

**KRİYOJENİK ISIL İŞLEMİN HASTELLOY C-22
SÜPER ALAŞIMININ AŞINMA DAVRANIŞINA
OLAN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

**2019
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

Muhammed Salih GÜL

**KRİYOJENİK ISIL İŞLEMİN HASTELLOY C-22 SÜPER ALAŞIMININ
AŞINMA DAVRANIŞINA OLAN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

Muhammed Salih GÜL

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalında

Yüksek Lisans Tezi

Olarak Hazırlanmıştır

KARABÜK

Mayıs 2019

Muhammed Salih GÜL tarafından hazırlanan “KRİYOJENİK ISIL İŞLEMİN HASTELLOY C-22 SÜPER ALAŞIMININ AŞINMA DAVRANIŞINA OLAN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Hasan GÖKKAYA
Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 30/05/2019

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Hasan GÖKKAYA (KBÜ)

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Muhammet Hüseyin ÇETİN (KBÜ)

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Fuat KARTAL (KÜ)

...../...../2019

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Filiz ERSÖZ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdür V.



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Muhammed Salih GÜL

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KRİYOJENİK ISIL İŞLEMİN HASTELLOY C-22 SÜPER ALAŞIMININ AŞINMA DAVRANIŞINA OLAN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Muhammed Salih GÜL

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Hasan GÖKKAYA

Mayıs 2019, 74 sayfa

Bu çalışmada, Hastelloy C-22 süper alaşım numunelerine, derin ve sığ kriyojenik ısıtım işlemi uygulanmıştır. Hastelloy C-22 numuneleri 3 farklı gruba (Isıtım işlemi uygulanmamış, sığ kriyojenik ısıtım işlemi (-80 °C) uygulanmış, derin kriyojenik ısıtım işlemi (-145 °C) uygulanmış) ayrılarak, sertlik ölçümü, mikroyapı görüntülemesi ve aşınma deneyleri yapılmıştır. Aşınma deneyleri sonucunda, aşınan bölgelerin aşınma tiplerini ve mikroyapılarını gözlemek için önce optik mikroskop (OM) ardından da taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelemeler yapılmıştır. Kriyojenik ısıtım işlemi uygulanmış numuneler, kriyojenik ısıtım uygulama sıcaklıklarında (-80 °C ve -145 °C) 24'er saat bekletildikten sonra oda sıcaklığına 6 saatlik bir sürede getirilmiştir. Oda sıcaklığına getirilen numunelere (kriyojenik ısıtım işlemi uygulanmamış numune de dahil olmak üzere) 200 °C 'de 2 saat süreyle temperleme işlemi uygulanmıştır. Isıtım işlemi sonrası yapılan sertlik ölçümlerinde, derin kriyojenik

ıslıl işlem uygulanmış numunenin sertlik değerinin %45 oranında, sığ kriyojenik ıslıl işlem uygulanmış numunenin sertlik değerinin ise %14 oranında arttığı tespit edilmiştir. Aşınma deneyleri ball-on flat metoduyla, tım numunelere 10 N, 20 N ve 40 N kuvvet uygulayarak 72 mm/s sabit kayma hızında toplamda 1000 m yol kat edilerek geręekleřtirilmiřtir. Deneysel sonuçlara gıre, kriyojenik ıslıl işlem uygulamasının Hastelloy C-22 siper alaşım numunelerinin aşınma davranışlarını iyileştirdiği belirlenmiştir. En ylıksek aşınma oranının kriyojenik ıslıl işlem uygulanmamış numunede olduğu, en dışlk aşınma oranının ise derin kriyojenik ıslıl işlem uygulanmış numunede olduğu belirlenmiştir. Kriyojenik ıslıl işlem parametrelerinin kontrolü ile Hastelloy C-22 siper alaşım numunelerinin aşınma davranışlarının optimize edilebileceği belirlenmiştir.

Anahtar Sızcükler : Kriyojenik ıslıl işlem, hastelloy C-22, sertlik, aşınma, mikroyapı.

Bilim Kodu : 914.1.092

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF CRYOGENIC HEAT TREATMENT ON WEAR BEHAVIOR OF HASTELLOY C-22 SUPER ALLOY

Muhammed Salih GÜL

Karabük University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor:

Prof. Dr. Hasan GÖKKAYA

May 2019, 74 pages

In this study, deep and shallow cryogenic heat treatment was applied to Hastelloy C-22 super alloy specimens. Hastelloy C-22 specimens were divided into 3 different groups (non-heat treated, shallow cryogenic heat treatment (-80 °C), deep cryogenic heat treatment (-145 °C)) and hardness measurement, microstructure imaging and wear tests were performed. As a result of the wear tests, firstly optical microscope (OM) and then scanning electron microscope (SEM) were examined to observe the wear types and microstructures of the eroded regions. The specimens were brought to room temperature (including the specimen not cryogenic heat treated) and tempered at 200 °C for 2 hours. Hardness measurements after heat treatment showed that the hardness value of deep cryogenic heat treated specimen increased by 45% and the hardness value of shallow cryogenic heat treated specimen increased by 14%. Wear tests were carried out by ball-on flat method, applying 10 N, 20 N and 40 N force to

all specimens at a constant shear rate of 72 mm/s with a total distance of 1000 m. According to the experimental results, it was determined that cryogenic heat treatment improved the wear behavior of Hastelloy C-22 super alloy specimens. It was determined that the highest wear rate was in the cryogenic non-heat-treated specimen. On the other hand, the lowest wear rate was determined in the deep cryogenic heat treated specimen. It was determined that the wear behavior of Hastelloy C-22 super alloy specimens could be optimized by controlling the cryogenic heat treatment parameters.

Key Word : Cryogenic heat treatment, hastelloy C-22, hardness, wear, microstructure.

Science Code : 914.1.092

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, sayın hocam Prof. Dr. Hasan GÖKKAYA'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmamda ve akademik hayatta bana her zaman yardımcı olan, bilgi ve desteklerini esirgemeyen sayın Dr. Öğr. Üyesi Muhammet Hüseyin ÇETİN hocama teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmam süresinde tecrübelerinden faydalandığım deneysel ve teorik süreçlerde bilgilerini ve yardımlarını esirgemeyen değerli arkadaşım Arş. Gör. Safa POLAT'a çok teşekkür ederim.

Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Koordinatörlüğü'ne KBÜBAP-17-YL-057 numaralı projeye desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Bu günlere gelmemde çok büyük emekleri olan sevgili babam ve anneme, tez çalışmam boyunca desteğini hep hissettiğim sevgili eşime tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	3
KRİYOJENİK ISIL İŞLEM.....	3
2.1. KRİYOJENİK ISIL İŞLEMİN YARARLARI	5
2.1. KRİYOJENİK ISIL İŞLEMİN KULLANILDIĞI ALANLAR.....	6
BÖLÜM 3	8
LİTERATÜR TARAMASI.....	8
3.1. LİTERATÜR TARAMASININ GENEL DEĞERLENDİRİLMESİ	20
BÖLÜM 4	22
DENEYSEL MATERYAL VE METOD	22
4.1. DENEY NUMUNESİ	22
4.2. DENEY NUMUNELERİNE UYGULANAN ISIL İŞLEMLER VE MEKANİK ÖZELLİKLERİN BELİRLENMESİ	24
4.2.1. Deney Numunelerine Kriyojenik Isıl İşlem Uygulanması	26
4.2.2. Temperleme İşlemi	27

	<u>Sayfa</u>
4.2.3. Metalografik İşlemler	27
4.2.4. X Işını Kırınım Yöntemi (XRD) Analizi.....	28
4.2.5. Sertlik Ölçümü.....	29
4.2.6. Aşınma Deneyleri	31
4.2.7. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Yardımıyla Görüntüleme	32
BÖLÜM 5	33
DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	33
5.1. SERTLİK ÖLÇÜM TESTLERİ.....	33
5.1.1. Makro Sertlik Ölçüm Testleri.....	33
5.1.2. Mikro Sertlik Ölçüm Testleri.....	35
5.1.3. Sertlik Ölçüm Sonuçlarının Genel Değerlendirilmesi.....	37
5.2. XRD ANALİZLERİ.....	38
5.3. AŞINMA DENEYLERİ.....	40
5.4. MİKROYAPI İNCELEMELERİ	47
BÖLÜM 6	63
SONUÇLAR	63
KAYNAKLAR	65
ÖZGEÇMİŞ	74

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1.	Standart derin kriyojenik ısıtım uygulama şeması.....	5
Şekil 3.1.	Isıtım işlem görmüş çeliklerin aşınma dirençleri grafiği.....	10
Şekil 3.2.	Uygulanan ısıtım işlemler.....	11
Şekil 3.3.	Kriyojenik ısıtım işlem ve geleneksel ısıtım işlem uygulanmış deney numunelerinin temperleme işlemleri sonrası sertlik değerlerindeki değişim grafiği.....	12
Şekil 3.4.	Numunelerin aşınma direnci testleri grafiği.....	13
Şekil 3.5.	Kalıntı östenit miktarının temperleme işlemi ile değişimi grafiği.	14
Şekil 3.6.	İki farklı ısıtım işlem uygulanan 100Cr6 rulman çeliğinin aşınma testi sonrası elde edilen yük-aşınma oranı ilişkisi.....	19
Şekil 4.1.	Hastelloy C-22 süper alaşımının diğer süper alaşımlarla korozyon direnci açısından kıyaslanma grafiği.....	23
Şekil 4.2.	Hastelloy C-22 süper alaşım numunelerine uygulanan ısıtım işlem ve mekanik özelliklerini belirleme sürecini gösteren akış şeması.	25
Şekil 4.3.	Kriyojenik ısıtım işlem uygulanmasının şematik gösterimi.....	26
Şekil 4.4.	Temperleme işleminin uygulandığı Termal marka ısıtım işlem fırınının görüntüsü.....	27
Şekil 4.5.	Metalografik cihazların görüntüsü a) Discotom 100 kesme, b) CitoPress 10 bakalit alma, c) Tegramin 30 zımparalama parlatma cihazı.	28
Şekil 4.6.	Nikon ters metalurjik mikroskop görüntüsü.....	28
Şekil 4.7.	XRD cihazı görüntüsü.....	29
Şekil 4.8.	Mikro sertlik ölçüm cihazı görüntüsü.	30
Şekil 4.9.	Makro sertlik ölçüm cihazı görüntüsü.....	30
Şekil 4.10.	Aşınma deney cihazı görüntüsü.	31
Şekil 4.11.	Taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü.	32
Şekil 5.1.	Numunelerin makro sertlik ölçüm değerleri grafiği.....	34
Şekil 5.2.	Numunelerin makro sertlik değerlerindeki yüzde (%) değişimi grafiği. 35	
Şekil 5.3.	10x büyütme mikroskopu (a) KİG, (b) SKİ, (c) DKİ görüntüleri.	36
Şekil 5.4.	Numunelerin mikro sertlik ölçüm değerleri grafiği.	37
Şekil 5.5.	Numunelerin mikro sertlik değerlerindeki yüzde (%) değişimi grafiği. .	37

Şekil 5.6. Hastelloy C-22 süper alaşım numunelerinin XRD analiz grafikleri, (a) DKİ, (b) SKİ, (c) KİG.	39
Şekil 5.7. Aşınma deneyi numuneleri görüntüsü.....	40
Şekil 5.8. KİG, SKİ ve DKİ uygulanmış numunelerin hacimsel kayıp (a) çizgi grafiği, (b) sütun grafiği.	41
Şekil 5.9. Kriyojenik ısı işlem uygulanmış numunelerin sürtünme kuvveti grafiği (a) KİG, (b) SKİ ve (c) DKİ.	43
Şekil 5.10. 10 N yük altında yapılan aşınma deneylerinde numunelerin yüzeyinde oluşan aşınma türlerinin SEM görüntüleri (a) KİG, (b) SKİ ve (c) DKİ.	44
Şekil 5.11. 20 N yük altında yapılan aşınma deneylerinde numunelerin yüzeyinde oluşan aşınma türlerinin SEM görüntüleri (a) KİG, (b) SKİ ve (c) DKİ.	45
Şekil 5.12. 40 N yük altında yapılan aşınma deneylerinde numunelerin yüzeyinde oluşan aşınma türlerinin SEM görüntüleri (a) KİG, (b) SKİ ve (c) DKİ.	46
Şekil 5.13. KİG numuneye ait (a) 50x, (b)100x büyütme optik mikroskop görüntüleri.	48
Şekil 5.14. SKİ uygulanmış numuneye ait (a) 50x, (b)100x büyütme optik mikroskop görüntüleri.	49
Şekil 5.15. DKİ uygulanmış numuneye ait (a) 50x, (b) 100x büyütme optik mikroskop görüntüleri.	50
Şekil 5.16. KİG numunenin EDX analizi.	51
Şekil 5.17. KİG numunenin EDX analizi görüntüsü üzerinde belirlenen 1. noktanın elemental pik grafikleri.	52
Şekil 5.18. KİG numunenin EDX analizi görüntüsü üzerinde belirlenen 2. noktanın elemental pik grafikleri.	52
Şekil 5.19. KİG numunenin EDX analizi görüntüsü üzerinde belirlenen 3. noktanın elemental pik grafikleri.	53
Şekil 5.20. KİG numunenin EDX analizi görüntüsü üzerinde belirlenen 4. noktanın elemental pik grafikleri.	53
Şekil 5.21. KİG numunenin çizgi EDX görüntüsü analizi.	54
Şekil 5.22. KİG numunenin çizgi EDX sonuçları grafiği.	55
Şekil 5.23. SKİ uygulanmış numunenin EDX görüntüsü analizi.	55
Şekil 5.24. SKİ uygulanmış numunenin EDX analizi görüntüsü üzerinde belirlenen 1. noktanın elemental pik grafikleri.	56
Şekil 5.25. SKİ uygulanmış numunenin EDX analizi görüntüsü üzerinde belirlenen 2. noktanın elemental pik grafikleri.	56

Sayfa

Şekil 5.26. SKİ uygulanmış numunenin EDX analizi görüntüsü üzerinde belirlenen 3. noktanın elemental pik grafikleri.	57
Şekil 5.27. SKİ uygulanmış numunenin çizgi EDX görüntüsü analizi.	58
Şekil 5.28. SKİ uygulanmış numunenin çizgi EDX sonuçları grafiği.	58
Şekil 5.29. DKİ uygulanmış numunenin EDX görüntüsü analizi.	59
Şekil 5.30. DKİ uygulanmış numunenin EDX analizi görüntüsü üzerinde belirlenen 1. noktanın elemental pik grafikleri.	59
Şekil 5.31. DKİ uygulanmış numunenin EDX analizi görüntüsü üzerinde belirlenen 2. noktanın elemental pik grafikleri.	60
Şekil 5.32. DKİ uygulanmış numunenin çizgi EDX görüntüsü analizi.	61
Şekil 5.33. DKİ uygulanmış numunenin çizgi EDX sonuçları grafiği.	61

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Farklı malzemelerin kriyojenik ısıtım işlem uygulanması sonrası sertlik değerlerindeki değişim.....	6
Çizelge 2.2. Farklı malzemelerin kriyojenik ısıtım işlem uygulanması sonrası aşınma davranışlarındaki değişim.....	6
Çizelge 3.1. Numunelerin vickers sertlik değerleri.....	13
Çizelge 3.2. Seçilen numunelere uygulanan ısıtım işlemler.	15
Çizelge 3.3. Numunelerin sertlik değerleri.	16
Çizelge 3.4. Numunelerin sertlik değerleri.	17
Çizelge 4.1. Hastelloy C-22 süper alaşımının kimyasal bileşenleri.....	24
Çizelge 4.2. Hastelloy C-22 süper alaşımının fiziksel özellikleri.....	24
Çizelge 4.3. Aşınma deney parametreleri.	31
Çizelge 5.1. Makro sertlik ölçüm testleri sonuçları.	33
Çizelge 5.2. Mikro sertlik ölçüm testleri sonuçları.	35
Çizelge 5.3. Numunelerin makro ve mikro sertlik ölçüm testleri değerleri.....	38
Çizelge 5.4. Uygulanan ısıtım işlemlerin yarı yükseklikteki pik genişliği değerleri. ...	39
Çizelge 5.5. Numunelerin 10 N, 20 N, 40 N yük altında oluşan ortalama sürtünme katsayı değerleri.	44
Çizelge 5.6. KİG numune üzerinde belirlenen 4 noktanın elemental sayısal değerleri.	54
Çizelge 5.7. SKİ uygulanmış numunenin üzerinde belirlenen 3 noktanın elemental sayısal değerleri.	57
Çizelge 5.8. DKİ uygulanmış numunenin üzerinde belirlenen 2 noktanın elemental sayısal değerleri.	60

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

Cr	: Krom
Ni	: Nikel
Mo	: Molibden
W	: Tungsten
C	: Karbon
Co	: Kobalt
Ti	: Titanyum
Fe	: Demir
Mg	: Magnezyum
N	: Azot
°C	: Santigrat derece
θ	: Kutupsal açı
s	: Saniye
dak	: Dakika
Hz	: Hertz
HB	: Brinell sertlik değeri
HV	: Vickers sertlik değeri
HRC	: Rockwell sertlik değeri
μm	: Mikrometre
mm	: Milimetre
m	: Metre
g	: Gram
kg	: Kilogram
cm^3	: Santimetreküp
keV	: Kiloelektron volt
N	: Newton

V_w : Hacimsel aşınma kaybı

c : Strok mesafesi

a : Aşınma genişliği

b : Aşınma derinliği



KISALTMALAR

- AISI : American Iron and Steel Institute (Amerika Demir ve Çelik Enstitüsü)
- ASTM : American Society for Testing and Materials (Amerika Deneme ve Malzeme Topluluğu)
- KİG : Kriyojenik Isıl İşlem Görmemiş
- SKİ : Sığ Kriyojenik Isıl İşlem
- DKİ : Derin Kriyojenik Isıl İşlem
- SEM : Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
- OM : Optik mikroskop
- XRD : X-Ray Diffraction (X Işını Difraksiyonu)
- FWHM : Full Width at Half Maximum (Yarı Yükseklikte Pik Genişliği)

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Makine elemanlarının kullanım ömürleri boyunca, işlevlerini sorunsuz bir şekilde yerine getirmeleri beklenmektedir. Bu durumun gerçekleşebilmesi, makine imalatında kullanılan malzemelerin uygun seçilmiş olması veya malzemelerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi ile sağlanabilir [1, 2]. Araştırmacılar makine elemanlarının yüksek hız, sürekli yükler, korozif ortam ve aşınma ortamı altında çalışmaları durumunda mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi gerektiğini belirtmektedirler [1].

Malzemelerin mekanik özelliklerinin geliştirilmesinde yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri de ısıl işlemlerdir. Isıl işlemler, uygulanan malzemelere yüksek sertlik, aşınma ve yorulma direnci gibi mekanik özellikler kazandırmaktadır. Çok fazla aşınan malzemelerde aşınma oranını azaltmak için, malzemelere geleneksel ısıl işlemlerin tamamlayıcısı olan kriyojenik ısıl işlemler de uygulanmaktadır. Sıfır altı işlem olarak da adlandırılan kriyojenik ısıl işlem, geleneksel ısıl işleme tabi tutulan malzemedeki kalıntı östenitlerin martenzite dönüşmesini sağlamaktadır. Ayrıca kriyojenik ısıl işleme daha küçük tane yapıları ve malzeme içinde daha homojen bir tane yapısı dağılımı oluşmaktadır. Tane yapılarının küçülmesiyle, malzemelerin mekanik özelliklerinde (sertlik ve aşınma direnci gibi) önemli oranda iyileşmeler elde edilmektedir. Kriyojenik ısıl işlem, son zamanlarda malzemelerin aşınma dirençlerini, sertlik değerlerini ve yorulma ömürlerini arttırmak için uygulanmaktadır [3,4,13–19,5–12]. Gerçekleştirilen bilimsel çalışmalarda, malzemeler üzerine uygulanan kriyojenik ısıl işlem sayesinde, numunelerin aşınma direnci, yorulma ömürleri artarken, daha homojen tane yapısı dağılımı sağlanmaktadır [20–28].

Malzemelere uygulanan sıcaklıklara bağı olarak kriyojenik ısı işlem, sıg kriyojenik ısı işlem -80 °C'ye kadar, derin kriyojenik ısı işlem ise -196 °C'ye kadar özel bir kabin içerisine yerleştirilen numunelerin kontrollü olarak soğutulması, ulaşılan sıcaklıkta belirli bir süre bekletilmesi ile gerçekleştirilir. Malzemelerin bahsedilen sıcaklıklara erişmesi, sistemdeki sıvı azot ile gerçekleştirilir. Kriyojenik ısı işlem uygulama/bekletme süresi, malzemelerin türüne göre değişkenlik göstermektedir. Yaygın olan 4 saat ile 48 saat uygulama/bekletme süresidir [29].

Bu çalışmada, korozyon direnci çok yüksek olan fakat aşınma direnci ve sertliği çeliklere nazaran düşük olan Hastelloy C-22 süper alaşımının kriyojenik ısı işlem ile sertliğinin ve aşınma direncinin artırılması hedeflenmiştir. Hastelloy C-22 süper alaşımı, nikel-krom-molibden alaşımı olup hem oksitleyici hem de oksitleyici olmayan kimyasallara karşı dirençli malzemelerdendir. C-22 süper alaşımı; çukurlaşma, çatlak korozyonu ve gerilim korozyon çatlağına karşı olağanüstü direnç göstermektedir [30]. Alaşımın üstün korozyon direncine rağmen düşük aşınma direnci ve sertliği malzemenin makine imalatında kullanım alanını sınırlamaktadır. Literatür çalışmalarında, Hastelloy C-22 süper alaşımının kriyojenik ısı işlem şartlarının ve kriyojenik ısı işlem sonrasında aşınma davranışının incelendiği herhangi bir çalışmanın mevcut olmadığı görülmüştür.

Tez çalışması kapsamında ilk olarak, çalışmanın nedeni ve özgün değeri anlatılmıştır. Çalışmanın 2. bölümünde ise kriyojenik ısı işlem ele alınmış, kriyojenik ısı işlem uygulaması ve avantajlarından bahsedilmiş olup 3. bölümde ise yapılan literatür çalışmasına yer verilmiştir ve ardından literatür değerlendirilmesi yer almıştır. 4. bölümde Hastelloy C-22 süper alaşım malzemesinden bahsedilmiştir. Yapılacak deneyler, deney parametreleri, hesaplama türleri ve metalografik işlemler 4. bölümde yer almaktadır. 5. bölümde ise yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar grafiklerle anlatılmış ve değerlendirilmesi yapılmıştır. OM ve SEM incelemeleri ile deney sonuçları görsel olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca elde edilen sonuçlar, literatür çalışmalarıyla desteklenerek açıklanmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda elde edilen verilerin detaylı incelemeleri 6. bölüm olan son bölümde, ortaya çıkan değerler ve görüntüler, deneysel çalışmaların hedeflediği sonuçlara uygun bir şekilde atıflar yapılarak tartışılmıştır.

BÖLÜM 2

KRİYOJENİK ISIL İŞLEM

Metalik malzemelerin mekanik özelliklerini geliştirmek için ısı işlemlerinin kullanılması, çok eski çağlara dayanmaktadır. Geliştirilen ısı işlemlerinin birçoğu oda sıcaklığından daha yüksek bir sıcaklıkta uygulanmıştır. Kriyojenik ısı işlemleri ilk uygulama girişimleri 20. yüzyılın başlarında gözlenmiştir. Ancak, kriyojenik ısı işleme duyulan ilgi 20. yüzyılın son yıllarında artmaya başlamıştır. Kriyojenik ısı işlemi, malzemenin belirlenen sıcaklığa kadar kademeli olarak soğutulması işlemidir. Soğutulan malzeme belirlenen süre boyunca belirlenmiş sıcaklık değerinde bekletilir ve ardından tekrar oda sıcaklığına getirilir. Kriyojenik ısı işlemlerinin uygulanma amacı, malzemelerin sertlik, aşınma direnci ve tokluk gibi mekanik özelliklerinde bir iyileşme elde etmektir [31].

Kriyojenik ısı işleminin etkisini incelemeye yönelik yapılan pek çok araştırmada, makine parçası olarak kullanılan malzemelerin, sertlik ve mukavemet değerlerinde önemli bir artış olduğu tespit edilmiştir. Bu tür çalışmalar dikkate alınarak, 1990'lı yıllardan itibaren kriyojenik ısı işleminin etkilerine olan ilginin artmasıyla; motor yarıları parçaları [32], dişliler ve yataklar [33–37], hiltiller, tabanca namluları, bıçaklar, cerrahi ve diş hekimliği aletleri [38] gibi malzemelere kriyojenik ısı işlemi uygulanmıştır.

Kriyojenik ısı işlemi sonrası malzemelerin iç yapısındaki iyileşme mekanizmaları tamamen açıklığa kavuşmamış olsa da literatürde mikroyapısal gözlemlerle tutarlı bir şekilde farklı hipotezler öne sürülmüştür [31].

Kriyojenik ısı işleme tabii tutulan numuneler kontrollü bir şekilde oksijen, helyum, ve azot gibi gazlar kullanılan sistemler aracılığıyla belirli sıcaklık aralıklarına kadar

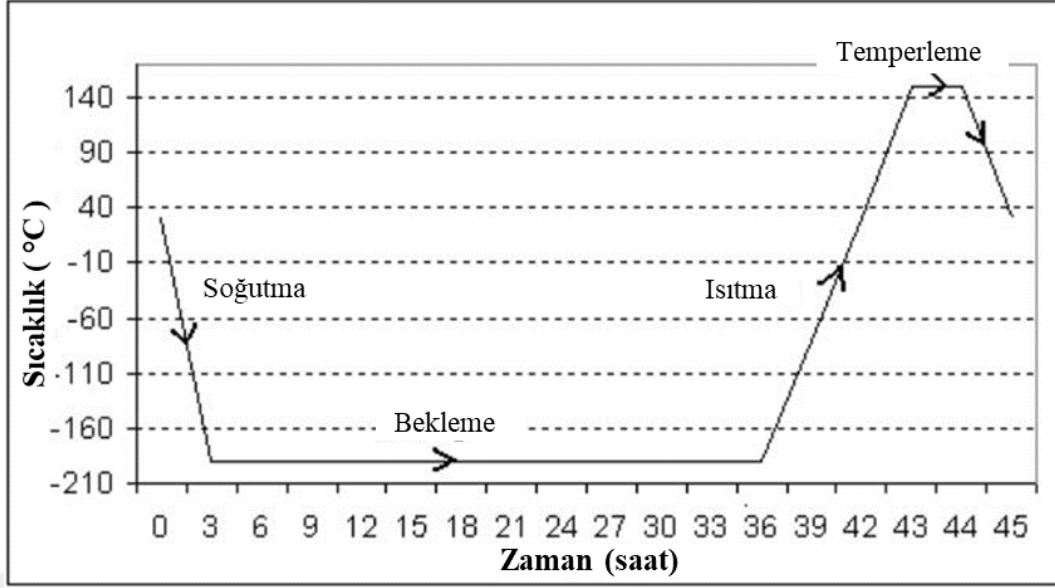
kademeli bir şekilde soğutulur. Belirli sıcaklığa ulaşan numuneler belirlenen sıcaklıkta bir süre bekletilmesinin ardından tekrar oda sıcaklığına getirilir [23,39]. Kriyojenik ısıt işlemlerin sıfır altı sıcaklıkta yapılmasından dolayı malzemelerin karbür dağılımları değişmekte ve karbür dağılımı daha homojen bir hale gelmektedir. Homojen karbür dağılımı malzemelerin, sertlik değerlerini ve aşınma dirençlerini arttırmaktadır [13, 25, 39, 40].

Kriyojenik ısıt işlem, uygulama sıcaklıklarına göre sınıflandırılmaktadır. -80 °C ile -140 °C sıcaklık değerleri arasında uygulanan kriyojenik ısıt işleme sığ kriyojenik ısıt işlem (SKİ), -140 °C ile -196 °C sıcaklık değerleri arasında uygulanan kriyojenik ısıt işleme ise derin kriyojenik ısıt işlem (DKİ) adı verilmektedir [22, 23].

Kriyojenik ısıt işlem uygulanan malzemeler, ani soğumadan dolayı termal şoka uğrayabilirler ve bu ani soğuma işlemi malzemelerin mikroyapılarında çatlaklar oluşturabilir. Bu durumların oluşmaması için malzemeler soğutulurken ve tekrar oda sıcaklığına getirilirken kontrollü olarak kademeli bir şekilde getirilirler [41, 42].

Malzemeler ve makine parçalarında yüksek performanslar elde etmek için uygulanan kriyojenik ısıt işlemlerde, uygulama sıcaklığı, uygulama süresi ve ısıtma/soğutma kademeli hız değişkenleri malzeme ve makine parça türüne göre optimize edilerek uygulanırlar [12, 30].

Barron ve Mulhern tarafından önerilen standart derin kriyojenik ısıt işlem uygulama şeması Şekil 2.1'de gösterilmiştir [43].



Şekil 2.1. Standart derin kriyojenik ısıl işlem uygulama şeması [43].

2.1. KRİYOJENİK ISIL İŞLEMİN YARARLARI

Literatürdeki araştırmaların büyük çoğunluğunda, kalıntı östenitin kriyojenik ısıl işlem sırasında martenzite dönüştürüldüğü belirtilmektedir. Barron ve Mulhern [43] ile Barron [6], kriyojenik ısıl işlem ile kalıntı östenitin martenzite dönüştürülmesinden dolayı malzemenin aşınma direncinin arttığını ve bu işlemin, malzemelerin kullanım ömrünü uzattığını belirtmektedir. Mohan Lal ve arkadaşları [44, 45] tarafından yapılan araştırmada, kriyojenik ısıl işlemler sonucu malzemede boyutsal stabilitenin arttığı ve bu yüzden malzemenin tokluk değerinin arttığı belirtilmiştir. Farklı malzemelerin kriyojenik ısıl işlem sonrası değişen sertlik değerleri Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Aşınma direnci; işleme aletleri, rulmanlar, dişliler, fren rotorları, piston contaları vb. gibi temas halindeki bileşenlerin karşılıklı hareketine neden olan uygulamalarda kullanıldığında malzemenin önemli bir özelliğini temsil eder. Kriyojenik ısıl işlem uygulanan malzemede kalıntı östenit azalır, karbür çökmesiyle sertlik değeri artar ve bu durum, aşınma direncinde iyileşmeye neden olur. Yapılan literatür araştırmasında, genel olarak kriyojenik ısıl işlem uygulamalarının takım çeliklerindeki aşınma direncini artırması üzerine yapıldıklarına rastlanılmıştır.

