

## TiN Kaplanmış Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirde Pim Sıcaklığının Aşınma Davranışı Üzerine Etkisi

Faik OKAY<sup>1</sup>, Bekir YELMEN<sup>2</sup>, Hasan SERT<sup>3</sup>, Kasım HABALI<sup>3</sup>, Ferhat GÜL<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>Kastamonu Üniversitesi, Kastamonu Meslek Yüksekokulu, Makine Bölümü / KASTAMONU

<sup>2</sup>Aksaray Üniversitesi, Ortaköy Meslek Yüksekokulu, Teknik Programlar Bölümü / AKSARAY

<sup>3</sup>Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü / ANKARA

<sup>4</sup>Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü / ANKARA

Alınış Tarihi:07.01.2012, Kabul Tarihi:06.08.2012

**Özet:** Bu çalışmada, TiN kaplanmış östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin aşınma davranışı üzerinde pim sıcaklığının etkisi incelenmiştir. Aşınma testleri 20, 40 ve 60 N yükler altında 1m/sn kayma hızında ve 1800 m kayma mesafesinde gerçekleştirilmiştir. Aşındırma sırasında pim numune sıcaklıkları, malzemenin sertliği ile artmıştır. TiN kaplamanın yüksek ısı iletkenliğine sahip olması nedeniyle, ÖKGDD-TiN en düşük pim sıcaklığına sahiptir.

**Anahtar Kelimeler:** TiN Kaplama, Adhesif aşınma, Östemperlenmiş dökme demir, pim sıcaklığı

## Effect of Pin Temperature on the Wear Behaviour in the TiN Coated Austempered Ductile Iron

**Abstract:** In this study, the effect of pin temperature on wear behaviour of TiN coated austempered ductile iron was studied. Wear tests were performed on pin-on-disc device under loads of 20 N, 40 N and 60 N, at linear sliding speed of 1m/sec and sliding distance of 1800 m. During the wear tests, pin temperature increased with increasing specimen hardness. ADI coated with TiN have the lowest pin temperature, because TiN coating have high heat transfer coefficient.

**Key Words:** TiN coating, Adhesive wear, austempered ductile iron, pin temperature

### 1. Giriş

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 (Çetin, 2006; Janowak, 1983; Harding, 1986; Walton 1981), iyi aşınma direnci ve yüksek yorulma direnci ve kırılma tokluğunun 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 sahiptir ve bu nedenle, son yıllarda ısı işlem yapılmış çeliklerin kullanıldığı çoğu mühendislik uygulamalarında tercih edilebilir hale gelmiştir (Çetin,2006; Janowak, 1983; Harding, 1986; Walton 1981; Jianghuai, 2004., Putatunda 2001.Stachoviak, 2002), 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 elemanlarda kullanılmaktadır (Jianghuai vd. 2004).

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 değişim gösterecektir (Putatunda,

2001; Çetin, 2007). 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 önemlidir. 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 (Fatahalla, vd. 1996). Bu malzemenin endüstride yaygın olarak kullanılmasının önemli sebeplerinden birisi, hem dökülmüş halde, hem de ısı işlem yapılmış şartlarda kullanıma elverişli olmasıdır (Çetin ve Gül, 2007). Küresel grafitli dökme demirlerin aşınma davranışları, matris yapısı ve sertlik ile doğrudan ilişkilidir (Çetin ve Gül, 2005). Döküm durumu perlitik mikroyapıya sahip KGDD, sürtünmenin ve şiddetli abrasiv aşınmanın olduğu aşınma şartlarında yeterince iyi bir aşınma direnci gösterirler (Çetin ve Gül, 2007).

1960'lı yılların sonunda ince sert kaplama teknikleri alanında Amerika'da PVD metodu geliştirilmiştir. Bu metot 200-500°C arasında sıcaklıklarda yapıldığı için ısı işlem görmüş takım çeliklerini de kaplama imkânı sağlamıştır. Günümüzde geliştirilmeye çalışılan CVD ve PVD teknolojilerinde 1-10 µm arasında kaplama yapılabilmektedir. Kaplamanın kalınlığı az olduğu için kaplanan malzemenin ölçüsünde çok fazla değişiklik olmamaktadır. Kaplama yapılmadan önce yüzeyin

\*fgul@gazi.edu.tr

temizliği ve pürüzlülüğünün en aza indirilmesi, kaplamanın verimliliği açısından önemlidir. (Sert, 1997). Bu çalışmada dökülmüş veya östemperlenmiş halde TiN kaplanmış ve kaplanmamış numunelerin aşınma davranışı üzerine sertliğin etkisi ve sertliğe bağlı olarak pim numune sıcaklığında meydana gelen artışın malzemenin aşınma davranışına etkisi incelenmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Deney Numunelerinin Hazırlanması

35 mm çapında ve 250 mm uzunluğunda silindirik şekle sahip döküm numunelerin üretimi için, % 3,96 C, %1,74 Si, % 0,293 Mn, % 0,026 P, % 0,018 S, % 0,039 Ni, % 0,96 Cu, % 0,042 Cr bileşimine sahip malzeme, 600 kg kapasiteli orta frekanslı ergitme tipi indüksiyon ocağı kullanılmış ve sandviç yöntemi ile küreleştirme işlemi yapılmıştır. Elde edilen döküm numuneler ASTM G99 standardına uygun bir şekilde tormalama ve taşlama işlemi yapılarak 10 mm çapına ve 40 mm boyuna getirilmiştir. Numunelere daha sonra 900°C'de östenitleme ve ardından 360 °C'de 30 ve 90 dakika tuz banyosunda östemperleme ısıl işlemi uygulanmıştır. Dökülmüş ve östemperleme ısıl işlemine tabi tutulmuş olan ASTM G99 standardındaki numuneler, kaplama işleminden önce zımparalanıp aseton ile temizlenmiştir. Daha sonra numuneler PVD yöntemi kullanılarak Çizelge 1'deki parametrelere göre TiN ile kaplanmıştır.

