T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

SIĞ VE DERİN KRİYOJENİK İŞLEMİN X40 CRMOV5 1 TAKIM ÇELİĞİNİN AŞINMA VE DARBE PERFORMANSINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

CENGİZHAN YAMİÇ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
DOÇ. DR. FUAT KARA

DÜZCE, 2022

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

SIĞ VE DERİN KRİYOJENİK İŞLEMİN X40 CRMOV5 1 TAKIM ÇELİĞİNİN AŞINMA VE DARBE PERFORMANSINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Cengizhan YAMİÇ tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Fuat KARA

Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Fuat KARA
Düzce Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Nursel ALTAN ÖZBEK
Düzce Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Murat AYDIN
Karabük Üniversitesi _____

Tez Savunma Tarihi: 22/06/2022

BEYAN

Bu tezde yapılan çalışmanın bana ait olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi beyan ederim. Bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

22 Haziran 2022

Cengizhan YAMİÇ

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimimde ve bu tez çalışmasının hazırlanmasında yaptığı her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Doç. Dr. Fuat KARA' ya en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Laboratuvar hizmeti, malzeme hazırlanması ve testlerin yapılması konularında tez çalışmasının desteklenmesine olanak veren Sarsılmaz Silah Sanayi A.Ş' ye teşekkür ederim.

Ayrıca çalışmalarım boyunca yardımını ve desteklerini esirgemeyen üretim müdürümüz Emrah BAŞIHOŞ' a, ısıl işlem konusunda sağladığı destek için Agâh UZUNHASANOĞLU' a, numunelerin hazırlanmasında destek olan Turgut ARSAN' a, manevi desteklerini esirgemeyen sevgili aileme ve bu çalışmamda ayrıca emeği geçen bütün çalışma arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

22 Haziran 2022 **Cengizhan YAMİÇ**

İÇİNDEKİLER

ŞEKİL LİSTESİ III

ÇİZELGE LİSTESİ V

KISALTMALAR VI

SİMGELER VII

ÖZET VIII

ABSTRACT IX

1. GİRİŞ 1

2. LITERATÜR ARAŞTIRMASI 4

2.1 KRİYOJENİK İŞLEM İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR 4

2.2 LİTERATÜR ARAŞTIRMASININ DEĞERLENDİRİLMESİ 13

3. KRİYOJENİK İŞLEM 17

3.1 KRİYOJENİK İŞLEM TANIMI 17

3.2 KRİYOJENİK İŞLEMİN UYGULAMASI 17

3.3 KRİYOJENİK İŞLEMİN ÇELİKLER ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ 21

3.3.1 Kriyojenik İşlemin Mikroyapı Üzerindeki Etkileri 21

3.3.2 Kriyojenik İşlemin Mekanik Özellikler Üzerindeki Etkisi 24

3.3.3 Kriyojenik İşlemin Çelikler Üzerinde Sağladığı Avantajlar 26

4. ÇELIKLER 28

4.1 SICAK İŞ TAKIM ÇELİKLERİ 29

4.2 SOĞUK İŞ TAKIM ÇELİKLERİ 31

5. MATERYAL VE YÖNTEM 33

5.1 KRİYOJENİK İŞLEM UYGULAMASI 41

5.2 SERTLİK ÖLÇÜMLERİ 43

5.3 DARBE DENEYLERİ 44

5.4 ÇEKME DENEYLERİ 46

5.5 AŞINMA DENEYLERİ 47

5.6 MİKROYAPI İNCELEMELERİ 48

6. BULGULAR VE TARTIŞMA 52

6.1 MİKROYAPI SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ 52

6.2 MAKRO VE MİKRO SERTLİĞİN DEĞERLENDİRİLMESİ 59
6.3 DARBE DAYANIMININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....62
6.4 ÇEKME DAYANIMININ DEĞERLENDİRİLMESİ 63
6.5 AŞINMA PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....66
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....74
8. KAYNAKLAR.....76
ÖZGEÇMİŞ.....84

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1 Kriyojenik işlem çevrimi. 2
Şekil 2.1 M2 takım çeliğinin TEM fotoğrafı a) İşlem öncesi b) İşlem sonrası. 6
Şekil 2.2 Aşınma direncindeki iyileşme oranı a) M1 b) H13 c) En19. 7
Şekil 2.3 D3 takım çeliğinin makro sertlik değerleri. 10
Şekil 2.4 D3 takım çeliğinin mikro sertlik değerleri. 11
Şekil 3.1. Kriyojenik işlem çevrimi. 18
Şekil 3.2. Çeliklerin sıcaklığa göre sertlik ve aşınma değişimleri. 19
Şekil 3.3. A2 Çeliğinin karbür dağılımı a) Yağda su verme + temperleme b) Kriyojenik işlem. 22
Şekil 3.4. AISI 52100 karbür dağılımı a) Yağda su verme + temperleme b) Kriyojenik işlem. 23
Şekil 3.5 Cu-Cr-Zr alaşımının tane boyutundaki değişim. 23
Şekil 3.6. AISI D2 çeliğinin kırılma yüzey görüntüsü. 26
Şekil 4.1. Demir - Karbon diyagramı. 28
Şekil 4.2 X40CrMoV5-1 çeliğin sıcaklık - zaman dönüşümü ve sertlik değişimi. 31
Şekil 5.1 Akış diyagramı. 34
Şekil 5.2. OXFORD Spektrometre cihazı. 35
Şekil 5.3. Çekme numunesi teknik resmi. 35
Şekil 5.4. DOOSAN LYNX2100 LB torna tezgâhı. 36
Şekil 5.5. METACUT 251 kesme cihazı. 37
Şekil 5.6 Satıh taşlama tezgahı. 38
Şekil 5.7 TIME L71-UV broş tezgahı. 39
Şekil 5.8. IPSEN Vakum fırını. 40
Şekil 5.9 X40CrMoV5-1 takım çeliğine uygulanan ısıl işlem grafiği. 41
Şekil 5.10. Kriyojenik işlem cihazı. 42
Şekil 5.11. Kriyojenik işlemin 24 saat bekleme süresindeki ısıl işlem grafiği. 43
Şekil 5.12. NOVOTEST sertlik ölçme cihazı. 44
Şekil 5.13 Darbe testi öncesi numunenin yerleştirilmesi. 45
Şekil 5.14. TIME JB-W300A Darbe test cihazı. 45
Şekil 5.15 Çekme test cihazı. 46
Şekil 5.16. TRD marka aşınma cihazı ve ekipmanları. 48
Şekil 5.17 TRONIC XQ-1 bakalit cihazı ve bakalit numuneleri. 49
Şekil 5.18. Mikro test parlatma cihazı. 49
Şekil 5.19. Nicon optik mikroskop. 50
Şekil 5.20 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM). 51
Şekil 6.1 Östenit yapının martenzite dönüşümü. 52
Şekil 6.2 CHT numunesine SEM görüntüsü. 54
Şekil 6.3 CHT numunesi EDAX grafikleri a) 1.karbür b) 2.karbür c) 3.karbür. 54
Şekil 6.4 SCT-12 numunesine SEM görüntüsü. 55
Şekil 6.5 SCT-12 numunesi EDAX grafikleri a) 1.karbür b) 2.karbür c) 3.karbür. 55
Şekil 6.6 SCT-24 numunesine SEM görüntüsü. 56
Şekil 6.7 SCT-24 numunesi EDAX grafikleri a) 1.karbür b) 2.karbür c) 3.karbür. 56
Şekil 6.8 DCT-36 numunesine SEM görüntüsü. 57
Şekil 6.9 DCT-36 numunesi EDAX grafikleri a) 1.karbür b) 2.karbür c) 3.karbür. 57
Şekil 6.10 Mikroyapı görüntüleri a) CHT b) SCT-12 c) SCT-24 d) DCT-36. 58

Şekil 6.11 Makro sertlik değerlerindeki değişim. 60
Şekil 6.12 Mikro sertlik değerlerindeki değişim. 61
Şekil 6.13 Numunelerin darbe dayanımı. 62
Şekil 6.14 Çekme diyagramı. 64
Şekil 6.15 Çekme deneyi numunelerinin ortalama akma dayanımı (MPa). 65
Şekil 6.16 Çekme deneyi numunelerinin uzama değeri (%). 66
Şekil 6.17 Aşınma oranları. 67
Şekil 6.18 20N için sürtünme katsayıları. 68
Şekil 6.19 Sürtünme sonrası oluşan aşınma kayıpları. 69
Şekil 6.20 Aşınma alanı 3D görüntüsü a) CHT b) SCT-12 c) SCT-24 d) DCT-36..... 70
Şekil 6.21 Aşınan yüzey pürüzlülük değeri (Ra). 70
Şekil 6.22 Aşınan yüzeylerin SEM görüntüsü a) CHT b) SCT-12 c) SCT-24 d) DCT-36. 71
Şekil 6.23 Aşınma yüzeyindeki element dağılım analizi. 72

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa No

Çizelge 2.1 Kalıntı gerilme değeri ve sertlik değerleri. 9
Çizelge 3.1. Farklı bekleme süresinin çelikler üzerindeki mekanik özelliklere etkisi. .. 20
Çizelge 3.2 Kriyojenik işlem sonrası aşınma direncindeki iyileşme oranları. 24
Çizelge 3.3 Bazı malzemelerdeki sertlik değişim oranları. 25
Çizelge 4.1. X40CrMoV5-1 Çeliğinin farklı standartlarda kullanılan kısaltmaları. 29
Çizelge 4.2. X40CrMoV5-1 çeliğin kimyasal kompozisyonu. 30
Çizelge 4.3 Soğuk İş Takım Çeliklerinin Kimyasal Kompozisyonları. 32
Çizelge 5.1 Testlerde kullanılan numune çizelgesi. 33
Çizelge 5.2. X40CrMoV5-1 çeliğin kimyasal bileşim değerleri. 33
Çizelge 5.3 METACUT 251 Hassas kesme cihazı teknik özellikler. 37
Çizelge 5.4 Satıh taşlama tezgahı teknik özellikler. 38
Çizelge 5.5 TIME L71-UV broş tezgahı teknik özellikleri. 39
Çizelge 5.6 IPSEN Vakum fırını teknik özellikleri. 40
Çizelge 6.1 Sıcak iş takım çeliklerinde görülen karbür türleri. 53
Çizelge 6.2 Kriyojenik işlemin sertliğe etkisi. 61

KISALTMALAR

AISI	Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
ANFOR	Fransız Standartları
CHT	Temperli Geleneksel Isıl İşlem
CNC	Bilgisayar Sayısal Kontrol
DCT	Temperli Derin Kriyojenik İşlem
DIN	Alman Standartları Enstitüsü
EN	Avrupa normu
ESR	Yeniden ergitme - Cüruf altı
HB	Brinell sertlik birimi
HRb	Sertlik birimi (B-Rockwell)
HRc	Sertlik birimi (C-Rockwell)
HV	Vikers sertlik birimi
JIS	Japon Standartları
MPa	Mega paskal (basınç birimi)
N	Newton
Nm	Newton metre
OM	Optik Mikroskop
SAE	Otomotiv Mühendisleri Birliği
SCT	Temperli Sığ Kriyojenik İşlem
VAR	Yeniden ergitme - Vakum ark
cm	Santimetre
dk.	Dakika
g	Gram
ksi	Basınç birimi (Kipper square inch)
m	Metre
maks.	Maksimum
mm	Milimetre
s	Saniye
vd.	ve diğerleri

SİMGELER

C	Karbon
Co	Kobalt
Cr	Krom
Cu	Bakır
FN	Yüzeyler arasındaki normal yük
J	Joule
K	Kelvin
Mn	Mangan
Mo	Molibden
Ni	Nikel
P	Fosfor
S	Aşınma mesafesini
Si	Silisyum
V	Vanadyum
X	Malzeme sınıfı
°C	Santigrat derece
k	Spesifik aşınma oranı,
v	Aşınan malzemenin hacmini
ŋ	Eta karbür

ÖZET

SIĞ VE DERİN KRİYOJENİK İŞLEMİN X40CRMOV5-1 TAKIM ÇELİĞİNİN AŞINMA VE DARBE PERFORMANSINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Cengizhan YAMİÇ
Düzce Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi
Danışman: Doç. Dr. Fuat KARA
Haziran 2022, 83 sayfa

Sıcak iş takım çelikleri, tokluk değerlerinin yüksek olması ve yüksek sıcaklıklarda darbe dirençlerinin yüksek olması sebebiyle endüstride farklı alanlarda tercih edilmektedir. Sıcak iş takım çeliklerinde yaygın kullanılan X40CrMoV5-1 sıcak iş takım çeliği ile ilgili literatürde çok sayıda çalışma yapılmış olmasına rağmen bu malzemede kriyojenik işlemin etkilerinin incelendiği çalışmaların sınırlanmış olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmada X40CrMoV5-1 sıcak iş takım çeliği üzerinde sertlik, darbe, çekme, aşınma testleri uygulanmış ve mikroyapı incelemesi yapılmıştır. Yapılan çalışmada iki farklı bekleme süresindeki sığ kriyojenik işlemin (SCT) ve derin kriyojenik işlemin (DCT), geleneksel ısıl işlem uygulanan (CHT) numuneye göre mekanik özellikler üzerine etkileri (mikro sertlik, makro sertlik, akma ve çekme dayanımı, uzama miktarı, darbe enerjisi) incelenmiştir. Mikroyapı, yüzey pürüzlülüğü ve aşınma deneyi sonucu aşınma performansı araştırılmıştır. Sonuç olarak, sığ ve derin kriyojenik işlemin geleneksel ısıl işleme göre aşınma direnci üzerinde sırası ile SCT-12, SCT-24 ve DCT-36 için %1,34, %9,31 ve %13 iyileşme sağladığı tespit edilmiştir. Darbe dayanımında ise en yüksek değer olan DCT numunesinde %2,37 oranında iyileşme görülmüştür.

Anahtar sözcükler: Aşınma direnci, Çekme dayanımı, Darbe direnci, Kriyojenik işlem, X40CrMoV5-1 sıcak iş takım çeliği.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF SHALLOW AND DEEP CRYOGENIC PROCESS ON WEAR AND IMPACT PERFORMANCE OF X40CRMOV5-1 TOOL

Cengizhan YAMİÇ
Düzce Üniversitesi
Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Manufacturing Engineering
Master's Thesis
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Fuat KARA
June 2022, 83 pages

Hot work tool steels are preferred in different areas in the industry due to their high toughness values and high impact resistance at high temperatures. Although there are many studies in the literature on X40CrMoV5-1 hot work tool steel, which is widely used in hot work tool steels, it has been determined that the studies examining the effects of cryogenic treatment on this material are limited. In this study, hardness, impact, tensile and abrasion tests were applied on X40CrMoV5-1 hot work tool steel and microstructure analysis was carried out. In the study, the effects of shallow cryogenic treatment (SCT) and deep cryogenic treatment (DCT) at two different residence times on mechanical properties (microhardness, macrohardness, yield and tensile strength, elongation amount, impact energy) compared to conventional heat treated (CHT) sample.) were studied. Wear performance was investigated as a result of microstructure, surface roughness and wear test. As a result, it was determined that shallow and deep cryogenic treatment provided 1.34%, 9.31% and 13% improvement in wear resistance for SCT-12, SCT-24 and DCT-36, respectively, compared to conventional heat treatment. On the other hand, 2.37% improvement was observed in the DCT sample, which is the highest value in impact strength.

Keywords: Wear resistance, Tensile strength, Impact resistance, Cryogenic treatment, X40CrMoV5-1 hot work tool steel.

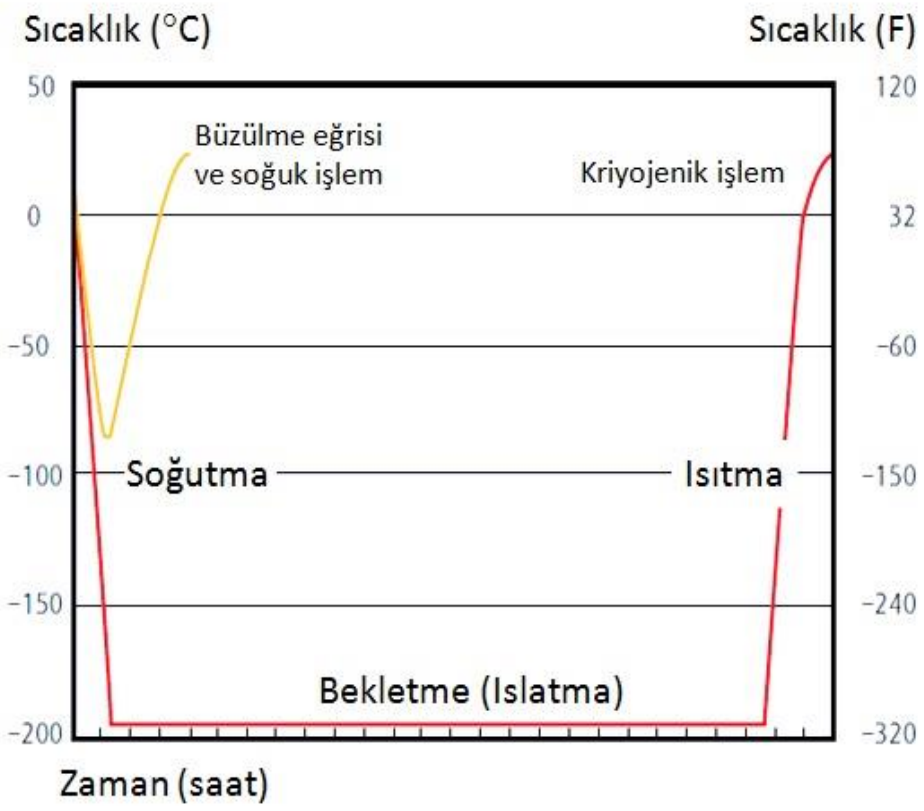
1. GİRİŞ

X40CrMoV5-1 takım çeliği, yaygın olarak kullanılan bir sıcak iş çeliğidir. Hafif metallerin ekstrüzyonu ve dövme metodundaki malzeme üretiminde kullanılırlar. Ayrıca, plastik üretim ve şekillendirme üzerindeki işletmelerde özellikle sıcak yollu kalıplarda ve bakalit kalıplarda kalıp malzemesi olarak tercih edilen X40CrMoV5-1 takım çeliği kalıp alanında yaygın olarak tercih edilir [1]. Yüksek sıcaklıklara dayanım göstermesi sonucu mekanik özelliklerini ve aşınma dayanımı yüksek olan takım çeliğidir. Tokluk ve ısıl kararlılık bakımından çok iyidir. Aşınma direnci yüksek olması sebebiyle savunma sanayi sektöründe de tercih edilmektedir. Bu sebepten bu malzemenin aşınma ve tokluk değerinin yüksek olması gerekmektedir. Geleneksel ısıl işlemin yanı sıra malzemeye uygulanan kriyojenik işlemin literatürde malzemeye olumlu yönde etki saladığı bilinmektedir. Fakat yapılan çalışmlarda aşınma ve tokluk değerlerine sığ ve derin kriyojenik işlemin etkisinin yeterli düzeyde olmadığı görülmüştür. Bu amaç ile X40CrMoV5-1 sıcak iş takım çeliğine uygulanan farklı bekletme sürelerinde sığ ve derin kriyojenik işlem uygulamanın mekanik özelliklere olumlu yönde etki sağlanması amaçlanmıştır. Bu sayede endüstride ve savunma sanayinde kullanılan X40CrMoV5-1 sıcak iş takım çeliğinin mekanik özelliklerinin artırılması ve maliyetlerin düşürülmesi öngörülmektedir.

X40CrMoV5-1 takım çeliği, özellikle 200°C ila 800°C arasında değişen yüksek sıcaklıklardaki üretim süreçlerinde malzemenin üstün mekanik davranışından dolayı [2] takım, kalıp ve kalıp endüstrisinde en yaygın kullanılan çeliklerden biridir [3], [4]. Ayrıca X40CrMoV5-1 takım çeliği, genellikle sertleştirme ve temperleme olan geleneksel ısıl işlemlerin neden olduğu mikroyapısal değişiklikler yoluyla mekanik özellikleri iyileştirilebilir [5]. Geleneksel ısıl işlem ile sertleştirme işlemine tabi tutulduğunda 50 ila 54 HRc sertlik değerlerine ulaşmaktadır [6]. Sertleştikten sonra yapısını değiştirmek ve mekanik özelliklerini ayarlamak için tavlama işlemlerine tabi tutulmaktadır [5], [7]. CHT sıcak iş takım çelikleri, dağılmış karbürlerle ince martensit çıtaların oluşturduğu mikroyapıları ortaya çıkarmaktadır [8], [9]. Bu çalışmada geleneksel ısıl işlem sonrası farklı sürelerde bekleme yapılan sığ ve derin kriyojenik

işlemin etkisi ile malzemenin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi hedeflenmektedir.

Kriyojenik işlem, sertlik ve çekme mukavemetinde artış, aşınma direncinde artış, daha fazla darbe tokluğu, düşük kırılganlık, düşük kalıntı gerilmeler ve daha yüksek termal kararlılık yönünden takım çeliklerinde önemli iyileşmeler sağlamaktadır [10], [11]. Takım ömründe %44-126 ve %301 iyileştirmeler olduğu kaydedilirken [12], [13], M2 HSS takım çeliklerinin aşınma oranında %56-87 aralığında iyileşme sağladığı belirtilmiştir [14]. Benzer şekilde literatürde D3 ve D6 tipi takım çeliği üzerine aşınma oranında %39-68 [15] ve %52 oranında [16] iyileşmeler olduğu yönünde çalışmalar yapılmıştır. Ancak bu gelişmelerden sorumlu olan mikroyapısal mekanizmalar henüz tam olarak anlaşılmamıştır ve daha fazla araştırmaya ihtiyaç olduğu bilinmektedir [13], [17]. Literatürlerin çoğunda tartışılan ortak mekanizmalardan bazıları, tutulan östenitin martensite tam dönüşümü, üçüncül karbürlerin (ETA karbürler) çökeltilmesi ve martensitik matriste düzgün dağılımı ve daha yoğun moleküler yapının oluşturulmasıdır [12], [13], [18]. Şekil 1.1 'de kriyojenik işlem çevriminde aşamalar belirtilmiştir [19], [20].



Şekil 1.1 Kriyojenik işlem çevrimi.

Zbigniew Latas, sıcak dövme takım çeliklerinde (55NiCrMoV6 ve X38CrMoV5-1) kriyojenik işlemin etkisi üzerin araştırma yaptı ve geleneksel ısıl işleme kıyasla derin kriyojenik işlemin (DCT) sertlik ve aşınma direncinde önemli bir artış olduğunu bildirmiştir [21]. M. Perez, geleneksel işleme kıyasla kriyojenik işlemin H13 takım çeliğinin kırılma tokluğunda %22-24 oranında iyileşme olduğunu belirtmiştir [22]. Çiçek A. vd. (2013), kriyojenik işlemin H13 takım çeliğinin işlene bilirliği üzerindeki etkisini araştırmış ve bu çeliğin tornalaması sırasında aşınma hızında, yüzey pürüzlülüğünde ve kesme kuvvetlerinde azalma olduğunu bildirmiştir [23]. Mehdi Koneshlou, DCT 'nin AISI H13 takım çeliği üzerindeki etkisini incelemiş ve burada sertlik, çekme mukavemeti, darbe enerjisi ve aşınma direncinde iyileşme olduğunu belirtmiştir [18]. Bu özelliklerdeki iyileşme, tutulan östenitin martensite dönüşümü, çok ince karbürlerin çökelmesi ve daha düzgün ve daha küçük martensitik mikroyapısı ile açıklanmıştır.

Bu çalışmada sertlik, çekme, darbe ve aşınma deneleri yapılarak sığ ve derin kriyojenik işlemin malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ayrıca mikroyapı ve faz analizi yapılarak farklı bekleme sürelerinde uygulanan sığ ve derin kriyojenik işlem sonrası karbür dağılımındaki etkileri belirlenmiştir. Ayrıca X40CrMoV5-1 takım çeliğinin aşınma sonrası yüzey ve mikroyapıları araştırılmıştır.

Sonuç olarak bu çalışmanın amacı; sığ ve derin kriyojenik işlemin farklı bekleme süresinde X40CrMoV5-1 takım çeliğinin mekanik özelliklerine etkileri incelenerek, sertlik, çekme, darbe ve aşınma değerlerindeki değişimlerini tespit etmektir. Ayrıca, sığ ve derin kriyojenik işlem sonrası oluşan mikroyapıdaki karbon dağılımı ve element analizi yapılmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1 KRİYOJENİK İŞLEM İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu çalışma, öncelikli olarak 1920 ve 1930'lu yıllarda uygulanmaya başlayan yüksek hız çeliklerinde, malzemenin mikroyapısında ısıl işlemden sonra oluşan ve malzeme ömrüne negatif etki eden yumuşak faz kalıntı östenitin, daha sert olan martenzite dönüştüğü için performansı iyileştiği bu çeliklerde görülmüştür [24]. İlerleyen zamanda kriyojenik işlem ile ilgili yapılan diğer çalışmalar; takım çeliklerinin aşınma ve yorulma performansları, faz dönüşümlerinin incelenmesi, kalıntı gerilmelerin değişmesi ve malzemelerin mekanik özelliklerindeki iyileştirmeler üzerine yapılmıştır.

Gordon vd., sertleştirme yapılmış 18-4-1 çeliğin yapısındaki kalıntı östenit dönüşümünü -196 °C'de sıvı nitrojen içinde tutarak incelediler. 93 ile 468 °C arasında temperlendiğinde kalıntı östenit dönüşümü oluşmaz, ancak sıcaklıklar 468 °C'yi aştığında yeterli karbür çökeltmesi meydana geldiği ve kalıntı östenit dönüşümünün gerçekleştiği tespit edilmiştir. Bu nedenle, sıfırın altında soğutma işlemiyle çeliğin; sertlik, mukavemet ve süneklik açısından geleneksel su verme ve menevişleme işlemleriyle elde edilemeyen üstün özellikler elde ettiği tespit edilmiştir [25].

Kuzmenko vd., -196°C yapıdaki çeliklerinin dayanıklılığını oda sıcaklığında incelemişlerdir. Çekme deneylerinden sonra -196°C sıcaklıkta, çeliklerin çekme dayanımında artış; yüzdeki uzama miktarında azalma tespit edilmiştir. Ayrıca, yorulma direnci çeliklerde kriyojenik işlem ile birlikte artışı tespit edilmiştir [26].

Tavadze vd., krom-mangan çeliğine kriyojenik uygulamanın farklı sıcaklıklarda (+20 °C, -78 °C, - 196 °C ve -253 °C) sıvı azot içende bekletilmesi ile östenit yapının mekanik özelliklerindeki değişimlerini incelemiştir. Belirtilen sıcaklıklarda gerçekleştirilen çekme ve darbe testleri sonuçları, test sıcaklığı azaldığında süneklik özelliklerinin azaldığı, çeliğin mukavemet karakteristikleri iyileştiği gözlenmiştir [27].

Stepanov vd., kriyojenik işlemin -196°C derecede krom-mangan çeliğinin mekanik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Kriyojenik işlemin çekme mukavemetini ve yorulma direnci arttırdığı tespit etmişlerdir. Smolnikov ve Kossovitch yaptıkları

çalışmada, kriyojenik işlem gören takımların ömründe % 10 ile % 40 oranında iyileşmeler olduğunu tespit etmişlerdir [28].

Strife vd., 5Ni ve 9Ni çeliklerinin mikroyapı ve kırılma özellikleri üzerinde kriyojenik işlemin etkilerine bakmışlarıdır. Kriyojenik işlemden (-196 °C) sonra iki malzemenin de kırılma tokluğunda iyileşme olduğu, bu iyileşmenin kalıntı östenitin martenzite dönüşümü ile gerçekleştiği belirlenmiştir [29].

Barron yaptığı çalışmada -84 °C ve -196 °C'de tutmanın geliştirilmiş aşınma direnci üzerindeki etkisini belirlemiş; malzemeye kriyojenik işlem uygulanmıştır. Takım çeliklerinde, -196 °C'de işlemden sonra aşınma direncinde önemli bir artış ve -84 °C'de yaşlandırmadan sonra daha küçük bir artış gözlendi. Paslanmaz çelik için, her iki sıcaklıkta da kriyojenik işlemden sonra aşınma direncinde hafif bir artış gözlemlendi, ikisi arasındaki fark %10'dan az. Düz karbon çeliği ve dökme demir, her iki sıcaklıkta da işlemden sonra hiçbir gelişme göstermemiştir [30].

Frey, numuneleri sıvı nitrojen ortamında -196 °C'de 20 saat tutarak kriyojenik işlemlerle P/M çeliklerin ve matkap uçlarının performanslarındaki iyileşmeyi incelemek için bir çalışma yapmıştır. Yüksek hız çeliği ve kobalt içeren matkap uçları ile yapılan deneylerin sonuçlarında; düşük sıcaklık işleminden sonra matkap ömrü sırasıyla %282 ve %341 olmuştur. Devam eden bir çalışmada, iki farklı P/M çeliğinin (sertleştirilmiş ve karbonitrürlenmiş) kalan östenit miktarı, sertlik ve aşınma direnci testler ve ölçümler ile belirlenmiştir. Düşük sıcaklık işleminden sonra her iki çelik grubunda da kalan östenit miktarı aynı oranda azalmakta, sertlik değeri ve aşınma direnci farklı oranlarda artmaktadır [31].

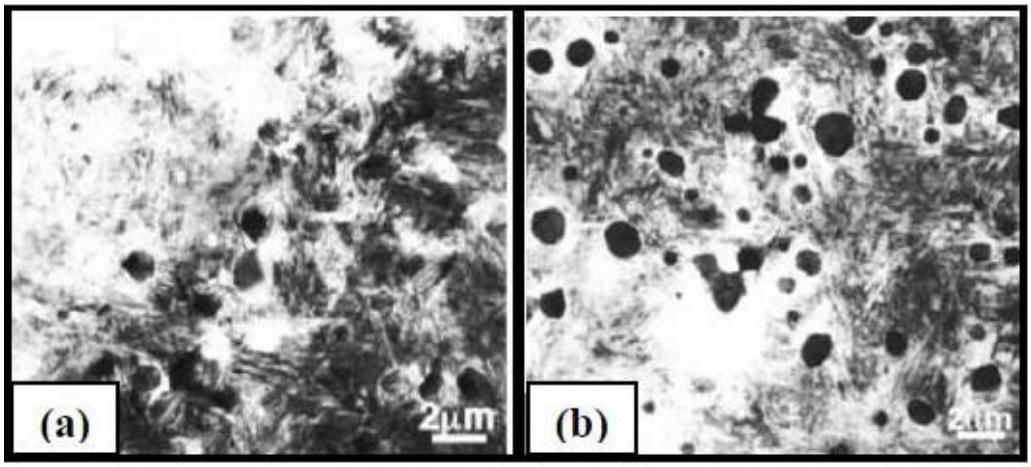
Pillai, bazı takım çelikleri ve kaplamasız sinterlenmiş karbür kesici takımların aşınma davranışlarını incelemek amacı ile bahsi geçen malzeme ve takımlara, aşınma testinden önce -196 °C sıcaklıkta kuru soğutma işlemi uygulamıştır. AISI 52100, AISI A2, AISI D2, AISI M2 ve AISI O1 çelikleri için aşınma direncindeki artış sırasıyla %500, %620, %380, %200 ve %400 değerlerinde olduğu, kaplamasız karbür kesici takımlarda ise bu artışın %37,5 değerinde olduğu belirlenmiştir [32].

Moore vd., AISI H13, AISI D2 ve Vanadis 4 takım çelikleri için farklı bekletme süresi, farklı bekletme sıcaklıkları ile yapılan kriyojenik işlemin ve temperleme sıcaklığının sertlik etkisini incelemişlerdir. Sertlik değeri; bekletme sıcaklığının artışıyla artmış,

temperleme sıcaklığının artışıyla azalmıştır. On beş gün gibi uzun süreli bekletilen numunelerin sertliği, hiç bekletilmeyen numunelerin sertliğinden daha düşük olduğu görülmüştür [33].