Çizelge 2.2’de farklı malzemelere [14, 43] kriyojenik ısıtım uygulamaları sonucu verileri verilmiştir.

Çizelge 2.1. Farklı malzemelerin kriyojenik ısıtım uygulanması sonrası sertlik değerlerindeki değişim [46–54].

İlk Yazar	Malzeme	Maksimum Sertlik Gelişimi
Molinari [46]	AISI M2, H13 takım çeliği	M2’de + %8,3 Vickers sertliği H13’de + %6,9 Rockwell-C sertliği
Yun [47]	AISI M2, T1 takım çeliği	M2 çeliği + %2,6 Rockwell-C sertliği T1 çeliği + %2,8 Rockwell-C sertliği
Gordo [48]	Nb ve Ta karbürleri olan M3/2 HSS matrisli kompozit	+12,35 Rockwell-C sertliği
Bensely [49]	En353 karbürize çelik	+%3,48 Vickers sertliği
Preciado [50]	Karbürize çelik	+%17 Vickers mikro sertliği
Zhirafar [51]	AISI 4340 düşük alaşımlı çelik	+%2,4 Rockwell-C sertliği
Yang [55]	13Cr2Mn2V yüksek kromlu beyaz demir	+%3,2 Rockwell-C sertliği
Liu [53]	3Cr13Mo1V1.5 yüksek kromlu dökme demir	+%5,5 Rockwell-C sertliği
Zhisheng [54]	Cr-Zr-Cu alaşımlı elektrotlar	+%3,13 Brinell sertliği

Çizelge 2.2. Farklı malzemelerin kriyojenik ısıtım uygulanması sonrası aşınma davranışlarındaki değişim [35,46,49,50].

İlk Yazar	Malzeme	Aşınma Davranışları
Molinari [46]	AISI M2, H13 takım çeliği	M2’de -%51 aşınma oranı H13’de -%29 aşınma oranı
Meng [35]	Fe-1.4Cr-1C rulman çeliği	-%50 aşınma oranı
Bensely [49]	En353 karbürize çelik	+%372 aşınma direnci
Preciado [50]	Karbürize çelik	-%20 aşınma oranı

2.1. KRIYOJENİK ISITIM İŞLEMİN KULLANILDIĞI ALANLAR

Kriyojenik ısıtım; hava taşıtı, savunma, otomotiv, kimyasal işleme, gıda işleme, madencilik ve enerji üretimi gibi birçok sektörde kullanılmaktadır. Kriyojenik ısıtım işlem görmüş takım çeliklerinin ömrü önemli ölçüde artmaktadır [31,56]. Kriyojenik

ıslıl işlem son zamanlarda, takım çeliği ve elik malzemelerin yanı sıra plastik ve kompozit malzemeler üzerinde de uygulanmaktadır. Kompozitler ve plastik esaslı malzemelerin mukavemet, sertlik ve aşınma direnci değerleri uygulanan kriyojenik ıslıl işlemele artış göstermiştir [54,57–59].



BÖLÜM 3

LİTERATÜR TARAMASI

Kriyojenik ısıtım uygulamalarında, malzemelerin mekanik özelliğine etkiyen en önemli parametreler, uygulama sıcaklığı ve bekletme süresidir. Ayrıca kriyojenik ısıtım işlem sonrasında farklı sıcaklıklarda uygulanan temperleme işleminin de önemli bir etkiye sahip olduğu bilinmektedir. Yapılan pek çok çalışmada, uygulama sıcaklığı ve bekletme süresi parametrelerindeki değişimler baz alınarak, malzemelerin mikroyapı ve mekanik özellikleri incelenmiştir.

Huang ve arkadaşları, sadece temperleme işlemi ile kriyojenik ısıtım işlem ve sonrasında uygulanan temperleme işleminin, M2 takım çeliğinin mikroyapısı ve mekanik özelliklerine olan etkileri üzerine yaptıkları çalışmalarında temperleme işlemini, 200 °C sıcaklıkta 24 saat uygulama süresi ile gerçekleştirmişlerdir. Kriyojenik ısıtım işlemi ise -196 °C sıcaklıkta 1 saat uygulama/bekletme süresi ile gerçekleştirmişlerdir. Sadece temperleme işlemi uygulanan numunelerde iri yapılı karbürler gözlenirken, kriyojenik ısıtım işlem ve temperleme işlemi sonrasında numunelerde homojen dağılımlı küçük yapılı karbür yapının meydana geldiğini belirtmişlerdir. Mekanik özellikler bakımından karbür tanelerinin homojen dağılımına bağlı olarak iyileşmeler gözlemlendiği ifade edilmiştir. İri yapılı karbür tanelerinin malzemenin mekanik dayanımını düşürdüğü, küçük taneli ve homojen dağılımlı karbür yapılarının ise mekanik dayanımı önemli derecede arttırdığı belirtilmiştir [60].

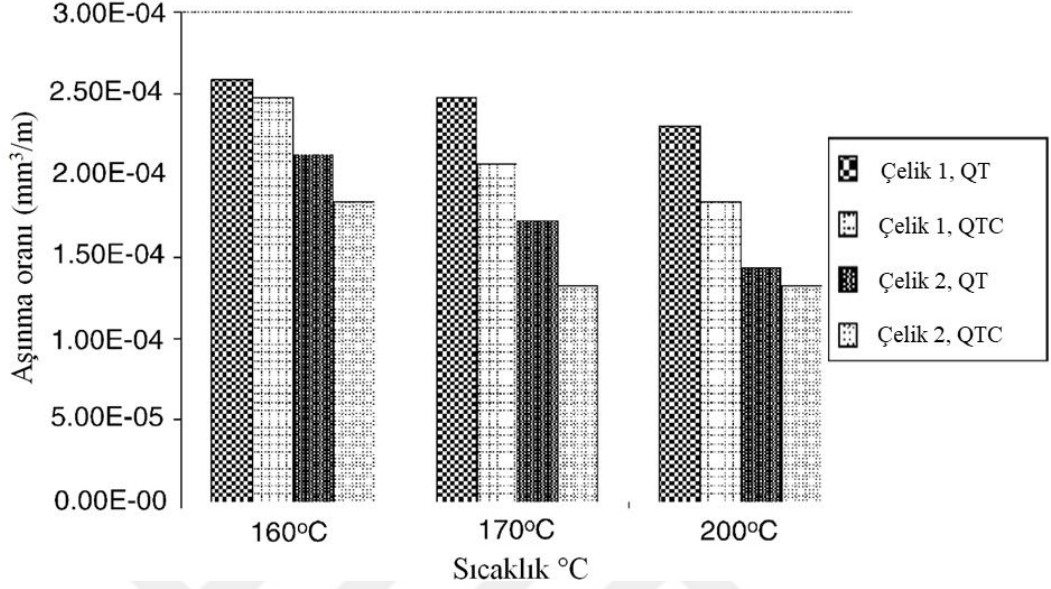
Leskovsek ve arkadaşları, yüksek hız çeliğine (HSS) uygulanan temperleme işlemi ve temperleme işlemi ile birlikte uygulanan -196 °C'de derin kriyojenik ısıtım işlemin etkisini incelemişlerdir. Farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen temperleme işlemi sonrasında malzemenin sertlik ve aşınma direncinin tutarsız bir şekilde artış gösterdiği gözlenirken, kriyojenik ısıtım işlemle birlikte uygulanan temperleme işlemi

sonrasında ise bu artışın birbiriyle oldukça tutarlı bir şekilde meydana geldiği, ayrıca temperleme sıcaklığına bağlı olarak malzemelerin aşınma dirençlerinin de arttığını belirtmişlerdir [61].

Liu ve arkadaşları, kriyojenik ısıtma işleminin 14CrZMn2V yüksek kromlu dökme demir üzerindeki mikroyapı, sertlik ve aşınma direncine olan etkilerini araştırmışlardır. 14CrZMn2V malzemesini -196 °C sıcaklıkta 3 saat bekleterek derin kriyojenik ısıtma işlemi uygulamışlardır. Yapılan kriyojenik ısıtma işleminden sonra elde edilen bulgulara göre alt kritik işleminden sonra uygulanan kriyojenik ısıtma işleminin, çok miktarda kalıntı östeniti martenzite dönüştürdüğünü tespit etmişlerdir. Liu ve arkadaşları, kriyojenik ısıtma işleminin, malzemedeki kalıntı östenit miktarını daha da azaltabileceğini ancak tamamıyla kalıntı östenitin martenzite dönüştürülemeyeceğini belirtmişlerdir [52].

Preciado ve arkadaşları, dişli yapımında kullanılan karbürize çeliklere yapılan derin kriyojenik ısıtma işleminin aşınma direncine ve sertlik değerine olan etkisini araştırmışlardır. Preciado ve arkadaşlarının belirlediği numuneler, önce 920 °C'de karbürizasyon işlemine tabi tutulmuştur. Karbürizasyon işlemi devamında 820 °C'de su verme işlemi gerçekleştirilmiştir. Karbürizasyon ve su verme işlemleri sırasında deney numuneleri 160, 170 ve 200 °C'de temperleme işlemine tabi tutulmuştur. Araştırmacılar, su verme ve temperleme işlemini QT, su verme, temperleme ve kriyojenik ısıtma işlemi de QTC olarak adlandırmışlardır. İlk olarak temperleme işlemi 2 saat süreyle 3 farklı sıcaklıkta (160, 170 ve 200 °C) uygulanmıştır. Farklı sıcaklıklarda uygulanan temperleme işleminden sonra ölçülen sertlik değerleri sırasıyla, 61 HRC, 58 HRC ve 56 HRC olarak elde edilmiştir. Temperleme işlemi sonrası uygulanan kriyojenik ısıtma işlemi, ortam sıcaklığından yaklaşık dakikada 1 derece soğutmayla -190 °C'de 22 saat boyunca bekletilerek gerçekleştirilmiştir. -190 °C'de 22 saat bekletilerek gerçekleştirilen kriyojenik ısıtma işleminden sonra numuneler, oda sıcaklığında kontrollü olarak soğumaya bırakılmıştır. Preciado ve arkadaşlarının yaptıkları deneysel işlemlerden elde etmiş oldukları verilere göre numuneler üzerinde uygulanan su verme ve birinci aşama temperleme işlemi sonrası kriyojenik ısıtma işleminin, numunenin aşınma direncini arttırdığı gözlemlenmiştir. Araştırmacılar, en iyi aşınma direncinin, 160 °C'de gerçekleştirilen temperleme işlemi sonrası kriyojenik ısıtma işlemi uygulanan numunelerde elde edildiğini belirtmişlerdir (Şekil

3.1). Aşınma direnci artışının nedeni, kalıntı östenitin kriyojenik ısıtma işlemle martenzit yapıya dönüşmesi olarak açıklanmıştır [50].



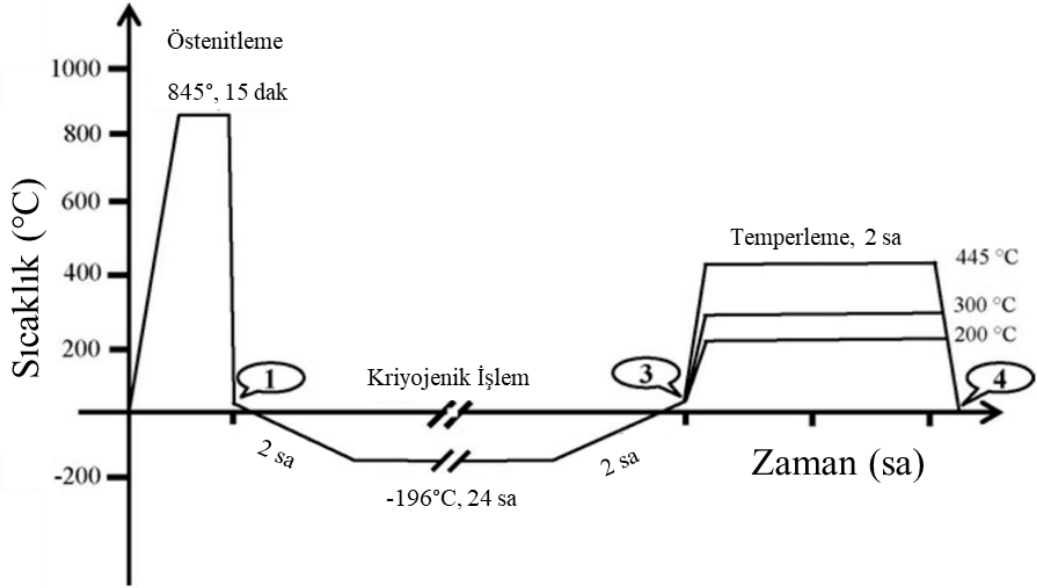
Şekil 3.1. Isıl işlem görmüş çeliklerin aşınma dirençleri grafiği [50].

Bensely ve arkadaşları, kriyojenik ısıtma işlem ve geleneksel ısıtma işlem uygulanan 815M17 çeliğinin gerilme davranışını araştırmışlardır. Araştırmada, ısıtma işlemi olarak derin kriyojenik ısıtma işlem, sığ kriyojenik ısıtma işlem ve geleneksel ısıtma işlemleri kullanılmıştır. Bensely ve arkadaşları ısıtma işlemlerinin 815M17 çeliğinin gerilme davranışı üzerindeki etkilerini belirlemek üzere yapmış oldukları çalışmalar sonucunda, derin kriyojenik ısıtma işlem ve sığ kriyojenik ısıtma işlem uygulanan numunelerdeki iç gerilmelerin, sadece geleneksel ısıtma işlem uygulanan numunelere göre daha düşük olduğunu tespit etmişlerdir. Bu düşüşün sebebini, geleneksel ısıtma işlem uygulanan numunelerin yüzeyindeki çatlak ve çukurların daha çok olmasına bağlamışlardır [62].

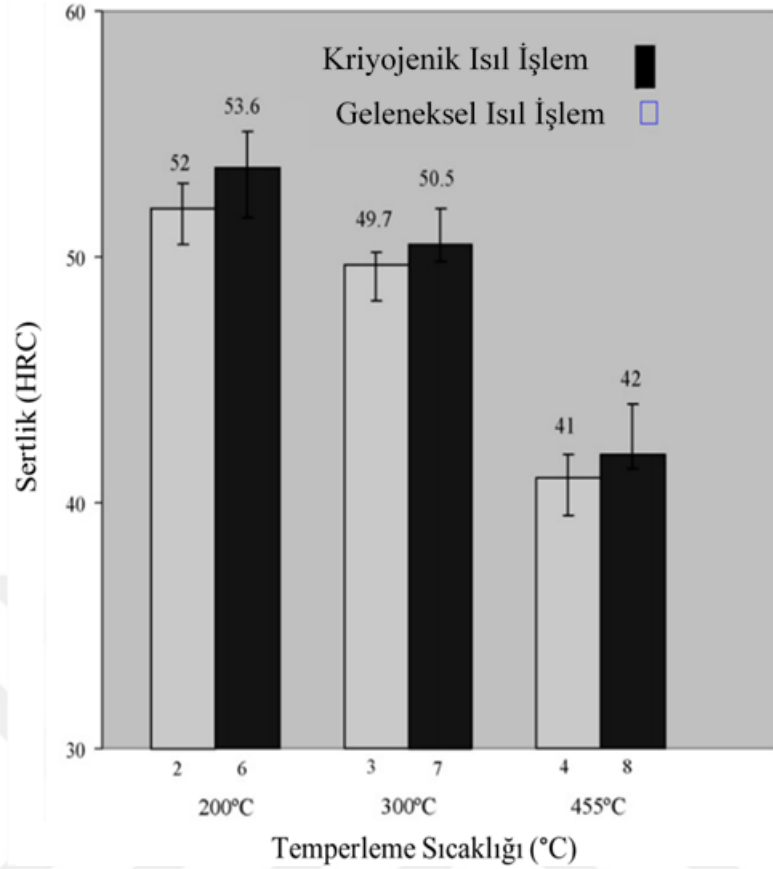
Xuan ve arkadaşları farklı ısıtma işlemlerinin 30Cr2Ni4MoV rotor çeliğinin korozyon direnci üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Isıtma işlemi olarak, geleneksel ısıtma işlem ve kriyojenik ısıtma işlem yöntemlerini kullanmışlardır. Uygulamış oldukları ısıtma işlemlerinin sonuçlarına göre, geleneksel ısıtma işlem uygulanan numunelerin akma dayanımlarında artış, korozyon direncinde düşüş tespit etmişlerdir. Derin kriyojenik

ıslıl işlem uygulanmış numunelerde ise sınırlı karbon çökelimi, östenit dönüşümü meydana geldiği ve bu durumun korozyon direnci üzerinde önemli bir iyileşmeye yol açtığını ifade etmişlerdir [63].

Zhirafar ve arkadaşları, kriyojenik ıslıl işlemin AISI 4340 çeliğinin mekanik özelliklerine olan etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla kriyojenik ıslıl işlem uygulanan her bir numuneye yorulma, darbe ve sertlik testleri uygulanmıştır. Geleneksel ıslıl işlem, 845 °C sıcaklıkta 15 dakika süre ile gerçekleştirilirken, kriyojenik ıslıl işlem ise -196 °C ve 24 saat bekletme süresi ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, kriyojenik ıslıl işlem uygulanan numuneler, üç farklı sıcaklıkta (200, 300, 445 °C) 2 saat temperleme işlemine tabi tutulmuştur (Şekil 3.2). Kriyojenik ıslıl işlem uygulanan numunelerin, geleneksel ıslıl işlem uygulanan numunelere göre sertlik ve yorulma dayanımlarında artış olup, tokluğunun azaldığını belirtmişlerdir (Şekil 3.3) [51].



Şekil 3.2. Uygulanan ıslıl işlemler [51].



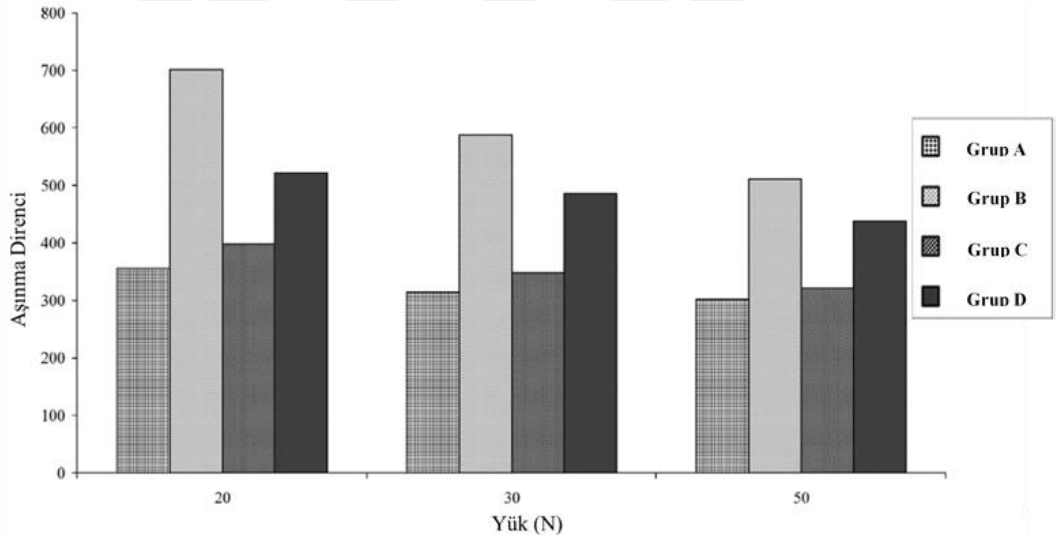
Şekil 3.3. Kriyojenik ısıl işlem ve geleneksel ısıl işlem uygulanmış deney numunelerinin temperleme işlemleri sonrası sertlik değerlerindeki değişim grafiği [51].

Vimal ve arkadaşları, En 31 çelik malzemesine farklı sıcaklıklarda geleneksel ısıl işlem ve derin kriyojenik ısıl işlem uygulamışlardır. Uygulanan ısıl işlemlerin, numunelerin mikroyapılarına ve aşınma dirençlerine olan etkisini araştırmışlardır. Vimal ve arkadaşları, belirledikleri çelik çubuk numuneleri, uygulanan ısıl işleme göre A, B, C ve D ile kodlayarak 4 ayrı gruba ayırmışlardır. Grup A numunelerine, temperleme işleminin hemen ardından su verme işlemi uygulanmıştır. Grup B numunelerine, kriyojenik ısıl işlem ve ardından temperleme işlemi uygulanmıştır. Grup C numuneleri, geleneksel su verme işleminden sonra temperleme işlemine, ardından kriyojenik ısıl işleme tabi tutulmuştur. Grup D numuneleri, Grup C numunelerine uygulanan işlemlere tabi tutulmuş ve bu ısıl işlemlere ek olarak temperleme işlemi uygulanmıştır. Vimal ve arkadaşlarının gerçekleştirmiş oldukları kriyojenik ısıl işlemde numuneler $-183\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye 3 saatte getirilmiş ve numuneler $-183\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 24 saat bekletilmiştir. Araştırmacılar, kriyojenik ısıl işlemde sonra numuneleri, temperleme işlemine maruz bırakmışlardır. Sonuç olarak, Grup B

numunelerinin (kriyojenik ısıtım işlem + temperleme işlemi), diğer numunelere kıyasla daha yüksek sertliğe ve aşınma direncine sahip olduğunu belirtmişlerdir (Çizelge 3.1, Şekil 3.4) [64].

Çizelge 3.1. Numunelerin vickers sertlik değerleri [64].

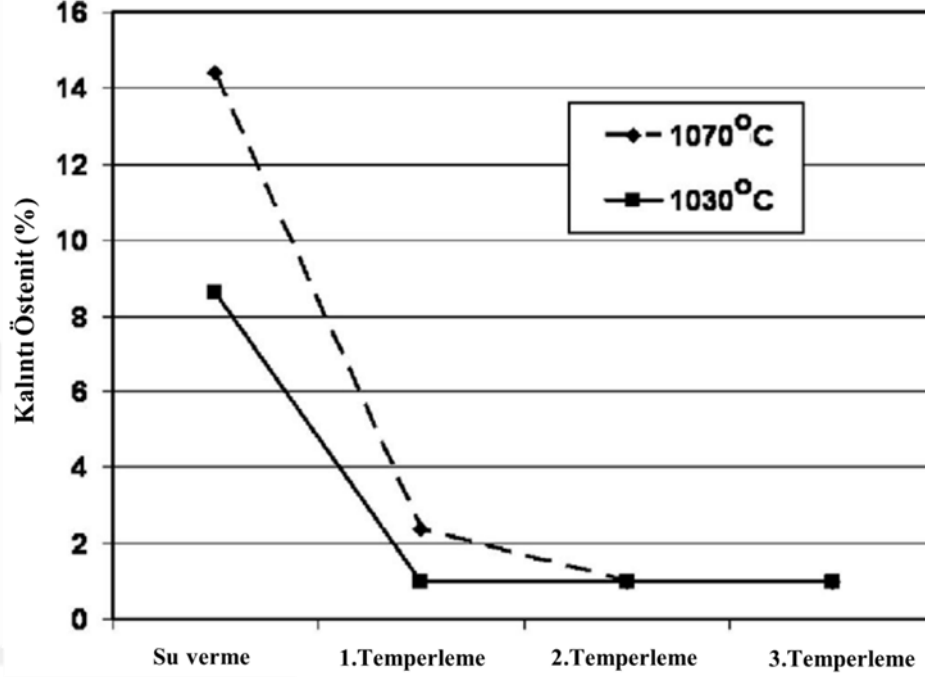
Farklı Gruplardaki Numunelerin Sertlik Değerleri		
Sl. No	Grup	Vickers Sertlik Değerleri (HV)
1	A	659±41
2	B	826±36
3	C	768±54
4	D	697±38



Şekil 3.4. Numunelerin aşınma direnci testleri grafiği [64].

Surberg ve arkadaşları, kriyojenik ısıtım işlem parametrelerinin AISI D2 çeliğinin boyutsal stabilizesine etkisini araştırmak üzere yapmış oldukları çalışmalarında dört farklı kriyojenik ısıtım işlem sıcaklık değeri (-90, -120, -150 °C) kullanmışlardır. Çalışmalarında, farklı kriyojenik ısıtım işlem sıcaklık değerlerinin AISI D2 çeliğinin işlenebilirlik süresinin düşürülmesi, yüzey pürüzlülüğü kalitesinin iyileştirilmesi ve boyutsal stabilizasyonu sağlamayı amaçlamışlardır. Araştırmacılar, seçtikleri numuneleri sertleştirmek amacıyla 1030 °C ve 1070 °C sıcaklıkta östenitleme işlemine tabi

tutmuşlardır. Sonrasında uygulanan kriyojenik ısıl işlemlerden sonra AISI D2 çeliği numunelerine 520 °C ve 540 °C’de temperleme işlemi uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, uygulanan kriyojenik ısıl işlemin kalıntı östenit miktarını azalttığını, kalıntı östenit miktarının daha da azaldığını tespit etmişlerdir (Şekil 3.5) [65].



Şekil 3.5. Kalıntı östenit miktarının temperleme işlemi ile değişimi grafiği [65].

Akhbarizadeh ve arkadaşları, sığ ve derin kriyojenik ısıl işlemin D6 takım çeliğinin aşınma davranışına olan etkilerini belirlemek üzere yapmış oldukları çalışmalarında, sığ kriyojenik ısıl işlemi -63 °C’de, derin kriyojenik ısıl işlemi ise -185 °C’de uygulamışlardır. Kriyojenik ısıl işlemlerin ardından farklı yüklerde ve farklı hızlarda gerçekleştirilen aşınma testleri sonucunda kriyojenik ısıl işlem uygulanan numunelerin daha yüksek performans gösterdiğini tespit etmişlerdir. Kriyojenik ısıl işlem sonrasında kalıntı östenit miktarının azalmasından dolayı, numunelerin sertliğinin arttığı ve bununla birlikte aşınma direncinin de doğru orantılı olarak artış gösterdiğini belirtmişlerdir. [66].

Baldissera, geleneksel karbürizasyondan sonra uygulanan derin kriyojenik ısıl işlem ve temperleme işleminin 18NiCrMo5 çeliğinin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Baldissera bu amaçla, 18NiCrMo5 çeliğine 3 farklı ısıl işlem

uygulamıştır. Birincisinde, sertleştirme işlemi sonrası temperleme işlemi, ikincisinde temperleme işlemi sonrasında derin kriyojenik ısıtma işlemi, üçüncüsünde ise derin kriyojenik ısıtma işlemi sonrasında temperleme işlemi uygulamıştır. Derin kriyojenik ısıtma işlemi, -185 °C’de 1 saat ve 24 saat bekletme sürelerinde, temperleme işlemi ise 180 °C’de 2 saat bekletme süresinde gerçekleştirmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, kriyojenik ısıtma işleminin malzemenin yorulma dayanımının önemli derecede arttırmış olduğunu tespit etmiştir. Kriyojenik ısıtma işlemi sonrasında uygulanan temperleme işleminin ise malzemenin yorulma gerilmesini %50 oranında düşürdüğünü, ayrıca temperleme işleminden sonra uygulanan kriyojenik ısıtma işleminin ise malzemenin yorulma gerilmesine önemli bir etkisinin olmadığını tespit etmiştir [67].

Baldissera ve arkadaşları, derin kriyojenik ısıtma işleminin 18NiCrMo5 çeliğinin mekanik özelliklerine olan etkisini araştırmışlardır. Araştırmacılar, 18NiCrMo5 çeliğinin mekanik özelliğini iyileştirmek için geleneksel ısıtma işleminden sonra kriyojenik ısıtma işlemi ve temperleme işlemi uygulamışlardır. Bu amaçla ilk olarak, -185 °C sıcaklıkta 1 saat ve 24 saat bekletme süreleriyle derin kriyojenik ısıtma işlemi gerçekleştirmişlerdir. Kriyojenik ısıtma işleminin ardından 180 °C’de 2 saat bekletme süresiyle temperleme işlemi uygulamışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre, kriyojenik ısıtma işleminden sonra sertlik değerinde önemli bir artış (0,6 HRC değerinden 2,4 HRC sertlik değerine) tespit etmişlerdir. Seçilen numune grupları, bu gruplara uygulanan ısıtma işlemleri ve bu ısıtma işlemleri sonucu ortaya çıkan sertlik değerleri Çizelge 3.2’de ve Çizelge 3.3’te ayrıntılı olarak verilmiştir [68].

Çizelge 3.2. Seçilen numunelere uygulanan ısıtma işlemleri [68].

Deney Grupları	Sıra	Derin Kriyojenik İşlem Sıcaklığı	Derin Kriyojenik İşlem Uygulama Süresi
S	Gİİ + T	-	-
M ₁	Gİİ + DKİ + T	-185 °C	1 saat
M ₂₄	Gİİ + DKİ + T	-185 °C	24 saat
E	Gİİ + DKİ + T	-185 °C	24 saat

Gİİ= Geleneksel ısıtma işlemi; T= Temperleme; DKİ= Derin kriyojenik ısıtma işlemi

Çizelge 3.3. Numunelerin sertlik değerleri [68].

Deney Grupları	Rockwell-C Sertlik Değerleri
S	59,1 ± 0.6
M ₁	60,5 ± 0.6
M ₂₄	61,5 ± 0.6
E	59,7± 0.5

Bensely ve arkadaşları, fener mili ve pinyon dişlilerin yapımında yaygın olarak kullanılan En 353 çeliğine uygulanan ısıl işlemlerin etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla, her bir numuneyi 3 ayrı ısıl işleme tabi tutmuşlardır. Uygulanan ısıl işlemler; geleneksel ısıl işlem, sıg kriyojenik ısıl işlem ve derin kriyojenik ısıl işlemdir. Sıg kriyojenik ısıl işlem -80 °C sıcaklıkta 5 saat bekletme süresinde, derin kriyojenik ısıl işlem ise, -196 °C sıcaklıkta 24 saat bekletme süresinde gerçekleştirilmiştir. Kriyojenik ısıl işlemler sonrasında uygulanan temperleme işlemi ise, 150 °C'de 90 dak bekletme süresiyle gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre sıg ve derin kriyojenik ısıl işlemlerden sonra numunelerin yorulma ömürlerinin sırasıyla %71 ve %26 oranında olumlu yönde değişim gösterdiğini tespit etmişlerdir [69].

