



IJEASED

INTERNATIONAL JOURNAL OF EASTERN ANATOLIA
SCIENCE ENGINEERING AND DESIGN

Uluslararası Doğu Anadolu Fen Mühendislik ve Tasarım Dergisi

ISSN: 2667-8764 , 2(1), 22-32, 2020

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/ijeased>





Araştırma Makalesi / Research Article

Kriyojenik İşlemin Vanadis 8 Çeliğinin Mekanik Özellikleri ve Mikroyapısı Üzerindeki Etkisi

Dilşad AKGÜMÜŞ GÖK^{1*}, Vedat ÖZTÜRK²

^{1,2} İstanbul Aydın Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, 34295, Türkiye.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process
*Sorumlu Yazar / Corresponding author : dilsadakgumus@aydin.edu.tr  https://orcid.org/0000-0003-3403-3815 , D. Akgümüş Gök  https://orcid.org/0000-0002-6011-5163 , V. Öztürk	Geliş Tarihi / Received Date : 22.01.2020 Revizyon Tarihi / Revision Date : 11.02.2020 Kabul Tarihi / Accepted Date : 12.02.2020 Yayın Tarihi / Published Date : 15.07.2020
Alıntı / Cite : Gök Akgümüş, D., Öztürk, V. (2020). Kriyojenik İşlemin Vanadis 8 Çeliğinin Mekanik Özellikleri ve Mikroyapısı Üzerindeki Etkisi, Uluslararası Doğu Anadolu Fen Mühendislik ve Tasarım Dergisi, 2(1), 22-32.	

Özet

Vanadis 8 soğuk iş takım çeliği endüstride yüksek mekanik özellikleri nedeni ile kesme ve form verme işlemlerindeki uygulamalarda karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışmada; Vanadis 8 soğuk iş takım çeliğine kriyojenik işlem ve geleneksel ısıtma işlemi uygulanmış olup, bu numunelerin mekanik özellikleri ve mikroyapı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Numuneler kriyojenik işlem ile 2°C/dk sabit hızla oda sıcaklığından -196°C'ye soğutulmuş ve bu sıcaklıkta 24 saat boyunca bekletilmiştir. Numunelerin sertlik değerleri Rockwell cinsinden 200 gr yükün altında 10 sn uygulama süresi ile ölçülmüştür. Basma deneyi 100 kN yüklem kapasiteli çekme test cihazında sabit 1 mm/dk basma hızında gerçekleştirilmiştir. Numunelere ait mikroyapılar SEM görüntüleri elde edilerek değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar incelendiğinde, kriyojenik işlem uygulanan numunenin sertlik ve basma dayanımı değerlerinde artış gözlenmiştir. Kriyojenik işlem sonrası mikroyapıda martenzit fazı, kalıntı östenit fazı, vanadyum ve krom esaslı karbürler belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kriyojenik İşlem, Soğuk İş Takım Çelikleri, Mekanik Özellikler, Mikroyapı, Vanadis 8.

The Influence of Cryogenic Treatment on Mechanical Properties and Microstructures of Vanadis 8 Steel

Abstract

Due to its high mechanical properties, Vanadis 8 cold work tool steel is used to cutting and forming applications in industry. In this study; Vanadis 8 cold work tool steel was subjected to cryogenic treatment and conventional heat treatment, and the effects of these samples on mechanical properties and microstructure were investigated. The samples

were cooled by cryogenic treatment at a constant rate of 2°C/min from room temperature to -140°C and kept at this temperature for 24 hours. The hardness values of the samples were measured in Rockwell under 200 g load with a 10 second application time. Compression test was carried out on a tensile tester with a loading capacity of 100 kN at a constant delivery speed of 1 mm/min. The microstructures of the samples were evaluated by obtaining SEM images. When the experimental results were examined, hardness and the compressive strength values of the cryogenic sample were increased. After cryogenic treatment, martensite phase, residual austenite phase, vanadium and chromium based carbides were determined in microstructure.

Keywords: Cryogenic Treatment, Cold Work Tool Steels, Mechanical Properties, Microstructure, Vanadis 8.

