



Küresel grafitli dökme demirlerin aşınma davranışına alüminyum ilavesinin ve östemperleme ısıl işleminin etkilerinin incelenmesi

Investigation of the effects of aluminum addition and austempering heat treatment on wear behavior of ductile cast irons

Rıdvan Gecü^{1,*} 

¹ Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Esenler, İstanbul, Türkiye

Öz

Alüminyum (Al) içermeyen ve ağırlıkça %3 Al içeren küresel grafitli dökme demirler kum kalıba döküm yöntemiyle üretilmiştir. Üretim sonrası, 900 °C'de 90 dk süreyle östenit sahada tutulan numuneler, 300 °C'ye hızla soğutulmuş ve bu sıcaklıkta 60 dk boyunca bekletilmiştir. Yapılan östemperleme işleminin, dökme demirlerin mikroyapı ve aşınma özelliklerine etkisinin incelenmesi amacıyla, optik mikroskop, SEM, sertlik ve disk üzeri bilya tipi aşındırma cihazları kullanılmıştır. Al miktarı arttıkça, matristeki ferrit oranı ve grafit miktarının arttığı, buna karşılık grafitlerin küreselliğinin bozulduğu belirlenmiştir. Al ile alaşımlandırma, malzemeye daha yüksek sertlik ve daha iyi aşınma dayanımı kazandırmıştır. Östemperleme sonrası numunelerde, kalıntı östenit ve beynitik ferrit matris yapısı elde edilmiştir. %3 Al içeren numunede, östemperleme sonrası oluşan beynit miktarının azaldığı görülmüştür. Numunelerin aşınma yüzeylerinde abrazif ve adhezif aşınmanın dominant karakterde olduğu belirlenmiştir. %3 Al ile alaşımlama aşınma direncini artırırken, östemperleme işlemi alaşımsız numunenin aşınma dayanımında daha iyi sonuç vermiştir.

Anahtar kelimeler: Östemperleme, Küresel grafitli dökme demir, Aşınma, Alüminyum, Alaşımlama

1 Giriş

Dökme demirlerin mikroyapıları, kimyasal bileşimlerine, döküm parametrelerine ve soğuma koşullarına bağlı olarak farklı özellikler göstermektedir [1]. Beyaz, gri, temper ve sfero gibi farklı çeşitleri bulunan dökme demirlerin, uygulamada arzu edilen özellikleri sağlayacak şekilde seçilmesi büyük önem taşımaktadır. Sfero, dökme demir mikroyapısı, ferritik, perlitik veya ferritik/perlitik bir matris üzerinde küresel grafit parçacıkları içermektedir. Bu nedenle küresel grafitli dökme demir olarak da adlandırılmaktadır. Grafitlerin küreselleştirilmesi, magnezyum, kalsiyum, seryum gibi elementlerin ergiyik dökme demire belli oranlarda ilavesiyle gerçekleşmektedir [2]. Küresel grafitli dökme demirlerin özgün mikroyapısı; aşınma dayanımı, korozyon direnci, sertlik, yorulma dayanımı, süneklik, işlenebilirlik gibi birçok farklı özelliği aynı anda sergilemesini sağlamaktadır [3]. Mevcut özellikleri sayesinde otomotiv ve enerji sektörlerinde yaygın olarak

Abstract

Ductile cast irons, which do not contain aluminum (Al) and contain 3 wt.% Al, were produced by the sand mold casting method. After production, the samples kept in the austenite field at 900 °C for 90 min were rapidly cooled to 300 °C and held at this temperature for 60 min. Optical microscope, SEM, EDS, and ball-on-disc type wear devices were used to examine the effect of austempering on the microstructure and wear properties of the cast irons. It was determined that as the amount of Al increased, the ferrite ratio and the amount of graphite in the matrix increased, whereas the nodularity of the graphite deteriorated. Alloying with Al provided higher hardness and better wear resistance. After austempering, retained austenite and bainitic ferrite matrix structure were obtained. It was observed that the amount of bainite formed after austempering decreased in the sample containing 3% Al. It was determined that abrasive and adhesive wear was predominant on wear surfaces of the samples. While alloying with 3% Al increased the wear resistance, austempering process gave better results in the wear resistance of the unalloyed sample.

Keywords: Austempering, Ductile cast iron, Wear, Aluminum, Alloying

kullanılan küresel grafitli dökme demirler, işlem parametreleri değiştirilerek veya ilave bir ısıl işlem uygulanarak, daha da güçlendirilebilmektedir [4]. Malzemenin 825–950 °C sıcaklıkları arasında östenit sahaya ısıtılıp burada bir süre bekletildikten sonra 280–550 °C sıcaklıkları arasına soğutulmasıyla gerçekleştirilen östemperleme işlemi, malzeme mikroyapısını değiştirerek, özelliklerde iyileştirme sağlayan yöntemlerden biridir [5]. Soğutma işleminin gerçekleştirileceği ortam olarak, tuz banyosu, sıcak yağ veya ergiyik metal kullanılabilir. Beynitik/östenitik bir matris ortaya çıkaran östemperleme işleminde, martenzit veya farklı türlerde karbür parçacıkları oluşması da mümkündür. Hangi fazların oluşup oluşmayacağı, malzemenin kimyasal bileşimi ve ısıl işlem parametreleriyle belirlenmektedir [6].

Dökme demir içindeki grafitin hacmi, boyutu, dağılımı, küreselliği ve sayısı sfero dökümlerin mekanik özellikleri üzerinde büyük bir etkiye sahiptir [7]. Alaşım elementleri de

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: gecur@yildiz.edu.tr (R. Gecü)

Geliş / Received: 07.02.2022 Kabul / Accepted: 16.02.2022 Yayınlanma / Published: 15.04.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1069484

matris yapısını veya grafitin küreselliğini değiştirerek mekanik özellikleri etkileyebilmektedir. Alüminyum, özellikle sfero demirlerin hafif, ince cidarlı dökümlerinde en çok talep edilen alaşım elementlerinden biridir. Maliyet uygunluğu ve malzeme erişilebilirliği nedeniyle, küresel grafitli dökme demirlerin Al ile alaşımlanması endüstriyel açıdan da uygun bulunmuştur [8]. Al alaşımlı sfero dökümler, Al içermeyenlere göre aşınma, oksidasyon, korozyon ve yorulma direnci, tokluk, sertlik ve işlenebilirlik özelliklerinde iyileştirme göstermektedir [9]. Ayrıca, dökme demirlerin üretimi sırasında grafit CO ve CO₂'ye ayrışabildiğinden, Al ilavesi, yüzeyde metal oksidasyonuna karşı bir bariyer görevi gören, ince ve yüzeye sıkıca tutunan bir Al₂O₃ filmi oluşturarak, dökme demirde grafit ayrışmasını önleme potansiyeline sahiptir [10].