Das ve arkadaşları, kriyojenik ısıl işlem uygulanan AISI D2 çeliğinin, sertlik, mikroyapı karakteristiği ve aşınma direncine olan etkisi üzerine araştırma yapmışlardır. Araştırmacılar, kriyojenik ısıl işlemi, -196 °C sıcaklıkta iki farklı bekletme süresinde (36 ve 84 saat) gerçekleştirmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre, en düşük aşınma direncinin ve sertlik değerinin 36 saat bekletme süresinde ortaya çıktığını gözlemlemişlerdir (Çizelge 3.4). Ayrıca, kriyojenik ısıl işlemde bekletme süresindeki artışa bağlı olarak mekanik dayanımda da artış görüldüğünü belirtmişlerdir. Mekanik dayanımdaki artışın sebebini, kriyojenik ısıl işlem sonrasında meydana gelen ikincil karbür oluşumları ve bekletme süresine bağlı olarak karbürlerin mikroyapısındaki homojen dağılımdan kaynaklandığını belirtmişlerdir [70].

Çizelge 3.4. Numunelerin sertlik değerleri [70].

Numuneler	Kalıntı Östenitin Hacimsel Oranı	Vickers Sertlik Test Değerleri
36 saat kriyojenik ısıtılma işlemine maruz kalan numune	< 2.0	767 ± 7
84 saat kriyojenik ısıtılma işlemine maruz kalan numune	< 2.0	775 ± 5

Harish ve arkadaşları, En 31 rulman çeliği üzerine uygulanan sığ kriyojenik ısıtılma işlemi ve derin kriyojenik ısıtılma işleminin, malzemenin mikroyapısına olan etkilerini araştırmışlardır. Araştırmacılar tarafından En 31 rulman çeliği malzemesinden yapılmış numuneler östenit sıcaklığı olan 820 °C’de 60 dak süreyle bekletilmiş ve aynı numuneler yağda 40 °C’ye kadar soğutulmuştur. Harish ve arkadaşları yaptıkları bu soğutma işleminden sonra ayrıca farklı numunelere -80 °C’de 24 saat bekletme süresi ile sığ kriyojenik ısıtılma işlemi ve -196 °C’de 24 saat bekletme süresi ile derin kriyojenik ısıtılma işlemi uygulamışlardır. Kriyojenik ısıtılma işlemi uygulanan bu iki numune 150 °C sıcaklıkta 90 dak boyunca temperleme işlemine maruz bırakılmıştır. Harish ve arkadaşlarının elde ettikleri sonuçlara göre; kriyojenik ısıtılma işlemi uygulanmış numunelerin sertliğinin, östenitleme işlemi görmüş, numunelere göre daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Aynı zamanda, sığ ve derin kriyojenik ısıtılma işlemi uygulanmış numunelerdeki sertlik oranının ise %13 ve %14 düzeyinde artış gösterdiğini ifade etmişlerdir [71].

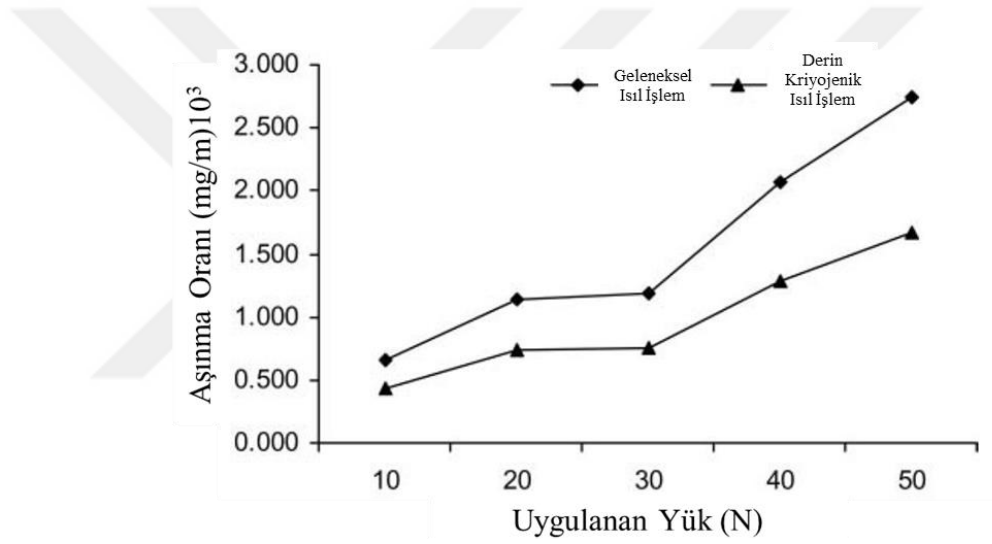
Gogte ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, AISI T42 yüksek hız takım çeliğine uygulanan derin kriyojenik ısıtılma işleminin, çeliğin mikroyapısına olan etkilerini araştırmışlardır. Araştırmacılar, AISI T42 takım çeliği numunelerine 450 °C, 850 °C ve 1250 °C’ye kadar üçlü temperleme işlemi uygulamışlardır. Temperleme işleminden sonra numuneler, 70 °C suda soğutulmuştur. Gogte ve arkadaşları, geleneksel ısıtılma işlemi uyguladıkları AISI T42 çelik numunelerine derin kriyojenik ısıtılma işlemi ise -185 °C’de 1 °C/dak olarak 8, 16 ve 24 saat bekletme sürelerinde gerçekleştirmişlerdir. Gerçekleştirilen kriyojenik ısıtılma işlemleri sonrasında malzemelerin mikroyapısında bulunan düzensiz karbür yapılarının daha düzenli hale geldiğini belirtmişlerdir [56].

Wang ve arkadaşları 16Cr1Mo1Cu dökme demir malzemesine derin kriyojenik ısıtım işlemi uygulayarak, derin kriyojenik ısıtım işleminin malzemenin mikroyapısına, sertliğine ve aşınma direncine olan etkisini araştırmışlardır. Araştırmacılar, seçtikleri 16Cr1Mo1Cu dökme demir numunelerine, 1000 °C sıcaklıkta yarım saat süreyle destabilizasyon işlemi uygulamışlardır. Uygulanan destabilizasyon işleminden sonra seçilen numunelerden bir grup hava ortamında, diğer grup kriyojenik ısıtım işlemle soğutulmuştur. Wang ve arkadaşlarının gerçekleştirdikleri deneylerden elde edilen sonuçlara göre, kriyojenik ısıtım işlemine tabi tutulan numunelerde kalıntı östenit miktarının belirgin olarak azaldığı görülmüş ancak kalıntı östenitin tamamının martenzite dönüşmediği tespit edilmiştir. Araştırmacılar, kriyojenik ısıtım işleminden sonra malzemenin sertlik ve aşınma direnci davranışı değerlerinde belirgin oranda iyileşme gösterdiğini ifade etmişlerdir [72].

Senthilkumar ve Rajendran yapmış oldukları çalışmada, kriyojenik ısıtım işleminin En 19 çeliğinin aşınma direncine olan etkisini araştırmışlardır. Araştırmacılar yapmış oldukları çalışmalarında, kuru ortamda aşınma testi gerçekleştirerek, derin kriyojenik ısıtım işlemi (-196 °C sıcaklık, 24 saat bekletme süresi), sığ kriyojenik ısıtım işlemi (-80 °C sıcaklık, 5 saat bekletme süresi) ve geleneksel ısıtım işlemi uygulanmış numuneleri birbirleriyle kıyaslamışlardır. Araştırmacılar seçtikleri numuneleri öncelikle, 875 °C'ye kadar ısıtmışlar ve sonrasında numuneleri yağda soğutarak sıcaklıklarını 30 °C'ye kadar düşürmüşlerdir. Soğutma işleminden sonra belirlenen numunelere sığ kriyojenik ısıtım işlemi -80 °C sıcaklıkta 5 saat süreyle ve derin kriyojenik ısıtım işlemi -196 °C sıcaklıkta 24 saat bekletme süresiyle uygulamışlardır. Kriyojenik ısıtım işleminden sonra belirlenen numuneler 200 °C sıcaklıkta 1 saat bekletme süresiyle temperleme işlemine tabi tutmuşlardır. Senthilkumar ve arkadaşının yapmış oldukları deneysel çalışma sonrasında, sığ kriyojenik ısıtım işlemi ve derin kriyojenik ısıtım işlemi uygulanan numunelerin aşınma dirençlerinin, geleneksel ısıtım işlemi uygulanan numuneye göre daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Sığ ve derin kriyojenik ısıtım işlemi uygulanmış numunelerin aşınma dirençleri, geleneksel ısıtım işlemi uygulanmış numuneye oranla sırasıyla %118,38 ile %214,94 değerlerinde artış göstermiştir [73].

Sri Siva ve arkadaşları, derin kriyojenik ısıtım işleminin 100Cr6 rulman çeliği üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Gerçekleştirdikleri çalışmada, numuneleri iki gruba

ayırılmışlardır. Her iki gruba da öncelikle östenitleme sıcaklığı olan 850 °C'yi 1 saat süreyle uygulamışlardır. Östenitleme işlemi sonrasında numuneleri, yağda soğutma işlemine tabi tutmuşlardır. Bu işlemlerden sonra birinci grup numunelere geleneksel ısıl işlem, ikinci grup numunelere ise derin kriyojenik ısıl işlem uygulamışlardır. Isıl işlemlerin ardından her iki grup numuneye 200 °C sıcaklıkta 2 saat süreyle temperleme işlemi uygulamışlardır. Sri Siva ve arkadaşlarının gerçekleştirdikleri ısıl işlemlerden elde edilen sonuçlara göre; derin kriyojenik ısıl işlem uygulanan numunelerin sertliğinin, geleneksel ısıl işlem uygulanan numunelere kıyasla %18 daha fazla iyi olduğunu ifade etmişlerdir. Aşınma direncinin ise yine aynı doğrultuda %37 oranında iyileşme gösterdiğini tespit etmişlerdir (Şekil 3.6) [74].



Şekil 3.6. İki farklı ısıl işlem uygulanan 100Cr6 rulman çeliğinin aşınma testi sonrası elde edilen yük-aşınma oranı ilişkisi [74].

Dixit ve arkadaşları, AISI D5 takım çeliği malzemesine uyguladıkları geleneksel ısıl işlem ve kriyojenik ısıl işlemin mekanik özelliklere (sertlik, aşınma direnci) etkisini araştırmışlardır. Araştırmacılar, AISI D5 takım çeliğine geleneksel ısıl işlem uygulamışlar ve ardından -185 °C sıcaklıkta 36 saat bekletme süresi ile derin kriyojenik ısıl işleme tabi tutmuşlardır. Araştırmacılar, sadece geleneksel ısıl işleme tabi tutulan numuneler ile geleneksel ısıl işlemin ardından kriyojenik ısıl işlem uygulanan numunelerin elde edilen verilerini karşılaştırmışlardır. Kriyojenik ısıl işlem uygulanmış numunelerin daha iyi mekanik performansa sahip olduğunu belirtmişlerdir. Dixit ve arkadaşları, kriyojenik ısıl işlem uygulanan AISI D5 takım çeliği numunelerinin daha iyi performans göstermesinin nedenini, kriyojenik ısıl

işlem gören numunelerin, kalıntı östenit miktarındaki düşüşüne ve bu düşüşün de numunedeki sertliğe ve aşınma direncine olumlu yönde etki etmesine atfetmişlerdir [75].

Koneshlou ve arkadaşları H13 takım çeliğine, kriyojenik ısıtım işlemi uygulayarak numunenin mikroyapısında ve mekanik özelliklerinde oluşan değişimleri incelemişlerdir. Araştırmacılar, kriyojenik ısıtım sıcaklıkları olarak, sığ kriyojenik ısıtım işlemi (-72 °C) ve derin kriyojenik ısıtım işlemi (-196 °C) kullanmışlardır. H13 takım çeliğine uygulanan kriyojenik ısıtım sıcaklığı düştükçe daha büyük oranda kalıntı östenit miktarının, martenzit yapıya dönüştüğü görülmüştür. Koneshlou ve arkadaşları, kriyojenik ısıtım sıcaklığı düştükçe karbür yoğunluğunun daha düzgün ve daha homojen hale geldiğini gözlemlemişlerdir. Araştırmacılar, numunenin mikroyapısında görünen bu değişimlerin, numunenin aşınma direncini arttırdığını ifade etmişlerdir [76].

Kriyojenik ısıtım işlemi 24 saatten 100 saate kadar bekletme süreleriyle uygulayan Kerscher ve Lang, rulman çeliği malzemesi olan AISI 52100 numunesi üzerindeki kalıntı östenit miktarının değişmesiyle doğru orantılı olarak yorulma ömürlerine olan etkisini araştırmışlardır. AISI 52100 numunesine uyguladıkları geleneksel ısıtım işleminin ardından temperleme işlemi sonrasında malzemenin sertlik değerini arttırmışlardır. Ancak bu işlemlerin devamında uyguladıkları derin kriyojenik ısıtım işlemiyle sertlik değeri azalmıştır. Yorulma ömrü değerinin ise derin kriyojenik ısıtım işlemiyle, geleneksel ısıtım işlemine göre artış gösterdiğini ifade etmişlerdir [77].

3.1. LİTERATÜR TARAMASININ GENEL DEĞERLENDİRİLMESİ

Yapılan literatür taramasıyla, kriyojenik ısıtım işlemlerinin malzemelerin mekanik özelliklerini iyileştirdiği, iyileşmenin nedeni, SKİ ve DKİ uygulaması sonucu malzemelerin östenit yapıdan martenzit yapıya dönüşmesine bu sayede daha homojen ve daha küçük tane yapıları oluşmasıyla açıklanmıştır.

Araştırmacılar, SKİ ve DKİ kriyojenik ısıtım uygulamalarını kesici takımlar ve çelikler üzerinde uygulamışlardır. Yapılan çalışmalarda, DKİ uygulanan

malzemelerin SKİ uygulanan malzemelere göre daha iyi üstünlük, SKİ uygulanan malzemelerin ise geleneksel ısıtım uygulanan malzemelere göre daha iyi üstünlük gösterdikleri belirtilmiştir. Kriyojenik ısıtım işleminin, geleneksel ısıtım işleminden farklı olarak, malzemenin tüm yapısına etki etmesi, kriyojenik ısıtım işleminin faydaları arasında gösterilmiştir.

Yapılan çalışmaların genelinde, kriyojenik ısıtım işlem sonrasında malzemelerin sertlik değerinde artış görülürken, Kersch ve Lang, tarafından yapılan çalışmada, kriyojenik ısıtım işlem sonrasında sertlik değeri %19'a yakın bir oranda azaldığı belirtilmiştir [77].

Kriyojenik ısıtım işleminden sonra uygulanan temperleme işleminin, numunelerin gerilimini gidererek, tokluğunu arttırdığı belirtilmiştir. Kriyojenik ısıtım işleminin önemli parametrelerinden olan uygulama/bekletme süreleri yaygın olarak 24 saat uygulama süresinin yanında [78–81], 40 saat [82] ve 48 saat [84, 85] kullanıldığı tespit edilmiştir. Temperleme sıcaklığı olarak ise 150 °C ile 200 °C değerleri kullanılmıştır.

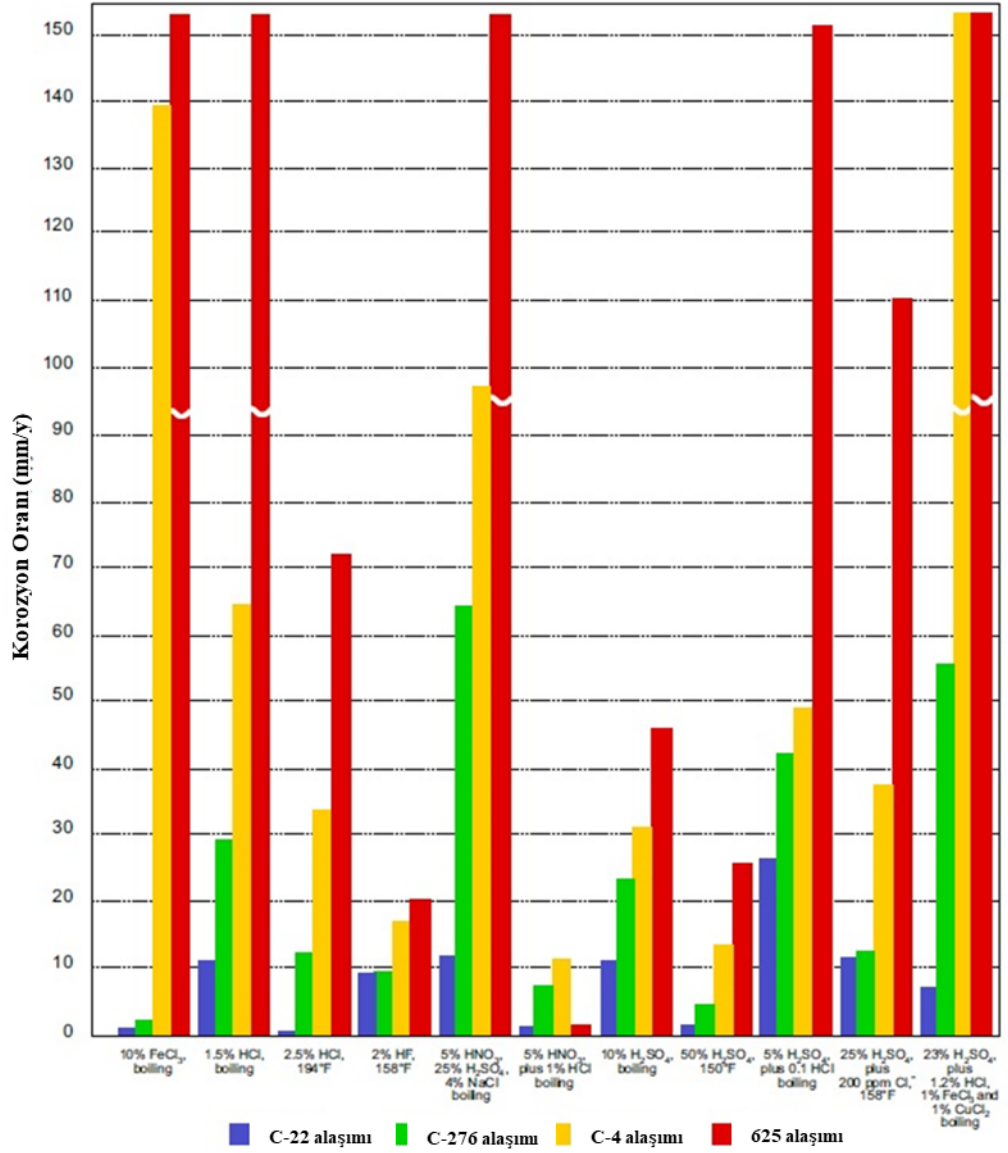
Bu çalışmada, Hastelloy C-22 süper alaşım malzemesi üzerine uygulanan kriyojenik ısıtım işlemlerinin numunelerin mekanik özelliklerine olan etkileri araştırılmıştır. Sığ kriyojenik ısıtım işlem için -80 °C sıcaklık değeri, derin kriyojenik ısıtım işlem için -145 °C sıcaklık değeri, kriyojenik ısıtım işlemi uygulama süresi olarak ise 24 saat kullanılmıştır.

BÖLÜM 4

DENEYSEL MATERYAL VE METOD

4.1. DENEY NUMUNESİ

Deneysel çalışma için seçilen Hastelloy C-22 süper alaşımı, Hastelloy C-276, C-4 alaşımları ve 625 alaşımı gibi mevcut diğer Ni-Cr-Mo alaşımlarına kıyasla daha iyi genel korozyon direncine sahip, çok yönlü nikel-krom-molibden-tungsten alaşımıdır. Hastelloy C-22 süper alaşımı, hem oksitleyici hem de oksitleyici olmayan kimyasallara karşı yüksek korozyon direncine (Şekil 4.1), çukurlaşma, çatlak korozyonu ve gerilim korozyon çatlaklarına karşı olağanüstü dirençli malzemedir [30,85].



Şekil 4.1. Hastelloy C-22 süper alaşımının diğer süper alaşımlarla korozyon direnci açısından kıyaslanma grafiği [85].

Hastelloy C-22 süper alaşımının kimyasal bileşimi Çizelge 4.1’de, fiziksel özellikleri ise Çizelge 4.2’de verilmiştir [85,86].

Çizelge 4.1. Hastelloy C-22 süper alaşımının kimyasal bileşenleri [86].

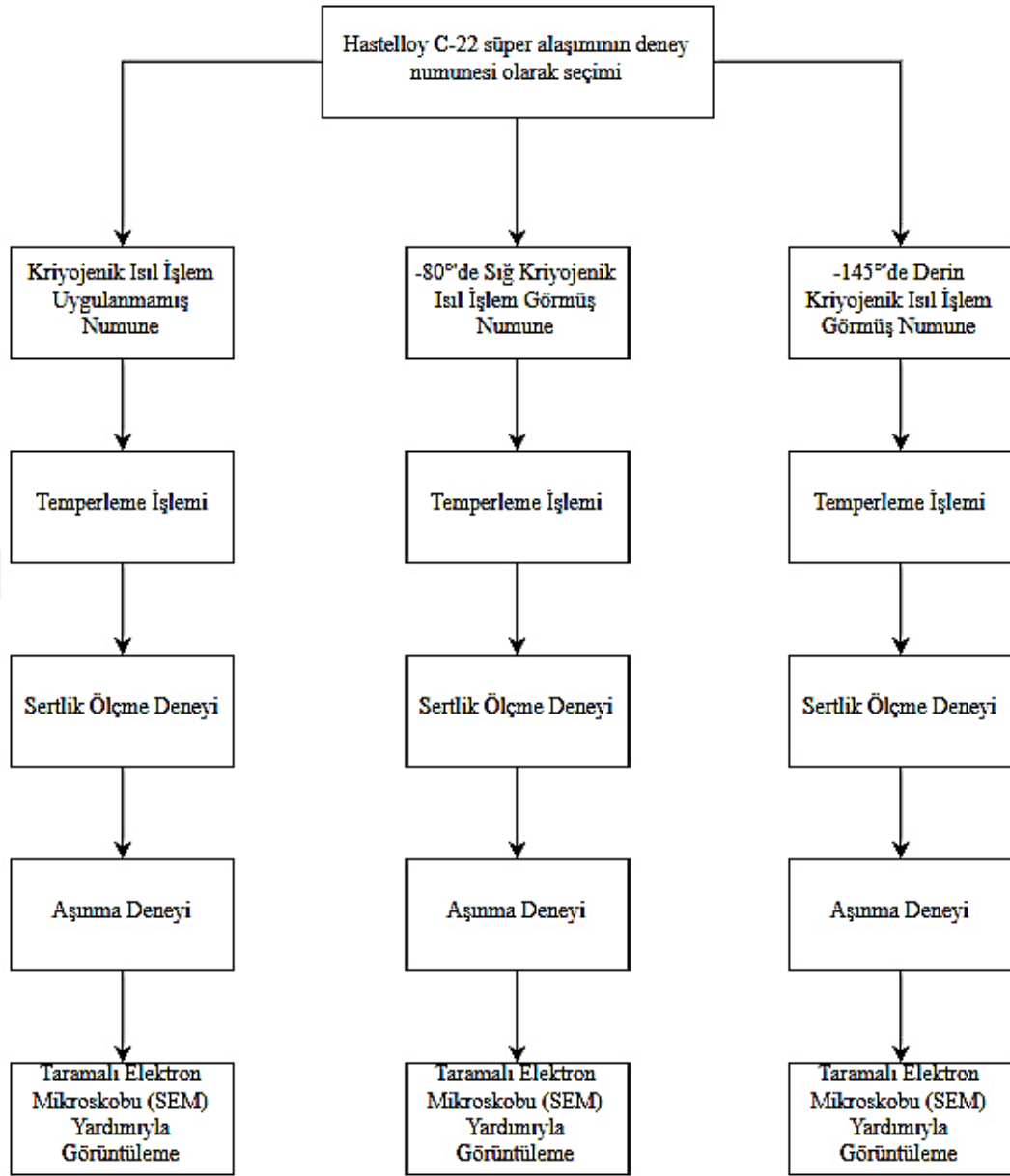
% Ağırlık	
Nikel	56
Krom	22
Molibden	13
Demir	3
Kobalt	Maks. 2.5
Tungsten	3
Mangan	Maks. 0.5
Silisyum	Maks. 0.08
Karbon	Maks. 0.01
Vanadyum	Maks. 0.35
Bakır	Maks. 0.5

Çizelge 4.2. Hastelloy C-22 süper alaşımının fiziksel özellikleri [85].

Fiziksel Özellikler (Oda Sıcaklığında)	
Yoğunluk	8,69 g/cm ³
Young Modülü	206 GPa
Isıl Genleşme Katsayısı	12,4 µm/m.°C
Elektrik Direnci	1,14 µohm.m
Erime Sıcaklığı	1357-1399 °C

4.2. DENEY NUMUNELERİNE UYGULANAN ISIL İŞLEMLER VE MEKANİK ÖZELLİKLERİN BELİRLENMESİ

Deneysel çalışmalar için temini sağlanan Hastelloy C-22 süper alaşım numunelerine kriyojenik ısıtım işlemi (sığ ve derin) uygulanmıştır. Sığ kriyojenik ısıtım işlemi (SKİ) uygulama sıcaklığı -80 °C, derin kriyojenik ısıtım işlemi (DKİ) sıcaklığı ise -146 °C olarak belirlenmiştir. Deneysel numunelerine uygulanacak ısıtım işlemi ve mekanik özellikleri belirleme süreci Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



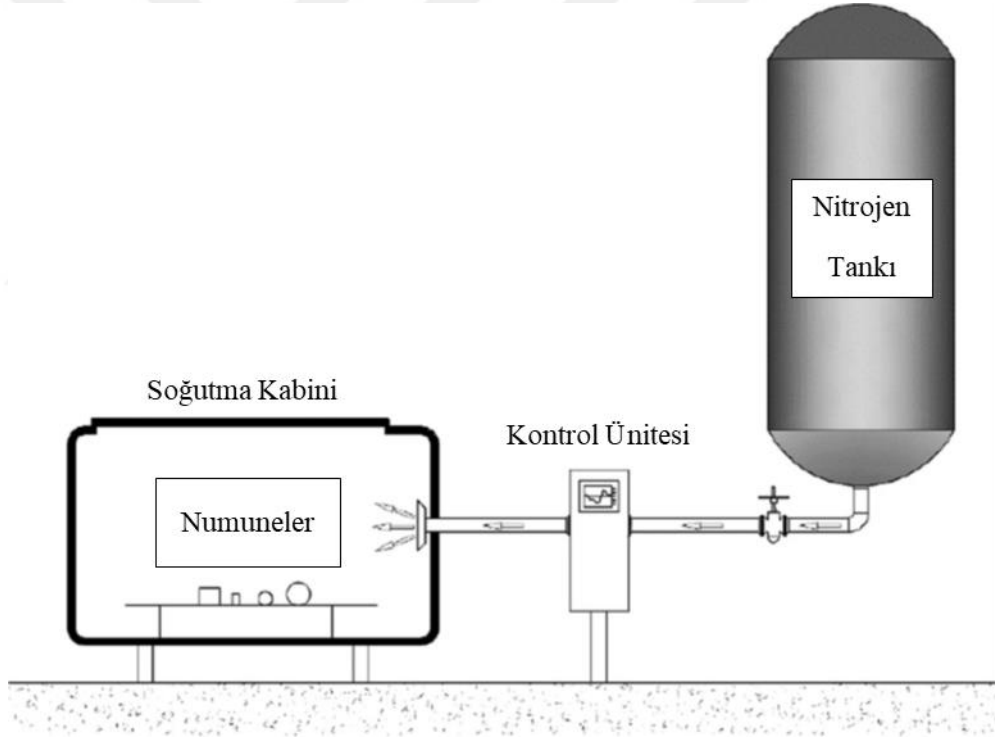
Şekil 4.2. Hastelloy C-22 süper alaşım numunelerine uygulanan ısıl işlem ve mekanik özelliklerini belirleme sürecini gösteren akış şeması.

Kriyojenik ısıl işlemin aşınma davranışı üzerindeki etkisini gözlemleyebilmek için numuneler 3 farklı grupta incelenmiştir. Birinci gruptaki numunelere kriyojenik ısıl işlem uygulanmadan 200 °C sıcaklıkta 2 saat süreyle temperleme işlemi uygulanmıştır. İkinci gruptaki numunelere ilk önce -80 °C'de SKİ uygulanıp ardından 200 °C sıcaklıkta 2 saat süreyle temperleme işlemi uygulanmıştır. Son olarak üçüncü gruptaki numunelere ise -145 °C'de DKİ uygulanmasının ardından 200 °C'de, 2 saat süre ile temperleme işlemi uygulanmıştır. Uygulanan temperleme

işlemi ile daha homojen karbür dağılımı elde edilerek iç gerilmeleri en aza indirmek hedeflenmiştir.

4.2.1. Deney Numunelerine Kriyojenik Isıl İşlem Uygulanması

Hastelloy C-22 süper alaşım numunelerine uygulanan kriyojenik ısıl işlem, bilgisayar kontrollü kriyojenik ısıl işlem ünitesinde gerçekleştirilmiştir. Literatür incelemeleri sonucunda hazırlanan numunelerin kriyojenik bekleme sıcaklıkları $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $-145\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak belirlenmiştir. Hastelloy C-22 süper alaşım numuneleri kriyojenik ısıl işlem ünitesinin içerisine uygun şekilde yerleştirilerek, hazne kapağı sıkı bir şekilde kapatılmıştır. Kriyojenik ısıl işlem uygulama ünitesi Şekil 4.3'te gösterilmiştir [87].



