

ÖSTEMPERLENMİŞ KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRİN ABRASİV AŞINMA DAVRANIŞINA ÖSTEMPERLEME İŞLEMİNDE SOĞUTMANIN ETKİSİ

Melik ÇETİN ve Ferhat GÜL*

Metal Eğitimi Bölümü, Karabük Teknik Eğitim Fakültesi, ZKÜ, Balıklarkayası Yerleşkesi, 78050 Karabük

* Metal Eğitimi Bölümü, Teknik Eğitim Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Teknikokullar, 06500 Ankara

melikcetin@gmail.com , fgul@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 27.12.2004; Kabul/Accepted: 18.05.2006)

ÖZET

Bu çalışmada, geleneksel tek kademeli östemperleme işleminde, küresel grafitli dökme demir (KGDD) numuneler 900°C'de 1 saat östenitlenmiş, müteakiben tuz banyosunda 400°C'de 2 saat östemperlenmiştir. İki-kademeli östemperleme prosesinde ise KGDD numuneler 900°C de 1 saat östenitlendikten sonra derhal 400°C'lik tuz banyosuna aktarılmış, 10 dakika bu sıcaklıkta bekletildikten sonra banyonun sıcaklığı 1.88°C/dak hızla 250°C'a soğutulmuştur. Geleneksel tek kademeli östemperleme prosesi ile üretilen üst ösferritik ve iki-kademeli prosesle üretilen üst ve alt ösferritik Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demir (ÖKGDD) numunelerin abrasiv aşınma deneyleri, disk üzerinde pim cihazında 10, 20 ve 30 N normal yük altında, 180 mesh (80 µm) boyuta sahip Al₂O₃ zımpara üzerinde gerçekleştirilmiştir. İki kademeli östemperleme prosesiyle üretilen küresel grafitli dökme demirin sertliği, tek kademeli prosesle üretilen dökme demirinkinden daha yüksek olmasına rağmen, her iki dökme demirin benzer abrasiv aşınma davranışı sergilediği görülmüştür. Ayrıca iki kademeli östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirde abrasiv aşınma direnci uygulanan yükün artmasıyla artmıştır.

Anahtar Kelimeler: Abrasive aşınma, östemperlenmiş küresel grafitli dökme demir, sertlik, mikroyapı.

EFFECT OF THE COOLING IN THE AUSTEMPERING PROCESS ON THE ABRASIVE WEAR BEHAVIOR OF AUSTEMPERED DUCTILE IRON

ABSTRACT

In this study, ductile iron was austenised at 900 °C for 1 h and austempered at 400 °C for 2 h in single step austempering process, whereas it was austenised at 900 °C for 1 h and immediately quenched in a salt bath at 400 °C for 10 minutes and then the temperature of bath was decreased by 1.88 °C per minutes down to 250 °C in two-step austempering process. The upper ausferritic austempered ductile iron (ADI) specimens produced by conventional single step austempering process and the upper and lower ausferritic specimens produced by two-step austempering process were abraded on the pin on disc apparatus under the normal load of 10, 20, 30 N, by rubbing the specimens on abrasive Al₂O₃ grains with diameters of 180 Mesh (80 µm). Although the ductile iron austempered in two steps had higher hardness than the ductile iron austempered in single step, they showed similar abrasive wear behavior. In addition, the abrasive wear resistance of two step austempered specimen increased with increasing applied load.

Keywords: Abrasive wear, austempered ductile iron, hardness, microstructure.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirler (ÖKGDD) dökme demirlerin yeni bir sınıfıdır ve özellikleri seçilen östemperleme parametrelerine bağlı olarak değişebilmektedir. ÖKGDD malzemelerinin çekici hale gelmesi, yüksek dayanımla birlikte iyi

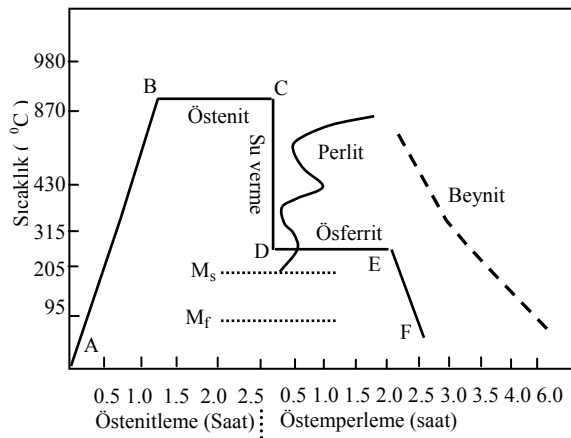
süneklik [1-3], iyi aşınma direnci [4-6] ve yüksek yorulma direnci [7-10] ve kırılma tokluğunun [11-15] mükemmel kombinasyonu gibi benzersiz özelliklere sahip olmasına dayandırılmaktadır. Çeliklerle karşılaştırıldığında ÖKGDD; düşük malzeme maliyetine, düşük üretim maliyetine, düşük yoğunluğa, iyi işlenebilirliğe ve yüksek titreşim söndürme kabiliyetine sa-

hiptir ve bu nedenle, son yıllarda ısıtma işlemi yapılmış çeliklerin kullanıldığı çoğu mühendislik uygulamalarında tercih edilebilir hale gelmiştir [12-14,16]. ÖKGDD'ler, otomotiv, demiryolu ve ağır sanayi gibi geniş bir yelpazede değişen uygulamalar için uygun malzemelerdir. Bu malzemeler dişli, krank mili, kanat, lokomotif tekerleği, tarımsal ekipmanlar gibi aşınma direncinin iyi olması gereken yapısal elemanlarında kullanılmaktadır [11,14].

