DERİN KRİYOJENİK İŞLEM UYGULANMIŞ ORTA KARBONLU ALAŞIMLI ÇELİKLERİN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Esad KAYA[1], İsmail BAYAR[2], Koray KILIÇAY[3*]

[1] ESOGÜ, Müh.-Mim. Fak. Makine Müh. Bölümü, ORCID No: https://orcid.org/0000-0002-7332-6154
[2] Batman Üniversitesi, Müh.-Mim. Fak. Makine Müh. Bölümü, ORCID No: https://orcid.org/0000-0002-4187-3911
[3*] ESOGÜ Müh.-Mim. Fak. Makine Müh. Bölümü, ORCID No: http://orcid.org/0000-0003-2025-4991

Anahtar Kelimeler
Su verme
Kriyojenik işlem
Fraktografi
Mikroyapı
Çelik

Öz

Derin kriyojenik işlem, kademeli olarak sıfırın altındaki sıcaklıklara soğutulması, bekletilmesi ve ısıtılması işlemlerini içeren özel bir ısıl işlem sürecidir. Bu çalışmada, ticari orta karbonlu AISI 4140 çeliğinin mikroyapısal ve mekanik davranışları üzerinde kriyojenik işlemin etkileri araştırılmıştır. Çekme testine uygun hazırlanan numuneler 910°C' de ostenitlenmiş ardından yağda su verme (S), yağda su verme-temperleme (ST) işlemleri uygulanmıştır. -196°C'de uygulanan kriyojenik ısıl işlem prosesi, çeliğin geleneksel ısıl işlem prosedürüne eklenmiştir. Derin kriyojenik işleme tabi tutulmuş numuneler (SKT) daha sonra 200°C'de 1 saat temperlenmiştir. Derin kriyojenik işlemin numuneler üzerindeki etkileri çekme testi, sertlik ve mikroyapı açısından değerlendirilmiştir. Sonuçlarda, derin kriyojenik işlem karbürlerin çökelmesi ve sertliğin artması nedeniyle statik tokluk açısından geleneksel ısıl işlem görmüş numunelere kıyasla benzer davranış göstermesini sağlamıştır. Derin kriyojenik işlem uygulamasının temperlenmiş numuneye göre sertliği hafifçe iyileştirdiğini (%10) görülmüştür. Bununla birlikte, derin kriyojenik işlemin karbürlerin çökelmesi sağlaması sonucu sertliğin artması mikroyapısal analizlerden belirlenmiştir. Çekme testi sonuçları karşılaştırıldığında statik tokluğun, rezilyans modülü, akma ve çekme mukavemeti değerleri bazında kriyojenik işlem uygulamasının temperlenmiş duruma kıyasla üstün olduğu tespit edilmiştir.

MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF DEEP CRYOGENICALLY TREATED MEDIUM CARBON ALLOY STEELS

Keywords
Quenching
Cryogenic treatment
Fractography
Microstructure
Steel

Abstract

Deep cryogenic treatment is a special heat treatment process involving gradual cooling to subzero temperatures, holding, and heating. In this study, the effects of cryogenic treatment on the microstructural and mechanical behaviors of commercial medium carbon AISI 4140 steel were investigated. Specimens prepared for tensile testing were austenitized at 910°C and then oil quenching (S), oil quenching-tempering (ST) processes were applied. The cryogenic heat treatment process applied at -196°C was added to the conventional heat treatment procedure of the steel. The deep cryogenic treated specimens (DCT) were then tempered at 200°C for 1 hour. The effects of deep cryogenic treatment on the specimens were evaluated in terms of tensile test, hardness and microstructure. In the results, deep cryogenic treatment provided similar behavior compared to conventional heat treated specimens in terms of static toughness due to the precipitation of carbides and increase in hardness. It was observed that deep cryogenic treatment slightly improved the hardness compared to the tempered specimen (10%). However, the increase in hardness due to deep cryogenic treatment resulting in precipitation of carbides was determined from microstructural analysis. When the tensile test results were compared, it was determined that the cryogenic treatment application was superior to the tempered condition in terms of static toughness, resilience modulus, yield and tensile strength values.