1. Giriş

Günümüzde teknolojinin hızla gelişmesi ile birlikte farklı yöntemlere ve malzemelere duyulan ihtiyaç artmaktadır. Kriyojenik işlem günümüzde hızla yükselen bir ısıl işlem türüdür. Bu işlem türü sıfırlatıl işlem olarak da adlandırılmaktadır. Kriyojenik kelimesi soğuk anlamında olan Yunanca “kryos”dan gelmektedir. Bu ısıl işlem türü daha çok kesici takımlara uygulanmakla beraber, çoğu kesici takım malzemelerinin takım ömrünü uzattığı bilinmektedir.

Takım çelikleri, çeliklerin sınıflandırılması doğrultusunda farklı bir grubu oluşturmaktadır. Bunun nedeni diğer çeliklere göre çalışma şartlarının farklı olmasıdır. Bu gruptaki çeliklerin ağır çalışma şartlarında kullanılması beklenmektedir. Bu takım çeliklerinden, düşük veya yüksek sıcaklıklardaki kullanımları sırasında, yüksek hızlarda ve yüksek gerilmelerde sürekli aynı performansı göstermeleri istenmektedir. Çalışma koşullarından ötürü ortaya çıkan bu özellikler, karbonun yanı sıra bileşiminde bulunan alaşım elementleri ile de sağlanır. Bu çeliklere üstün özellikler kazandıran başlıca alaşım elementleri; krom, molibden, vanadyum, volfram ve kobalttır.

Kriyojenik işlem bir defa yapılan ve kalıcı etki veren bir uygulamadır. Geçmişte yapılan çalışmaların yüksek aşınma ve darbeye maruz kalan takım çeliklerinin performansını olumlu yönde etkilediğini göstermiştir. Kriyojenik işlem; temperleme işleminden sonra -50°C ile -196°C arasında malzemenin sıvı veya gaz ortamında belirli süre veya süreler boyunca bekletilmesi esasına dayanan bir ısıl işlem türüdür (Arslan ve ark., 2011). Kriyojenik işlemde malzemeler su verme sonrası kriyojenik sıcaklıklara kademeli bir şekilde soğutulmakta, bu sıcaklıklarda belirli bir miktar bekletildikten sonra tekrar oda sıcaklığına kademeli olarak ısıtılmaktadır. Bu sayede takımların ömrü, aşınma dayanımı, tokluk değerleri, yorulma ve çekme dayanımları gibi mekanik ve fiziksel özelliklerinde iyileştirmeler sağlanmaktadır (Amini ve ark., 2014; Das ve ark., 2010).

Kriyojenik işlemin ana amacı; olumsuz etkileri en aza indirgeyerek, malzemenin mikro yapısında kalıcı değişiklikler meydana getirerek, malzemede istenen özelliklerin elde edilmesini sağlamaktır. Düşük sıcaklıkların ve bu sıcaklıklarda bekletme sürelerinin etkisiyle kriyojenik işlem

demir-karbon alaşımların ve yüksek alaşımlı çeliklerde ısıl işlem sonrası mikroyapıda kalan ve yumuşak faz olan östenitin, sert faz olan martenzite dönüşmesini sağlamaktadır (Akhbarizadeh ve ark., 2009). Bunun dışına kriyojenik işlem ile temperleme işlemi sonrası ikincil sert karbür yapılarının çökmesini sağlamaktadır. Mikroyapıdaki bu değişimlerin, malzemelerin sertlik ve aşınma dirençlerinde artışa sebep olduğu bilinmektedir (Sobotova ve ark., 2016). Sertlik ve aşınma direncinin dışında malzemelerin tokluk, kalıntı gerilme ve yorulma ömründe de olumlu etkiler gösterdiğine dair bilgiler literatürde yer almaktadır (Durica ve ark., 2010; Yan ve Li, 2013).