ÖKGDD'nin mükemmel özellikleri mikroyapısını oluşturan ferrit (α) ve yüksek karbonlu östenit (γ_{yk}) ile ilişkilidir. Östemperlenmiş çelik ise ferrit ve demir karbür içeren yapıya sahiptir. Bu nedenle KGDD'in östemperlenmesiyle oluşan ürün ösferrit olarak isimlendirilirken, çelikte elde edilen ürün beynit olarak isimlendirilir [11-14,17]. Bu çalışmada bu terminoloji kullanılacaktır. KGDD mikroyapısında küresel grafitler de içerir [12-14,17,18]. KGDD içerisinde yüksek Si içeriği östemperleme reaksiyonu sırasında karbür çökmesini engeller ve kararlı yüksek karbonlu östenitin γ_{yk} içeriğini korur [11-15]. Genellikle ÖKGDD'e düşük miktarlarda Ni, Mo ve Cu gibi alaşım elementleri ilave edilerek östemperleme sıcaklığına soğutulma sırasında perlit oluşumu engellenerek bu malzemenin yeterli sertleşebilirliği sağlanır.

Geleneksel östemperleme prosesinde (bu çalışmada tek kademeli olarak isimlendirilmiştir) döküm malzeme 850-950°C sıcaklık aralığında tamamen östenit (γ) matris elde edilene kadar yeterli süre (genellikle 1-2 saat) bekletilir. Bunun ardından 250-400°C sıcaklık aralığına hızla soğutulur ve seçilen sıcaklıkta 1-4 saat süreyle bekletilir, daha sonra oda sıcaklığına havada soğutulur. Geleneksel tek kademeli östemperleme işlemi şematik olarak Şekil 1'de gösterilmiştir.

ÖKGDD ısıtma işlemi döngüsü iki aşamalı prosesle gerçekleştirilir. I. aşamada östenit, ferrit (α) ve yüksek karbonlu östenit(γ_{yk})'e ayrışır.



Şekil 1. Geleneksel (tek kademeli) östemperleme işleminin şematik gösterimi [14] (Schematic appearance of single step (conventional) austempering process)

$$\gamma = \alpha + \gamma_{yk} \quad (1)$$

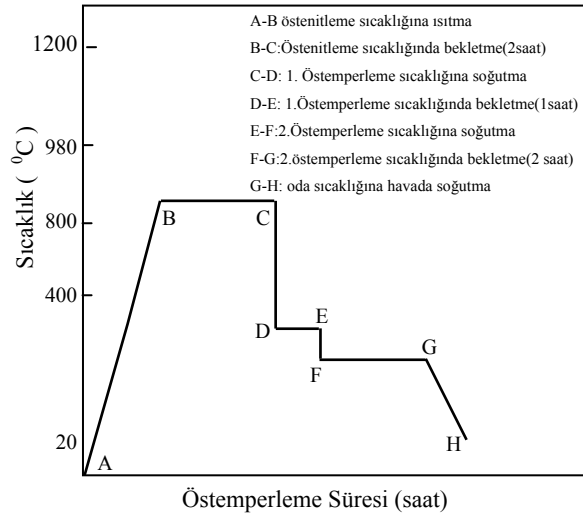
Döküm malzeme östemperleme sıcaklığında çok uzun süre bekletilirse, II. aşama reaksiyonu başlar ve yüksek karbonlu östenit (γ_{yk}), ferrit ve karbür ayrışır:

$$\gamma_{yk} = \alpha + \varepsilon \text{ (karbür)} \quad (2)$$

Optimum mekanik özellikler birinci aşama reaksiyonu tamamlandıktan sonra ikinci aşama reaksiyonu başlamadan önce elde edilir. Birinci aşama sonu ve ikinci aşama reaksiyonu başlangıcı arasındaki süre "işlem aralığı" olarak isimlendirilir. İşlem aralığı Ni, Mo ve Cu gibi alaşım elementlerinin ilavesiyle genişletilebilir. 340°C'nin üzerinde yapılan östemperleme işlemiyle elde edilen ürün üst ösferrit olarak isimlendirilirken, bu sıcaklığın altında yapılan östemperleme işlemiyle elde edilen ürün ise alt ösferrit olarak adlandırılmaktadır [11-14]. Alt ösferrit sıcaklık aralığında daha fazla ferrit ve daha az kalıntı östenit vardır, birinci aşama reaksiyonu sırasında karbonca zenginleşmiş östenit ve ferritle birlikte karbür çökmesi meydana gelir. Üst ösferrit sıcaklık aralığında ise tam tersi durum oluşur.

KGDD malzeme, östenit matris katılma sırasında bazı elementlerin segregasyonundan dolayı homojen değildir. Genel olarak, grafit kürelerinin (ötektik hücreler) etrafındaki östenit içerisinde Si ve Ni gibi alaşım elementlerinin konsantrasyonu oldukça yüksektir. Genellikle hücrelerarası bölge olarak tanımlanan Primer östenit bölgesi yüksek Mn, Mo, Cr ve V konsantrasyonuna sahiptir. Segregasyon miktarı soğuma şartlarına bağlıdır fakat çoğu dökümlerde bu alaşım elementleri malzeme bünyesinde düşük miktarlarda mevcuttur ve 850-950°C sıcaklık aralığında östenitleme işlemiyle kısmen giderilebilir. Homojensizliğin kalması östemperleme reaksiyonu kinetiği üzerinde önemli etkiye sahiptir. Hücrelerarası bölge içerisinde Mn ve Mo yüksek konsantrasyonu östeniti güçlü kararlaştırıcı etkiye sahiptir ve ayrıca karbonun çözünebilirlik derecesini yükseltir. Bunun sonucu ferritte çekirdeklenme ve büyüme sergilemez, birinci aşama reaksiyonun tamamlanması uzar. Belirli durumlarda hücrelerarası bölge içerisinde birinci aşama reaksiyonu henüz tamamlanamazken, arzu edilmeyen ikinci aşama reaksiyonu ötektik hücreler içinde başlar [19,20]. Bu problemi çözmek için iki kademeli proses uygulanmıştır (Şekil 2). Birinci kademede östemperleme işlemi 400°C gibi yüksek sıcaklıklarda başlatılmış, böylece ötektik hücre içerisinde birinci aşama reaksiyonu tamamlanmıştır. Bunu takiben numuneler 300°C sıcaklıkta diğer tuz banyosuna alınmıştır. Böylece hücrelerarası bölge içerisinde birinci aşama reaksiyonu için itici kuvveti artar ve ötektik hücre içerisinde karbürlerin çökmesi geciktirilir. İki kademeli östemperleme ile ötektik hücreler içerisinde üst ösferrit ve hücreler arası bölge içerisinde alt ösferrit yapı elde edilir [19].

