



MAKİNE KONSTRÜKSİYONUNDA KULLANILABİLİRLİK İÇİN HASTELLOY C-22 SÜPER ALAŞIMININ AŞINMA DİRENCİNİN KRIYOJENİK İŞLEM İLE ETKİLEŞİMİNİN İNCELENMESİ

¹Muhammed Salih GÜL , ²Hasan GÖKKAYA , ³Bilgehan KONDUL ,
⁴Muhammet Hüseyin ÇETİN 

^{1,2,3}Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Karabük, TÜRKİYE
⁴Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Konya, TÜRKİYE

¹msalihgul@karabuk.edu.tr, ²hgokkaya@karabuk.edu.tr, ³bilgehankondul@karabuk.edu.tr,
⁴mhcetin@ktun.edu.tr

(Geliş/Received: 16.11.2021; Kabul/Accepted in Revised Form: 27.01.2022)

ÖZ: Makine konstrüksiyonunda kullanılacak parçaların aşınma, yorulma ve korozyon dirençlerinin yüksek olması önem taşımaktadır. Hastelloy C-22 süperalaşımı yüksek korozyon direnciyle dikkat çekmekte fakat aşınma dayanımının yetersizliği nedeniyle konstrüktif kullanımı sınırlı kalmaktadır. Bu çalışmada, Hastelloy C-22 süper alaşımına, aşınma direncini iyileştirebilmek amacıyla derin ve sığ kriyojenik işlem uygulanmıştır. Aşınma deneyi öncesi metalurjik karakterizasyon amacıyla XRD analizleri, sertlik ölçümü ve mikroyapı görüntülemesi yapılmıştır. Kriyojenik işlem uygulanmış numuneler, kriyojenik işlem uygulama sıcaklıklarında 24'er saat bekletildikten sonra oda sıcaklığına 6 saatlik bir sürede getirilmiştir. Oda sıcaklığına getirilen numunelere 200 °C 'de 2 saat süreyle temperleme işlemi uygulanmıştır. Isıl işlem sonrası yapılan sertlik ölçümlerinde, derin kriyojenik işlem uygulanmış numunenin sertlik değerinin %45 oranında, sığ kriyojenik işlem uygulanmış numunenin sertlik değerinin ise %14 oranında arttığı tespit edilmiştir. Aşınma deneyleri ASTM G133 standartına göre doğrusal olarak ileri geri hareket eden pim üzeri plaka (ball-on flat) tipi metoduyla, tüm numunelere 10 N, 20 N ve 40 N kuvvet uygulanarak 72 mm/s sabit kayma hızında toplamda 1000 m kayma mesafesinde gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneyleri sonucunda, sığ kriyojenik işlemde %24, derin kriyojenik işlemde ise %44 oranında hacimsel kayıp gerçekleşmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kriyojenik işlem, Hastelloy C-22, Sertlik, Aşınma, Mikroyapı

Investigation of the Interaction of Wear Resistance of Hastelloy C-22 Super Alloy with Cryogenic Process for Usability in Machine Construction

ABSTRACT: The parts to be used in machine construction must have high wear, fatigue and corrosion resistance. Hastelloy C-22 superalloy draws attention with its high corrosion resistance, but its constructive use is limited due to insufficient wear resistance. In this study, deep and shallow cryogenic treatment was applied to Hastelloy C-22 superalloy to improve wear resistance. Before the wear test, XRD analysis, hardness measurement and microstructure imaging were performed for metallurgical characterization. The cryogenic treated samples were brought to room temperature for 6 hours after being kept at cryogenic treatment application temperatures for 24 hours. The samples brought to room temperature were tempered at 200 °C for 2 hours. In the hardness measurements made after heat treatment, it was determined that the hardness value of the deep cryogenic treated sample increased by 45%, and the hardness value of the shallow cryogenic treated sample increased by 14%. Wear tests were carried out according to ASTM G133 standard using the ball-on-flat type method that moves back and forth linearly, a force of 10 N, 20 N and 40 N was applied to all samples at a constant sliding speed of 72

mm/s at a total sliding distance of 1000 m. As a result of wear tests, volumetric loss was 24% in shallow cryogenic treatment and 44% in deep cryogenic treatment.

Keywords: *Cryogenic treatment, Hastelloy C-22, Hardness, Wear, Microstructure*

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Nikel (Ni) bazlı süper alaşımlar, geleneksel paslanmaz çeliklere kıyasla yüksek korozyon direnci, iyi mekanik ve termal özellikleri nedeniyle yüksek sıcaklıklı çalışma koşullarında yaygın olarak kullanılmaktadırlar (Abu Kassim ve diğ., 2020; Firouzdor ve diğ., 2013; He ve diğ., 2016). Nikel bazlı bir süper alaşım olan Hastelloy C-22, yüksek korozyon direncine sahip bir alaşımdır (Hashim ve diğ., 2015; Sharma ve diğ., 2019). Bu süper alaşımlar, yüksek sıcaklık çalışmalarında korozyona karşı direnç gösterebilen koruyucu bir oksit tabakası (Cr_2O_3) oluşturmaları sayesinde avantajlıdırlar (Abdullah ve diğ., 2013). Bu sayede nükleer sanayi, petrol, kimya, gıda ve hidrolik sistem esaslı birçok endüstriyel uygulamada yoğun kullanım alanı bulmaktadır (Hashim ve diğ., 2015; He ve diğ., 2016). Hastelloy serisindeki alaşımların iyi korozyon direncininin sağlanmasında Cr ve Mo elementleri önemli rol oynamaktadırlar (Abu Kassim ve diğ., 2020; Sharma ve diğ., 2019). C-22 alaşımı korozyon ortamında yüksek performans göstermesine rağmen aşınmaya maruz ortamlarda, mekanik özellikleri sebebiyle düşük performans sergilemektedir. Hastelloy alaşımının düşük sertlik (~170 HB) ve yüksek süneklik (~%70) değerleri aşınma direncini kısıtlamaktadır (Gül, 2019). Bu sebeple mekanik zorlamalı (pistonlar, dişli çarklar, yüksek basınçlı kaplar, buhar kazanları, içten yanmalı motorların silindir gömlekleri, pompa mili ve motoru gibi) korozyon ortamlarında ürün kullanım ömrünün arttırılabilmesi için Hastelloy C-22 süper alaşımının aşınma direncininin arttırılması gerekmektedir.

Hastelloy C-22 süper alaşım malzemesine yüksek aşınma direnci kazandırabilmek için geleneksel ısıtma işlem yöntemleri, mekanik yüzey işlemleri ve kriyojenik işlem uygulanabilir. Bütün yöntemlerde malzemenin sertlik artışına bağlı olarak aşınma direncininin artması beklenmektedir (Slatter ve diğ., 2011). Kriyojenik işlem, malzemelerin sertliğini, aşınma direncini ve kullanım ömrünü arttırmakta etkili bir yöntem olarak dikkat çekmektedir (Bensely ve diğ., 2005; Leskovšek ve diğ., 2006; Reitz ve Pendray 2001; Slatter ve diğ., 2011). Geleneksel ısıtma işlem ile kriyojenik işlem kıyaslandığında, kriyojenik işlem malzemenin tüm yapısına etki etmektedir (Mohan Lal ve diğ., 2001). Bu sayede sadece yüzeysel sertleşme değil, bütün iç yapıda homojen bir sertlik elde edilebilmektedir. İlave, mekanik yüzey işlemlerinde (bilyalı dövme gibi) görülen yüzey pürüzlülüğü artışı problemi kriyojenik işlemde görülmemektedir. Kriyojenik işlem, malzemelerin mikro yapısı üzerinde; kalıntı östenit martenzite dönüştürme (Barron, 1982; Barron ve Mulhern 1980), yeni karbür oluşturma, karbür dağılımını homojenleştirme (Baldissera ve Delprete 2008) ve tane yapısını inceltme (Zhisheng ve diğ., 2003) etkilerine sahiptir. Kriyojenik işlem sonrasında kalıntı östenit fazının daha sert ve dayanımlı olan bir martenzit fazına dönüştürülmesi sayesinde makine parçalarının sertlik değerlerinde, aşınma dirençlerinde ve dolayısıyla yorulma ömürlerinde artış görülmektedir (Barron, 1982; Barron ve Mulhern, 1980; Moore ve Collins, 1993).