Bu çalışmada, %3 Al ile alaşımlandırılmış sfero demirin aşınma davranışına östemperleme ısıl işleminin etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla hem Al içermeyen hem de %3 Al içeren küresel grafitli dökme demirler kum kalıba döküm yöntemiyle üretilerek, üretim sonrası, 900 °C'de 90 dk süreyle östenit sahada tutulmuş, akabinde 300 °C'ye hızla soğutulmuş ve bu sıcaklıkta 60 dk boyunca bekletilmiştir. Yapılan Al ile alaşımlama ve östemperleme işlemlerinin, dökme demirlerin aşınma özelliklerine etkisi, mikroyapının bir fonksiyonu olarak incelenmiştir.

2 Materyal ve metod

Pik demir, çelik hurdası ve elektrolitik bakırdan oluşan şarj malzemeleri, 100 kg kapasiteli bir indüksiyon ocağı kullanılarak hazırlanmış ve ergitilmiştir. Ergiyik 1540 °C'ye ısıtılmış ve ticari saflıkta Al parçaları bir piston yardımıyla potaya daldırılmıştır. Arzu edilen Al miktarı (ağırlıkça %3) spektrometre kullanılarak ayarlanmıştır. 1540 °C'deki işlemin ardından, modifiye edici olarak ağırlıkça %1,4 ferromangan (FeSiMg5) ve aşılavıcı olarak ağırlıkça %0,3 ferrosilikon (FeSi75) 1400 °C'de ergiye ilave edilmiştir. Gerekli bileşim elde edildiğinde ergiyik, Al içermeyen alaşım için 1380 ve %3 Al içeren alaşım için 1410 °C'de 135x240x10 mm boyutlarındaki yaş kum kalıplarına dökülmüştür. Artan Al ile ötektik dönüşüm sıcaklığı ve likidüs sıcaklığı arttığı için döküm sıcaklığı değişmiştir [11].

Tablo 1, döküm yoluyla üretilen külçelerin kimyasal bileşimini vermektedir.

Üretilen numunelerin bir kısmı karakterizasyon aşamasına geçerken diğer kısmı östemperleme işlemine tabi tutulmuştur. 900 °C'de 90 dk süreyle östenit sahada tutulan numuneler, 300 °C'ye ısıtılmış sıcak yağ içerisine atılarak hızla soğutulmuş ve bu sıcaklıkta 60 dk boyunca bekletilmiştir. Üretim ve ısıl işlemler sonrası numunelerin parlatma ve dağlama sonrası mikroyapı görüntüleri, optik mikroskop (Nikon Eclipse MA100) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM, Carl Zeiss EVO LS 10) ile alınmıştır.

Mikroyapı karakterizasyonu sonrası sertlik ölçümleri Brinell test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Numune yüzeylerine 10 saniye boyunca 2,5 mm çapında tungsten karbür bir indentör vasıtasıyla 1839 N'luk bir yük uygulanmıştır. Her numune için rastgele beş ölçüm yapılmış ve bu ölçümlerin ortalama değerleri verilmiştir.

Üretilen dökme demirlere ASTM G99-17 standardına uygun şekilde disk üzeri bilya tipi aşınma makinesi kullanılarak, kuru ortamda aşınma testleri yapılmıştır. Deneyler oda sıcaklığında, bağıl nemin %40 olduğu koşullarda gerçekleştirilmiştir. Numuneler, 200 m mesafede 0,1 m/s kayma hızı ile 10 N yük altında Al₂O₃ bilya tarafından aşındırılmıştır. **Tablo 2**, Al₂O₃ bilyanın özelliklerini vermektedir. Çalışmada Al₂O₃ bilya, yüksek sertliği ve dayanım değerleri göz önünde bulundurularak, şiddetli aşınma koşullarını simüle etmek amacıyla kullanılmıştır. Aşınma oranları, her numune için aynı ortam koşullarında gerçekleştirilen üç ayrı testin ortalama sonucu olarak verilmiştir. Üretilen sfero dökme demirlerin aşınma oranları, hacim kaybının kayma mesafesine ve uygulanan yüke bölünmesiyle hesaplanmıştır. Hacim kayıpları, test öncesi ve sonrası ölçümlerle belirlenen kütle kayıplarının malzeme özkütlesine bölünmesiyle elde edilmiştir.

Aşınma çalışmalarında kullanılan cihaz, deney sırasında zamanın bir fonksiyonu olarak sürtünme katsayısı değerlerinin kaydını tutmuştur. Kayma mesafesi ile zaman eksenini değiştirilmiş ve kayma mesafesine bağlı olarak sürtünme katsayısı değerlerindeki değişim verilmiştir. Aşınmış yüzey incelemeleri optik mikroskop ile yapılmış ve gözlemlenen aşınma mekanizmaları, sfero dökümlerin mikroyapısal gelişimi dikkate alınarak tartışılmıştır.