Putatunda ve arkadaşları[14,15] iki kademeli prosesi diğer araştırmacılardan farklı uygulamış ve östemper-



Şekil 2. İki kademeli ısıtma işlemi şematik gösterimi [14] (Schematic appearance of two-step austempering process)

leme işleminde tuz banyosunun sıcaklığı artırılarak ÖKGDD malzemenin kırılma tokluğunda gelişme sağlanmıştır. Prado ve arkadaşları [21] ve Owhadi ve arkadaşları [22] dökme demirlerin aşınma dirençleri üzerine ısıtma işlemi değişkenlerinin etkisi araştırılmışlar ve ÖKGDD aşınma direncinin östemperleme sıcaklığı ve süresinin kompleks bir fonksiyonu olduğu belirtilmiştir. İki kademeli ısıtma işlemi şematik gösterimi ÖKGDD'e etkisi henüz detaylı olarak araştırılmamıştır.

Bu çalışmada aşınma davranışına farklı östemperleme şartlarının etkisi belirlenecek ve özellikle iki kademeli östemperleme işleminde soğutma hızının ÖKGDD tribolojik davranışına etkisi araştırılacaktır. ÖKGDD'in aşınma davranışı üzerinde bileşim, ısıtma işlemi prosedürü ve mikroyapı anahtar rol oynamaktadır. Bu amaçla bu çalışmada geleneksel östemperleme sıcaklığı ve kademeli östemperleme prosedüründe özellikle soğutma hızının ferritik ve perlitik ÖKGDD malzemenin abrasiv aşınma davranışına etkisi araştırılmıştır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

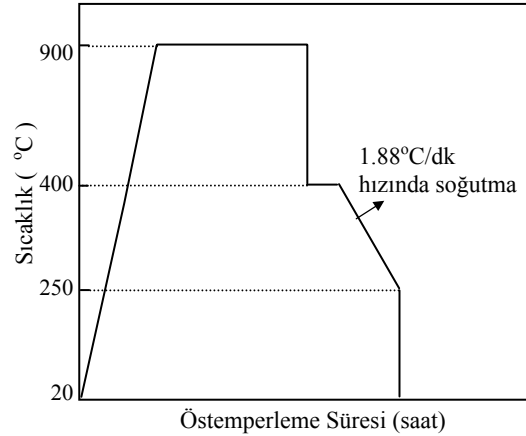
2.1. Deneysel Numunelerin Hazırlanması (Preparation of Experimental Specimens)

Bu çalışmada Çizelge 1'de kimyasal bileşimi verilen ferritik ve perlitik ÖKGDD malzeme, 25mm çapındaki silindirik şeklindeki maça kum kalıplara dökülmüştür. Deneysel çalışmada kullanılacak silindirik döküm parçalar tornalanarak 6.25mm çapında ve 50 mm uzunluğunda aşınma numuneleri elde edilmiştir. Geleneksel (tek kademeli) östemperleme için numuneler 900°C'de 1saat östenitlenmiş ve daha sonra hızlıca 400°C tuz

Çizelge 1. Döküm durumu perlitik ve ferritik olan numunelerin kimyasal bileşimi (Chemical composition of the as-cast pearlitic and ferritic specimens)

Malzeme	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

banyosuna (50% NaNO₃ + 50%KNO₃) transfer edilmiş ve bu sıcaklıkta 2 saat bekletilmiş, daha sonra numuneler oda sıcaklığına hava da soğutulmuştur (Şekil 1). Bosnjak ve arkadaşlarının [19] uyguladığı iki kademeli östemperleme işleminden (Şekil 2) farklı olarak, bu çalışmada östenitleme işlemi müteakip numuneler 400°C'lik tuz banyosuna alınmıştır, bu sıcaklıkta 10 dakika bekletildikten sonra, numunelerle birlikte tuz banyosu sıcaklığı 1.88°C/dak hızında 250°C'e soğutulmuştur. Bu işlemden sonra numuneler tuz banyosundan alınarak oda sıcaklığına havada soğutulmuştur (Şekil 3). Numunelere uygulanan östemperleme işlemine göre birbirinden ayırt etmek amacıyla; geleneksel östemperleme işlemi için ÖKGDD400F ve ÖKGDD400P olarak, kademeli östemperleme işlemi için ÖKGDD400F-250 ve ÖKGDD400-250P şeklinde kodlama kullanılmış, F sembolü döküm hali ferritik, P sembolü döküm hali perlitik yapıyı tanımlamaktadır.



Şekil 3. Çalışmada kullanılan kademeli östemperleme işlemi şematik gösterimi (Schematic appearance of two step austempering process used in study)

2.2. Mikroyapının Karakterizasyonu (Characterization of Microstructure)

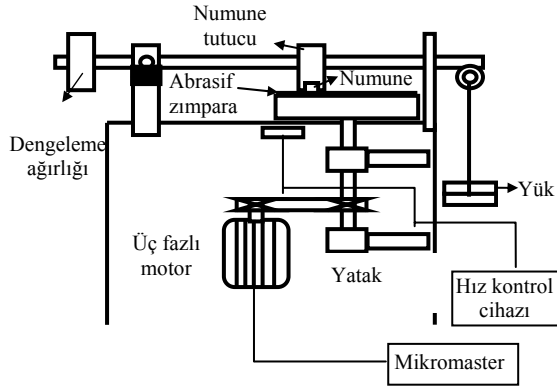
Aşınma deneylerinden önce aşınma numunelerinden kesilmiş olan mikroyapı numuneleri, daha sonra sırasıyla 250, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 mesh SiC zımpara ile zımparalanmış, 1µm elmas pasta ile parlatılmış ve %2 nital ile dağlanmış. Numunelerin mikroyapıları Olympus marka optik mikroskop ile incelenmiş ve CCD kamera ve yazılım programı aracılığıyla bilgisayara aktarılmıştır.

