıya sahip KGDD, sürtünmenin ve şiddetli abrasiv aşınmanın olduğu aşınma şartlarında yeterince iyi bir aşınma direnci gösterirler [8-11]. Literatürde [16,17] KGDD malzemenin sürtünme katsayısı ilgili çalışmalar sınırlıdır. Ancak küresel grafitli dökme demirlerin kuru kayma aşınma testi sırasında sıcaklık değişiminin ve sürtünme katsayısının ölçülmesi ilgili çalışmaya rastlanmamıştır.

Bu nedenle bu çalışmada, matris yapısının; küresel grafitli dökme demirin kuru kayma aşınma davranışına, sürtünme katsayısına ve pim sıcaklığına etkisi araştırılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Deney Numunelerinin Hazırlanması (Preparation of Experimental Specimens)

Bu çalışmada, Tablo 1'de kimyasal bileşimi verilen döküm durumu ferritik (DDF) ve döküm durumu perlitik (DDP) KGDD malzeme, 25 mm çapındaki silindirik şeklindeki maça kum kalıplara dökülmüştür. Deneysel çalışmada kullanılacak silindirik döküm parçalar tornalanarak 6.25 mm çapında ve 50 mm uzunluğunda aşınma numuneleri elde edilmiştir.

Tablo 1. Döküm durumu perlitik ve ferritik olan numunelerin kimyasal bileşimi (Chemical composition of the as-cast pearlitic and ferritic specimens)							
Malz	C	Si	Mn	P	S	Mg	Cu
DDP	3,2	2,9	0,372	0,024	0,018	0,04	1,644
DDF	3,2	2,9	0,372	0,024	0,018	0,04	0,033

2.2. Mikroyapının Karakterizasyonu (Characterization of Microstructure)

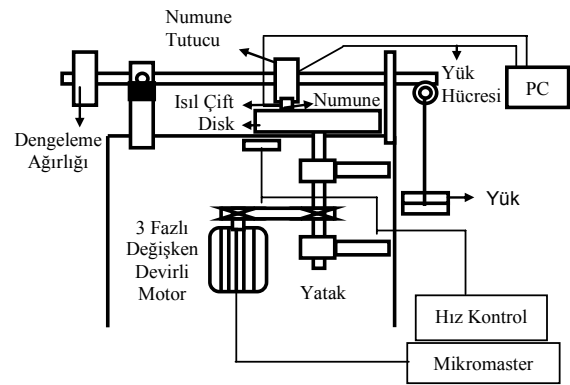
KGDD malzemelerden gömme işlemi yapılan numuneler sırasıyla 250, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 mesh SiC zımpara ile zımparalanmış, 1 µm elmas pasta ile parlatılmış ve %2 Nital ile dağlanmıştır. Mikroyapısal incelemeler Olympus marka optik mikroskop ile yapılmış ve CCD kamera ve yazılım programı ile bilgisayara aktarılmıştır.

2.3. Sertlik Testi (Hardness Test)

Küresel grafitli dökme demir numunelerin sertlik testleri, Instron Wolpert marka sertlik cihazında 20 kg yük kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her bir numune için 10 sertlik testi yapılmış ve değerlerin ortalamaları alınmıştır.

2.4. Aşınma Testi (Wear Test)

KGDD numunelerin aşınma testleri Şekil 1'de şematik olarak gösterilmiş olan disk üzerinde pim cihazında, kuru ortamda, normal atmosfer koşullarında, 1 m s-1 kayma hızında, 20, 40 ve 60 N yük altında ve 3600 m kayma mesafesinde gerçekleştirilmiştir. Aşındırıcı disk olarak 63 HRC sertliğindeki AISI 52100 soğuk iş takım çeliği kullanılmıştır. Diskin yüzeyi deney öncesinde 0.5 µm taşlanmıştır.



Şekil 1. Disk üzerinde pim aşınma cihazının şematik gösterimi (Schematic appearance of pin on disc apparatus)

Sıcaklık ölçümleri için, numunenin temas yüzeyinin 2 mm yukarıdaki mesafede numune yüzeyine sabitlenmiş teflon aparata delinen 1 mm çapındaki delik içerisine yerleştirilen K-tipi ısı çift numune yüzeyine sabitlenmiştir. Kayma yüzeyinde sürtünmenin etkisiyle oluşan sıcaklıktaki değişim kullanılan ısı çift ile monitörden izlenmiştir. Ara yüz kartı ile okunan sıcaklık değişimleri, yazılım ile deney süresince bilgisayara kaydedilmiştir. Sürtünme kuvveti ölçümleri yük hücrelerinden alınan sinyaller yine aynı ara yüz kartı ve yazılım aracılığıyla deney süresince monitörden izlenmiş ve kayıt edilmiştir. Aşınma deneyi süresinde numunelerin aşınma kaybı, pim sıcaklığı ve sürtünme kuvveti ölçümleri eş zamanlı olarak gerçekleştirilmiştir. Ölçülen sürtünme kuvveti değerleri sürtünme katsayısını çevrilmiştir. Aşınma hızı ağırlık kaybı tekniğiyle hesaplanmıştır [11]. Aşınma testinden önce ve sonra numuneler Etıl alkol ile temizlenmiş ve sıcak hava ile kurutulmuştur. Aşınma deneylerinden önce 1000 grit SiC zımpara üzerinde test numunelerinin yüzeyleri zımparalanarak, numune yüzeyi ile disk yüzeyi paralel hale getirilmiş, daha sonra Etıl alkolle temizlenmiş, kurutulmuş daha sonra 0,1 mg hassasiyetindeki elektronik teraziye