Tablo 1. Üretilen dökme demirlerin kimyasal kompozisyonu (% ağırlıkça)

Al	C	Si	Mn	P	S	Cu	Mg	Fe
0.001	3.59	2.37	0.12	0.026	0.014	0.15	0.06	Kalan
2.99	3.65	2.31	0.11	0.027	0.014	0.16	0.06	Kalan

Tablo 2. Aşınma testlerinde karşıt yüzey olarak kullanılan Al₂O₃ bilyanın karakteristik özellikleri

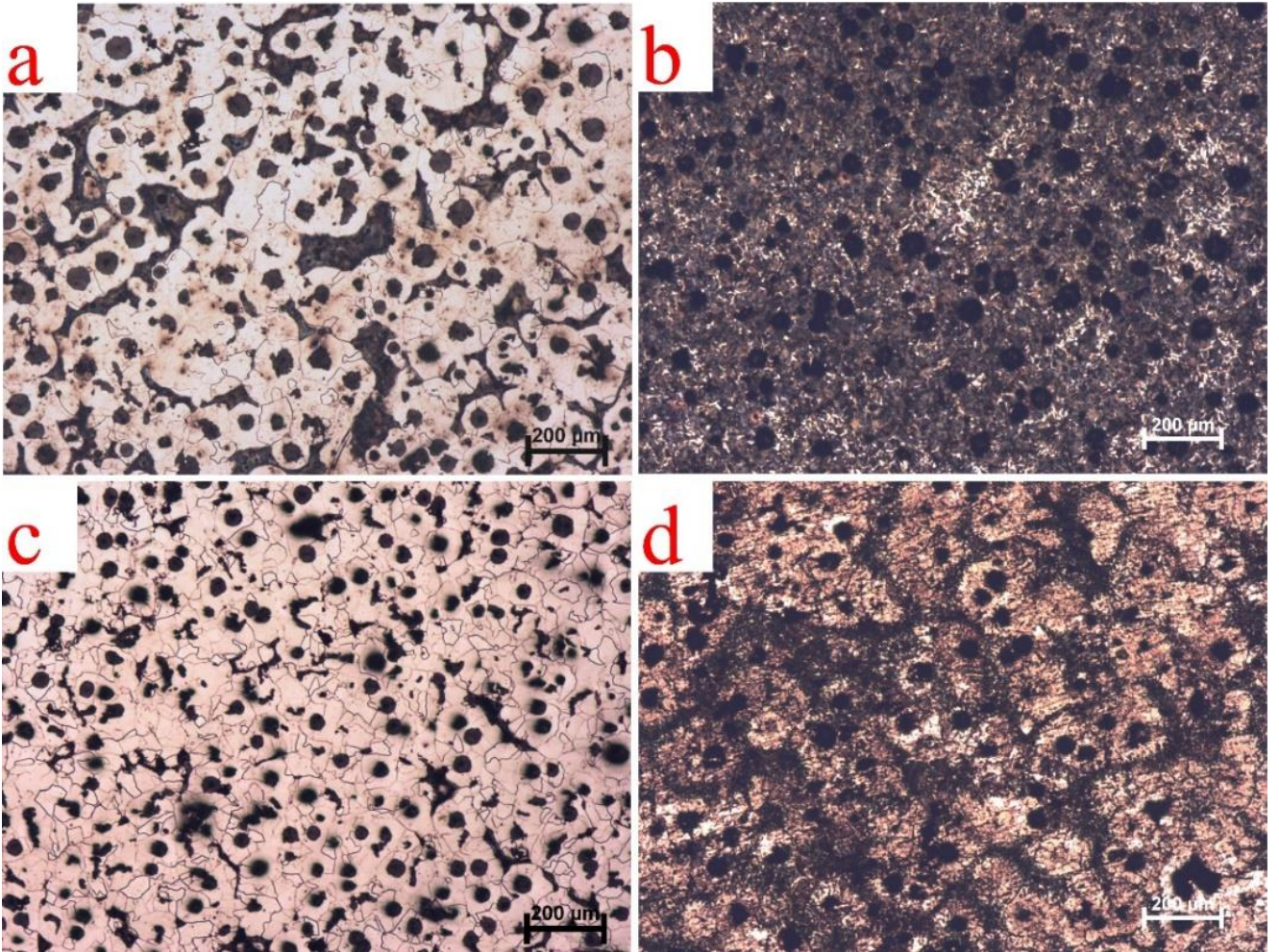
Özellik	Değer
Sertlik	1400 HV
Basma dayanımı	2600 MPa
Elastisite modülü	370 GPa
Yoğunluk	3.86 g/cm ³
Çap	6 mm
Safılık	%99.5