2.3. Sertlik Testi (Hardness Test)

Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demir numunelerin sertlik testleri, INSTRON WOLPERT marka sertlik cihazında 5 kg yük kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her bir numune için 5 sertlik testi yapılmış ve değerlerin ortalamaları alınmıştır.

2.4. Abrasiv Aşınma Testi (Abrasive Wear Test)

ÖKGDD numunelerin metal-abrasiv aşınma testleri, Şekil 4'de gösterilen iki gövdeli disk üzerinde pim



Şekil 4. Disk üzerinde pim aşınma cihazının şematik gösterimi [16,26] (Schematic appearance of pin on disc apparatus)

cihazında 10, 20 ve 30N yükler altında ve 0.1m/sn kayma hızında 180 Mesh (80 μ m) abrasiv Al_2O_3 zımpara üzerinde yapılmıştır. Abrasiv zımpara üzerinde aşınma numuneleri, aşınma yönüne dik şekilde hareket ettirilmiş ve böylece numuneler daima yeni zımpara yüzeyine temas ettirilmiştir. Abrasiv zımpara üzerinde numunelerin toplam kayma mesafesi 7.25 m'dir.

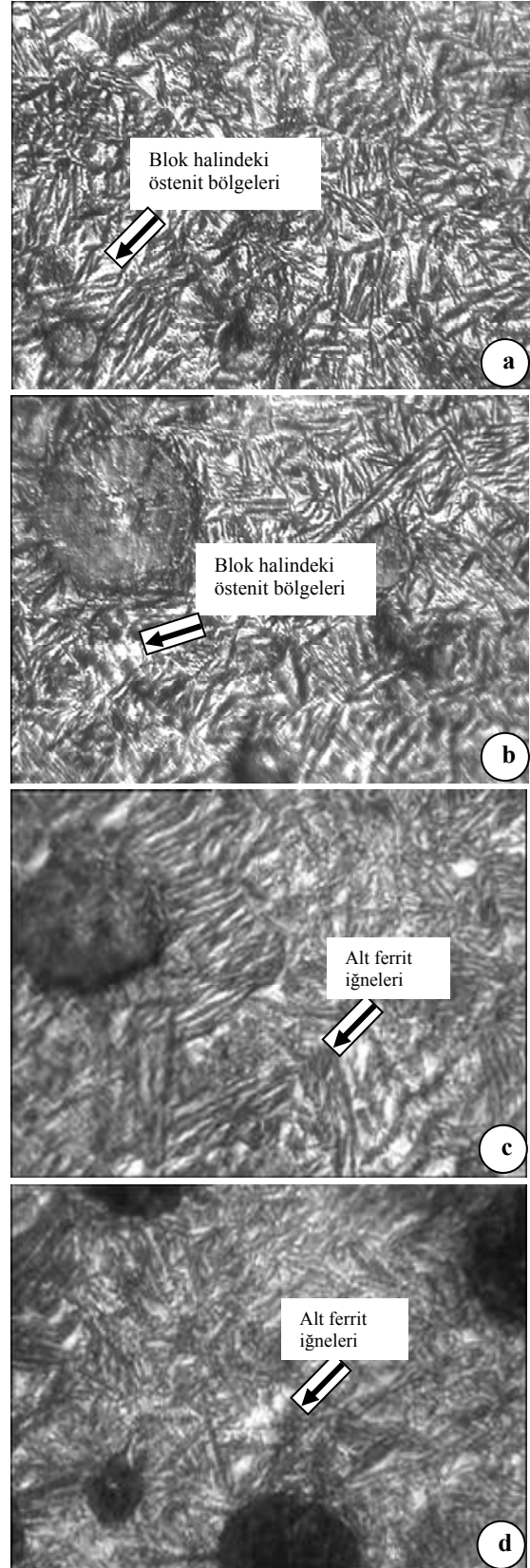
Aşınma deneylerinden önce 1000 grit SiC zımpara üzerinde test numunelerinin yüzeyleri zımparalandıktan sonra Metanol ile temizlenmiş ve sıcak hava ile kurutulmuş ardından 0.1 mg hassasiyetindeki elektronik terazide tartılmıştır. Aşınma hızı ağırlık kaybı yöntemiyle hesaplanmıştır. Bilindiği gibi aşınma kaybı ile uygulanan yükten elde edilen lineer doğrunun eğimi mg/N biriminde aşınma hızını verir. Her numune en az iki teste tabi tutulmuş ve elde edilen değerlerin ortalaması alınmıştır.

3. DENEYSEL SONUÇLAR (EXPERIMENTAL RESULTS)

3.1. Mikroyapı (Microstructure)

Şekil 5'den de görüldüğü gibi genel olarak östemperleme ısıl işlemi sonucu oluşan mikroyapı küresel karbonlu matris içerisinde iğnemsî ferrit plakaları ve kalıntı östenit içermektedir.

