



T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü



KRİYOJENİK İŞLEM KOŞULLARININ VANADYUMLU ÇELİKLERİN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİNİN DENEYSEL ARAŞTIRILMASI

Doktora Tezi

Dilşad AKGÜMÜŞ GÖK

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İzmir
2019

T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

**KRİYOJENİK İŞLEM KOŞULLARININ
VANADYUMLU ÇELİKLERİN MİKROYAPI VE
MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİNİN
DENEYSEL ARAŞTIRILMASI**

Dilşad AKGÜMÜŞ GÖK

Danışman: Prof. Dr. Rasim İPEK

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Konstrüksiyon ve İmalat Doktora Programı

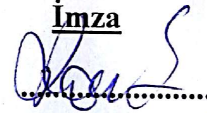
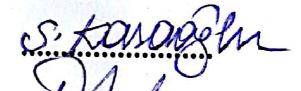
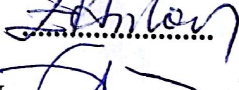
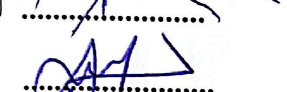
İzmir
2019

DİLŞAD AKGÜMÜŞ GÖK tarafından doktora tezi olarak sunulan “**Kriyojenik İşlem Koşullarının Vanadyumlu Çeliklerin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerine Etkilerinin Deneysel Araştırılması**” başlıklı bu çalışma EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi’nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve **02/12/2019** tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

Jüri Başkanı : Prof. Dr. Rasim İPEK
Raportör Üye : Dr. Öğr. Üyesi Serdar KARAOĞLU
Üye : Prof. Dr. Ersin ARSLAN
Üye : Prof. Dr. İbrahim Etem SAKLAKOĞLU
Üye : Doç. Dr. Fatih KAHRAMAN

İmza

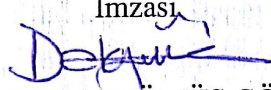



EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI**

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Doktora Tezi olarak sunduğum **“Kriyojenik İşlem Koşullarının Vanadyumlu Çeliklerin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerine Etkilerinin Deneysel Araştırılması”** başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

02 / 12 / 2019

İmzası


Dilşad AKGÜMÜŞ GÖK



ÖZET**KRİYOJENİK İŞLEM KOŞULLARININ VANADYUMLU
ÇELİKLERİN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE
ETKİLERİNİN DENEYSEL ARAŞTIRILMASI**

AKGÜMÜŞ GÖK, Dilşad

Doktora Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Rasim İPEK

Aralık 2019, 93 sayfa

Bu tez kapsamında değişik yüzdeliklere sahip olan vanadyum alaşımlı soğuk iş takım çeliklerinin farklı kriyojenik işlem sıcaklıklarında ve süre parametrelerinde bekletilmesi ile malzemelerin metalurjik yapısında ve mekanik özelliklerinde meydana gelen değişiklikler incelenmiştir.

Tez çalışmasında öncelikli olarak yeni nesil vanadyum içerikli soğuk iş takım çelikleri temin edilmiş ve yapılacak deney boyutlarına uygun olarak işlenmiştir. Kriyojenik işlem öncesinde uygulanacak olan ısıtma işlemleri ve parametreleri belirlenmiştir. Kriyojenik işlem uygulaması tamamlanan numunelerin mekanik özelliklerini incelemek amacı ile her numunelere sertlik ve basma deneyleri uygulanmıştır. Çeliklerin mikroyapılarında meydana gelen değişimler ve oluşan elementlerin incelenmesi için SEM-EDS analizleri yapılmıştır. Sonrasında malzemelerin yapısında meydana gelen faz dönüşümlerinin belirlenmesi amacıyla XRD ve Rietveld analizleri kullanılmıştır.

Sonuç olarak malzemelerde bulunan vanadyum alaşım elementinin ve malzemelere uygulanan kriyojenik işlemin malzemelerin mekanik özelliklerinde artış sağladığı gözlenmiştir. Kriyojenik işlem sonucunda malzemelerde yeni karbürlerin oluştuğu ve kalıntı austenit miktarının azalarak martenzit yapılarına dönüştüğü belirlenmiştir.