tartılmıştır. Her bir testten sonra numuneler Etil alkolle temizleme işlemine tabi tutulmuş daha sonra tartılmıştır. Her numune en az üç teste tabi tutulmuş ve elde edilen değerlerin ortalaması alınmıştır.

3. DENEYSEL SONUÇLAR (EXPERIMENTAL RESULTS)

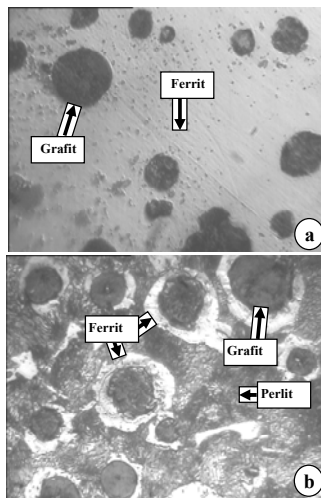
3.1. Mikroyapı (Microstructure)

Bu çalışmada kullanılan ve kimyasal bileşimleri Tablo 1’de verilen döküm durumu ferritik ve perlitik matrisli küresel grafitli dökme demirlerin mikroyapıları Şekil 2’de verilmiştir. Şekil 2 (a)’da görüldüğü gibi döküm durumu ferritik KGDD mikroyapısı ferrit + grafitten meydana gelmektedir. Şekil 2 (b)’de görülen döküm durumu perlitik KGDD malzemenin mikroyapısı ise, grafit kürelerinin etrafının ferrit halkaları ile çevrili olduğu, diğer kısımlarda ise perlitin yer aldığı tipik “dana gözü” yapısına sahiptir.

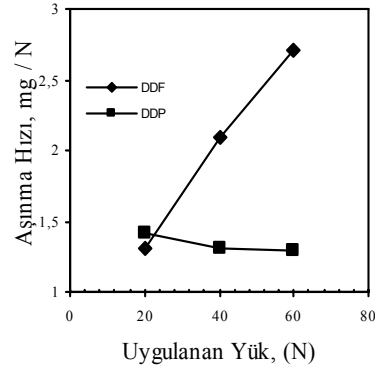
3.2. Aşınma Davranışı (Wear Behaviour)

Döküm durumu ferritik ve perlitik KGDD numunelerin 20 ve 60 N arasında değişen yüklerde ve 1 m/sn kayma hızında aşınma hızları Şekil 3’te verilmiştir. Şekil 3’te görüldüğü gibi döküm durumu ferritik KGDD numunenin aşınma hızı, uygulanan yüke bağlı olarak doğrusal şekilde artmaktadır. Döküm durumu perlitik KGDD numunenin aşınma hızı ise nispeten azalmaktadır. Şekil 3’den aynı deney şartlarında her iki KGDD malzemeye uygulanan yük 40 N’u geçtiğinde, döküm durumu ferritik malzemede aşınma hızı artış eğilimi azalırken, döküm durumu perlitik KGDD’de ise aşınma hızındaki azalma eğilimi düşmektedir.

Metal-metal aşınma deneyi sonrasında döküm durumu ferritik ve perlitik numunelerin 60 N yük altında aşınmış yüzeylerinin SEM görüntüleri Şekil 4’de verilmiştir. Şekil 4’den görüldüğü gibi her iki döküm

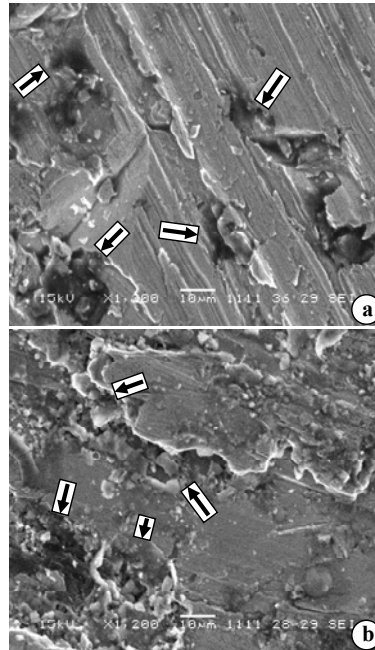


Şekil 2. Döküm durumu (a) ferritik ve (b) perlitik KGDD’in mikroyapısı, X 350 (Microstructure of as-cast ductile iron (a) ferritic and (b) pearlitic, X 350)