Araştırma Makalesi
Başvuru Tarihi : 02.01.2025
Kabul Tarihi : 24.02.2025

Research Article
Submission Date : 02.01.2025
Accepted Date : 24.02.2025

[*] Sorumlu yazar: kkilicay@ogu.edu.tr
https://doi.org/10.31796/ogummf.1611872

Bu eser, Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.
This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Giriş

Mühendislik uygulamalarında, malzemelerin mekanik özelliklerinin ve dayanıklılığının belirlenmesi, üretim ve tasarım süreçlerinin temel parçasını oluşturur. Bu amaçla, çeşitli ısıl işlemler kullanılarak malzeme özelliklerinin iyileştirilmesi sağlanır. Özellikle düşük alaşımlı çelikler, çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılan, genellikle yüksek mukavemet ve sertlik gerektiren uygulamalarda tercih edilen önemli malzemelerdir (Zhang ve diğ., 2022; Xie ve diğ., 2020). Düşük alaşımlı çeliklerden AISI 4140 çeliği; mekanik özelliklere önemli ölçüde katkıda bulunan ana alaşım elementleri olarak Mo ve Cr içeren, yüksek dayanımlı-düşük alaşımlı bir çeliktir (Ranju ve D, 2024; Dewan, Liang, Wahab ve Okeil, 2014). Uygulama alanı şaftlar, cıvatalar, pimler, bağlantı çubukları, krank milleri, dişliler, rulmanlardır. (Prabhu, Kulkarni ve Sharma, 2020; Singh ve diğ., 2022; Choo, Lee ve Golkovski, 2000). AISI 4140 çeliği belirli kullanım koşullarında daha yüksek performans ve dayanıklılık gereksinimleri ortaya çıkabilir. Bu bağlamda, ısıl işlem, çeliğin mekanik özelliklerini istenilen seviyelere getirmek veya iyileştirmek için yaygın bir yöntemdir.

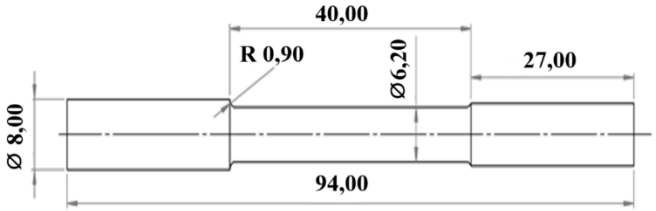
Isıl işlem, uygulamaya bağlı olarak malzemenin mekanik özelliklerinde ilerleme sağlamak için kullanılır. Su verme, ısıl işlem sürecinin genel bir aşaması olup, çelikte östenitten martenzite faz dönüşümünü takiben önceden östenitlenmiş parçanın hızlı bir şekilde soğutulmasını içerir (Sonar, Lomte, Gogte ve Balasubramanian, 2018). AISI 4140 malzemelerinin su verme işleminden sonra ortaya çıkan mikroyapısı martenzit ve kalıntı östenitten oluşmaktadır (Chuaiphan, Srijaroenpramong ve Pinpradub, 2013). Bu da malzemenin daha kırılgan olmasına neden olur.

Tokluğu arttırmak ve kalıntı östenitin içeriğini azalmak için kriyojenik ısıl işlem ve temperleme işlemleri uygulanır (Salunkhe, Fabijanic, Nayak ve Hodgson, 2015). Isıl işlemin etkilerini belirlemek için çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Meysami, Ghasemzadeh, Seyedein ve Aboutalebi (2010) çalışmalarında AISI 4140 çelik malzemelere su verilmiş ve 630°C sıcaklıkta 2 saat süreyle temperlenmiştir. Su verme ve temperleme işlemlerinin numunelerin çekme mukavemeti ve sertleşme kabiliyeti gibi mekanik özelliklerini geliştirmiş ve su verme öncesi çelik sıcaklığı, su sıcaklığı, su verme süresi ve ayrıca malzeme boyutu gibi çeşitli parametrelerden etkilendiğini göstermiştir. Sadece su verilen çubukların çekme mukavemeti, akma gerilmesi ve sertlik değerleri, su verilen ve ardından temperlenen çubuklardan daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Senthilkumar, Rajendran ve Pellizzari (2011) kriyojenik işlemin AISI 4140 çeliğinin sertlik ve çekme davranışı üzerindeki etkisini incelemiş ve ısıl işlem görmüş numune ile karşılaştırmışlardır. Isıl işlem görmüş çeliğe kıyasla sığ ve derin kriyojenik işlem görmüş numunelerin sertliğinin daha yüksek olduğu ve çekme mukavemetinin ise daha düşük olduğu belirtilmiştir. Bu durumun kalıntı östenitin martenzite dönüşümünden kaynaklandığı açıklanmıştır. Jamali, Khan, Chandio, Anwer ve Jokhio (2019) çalışmalarında derin kriyojenik ve temperleme işlemin AISI 4340 ve AISI 4140'ın mekanik özelliklerine etkisi incelemiştir. Deneysel sonuçlara göre temperleme işlemi ile birlikte kriyojenik işlemden sonra çekme mukavemetinin, darbe tokluğunun ve sertliğin kolayca artırılabileceği belirtilmiştir.