Şekil 4.3. Kriyojenik ısıl işlem uygulamasının şematik gösterimi [87].

Hastelloy C-22 süper alaşım numunelerine uygulanan ısıl işlemden dolayı meydana gelen termal şoklar ve mikroyapıda oluşan mikro çatlakları engellemek için cihaz üzerinde bulunan kontrol paneli ünitesinde kademeli soğutma ve ısıtma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Kademeli soğutma işlemi 6 saat sürede gerçekleştirilmiştir. $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $-145\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık değerlerine ulaşan numuneler, $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $-145\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 24

saat bekletilmiştir. Kriyojenik ısıl işlem sonrasında Hastelloy C-22 süper alaşım numuneleri tekrar kademeli olarak oda sıcaklığına 6 saat sürede getirilmiştir.

4.2.2. Temperleme İşlemi

Hastelloy C-22 süper alaşım numunelerine kriyojenik ısıl işlemde sonra numunelere temperleme işlemi uygulanmıştır. Uygulanan temperleme işlemiyle numunelerin, daha homojen karbür yapısına ulaşması ve aşınma dirençlerinin artırılması hedeflenmiştir. Temperleme işlemi literatür çalışmaları örnek alınarak 200 °C’de 2 saat süreyle uygulanmıştır. Temperleme işlemi Termal marka ısıl işlem fırınında gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.4).

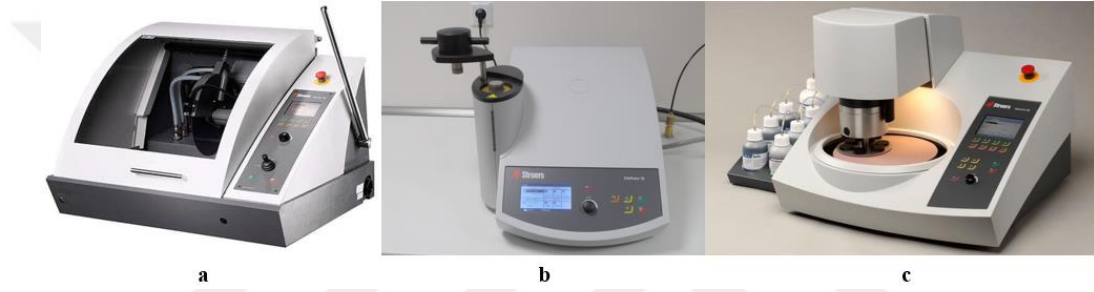


Şekil 4.4. Temperleme işleminin uygulandığı Termal marka ısıl işlem fırınının görüntüsü.

4.2.3. Metalografik İşlemler

Isıl işlem uygulanmış Hastelloy C-22 süper alaşım numuneleri metalografik işlemler için büyük ebatlarda olduğundan küçültme işlemine gerek duyulmuştur. Öncelikle Şekil 4.5a’da gösterilen Discotom 100 kesme cihazı ile küçük parçalar haline getirilmiştir. Boyutları küçültülen numuneler Secotom 50 hassas kesme cihazı ile daha küçük numuneler haline getirilmiştir. Numunelerin küçültme işlemlerinden sonra zımparalama işlemi için Şekil 4.5b’de CitoPress 10 cihazını kullanarak bakalite

alma işlemi yapılmıştır. Bakalite alınan numuneler Şekil 4.5c’de gösterilen Tegramin 30 cihazına yerleştirilerek sırası ile 240-400-600-800-1000-1200-2000 numaralı zımpara kağıdı ile kalın zımparadan ince zımparaya doğru zımparalama işlemlerinden sonra parlatma için yüzeyleri temizlenmiştir. Yüzey temizleme işlemlerinden sonra 3 mikron elmas süspansiyon kullanılarak yüzey parlatma işlemi yapılmıştır. Hazırlanan numuneler, %5 oksalik asit ve %95 hidroklorik asit çözeltisi ile 30 saat süreyle dağlanmıştır. Dağlama işleminin ardından numunelerin mikroyapı görüntülemeleri Nikon ters metalurjik mikroskop yardımıyla gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.6).



Şekil 4.5. Metalografik cihazların görüntüsü a) Discotom 100 kesme, b) CitoPress 10 bakalit alma, c) Tegramin 30 zımparalama parlatma cihazı.



Şekil 4.6. Nikon ters metalurjik mikroskop görüntüsü.

4.2.4. X Işını Kırınım Yöntemi (XRD) Analizi

Hastelloy C-22 süper alaşım numunelerine uygulanan SKİ ve DKİ sonrasında, numunelerin mikroyapılarında oluşan değişimleri incelemek ve değerlendirmek için X ışını kırınım yöntemiyle (XRD) görüntüleme yapılmıştır. XRD analizleri, Karabük

Üniversitesi MARGEM Laboratuvarında bulunan Rigaku Ultra IV XRD cihazı (Şekil 4.7) ile 40 kV voltaj, 40 mA akım 10 °- 120 °C arasındaki açı ölçüleriyle, 0,02 ° adım tarama büyüklüğünde 3 °/dk hız ile gerçekleştirilmiştir.

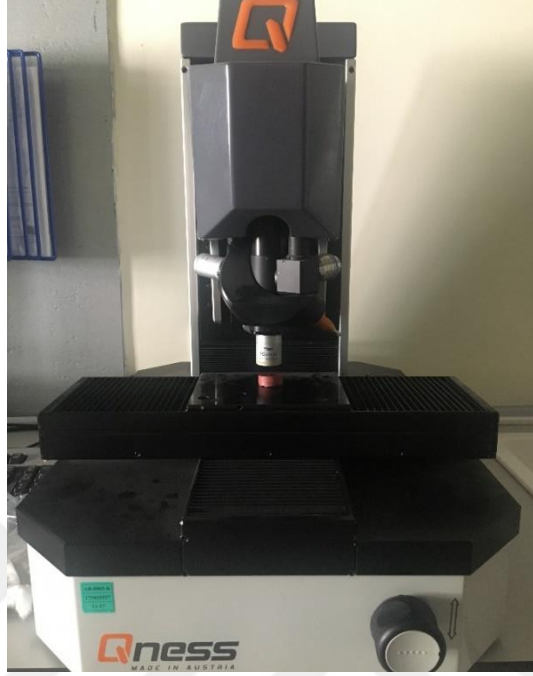


Şekil 4.7. XRD cihazı görüntüsü.

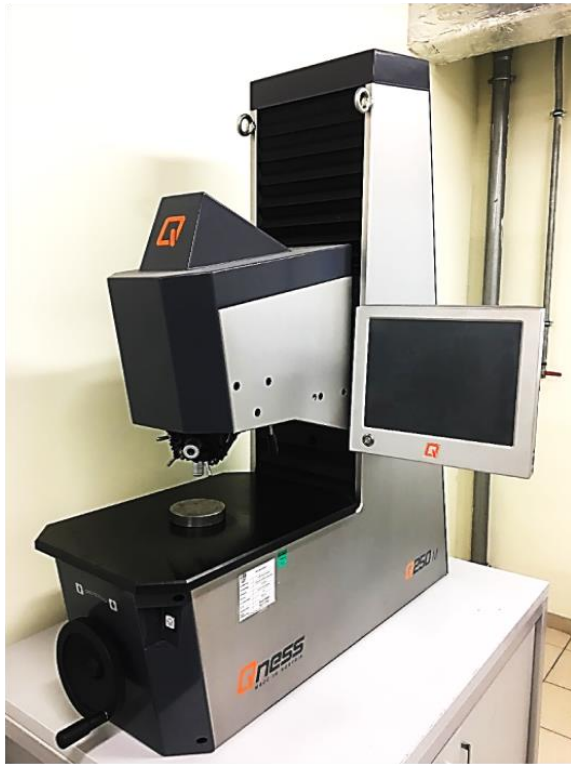
4.2.5. Sertlik Ölçümü

Hastelloy C-22 süper alaşım numunelerine uygulanan kriyojenik ısıt işlemler ve temperleme işleminin meydana getirdiği sonuçları belirlemek için numunelerin makro ve mikro sertlik ölçümleri yapılmıştır. Makro ve mikro sertlik için 6 adet numune hazırlanmıştır. Mikro sertlik ölçümleri Karabük Üniversitesi MARGEM laboratuvarında bulunan QNESS Q10 A+ Mikro sertlik ölçüm cihazı (Şekil 4.8) ile her bir numune için 10 ayrı bölgeden sertlik değeri alınarak gerçekleştirilmiştir. Mikro sertlik ölçümleri için Vickers sertlik ölçme deneyi 10 s süreyle 5 kg yük uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Makro sertlik ölçümleri ise yine Karabük Üniversitesi MARGEM laboratuvarında bulunan QNESS Q250M Makro sertlik ölçüm cihazı (Şekil 4.9) kullanılmış olup her bir numune için üç farklı bölgeden ayrı ayrı alınan sertlik değerleri ölçümü yapılmıştır. Hastelloy C-22 süper alaşım numunelerinin makro sertlik değerleri Brinell sertlik cinsinden ölçülmüştür. Brinell

sertlik ölçümünde, 2,5 mm çapındaki tungsten karbür bilye, numuneye 62,5 kg yük ile 15 s süreyle uygulanmıştır.



Şekil 4.8. Mikro sertlik ölçüm cihazı görüntüsü.



Şekil 4.9. Makro sertlik ölçüm cihazı görüntüsü.

4.2.6. Aşınma Deneyleri

Kriyojenik ısıtma işlemi ve temperleme işlemi uygulanan Hastelloy C-22 süper alaşım numuneleri, Karabük Üniversitesi MARGEM Laboratuvarlarında bulunan UTS Tribometer T 10/20 markalı aşınma cihazında (Şekil 4.10) deneylere tabi tutulmuştur. Aşınma deneyleri oda sıcaklığında 10 N, 20 N ve 40 N yüklerle maruz bırakılarak, 72 mm/s sabit kayma hızında toplamda 1000 m yol kat edilerek yapılmıştır. Tüm yüzeylerde aynı yüzey kalitesinin sağlanması için aşınma testlerine başlamadan önce yüzeyler 220 mesh SIC zımpara ile zımparalanmıştır. Aşınma deneyleri sırasında sürtünme kuvveti verileri kaydedilmiştir. Hastelloy C-22 süper alaşım numunesinin aşınma izleri taramalı elektron mikroskopuyla (SEM) incelenmiştir. Aşınma deneylerinin parametreleri Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Aşınma deney parametreleri.

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



Şekil 4.10. Aşınma deney cihazı görüntüsü.

Aşınma oranı, denklem 4.1 kullanılarak 1000 m sonunda aşınma hacmi kaybı olarak hesaplanmıştır [88].

$$V_w = \frac{2ab}{3} c \quad (4.1)$$

- V_w = Hacimsel aşınma kaybı
 c = Strok mesafesi (kurs boyu)
 a = Aşınma genişliği
 b = Aşınma derinliği

Denklem 4.1 ile elde edilen hacimsel aşınma kaybı, toplam kayma mesafesine bölünerek aşınma oranı parametresi elde edilmiştir.

4.2.7. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Yardımıyla Görüntüleme

3 ayrı numune üzerinde (KİG, SKİ ve DKİ) uygulanan aşınma deneyleri sonucunda ortaya çıkan aşınan bölgelerin aşınma tipleri ve mikroyapılarını analiz etmek için Karabük Üniversitesi MARGEM laboratuvarında bulunan Carl Zeiss Ultra Plus Gemini Fesem markalı taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır (Şekil 4.11).



Şekil 4.11. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü.

BÖLÜM 5

DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

5.1. SERTLİK ÖLÇÜM TESTLERİ

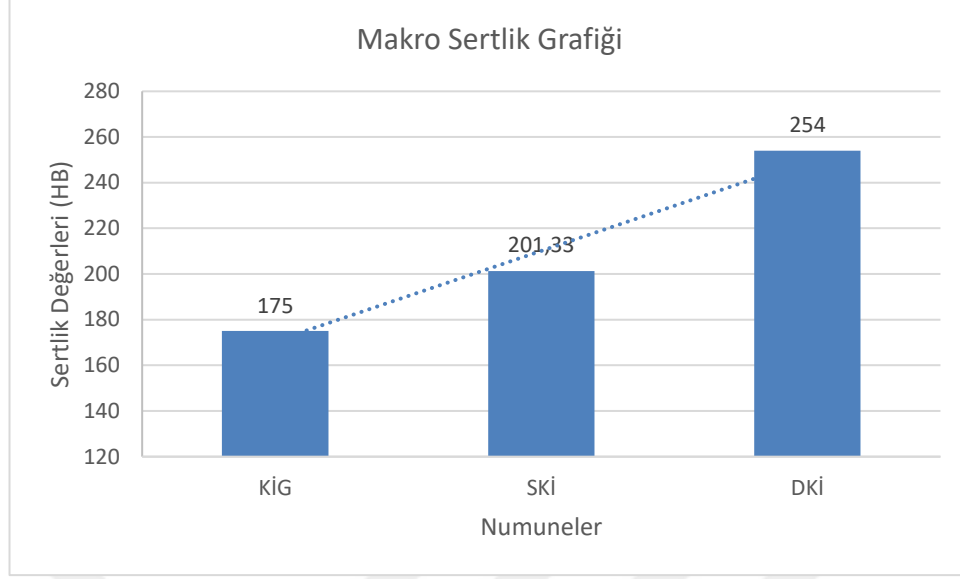
Hastelloy C-22 süper alaşımı numunesine uygulanan kriyojenik ısıtma işleminin numunedeki sertlik değeri değişimini belirlemek için makro ve mikro sertlik ölçüm testleri yapılmıştır. Malzemelerin sertlik değerlerinin artışıyla aşınma dirençlerinin artışı birbiri ile doğru orantılıdır. Malzemelerdeki sertlik artışı, kullanılan malzemenin yorulma ömrünü de arttırmaktadır. Kriyojenik ısıtma işlemi, malzemenin sertlik değerini arttırmaktadır [89].

5.1.1. Makro Sertlik Ölçüm Testleri

Makro sertlik ölçüm testleri, her bir numune için yapılan üç adet ölçümün aritmetik ortalama değerleri esas alınarak elde edilmiştir. Çizelge 5.1’de ölçülen değerler ve ortalamaları verilmiştir. Makro sertlik ölçüm testlerinin sonuçları (Çizelge 5.1) Şekil 5.1’de grafik olarak gösterilmiştir.

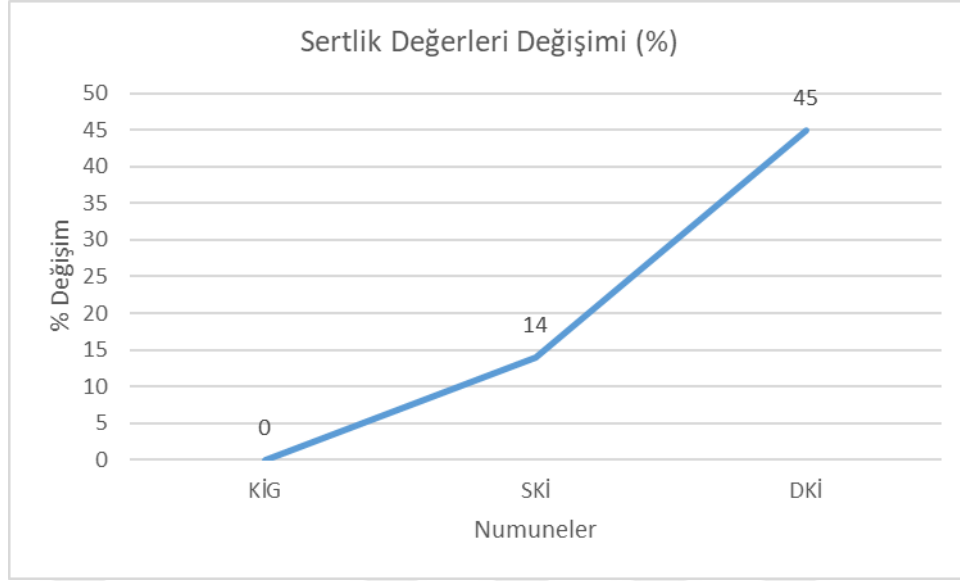
Çizelge 5.1. Makro sertlik ölçüm testleri sonuçları.

	KİG Numune	SKİ Uygulanan Numune	DKİ Uygulanan Numune
Brinell Sertlik Değerleri	171 HB	202 HB	254 HB
	176HB	198 HB	252 HB
	178 HB	204 HB	256 HB
Ortalama Değer	175 HB	201,33 HB	254 HB



Şekil 5.1. Numunelerin makro sertlik ölçüm değerleri grafiği.

Sertlik ölçüm değerleri incelendiğinde SKİ ve DKİ'ye tabi tutulan numunelerin sertlik değerleri gözle görülür şekilde artış göstermiştir. Sertlik değerleri, numunelere uygulanan işlemlere göre değişiklik göstermiştir. En yüksek makro sertlik değerleri DKİ uygulanmış numunelerde elde edilmiştir (254 HB). DKİ uygulanmış numunenin, SKİ uygulanan numuneden %26 oranında (201,33 HB), SKİ uygulanan numunenin, KİG numuneden %14 oranında (175 HB), DKİ uygulanan numunenin, KİG numuneden %45 oranında daha yüksek bir makro sertlik oranına sahip oldukları tespit edilmiştir (Şekil 5.2).



Şekil 5.2. Numunelerin makro sertlik değerlerindeki yüzde (%) değişimi grafiği.

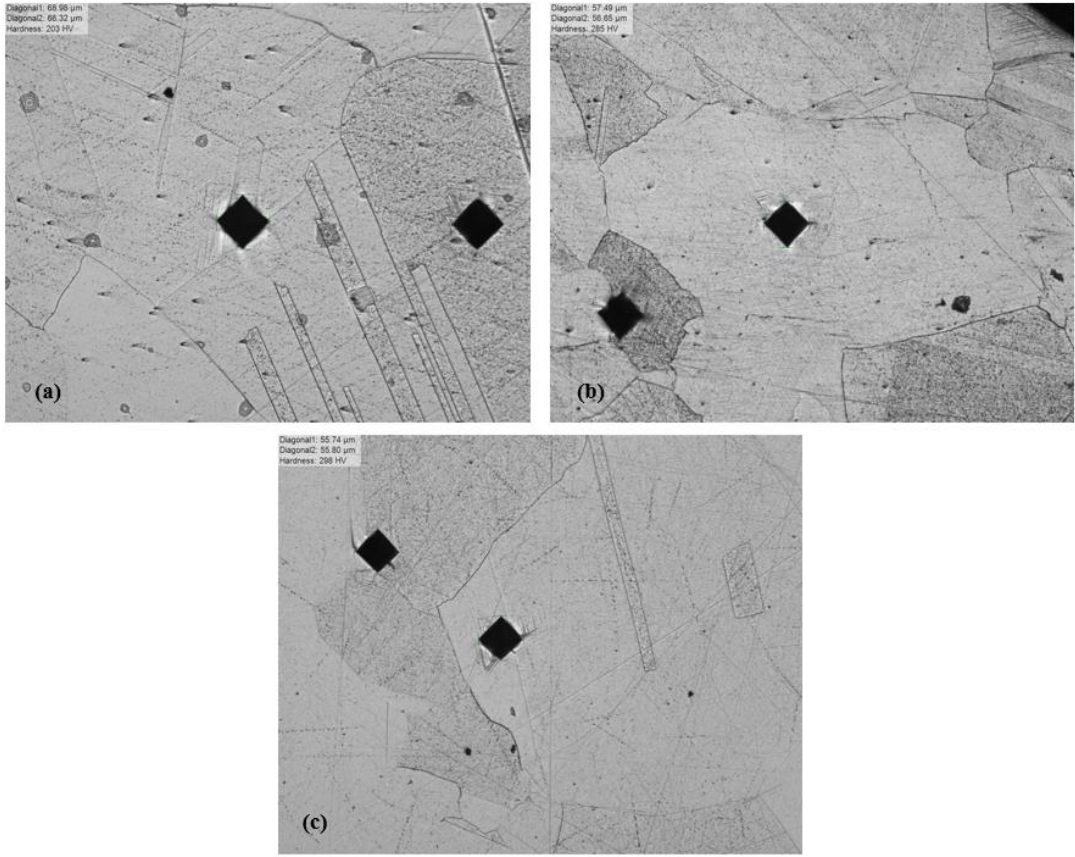
5.1.2. Mikro Sertlik Ölçüm Testleri

Mikro sertlik ölçüm testleri, her bir numune için yapılan 10 adet ölçümün aritmetik ortalama değerleri esas alınarak elde edilmiştir. Çizelge 5.2’de ölçülen mikro sertlik değerleri ve ortalamaları verilmiştir.

Çizelge 5.2. Mikro sertlik ölçüm testleri sonuçları.

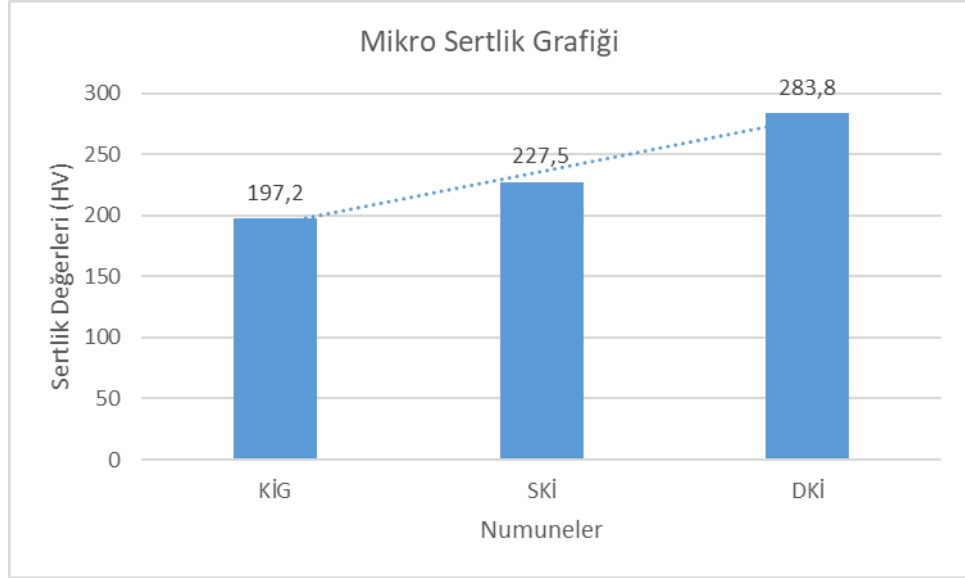
	Kriyojenik İşlem Görmemiş Numune	Sığ Kriyojenik İşlem Uygulanmış Numune	Derin Kriyojenik İşlem Uygulanmış Numune
Vickers Sertlik Değerleri	197 HV	229 HV	253 HV
	211 HV	225 HV	318 HV
	181 HV	218 HV	323 HV
	208 HV	253 HV	289 HV
	198 HV	267 HV	318 HV
	193 HV	285 HV	229 HV
	203 HV	202 HV	242 HV
	193 HV	197 HV	329 HV
	200 HV	199 HV	298 HV
	188 HV	200 HV	239 HV
Ortalama Değer	197,2 HV	227,5 HV	283,8 HV

Mikro sertlik ölçüm testleri uygulamaları sonrası 10x büyütmeli (a) KİG numune, (b) SKİ uygulanmış numune, (c) DKİ uygulanmış numuneye ait mikro sertlik ölçüm görüntüleri Şekil 5.3’te gösterilmiştir.

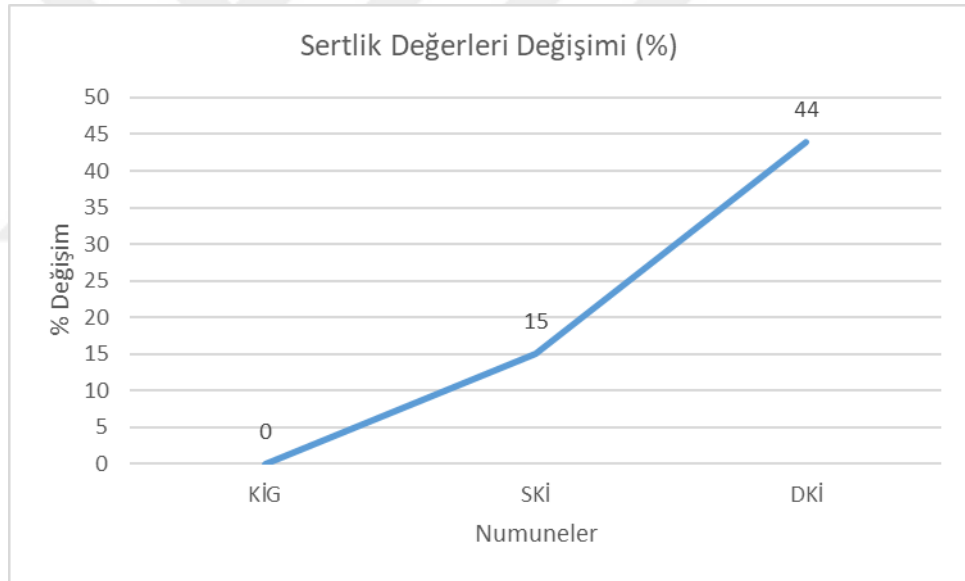


Şekil 5.3. 10x büyütmeli mikro sertlik ölçüm (a) KİG, (b) SKİ, (c) DKİ görüntüleri.

Mikro sertlik ölçüm değerleri incelendiğinde SKİ ve DKİ'ye tabi tutulan numunelerin sertlik değerleri belirgin bir şekilde artış göstermiştir. En büyük mikro sertlik değeri DKİ uygulanan numunelerde elde edilmiştir (283,8 HV). DKİ uygulanan numunenin, SKİ uygulanan numuneden %24 oranında (227,5 HV), SKİ uygulanan numunenin, KİG numuneden %15 oranında (197,2 HV), DKİ uygulanan numunenin, KİG numuneden %44 oranında daha yüksek bir mikro sertlik oranına sahip olduğu deney sonuçlarında görülmektedir (Şekil 5.4, Şekil 5.5).



Şekil 5.4. Numunelerin mikro sertlik ölçüm değerleri grafiği.



Şekil 5.5. Numunelerin mikro sertlik değerlerindeki yüzde (%) değerimi grafiği.

5.1.3. Sertlik Ölçüm Sonuçlarının Genel Değerlendirilmesi

Çizelge 5.3'te KİG numunesinin, SKİ uygulanmış numunenin ve DKİ uygulanmış numunenin makro ve mikro sertlik değerleri verilmiştir.

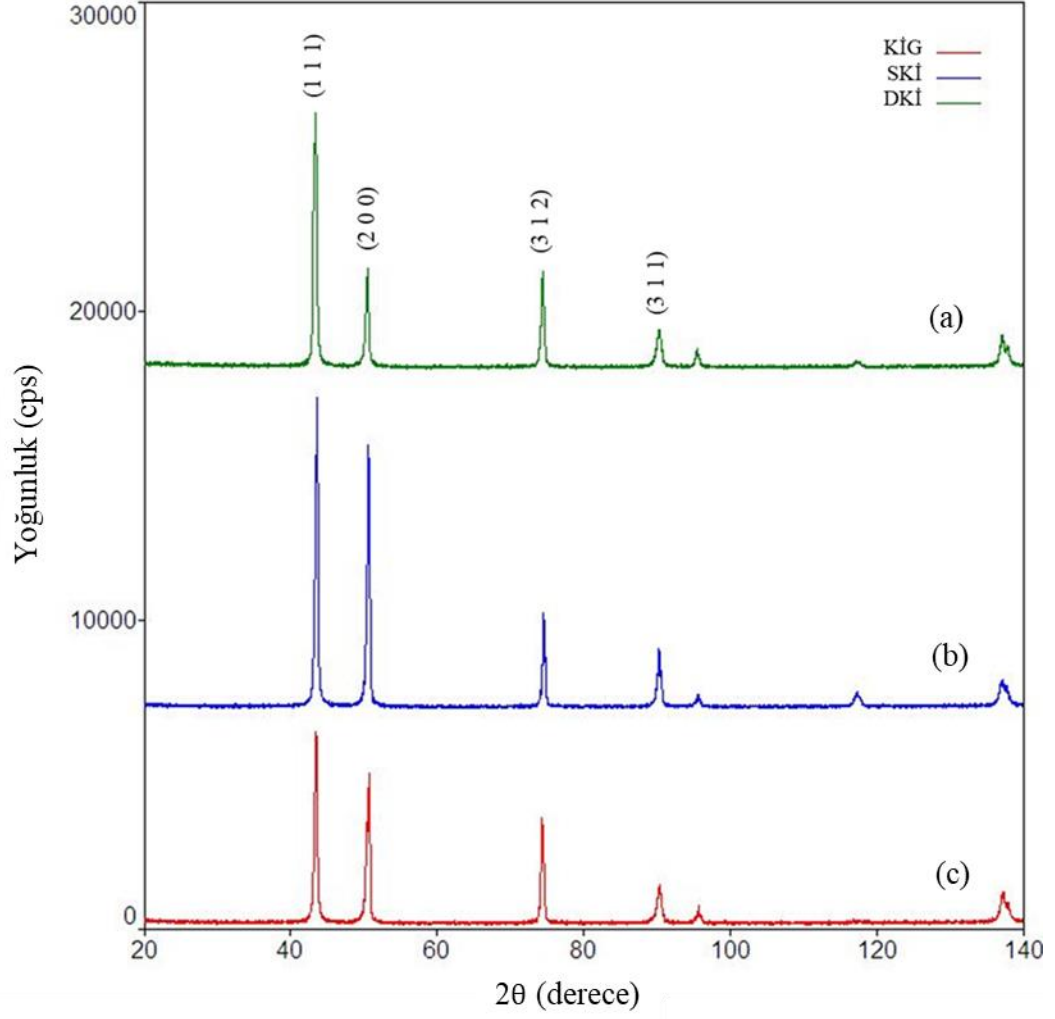
Çizelge 5.3. Numunelerin makro ve mikro sertlik ölçüm testleri değerleri.