3 Bulgular ve tartışma

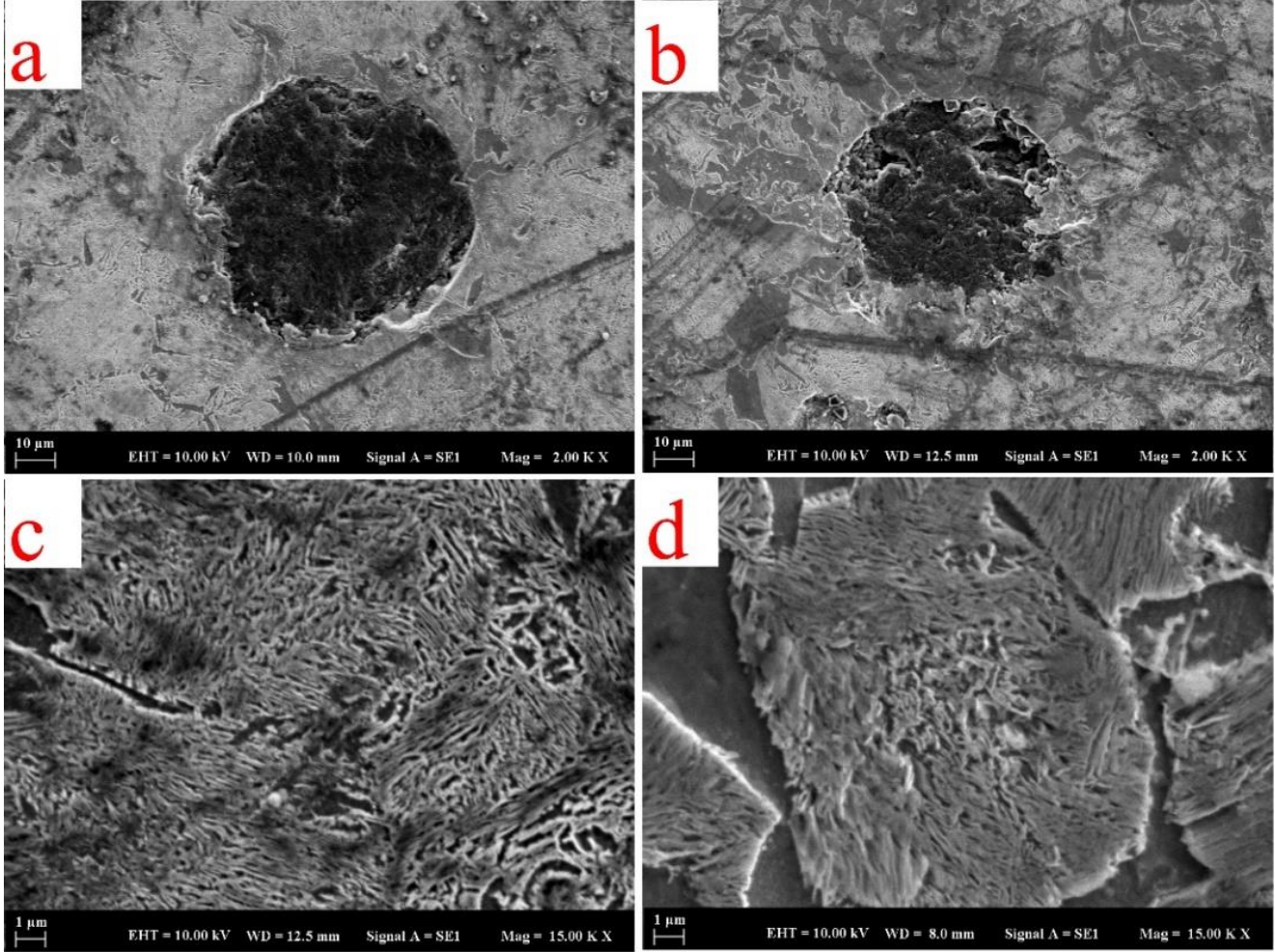
Kum kalıba döküm yöntemiyle başarılı bir şekilde üretilen %0 ve %3 oranında Al içeren sfero demirlerin östemperleme öncesi ve sonrası mikroyapıları Şekil 1'de gösterilmiştir. Şekil 1a'da verilen Al içermeyen dökme demir numunede, beyaz bölgeler matristeki ferriti, koyu bölgeler ise perlitli göstermektedir. Çeşitli boyutlarda küresel veya kompakt grafitler de matrise gömülü şekilde göze çarpmaktadır. Şekil 1b'de aynı numunenin östemperleme sonrası mikroyapısı verilmiştir. Matristeki koyu bölgeler ısı işlem sonrası oluşan beyniti işaret ederken, beyaz renkli bölgeler kalıntı östenit fazını belirtmektedir. Aynı yapıda küresel formdaki grafitlerin siyah renkte matrise gömülü şekilde bulunduğu görülebilmektedir. Östemperleme işleminde malzeme öncelikle östenit sahada 90 dk boyunca tutulduğu için yapının tamamı östenite dönüşmüştür. Ardından gerçekleştirilen 300 °C'ye ani soğutma işlemiyle östenitin beynite dönüşmesi sağlanmıştır. İşlem sonrası yapıda kalıntı östenit varlığı, bir kısım östenitin beynite dönüşmediğini göstermektedir.

Şekil 1c'de %3 Al içeren sünek demir numunenin optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Alaşimsız numuneye

kıyasla ferrit miktarının arttığı ve yapıda neredeyse hiç perlit kalmadığı görülmektedir. Bu, Al'nin Fe üzerindeki ferrit yapıcı etkisini doğrulayan bir bulgudur [12]. Aynı numunede, Al içermeyen numuneye kıyasla daha fazla grafit çekirlendiği belirlenmiştir. Al ilavesi, demir kafesi içinde karbon çözünürlüğünü düşürerek daha fazla karbonun yapıda serbest kalmasına neden olmaktadır [13]. Şekil 1d'de aynı numunenin östemperleme sonrası mikroyapısı verilmiştir. Yapının çoğunluğunun ferritten (açık renkli bölgeler) meydana geldiği, işlem sonrası önemli bir miktar beynitin (koyu bölgeler) oluştuğu ve bazı bölgelerde kalıntı östenite (adacıklar şeklindeki parlak bölgeler) rastlandığı belirlenmiştir. Östemperleme sıcaklığında bekleme sürecinde östenit yapı, ferrit/segmentit sınırlarında, ferrit/grafit sınırlarına göre daha kolay çekirdeklendiği ve Al katkılı dökme demirde neredeyse hiç segmentit oluşmadığı için, Al içermeyen numunenin östemperleme işlemi ideale daha yakın şekilde gerçekleşmiştir [6]. Al ilavesi, aynı zamanda dönüşüm sıcaklıklarını da düşürdüğü için, östenit sahadan beynit veya martenzit oluşumunu zorlaştırmaktadır. Bu nedenle östemperleme sonrası Al içermeyen numunede, %3 Al takviyeli numuneye göre yapıda daha fazla beynit oluşmuştur.



Şekil 1. (a, b) Al içermeyen ve (c, d) %3 Al içeren küresel grafitli dökme demirlerin (a, c) östemperleme öncesi ve (b, d) östemperleme sonrası mikroyapı görüntüleri



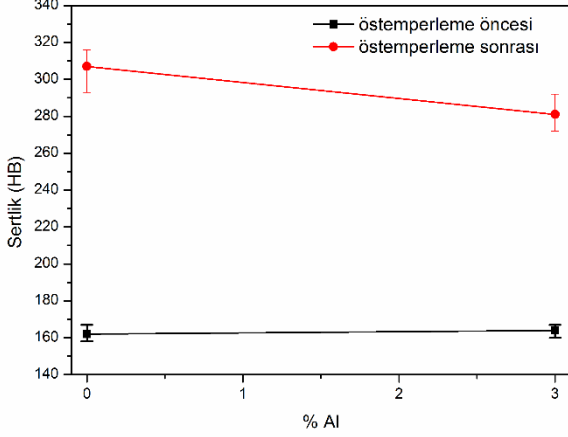
Şekil 2. (a, c) Al içermeyen ve (b, d) %3 Al içeren küresel grafitli dökme demirlerin östemperleme işlemi sonrası elde edilen (a, b) düşük ve (c, d) yüksek büyütme SEM görüntüleri

