



# Farklı Matrisli Dökme Demirlerde Aşınma Özelliklerinin Gözden Geçirilmesi

## Review Of Wear Properties In Different Matrix Cast Irons

Ruziye Çamkerten<sup>1</sup> , Mehmet Erdoğan<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 06500, Ankara, Türkiye

<sup>2</sup> Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, 06500, Ankara, Türkiye

Başvuru/Received: 27/12/2022

Kabul / Accepted: 25/01/2023

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2023

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2023

### Öz

Bu çalışmada, literatürde yer alan dökme demirlerde matris yapı türlerinin aşınma özelliklerine etkileri gözden geçirilmiştir. Dökme demirlerde (DD) matris ferritik olduğunda aşınma kaybı her zaman daha yüksek olmaktadır. Perlitik matrisli DD'lerde aşınma direnci lamellar arası mesafe azaldıkça artmaktadır. Ferritik-perlitik çift matrisli DD'lerde aşınma direnci, perlit hacim oranındaki artışa paralellik göstermektedir. Martensitik matrisli DD'lerde aşındırıcıların kırılma miktarı artarak aşınmaya katkıda bulunmaktadır. Ferritik-martensitik çift matrisli DD'lerde martensitik yapı hacim oranı arttıkça aşınma kaybı azalmaktadır. Östenitik matrisli DD'lerde östenitin daha düşük sertliği ve daha yüksek derecede plastik deformasyonu nedeniyle matrisin güçlü pekleşme sertleşmesi diğer matris yapılarını aşan bir sertlikle sonuçlanarak diğer matrislerden daha iyi aşınma direnci sergilemektedir. Ösferritik matrisli DD'lerde aşınma testi sırasında yüksek bölgesel gerilme veya plastik deformasyonun neden olduğu gerilim kaynaklı östenitten martensite dönüşüm (Transformation induced plasticity-TRIP) aşınma direncini artırmaktadır. Ayrıca yüksek aşınma direncine ösferritik yapının pekleşmesinde katkıda bulunmaktadır. Ferritik-Ösferritik çift matrisli DD'lerde ösferritik yapı hacim oranı arttıkça aşınma kaybı azalmaktadır. Literatürdeki çalışmaların sonuçlarına göre, aşınma direnci açısından matris türleri birbirleri ile karşılaştırıldığında genel olarak östenitik matrisler>ösferritik matrisler>martensitik matrisler>perlitik matrisler>ferritik olarak görülebilir. Aşınma direnci açısından çift matris türleri birbirleri ile karşılaştırıldığında ise genel olarak ferritik+ösferritik matrisler>ferritik+martensitik matrisler>ferritik+perlitik matrisler sıralamasını takip etmektedir.

### Anahtar Kelimeler

“Dökme demir, matris yapısı, aşınma”

### Abstract

In this study, the effects of matrix structure types on the wear properties of cast irons with different matrices in the literature were reviewed. In cast irons (CI), the wear loss is always higher when the matrix is ferritic. Wear resistance of pearlitic matrix CIs increases with decreasing lamella distance. The wear resistance of ferritic-pearlitic dual matrix CIs shows parallelism with the increase in the pearlite volume fraction. In CIs with martensitic matrix, the fracture rate of abrasives increases, contributing to increased wear. In CIs with ferritic+martensitic dual matrix, abrasive wear loss decreases as the martensitic structure volume fraction increases. In CIs with austenitic matrix, the strong strain hardening of the matrix results in a hardness exceeding that of other matrix structures, exhibiting better wear resistance than other matrices, due to the lower hardness and higher degree of plastic deformation of the austenite. In CIs with ausferritic matrix, stress-induced austenite-to-martensite transformation (TRIP) caused by high local stress or plastic deformation during the abrasion test increases the wear resistance. In addition, the hardening of the ausferritic structure contributes to the high wear resistance. In CIs with Ferritic+Ausferritic dual matrix, abrasive wear loss decreases as the ausferritic structure volume fraction increases. According to the results of the studies in the literature, when the matrix types are compared with each other in terms of wear resistance, generally austenitic matrices>ausferritic matrices>martensitic matrices>pearlitic matrices>ferritic. When dual matrix types are compared with each other in terms of wear resistance, they generally follow the order of ferritic+ausferritic matrices>ferritic+martensitic matrices>ferritic+perlitic matrices.

### Key Words

“Cast iron, matrix structure, the wear”

## 1. Giriş

Çok uygun maliyetli dökme demir malzemeler, endüstride çok geniş kullanım alanlarına sahip bulunmaktadır. Bu malzemeler kullanıldıkları koşullar itibari ile de aşınmaya maruz kalabilmektedirler. Farklı türden dökme demir malzemelerde matris yapılarının oluşumunu döküm koşulları, kimyasal bileşim ve uygulanan ısı işlemler belirlemektedir. Dökme demir türü farklı olmakla beraber bu malzemelerdeki matris yapıların ortak paydası ferritik, perlitik, ferrit+perlit, martensitik, martensitik+ferritik, östenitik, ösferritik veya ferritik+ösferritik türlerden olabilmektedir. Bir mikroyapıda çoğunluğu oluşturan matris yapı pek çok mekanik özellikleri belirlemede başat rol oynadığı iyi bilinen bir gerçektir. Bu yaklaşım çerçevesinde literatür taramasının amacı, literatürde yer almış çalışmalar ışığında genel olarak dökme demir malzemelerdeki yukarıda anılan matris yapıların aşınma özelliklerini rapor etmektir.

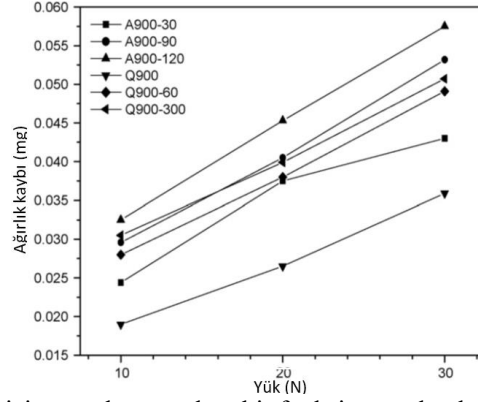
## 2. Dökme Demirlerde Farklı Matris Yapıların Aşınma Özellikleri

Dökme demirlerin aşınma özellikleri ile ilgili literatüre bakıldığında farklı türden ve farklı matrise sahip dökme demirlerde aşınma özelliklerinin incelendiği çok sayıda çalışma görülmektedir (Sellamuthu ve diğerleri, 2018; Sahin & Durak, 2007; Batra ve diğerleri, 2013; Wang ve diğerleri, 2018; Sahin ve diğerleri, 2007; Sharma & Gupta, 2015; Sahin ve diğerleri, 2010; Kumari & Rao, 2009; Zhou ve diğerleri, 1993; Ghaderi ve diğerleri, 2003; Ahmadabadi ve diğerleri, 1991; Krzynska ve diğerleri, 2015; Abedi ve diğerleri, 2010; Wang ve diğerleri, 2017; Velez ve diğerleri, 2001; Haseeb ve diğerleri, 2000; Lerner & Kingsbury, 1997; Keough & Hayrynen, 2005; Laird ve diğerleri, 2000; Vadiraj ve diğerleri, 2010; Balachandran ve diğerleri, 2011; Woodward ve diğerleri, 2022; Cardoso ve diğerleri, 2014; Chiniforush ve diğerleri, 2016; Daber ve diğerleri, 2008; Wen ve diğerleri, 2019; Balos ve diğerleri, 2016; Zhang ve diğerleri, 2014; Zimba ve diğerleri, 2004; Wang ve diğerleri, 2020; Han ve diğerleri, 2015; Lee ve diğerleri, 1999; Turenne ve diğerleri, 1989; Coronado & Sinatora, 2009; Scandian ve diğerleri, 2009; Filipovic ve diğerleri, 2013). Dökme demirlerin aşınma performansın belirlemek için laboratuvar deneylerinde normalde disk üzerinde pin ve halka üzerinde blok test donanımları kullanıldığı görülmektedir.

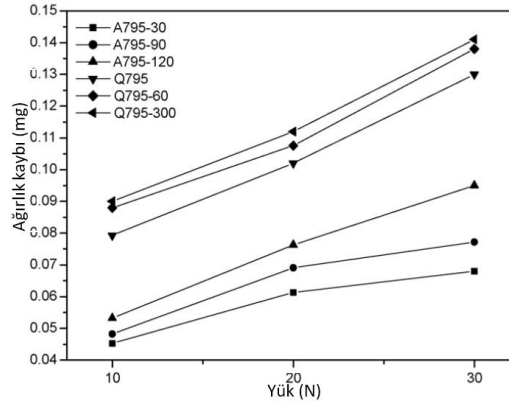
Ösferritik matrise sahip östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin (ÖKGDD) aşınma direncinin incelenmesinde araştırmacılar ÖKGDD'lerde östemperleme sıcaklığı ve bekletme süresinin aşınma direnci üzerindeki etkilerine odaklanmıştır (Sellamuthu ve diğerleri, 2018; Sahin & Durak, 2007; Batra ve diğerleri, 2013; Wang ve diğerleri, 2018; Sahin ve diğerleri, 2007; Sharma & Gupta, 2015; Sahin ve diğerleri, 2010; Kumari & Rao, 2009). Sabit sıcaklıktaki östemperleme sırasında ana östenit fazı bekletme süresine bağlı olarak farklı yapılara dönüşebilmektedir. Östemperleme işleminin erken aşamalarında karbonca yeterince zenginleşmemiş ana östenitin fazının bir kısmı sert martensitik yapıya dönüşürken diğer geriye kalan karbonca zengin östenit, ösferritik (kararlı östenit+beynitik ferrit) yapıya dönüşmektedir. Östemperleme süresi ilerlediğinde östenitin karbonca zenginleşmesi arttığı için sert martensitin yerini daha sünek ve kararlı ösferritik yapı almaktadır. Östemperleme süresinin daha da ilerlemesi kararlı östenitin beynitik ferrit ve karbüre dönüşümüyle sonuçlanmaktadır. Bu aşama da karbür oluşumu nedeniyle sertlik artmaktadır.