Numuneler	Makro Sertlik (HB)	Mikro Sertlik (HV)
Kriyojenik İşlem Görmemiş (KİG)	175	197,2
Sığ Kriyojenik İşlem Uygulanmış (SKİ)	201,33	227,5
Derin Kriyojenik İşlem Uygulanmış (DKİ)	254	283,8

SKİ ve DKİ uygulanmış numunelerdeki kalıntı östenit miktarının kriyojenik ısı işlem sonrasında martenzite dönüşmesi sonucu numunelerin makro ve mikro sertlik değerleri artış göstermiştir. Sığ ve derin kriyojenik ısı işlemlerin numunelerin sertlik değerinin artışına neden olması, sıfır altı ısı işlemlerin numuneleri östenitik yapıdan martenzitik yapıya dönüştürmesi ile numunelerin martenzitik yapılarını homojen olarak dağıtmasına bağlanmıştır [13,15]. Oluşan homojen yapı, numunelerdeki kararlılığı arttırdığı için numunelerin sertliğini de arttırmıştır. Ayrıca, tane boyutlarının küçülmesiyle tane sınırlarının sayısı artmıştır. Tane sınırlarının çok olması, malzemenin tane yapısındaki düzlemlerin birbiri üzerinden kaymasına engel olmaktadır. Düzlemlerin birbiri üzerinden zor bir şekilde kayması, malzemelerin mekanik özelliklerini dolayısıyla sertlik değerlerini arttırmaktadır. Yapılan literatür araştırmalarında, kriyojenik ısı işlem uygulanmış numunelerin, sertlik değerinin arttığı belirtilmiştir [90]. Malzemelere uygulanmış olan kriyojenik ısı işlem, aşınma direncini ve tokluk değerini arttırmaktadır [42]. Elde edilen bulgular, literatürdeki çalışmalarla örtüşmektedir.

5.2. XRD ANALİZLERİ

Hastelloy C-22 süper alaşımının, KİG numunenin, SKİ ve DKİ uygulanmış numunelerin kristalografik özellikleri ve faz bileşimleri, XRD analizi ile incelenmiştir. KİG, SKİ ve DKİ uygulanmış numunelerin XRD analiz grafikleri (Şekil 5.6)'da gösterilmiştir.



Şekil 5.6. Hastelloy C-22 süper alaşım numunelerinin XRD analiz grafikleri, (a) DKİ, (b) SKİ, (c) KİG.

Uygulanan ısı işlemlere göre piklerin yarı yükseklikteki pik genişliği (FWHM) değerleri Çizelge 5.4'te verilmiştir.

Çizelge 5.4. Uygulanan ısı işlemlerin yarı yükseklikteki pik genişliği değerleri.

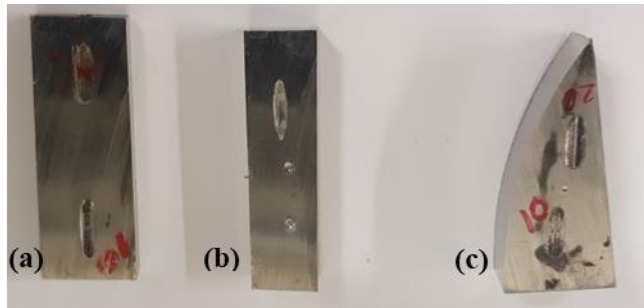
2θ (°)	Pik	FWHM (°)		
		KİG	SKİ	DKİ
43,47	111	0,223	0,385	0,403
50,33	200	0,21	0,27	0,419
74,32	312	0,28	0,275	0,35
90,363	311	0,309	0,622	0,658

Kriyojenik ısı işlem uygulanmış veya uygulanmamış numunelerin faz değişimleri XRD analiz sonuçlarına göre, bütün numunelerde Nikel (Ni), krom (Cr), molibden

(Mo) ve demire (Fe) ait karakteristik pikler gözlemlenmiştir. Bu gözlenen piklerden, $2\theta=43$ derecedeki 111 düzleminin Ni'ye ait olduğu, $2\theta=50$ derecedeki 200 düzleminin Cr'ye ait olduğu, $2\theta=74$ derecedeki 312 düzleminin Mo'ya ait olduğu, $2\theta=90$ derecedeki 311 düzleminin de Fe'ye ait olduğu önceki yapılan çalışmalarla da doğrulanmıştır. Kriyojenik ısıtma işlemi uygulanmış numunelerin pik şiddetlerinin artmış olduğu gözlemlenmiştir. Bu artışın sebebi, uygulanan kriyojenik ısıtma işlemi sonucunda düzlem yönelmelerinde farklılaşmalar olduğu ve bu yüzden pik şiddetlerinde artmanın meydana geldiği düşünülmektedir. Ayrıca yapılan kriyojenik ısıtma işlemi malzemenin iç yapısında yeni bir faz oluşumuna sebep olmadığı da söylenebilir. Kriyojenik ısıtma işlemi neticesinde XRD grafiklerinde FWHM olarak adlandırılan değerlerde de değişimler gözlemlenmiştir. Grafikte gördüğümüz FWHM değerlerinin artmasıyla birlikte tane boyutunun azalması arasında bir ilişki literatürde de görülmüştür [91–93]. Sonuç olarak kriyojenik ısıtma işlemi, Hastelloy C-22 süper alaşımının tane boyutunun küçüldüğü tespit edilmiştir.

5.3. AŞINMA DENEYLERİ

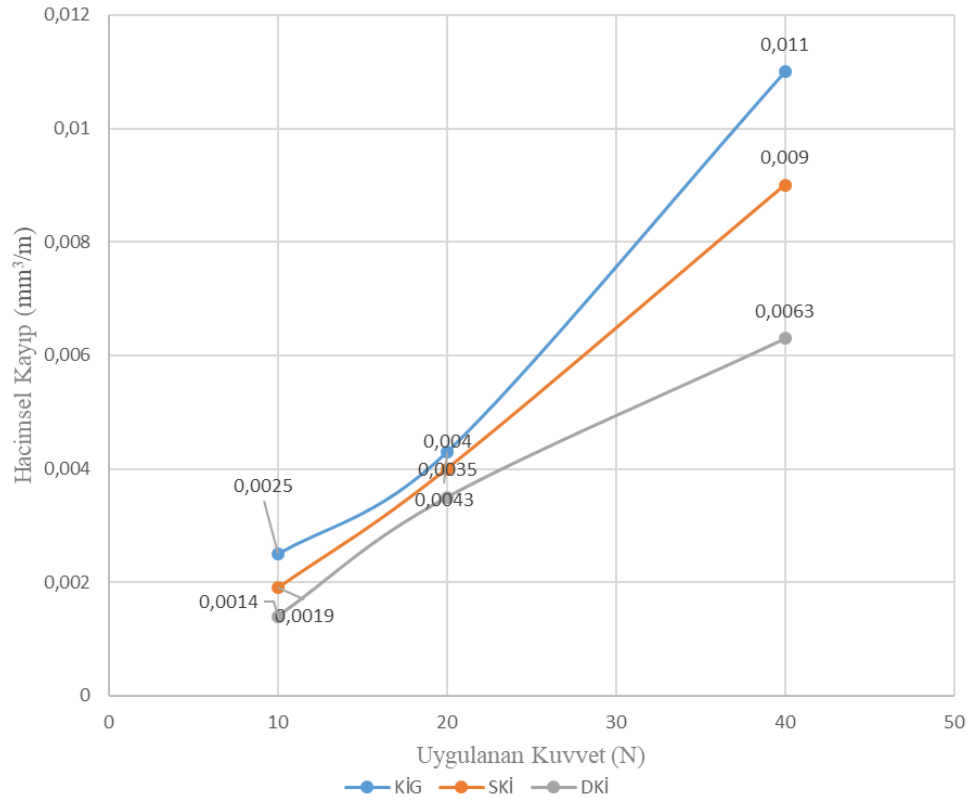
Hastelloy C-22 numunesine uygulanan kriyojenik ısıtma işlemi, malzemenin aşınma direncine olan etkilerini gözlemek için aşınma deneyleri yapılmıştır. Aşınma deneyleri ile malzemenin hacimsel kaybı, sürtünme kuvveti ve aşınma derinlikleri belirlenmiştir. Aşınma deneylerinde kullanılan numuneler Şekil 5.7'de gösterilmiştir.



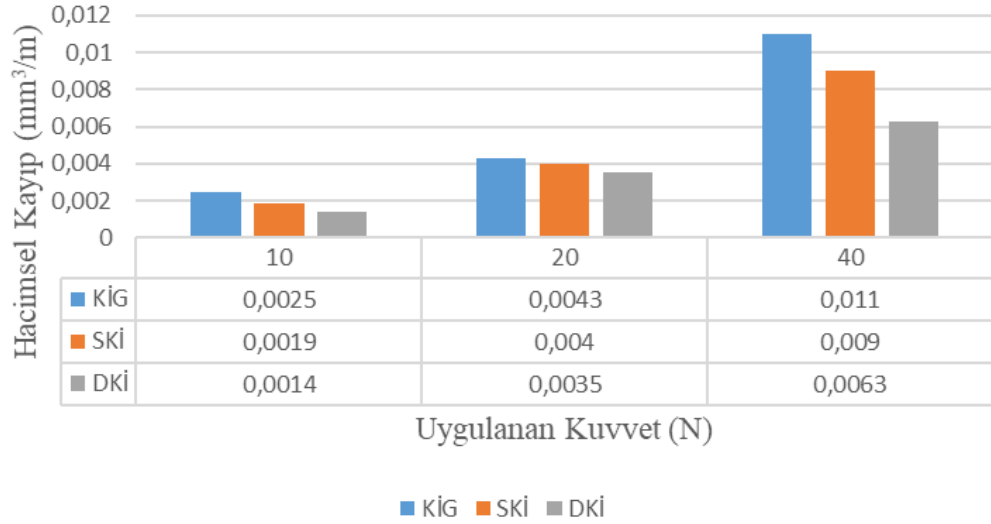
Şekil 5.7. Aşınma deneyi numuneleri görüntüsü (a) DKİ, (b) SKİ ve (c) KİG

Aşınma deneyleri ile hacimsel kayba uğrayan numunelerin grafikleri Şekil 5.8'de, gösterilmiştir.

(a) Hacimsel Kayıp Grafiği

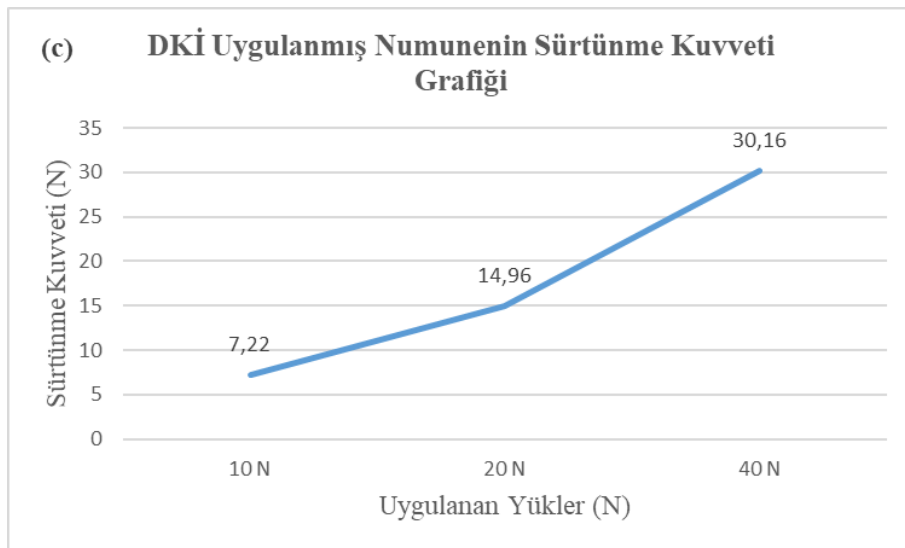
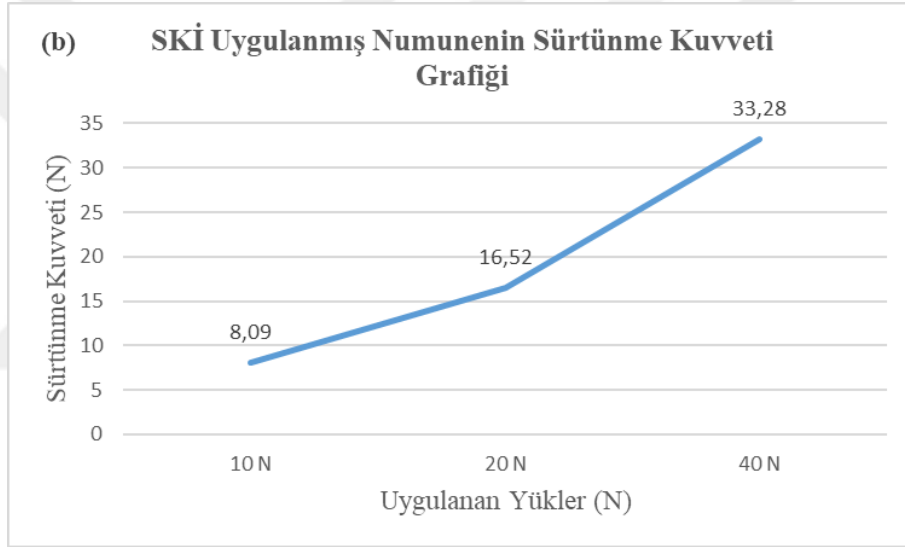
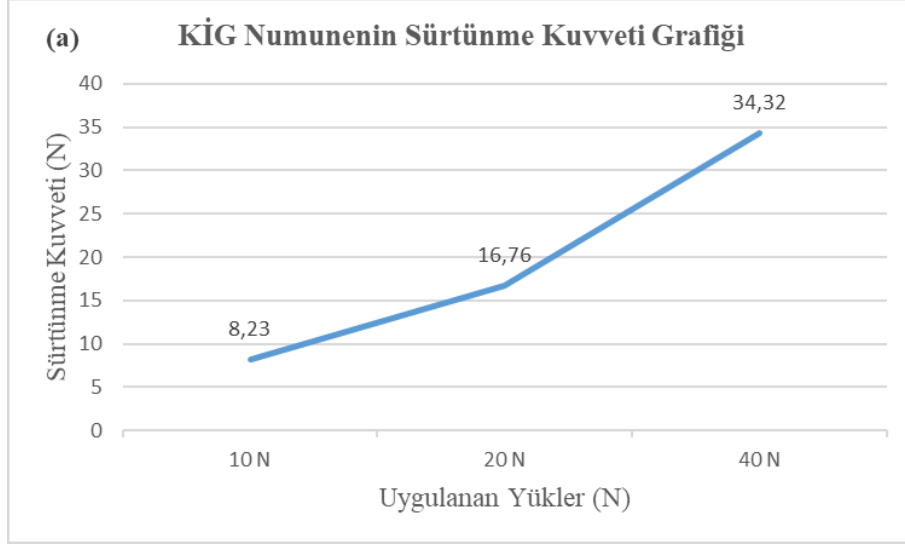


(b) Hacimsel Kayıp Grafiği



Şekil 5.8. KİG, SKİ ve DKİ uygulanmış numunelerin hacimsel kayıp (a) çizgi grafiği, (b) sütun grafiği.

Şekil 5.8 incelendiğinde, kriyojenik ısı işlem uygulanan numunelerin, kriyojenik ısı işlem görmemiş numuneye oranla daha az aşınma kaybına uğradığı görülmüştür. Literatürde belirtilen çalışmalarda sertlik değerleri yüksek olan malzemelerin daha çok aşınma direncine sahip olduğu belirtilmiştir [42, 49, 64, 75]. Şekil 5.8 ve Şekil 5.9'da KİG numunesinin, SKİ ve DKİ uygulanmış numunelerin 10 N, 20 N ve 40 N yük altındaki hacimsel aşınma kayıpları gösterilmiştir. 10 N yük altında KİG numunenin hacimsel kaybı $0,0025 \text{ mm}^3/\text{m}$ olarak hesaplanırken, SKİ uygulanmış numunenin hacimsel kaybı $0,0019 \text{ mm}^3/\text{m}$, DKİ uygulanmış numunenin hacimsel kaybı ise $0,0014 \text{ mm}^3/\text{m}$ olarak hesaplanmıştır. 20 N yük altında KİG numunenin hacimsel kaybı $0,0043 \text{ mm}^3/\text{m}$ olarak hesaplanırken, SKİ uygulanmış numunenin hacimsel kaybı $0,004 \text{ mm}^3/\text{m}$, DKİ uygulanmış numunenin hacimsel kaybı ise $0,0035 \text{ mm}^3/\text{m}$ olarak hesaplanmıştır. 40 N yük altında ise KİG numunenin hacimsel kaybı $0,011 \text{ mm}^3/\text{m}$ olarak hesaplanırken, SKİ uygulanmış numunenin hacimsel kaybı $0,009 \text{ mm}^3/\text{m}$, DKİ uygulanmış numunenin hacimsel kaybı ise $0,0063 \text{ mm}^3/\text{m}$ olarak hesaplanmıştır. Öte yandan artan yüklerle doğru orantılı olarak hacimsel aşınma oranları da artış göstermiştir. Kriyojenik ısı işlem uygulanmayan numunenin ve kriyojenik ısı işlem uygulanan numunelerin sürtünme katsayılarının grafiksel gösterimi Şekil 5.9'da verilmiştir.



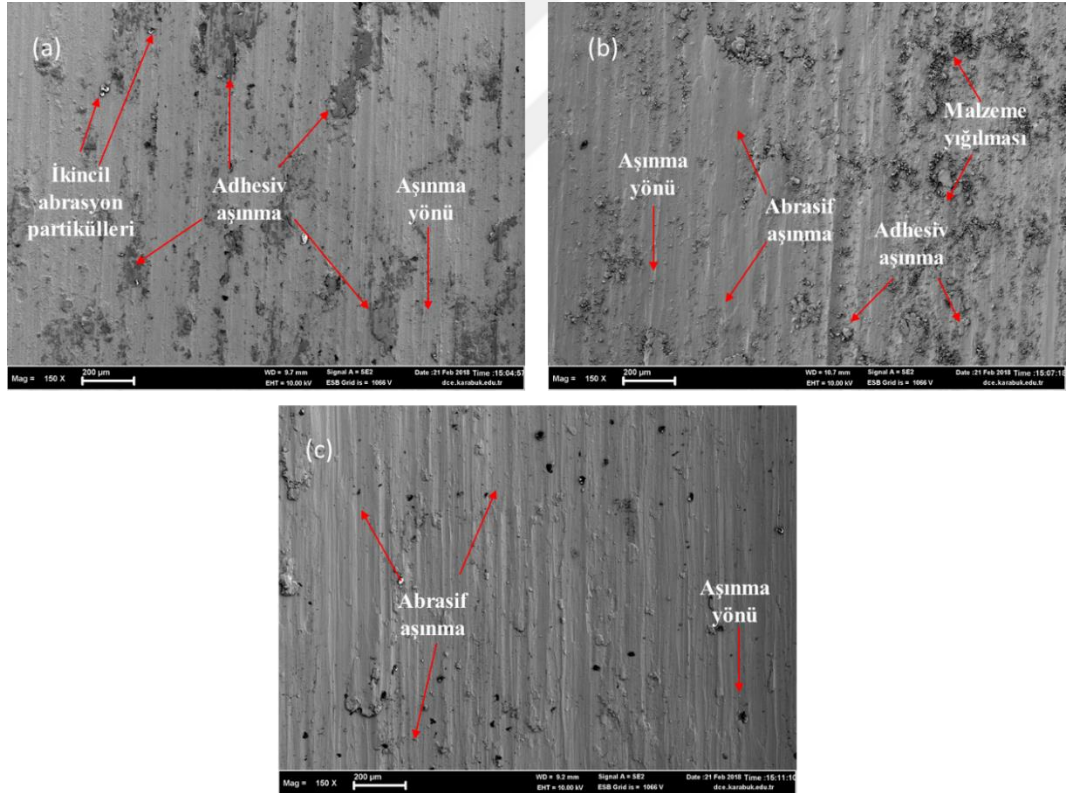
Şekil 5.9. Kriyojenik ısı işlem uygulanmış numunelerin sürtünme kuvveti grafiği (a) KİG, (b) SKİ ve (c) DKİ.

Aşınma ile sürtünme katsayısı birbirine bağlı parametrelerdir. Kriyojenik ısıtma işlemi uygulanmamış numunenin, kriyojenik ısıtma işlemi uygulanmış numunelere oranla sürtünme katsayısı daha yüksek elde edilmiştir (Çizelge 5.5).

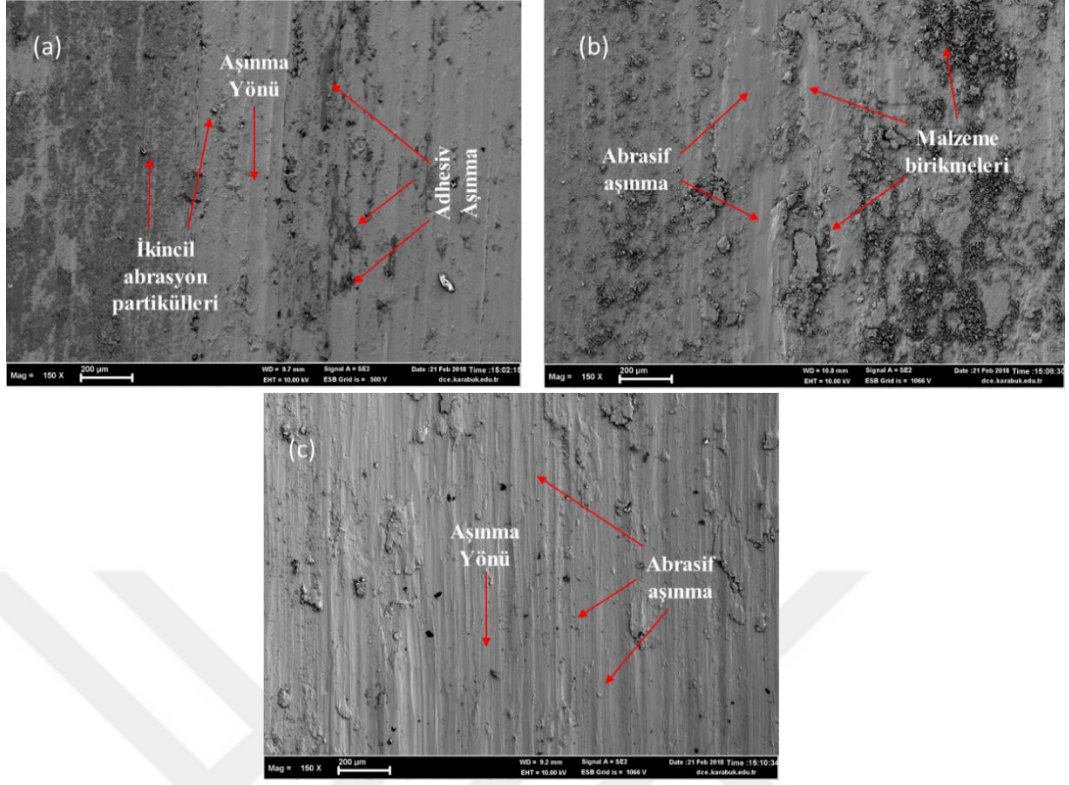
Çizelge 5.5. Numunelerin 10 N, 20 N, 40 N yük altında oluşan ortalama sürtünme katsayısı değerleri.

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

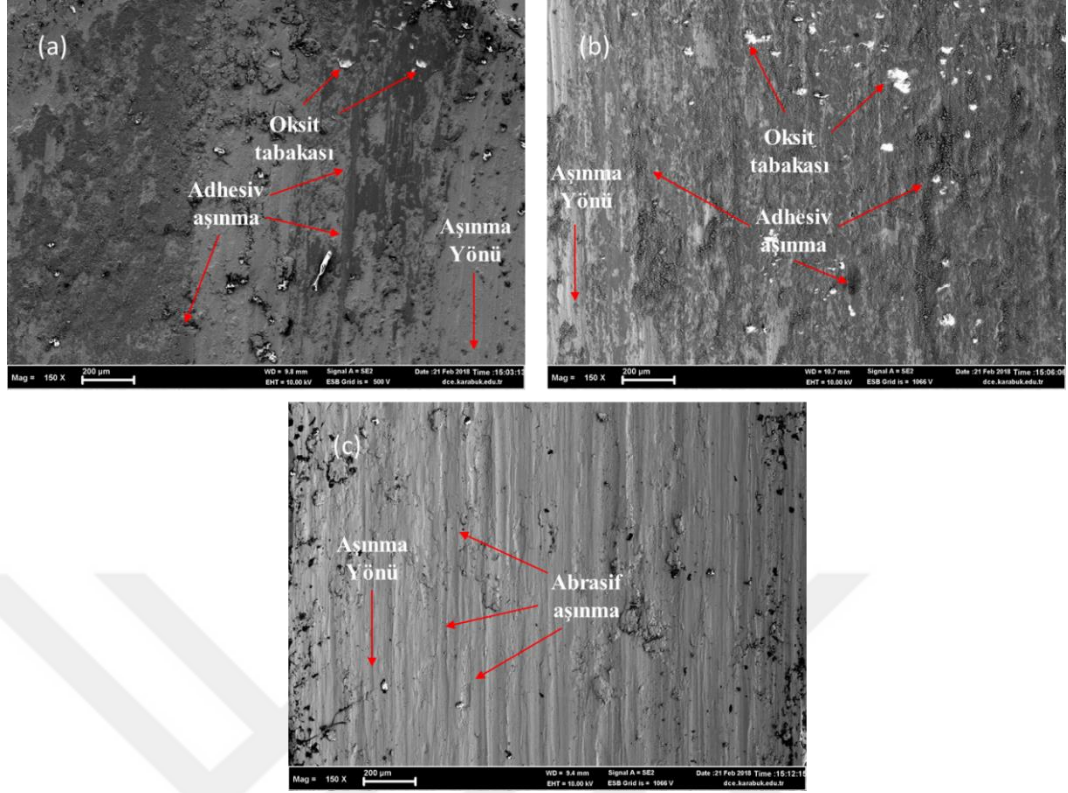
3 farklı yük (10 N, 20 N ve 40 N) altında yapılan aşınma deneyleri sonucu numuneler yüzeyinden alınan SEM görüntülerinde (Şekil 5.10, Şekil 5.11, Şekil 5.12) adhesiv, abrasif ve ikincil abrasif aşınma türleri olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.10. 10 N yük altında yapılan aşınma deneylerinde numunelerin yüzeyinde oluşan aşınma türlerinin SEM görüntüleri (a) KİG, (b) SKİ ve (c) DKİ.



Şekil 5.11. 20 N yük altında yapılan aşınma deneylerinde numunelerin yüzeyinde oluşan aşınma türlerinin SEM görüntüleri (a) KİG, (b) SKİ ve (c) DKİ.

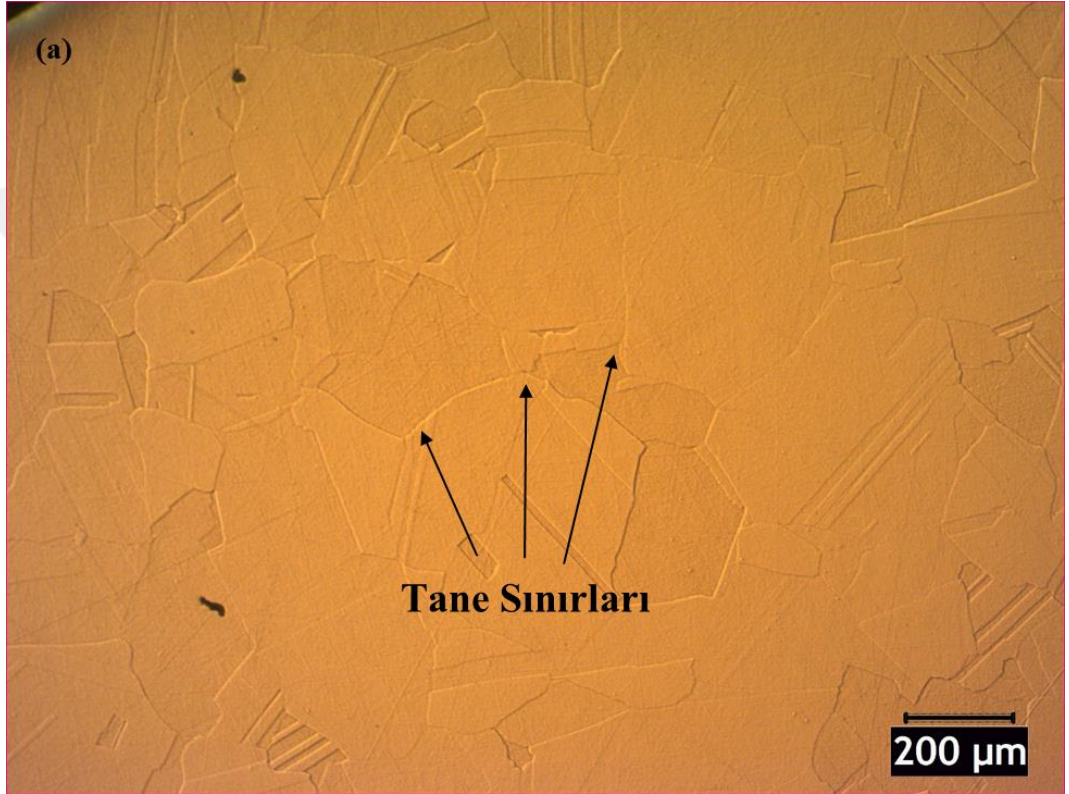


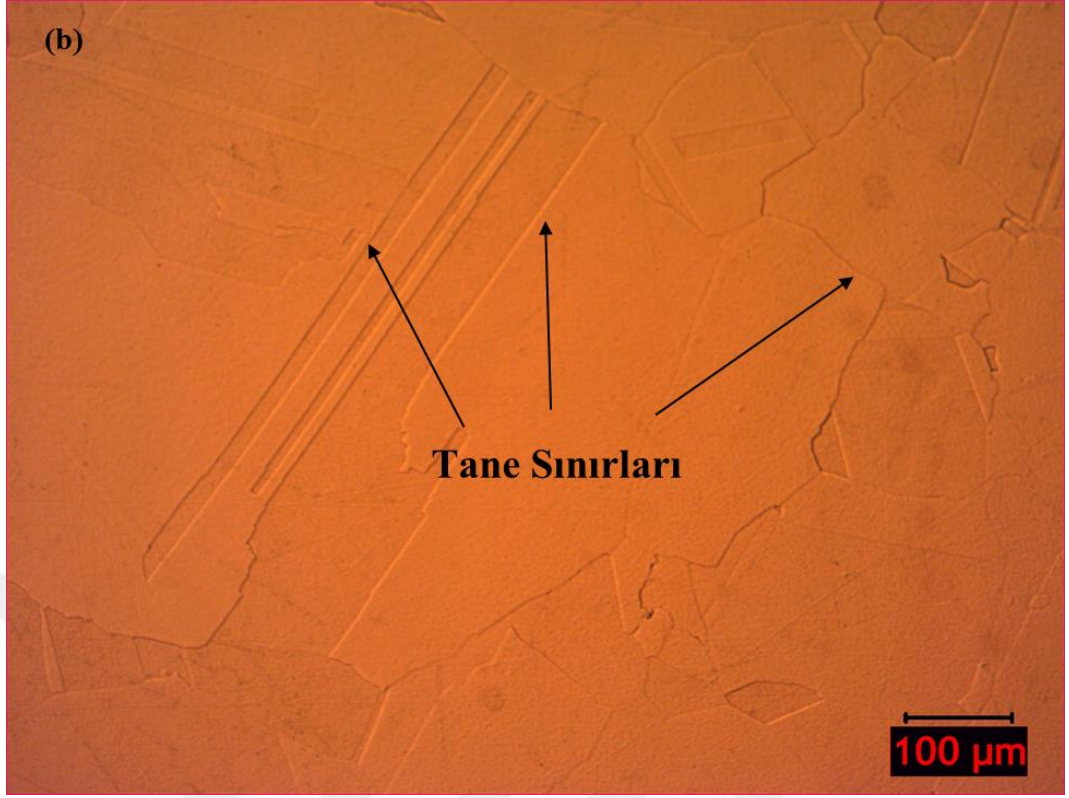
Şekil 5.12. 40 N yük altında yapılan aşınma deneylerinde numunelerin yüzeyinde oluşan aşınma türlerinin SEM görüntüleri (a) KİG, (b) SKİ ve (c) DKİ.