Şekil 3. Döküm durumu ferritik ve perlitik numunelerin aşınma hızının uygulanan yük ile değişimi (Variation of wear rate of as-cast ferritic and pearlitic specimens with applied load)

durumu numunede aşırı deformasyon gözlenirken, ancak deformasyonun ferritik numunede daha etkili olduğu ve aşınma yönünde çatlakların oluştuğu görülmektedir. Ayrıca ferritik KGDD numunenin aşınma yüzeyindeki küresel grafitlerin de aşırı miktarda deformasyona uğrayarak şeklini değiştirdiği görülmektedir (Şekil 4a). Şekil 4b’de görüldüğü gibi döküm durumu, perlitik numunenin aşınmış yüzeyinde tabakanın yüzeyden uzaklaşmak üzere olduğu, yani delaminasyon başlangıcının meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 4. 60 N yük altında aşındırılan döküm durumu KGDD numunelerin aşınmış yüzey SEM görüntüleri (a) ferritik ve (b) perlitik (SEM micrograph of worn surface of as-cast ductile iron tested at 60 N load, (a) ferritic, (b) pearlitic)

3.3. Sürtünme Katsayısı ve Pim Sıcaklığı Ölçümleri (Measurements of Friction Coefficient and Pin Temperature)

Şekil 5-6'da ise döküm durumu ferritik ve perlitik numunelerin 20 N, 40 N ve 60 N yük altında gerçekleştirilen aşınma testi sonucu sürtünme katsayısı (SK) ve pim sıcaklığı (Tpim) değişimleri verilmiştir. Şekil 5'den görüldüğü gibi döküm durumu ferritik numunenin 20 N yük altında sürtünme katsayısı deney periyodunun başlangıcında 0-5 dk arasında 0.8'den 0.55'e düşmekte ve daha sonra 5 ile 60 dk arasında ise ortalama 0.63 dür. 20 N yük altında deneyin başlangıç periyodunda pim sıcaklığı değerleri hızlıca yükselirken buna karşılık sürtünme katsayısı düşmektedir. Pim sıcaklığı deney sürecinin 0-5 dakikalık sürecinde 23°C'e yükselmekte, daha sonra deneyin 20 dakikalık periyodunda ise 30°C'ye ulaşmakta ve 60 dakikalık süreç içerisinde ortalama pim sıcaklığı 29,4°C olarak tespit edilmiştir. Ayrıca Şekil 5'den görüldüğü gibi 20 N yük altında genel eğilim olarak deneyin başlangıcında pim sıcaklığı artarken sürtünme katsayısı azalmakta, daha sonraki süreçte ise sürtünme katsayısı maksimum değerini gösterirken, pim sıcaklığı minimum değerinde olduğu görülmekte veya tam tersi durum oluşmaktadır. 40 N yük altında döküm durumu ferritik numunenin ortalama sürtünme katsayısı 0.575'dir (Şekil 5). Ayrıca Şekil 5'den 40 N yük altında sürtünme katsayısı deney periyodunun başlangıcında 0-5 dk arasında 0.4'den 0.475'e yükseldiği görülmekte ve daha sonra sürtünme katsayısı 5 ile 60 dk arasında ise ortalama 0.575'e yükselmektedir. 40 N altında gerçekleştirilen aşınma deneyinde pim sıcaklığı ise deneyin başlangıç periyodunda 0-5 dk aralığında sürekli artış göstererek 40°C'in üzerine çıkarken, daha sonraki süreçte, sıcaklıkta kısmen düşme gözlenmekte, 60 dakikalık süreç içerisinde ise ortalama sıcaklık 42,9°C olarak ölçülmüştür. 60 N yük altında sürtünme katsayısı deney periyodunun başlangıcıyla 0-5 dk arasında 0.52'den 0.45'e düşmekte ve daha sonra 5 ile 60 dk arasında ise ortalama 0.52'dir. 60 N yük altında pim sıcaklığı ise deneyin 0-5 dk süresi içerisinde sürekli bir artış göstererek 56°C'ye kadar çıkmıştır. Daha sonraki süreçte de sıcaklık yükselmeye devam etmiştir ve 0-60 dakikalık periyot içerisinde ortalama sıcaklık 53,6°C'dir (Şekil 5).