Sellamuthu ve diğerleri (Sellamuthu ve diğerleri, 2018), östemperleme sıcaklıklarının artırılmasının, düşük östemperleme sıcaklıklarında oluşan ösferritik yapıya göre daha kaba ve yumuşak ösferritik yapıların oluşumuna yol açtığını ve bu nedenle de ÖKGDD numunelerinde önemli ölçüde yüksek aşınma kaybıyla sonuçlanabileceğini bulmuştur. Östemperleme işleminde bekletme süresinin uzatılması ösferritik yapı hacim oranını artarak martensitik yapının yerini almış ve daha düşük aşınma direnci ile sonuçlanmıştır (Sahin & Durak, 2007; Batra ve diğerleri, 2013; Wang ve diğerleri, 2018; Sahin ve diğerleri, 2007; Sharma & Gupta, 2015; Sahin ve diğerleri, 2010; Kumari & Rao, 2009). Sharma ve diğerleri (Sharma & Gupta, 2015) yüksek östemperleme sıcaklığı veya uzun bekletme süresi altında ÖKGDD'de artan aşınma kaybını daha yumuşak ösferritik yapı hacim oranını artması ve bunun sonucu olarak sertlikteki azalma ile ilişkilendirmişlerdir.

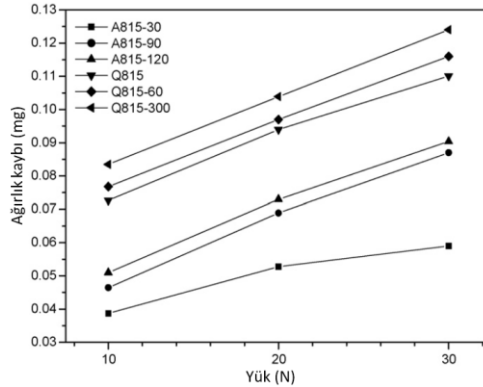
Şahin, Y ve diğerleri (Sahin ve diğerleri, 2007) yapmış oldukları çalışmada farklı hacim oranlı (çift matris- ösferritik+ferritik ve ferritik+martensitik) ve geleneksel östemperlenmiş (tamamen ösferritik matrisli), ve su verilmiş ve temperlenmiş (tamamen martensitik matrisli) KGDD'in abrasif aşınma davranışını incelemiştir. Çalışma sonuçları tamamen martensitik matrisli KGDD'lerin (Su verilmiş ve temperlenmiş - Q serisi) aşındırıcı aşınma kayıplarının tamamen ösferritik matrisli KGDD'lerden (Östemperlenmiş A serisi) az olduğunu göstermiştir (Şekil 1). Ferritik+martensitik çift matrisli yapılarda (Q serisi) martensitik yapı hacim oranı arttıkça aşındırıcı aşınma kaybı azalmıştır. Ösferritik+ferritik çift matrisli yapılarda da (A serisi) benzer bir şekilde ösferritik yapı hacim oranı arttıkça aşındırıcı aşınma kaybı azalmıştır (Şekil 2 ve 3).



Şekil 1. 900 °C'de östenitlenen numuneler için uygulanan yükün bir fonksiyonu olarak ağırlık kaybının değişimi (Sharma & Gupta, 2015).



Şekil 2. 795 °C'de östenitlenen numuneler için uygulanan yükün bir fonksiyonu olarak ağırlık kaybının değişimi (Sharma & Gupta, 2015).



Şekil 3. 815 °C'de östenitlenen numuneler için uygulanan yükün bir fonksiyonu olarak ağırlık kaybının değişimi (Sharma & Gupta, 2015).

Östempelenmiş numunelerin tümünde östempereleme süresinin artması, sert martensitin yerini daha sünek ösferritik yapının almasına neden olmuş ve bu sonuca bağlı olarak da aşındırıcı ağırlık kaybı artmıştır. Diğer bir neden ise, numune yüzeyinin test sırasında pekleşme nedeniyle sertliğin artması sonucu daha az aşınma kaybına yol açmasına dayandırılmıştır.

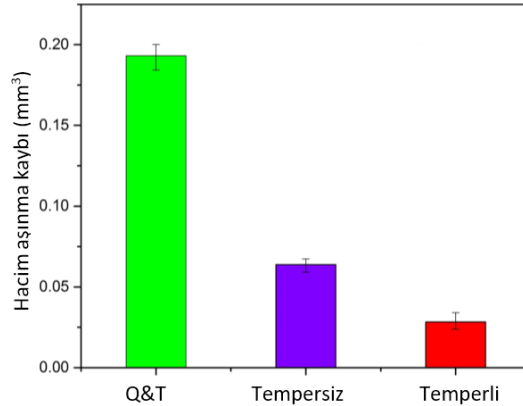
Tamamen martensitik matrisli 900°C'den su verilmiş ve temperlenmiş Q900 numuneleri için, aşındırıcıların kırılma miktarının daha sert numune ile artarak artan aşınmaya katkıda bulunmuştur. Ayrıca mikrokırıntılar, daha sünek malzemeler için mikro talaşlanma modunda baskın aşınma mekanizması olurken, daha sert malzemeler için mikro sürtünme nedenli çizilme baskın aşınma olmuştur, ancak Q numuneleri için mikro sürtünme nedenli çizilme ve yüzeye gömme kombinasyonlarının aşınması da meydana gelmiştir. Çift matrisli arakritik sıcaklık 795°C'den östempelenmiş A795 ve arakritik sıcaklık 795°C'den su verilmiş ve temperlenmiş Q795 numunelerinin yüzeylerinde daha pürüzsüz yüzey gözlenirken tamamen ösferritik matrisli A900-120 ve tamamen martensitik matrisli Q900 numunelerinde ise daha pürüzlü yüzeyler gözlenmiştir.

ÖKGDD'ler diğer bazı demir bazlı malzemelerle karşılaştırıldığında, mükemmel aşınma direnci üretebilir (Zhou ve diğerleri, 1993; Ghaderi ve diğerleri, 2003; Ahmadabadi ve diğerleri, 1991). Ghaderi ve diğerleri (Ghaderi ve diğerleri, 2003), ÖKGDD'nin, özellikle düşük kayma hızı altında, halka üzerinde blok kayma aşınma testlerinde perlitik lamel grafitli dökme demirden (PLGDD) daha yüksek aşınma direnci ürettiğini bulmuşlardır. Ayrıca, Ahmadabadi ve diğerleri (Ahmadabadi ve diğerleri, 1991), demiryolu frenleme uygulamalarında ÖKGDD'in, PLGDD için potansiyel bir ikame olacağını öne sürmüşlerdir. Ayrıca, ÖKGDD'in, ağır yük koşulları altında mangan çeliğinin olası bir ikamesi olduğu gösterilmiştir.

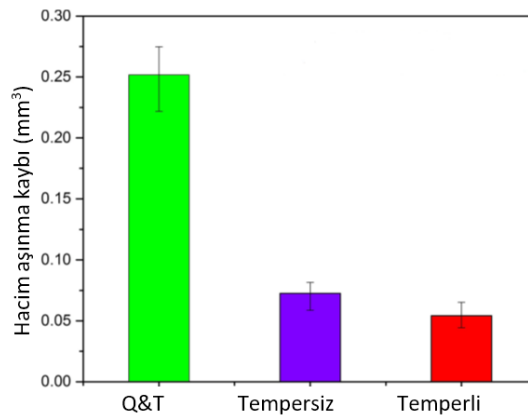
Abedi ve diğerleri (Abedi ve diğerleri, 2010) farklı küresel grafit sayısına sahip ferritik-perlitik KGDD'in kayma aşınma davranışını incelemişlerdir. Sonuçlar, Perlitik KGDD'deki kayma aşınma sürecinin, uygulanan yük ve küresel grafit sayısına bağlı olarak oksidasyon, adeziv (yapışkan) ve delaminasyon (katmanlara ayrılma) olmak üzere üç aşınma mekanizmasında yer aldığını göstermiştir. Uygulanan yük 3,5 kgf'den 5,5 kgf'ye yükseltildiğinde, aşınma mekanizmasında oksidatif aşınmadan delaminasyonla ilişkili adeziv aşınmaya doğru bir değişiklik olduğu gösterilmiştir. Ayrıca, uygulanan düşük yükte, yüksek küresel grafit sayısına sahip numuneler, düşük küresel grafit sayısına sahip numunelere göre daha düşük aşınma direnci sergilerken, daha yüksek yüklerde, küresel grafit sayısının artmasıyla aşınma direnci zayıflamıştır.