Anahtar sözcükler: Vanadyum içerikli çelikler, soğuk iş takım çelikleri, kriyojenik işlem, sertlik deneyi, basma deneyi, SEM-EDS analizi, Rietveld-XRD analizi.



ABSTRACT**EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF
CRYOGENIC PROCESSING CONDITIONS ON MICROSTRUCTURE
AND MECHANICAL PROPERTIES OF VANADIUM STEELS**

AKGÜMÜŞ GÖK, Dilşad

PhD Thesis, in Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Rasim İPEK

December 2019, 93 pages

In this thesis, the changes in the metallurgical structure and mechanical properties of the materials were investigated by keeping the cryogenic working temperature and time parameters of vanadium alloy cold work tool steels having different percentages.

In the thesis study, cold work tool steels with a new generation vanadium content were obtained and processed according to the experimental dimensions. The heat treatment and the parameters to be applied before the cryogenic process were determined. In order to investigate the mechanical properties of the cryogenic processing samples, hardness and compression tests were applied to each sample. SEM-EDS analyzes were performed to investigate the changes occurring in the microstructures of the steels and the elements formed. Afterwards, XRD and Rietveld analyzes were used to determine phase transformations in the structure of materials.

As a result, it was observed that the vanadium alloying element and cryogenic process applied to the materials increased the mechanical properties of the materials. After cryogenic processing, it was determined that new carbides were formed in the materials and the amount of residual austenite decreased to martensite structures.

Keywords: Vanadium alloy steels, cold work tool steels, cryogenic process, hardness test, compression test, SEM-EDS analysis, Rietveld-XRD analysis.

ÖNSÖZ

Takım çelikleri, çeliklerin gruplandırılmasında ayrı bir sınıf olarak ele alınmakta ve incelenmektedir. Takım çelikleri, toplam çelik üretiminin nispeten küçük bir yüzdesini oluşturmalarına rağmen diğer çelik ve mühendislik malzemelerinin üretiminde kullanıldıkları için stratejik bir öneme sahiptirler. Bu çalışmada kullanılan soğuk iş takım çelikleri sürekli aşınma ve sürtünmeye maruz kalan yerlerde (kesme kalıpları, sac basma kalıpları, kesme bıçakları, talaş kaldırma vb.) kullanılmaktadırlar. Bu nedenle soğuk iş takım çeliklerinin dayanımlarını artırmak, takım maliyetlerini azaltmak ve daha uzun takım ömrü elde etmek amacıyla çeliklerin alaşım elementi olarak sertlik ve dayanımları yüksek olan vanadyum seçilmiştir.

Tezin diğer önemli noktası ise daha önce üzerinde çalışmadığım fakat aşamalarını ve uygulama yöntemlerini merak ettiğim kriyojenik işlem aşamasıdır. Kriyojenik işlem, yüksek aşınmaya maruz kalan takımlarda aşınma direncini ve sertliği artırma amacı ile kullanılan bir soğutma ısıl işlemidir. Vanadyum alaşımlı çeliklerin ve kriyojenik işlemin belirtilen avantajları ile birlikte olumlu sonuçlar alınacağı düşünülerek çalışmaya başlanılmıştır. Çalışma kapsamında yapmış olduğum mekanik deneyler ve mikroyapı çalışmaları bu ön görüşü doğru kılmıştır.

Bu çalışmanın, yapmış olduğum mekanik ve metalurjik analiz sonuçları ile birlikte bilimsel anlamda literatüre katkı sağlayacağını düşünmekteyim.

İZMİR

02 / 12 / 2019

Dilşad AKGÜMÜŞ GÖK



İÇİNDEKİLER

Sayfa

İÇ KAPAK.....	i
KABUL ONAY SAYFASI.....	iii
ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI.....	v
ÖZET.....	vii
ABSTRACT.....	ix
ÖNSÖZ	xi
İÇİNDEKİLER	xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xvii
TABLOLAR DİZİNİ	xxi
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	3
2.1 Literatür Özeti	3
2.2 Önceki Çalışmalar	4
3. TAKIM ÇELİKLERİ.....	18
3.1 Takım Çeliklerinin Tanımı ve Genel Özellikleri	18
3.2 Takım Çeliklerinin Sınıflandırılması	19
3.3 Soğuk İş Takım Çelikleri	20
3.3.1 Soğuk iş takım çeliklerinin çeşitleri	21
3.3.2 Soğuk iş takım çeliklerinin kullanım alanları	25
3.3.3 Soğuk İş Takım Çeliklerine Uygulanan Isıl İşlemler.....	26