Bu çalışma, 4140 çeliği üzerindeki mekanik özelliklerin geliştirilmesine odaklanarak su verme, su verme işleminin ardından uygulanan temperleme ve kriyojenik işlemlerinin etkilerini araştırmayı amaçlamaktadır. AISI 4140 kalite çelik numunesine sırasıyla 910°C'de östenitleme, ardından su verme, 200°C'de 1 saat temperleme ve -196°C'de 24 saat derin kriyojenik işlemleri uygulanmıştır. Mekanik özelliklerin belirlenmesi için çekme testi, mikroyapısal analizler ve sertlik ölçümleri yapılmış, ve SEM görüntüleri ile mikroyapısı incelenmiştir.

2. Yöntem

Şekil 1, deneylerde kullanılan talaşlı imalat ile üretilen standart çekme numunesinin teknik resimlerini göstermektedir. Tüm numuneler şekil 1'deki teknik resime uygun olarak normalize edilmiş AISI 4140 çeliğinden tornalama yöntemi ile imal edilmiştir. Boyutlar ASTM E8/E8M standartlarına uygun olarak belirlenmiştir.



Şekil 1. Standart çekme numunesinin teknik resmi

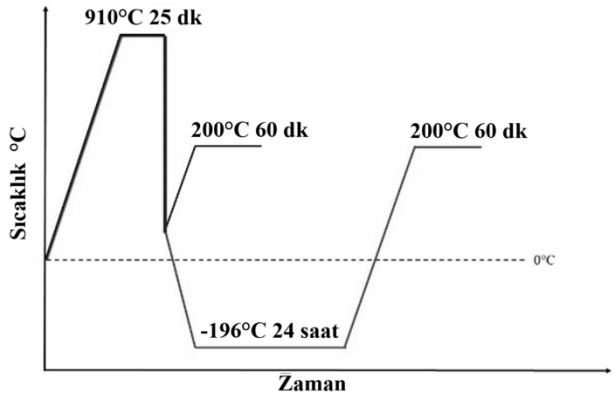
Tablo 1, deneysel süreçlerde kullanılan kontrollü grupları göstermektedir. Toplamda üç adet numune grubu tasarlanmıştır. Bu numune grupları; yalın su verme (S), su verilip temperlenmiş (ST), su verilmiş-kriyojenik işlem uygulanıp temperlenmedir (SKT). Numuneler, 910°C'de 25 dakika ostenitlenmiştir. Süre, numunelerdeki tüm kesit aynı sıcaklığa gelecek şekilde seçilmiştir. Temperleme sıcaklığı olarak literatür gözönüne alınarak 200°C olarak seçilmiştir. Temperleme süresi olarak 1 saat seçilmiştir. Kriyojenik ısıl işlemler MMD firmasına ait, bilgisayar kontrollü kriyojenik ısıl işlem fırınında yapılmıştır. Tüm numuneler 1°C/dk sıcaklık oranı ile soğutulmuştur. Numuneler 24 saat boyunca -196°C'de bekletilmiştir. Tüm numunelerin benzer oranla oda sıcaklığına gelmesi

sağlanmıştır. Kriyojenik ısıl işlemi takiben temperleme işlemi uygulanmıştır.

Tablo 1. Deneylerde kullanılan numune grupları

Kod	İşlemler
S	910°C'de 25 dakika ostenitleme ve yağ ortamında su verme
ST	910°C'de 25 dakika ostenitleme, yağ ortamında su verme ve 200°C'de 1 saat temperleme
SKT	910°C'de 25 dakika ostenitleme, yağ ortamında su verme, -196°C 'de derin kriyojenik işlem ve 200°C'de 1 saat temperleme

Şekil 2, çalışmada uygulanan ısıl işlem prosedürünün sıcaklık ve zamana bağlı değişimini göstermektedir. Tüm numunelere öncesinde 910°C'de 25 dakika ostenitleme işlemi uygulanmış sonrasında yağ ortamında su verilmiştir. Bir grup numuneye -196°C 'de kriyojenik işlem ve 200°C'de 1 saat temperleme işlemi uygulanmıştır. Diğer grup numuneye ise 910°C'de 25 dakika ostenitleme ve yağ ortamında su verme ve 200°C'de 1 saat temperleme işlemi uygulanmıştır.