ÖKGDD'nin, aşınma performansını eşdeğer sertlikteki farklı matris yapılarla karşılaştıran çalışmaları oldukça sınırlı kalmıştır (Abedi ve diğerleri, 2010; Wang ve diğerleri, 2017; Velez ve diğerleri, 2001; Haseeb ve diğerleri, 2000). Bu çalışmalardan birisini gerçekleştiren (Abedi ve diğerleri, 2010) kalıntı östenitin temperlenmiş ÖKGDD'de dönüşümünün özelliklerini incelemişlerdir. Sonuçlar 177 °C'lik bir tavlama işlemi, ÖKGDD numunelerinin genel sertliğini değiştirmediklerini, kalıntı östenitin bir kısmının yeni kırılğan martensite dönüştürülmesi nedeniyle artan sertliğin matriste mevcut su verilmiş martensitten nispeten yumuşak temperli martensit oluşumuyla dengelendiğini, aynı östemperleme sıcaklığı ve tutma süresi altında, artan temperleme çevrimi sayısı ile kalıntı östenit miktarının azaldığını, aynı bekletme süresi ve tavlama döngüleri altında, matriste daha az kalıntı östenitin bulunduğunu ve daha yüksek östemperleme sıcaklığı altında kalıntı östenitin daha küçük bir dönüşüm yüzdesi meydana geldiğini göstermiştir. Bunun nedeni, ÖKGDD matrisinde daha yüksek karbon içerikli östenit ve iğne benzeri ferrit bulunmasına atfedilmiştir.

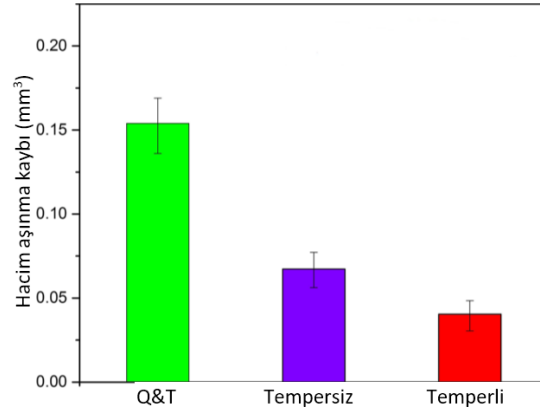
Aynı sertlik için, ÖKGDD, geleneksel su verilmiş ve tavllanmış KGDD'e kıyasla önemli ölçüde daha yüksek aşınma direncine sahip olmuştur. Temperleme işlemi, matriste kalıntı östenit miktarını azalttığı için ÖKGDD aşınma direncini iyileştirmiştir (Şekil 4-6).



**Şekil 4.** 40 dakikalık kayma testinden sonra aşınma hacmi kaybı. (Yeşil, su verilmiş ve temperlenmiş- Q KGDD. Mor, ÖKGDD, 276 °C, temperlenmesiz 30 dk. Kırmızı, temperlenmiş ÖKGDD, 276 °C, üç temperleme çevrimli 30 dk) (Abedi ve diğerleri, 2010)



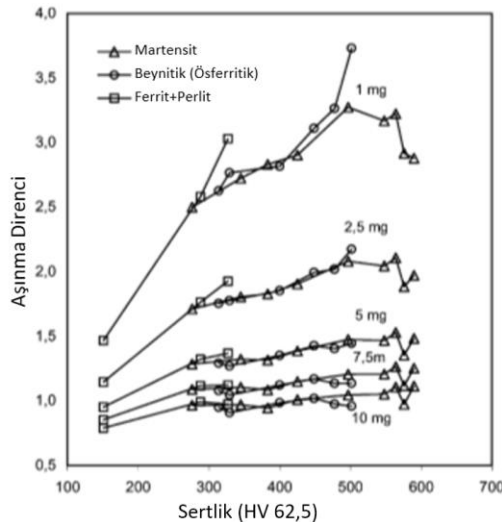
**Şekil 5.** 5 dakikalık kayma testinden sonra aşınma hacmi kaybı. (Yeşil, su verilmiş ve temperlenmiş – (Q&T) KGDD döküm. Mor, ÖKGDD, 321 °C, temperlenmesiz 45 dk. Kırmızı, temperlenmiş ÖKGDD, 321 °C, üç temperleme çevrimli 45 dk) (Abedi ve diğerleri, 2010)



**Şekil 6.** 8 dakikalık kayma testinden sonra aşınma hacmi kaybı. (Yeşil, su verilmiş ve temperlenmiş KGDD. Mor, ÖKGDD, 373 °C, 30 dk, temperlemesiz. Kırmızı, temperlenmiş ÖKGDD, 373 °C, 30 dk, üç temperleme çevrimli) (Abedi ve diğerleri, 2010)

Vélez, J. M. ve diğerleri (Velez ve diğerleri, 2001) tek geçişli bir sarkaç cihazında farklı matris mikro yapılarına (ferrit, perlit, ösferritik ve martensit) sahip KGDD'in aşındırma aşınmasını incelemişlerdir. Yine bu çalışmada da ÖKGDD'nin, aşınma performansı eşdeğer sertlikteki diğerleriyle karşılaştırılmıştır. Çalışma sonuçları şu şekilde sıralanabilir (Şekil 7).

- Sertliği 280 ile 330HV arasında değişen ince perlit numuneleri, aynı sertliğe sahip östemperlenmiş veya su verilmiş ve temperlenmiş numunelere göre daha yüksek aşınma direnci göstermiştir.
- Alt beyrit ÖKGDD (östemperleme sıcaklıkları 260–300°C aralığında ve sertlik 450 ila 500 HV arasında), 30 µm derinliğinde çizikler yapıldığında, aynı sertlikteki su verilmiş ve temperlenmiş KGDD'e (400 ila 450°C arasında temperleme sıcaklığı) göre, daha yüksek aşınma direnci göstermiştir. 100 µm'den daha derin çizikler için su verilmiş ve temperlenmiş dökme demirler daha iyi performans göstermiştir.
- Sertliği 300HV düzeyinde olan KGDD'lerde ve 60 µm derinliğe kadar olan çiziklerde en iyi performans perlitik matrisli KGDD'e elde edilmiştir.
- 450HV düzeyinde sertlikteki KGDD'ler için, aşındırıcı aşınmaya karşı en iyi direnç, ösferritik matrisli malzemede bulunmuştur.
- Sertliği >500HV olan ve tavlanmış martensitik matrisli KGDD, iyi bir aşınma direnci göstermemiştir.
- Ferritik-perlitik KGDD demirlerin aşınma direnci, perlit hacim oranı arttıkça ve perlit lameller arası aralık azaldıkça sertlikle birlikte doğrusal olarak artış göstermiştir.
- ÖKGDD'in aşınma direnci, yapıda kalıntı östenit miktarının artmasıyla azalmıştır.



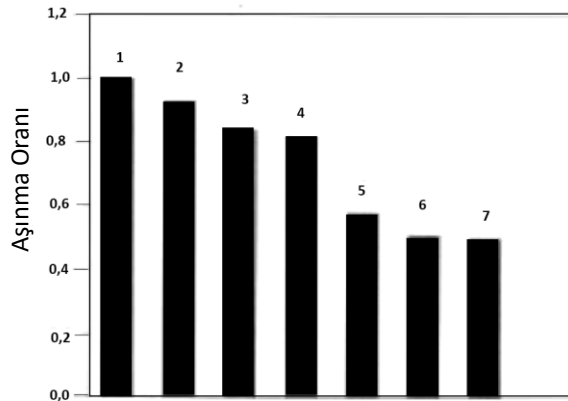
**Şekil 7.** KGDD'in farklı mikro yapıları için özgül enerjinin sertlikle değişimi (Velez ve diğerleri, 2001)

- Aşınma testleri sırasında gerilim kaynaklı östenitten martensite dönüşüm (Transformation induced plasticity-TRIP) reaksiyonu ÖKGDD'in mükemmel aşınma dirençlerinin, yüksek bölgesel gerilme veya plastik deformasyon nedeniyle kalıntı östenitin martensite dönüşmesiyle gerilim kaynaklı östenitten martensite dönüşüm ile ilişkili olduğunu bildirilmiştir (Batra ve diğerleri, 2013; Haseeb ve diğerleri, 2000; Lerner & Kingsbury, 1997; Keough & Hayrynen, 2005; Laird ve diğerleri, 2000; Vadiraj ve diğerleri, 2010; Balachandran ve diğerleri, 2011; Woodward ve diğerleri, 2022; Cardoso ve diğerleri, 2014).

Batra ve diğerleri (Batra ve diğerleri, 2013), disk üzerinde pinli döner test düzeneği kullanarak ÖKGDD'in aşınma davranışını incelemiştir. Östemperleme sıcaklığının artırılmasıyla aşınma direncinin iyileştirilebileceği bulmuşlardır. ÖKGDD'in aşınma kaybı, ısıtılmış dökülmüş koşullardaki orijinal KGDD döküme göre %38 kadar daha az gerçekleşmiştir. Pin ve disk arasındaki arayüze uygulanan dış kuvvet, kalıntı östenitin martensite dönüşümü için yeterli gerilim üretmiştir. Ayrıca, temas yüzeyi çevresinde önemli bir sıcaklık sıçramasının gözlenmemesi, dönüşüm reaksiyonunun sıcaklık tarafından üretilme ihtimalini ortadan kaldırmıştır. Kalıntı östenit, martensit plakalarının yakınında bloklu östenit olarak tanımlanmıştır.

Haseeb ve diğerleri (Haseeb ve diğerleri, 2000) aynı sertlik seviyesinde su verilmiş ve temperlenmiş ve östemperlenmiş ÖKGDD'in tribolojik davranışını incelemiştir. Bu çalışma sonuçları östemperlenmiş ÖKGDD'lerde oksidasyon aşınmasının ana mekanizma olduğunu göstermiştir. Aynı kimyasal bileşime ve aynı sertliğe rağmen, tüm test koşulları altında ÖKGDD'in, su verilmiş ve tavlama yapılmış KGDD'den daha fazla aşınmaya dirençli olduğu gözlemlenmiştir. Daha yüksek uygulanan yük ve daha uzun kayma mesafesi altında aşınma direnci daha da iyileşmiştir. Bu çalışmalarda, ÖKGDD'in olağanüstü aşınma direnci çoğunlukla, düşük karbonlu kalıntı östenitten martensite gerilim kaynaklı dönüşümüne dayandırılmıştır. Martensit oluşumundan sonra temas yüzeyi veya alt yüzey sertleştiği için aşınma direnci artmıştır. Ayrıca yüksek aşınma direncine ösferritik yapının pekleşmesinde katkıda bulunduğu ileri sürülmüştür.