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4. KRIYOJENİK İŞLEM	30
4.1 Kriyojenik İşlemin Tanımı	30
4.2 Kriyojenik İşlemin Uygulanması	33
4.3 Kriyojenik İşlemin Etkileri.....	35
4.3.1 Mikroyapıya etkisi.....	35
4.3.2 Mekanik özelliklere etkisi	36
4.4 Kriyojenik İşlemin Uygulama Alanları.....	37
5. GEREÇ VE YÖNTEM	38
5.1 Deneylerde Kullanılan Malzemeler	39
5.1.1 Vanadis 4 extra superclean numuneleri	39
5.1.2 Vanadis 8 superclean numuneleri	40
5.1.3 Vanadis 10 superclean numuneleri	41
5.1.4 Sürekli soğuma dönüşüm (CCT) grafiklerinin yorumlanması	42
5.1.5 Numune boyutlarının belirlenmesi ve numunelerin oluşturulması	43
5.2 Kriyojenik İşlem Parametrelerinin Belirlenmesi ve Uygulanması	44
5.2.1 Kriyojenik işlem parametrelerinin belirlenmesi.....	44
5.2.2 Kriyojenik işlemin uygulanması	46
5.3 Mikro Sertlik Cihazı.....	49
5.4 Basma Deneyi Cihazı	50
5.5 Metalografik Numune Yüzey Hazırlama İşlemleri	51
5.6 SEM-EDS Analiz Cihazı.....	52

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

5.7 XRD-Rietveld Analiz Cihazı	52
5.8 Karbür Boyutu Ölçümü.....	53
6. BULGULAR	55
6.1 Mikroyapısal Karakterizasyon Sonuçları.....	55
6.1.1 SEM analiz sonuçları	55
6.1.2. EDS analiz sonuçları	58
6.1.3. Karbür boyutu ölçüm sonuçları.....	62
6.1.4. XRD ve Rietveld analiz sonuçları.....	63
6.2 Mekanik Deneylerin Sonuçları	71
6.2.1 Mikro sertlik deneyi sonuçları	71
6.2.2 Basma deneyi sonuçları	75
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	81
KAYNAKLAR DİZİNİ	84
TEŞEKKÜR.....	91
ÖZGEÇMİŞ	93



ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.1 Takım çeliklerinin kullanım ömrünü etkileyen etmenler.....	19
3.2 Yüzde ağırlıkça vanadyum.....	25
3.3 Soğuk iş takım çeliklerinin endüstrideki kullanım yüzdeleri.....	26
3.4 Takım çeliklerinin sertleştirilmesinde uygulanan konvansiyonel ısıt işlemlerinin basamakları.....	27
3.5 Çeliğin karbon oranına bağlı olarak M_s ve M_f sıcaklıklarının değişimi	28
3.6 Su verme işlemi sonrası kriyojenik işlem aşaması.....	29
4.1 Kriyojenik işlemin yapıldığı azot tankı görünümü	30
4.2 Kriyojenik işlemin sıcaklık-zaman döngüsü.....	31
4.3 Kriyojenik işlem aşamaları	31
4.4 Kriyojenik işlemin uygulandığı sistemin şeması	33
4.5 Tipik bir kriyojenik işlem sisteminin soğutma prensibi.....	34
4.6 Kriyojenik işlem döngüsünde oluşan malzeme mikroyapıları.....	35
5.1 Deneysel çalışmada izlenecek yolun şematik gösterimi	38
5.2 Temin edilen vanadyum içerikli çelik numuneler.....	39
5.3 Vanadis 4 Extra superclean çeliğine ait sürekli soğuma dönüşüm grafiği.....	40
5.4 Vanadis 8 superclean çeliğine ait sürekli soğuma dönüşüm grafiği	41
5.5 Vanadis 10 superclean çeliğine ait sürekli soğuma dönüşüm grafiği	42
5.6 Numunelerin işlenme aşamaları.....	44
5.7a Vanadis çeliklerine ait sertlik, SEM-EDS, XRD ve Rietveld analiz numunesi	44
5.7b Vanadis çeliklerine ait basma deney numunesi	44