Aşınma testleri, disk üzerinde pim tipi aşınma test cihazında gerçekleştirilmiştir. Aşınma testinde karşılık malzeme olarak 62 HRC sertliğinde AISI 52100 soğuk iş takım çeliğinden imal edilmiş ve su verilmiş ve daha

sonra 0,3 µm hassasiyetinde taşlanmış çelik disk kullanılmıştır. Aşınma deneyleri oda sıcaklığında 1 m/s sabit kayma hızında 20, 40 ve 60 N yükler altında 1800 m kayma mesafesinde gerçekleştirilmiştir. Aşınma testinden önce ve sonra numuneler aseton ile temizlenerek 0,1 mg hassasiyetinde terazi ile tartılmış, elde edilen üç verinin ortalaması aşınma kaybı olarak verilmiştir.

Çizelge 1. TiN kaplama Parametreleri

Yapılan Kaplama	TiN
Yöntem	Katodik Ark
Kaplama Süresi	45 dakika
BIAS Voltajı	-200V
Ark Akımı	50 A
Basınç(Kaplama Öncesi)	10 <sup>-5</sup> Torr
Basınç(Kaplama Esnasında)	10 <sup>-3</sup> Torr
Kalınlık	2,5-3µ
Kaplama Sıcaklığı	250 °C
Termal İletkenlik Katsayısı [12]	25 W/m°C
Sertlik	2300 HV

Yapılan çalışmada numune kodlaması, küresel grafitli dökme demirin baş harflerinden, östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirin ise östemperleme sıcaklığı ve süresine göre yapılmıştır. Ayrıca kaplama yapılan numunelerin başına TiN (Titanium Nitrid) sembolü kullanılmıştır (Çizelge 2).

Çizelge 2. Numune kodlama sistemi

Numune Kodu	Östenitleme sıcaklık ve süresi	Östemperleme sıcaklığı	Östemperleme süresi	TiN Kaplama
KGDD	-	-	-	-
ÖKGDD 360-30	900°C, 1 saat	360 °C	30 dakika	-
ÖKGDD 360-90	900°C, 1 saat	360 °C	90 dakika	-
KGDD TiN	-	-	-	+
ÖKGDD TiN 360-30	900°C, 1 saat	360 °C	30 dakika	+
ÖKGDD TiN 360-90	900°C, 1 saat	360 °C	90 dakika	+

### 2.2 Deney Verilerinin Depolanması

Aşınma deneyi esnasında numune yüzeyinde meydana gelen sıcaklığın ölçülmesi ve deney esnasında numune sıcaklığında meydana gelen değişikliğin görülebilmesi hedeflenmiştir. Numune sıcaklığının ölçülmesinde ısıl çift yöntemi kullanılmıştır. Isıl çift malzemesi elektrik iletkenliği olan iki farklı malzemenin bir noktada birleştirilerek, elektrik iletir hale gelmesinden ibarettir. Isıl çift iki farklı alaşımın ucunun kaynaklanması ile oluşturulan basit bir sıcaklık ölçü elemanıdır. Kaynak noktası sıcak nokta açık iki uç soğuk nokta olarak anılır. Isıl çift olayı sıcak nokta ile soğuk nokta arasındaki sıcaklık farkından doğar. Bu sıcaklık farkına orantılı, soğuk nokta uçlarında mV cinsinden gerilim üretilir. Isıl çift iki farklı metal veya alaşımın tel olmasına rağmen

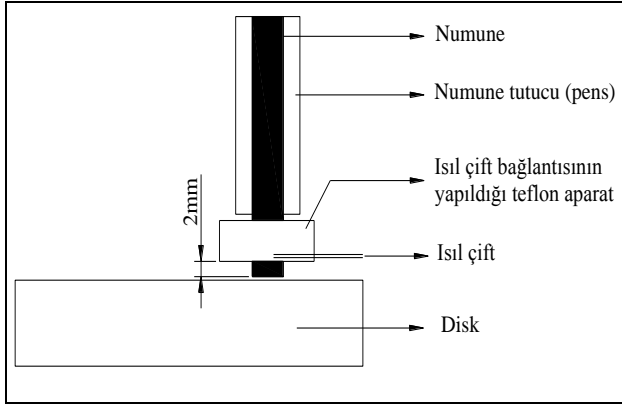
çıplak olarak kullanılmaz. Belli koruyucu kılıflar içinde kullanılırlar. Numune sıcaklığının ölçülmesinde 0,5 mm tel kalınlığında ve 1,5 m uzunluğunda K tipi ısıl çift kullanılmıştır.

Isıl çiftin numuneye konumlandırılması için, teflon malzemenin yapılan aparat ısıl çiftin diskle temas yüzeyinden 2 mm yükseklikte ve deney süresince sabit kalmasını sağlayacak şekilde imal edilmiş olup, Şekil 1'de gösterildiği gibi numuneye sabitlenmiştir. Teflon malzemesi 300 °C sıcaklığına kadar duyarlı olduğu için numune ile herhangi bir ısı transferi olmamıştır. Daha sonra sıcaklık kalibrasyonu için değişik sıcaklıklara karşılık gelen gerilim değerleri belirlenmiştir. Bu veriler program içerisinde bulunan sıcaklık kalibrasyon

bölümüne girilerek numunenin sıcaklığındaki zamana bağlı değişimi belirlenmiştir.

Isıl çiftten gelecek olan veriler, dönüştürücüler, terminal board ve I/O kartı ile bilgisayara aktarılmıştır. Daha sonra bu veriler depolanarak DASSYLab (Data Ascquisition and Software Version 8.0) adlı bir ticari paket program sayesinde veriler analiz edilmiştir.

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.