Lerner, Y. S ve G. R. Kingsbury'nin (Lerner & Kingsbury, 1997) ÖKGDD aşınma direnci üzerine yapmış oldukları çalışma sonuçları ÖKGDD'nin aşınma direncinin AISI 4340 çeliğine eşdeğer, sertleştirilmiş ve temperlenmiş AISI 1050 karbon çeliğinden neredeyse iki kat daha az ve beyaz ve alaşımlı dökme demirlerden önemli ölçüde daha yüksek aşınma direnci sergilediğini göstermiştir (Şekil 8). ÖKGDD'nin üstün aşınma direnci, aşınma testleri sırasında yüzey tabakasında meydana gelen yüksek karbonlu östenitin martensite dönüşmesine atfedilmiştir.

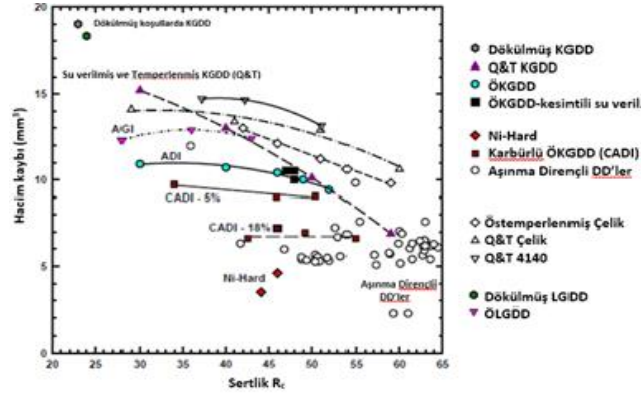


**Şekil 8.** Aşındırma testinde malzemelerin aşınma direnci. 1, su verilmiş ve temperlenmiş orta karbonlu 1050 çelik; 2, alaşımsız beyaz dökme demir; 3, LGDD (%0,8 Cr, %3 Ni); 4, BDD (%12 Cr); 5, su verilmiş ve temperlenmiş KGDD; 6, ÖKGDD, sınıf 200/155/1; 7, alaşımlı çelik 4340 (Lerner & Kingsbury, 1997)

Keough, J ve Hayrynen, K. (Keough & Hayrynen, 2005) ösferritik matrisli ÖKGDD'lerde pin aşınma testi (yüksek stres ortamı) gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışma sonuçları ÖKGDD'lerin aşınma direncinin dökülmüş koşullardaki KGDD'lerden daha iyi olduğunu göstermiştir. Bu sonuç gerilim kaynaklı östenitten martensite dönüşüm (TRIP) etkisine atfedilmiştir. Bu çalışma ve diğer çeşitli dökme demirler, çelik ve aşınmaya dayanıklı dökme demirler için pin aşınma testi sonuçlarının karşılaştırmalarını grafik olarak sunmuşlardır (Şekil 9). Bu verilere dayalı yapılan gözlemler şu şekilde sıralanmıştır:

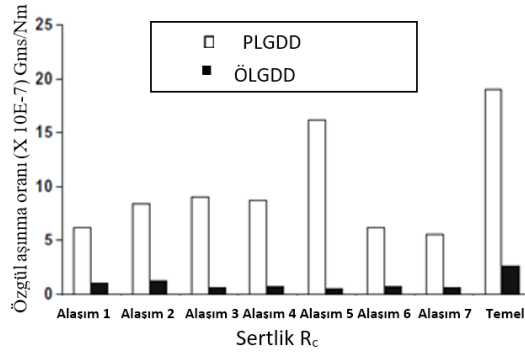
- ÖKGDD'lerin eğrileri nispeten düzdür, bu da malzeme kaybının sertliğe karşı duyarsız olduğunu gösterir. Bu sonuç, test parçasının yüzeyindeki östenitten martensite dönüşümünün bir sonucudur.
- Yüksek gerilimli aşınma ortamında, ÖKGDD, Karburlü ÖKGDD (CADI), Ni-Hard Sınıf 2 ve aşınmaya dayanıklı (AR) dökme demirler, ÖKGDD ve Su verilmiş ve Temperlenmiş (Q&T) çelikten daha iyi aşınma direncine sahiptir.

- ÖKGDD'nin aşınma direnci, karbürlerin eklenmesiyle veya Karbürü ÖKGDD (CADI) kullanılarak daha da geliştirilebilir. Kaybedilen malzemenin hacmi, mevcut karbürün hacim oranına bağlıdır ve daha yüksek karbür hacimleri daha iyi aşınma direnci ile sonuçlanır.
- En iyi aşınma direnci aşınma dirençli (AR) dökme demirler tarafından sergilenmektedir. Ancak CADI ve Q&T KGDD, bu dökme demirlerin bazılarının performansına rakip olabilir.



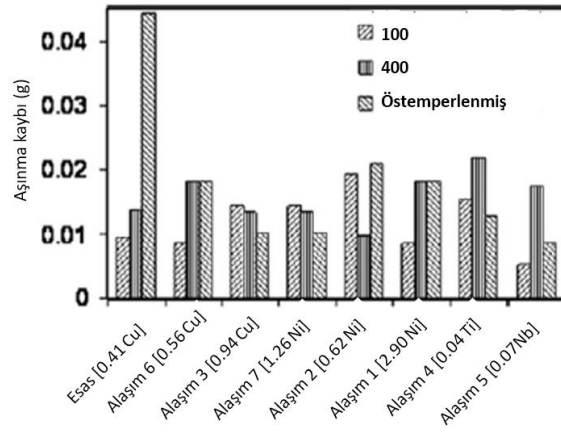
**Şekil 9.** Çeşitli dökme demirler, ÖKGDD'ler, çelik ve aşınmaya dayanıklı dökme demirler için Pin-on Aşınma (Verileri Laird ve diğerleri, 2000).

Vadiraj ve diğerleri (Vadiraj ve diğerleri, 2010) temel bileşenler dışında değişen Cr, Mo, Ni, Ti vb. içeriklere sahip alaşımlı ötektiküstü LGDD'lerin perlitik ve östemperlenmiş koşullardaki mekanik ve aşınma özelliklerini incelemiştir. Bu çalışmada ÖLGDD alaşımlar, PLGDD'e kıyasla son derece yüksek aşınma direnci (7-15 kat) sergilemiştir (Şekil 10). PLGDD'in aşınma direncindeki artışın, perlit ve karbürlerin hacim oranına ve inceliğine, ancak ÖLGDD'e ise aşınma direncindeki artışın aşınma testleri sırasında gerilim kaynaklı östenitten martensite dönüşümüne bağlı olduğunu ve gerilim arttıkça martensit hacim oranının arttığını bildirilmiştir.



**Şekil 10.** ÖLGDD alaşımlarının PLGDD alaşımları ile aşınma oranlarının karşılaştırılması (Vadiraj ve diğerleri, 2010)

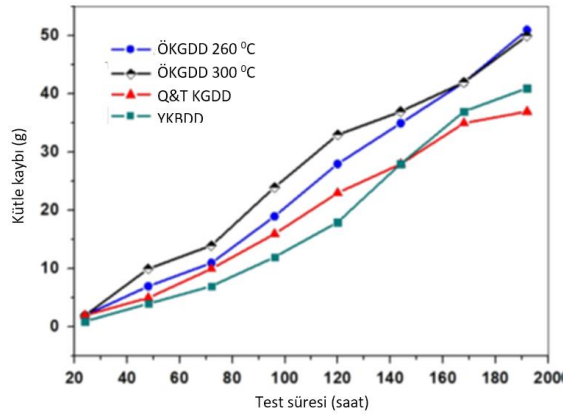
Balachandran, G ve diğerleri (Balachandran ve diğerleri, 2011) alaşımlı LGDD'in su verilmiş, temperlenmiş ve östemperlenmiş koşullarda mekanik ve aşınma davranışını incelemiştir. Bu çalışma sonuçları genel olarak östemperlenmiş durumdaki dökme demirleri en yüksek aşınma direncine sahip olduğunu bu sunucun TRIP etkisinden kaynaklandığını göstermiştir. Su verilmiş ve 100 ve 400 °C 'de temperlenmiş dökme demirler östemperlenmiş alaşımlara karşılaştırılabilir düzeyde aşınma direnci sergilemiştir (Şekil 11).



**Şekil 11.** Su verme tavllanmış (100 ve 400 °C tavlama sıcaklığı) ve östemperlenmiş durumda en düşük aşınma oranına sahip alaşımların nispi değerleri (Woodward ve diğerleri, 2022)

Woodward, ve diğerleri (Woodward ve diğerleri, 2022), LGDD'in AISI 4330'a karşı mikroyapısı ve kayma aşınma tepkisi üzerine sementit küreselleşme süresinin etkisini incelemişlerdir. Sonuçlar, aşırı küreselleştirilmiş ve ferritleştirilmiş dökme demir matrisin önemli ölçüde deforme olduğu, faydalı oksidatif aşınmanın oluşmasını engellediği ve dolayısıyla disk karşılığına zarar verdiği en yüksek yük ve en uzun tavlama süreleri için şiddetli aşınmaya geçiş göstermiştir. Yüzey altı deformasyonunun derinliği tavlama süresi ile artmış, ancak yük ile artmamıştır.