Şekil 2. Isıl işlemlerin sıcaklık ve zamana bağlı değişimi

Deneysel çalışmanın daha iyi ifade edilebilmesi için numune isimlendirilmesi yapılmıştır. Yapılan numune isimlendirilmesi Tablo 2' de gösterilmiştir.

Tablo 2. Deneysel çalışmalarda kullanılan isimlendirme

Kısaltma	İşlemler
S	Sadece su verme
ST	Su verme + temperleme
SKT	Su verme, kriyojenik işlem + temperleme

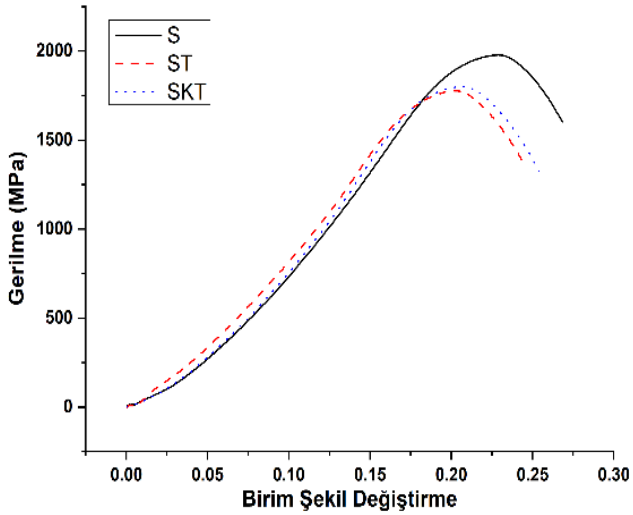
Çekme testleri, 250 kN yük hücresi ile Shimadzu universal test cihazında 1 mm/dak hızında gerçekleştirilmiştir. Her bir parametre için testler üç kez tekrarlanmış, sonuçlar ortalama değerler olarak verilmiştir. Numunelere sertlik ölçümleri ve metalografik incelemeleri için Struers MD piano 220 ve 600 grit manyetik disklerde zımparalanma işlemi uygulanmıştır, devamında ise 3 µm elmas solüsyon kullanılarak numune yüzeyleri parlatılmıştır. %2 nital solüsyonu kullanılarak yüzeylere dağlama işlemi uygulanmıştır. Numunelerin mikroyapıları optik mikroskopta (Nikon Clemex) ve kırık kesit analizleri taramalı elektron mikroskobunda (SEM, JEOL JSM-5600LV) incelenmiştir. Numunelerin sertlik ölçümleri ASTM E18'e uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Numunelerin sertlik ölçümleri, numunelerin yüzeyinde Futuretech mikrosertlik ölçüm cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sertlik testleri tüm numuneler için 300 gf yük altında ve 10 saniye bekletme süresinde gerçekleştirilmiştir. Tüm numuneler için üç ölçüm yapılmıştır ve sertlik sonucu için ortalama sonuçlar kullanılmıştır. Bu çalışmada, araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

3. Bulgular

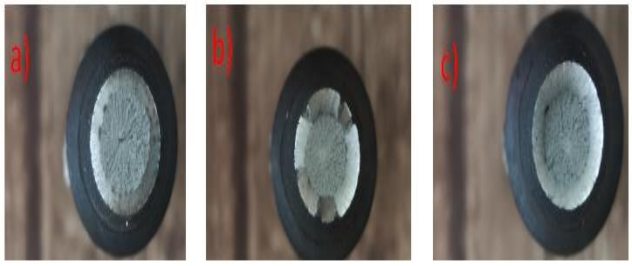
Numunelerin gerilme-gerinim grafiği Şekil 3'de gösterilmiştir. Numuneler sünek olarak kırılmıştır ve belirgin bir akma göstermemiştir. Karşılaştırma için numunelerin %0,2 akma dayanımı (σ_{ak}) nihai çekme dayanımı (σ_{maks}) ve süneklikdeki değişim uzama ve alan daralması hesaplanmıştır. σ_{max} değerleri büyükten küçüğe S, SKT ve ST olarak elde edilmiştir. S numunesinin çekme dayanımı 1976±19.2 MPa, uzama miktarı %23.6 mm olarak belirlenmiştir. ST ve SKT numunelerinin σ_{max} değerleri sırasıyla 1673±12.3 MPa ve 1802±11.4 MPa olarak belirlenmiştir. Kriyojenik işlem-temperlerme işleminin çekme dayanımı yaklaşık 129 MPa arttırdığı görülmüştür. Benzer şekilde %0.2 akma dayanımları da büyükten küçüğe doğru S, SKT ve ST olarak belirlenmiştir. En yüksek değerin su verilen numunede olması beklenen bir sonuçtur. Sıcaklığın östenitleme sıcaklığından ani bir şekilde oda sıcaklığına düşmesi numunede martenzit yapı oluşmuştur ve bu durum çekme dayanımını yükseltmiştir. Su verme işleminin ardından temperleme işlemi uygulandığında çekme dayanımı düşmüştür. Temperleme ısıl işlemi ile martenzit içerisindeki ince karbür parçacıklarının büyümesi ve homojen dağılımının etkisiyle bu düşüş gerçekleşmiştir. SKT numunesinde ise kriyojenik işlem ile su verme sırasında oluşan kalıntı östenitler martenzite dönüşmüştür ve ardından temperleme işlemi uygulanmıştır. Burada kalıntı östenitlerin martenzite dönüşmesi ile SKT numunelerinin çekme dayanımı ST numunelerine göre bir miktar artmıştır.