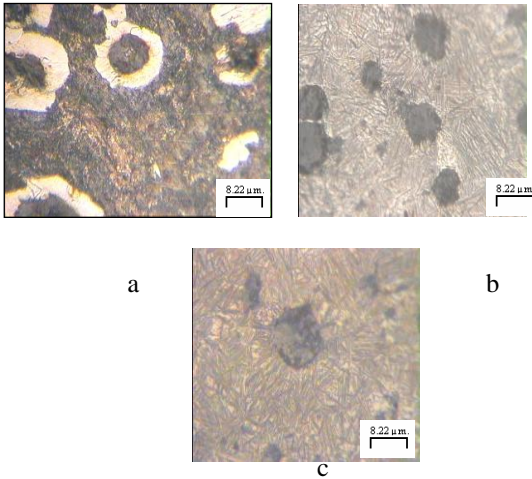


Şekil 1. Isıl çiftin pim üzerine yerleştirilmesi

### 3. Deneysel Sonuçlar

#### 3.1. Mikroyapı ve Mekanik Özellikler

Küresel grafitli dökme demir malzemenin mikroyapısı incelendiğinde, ferritik ve perlitik matristen meydana geldiği görülmüştür (Şekil 2). Grafit küreleşme oranının uygun olduğu ve yapının % 8-9'unu oluşturduğu belirlenmiştir. Östemperleme işlemi için numunelere 900 °C'de 60 dakika östenitleme, daha sonra 360 °C'de 30 ve 90 dakika östemperleme ısıl işlemi yapılmıştır. Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin mikroyapısının, ferrit ( $\alpha$ ), yüksek karbonlu östenit ( $\gamma_{yk}$ ) ve dönüşmemiş östenitten oluştuğu tespit edilmiştir (Çizelge 3).



Şekil 2. a) Döküm durumu KGDD b) 360-30 c) 360-90 östemperlenmiş KGDD mikroyapısı

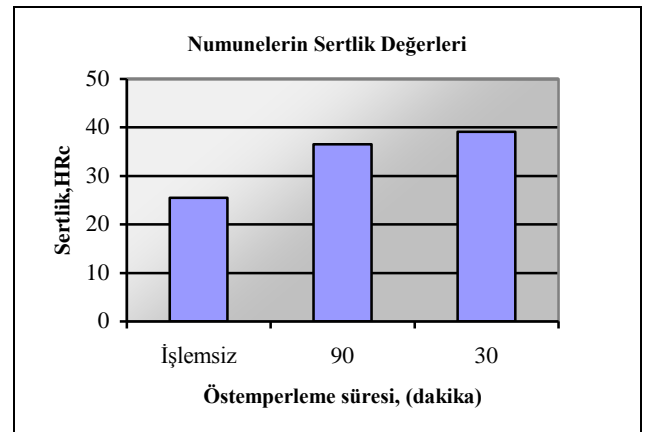
Östemperleme süresinin 30 dakikadan 90 dakikaya çıkmasıyla yapıda dönüşmemiş östenit alanların azaldığı görülmektedir (Çizelge 3). Östemperleme ısıl işleminde östenitleme süresinin 90 dakika ve sıcaklığının 900 °C seçilmesiyle ferrit matrisin östenite dönüşmesi sağlanmıştır. Mallia (1998)'e göre bu sürenin yeterli olduğu saptanmıştır (Mallia vd.1998).

Çizelge 3. Numunelerde oluşan fazların yüzde olarak dağılımı

Numuneler	KGDD	ÖKGDD 360-90	ÖKGDD 360-30
Faz(%)	%80 - P %11 - F	%86 - Ö.F. %14 - D.Ö.	%70 - Ö.F. %30 - D.Ö.

P=Perlit, F=Ferit, Ö.F.=Ösferrit, D.Ö.= Dönüşmemiş Östenit

Numunelerin sertlik değerleri incelendiğinde küresel grafitli dökme demirin sertliği 25,5 HRC'dir. 360 °C 90 dakika östemperlenen numunede sertliğin 36,5 HRC'ye ulaştığı görülmüştür. (Şekil 3). Bu durum östemperleme ısıl işleminin sertliği artırdığını göstermektedir. Östemperleme süresi azaldıkça sertliğin daha da arttığı görülmektedir. Östemperleme süresinin 30 dakikaya düşmesiyle sertliğin 39,1 HRC'ye çıktığı tespit edilmiştir (Şekil 3). Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demir matrisinde bulunan dönüşmemiş östenit alanının, östemperleme süresinin azalmasıyla arttığı görülmektedir. 360-30 ÖKGDD bünyesinde dönüşmemiş östenit alanının fazla olması (%30) sertliği artıran bir faktör olduğu söylenebilir. Dönüşmemiş östenit alanının içinde bulunan kararsız yapı karbür şeklinde numuneye etki ederek sertliği artırmıştır. Bu durum kaynaklar ile paralellik göstermektedir (Fatahalla vd. 1996).



Şekil 3. Numunelerin östemperleme şartlarına bağlı olarak sertlik değerleri

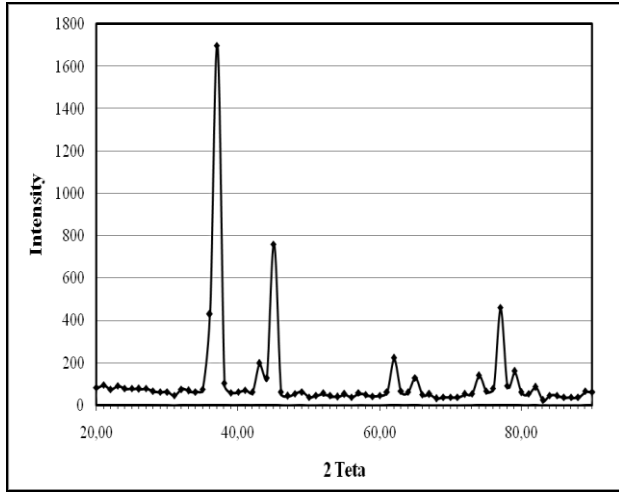
Numunelerin mikrosertlik araştırması yapılmış olup sonuçları Çizelge 4'de verilmiştir. Kaplamalı numunelerin ölçümleri sadece yüzeyden yapılmıştır. Yapılan kaplamanın sertliğinin 2300 HV olduğu tespit edilmiştir. 1800 metre kayma mesafesinde yapılan deneylerde özellikle 60 N yük altında numunelerdeki kaplamanın kısmen kalkmaya başladığı görülmüştür. PVD yöntem ile TiN kaplanan KGDD'nin x-ışını kırınım analizi Şekil

4'de verilmiştir. Analiz sonucuna göre yapıda TiN kaplamanın bulunduğu tespit edilmiştir. Pankiew (2010)'a göre de benzer sonuçlar bulunmuştur (Pankiew vd. 2010).