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.8 Gerçekleştirilen çalışmanın ısıtma işlem parametrelerinin şematik diyagramı	46
5.9 Kriyojenik işlemin gerçekleştirildiği “Cryo Üretim” azot tankı	47
5.10 Kriyojenik işlem sonrası deney numuneleri	47
5.11 -196°C’de 12 saat kriyojenik işlem görmüş numunelerin sıcaklık eğrisi program ara yüzü	48
5.12 -196°C’de 24 saat kriyojenik işlem görmüş numunelerin sıcaklık eğrisi program ara yüzü	48
5.13 -196°C’de 36 saat kriyojenik işlem görmüş numunelerin sıcaklık eğrisi program ara yüzü	49
5.14 Future Tech FM-700 mikro sertlik cihazı	50
5.15 SHIMADZU Autograph AGS-X marka çekme-basma test cihazı	51
5.16a Struers CitoPress-1 kalıplama	51
5.16b Struers Tegra Pol- 21 zımparalama cihazları	51
5.17 Hitachi Regulus 8230 SEM-EDS analiz cihazı.....	52
5.18 Panalytical EMPYREAN XRD analiz cihazı.....	53
5.19 Karbür boyutu hesaplaması için oluşturulan ve karbürleri kesen çizgiler	53
6.1 Numunelerinin kriyojenik işlem süresine (0-36 saat) bağlı olarak elde edilen SEM mikroyapıları	56
6.2 V4 numunelerinin SEM-EDS analizleri.....	59
6.3 V8 numunelerinin SEM-EDS analizleri.....	60
6.4 V10 numunelerinin SEM-EDS analizleri.....	61

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.5 V4-0 kodlu çeliğe ait Rietveld analiz görüntüsü.....	63
6.6 V4-1 kodlu çeliğe ait Rietveld analiz görüntüsü.....	63
6.7 V4-2 kodlu çeliğe ait Rietveld analiz görüntüsü.....	64
6.8 V4-3 kodlu çeliğe ait Rietveld analiz görüntüsü.....	64
6.9 V4-4 kodlu çeliğe ait Rietveld analiz görüntüsü.....	65
6.10 V8-0 kodlu çeliğe ait Rietveld analiz görüntüsü.....	65
6.11 V8-1 kodlu çeliğe ait Rietveld analiz görüntüsü.....	66
6.12 V8-2 kodlu çeliğe ait Rietveld analiz görüntüsü.....	66
6.13 V8-3 kodlu çeliğe ait Rietveld analiz görüntüsü.....	67
6.14 V8-4 kodlu çeliğe ait Rietveld analiz görüntüsü.....	67
6.15 V10-0 kodlu çeliğe ait Rietveld analiz görüntüsü.....	68
6.16 V10-1 kodlu çeliğe ait Rietveld analiz görüntüsü.....	68
6.17 V10-2 kodlu çeliğe ait Rietveld analiz görüntüsü.....	69
6.18 V10-3 kodlu çeliğe ait Rietveld analiz görüntüsü.....	69
6.19 V10-4 kodlu çeliğe ait Rietveld analiz görüntüsü.....	70
6.20 V4, V8 ve V10 çeliklerine ait mikro sertlik değerlerinin karşılaştırılması	75
6.21 V4 numunelerine ait gerilme-şekil değişimi diyagramları.....	76
6.22 V8 numunelerine ait gerilme-şekil değişimi diyagramları.....	77
6.23 V10 numunelerine ait gerilme-şekil değişimi diyagramları.....	78
6.24 Numunelere ait maksimum gerilme değerlerindeki değişimleri	78

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)ŞekilSayfa

6.25	Numunelere ait kopma gerilmesi değerlerindeki değişim.....	79
6.26	Numunelere ait şekil değişimi değerlerindeki değişim	80



TABLOLAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Literatür özeti	16
3.1 Takım çeliklerinin sınıflandırılması	20
3.2 Yağda sertleşen soğuk iş takım çeliklerinin çeşitleri ve kimyasal bileşimlerinin limitleri	21
3.3 Havada sertleşen soğuk iş takım çeliklerinin çeşitleri ve kimyasal bileşimlerinin limitleri	22
3.4. Yüksek karbonlu yüksek kromlu soğuk iş takım çeliklerinin çeşitleri ve kimyasal bileşimlerinin limitleri.....	23
5.1 Vanadis 4 Extra superclean kimyasal bileşen içeriği	40
5.2 Vanadis 8 superclean kimyasal bileşen içeriği.....	41
5.3 Vanadis 10 superclean kimyasal bileşen içeriği	42
5.4 Malzeme boyutları ve deney planı	43
5.5 Çalışmada kullanılan numunelerin kodlamaları.....	45
5.6 Numunelere uygulanan ısıtıl işlem parametreleri	45
6.1 Numunelere ait ortalama karbür boyutu değerleri	62
6.2 Rietveld analiz sonuçları	71
6.3 V4 kodlu numuneye ait mikro sertlik değerleri	72
6.4 V8 kodlu numuneye ait mikro sertlik değerleri	73
6.5 V10 kodlu numuneye ait mikro sertlik değerleri	74
6.6 Numunelere ait gerilme, kopma gerilmesi ve şekil değişimi değerleri.....	76



1. GİRİŞ

Günümüz teknolojisinin gelişmesi ile birlikte üretim ve imalat açısından yeni yöntemlere ve farklı malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Farklı alanlarda kullanılan bu yeni yöntemlerin ve yeni nesil malzemelerin işlenmesi aşamasında bazı sorunlar ortaya çıkmaktadır. Bunların en önemlileri, uygun işleme yönteminin tespiti, kesici takım performanslarının artırılması, uygun takımın tayini ve kesme parametrelerinin optimize edilmesidir.

Kesici takımların performanslarının artırılması, üretim maliyetlerinin azaltılması açısından önemli bir faktördür. Aşınma ve tokluk dayanımı, işlenebilirlik, boyutsal kararlılık ve yorulma direnci kullanım alanları bakımından soğuk iş takım çelikleri için oldukça önem arz etmektedir. Bunun yanı sıra kesici takımların performanslarını artırmak amacıyla, takımlara ısıtılma işlemi ve kaplama işlemleri uygulanmaktadır. Sıfır altı ısıtılma işlemi olarak da bilinen kriyojenik ısıtılma işlemi, özellikle aşınmaya, darbeye maruz kalan parçaların ve kesici takımların aşınma direnci, takım ömrü ve ürün kalitesinin artırılmasına önemli katkı sağlamaktadır.

Kesici takımlara uygulanan kriyojenik işlemin uygulanış şekli takımların performansları üzerinde etkili olmaktadır. Kriyojenik işlem; özellikle takım çelikleri, yüksek kromlu dökme demirler ve tungsten karbür gibi malzemelerin mekanik ve fiziksel özelliklerinde iyileştirmeler sağlayan kriyojenik sıvı veya gaz ortamında belirli sürelerde bekletmeyi esas alan ve malzemelere bir kez uygulanarak etkisi sürekli kalan bir ısıtılma işlemi türüdür. Demir-karbon alaşımlarına uygulanan kriyojenik işlem sonucunda düşük sıcaklık ve bekleme sürelerinin etkisi ile bu alaşımların mikroyapısında bulunan yumuşak austenite yapısı sert martenzit yapısına dönüşmektedir. Kriyojenik işlem sonrasında uygulanan temperleme işlemi ile sert karbür yapılarının çökmesi sağlanmaktadır. Mikroyapıdaki bu değişimler malzemelerin sertlik ve aşınma direncini iyileştirmektedir. Sertlik ve aşınma direncinin yanı sıra malzemelerin tokluk, kalıntı gerilme ve yorulma ömründe de iyileşmeler sağlandığına dair bilgiler literatürde yer almaktadır. Sağladığı üstün mekanik ve fiziksel özellikler nedeniyle kriyojenik işlem son yıllarda yaygın bir çalışma konusu olmuştur ve bu konudaki çalışmaların giderek artması

beklenmektedir.