Collins vd., kriyojenik işlemin AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin aşınma direnci üzerindeki etkisini inceledi. Çalışmada, takım çeliğinin sıcaklığı -140 °C ile -196 °C arasında tutulmuş, DCT sonrası sertlik, tokluk ve aşınma direnci artmıştır. Sertlikteki artış, yumuşak fazda tutulan östenitin yumuşak bir faz olan martensite dönüşmesi ile ilgilidir. Kriyojenik işlem sırasında, temperlenmiş numune çökelme gösteren ince karbür yapısının oluşumu ve eşit dağılması tokluk ve aşınma direncindeki artışa atfedilmiştir [34].

Huang vd., kriyojenik işlemden sonra M2 takım çeliğinin mikroyapısındaki değişimleri incelemişlerdir. Yapılan araştırmada kriyojenik işlemin karbon kümelenme oluşumunu kolaylaştırabileceği ve sonraki ısıl işlemde karbür yoğunluğunu artırabileceği tespit etmişlerdir. Bundan dolayı kriyojenik işlemin martenzit matristeki karbür oluşumunu kolaylaştırdığı, çeliklerin aşınma direnci iyileştiği ve karbür miktarının ve hacim oranını artırmanın yanı sıra daha homojen karbür dağılımı sağladığı belirlenmiştir [35]. Şekil 2.1 'de M2 takım çeliğine ait TEM 'de çekilen mikroyapı gösterilmiştir. Resme bakıldığında mikroyapıdaki dağılımın eşit olduğu görülmektedir. Bunun yanı sıra karbür miktarının arttığı martenzit yapının oluştuğu görülmüştür.

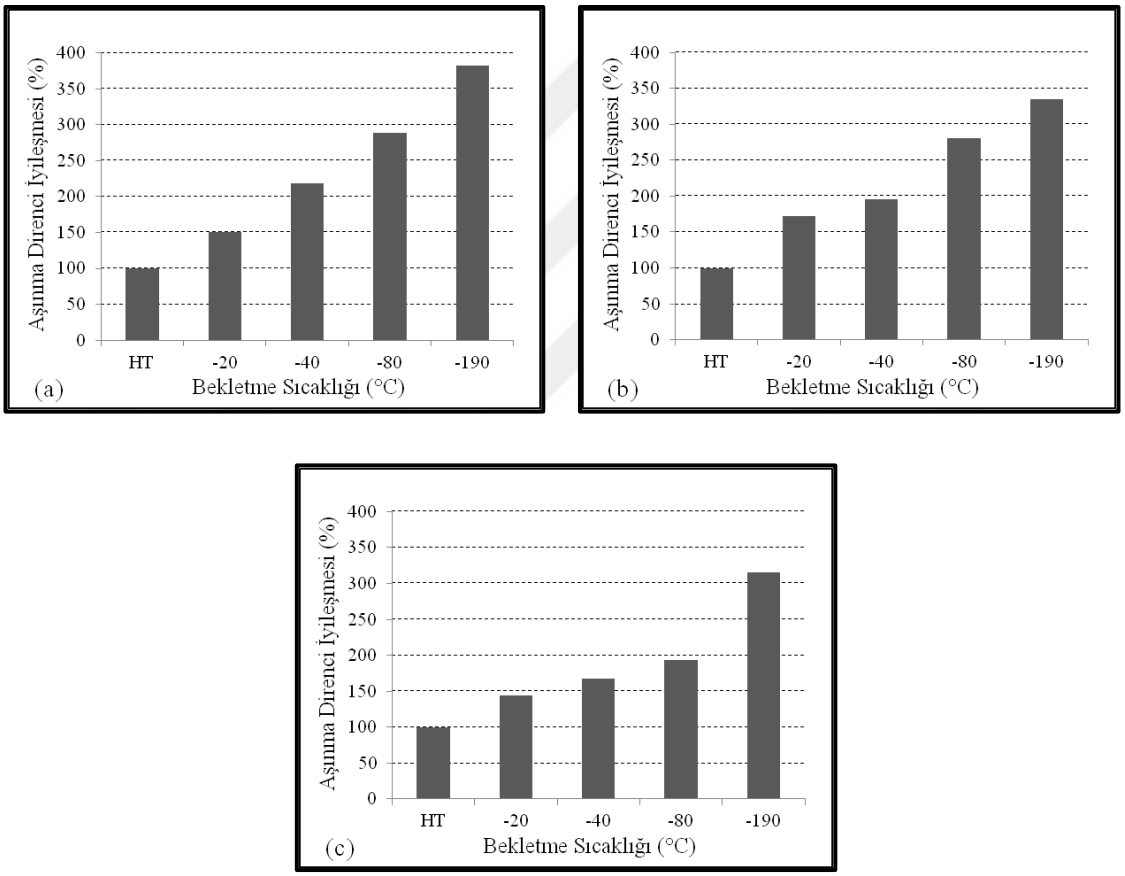


Şekil 2.1 M2 takım çeliğinin TEM fotoğrafı a) İşlem öncesi b) İşlem sonrası.

Prabhakaran vd., sığ kriyojenik işlem (-80°C), derin kriyojenik işlemin (-196°C) geleneksel ısıl işlemin EN 353 çeliğine darbe dayanımı üzerindeki etkisini incelemiştir.

Sığ kriyojenik işlem ile derin kriyojenik işlem kıyaslandığında darbe dayanımında bir değişim olmadığı; fakat geleneksel ısıl işlem ile karşılaştırıldığında kriyojenik işlemden sonra malzemenin darbe dayanımının arttığı tespit edilmiştir [36].

Babu vd., kriyojenik işlemin M1, EN19 ve H13 takım çeliklerinin farklı sıcaklıklarda (-20°C, -40°C, -80°C ve -190°C) aşınma direnci üzerindeki etkisi üzerine bir çalışma yürütmüştür. Aşınma testi sonucunda; kriyojenik işlemde azalan sıcaklık ile aşınma direncinin artış sağladığını gözlemlenmiştir. Şekil 2.2 'de aşınma iyileşme oranları verilmiştir. En yüksek aşınma direnci artışları sırasıyla M1, H13 ve En19 takım çelikleri için %382, %335 ve %315 olmuştur [37].



Şekil 2.2 Aşınma direncindeki iyileşme oranı a) M1 b) H13 c) En19.

Zhirafar vd., kriyojenik işlemin AISI 4340 çeliğinin mikroyapı ve mekanik özellik üzerine etkileri üzerinde çalışmıştır. Yorulma, darbe ve sertlik deneylerini içeren mekanik deneyler ile numunelerin kırılma özellikleri; farklı kriyojenik işlem ve temperleme sıcaklıkları uygulanmış numuneler üzerinden yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Geleneksel ısıl işlem uygulanan çeliklerle karşılaştırıldığında

kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin tokluğun daha düşükken, sertliği ve yorulma dayanımı küçük bir miktar yüksek olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmada kriyojenik işlem ve temperleme ile sertlik ve yorulma direncindeki iyileşmedeki etkenin kalıntı östenitin martenzite dönüşmesi olduğu nötron kırılma ile gösterilmiştir [38].

Benzelli vd., geleneksel ısıl işlemin, sığ ve kriyojenik işlemlerin ve ardından tavlamanın EN 353 karbonlu çelik üzerindeki etkisini araştırdı. Yüzeyde oluşan kalıntı basma gerilmesi, temperleme öncesinde ölçülür ve karşılaştırılır. Ayrıca geleneksel ısıl işlem, sığ ve kriyojenik işlem olmak üzere üç farklı işlem için tutulan östenitin hacim oranı sırasıyla %28, %22 ve %14'tür. Kalıntı gerilmenin ölçülmesinden sonra, bu üç prosesin karşılaştırılmasında, kriyojenik proses sonrası tavlama prosesinde bunun tam tersi bir durum meydana gelmekte, kriyojenik prosesten sonra kalıntı gerilme değeri azalmakta ve basma kalıntı gerilmesi artmaktadır. Bu gerilim giderme davranışının esas olarak temperlemeden sonra derin kriyojenik olarak işlenmiş numunelerde ince karbür çökelmesindeki artışla ilgili olduğunu düşündü [39].

Bensely vd., bu çalışmanın devam niteliğinde olan ikinci çalışmalarında sığ ve derin kriyojenik proses uygulanmış numunelerin, konvansiyonel ısıl işlem uygulanmış numunelere göre yorulma ömründe sırasıyla %71 iyileşme ve %26 azalma olduğu tespit edilmiştir. Kalıntı östenitin ve karbürlerin birleşik bulunması, konvansiyonel ısıl işlem ve derin kriyojenik proses uygulanmış numunelere göre sığ kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin daha iyi bir yorulma mukavemetine sahip olmasına neden olduğu şeklinde yorum yapılmıştır [39].

Dhokey ve Nirbhavne, AISI D3 soğuk iş takım çeliğinin düşük sıcaklıkta işlenmesinden sonra çoklu tavlamanın etkisini belirlemek için disk üzerinde pim test cihazı kullanılarak aşınma testleri yapılmıştır. AISI D3 takım çeliklerinin aşınma direncini iyileştiren; aşınma yüzeyi mikroyapısını, aşınma hasarını, sertlik verilerini ve SEM analizini açıklar. Tek temperli AISI D3 çeliğinin, geleneksel ısıl işleme göre %93 daha düşük aşınma oranına sahip olduğu belirlenmiştir. AISI D3 çeliğinin aşınma direnci üzerinde düşük sıcaklık muamelesi sonrası ikincil ve üçüncül tavlama işlemlerinin olumsuz etki yaptığı gözlendi [40].

Amini vd., kriyojenik işlemin 0, 6, 24, 48, 75, 168 saat bekleme süresi ile derin kriyojenik işlemin ve sığ kriyojenik işlemin 80CrMo12-5 soğuk iş takım çeliğinin

aşınma davranışı üzerindeki etkisine bakmıştır. Mekanik testler sonucunda, kriyojenik işlem gören numunelerin sertlik ve aşınma direnci 48 saat olarak belirlenmiş, aşınma direncinde kayda değer bir artış görülmüştür [41].

Koneshlou vd., AISI H13 sıcak iş takım çeliğinin mekanik özellikleri ve mikroyapısı üzerinde düşük sıcaklık (sıfır altı) işlemlerinin etkisini araştırmıştır. AISI H13 takım çeliğine -72 ºC'de sığ kriyojenik işlem ve -196 ºC'de derin kriyojenik işlem uygulanmıştır. Malzeme içerisindeki kalıntı östenitin martenzite dönüşmüştür. Uygulama sıcaklığı azaldıkça daha fazla kalıntı östenitin martenzite dönüştüğü ve aynı zamanda mikroyapıda daha küçük ve daha homojen karbür dağılımı olduğu görülmüştür. Derin kriyojenik işlem daha homojen ve çok ince karbür parçacıkların çökelmesini sağladığı ve mikroyapıda meydana gelen bu değişiklikler ile AISI H13 takım çeliğinin mekanik özelliklerinin iyileştiği göstermiştir [8].

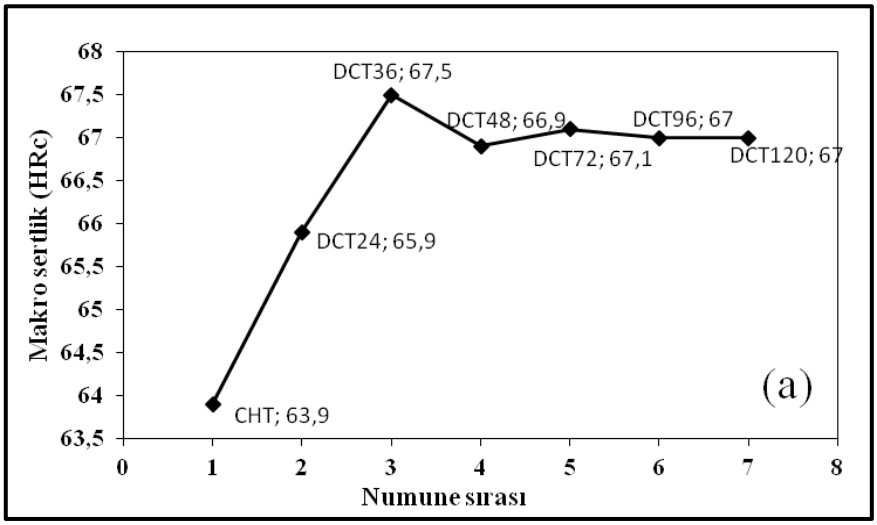
Senthilkumar vd., kriyojenik işlemin AISI 4140 çeliğinin kalıntı gerilme durumu üzerindeki etkisini araştırdı. Su verme ve temperleme arasında iki farklı soğutma işlemi, sığ bir düşük sıcaklık işlemi (-80°C'de 5 saat) ve derin bir düşük sıcaklık işlemi (-196°C'de 24 saat) gerçekleştirilmiştir. Kriyojenik işlem sıcaklığının düşürülmesi, daha fazla östenitin martensite dönüşmesine neden olur. Bu nedenle, temperlenmemiş derin kriyojenik işlemden geçirilmiş (DCT) numunelerde büyük sıkıştırma kalıntı gerilmeleri oluşmuştur. Çizelge 2.1 'de test edilen numunelerin kalıntı gerilme ve sertlik değerlerinin değişimini verilmiştir.

Çizelge 2.1 Kalıntı gerilme değeri ve sertlik değerleri.

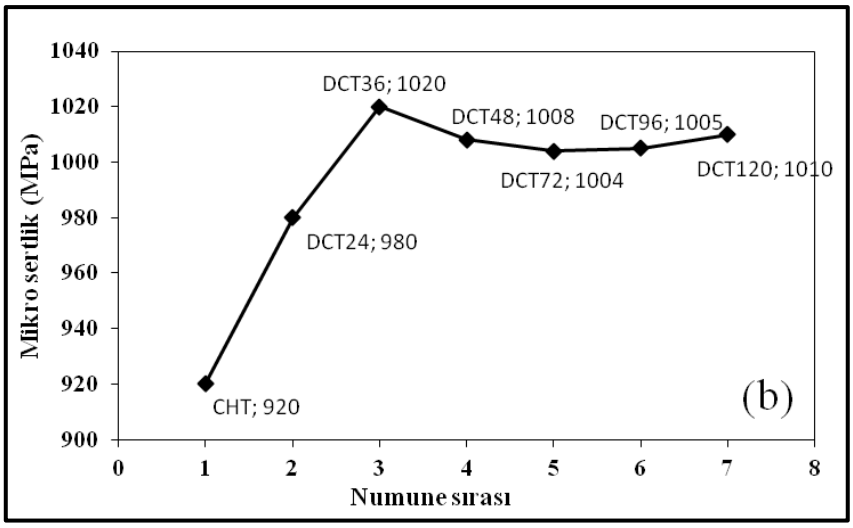
Numune	Eksende Oluşan Kalıntı Gerilme (MPa)	Çevrede Oluşan Kalıntı Gerilme (MPa)	Sertlik Değeri (HRc)
Temperleme + CHT	-136,9	-107,97	60
Temperleme + SCT	-125,67	-66,26	64
Temperleme + DCT	-184,06	-175,00	66
CHT + Temperleme	108,10	148,76	55
SCT + Temperleme	19,43	49,83	56,7
DCT + Temperleme	-69,10	-88,53	60,3

Temperleme sonrası geleneksel ısıl işlem (CHT) ve sığ kriyojenik işlem (SCT) numuneleri incelendiğinde derin kriyojenik işlemde kalıntı gerilme azalırken, kriyojenik işlemden sonra uygulana temperleme de CHT ve SCT numunelerinde kalıtı gerilme görülmüştür (Çizelge 2.1). Kriyojenik işlem sonrası her iki durumda da sertlik değerlerinde artış görülmüştür. Derin kriyojenik işlem sonrası % 10'luk bir artış gözlenmiştir. Sonuç olarak bu çalışmada AISI 4140 çeliği için temperleme öncesinde yapılan derin kriyojenik işlemden sonra maksimum basma kalıntı gerilmelerinin oluştuğu bulunmuştur. Ayrıca bu çalışmada, derin kriyojenik işlem ile gerçekleşen gerilim giderme olayı, kalıntı gerilme durumunu olumlu yönde etkilemesi ile dikkat çekmiştir [42].

Amini vd., kriyojenik işlem ile AISI D3 soğuk iş takımlarının mikroyapısal değişimlerini, karbür dağılımını, makroskobik ve mikroskobik değişimlerini farklı bekletme sürelerinde (24, 36, 48, 72, 96 ve 120 saat) sertliğin çelikler üzerindeki etkisini araştırmıştır. Şekil 2.3 ve Şekil 2.4 'de farklı bekletme süresinde derin kriyojenik işlem uygulanan D3 takım çeliğinin makro ve mikro sertlik değerleri gösterilmektedir. Deney sonucu olarak, mikroyapı dağılımı, karbür oranı ve sertlik (makro ve mikro) değerlerine en iyi sonuçlar 36 saat bekletme süresi ile elde edildiği belirlenmiştir [43].



Şekil 2.3 D3 takım çeliğinin makro sertlik değerleri.



Şekil 2.4 D3 takım çeliğinin mikro sertlik değerleri.

Podgornik vd., kriyojenik işlemin ve ardından farklı bekletme sürelerinde (25 saat ve 40 saat) P/M HSS'nin plazma nitrürlenmesinin mekanik özellikler üzerindeki etkisini araştırdı. Kriyojenik işlem ile birlikte daha düşük kırılma tokluğu ve daha yüksek sertlik elde edilmiştir. Yüzey sertliğinde plazma nitrürleme işlemi ile ciddi artışlar görülmüştür. Mekanik özellikler bakımından 25 saat bekletilen kriyojenik işlem numunelerine göre 40 saat bekletilen kriyojenik işlem numuneleri daha iyi sonuçlar alınmıştır. Geleneksel ısıl işlem görmüş en yüksek yük taşıma kapasitesine bu numuneler ile ulaşılmış, fakat numuneler en yüksek sertliği vermemiştir. Kriyojenik işlem ve plazma nitrürleme işlemi yük taşıma kapasitesini düşürmüş, sertliği arttırmıştır [44].

Amini vd., AZ91 magnezyum alaşımının aşınma davranışları üzerinde derin kriyojenik işlemin etkisini incelemişlerdir. Numunelerin sertleştirme işlemi östenitleme sıcaklığına ısıtılıp yağda, suda ve sıvı nitrojende soğutularak yapılmıştır. Isıl işlemden sonra tüm numuneler -196°C'de sıvı nitrojen ile 24 saat bekletilerek derin kriyojenik işlem uygulanmıştır. Numunelerin sertlik ve aşınma oranlarını karşılaştırdığımızda, derin kriyojenik işlem gören numunede en yüksek sertlik ve en düşük aşınma oranı suda soğutularak sertleştirildikten sonra elde edilmiştir. Mikroyapısal değişimlerin derin kriyojenik işlem esnasında gerçekleşmesi atıf edilmiştir [45].

F. Kara, AISI 52100 malzemesi üzerinde çekme, yorulma, taşlama deneyleri ve malzeme karakterizasyon testleri yapmıştır. İki farklı bekleme süresinde derin kriyojenik işlem uygulaması yapılmış ve malzemenin mekanik özelliklerinde

iyileşmeler olduğunu tespit etmiştir. Yorulma deneyi sonucunda farklı bekleme süresindeki derin kriyojenik işlem sonrası yorulma dayanımlarının DKİ- 36, DKİ-24, DKİ-48, DKİ-60 ve DKİ-00 numuneleri için sırasıyla % 108, % 100, % 40 ve % 12 oranlarında iyileştiği tesit edilmiştir [46].

A. Çiçek vd., tavlama işleminin H13 takım çeliğinin mikroyapısı üzerindeki etkisini incelemiştir. CHT dahil tüm numunelerde yüksek aşınma direncini gösterdiği belirtmiştir. Benzer şekilde, DCT sonrası tavlama işlemi, CHT 'ye kıyasla mikro ve makro sertlikte hafif bir artış sağlamıştır. Çalışma sonucuna göre, γret → α′ dönüşümü hem mekanik özelliklerde hem de ikincil karbürlerin çökeltilmesi (2 saat boyunca 565°C 'de) ve ince karbürlerin düzgün dağılım gösterdiği belirtilmiştir [47].

Li vd., kriyojenik işleme tabi tutulan IN718 süper alaşımının mekanik özelliklerini ve mikroyapılarını araştırdı. Tanelerin önemli ölçüde rafine edildiği ve iç stresin arttığını kanıtlamıştır [48].

Araghchi vd., su verme işlemine tabi tutulan alüminyum alaşımının kalıntı gerilimlerini gidermek için yeni bir derin kriyojenik işlem uygulamıştır. Semente karbür takımada, derin kriyojenik işlemin semente karbür kesici takımların mikroyapılarını ve mekanik özelliklerini değiştirebileceği ve ayrıca takım aşınma direncini önemli ölçüde iyileştirebileceği ve ayrıca sürtünme katsayısını azaltabileceği birçok araştırma deneysel olarak doğrulanmıştır [49].

Katoch vd., kriyojenik işlemlere tabi tutulan H13 takım çeliğinin aşınma direncini iyileştirmiştir. Çalışmalarında H13 takım çeliğinin kayma aşınma direncini artırmışlarıdır. En yüksek aşınma direncine sahip mikroyapı -184°C 'de 21 saat boyunca beklemesiyle elde edilmiştir [9].

Zhu vd., sertleştirilmiş H13 takım çeliği üzerinde farklı ön temperleme sıcaklıklarında (620 °C ila 750 °C) farklı maruz kalma süreleri (5 ila 60 dakika) için ön temperleme işlemleri uygulamıştır. Daha sonra sertleştirme ve ön tavlama işlemlerine tabi tutulan malzeme 600 °C'de 30 dakika tavlanmıştır. Sonuçlar, 640 ve 660 °C'de (5 ila 15 dakika arasında) ön temperleme işlemlerinin malzemede üstün mekanik özellikleri desteklediğini kanıtlamıştır [50].

Liu, K. vd., derin kriyojenik işlemin (DCT) aşındırma prosesinde Cu-Ni-Co-Si alaşımının çekme mukavemeti, kırılma uzaması ve iletkenliği üzerindeki etkisini araştırılmıştır. Cu-1.34, Ni-1.02, Co-0.61, Si alaşımının çekme mukavemeti soğuk haddelemede %47 oranında azaldığı görülmüştür. Artan DCT süresinde 36 saatten sonra kırılma uzaması ve iletkenlik değerleri stabil hal almıştır. DCT 'den sonra mikroyapı daha düzgün hale gelmiştir. 48 saatin sonun en küçük tane boyutunda ulaşıldığını belirtti. DCT sonrası katı çözelti elementleri Ni, Co ve Si ince ve eşit dağıldığını gördü. 20-70 μm küresel ikinci faz partikülü oluşturmak için Cu matrisinin çökelmesi desteklenmiştir [51].

A. López-Leyva vd., kriyojenik işlem sonrası H13 çeliğe temper uygulayarak mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkisini analiz etmişleridir. Numuneler 24 saat –80 °C'de SCT ve 24 saat –185 °C'de DCT 'ye tabi tutulmuştur. Temperleme işlemi 24 saat boyunca 650 °C'de gerçekleştirilmiştir. İlave olarak bir grup numuneye geleneksel ısıl işlem sonrası sadece temperleme işlemi uygulanmıştır. Kriyojenik işlemden martensit yapıda ince kristallerin oluşumu görülürken geleneksel işlem ve temperleme sonrası mikroyapıda martensit yapıda daha geniş tanecikler görülmüştür. Bu durum kriyojenik işlem sonrası martensit yapının incelmesi ve ince karbürlerin oluşumunu desteklemiştir. Ayrıca SCT ve DCT numuneleri yapısal değişikliklere bağlı olarak sertlik değerlerinde de iyileşme elde etmiştir. CHT numunesine göre aşınma direncine %17 ve %25 oranında katkı sağlamıştır [52].

2.2 LİTERATÜR ARAŞTIRMASININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Literatür çalışmalarında kriyojenik işlem geleneksel ısıl işlemin devamı olarak belirtilmiştir. Sığ ve derin kriyojenik işlem olarak iki grupta sınıflandırılmıştır [53]. Farklı bekleme sürelerinde sığ ve derin kriyojenik işlemin etkileri incelenmiştir. Literatür araştırmasında kriyojenik işlemin çelikler üzerinde mekanik özelliklerine önemli etkiler sağladığı görülmüştür.

Bazı çalışmalarda, sığ kriyojenik süreçler -50 ºC ile -80 ºC arasında, derin kriyojenik

süreçler -125 ºC ile -196 ºC arasında tanımlanmıştır [54], [23]. Sığ kriyojenik süreçler ise, bazı çalışmalarda -50ºC ve -100ºC 'de uygulanırken, -125°C ve -196ºC arasında ise derin kriyojenik işlemler uygulanmıştır [15], [55]. 1960'ların sonlarına kadar, parçalar doğrudan sıvı nitrojene daldırılarak kriyojenik işlem yapılıyordu ve bu işlem sonucunda parçalarda mikro çatlaklar oluşuyordu. 1960'ların sonlarında geliştirilen kriyojenik arıtma sistemleri, soğutma ve ısıtma hızlarındaki sıcaklığı kademeli olarak kontrol ederek, son derece düşük sıcaklıklarda etkili ve çatlaksız kriyojenik işleme izin verildi.

Araştırmada genel olarak derin ve sığ kriyojenik işleminin geleneksel ısıl işlemden daha iyi olduğuna inanılmaktadır. Bununla birlikte, bazı literatür çalışmalarında derin kriyojenik işleme göre sığ kriyojenik işlemin sonuçları daha olumlu olduğu görülmektedir. Bensely vd., sığ ve derin kriyojenik işlem görmüş numunelerin yorulma ömrü, geleneksel ısıl işlem görmüş numunelere kıyasla sırası ile %71 iyileşmiş ve %26 azalmıştır. Bu, tutulan östenit ve ince karbürlerin bir arada bulunmasına bağlanmaktadır. Sığ kriyojenik olarak işlem görmüş numuneler, sadece ısıl işlem görmüş ya da derin kriyojenik işlem görmüş numunelere göre yorulma direnci daha iyidir [56]. Kerscher ve Lang, düşük sıcaklık uygulamasından sonra 950HV'den 770HV'ye bir düşüş bildirmiştir [57]. Kriyojenik işlemin geleneksel ısıl işleme göre sertlik ve aşınma direncinde önemli etkileri olduğu da literatür çalışmalarında desteklenmiştir [52].

Kriyojenik işlemin bekleme süresi konusunda farklı çalışmalar yapılmış ve bu çalışmalarda en iyi sonuçlar genellikle 36 saat bekletilen numunelerde alındığı gözlemlenmiştir [43], [58], [59]. Ancak bazı çalışmalarda 40 saat [44] ve 48 saat [41], [43] bekletilen numuneler daha iyi performans göstermiştir.

Literatür çalışmaları sonucunda, çelik malzemelerin kriyojenik işlemlerle iyileştirilmesinin arkasındaki mekanizma tam olarak açıklanmamasına rağmen, mikroyapısal değişiklikler için aşağıdaki öneriler verilmiştir.

- Yumuşak fazda tutulan östenitin sert faz martensite dönüşümü,
- İnce yapıdaki karbürün çökeltilmesi ve eşit dağılımda bir mikroyapının belirmesi,
- Kalıntı stresi ortadan kaldırmak,

- Termal iletkenliğin artması,

Yukarıdaki varsayımlara dayanarak, kriyojenik işlem uygulamasından sonra literatürde genel olarak elde edilen olumlu gelişmeler aşağıda belirtilmiştir.

- Aşınma direncinde %35 ila %620 artış,
- Malzeme aşınma oranında %93 ila %600 azalma,
- Makro ve mikro sertlikte %1 ila %120 artış,
- Çekme mukavemetinde %7 ila %30 artış,
- Malzemenin sünekliğinde %3 ile %6 oranında azalma,
- Malzemenin uzamasında %10 ile %280 arasında azalma,
- Kırılma tokluğu %30 ila %60 arasında azalma,
- Yorulma gücünün %20 oranından %71'e yükselmesi,
- İş parçası ve takım malzemelerinin yaklaşık %5 ila %25 daha yüksek termal iletkenliği,
- Kesici takım ömrünün %90 ila %800 artması,
- Çekme ve yorulma testi sırasında numunelerde gecikmeli çatlak başlangıcı ve çatlak ilerlemesini yavaşlaması,

Yukarıda belirtilen başlıca iyileşmeler gibi birçok iyileşme kriyojenik işlemi ile sağlanabilir.

Sonuç olarak kriyojenik işlemin malzemelere uygulanması ile yapılan çalışmalarda sertlik, çekme dayanımı gücü, tokluk, aşınma direnci, yorulma, mikroyapı, kalıntı östenit ve kalıntı stres değerlerinde önemli iyileşmeler olduğu görülmüştür. Yapılan çalışmalara bakıldığında, farklı malzemeler üzerinde yapılan kriyojenik işlem deneyleri ile ilgili çok sayıda çalışma olmasına rağmen X40CrMoV5-1 takım çeliği ile ilgili yeterli çalışma yapılmadığı anlaşılmaktadır. Literatürdeki eksikliğin tamamlanması ve X40CrMoV5-1 takım çeliğinin mekanik özelliklerinde iyileşmeler sağlanmasıyla,

endüstri ve savunma sanayinde kullanılacak olan malzeme hakkında bilgi alınması bakımından bu çalışma önemli bir yer alacaktır.

3. KRİYOJENİK İŞLEM

3.1 KRİYOJENİK İŞLEM TANIMI

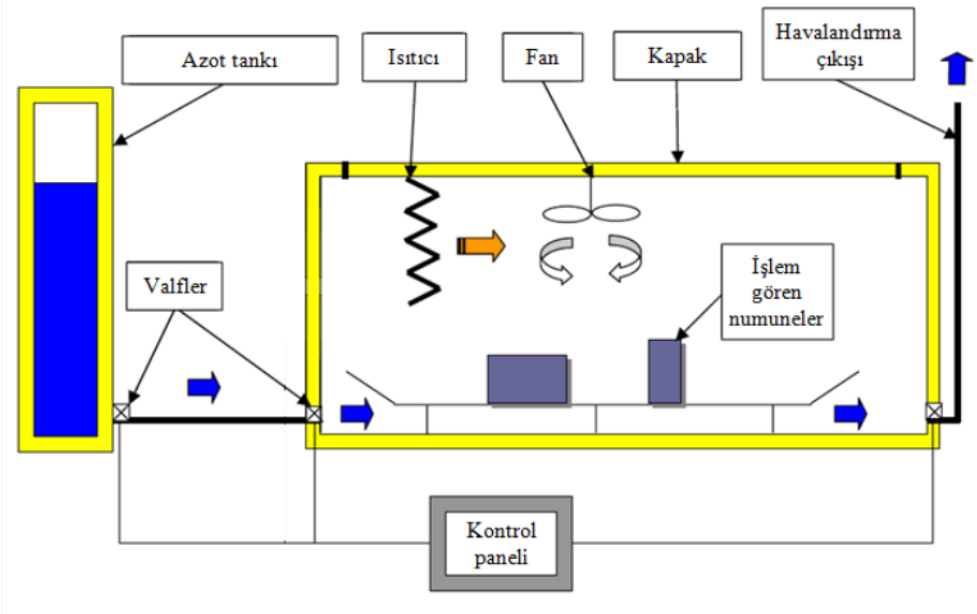
Kriyojenik işlem, genel tabir olarak sıfır altı işlem olarak bilinmektedir. Malzemelerin sıfırın altındaki sıcaklıklara belirli hızlarda kontrollü bir şekilde soğutmak, bu sıcaklıkta bekletmek ve yine belirli hızlarla oda sıcaklığında ısıtmak olarak tanımlanmaktadır. Kriyojenik işlemin amacı malzemenin istenilen mekanik özelliklerin kazandırılması için mikroyapının değiştirilmesini sağlamaktır [60]. Kaplamaların yüzey sertliğine etkisinin aksine malzemenin tüm bölümünü etkileyen, tek seferde yapılan kalıcı bir yöntemdir [61].