**Çizelge 4. Numunelerin Mikrosertlik Değerleri(HV)**

YüzeYden Uzaklığı (mm)	KGDD	ÖKGDD 360-30	ÖKGDD 360-90	TiN Kaplı Numuneler
0	269	378	338	2300
0,5	257	395	368	-
1,0	245	389	358	-
3,0	230	389	356	-
5,0	210	378	350	-

\*Mikrosertlik değerleri HV'dir.



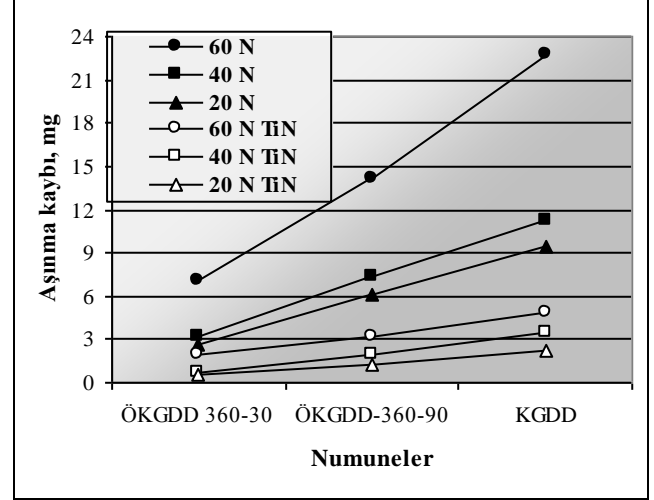
**Şekil 4. TiN kaplı KGDD'nin XRD Analizi**

### 3.2. Aşınma Deneyi Sonuçları

Çalışmada kullanılan tüm numunelerin aşınma kaybı olarak karşılaştırmaları ve kaplamanın aşınma davranışına etkisinin görülebilmesi için aşınma grafiği çizilmiştir (Şekil 6). Aşınma kayıpları incelendiğinde, tüm numunelerde artan yüklerle beraber aşınma kaybının da arttığı görülmektedir. En fazla aşınma miktarı 60 N yük altında küresel grafitli dökme demirde 22,7 mg olarak ölçülmüştür. Bütün numunelerde uygulanan kuvvetin 20 N'dan 40 N'a çıkmasıyla aşınma kaybının ~% 100 arttığı tespit edilmiştir. Küresel grafitli dökme demirde ve östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirde sertliğin artmasıyla aşınma kaybının azaldığı görülmektedir. Yani sertlik arttıkça aşınma kaybı azalmaktadır. Bu durum literatürle bir paralellik göstermektedir (Fatahalla. 1996; Lu. 2002; Dağ.2002).

Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin aşınma direncinin, ısıl işlemsiz dökme demirden daha iyi olduğu anlaşılmaktadır. Östemperleme ısıl işleme mikroyapının ösferrite dönüşerek daha kararlı ve daha yüksek dayanım sergilediği söylenebilir. Mikroyapının bu etkisi, östemperlenmiş numunelerde aşınma direncinin daha iyi olmasının en önemli nedenidir. Ayrıca ısıl işlemler numunelerde östemperleme süresinin artmasıyla aşınma miktarının da arttığı görülmektedir. Östemperleme süresi

30 dakika olan numune yapısında bulundurduğu % 30 oranındaki dönüşmemiş östenit miktarıyla 90 dakika östemperlenen numuneye göre daha kararsız bir haldedir. Bu durumda aşınma deneyi sırasında mekanik etkilerle dönüşmemiş östenitin martenzite dönüşerek malzemenin sertliğini ve dolayısıyla da aşınma direncini artırdığı görülmektedir.



**Şekil 5. Numunelerin ortalama aşınma kayıpları**

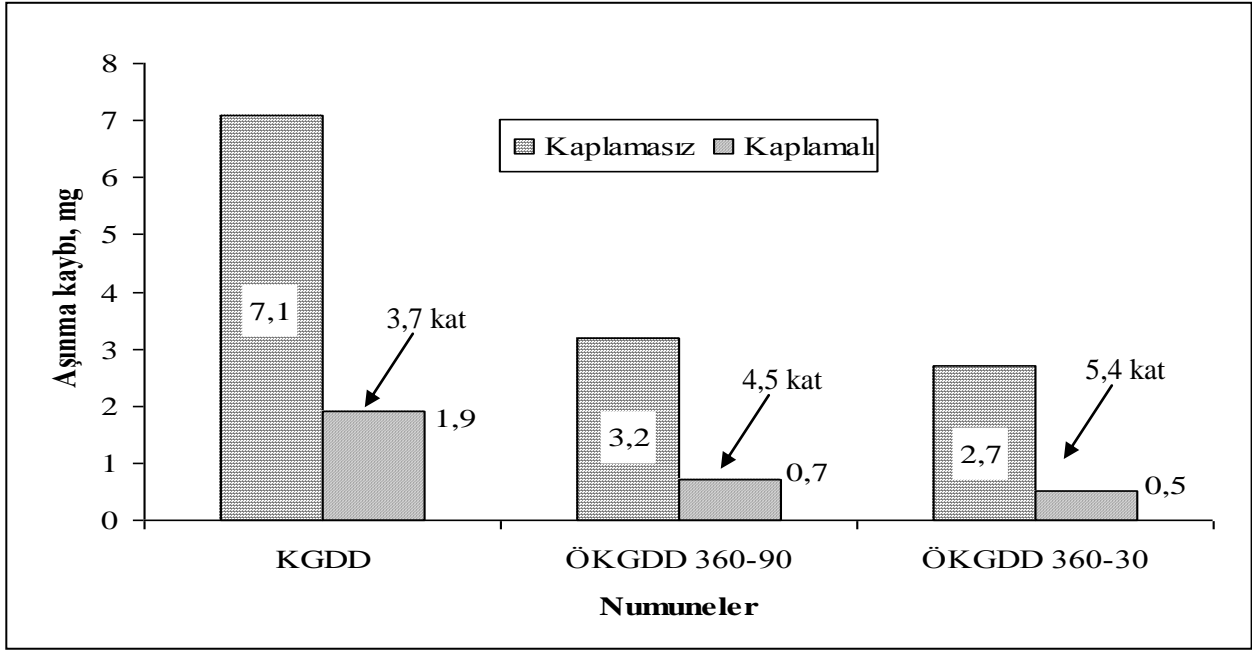
Şekil 5 incelendiğinde tüm deney şartlarında malzemenin sertliği arttıkça aşınma kaybı azalmıştır. 20 N deney yükünde KGDD numunesinde aşınma kaybı 7,1 mg'dır. ÖKGDD 360-90 numunesinde aşınma kaybı 2,7 mg, ÖKGDD TiN 360-30 numunesinde aşınma kaybı 0,5 mg'a düşmüştür. Sonuçlardan da görüldüğu gibi sertleştirilmiş ve kaplanmış numunelerde aşınma kaybı önemli derecede azalmıştır. Dağ (2002), 25 N deney yükünde yaptığı çalışmada sertleştirilmemiş numunede aşınma kaybı 28,4 mg, sertleştirilmiş numunede aşınma kaybı 11,4 mg ve hem kaplanmış hem de sertleştirilmiş numunede ise 3,7 mg'a düştüğu tespit etmiştir.