Yüksek östemperleme sıcaklığında (400°C) östenit daha az alt soğumaya uğrar bunun sonucu, ferrit iğnelerinin çekirdeklenmesi düşer, ferrit hacim oranı azalır ve matris içerisinde kalıntı östenit hacim oranı artar. Yüksek sıcaklıklarda östemperleme prosesi sonucu kalıntı östenit hacim oranı maksimum ~% 40'a kadar çıkabilmektedir [15,17,19]. Üst östemperleme sıcaklığında karbonun difüzyon hızı çok yüksektir ve buna bağlı olarak da ferrit iğnelerinin büyüme hızı oldukça yüksektir. 400-250°C aralığına 1.88°C/dak hızda soğutulan döküm durumu ferritik ve perlitik numunelerin mikroyapısı iğnemsî ferrit morfolojisine sahipken, 400°C'de östemperlenen numunelerde iğnemsî ferrit kabalaşmakta ve kenar kalınlığı artmaktadır. Ayrıca hücrelerarası bölgede reaksiyona girmeyen bölgeler görülür ve ötektik hücrelerde blok halinde



Şekil 5. 400°C'de östemperlenmiş (a) ferritik (b) perlitik KGDD, iki kademeli (250-400°C) östemperlenmiş (c) ferritik ve (d) perlitik KGDD'in mikroyapısı (X 280) (Microstructure of single step austempered ductile iron at 400°C (a) ferritic, (b) pearlitic DI, two step (250- 400°C) austempered ductile iron (c) ferritic, (d) pearlitic DI, (X 280)

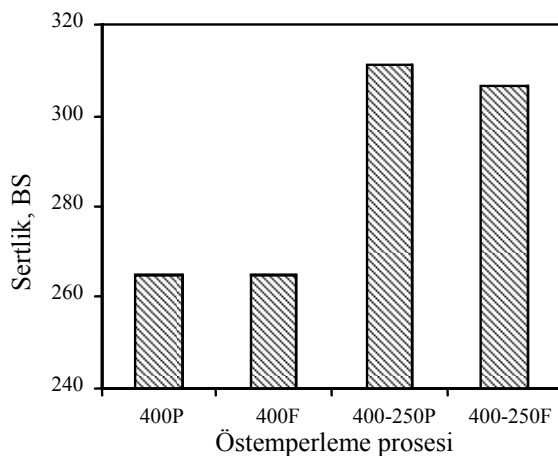
östenit kolonileri hâlihazırda mikroyapıda mevcuttur, bu mikroyapısal özellikler Şekil 5 a, b'de görülmektedir.

1.88°C/dak soğutma hızı uygulanan kademeli östemperleme prosesinden sonra reaksiyona girmeyen hücrelerarası bölgenin azaldığı Şekil 5 c, d'de görülmektedir. Bu prosesin uygulanmasıyla hücrelerarası bölgelerde reaksiyona girmeyen östenit miktarının azaltılmasıyla kalıntı östenit oranının veya kalıntı östenit karbon içeriğinin artmasına imkân sağlar. Bununla birlikte mikroyapıda bu kalıntı östenitlerin bir kısmı ferrit iğnelerinin arasında ince tabakalar şeklinde halihazırda bulunduğu için görülemez [19]. 1.88°C/dak soğutma hızı uygulanan kademeli östemperleme prosesiyle tamamen östemperlenmiş yapıya sahip ÖKGDD malzeme üretimine imkan sağlarken karbür oluşumu engellenir. Kademeli östemperleme ısıl işlemi, ötektik hücre içerisinde II. aşama reaksiyonu başlamadan önce hücrelerarası bölgede I. aşama reaksiyonunun tamamlanmasına olanak sağlar.

Yüksek östemperleme sıcaklıklarında tek kademeli östemperleme işlemi uygulandığında: hücrelerarası bölgeler içerisinde I. aşama reaksiyonu uzun sürede tamamlandığı için, bu kısımlarda I. aşama reaksiyonu devam ederken ötektik hücre içerisinde II. aşama reaksiyonu başlar, II. aşama reaksiyonunun başlamasıyla yüksek karbonlu östenit, ferrit ve karbüre ayrışır, buna bağlı olarak da malzeme yapısını gevreklettiği için mekanik özellikler kötüleşir, bu nedenle yüksek sıcaklıklarda östemperleme işleminin yapılması oldukça zordur.

3.2. Sertlik (Hardness)

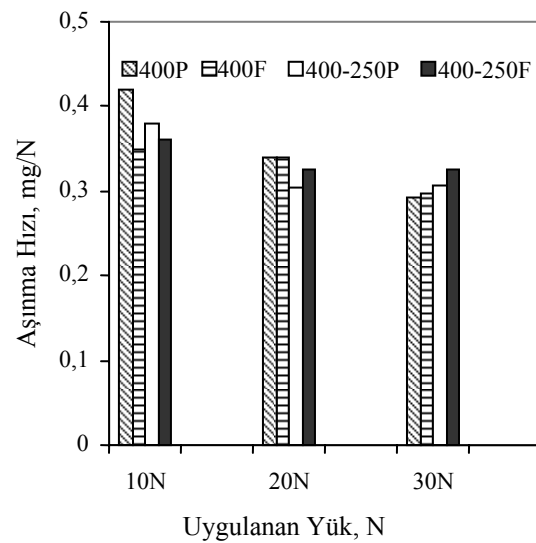
Uygulanan ısıl işleme şartlarına bağlı olarak ÖKGDD numunelerinin sertliklerindeki değişim Şekil 6'da verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi iki kademeli östemperleme işlemi uygulanan numunelerin sertlikleri, geleneksel östemperleme uygulanan numunelere göre daha fazla artış göstermiştir.



Şekil 6. Geleneksel (tek kademeli) ve iki kademeli östemperleme prosesinin ÖKGDD sertliği üzerine etkisi (Influence of conventional (single step) and two-step austempering process on the hardness of ADI)

3.3. Abrasiv aşınma davranışı (Abrasive wear behavior)

Uygulanan farklı östemperleme şartlarına bağlı olarak ÖKGDD numunelerin aşınma hızları Şekil 7'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi uygulanan östemperleme şartlarına ve yüke bağlı olarak numunelerin aşınma hızları farklılık göstermektedir. Ancak döküm durumu ferritik ve perlitik olan KGDD numuneye uygulanan geleneksel östemperleme prosesine bağlı olarak 400 P ve 400 F numunelerinde test yükünün 10N'dan 20 ve 30 N'a artırılmasıyla birlikte aşınma hızı azalmaktadır. İki kademeli proses içerisinde 1.88°C/dak hızında soğutma uygulanan ÖKGDD 400-250F ve ÖKGDD 400-250P kodlu numunelerin aşınma hızları test yükünün 10 N dan 20 N'a çıkarılmasıyla azalırken, test yükünün 30 N'a çıkarılmasıyla aynı numunelerin aşınma hızları artmıştır.