Sağladığı üstün mekanik ve fiziksel özellikler nedeniyle kriyojenik işlem günümüzde oldukça merak edilen bir çalışma konusu olmuş ve farklı malzemelere olan etkilerini incelemek amacıyla birçok çalışma yapılmaktadır. Akhbarizadeh ve ark., (2009) kriyojenik işlemin D6 takım çeliğinin aşınma davranışı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Elde ettikleri veriler doğrultusunda kriyojenik işlem uygulamasının ve bekleme süresindeki artışın kalıntı östenit faz yapısını azalttığını ve böylece sertliği ve aşınma direncini iyileştirdiği görüşünde bulunmuşlardır. Sri Siva ve ark., (2012) kriyojenik işlemin AISI 52100 çeliğinin aşınma dayanımını iyileştirmesine yönelik bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışma ile kriyojenik işlem uygulanan rulman çeliğinin aşınma direnci, sertlik ve mikroyapısında iyileşmeler olduğunu ileri sürmüşlerdir. Dixit ve ark., (2013) yaptıkları çalışmada kriyojenik işlem görmüş ve görmemiş AISI D5 çeliğinin aşınma dayanımını ve sertlik değerini incelemiştir. Elde edilen bulguları; kriyojenik işlemin kalıntı östeniti azaltması ve buna bağlı olarak aşınma dayanımını ve sertlik değerlerini artırması şeklinde yorumlamışlardır. Yan ve Li, (2013) W9Mo3Cr4V yüksek hız çeliğine uygulanan kriyojenik işlemin aşınma dayanımı, mekanik özellikler ve mikroyapı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Kriyojenik işlemin etkisi ile çeliğin aşınma dayanımında ve sertlik değerlerinde meydana gelen artışlar kalıntı östenit fazının martenzite dönüşmesi ve homojen ikincil karbür çökmesi şeklinde yorumlanmıştır. Li ve ark., (2016) kriyojenik işlemin yüksek vanadyum alaşımlı çeliğin sertlik, darbe dayanımı ve aşınma direnci üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Kriyojenik bekleme süresinin artması ile çeliğin darbe dayanımının ve aşınma direncinin daha da arttığını, sertlik değeri ise giderek azaldığını tespit etmişlerdir. Durica ve ark., (2018) çalışmalarında -140°C’de ve farklı bekleme sürelerinde (12, 24 ve 36 saat) kriyojenik işleme tabi tutulmuş olan Cr-V içerikli ledeburitik takım çeliğinin mikroyapısını, faz yapısını ve sertlik değerlerini incelemiştir. Kriyojenik işlemin östenit miktarını yaklaşık olarak %85 oranında azalttığını ve küçük, küresel karbür yapıları oluşturduğunu gözlemlemiştir.

Daha önceki çalışmalar incelendiğinde kriyojenik işlemin yüksek vanadyum oranına sahip çelikler üzerindeki etkisine dair pek çalışma yapılmadığı ve yapılan çalışmalarda da net sonuçlar elde edilmediği görülmüştür. Gerçekleştirilen çalışma ile bu alanda netlik sağlamak hedeflenmiştir.

Çalışma kapsamında son yıllarda yaygınlaşmaya başlayan kriyojenik ısıl işlem uygulaması Vanadis 8 takım çeliğine uygulanmıştır. Bu çeliğe sertlik ve basma deneyi uygulanmış olup sonrasında mikroyapı görüntüleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçların geleneksel ısıl işlem yöntemi sonuçları ile kıyaslaması yapılmıştır.

2. Materyal ve Metot

Çalışma kapsamında vanadyum alaşımli patentli Vanadis 8 takım çeliği kullanılmıştır. Malzemeye ait kimyasal bileşim Tablo 1’de gösterilmiştir. Bu kimyasal bileşim çalışma kapsamında kullanılan çeliklerin temin edildiği Uddeholm üretici firması tarafından gerçekleştirilen spektral analiz ile belirlenmiştir.

Tablo 1. Vanadis 8 Kimyasal Bileşen İçeriği (URL-1, 2020)

C	Si	Mn	Cr	Mo	V
2.3	0.4	0.4	4.8	3.6	8.0

Sertlik, basma deneyleri ve SEM görüntü analizlerinde kullanılmak üzere 5 mm çapında ve 20 mm boyutlarında her bir ısıl işlem parametresi için 3’er adet olmak üzere toplamda 6 adet numune oluşturulmuştur.