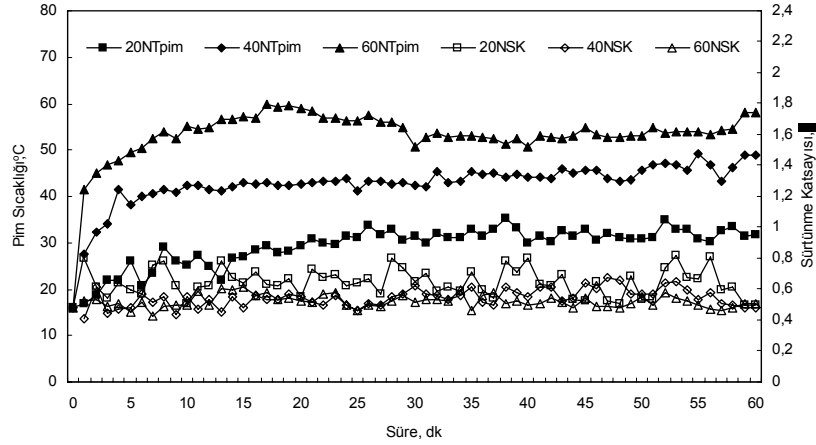
Şekil 6'da görüldüğü gibi döküm durumu perlitik numunenin 20 N yük altında sürtünme katsayısı ile pim sıcaklığı deney periyodunun başlangıcında artmakta pim sıcaklığı ilk 0-5 dakikalık süreçte 30°C'a ulaşırken, sürtünme katsayısı ise 0.55'e yükselmektedir. Daha sonraki 60 dakikalık süreçte ise sürtünme katsayısı ortalaması 0.66 olarak ölçülürken, pim sıcaklığı ortalaması 33,97°C olarak ölçülmüştür. Döküm durumu ferritik KGDD ile döküm durumu perlitik KGDD'lerin 20 N yük altında ölçülen

sürtünme kuvvetleri birbirine yakın çıkarken, ortalama pim sıcaklığı ise döküm durumu ferritik KGDD numunede 29,4°C tespit edilirken, döküm durumu perlitik KGDD ise 33,97°C olarak bulunmuştur (Şekil 5 ve Şekil 6). Şekil 6'dan görüldüğü gibi 40 N yük altında döküm durumu perlitik KGDD malzemenin sürtünme katsayısı 0-5 dakikalık sürede 0.525'e yükselirken, pim sıcaklığı 36°C'a yükselmektedir. Deney sürecinin başlangıcında hem sürtünme katsayısı artmakta, hem de pim sıcaklığı artmaktadır. Daha sonraki deney süresi içerisinde ise sürtünme katsayısı ortalaması 0.6 olarak ölçülürken, pim sıcaklığı ortalaması ise 46°C olarak ölçülmüştür. Döküm durumu perlitik numunenin 60 N yük altında ortalama sürtünme katsayısı 0.608'dir. 60 N yük altında 0-5 dakikalık başlangıç periyodunda sürtünme katsayısı 0.57'ye yükselirken, pim sıcaklığı ise 55,8°C'ye yükselmektedir. 60 dakikalık deney sürecinde ortalama sürtünme katsayısı 0.608 olarak ölçülürken, ortalama pim sıcaklığı ise 71,9°C olarak ölçülmüştür (Şekil 6). 40 ve 60 N yükler altında gerçekleştirilen deneyler sonucunda döküm durumu perlitik numunenin ortalama sürtünme katsayısı ve pim sıcaklığı sırasıyla, 0.6 ve 0.608; 46°C ve 71,9°C olarak ölçülmüştür.

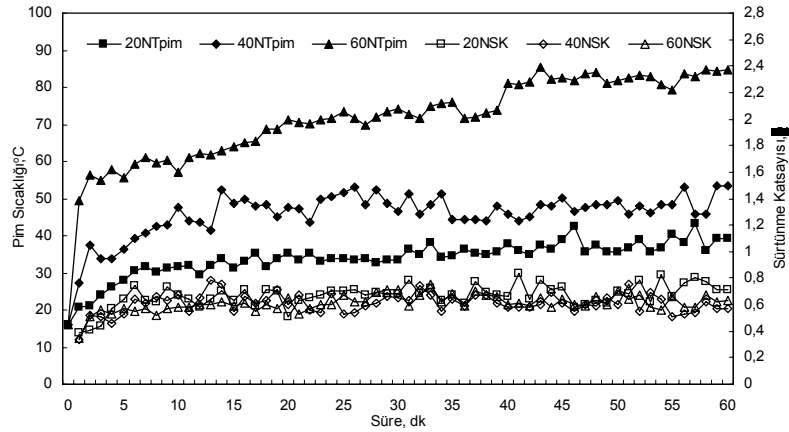
Sonuçlardan görüldüğü gibi uygulanan yükün artışına bağlı olarak hem sürtünme katsayısı artmakta, hem de pim sıcaklığı artmaktadır.