Şekil 6'da görüldüğu gibi TiN kaplama ile numunelerin aşınma kayıpları azalmıştır. 20 N yük altında, taban malzemesi en yumuşak olan KGDD numunesinin aşınma kaybı 7,1 mg'dan 1,9 mg'a düşmüştür. Yani yapılan kaplama ile numune 3,7 kat aşınmaya karşı dirençli hale gelmiştir. ÖKGDD 360-90 numunesinde yapılan kaplama ile aşınma miktarı 4,5 kat azalmıştır.

Taban malzemesinin sertliği artıkça yapılan kaplamanın da etkisiyle aşınma direnci artmıştır. Taban malzemesi en sert olan ÖKGDD 360-30 numunesinde aşınma kaybı yapılan kaplama ile 5,4 kat azalmıştır.

### 3.3 Pim Sıcaklığı Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Sıcaklık ölçümleri, numune ile diskin temas ettiği ara yüzeYden 2 mm üst kısımdan yapılmıştır. Temas yüzeyindeki sıcaklığın ölçülen noktadaki sıcaklıktan fazla olduğu bilinmektedir. Ancak bu noktadan ölçüm yapmak mümkün olmamıştır. Diğer yandan ölçümler bütün deney şartlarında hep aynı yerden yapıldığı için numunelerin birbiri ile kıyaslanması açısından uygun bulunmuştur.



Şekil 6. 20 N yük altında kaplamanın aşınma davranışına etkisi

Çizelge 5’de görülen sonuçlar incelendiğinde tüm deney şartlarındaki numunelerdeki aşınma deneyi sırasındaki sıcaklık, deney başladığı andaki sıcaklık değeri olarak ortam sıcaklık değeri olan 20 °C alınmıştır. 20 N yük altındaki kaplamasız numunelerin sıcaklık değerleri incelendiğinde sıcaklık değerlerinin tüm numunelerde devamlı artmıştır. En fazla sıcaklık değerinin 360 °C 30 dakika östemperlenen numunede meydana geldiği görülmektedir. Bu numunede deney bitiminde sıcaklığın 45 °C olduğu görülmektedir. Ayrıca bu numune kaplamasız numuneler arasında en sert numunedir. Sıcaklık değeri en düşük olan KGDD numunesi en yumuşak malzeme olarak da dikkat çekmektedir. Numunelerde meydana gelen sıcaklık değerlerini sertlik değerleri ile doğru orantılıdır. Sertlik değeri arttıkça numunenin sıcaklığının da arttığı söylenebilir.

20 N yük altında kaplanmış numunelerde sıcaklık değerleri incelendiğinde ölçülen sıcaklık değerlerinin kaplamasız numunelere benzer şekilde sertlikle doğru orantılı olarak artmıştır. Fakat kaplamanın etkisiyle ölçülen sıcaklık değerlerinde bir miktar düşüşün olduğu görülmektedir. En yüksek sıcaklık değeri kaplama yapılan taban malzemesi en sert olan 360 °C 30 dakika östemperlenen numunede 36 °C olarak ölçülmüştür. Oysa aynı malzemenin kaplamasız numunesinde bu değer 44,7 °C’dir. Yapılan kaplamanın ısı iletkenlik katsayısının yüksek olması sonucu kaplamalı numunelerin daha az ısındığı söylenebilir. TiN kaplamanın ısı iletkenlik katsayısı 25 W/m°C’dir (Çizelge 1).

Yapılan bütün deneylerde artan yüklerle beraber numunenin sıcaklığı da artmıştır. Kaplamalı ve kaplamasız bütün numunelerde sıcaklığın deney esnasında devamlı artış eğiliminde olduğu görülmektedir. Ayrıca, sıcaklık değerlerinin uygulanan yük değerleri ile orantılı bir şekilde arttığı da söylenebilir.

En yüksek numune sıcaklığı 60 N yük altında 360 °C 30 dakika östemperlenen numunede 81,3 °C olarak ölçülmüştür. Bosnjak ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada numune sıcaklığının disk ile numune temas yüzeyinde 200 °C’ye kadar çıkabildiğini öngörmüşlerdir (Bosnjak vd. 2002).

Tüm deney şartlarında en yüksek sıcaklık değeri, en sert malzeme olan ÖKGDD 360–30 numunesinde elde edilmiştir. En düşük sıcaklık değeri ise KGDD numunesinde meydana gelmiştir. Yani sıcaklık değerleri ile sertlik değerleri arasında bir paralellik olduğu, sertlik arttıkça, numune sıcaklığının da arttığı söylenebilir. Bu durumun nedeni olarak, sert malzemelerin deney esnasında aşınmaya karşı daha dirençli olduğu için sürtünmeden dolayı oluşan ısıyı kendi içine emdiği söylenebilir. Yumuşak malzemede ise oluşan ısı, malzemeden kopan parçacıklarla dışarıya kütle yoluyla atılabilmektedir. Dolayısıyla sürtünmeden dolayı oluşan ısı dışarıya atıldığından malzeme fazla ısınmamaktadır. Bu nedenle sert malzemeler yumuşak malzemelere oranla daha fazla ısınmaktadır.