Şekil 1. Deney numunesi

İlk numune grubu sadece geleneksel işlem (Gİ); su verme ve temperleme işlemi görmüştür. Diğer grup numuneleri ise su verme ve temperleme işlemleri arasında 24 saat boyunca kriyojenik işlem (Kİ24) şartları altında bekletilmiştir.

Tablo 2. Numune Kodlamaları

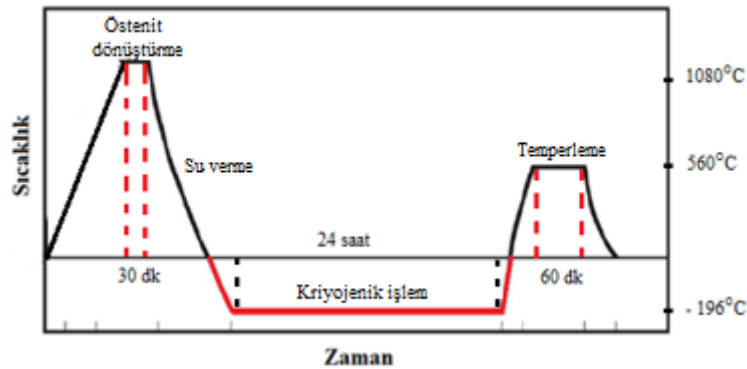
Numune Adı	Isıl İşlem
1.Numune (Gİ)	Su verme + Temperleme
2.Numune (Kİ24)	Su verme + 24 saat kriyojenik + Temperleme

Numunelere öncelikle 1080°C’de 30 dakika olmak üzere östenitleme işlemi yapılmıştır. Sonrasında her iki numune grubu da basınçlı hava yardımı ile soğutulurak sertleştirme işlemine tabi tutulmuştur. Sertleştirme sonrasında 1.numune grubuna 560°C’de 1 saat boyunca temperleme ısıl işlemi uygulanmıştır. Sertleştirme sonrasında 2.numune grubuna 24 saat boyunca -196°C’de kriyojenik ısıl işlem uygulanmıştır.



Şekil 2. Kriyojenik işlemin gerçekleştirildiği azot tankı

24 saatin sonunda geleneksel ısıl işlem temperleme parametrelerinde numune temperlenmiştir. Isıl işlem parametrelerini gösteren grafik Şekil 3’de gösterilmiştir.



Şekil 3. Isıl işlem deney parametreleri

Numunelere bilgisayar kontrollü direkt soğutma metodu ile çalışan bir sistemde kriyojenik işlem uygulanmıştır. Numunelerin sıcaklığı oda sıcaklığından 2°C/dk hızla oda sıcaklığından -196°C’ye indirilmiştir. Bu sıcaklıkta 24 saat bekletilen numuneler yine 2°C/dk hızla oda sıcaklığına

çıkması sağlanmıştır. Numunelerin istenmeyen gerilmeleri barındırmaması için soğutma ve ısıtma işlemleri kademeli olarak gerçekleştirilmiştir.

Geleneksel ve kriyojenik ısıtma işlemi görmüş numunelerin mekanik özelliklerini belirlemek amacı ile numunelere sertlik ve basma deneyleri uygulanmıştır. Sertlik deneyi Future Tech FM-700 marka mikro sertlik cihazında ve Rockwell testi C skalasında 200 gr yükün altında 10 sn uygulama süresi ile gerçekleştirilmiştir. Her bir numune için 5 sertlik testi yapılmış ve bu değerlerin ortalaması alınmıştır. Basma deneyi, 100 kN yükleme kapasiteli çekme test cihazında, sabit 1 mm/dk basma hızında gerçekleştirilmiştir.

Mikroyapı analizi öncesinde numunelerin zımparalama ve parlatma işlemleri yapılmış ve %2'lik nital çözeltisi ile dağlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Sonrasında tüm deney numunelerine ait x50.000 büyütmede SEM görüntüleri alınmıştır. Alınan SEM görüntüleri Hitachi/Regulus 8230 marka/model taramalı elektron mikroskopunda incelenmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

Gİ ve Kİ24 numunelerinin mekanik özelliklerini belirlemek amacı ile numunelere öncelikle sertlik deneyi uygulanmıştır. Numunelere ait sertlik değerleri Tablo 3'de gösterilmektedir.