Kriyojenik işlem, ısı yalıtımlı kriyojenik kabinin işlem yapılacak malzemelerin içinde olmasıyla sıvı azotun içerisine beslenmesi ile gerçekleşir. Sıvı azotun kabin içerisine beslenmesi iki şekilde gerçekleşir. Birincisi ısıl değiştiriciler yardımıyla, ikinci sıvı halde fan yardımı ile püskürtülerek azot atmosferi oluşumu sağlanmasıdır [62].

Malzemenin uygulama sıcaklığına göre, kriyojenik işlem iki kategoriye ayrılır; sığ kriyojenik işlem ve derin kriyojenik işlem [63]. Sığ kriyojenik işlem, malzemeye ısıl işlemin devamında malzemeyi -50°C ile -100°C arasında azot ya da nitrojen içinde tutma uygulamasıdır. Malzemeleri -125°C ve altındaki sıcaklıklarda soğutan işlemi ise derin kriyojenik işlem olarak belirtilmektedir [54].

3.2 KRİYOJENİK İŞLEMİN UYGULAMASI

İlk uygulanmalarda kriyojenik işlem başladığı zamanda, malzemelerin daldırma yöntemi ile doğrudan sıvı azot içerisine batırılırdı. Bu yöntem sonrası ani ısıl değişkenlik şok etkisi yaratarak mikroyapıyı olumsuz etkilemekte ve çatlak oluşumuna sebep olurdu [6], [68]. Gelişen teknolojiyle birlikte bilgisayar kontrollü sistemlerin geliştirilmesiyle sıcaklığın kademeli olarak düşürülmesi kriyojenik işlem daha uygun duruma geldi. Kriyojenik işlem safhaları düşük sıcağa indirme, bekleme ve ısıtma olarak üç operasyondan geçmektedir [71], [72], [73], [74]. Şekil 3.1 'de kriyojenik işlem çevriminde işlem sırası belirtilmiştir [55].



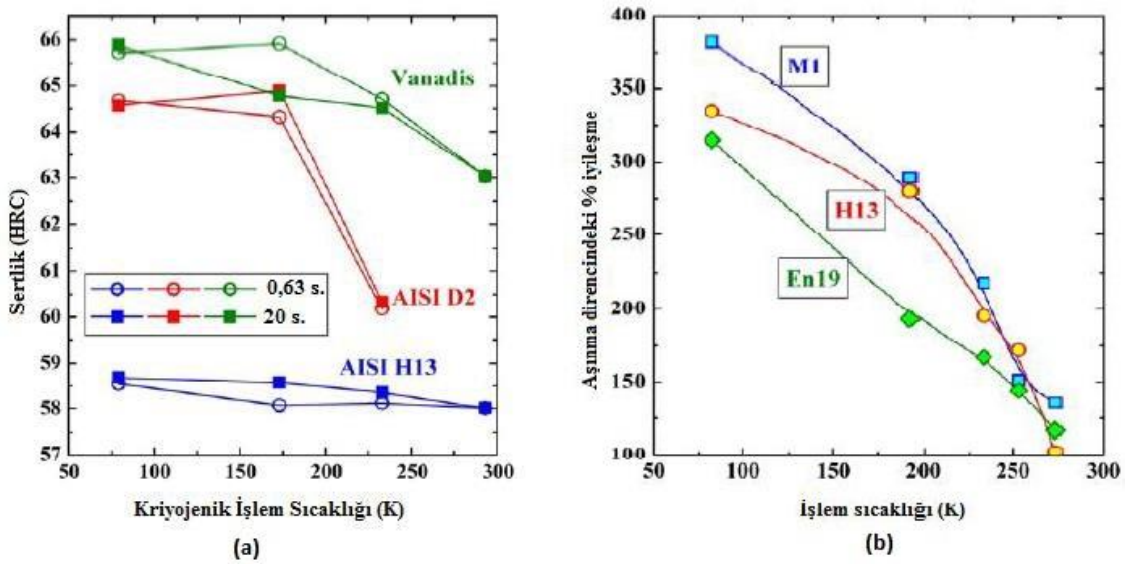
Şekil 3.1. Kriyojenik işlem çevrimi.

Soğutma aşamasında parçalar ortam sıcaklığından kriyojenik sıcaklıklara belirlenen bir zaman periyodunda (derece/saat veya derece/dakika) soğutulmaktadır. Soğutma aşamasının, işlem gören malzemenin özelliklerine az bir etkisinin olduğu belirlenmiştir [75]. Parrish J., yaptığı çalışmada kriyojenik işlem ile mekanik özelliklerin iyileştirilmesi için, %10 oranında soğutma hızının etken olduğu tespit etmiştir. 1960'lı yılların ortalarında yapılan çalışmalar, malzemelerin -196 °C ile direkt temas eden malzemelerde çatlaklara yol açan termal ve yapısal gerilmelerin sıvı azot banyolarına direkt daldırılması ile meydana geldiği tespitine varılmıştır [79]. Dolayısıyla malzemelerin işlem sıcaklığına, işlem zamanını azaltmak ve böylece maliyeti de azaltmak için termal şoklara sebep olmadan mümkün olduğu kadar hızlı bir şekilde soğutulması önerilmektedir [74]. Yapılan çalışmalarla 1-2 °C/dk soğutma ve ısıtma hızının olabileceği belirtilmiştir [55].

Bekletme sırasında, parçaların kriyojenik sıcaklıklarda belirlenen sürede (saat) bekletilmesi gerekmektedir. Bekletme aşamasının, işlem gören malzemenin nihai özellikleri açsından önemli olduğu belirtilmiştir ve malzeme içerisindeki atomların yeni bölgelere yayılması için önemlidir [75]. Malzeme içi faz dönüşümlerinin ve atomsal hareketlerin tamamlanmasını sağlamak için istenilen sıcaklıkta bekletme süresine gerek vardır [80].

Bekletme süresi kriyojenik işlemin malzeme özelliklerine en fazla etkisi olan faktörlerdendir. Genellikle uzun bekletme süreleri (24 – 36 saat) tavsiye edilmektedir. Malzeme cinsine göre bekleme süreleri değişkenlik gösterir. Kriyojenik işlemde malzeme mekanik özelliklerinde değişme belirlenen düşük sıcaklıklarda bekletme süresi sebep olmaktadır. Tokluk, sertlik, aşınma direnci, çekme mukavemeti vb. istenilen mekanik özelliklerde uygun bekletme süresi ile olumlu sonuçlar alınmaktadır.

Şekil 3.2 'de Vanadis, D2, H13 takım çeliklerinde işlem sıcaklığına bağlı sertliklerindeki değişimler (a) ve M1, H13, En19 çelikleri işlem sıcaklığına göre aşınma oranlarındaki artış (b) gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Çeliklerin sıcaklığa göre sertlik ve aşınma değişimleri.

Çizelge 3.1 'de literatürde yapılan çalışmalar sonucu ortaya çıkan, derin kriyojenik işlemde belirlenen bekleme süresi ile malzemelerin mekanik özellikleri arasındaki ilişkilere yer verilmiştir. Darwin vd. (2007) yaptıkları çalışmada kriyojenik işlem ile mekanik özelliklerin geliştirilmesinde, bekletme sıcaklığının %72, bekletme süresinin %24 oranındaki etkisinin olduğunu belirtmiştir. Kriyojenik işlemde aşınma dayanımı takım çelikleri de düşük sıcaklıklara ulaşılması ile daha çok sağlamaktadır. Malzemenin kullanım ömrünü yüksek aşınma dayanımı doğrudan artırmaktadır. Kriyojenik işlem

sıcaklığı, malzemelerin sertliğine ve aşınma dayanımına etkisinde değişikliklere sebep olmaktadır [33].

Çizelge 3.1. Farklı bekleme süresinin çelikler üzerindeki mekanik özelliklere etkisi.

Malzeme	Bekletme Süresi (Saat)	Sıcaklık (°C)	Etkisi	Referans
AISI M2 ve D3 çelik	6 ve 24	-180	24 saat bekletme - 6 saate göre aşınma direnci ve kullanım ömrü artmıştır.	[61]
AISI A2 çelik	0.5 ve 24	-196	24 saat bekletme süresi - 0,5 saate göre tokluk, sertlik ve aşınma direnci artmıştır.	[63]
AISI M2 ve T1 çelik	24 ve 48	-196	48 saat bekletme - 24 saate göre sertlik, eğilme mukavemeti ve tokluk artmıştır.	[82]
AISI D2 çelik	0.17'den 24 saate	-180	Bekletme süresi uzadıkça aşınma direnci azalarak artmıştır.	[83]
Karbürize En 31 çelik	1 ve 24	-185	24 saat bekletme süresinde 1 saate göre Young modülü ve çekme mukavemeti artışı.	[84]
AISI T42 çelik	8, 16 ve 24	-185	8 saat bekletme süresinde aşınma direnci yükselmiş, diğerinde ise düşmüştür.	[85]

Kriyojenik işlemden sonra darbe dirençlerini artırmak için temperleme işlemi yapılmaktadır. Temperleme, malzeme karakteristikleri ve istenilen özelliklere bağlı olarak tek, çift veya üçlü döngüler olarak yapılmaktadır [72]. Ancak, nihai etki için kriyojenik işlem sürecinden önce herhangi bir temperleme işleminin gerçekleştirilmesi tavsiye edilmemektedir [74]. Ayrıca, kriyojenik işlemin sertleştirme (su verme) ve temperleme işlemlerinin arasına yapılması gerektiği belirtilmiştir [34].

Araştırmalardan yola çıkarak, kriyojenik işlem yavaş soğutma işlemiyle başlayıp, yeterli sürede bekletme süresi (24-72 sa.) ile devam eden ve yine yavaş bir ısıtma ile tamamlanan çevrim sonucu devamında pek çok malzeme grubu için olumlu katkılar sağlayan temperleme işlemi ile yapılmaktadır [34].

3.3 KRİYOJENİK İŞLEMİN ÇELİKLER ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Kriyojenik işlemler, çelikler üzerinde iyi sonuçlar verebilir. Uygulanan malzemeye bağlı olarak değişmekle birlikte, tipik olarak kriyojenik işlem ile özellikle yüksek bir aşınma direnci elde edilebilir [86]. Bununla birlikte, kriyojenik işlemin etkileri üzerine yapılan çalışmalar, yaygın takım çelikleri ve imalat uygulamaları ile sınırlıdır. Bu, 1930'lardan beri işleme takımlarının kriyojenik işlenmesi yoluyla işleme süreçlerinin iyileştirilmesinden anlaşılabilir. Yakın zamanda yapılan araştırmalarda sinterlenmiş tungsten karbürler gibi havacılık, otomotiv gibi alanlarda kullanılan diğer malzemelerde de kriyojenik işlem uygulamaları görülmektedir [87].

Çoğu araştırmacı, zorlu uygulamalar için karmaşık alaşımları incelemeyi tercih ettiğinden, literatürde genellikle eksik olan şey, en temel veya en yaygın kullanılan alaşımlar üzerinde çalışmaktır. Bu durum, malzemenin bileşiminin ve ısıl işleminin kriyojenik işlemde nasıl etkilendiği veya kriyojenik işlem için en uygun alaşımın nasıl belirleneceği hakkında sonuçlar çıkarmayı zorlaştırmaktadır [60].

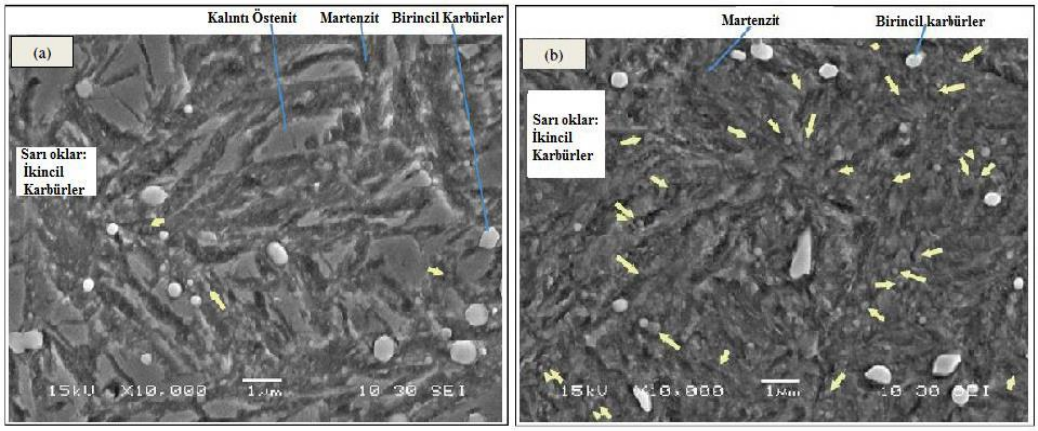
3.3.1 Kriyojenik İşlemin Mikroyapı Üzerindeki Etkileri

Kriyojenik işlem çalışmalarında, işlemin farklı malzemelerin mikroyapısında üç değişiklik olduğu gözlemlendi.

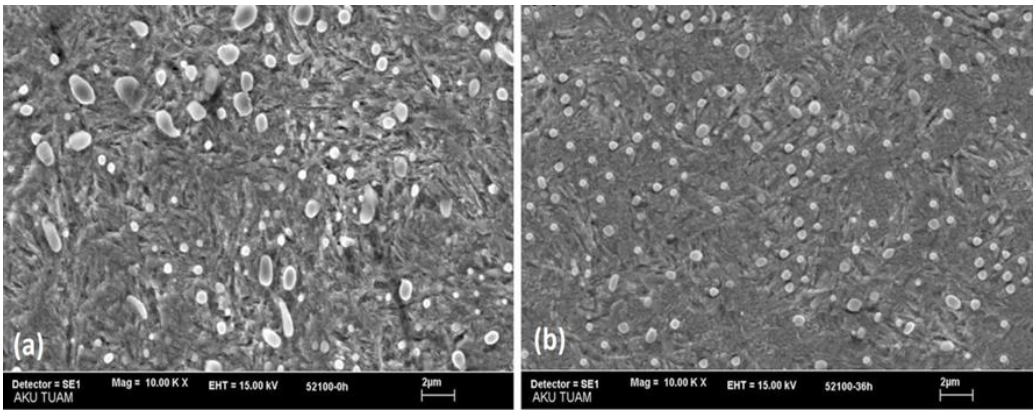
- Kalıntı östenit fazının martensite dönüşümü [88],
- Yeni karbürler oluşumu ve karbür dağılımının eşit dağılması [19],
- İnce tane yapısının oluşması [89].

Yüksek sıcaklıklarda oluşan östenit faz, yüzey merkezli kübik kristal yapıdaki demirin fazıdır. Yüksek sıcaklıktaki çelik hızlı bir şekilde düşük sıcaklığa indirgendiğinde mikroyapıda kalan östenite kalıntı östenit denir. Martenzit faz, östenit fazına göre süneklik bakımından daha düşük ve daha yüksek çekme kuvvetinde olduğu bilinmektedir [90]. Kriyojenik işlem ile birlikte östenit fazı sert ve mukavemet fazla olan martenzit faza dönüşmektedir. Farklı malzemelerde farklı miktarlarda dönüşümler görülürken, örneğin En 353 çeliğinde %28 olan kalıntı östenit miktarı %14 civarlarına düşmektedir [39].

Kriyojenik işlem, kalıntı östeniti martensite dönüştürür, bu da yapıdaki karbürlerin düzgün dağılımına ve yeni ince karbürlerin oluşumuna neden olur. Düşük sıcaklıklarda kafeste bulunan karbür oluşturan alaşım elementleri, çekme gerilimi oluşumu ile kafesten dışarı çıkar ve yeni karbürler oluşturur. Bu karbür taneleri, yapıda bulunan birincil karbürlerden çok daha küçüktür. M2 çeliği kriyojenik işlem sonrası 1 mm2'deki karbür miktarı %62 artmıştır [88]. Şekil 3.3 'de kriyojenik işlemden öncesi ve sonra A2 çeliğinin mikroyapısındaki karbür dağılımını göstermektedir [88]. Benzer şekilde, AISI 52100 çeliği üzerinde yapılan bir çalışmada, düşük sıcaklık işleminden sonra karbürlerin mikroyapıda daha düzgün dağıldığı gözlemlenmiştir [91]. Şekil 3.4 'de 36 saat -145°C'de bekletildikten sonra AISI 52100 çeliğinin mikroyapısındaki karbür dağılımını göstermektedir [91].

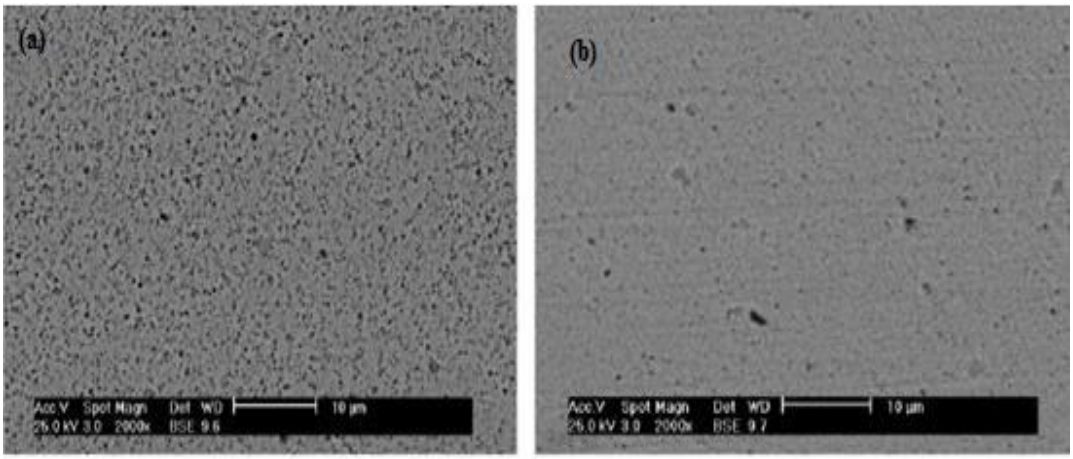


Şekil 3.3. A2 Çeliğinin karbür dağılımı a) Yağda su verme + temperleme b) Kriyojenik işlem.



Şekil 3.4. AISI 52100 karbür dağılımı a) Yağda su verme + temperleme b) Kriyojenik işlem.

Kriyojenik işlem, takım çeliğinde tutulan östeniti martensite dönüştürür ve böylece yeni karbür tanecikleri oluşturur. Takım çeliklerinden farklı olarak, düşük sıcaklık işlemi, demir ve demir dışı alaşımların mikroyapısal tane boyutunda bir azalma ile sonuçlanır. Cu-Cr-Zr alaşımının tane boyutu birim alan başına 159,7 Nm 'den 82,9 Nm 'ye düştüğü görülmüştür. Ayrıca, mikro gözenekleri büyük ölçüde ortadan kaldırarak daha yoğun hacimler elde edildiği bilinmektedir [89]. Şekil 3.5 'de Cu-Cr-Zr alaşımının tane boyutundaki değişimin SEM görüntüsü a) kriyojenik işlem öncesi, b) kriyojenik işlem sonrası verilmiştir [89].



Şekil 3.5 Cu-Cr-Zr alaşımının tane boyutundaki değişim.

3.3.2 Kriyojenik İşlemin Mekanik Özellikler Üzerindeki Etkisi

Kriyojenik işlem aşınma direnci ile malzemenin mekanik özelliklerine en önemli etkiyi meydana gelmektedir. Özellikle takım çeliklerinde meydana getirdiği %800 'ler varan gelişimler tespit edilmiştir. Çalışmalarda görünen aşınma direncindeki iyileşme, kriyojenik işlem sonucu yapıdaki kalıntı östenitin martenzite dönüşmesi ve yeni karbürlerin oluşumu ile birlikte homojen dağılmasıdır [53]. Çizelge 3.2 'de kriyojenik işlemin genel olarak aşınma dirençlerindeki artışlar gösterilmiştir [53].

Çizelge 3.2 Kriyojenik işlem sonrası aşınma direncindeki iyileşme oranları.

AISI	Tanımı	-80 ºC	-196 °C
D2	Takım Çeliği - Yüksek Karbon-Krom Alaşımlı	%316	%817
A7	Takım Çeliği - Krom Alaşımlı	%204	%560
S7	Takım Çeliği - Silisyum Alaşımlı	%241	%503
52100	Rulman Çeliği	%195	%420
01	Takım Çeliği - Yağda Su Verilmiş	%221	%418
A10	Takım Çeliği - Grafitli	%230	%264
M1	Yüksek Hız Takım Çeliği - Molibden Alaşımlı	%145	%225
H13	Sıcak İş Takım Çeliği - Krom/Molibden Alaşımlı	%164	%209
M2	Yüksek Hız Takım Çeliği - Tungsten/Molibden Alaşımlı	%117	%203
T1	Yüksek Hız Takım Çeliği - Tungsten Alaşımlı	%141	%176
CPM10V	Takım Çeliği - Yüksek Vanadyum Alaşımlı	%94	%131

Barron, yapmış olduğu çalışmada takım ve makine parçalarının kriyojenik işlem sonrası performanslarını analiz etmiştir. Kriyojenik işlem gören makine parçalarının daha uzun ömürde çalışacağını söylemiştir. Yüksek aşınma şartlarında çalışan makine elemanları, kriyojenik işlem ile daha uzun ömürlü ve yüksek performansta çalışması sonraki çalışmalarda da desteklenmiştir [80].

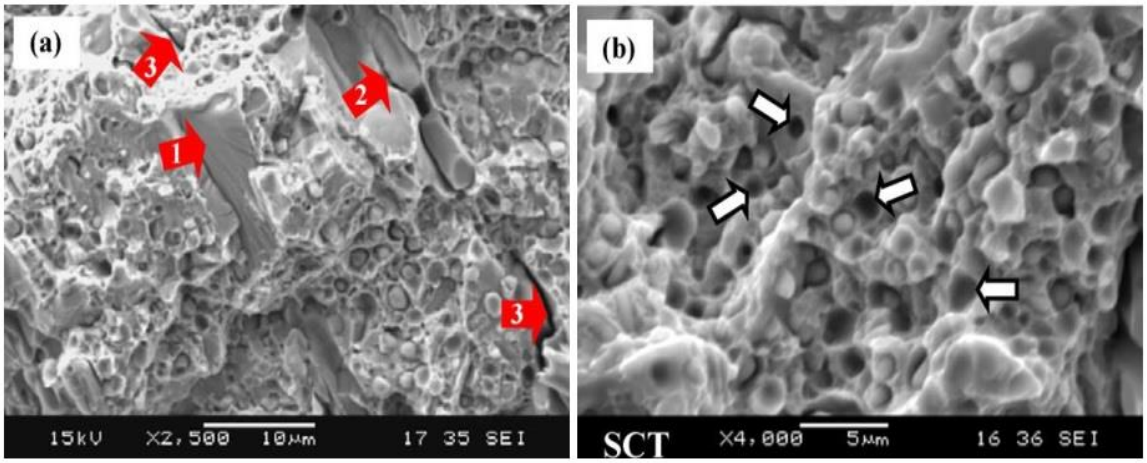
Kriyojenik işlem malzeme sertliği üzerinde farklı etkisi vardır. Sertlik ölçümleri genellikle Vikers, Rockwell ve Brinell olarak ölçülmektedir. Kriyojenik işlem sonrası malzeme sertliği ile ilgili değişimler görülmektedir. Derin kriyojenik işlem sonrası temperleme uygulanmış yüksek hız çeliklerinde ve H13 takım çeliğinde ortalama olarak 2 HRc sertlik artışı olduğu bildirilmiştir [8], [92], [93]. Çizelge 3.3 'te kriyojenik işlem sonrası bazı çelikler üzerindeki sertlik artışları gösterilmiştir [19].

Çizelge 3.3 Bazı malzemelerdeki sertlik değişim oranları.

Malzeme Cinsi	Sertlik oranındaki maksimum artış miktarı
AISI M2	5,26 HRc
AISI H13	6,9 HRc
AISI T1	2,8 HRc
En 353	3,48 HV
En 36A	17 HV
Karbürize Çelik	17 HV
AISI 4140	9,9 HV
AISI 4340	2,5 HRc
13Cr2Mn2V	3,2 HRc
3Cr13Mo1V1.5	5,5 HRc
AISI 304L	18,8 HRc
Cr-Zr-Cu Alaşımı	3,13 HB

Kriyojenik işlem, aşınma direnci ve sertlik üzerindeki etkileri daha az kapsamlı laboratuvar tabanlı testler ile bazı malzemeler üzerinde incelenmiştir. Kriyojenik işlem sonrası malzemelerin sertlik ve aşınma dirençleri üzerinde olumlu yönde iyileşmeler olduğu görülmüştür.

Kriyojenik işlemin kırılma tokluğu üzerindeki incelemeler yapılmış, derin kriyojenik işlem sonrası malzemedeki süneklik artış gösterdiği görülmüştür. Genelde D2 takım çeliği üzerine çalışmalar yapan Das vd., sünek yapının sığ ve derin kriyojenik işlem sonrası iyileşme olduğunu Şekil 3.6 'da ki kırılma yüzey görüntüsünde göstermiştir. a)1.Karbürlerin parçalanması, 2. Karbürlerin çatlaması, 3. Matris ile karbür arası çatlakların oluşması, (b) Karbürlerin ayrışması sonucu oluşan tabaka, olarak gösterilmiştir. Uzun ve büyük birinci karbürün çatlaması ve ikinci oluşan mikro-tabaka karbürün ayrılması ile ilişkilendirmişlerdir [80].



Şekil 3.6. AISI D2 çeliğinin kırılma yüzey görüntüsü.

Kriyojenik işlem sonrası malzemelerin mekanik özelliklerinde önemli değişimler olduğu görülmüştür. Fakat X40CrMoV5-1 sıcak iş takım çeliğinin mekanik özellikleri üzerinde yeterli çalışma olmadığı görülmüştür. Bu çalışma ile X40CrMoV5-1 sıcak iş takım çeliğinin mekanik özelliklerinde iyileşmeler sağlayarak literatüre yeni veri girişleri sağlanmıştır.

3.3.3 Kriyojenik İşlemin Çelikler Üzerinde Sağladığı Avantajlar

Kriyojenik işlem, mekanik özelliklerin elde edilmesine olanak sağlayan geleneksel ısıl işlemin devamı olarak yapılan işlemdir. Geleneksel ısıl işlem sonrası malzemenin mikroyapısında iyileşmeler sağlamakta ve mekanik özellikleri olumlu yönde iyileştirmektedir.

Kriyojenik işlem sonrası malzemelerde elde edilen avantajlar aşağıda belirtilmiştir.

- Malzeme ömrü daha uzun olmaktadır.
- Bir kere yapılır ve kalıcı bir işlemdir.
- Aşınma dayanımında etkisi yüksektir.
- Malzeme tokluğunu artırmaktadır.
- Çekme dayanımını arttırır.
- Oluşan kalıntı stresi almaktadır.
- Kriyojenik işlem sonrası malzemede sadece yüzeysel sertlik değil bütün yapıda

sertlik oluşmaktadır.

Kriyojenik işlemde olumsuz olarak belirtilen bazı durumlar aşağıdaki gibidir;

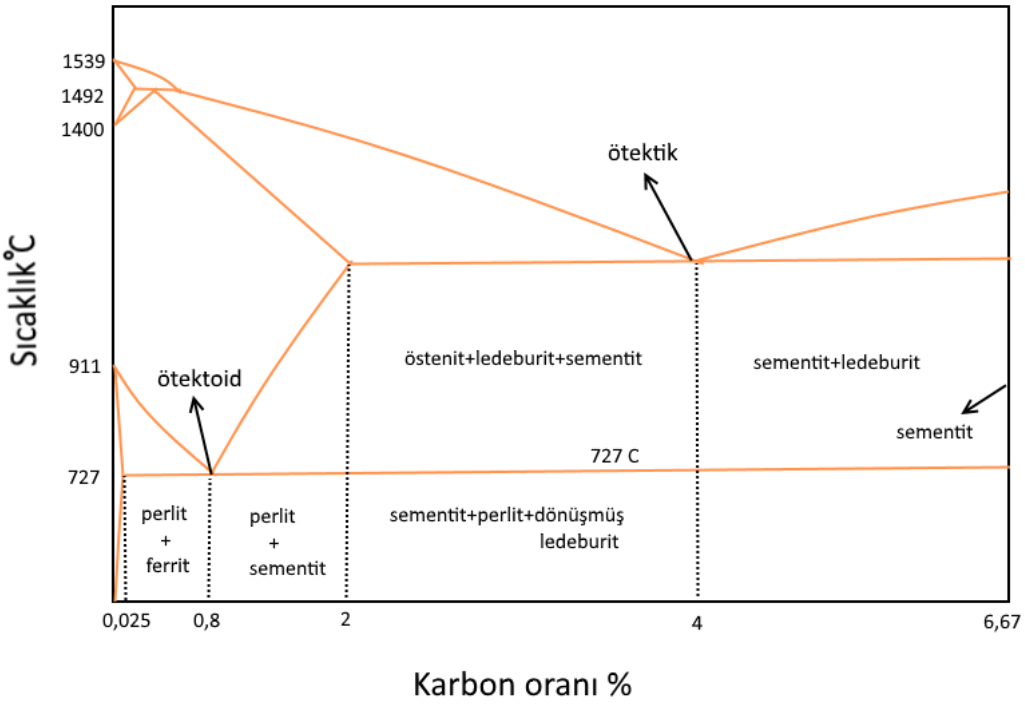
- Yüksek stresten sebebiyle malzemelerde çatlama yaşanabilir.
- Yüksek maliyetli olması sebebiyle istenilen her malzemede uygulama yapılamaz.

Bu kapsamda makine parçaları, endüstride mekanik özellikleri bakımından uzun ömür amaçlanan parçalarda kullanılması ile hem malzemeden hem de maddi açıdan kazanç sağlanabilmesi ön görülmüştür.

4. ÇELİKLER

Demir–karbon alaşımı karbon oranına göre iki gruba ayrılmaktadır. Bunlar; “Çelikler” ve “Dökme Demirler” olarak bilinir. Bu ayrımda %2 'den daha az karbon bulunduran çelikler olarak adlandırılırken ve %2'den fazla karbon içeren alaşımlar ise döküm demir olarak adlandırılmaktadır. Çelik, temel tanımlamaya göre Şekil 4.1 'de gösterildiği gibi ana alaşım elementi karbon olan bir demir-karbon alaşımıdır. Üretim şekilleri ve kullanılan madenlerden ötürü manganez, silisyum, kükürt ve fosfat çeliğin bünyesinde bulunabilen diğer elementlerdendir.

Karbon çeliğin yapısındaki alaşımın yapısını sertleştirmekte ve demir atomlarının kaymamasını sağlamaktadır. Alaşımın içindeki karbon oranı değiştirilerek çeliğin esneklik, sünek yapısı, sertlik, aşınma direnci, darbe direnci ve gerilme mukavemeti gibi mekanik özellikler değişkenlik gösterebilir. Alaşımın karbon miktarını artırdığımızda çeliğin sertliğini artırabiliriz fakat bu durum çeliğin kırılganlığının armasını sağlar ve kaynaklanma ve süneklik özelliklerini ters yönde etkiler.



Şekil 4.1. Demir - Karbon diyagramı.

4.1 SICAK İŞ TAKIM ÇELİKLERİ

Endüstrinin faklı alanlarında çokça kullanılan sıcak iş takım çelikleri, talaşlı ya da talaşsız imalatta kullanılmaktadır. Soğuk veya sıcak durumdaki iş parçalarını dövme, kesme, sıkıştırma metotları ile şekillendirme yapılabilen yüksek özellikteki malzemelerdir.