Şekil 2’de Al içermeyen ve %3 oranında Al içeren küresel grafitli dökme demirlerin östemperleme sonrası düşük ve yüksek büyütmelerdeki SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 2a ve 2b’de, optik mikroskop görüntülerinin aksine, açık renkli bölgeler beynit oluşumunu simgelerken, koyu bölgeler kalıntı östenit fazlarını işaret etmektedir. Al içermeyen numunede oluşan beynit miktarı daha fazlayken, %3 Al içeren sünek demirin daha fazla kalıntı östenit içerdiği belirlenmiştir. Aynı zamanda Al ilavesiyle birlikte, grafit küreselliğindeki bozulma da açık bir şekilde görülmektedir. Elde edilen bu sonuç, %2 ve üzerinde yapılan Al ilavelerinin dökme demirde vermiküler grafiti teşvik ettiğini belirten çalışmalarla uyumlu görünmektedir [14]. Matris bölgesine yaklaşılan yüksek büyütme SEM görüntülerinde (Şekil 2c ve 2d) oluşan beynitik ferrit yapısı açıkça ortaya konmuştur. %3 Al katkısıyla birlikte daha fazla kalıntı östenitin yapıda yer aldığı, diğer bir deyişle, östenitin beynite dönüşme kabiliyetinin azaldığı saptanmıştır. Bunun nedeni, Al ilavesinin, demir alaşımlarında martenzit ve beynit gibi hızlı soğuma fazlarının oluşumunu geciktirirken, ferrit oluşumunu kolaylaştırmasıdır. Yapıdaki Al miktarı arttıkça, TTT (zaman-sıcaklık-dönüşüm) diyagramlarındaki ferrit dönüşümünü belirten başlangıç ve bitiş eğrileri sola

kaymakta ve bunun sonucu olarak östenit sahadan beynit oluşumu zorlaşmaktadır.

Şekil 3, üretilen dökme demirlerin östemperleme öncesi ve sonrası ölçülen sertlik değerlerini vermektedir. Çoğunluğu ferrit olmakla birlikte, ferritik-perlitik matris üzerinde küresel grafit çöktürmelerinden meydana gelen bir mikroyapıya sahip olan Al ile takviyelendirilmemiş numunenin sertliği 162 HB olarak ölçülmüştür. %3 Al ilavesi, malzemenin matrisini neredeyse tamamen ferritik bir yapıya dönüştürmüştür. Ferritik-perlitik bir matriste sertliği artıran faz, perlit içerisindeki sementit lamelleri olduğu için, %3 oranında Al ilavesinin malzemenin sertliğini düşürmesi beklenebilir. Ancak yapılan ölçümlerde, Al ile alaşımlandırılmış numunenin daha yüksek sertliğe sahip olduğu ortaya çıkmıştır. Artan Al ile artan ferrit miktarı, Al’nin ferrit matrisinde çözünerek katı çözültü oluşturmasından ötürü sertlikte azalmaya neden olmamıştır. Fe-Al faz diyagramına göre, ferrit fazının ağırlıkça %11’in altında Al ile alaşımlanması, katı çözültü oluşturmaktadır [15]. Al atomları ferrit kafesine yayındığında, Al ve Fe’nin kafes parametreleri arasındaki büyük farklılıklar, matriste distorsiyona neden olmaktadır. Meydana gelen bu distorsiyon sayesinde, çekme dayanımı, sertlik gibi mekanik özelliklerde artış meydana gelmektedir. Khalvan ve

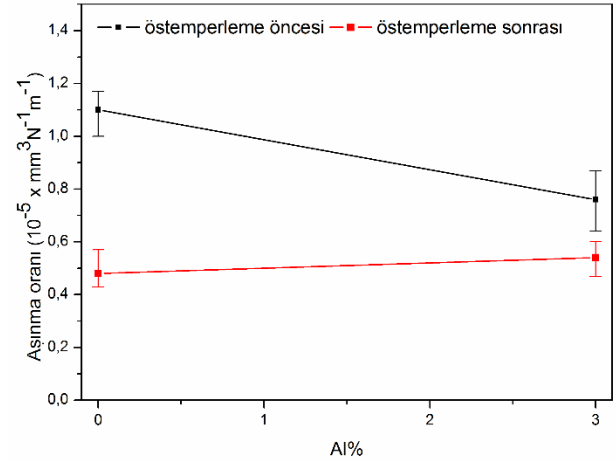
Divandari [16], yaptıkları çalışmada, Al miktarına bağlı olarak ferrit fazının sürekli artan sertliğini mikrosertlik cihazıyla ölçerek, bu çalışmada bahsedilen katı çözeltili sertleşmesinin doğruluğunu ispatlamışlardır.



Şekil 3. Al içermeyen ve %3 Al içeren küresel grafitli dökme demirlerin östemperleme öncesi ve sonrası ölçülen sertlik değerleri

Östemperleme sonrası yapılan ölçümlerde, ısıl işlem öncesi bulgulara göre farklı bir davranış gözlenmiştir. Al ile alaşımlandırılmamış numunenin sertliği 1.89 katına çıkarken, Al takviyeli dökme demirin sertliği 1.71 kat artmıştır. Bunun sonucunda alaşımlandırılmamış numunenin sertliği 307 HB olarak ölçülürken, %3 Al içeren numunenin sertliği 281 HB olarak bulunmuştur. Sertlikteki bu farklılık, Şekil 1'deki mikroyapısal değişikliklerle kolayca açıklanabilir. Görüldüğü gibi, alaşımlandırılmamış sünek demir, östemperleme işlemi sonrası çok daha fazla beynit içermektedir. Al ilavesiyle birlikte östenit sahadan ferrit oluşumu kolaylaşırken, bir östemperleme ürünü olan beynitin oluşma kabiliyeti zayıflamıştır. Bunun sonucunda da %3 Al içeren küresel grafitli dökme demirde önemli ölçüde ferrit fazına rastlanırken, Al içermeyen numunede çoğunlukla beynit oluştuğu görülmüştür. Beynit, ferrite göre daha sert bir yapıda olduğu için Al içermeyen numunenin sertliği daha yüksek çıkmıştır.