Tablo 3. Sertlik Deneyi Sonuçları

Vanadis 8	Sertlik (HRC)
Gİ	63.625
Kİ24	63.975

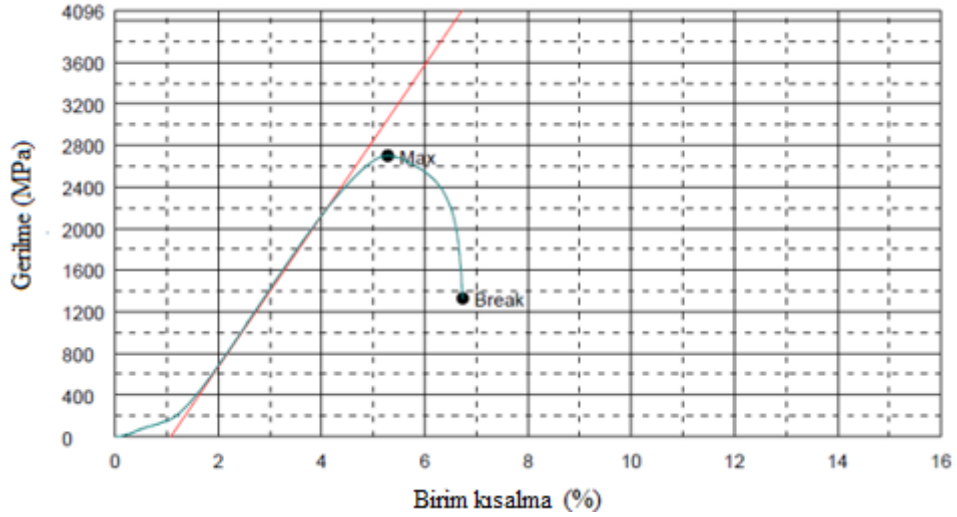
Kİ24 numunelerinin ortalama sertlik değerinin Gİ numunelerinin ortalama sertlik değerlerinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Böylece kriyojenik işlemin sertlik değerlerini arttırdığı belirlenmiştir. Bu durum literatürde yer alan sertlik deneylerinin sonuçları ile desteklenmektedir (Jurci ve ark., 2018).

Mekanik özellikleri değerlendirmek için diğer adım olarak numunelere basma deneyleri uygulanmıştır. Numunelere ait maksimum basma dayanımı, kopma gerilmesi ve birim kısalma değerleri elde edilmiş Tablo 4'de bu sonuçlara yer verilmiştir.

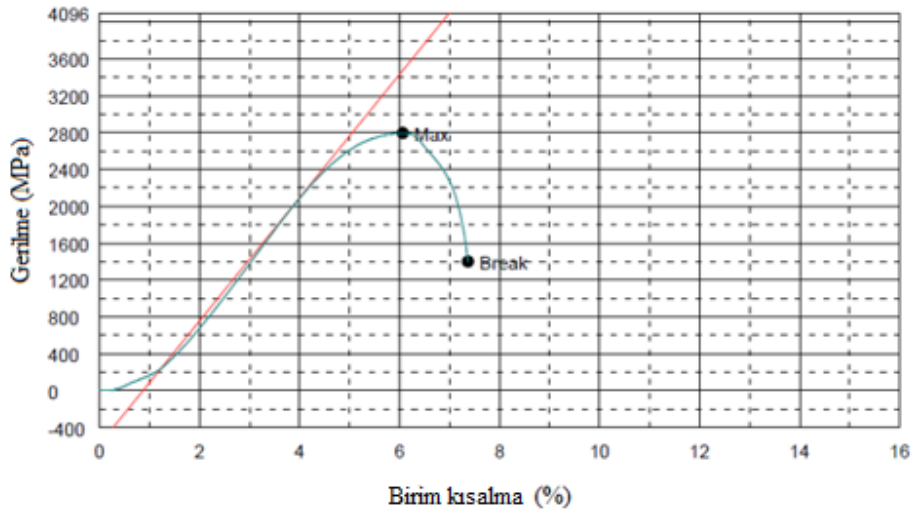
Tablo 4. Basma Deneyi Sonuçları

Vanadis 8	Maksimum Gerilme (MPa)	Kopma Gerilmesi (MPa)	Birim Kısalma (%)
Gİ	2700.52	1328.46	6.74
Kİ24	2793.99	1400.50	7.37