Şekil 7. Geleneksel (tek kademeli) ve iki kademeli östemperleme prosesi uygulanan ÖKGDD'lerin aşınma hızının uygulanan yük ile değişimi (Variation of wear rate of conventional (single step) and two step austempered ADI depending applied load)

Şekil 6'dan görüldüğü üzere geleneksel östemperleme uygulanan numunelerin sertlikleri iki kademeli östemperleme uygulanan numunelere göre daha düşüktür, ancak aşınma hızları ise test yükünün artışına bağlı olarak azalırken, iki kademeli östemperleme uygulanan numunelerde test yükünün 10 N'dan 20 N'a artmasıyla aşınma hızı azalmış, yükün 30 N'a çıkarılmasıyla aşınma hızı artmıştır.

İki kademeli östemperleme işlemi uygulanan numunelerin sertlikleri, geleneksel östemperleme uygulanan numunelere göre artış göstermiş (Şekil 6), sertlik artışına paralel olarak ta bu numunelerin aşınma hızları azalmıştır. Buna ilaveten iki kademeli östemperleme uygulanan ÖKGDD numunelerin abrasiv aşınması sırasında uygulanan yükün artmasıyla birlikte, yüksek karbonlu östenit gerilim/deformasyon nedeniyle martensite dönüşmekte, buna bağlı olarak da numunelerin aşınma yüzeylerinin sertliğinin artmasından dolayı aşınma miktarı azalmıştır. Literatürde

abrasiv aşınma sırasında yüzeydeki yüksek karbonlu östenitin martensite dönüştüğü ve buna bağlı olarak da ÖKGDD'in yüzey sertliğinin ve yüzey sertliğinin artması ile aşınma direncini arttırdığı belirtilmiştir [5,17]. Shepperson ve Allen [24] de ÖKGDD'in mükemmel aşınma direncine sahip olmasının bu malzemenin ferrit-östenit çift fazlı morfolojisinden kaynaklandığını ifade etmektedir. Çünkü yapının abrasiv aşınma testi sırasında, deformasyon nedeniyle östenit martensite dönüşme davranışı göstermektedir. Bu dönüşüm sadece aşınma yüzeyinde meydana geldiği için malzemenin tokluğunda herhangi bir kayıp meydana getirmez [17]. Böylece ÖKGDD malzeme, nadir görülen yüksek dayanım, tokluk ve aşınma direnci kombinasyonu sergiler.

Owhadi ve arkadaşları [22] 1.5 Mn içeren KGDD malzemenin abrasiv aşınma direncinin östenitleme sıcaklığının artmasıyla arttığını belirtmişlerdir. Bunun yanında östemperleme süresinin artmasıyla reaksiyona girmeyen östenit (RGÖ) içeriğinin azaldığını, γ_{yk} içeriğinin arttığını ve sertliğin azaldığı belirtilmiştir. Bununla birlikte % 5-10 aralığında RGÖ içeriğinin ÖKGDD malzemenin abrasiv aşınma direncinin iyileşmesinde faydalı olduğu ifade edilmektedir. Östenitleme sıcaklığının yükselmesiyle ÖKGDD malzemenin abrasiv aşınma direncinin iyileşmesi; östenitleme sıcaklığının yükselmesiyle östenitleme aşamasında karbonu arttırılan östenitle östemperleme yapılması durumunda, düşük sıcaklıkta yapılan östemperleme prosesi sırasında RGÖ hacim oranının arttığını, buna bağlı olarak malzemenin martensite dönüşme eğiliminin artmasına dayandırmışlardır [22]. Kademeli östemperleme ısıl işleminin uygulanmasıyla RGÖ içeriğinin azaltılması amaçlanmıştır, dolayısıyla Owhadi ve arkadaşlarının [22] çalışmasında östemperleme süresinin arttırılmasıyla RGÖ içeriği azaltılırken, bu çalışmada ise 1.88°C/dak hızda soğutma yapılarak RGÖ içeriği azaltılmıştır (Şekil 5 c, d). Dolayısıyla belirli sıcaklıkta östemperleme süresinin arttırılmasıyla RGÖ içeriği azaltılırken aynı zamanda malzemenin sertliği de azalmaktadır [22]. Ancak tuz banyosu içerisinde belirli bir hızda soğutma işlemiyle RGÖ içeriği azalırken aynı zamanda numunenin sertliği de artmaktadır (Şekil 6). Sertliğin artışına paralel olarak kademeli östemperleme uygulanan numunelerin aşınma hızları test yükünün artışına bağlı olarak azalmıştır (Şekil 7).

4. TARTIŞMA (DISCUSSION)

Üst ösferritik bölge içerisinde yaklaşık 2 saat östemperleme periyodunda II. aşama reaksiyonunun başladığının buna bağlı olarak ta γ_{yk} östenit hacim oranının azaldığı yapılan çalışmalarda belirtilmektedir. Ayrıca ÖKGDD malzemenin abrasiv aşınma davranışının γ_{yk} hacim oranına bağlı olduğu belirtilmekte [23] ve diğer çalışmada ise ÖKGDD'in aşınma direncinin yapı içerisinde γ_{yk} içeriğinin artmasıyla azaldığı ifade edilmiştir [25].