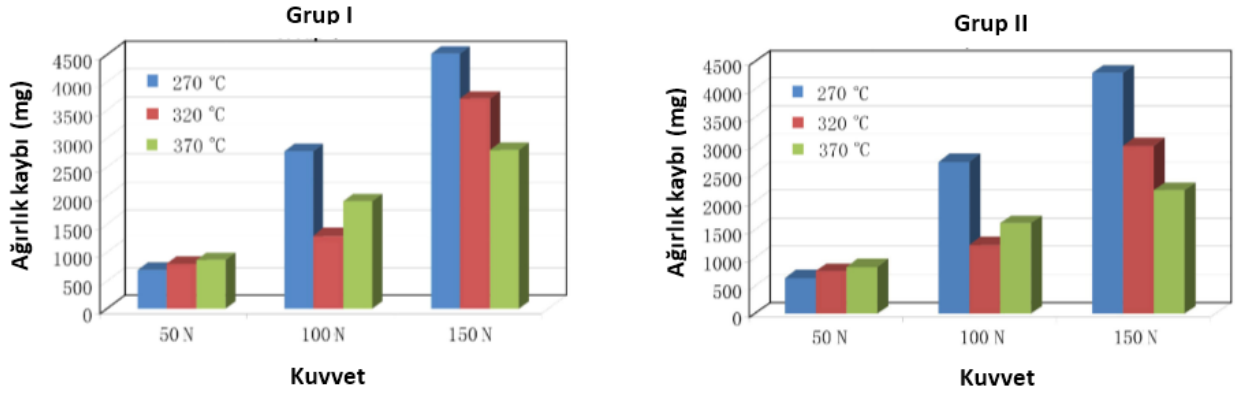
Cardoso, P. H. S ve diğerleri (Cardoso ve diğerleri, 2014) ÖKGDD ve yüksek kromlu beyaz dökme demirin (YKBDD) aşınma özelliklerini çalışmışlardır. Bu çalışma sonucu YKBDD'ler yüksek sertlikleri nedeniyle ÖKGDD'lerden daha iyi aşınma direnci performansı sergilemişlerdir (Şekil 12). Aşındırıcı malzemeye uzun süre maruz bırakılan ÖKGDD'ler sürekli TRIP etkisi nedeniyle daha düşük kütle kaybı göstermişlerdir.



**Şekil 12.** Numunelerin karşılaştırmalı aşınma direnci (Cardoso ve diğerleri, 2014)

Chiniforush, E.A ve diğerleri (Chiniforush ve diğerleri, 2016) Nikel içerikleri farklı iki grup Ni alaşımlı ÖKGDD'lerin kuru kayma aşınması incelemişlerdir. Sonuçlar kuru kayma aşınma direncinin düşük uygulanan yükler için östemperleme sıcaklığından bağımsız olduğunu ancak uygulanan yüksek yükler için östemperleme sıcaklığına güçlü bir bağımlılığın olduğunu artan Ni içeriği ile yüksek östemperleme sıcaklıklarında ve yüksek uygulanan yüklerde aşınma direncinin arttığını göstermiştir (Şekil 13). Aşınma direncindeki artış TRIP ve östenitin pekleşme etkilerine atfedilmiştir. Bu çalışmanın sonuçları, ÖKGDD'in kuru kayma aşınması sırasında yüzey altı yorulmasının meydana geldiğini ve yüzeye yakın duran grafit kürelerinin aşınmanın erken aşamalarından itibaren plastik olarak deforme olduğunu ve çatlak çekirdeklenme bölgeleri olarak hareket ettiğini göstermiştir.





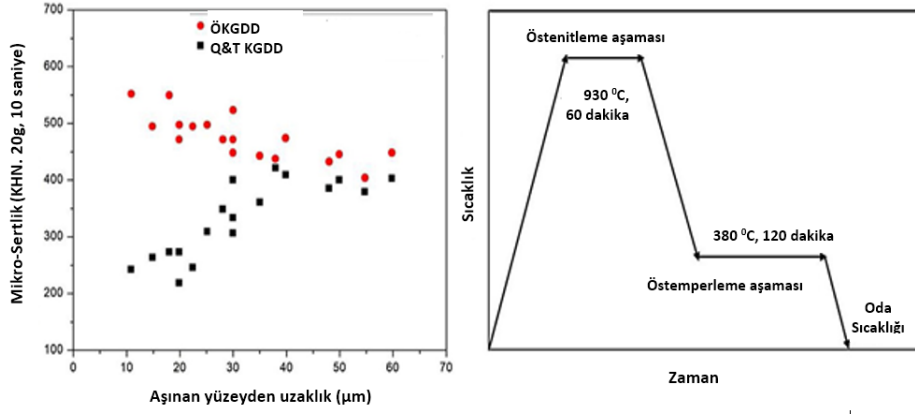
**Şekil 13.** İki numune grubu için 40 dakikalık aşınma testinden sonra uygulanan yük ile ağırlık kaybının değişimi; östempereleme süresi: 120 dakika (Chiniforush ve diğerleri, 2016).

Kumari ve diğerleri (Kumari & Rao, 2009) ÖKGDD'lerde östenitleme sıcaklığının gerilim kaynaklı dönüşüm üzerine etkisini çalışmışlardır. Bu çalışma sonuçları, gerilim kaynaklı dönüşüm eğiliminin büyük ölçüde östenitleme sıcaklığına bağlı olduğunu, östenitleme sıcaklığı arttıkça, tüm östempereleme sıcaklıklarında martensite dönüşme eğilimini arttığını yüksek östenitleme ve östempereleme sıcaklıklarının, östeniti düşük kararlılık ile tuttuğunu ve bu nedenle gerilim altında martensit oluşturmaya eğilimin daha fazla arttığını göstermiştir.

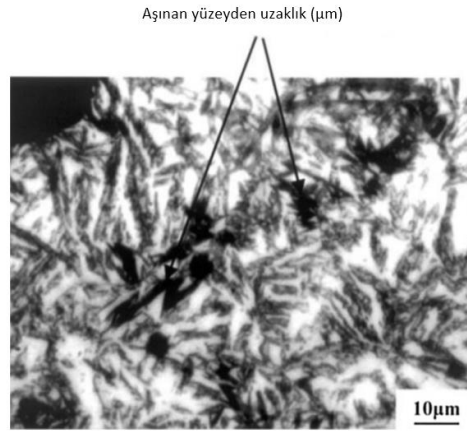
Daber ve diğerleri (Daber ve diğerleri, 2008) ÖKGDD'de gerilim kaynaklı dönüşümü çalışmışlardır. Çalışma sonuçları daha yüksek sıcaklıklarda östemperelemeye tabi tutulan numunelerin, gerilim kaynaklı martensit üretme eğilimine sahip olduğunu bu numunelerde kalıntı östenitin boyutunun daha büyük olduğunu, daha düşük östempereleme sıcaklıklarında ise östenitin ince boyutunun yanı sıra östenitin yakınında büyük miktarda ferrit bulunmasının da gerilim kaynaklı martensit oluşumunu engellediğini göstermiştir.

Wen ve diğerleri (Wen ve diğerleri, 2019), 25 N ve 100 N'lik iki farklı normal yük ile ÖKGDD üzerinde blok üzerinde bilye ile geri kaymalı aşınma testleri uygulamıştır. 100 N altında mikro sertlikteki artış dikkat çekici hale gelmiştir (Şekil 14). Dönüşüm reaksiyonundaki kalıntı östenit bu çalışmada açıkça doğrulanmamıştır. Balos ve diğerleri (Balos ve diğerleri, 2016), ÖKGDD'in iyi aşınma direncinin, yüksek bölgesel gerilim nedeniyle kalıntı östenitin martensite dönüşmesine bağlı olduğunu açıkça belirtmişlerdir. Dönüşüm reaksiyonu, ancak gerekli miktarda düşük karbonlu östenit ve yerel basınç yerine getirildiğinde meydana gelebileceğini bildirmişlerdir. Zhang ve diğerleri (Zhang ve diğerleri, 2014), yüzey sertleştirme tabakasının, yüksek karbon yüzdeli östenitin martensite faz dönüşümü olarak açıklanabileceğini düşünmüşlerdir. Kumari ve diğerleri (Kumari & Rao, 2009), ÖKGDD numunelerinin aşınmış yüzeyinin altında koyu dağlama merceksi martensitik fazı gözlemişlerdir (Şekil 15). Ancak, bu mukavemetlenme mekanizmasında yer alan kalıntı östenit tanımı yapılmamıştır. Bu nedenle dönüşüm yer alan kalıntı östenitin, östempereleme işleminde ilk aşamanın %100 tamamlanması halinde karbonca doymuş östenit içerdiğine ve son matriste bir miktar martensit oluşmuşsa hem karbonla doymuş östenit hem de düşük karbon içerikli östenit içerdiği değerlendirilmiştir. Yüksek bölgesel gerilim veya plastik deformasyon altında, düşük karbon içerikli kalıntı östenit, yarı kararlı olduğu için önce martensite, ardından yüksek karbon içerikli östenite dönüşmüştür. Yüzey sertliği artışı sayesinde aşınma direnci iyileştirilmiştir (Wen ve diğerleri, 2019; Zimba ve diğerleri, 2004; Wang ve diğerleri, 2020).