Çekme testi uygulanan numunelerin kırık kesitlerinin makro fotoğrafları Şekil 4' de görülmektedir. Makro incelemeler ile yalın su verilmiş numunede (S) chevron tipi gevrek kırılma belirtileri tespit edilmiştir. Temperlenmiş ve kriyojenik işlem-temperleme uygulanmış numunelerde ise bu oluşumlar görülmemektedir. Ayrıca bu numunelerde belirgin koni

çanak oluşumları olduğu görülmektedir. Bu durum uygulanan ısıl işlemlerin statik tokluk özelliğini iyileştirdiğini bir göstergesidir. Elde edilen makro gözlemler gerilme gerinim eğrisi sonuçları ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir.



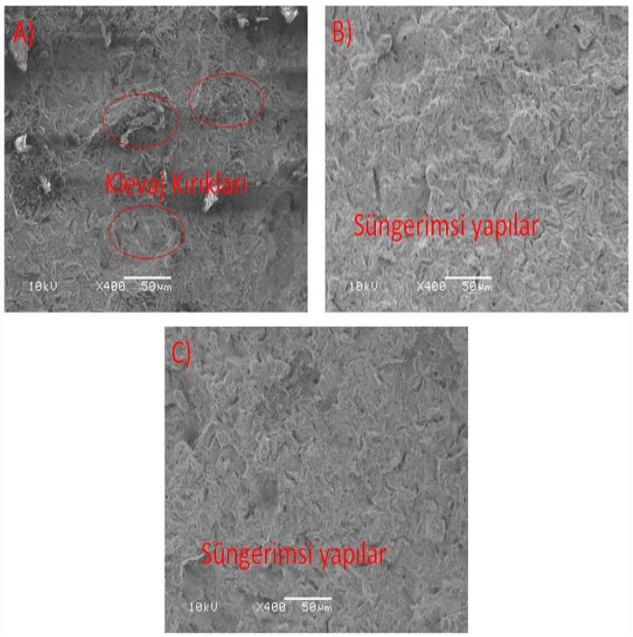
Şekil 3. Isıl işlem uygulanan numunelerin gerilme-gerinim eğrileri



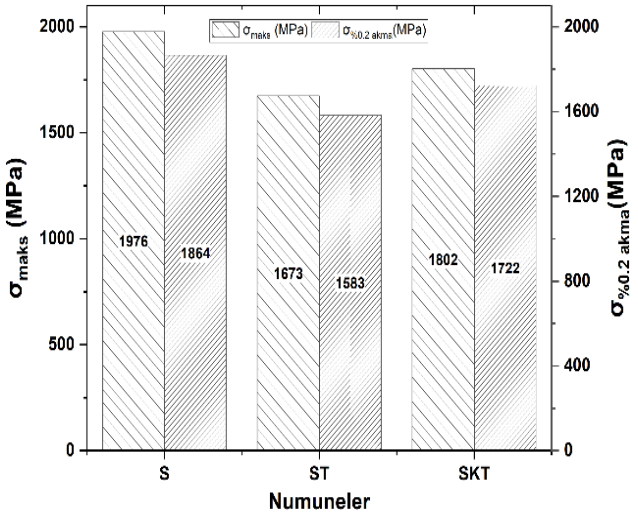
Şekil 4. Numunelerin kırık kesitlerinin makro görüntüsü: a)S, b)SK, c)SKT