Aşınma ve korozyon parametreleri makine parçalarının kullanım ömrünü belirleyen en önemli iki fiziksel ve kimyasal unsurdur. Korozyona maruz makine parçalarında yüzey elektronlarının taşınımı sonucu kütle kaybı oluşmaktadır. Aşınmada ise birbiri ile temas halinde olan yüzeylerin birbirlerine karşı gösterdikleri direnç sonucu kütle kaybı gerçekleşmektedir. Her iki durumda ortak olan unsur kütle kaybıdır ve makine tasarımı açısından bu durum tolerans ve ölçü hassasiyetinin bozulması olarak ifade edilebilir. Birbirleriyle etkileşimli olarak çalışan makine sistemlerinde tolerans ve ölçü hassasiyetinin bozulması makine kullanım ömrünü azaltmakta ve üretilen ürünler için belirlenen kalite seviyesini de düşürmektedir. Özellikle doğrudan temas halinde olan sistemlerde (yataklar, dişli çarklar, kayış-kasnak mekanizmaları) karşılaşılan aşınma ve korozyon kaynaklı bu durumu minimize edebilmek için malzeme yüzeylerinin sertliklerinin arttırılması gerekmektedir. Hastelloy C-22 malzemesinin yüksek korozyon direncine sahip olması, malzemeyi makine tasarımları için önemli bir alternatif durumuna getirmektedir. Fakat aşınma direncininin düşüklüğü sebebiyle malzeme kaybının önlenmesi güçtür. Bu sebeple Hastelloy

C-22 malzemesinin sertlik ve aşınma direnci artışının araştırılması gerekmektedir. Vimal ve diğ. (2008), EN 31 çeliğine farklı sıcaklıklarda geleneksel ısıl işlem ve derin kriyojenik işlem uygulamışlardır. Uygulanan ısıl işlemlerin, numunelerin mikroyapı ve aşınma dirençlerine olan etkisini incelemişlerdir. Kriyojenik işlem için numuneler $-183\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye 3 saatte getirilmiş ve numuneler $-183\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 24 saat bekletilmiştir. Kriyojenik işlemden sonra numunelere temperleme işlemi uygulanmıştır. Araştırmacılar Grup B numunelerinin (kriyojenik işlem + temperleme işlemi), diğer numunelere kıyasla daha yüksek sertliğe ve aşınma direncine sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Akhbarizadeh ve diğ. (2009), sıg ve derin kriyojenik işlemin D6 takım çeliğinin aşınma davranışına olan etkilerini belirlemek için sıg kriyojenik işlemi $-63\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de, derin kriyojenik işlemi $-185\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de gerçekleştirmişlerdir. Kriyojenik işlemlerin ardından farklı yüklerde ve farklı hızlarda gerçekleştirilen aşınma testleri sonucunda kriyojenik işlem uygulanan numunelerin yüksek performans gösterdiğini tespit etmişlerdir. Araştırmacılar, kriyojenik işlem sonrasında kalıntı östenit miktarının azalmasından dolayı, numunelerin sertliğinin arttığını ve aşınma direncinin doğru orantılı olarak artış gösterdiğini ifade etmişlerdir. Literatür incelendiğinde, kriyojenik işlem uygulanan Hastelloy C-22 süper alaşımının sertlik ve aşınma direnci değişiminin incelendiği bir çalışma bulunmadığı belirlenmiştir.

Bu çalışmanın özgün değeri, korozyon direnci çok yüksek olan fakat aşınma direnci ve sertliği çeliklere nazaran düşük olan Hastelloy C-22 süper alaşımının kriyojenik işlem ile sertlik ve aşınma direncinin değişiminin incelenmesidir. Hastelloy C-22 süper alaşımının aşınma direncinin artırılması, makine konstrüksiyonlarında kullanılabilirliğinin artırılması için önem taşımaktadır. Sıg ve derin kriyojenik işlem uygulanan numuneler için sıcaklık değerleri sırasıyla $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $-145\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak seçilmiş ve kriyojenik işlem bekleme süresi olarak 24 saat tercih edilmiştir.

MATERYAL VE METOT (MATERIAL and METHOD)

Çalışmada Kullanılan Malzeme (Material Used in the Study)

Çalışma kapsamında Çizelge 1'de kimyasal bileşeni verilen Hastelloy C-22 nikel-krom-molibden süper alaşımı kullanılmıştır. Hastelloy C-22 süper alaşımı yüksek krom ve nikel içeriği sayesinde, hem oksitleyici ve oksitleyici olmayan kimyasallara karşı hem de çukurlaşma, çatlak korozyonu ve gerilim korozyon çatlama karşı olağanüstü direnç gösterebilmektedir (Abu Kassim ve diğ., 2020).

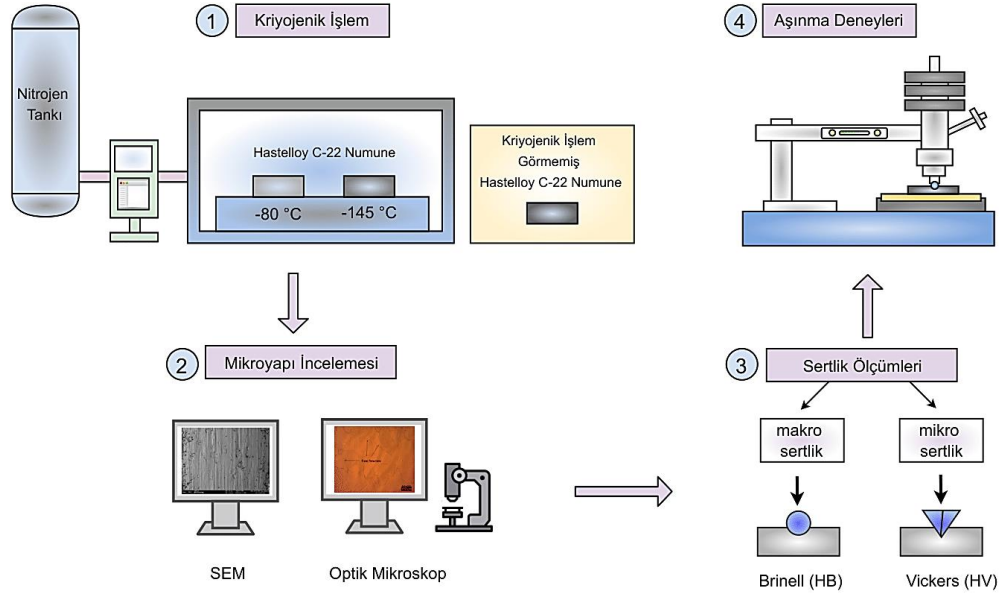
Çizelge 1. Hastelloy C-22'nin spektral analiz sonuçları (Ağırlık, %).

Table 1. Spectral analysis of Hastelloy C-22 (Weight, %)

Kimyasal Bileşen	Ni	Cr	Mo	Fe	W	Co	Mn	Si	C	Cu
Ağırlık, %	56	22	13	3	3	Max. 2,5	Max. 0,5	Max. 0,08	Max. 0,01	0,5

Kriyojenik İşlemin Uygulanması (Application of Cryogenic Treatment)

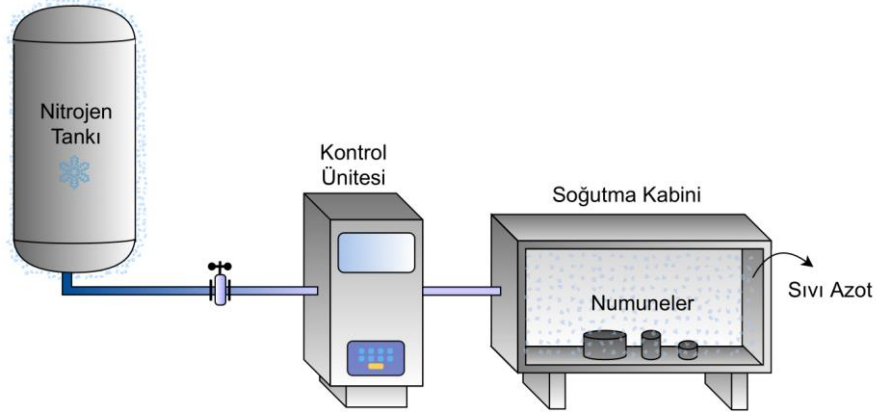
Korozyon direnciyle birlikte aşınma direncinin artırılabilmesi için Hastelloy C-22 süper alaşımının sertlik değerinin artırılması gerektiğinden dolayı alaşıma, $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $-145\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de olmak üzere 2 farklı koşulda kriyojenik işlem uygulanmıştır. $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ koşulu sıg kriyojenik işlem, $-145\text{ }^{\circ}\text{C}$ koşulu ise derin kriyojenik işlem olarak dikkate alınmış, bu sayede farklı kriyojenik işlem koşulları ile sertlik nüfuziyeti, mikroyapı ve aşınma direnci değişimi arasındaki korelasyon incelenmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Deneysel ve görsel değerlendirme faktörleri.