Sıcak iş takım çelikleri, 200°C ve üzerindeki uygulamaları için kullanılır. Kullanım alanı bakımından süreklilik arz eden sıcak şekillendirme yöntemlerinde sertlik değişimi istenilen düzeyde olması gerekir. Önemli özelliklerinden biri doğru kimyasal uyumu sayesinde bu dayanıma sahip olmasıdır. Mekanik özellikleri yüksek sıcaklığa dayanıklı olmalı, bu özellikleri korumalıdır. Budan dolayı prensip alaşım elemanlarını içinde bulundurması ile sıcak iş takım çeliklerinde sertliği sağlar [94].

Sıcak iş takım çeliği, yüksek sıcaklıkta aşınma ve kopma direnci özelliklerini kaybetmemeleri sebebiyle, tokluk değeri ve yüksek sıcaklıktaki darbe direncinin iyi olması nedeniyle birçok endüstride ilk tercihtir.

Sıcak iş takım çelikleri AISI standardında H harfi ile adlandırılmaktadır. Üç grupta isimlendirilir. Üç gruptaki sıcak iş takım çelikleri; tungsten, molibden ve kromlu olarak tanımlanır [95].

Genel olarak kullanılan sıcak iş çelikleri şu şekildedir:

DIN 1.2340, DIN 1.2344, 1.2343, 1.2365, 1.2367, 1.2714, 1.2581, 1.2606, 1.2713, 1.2885.7

Çizelge 4.1 'de deneylerde kullanılan X40CrMoV5-1 sıcak iş takım çeliğinin farklı standartlardaki karşılıkları gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. X40CrMoV5-1 Çeliğinin farklı standartlarda kullanılan kısaltmaları.

Farklı standartlarda kullanılan kısaltmalar				
EN	DIN	AISI	BS	JIS
X40CrMoV5-1	1.2344	H13	BH13	SKD61

Çizelge 4.2 'de deneylerde kullanılan X40CrMoV5-1 sıcak iş takım çeliğinin kimyasal bileşimi gösterilmiştir [96].

Çizelge 4.2. X40CrMoV5-1 çeliğin kimyasal kompozisyonu.

Element	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
%	0,35-0,42	0,8-1,2	0,25-0,50	4,80-5,50	1,20-1,50	0,85-1,15

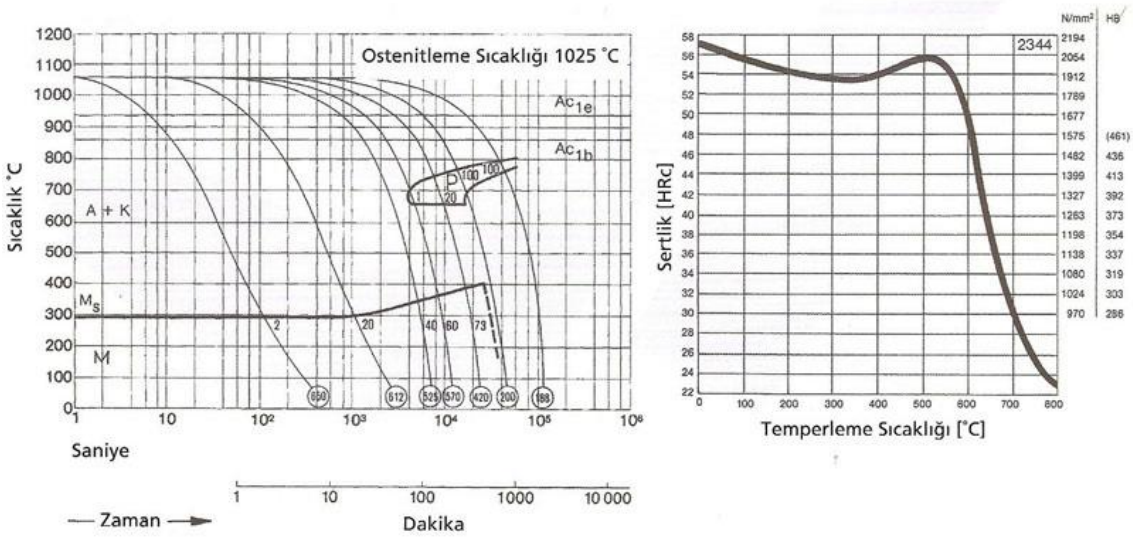
Takım çelikleri, kullanım alanlar gereği aşınma direnci yüksek olmalı ve uygulanan yüke karşı plastik şekil değiştirmeye maruz kalmamalıdır. Çeliğin sertliği, aşınma direnci ve şekil değiştirme durumu ile alakalıdır. Sertliğin artması ile süneklik ters orantılı çalışmaktadır. Bu sebeple proses için en kritik durum malzemenin maksimum sıcaklığının doğru seçilmesidir [97].

Sıcak iş takım çelikleri için başlıca özellikleri aşağıdaki gibi olmalıdır.

- Çalışma sıcaklığında deformasyona karşı dirençli olmalı,
- Termal ve mekanik şoklara karşı dirençli olmalı,
- Aşınma direncinin yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklı olmalı,
- Isıl işlemde deformasyon direncinin yüksek olmalı,
- Kolay işlenebilir olmalı,
- Sıcak yırtılma direnci yüksek olmalı [95].

Takım çelikleri sertleştirme işleminden önce tavlama ve gerilim giderme işlemleri uygulanır. Gerilim giderme uygulaması ile kristal yapının daha homojen ve ince bir hal alması sağlanmaktadır. Yapılan gerilim giderme ile bir sonraki işlemde karbürlerin daha uygun dağılması sağlanmaktadır. Sertleştirme işlemi malzemenin aşınma ve darbe direncine direk etki eden önemli bir basamaktır. Östenitleme süresince ferrit östenit dönüşümü ile birlikte yeterli karbür çözünmesi sağlanmalıdır [98]. Östenitleme sıcaklığı belirtilen süreden kısa olması durumunda yeterli miktarda karbür çözünmesi olmayacaktır. Bu durumda düşük sertlik elde edilmektedir. Sürenin fazla olmasında ise

çok faza kalıntı östenit kalacağından sertliğin düşük olmasına sebep olacaktır [99]. Östenitleme işleminin ardından gerçekleştirilen su verme işlemi (quenching), çelikte sertleştirme sonrası elde edilmesi istenen martensitik yapının oluşmasını sağlar [46]. Şekil 4.2 'de X40CrMoV5-1 takım çeliğinin sıcaklık – zaman grafiği ve sertlik değişim grafikleri verilmiştir [96].



Şekil 4.2 X40CrMoV5-1 çeliğin sıcaklık - zaman dönüşümü ve sertlik değişimi.

Sıcak iş takım çeliklerinin seçilmesinde göz önünde bulunması gereken kriterler, üretim parametreleri, ısıl işleme uygunluk, proses şartlarıdır. Çeliğin seçiminde, maruz kalacağı şartlar mutlaka değerlendirilmelidir. Örnek olarak, ekstrüzyon yapılacak sıcak iş takım çeliği, yüksek aşınma direncine sahip olmalı ve yüksek sıcaklık dayanımı iyi olmalıdır. Uygulama prosesi darbe üzerine ise tokluk, darbe sönümleme özelliği için önemli durumdadır. Isıl işlem yorulması olan çalışma durumlarında, ESR ve VAR metalürjik işlemler ile homojenlik ve yüksek saflıkta olması istenir. Bunların haricinde çeliğin ısıl işleme göre tercih edilmesi çelik tercihinde önemli faktörlerdendir [94].

4.2 SOĞUK İŞ TAKIM ÇELİKLERİ

Karbon içeriği %0,3 ile %3 arasında olan ve alaşım elementleri olarak karbür oluşturan krom, vanadyum, molibden ve tungsten ile nikel ve mangan elementlerini içeren takım çelikleri soğuk iş takım çelikleri olarak adlandırılmaktadır. Sertlik değeri yüksek olan, 200°C'yi aştığında hızla azalan sertlik yapısına sahiptir. Bu nedenle proses, yaklaşık

200°C ve altındaki sıcaklıklarda çalışan iş parçalarının talaşlı imalat ve talaşsız şekillendirilmesi için kullanılmaktadır.

Soğuk iş takım çeliği, genel olarak kesici takımlar, hassas delme zımbaları, kazıma ve sıyırma, bıçak kırma, derin çekme ve kabartma takımları, derin çekme ve büküm takımları, sinterleme ve presleme takımlarıdır.

Soğuk iş takım çeliklerinden basınç dayanımı ve sertlik değerleri yüksek olması beklenir. Aşınma direnci ve çekme mukavemeti yüksek olmalıdır. İyi şekillenebilen ve işlenebilirliği kolay olması yönünden tercih edilmektedir. Çizelge 4.3 'te soğuk iş takım çeliklerinin kimyasal kompozisyonları gösterilmiştir [100].

Çizelge 4.3 Soğuk İş Takım Çeliklerinin Kimyasal Kompozisyonları.

Malzeme No	Sembol	%C	%Si	%Mn	%Cr	%Mo	%Ni	%V	%W
1.2067	100Cr6	0,95-1,10	0,15-0,35	0,25-0,45	1,35-1,65				
1.2080	X21Cr12	1,90-2,20	0,10-0,40	0,15-0,45	11,0-12,0				
1.2210	115CrV3	1,10-1,25	0,15-0,30	0,20-0,40	0,50-0,80			0,07-0,12	
1.2312	40CrMnMoS 8 6	0,35-0,45	0,30-0,50	1,40-1,60	1,80-2,00				
1.2316	X36CrW12	0,33-0,43	maks. 1,00	maks. 1,00	15,0-17,0	1,00-1,30	maks. 1,00		
1.2379	X155CrVMo12 1	1,50-1,60	0,10-0,40	0,15-0,45	11,0-12,0	0,60-0,90		0,90-1,10	
1.2436	X210CrW12	2,00-2,25	0,10-0,40	0,15-0,45	11,0-12,0				0,60-0,80
1.2550	60WCrV7	0,55-0,65	0,55-0,70	0,15-0,45	0,0-1,20			0,10-0,20	1,80-2,10
1.2842	90MnCrV8	0,85-0,95	0,10-0,40	1,90-2,10	0,20-0,50			0,05-0,15	

5. MATERYAL VE YÖNTEM

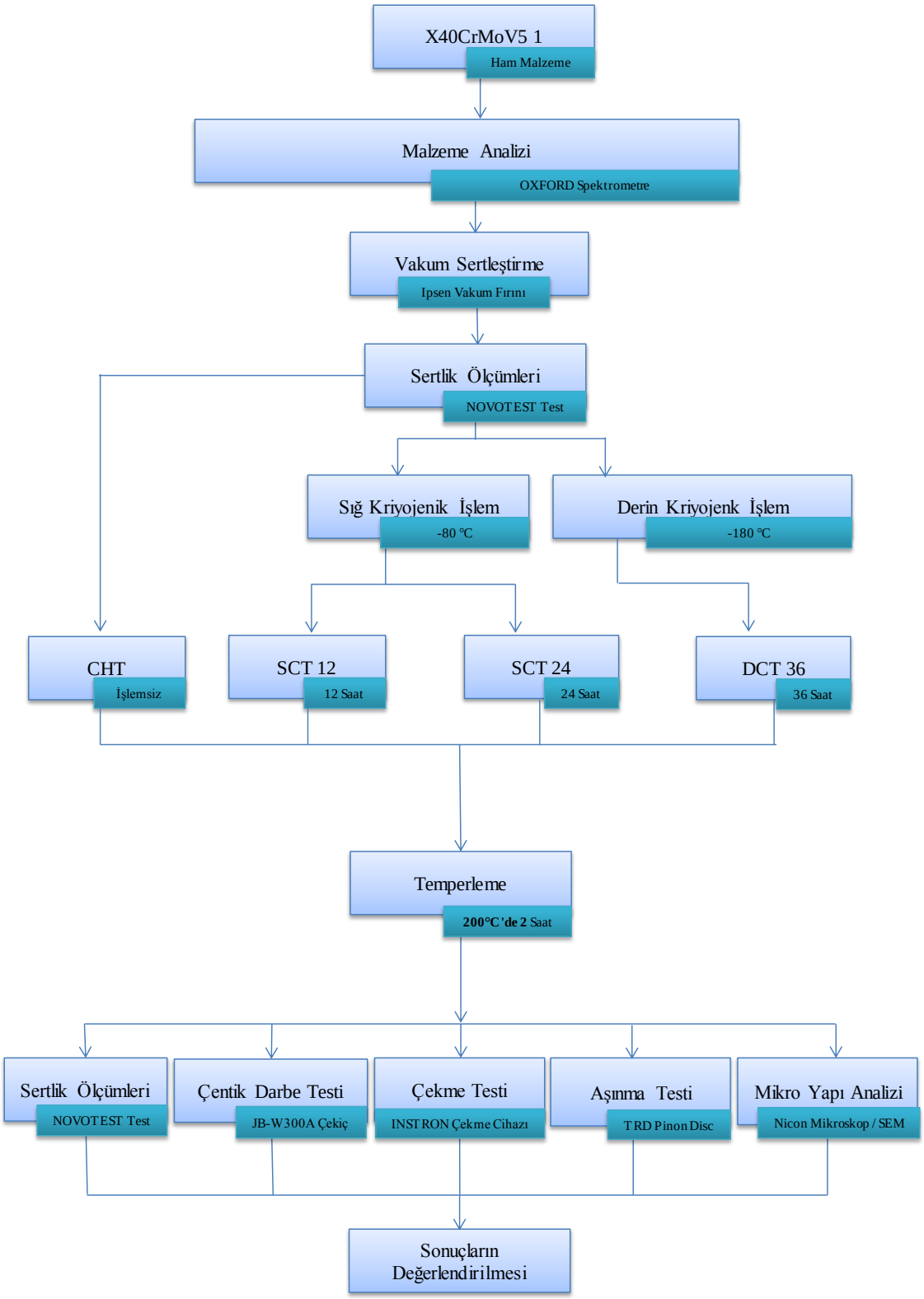
Bu tez çalışmasında geleneksel ısıl işlem uygulaması sonrası sığ ve derin kriyojenik işlem uygulanan malzemelerde darbe, çekme, aşınma deneyleri yapılmıştır. Ayrıca metalografik inceleme, sertlik testleri ile mikroyapı, mikro ve makro sertlik değişimleri incelenmiştir. Deneylerde sertleştirilen X40CrMoV5-1 sıcak iş takım çeliği kullanılmıştır. Testlerde kullanılan numune tipleri ve adetleri Çizelge 5.1 'de belirtilmiştir. Toplamda 44 adet numune talaşlı imalat yöntemleri ile CNC torna ve frezelerde üretilmiştir. Deneyde kullanılan malzemenin kimyasal bileşimi Çizelge 5.2 'de verilmiştir. Numune hazırlık sürecinde uygulanan metotlar ve testleri içeren akış diyagramı Şekil 5.1 'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1 Testlerde kullanılan numune çizelgesi.

Test	Numune Tipi	Numune Adedi			
		CHT	SCT-12	SCT-24	DCT-36
Sertlik ve Kimyasal Analiz	Disk Numune	2	2	2	2
Darbe Testi	U Çentikli Numune	3	3	3	3
Çekme Testi	Standart Çekme Çubuğu	3	3	3	3
Aşınma Testi, Mikroyapı	Disk Numune	3	3	3	3

Çizelge 5.2. X40CrMoV5-1 çeliğin kimyasal bileşim değerleri.

Element	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
%	0,35-0,42	0,8-1,2	0,25-0,50	4,80-5,50	1,20-1,50	0,85-1,15
Ölçüm Sonucu	0,38	0,92	0,33	4,87	1,28	0,98

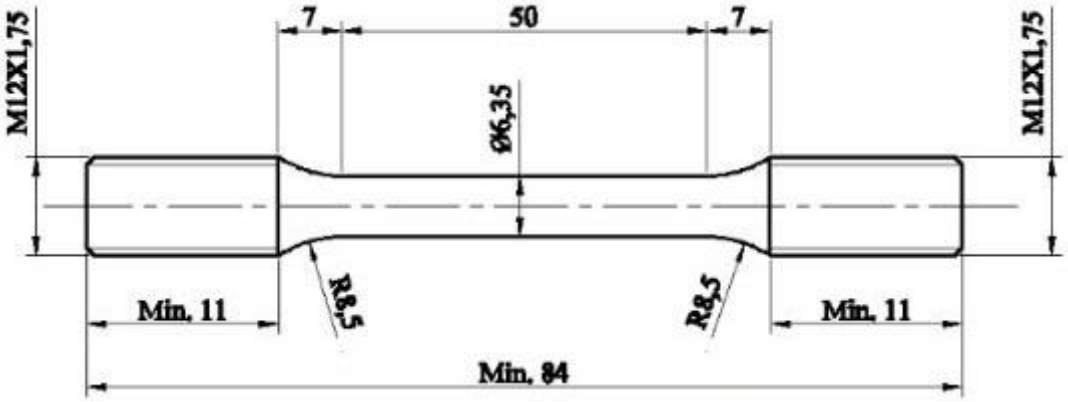


Şekil 5.1 Akış diyagramı.

Çizelge 5.2 'de belirtilen malzeme kimyasal analizi Şekil 5.2 'de gösterilen OXFORD Foundry Master – X line marka spektrometre cihazı ile yapılmıştır.

Şekil 5.2. OXFORD Spektrometre cihazı.

Şekil 5.3 'te teknik resmi gösterilen çekme numunesi Şekil 5.4 'te gösterilen 268 Nm spindle torka sahip iki eksen DOOSAN LYNX2100 LB torna tezgâhı imal edilmiştir.



Şekil 5.3. Çekme numunesi teknik resmi.

Şekil 5.4. DOOSAN LYNX2100 LB torna tezgâhı.

Aşınma testi, sertlik, kimyasal analiz testleri için 10 mm çapında 10 mm boyuna olacak şekilde hazırlanan disk numuneler ise Şekil 5.3 'te gösterilen torna tezgahında çap ölçüsüne getirilerek Şekil 5.5 'te gösterilen METACUT 251 kesme cihazında saniyede 0,5 mm hızla kesilip, Şekil 5.5 'da gösterilen SES3000 hassas taşlama tezgahına taşlanıp parlatılmıştır. Tezgahlara ait teknik özellikler Çizelge 5.3 ve Çizelge 5.4 'de belirtilmiştir.

Deneyler içi hazırlanan numuneler standartlara uygun ölçülerde hazırlanmıştır. Yapılacak deneme sayısına göre numune adedi belirlenmiştir. Çap malzemeler hazırlandıktan sonra darbe testi için numune hazırlığı yapılmıştır.

Şekil 5.5. METACUT 251 kesme cihazı.

Çizelge 5.3 METACUT 251 Hassas kesme cihazı teknik özellikler.

METACUT 251 HASSAS KESME CİHAZI	
Cihaz Ölçüleri:	580 x 680 x 490 mm
Ağırlık:	132 Kg
Güç:	400V - 50Hertz - 3 faz
Ek Özellikler:	
Paslanmaz T-kanallı tabla	
Elektronik fren sistemi	
Özel hafif alaşımlı alüminyum kaide	

Şekil 5.6 Satıh taşlama tezgahı.

Çizelge 5.4 Satıh taşlama tezgahı teknik özellikler.

SATIH TAŞLAMA TEZGAHI	
Tabla Ölçüsü:	200 x 400 mm
Tabla Tipi:	Elektro manyetik tabla
Çalışma Sistemi:	Hidrolik
Hareket Sistemi:	Aşağı yukarı motorlu
Soğutma Sistemi:	Otomatik bor yağ ile soğutma

Darbe testi için malzemeler kalıpçı freze ile mengene yardımıyla 10x10x55 mm ölçülerinde frezeleme yapılarak hazırlanmıştır. Her bir grup numune için toplam 12 adet numune yapılmıştır. Hazırlanan numunelerin çentik kısımları Şekil 5.7 'de gösterilen TIME L71-UV broş tezgahında hazırlanmıştır. Tezgahın teknik özellikleri Çizelge 5.5 'te belirtilmiştir.

Çentik kanalı, broş tezgahına bağlanan kesici takımın (tığ) konik dişleri sayesinde malzeme üzerinde talaş kaldırması ile hassas bir şekilde oluşturulmaktadır. Çentik kanalı kesici takımın kesici ağız formuna bağlı olarak faklı şekillerde oluşturulabilir. Broşta kullanılan tığın kesici ağız formu değiştirilerek farklı formlarda çentiklerde açılabilmektedir.

Yaygın olarak kullanılan "U" çentik formu için "U" form tığ yardımı ile darbe numunelerine çentik açılmıştır.

Şekil 5.7 TIME L71-UV broş tezgahı.

Çizelge 5.5 TIME L71-UV broş tezgahı teknik özellikleri.

TIME L71-UV BROŞ TEZGAHI	
Strok:	1000 mm
Çekme Kuvveti:	60 KN
Güç:	9,2 KW

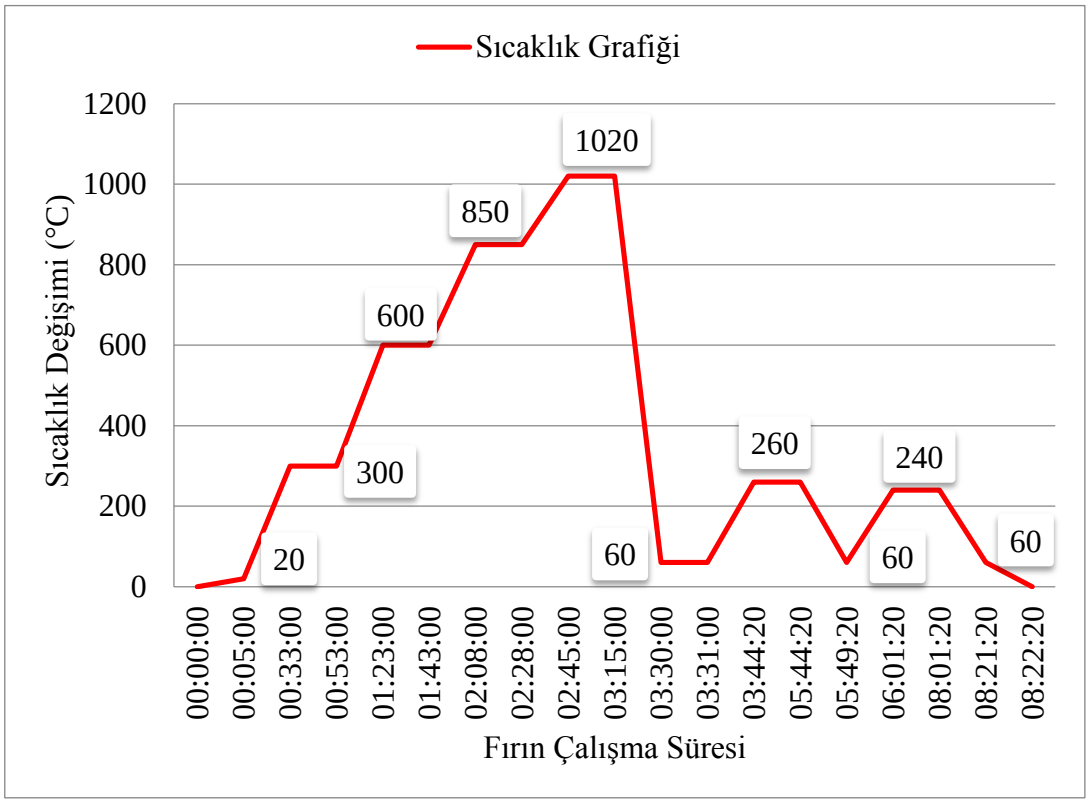
Hazırlanan her bir numune istenilen sertliğe getirebilmek için geleneksel ısıl işlem uygulanmıştır. Vakum fırınında kademeli olarak 10°C/dak artan sıcaklık ile 1020°C sıcaklığa 2 saat 45 dakika ısıtılarak östenit dönüşüm gerçekleştirilmiştir. Östenitleme işleminden sonra azot gazı ile 15 dakikada 60°C'ye soğutma yapılarak martensitik dönüşüm tamamlanmıştır. Kalıntı östenitlerin giderilmesi için sırasıyla 260°C'de 2 saat ve 240°C'de 2 saat meneviş uygulanmış ve istenilen 54-56 HRc sertlik değeri elde edilmiştir. Geleneksel ısıl işlemin uygulandığı IPSEN vakum fırını Şekil 5.8 'de gösterilmiştir. Tezgah teknik özellikleri Çizelge 5.6 'da gösterilmiştir.

Şekil 5.8. IPSEN Vakum fırını.

Çizelge 5.6 IPSEN Vakum fırını teknik özellikleri.

IPSEN VAKUM FIRINI	
Kapasite:	50 – 2.500 kg/şarj
Vakum Seviyesi:	10^(-6) mbar
Sıcaklık:	1350°C
Boyut:	1000x1500x1000 mm
Güç:	240 KW

Isıl işlemde kullanılan proses Şekil 5.9'da belirtilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi 10°C/dak ile kademeli olarak artırılarak sırasıyla 300°C, 600°C ve 850°C de 20 dakika bekleme süresi ile 2 saat 45 dakika ısıtma yapılarak 1020°C sıcaklığa ulaşılmıştır. Azot gazı ile soğutma yapıldıktan sonra 2 kere menevişleme yapılarak numunelerde istenilen sertlik değerleri elde edilmiştir.



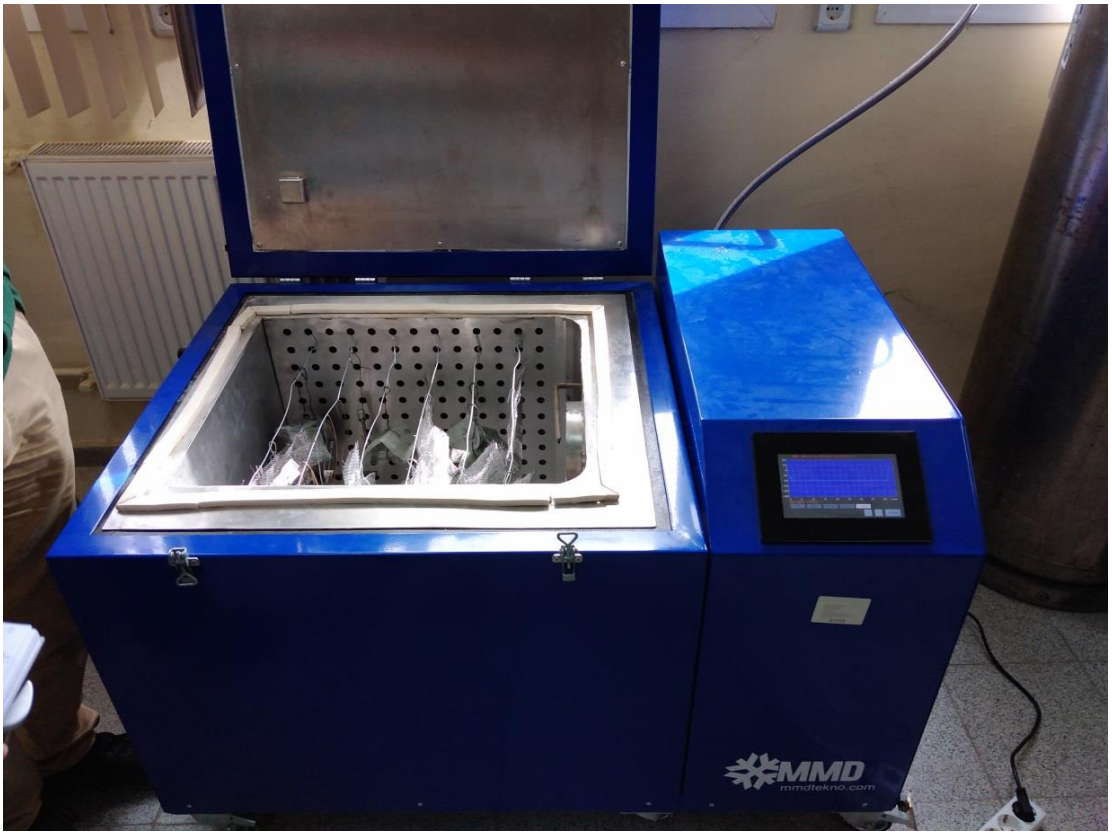
Şekil 5.9 X40CrMoV5-1 takım çeliğine uygulanan ısıl işlem grafiği.

5.1 KRİYOJENİK İŞLEM UYGULAMASI

Deneylerde kullanılan numuneler geleneksel ısıl işlem ve geleneksel ısıl işlem sonrası kriyojenik işlem olarak sınıflandırılmıştır. Geleneksel ısıl işlem uygulanan numuneler "CHT" olarak adlandırılmıştır. Geleneksel ısıl işlem sonrası kriyojenik işlem uygulanan numunelerde ise; -80°C 'de 12 saat bekletilen numuneler SCT-12, -80°C 'de 24 saat bekletilen numuneler SCT-24 ve -180°C'de 36 saat bekletilen numuneler DCT-36

olarak isimlendirilmiştir.

Şekil 5.10 'da gösterilen MMD soğutma fırınında kriyojenik işlem uygulanmıştır. Soğutma işlem sürecinde sürekli olarak azot gazı ile besleme yapılmıştır.

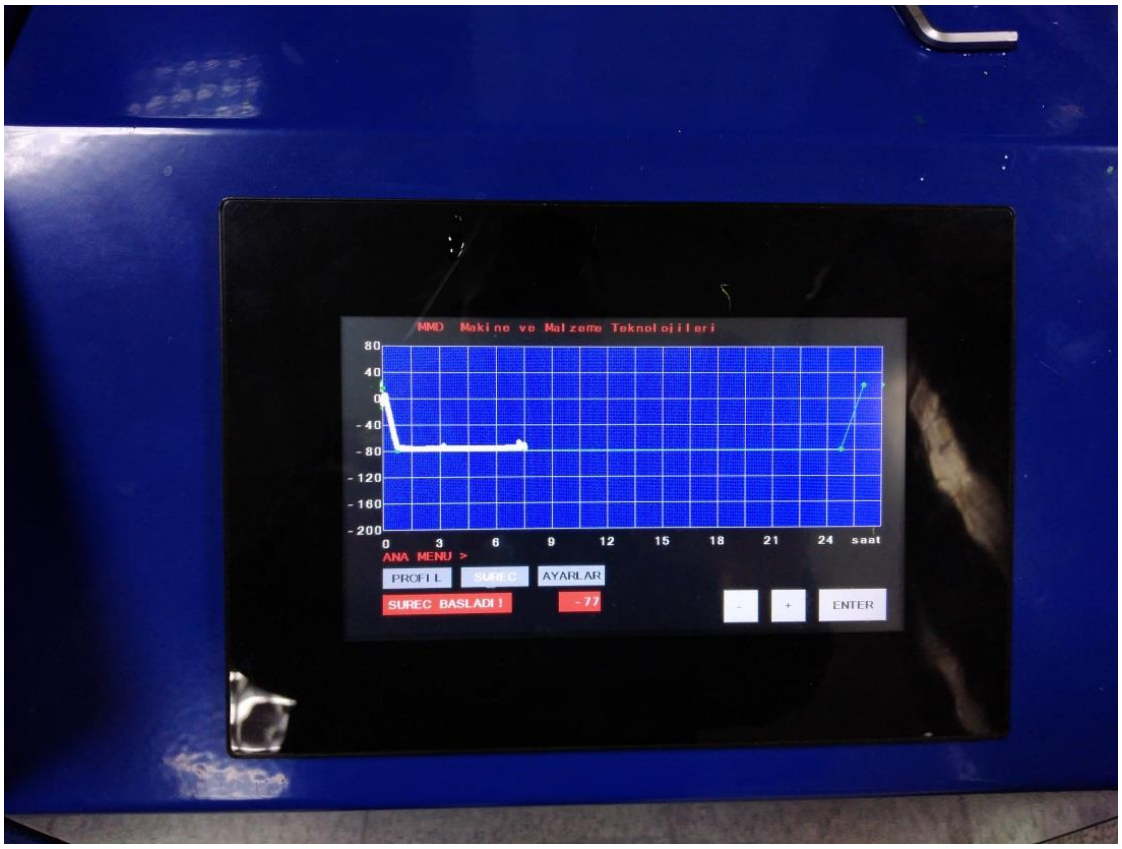


Şekil 5.10. Kriyojenik işlem cihazı.