4. TARTIŞMA (DISCUSSION)

Uygulanan yükün artmasıyla birlikte döküm durumu ferritik numunenin aşınma hızı artarken, döküm durumu perlitik numuneninki ise azalmaktadır (Şekil 3 ve Tablo 2). Uygulanan yük 20 N'dan 40 N'a yükseldiğinde aşınma hızı, döküm durumu ferritik KGDD numunede % 60 artarken, döküm durumu perlitik KGDD numunede ise % 9 azalma olmuştur. Uygulanan yük 60 N'a çıkarıldığında ise aşınma hızı döküm durumu ferritik KGDD numunede % 107 artış gösterirken, döküm durumu perlitik KGDD numunede ise % 11 azalma olmuştur. Uygulanan tüm test yüklerinde döküm durumu perlitik KGDD numune, döküm durumu ferritik KGDD numuneden daha az aşınma hızı sergilemiştir (Şekil 3). 220 HV sertliğe sahip döküm durumu perlitik KGDD numunenin, 176 HV sertliğe sahip döküm durumu ferritik KGDD numuneden daha az aşınmasının nedeni bu malzemelerin sertliğiyle doğrudan ilişkilidir (Şekil 7). KGDD malzemedeki matrisin sertliğinin artmasıyla birlikte aşınma kaybı azalmaktadır [8,18,19] veya metallerin sertliği arttığında aşınma miktarı azalır [4]. Başka bir ifadeyle sertliği yüksek olan malzemeler sertliği düşük olan malzemelere göre daha az aşınır.



Şekil 5. Döküm durumu ferritik KGDD numunesinin 20 N, 40 N ve 60 N yükler altında deney süresine karşılık numunelerin sıcaklık ve sürtünme katsayısındaki değişim (Variation of friction coefficient and pin temperatures of as-cast ferritic DI specimens under 20 N, 40 N and 60 N loads, depending on the test time)

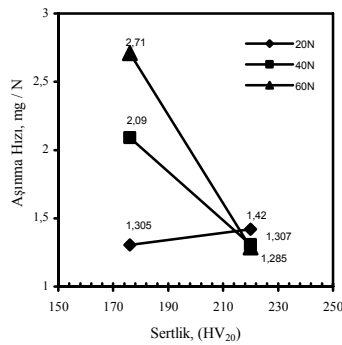


Şekil 6. Döküm durumu perlitik KGDD numunesinin 20 N, 40 N ve 60 N yükler altında deney süresine karşılık numunelerin sıcaklık ve sürtünme katsayısındaki değişim (Variation of friction coefficient and pin temperatures of as-cast pearlitic DI specimens under 20 N, 40 N and 60 N loads, depending on the test time)

Şekil 4'te görüldüğü gibi her iki döküm durumu numune yüzeyinin aşırı deformasyona uğradığı, yüzeyde görülen akma alt yapıda oluşmakta ve aşınma yönünde ağ şeklinde meydana gelen çatlakların aşınma yüzeyi boyunca devam ettiği görülmektedir. Ayrıca aşınma deneyi sürecinde özellikle döküm durumu ferritik KGDD numuneden büyük miktarlarda metal partiküllerinin koptuğu tespit edilmiştir. Özellikle döküm durumu perlitik KGDD

numunenin yüzeyinin adhesyona uğradığı Şekil 4(b)'den görülmektedir. Her iki döküm durumu KGDD numunenin aşınma yüzeyinde küresel grafitlerin aşırı miktarda deformasyona uğrayarak şeklini değiştirdiği Şekil 4'den tespit edilmiştir.

KGDD malzemenin sürtünme katsayısı ve pim sıcaklığının tespitiyle ilgili literatür araştırması sonucu, KGDD malzemelerin aşınma davranışıyla ilgili yapılan çalışmalarda numune sıcaklığı ile birlikte sürtünme katsayısının ölçümünü kapsayan herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Ancak aşınma sonunda oluşan debrislerin analizleri yapılmış, birkaç farklı oksit oluştuğu tespit edilmiş ve oluşan oksitlerin oluşum sıcaklıklarına göre numunelerin temas yüzeylerinin aşınma sırasında sıcaklıklarının yükseldiği gibi genel yaklaşımlar vardır [20–22]. Bu noktadan hareketle aşınma deneyi sırasında, numunenin temas yüzeyinin 2 mm üst kısmından numunenin sıcaklığı ve sürtünme kuvveti eş zamanlı olarak ölçüm yapılarak literatürde eksikliği tespit edilen bu noktalarda katkı sağlanmış olacaktır.