Yapılan aşınma testleri sonucunda numunelerde, adhesiv, abrasif ve ikincil abrasif aşınma mekanizmaları oluşmuştur. Numunelerin yüzeylerinde yer yer malzeme yığılması gözlemlenmiştir. Şekil 5.10, Şekil 5.11, Şekil 5.12’de SEM görüntüleri incelendiği zaman aşınma karakteristiği KİG numunelerde adhesiv aşınma, SKİ uygulanan numunelerde hem adhesiv hem de abrasif aşınma mekanizmaları oluşmuştur. DKİ uygulanan numunelerde sadece abrasif aşınma mekanizması oluşmuştur. KİG numune ile SKİ uygulanmış numunelerde aşınma mekanizmaları benzerlik gösterirken, DKİ uygulanmış numunelerde ise abrasif aşınma mekanizması oluşmuştur. 40 N yük uygulayarak yapılan aşınma testi sonucu numunelerin SEM görüntülerinde (Şekil 5.12) DKİ uygulanan numunede aşınma yönü çizgileri net olarak görülmektedir. Net olarak görünen çizgiler, DKİ uygulanmış numunede abrasif aşınmanın bir göstergesi olarak yorumlanmıştır. Bu çizikler, aşınma deneyleri yapılırken numuneden ya da aşındırıcıdan kopan malzemeler sonucunda abrasif aşınma mekanizmasına işaret etmektedir.

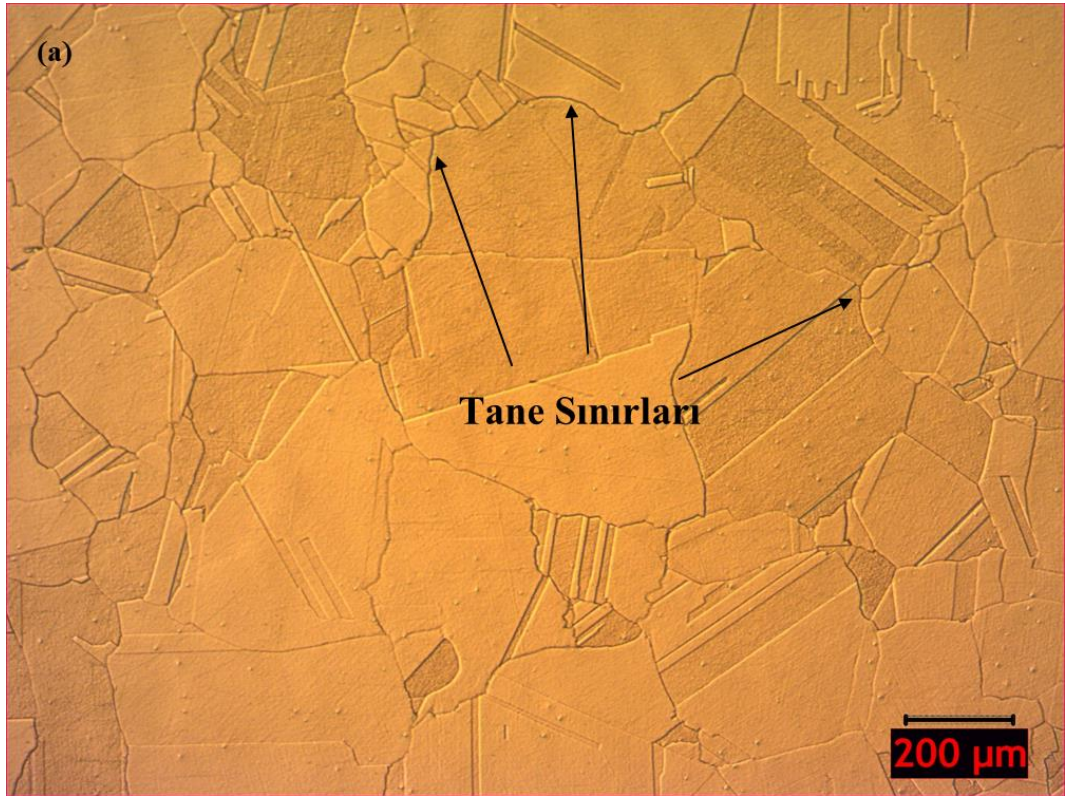
5.4. MİKROYAPI İNCELEMELERİ

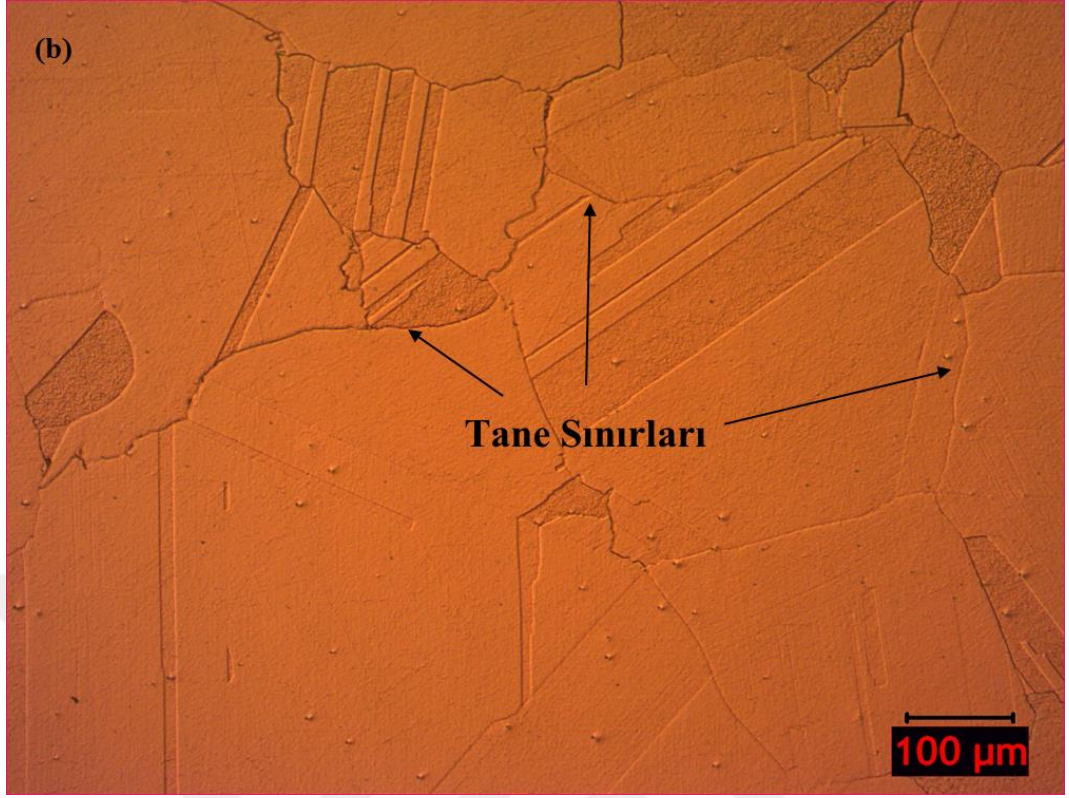
Hastelloy C-22 süper alaşımına uygulanan 3 farklı ısıl işlem sonucunda mikroyapılarında meydana gelen değişimleri gözlemek için numunelerin mikroyapıları önce optik mikroskopla ardından SEM cihazıyla incelenmiştir. Optik mikroskop görüntüleri Şekil 5.13, Şekil 5.14 ve Şekil 5.15'te gösterilmiştir.



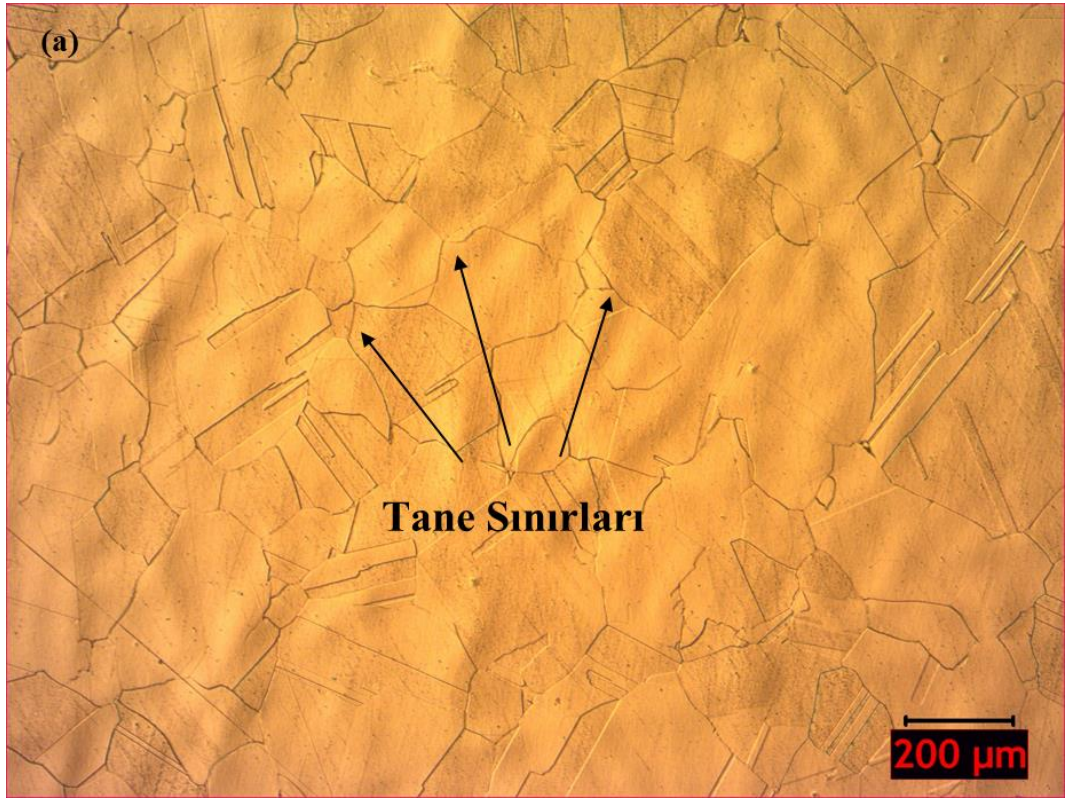


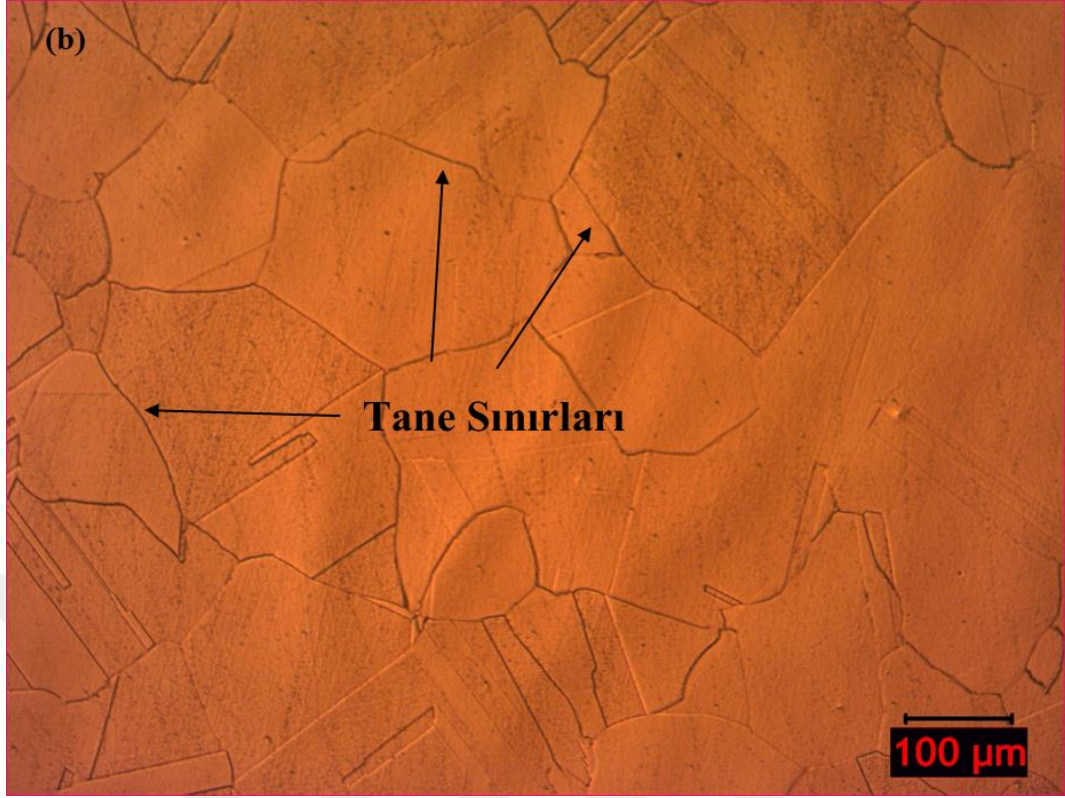
Şekil 5.13. KİG numuneye ait (a) 50x, (b)100x büyütme optik mikroskop görüntüleri.





Şekil 5.14. SKİ uygulanmış numuneye ait (a) 50x, (b)100x büyütme optik mikroskop görüntüleri.



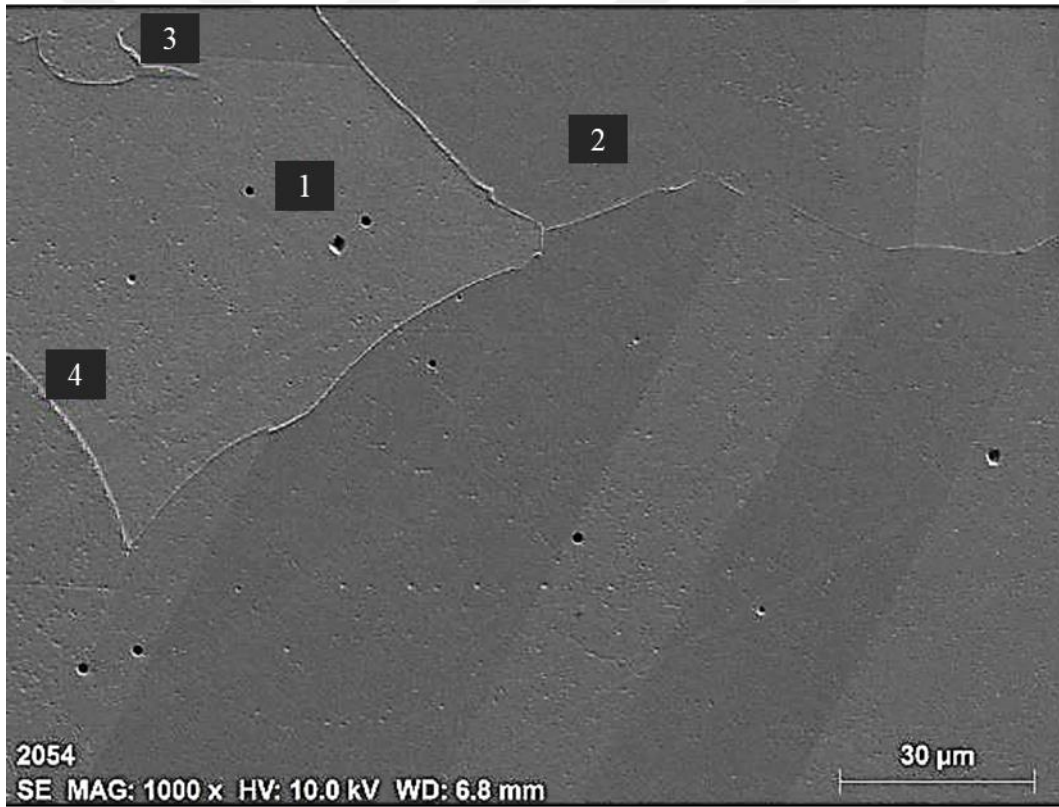


Şekil 5.15. DKİ uygulanmış numuneye ait (a) 50x, (b) 100x büyütme optik mikroskop görüntüleri.

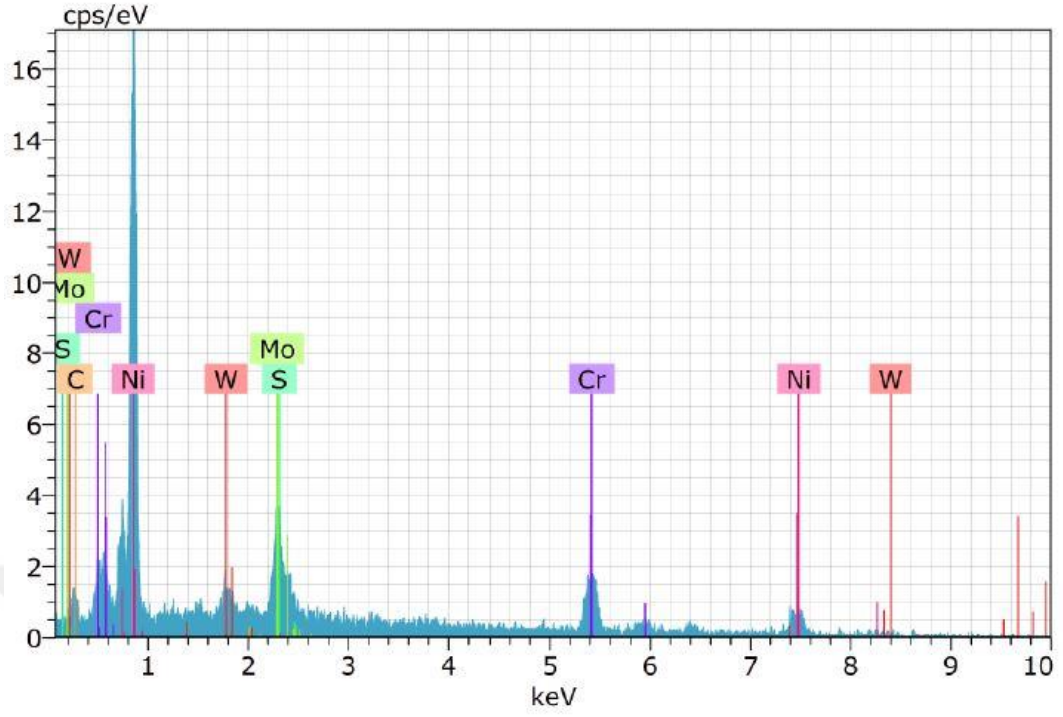
Optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde Hastelloy C-22 süper alaşım numunelerinin tane boyutları DKİ ile küçülmüştür. Küçülen tane boyutları daha çok tane sınırı meydana getirmiştir. Tane sınırlarının çoğalması, malzemedeki atomların dislokasyon hareketlerini, mikroyapıdaki düzlemlerin birbiri üzerinde ve tane sınırları üzerinde kayarak ilerlemesini zorlaştırmaktadır. Malzemedeki dislokasyon hareketinin kısıtlanması malzemenin mukavemetlenmesine sebep olmaktadır [20, 21, 59, 96].

Optik mikroskopta görüntülenen fazları elemental seviyede görüntülemek için SEM görüntüleri alınarak Enerji yayımlı X-Işını (EDX) analizi yapılmıştır. KİG numunenin SEM görüntüsü Şekil 5.16'da, SEM görüntüsü içerisinde verilen noktalara ait elemental EDX grafikleri Şekil 5.17, Şekil 5.18, Şekil 5.19 ve 5.20'de, EDX grafiklerindeki elemental pik noktalarının sayısal değerleri ise Çizelge 5.6'da verilmiştir. Ayrıca, KİG numunenin çizgisel spektroskopisi için SEM görüntüsü üzerinde belirlenen çizginin görüntüsü Şekil 5.21'de, çizgiye ait elemental analiz grafiği ise Şekil 5.22'de verilmiştir. SKİ uygulanmış numunenin SEM görüntüsü

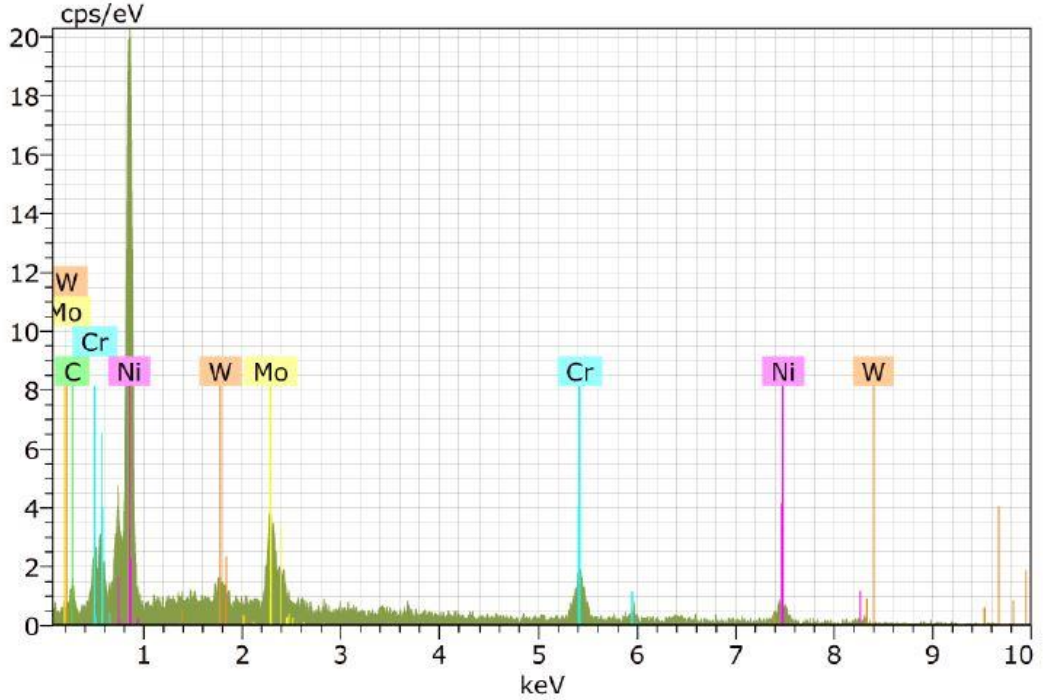
Şekil 5.23'te, SEM görüntüsü içerisinde verilen noktalara ait EDX grafikleri Şekil 5.24, Şekil 5.25 ve Şekil 5.26'da, EDX grafiklerindeki pik noktalarının sayısal değerleri ise Çizelge 5.7'de verilmiştir. Ayrıca SKİ uygulanmış numunenin çizgisel spektroskopisi için SEM görüntüsü üzerinde belirlenen çizginin görüntüsü Şekil 5.27'de, çizgiye ait elemental analiz grafiği ise Şekil 5.28'de verilmiştir. DKİ uygulanmış numunenin SEM görüntüsü Şekil 5.29'da, SEM görüntüsü içerisinde verilen noktalara ait EDX grafikleri Şekil 5.30 ve 5.31'de, EDX grafiklerindeki pik noktalarının sayısal değerleri ise Çizelge 5.8'de verilmiştir. Ayrıca DKİ uygulanmış numunenin çizgisel spektroskopisi için SEM görüntüsü üzerinde belirlenen çizginin görüntüsü Şekil 5.32'de, çizgiye ait elemental analiz grafiği ise Şekil 5.33'te gösterilmiştir.



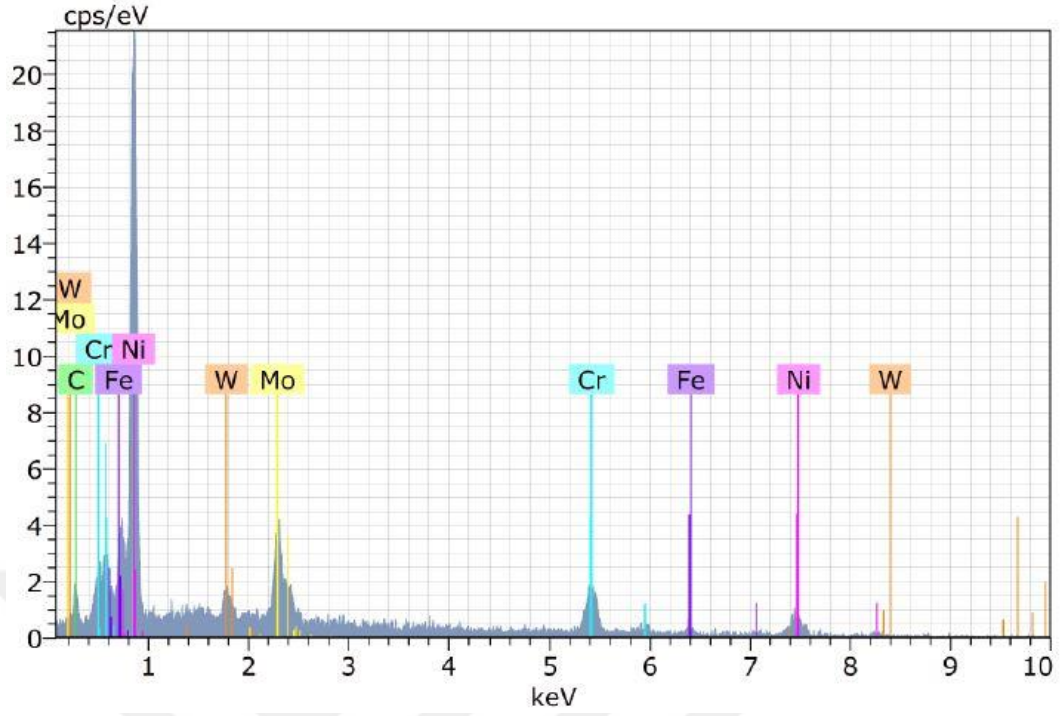
Şekil 5.16. KİG numunenin EDX analizi.



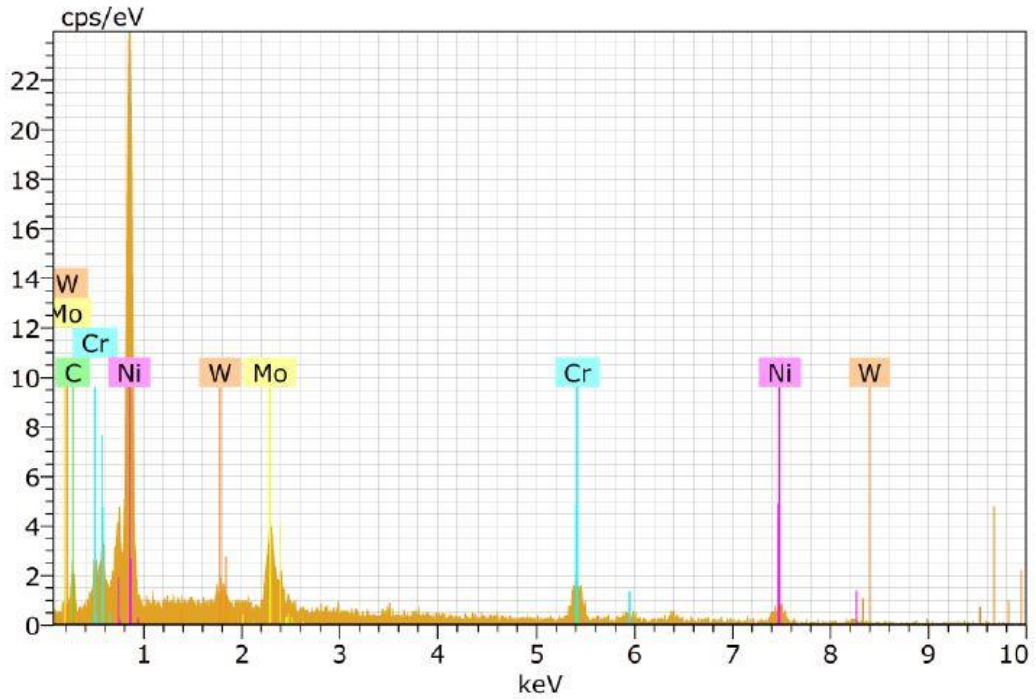
Şekil 5.17. KİG numunenin EDX analizi görüntüsü üzerinde belirlenen 1. noktann elemental pik grafikleri.