Bunun yanısıra üst ösferritik bölge içerisinde östemperleme prosesi gerçekleştiğinde, sıcaklığın yüksek olmasından dolayı alt soğuma düşük olduğu için oluşacak ferrit miktarı azalmakta, buna karşılık γ_{yk} hacim oranı artmakta, alt ösferritik bölgede ise tam tersi durum oluşmakta yani, alt soğumanın yüksek olmasından dolayı daha fazla ferrit çekirdeklenmekte, bunun sonucu ferrit miktarı artmakta, γ_{yk} hacim oranı azalmaktadır. Ayrıca üst ösferritik bölge içerisinde sıcaklığın yüksek olmasından dolayı karbonun difüzyon hızının yüksek olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada buradan hareketle östemperleme prosesi üst ösferritik bölgeden başlatılarak prosenin ilk periyodunda dönüşüm hızı arttırılmış böylece RGÖ hacim oranı azaltılarak, γ_{yk} hacim oranının ve γ_{yk} karbon içeriğinin yükseltilmesi amaçlanmış, müteakiben tuz banyosunun sıcaklığı 1.88°C/dak hızda soğutulmuş, II. aşama reaksiyonunun başlamasına imkan verilmiş, böylece γ_{yk} hacim oranı arttırılmaya çalışılırken, üst ösferrit ile alt ösferrit karışımı mikroyapı elde edilerek, malzemenin sertliğinin artması sağlanmıştır (Şekil 6). Böylece üst ösferrit sıcaklık aralığında uzun süre bekletilmediği için mikroyapının kabalaşmasına izin verilmemiştir. Çünkü 400°C 10 dakika bekletmeden sonra deney periyodunun ilk 30 dakikalık süresi içerisinde literatürde belirtilen alt ösferrit sıcaklığının üst limit sıcaklığına (343°C) ulaşılarak, daha sonraki 30 dakikalık süre içerisinde 287°C sıcaklığına düşürülerek devam etmekte olan I. aşama reaksiyon hızının artması sağlanmış hücrelerarası bölge içerisindeki RGÖ hacim oranı azaltılmıştır. Bu çalışmada östemperleme prosesi için deney süresinin, 100 dakikası tamamıyla alt ösferrit sıcaklık aralığında (343-250°C) gerçekleştirilmiştir. Şekil 5(c) ve 5(d)'den görüldüğü gibi kademeli ısıl işlem prosesiyle elde edilen mikroyapı, geleneksel tek kademeli östemperleme prosesiyle elde edilen mikroyapıdan daha incedir (Şekil 5 (a) ve 5(b)). Belirli bir hızda soğutulmuş gerçekleştirilen izotermal dönüşüm işlemi numunelerin sertliğini yükseltmiştir (Şekil 6). Bunun yanı sıra abrasiv aşınma deneyleri sonuçlarına bakıldığında geleneksel tek kademeli östemperleme prosesi ile iki kademeli östemperleme prosesiyle elde edilen numunelerin aşınma hızları uygulanan test yüküne bağlı olarak değişiklik göstermiştir (Şekil 7). İki kademeli proses ÖKGDD abrasiv aşınma hızı üzerinde düşük deney yükünde (10N) fazla bir etki göstermemesine rağmen, deney yükünün 20N'a çıkarılmasıyla iki kademeli östemperleme uygulanan numuneler geleneksel östemperleme uygulanan numunelerden daha düşük aşınma hızı sergilemiştir. Deney yükünün 30N'a çıkarılmasıyla kademeli östemperleme uygulanan numuneler, geleneksel östemperleme uygulanan numunelerle karşılaştırıldığında ise bu numunelerin aşınma hızı artmıştır (Şekil 7). Test yükünün artışına bağlı olarak aşınma hızının artması, abrasiv aşınma sırasında gerilim nedeniyle yüksek karbonlu östenitin martensite dönüşmesinden kaynaklanmaktadır. Abrasiv aşınma sırasında gerilim nedeniyle yüksek karbonlu östenitin martensite dönüştüğü literatürde belirtilmektedir

[5,17,24,25]. Uygulanan iki kademeli proses içerisinde soğutma hızının bu malzemenin diğer mekanik özelliklerine ve adhesiv aşınma davranışına etkisi araştırılmaya değerdir ve bu konularla ilgili bir sonraki çalışmalar tamamlanma aşamasına gelmiştir. Bu çalışmada ferrit içeriği sabit tutularak yüksek karbonlu östenit hacim oranının yükseltilmesi, bunun yanında RGÖ hacim oranı azaltılarak, östemperleme aşamasından sonra oda sıcaklığına soğutma sırasında düşük karbonlu olan RHÖ martensite dönüşümünün engellenmesi amaçlanmıştır. Böylece yüksek karbonlu östenit hacim oranının yükseltilmesi ile aşınma testi sırasında yalnızca deformasyon nedeniyle γ_{yk} 'in martensite dönüşümü sağlanmış, buna bağlı olarak aşınma yüzeyinin sertliği artırılmıştır. Bu dönüşüm sadece aşınma yüzeyinde olduğu için malzemenin diğer mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemez.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

1. İki kademeli östemperleme prosesi ile ÖKGDD malzemenin sertliği geleneksel (tek kademeli) östemperleme uygulanan numunelere göre arttırmıştır.
2. Geleneksel ve iki kademeli östemperleme prosesi uygulanan numuneler düşük deney yüklerinde aşınma hızları birbirine yakın çıkarken, ancak yüksek yükte (30 N) iki kademeli östemperleme prosesi ÖKGDD'in aşınma hızını belirgin şekilde arttırmıştır.
3. İki kademeli östemperleme prosesiyle üretilen numunelerde yüksek karbonlu östenit içeriğinin artması, abrasiv aşınma hızını arttırmıştır. Yüksek karbonlu östenit içeriğinin aşınma hızı üzerine etkisi, iki kademeli östemperleme prosesiyle üretilen numunelerde geleneksel östemperleme prosesiyle üretilen numunelere göre daha fazladır. Özellikle 30N yük altında abrasiv aşınma sırasında numune yüzeyinde yüksek karbonlu östenitin martensite dönüşmesi, iki kademeli östemperleme prosesiyle üretilen ÖKGDD'in yüzey sertliğini arttırmıştır. İki kademeli prosenin numunelerin sertliğini arttırmasına ilave olarak aşınma sırasında martensite dönüşümle ilave sertlik artışı da iki kademeli prosesle üretilen numunelerin aşınma hızını arttırmıştır.