Şekil 7. Numunelerin aşınma hızına uygulanan yüke bağlı olarak sertliğin etkisi (The effect of hardness on the wear rate of the specimens depending on applied load)

Şekil 5-6 incelendiğinde sürtünme katsayısında dalgalanma olduğu, inişli çıkışlı sürekli bir değişim görülmektedir. Bu durumu da deney sırasında oluşan deformasyon ve adhesiv birleşmenin/bağın dayanımı nedeniyle sürtünme katsayısının yüksek değerlere ulaştığı, ayrıca oluşan bağın kırılmasıyla da düşük değerlere düşmesi şeklinde açıklanabilir. Pin ve arkadaşları da [23] çalışmalarında aşınma deneyi sırasında sürtünme katsayısında dalgalanma olduğunu tespit etmişlerdir. Bunun deney sırasında oluşan deformasyondan kaynaklandığını belirtmişlerdir. Ayrıca dökme demir bünyesinde bulunan grafitlerin aşınma yüzeyi üzerinde grafit filmi oluşturduğunu, bu nedenle kaymanın düzenli şekilde devam etmediğini, ancak grafitlerin kayma yüzeyinde film oluşturmasının adhesiv temasın veya adhesiv bağın engellenmesinde etkili olmadığını, fakat oluşan bağın minimum düzeyde oluşmasını sağladığını açıklamışlardır. Ayrıca Anderson [23], bu durumu sürtünme süresince disk yüzeyindeki temas bölgelerinin içine doğru ısının periyodik olarak sürekli değişmesinden kaynaklandığını belirtmiştir. Bu etkiden dolayı sürtünme katsayısında sürekli bir değişim meydana gelir. Diğer bir çalışmada ise bu durumu Stachowiak ve Batchelor [24] sürtünme çiftlerinin yüzeyindeki pürüzlerde birleşme olması ve büyümesi ile açıklamışlardır. Bu durumda yapışma ve ayrılma hali sürekli tekrarlanır, bu da sürtünme katsayısında sürekli artma ve azalmaya neden olur [25].

Şekil 5-6'dan görüldüğü gibi deney yükünün artmasıyla hem sürtünme katsayısı, hem de numune sıcaklığı artmaktadır. Ancak uygulanan yükün 60 N'a çıkmasıyla numune sıcaklığı 20 ve 40 N uygulanan numunelere oranla daha fazla artmaktadır. Ayrıca Şekil 5-6'dan görüldüğü gibi sürtünme katsayısı maksimuma ulaştığında, temas yüzeyinin 2 mm üst kısmından ölçülen pim sıcaklığı özellikle deney periyodunun başlangıç aşamasında maksimuma çıkmaktadır. Döküm durumu perlitik numunelerde sürtünme katsayısı ve numune sıcaklığı döküm durumu ferritik numunelerden daha yüksektir. Bu durum döküm durumu perlitik numunelerin sertliğinin döküm durumu ferritik numunelerden yüksek olmasına atfedilebilir (Şekil 7).

Her iki matris yapısına sahip KGDD numunelerin 20, 40 ve 60 N yükler altında gerçekleştirilen deney

sonucu ölçülen sürtünme katsayılarının bu derece artması veya azalmasının her iki döküm durumu KGDD malzemelerin, mikroyapılarının homojen olmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Jang ve arkadaşları [26] fren balataları üzerine yaptıkları çalışmalarında, yüksek ara yüzey sıcaklıklarında sürtünme katsayısının son derece artmasının ve azalmasının sebebini, dökme demirden yapılan diskin mikroyapısının homojen olmamasından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Sürtünme şartlarında malzemelerin dayanımı üç grup faktöre bağlıdır [3]: Bu faktörler şöyle sıralanabilir: (1) Yapı-yüzey özellikleri; (2) Sürtünme türü (kayma, yuvarlama) ve deney şartları (nispi hız, yük, uygulama türü ve sıcaklık); (3) Çevre şartları ve yağlama.

Tablo 2'de döküm durumu perlitik ve ferritik KGDD'lerin uygulanan deney yüklerine bağlı olarak sürtünme katsayısı, aşınma hızı ve pim sıcaklığı ilişkisi verilmiştir. Tablo 2'den görüldüğü gibi her iki döküm durumu matris yapısına sahip KGDD numunelerin sürtünme katsayıları 20 N yük altında yaklaşık benzer çıkarken, uygulanan yük 40 N ve 60 N'a çıkarıldığında ise döküm durumu perlitik KGDD numunenin sürtünme katsayısı döküm durumu ferritik numuneden daha yüksek çıkmıştır. Bunun yanında uygulanan deney yükünün 20 N'dan 40 N'a çıkarılmasıyla, döküm durumu ferritik ve perlitik KGDD'in sürtünme katsayısında % 9 azalma meydana gelmiştir. Uygulanan yük 60 N'a çıkarıldığında ise sürtünme katsayısı döküm durumu ferritik KGDD numunede % 19 ve döküm durumu perlitik KGDD numunede ise % 8 azalma olmuştur. Bunun yanında döküm durumu ferritik KGDD numuneye uygulanan deney yükü 20 N'dan 40 N'a çıkarılmasıyla numunenin aşınma hızı % 60 artarken, döküm durumu perlitik numunede ise aşınma hızı % 9 azalmaktadır. Uygulanan deney yükü 60 N'a çıkarıldığında ise döküm durumu ferritik KGDD numunenin aşınma hızı % 107 artarken, döküm durumu perlitik KGDD numunenin aşınma hızı ise % 11 azalmıştır. Uygulanan tüm test yüklerinde döküm durumu perlitik KGDD numunenin pim sıcaklığı, döküm durumu ferritik KGDD numuneden daha yüksek çıkmıştır. Aşınma hızı, sürtünme katsayısı ve pim sıcaklığı matris yapısına bağlı olarak değişim göstermiştir. Döküm durumu perlitik KGDD malzeme, döküm durumu ferritik KGDD malzemeye göre; aşınma hızı, sürtünme katsayısı ve pim sıcaklığı