Östempereleme parametrelerine ek olarak, alaşım elementlerinin eklenmesi de ÖKGDD'in aşınma direncinde önemli bir rol oynamaktadır (Ahmadabadi ve diğerleri, 1991). Daha fazla ösferrit oluşumu daha yumuşak bir yüzey ile sonuçlanacağından, bor ilavesinin tek aşamalı ÖKGDD'in aşınma oranını artıracığı bulunmuştur (Ahmadabadi ve diğerleri, 1991). Han ve diğerleri (Han ve diğerleri, 2015), molibden içeriğinin artmasından sonra iğnemi ferrit daha ince hale geldiğinden ve karbonca doymuş östenit yüzdesi yükseldiğinden molibdenin aşınma direnci üzerinde faydalar sağlayabileceğini göstermiştir. Lee ve diğerleri (Lee ve diğerleri, 1999) tarafından kuru yuvarlanma aşınma testlerinde benzer sonuçlar rapor edilmiştir.

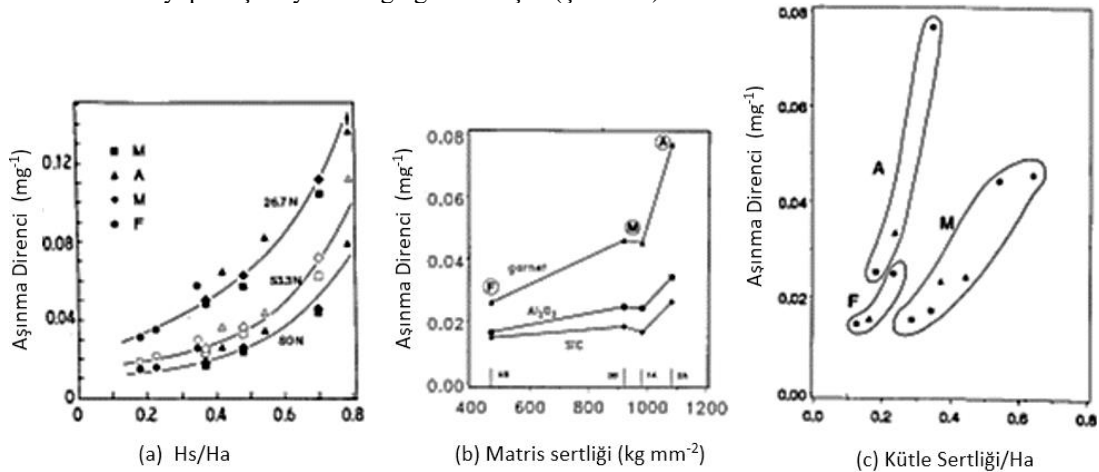


Şekil 14. (a) 25 N ve 100 N normal yükler altında tek kademeli ADI'nin aşınmış yüzeyinden derinlik boyunca mikrosertlik ölçümü ve (b) karşılık gelen ısısal işlem tasarımı (Wang ve diğerleri, 2020).



Şekil 15. ADI numunesinin aşınmış yüzeyinin altında stres kaynaklı martensit (Kumari & Rao, 2009).

Turenne, S ve diğerleri (Turenne ve diğerleri, 1989) yüksek kromlu BDD'in aşındırıcı aşınma direncine matris mikroyapı etkisini çalışmışlardır. Bu çalışmada krom ve karbon içeriği, aynı miktarda ötektik karbür ( $M_7C_3$ ) ile farklı matris mikro yapılarına (östenitik veya martensitik ve ferritik) sahip olacak şekilde seçilmiştir. Sonuçlar tüm dökme demirler için geçerli olan aşınma mekanizmalarının mikro talaşlanma ve sürtünme nedeni çizilme olduğunu, çizilme oranı, matrisin sünekliği ile arttığını, ferritik matris için, oluklarda yırtılma, belirli bir deneysel koşul için kütle kaybını artıran yüzey bozulmasına neden olduğunu göstermiştir. Oluk derinliğinin, aşındırma aşınmasından kaynaklanan kütle kayıpları ile iyi bir şekilde ilişkili olduğu, test sırasında pekleşme sertleşmesi nedeniyle östenitik matrisin başlangıç sertliği martensitik matrisin sertliğinden daha düşük olmasına rağmen östenitik matris martensitik matristen daha iyi aşınma direnci sahip olduğunu göstermiştir. Bu sonucun nedeni diğer yapılarınkini aşan bir sertlikle sonuçlanan östenitik matrisin güçlü pekleşme sertleşmesine dayandırılmıştır. Ötektik karbürlerin ve matrisin aşınma oranı, belirli bir dökme demir mikro yapısı için aynı olduğu gözlenmiştir (Şekil 16).



Şekil 16. (a) Matris sertliğinin aşındırıcı sertliğe oranına göre çizilen aşınma direnci, (b) testten sonra ölçülen matris sertliğine karşı çizilen aşınma direnci. A: östenitik, M: martensitik, F: ferritik, (yük 80N, aşınma mesafesi 6m), (c) Kütle sertliğinin aşındırıcı sertliğe

(yük 80N) oranına göre çizilen aşınma direnci. SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, garnet (lal taşı). Aşındırıcı sertlik (Ha), Ölçülen Vickers sertlik (Hs - 50 gf) (Turenne ve diğerleri, 1989).

Coronado, J ve Sinatora, A. (Coronado & Sinatora, 2009) farklı katılma hızlarına sahip BDD'in aşındırıcı aşınmasını çalışmışlardır. Biri ağırlıklı olarak östenitik ve diğeri ise ağırlıklı olarak M<sub>3</sub>C karbürleri içeren martensitik olmak üzere iki matris test edilmiştir. Kütle kaybı, farklı boyutlarda alümina kullanılarak aşındırıcı disk üzerindeki pin tipi testleriyle değerlendirilmiştir (Tablo 1). Aşındırıcı aşınma mekanizmaları olarak mikro talaşlanma, mikro yorulma ve mikro sürtünme nedenli çizilme olarak gözlenmiştir.

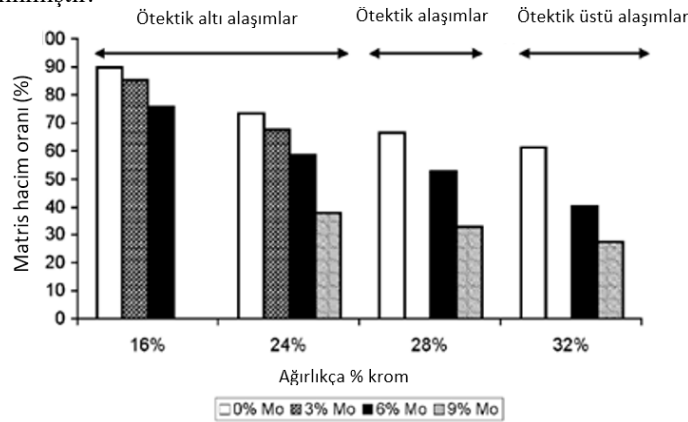
**Tablo 1.** Alümina ve 4,6 N yük kullanılarak kütle kaybının karşılaştırılması (Coronado & Sinatora, 2009).

| Malzeme            | Katılma hızı (°C/s) | Aşındırıcı boyutu (µm) | Kütle kaybı (mg) |
|--------------------|---------------------|------------------------|------------------|
| Östenitik matris   | 1,5                 | 23,6                   | 2,9 ± 0,1        |
|                    | 15                  | 23,6                   | 2,9 ± 0,1        |
| Martensitik matris | 1,5                 | 23,6                   | 2,8 ± 0,1        |
|                    | 15                  | 23,6                   | 2,8 ± 0,3        |
| Östenitik matris   | 1,5                 | 36,0                   | 3,7 ± 0,1        |
|                    | 15                  | 36,0                   | 3,7 ± 0,3        |
| Martensitik matris | 1,5                 | 36,0                   | 3,8 ± 0,1        |
|                    | 15                  | 36,0                   | 3,7 ± 0,2        |
| Östenitik matris   | 1,5                 | 66,0                   | 4,1 ± 0,2        |
|                    | 15                  | 66,0                   | 4,1 ± 0,1        |
| Martensitik matris | 1,5                 | 66,0                   | 4,8 ± 0,2        |
|                    | 15                  | 66,0                   | 4,4 ± 0,1        |
| Östenitik matris   | 1,5                 | 93,0                   | 4,5 ± 0,2        |
|                    | 15                  | 93,0                   | 4,5 ± 0,1        |
| Martensitik matris | 1,5                 | 93,0                   | 5,3 ± 0,2        |
|                    | 15                  | 93,0                   | 4,9 ± 0,1        |

Östenitik matrisli dökme demir, 66 ve 93µm aşındırıcılar için martensitik matrisli dökme demirden daha yüksek aşınma direnci göstermiştir. Ancak, daha küçük aşındırıcılar (23,6 ve 36µm) için aşınma oranının benzer olduğu rapor edilmiştir. Daha büyük aşındırıcılar, östenitik matrislerde daha fazla penetrasyon ve plastik deformasyon, martensitik matrisde ise, aşınma oranını artırarak daha fazla mikro talaşlanma oluşumu üretmiştir. Östenitik matrisin daha düşük sertliği ve daha yüksek derecede plastik deformasyonu nedeniyle mikro çatlama ve karbür ayrılması göstermiştir.

Literatürde hali hazırda ösferritik matrisli BDD'lerin aşınma direnci ile ilgili çalışma henüz bulunmamaktadır.