Soğutma hızı 2 °C/dakika ile düşürülmesi programlanan soğutma fırınında, -80°C 'de 12 ve 24 saat bekleme süresinde sığ kriyojenik işlem, -180°C 'de 36 saat bekletilme süresinde derin kriyojenik işlem uygulanmıştır. Soğutma sisteminde kullanılan azot gazı, sisteme fan ve dozajlama sistemiyle aktarılmıştır.

Numuneler kriyojenik işlem öncesi SCT-12, SCT-24 ve DCT-36 isimlerinde numune adedine göre gruplandırılmıştır. Gruplandırılan numuneler cihaz içerisinde homojen ısı dağılımı için tel yardımı ile asılmıştır. Her bir grup numune için bekleme süresi ve sıcaklık değerleri ayrı ayrı programlandırılmıştır.

Kriyojenik işlem cihazı programlaması cihaz üzerinden parametre değerlerinin belirlenmesi ile gerçekleşmektedir. Şekil 5.11 'de sığ kriyojenik işlem uygulanan numuneler için 24 saat bekleme süresindeki ısıl işlem grafiği gösterilmiştir.



Şekil 5.11. Kriyojenik işlemin 24 saat bekleme süresindeki ısıl işlem grafiği.

Kriyojenik işlemden sonra numunelere temperleme işlemi uygulanmıştır. Her grup numune için 200℃'de 2 saat sürede temperleme yapılmıştır.

Testlerden önce numuneler SCT-12, SCT-24, DCT-36 olarak gruplandırılarak ayrı takip edilmiş, kriyojenik işlem uygulanmamış CHT numunesi ayrı bir grup olarak bekletilmiştir.

5.2 SERTLİK ÖLÇÜMLERİ

Hazırlanan numunelerde makro ve mikro sertlik ölçümleri yapılmıştır. Ölçümlerde 10 mm çapında ve 10 mm yüksekliğindeki disk numuneler kullanılmıştır. Sertlik ölçümlerinde her bir numune grubundan en az 5 ölçüm sonucunun ortalaması alınmıştır. Makro ve mikro sertlik değerleri Şekil 5.12 'de gösterilen NOVOTEST marka sertlik ölçüm cihazında ölçülmüştür. Makro sertlikler Rockwell (HRc) yöntemi kullanılarak ölçülmüştür. Mikro sertlik değerlerine 200 g yük ile 10 saniye uygulama yapılarak ölçüm gerçekleştirilmiştir.

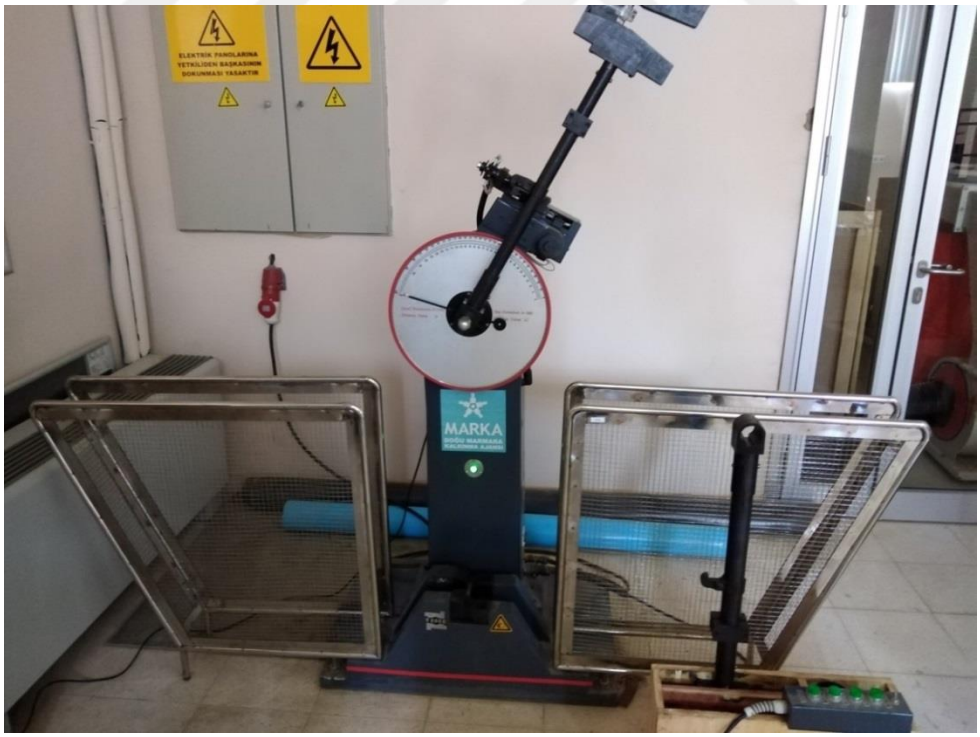
Şekil 5.12. NOVOTEST sertlik ölçme cihazı.

5.3 DARBE DENEYLERİ

Yapılan çalışmada, kriyojenik işlem sonrası numunelerin mekanik özelliklerde dinamik zorlama ile kırılma etkisini incelemek için numunelere darbe deneyi uygulanmıştır. Darbe deneyi Düzce Üniversitesinde, Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezinde yapılmıştır. Daha öncesinde broş ile "U" çentik açılan 10x10x55 mm ölçülerindeki numune Şekil 5.13 'de gösterilen şekilde çentik kısmı çekicin temas edeceği yönün tersinde, çekicin merkezine gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Deneyde numuneye çekiç ile 150 J darbe uygulanmıştır.

Darbe deneyi için Şekil 5.14 'te gösterilen JB-W300A marka darbe test cihazı kullanılmıştır.

Şekil 5.13 Darbe testi öncesi numunenin yerleştirilmesi.



Şekil 5.14. TIME JB-W300A Darbe test cihazı.

5.4 ÇEKME DENEYLERİ

Kriyojenik işlem sonrası malzemedeki çekme, uzama ve akma değerlerindeki değişimin incelenmesi için daha önce Şekil 5.3 'de teknik resme göre üretilen numuneler üzerinde çekme deneyi uygulanmıştır. Deney 10mm/dk çekme hızı ile gerçekleştirilmiştir. Her gruptan toplam 12 adet numuneye çekme testi uygulanmıştır.

Çekme deneyi, TEKNOROT laboratuvarında Şekil 5.15 'te gösterilen INSTRON 3382 marka 100KN çekme cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

Şekil 5.15 Çekme test cihazı.

5.5 AŞINMA DENEYLERİ

Makinelerin arızalanmasının ve yapı elemanlarının kullanılamaz hale gelmesinin en önemli nedenlerinden biri aşınma ve yıpranmadır. Sürtünmede enerji kaybı olduğu gibi aşınmada da aynı şekilde malzeme kaybı meydana gelmektedir. Bu nedenle dünya genelinde her yıl önemli ekonomik kayıplar meydana gelmekte ve aynı zamanda kayıpların önüne geçmek için çeşitli önlemler alınmaya çalışılmaktadır.

Kriyojenik işleminde bu kayıplar için alınan önlemlerden biridir. Bu amaç ile X40CrMoV5-1 takım çeliğin kriyojenik işlem sonrası aşınma davranışındaki etkisinin incelenmesi için aşınma deneyi yapılmasına karar verilmiştir.

Aşınma testi Düzce Üniversitesinde, Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezinde yapılmıştır. Aşınma testi için Şekil 5.16 'da gösterilen TRD marka aşınma cihazı kullanılmıştır. Deneyde daha önceden hazırlanan 12 adet 10 mm çapında 10 mm yüksekliğindeki disk numuneler kullanılmıştır. CHT, SCT-12, SCT-24 ve DCT-36 olarak gruplandırılan her numunenin ortalama değerleri alınmıştır.

Test kuru şartlarda, oda sıcaklığında 20N yük altında, 1 m/s kayma hızında gerçekleştirilmiştir. 1000 m ve 2000 m mesafede aşınma testi gerçekleştirilmiştir.

Aşınamadan önce ve aşınmadan sonra her grup malzeme 0.001 hassasiyetli terazi ile ölçülmüştür. Her bir numune için alınan değerlerin ortalamasıyla ölçüm sonuçlarına göre özgül aşınma kayıpları belirlenmiştir. Aşınma hızını hesaplama için aşağıdaki formül kullanılmıştır.

Aşınma hızı=Aşınma hacmi/(Yük Miktarı x Mesafe) , mm^3/Nm

Aşınma esnasındaki sürtünme kat sayısı sistemde bulunan yük ölçüm kolu vasıtasıyla kuvvetler tespit edilmekte ve I/O dönüştürücü kart yardımıyla bilgisayara aktarılmaktadır. Sürtünme katsayısı bilgisayar ortamında mesafeye bağlı olan ortalama değer grafiği vermektedir.

Şekil 5.16. TRD marka aşınma cihazı ve ekipmanları.

5.6 MİKROYAPI İNCELEMELERİ

Mikroyapı incelemelerinde disk numuneler kullanılmıştır. Numuneler mikroyapı analizi için Şekil 5.17 'de gösteril TRONIC XQ-1 marka cihazı ile şekilde gösterildiği gibi bakalite alma işlemi gerçekleştirilmiştir. CHT, SCT-12, SCT-24 ve DCT numune grupları renkli tozlar ile karıştırılmadan takip edilmiştir.

Bakalite alınan numuneler Şekil 5.18 'de gösterilen Mikro test marka parlatma cihazında aşağıda belirtilen teknik ile parlatma işlemi yapılmıştır.

- 1.aşama; Piatta elmas zımpara ve su ile 360 sn. süreyle parlatılmıştır. (220 grid)
- 2.aşama; 500 zımpara ve su ile 360 sn. süreyle parlatılmıştır.
- 3.aşama; Allegron elmas zımpara ve 6µm'luk poly elmas süspansiyon ile 240 sn. süreyle parlatılmıştır. (1200 grid)
- 4.aşama; Ramda parlatma keçesi ve 1µm'luk poly elmas süspansiyon ile 240 sn.

süreyle parlatılmıştır.

- 5.aşama; Napal ve 1µm'luk poly elmas süspansiyon ile 60 sn. süreyle ve 20N kuvvetle parlatılmıştır.
- 6.aşama; Dağlama işlemi %4 Nital (Nitrik asit ve etil alkol) ile dağlanarak analiz için hazırlanmıştır.

Şekil 5.17 TRONIC XQ-1 bakalit cihazı ve bakalit numuneleri.

Şekil 5.18. Mikro test parlatma cihazı.

Bakalite alınıp yüzey parlatma ve dağlama işlemi yapılan numuneler Şekil 5.19 'da gösterilen Nicon marka optik mikroskop ile 200x ve 500 x mikroyapılara bakılmıştır. Çözünürlük ve odaklama açısından taramalı elektron mikroskobu optik mikroskoba göre daha iyi olduğundan Şekil 5.20 'de gösterilen taramalı elektron mikroskobu ile mikroyapıdaki değişimler incelenmiştir.

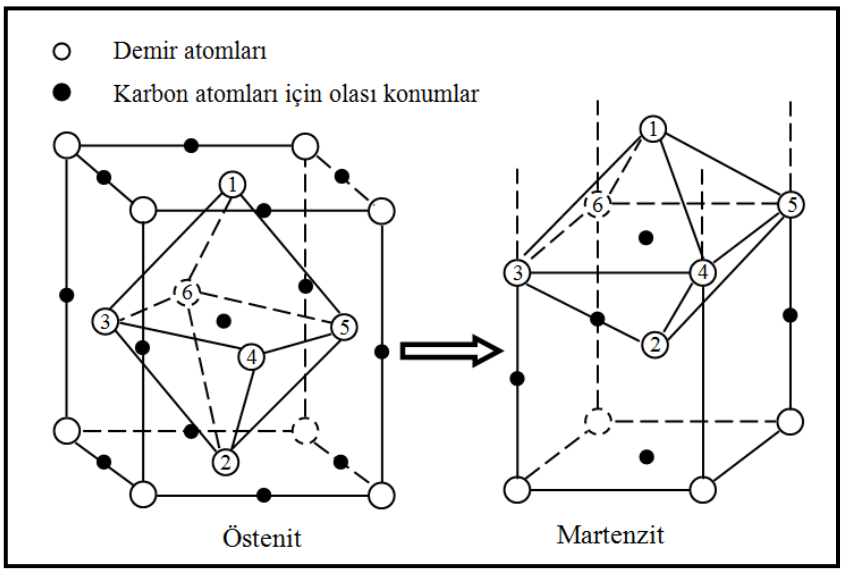
Şekil 5.19. Nicon optik mikroskop.

Şekil 5.20 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

6.1 MİKROYAPI SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

X40CrMoV5 1 takım çeliği ısıtılması sonucu, demir atomunun dağılmasıyla çelik içerisinde bulunan karbon atomlarının daha büyük boşlukları doldurmak için katı bir eriyik oluşturmasına neden olur. Bu karbonca zengin demir katı çözeltisi östenit olarak isimlendirilmektedir. Östenit yapısı kübik bir yapıya sahiptir. Bu faz 1147°C de %2 'lik karbonu çözmektedir [109]. Isıtma işleminden sonra çelik yavaşça soğuyarak östenit fazındaki karbonlar difüzyona uğrayarak çözünür ve östenit yapısından ayrılır. Bu durumun devamında demir atomları harekete geçerek α fazı oluşur. Soğuma hızı arttığında karbon atomları difüzyona uğrayamadığı için çözelti içerisinde kalarak farklı bir yapının olmasına neden olur. Soğuma hızlı olması sebebiyle oluşan bu yapı martenzit olarak isimlendirilir. Martenzit yapı sert bir faz olması ile bilinmektedir. Sertlik sebebi ise dönüşüm sırasında yaşanan çarpılma olarak belirtilmiştir [46]. Şekil 6.1 'de östenit yapının martenzit yapıya dönüşümü gösterilmiştir [110].



Şekil 6.1 Östenit yapının martenzite dönüşümü.

Takım çeliklerinde yer alan C elementi sebebi ile geleneksel ısıl işlem sonrası mikroyapıda kalıntı östenit olduğu bilinmektedir [51]. Kriyojenik işlem uygulamalarında bu durum martenzit dönüşümü ile kalıntı östenitin azalmasına sebep

olmaktadır. Kriyojenik işlem sonrası mikroyapıda küçük boyutlardaki karbürler oluşmakta ve homojen dağılımlar görülmektedir. Geleneksel ısıl işlem ile birlikte martenzit yapıdaki kafes yapısındaki değişime bağlı olarak karbon atomları dislokasyonların yoğun olduğu alana hareket edebilirler. Uygulanan temperleme işlemi ile bu alanlarda karbürler oluşmaktadır. Takım çeliklerinde mikroyapıda görülen başlıca karbür çeşitleri, özellikleri ile birlikte Çizelge 6.1 'de gösterilmiştir [112].

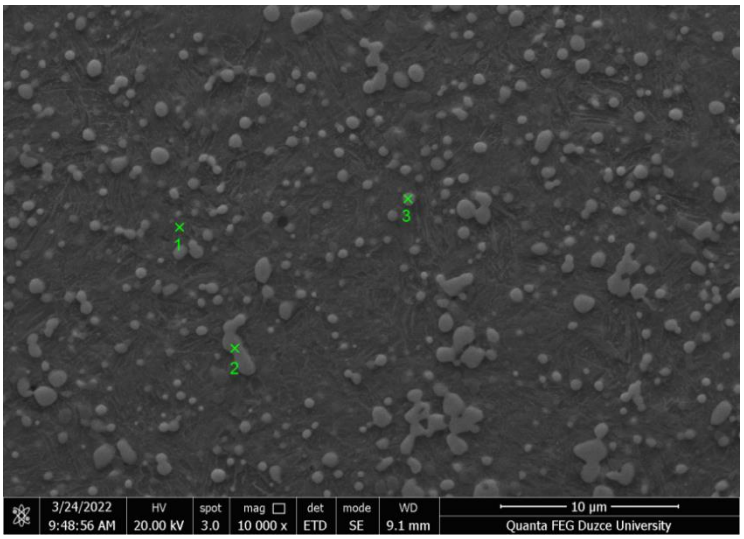
Çizelge 6.1 Sıcak iş takım çeliklerinde görülen karbür türleri.

Karbür Türleri	Karbürü Oluşturan Elementler	Kristal Yapı	Geometri
MC	V (baskın), W, Mo, Cr	Yüzey merkezli kübik	Kümeleşmiş
M_2C	Mo, W (baskın), V, Cr	Hekzagonal	İğnemsi
M_6C	Mo, W (baskın), V	Yüzey merkezli kübik	Lamelli
M_7C_3	Cr (baskın), V, Mo, Fe	Hekzagonal	Lamelli
$M_{23}C_6$	Cr (baskın), V, Mo, Fe	Kübik (kompleks)	Lamelli

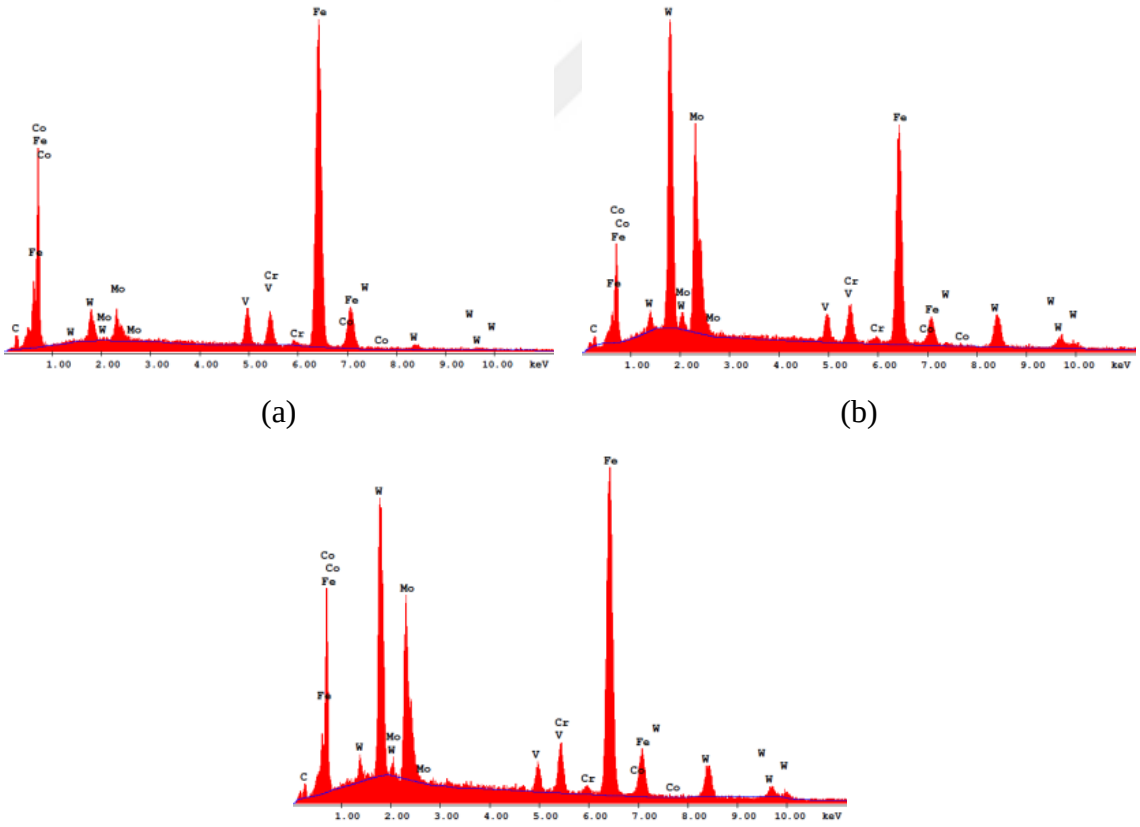
Sıcak iş takım çelikleri kriyojenik işlem uygulandığında daha az kararlı olan karbürlerin yüksek kararlı yapıdaki karbürlere dönüştüğü görülmektedir [52]. Karbür yapısı genelde temperleme sonucu kimyasal yapısında değişim görülmektedir. Sıcaklık artışı ile birlikte enerji artmakta ve kararlı bir yapı oluşması için karbürler kümeleşmektedir. Boyutsal olarak en büyük boyuttaki karbürler sırası ile $M_{23}C_6$ (0.15 – 0.30 μm) ve M_7C_3 (0.10 – 0.18 μm) karbürleri olduğu bilinirken daha küçük yapıdaki M_6C, M_2C ve MC (0.07 – 0.12 μm) karbür türleri de bulunmaktadır [112].

Her numuneye element dağılım analizi (EDAX) yapılmıştır. Dağılım analizlerinde C, Mo, V, Cr, Fe ve W elementlerine görülmektedir. Şekil 6.2 ‘den Şekil 6.9 'a kadar sırası ile CHT, SCT-12, SCT-24 ve DCT-36 numunelerine ait SEM görüntüleri ve EDAX grafikleri gösterilmiştir. Mikroyapı incelemesinde CHT numunesinde oluşan karbürlerin yapısında genel olarak Cr, Mo ve W elementinin baskın olduğu görülmüştür. Kristal yapıları bakımından hekzagonal ve yüzey merkezli kübik M_6C - M_2C karbürler olarak tanımlandı. SCT-12 ve SCT-24 numunelerinde Cr, V, W, Mo ve Fe elementlerinin bulunduğu EDAX grafiğinde temel karbür oluşturan W ve Mo elementinin baskın olduğu görülmektedir. Sığ kriyojenik işlem uygulanan numunelerde ikincil karbürlerin oluştuğu görülmüş ve hekzagonal yapıdaki M_2C fazı varlık göstermiştir. DCT-36 numunesinde ise mikroyapıda oluşan küçük karbürler ile ikincil karbür oluşumu

görülmüştür. EDAX bakıldığında, martensit çıtalarının iç kısmında yüksek yoğunlukta Mo bakımından zengin M_2C karbürler gözlenirken, daha küçük V bakımından zengin MC karbürlerin baskın olduğu görülmüştür.



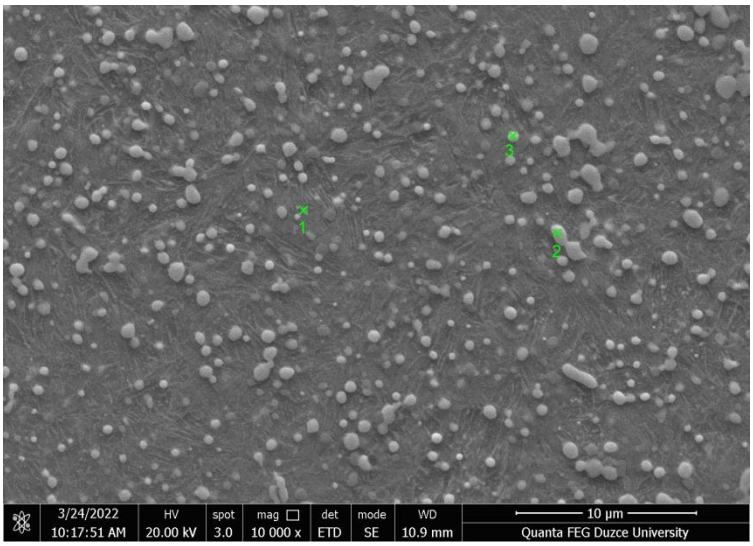
Şekil 6.2 CHT numunesine SEM görüntüsü.



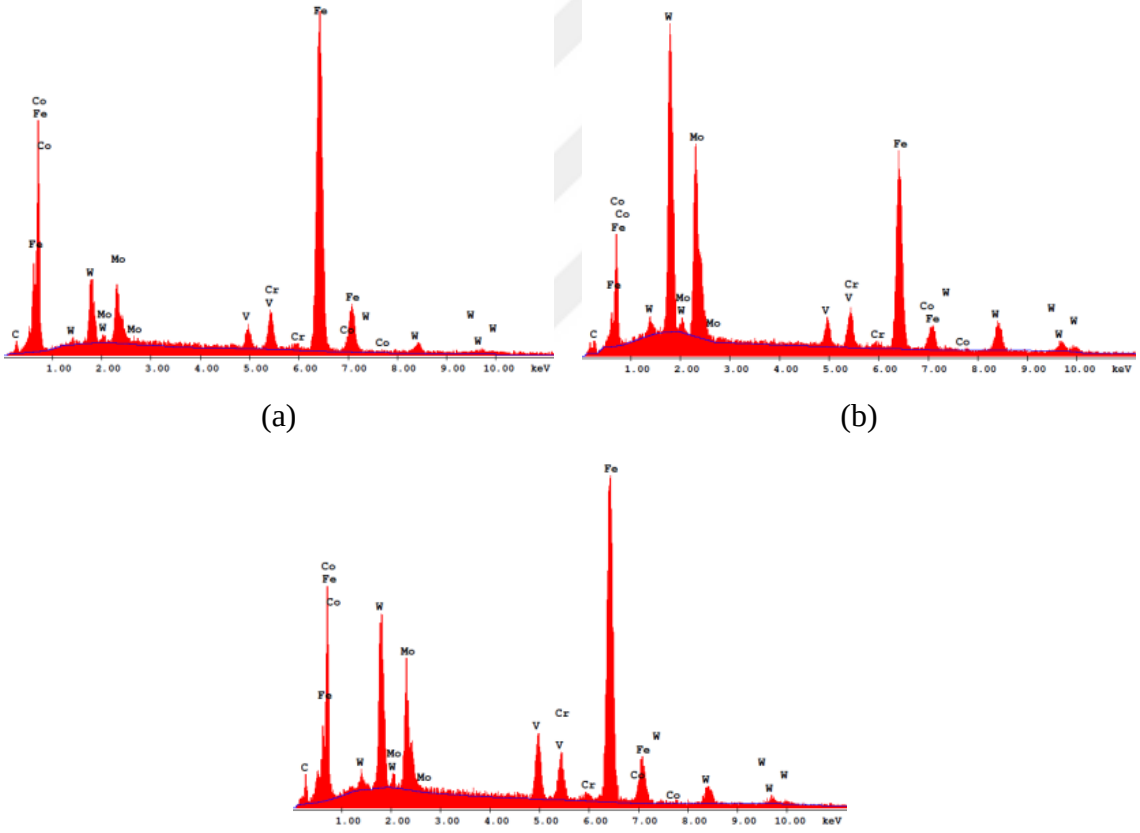
(a) (b)

(c)

Şekil 6.3 CHT numunesi EDAX grafikleri a) 1.karbür b) 2.karbür c) 3.karbür.



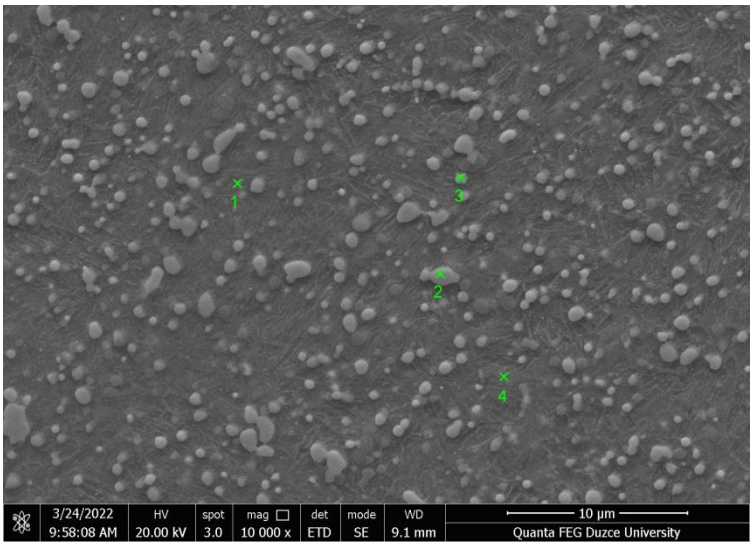
Şekil 6.4 SCT-12 numunesine SEM görüntüsü.



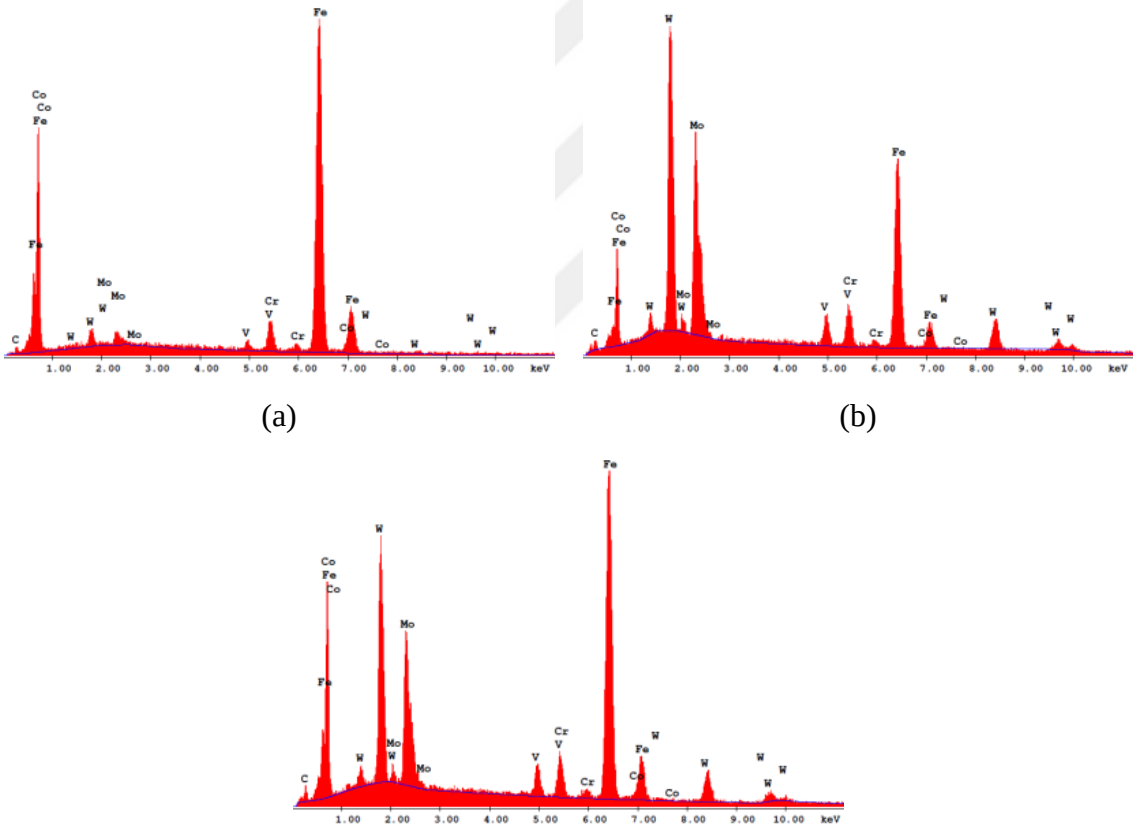
(a) (b)

(c)

Şekil 6.5 SCT-12 numunesi EDAX grafikleri a) 1.karbür b) 2.karbür c) 3.karbür.



Şekil 6.6 SCT-24 numunesine SEM görüntüsü.