Figure 1. Experimental and visual evaluation factors

Deneylemlerde 12x5x2 mm boyutlarında dikdörtgen numune kullanılmıştır. Hastelloy C-22 numunesine uygulanan kriyojenik işlem, özel olarak tasarlanan bilgisayar kontrollü kriyojenik işlem ünitesinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 2). Isıl işlem sırasında meydana gelebilecek termal şokları ve mikro yapıda oluşabilecek mikro çatlakları engellemek için kademeli soğutma ve ısıtma ile kriyojenik işlem gerçekleştirilmiştir. Numuneler -80 °C ve -145 °C'ye kadar 6 saat sürede soğutulmuştur. -80 °C ve -145 °C sıcaklık değerlerine ulaşan numuneler, bu sıcaklıkta 24 saat bekletilmiştir. İşlem sonrası, numuneler 6 saat sürede oda sıcaklığına kademeli olarak ulaşmıştır.



Şekil 2. Bilgisayar kontrollü kriyojenik işlem ünitesi.

Figure 2. Computer controlled cryogenic treatment unit.

Kriyojenik işlemden sonra numuneler temperleme işlemine maruz bırakılmışlardır. Uygulanan temperleme işlemiyle numunelerde homojen karbür yapısı oluşumu ve bu sayede iç gerilmelerinin minimizasyonu hedeflenmiştir. Temperleme işlemi, literatür çalışmaları örnek alınarak 200 °C 'de 2 saat uygulanmıştır (Baldissera ve Delprete, 2008; Bensely ve diğ., 2005; Mohan Lal ve diğ., 2001; Zhirafar ve diğ., 2007). Temperleme işlemi Termal marka ısıl işlem fırınında gerçekleştirilmiştir.

Metalografik İşlemler (Metallographic Processes)

Isıl işlem sonrası elde edilen numunelerin iç yapı analizleri için optik mikroskop (OM-Eclipse MA200) ve taramalı elektron mikroskobu (FESEM - CARL ZEISS GEMINI) görüntüleri kullanılmıştır. Hastelloy C-22 süper alaşımının yüksek korozyon dayanımı sebebiyle, hassas yüzey parlatma ve uzun süreli

dağlama ile iç yapı görüntüleri elde edilmiştir. Metalografik analiz için öncelikle bakalite alınan numuneler, Tegramin 30 cihazında sırası ile 240-400-600-800-1000-1200-2000-3000 zımpara aşamalarından geçirilmiş ve numunelerin yüzeyleri parlatma işlemi için temizlenmiştir. Tegramin 30 cihazına Floc Parlatma keçesi takılmış ve 3 mikron elmas süspansiyon kullanılarak yüzey parlatma işlemi gerçekleştirilmiştir. Dağlama çözeltisi için 5 ml oksalik asit ($H_2C_2O_4$) – 95 ml hidroklorik asit (HCl) çözelti içeriği emülsiyonu hazırlanmıştır. Yaklaşık 30 saat dağlama işleminden sonra etanol ile numune yüzeyleri temizlenmiştir. Mikro yapı incelemeleri için Eclipse MA200 cihazında optik mikroskop görüntüleri alınmıştır. Bu sayede kriyojenik işlemin malzemenin tane yapısına/ boyutuna nasıl etki ettiği incelenmiştir.

Sertlik Ölçümleri (Hardness Measurements)

Hastelloy C-22 numunelerin kriyojenik işlem sonrası oluşan sertlik değerleri Brinell yöntemi ile makro boyutta ve Vickers yöntemi ile mikro boyutta ölçülmüştür. Mikro sertlik ölçümleri Karabük Üniversitesi MARGEM laboratuvarında bulunan QNESS Q10 A+ mikro sertlik ölçüm cihazı ile her bir numune için en dış yüzeyden merkeze doğru 10 farklı noktadan ölçüm alınarak yapılmıştır. Ölçümler, 10 s süre ve 5 kg yük altında gerçekleştirilmiştir. Hastelloy C-22 süper alaşım numunelerinin makro sertlik değerleri Brinell sertlik cinsinden ölçülmüştür. Makro sertlik değerleri, Karabük Üniversitesi MARGEM laboratuvarında bulunan QNESS Q250M Makro sertlik ölçüm cihazı ile her bir numune için üç farklı bölgeden ayrı ayrı alınan sertlik değerlerinin aritmetik ortalaması hesaplanarak belirlenmiştir. Brinell sertlik ölçümünde 2,5 mm çapındaki tungsten karbür bilye, numuneye 62,5 kg yük altında 15 s süreyle uygulanmıştır.

X Işını Kırınım Yöntemi (XRD) Analizi (X-Ray Diffraction Method (XRD) Analysis)

Hastelloy C-22 süper alaşım numunelerine uygulanan sıg ve derin kriyojenik işlemler sonucunda, malzemenin mikro yapılarında ortaya çıkan değişimleri incelemek ve değerlendirmek için X ışını kırınım yöntemiyle (XRD) görüntüleme yapılmıştır. XRD analizleri, Karabük Üniversitesi MARGEM Laboratuvarında bulunan Rigaku Ultra IV XRD cihazı ile yapılmıştır. Analizler 40 kV voltaj, 40 mA akım 10° - 120° C arasındaki açı ölçüleriyle, $0,02^\circ$ adım tarama büyüklüğünde 3° /dk hız ile gerçekleştirilmiştir.

Aşınma Deneyleri (Wear Tests)

Kriyojenik işlem ve temperleme işlemine maruz kalan Hastelloy C-22 numunelerine uygulanan ısı işlemlerin etkilerini görmek amacıyla Karabük Üniversitesi MARGEM Laboratuvarlarında bulunan UTS Tribometer T 10/20 markalı aşınma cihazı ile kuru kayma ortamında deneyler yapılmıştır. Aşınma deneyleri doğrusal olarak ileri geri hareket eden pim üzeri plaka (ball-on flat) tipi metoduyla oda sıcaklığında 10 N, 20 N ve 40 N yük koşulları altında, 72 mm/s sabit kayma hızında ve toplamda 1000 m yol kat edilerek yapılmıştır (Çizelge 2). Hastelloy C-22 süper alaşımı pistonlar, dişli çarklar, yüksek basınçlı kaplar gibi mekanik zorlamalı korozyon ortamlarında kullanılan bir alaşım olduğundan dolayı aşındırıcı olarak 803 HV yüksek sertliğe sahip 6 mm çapında 52100 çelik bilye kullanılmıştır. Tüm yüzeylerde aynı yüzey kalitesinin sağlanması için aşınma deneylerine başlamadan önce yüzeyler 220 mesh SIC zımpara ile zımparalanmıştır. Aşınma deneyleri sırasında sürtünme katsayısı verileri kaydedilmiştir.

Çizelge 2. Aşınma deneyi parametreleri.

Table 2. Wear test parameters

Aşınma Deney Parametreleri		
Uygulanan Yük	Kayma Mesafesi	Kayma Hızı
10 N, 20 N ve 40 N	1000 m	72 mm/s

Hastelloy C-22 deney numunelerinde aşınan malzeme miktarlarının kıyaslanması için aşınma izi bölgelerinin hacim kaybı hesapları yapılmıştır. Denklem 1'e göre hesaplanan hacim kayıplarının toplam

kayma mesafesine bölünmesi ile aşınma oranı elde edilmiştir (Turan ve diğ., 2018). Denklem 1’de “V” hacimsel aşınma kaybını, “a” aşınma genişliğini, “b” aşınma derinliğini ve “c” strok mesafesini ifade etmektedir.

$$V = \frac{2}{3} abc$$

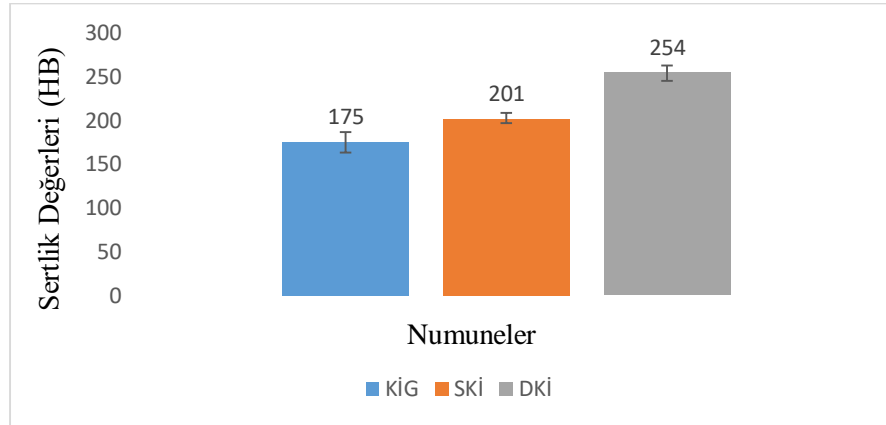
Denklem 1.

Aşınma deneyleri sonucunda aşınma mekanizmalarını ve yüzey morfolojisini analiz edebilmek için Karabük Üniversitesi MARGEM laboratuvarında bulunan CARL ZEISS ULTRA PLUS GEMINI FESEM marka Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) kullanılmıştır.