Kırılma mekanizmaları daha etkin belirlenmesi açısından, numuneler ayrıca taramalı elektron mikroskobu altında da incelenmiştir. Şekil 5, numunelerin kırık kesitlerinin SEM görüntülerini göstermektedir. Tüm görüntüler bir bütün olarak değerlendirildiğinde yalın su verilmiş numunede (S) belirgin klevaj oluşumları görülmektedir. Bu durum bir gevreklik göstergesidir. Temperlenmiş ve kriyojenik işlem uygulanmış numunelerde ise süngerimsi yapılar görülmektedir. Bu durum kırılmanın sünek karakterli olduğunu göstermektedir.

Şekil 6, numunelerin hesaplanan çekme ve akma mukavemeti değerlerini göstermektedir. Tahmin edileceği üzere en yüksek dayanım yalın su verilmiş numunede elde edilmiştir. Temperleme işlemi uygulanmış numunelerde, dayanımın bir miktar düştüğü gözlemlenmiştir. Sertlik açısından değerlendirildiğinde, kriyojenik işlemin ve temperleme prosesinin beraber uygulanması yalın temperleme işlemi uygulandığı duruma göre daha etkilidir.

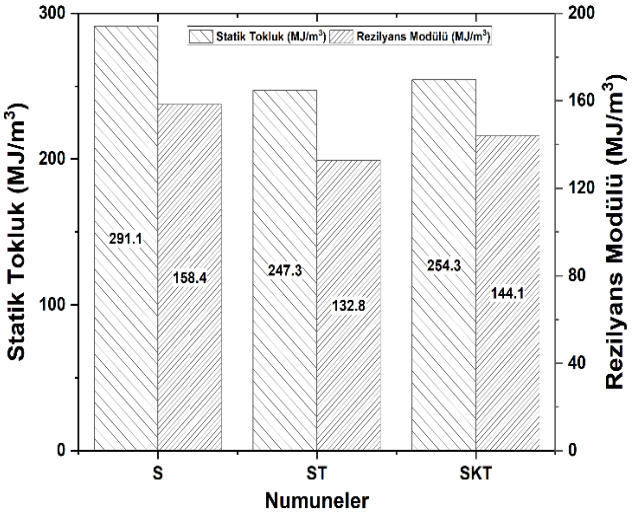


Şekil 5. Numunelerin kırık kesitlerinin SEM görüntüsü, a)S, b)SK, c)SKT



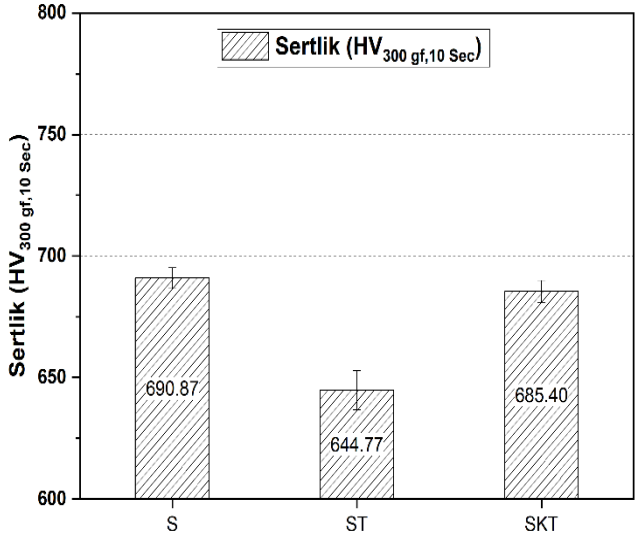
Şekil 6. Hesaplanan çekme ve akma mukavemeti değerleri

Şekil 7, numunelerde hesaplanan statik tokluk ve rezilyans modülü değerlerini göstermektedir. Kriyojenik işlemin temperleme prosesine ilave edilmesiyle statik toklukta artma tespit edilmiştir. Benzer şekilde rezilyans modülünde de bir miktar artış belirlenmiştir. Genel anlamda oluşan bu iyileşmelerin kriyojenik işlem uygulanması sonucu, yapıdaki kalıntı ostenit martenzit dönüşümü ve alaşım elementlerinin boştaki karbon ile ikincil karbürler oluşturması ile sağlandığı düşünülmektedir.