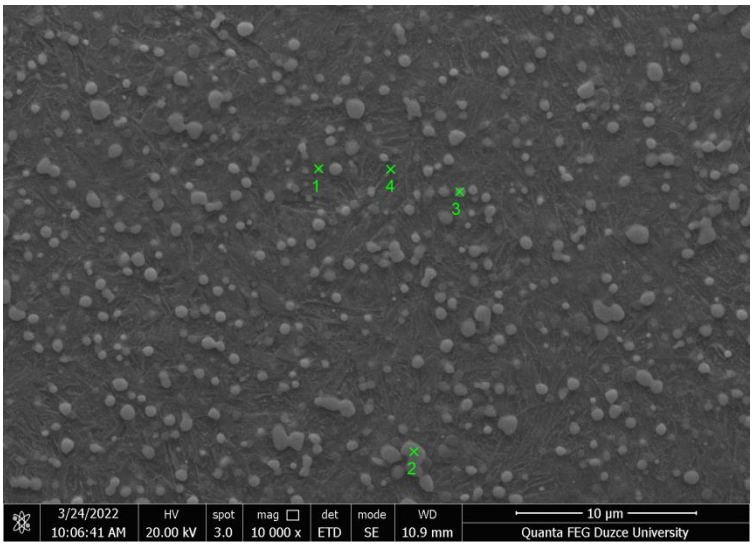


(a)

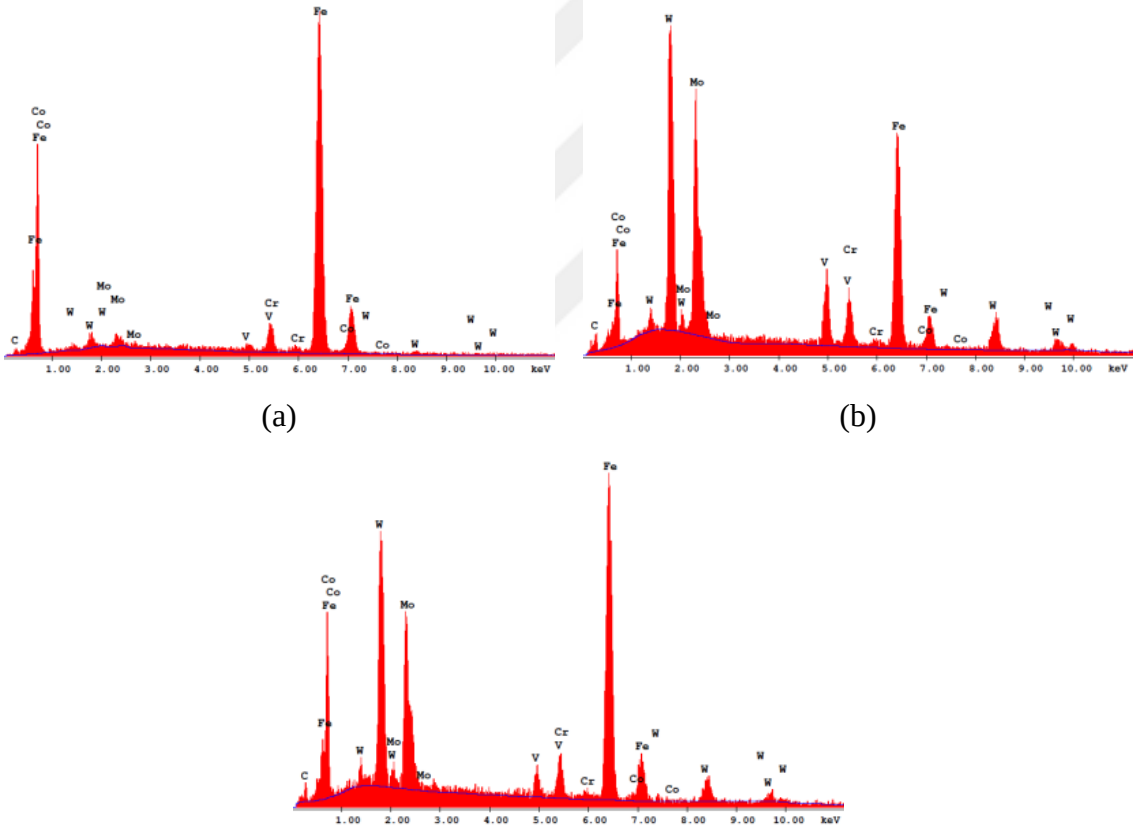
(b)

(c)

Şekil 6.7 SCT-24 numunesi EDAX grafikleri a) 1.karbür b) 2.karbür c) 3.karbür.



Şekil 6.8 DCT-36 numunesine SEM görüntüsü.



(a)

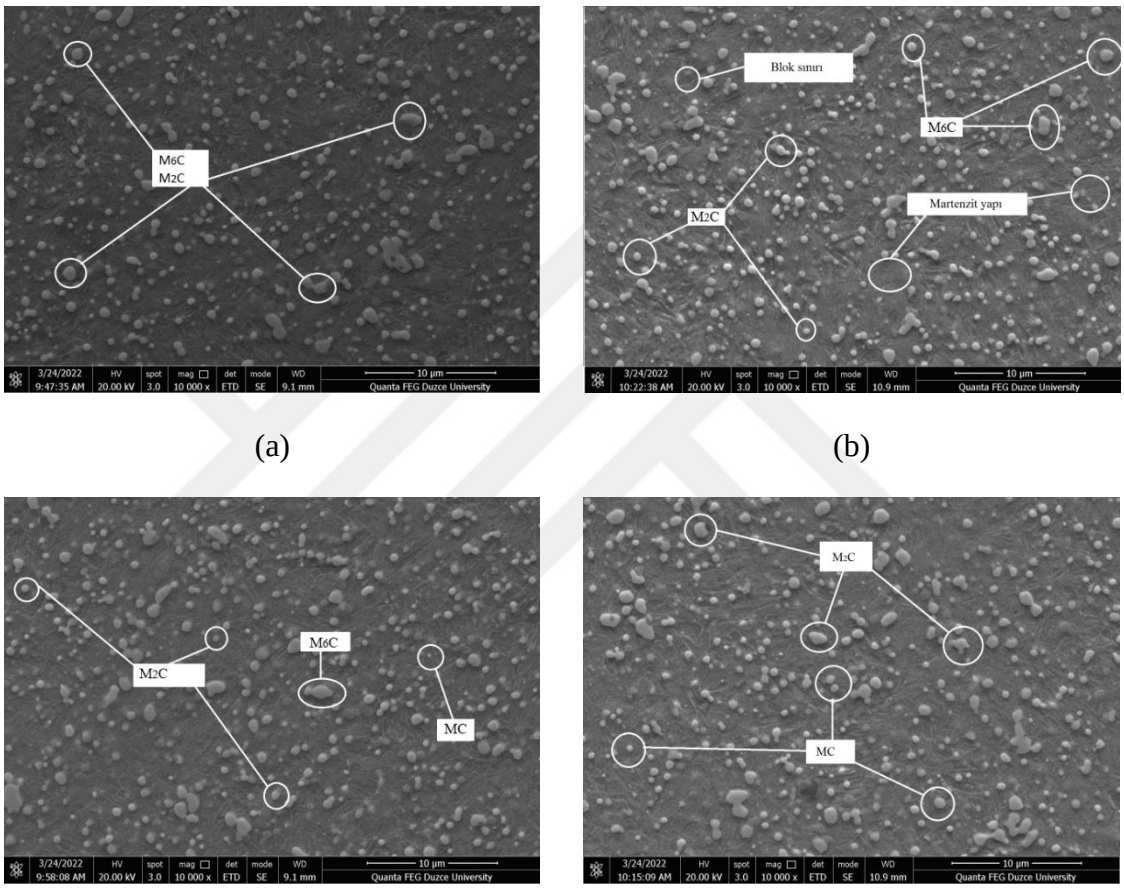
(b)

(c)

Şekil 6.9 DCT-36 numunesi EDAX grafikleri a) 1.karbür b) 2.karbür c) 3.karbür.

Şekil 6.10 'de kriyojenik işlem uygulanan numunelerin mikroyapısının SEM görüntüsü verilmiştir. Mikroyapıya bakıldığında CHT numunesinde hekzagonal ve yüzey merkezli kübik yapıdaki M_6C – M_2C karbürleri oluştuğu görülmektedir. Kriyojenik işlem uygulanan numunelerde martenzit yapının oluştuğu görülmüştür. Kriyojenik işlem ile

birlikte yüzey kübik merkezli M_2C ve MC fazları varlık göstermiştir. Bu karbür türleri EDAX ile içerisindeki V ve W elementlerinin baskım olması ile ilişkilendirilmiştir. CHT numunesine göre bakıldığında, DCT-36 numunesinin mikroyapısında küçük yapıdaki MC türdeki karbürlerin arttığı ve homojen bir yapıda olduğu görülmüştür. Bu durumun oluşması ile karbür çökelmesine atfedilmiştir. Zhang vd. (2021), tavlanmış malzemenin mikroyapısının $M_{23}C_6$ (0.15 – 0.30 μm), M_7C_3 (0.10 – 0.18 μm) ve MC (0.07 – 0.10 μm) karbür türlerini geliştirdiğini belirlemiştir [111].



(a) (b)

(c) (d)

Şekil 6.10 Mikroyapı görüntüleri a) CHT b) SCT-12 c) SCT-24 d) DCT-36.

Amini vd., yaptıkları çalışma sonucunda karbür yüzdesinde en yüksek değeri 36 saat bekletilen numunede tespit etmişlerdir. Bekleme süresi arttıkça karbür yüzdesinde azalma olmuş ve devamında değişim göstermemiştir [43]. Mikroyapı incelemeleri sonucu kriyojenik işlem sonrası östenit fazından martenzit yapıya geçiş olduğu görülmektedir. 36 saat bekleme süreindeki numunede karbür dağılımında daha homojen bir yapının olduğu görülmektedir. Bu durum literatürde yapılan çalışmaları desteklemektedir [46].

Grafiklere bakıldığında demir elementi en yüksek element olduğu görülmektedir. Yüksek miktarda Mo elementi analiz sonucunda Fe elementini takip etmektedir. Az oranda Cr ve V elementleri görülmektedir. Demir elementi bekleme zamanına bağlı olarak azalan bir grafik sergilemiştir. Bu durum -80ºC'deki 12 saat bekleme süresine göre 24 saat bekletilen numunede demir elementinin %13,56 oranında azaldığı tespit edilmiştir.

Kriyojenik işlem sonrası yapılan mikroyapı incelemesinde ikincil karbürlerin oluştuğu görülmüş ve M_6C, M_2C, MC karbürleri varlık göstermiştir. Kriyojenik işlem ile daha küçük yapıdaki karbürlerin oluştuğu ve homojen dağıldığı görülmüştür. Demir elementinin zaman balı olarak azalma eğilim göstermiştir. Alaşım elementlerinde azalma görülmüştür. Bu durum kriyojenik işlem sonrası karbür oluşumu ile ilişkilendirilmiştir.

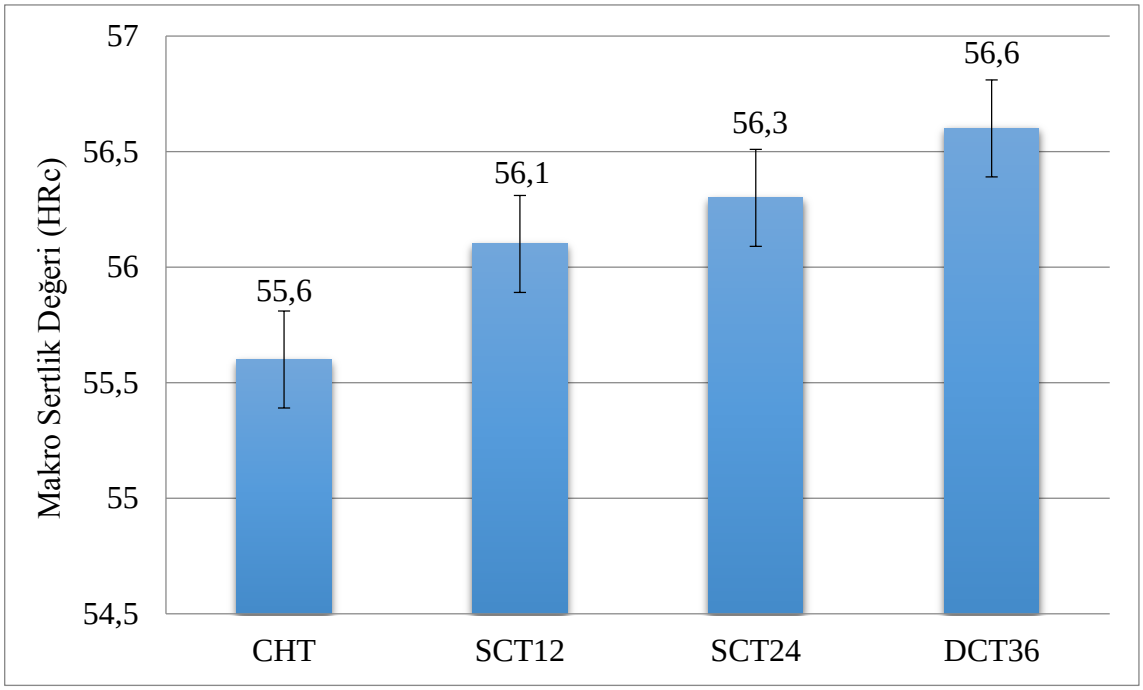
6.2 MAKRO VE MİKRO SERTLİĞİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Sertlik deneyleri, yapılan diğer deneylere oranla basit ve tahribatın az olması sebebiyle mekanik özelliklerin tanımlanmasında daha çok tercih edilmektedir. Sertlik değeri bilinen bir malzemede mekanik özellikler için daha kolay yorum yapılabilir. Sertlik değeri diğer deneyleri etkileyen önemli faktördür. Aşınma, çekme, darbe gibi deneylerde malzeme sertliği sonuca paralel ya da ters oranda etki etmektedir.

Şekil 6.11 'de geleneksel ısıl işlem gören numune ve kriyojenik işlem görmüş numunelerin makro sertlik değerleri gösterilmiştir. Sertlik değerlerine bakıldığında en yüksek değerler DCT-36, SCT-24, SCT-12 şeklinde sıralandığı görülmektedir. X40CrMoV5 1 takım çeliğinde kriyojenik işlem sonrası en yüksek sertlik artışı %1,79 oranında DCT-36 numunesinde görülmüştür. Bu durum kriyojenik işlem sonrası X40CrMoV5 1 takım çeliğinin içindeki yumuşak faz olan östenitin daha sert bir faz olan martenzit yapıya dönüşmesi ile açıklanmaktadır [55], [58], [62], [101]. Yi vd. (2013), yaptıkları çalışma ile derin kriyojenik işlemden sonra %22 oranında serlik miktarında artış olduğunu bildirmiştir [101]. Yapılan diğer bir çalışmda Dhokey vd. (2009), D3 çeliği üzernde uyguladıkları derin kriyojenik işlem sonrası sertlik değerinde 5 HRc artış olduğunu tesit etmişlerdir [40].

Elde edilen sonuçlara göre literatürde elde edilen sonuçların paralel doğrultuda olduğu

görülmektedir. Kriyojenik işlem sonrası en yüksek sertlik değeri 56,6 HRc ile DCT-36 numunesinde olduğu görülmüştür. Geleneksel ısıl işleme göre SCT numunelerinde de artış olduğu görlmektedir. Sonuç kriyojenik işlem sonrası mikroyapıdaki östenitin martenzite dönüşmesi ile ilişkilidir.

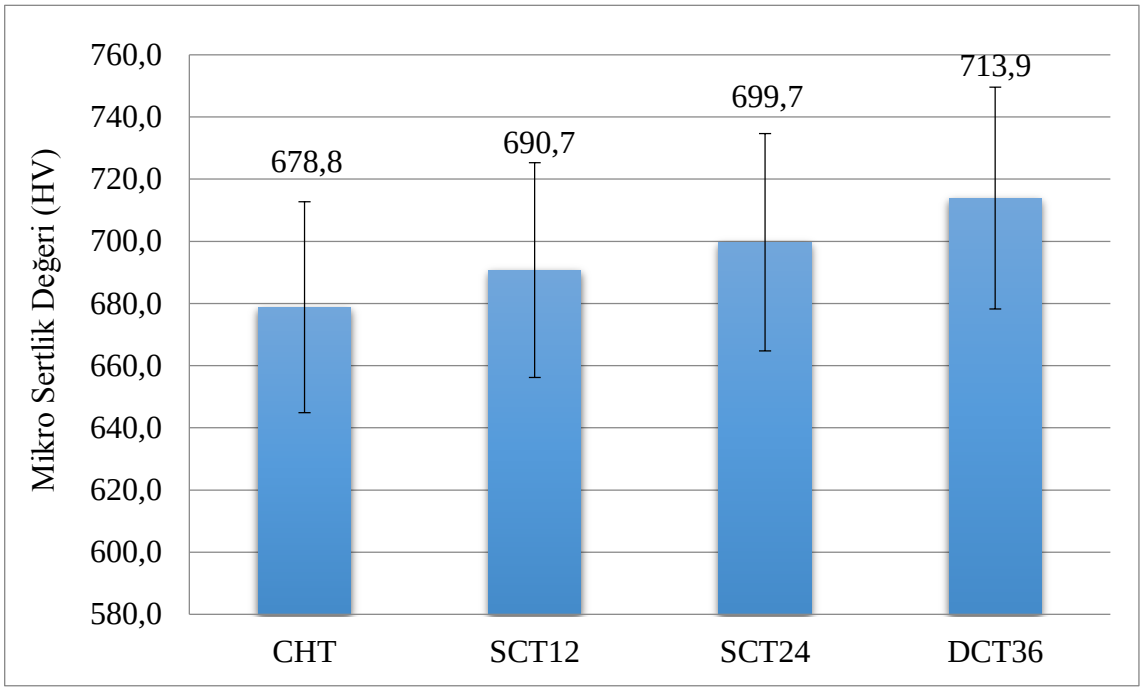


Şekil 6.11 Makro sertlik değerlerindeki değişim.

Şekil 6.12 'de geleneksel ısıl işlem gören numune ve farklı bekleme süresindeki kriyojenik işlem görmüş X40CrMoV5 1 takım çeliğinin mikro sertlik değerlerindeki değişim değerleri gösterilmiştir. Sonuçlara göre 713,9 HV değeri ile en yüksek mikro sertlik değeri DCT-36 numunesi olduğu görülmüştür. Diğer numunelerde ise sırasıyla 699,7 HV, 690,7 ve 678,8 HV değerlerinde SCT-24, SCT-12 ve CHT numunelerinin ortalama mikro sertlik değerleri yüksekten düşüğe göre sıralanmıştır.

Sonuçlara bakıldığında mikro sertlik değerlerindeki değişim oranları makro sertlik değerleri ile paralel seyretmiştir. DCT-36 numunesi makro sertlikte olduğu gibi mikro sertlik değerinde %5,17 'lik iyileşme oranıyla en yüksek sertlik değerine sahiptir. Bu durum yukarıda belirtildiği gibi östenitin martenzite dönüşümünün DCT-36 numunesinde daha yüksek olması ile ilişkilidir. H. Nalbant (2018), yatığı çalışmada 12 saat derin kriyojenik işlemde bekletilen AISI 4140 çelikte %3,59 oranında artış elde etmiştir [81]. Amini vd. (2012) yaptıkları çalışmada farklı bekleme süresindeki derin kriyojenik işlemin sertliği arttırdığını belirtmiştir. En yüksek makro ve mikro sertlik

değerine takım çeliğinde 36 saat bekleme süresinde ulaşmışlardır [43].



Şekil 6.12 Mikro sertlik değerlerindeki değişim.

Yapılan çalışmalara bakıldığında sertlik oranındaki artışın kriyojenik işlem sonrası östenit yapının martenzit yapıya dönüşümü ile ilgili olduğunu belirtmişlerdir. Bununla birlikte 36 saat bekleme süresinde sertlik değerinin daha yüksek sonuçlar vermesi sebebiyle kalıntı östenit miktarı diğer bekleme sürelerine göre daha az olmasına ve 36 saat bekleme süresinde karbür oranının yüksek oranda olmasına atfedilmiştir. Literatür çalışmaları incelendiğinde Çizelge 6.2 'de farklı malzemelere uygulanan kriyojenik işlemin sertlik değerlerindeki iyileşme oranları tabloda verilmiştir.

Çizelge 6.2 Kriyojenik işlemin sertliğe etkisi.

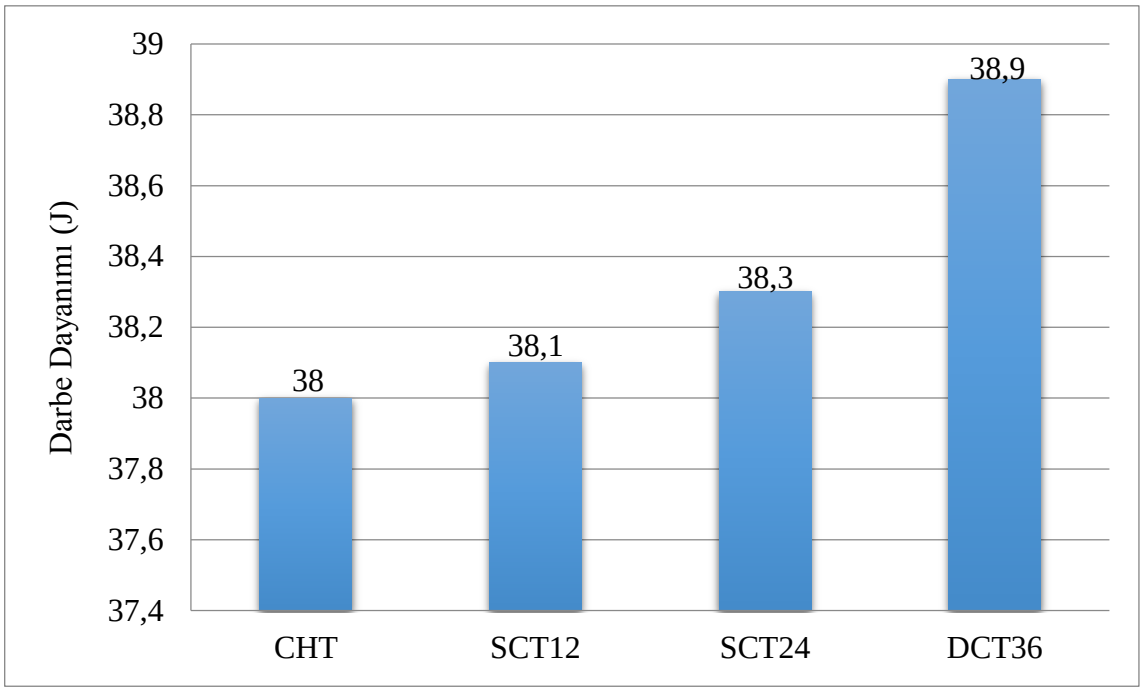
Referans	Malzeme	Sertlik Değerindeki İyileşme
Molinari [93]	AISI H13	% 6,9 HRc
F. Kara [46]	AISI 52100	%8,38 HV
H. Nalbant[81]	AISI 4140	%3,59 HV

Tabloya bakıldığında literatürde yapılan çalışmaların mikro ve makro sertlik üzerinde iyileşmeler olduğunu göstermektedir. Mikroyapıda oluşan karbürlerin sertliğin artırmasına atfedilmiştir. Bu çalıma ile literatürdeki mikro ve makro sertlik

değerlerindeki iyileşmelerin paralel olduğu görülmektedir.

6.3 DARBE DAYANIMININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Kriyojenik işlem, malzemenin darbe ve tokluğunu önemli oranda etkilenmektedir. X40CrMoV5 1 takım çeliğinin mekanik özelliklerinde kriyojenik işlemin etkisini incelemek için 4 farklı numuneye darbe testi uygulanmıştır. Darbe testi her numunede 3 kez uygulanarak elde edilen sonuçların ortalama değerleri alınmıştır. Şekil 6.13 'te kriyojenik işlem uygulanan numunelerdeki darbe performansındaki iyileşme grafik olarak gösterilmiştir.



Şekil 6.13 Numunelerin darbe dayanımı.

Darbe enerjisi sırasıyla 38,9 J, 38,3 J, 38,1 J ve 38 J değerlerinde DCT-36, SCT-24, SCT-12 ve CHT numunelerinde büyükten küçüğe sıralanmıştır. Kırılma enerjisi en yüksek DCT-36 numunesi olduğu görülmektedir. Geleneksel ısıl işlem görmüş numuneye göre kriyojenik işlem görmüş DCT-36 numunesinde %2,37 oranında iyileşme olduğu görülmektedir. Grafikten anlaşıldığı üzere geleneksel ısıl işlem uygulanan numuneye göre kriyojenik işlem uygulanmış olan numunelerin darbe dayanımlarında iyileşme olduğu tespit edilmiştir. Carlson (1991), yaptığı çalışmada temperleme işleminin kriyojenik işlemden sonra yapılması ile malzeme

karakteristiğinde ve darbe direncinde iyileşme olduğu bu çalışma ile desteklemiştir [72]. H. Nalbant (2018), AISI 4140 çelik üzerinde uygulanan 36 saat bekleme süresindeki derin kriyojenik işelem sonucu %4,99 oranında darbe dayanımında iyileşme olduğunu tespit etmiştir.

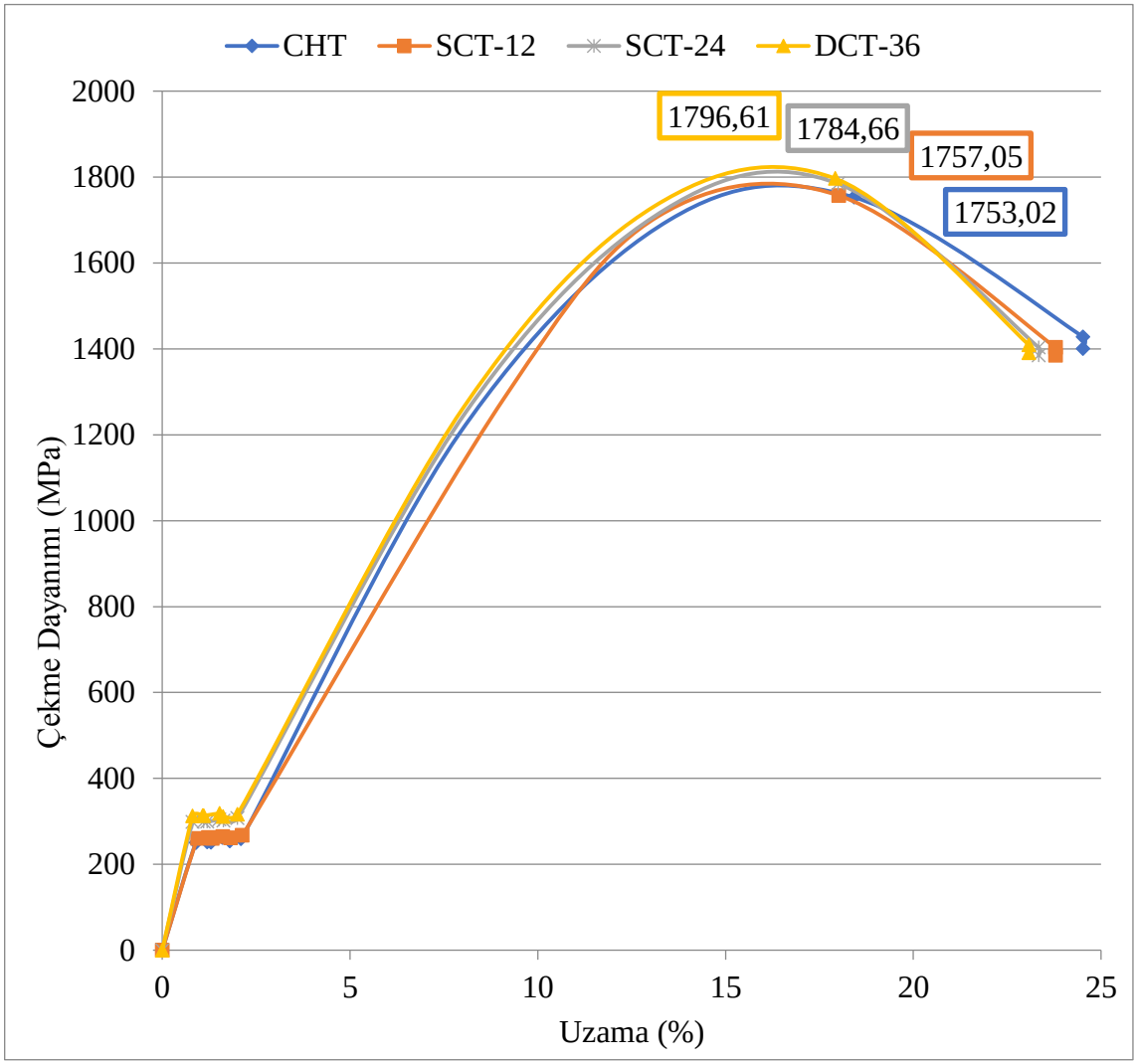
Darbe dayanımını etkileyen başka bir etken ise mikroyapıdaki ikincil karbür taneciklerdir. Bu taneciklerin etrafında büyümeye yatkın çatlaklar oluşturabilir. Bu durum kırılma enerjisini olumsuz etkilemektedir. Mikroyapıdaki tanecik hacminin, boyutunun ve morfolojisinin darbe dayanımına önemli etkisi olduğu bilinmektedir [102]. Kriyojenik işlem sonrası ince tane boyutuna sahip martensit tanelerin oluşması tokluğu iyileştirdiği söylenmektedir [103]. Temperleme işlemi sonrası martenzit yapının iyileşmesi ile darbe dayanımı arttığı bilinmektedir [72]. Fakat kriyojenik işlem sonrası kalıntı östenitten oluşan yeni martenzit yapının sert ve kırılgan yapısı darbe dayanımını olumsuz etkilemektedir [42]. Bu durum kriyojenik işelmde uygulanan farklı bekleme süresinin tanecik yapısındaki değişim ile ilişkilendirilmiştir.

6.4 ÇEKME DAYANIMININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Yapılan çalışmalarda kriyojenik işlem sonrası malzemelerin mekanik özelliklerinde iyileşmeler olduğu görülmektedir [58], [101], [104], [105]. Kriyojenik işlemin X40CrMoV5 1 takım çeliğinin mekanik özelliklerine etkisinin incelenmesi için dört farklı numunede çekme testi uygulanmıştır. Her numune için üç kez tekrarlanan testlerin ortalama değerleri alınmıştır. Gruplandırılan her numunenin çekme diyagramı Şekil 6.14 'deki grafikte verilmiştir. Her numuneye ait akma dayanımı ve uzaman miktarları Şekil 6.15 ve Şekil 6.16 'da grafikler ile gösterilmiştir.