3. DENEY SONUÇLAR VE TARTIŞMA (EXPERIMENT RESULTS AND DISCUSSION)

3.1 Sertlik Ölçümleri (Hardness Measurements)

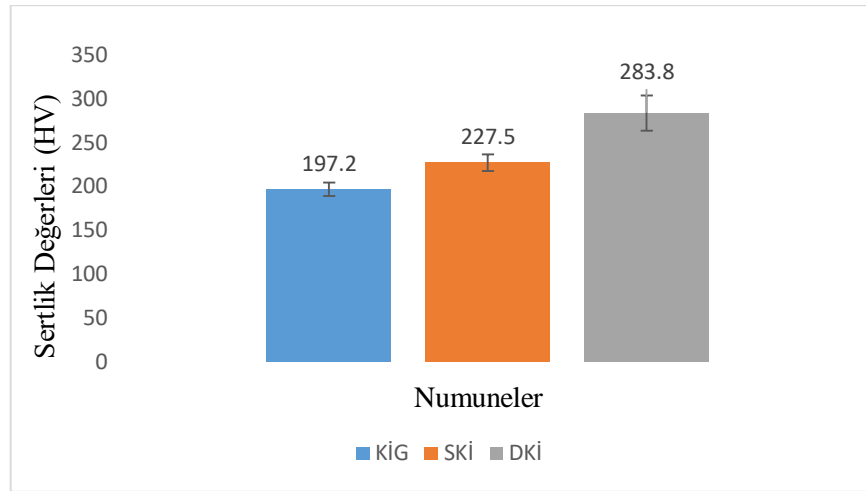
Malzemelerin sertlik değerlerinin artmasıyla birlikte aşınma dirençlerinin artması beklenir (Kondul ve Çetin, 2021). Aynı zamanda yüksek sertlik değerleri, malzemelerin yorulma ömürlerini artırmaktadır (Zhirafar ve diğ., 2007). Çalışma kapsamında Hastelloy C-22 süper alaşım numunesine uygulanan kriyojenik işlemin numunedeki sertlik değeri değişimini belirlemek için numunelere makro ve mikro sertlik ölçüm testleri yapılmıştır. Numunede aşınma testi öncesi XRD sonuçlarında farklı fazlar görüntülenmiştir (Şekil 5). Farklı fazlardaki sertlik değeri değişebileceği için iki farklı sertlik ölçüm testi yapılmıştır. Makro sertlik değerini tespit etmek için kullanılan Brinell sertlik ölçme testindeki batıcı uç çapı büyük olması nedeniyle her fazdaki sertlik değeri net olarak tespit edilememektedir. Bu yüzden mikro sertlik ölçümü yapılması gerekmektedir. Yapılan iki sertlik ölçüm testinin sonuçları ise benzerlik göstermektedir. Makro sertlik ölçümlerinde her bir numune için üçer ölçüm alınarak aritmetik ortalama değerleri dikkate alınmıştır. Şekil 3’te ortalama makro sertlik ölçüm değerlerinin grafiği verilmiştir. Kriyojenik işlem görmemiş (KİG), sığ (SKİ) ve derin kriyojenik işlem (DKİ) görmüş numunelerin makro sertlik değerleri sırasıyla 175, 201 ve 254 HB olarak ölçülmüştür.



Şekil 3. Numunelerin makro sertlik değerleri.

Figure 3. Macro hardness values of the samples.

Şekil 3’e göre sığ kriyojenik işlem ve derin kriyojenik işlem görmüş numunelerin sertlik değerlerinde artış meydana gelmiştir. En düşük sertlik (175 HB) kriyojenik işlem görmemiş numune elde edilirken en yüksek makro sertlik (254 HB) DKİ uygulanmış numunelerde elde edilmiştir. Kriyojenik işlem görmemiş numuneye kıyasla SKİ uygulanan numunenin sertlik değerlerinde %14, DKİ uygulanan numunenin sertlik değerinde %45 oranında bir artış gözlenmiştir. Mikro sertlik ölçümlerinde, her bir numune için yapılan 10 adet ölçümün aritmetik ortalaması Şekil 4’te verilmiştir. Kriyojenik işlem görmemiş, sığ ve derin kriyojenik işlem görmüş numunelerin mikro sertlik değerleri sırasıyla ~192, 227 ve 283 HV’dır. Sonuçlar literatür ile uyumludur (Akhbarizadeh ve diğ., 2009; Bensely ve diğ., 2005; Leskovšek ve diğ., 2006; Reitz ve Pendray 2001).



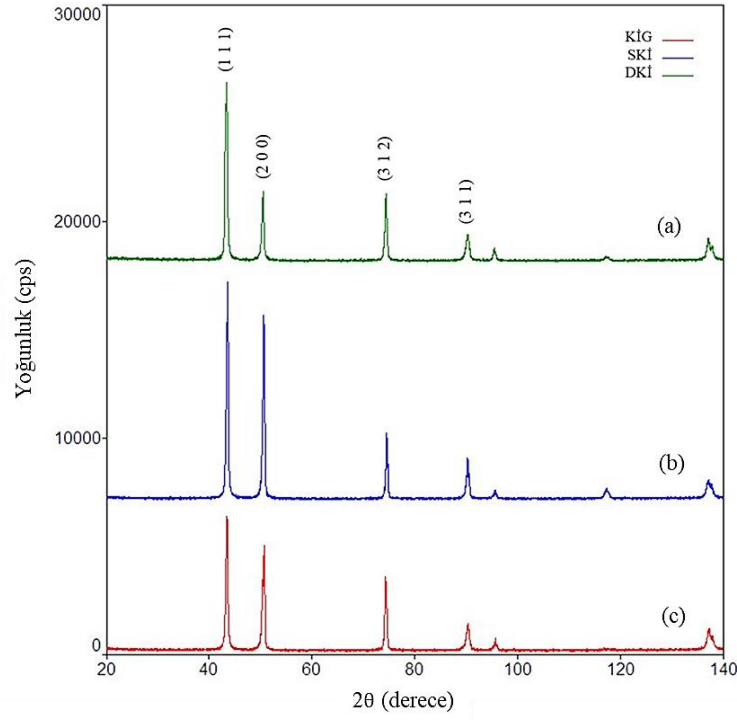
Şekil 4. Numunelerin mikro sertlik değerleri.

Figure 4. Microhardness values of the samples.

Kriyojenik işlem, malzemenin sertlik değerini arttırmıştır. Kriyojenik işlem görmemiş numuneye kıyasla SKİ uygulanan numunenin sertlik değerlerinde %15, DKİ uygulanan numunenin sertlik değerinde %44 oranında bir artış gözlenmiştir. Bu iyileşme kalıntı östenitin martenzite dönüşmesine bağlanabilir. Akhbarizadeh ve diğ., (2009) çalışmalarında, sıg kriyojenik olarak işlenmiş numunelerin yüksek sertliğini kalıntı östenit miktarının azalmasından kaynaklandığını ifade etmişlerdir. Ayrıca derin kriyojenik işlem görmüş numunelerde, kalıntı östenit eliminasyonu, yüksek krom karbür yüzdesi ve homojenleştirilmiş krom karbür dağılımı sertliğin daha fazla artmasına neden olmuştur (Akhbarizadeh ve diğ., 2009). Sıg ve derin kriyojenik işlem ile numunelerin martenzitik yapıları homojen olarak dağılmıştır (Kalsi ve diğ., 2014). Bu homojen yapı numunelerdeki kararlılığı arttırdığı için numunelerin sertliği artmaktadır. Sertlik artışındaki diğer bir sebep ise tane boyutlarının küçülmesiyle birlikte tane sınırı sayısının artmasıdır. Tane sınırlarının çok olması, malzemenin tane yapısındaki düzlemlerin (dislokasyonların) birbiri üzerinden kaymasına engel olmaktadır. Bu durum, malzemelerin mekanik özelliklerini dolayısıyla sertlik değerlerini arttırmaktadır. Şekil 9'daki optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde en fazla tane sınırına sahip olan numunenin DKİ uygulanmış numune olduğu görülmektedir. Sertlik grafikleri ile optik mikroskop görüntülerinin birbirleri ile tutarlı olduğu görülmektedir. Ayrıca, malzemelere uygulanan kriyojenik işlem, sertlik değerinin yanı sıra aşınma direnci ve tokluk değerini arttırmaktadır (Candane ve diğ., 2013). Elde edilen bulgular, literatürdeki çalışmalarla örtüşmektedir (Akhbarizadeh ve diğ., 2009; Bensely ve diğ., 2005; Candane ve diğ., 2013; Leskovšek ve diğ., 2006; Reitz ve Pendray, 2001).