Şekil 4 ve Şekil 5'te numunelere ait gerilme-birim kısalma diyagramları verilmiştir. Gİ numunesinin 2700.52 MPa maksimum gerilme değerine ulaştıktan sonra 1328.46 MPa değerinde koptuğu görülmektedir. Benzer şekilde Kİ24 numunesinin de 2793.99 MPa maksimum gerilme değerine ulaştıktan sonra 1400.50 MPa değerinde koptuğu görülmektedir.



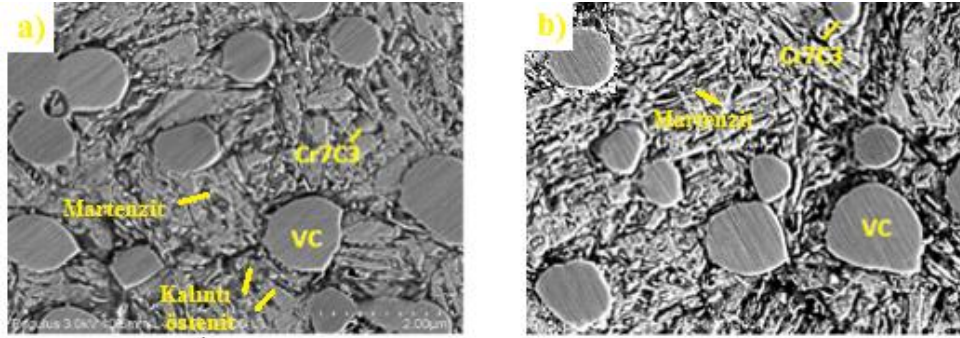
Şekil 4. Gİ numunesine ait gerilme-birim kısalma diyagramı



Şekil 5. Kİ24 numunesine ait gerilme-birim kısalma diyagramı

Gİ ve Kİ24 numuneleri karşılaştırıldığında, kriyojenik işlem görmüş olan Kİ24 numunesinin mekanik özelliklerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Kriyojenik işlemin gerilme değerlerini buna bağlı olarak da dayanımı arttırdığı belirlenmiştir. Aynı şekilde birim uzama miktarında da artış tespit edilmiştir. Bu durum literatürde yer alan kriyojenik işlem çalışmalarına uygun sonuçlar vermektedir (Cicek ve ark., 2015).

Şekil 6'da geleneksel ve kriyojenik ısıl işlem görmüş numunelere ait SEM görüntülerine yer verilmektedir. Şekil 6'da her iki ısıl işlem türüne ait SEM görüntülerinde VC, Cr₇C₃, kalıntı östenit ve martenzit yapılarının olduğu görülmektedir. Kİ24 numunesindeki karbür boyutlarının Gİ numunelerine ait karbür boyutlarından daha iri olduğu ve bunun yapı içerisindeki yüksek vanadyum ve krom alaşımlarının etkisine bağlı olarak gerçekleştiği düşünülmektedir (Li ve ark., 2016). Martenzit fazının kriyojenik işlemin etkisi ile arttığı ve buna bağlı olarak kalıntı östenit miktarının azaldığı söylenebilmektedir. Artan martenzit fazına bağlı olarak malzemenin mekanik özelliklerinde iyileşmelerin gerçekleşmesi beklenmektedir (Perez ve Belzunce, 2015). Sertlik ve basma deneyinden elde edilen sonuçlar bu beklentiye doğrulamaktadır.