Şekil 5.18. KİG numunenin EDX analizi görüntüsü üzerinde belirlenen 2. noktann elemental pik grafikleri.



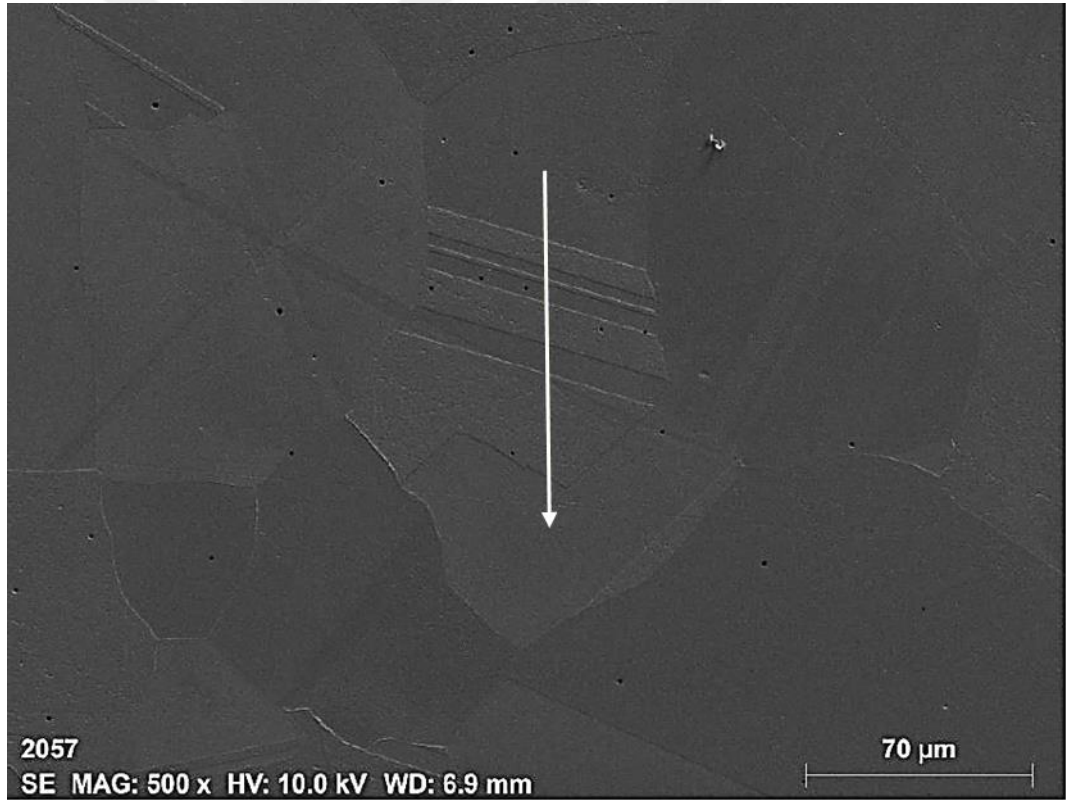
Şekil 5.19. KİG numunenin EDX analizi görüntüsü üzerinde belirlenen 3. noktann elemental pik grafikleri.



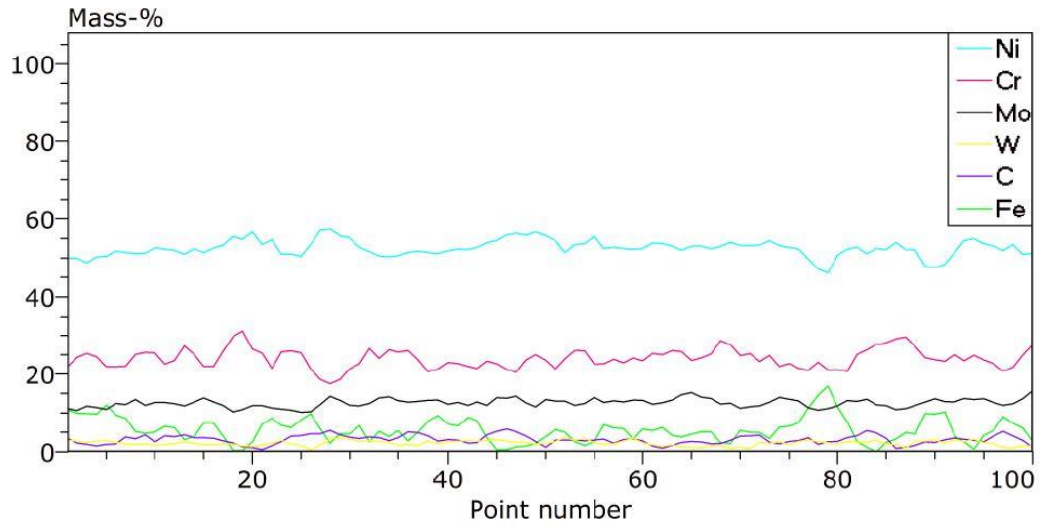
Şekil 5.20. KİG numunenin EDX analizi görüntüsü üzerinde belirlenen 4. noktann elemental pik grafikleri.

Çizelge 5.6. KİG numune üzerinde belirlenen 4 noktanın elemental sayısal değerleri.

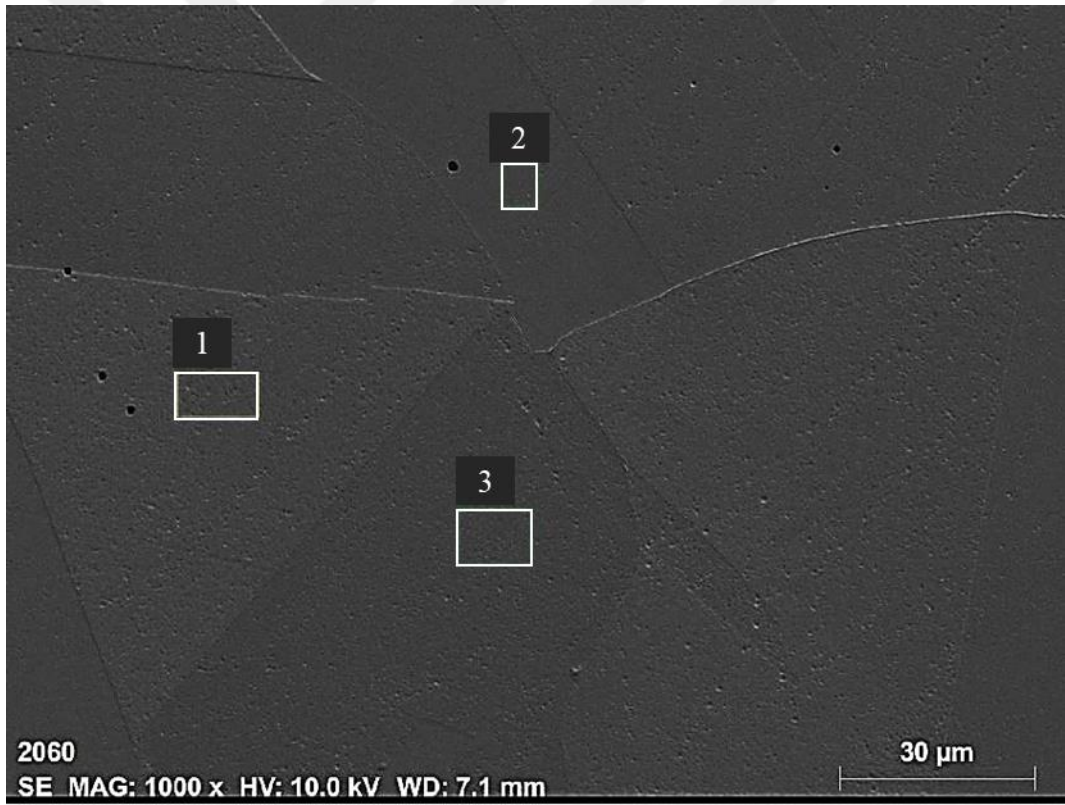
Kütle Yüzdesi (%)							
Spektrum	C	S	Cr	Fe	Ni	Mo	W
1. nokta	3,72	0,62	29,62	-	51,77	12	2,26
2. nokta	3,88	-	25,49	-	55,06	12,90	2,67
3. nokta	4,43	-	23,14	6,31	52,46	11,29	2,37
4. nokta	5,82	-	22,88	-	57,29	11,70	2,32
Ortalama Değer	4,46	0,62	25,28	6,31	54,14	11,97	2,41
Sigma	0,95	0,00	3,12	0,00	2,53	0,68	0,18
Sigma Ortalama	0,48	0,00	1,56	0,00	1,27	0,34	0,09



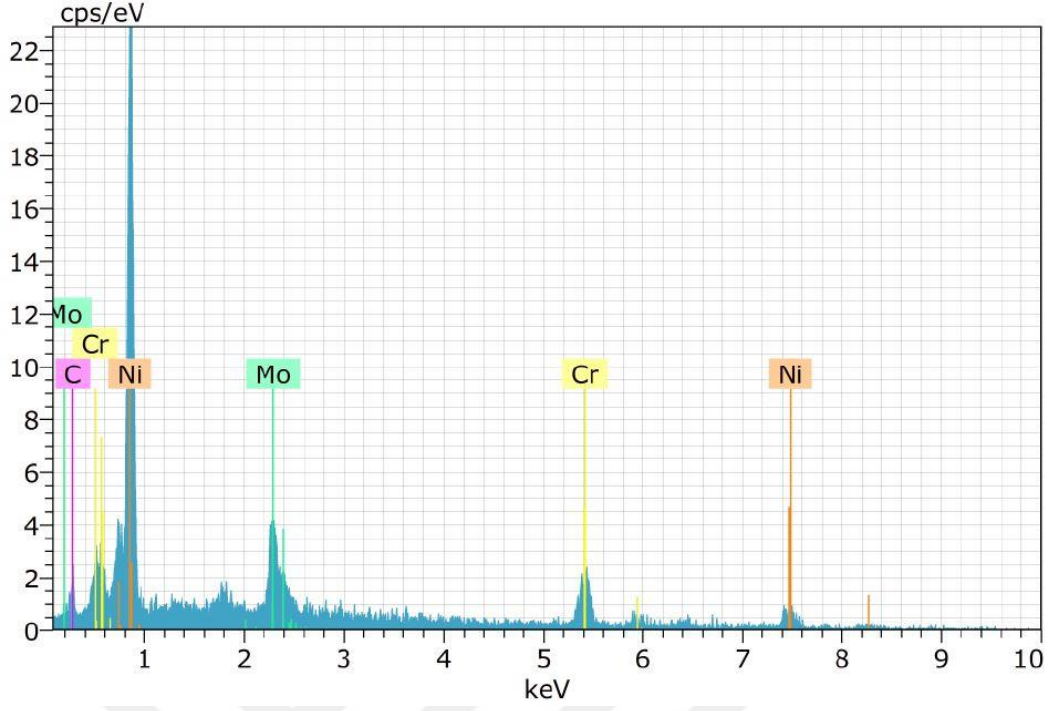
Şekil 5.21. KİG numunenin çizgi EDX görüntüsü analizi.



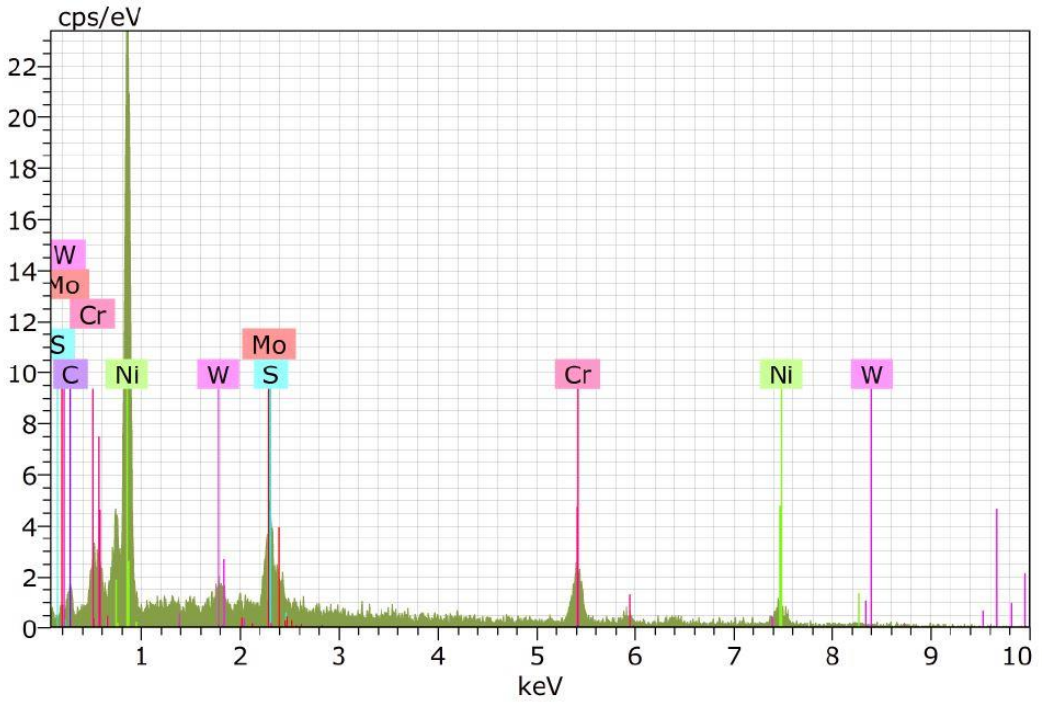
Şekil 5.22. KİG numunenin çizgi EDX sonuçları grafiği.



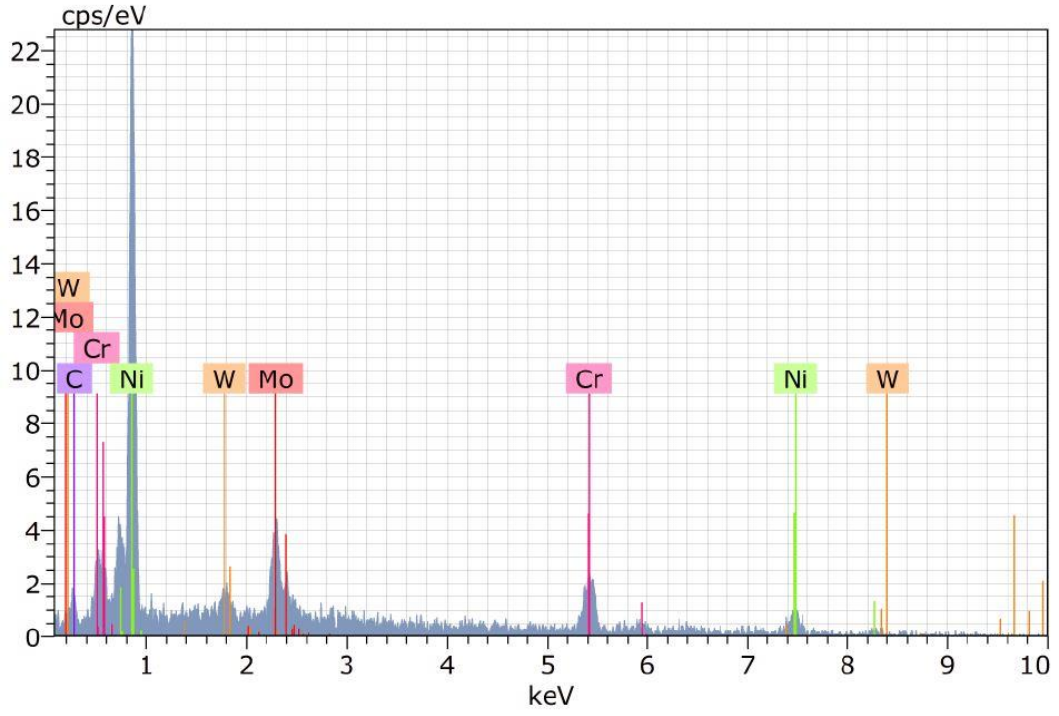
Şekil 5.23. SKİ uygulanmış numunenin EDX görüntüsü analizi.



Şekil 5.24. SKİ uygulanmış numunenin EDX analizi görüntüsü üzerinde belirlenen 1. noktanın elemental pik grafikleri.



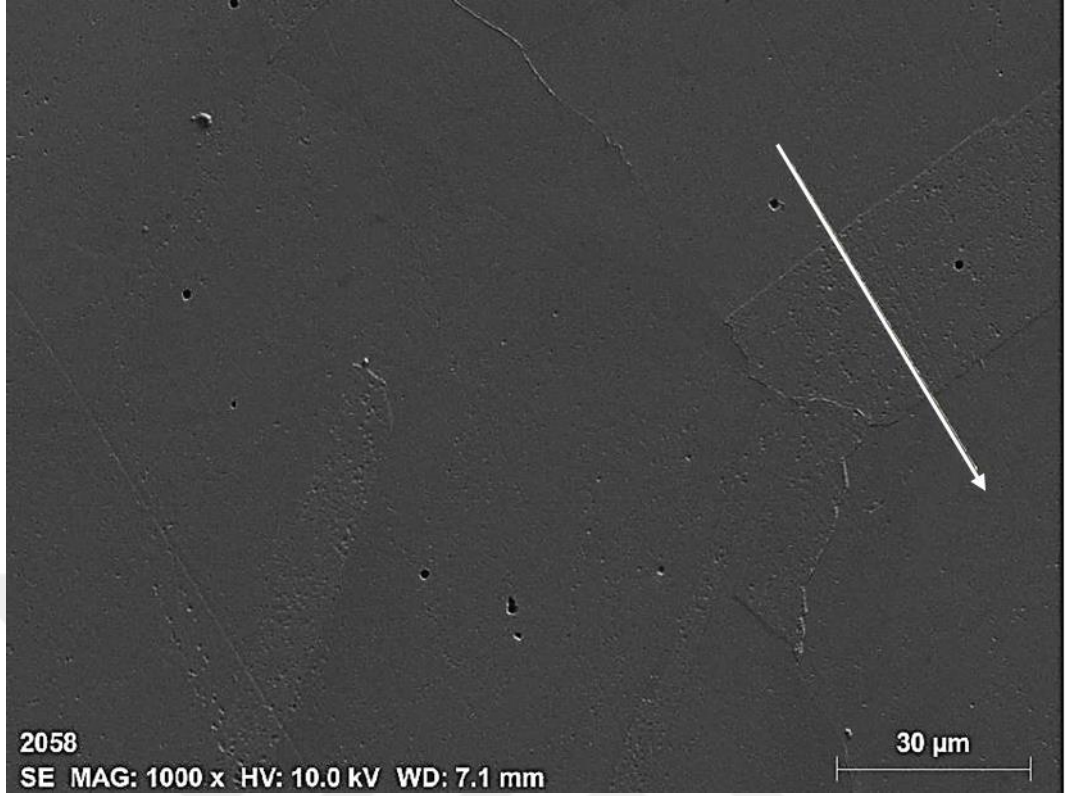
Şekil 5.25. SKİ uygulanmış numunenin EDX analizi görüntüsü üzerinde belirlenen 2. noktanın elemental pik grafikleri.



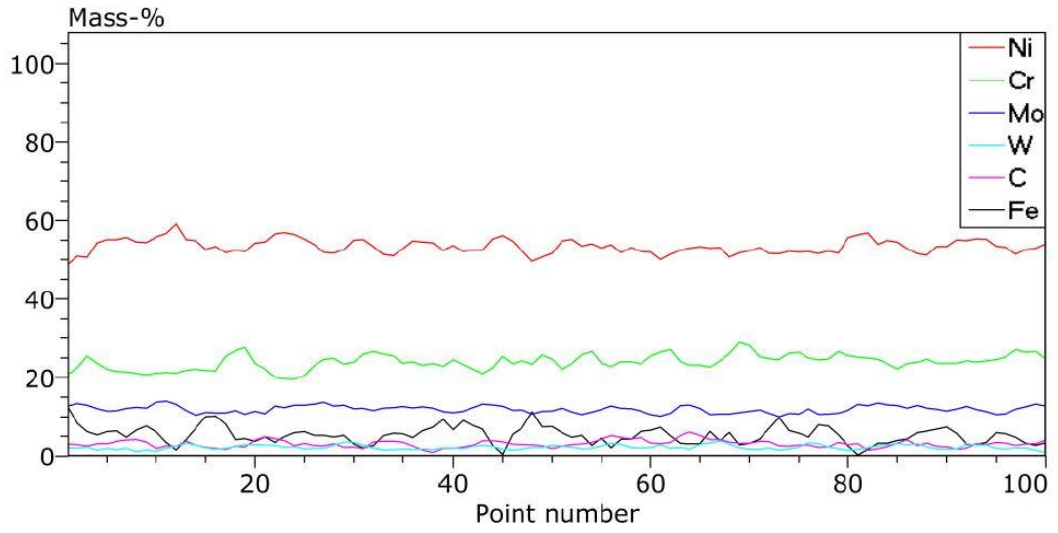
Şekil 5.26. SKİ uygulanmış numunenin EDX analizi görüntüsü üzerinde belirlenen 3. noktanın elemental pik grafikleri.

Çizelge 5.7. SKİ uygulanmış numunenin üzerinde belirlenen 3 noktanın elemental sayısal değerleri.

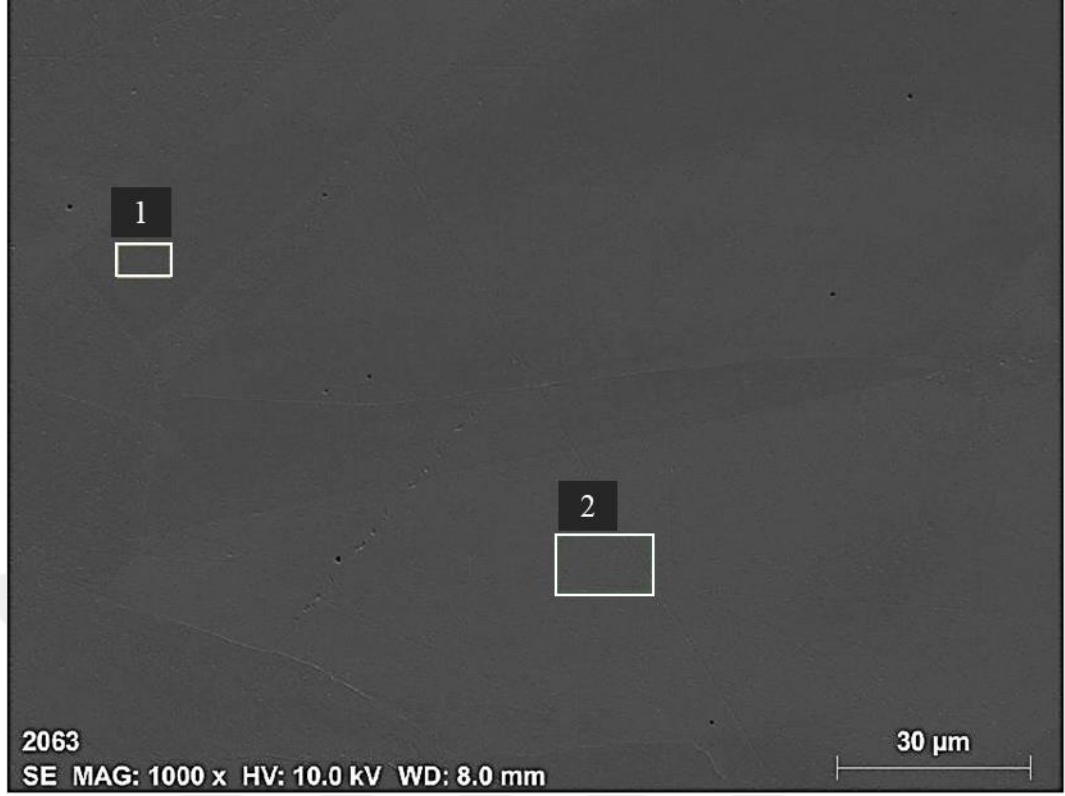
Kütle Yüzdesi (%)						
Spektrum	C	S	Cr	Ni	Mo	W
1. nokta	4,06	-	27,69	55,93	12,32	-
2. nokta	3,82	1,22	27,99	54,44	10,17	2,35
3. nokta	3,32	-	28,40	54,38	11,79	2,11
Ortalama Değer	3,73	1,22	28,03	54,92	11,43	2,23
Sigma	0,38	0,00	0,36	0,88	1,12	0,17
Sigma Ortalama	0,22	0,00	0,21	0,51	0,65	0,10



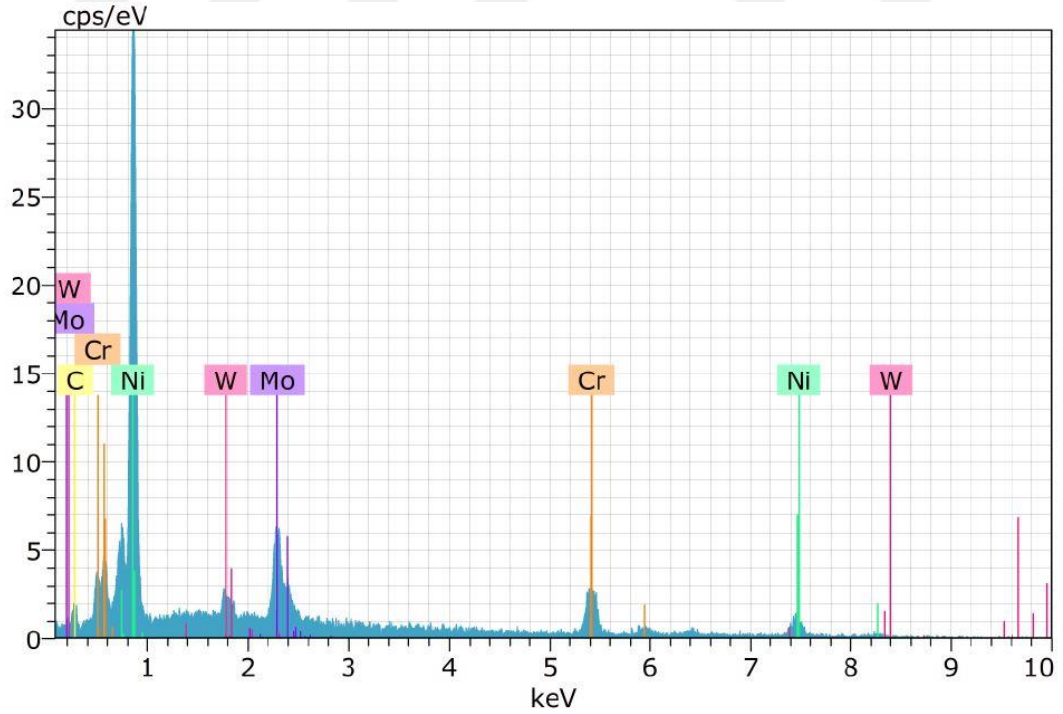
Şekil 5.27. SKİ uygulanmış numunenin çizgi EDX görüntüsü analizi.



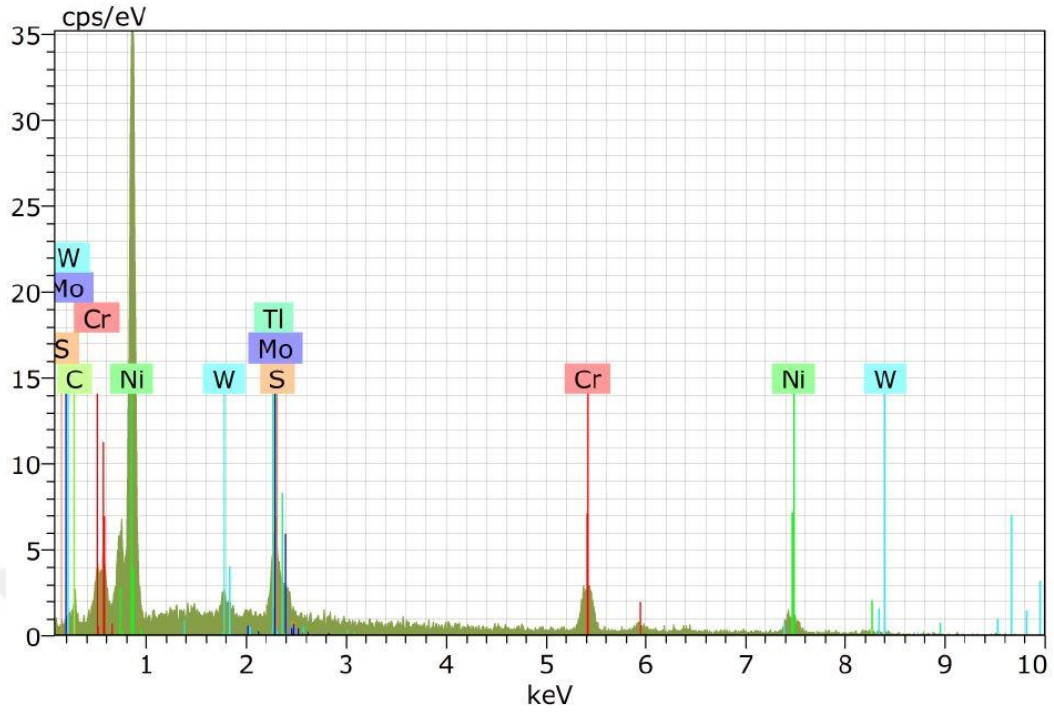
Şekil 5.28. SKİ uygulanmış numunenin çizgi EDX sonuçları grafiği.



Şekil 5.29. DKİ uygulanmış numunenin EDX görüntüsü analizi.