XRD Analizleri (XRD Analysis)

KİG, SKİ ve DKİ uygulanmış Hastelloy C-22 süper alaşım numunelerinin kristalografik özellikleri ve faz bileşimleri XRD analizi ile elde edilmiş ve XRD analiz grafikleri Şekil 5'te verilmiştir. Uygulanan ısıl işlemlere göre piklerin yarı yükseklikteki pik genişliği (FWHM) değerleri Çizelge 3'te verilmiştir. XRD analiz sonuçlarına göre, bütün numunelerde Nikel (Ni), krom (Cr), molibden (Mo) ve demire (Fe) ait karakteristik pikler gözlenmiştir. Bu gözlenen piklerden, $2\theta=43$ derecedeki 111 düzlemi Ni, $2\theta=50$ derecedeki 200 düzlemi Cr, $2\theta=74$ derecedeki 312 düzlemi Mo ve $2\theta=90$ derecedeki 311 düzlemi Fe elementinin varlığını göstermektedir. Grafiğe göre kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin pik şiddetlerinde artış gözlenmiştir. Isıl işlem sonucunda düzlem yönlenmelerinde farklılaşmalar olduğu ve bu yüzden pik şiddetlerinde artış olduğu düşünülmektedir. Ayrıca yapılan kriyojenik işlemin malzemenin iç yapısında yeni bir faz oluşumuna sebep olmadığı da söylenebilir.



Şekil 5. Hastelloy C-22 süper alaşım numunelerinin XRD analiz grafikleri, (a) DKİ, (b) SKİ, (c) KİG.

Figure 5. XRD analysis graphs of Hastelloy C-22 superalloy samples, (a) DKİ, (b) SKİ, (c) KİG.

Çizelge 3. Uygulanan ısı işlemlerin yarı yükseklikteki pik genişliği değerleri.

Table 3. Peak width values at half height of applied heat treatments.

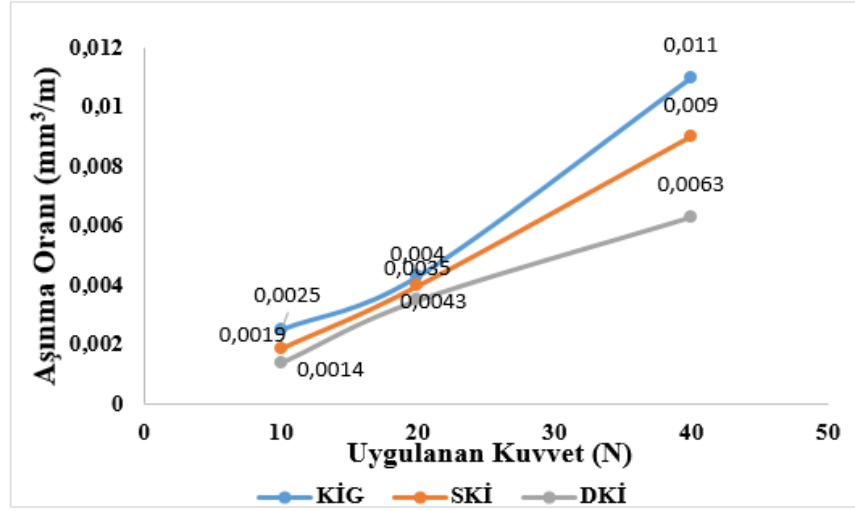
2θ (°)	Pik	FWHM (°)			Karşılık Gelen Element
		KİG	SKİ	DKİ	
43,47	111	0,223	0,385	0,403	Ni
50,33	200	0,21	0,27	0,419	Cr
74,32	312	0,28	0,275	0,35	Mo
90,363	311	0,309	0,622	0,658	Fe

Kriyojenik işlem sonrası XRD grafikleri analiz edildiğinde FWHM değerlerinde farklılıklar gözlenmiştir. Grafikte gördüğümüz FWHM değerlerinin artmasıyla birlikte tane boyutunun azalması arasında bir ilişki literatürde görülmüştür (Khakbaz ve Kazeminezhad, 2012; Kumar ve diğ., 2016; Maleki ve Unal, 2018). Bu nedenle kriyojenik işlemle, Hastelloy C-22 süper alaşımının tane boyutunun küçüldüğünü söyleyebiliriz. Böylece XRD grafiği (Şekil 5) ile sertlik grafikleri (Şekil 3-4) birbirleri ile örtüşmekte olup, tane boyutunun küçülmesiyle birlikte sertlik değerinin arttığını ifade edebiliriz.

Aşınma Deneyleri (Wear Tests)

Kriyojenik işlemin Hastelloy C-22 süper alaşımının aşınma direnci üzerindeki etkisi aşınma oranı, sürtünme katsayısı ve aşınma mekanizmaları açısından değerlendirilmiştir. Literatür incelemeleri sonucunda sertlik ile aşınma dayanımı arasındaki ilişkinin doğru orantılı olduğu bilinmektedir (He ve diğ., 2015). 10, 20 ve 40 N yük koşulları altında yapılan aşınma deneyleri sonucunda numunelerde meydana gelen aşınma oranları Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 6'ya göre, kriyojenik işlem görmüş numunelerin daha yüksek aşınma direncine sahip olduğu gözlenmiştir. 10 N yük altında aşınma deneylerine tabii tutulmuş KİG, SKİ ve DKİ uygulanmış numunelerin aşınma oranları sırasıyla 0,0025, 0,0019 ve 0,0014 mm³/m'dir. 20 N yük altındaki KİG, SKİ ve DKİ uygulanmış numunelerin aşınma oranları sırasıyla 0,0043, 0,004 ve 0,0035 mm³/m'dir. 40 N yük altındaki KİG, SKİ ve DKİ uygulanmış numunelerin

aşınma oranları sırasıyla 0,011, 0,009 ve 0,0063 mm³/m olarak hesaplanmıştır. Aşınma oranı sonuçlarına bakıldığında literatürle uyumlu olarak (Bensely ve diğ., 2005; Candane ve diğ., 2013; Dixit ve diğ., 2013; Vimal ve diğ., 2008) sertlik değeri yüksek olan numunelerin aşınmaya karşı daha fazla dirençli oldukları görülmüştür.



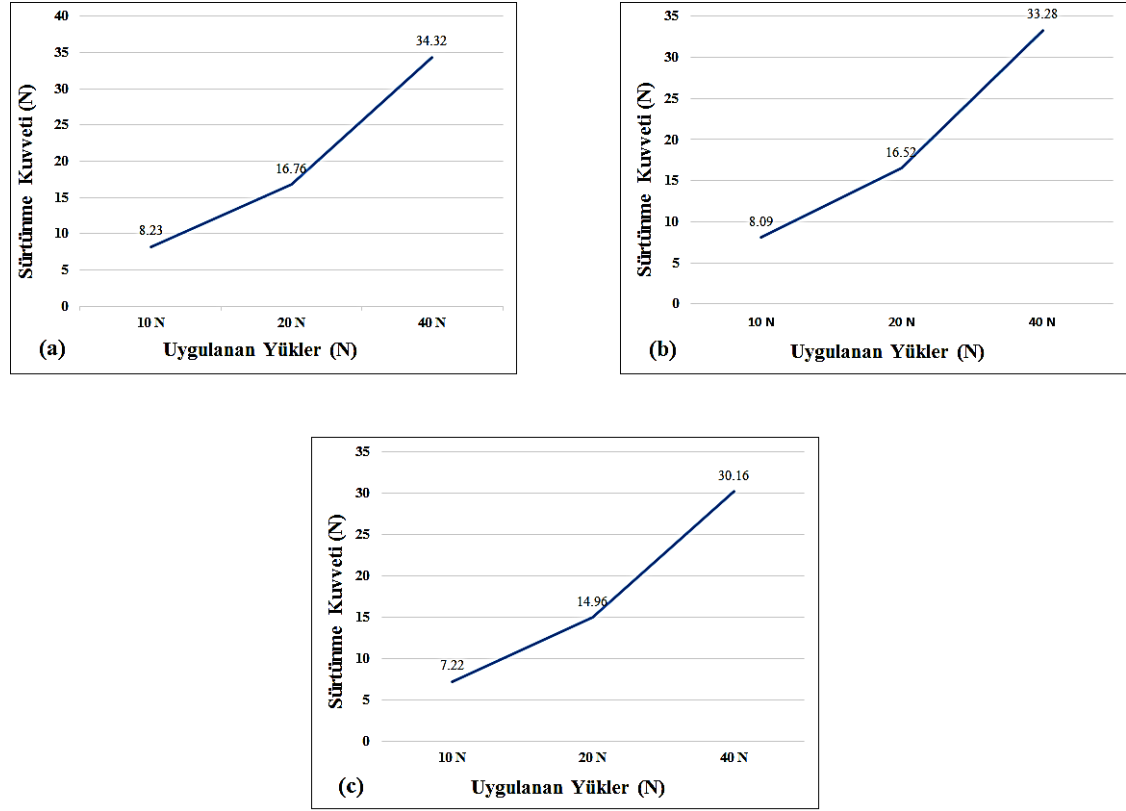
Şekil 6. KİG, SKİ ve DKİ uygulanmış numunelerin aşınma oranı grafikleri.