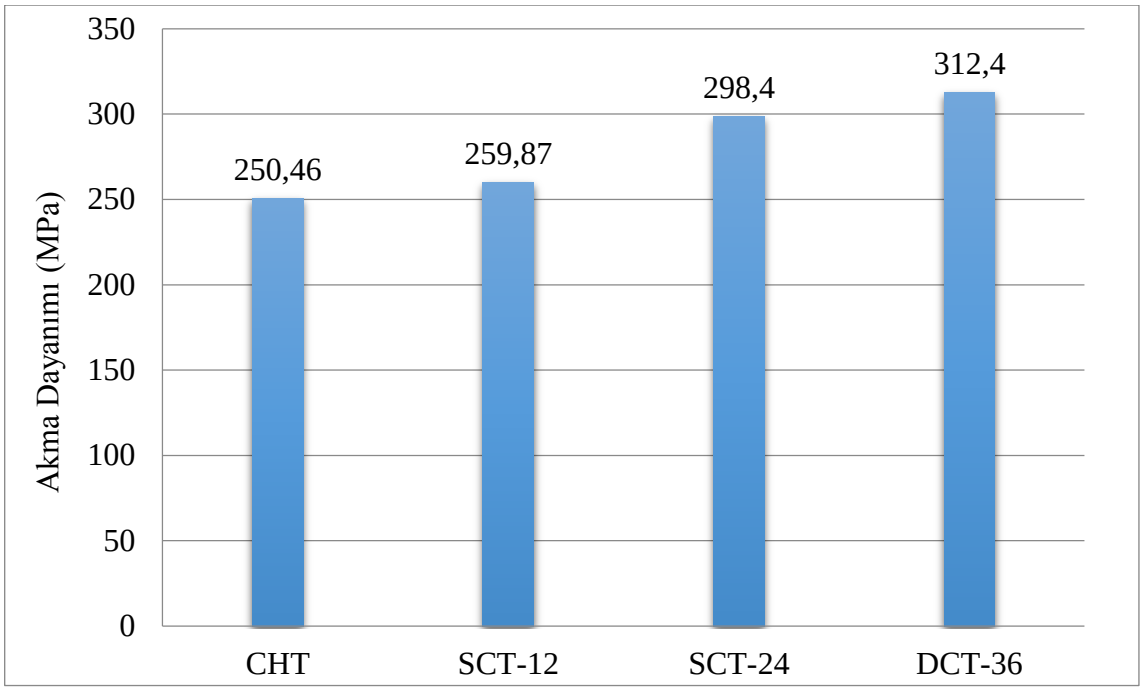
Grafikler incelendiğinde maksimum çekme ve akma dayanımları DCT-36, SCT-24, SCT-12 ve CHT olarak en yüksek değerden başlayarak sıralandığı görülmektedir. Bu durum X40CrMoV5 1 takım çeliğinin kriyojenik işlemden sonra geleneksel ısıl işlem gören numuneye göre akma ve çekme dayanımlarında iyileşmeler olduğunu göstermektedir. Çekme dayanımı en yüksek 1796,61 MPa ile derin kriyojenik işlem görmüş olan numunede görülmektedir. CHT numunesine göre DCT-36 numunesi %2,49 oranında maksimum çekme değerinde artış sağlanmıştır. Aynı zamanda çekme dayanımlarında sığ kriyojenik işlem gören numunelerde de en yüksek değerden

başlayarak sırasıyla %1,80 ve %0,23 oranlarında SCT-24 ve SCT-12 numunelerinde iyileşme görülmüştür.



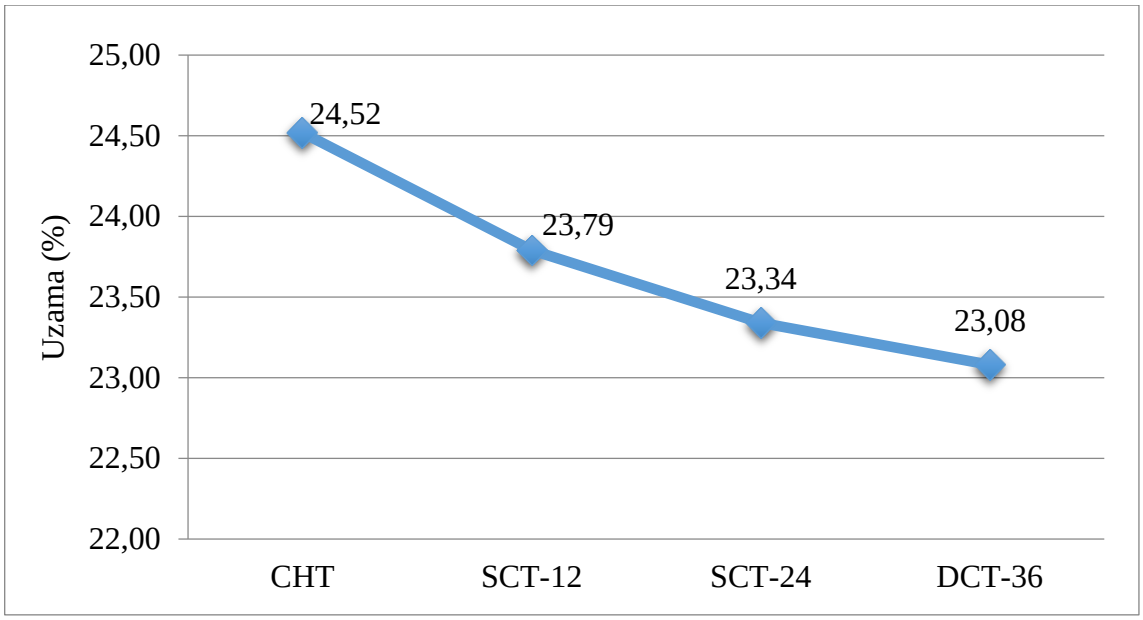
Şekil 6.14 Çekme diyagramı.

Akma dayanımındaki iyileşme oranları en yüksek değerden başlayarak sırasıyla DCT-36, SCT-24, SCT-12 numunelerinde %24,73, %19,14, %3,76 olarak tespit edilmiştir. En yüksek çekme dayanımı ve akma dayanımı DCT-36 numunesinde görülmektedir. Bu durum daha öncede belirtildiği gibi östenit yapıdan martenzit yapıya dönüşümü ile ilişkilidir. Kriyojenik işlem sonrasında oluşan martenzit yapı ile karbür tanelerinin homojen dağılımı ve tokluğun azalması ile akma ve maksimum çekme dayanımlarında iyileşmeler sağlanmıştır [55], [58], [101], [106]. CHT numunesine göre kriyojenik işlem sonrası sertliğin artması sonucu SCT ve DCT numunelerinin akma ve çekme dayanımlarında artış görülmüştür.



Şekil 6.15 Çekme deneyi numunelerinin ortalama akma dayanımı (MPa).

Kriyojenik işlem gören numunelerdeki akma ve çekme dayanımlarındaki artışlara bakıldığında en yüksek değer DCT-36 numunesinde görülmektedir. Bu durum mikroyapıdaki östenit yapının martenzit yapıya dönüşümünü desteklemektedir. Literatürde yapılan incelemelerde mekanik özelliklerde iyileşmeler olduğu görülmektedir. Bensely vd., yaptığı derin kriyojenik işlem çalışmasında -196°C de 24 saat bekletme süresinde %9,34 iyileşme olduğunu belirtmiştir [106]. Kriyojenik işlem sonrası kalıntı östenit hacminin düşmesi ile çekme dayanımı %8,9 oranında iyileştiği tespit edilmiştir [8]. AISI 52100 çelik üzerinde uygulanan çekme deneyinde derin kriyojenik işlem sonrası maksimum çekme dayanımında ve akma dayanımındaki iyileşmeler sırasıyla %5,2 ve %3,1 olarak belirtilmiştir [46]. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar ile literatürde elde edilen sonuçların paralel yol izlediği görülmektedir.



Şekil 6.16 Çekme deneyi numunelerinin uzama değeri (%).

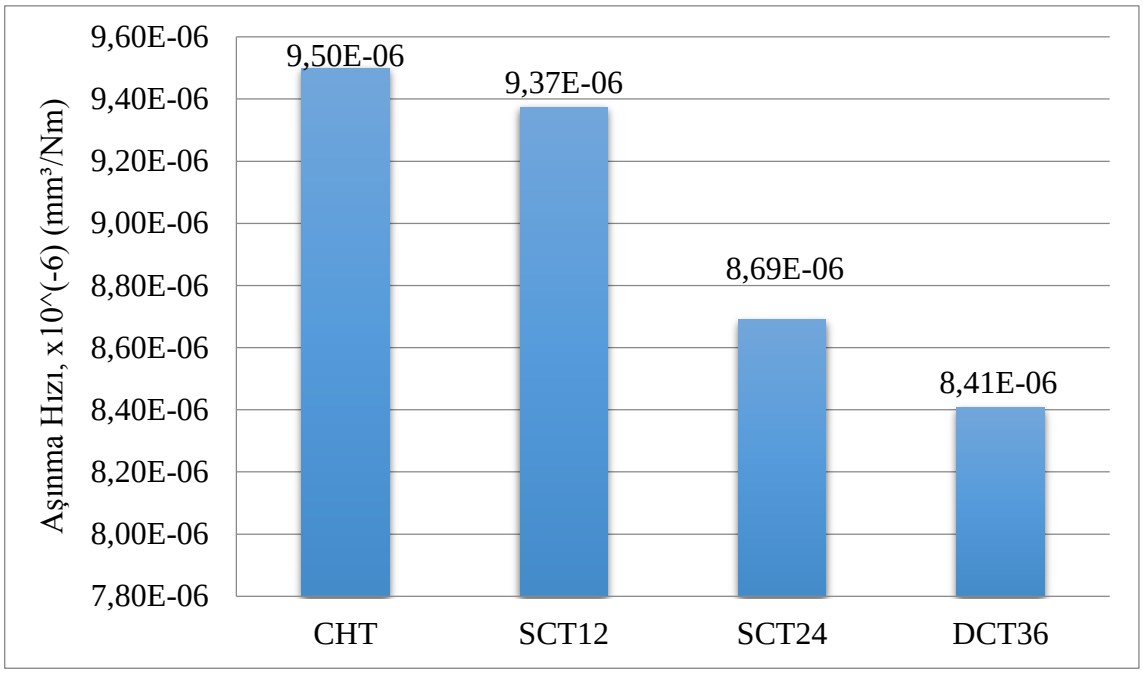
Uzama miktarlarında akma ve çekme dayanımının tersi yönünde bir grafik görülmektedir. Uzama miktarı malzemenin süneklik ve gevreklik durumu ile ilişkilidir. Numunelerin arasındaki uzaman miktarlarına bakıldığında en düşük değerden sıralama yapılırsa sırasıyla DCT-36, SCT-24, SCT-12 ve CHT olarak görülmektedir. CHT numunesi daha sünek ve gevrek yapıda olması sebebiyle DCT-36 numunesine göre daha fazla uzamıştır. Sıcaklık değeri hızla düşürülen çeliklerde mikroyapıdaki östenitin martenzite dönüşümü sırasında kalıntı östenitlerin oluştuğu bilinmektedir. Östenit hacminin düşmesi sonucu DCT-36 numunesindeki martenzit yapıya dönüşüm ile ilişkili olarak süneklik özelliği azalmış ve diğer numunelere göre daha az uzama yaparak kopmuştur. Martenzit yapının östenite göre daha az sünek olması ve daha yüksek çekme mukavemetine sahip olduğu kaydedilmiştir [90]. N52 ve 21-4N valf çeliklerine uygulanan kriyojenik işlem ile çekme dayanımlarında sırası ile %7,84 ve %11,87 değerinde iyileşme ile birlikte uzama değerinde azalma olduğunu tespit edilmiştir [107]. Bu çalışma ile literatür çalışmaları arasında paralel sonuçlar gözlemlenmiştir. Yapılan deneylerde martenzit yapı oluşumu ve karbür çökelmesi ile mekanik özelliklerin iyileştiği belirtilmiştir.

6.5 AŞINMA PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Kriyojenik işlem çalışmaları genellikle takım çeliklerinde aşınma, yorulma ve

malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirme amacıyla yapılmıştır. Bu çalışmada kriyojenik işlem sonucu X40CrMoV5 1 takım çeliğinin aşınma performansı incelenmiştir. Aşınma etkileri Aşınma deneyinde 10 mm çapında 10 mm yüksekliğindeki disk numuneler kullanılmıştır. Aşınma performansının incelenmesi için deneyde dört farklı numuneye aşınma testi yapılmıştır. Her numuneden üç adet test yapılmış ve ortalama değerleri alınmıştır.

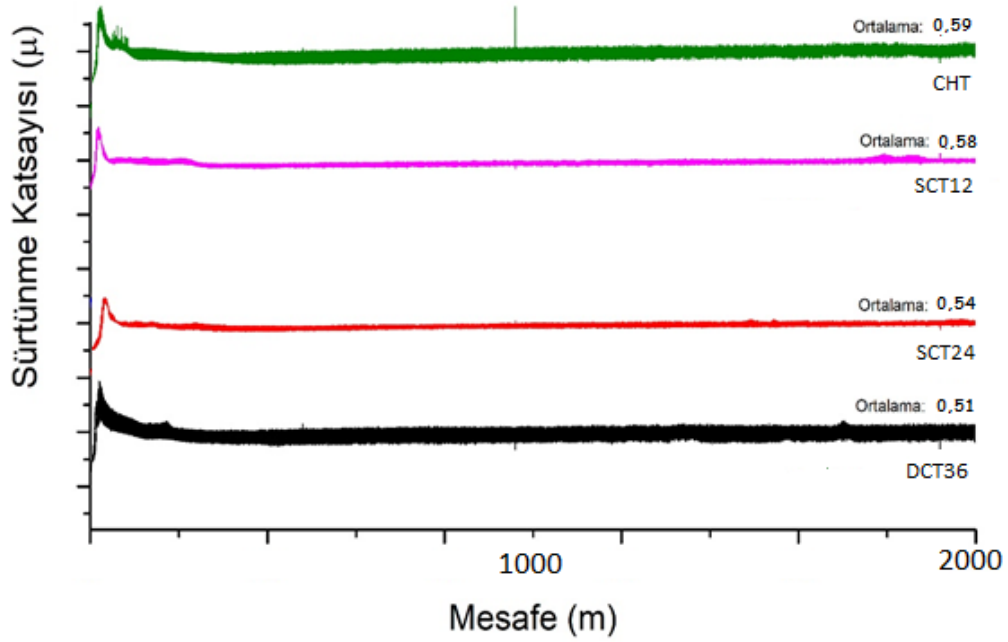
Aşınma oranı 2000 metre mesafe sonrası hesaplanarak her bir numuneye ait aşınma değeri Şekil 6.17 'de gösterilmiştir. Kriyojenik işlemden sonra malzemelerin sertlik oranlarının artması ile aşınma oranının azaldığı görülmektedir. Aşınma oranı kriyojenik işlem uygulanan numunede sığ kriyojenik işlemden derin kriyojenik işleme doğru azalmaktadır. Das vd. 2009, AISI D2 çeliği üzerinde uyguladığı derin kriyojenik işlem sonucu aşınma dirençlerinde artış tespit etmişlerdir. En iyi sonuç olarak 36 saat bekleme süresinde uygulanan kriyojenik işlem ile elde etmişlerdir [108].



Şekil 6.17 Aşınma oranları.

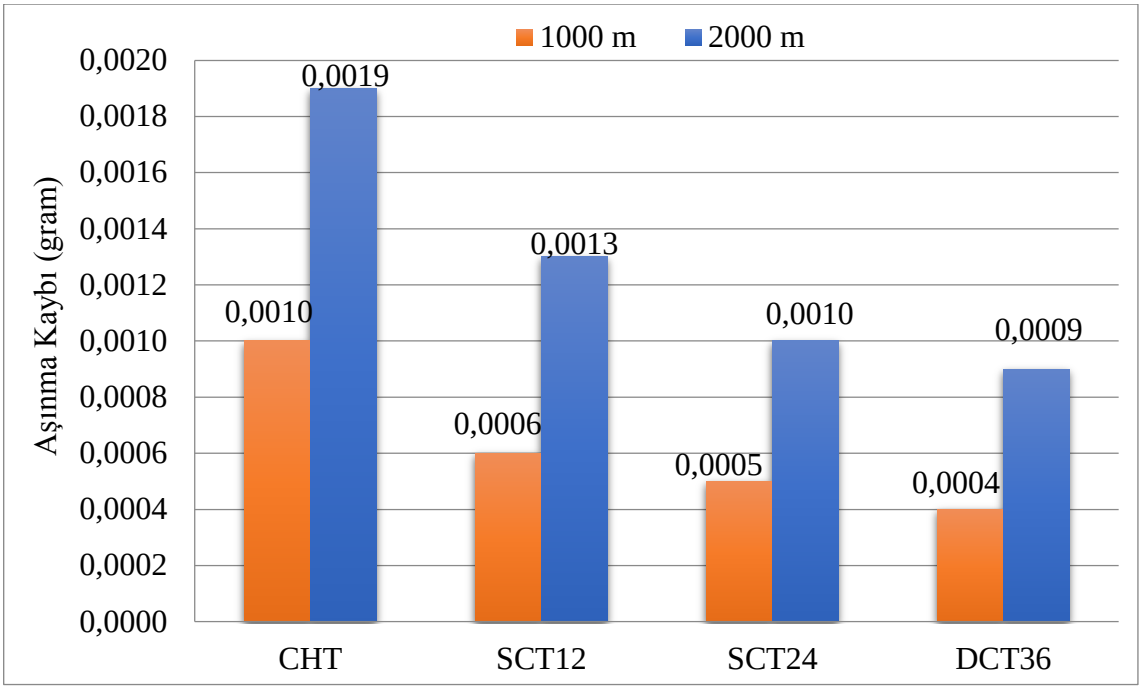
Aşınmayı deneyi sonucu elde edilen grafik ile aşınma katsayısı belirlenmiştir. Numunelerin sürtünme katsayıları küçükten büyüğe sırasıyla DCT-36, SCT-24, SCT-12 ve CHT için 0,51, 0,54, 0,58 ve 0,59 olarak belirlenmiştir. Bu değerler arasında en yüksek sürtünme katsayısı CHT numunesinde olduğu görülmektedir. Sürtünme kat sayısı sertlik değerleri ile paralel doğrultuda olduğu görülmektedir. Aşınma oranında

sırasıyla SCT-12, SCT-24 ve DCT-36 numunelerinde %1,34, %9,31 ve %13 oranında iyileşme sağladığı tespit edilmiştir. Aşınma oranı ve sertlik arasındaki ilişki literatürde yapılan çalışmalar ile benzerlik göstermektedir [81]. Şekil 6.18 'de 20N yük ile yapılan aşınma deneyi sonucu küçükten büyüğe doğru sırası ile DCT-36, SCT-24, SCT-12 ve CHT numunelerinin ortalama sürtünme katsayıları grafik ile belirtilmiştir.



Şekil 6.18 20N için sürtünme katsayıları.

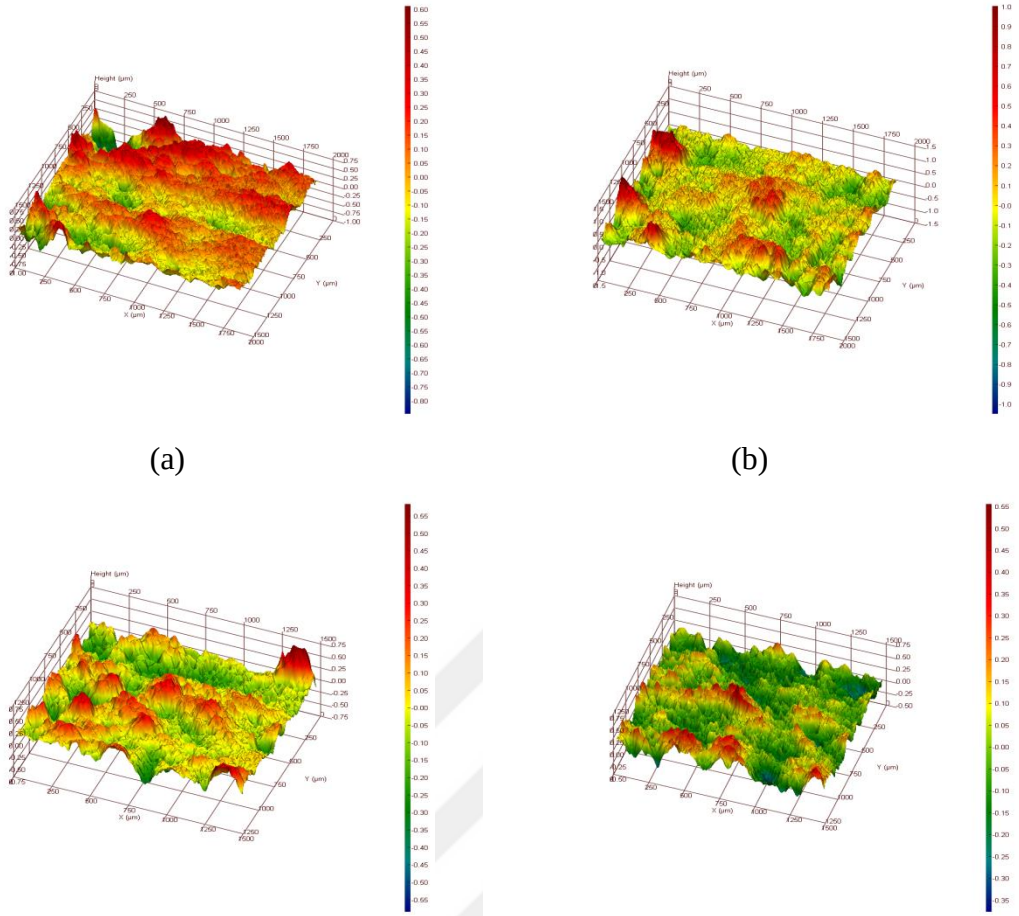
Aşınma kayıplarına göre kriyojenik işlem uygulanan numunedeki dirence bağlı olarak aşınma hacim kaybının daha az olduğu görülmektedir. Buna bağlı olarak aşınma kaybı en yüksek olan numuneler sırasıyla CHT, SCT-12, SCT-24 ve DCT-36 olarak tespit edilmiştir. Aşınma kaybı DCT-36 numunesinde geleneksel ısıl işlem uygulanan numuneye göre 2000 m mesafede %0,02 oranında iyileşme sağlamıştır. Frey, P/M çelikleri ve matkaplarına kriyojenik işlem uygulayarak yaptığı çalışmada, -196°C de derin kriyojenik işlem sonrası sertlik değerlerinde 1,5HRc ile 4,5HRc artış olduğunu tespit etmiştir. Aşınma testinden sonra ağırlık kayıplarının ortalama değerinde ise %17 ve %36 iyileştiğini belirtmiştir [31]. Bu durum kriyojenik işlem sonrası oluşan martenzit yapının aşınma direncine karşı iyileştirme sağlaması ile ilişkilendirilmiştir. Şekil 6.19 'de aşınma testi sonrası 1000 ve 2000 metre sonrası malzemelerin ağırlık kayıpları verilmiştir.



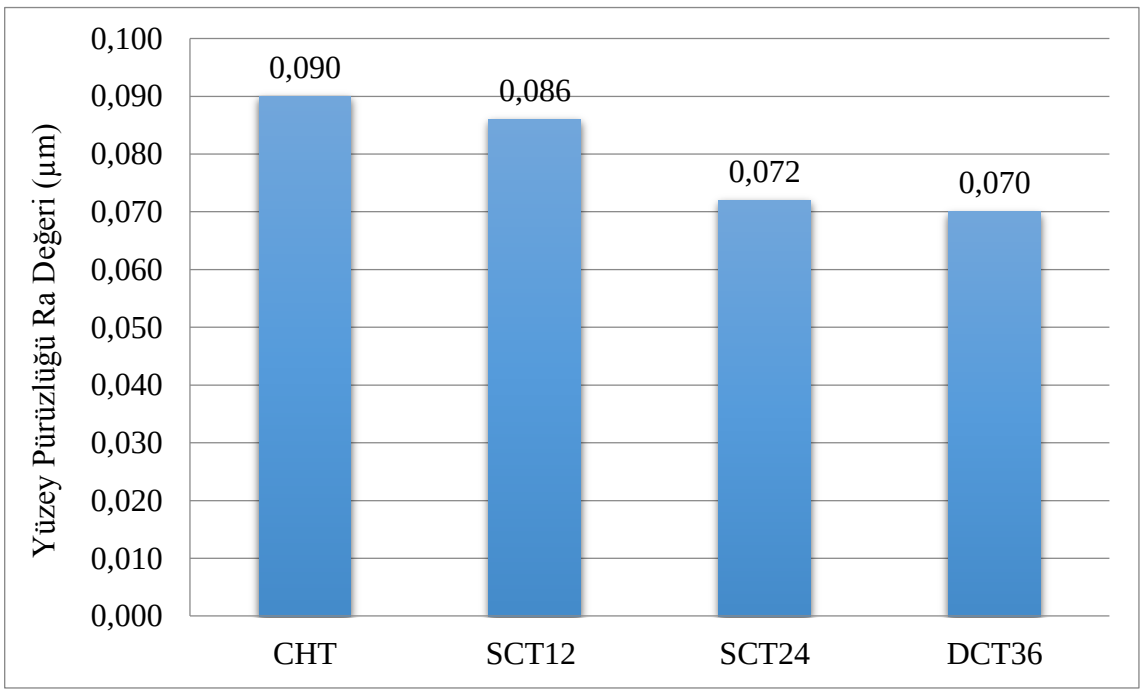
Şekil 6.19 Sürtünme sonrası oluşan aşınma kayıpları.

Yüzey profilleri farklı doğrultularda ölçülüp aşınma alanları hesaplanmıştır. CHT, SCT-12, SCT-24 ve DCT-36 numunelerine ait 20N yük ile aşınma testi uygulanan numunelerin yüzey aşınma alanlarına ait üç boyutlu görüntüler çekilmiştir. Aşınma alanı en yüksek değer CHT numunesinde hesaplanmıştır. Şekil 6.20 'de CHT ve SCT-12, SCT-24 ve DCT-36 numunelerine ait aşınma alanları üç boyutlu tarama cihazı görüntüleri verilmiştir.

Aşınma alanlarına bakıldığında en yüksek değerin CHT numunesine ait olduğu görülmektedir. Yapılan test sonucu aşınma sonucu elde edilen yüzey değerleri (Ra) ölçülmüş ve en yüksek yüzey Ra değeri CHT numunesinde elde edilmiştir. Ra değerleri sırası ile DCT-36, SCT-24, SCT-12 ve CHT numunelerinde 0,07, 0,072, 0,086, 0,090 olarak ölçülmüştür. Kriyojenik işlem uygulaması ile yüzey kalitesinde iyileşme sağlandığı belirlenmiştir. Şekil 6.21 'da yüzey kalitesine ait Ra değerleri gösterilmiştir.



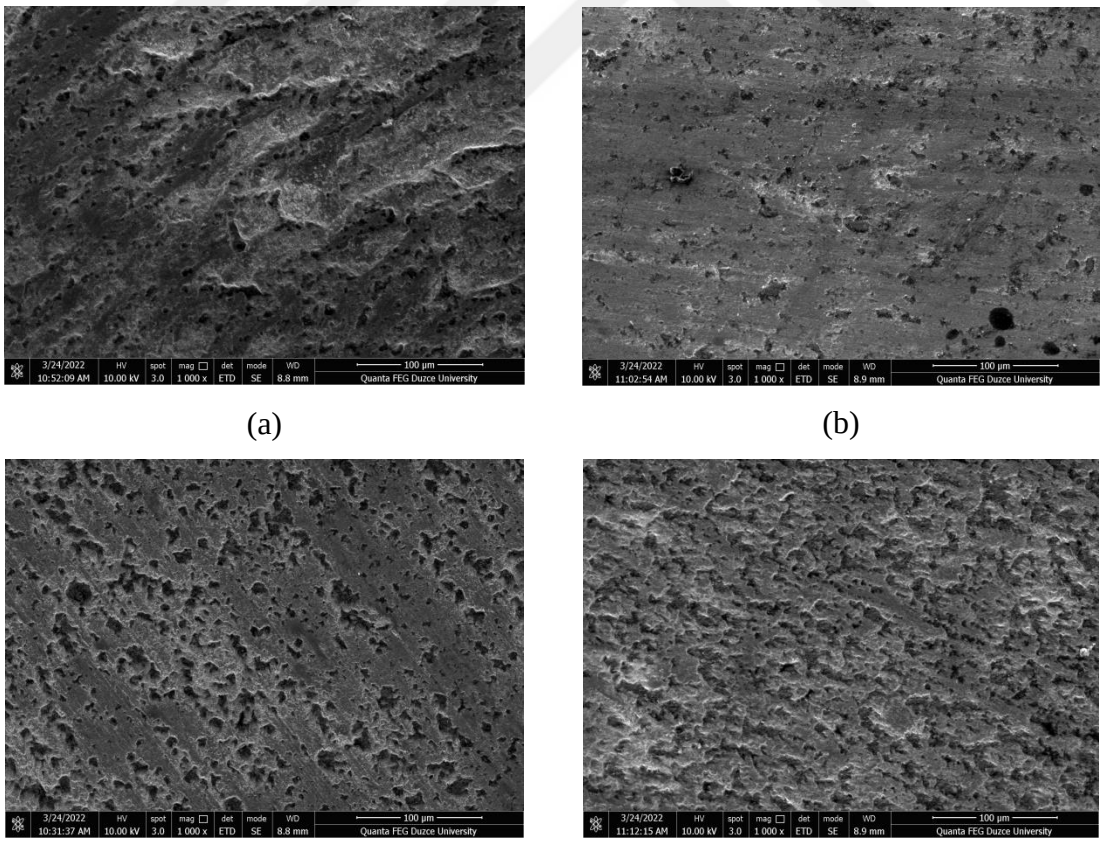
Şekil 6.20 Aşınma alanı 3D görüntüsü a) CHT b) SCT-12 c) SCT-24 d) DCT-36.



Şekil 6.21 Aşınan yüzey pürüzlülük değeri (Ra).

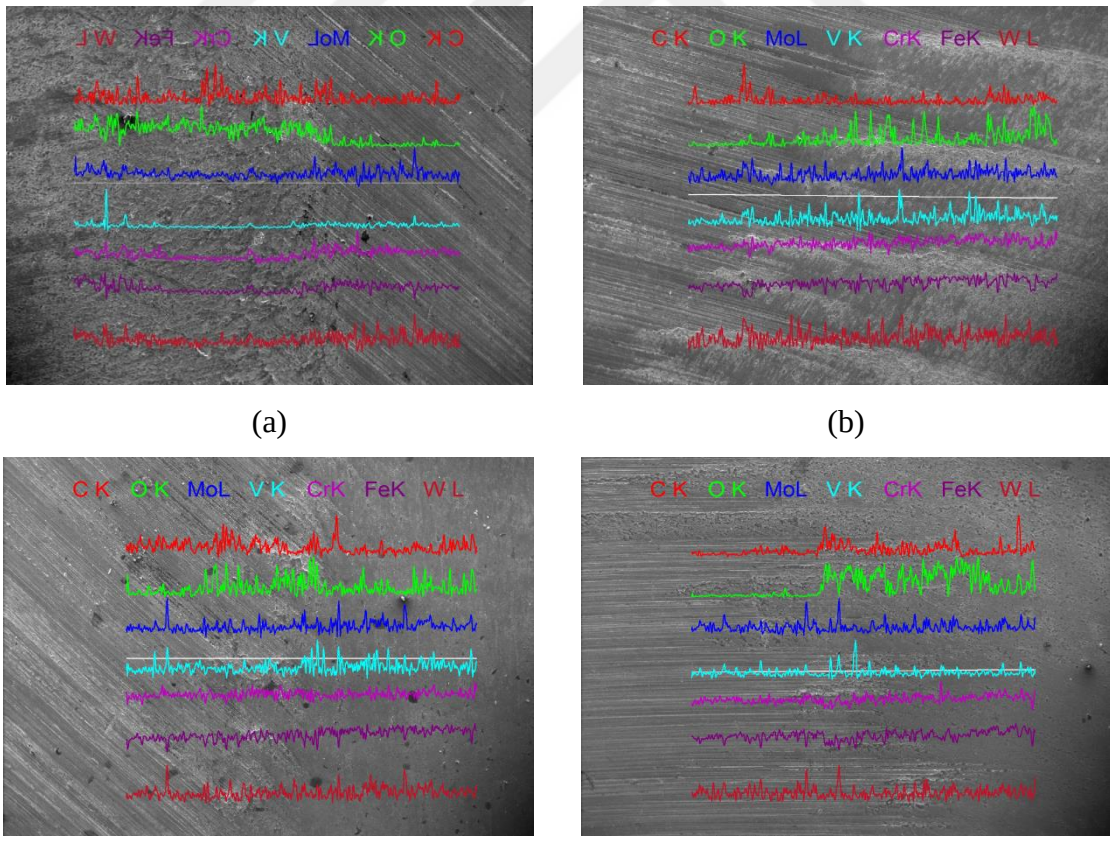
Aşınma deneyinden elde edilen sonuçlara bakıldığında aşınma yüzey alanı ve Ra değerleri için kriyojenik işlemden sonra değişim olduğu görülmektedir. Aşınma alanın azalması sertlik ile doğru oranda olduğu görülmektedir. Bu durum oluşan martenzit yapının malzeme sertliğine etkisi olduğunu açıklamaktadır.