Tablo 2. Döküm durumu perlitik ve ferritik KGDD'lerin değişik yükler altında sürtünme katsayısı, aşınma hızı ve pim sıcaklığı (Friction coefficient and wear rate and pin temperature for as-cast pearlitic and ferritic DI specimens under different loads)

Malzeme	Uygulanan Yük (N)	Ortalama sürtünme katsayısı (μ)	Değişim (%)	Aşınma Hızı (mg/N)	Değişim (%)	Pim Sıc. (°C)	Değişim (%)
DDF	20	0.63	0	1,305	0	29,4	0
	40	0.575	9 (↓)	2,09	60 (↑)	42,9	46 (↑)
	60	0.52	19 (↓)	2,71	107 (↑)	53,6	82 (↑)
DDP	20	0.66	0	1,420	0	33,97	0
	40	0.6	9 (↓)	1,307	9 (↓)	46	35,4 (↑)
	60	0.608	8 (↓)	1,285	11 (↓)	71,9	112 (↑)

değerleri karşılaştırıldığında, her yönüyle daha yüksek performans göstermiştir. Döküm durumu perlitik matris yapısına sahip KGDD malzemenin uygulanan yükün artışına bağlı olarak, döküm durumu ferritik matris yapısına sahip KGDD'ye göre düşük aşınma hızı, yüksek sürtünme katsayısı ve yüksek pim sıcaklığına sahip olması, bu malzemenin matris yapısından ve sertliğinin döküm durumu ferritik KGDD'den yüksek olmasından kaynaklandığı tespit edilmiştir (Tablo 2 ve Şekil 7).

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- 1) Her iki grup numunelerin aşınma hızları, matris yapısına bağlı olarak değişim göstermiştir. Döküm durumu perlitik KGDD'in aşınma hızı uygulanan yükün artışına bağlı olarak azalırken, döküm durumu ferritik KGDD'in aşınma hızı ise uygulanan yükün artmasıyla birlikte artmıştır.
- 2) Döküm durumu ferritik KGDD malzemenin ortalama sürtünme katsayısı, 20 N yük altında 0.63, 40 N yük altında 0.575 ve 60 N yük altında ise 0.52 olarak değişmektedir. Döküm durumu perlitik KGDD malzemenin sürtünme katsayısı ise, 20 N yük altında 0.66, 40 N yük altında 0.6 ve 60 N yük altında ise 0.608 olarak değişmektedir.
- 3) Döküm durumu perlitik KGDD numunelerin sürtünme katsayısı ve sürtünme sıcaklığı, döküm durumu ferritik KGDD'den daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.
- 4) Her iki matris yapısına sahip KGDD numunelerin sürtünme katsayısının azalmasıyla numunelerin sürtünme sıcaklığı artmıştır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

Bu çalışma, 07/2003-32 nolu Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri kapsamında desteklenmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Ostermeyer, G.P. ve Muller, M., "Dynamic interaction of friction and surface topography in brake systems", **Tribology International**, Cilt 39, 370-380, 2006.
2. Dogan, H., Fındık, F., ve Oztarhan, "Comparative study of wear mechanism on surface treated AISI 316L stainless steel", **Industrial Lubrication and Tribology**, Cilt 55, No 2, 76-83, 2003.
3. Tonghe, Z., Huixing, Z., Ji, H., Xiaoji, Y., Yuguang, W., Furong, M., Hong, L., Hanzhang, S. ve Jianzhong, S., "Industrialization of Mevva source ion implantation", **Surface and Coatings Technology**, 128-129, 1-8, 2000.