Figure 6. Graphs of wear rate of the samples applied KIG, SKI and DKI.

3 farklı numune arasında minimum aşınma derin kriyojenik işlem görmüş numunede elde edilmiştir. Akhbarizadeh ve diğ. (2009) bu durumun kalıntı östenit eliminasyonu ve homojenleştirilmiş karbür dağılımının yanı sıra daha fazla krom karbür yüzdesinden kaynaklanabileceğini söylemişlerdir. Yine grafik incelendiğinde, artan yükte doğru orantılı olarak aşınma oranlarının arttığı görülmektedir.

Birbiri ile temas halinde olan iki yüzey arasında kayma hızı ve yük etkisiyle sürtünme enerjisi meydana gelmektedir. Birbirleriyle temaslı olan yüzey pürüzlülük noktalarında oluşan sürtünme enerjisi malzeme yüzeyinde plastik deformasyonlara sebebiyet vermektedir. Çalışma kapsamında kriyojenik işlem uygulanan ve uygulanmayan numunelerin sürtünme kuvveti grafikleri Şekil 7'de verilmiştir. Verilen grafiğe göre minimum sürtünme kuvveti her 3 kuvvet için DKİ uygulanmış numunelerde elde edilmiştir. En yüksek sürtünme kuvvetleri ise KİG numunelerde elde edilmiştir.

Aşınma ile sürtünme katsayısı birbirine bağlı parametrelerdir. Aşınma sonrasında malzemelerin yapısında mikro çatlaklar meydana gelmektedir. Oluşan bu mikro çatlak etkisinden kaynaklanan plastik deformasyonlar sürtünme katsayısını etkilemektedir (Erdoğan, 2019). 3 farklı yük ve kuru kayma koşulu altında yapılan aşınma deneylerinde sürtünme katsayısı değerleri ölçülmüş ve deney sırasında kaydedilen sürtünme katsayılarının ortalama değerleri Çizelge 4'te verilmiştir. Kriyojenik işlem uygulanmamış numunenin sürtünme katsayısı, kriyojenik işlem uygulanmış numunelere oranla yüksek elde edilmiştir. Kriyojenik işlem ile sürtünme katsayısı arasındaki ilişki, kriyojenik işlem görmüş numunelerin yüzey sertlikleri ve pürüzlülükleri ile açıklanabilir. Kriyojenik işlemin numunenin tribolojik özelliklerine etkisini inceleyen Podgornik ve diğ. (2009) ve Senthilkumar ve Rajendran (2011), kriyojenik işlem ile elde edilen yüksek yüzey sertlikleri sayesinde düşük sürtünme katsayısı elde edildiğini çalışmalarında belirtmişlerdir.



Şekil 7. Sürtünme kuvveti grafiği (a) KİG, (b) SKİ ve (c) DKİ.

Figure 7. Friction force graph (a) KIG, (b) SKI and (c) DKI.

Bunun yanı sıra kriyojenik işlem sırasında oluşan ince karbür çökeltileri, dispersiyon sertleşmesi etkisiyle aşınma direncini arttırmıştır. İnce karbürlerin varlığından dolayı, derin kriyojenik işleme tabi tutulan numunelerde plastik deformasyon meydana gelmemiştir. Dolayısıyla ara yüzde birbiriyle temas eden pürüzler minimum sürtünme katsayısı oluşumuna yol açmıştır (Candane ve diğ., 2013). SKİ ve DKİ uygulanmış numunelerin yüzey sertliklerinin artmasıyla birlikte yüzey dirençleri artmış ve bu nedenle sürtünme katsayılarında düşüş yaşanmıştır.

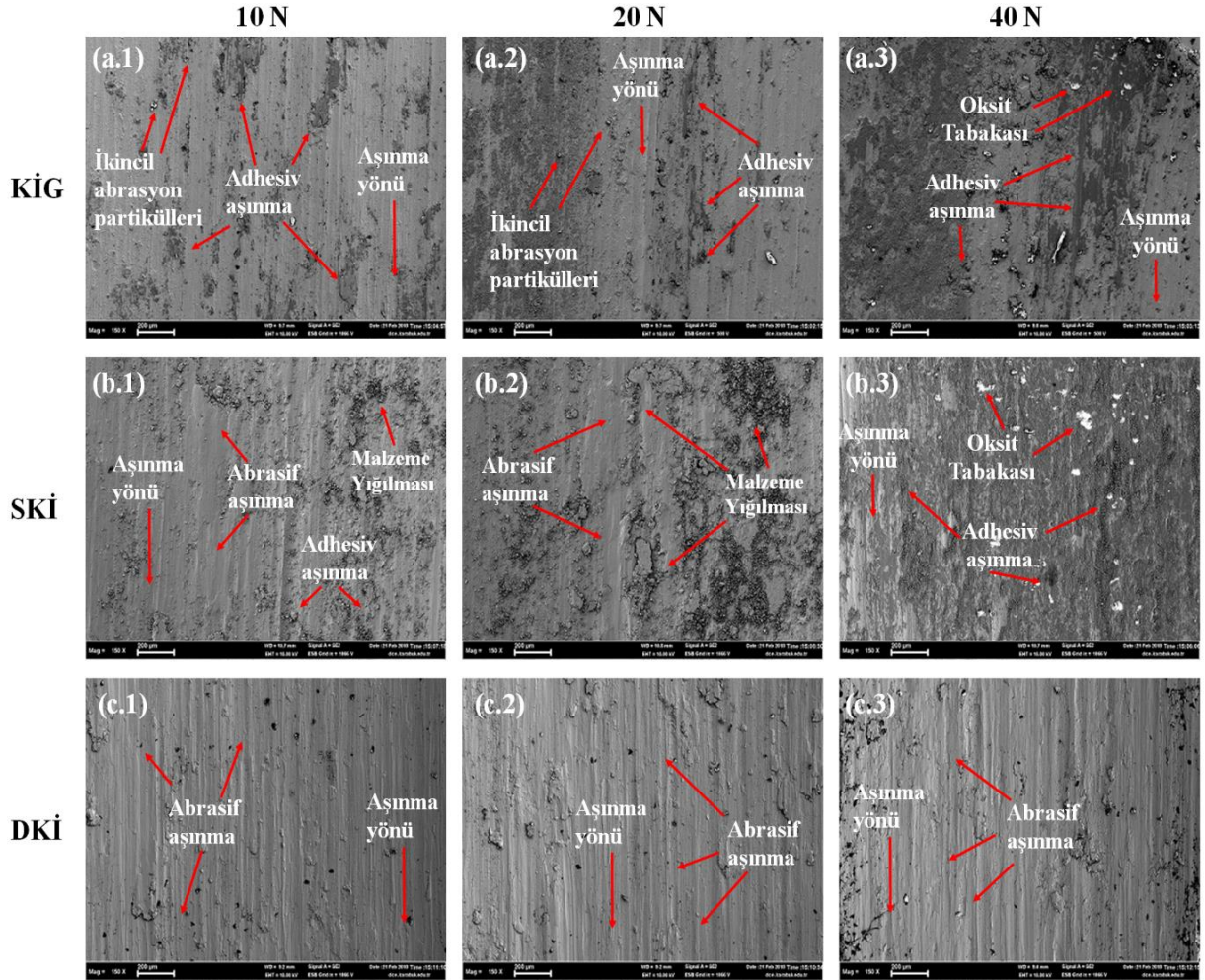
Çizelge 4. Ortalama sürtünme katsayısı değerleri (μ).

Table 4. Average friction coefficient values (μ).

Numuneler	10 N Yük	20 N Yük	40 N Yük
KİG	0,823	0,838	0,858
SKİ	0,809	0,826	0,832
DKİ	0,722	0,748	0,754

Kriyojenik işlem uygulanmamış ve kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri Şekil 8'de gösterilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde aşınmaya daha fazla direnç gösteren numunenin DKİ (Şekil 8.c) uygulanmış numuneler olduğu görülmektedir. Dolayısıyla aşınma oranı grafiği ile (Şekil 6) SEM görüntüleri birbirleri ile tutarlılık göstermektedir. SEM görüntülerine göre 10 N ve 20 N yük altında aşınma deneyi yapılan SKİ uygulanmış numunelerde (Şekil 8.b1 – b2) malzeme yığılmaları gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre Hastelloy C-22 malzemesinin farklı koşullarda çoklu aşınma mekanizmalarına maruz kaldığı görülmüştür. KİG numunelerde (Şekil 8.a) adhesiv aşınma mekanizması, SKİ uygulanmış numunelerde adhesiv ve abrasif aşınma mekanizmalarının birlikte olduğu ve DKİ uygulanan numunelerde (Şekil 8.c) ise sadece abrasif aşınma mekanizmasının meydana geldiği görülmüştür. DKİ uygulanan numunenin 40 N yük altındaki aşınma sonucunda yüzeylerindeki aşınma yönü çizgileri (Şekil 8.c3) net olarak görülmektedir. Net olarak görünen aşınma çizgileri, DKİ uygulanmış numunede abrasif aşınmanın bir göstergesi olarak yorumlanmıştır. Aşınma deneyleri

yapıldığı esnada aşınma yönü çizgileri bölgesinden ya da aşındırıcıdan kopan malzemeler abrasif aşınma mekanizmasına sebep olmuşlardır. Kriyojenik işlem uygulanmasının tane dağılımını düzenleyerek aşınma direncine katkıda bulunduğu düşünülmektedir. Literatürde kriyojenik işlem sayesinde kalıntı östenitin martenzite dönüştürüldüğü ve karbür çökmesiyle sertlik değerlerinin (Şekil 3-4) artmasından dolayı malzemenin aşınma direncinin arttığı belirtilmiştir (Akhbarizadeh ve diğ., 2009; Barron, 1982).