Teşekkür (Acknowledgements)

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

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Janowak, J.F., Gundlach, R.B., "Development of a Ductile Iron for Commercial Austempering", **AFS Transactions**, 83-54,377-388, 1983.
2. Harding, R.A., Gilbert, G.N.J., "Why the Properties of Austempered Ductile Irons Should Interest Engineers", **The British Foundryman**, 79, 489-496, 1986.
3. Walton, C.F., "Mechanical Properties of Ductile Iron", **Iron Castings Handbook**, Iron Castings Society Inc., 323-376, 1981.

4. Schmidt, I., Schuchert, A.Z., "Unlubricated Sliding Wear of Austempered Ductile Iron", **Metallkunde**, 78, 871-875, 1987.
5. Johansson, M., "Austenitic-Bainitic Ductile Iron", **AFS Transactions**, 77-73, 117-122, 1977.
6. Lerner, Y.S., "Wear Resistance of Austempered Ductile Iron", **Foundry Management & Technology**, 74-80, 1999.
7. Bartosiewicz, L., Krause, A.R., Kovacs, B., Putatunda, S.K., "Fatigue Crack Growth Behavior of Austempered Ductile Cast Iron", **AFS Transactions** 92 (135), 135-143, 1992.
8. Bahmani, M., Elliott, R., Varahram, N., "The Relationship between Fatigue Strength and Microstructure in an Austempered Cu-Ni-Mn-Mo alloyed ductile iron", **Journal of Materials Science**, 32, 5383-5388, 1997.
9. Greno, G.L. Otegui, J.L., Boeri, R.E., Mechanisms of Fatigue Crack Growth in Austempered Ductile Iron", **International Journal of Fatigue**, 21, 35-43, 1999.
10. Dommarco, R.C., Salvande, J.D., "Contact Fatigue Resistance of Austempered and Partially Chilled Ductile Irons", **Wear**, 254, 230-236, 2003.
11. Putatunda, S.K., Gadicherla, K., "Influence of Austenitizing Temperature on Fracture Toughness of a Low Manganese Austempered Ductile Iron (ADI) with Ferritic as Cast Structure", **Materials Science and Engineering A** 268, 15-31, 1999.
12. Rao, P., Putatunda, S.K., "Investigations on the Fracture Toughness of Austempered Ductile Irons Austenitized at Different Temperatures", **Materials Science and Engineering A** 349, 136-149, 2003.
13. Rao, P., Putatunda, S.K., "Investigations on the Fracture Toughness of Austempered Ductile Iron Alloyed with Chromium", **Materials Science and Engineering A** 346, 254-265, 2003.
14. Jianghuai Yang, J., Putatunda, S.K., "Improvement in Strength and Toughness of Austempered Ductile Cast Iron by a Novel Two-Step Austempering Process", **Materials and Design** 25, 219-230, 2004.
15. Putatunda, S.K., "Development of Austempered Ductile Cast Iron (ADI) with Simultaneous High Yield Strength and Fracture Toughness by a Novel Two-Step Austempering Process", **Materials Science and Engineering A** 315, 70-80, 2001.
16. Şenel, L., Çetin, M., Gül, F., "Evaluation of Dry Sliding Wear of Ductile Iron with Different Matrix Microstructures", **3th International Advanced Technologies Symposium**, August 18-20, Ankara, 154-166, 2003.
17. Zimba, J., Simbi, D.J., Navara, E., "Austempered Ductile Iron: An Alternative Material for Earth Moving Component", **Cement & Concrete Composites**, 25, 643-649, 2003.
18. Yescas, M.A., Bhadeshia, H.K.D.H., "Model for the Maximum Fraction of Retained Austenite in Austempered Ductile Cast Iron", **Materials Science and Engineering A** 333 60-66, 2002.

19. Bosnjak, B., Verlinden, B., and Radulovic, B., "Dry Sliding Wear of Low Alloyed Austempered Ductile Iron", **Materials Science and Technology**, 19, 650-656, 2003.
20. Hamid Ali A.S. and Elliot, R., "Influence of Austenitising Temperature on Austempering of an Mn-Mo-Cu Alloyed Ductile Iron, Part 1- Austempering Kinetics and the Processing Window", **Materials Science and Technology**, 12, 1021-1031, 1996.
21. Prado, J.M., Oujol, A., Cullell, J., and Tartera, J., "Dry Sliding Wear of Austempered Ductile Iron", **Materials Science and Technology**, 11, 294-298, 1995.
22. Owhadi, A., Hedjazi, J., Davami, P., "Wear Behavior of 1.5Mn Austempered Ductile Iron", **Journal of Materials Science**, 14, 245-250, 1998.
23. Jeng, M.C., "Abrasive Wear Study of Bainitic Nodular Cast Iron", **Journal of Materials Science**, 28, 6555-6561, 1993.
24. Shepperson, S., and Allen, C., "The Abrasive Wear Behavior of Austempered Spheroidal Cast Irons", **Wear**, 121, 271-287, 1988.
25. Velez, J. M., Tanaka, D.K., Sinatora, A., Tschiptschin, A.P., "Evaluation of Abrasive Wear of Ductile Cast Iron in a Single Pass Pendulum Device", **Wear**, 251, 1315-1319, 2001.
26. Çetin, M., Gül, F., "Effect of Mg on Abrasive and Adhesive Wear Behavior of Al-Cu Casting Alloy", **3th International Advanced Technologies Symposium**, August 18-20, Ankara, 134-145, 2003.