Disk üzeri bilya tipi aşınma testleri sonrası malzemelerde meydana gelen aşınma kayıpları Şekil 4'te verilmiştir. En yüksek aşınma kaybı, alaşımlandırılmamış numunede meydana gelmiştir. Al ilavesi ile birlikte aşınma oranında yaşanan düşüş, katı çözeltili sertleşmesiyle matrisin güçlendirilmesine bağlanabilir. Perlit oranının azalmasıyla birlikte heterojenliğin azalması da aşınma dayanımını olumlu yönde etkileyen faktörlerden biri olarak sayılabilir. Östemperleme sonrası aşınma kayıpları alaşımsız numunede %56.36 oranında, %3 Al takviyeli numunede ise %28.95 oranında azalmıştır. Bu sonuçlara bakılarak, östemperleme işleminin, Al içermeyen numunede daha etkin sonuç verdiği çıkarımı yapılabilir. Şekil 3 ve Şekil 4'teki sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, sertlik ile aşınma dayanımı arasında, literatürde de sıklıkla belirtildiği şekilde doğrusal bir ilişki olduğu açıkça görülmektedir [17,18].

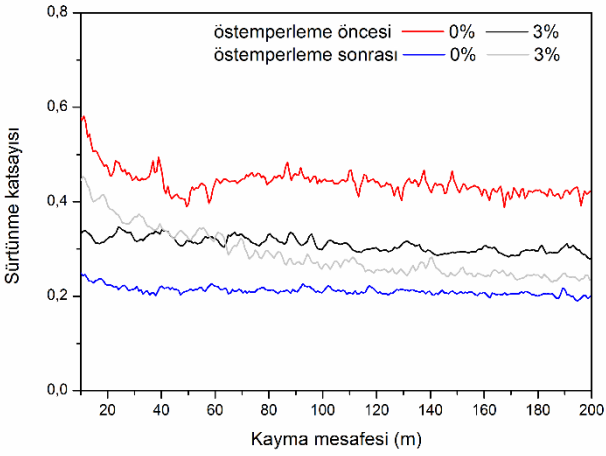


Şekil 4. Al içermeyen ve %3 Al içeren küresel grafitli dökme demirlerin östemperleme öncesi ve sonrası aşınma oranları

Aşınma testleri boyunca anlık olarak kaydedilen sürtünme katsayısı değerleri, kayma mesafesinin bir fonksiyonu olarak Şekil 5'te verilmiştir. Değerler incelendiğinde, Şekil 4'teki aşınma oranlarıyla uyumlu sonuçlar ortaya çıktığı anlaşılmaktadır. En düşük aşınma dayanımına sahip numunede en yüksek sürtünme katsayısı değerleri (ortalama 0.45) elde edilirken, en iyi aşınma direncine sahip numunede en düşük sürtünme katsayısı değerlerine (ortalama 0.22) ulaşılmıştır. Numunelerin genel hatlarıyla kararlı durumlarına kayma testlerinin erken dönemlerinde ulaştıkları söylenebilir. Bunun en önemli nedeni tutma-bırakma etkisinin düşük olmasıdır. Kararlı durumuna en geç ulaşan malzeme, %3 Al içeren küresel grafitli dökme demirin östemperleme işlemi görmüş halidir. Bu numunenin mikroyapısı tüm dökme demirler içerisindeki en kompleks yapıdır. Bu malzemenin matrisinde; dönüşmemiş kalıntı östenit, kafesinde önemli miktarda Al çözüldürmüş ferrit ve östemperleme sonrası oluşmuş beynit bulunmaktadır. Mevcut yapının heterojenliği nedeniyle bu numune, kararlı durumuna diğer numunelerin aksine, testin ancak ikinci yarısında ulaşabilmiştir.

Aşınma testleri sonrası dökme demirlerin aşınmış yüzeylerinin incelemesi optik mikroskop altında gerçekleştirilmiş olup aşınmış yüzey görüntüleri Şekil 6'da verilmiştir. Aynı parametrelerle gerçekleştirilen kayma testleri sonrası, ilk bakışta yalnızca aşınma izi genişliklerine bakılarak bile hangi malzemenin aşınmaya karşı daha dayanıklı olduğunun belirlenmesi mümkündür. Bu bağlamda, östemperleme öncesi Al ile alaşımlandırılmayan numunenin aynı yük altında aynı mesafede diğer numunelerden çok daha fazla aşındığı sonucuna varılabilir. %3 Al takviyesi ile birlikte aşınma izi genişliğinde önemli ölçüde bir daralma meydana gelmiştir. Östemperleme ile malzemeye kazandırılan sertlik sayesinde, bu numunelerdeki aşınma izi genişlikleri, östemperleme öncesi hallerine göre oldukça azalmıştır. Şekil 6c'de görülen çoğu beynitten ibaret matrisin Şekil 6d'de çoğu ferritten ibaret bir matrise dönüşmesiyle yaşanan sertlik kaybı nedeniyle,