Şekil 6. Numunelerin SEM mikroyapıları a) Gİ, b) Kİ24

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada geleneksel ısıl işlem ve kriyojenik ısıl işlem gören Vanadis 8 takım çeliğinin mekanik özellikleri ve mikroyapısı incelenmiştir. Mekanik özellikler sertlik ve basma deneyleri ile mikroyapıda meydana gelen değişiklikler ise SEM analizleri ile değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- 24 saat kriyojenik işleme tabii tutulmuş numunelerin ortalama sertlik değerlerinin geleneksel ısıl işlem görmüş olan numunelerin ortalama sertlik değerlerinden daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

- Sertlik deneyi sonucuna göre kesici takım olarak kullanılacak olan bu çeliklerin kriyojenik işlem ile sertliğin bir miktarda olsa artacağını göstermiştir.
- 24 saat boyunca kriyojenik işlem görmüş olan numunenin gerilme değerlerinin geleneksel ısıtıl işlem görmüş olan numuneye göre daha yüksek sonuçlar verdiği yapılan basma deneylerinde elde edilmiştir.
- Süneklik miktarının yani birim kısalma miktarının da Kİ24 numunesinde daha yüksek olduğu belirlenmiştir.
- Basma deneyi sonuçları kesici takım olarak kullanılacak olan bu çeliklerin kriyojenik işlem görerek daha iyi dayanım değerleri sunduğunu açıkça ortaya koymaktadır.
- SEM mikrografileri incelendiğinde her iki numuneye ait görüntülerde de temperleme işleminin etkisi ile VC ve Cr₇C₃ karbür oluşumları ve östenit fazının martenzite dönüşümü gözlenmiştir.
- Gİ ve Kİ24 numuneleri ait SEM görüntüleri karşılaştırıldığında, 24 saat boyunca kriyojenik işlem görmüş olan Kİ24 numunelerindeki karbür boyutlarının daha iri olduğu ve yapıda daha fazla martenzit fazının olduğu görülmüştür.
- Kİ24 numunesindeki iri karbürlerin, kullanılan takım çeliğinin kimyasal bileşimdeki yüksek alaşım miktarlarından ve karbürlerin birbirleri ile birleşmesine bağlı olarak gerçekleştiği düşünülmektedir.
- Kİ24 numunelerindeki martenzit fazı Gİ numunelerinde elde edilen martenzit fazından daha fazla olarak görülmektedir. Bu durum kalıntı östenit miktarının daha fazla kısmının martenzite dönüşmesi şeklinde açıklanmaktadır.
- Kriyojenik işlem gören numunelerdeki yüksek martenzit fazına bağlı olarak daha iyi mekanik özellikler elde edilmiştir. Bu durum yapılan sertlik ve basma deneyi sonuçları ile desteklenmektedir.

Çalışma kapsamında seçilen malzeme grubuna kriyojenik işlem sonrasında farklı sıcaklıklarda ve sayılarda temperleme uygulayarak temperleme etkisinin mekanik özellikler üzerindeki etkisi araştırılarak çalışma bir üst aşamaya taşınabilir. Buna ek olarak farklı bekleme sürelerinde uygulanan kriyojenik işlemin seçilen malzeme grubu üzerindeki takım ömrü ve aşınma davranışları da incelenebilir.

Teőekkür

Araştırmacılar, bu çalıőmanın 54167746-050.03.04-2018/05 numaralı BAP projesi olarak gerçekleştirilmesini sağlayan İstanbul Aydın Üniversitesi'ne teőekkürlerini sunmaktadır.