Deneyler esnasında ölçülen sıcaklık değerlerinin aritmetik ortalaması alınmıştır. Bu değerler ortalama sıcaklık değeri diye adlandırılmıştır. Aynı deney şartlarında alınan bu ortalama değerler, numunelerin birbiriyle kıyaslanabilmesini sağlamıştır. Bu değerler Çizelge 6’da verilmiştir.

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde ortalama sıcaklık değerlerinin yük artışına bağlı olarak arttığı görülmektedir (Şekil 7 ve 8). Östemperleme ısı işleminin numune sıcaklığını artırdığı görülmektedir. Aynı zamanda yapılan TiN kaplamanın sıcaklık değerini aynı cins numunede düşürdüğü görülmektedir.

Çizelge 5. Numunelerin sıcaklık denklem ve regrasyon değerleri

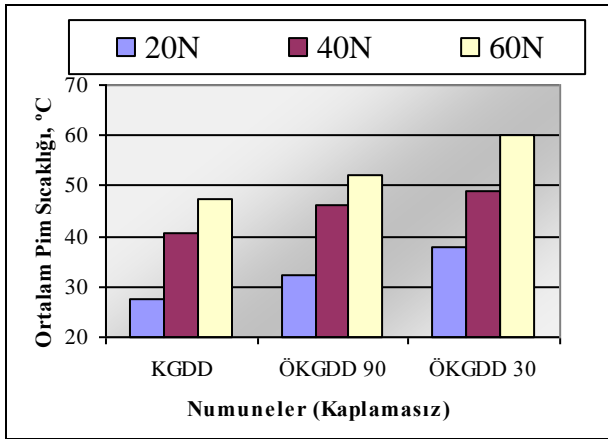
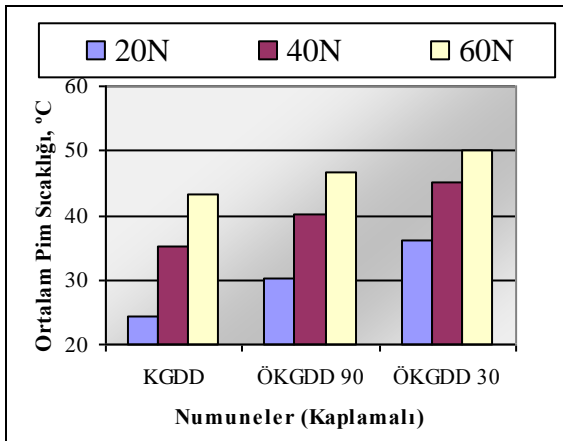
20 N yük altındaki numunelerin sıcaklık değişimi ( °C)						
Numune/ Zaman(dak)	KGDD	KGDD TİN	ÖKGDD 360-90	ÖKGDD TİN 360-90	ÖKGDD 360-30	ÖKGDD TİN 360-30
0	20	20	20	20	20	20
3	21,8	21	22,3	22	23,2	23,1
6	23,1	22,1	24,1	24,1	26,4	25,4
9	24,3	23	26,6	24,5	28,6	26,4
12	25,2	23,9	29,3	25,6	31	28,4
15	26,3	24,8	32,1	27,1	34,1	30,4
18	27,4	25,6	33,6	29	36,5	32,6
21	29	26,7	36,4	30,9	39,4	33,6
24	30,4	27,8	38,4	32,8	41,2	34
27	31,8	28,9	39,7	32	42,9	34,9
30	32,7	29,6	40,7	33,1	44,7	36,0
Regrasyon (R <sup>2</sup> )	0,996	0,999	0,999	0,979	0,997	0,969
Denklem	y=0,417x+19,04	Y=0,322x+19,06	Y=0,761x+17,69	Y=0,471x+19,01	Y=0,858x+18,17	Y=0,550x+19,79

40 N yük altındaki numunelerin sıcaklık değişimi ( °C)						
Numune/ Zaman(dak)	KGDD	KGDD TİN	ÖKGDD 360-90	ÖKGDD TİN 360-90	ÖKGDD 360-30	ÖKGDD TİN 360-30
0	20	20	20	20	20	20
3	22,1	23,5	25,3	25,1	28,1	27,1
6	25,1	25,2	28,1	28,2	31,6	29,2
9	30,2	27,2	33,1	30,3	36,2	33,5
12	34,6	30,5	37,9	32,5	40,2	36,5
15	40,4	33,2	43,8	35,6	45,6	38,8
18	43,1	36,4	47,4	38,8	50,4	41,7
21	47,1	39,1	50	41,1	53,1	44,4
24	50,5	41	53,1	43,8	56	46,4
27	52,3	43,3	55,1	45,4	58,7	47,5
30	53,8	44,1	56,3	46,1	60,3	49,3
Regrasyon (R <sup>2</sup> )	0,993	0,999	0,994	0,998	0,997	0,981
Denklem	y=1,305x+15,00	Y=0,875x+17,49	Y=1,362x+16,90	Y=0,921x+18,86	Y=1,430x+18,39	Y=0,993x+20,12

60 N yük altındaki numunelerin sıcaklık değişimi ( °C)						
Numune/ Zaman(dak)	KGDD	KGDD TİN	ÖKGDD 360-90	ÖKGDD TİN 360-90	ÖKGDD 360-30	ÖKGDD TİN 360-30
0	20	20	20	20	20	20
3	26,6	24,3	29,1	28,1	33,1	31,5
6	33,1	28,2	35,7	31,1	39,1	34,3
9	37,2	30,1	39,4	34,2	43,3	38,2
12	40,5	33,6	43,6	37,3	47,7	41
15	44,1	36,4	46,4	40,4	50,2	44,5
18	47,5	39,8	51,1	43,7	55,2	47
21	50,1	42,9	55,4	46,6	61,3	50,1
24	54,9	45,5	61	50,2	68,2	54,7
27	59,6	48,5	66,5	54,4	74,3	57,6
30	64,7	50,5	70,1	55,1	81,3	58,6
Regrasyon (R <sup>2</sup> )	0,987	0,999	0,999	0,999	0,999	0,986