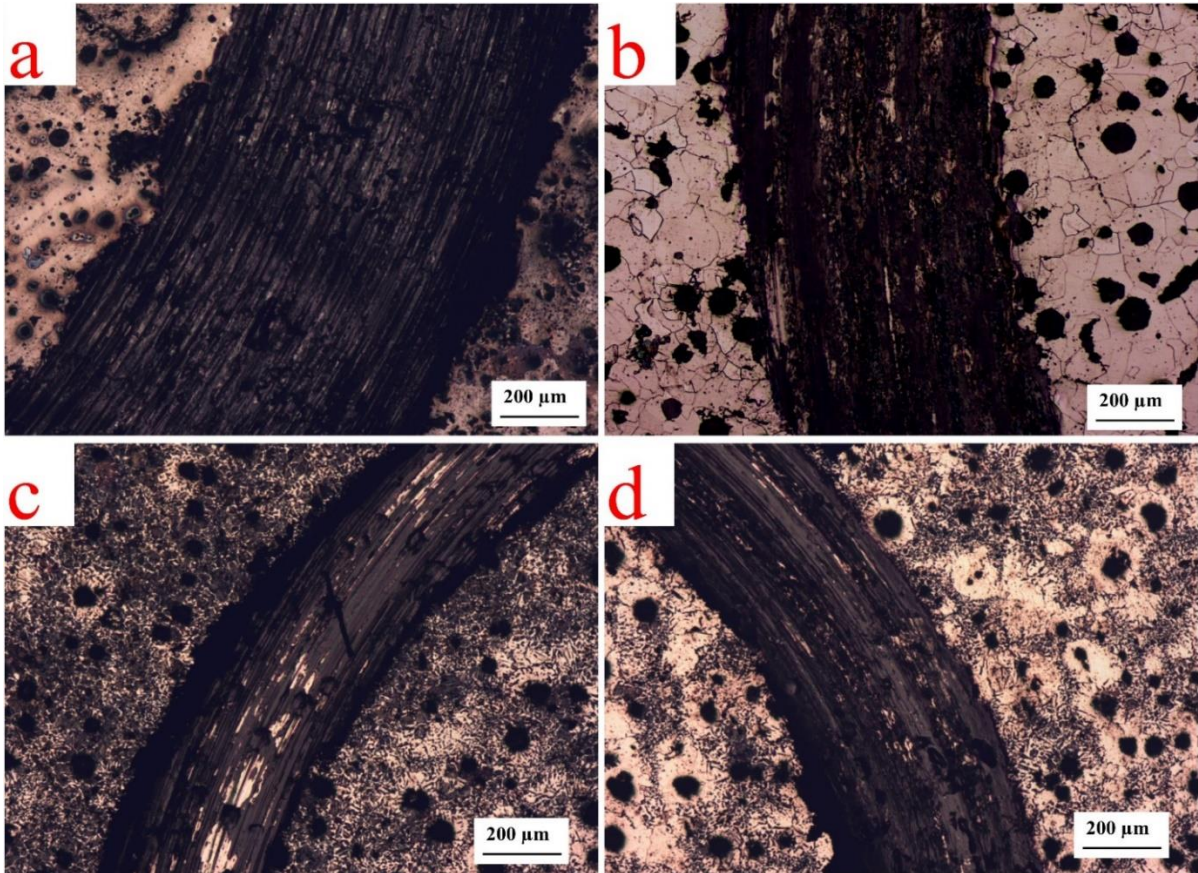
östemperlenmiş %3 Al içeren numunenin aşınma izi genişliği, Al içermeyene göre daha fazla bulunmuştur.



Şekil 5. Al içermeyen ve %3 Al içeren küresel grafitli dökme demirlerin östemperleme öncesi ve sonrası kayma mesafesine bağlı sürtünme katsayısı değerleri

Aynı görüntülerden malzemenin aşınma davranışının da belirlenmesi mümkündür. Belirgin olukların ve parçalanma bölgelerinin varlığı göz önüne alındığında, numunelerin

abrazif ve adhezif olarak aşındığı söylenebilir. Şekil 6a'daki numunede derin oluklar, bu olukların içinde başlayıp ilerleyen çatlaklar, kopan ve sıvanan metal parçacıklar ve çeşitli boyutlarda aşınma kalıntıları görülmektedir. Al ilavesi ile birlikte Şekil 6b'de oluşan olukların daha derin şekilde ortaya çıktığı, başka bir deyişle, abrasif aşınmanın arttığı söylenebilir. Buna karşılık, test sırasında kopan parçaların meydana getirdiği çukur ve tümseklerin azalması nedeniyle, adhezif aşınmanın azaldığı sonucuna varılabilir. Metalden ayrılarak bilya üzerine sıvanan parçalar, kayma sırasında ya burada kalmakta ya da malzeme yüzeyine tekrar yerleşmektedir. Kopan parçaların davranışına bağlı olarak, aşınmış yüzeylerde çukur veya tümsekler oluşmaktadır [19]. Perlitteki sementit mikroçatlak hasarına daha duyarlı olduğundan, Al ilavesi ile birlikte delaminasyon aşınması da azalmıştır [20]. Östemperleme sonrası aşınma izlerinde de benzer işaretlere rastlanmıştır. Özellikle beynit miktarı arttıkça oluk derinliğinin azaldığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni, malzemenin beynit oluşumuyla artan sertliğinin, numune ile bilya temas yüzeyleri arasında kopan parçaların oluşturduğu aşınmaya karşı direnci artırmasıdır. Ayrıca, östemperleme sonrası aşınmış yüzey görüntülerinde, aşınma kalıntılarının sayısında ciddi bir azalma meydana gelmiştir. Aşınma kalıntısı miktarı, delaminasyon aşınması ile doğrudan bağlantılı olduğundan, östemperlemenin delaminasyon aşınmasını azalttığı sonucuna varılabilir [21].



Şekil 6. (a, c) Al içermeyen ve (b, d) %3 Al içeren küresel grafitli dökme demirlerin (a, b) östemperleme öncesi ve (c, d) östemperleme sonrası gerçekleştirilen aşınma testleri sonrası elde edilen aşınmış yüzey görüntüleri

4 Sonuçlar

Al içermeyen ve %3 Al içeren küresel grafitli dökme demirler başarıyla üretilmiş ve östemperleme işlemine tabi tutulmuştur. Bu çalışma sonucunda ortaya çıkan bulgular aşağıda verilmektedir.

%3 Al ilavesi, alaşımlandırılmamış dökme demirin ferritik-perlitik matrisini tamamen ferrite dönüştürürken, grafitlerin küreselliğinin de bozulmasına yol açmıştır. Östemperleme işlemi matrisin beynit ve kalıntı östenitten oluşmasına yol açarken, Al ile alaşımlandırmanın, oluşan beynit miktarını azalttığı belirlenmiştir.

Al içermeyen ve %3 Al içeren numunelerin östemperleme sonrası sertlikleri sırasıyla 1.89 ve 1.71 katına çıkmıştır.

%3 Al ile alaşımlama, dökme demirin aşınma dayanımını artırırken, östemperleme işlemi, alaşımsız numunenin aşınma dayanımında daha iyi sonuç vermiştir.

Aşınmış yüzey görüntülerinde, küresel grafitli dökme demirlerin abrazyon ve adeziv baskın mekanizmaları altında aşındığı belirlenmiştir.

Üretilen sünek demire östemperleme ısıl işlemi uygulanmayacaksa, %3 oranında Al ile alaşımlama ile aşınma uygulamaları için daha dayanıklı bir malzeme üretilebileceği sonucuna varılmıştır.