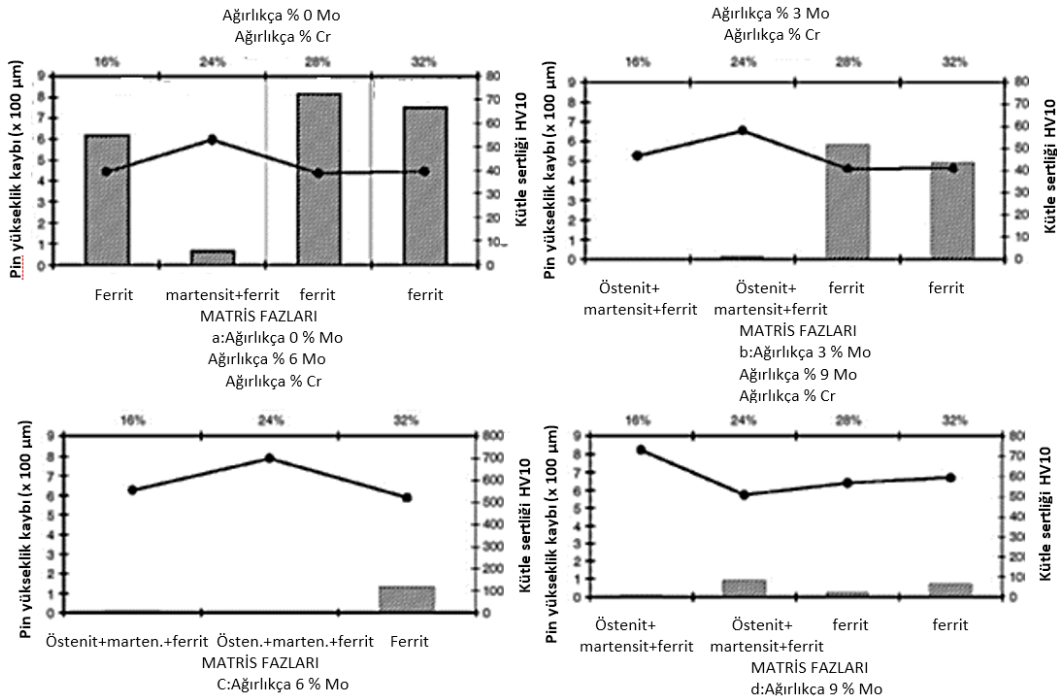
Scandian, C ve diğerleri (Scandian ve diğerleri, 2009) yüksek kromlu BDD'in kayma aşınmasında molibden ve krom içeriğinin etkisini çalışmışlardır. Matris mikro yapısı ve karbürlerin türü, molibden ve kromun nispi içeriklerine bağlı olmuştur (Şekil 17). Aşınma deneyleri, oda sıcaklığında bir pin-on-disk tribometre üzerinde gerçekleştirilmiştir. Pin dökme demirden yapılmış ve aşınma kaybı olarak pin yüksekliği esas alınmıştır.



**Şekil 17.** Krom ve molibden içeriklerinin (% ağırlık) bir fonksiyonu olarak farklı alaşımlarda matrisin (%) hacim oranları (Scandian ve diğerleri, 2009).

Aşınma test sonuçları, matrisin mikro yapısının kayma aşınma direnci üzerinde güçlü bir etki gösterdiğini vurgulamıştır. Matris, Mo içeriğinden bağımsız olarak ferritik tek fazlı olduğunda pin aşınma kaybı oldukça fazla olmuştur. Matris çok fazlı olduğunda ( $\alpha/\alpha_2/\gamma$ ), aşınma kaybı sıfıra doğru eğilim göstermiştir (Şekil 18). Aşınma kaybını belirlemede matris mikro yapısının kütle sertliğinden

daha önemli olduğu görülmüştür. Aynı Cr içeriği ve tek fazlı bir matris için, Mo içeriği ile sertlik artmış ve aşınma kaybı azalmıştır. Ancak eşdeğer bir sertlik seviyesi için, matris ferritik olduğunda aşınma kaybı her zaman daha yüksek olmuştur. Ferritik matris sürtünmeli teğetsel kuvvetler altında plastik olarak daha kolay deforme olmuş ve matrisin plastik deformasyonu, karbür mikro çatlaklarına ve kırıntı (döküntü) oluşumuna katkıda bulunmuştur. Ötektik veya birincil  $M_7C_3$  karbürlerde mikro çatlaklar her zaman açıkça gözlemlenmiş, ancak  $M_6C$  karbürlerde kullanılan ölçüm çözünürlükleri seviyesinde gözlenmemiştir.  $M_6C$  karbürlerin, alaşımın aşınma direncini arttırmaya çok daha iyi katkıda bulunduğu ileri sürülmüştür.



**Şekil 18.** Nispi matris mikro yapılarında (a: 0 wt.%Mo; b) Cr ve Mo'nun (% wt.) bir fonksiyonu olarak pin yükseklik kaybı "h" (kesikli dikdörtgenler) ve alaşımların kütle sertliği (tam çizgiler) : a) ağırlıkça %3 Mo; c) ağırlıkça %6 Mo; d) ağırlıkça %9 Mo (Scandian ve diğerleri, 2009).

Filipovic, M ve diğerleri (Filipovic ve diğerleri, 2013) beyaz dökme demir alaşımlarının aşınma direnci ve kırılma tokluğu ile mikroyapı korelasyonu incelemiştir. Deneysel sonuçlar, ötektik karbür fazının ( $M_3C$  veya  $M_7C_3$ ) hacim oranı, karbür boyutu ve dağılımının düşük gerilimli aşınma koşulları altında BDD alaşımlarının aşınma direnci üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Martensitik veya martensit-östenitik matris mikro yapısı östenitik matrise göre ötektik karbürleri yeterince güçlendirerek aşınma sırasında çatlamayı ve ayrılmayı en aza indirmiştir. Yüksek kromlu BDD'in matris bölgelerinde çökelen ikincil karbürler de aşınma davranışını etkilemiştir.

### 3. Sonuçlar

#### 1- Ferritik matrisler (FM)

Dökme demirlerde matris ferritik olduğunda aşınma kaybı her zaman daha yüksek olmaktadır. Aşınma mekanizması mikro talaşlanma ve sürtünme nedenli çizilme olmakla beraber, çizilme oranı, sünek ferritik matrisde, oluklardaki yırtılma, belirli bir deneysel koşul için kütle kaybını artıran yüzey bozulmasına neden olmaktadır.

#### 2- Perlitik matrisler (PM)

Perlitik matrisli dökme demirlerde aşınma direnci perlit lamellar arası mesafe ile değişkenlik göstermektedir. Lamellar arası mesafe azaldıkça aşınma direnci doğrusal olarak artmaktadır. Aşınma testi sırasında uygulanan yük arttıkça, aşınma mekanizmasında oksidatif aşınmadan delaminasyonla ilişkili adeziv aşınmaya doğru bir değişiklik gerçekleşmektedir.

#### 3- Ferritik+Perlitik matrisler (FPM)

Ferritik-perlitik dökme demirlerin aşınma direnci, perlit hacim oranı arttıkça ve perlit lameller arası aralık azaldıkça sertlikle birlikte doğrusal olarak artış göstermiştir.

#### 4- Martensitik matrisler (MM)

Martensitik matrisli dökme demirlerde, aşındırıcıların kırılma miktarının artarak artan aşınmaya katkıda bulunmaktadır. Bu nedenle daha pürüzlü yüzeyler gözlenmektedir. Bu malzemeler için mikro talaşlanma ve sürtünme nedenli çizilme baskın aşınma mekanizmasıdır.

#### 5- Ferritik+Martensitik matrisler (FMM)

Ferritik+martensitik çift matrisli yapılarda martensitik yapı hacim oranı arttıkça aşındırıcı aşınma kaybı azalmıştır.

#### 6- Östenitik matrisler (ÖM)

Östenitik matrisin daha düşük sertliği ve daha yüksek derecede plastik deformasyonu nedeniyle matrisin güçlü pekleşme sertleşmesi diğer yapılarının aşan bir sertlikle sonuçlanarak diğer matrislerden daha iyi aşınma direnci sahip olduğunu gösterilmiştir. Östenitik matrisin başlangıç sertliği martensitik matrisin sertliğinden daha düşük olmasına rağmen östenitik matris martensitik matristen daha iyi aşınma direnci sahip olduğunu gösterilmiştir. Bu sonucun nedeni diğer yapılarının aşan bir sertlikle sonuçlanan östenitik matrisin güçlü pekleşme sertleşmesine dayandırılmıştır.

#### 7- Ösferritik matrisler (ÖsM)

Östemperleme sıcaklıklarındaki değişim ösferritik mikroyapı oluşumunu ve dolayısı ile aşınma davranışının etkilemektedir. Yüksek östemperleme sıcaklıklarından düşük östemperleme sıcaklıklarına inildikçe kaba ösferritik yapıdan ince ösferritik yapıya geçilmekte ve bu değişime paralel olarak sertlik ve aşınma direnci artmaktadır.

Sabit sıcaklıktaki östemperleme sırasında ana östenit fazı bekletme süresine bağlı olarak önce sert martensitik yapıdan yumuşak ösferritik yapıya daha sonra kararlı östenitin beyitik ferrit+karbürü dönüşümüyle sonuçlanmaktadır. Mikroyapıdaki bu değişime göre izotermal bekletme süresinin uzatılması ile ösferrit yapı hacim oranının artması, düşük aşınma direnci ile sonuçlanmaktadır.

ÖKGDD'in mükemmel aşınma dirençlerinin, yüksek bölgesel gerilme veya plastik deformasyon nedeniyle artık östenitin martensite dönüşmesiyle gerilim kaynaklı östenitten martensite dönüşüm (Transformation induced plasticity-TRIP) reaksiyonu ile ilişkilendirilmiştir. Aşınma testi sırasında uygulanan gerilim arttıkça martensit hacim oranı artmaktadır. Ayrıca yüksek aşınma direncine ösferritik yapının pekleşmesinde katkıda bulunduğu ileri sürülmektedir.