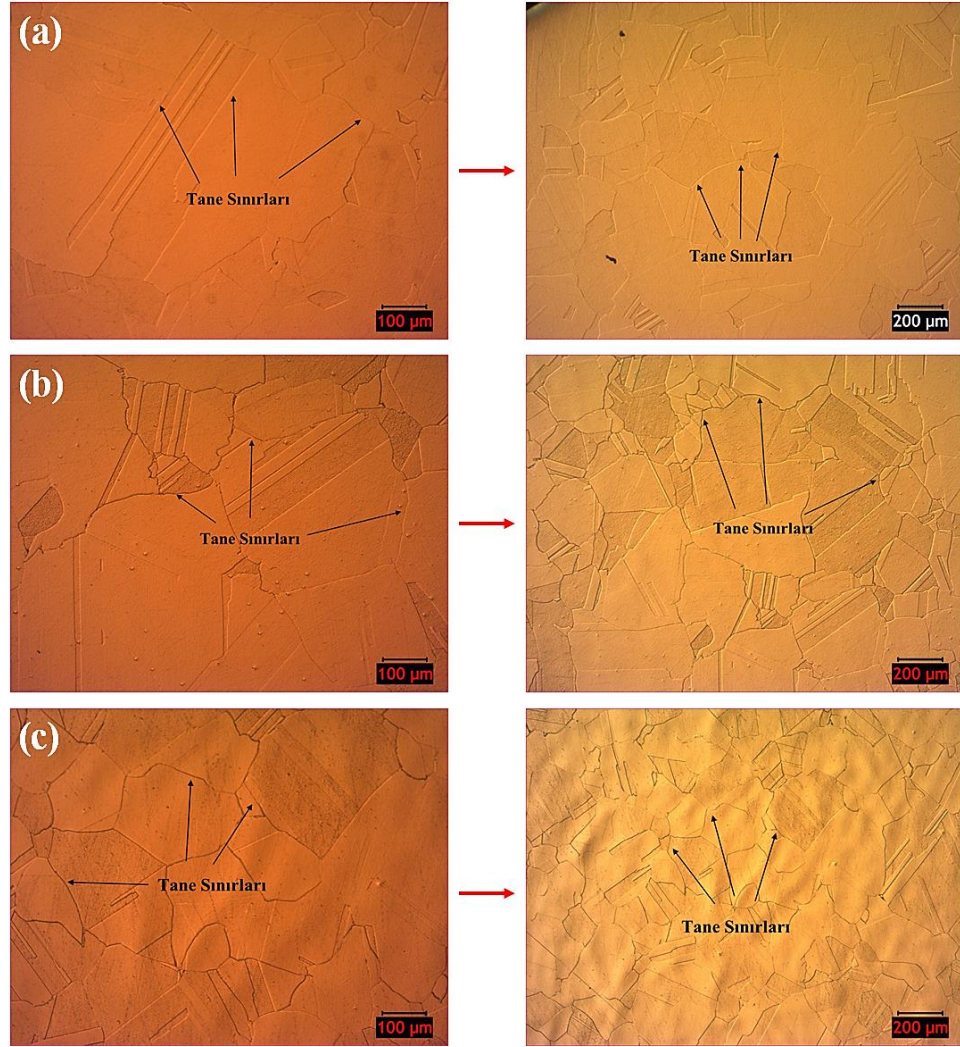


Şekil 8. Aşınma deneyleri sonucu numunelerin yüzeyinde meydana gelen aşınma izi SEM görüntüleri.
Figure 8. SEM images of the wear trace on the surface of the samples as a result of the wear tests.

Mikroyapı İncelemeleri (Microstructure Review)

Hastelloy C-22 süper alaşımına uygulanan 3 farklı ısıl işlem sonucu mikroyapıda meydana gelen değişimleri gözlemleyebilmek için numunelerin mikroyapıları önce optik mikroskopla ardından SEM cihazıyla incelenmiştir. Optik mikroskop görüntüleri Şekil 9’da verilmiştir.

Optik mikroskop görüntülerine bakıldığında Hastelloy C-22 süper alaşım numunelerinin tane boyutlarının DKİ ile küçüldüğü görülmektedir. Küçülen tane boyutları daha çok tane sınırı meydana getirmektedir. Tane sınırlarının çoğalması, malzemedeki atomların dislokasyon hareketlerini, mikroyapıdaki düzlemlerin birbiri üzerinde ve tane sınırları üzerinde kayarak ilerlemesini zorlaştırmaktadır. Malzemedeki dislokasyon hareketinin kısıtlanması malzemenin mukavemetlenmesini sağlamaktadır (Firouzdor ve diğ., 2008; Patil ve Tated, 2012; Thakur ve diğ., 2008). Uygulanan ısıl işlemlere göre piklerin yarı yükseklikteki pik genişliği (FWHM) değerlerinin artmasıyla birlikte tane boyutunun azalması arasında bir ilişki literatürden bilinmektedir. XRD ölçümleri sonucunda Çizelge 3’te verilen FWHM değerlerine göre DKİ uygulanmış numunenin FWHM değerleri en yüksek çıkmaktadır. Bu nedenle DKİ uygulanmış numunenin tane boyutu küçülmüş ve tane sınırları artmıştır.



Şekil 9. Optik mikroskop görüntüleri (a) KİG, (b) SKİ, (c) DKİ.

Figure 9. Optical microscope images (a) KIG, (b) SKI, (c) DKI.

SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Yüksek korozyon direncine sahip Hastelloy C-22 süper alaşımı, korozyon ortamında yüksek performans göstermesine rağmen aşınmaya maruz ortamlarda, mekanik özellikleri sebebiyle düşük performans sergilemektedir. Çalışma kapsamında, Hastelloy C-22 süper alaşım malzemesine uygulanan kriyojenik işlemin malzemedeki sertlik ve aşınma direncine olan etkileri araştırılmış olup yapılan deneysel çalışmaların sonuçları aşağıda verilmiştir.

- Kriyojenik işlem, sığ ve derin kriyojenik işlem olmak üzere 2 şekilde uygulanmıştır. Derin kriyojenik işlemin etkileri daha net bir şekilde gözlenmiştir.
- Hastelloy C-22 süper alaşımının sertliği (175 HB) SKİ uygulanması sonucu %14 oranında (201 HB), DKİ uygulanması sonucu ise %45 oranında (254 HB) artış göstermiştir.
- Aşınma deneylerinde hacimsel kayıp, sığ kriyojenik işlemde %24 oranında ($0,0019 \text{ mm}^3/\text{m}$), derin kriyojenik işlemde ise %44 oranında ($0,0014 \text{ mm}^3/\text{m}$) azalmıştır. Minimum sürtünme kuvveti DKİ uygulanmış numunelerde elde edilmiştir. En yüksek sürtünme kuvvetleri ise KİG numunelerinde elde edilmiştir.