**Çizelge 6.** Numunelerin ortalama sıcaklık değerleri

NUMUNELER	Sıcaklık, (°C)		
	20 N	40 N	60 N
KGDD	27,6	40,8	47,4
ÖKGDD 360-90	32,4	46,0	52,1
ÖKGDD 360-30	37,8	49,1	60,2
KGDD TiN	24,2	35,2	43,1
ÖKGDD 360-90 TiN	30,3	40,1	46,6
ÖKGDD 360-30 TiN	36,1	45,0	50,1

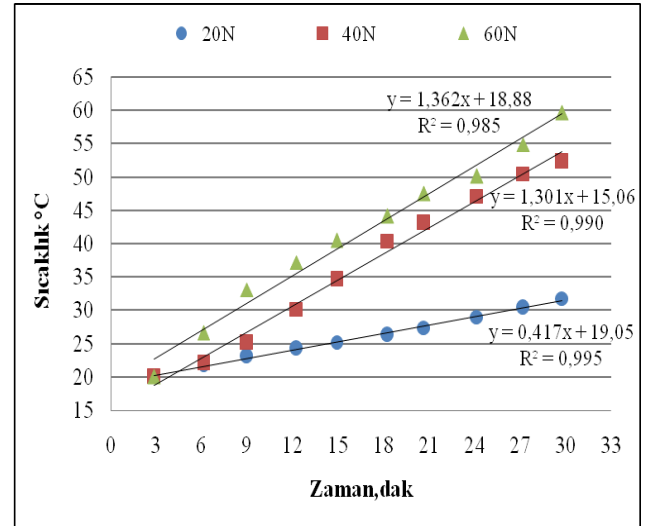
**Şekil 7.** Kaplamasız numunelerde sertliğe bağlı olarak ortalama pim sıcaklığının değişimi**Şekil 8.** Kaplamalı numunelerde sertliğe bağlı olarak ortalama pim sıcaklığının değişimi

Aşınma kaybı-numune sıcaklığı arasında ise ters bir orantının olduğu tespit edilmiştir. Aşınma kaybı arttığı zaman numunenin sıcaklık değeri düşmüştür. Aşınma kaybındaki artış ile kopan parçalarla mevcut ısı dışarı atıldığından numunenin sıcaklığı artmamaktadır.

Numunelerin sıcaklık sonuçlarını değerlendirme aşamasında; belirtme katsayısı değeri ( $R^2$ ) 1,000'a en yakın model en uygun model olarak nitelendirilir. Belirtme katsayısı değeri 0,000 değerine yaklaştıkça modelin verileri temsil etme yeteneği de kötüleşir. Belirtme katsayısı değerinin % 95 gibi yüksek bir değerde

olması arzu edilir (Öztek ve Soysal, 2002). Elde edilen verilerin değerlendirilmesinde istatistiksel yöntemler kullanılmıştır. Numune sıcaklıklarının hesaplanmasında regresyon analizi yapan KStat ve EXCEL gibi bilgisayar programları kullanılmıştır. Deneysel verilerden yararlanarak sıcaklık ile süre arasında bir ilişki sağlanması amacıyla KStat programıyla elde edilen ( $R^2$ ) belirlilik katsayısı ve denklemler test edilmiştir. ( $R^2$ ) belirlilik katsayısı ve denklemlerine ilişkin sonuçlar Çizelge 5'de verilmiştir. Deneysel verilerden elde edilen sonuçlara göre belirtme katsayısı ( $R^2$ ) en yüksek bulunan KGDD TiN modeli ile 20, 40, 60 N'luk kuvvetlerin tamamında 0,999 gibi çok yüksek bir değer saptanırken en düşük değer ise ÖKGDD TiN 360-30 modeli ile 20, 40, 60 N'luk kuvvetlerde sırasıyla, 0,969, 0,981, 0,986'lık bir belirlilik katsayısı elde edilmiştir. Modellerin deneysel verileri arasındaki belirtme katsayıları incelendiğinde en yüksek belirtme katsayısı KGDD TiN modelinde sağlanmış olup 0,9993-1,0000 düzeyindedir

Tüm numunelerin KStat programında belirlilik katsayısı ve denklemleri analiz edilmiştir. Şekil 9'da KGDD numunesine ait analizi gösteren grafik verilmiştir. Diğer numunelere ait sonuçlar Çizelge 5'de verilmiştir.

**Şekil 9.** KGDD numunesinin regresyon analizi

Belirtme katsayısı ( $R^2$ ) kaplamasız numunelerde, malzemenin sertlik arttıkça artmış, kaplamalı numunelerde ise ana malzemenin sertliği arttıkça da azalmıştır.

#### 4. Sonuçlar

- Çalışma kapsamında kullanılan numunelerin mikroyapısı incelendiğinde mikroyapının % 10 ferrit, % 81 perlit ve % 8-9 grafit kürelerinden meydana geldiği tespit edilmiştir. Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirde ise mikroyapının grafit küreleri, ferrit ( $\alpha$ ) ve yüksek karbonlu östenitten ( $\gamma_{yk}$ ) meydana geldiği, ısıl işlem ve süresine bağlı olarak dönüşmemiş östenit (DÖ) matris görülmüştür. Yüksek karbonlu östenit alanları östemperleme süresinin artması ile artma göstermiştir.



- Numunelerden elde edilen sertlik değerleri incelendiğinde, küresel grafitli dökme demirin sertliği 25,5 HRC'dir. Sertlik değerleri östemperleme ısıl işlemi sonucunda büyük oranda artış göstermiştir. 360 °C 30 dakika östemperlenen numunede sertlik 39,1 HRC sertlik değeri elde edilirken, 90 dakika östemperlenen numunede yapısal dönüşüme bağlı olarak sertlik 36,5 HRC değerine düşmüştür.

- Metal-metal aşınma deneylerinde uygulanan yükün artması, kaplama ve sertlik durumuna bağlı olarak aşınma miktarında sürekli artışa neden olmuştur. Ancak artan yükte beraber kaplamanın etkisinin de arttığı görülmektedir.