Bu tez çalışmasına konu olan soğuk iş takım çelikleri sürekli sürtünme ve aşınmaya maruz kalan yerlerde (kesme bıçakları, kesme kalıpları, talaş kaldırma aşınmaya dayanıklı kalıp elemanları, çapak alma kalıpları ve basma kalıpları) kullanılmaktadırlar. Tez çalışması için üstün mekanik özellikleri sebebi nedeni ile soğuk iş takım çeliklerinden olan yeni nesil vanadyum içerikli çelikler tercih edilmiştir. Bu çeliklerin kriyojenik işlemle aşınma ve sürtünmeye karşı dayanımlarının artırılması amaçlanmıştır.

Vanadis 4, Vanadis 8 ve Vanadis 10 soğuk iş takım çelikleri özellikle kesici takım ve kalıp elemanlarının üretiminde kullanıldığı için yüksek oranda delme ve kesme işlemleri tesiri altında kalmaktadırlar. Takım maliyetlerinin daha az miktarlara indirgenmesi için kesme ve delme işlemleri sırasında malzeme ömrünü etkileyen takım aşınmasının kontrol altına alınması gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında uygulanacak olan kriyojenik işlemin Vanadis 4, Vanadis 8 ve Vanadis 10 soğuk iş takım çeliklerinde; mikroyapı, mikro-sertlik, basma dayanımları ve Xrd-Rietveld analizi ile detaylı faz taraması deneysel olarak araştırılacaktır.

Bu çalışmanın 2. bölümünde literatür bilgisine ve konu ile ilgili daha önce yapılmış çalışmalar anlatılmıştır, 3. bölümünde takım çeliklerine yer verilmiş ve özellikle çalışma kapsamında kullanılan soğuk iş takım çelikleri ele alınmıştır, 4. bölümünde kriyojenik işlem hakkında detaylı bilgilere yer verilmiştir. Çalışmanın 5. bölümü yapılan deneysel çalışmaları, 6. bölümü yapılan bu deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçları kapsamaktadır. Son olarak 7.bölümde ise sonuçlar ayrıntılı olarak irdelenmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

2.1 Literatür Özeti

Kriyojenik işlem ilk olarak 1930'lu yılların başında yüksek hız çeliklerine uygulanmıştır. Bu yıllarda Alman WHN şirketi uçak motorlarının ekipmanlarında bu işlemleri kullanmıştır. 1940'larda uygulanan kriyojenik işlem aşamaları ise günümüz şartları ile kıyaslandığında oldukça ilkel kalmıştır. Kriyojenik işlemlerle ilgili araştırmalar 1950'li yıllarda takım ve üretim gibi dergilerde makaleler şeklinde bildirilmiştir. Kriyojenik işlemlerin en kayda değer ve kalıcı öncüsü ise Louisiana Teknik Üniversitesi araştırmacısı Dr. Randall Baron tarafından yapılmış ve yayımlanmış olan çalışmalardır. Bu yıllarda yapılan çalışmalarda daha çok farklı türdeki metallerin düşük sıcaklıkların elektriksel özellikler üzerindeki etkisini belirlemek amaçlanmıştır. 1960'lara kadar çalışmalar doğrudan sıvı azot içine daldırılarak yapılmıştır. 1965'lerden beri yapılan bazı çalışmalar, bu metot ile yüksek aşınma ve yüksek darbeye maruz kalan bazı takım çeliklerinin performansında ciddi iyileşme elde edildiğini göstermiştir. Özellikle 1980'li yılların başında işlem ünitelerinin ve sıcaklığın bilgisayar kontrolü ile kontrol altına alınması sonucunda parçaların termal şoklara maruz kalmasının önüne geçilmiştir. Kriyojenik işlemde gerekli sıcaklıklara inebilmek ve hızlı soğuma elde edebilmek için sıvı azotu son derece verimli kullanabilen dondurucular geliştirilmiştir. 1990'lardan itibaren kriyojenik işlem yarış motor parçaları, özellikle dişliler ve rulmanlar, petrol kuyusu açma ekipmanları, silah namlusu, cerrahi ve diş ekipmanları gibi birçok farklı ürüne uygulanmıştır.

Günümüzde kriyojenik işlemi kapsayan bilimsel çalışmalar; takım çeliklerinin yorulma ve aşınma davranışları, kalıntı gerilmelerin değişimi, faz dönüşümlerinin tayini ve malzemelerin mekanik özelliklerindeki iyileşmeleri üzerine olmuş ve önemli aşamalar kaydetmiştir.