- Kriyojenik işlemle beraber malzemedeki tane boyutları küçülmüştür. Küçülen tane boyutları optik mikroskopla gözlenmiştir. SEM ve EDX analizlerine göre mikroyapıda herhangi bir faz değişimi oluşmadığı belirlenmiştir.
- Mikroyapı incelemelerinde, Hastelloy C-22 süper alaşım numunelerinde, SKİ uygulanması sonucu oluşan tane boyutlarının, KİG numuneye göre daha küçük olduğu, DKİ uygulanmış numunelerin tane boyutlarının ise SKİ uygulanmış numuneden daha küçük olduğu tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Abdullah, T.K., Petitjean, C., Panteix, P.J., Rapin, C., Vilasi, M., Hussain Z., ve Rahim, AA., 2013, "Dissolution Equilibrium of Chromium Oxide in a Soda Lime Silicate Melt Exposed to Oxidizing and Reducing Atmospheres", *Materials Chemistry and Physics*, Cilt 142, Sayı 2-3, ss. 572-79.
- Abu Kassim S., Thor, JA., Abu Seman, A., ve Abdullah TK., 2020, "High Temperature Corrosion of Hastelloy C22 in Molten Alkali Salts: The Effect of Pre-Oxidation Treatment", *Corrosion Science*, Cilt 173, ss. 108761.
- Akhbarizadeh, A., Shafyei, A., ve Golozar MA., 2009, "Effects of Cryogenic Treatment on Wear Behavior of D6 Tool Steel", *Materials and Design*, Cilt 30, Sayı 8, ss. 3259-3264.
- Baldissera, P., ve Delprete, C., 2008, "Deep Cryogenic Treatment: A Bibliographic Review", *The Open Mechanical Engineering Journal*, Cilt 2, Sayı 1, ss. 1-11.
- Barron, RF., 1982, "Cryogenic Treatment To Improve Wear Resistance of Steel By the 'Cryotough' Process", *Cryogenics*, Cilt 22, Sayı 8, ss. 409-13.
- Barron, RF., ve Mulhern CR., 1980, "Cryogenic Treatment of Aisi-T8 and Ci045 Steels", *Advances In Cryogenic Engineering Materials*, Cilt 26, ss. 171-79.
- Bensely, A., Prabhakaran, A., Mohan Lal, D., ve Nagarajan, G., 2005, "Enhancing the Wear Resistance of Case Carburized Steel (En 353) by Cryogenic Treatment", *Cryogenics*, Cilt 45, Sayı 12, ss. 747-54.
- Candane, D., Alagumurthi, N., ve Palaniradja, K., 2013, "Effect of Cryogenic Treatment on Microstructure and Wear Characteristics of AISI M35 HSS", *International Journal of Materials Science and Applications*, Cilt 2, Sayı 2, ss. 56-65.
- Dixit, Swadesh S., Nimbalkar, SR., ve Kharde, RR., 2013, "Dry Sliding Wear Analysis of D5 Tool Steel at Different Heat Treatments", *The International Journal Of Engineering And Science (IJES)*, Cilt 2, Sayı 5, ss. 16-26.
- Erdoğan, A., 2019, "Investigation of High Temperature Dry Sliding Behavior of Borided H13 Hot Work Tool Steel with Nanoboron Powder", *Surface and Coatings Technology*, Cilt 357, Sayı September 2018, ss. 886-95.
- Firouzdar, V., Nejati, E., ve Khomamizadeh, F., 2008, "Effect of Deep Cryogenic Treatment on Wear Resistance and Tool Life of M2 HSS Drill", *Journal of Materials Processing Technology*, Cilt 206, Sayı 1-3, ss. 467-72.
- Firouzdar, V., Sridharan, K., Cao, G., Anderson, M., ve Allen, TR., 2013, "Corrosion of a Stainless Steel and Nickel-Based Alloys in High Temperature Supercritical Carbon Dioxide Environment", *Corrosion Science*, Cilt 69, ss. 281-91.
- Gül, MS., 2019, Kriyojenik Isıl İşlemin Hastelloy C-22 Süper Alaşımının Aşınma Davranışına Olan Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Hashim, AA., Hammood, AS., ve Hammadi, NJ., 2015, "Evaluation of High-Temperature Oxidation Behavior of Inconel 600 and Hastelloy C-22", *Arabian Journal for Science and Engineering*, Cilt 40, Sayı 9, ss. 2739-46.
- He, X., Xiao, H., Ozaydin, MF., Balzuweit, K., ve Liang, H., 2015, " Low-Temperature Boriding of High-Carbon Steel Xingliang", *Surface and Coatings Technology*, Cilt 263, ss. 21-26.
- He, Y., Yang, J., Chen, S., ve Gao, Z., 2016, "Influence of Simulated Heat-Affected Zone Thermal Cycle Treatment on Mechanical Performances and Microstructural Stability of Ni-17Mo-7Cr Based

- Superalloy", *Vacuum*, Cilt 125, ss. 26–35.
- Kalsi, NS., Sehgal, R., ve Sharma, VS., 2014, "Effect of Tempering after Cryogenic Treatment of Tungsten Carbide-Cobalt Bounded Inserts", *Bulletin of Materials Science*, Cilt 37, Sayı 2, ss. 327–35.
- Khakbaz, F., ve Kazeminezhad, M., 2012, "Work Hardening and Mechanical Properties of Severely Deformed AA3003 by Constrained Groove Pressing", *Journal of Manufacturing Processes*, Cilt 14, Sayı 1, ss. 20–25.
- Kondul, B., ve Çetin MH., 2022, "Increasing The Wear Resistance of Railway Switches With Boron Coating And Analysis of Tribological Performance by ANOVA Method", *Wear*, Cilt 488-489, Sayı Eylül 2021, ss. 204132.
- Kumar, S., Chattopadhyay, K., ve Singh V., 2016, "Effect of Surface Nanostructuring on Corrosion Behavior of Ti-6Al-4V Alloy", *Materials Characterization*, Cilt 121, ss.23–30.
- Leskovšek, V., Kalin, M., ve Vižintin J., 2006, "Influence of Deep-Cryogenic Treatment on Wear Resistance of Vacuum Heat-Treated HSS", *Vacuum*, Cilt 80, Sayı 6, ss. 507–18.
- Maleki, E., ve Unal, O., 2018, "Roles of Surface Coverage Increase and Re-Peening on Properties of AISI 1045 Carbon Steel in Conventional and Severe Shot Peening Processes", *Surfaces and Interfaces*, Cilt 11, Sayı March 2018, ss. 82–90.
- Mohan Lal, D., Renganarayanan, S., ve Kalanidhi A., 2001, "Cryogenic Treatment to Augment Wear Resistance of Tool and Die Steels", *Cryogenics*, Cilt 41, Sayı 3, ss. 149–55.
- Moore, K., ve Collins DN., 1993, "Cryogenic Treatment of Three Heat-Treated Tool Steels", *Key Engineering Materials*, Cilt 86–87, ss. 47–54.
- Patil, PI., ve Tated RG., 2012, "Comparison of Effects of Cryogenic Treatment on Different Types of Steels: A Review", *IJCA Proceedings on International Conference in Computational Intelligence*, Sayı 9, ss. 10–29.
- Podgornik, B., Leskovsek, V., ve Vizintin, J., 2009, "Influence of Deep-Cryogenic Treatment on Tribological Properties of P/M High-Speed Steel", *Materials and Manufacturing Processes*, Cilt 24, Sayı 7-8, ss. 734-738.
- Reitz, W., ve Pendray J., 2001, "Cryoprocessing of Materials: A Review of Current Status", *Materials and Manufacturing Processes*, Cilt 16, Sayı 6, ss. 829–40.
- Senthilkumar, D., ve Rajendran, I., 2011, "Influence of Shallow and Deep Cryogenic Treatment on Tribological Behavior of En 19 Steel", *Cilt 18, Sayı 9*, ss. 53-59.
- Sharma, S., Taiwade, RV., Yadav, A., ve Vashishtha, H., 2019, "Influence of Fillers and Welding Processes on the Microstructural Evolution, Mechanical Properties and Corrosion Behavior of Dissimilar Hastelloy C-22/AISI 321 Joints", *Materials Research Express*, Cilt 6, Sayı 9.
- Slatter, T., Lewis, R., ve Jones AH., 2011, "The Influence of Cryogenic Processing on Wear on the Impact Wear Resistance of Low Carbon Steel and Lamellar Graphite Cast Iron", *Wear*, Cilt 271, Sayı 9–10, ss.1481–89.
- Thakur, D., Ramamoorthy, B., ve Vijayaraghavan, L., 2008, "Influence of Different Post Treatments on Tungsten Carbide-Cobalt Inserts", *Materials Letters*, Cilt 62, Sayı 28, ss. 4403–4406.
- Turan, ME., Sun, Y., ve Akgul, Y., 2018, "Improved Wear Properties of Magnesium Matrix Composite with the Addition of Fullerene Using Semi Powder Metallurgy", *Fullerenes Nanotubes and Carbon Nanostructures*, Cilt 26, Sayı 2, ss. 130–36.
- Vimal, AJ., Bensely, A., Lal, DM., ve Srinivasan, K., 2008, "Deep Cryogenic Treatment Improves Wear Resistance of En 31 Steel", *Materials and Manufacturing Processes*, Cilt 23, Sayı 4, ss. 369–76.
- Zhirafar, S., Rezaeian, A., ve Pugh, M., 2007, "Effect of Cryogenic Treatment on the Mechanical Properties of 4340 Steel", *Journal of Materials Processing Technology*, Cilt 186, Sayı 1–3, ss. 298–303.
- Zhisheng, W., Ping, S., Jinrui, L., ve Shengsun H., 2003, "Effect of Deep Cryogenic Treatment on Electrode Life and Microstructure for Spot Welding Hot Dip Galvanized Steel", *Materials and Design*, Cilt 24, Sayı 8, ss. 687–92.