4. Stachowiak, G.W., ve Batchelor, A.W., "Adhesion and adhesive wear", **Engineering Tribology**, Butterworth-Heinemann, A.B.D, 533-553, 2001.
5. Fatahalla, N., Husein, O. ve Bahi, S., "Metallurgical parameters, mechanical properties and machinability of ductile cast iron", **Journal of Materials Science**, Cilt 31, 5772-5772, 1996.
6. Janowak, J.F. ve Gundlach, R.B., "Development of a ductile iron for commercial austempering", **AFS Transactions**, 83-54, 377-388, 1983.
7. Walton, C.F., "Mechanical properties of ductile iron", **Iron Castings Handbook**, Iron Castings Society Inc., 323-376, 1981.
8. Şenel, L., Çetin, M. ve Gül, F., "Evaluation of dry sliding wear of ductile iron with different matrix microstructures", **3th International Advanced Technologies Symposium**, Ankara, 154-166, 18-20 Ağustos 2003.
9. Velez, J.M., Tanaka, D.K., Sinatora, A. ve Tschiptschin, "Evaluation of abrasive wear of ductile cast iron in a single pass pendulum device", **Wear**, Cilt 251, 1315-1319, 2001.
10. Çetin, M. ve Gül, F., "Alaşım ve aşınmaz östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirin abrasif aşınma davranışına aşındırıcı parçacık boyutu ve östemperleme süresinin etkisi", **12. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi**, İstanbul, 2109-2116, 28 Eylül-02 Ekim 2005.
11. Çetin, M. ve Gül, F., "Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirin Abrasif Aşınma Davranışına Östemperleme İşleminde Soğutmanın Etkisi", **G.Ü. Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi**, Cilt 21, No 2, 359-366, 2006.
12. Çetin, M. ve Gül, F., "Alaşım ve aşınmaz östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirin Kuru Kayma Aşınma Davranışına Östenitleme Süresinin Etkisi", **12. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi**, İstanbul, 1085-1093, 28 Eylül-02 Ekim 2005.
13. Çetin, M. ve Gül, F., "Alaşım ve aşınmaz östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirin Abrasif Aşınma Davranışına Östemperleme Süresinin Etkisi", **1. Uluslararası Mesleki ve Teknik Eğitim Teknolojileri Kongresi**, İstanbul, 5-7 Eylül 2005.
14. Çetin, M. ve Gül, F., "Alaşım ve aşınmaz östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirin Abrasif Aşınma Davranışına Aşındırıcı Parçacık Boyutu ve Östenitleme Süresinin Etkisi", **4th International Advanced Technologies Symposium**, Konya, 908-913, Eylül 28-30 2005.
15. Çetin, M. ve Gül, F., "Alaşım ve aşınmaz östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirin Abrasif Aşınma Davranışına Östenitleme Sıcaklık ve Süresinin Etkisi", **11.**

- Uluslararası Denizli Malzeme Sempozyumu**, Denizli, 86-92, 19-21 Nisan 2006.
16. Zimba, J., Samandi, M., Yu, D., Chandra, T.Y., Navara, E. ve Simbi, D.J., "Unlubricated sliding wear performance of unalloyed austempered ductile iron, under high contact stresses", **Materials & Desing**, Cilt 25, No 5, 431-438, 2004.
 17. Refaey, A. ve Fatahalla, N., "Effect of microstructure on properties of ADI and low alloyed ductile iron", **Journal of Materials Science**, Cilt 38, 351-362, 2003.
 18. Çelik, O., Ahlatcı, H., Çimenoglu, H. ve Kayalı, E.S., "Dry sliding wear of as-cast and ausstempered ductile irons", **4th International Conference on Tribology**, Kayseri, 769-774, 2002.
 19. Lu, Z-L., Zhou, Y-X., Rao, Q-C. ve Jin, Z-H., "An investigation of the abrasive wear behavior of ductile cast iron", **Journal of Materials Processing Technology**, Cilt 116, 176-183 2002.
 20. Islam, M.A., Haseeb, A.S.M.A. ve Kurny, A.S.W., "Study of wear of as-cast and heat-treated spheroidal graphohite cast iron under dry sliding conditions", **Wear**, Cilt 188, 61-65, 1995.
 21. Haseeb, A.S.M.A., Islam, M.A. ve Bepari, M.M.A., "Tribological behaviour of quenched and tempered, and austempered ductile iron at same hardness level", **Wear**, Cilt 244, 15-19, 2000.
 22. Ping, L., ve Bahadur, S., "Friction and wear behavior of high silicon bainitic structures in austempered cast iron and steel", **Wear**, Cilt 138, 269-284, 1990.
 23. Anderson, A.E., "Friction, Lubrication and Wear Technology", **ASM Handbook**, Cilt 8, 569-577, 1992.
 24. Stachowiak, G.W. ve Batchelor, A.W., **Engineering Tribology**, Cilt 1, Heineman, Boston, 2001.
 25. Boz, M., Kurt, A., "Toz Metal Fren Balata Malzemelerinin Sürtünme-Aşınma Performansı Üzerine Çinkonun Etkisi", **Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.**, Cilt 21, No 1, 115-121, 2006.
 26. Jang, H. ve Ko, K. "The Effect of Metal Fibers on the Friction Performance of Automotive Brake Friction Materials", **Wear**, Cilt 256, 406-414, 2004.