Literatürde, kriyojenik işlemin özellikle aşınma ve sürtünmeye maruz kalan yerlerde aşınma direnci ve takım ömrünü artırdığını bildiren birçok çalışma bulunmaktadır. Kriyojenik işlemin takım ömrünü artırması ve gerilim giderme gibi

ilave özellikler sunmasından dolayı, son yıllarda farklı malzemelere ve takımlara kriyojenik işlem uygulaması giderek artmıştır. Yapılan çalışmalarda, kriyojenik işlem ile klasik ısıtıl işlemden sonra oluşan ve ürünün ömrünü negatif yönde etkileyen kalıntı austenit fazının martenzit fazına dönüşmesi, çekirdeklenme bölgelerinde çok sayıda ince taneli karbür çökmesi sağlanarak malzemede yüksek aşınma dayanımı elde edildiği bildirilmektedir.

Kriyojenik işlem, malzemelerin yorulma ve çalışma ömürlerinin artırılması amacı ile oda sıcaklığının oldukça altındaki sıcaklıklarda (-196°C) klasik ısıtıl işlemi tamamlayıcı bir işlem olarak değerlendirilmektedir. Uygulanan bu işlem, malzeme içerisinde klasik ısıtıl işlem sonrasında malzemede kalan ve malzemenin ömrünü olumsuz yönde etkileyen yumuşak bir faz olan kalıntı austenit yapısının, sert bir faz olan martenzit yapısına dönüşmesinden ötürü çeliklerin performansını iyileştirdiği belirtilmiştir. (Amini et al.,2012)

Literatürden farklı olarak bu çalışmada, değişik vanadyum yüzdeliklere sahip olan soğuk iş takım çeliklerine uygulanacak olup hem vanadyum miktarının etkisinin incelenecek olması, hem de farklı bekletme sürelerinde uygulanan kriyojenik işlemin takım çelikleri üzerindeki mekanik özelliklerinin araştırılarak en iyi kriyojenik işlem bekletme süresinin belirlenecek olması bu tez çalışmasının literatürdeki diğer çalışmalardan farklılığını ortaya koymaktadır.

2.2 Önceki Çalışmalar

Bu bölümde, literatürde çeliklere uygulanan kriyojenik işlemin mekanik ve metalurjik özellikler üzerindeki etkisini incelemek amacıyla; yapılan bilimsel çalışmaların özetleri sunulmuştur.

Gordon ve Cohen (1942), yapmış oldukları çalışmada; tungsten esaslı sertleştirilmiş çeliğin -196°C sıcaklıkta sıvı nitrojende bekletilmesi sonucunda yapıda oluşan kalıntı austenit faz dönüşümlerini araştırmışlardır. Temperleme işlemi 93°C ile 468°C sıcaklıkları arasında yapıldığında kalıntı austenit fazının stabil davranış sergilediği ve kriyojenik işlem sonucunda austenit dönüşümünün gerçekleşmediği

görülmüştür. Fakat temperleme sıcaklığının 468°C'nin üstüne çıkarılması ile yeterli karbür çökmesinin olduğu ve kalıntı austenit dönüşümünün gerçekleştiği ileri sürülmüştür. Ayrıca uygulanan kriyojenik işlem ile tungsten esaslı çelik; sertlik, dayanım ve süneklik özellikleri bakımından, geleneksel sertleştirme ve temperleme işlemi ile elde edilemeyecek kadar üstün özellikler kazandığı belirtilmektedir.

Tavadze vd. (1975), çalışmalarında; farklı kriyojenik işlem sıcaklıklarında sıvı nitrojen içerisinde bekletilen austenit yapılı krom-mangan çeliğinin mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimleri araştırmışlardır. Bu amaçla +20°C, -78°C, -196°C ve -253°C olarak belirlenen işlem sıcaklıklarında kriyojenik işlem görmüş olan numuneler, darbe ve çekme testlerine tabi tutulmuşlardır. Deney sonuçları incelendiğinde, kriyojenik işlem sıcaklığı düşürüldükçe krom-mangan çeliğinin mukavemet değerlerinin iyileştiği, sünekliğinin ise azaldığı görülmüştür. Mekanik özelliklerde meydana gelen bu iyileşmeler kriyojenik işlem sonrasında kalıntı austenit fazının martenzit fazına dönüşmesi ile ilişkilendirilmiştir.