ÖKGDD'lerde baskın aşınma mekanizmasının mikro yorulma, mikro talaşlanma ve sürtünme nedenli çizilme olduğu uygulanan yük artığında, aşınma mekanizmasında oksidatif aşınmadan delaminasyonla ilişkili adeziv (yapışkan) aşınmaya doğru bir değişiklik olduğu gösterilmiştir.

#### 8- Ferritik+Ösferritik matrisler (FÖM)

Ösferritik+ferritik çift matrisli yapılarda da ösferrit yapı hacim oranı arttıkça aşındırıcı aşınma kaybı azalmaktadır.

9- Aşınma direnci açısından matris türleri birbirleri ile karşılaştırıldığında genel olarak ÖM>ÖsM>MM>PM>FM sonucuna varılabilir.

10- Aşınma direnci açısından çift matris türleri birbirleri ile karşılaştırıldığında genel olarak FÖM> >FMM> FPM sonucuna varılabilir.

#### **Teşekkür**

Çalışmamızı destekleyen Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimine (GÜBAP 07/2019-20) teşekkür ederiz.

#### **REFERANSLAR**

Abedi, H. R., Fareghi, A., Saghafian, H., Kheirandish, S. H. (2010). Sliding wear behavior of a ferritic–pearlitic ductile cast iron with different nodule count. *Wear*, 268(3), 622–628, 10.1016/j.wear.2009.10.010.

Ahmadabadi M, Nategh S, Davami P. (1991). Wear behavior of austempered ductile iron. *Cast Metals*, 4(4), 188–194. 10.1080/09534962.1991.11819079

Balachandran, G., Vadiraj, A., Kamaraj, M., Kazuya, E. (2011). Mechanical and wear behavior of alloyed gray cast iron in the quenched and tempered and austempered conditions. *Materials & Design*, 32(7), 4042–4049, 10.1016/j.matdes.2011.03.054.

- Balos, S., Rajnovic, D., Dramicanin, M., Labus, D., Eric-Cekic, O., Grbovic-Novakovic, J., Sidjanin, L. (2016). Abrasive wear behaviour of ADI material with various retained austenite content. *International Journal of Cast Metals Research*, 29(4), 187-193, 10.1080/13640461.2015.1125982.
- Batra U, Batra N, Sharma J. (2013). Wear performance of Cu-alloyed austempered ductile iron. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 22(4), 1136-1142, 10.1007/s11665-012-0380-3.
- Cardoso, P. H. S., Israel, C. L., Strohaecker, T. R. (2014). Abrasive wear in Austempered Ductile Irons: A comparison with white cast irons. *Wear*, 313(1-2), 29- 33, 10.1016/j.wear.2014.02.009.
- Chiniforush, E. A., Rahimi, M. A., Yazdani, S. (2016). Dry sliding wear of Ni alloyed austempered ductile iron. *China Foundry*, 13(5), 361-367.
- Coronado, J. J., Sinatora, A. (2009). Abrasive wear study of white cast iron with different solidification rates. *Wear*, 267(11), 2116-2121, 10.1016/j.wear.2009.08.012.
- Daber, S., Ravishankar, K. S., Prasad Rao, P. (2008). Influence of austenitising temperature on the formation of strain induced martensite in austempered ductile iron. *Journal of materials science*, 43(14), 4929-4937, 10.1007/s10853-008-2717-8.
- Filipovic, M., Kamberovic, Z., Korac, M., Gavrilovski, M. (2013). Correlation of microstructure with the wear resistance and fracture toughness of white cast iron alloys. *Metals and materials international*, 19(3), 473-481, 10.1007/s12540-013-3013-y.
- Ghaderi A, Ahmadabadi M, Ghasemi H. (2003). Effect of graphite morphologies on the tribological behavior of austempered ductile iron. *Wear*, 255(1), 410-6, 10.1016/S0043-1648(03)00156-X.
- Han C, Wang Q, Sun Y, Li J. (2015). Effects of molybdenum on the wear resistance and corrosion resistance of carbidic austempered ductile iron. *Metall Microst Anal*, 4(4), 298-304
- Haseeb A, Aminul Islam M, Mohar Ali Bepari M. (2000). Tribological behaviour of quenched and tempered, and austempered ductile iron at the same hardness level. *Wear*, 244, 15-19, 10.1016/S0043-1648(00)00404-X.
- Keough, J., Hayrynen, K. (2005). *Wear Properties of Austempered Ductile Irons*. SAE Technical Paper, 01-1690.
- Krzynska A, Chmielewski T, Stolinski A. (2015). Comparison of austempered ductile iron and manganese steel wearability. *Arch Found Eng*, 15, 51-54.
- Kumari U, Rao P. (2009). Study of wear behavior of austempered ductile iron. *J Mater Sci*, 44, 1082-1093, 10.1007/s10853-008-3195-
- Laird, G., Gundlach, R. and Rohrig, K., (2000). *Abrasion Resistant. Cast Iron Handbook*, 1st ed, American Foundry Society, Des Plaines, IL.
- Lee S, Kim H, Kim J, Chun B, Kim C, Choi C. (1999). Effect of alloy elements on the wear resistance of austempered ductile iron. *J Kor Found Soc*, 19(1), 24-32.
- Lerner, Y. S., and G. R. Kingsbury. (1997). Wear resistance properties of austempered ductile iron. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 7(1), 48-52.
- Sahin Y, Durak O. (2007). Abrasive wear behavior of austempered ductile iron. *Materials & Design*, 28(6):1844-1850, 10.1016/j.matdes.2006.04.015.
- Sahin Y, Erdogan M, Kilicli V. (2007). Wear behavior of austempered ductile irons with dual matrix structures. *Mater Sci Eng*, 444(1), 31-8 10.1016/j.msea.2006.06.071.
- Sahin Y, Kilicli V, Ozer M, Erdogan M. (2010). Comparison of abrasive wear behavior of ductile iron with different dual matrix structures. *Wear*, 268, 152-265, 10.1016/j.wear.2009.07.008.
- Scandian, C., Boher, C., De Mello, J. D. B., Rezai-Aria, F. (2009). Effect of molybdenum and chromium contents in sliding wear of high-chromium white cast iron: The relationship between microstructure and wear. *Wear*, 267(1-4), 401-408, 10.1016/j.wear.2008.12.095.

- Sellamuthu P, Samuel D, Dinakaran D, Premkumar V, Li Z, Seetharaman S. (2018). Austempered ductile iron (ADI): influence of austempering temperature on microstructure, mechanical and wear properties and energy consumption. *Metals*, 8(1), 53, 10.3390/met8010053.
- Sharma S, Gupta R. (2015). Effect of austempering temperature and time on the wear characteristics of austempered ductile iron (ADI). *Int J Eng Res Gener Sci*, 3(1), 986–90.
- Turenne, S., Lavallee, F., Masounave, J. (1989). Matrix microstructure effect on the abrasion wear resistance of high-chromium white cast iron. *Journal of materials science*, 24(8), 3021-3028.
- Vadiraj, A., Balachandran, G., Kamaraj, M., Gopalakrishna, B., Rao, K. P. (2010). Studies on mechanical and wear properties of alloyed hypereutectic gray cast irons in the as-cast pearlitic and austempered conditions. *Materials & Design*, 31(2), 951-955, 10.1016/j.matdes.2009.07.030.
- Velez J, Tanaka D, Sinatora A, Tschiptschin A. (2001). Evaluation of abrasive wear of ductile cast iron in a single pass pendulum device. *Wear*, 251, 1315–1319, 10.1016/S0043-1648(01)00760-8.
- Wang B, Barber G, Tao C, Sun X, Ran X. (2018). Characteristics of tempering response of austempered ductile iron. *J Mater Res Technol*, 7(2), 198–202, 10.1016/j.jmrt.2017.08.011.
- Wang B, Barber G, Sun X, Shaw M, Seaton P. (2017). Characteristics of the transformation of retained austenite in tempered austempered ductile iron. *J Mater Eng Perform*, 26(5), 2095–2101, 10.1007/s11665-017-2663-1.
- Wang, B., Barber, G. C., Qiu, F., Zou, Q., Yang, H. (2020). A review: phase transformation and wear mechanisms of single-step and dual-step austempered ductile irons. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(1), 1054-1069, 10.1016/j.jmrt.2019.10.074.
- Wen F, Zhao J, Zheng D, He K, Shangguan J. (2019). The role of bainite in wear and friction behavior of austempered ductile iron. *Materials*, 12(5), 767, 10.3390/ma12050767.
- Woodward, R. G., Toumpis, A., Galloway, A. (2022). The influence of cementite spheroidizing duration on the microstructure and sliding wear response of grey cast iron against AISI 4330. *Wear*, 488, 204155.
- Zimba J, Mamandi M, Yu D, Chandra T, Navara E, Simbi D. (2004). Un-lubricated sliding wear performance of unalloyed austempered ductile iron under high contact stresses. *Mater Des*, 25, 431–438, 10.1016/J.MATDES.2003.11.004.
- Zhang, J., Zhang, N., Zhang, M., Zeng, D., Song, Q., Lu, L. (2014). Rolling–sliding wear of austempered ductile iron with different strength grades. *Wear*, 318(1-2), 62-67, 10.1016/j.wear.2014.06.015.
- Zhou W, Zhou Q, Meng S. (1993). Abrasion resistance of austempered ductile iron. *Cast Metals*, 6(2), 69–75, 10.1080/09534962.1993.11819129