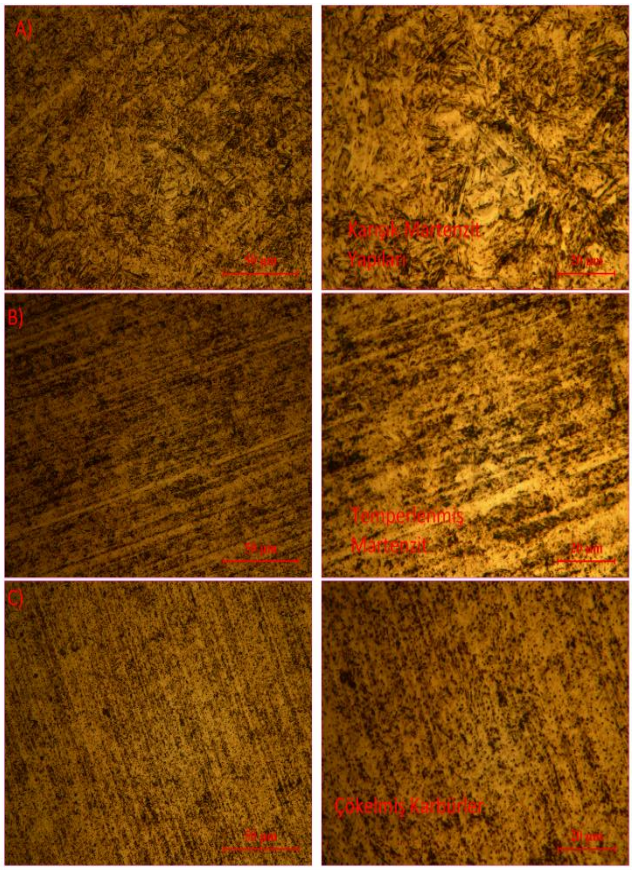
Şekil 7. Çekme testi sonucu numunelerde hesaplanan statik tokluk ve rezilyans modülü değerleri

Şekil 8, numunelere uygulanan sertlik testlerinin sonuçlarının göstermektedir. Sertlik testleri ortalama değer olarak raporlanmış ve her bir numune grubu için sapmalar ifade edilmiştir. ST numunesinde temperlenme ısıl işlemin etkisi ile sertlik değerlerinde bir miktar azalma gözlemlenmiştir. Ancak SKT numunesinde uygulanan derin kriyojenik işlemin etkisi ile sertlik değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Bu durumun ostenitin martensite dönüşümüne ve alaşım elementleriyle ikincil karbürlerin çökelmesiyle açıklanabilmektedir.



Şekil 8. Numunelerde ölçülen sertlik değerleri

Şekil 9'da, numunelerin farklı büyütmelerdeki optik mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Yalın su verilmiş numunenin mikroyapısının karışık formda martenzit fazdan oluştuğu görülmektedir. Su verilmiş temperlenmiş durumda ise martenzitik yapının bir miktar azaldığı görülmektedir. Oluşan yapı klasik temperlenmiş martenzit yapısı olduğu düşünülmektedir. Kriyojenik işlemin ilave edildiği durumda ise yapı içerisinde küçük siyah noktacıklar görülmektedir. Bu yapının kriyojenik işlem sonrası oluşan kalıntı ostenitten dışarı atılan karbon atomlarının oluşturduğu ikincil karbürler olduğu düşünülmektedir. Bu yapının dislokasyon hareketini bloke ettiği düşünülmektedir. Bu nedenle mekanik özelliklerdeki iyileşmelerin temelini oluşturmaktadır.



Şekil 9. Numunelerin optik mikroyapısı, a)S, b)SK, c)SKT

6. Sonuçlar

AISI 4140 kalite çelik numunelere, su verme, temperleme ve derin kriyojenik işlemlerini içeren üç adet ısıl işlem başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Bu çalışma ile, numunelerin mikroyapısal ve mekanik özellikleri farklı ısıl işlem koşulları altında belirlenmiştir. Elde edilen deneyler sonuçlar aşağıdaki özetlenmiştir.

- Uygulanan derin kriyojenik işlem ile martenzit ve farklı karbür formları oluştuğu tespit edilmiştir. Temperlenmiş numunede temperlenmiş martenzit formu, yalın su verilmiş numunede ise karışık martenzit yapısı görülmüştür.
- Kriyojenik ısıl işlemin uygulanması ile sertlik değerlerinde yaklaşık %10 artış gözlemlenmiştir.