Üretilen sünek demire östemperleme işlemi yapılarak mekanik özelliklerinde bir iyileştirme yapılacaksa, 300 °C'de 60 dk östemperlemenin iyi bir sonuç vermediği göz önüne alınmalıdır.

%3 Al ile alaşımlandırılmış küresel grafitli dökme demir numune aynı zamanda katı çözeltili sertleşmesi de gösterdiğinden, uygun bir sıcaklık ve sürede östemperleme yapıldığı takdirde, alaşımsız numuneden çok daha yüksek bir aşınma direnci göstereceği düşünülmektedir.

Teşekkür

Yazar, dökme demirlerin tedariki sürecindeki yardımlarından ötürü, Yük. Müh. Açelya Sandıkoğlu'na teşekkür eder.

Çıkar çatışması

Yazar, çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %11

Kaynaklar

- [1] K. A. Kasvayee, E. Ghassemali, I. L. Svensson, J. Olofsson ve A. E. W. Jarfors, Characterization and modeling of the mechanical behavior of high silicon ductile iron. *Materials Science and Engineering A*, 708, 159–170, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.09.115>
- [2] A. Vicente, J. R. Sartori Moreno, T. F. Santos, D. C. R. Espinosa ve J. A. S. Tenório, Nucleation and growth of graphite particles in ductile cast iron. *Journal of Alloys and Compounds*, 775, 1230–1234, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.10.136>
- [3] K. Odum ve M. Soshi, Surface Formation Study Using a 3-D Explicit Finite Element Model of Machining of

- Gray Cast Iron. *Procedia CIRP*, 45, 111–114, 2016. <https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2016.02.168>.
- [4] A. O. Adebayo, O. O. Ajibola, A. F. Owa, S. G. Borisade, K. K. Alaneme ve A. Oyetunji, Characterisation and dry sliding wear behaviour of 2.29 aluminium-alloyed ductile iron. *Materials Today: Proceedings*, 38, 1152-1158, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.138>.
- [5] A. R. Kiani-Rashid ve D. V. Edmonds, Microstructural characteristics of Al-alloyed austempered ductile irons. *Journal of Alloys and Compounds*, 477, 391-398, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.10.038>.
- [6] A. R. Kiani-Rashid, Influence of austenitising conditions and aluminium content on microstructure and properties of ductile irons. *Journal of Alloys and Compounds*, 470, 323-327, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.02.070>
- [7] C. Labrecque ve M. Gagné, Ductile Iron: Fifty years of continuous development. *Can Metall Q*, 37, 343–378, 1998. <https://doi.org/10.1179/cmq.1998.37.5.343>.
- [8] M. S. Soiński, P. Kordas, K. Skurka ve A. Jakubus, Investigations of Ferritic Nodular Cast Iron Containing about 5-6% Aluminium. *Arch Foundry Eng*, 16, 141-146, 2016. <https://doi.org/10.1515/afe-2016-0099>.
- [9] A. O. Adebayo, K. K. Alaneme ve A. Oyetunji, Corrosion Evaluation Of Austempered Aluminium-Alloyed Ductile Irons In Well Water And 0.5M NaCl Solution. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 56, 180-193, 2021.
- [10] A. R. K. Rashid ve D. V. Edmonds, Oxidation behaviour of Al-alloyed ductile cast irons at elevated temperature. *Surface and Interface Analysis*, 36, 1011-1013, 2004. <https://doi.org/10.1002/sia.1825>
- [11] E. Aguado, M. Ferrer, P. Larrañaga, D. M. Stefanescu ve R. Suárez, The Effect of the Substitution of Silicon by Aluminum on the Properties of Lamellar Graphite Iron. *International Journal of Metalcasting*, 13, 536-545, 2019. <https://doi.org/10.1007/s40962-018-00303-y>.
- [12] D. Franzen, P. Weiß, B. Pustal ve A. Bührig-Polaczek. Modification of Silicon Microsegregation in Solid-Solution-Strengthened Ductile Iron by Alloying with Aluminum. *International Journal of Metalcasting*, 14, 1105-1114, 2020. <https://doi.org/10.1007/s40962-020-00412-7>
- [13] H. R. Erfanian-Naziftoosi, N. Haghdadi ve A. R. Kiani-Rashid, The effect of isothermal heat treatment time on the microstructure and properties of 2.11% Al austempered ductile iron. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 21, 1785-1792, 2012. <https://doi.org/10.1007/s11665-011-0086-y>.
- [14] A. S. Benam, Effect of alloying elements on austempered ductile iron (ADI) properties and its process: Review. *China Foundry*, 12, 54–70, 2015.
- [15] U. R. Kattner ve B. P. Burton, Phase diagrams of binary iron alloys. ASM International, Chicago, 1993.
- [16] M. M. Khalvan ve M. Divandari, Microstructure of spheroidal graphite aluminum-alloyed cast irons

- (SGAACI) containing up to 7.5 wt% produced via in-mold process. *International Journal of Metalcasting*, 15, 271–280, 2021. <https://doi.org/10.1007/s40962-020-00461-y>.
- [17] J. D. Lemm, A. R. Warmuth, S. R. Pearson ve P. H. Shipway, The influence of surface hardness on the fretting wear of steel pairs-Its role in debris retention in the contact. *Tribology International*, 81, 258-266, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2014.09.003>.
- [18] J. Li, Y. Lu, H. Zhang ve L. Xin, Effect of grain size and hardness on fretting wear behavior of Inconel 600 alloys. *Tribology International*, 81, 215-222, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2014.08.005>.
- [19] G. K. Goh, L. Lim, M. Rahman ve S. Lim, Effect of grain size on wear behaviour of alumina cutting tools. *Wear*, 206, 24-32, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(97\)00002-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(97)00002-1)
- [20] A. K. Jha, B. K. Prasad, O. P. Modi, S. Das ve A. H. Yegneswaran, Correlating microstructural features and mechanical properties with abrasion resistance of a high strength low alloy steel. *Wear*, 54, 120-128, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(02\)00309-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(02)00309-5)
- [21] A. M. Kirk, P. H. Shipway, W. Sun ve C. J. Bennett, Debris development in fretting contacts – Debris particles and debris beds. *Tribology International*, 149, 105592, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.01.051>