Kaynaklar

- Amini, K., Akhbarizadeh A. and Javadpour S., (2014). Investigating the Effect of Quench Environment and Deep Cryogenic Treatment on the Wear Behavior of AZ91, *Materials & Design*, 54, 154-160.
- Akhbarizadeh, A., Shafyei A. and Golozar, M.A., (2009). Effects of Cryogenic Treatment on Wear Behavior of D6 Tool Steel, *Materials & Design*, 30, 3259–3264.
- Arslan, F., Altınoy, D. and Hatman, A., (2011). Characterization of Cryogenic Heat Treated Vanadis 4 PM Cold Work Tool Steel, *Vacuum*, 370-373.
- Arslan, Y., (2014). *Kriyojenik İşlemin AISI D3 Soğuk İő Takım elięinin Performansına Etkilerinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Makine Eęitimi Anabilim Dalı, Ankara.
- Bensely, A., Senthilkumar, D. and Mohan Lal, D., (2007). Effect of Cryogenic Treatment on Tensile Behavior of Case Carburized Steel-815M17, *Materials Characterization*, 58, 485–491.
- Cicek, A., Kara, F. and Kivak, T., (2015). Effects of Deep Cryogenic Treatment on the Wear Resistance and Mechanical Properties of AISI H13 Hot-Work Tool Steel, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 24, 4431-4439.
- Collins, D. N. and Dormer, J., (1997). Deep Cryogenic Treatment of a D2 Cold Work Tool Steel, *Heat Treatment of Metals*, 71–74.
- Das, D., Dutta, A.K. and Ray, K.K., (2010). Sub-zero Treatments of AISI D2 steel: Part I. Microstructure and Hardness, *Materials Science and Engineering: A*, 527, 2182-2193.
- Demir, İ. D. ve Uygur, İ., (2017). Kriyojenik İşlem Uygulanmış Dökme Demir Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, *Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5, 210-219.
- Durica, J., Ptacinova, J. and Hudakova, M., (2010). Microstructure and Hardness of Cold Work Vanadis Steel after Subzero Treatment at -140°C, *Metal*, 1-5.
- Huang, J.Y, Zhu, Y.T. and Liao, XZ, (2003). Microstructure of Cryogenic Treated M2 Tool Steel, *Materials Science and Engineering*, 339(1–2), 241–244.
- Jurci, P., Domankova, M. and Caplovic, L., (2015). Microstructure and Hardness of Sub-zero Treated and No Tempered P/M Vanadis 6 Ledeburitic Tool Steel, *Vacuum*, 111, 92-101.
- Jurci P., DlouhY I. and Priknerova, P., (2018). Effect of Sub-Zero Treatment Temperatures on Hardness, Flexural Strength, and Fracture Toughness of Vanadis 6 Ledeburitic Die Steel, *Metal*, 8:1047, 1-15.
- Kaushal, A., Rajput, RS. and Vardhan, A., (2015). Effects of Cryogenic Treatment on Tool Steel AISI-D6, *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 4(3), 470-473.
- Li, S., Xie, Y. and Wu, X., (2010). Hardness and Toughness Investigations of Deep Cryogenic Treated Cold Work Die Steel, *Cryogenics*, 50(2), 89-92.

- Li, H., Tong, W. and Cui, J., (2016). The Influence of Deep Cryogenic Treatment on the Properties of High-Vanadium Alloy Steel, *Materials Science and Engineering: A*, 662, 356-362.
- Moore, K. and Collins D. N., (1993). Cryogenic Treatment of Three Heat-Treated Tool Steels, *Key Engineering Materials*, 86-87,47-54.
- Nalbant, H., (2018). *Derin Kriyojenik İşlemin AISI 4140 Çeliğinin Aşınma Davranışına Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Eskişehir.
- Perez, M. and Belzunce, F.J., (2015). The Effect of Deep Cryogenic Treatments on the Mechanical Properties of an AISI H13 Steel, *Materials Science and Engineering: A*, 624, 32-40.
- Podgornik, B., Paulina, I. and Zajec, B., (2016). Deep Cryogenic Treatment of Tool Steels, *Journal of Materials Processing Technology*, 229, 398-406.
- Sobotova, J., Jurci, P. and Dlouhy, I., (2016). The Effect of Subzero Treatment on Microstructure, Fracture Toughness, and Wear Resistance of Vanadis 6 Tool Steel, *Materials Science and Engineering: A*, 652, 192-204.
- URL-1, (2020). https://www.uddeholm.com/files/PB_Uddeholm_vanadis_8_english.pdf. Uddeholm. (Erişim Tarihi: 09 Şubat 2020).
- Vahdat, S. E., Nategh, S. and Mirdamadi, S., (2013). Microstructure and Tensile Properties of 45WCrV7 Tool Steel After Deep Cryogenic Treatment, *Materials Science and Engineering: A*, 585, 444-454.
- Yan, X. G. and Li, D. Y., (2013). Effects of the Sub-zero Treatment Condition on Microstructure, Mechanical Behavior and Wear Resistance of W9Mo3Cr4V High Speed Steel, *Wear*, 302(1-2), 854-862.