Şekil 6.22 'da numunelere ait aşınma yüzeylerindeki deformasyon görülmektedir. Malzemeler birbirlerine sürtmesi sonucu yüzeylerde aşınma gerçekleşir. Malzemelerin sertliği ve sünek yapısına bağlı olarak deformasyon artar ya da azalır. Resimde görülen numunelerin deformasyon oranları CHT numunesine göre sırası ile SCT-12, SCT-24 ve DCT-36 olarak iyileştiği görülmektedir. DCT-36 numunesinde daha homojen bir yüzey görülmektedir. Yüzey kalitesinde elde edilen görüntülere bakıldığında yüzeydeki parçacıklar arasında dağınık bir yapıya sahip olan CHT numunesinin Ra değerinin yüksek çıktığı görülmektedir.



Şekil 6.22 Aşınan yüzeylerin SEM görüntüsü a) CHT b) SCT-12 c) SCT-24 d) DCT-36.

Kriyojenik işlem uygulanan numunelerde sertliğe bağlı olarak aşınma kayıplarının azaldığı görülmektedir. Bu durum aşınma yüzeylerinin SEM görüntülerinde oluşan deformasyon ile benzer sonuçlar göstermektedir. SEM görüntüsünde daha yumuşak yapıya sahip olan CHT numunesindeki deformasyonun daha fazla olduğu görülmektedir. Aşınma sonrası CHT numunesinin yüzeyde çapak sıvaması olduğu ve bu malzemenin diğer numunelere göre daha yumuşak bir yapıda olduğu göstermektedir. Aynı şekilde DCT-36 numunesinde oluşan homojen görüntün mikroyapıdaki karbür dağılımının homojen olmasına bağlanmıştır. Element dağılım analizi sonucunda oluşan karbürler mikroyapıdaki diğer elementlerin azalmasına yol açmaktadır. Kriyojenik işlem ile birlikte artan karbür miktarı yapılan element dağılım analiz sonuçlarında görüldüğü gibi diğer elementlerin azalması yönünde değişim göstermesine sebep olmuştur.



(a) (b)

(c) (d)

Şekil 6.23 Aşınma yüzeyindeki element dağılım analizi.

Şekil 6.23 'de aşınma deneyinden sonra yüzeyinde oluşan element çizgilerine ait görüntüleri verilmiştir. Aşınma deneyinde sürtünme ile birlikte yüzeyde bulunan elementler değişme yer değiştirmekte ya da kopmaktadır. Bu sebep ile aşınma olmayan yüzey ile aşınan yüzey arasındaki element çizgisine bakılmıştır. Yapılan analiz sonucu normal yüzeylerden aşınmış yüzeye geçiş sırasında C, O, Mo ve V elementlerine ait çizginin yükseldiği görülmektedir. CHT ve SCT-12 numunelerine ait analiz sonucunda C ve O miktarları düşük oranda yükselme gösterse de SCT-24 ve DCT-36 numunelerinde önemli artışlar görülmektedir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, sığ ve derin kriyojenik işlem uygulanan X40CrMoV5 1 sıcak iş takım çeliğinin aşınma ve darbe performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bunların yanı sıra sığ kriyojenik işlemde farklı bekleme süresinde (12 ve 24 saat) ve derin kriyojenik işlem (36 saat -180°C) uygulamaları ile mekanik özellikler ve mikroyapıdaki etkiler araştırılmıştır. Deneysel sonuçlara dayanarak aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır.

- Uygulanan sığ ve derin kriyojenik işlem sonrası malzemelerin mekanik özelliklerinde iyileşmeler olduğu görülmüştür. En iyi iyileşme sonuçları DCT-36 numunesinde elde edilmiştir. Mikro ve makro sertlik değerlerine göre bakıldığında DCT-36 numunesi CHT ve SCT 'ye göre yüksek değerde gelmiştir. SCT-12 ve SCT-24 numuneleri ise geleneksel ısıl işlem numunesine göre sertlik değerinde artış olduğu tespit edilmiştir. Sertlik değerinin kriyojenik işlem ile artması sert faz olan martenzit yapının oluşumu ile ilişkili olduğu belirtilmiştir. Darbe performansı, maksimum çekme dayanımı ve akma dayanımından elde edilen sonuçlar sertlik ile paralel sonuçlar göstermiştir. Sertlik değeri en yüksek gelen numune DCT-36 numunesinde elde edilmiştir.

- Darbe deneyi kriyojenik işlemden sonra farklı bekletme süresindeki (12 ve 24 saat) sığ kriyojenik işlemde iyileştiği görülmüştür. Bu durum derin kriyojenik işlem sonrasında daha da artarak %2,37 oranında iyileşme sağladı. Darbe dayanımı en yüksek değer DCT-36 numunesinde elde edildi. Darbe dayanımı mikroyapıdaki tanecik yapısına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Mikroyapıdaki karbürlerin etrafında oluşan çatlaklar darbe enerjisini olumsuz etkilemektedir. Ayrıca östenit yapının martenzit yapıya dönüşümü esnasında kalan kırılgan yapıya sahip kalıntı östenitde darbe enerjisini olumsuz etkilemektedir. Bu durum, kalıntı östenit oluşumu farklı bekleme süresine göre değişkenlik göstermesi ile açıklanmıştır.

- Kriyojenik işlem sonrası malzeme mekanik özelliklerinin incelenmesi için uygulanan çekme deneyi sonucu iyileşmeler olduğu görülmüştür. CHT numunesinin maksimum çekme kuvveti ve akma dayanımı kriyojenik işlem gören numunelere göre daha düşük olduğu sonucuna varıldı. Kriyojenik işlem

sonrası SCT-12, SCT-24 ve DCT-36 numunelerinin çekme kuvveti artış gösterdi. En yüksek akma dayanımı %24,73 oranında artış gösteren DCT-36 numunesinde olduğu görülmüştür. Çekme deneyinde maksimum çekme kuvvetindeki değerlere göre uzama miktarları ters oranda etki gösterdi. Uzama değeri en yüksek olan numune CHT numunesi olarak belirlenmiştir. Bu durum kriyojenik işlem uygulanmayan numunenin daha sünek ve gevrek yapıda olması ile ilişkilendirildi.

- Aşınma deneyinde, aşınma direnci kriyojenik işlem gören numunelerde arttığı tespit edilmiştir. Sığ kriyojenik işlem uygulanan numuneler geleneksel ısıl işlem uygulanan numuneye göre sırasıyla %1,34 ve %9,31 oranında iyileşme görülmüştür. DCT-36 numunesinde ise %13 oranında en yüksek iyileşmeyi sağlamıştır. Aşınma hızları en düşükten yükseğe göre sırasıysa DCT-36, SCT-24, SCT-12 ve CHT olarak belirlenmiştir. Aşınma direnci ile sertlik değeri kriyojenik işlemden sonra paralel sonuç sergilemiştir.

- Aşındırıcı parçacıkların malzeme yüzeyleri üzerindeki kayma ve yuvarlanma hareketleri ile mikro kesme ve çukurlaşma mekanizmaları ortaya çıkarılmıştır.

- Aşınma direncinin iyileştirilmesi, kriyojenik işlemler sırasında martensitik dönüşümüne, ayrıca martensit matrisinin mukavemeti ve sertliğine ve tüm mikroyapı içinde dağılmış büyük ve ince karbürlerin çökelmesine bağlandı.

- Mikroyapı analizlerinde kriyojenik işlem gören numunelerin CHT numunesine göre daha iyi sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Martenzit oluşum mikroyapı da görülmüştür. Kriyojenik işlem sonrası Cr bakımında zengin M_7C_3 karbürlerine nispeten V ve W elementleri bakımından zengin M_2C ve MC karbürler varlık göstermiştir. İkincil karbür çökelmeleri ile homojen bir yapıya sahip DCT-36 numunesi en iyi mikroyapı özelliklerini gösteren numune olarak tespit edilmiştir.

Sonuç olarak yapılan çalışmada, farklı bekleme süresindeki sığ kriyojenik işlem ve derin kriyojenik işlemin X40CrMoV5 1 sıcak iş takım çeliğinin mekanik özelliklerinde ve mikroyapısında iyileşmeler olduğunu göstermiştir.

8. KAYNAKLAR

[1] "Takım çelikleri." https://www.saglammetal.com/ (Erişim: 20 Haziran 2022).

[2] V. Jagota and R. K. Sharma, "Interpreting H13 steel wear behavior for austenitizing temperature, tempering time and temperature," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, c. 40, sayı 4, 2018.

[3] I. Mutlu, E. Oktay, and S. Ekinci, "Characterization of microstructure of H13 tool steel using ultrasonic measurements," *Russian Journal of Nondestructive Testing*, c. 49, sayı 2, 2013.

[4] H. Demir, S. Gündüz, and M. A. Erden, "Influence of the heat treatment on the microstructure and machinability of AISI H13 hot work tool steel," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, c. 95, sayı 5–8, 2018.

[5] Q. Xu, L. Chen, M. Sun, G. Wang, and Y. Liu, "A comparative study of corrosion property, tribological behavior and cutting performance of tool materials for the cutting of marine high-strength steels in the marine environment," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, c. 235, sayı 1–2, 2021.

[6] H. Chandler, *Heat Treater's Guide - Practices and Procedures for Irons and Steels (2nd Edition)*. 1995.

[7] A. Medvedeva, J. Bergström, S. Gunnarsson, and J. Andersson, "High-temperature properties and microstructural stability of hot-work tool steels," *Materials Science and Engineering A*, c. 523, sayı 1–2, 2009.

[8] I. Najbolj *et al.*, "Thermo-Mechanical Fatigue of Hot Work Tool Steels," *6th International Tooling Conference*, c. 3, sayı 2, 2013.

[9] S. Katoch, R. Sehgal, and V. Singh, "Wear behavior of differently cryogenically treated AISI H13 steel against cold work steel," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, c. 233, sayı 2, 2019.

[10] A. Shokrani, V. Dhokia, P. Muñoz-Escalona, and S. T. Newman, "State-of-the-art cryogenic machining and processing," *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, c. 26, sayı 7, 2013.

[11] D. Palanisamy and P. Senthil, "A comparative study on machinability of cryo-treated and peak aged 15Cr-5Ni precipitation hardened stainless steel," *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, c. 116, 2018.

[12] F. J. da Silva, S. D. Franco, Á. R. Machado, E. O. Ezugwu, and A. M. Souza, "Performance of cryogenically treated HSS tools," *Wear*, c. 261, sayı 5–6, 2006.

[13] S. Kumar, N. K. Khedkar, B. Jagtap, and T. P. Singh, "The Effects of Cryogenic Treatment on Cutting Tools," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, c. 225, 2017.

[14] N. B. Dhokey, J. v. Dandawate, and R. Rawat, “Effect of Cryosoaking Time on Transition in Wear Mechanism of M2 Tool Steel,” *ISRN Tribology*, c. 2013, 2013.

[15] A. Akhbarizadeh, A. Shafyei, and M. A. Golozar, “Effects of cryogenic treatment on wear behavior of D6 tool steel,” *Materials and Design*, c. 30, sayı 8, 2009.

[16] N. B. Dhokey, A. R. Hake, V. T. Thavale, R. Gite, and R. Batheja, “Microstructure and Mechanical Properties of Cryotreated SAE8620 and D3 Steels,” *Current Advances in Materials Sciences Research (CAMSR) Microstructure*, c. 1, sayı 1, 2014.

[17] S. B. Chaudhari, S. P. Shekhawat, and A. S. Kushwaha, “Advanced Technology of Cryoprocessing for the Enhancement of Tool Material Machining Characteristics: A Review,” *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, c. 2, sayı 4, 2012.

[18] M. Koneshlou, K. Meshinchi Asl, and F. Khomamizadeh, “Effect of cryogenic treatment on microstructure, mechanical and wear behaviors of AISI H13 hot work tool steel,” *Cryogenics (Guildf)*, c. 51, sayı 1, 2011.

[19] P. Baldissera and C. Delprete, “Deep Cryogenic Treatment: A Bibliographic Review,” *The Open Mechanical Engineering Journal*, c. 2, sayı 1, 2008.

[20] D. Das, A. K. Dutta, and K. K. Ray, “Sub-zero treatments of AISI D2 steel: Part I. Microstructure and hardness,” *Materials Science and Engineering A*, c. 527, sayı 9, 2010.

[21] A. Ciski, T. Babul, and J. Jeleńkowski, “Deep cryogenic treatment and its influence on structure, mechanical properties and in-service life of high speed steel,” 2015.

[22] M. Pérez, C. Rodríguez, and F. J. Belzunce, “The Use of Cryogenic Thermal Treatments to Increase the Fracture Toughness of a Hot Work Tool Steel Used to Make Forging Dies,” *Procedia Materials Science*, c. 3, 2014.

[23] A. Çiçek, F. Kara, T. Kivak, and E. Ekici, “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*, c. 41, 2013.

[24] D. J. Walker and R. W. K. Honeycombe, “Effects of deformation on decomposition of austenite: Part II - Carbide precipitation,” *Metal Science*, c. 14, sayı 5, 1980.

[25] L. Xu, Z. Li, and S. Wei, “VC precipitation and retained austenite transformation of high-vanadium high-speed steel during tempering,” *Jinshu Rechuli/Heat Treatment of Metals*, c. 41, sayı 5, 2016.

[26] V. A. Kuz’menko and S. v. Grishakov, “Influence of high loading frequency on the endurance of several structural alloys at low (-196°C) and room temperatures,” *Strength of Materials*, c. 6, sayı 10, 1974.

[27] F. N. Tavadze, G. A. Stepanov, L. K. Lokhankina, and G. N. Grikurov, “Effect of heat treatment on properties of steel 03Kh13AG19 at cryogenic temperatures,” *Metal Science and Heat Treatment*, c. 17, sayı 2, 1975.

[28] N. A. Ivanov, A. G. Galov, and A. G. Vasil'eva, "Properties of stainless steel after rapid low-temperature deformation," *Metal Science and Heat Treatment*, c. 21, sayı 7, 1979.

[29] J. R. Strife and D. E. Passoja, "The effect of heat treatment on microstructure and cryogenic fracture properties in 5Ni and 9Ni steel," *Metallurgical Transactions A*, c. 11, sayı 8, 1980.

[30] R. F. Barron and C. R. Mulhern, "Cryogenic Treatment of AISI-T8 and C1045 Steels," in *Advances in Cryogenic Engineering Materials*, 1980.

[31] R. Frey, "Cryogenıc treatment ımproves properties of drılls and p/m parts.," *Industrial Heating*, c. 50, sayı 9, 1983.

[32] Anon, "New dry refrıgerant treatments ımprove characterıstıcs and wear resıstance of metal parts.," *Industrial Heating*, c. 53, sayı 3, 1986.

[33] K. Moore and D. N. Collins, "Cryogenic Treatment of Three Heat-Treated Tool Steels," *Key Engineering Materials*, c. 86–87, 1993.

[34] D. N. Collins and J. Dormer, "Deep cryogenic treatment of a D2 cold-work tool steel," *Heat Treatment of Metals*, c. 24, sayı 3, 1997.

[35] J. Y. Huang, Y. T. Zhu, X. Z. Liao, I. J. Beyerlein, M. A. Bourke, and T. E. Mitchell, "Microstructure of cryogenic treated M2 tool steel," *Materials Science and Engineering A*, c. 339, sayı 1–2, 2003.

[36] T. Babul, A. Nakonieczny, and A. Ciski, "Effect of cold treatment or deep cryogenic treatment on selected properties of case-carburized 18CrNiMo7-6 Steel," in *65th ABM International Congress, 18th IFHTSE Congress and 1st TMS/ABM International Materials Congress 2010*, 2010, c. 5.

[37] P. S. Babu, P. Rajendran, and K. N. Rao, "Cryogenic treatment of M1, EN19 and H13 tool steels to improve wear resistance," *Journal of the Institution of Engineers (India), Part MM: Metallurgy and Material Science Division*, c. 86, sayı Ekim, 2005.

[38] S. Zhirafar, A. Rezaeian, and M. Pugh, "Effect of cryogenic treatment on the mechanical properties of 4340 steel," *Journal of Materials Processing Technology*, c. 186, sayı 1–3, 2007.

[39] A. Bensely, S. Venkatesh, D. Mohan Lal, G. Nagarajan, A. Rajadurai, and K. Junik, "Effect of cryogenic treatment on distribution of residual stress in case carburized En 353 steel," *Materials Science and Engineering A*, c. 479, sayı 1–2, 2008.

[40] N. B. Dhokey and S. Nirbhavne, "Dry sliding wear of cryotreated multiple tempered D-3 tool steel," *Journal of Materials Processing Technology*, c. 209, sayı 3, 2009.

[41] K. Amini, S. Nategh, and A. Shafyei, "Influence of different cryotreatments on tribological behavior of 80CrMo12 5 cold work tool steel," *Materials and Design*, c. 31, sayı 10, 2010.

[42] D. Senthilkumar, I. Rajendran, M. Pellizzari, and J. Siiriainen, "Influence of shallow and deep cryogenic treatment on the residual state of stress of 4140 steel," *Journal of*

Materials Processing Technology, c. 211, sayı 3, 2011.

[43] K. Amini, A. Akhbarizadeh, and S. Javadpour, "Investigating the effect of holding duration on the microstructure of 1.2080 tool steel during the deep cryogenic heat treatment," in *Vacuum*, 2012, c. 86, sayı 10.

[44] B. Podgornik, V. Leskovšek, and B. Arh, "The effect of heat treatment on the mechanical, tribological and load-carrying properties of PACVD-coated tool steel," *Surface and Coatings Technology*, c. 232, 2013.

[45] K. Amini, A. Akhbarizadeh, and S. Javadpour, "Investigating the effect of quench environment and deep cryogenic treatment on the wear behavior of AZ91," *Materials and Design*, c. 54, 2014.

[46] Fuat Kara, "AISI 52100 çeliğinin yorulma ömrü ve taşlanabilirliğine kriyojenik işlem parametrelerinin etkilerinin araştırılması," Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi, Karabük, Türkiye, 2014.

[47] A. Çiçek, F. Kara, T. Kıvak, E. Ekici, and İ. Uygur, "Effects of Deep Cryogenic Treatment on the Wear Resistance and Mechanical Properties of AISI H13 Hot-Work Tool Steel," *Journal of Materials Engineering and Performance*, c. 24, sayı 11, 2015.

[48] J. Li *et al.*, "Effects of cryogenic treatment on mechanical properties and micro-structures of IN718 super-alloy," *Materials Science and Engineering A*, c. 707, 2017.

[49] M. Araghchi, H. Mansouri, R. Vafaei, and Y. Guo, "A novel cryogenic treatment for reduction of residual stresses in 2024 aluminum alloy," *Materials Science and Engineering A*, c. 689, 2017.

[50] J. Zhu, Z. Zhang, and J. Xie, "Improving strength and ductility of H13 die steel by pre-tempering treatment and its mechanism," *Materials Science and Engineering A*, c. 752, 2019.

[51] S. Li, N. Min, L. Deng, X. Wu, Y. Min, and H. Wang, "Influence of deep cryogenic treatment on internal friction behavior in the process of tempering," *Materials Science and Engineering A*, c. 528, sayı 3, 2011.

[52] A. J. Sánchez Egea, V. Martynenko, A. Simoncelli, G. Serrancoli, and D. M. Krahmer, "Sliding abrasive wear when combining WEDM conditions and polishing treatment on H13 disks over 1045 carbon steel pins," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, c. 118, sayı 1–2, 2022.

[53] P. I. Patil and R. G. Tated, "Comparison of effects of cryogenic Treatment on different types of steels: A review," *IJCA Proceedings on International Conference in Computional Intelligence*, c. ICCIA, sayı 9, 2012.

[54] A. Çiçek, T. KIvak, I. Uygur, E. Ekici, and Y. Turgut, "Performance of cryogenically treated M35 HSS drills in drilling of austenitic stainless steels," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, c. 60, sayı 1–4, 2012.

[55] P. Baldissera and C. Delprete, "Effects of deep cryogenic treatment on static mechanical properties of 18NiCrMo5 carburized steel," *Materials and Design*, c. 30, sayı 5, 2009.

[56] A. Bensely *et al.*, "Fatigue behaviour and fracture mechanism of cryogenically treated En 353 steel," *Materials and Design*, c. 30, sayı 8, 2009.

[57] E. Kerscher and K. H. Lang, "Increasing the fatigue limit of a high-strength bearing steel by a deep cryogenic treatment," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2010, c. 240.

[58] A. Akhbarizadeh and S. Javadpour, "Investigating the effect of as-quenched vacancies in the final microstructure of 1.2080 tool steel during the deep cryogenic heat treatment," *Materials Letters*, c. 93, 2013.

[59] K. Amini, A. Akhbarizadeh, and S. Javadpour, "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*, c. 45, 2013.

[60] R. Thornton, T. Slatter, A. H. Jones, and R. Lewis, "The effects of cryogenic processing on the wear resistance of grey cast iron brake discs," *Wear*, c. 271, sayı 9–10, 2011.

[61] D. Mohan Lal, S. Renganarayanan, and A. Kalanidhi, "Cryogenic treatment to augment wear resistance of tool and die steels," *Cryogenics (Guildf)*, c. 41, sayı 3, 2001.

[62] M. Preciado, P. M. Bravo, and J. M. Alegre, "Effect of low temperature tempering prior cryogenic treatment on carburized steels," *Journal of Materials Processing Technology*, c. 176, sayı 1–3, 2006.

[63] Z. Zurecki, "Cryogenic quenching of steel revisited," in *ASM Proceedings: Heat Treating*, 2006, c. 2006.

[64] Mustafa Uzun, "Kriyojenik işlem görmüş soğuk iş takım çeliğinin aşınma davranışının incelenmesi," Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2014.

[65] S. Kalia, "Cryogenic processing: A study of materials at low temperatures," *Journal of Low Temperature Physics*, c. 158, sayı 5–6, 2010.

[66] R. Sri Siva, M. Arockia Jaswin, and D. Mohan Lal, "Enhancing the Wear Resistance of 100Cr6 Bearing Steel Using Cryogenic Treatment," *Tribology Transactions*, c. 55, sayı 3, 2012.

[67] Y. Birol, "Analysis of wear of a gas nitrided H13 tool steel die in aluminium extrusion," *Engineering Failure Analysis*, c. 26, 2012.

[68] Turgay Kıvrak, "Kesici takımlara uygulanan kriyojenik işlemin Tİ-6AL-4V alaşımının delinebilirliği üzerindeki etkilerinin araştırılması," Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2012.

[69] H. Liu, J. Wang, H. Yang, and B. Shen, "Effects of cryogenic treatment on microstructure and abrasion resistance of CrMnB high-chromium cast iron subjected to sub-critical treatment," *Materials Science and Engineering A*, c. 478, sayı 1–2, 2008.

[70] M. M. Sundaram, Y. Yildiz, and K. P. Rajurkar, "Experimental study of the effect of cryogenic treatment on the performance of electro discharge machining," in *Proceedings of the ASME International Manufacturing Science and Engineering*

Conference 2009, MSEC2009, 2009, c. 2.

[71] R. Frey, "SECONDARY ADVANTAGES OF NITROGEN BASED ATMOSPHERE SINTERING.," in *Progress in Powder Metallurgy*, 1984, c. 39.

[72] R. Chillar and S. C. Agrawal, "Cryogenic treatment of metal parts," in *AIP Conference Proceedings*, 2006, c. 824 I.

[73] Y. Yıldız, "Soğuk ve kriyojenik işlemli bakır elektrot ve berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının elektro erozyon işleme performansına etkileri," Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2010.

[74] W. Reitz and J. Pendray, "Cryoprocessing of materials: A review of current status," *Materials and Manufacturing Processes*, c. 16, sayı 6, 2001.

[75] J. Zhu, G. T. Lin, Z. H. Zhang, and J. X. Xie, "The martensitic crystallography and strengthening mechanisms of ultra-high strength rare earth H13 steel," *Materials Science and Engineering A*, c. 797, 2020.

[76] S. P. da Silva, A. M. Abrão, P. G. Weidler, E. R. da Silva, and M. A. Câmara, "Investigation of nitride layers deposited on annealed AISI H13 steel by die-sinking electrical discharge machining," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, c. 109, sayı 7–8, 2020.

[77] P. Jurči, "Microstructural changes in high-alloyed tool steels by sub-zero treatments," *Materiali in Tehnologije*, c. 54, sayı 4, 2020.

[78] J. Parrish, "Retained austenite. New look at an old debate," *Advanced Materials and Processes*, c. 145, sayı 3, 1994.

[79] D. Das, A. K. Dutta, and K. K. Ray, "Structure-property correlation of cryotreated AISI D2 steel," in *Advanced Materials Research*, 2010, c. 117.

[80] Halime Nalbant, "Derin kriyojenik işlemin AISI 4140 çeliğinin aşınma davranışına etkisi," Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osman Gazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, 2018.

[81] D. Yun, L. Xiaoping, and X. Hongshen, "Deep Cryogenic Treatment of High-speed Steel and its Mechanism," *Heat Treatment of Metals*, c. 3, 1998.

[82] D. Das, A. K. Dutta, and K. K. Ray, "Correlation of microstructure with wear behaviour of deep cryogenically treated AISI D2 steel," *Wear*, c. 267, sayı 9–10, 2009.

[83] P. Baldissera and C. Delprete, "Deep cryogenic treatment of AISI 302 stainless steel: Part II - Fatigue and corrosion," *Materials and Design*, c. 31, sayı 10, 2010.

[84] C. L. Gogte, K. M. Iyer, R. K. Paretkar, and D. R. Peshwe, "Deep subzero processing of metals and alloys: Evolution of microstructure of AISI T42 tool steel," *Materials and Manufacturing Processes*, c. 24, sayı 7–8, 2009.

[85] A. Çiçek, T. Kıvak, Y. Turgut, İ. Uygur, and E. Ekici, "Derin kriyojenik işlemin kesme kuvvetleri, delik çapları ve takım ömrü üzerine etkileri," in *6th International Advanced*

Technologies Symposium (IATS'11), Elazığ, 2011, Sayı May.

[86] K. E. Lulay, K. Khan, and D. Chaaya, "The effect of cryogenic treatments on 7075 aluminum alloy," *Journal of Materials Engineering and Performance*, c. 11, sayı 5, 2002.

[87] P. Paulin, "Frozen gears," *Gear Technology*, c. 10, sayı 2, 1993.

[88] W. Zhisheng, S. Ping, L. Jinrui, and H. Shengsun, "Effect of deep cryogenic treatment on electrode life and microstructure for spot welding hot dip galvanized steel," *Materials and Design*, c. 24, sayı 8, 2003.

[89] D. R. Askeland, "The Science and Engineering of Materials," *European Journal of Engineering Education*, c. 19, sayı 3, 1994.

[90] I. Gunes, A. Cicek, K. Aslantas, and F. Kara, "Effect of deep cryogenic treatment on wear resistance of AISI 52100 bearing steel," *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2014.

[91] X. G. Yan and D. Y. Li, "Effects of the sub-zero treatment condition on microstructure, mechanical behavior and wear resistance of W9Mo3Cr4V high speed steel," *Wear*, c. 302, sayı 1–2, 2013.

[92] A. Molinari, M. Pellizzari, S. Gialanella, G. Straffelini, and K. H. Stiasny, "Effect of deep cryogenic treatment on the mechanical properties of tool steels," in *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, c. 118, sayı 1–3.

[93] D. Taştemür and S. Gündüz, "AISI H10 sıcak iş takım çeliğinin mekanik özelliklerine temperleme ve yaşlanma işlemlerinin etkisi," *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2021.

[94] R. A. Mesquita, *Tool steels: Properties and performance*. 2016.

[95] "Sıcak ve Soğuk İş Takım Çelikleri." https://www.celikmetal.com.tr (Erişim: 20 Haziran 2022).

[96] M. Bonek, L. A. Dobrzański, E. Hajduczek, and A. Klimpel, "Structure and properties of laser alloyed surface layers on the hot-work tool steel," *Journal of Materials Processing Technology*, c. 175, sayı 1–3, 2006.

[97] H. K. D. H. Bhadeshia, "Steels for bearings," *Progress in Materials Science*, c. 57, sayı 2. 2012.

[98] Y. Arslan and A. Özdemir, "AISI D3 soğuk iş takim çeliği zımbalarında sıfır altı kriyojenik işlemin aşınmaya etkisi," 2012.

[99] A. Kisasoz, S. Gurel, and A. Karaaslan, "Effect of annealing time and cooling rate on precipitation processes in a duplex corrosion-resistant steel," *Metal Science and Heat Treatment*, c. 57, sayı 9–10, 2016.

[100] J. Yi *et al.*, "Enhanced toughness and hardness at cryogenic temperatures of silicon carbide sintered by SPS," *Materials Science and Engineering A*, c. 569, 2013.

[101] J. Yi *et al.*, “Enhanced toughness and hardness at cryogenic temperatures of silicon carbide sintered by SPS,” *Materials Science and Engineering A*, c. 569, 2013.

[102] I. Calliari, M. Zanesco, and E. Ramous, “Influence of isothermal aging on secondary phases precipitation and toughness of a duplex stainless steel SAF 2205,” *Journal of Materials Science*, c. 41, sayı 22, 2006.

[103] J. Y. Li, Y. L. Chen, and J. H. Huo, “Mechanism of improvement on strength and toughness of H13 die steel by nitrogen,” *Materials Science and Engineering A*, c. 640, 2015.

[104] D. Das and K. K. Ray, “Structure-property correlation of sub-zero treated AISI D2 steel,” *Materials Science and Engineering A*, c. 541, 2012.

[105] L. M. Elias, S. G. Schneider, S. G. Schneider, H. M. Silva, and F. Malvisi, “Microstructural and mechanical characterization of biomedical Ti-Nb-Zr(-Ta) alloys,” *Materials Science and Engineering A*, c. 432, sayı 1–2, 2006.

[106] A. Bensely, D. Senthilkumar, D. Mohan Lal, G. Nagarajan, and A. Rajadurai, “Effect of cryogenic treatment on tensile behavior of case carburized steel-815M17,” *Materials Characterization*, c. 58, sayı 5, 2007.

[107] M. A. Jaswin and D. M. Lal, “Effect of cryogenic treatment on the tensile behaviour of En 52 and 21-4N valve steels at room and elevated temperatures,” *Materials and Design*, c. 32, sayı 4, 2011.

[108] D. Das, A. K. Dutta, and K. K. Ray, “Inconsistent wear behaviour of cryotreated tool steels: Role of mode and mechanism,” *Materials Science and Technology*, c. 25, sayı 10, 2009.

[109] W. F. Smith, *Structure and Properties of Engineering Alloys*. 1993.

[110] S. S. Gill, J. Singh, R. Singh, and H. Singh, “Metallurgical principles of cryogenically treated tool steels - A review on the current state of science,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, c. 54, sayı 1–4, 2011.

[111] J. Zhang *et al.*, “The effect of laser energy density on the microstructure, residual stress and phase composition of H13 steel treated by laser surface melting,” *Journal of Alloys and Compounds*, c. 856, 2021.

[112] M. M. Serna, E. R. B. Jesus, E. Galego, L. G. Martinez, H. P. S. Corrêa, and J. L. Rossi, “An Overview of the Microstructures Present in High-Speed Steel -Carbides Crystallography,” *Materials Science Forum*, c. 530–531, 2006.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :Cengizhan YAMİÇ

Yabancı Dili :İngilizce

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Makine Mühendisliği	Marmara Üniversitesi	2017
Lise	Makine (CNC)	Düzce Anadolu Teknik Lisesi	2012

YAYINLAR

C. Yamiç, F. Kara, "Sığ kriyojenik işlem uygulanan X40 CRMOV5 1 takım çeliğinin çekme, darbe ve sertlik değerlerine etkisinin incelenmesi," Uluslararası Marmara Fen Bilimleri Kongresi, Imascon Güz, 2021.