Sertlikteki iyileşme, ostenitin martensite dönüşümüne ve daha ince karbür dağılımının çökelmesi nedenli olduğu değerlendirilmektedir.

- Kriyojenik ısıl işlem temperlerme işlemine göre kıyaslandığında akma mukavemeti, çekme mukavemeti, statik tokluk ve rezilyans modülünde yaklaşık %10 oranında iyileşme sağlamıştır.

Araştırmacıların Katkısı

Bu araştırmada; Esad KAYA, deney tasarımı, makalenin oluşturulması; İsmail BAYAR, bilimsel yayın araştırması, deney uygulamaları; Koray KILIÇAY, deneysel sonuçların yorumlanması konularında katkı sağlamışlardır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

Choo, S.-H., S. Lee, ve M. G. Golkovski. 2000. Effects of accelerated electron beam irradiation on surface hardening and fatigue properties in an AISI 4140 steel used for automotive crankshaft, *Materials Science and Engineering: A*, 293(1), 56-70. doi: https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)01207-7

Chuaiphan, W., L. Srijaroenpramong, ve D. Pinpradub. 2013. The Effects of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of AISI 4140 for Base Cutter Cane Harvester, *Advanced Materials Research*, 774-776(1059-67. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.774-776.1059

Dewan, M. W., J. Liang, M. A. Wahab, ve A. M. Okeil. 2014. Effect of post-weld heat treatment and electrolytic plasma processing on tungsten inert gas welded AISI 4140 alloy steel, *Materials & Design (1980-2015)*, 54(6-13. doi: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.08.035

Jamali, A. R., W. Khan, A. D. Chandio, Z. Anwer, ve M. H. Jokhio. 2019. Effect of cryogenic treatment on mechanical properties of AISI 4340 and AISI 4140 steel, *Mehran University Research Journal Of Engineering & Technology*, 38(3), 755-66. doi:

Meysami, A. H., R. Ghasemzadeh, S. H. Seyedein, ve M. R. Aboutalebi. 2010. An investigation on the microstructure and mechanical properties of direct-quenched and tempered AISI 4140 steel, *Materials & Design*, 31(3), 1570-75. doi: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.09.040

Prabhu, P. R., S. M. Kulkarni, ve S. Sharma. 2020. Multi-response optimization of the turn-assisted deep cold rolling process parameters for enhanced surface characteristics and residual stress of AISI 4140 steel shafts, *Journal of Materials Research and Technology*, 9(5), 11402-23. doi: https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.08.025

Ranju, M. R., ve K. D. 2024. Effect of nano-graphene as an additive for the improved rolling contact fatigue life of through hardened AISI 4140 alloy steel, *Tribology International*, 192(109249. doi: https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.109249

Salunkhe, S., D. Fabijanic, J. Nayak, ve P. Hodgson. 2015. Effect of Single and Double Austenitization Treatments on the Microstructure and Hardness of AISI D2 Tool Steel, *Materials Today: Proceedings*, 2(4), 1901-06. doi: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.145

Senthilkumar, D., I. Rajendran, ve M. Pellizzari. 2011. Effect of cryogenic treatment on the hardness and tensile behaviour of AISI 4140 steel, *International Journal of Microstructure and Materials Properties*, 6(5), 366-77. doi: 10.1504/IJMMP.2011.043573

Singh, H., A. K. Singh, Y. K. Singla, K. Chattopadhyay, A. Saini, ve K. Singh. 2022. Interpretation of the wear characteristics of AISI 4140 under nano-fly ash based engine lubricant, *Materials Today: Proceedings*, 50(1683-89. doi: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.160

Sonar, T., S. Lomte, C. Gogte, ve V. Balasubramanian. 2018. Minimization of Distortion in Heat Treated AISI D2 Tool Steel: Mechanism and Distortion Analysis, *Procedia Manufacturing*, 20(113-18. doi: https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.016

Xie, Z.-j., C.-j. Shang, X.-l. Wang, X.-m. Wang, G. Han, ve R.-d.-k. Misra. 2020. Recent progress in third-generation low alloy steels developed under M3 microstructure control, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 27(1), 1-9. doi: 10.1007/s12613-019-1939-x

Zhang, Y., R. Yuan, J. Yang, D. Xiao, D. Luo, W. Zhou, C. Tuo, H. Wu, ve G. Niu. 2022. Effect of tempering on corrosion behavior and mechanism of low alloy steel in wet atmosphere, *Journal of Materials Research and Technology*, 20(4077-96. doi: https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.08.138