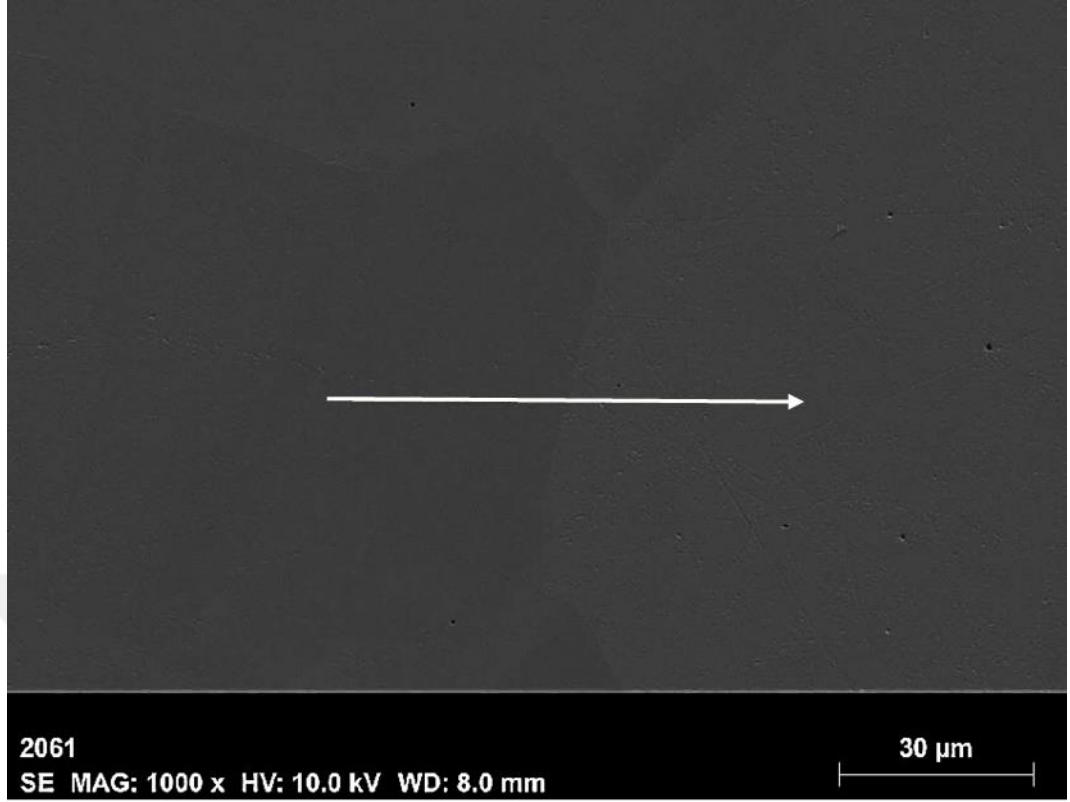
Şekil 5.30. DKİ uygulanmış numunenin EDX analizi görüntüsü üzerinde belirlenen 1. noktanın elemental pik grafikleri.



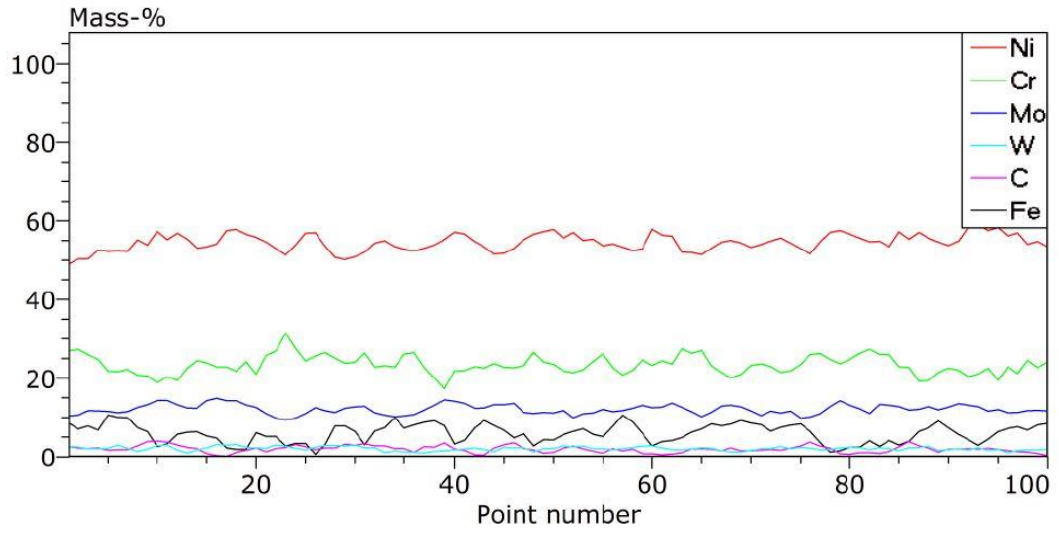
Şekil 5.31. DKİ uygulanmış numunenin EDX analizi görüntüsü üzerinde belirlenen 2. noktanın elemental pik grafikleri.

Çizelge 5.8. DKİ uygulanmış numunenin üzerinde belirlenen 2 noktanın elemental sayısal değerleri.

Kütle Yüzdesi (%)							
Spektrum	C	S	Cr	Ni	Mo	W	Ti
1. nokta	2,72	-	25,45	56,32	12,82	2,69	-
2. nokta	3,30	0,23	26,70	55,62	10,20	2,38	1,58
Ortalama Değer	3,01	0,23	26,07	55,97	11,51	2,54	1,58
Sigma	0,41	0,00	0,88	0,50	1,85	0,22	0,00
Sigma Ortalama	0,29	0,00	0,63	0,35	1,31	0,16	0,00



Şekil 5.32. DKİ uygulanmış numunenin çizgi EDX görüntüsü analizi.



Şekil 5.33. DKİ uygulanmış numunenin çizgi EDX sonuçları grafiği.

SEM ve EDX görüntüleri incelendiğinde numunelere uygulanan kriyojenik ısıtma işleminin, numunelerde faz değişimine sebep olduğu görülmemiştir. Elemental analizleri kütle yüzdeleri oranında bakıldığında Hastelloy C-22 süper alaşımının, Ni

esalı bir alaşım olduğu görülmektedir. Uygulanan kriyojenik ısıl işlemler Ni esalı bu süper alaşımın kimyasal özelliklerinde bir değişikliğe neden olmamıştır.



BÖLÜM 6

SONUÇLAR

Yüksek korozyon direncine sahip Hastelloy C-22 süper alaşımı, korozyon ortamında yüksek performans göstermesine rağmen aşınmaya maruz ortamlarda, mekanik özellikleri sebebiyle düşük performans sergilemektedir. Özellikle mekanik zorlamalı korozyon (pistonlar, dişli çarklar, içten yanmalı motorların silindir gömlekleri, pompa mili ve motoru gibi) ortamlarında ürün kullanım ömrünün arttırılabilmesi için Hastelloy C-22 süper alaşımının aşınma direncinin arttırılması gerekmektedir. Literatürde de belirtildiği gibi kriyojenik ısıtma işlemi, malzemelerdeki sertliği ve aşınma direncini arttırmakta kullanılan önemli bir işlemdir. Yapılan tez çalışmasında, Hastelloy C-22 süper alaşım malzemesine uygulanan kriyojenik ısıtma işleminin malzemedeki sertlik ve aşınma direncine olan etkileri araştırılmış olup yapılan deneysel çalışmaların sonuçları aşağıda verilmiştir.

- Kriyojenik ısıtma işlemi, sığ ve derin kriyojenik ısıtma işlemi olmak üzere 2 şekilde uygulanmıştır. Derin kriyojenik ısıtma işleminin etkileri daha net bir şekilde gözlemlenmiştir.
- Hastelloy C-22 süper alaşımının sertliği (175 HB) SKI uygulanması sonucu %14 oranında (201,33 HB), DKİ uygulanması sonucu ise %45 oranında (254 HB) artış göstermiştir.
- Aşınma deneylerinde hacimsel kayıp, sığ kriyojenik ısıtma işleminde %24 oranında (0,019 mm³/m), derin kriyojenik ısıtma işleminde ise %44 oranında

(0,014 mm³/m) azalmıştır.

- SEM ve EDX analizlerine göre mikroyapıda herhangi bir faz değişimi olmadığı belirlenmiştir.
- Kriyojenik ısıl işleme beraber malzemedeki tane boyutları daha da küçülmüştür. Küçülen tane boyutları optik mikroskopla gözlemlenmiştir.
- Mikroyapı incelemelerinde, Hastelloy C-22 süper alaşım numunelerinde, SKİ uygulanması sonucu oluşan tane boyutlarının, KİG numuneye göre daha küçük olduğu tespit edilmiştir. DKİ uygulanması sonucu oluşan mikroyapıdaki tane boyutlarının, SKİ uygulanmış numuneye göre daha küçük olduğu tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

1. Ekinci, Ş. , Akdemir, A., "Nitrürlenmiş AISI 4140 Çeliğine Uygulanan Yükün Aşınma Hızına Etkisi", *Journal Of Technical-Online*, 10 (1): 38–52 (2011).
2. Kam M., Saruhan H., K. F., "Isıl İşlem Görmüş Millerin Dinamik Davranışlarının Deneysel Analizi", *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi Journal Of Advanced Technology Sciences*, 5 (1): 80–90 (2011).
3. Motorcu, A. R., "Nikel Esaslı Süperalaşımın ve Titanyum Alaşımının İşlenebilirliği", *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 25 (1–2): 302–330 (2009).
4. Priyadarshini, A., "A study of the effective of cryogenic treatment on the performance of high speed steel tools and carbide inserts", *National Institute of Technology Rourkela 2007*, (2007).
5. Reddy, T. V. S., Sornakumar, T., Reddy, M. V., Venkatram, R., ve Senthilkumar, A., "Turning studies of deep cryogenic treated P-40 tungsten carbide cutting tool inserts- Technical communication", *Machining Science And Technology*, 13 (2): 269–281 (2009).
6. Barron, R. F., "Cryogenic treatment of metals to improve wear resistance", *Cryogenics*, 22 (8): 409–413 (1982).
7. Dhar, N. R. ve Kamruzzaman, M., "Cutting temperature, tool wear, surface roughness and dimensional deviation in turning AISI-4037 steel under cryogenic condition", *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, 47 (5 SPEC. ISS.): 754–759 (2007).
8. Ramji, B.R. , Narasimha M.H.N. , Krishna, M., "Performance Study of Cryo Treated Hss Drills in Drilling Cast Iron", *International Journal Of Engineering Science And Technology*, 2 (7): 2530–2536 (2010).
9. Gill, S. S., Singh, R., Singh, H., ve Singh, J., "Wear behaviour of cryogenically treated tungsten carbide inserts under dry and wet turning conditions", *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, 49 (3–4): 256–260 (2009).
10. Reddy, T. V. S., Sornakumar, T., Reddy, M. V., ve Venkatram, R., "Machining performance of low temperature treated P-30 tungsten carbide cutting tool inserts", *Cryogenics*, 48 (9–10): 458–461 (2008).

11. Chang, Y.-P., Wang, G., Horng, J.-H., Chu, L.-M., ve Hwang, Y.-C., "Effects of Deep Cryogenic Treatment on Wear Mechanisms and Microthermal Expansion for the Material of Drive Elements", *Advances In Materials Science And Engineering*, 2013 (November 2013): 1–7 (2013).
12. Vadivel, K. ve Rudramoorthy, R., "Performance analysis of cryogenically treated coated carbide inserts", *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 42 (3–4): 222–232 (2009).
13. Jeleńkowski, J., Ciski, A., ve Babul, T., "Effect of deep cryogenic treatment on substructure of HS6-5-2 high speed steel", *Journal Of Achievements In Materials And Manufacturing Engineering*, 43 (1): 80–87 (2010).
14. Šolić, S., Cajner, F., ve Panjan, P., "Influence of deep cryogenic treatment of high speed steel substrate on TiAlN coating properties", *Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik*, 44 (12): 950–958 (2013).
15. Kalsi, N. S., Sehgal, R., ve Sharma, V. S., "Effect of tempering after cryogenic treatment of tungsten carbide-cobalt bounded inserts", *Bulletin Of Materials Science*, 37 (2): 327–335 (2014).
16. Gill, S. S., Singh, J., Singh, H., ve Singh, R., "Metallurgical and mechanical characteristics of cryogenically treated tungsten carbide (WC-Co)", *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 58 (1–4): 119–131 (2012).
17. Gill, S. S., Singh, H., Singh, R., ve Singh, J., "Flank wear and machining performance of cryogenically treated tungsten carbide inserts", *Materials And Manufacturing Processes*, 26 (11): 1430–1441 (2011).
18. He, H. B., Han, W. Q., Li, H. Y., Li, D. Y., Yang, J., Gu, T., ve Deng, T., "Effect of deep cryogenic treatment on machinability and wear mechanism of TiAlN coated tools during dry turning", *International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing*, 15 (4): 655–660 (2014).
19. Murthy, N., Engineering, I., ve Engineering, M., "Performance analysis of cryogenically treated carbide drills in drilling white cast iron", *International Journal Of Applied Engineering Research*, 1 (3): 553–560 (2010).
20. Firouzdar, V., Nejati, E., ve Khomamizadeh, F., "Effect of deep cryogenic treatment on wear resistance and tool life of M2 HSS drill", *Journal Of Materials Processing Technology*, 206 (1–3): 467–472 (2008).
21. Thakur, D., Ramamoorthy, B., ve Vijayaraghavan, L., "Influence of different post treatments on tungsten carbide-cobalt inserts", *Materials Letters*, 62 (28): 4403–4406 (2008).

22. SreeramaReddy, T. V., Sornakumar, T., VenkataramaReddy, M., ve Venkatram, R., "Machinability of C45 steel with deep cryogenic treated tungsten carbide cutting tool inserts", *International Journal Of Refractory Metals And Hard Materials*, 27 (1): 181–185 (2009).
23. Senthilkumar, D., Rajendran, I., Pellizzari, M., ve Siiriainen, J., "Influence of shallow and deep cryogenic treatment on the residual state of stress of 4140 steel", *Journal Of Materials Processing Technology*, 211 (3): 396–401 (2011).
24. Singh, L. ve Singh, J., "Effects of Cryogenic Treatment on High-speed Steel Tools", *Journal Of Engineering And Technology*, 1 (2): 88 (2011).
25. Çiçek, A., Kara, F., Kivak, T., ve Ekici, E., "Evaluation of machinability of hardened and cryo-treated AISI H13 hot work tool steel with ceramic inserts", *International Journal Of Refractory Metals And Hard Materials*, 41: 461–469 (2013).
26. Çiçek, A., Kivak, T., ve Ekici, E., "Optimization of drilling parameters using Taguchi technique and response surface methodology (RSM) in drilling of AISI 304 steel with cryogenically treated HSS drills", *Journal Of Intelligent Manufacturing*, 26 (2): 295–305 (2015).
27. Balasubramanian, S., Gupta, M. K., ve Singh, K. K., "Cryogenics and its application with reference to spice grinding: a review.", *Critical Reviews In Food Science And Nutrition*, 52 (9): 781–794 (2012).
28. Zhao, Z. ve Hong, S. Y., "Cryogenic properties of some cutting tool materials", *Journal Of Materials Engineering And Performance*, 1 (5): 705–714 (1992).
29. D.Candane, N.Alagumurthib, K. P., "Effect of Deep Cryogenic Treatment on AISI T42 High Speed Steel", *International Journal Of Current Engineering And Technology*, 3 (4): 1164–1170 (2013).
30. Internet: Haynes International, "Hastelloy C22 Alloys", <http://mail.haynesintl.com/HASTELLOYC22Alloy/HASTELLOYC22AlloyPF.htm> (2018).
31. Baldissera, P. ve Delprete, C., "Deep Cryogenic Treatment: A Bibliographic Review", *The Open Mechanical Engineering Journal*, 2 (1): 1–11 (2008).
32. Moretti, G., "The racer's edge", *Edn*, 48 (27): 28–30 (2003).
33. Paulin, P., "Frozen Gears", *Gear Technology*, 26–29 (1993).

34. Meng, F., Tagashira, K., Azuma, R., ve Sohma, H., "Role of Eta-carbide Precipitations in the Wear Resistance Improvements of Fe-12Cr-Mo-V-1.4C Tool Steel by Cryogenic Treatment.", *ISIJ International*, 34 (2): 205–210 (2008).
35. F. Meng, K. T. and H. S., "Wear resistance and microstructure of cryogenic treated Fe-1.4Cr-1C bearing steel", *Scripta Metall. Mater.*, 31(7): 865–868 (1994).
36. A. Jordine, "Increased life of carburised race car gears by cryogenic treatment", *Int. J. Fatigue*, 18(6): 418 (1996).
37. Wurzbach, R. N. ve DeFelice, W., "Improving component wear performance through cryogenic treatment", *Lubrication Excellence 2004 Conference Proceedings*, (2004).
38. Kim, J. W., Griggs, J. A., Regan, J. D., Ellis, R. A., ve Cai, Z., "Effect of cryogenic treatment on nickel-titanium endodontic instruments", *International Endodontic Journal*, 38 (6): 364–371 (2005).
39. Podgornik, B., Leskovšek, V., Vižintin, J., Podgornik, B., Leskovšek, V., ve Vižintin, J., "Influence of Deep-Cryogenic Treatment on Tribological Properties of P / M High-Speed Steel Influence of Deep-Cryogenic Treatment on Tribological Properties of P / M High-Speed Steel", *Materials And Manufacturing Processes*, 6914 (May): 734–738 (2009).
40. Bensely, A., Venkateswaran, S., Subisak, A. D., Lal, D. M., ve Rajadurai, A., "Influence of deep cryogenic treatment on alloy carbide precipitations and mechanical properties of AISI M2 high speed tool steel", *Cold Facts*, 28 (2): 1–28 (2012).
41. Yong, A. Y. L., Seah, K. H. W., ve Rahman, M. A., "Performance evaluation of cryogenically treated tungsten carbide tools in turning", *International Journal Of Machine Tools & Manufacture*, 46: 2051–2056 (2006).
42. Candane, D., "Effect of Cryogenic Treatment on Microstructure and Wear Characteristics of AISI M35 HSS", *International Journal Of Materials Science And Applications*, 2 (2): 56 (2013).
43. Barron, R. F. and Mulhern, C. R., "Cryogenic Treatment of AISI-T8 and C1045 Steel", *Advances In Cryogenic Engineering Materials*, 26: 171–178 (1980).
44. Mohan Lal, D., Renganarayanan, S., Kalanidhi, A., "Effect of cryogenic treatment on T1 type high speed steel tool material", *Indian Journal Of Cryogenics*, 21 (2): 41–44 (1996).
45. Lal, D. M., Renganarayanan, S., ve Kalanidhi, A., "Cryogenic treatment to augment wear resistance of tool and die steels", *Cryogenics*, 41: 149–155 (2001).

46. Molinari, A., Pellizzari, M., Gialanella, S., Straffelini, G., ve Stiasny, K. H., "Effect of deep cryogenic treatment on the mechanical properties of tool steels", *Journal Of Materials Processing Technology*, 118: 350–355 (2001).
47. Yun, D., Xiaoping, L. I. N., ve Hongshen, X. A. O., "P " " p Cryogenic Treatment of High-speed Steel and its Mechanism", *Heat Treatment Of Metals*, 3: 55–59 (2010).
48. Gordo, E. ve Candela, N., "Cryogenic treatments on HSS base composites reinforced with Nb and Ta carbides", *Euro PM99 Hard Material Powders*, 75–82 (1999).
49. Bensely, A., Prabhakaran, A., Mohan Lal, D., ve Nagarajan, G., "Enhancing the wear resistance of case carburized steel (En 353) by cryogenic treatment", *Cryogenics*, 45 (12): 747–754 (2005).
50. Preciado, M., Bravo, P. M., ve Alegre, J. M., "Effect of low temperature tempering prior cryogenic treatment on carburized steels", *Journal Of Materials Processing Technology*, 176 (1–3): 41–44 (2006).
51. Zhirafar, S., Rezaeian, A., ve Pugh, M., "Effect of cryogenic treatment on the mechanical properties of 4340 steel", *Journal Of Materials Processing Technology*, 186 (1–3): 298–303 (2007).
52. LIU, H. huai, WANG, J., YANG, H. shan, SHEN, B. luo, GAO, S. ji, ve HUANG, S. jiu, "Effect of Cryogenic Treatment on Property of 14Cr2Mn2V High Chromium Cast Iron Subjected to Subcritical Treatment", *Journal Of Iron And Steel Research International*, 13 (6): 43–48 (2006).
53. Liu, H., Wang, J., Shen, B., Yang, H., Gao, S., ve Huang, S., "Materials & Design 3Cr13Mo1V1 . 5 high chromium cast iron", *Materials And Design*, 28: 1059–1064 (2007).
54. Zhisheng, W., Ping, S., Jinrui, L., ve Shengsun, H., "Effect of deep cryogenic treatment on electrode life and microstructure for spot welding hot dip galvanized steel", *Materials And Design*, 24: 687–692 (2003).
55. Yang, H., Wang, J., Shen, B., Liu, H., Gao, S., ve Huang, S., "Effect of cryogenic treatment on the matrix structure and abrasion resistance of white cast iron subjected to destabilization treatment", *Wear*, 261: 1150–1154 (2006).
56. Gogte, C. L., Iyer, K. M., Paretkar, R. K., ve Peshwe, D. R., "Deep subzero processing of metals and alloys: Evolution of microstructure of AISI T42 tool steel", *Materials And Manufacturing Processes*, 24 (7–8): 718–722 (2009).
57. Malone, T. ve Torres, P., "EFFECTS OF CRYOGENIC TREATMENT ON THE RESIDUAL STRESS", *AMPET Conference*, 0–4 (2000).

58. Lulay, K. E., "The Effect of Cryogenic Treatments on 7075 Aluminum Alloy The Effect of Cryogenic Treatments on 7075 Aluminum Alloy", *Journal Of Materials Engineering And Performance*, 11 (5): 10–12 (2002).
59. Patil, P. I., "Comparison of Effects of Cryogenic Treatment on Different Types of Steels: A Review", *International Journal Of Computer Applications*, 10–29 (2012).
60. Huang, J. Y., Zhu, Y. T., Liao, X. Z., Beyerlein, I. J., Bourke, M. A., ve Mitchell, T. E., "Microstructure of cryogenic treated M2 tool steel", *Materials Science And Engineering A*, 339 (1–2): 241–244 (2003).
61. Leskovšek, V., Kalin, M., ve Vižintin, J., "Influence of deep-cryogenic treatment on wear resistance of vacuum heat-treated HSS", *Vacuum*, 80 (6): 507–518 (2006).
62. Bensely, A., Senthilkumar, D., Mohan Lal, D., Nagarajan, G., ve Rajadurai, A., "Effect of cryogenic treatment on tensile behavior of case carburized steel-815M17", *Materials Characterization*, 58 (5): 485–491 (2007).
63. Xuan, F. Z., Huang, X., ve Tu, S. T., "Comparisons of 30Cr2Ni4MoV rotor steel with different treatments on corrosion resistance in high temperature water", *Materials And Design*, 29 (8): 1533–1539 (2008).
64. Vimal, A. J., Bensely, A., Lal, D. M., ve Srinivasan, K., "Deep cryogenic treatment improves wear resistance of en 31 steel", *Materials And Manufacturing Processes*, 23 (4): 369–376 (2008).
65. Surberg, C. H., Stratton, P., ve Lingenhöle, K., "The effect of some heat treatment parameters on the dimensional stability of AISI D2", *Cryogenics*, 48 (1–2): 42–47 (2008).
66. Akhbarizadeh, A., Shafyei, A., ve Golozar, M. A., "Effects of cryogenic treatment on wear behavior of D6 tool steel", *Materials And Design*, 30 (8): 3259–3264 (2009).
67. Baldissera, P., "Fatigue scatter reduction through deep cryogenic treatment on the 18NiCrMo5 carburized steel", *Materials And Design*, 30 (9): 3636–3642 (2009).
68. Baldissera, P. ve Delprete, C., "Effects of deep cryogenic treatment on static mechanical properties of 18NiCrMo5 carburized steel", *Materials And Design*, 30 (5): 1435–1440 (2009).
69. Bensely, A., Shyamala, L., Harish, S., Mohan Lal, D., Nagarajan, G., Junik, K., ve Rajadurai, A., "Fatigue behaviour and fracture mechanism of cryogenically treated En 353 steel", *Materials And Design*, 30 (8): 2955–2962 (2009).

70. Das, D., Dutta, A. K., Toppo, V., ve Ray, K. K., "Effect of deep cryogenic treatment on the carbide precipitation and tribological behavior of D2 steel", *Materials And Manufacturing Processes*, 22 (4): 474–480 (2007).
71. Harish, S., Bensely, A., Mohan Lal, D., Rajadurai, A., ve Lenkey, G. B., "Microstructural study of cryogenically treated En 31 bearing steel", *Journal Of Materials Processing Technology*, 209 (7): 3351–3357 (2009).
72. Wang, J., Xiong, J., Fan, H., Yang, H. S., Liu, H. H., ve Shen, B. L., "Effects of high temperature and cryogenic treatment on the microstructure and abrasion resistance of a high chromium cast iron", *Journal Of Materials Processing Technology*, 209 (7): 3236–3240 (2009).
73. Senthilkumar, D. ve Rajendran, I., "Influence of Shallow and Deep Cryogenic Treatment on Tribological Behavior of En 19 Steel", *Journal Of Iron And Steel Research International*, 18 (9): 53–59 (2011).
74. Sri Siva, R., Arockia Jaswin, M., ve Mohan Lal, D., "Enhancing the Wear Resistance of 100Cr6 Bearing Steel Using Cryogenic Treatment", *Tribology Transactions*, 55 (3): 387–393 (2012).
75. Dixit, S. S., Nimbalkar, S. R., ve Kharde, R. R., "Dry Sliding Wear Analysis of D5 Tool Steel at Different Heat Treatments", *The International Journal Of Engineering And Science (IJES)*, 2 (5): 16–26 (2013).
76. Koneshlou, M., Meshinchi Asl, K., ve Khomamizadeh, F., "Effect of cryogenic treatment on microstructure, mechanical and wear behaviors of AISI H13 hot work tool steel", *Cryogenics*, 51 (1): 55–61 (2011).
77. Kerscher, E. ve Lang, K. H., "Increasing the fatigue limit of a high-strength bearing steel by a deep cryogenic treatment", *Journal Of Physics: Conference Series*, 240 (1): 1–4 (2010).
78. Akhbarizadeh, A. ve Javadpour, S., "Investigating the effect of as-quenched vacancies in the final microstructure of 1.2080 tool steel during the deep cryogenic heat treatment", *Materials Letters*, 93: 247–250 (2013).
79. Amini, K., Akhbarizadeh, A., ve Javadpour, S., "Investigating the effect of holding duration on the microstructure of 1.2080 tool steel during the deep cryogenic heat treatment", *Vacuum*, 86 (10): 1534–1540 (2012).
80. Amini, K., Akhbarizadeh, A., ve Javadpour, S., "Investigating the effect of the quench environment on the final microstructure and wear behavior of 1.2080 tool steel after deep cryogenic heat treatment", *Materials And Design*, 45: 316–322 (2013).
81. Vahdat, S. E., Nategh, S., ve Mirdamadi, S., "Microstructure and tensile properties of 45WCrV7 tool steel after deep cryogenic treatment", *Materials Science And Engineering A*, 585: 444–454 (2013).

82. Podgornik, B., Leskovšek, V., ve Arh, B., "The effect of heat treatment on the mechanical, tribological and load-carrying properties of PACVD-coated tool steel", *Surface And Coatings Technology*, 232: 528–534 (2013).
83. Amini, K., Nategh, S., ve Shafyei, A., "Influence of different cryotreatments on tribological behavior of 80CrMo12 5 cold work tool steel", *Materials And Design*, 31 (10): 4666–4675 (2010).
84. Akhbarizadeh, A., Amini, K., ve Javadpour, S., "Effects of applying an external magnetic field during the deep cryogenic heat treatment on the corrosion resistance and wear behavior of 1.2080 tool steel", *Materials And Design*, 41: 114–123 (2012).
85. Features, P. ve Composition, N., "Hastelloy ® C-22 ® alloy", (2017).
86. Internet: Haynes International, "Nominal Composition", http://www.haynesintl.com/alloys/ally-portfolio_/Corrosion-resistant-Alloys/HASTELLOY-C-22/nominal-composition (2018).
87. Akincioğlu, S., Gökkaya, H., ve Uygur, İ., "The effects of cryogenic-treated carbide tools on tool wear and surface roughness of turning of Hastelloy C22 based on Taguchi method", *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 82 (1–4): 303–314 (2016).
88. Turan, M. E., Sun, Y., ve Akgul, Y., "Improved wear properties of magnesium matrix composite with the addition of fullerene using semi powder metallurgy", *Fullerenes, Nanotubes And Carbon Nanostructures*, 26 (2): 130–136 (2018).
89. Dogra, M., Sharma, V. S., Sachdeva, A., Suri, N. M., ve Dureja, J. S., "Performance evaluation of CBN, coated carbide, cryogenically treated uncoated/coated carbide inserts in finish-turning of hardened steel", *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 57 (5–8): 541–553 (2011).
90. Gill, S. S., Singh, J., Singh, R., ve Singh, H., "Effect of cryogenic treatment on AISI M2 high speed steel: Metallurgical and mechanical characterization", *Journal Of Materials Engineering And Performance*, 21 (7): 1320–1326 (2012).
91. Maleki, E. ve Unal, O., "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*, 11 (March): 82–90 (2018).
92. Khakbaz, F. ve Kazeminezhad, M., "Work hardening and mechanical properties of severely deformed AA3003 by constrained groove pressing", *Journal Of Manufacturing Processes*, 14 (1): 20–25 (2012).

93. Kumar, S., Chattopadhyay, K., ve Singh, V., "Effect of surface nanostructuring on corrosion behavior of Ti-6Al-4V alloy", *Materials Characterization*, 121: 23–30 (2016).
94. Uygur, I., "Microstructure and wear properties of AISI 1038 H steel weldments", *Industrial Lubrication And Tribology*, 58 (6): 303–311 (2006).



ÖZGEÇMİŞ

Muhammed Salih GÜL (1991 - ANKARA) Arş. Gör / Karabük Üniversitesi

İlköğrenimini Ankara'da bitiren Gül, lise öğrenimini yine aynı şehirde Alparslan Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2014 yılında Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünden mezun oldu. 2015 yılında, Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde araştırma görevlisi olarak işe başlamıştır. Geçici görevlendirme ile Karabük Üniversitesi Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığı'nda yaklaşık 3 yıldır (Ağustos 2016-...) görev yapmaktadır.