- Metal-metal aşınma deneylerinde aşınma miktarının numunenin artan sertliği ile doğru orantılı olarak azaldığı görülmektedir. Tüm deney şartlarında en fazla aşınma kaybı küresel grafitli dökme demir numunesinde gerçekleşmiştir. Kaplamasız numuneler arasında en sert numune olan ÖKGDD 360-30 numunesi en yüksek aşınma direncine sahiptir. Zimba ve arkadaşları malzemenin sertliğine bağlı olarak yüksek karbonlu östenit oranının artması sertliği artırdığı için malzemenin daha az aşındığı söylemişlerdir (Zimba vd. 2004).

- Metal-metal aşınma deneylerinde aşınma miktarının yapılan kaplama ile büyük oranda azaldığı görülmektedir. 20 N yük altında KGDD numunesini aşınma kaybı 7,1 mg olarak gerçekleşirken, bu malzemenin kaplamalı halinde aşınma miktarı 1,9 mg'a düşmektedir. Burada kaplama aşınma miktarını 3,7 kat azaltmıştır. Yine aynı numunede 40 N yükte kaplama aşınma kaybını 4,4 kat, 60 N yükte ise 4,6 kat azaltmıştır.

- Hem östemperlenip hem de kaplanan numunelerde aşınma kaybı diğer numunelere göre büyük ölçüde azalmıştır. 60 N yükte KGDD numunesinde aşınma kaybı 22,7 mg'dır. ÖKGDD TiN 360-30 numunesinde aşınma kaybı 3,4 mg'dır. ÖKGDD TiN 360-30 numunesi taban malzemesi en sert olan numunedir.

- Aşınma deneyi sırasında numunelerde malzemenin sertliği artarken aşınma ile atılan partikül miktarı az olduğundan dolayı oluşan sıcaklığın arttığı tespit edilmiştir.

- Yapılan kaplamanın yüksek ısıl iletkenliğe sahip olması nedeni ile aynı deney şartlarındaki TiN kaplanmış tüm numunelerde meydana gelen sıcaklık düşmüştür.

- Metal-metal deneyleri sırasında ölçülen en yüksek numune sıcaklığı en sert numune olan 360-30 ÖKGDD numunesinde 60 N yükte 85 °C'dir.

- Belirtme katsayısı ( $R^2$ ) en yüksek KGDD TiN numunesinde en düşük ise ÖKGDD TiN 360-30 numunesinde hesaplanmıştır.

## Kaynaklar

Bosnjak, B. Verlinden, B. Radulovic, B. 2003. Dry Sliding Wear of Low Alloyed Austempered Ductile Iron, Materials Science and Engineering, 19, 650-656.

Çetin, M. ve Gül, F. 2005 Alaşımız Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirin Kuru Kayma Aşınma Davranışına Östenitleme Süresinin Etkisi, 12. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, İstanbul, 28 Eylül-02 Ekim 2005, 1085-1093.

Çetin, M. Gül, F. 2006. Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirin Abrasif Aşınma Davranışına Östemperleme İşleminde Soğutmanın Etkisi, G.Ü. Mühendislik- Mimarlık Fakültesi Dergisi, 21, 359- 366.

Çetin, M. Gül, F. 2007. Kuru Kayma Şartlarında Matris Yapısının Küresel Grafitli Dökme Demirin Sürtünme Katsayısına ve Pim Sıcaklığına Etkisi, G.Ü. Mühendislik- Mimarlık Fakültesi Dergisi, 22, 273- 280.

Dağ, M. 2002. PVD yöntemi ile TiN Kaplanmış AISI 304 Çeliğinin Aşınma Deneyleri ve Yüzey Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-93.

Fatahalla, N. Husein, O. ve Bahi, S. 1996. Metallurgical parameters, mechanical properties and machinability of ductile cast iron", Journal of Materials Science, 31, 5772-5772.

Harding, R.A. Gilbert, G.N.J. 1986. Why the Properties of Austempered Ductile Irons Should Interest Engineers, The British Foundryman, 79, 489-496.

Janowak, J.F. ve Gundlach, R.B. 1983. Development of a Ductile Iron for Commercial Austempering, AFS Transactions, 83-54,377-388.

Jianghuai Yang, J. Putatunda, S.K. 2004. Improvement in Strength and Toughness of Austempered Ductile Cast Iron by a Novel Two-Step Austempering Process, Materials and Design 25, 219-230.

Lu, Z. Zhou, Y. Rao, C. Jin, Z. 2002. An investigation of The Abrasive Wear Behavior of Ductile Cast Iron", Journal of Materials Processing Technology, 116, 176-183.

Mallia, J. Grech, M. Smallman, R.E. 1998. Effect of Silicon Content on Transformation Kinetics of Austempered Ductile Iron, Materials Science and Technology, 14, 452-460,

Öztekin, S. Soysal, Y. 2002. Denge Nemi Ölçüm ve Hesaplama Yöntemleri, Tarım Ürünleri Çalıştayı, İzmir, 21-21 Mart 2002,



- Pankiew, A. Bunjogpru, W. Sonwag, N.i Porntheeraphat, S., Sopotpan, S., Nukaew, J., Hruanun, C., Poyai, A., 2010. Study of TiN Films Morphology Deposited by DC Magnetron Sputtering in Different N<sub>2</sub>:Ar Mixtures". Journal of the Microscopy Society of Thailand, 24, 103-107.
- Putatunda, S.K. 2001. 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.
- Sert, H. 1997. PVD ile TiN Kaplanmış Alüminyum Ekstürüzyon Kalıplarının Yüzey Özellikleri ve Aşınma Performanslarının Deneysel İncelenmesi, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 1-47.
- Stachowiak, G.W. Batchelor, A.W. 2001. Adhesion and adhesive wear", Engineering Tribology, Butterworth-Heinemann, A.B.D, 533-553.
- Ucun, İ. Aslantaş, K. Apaydın, D. 2010. Çok Kaplamalı Kesici Takımla Tornalama İşleminin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Modellenmesi. Teknolojik Araştırmalar, 7, 69-82,
- Walton, C.F. 1981. Mechanical Properties of Ductile Iron, Iron Castings Handbook, Iron Castings Society Inc., 323-376.
- Zimba, J., Samandi, M. Yu, D. Chandra, T. Navara, E. Simbi, D.J. 2004. Un-Lubricated Sliding Wear Performance of Unalloyed ADI Under High Contact Stres", Materials and Desing, 25, 431 – 438.