Stepanov ve Lokhankina (1979), kriyojenik işlem (-196°C) uygulanan austenit yapılı krom-mangan çeliğinin mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimleri incelemiştir. Yapılan mekanik testler ve mikroyapıdaki kalıntı austenit dönüşümüne bağlı olarak kriyojenik işlemin malzemenin çekme mukavemetini ve yorulma direncini olumlu yönde etkilediği belirtilmektedir.

Barron (1982), yaptığı çalışmada; abrasif aşınma direncini iyileştirmede iki farklı bekleme sıcaklık değeri (-84°C ve -196°C) arasındaki farkı saptamak için 3 paslanmaz çelik, 12 takım çeliği, ve 4 farklı cins çelik grubundan oluşan 19 adet çelik malzemeye kriyojenik işlem uygulamıştır. Takım çeliklerinin -84°C sıcaklıkta bekletilmesi ile elde edilen aşınma direnci değerlerinin -196°C sıcaklıkta bekletilmesi ile elde edilen aşınma direnci değerlerinden daha az artış sergilediği görülmüştür. Uygulanan her iki kriyojenik soğutma paslanmaz çeliklerin aşınma dirençlerinde bir miktar artış sağlamıştır. Fakat bu iki davranış arasındaki fark % 10'dan daha az bulunmuştur. Dökme demir ve sade karbonlu çeliklerin ise diğer çelik gruplarına göre daha az karbon içermeleri ve kırılğan bir yapıya sahip olmaları

sebebi ile her iki kriyojenik soğutma aşamasında da iyileşme göstermedikleri ileri sürülmüştür.

Krzanowski (1988), Fe-30Mn-9Al-0.9C çeliğinin mekanik özelliklerindeki değişimi oda sıcaklığı, -76°C ve -196°C sıcaklıklarında incelemiştir. Kriyojenik işlem sıcaklığının düşürülmesi ile kafes sisteminin HMK yapıdan daha sıkı düzene sahip olan YMK yapıya geçtiği ve karbon miktarı az olan bölgelerin (austenit fazları) azaldığı görülmüştür. Bu sonuçlara göre çalışma kapsamında kriyojenik işlem sıcaklığı azaldıkça numunelerin mekanik özelliklerinin iyileştiği düşünülmektedir.

Koshelev vd. (1991), yaptıkları çalışmada, farklı sıcaklıklarda (-196°C ve -253°C) kriyojenik işlem uygulanan KhN35VTYu alaşımlı çeliğinin mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimleri incelemişlerdir. Kriyojenik işlem sonrasında akma ve çekme gerilmesi değerlerinin yaklaşık olarak % 20-30 oranında arttığı, uzama oranının ise % 10-20 arasında azaldığı, süneklik ve darbe dayanımlarının da bir miktar azaldığı görülmüştür. Elde edilen sonuçlar austenit fazının tane sınırlarında azalması ve sertleştirilmiş martenzit yapı içerisinde homojen bir şekilde dağılması ile ilişkilendirilmiştir.

Ma vd. (1992), yaptıkları çalışmada, austenitik çelikten hazırlanan numuneleri oda sıcaklığında ve -196°C'de çekme deneyine tabi tutmuşlardır. Oda sıcaklığında numunelerin mikroyapısı incelendiğinde herhangi bir faz dönüşümü görülmemiştir. Soğutma işlemi sonucunda süneklik değerlerinde azalma, çekme dayanımı değerlerinde ise artış olduğu belirlenmiştir. Bu durum ince austenit yapının azalması ve tane sınırlarındaki martenzit yapının artması şeklinde yorumlanmıştır.

Collins ve Moore (1993), Vanadis 4, AISI H13 ve AISI D2 takım çeliklerine farklı bekletme süreleri (0 dakika ve iki hafta) ve sıcaklıklarında (-40°C, -100°C ve -196°C) uygulanan kriyojenik işlemin ve temperleme sıcaklığının sertliğe etkisini incelemişlerdir. Sertlik değerleri; temperleme sıcaklığının artması ile tüm takım çeliklerinde azalmış, bekleme sıcaklığının artması H13 takım çeliği dışındaki çeliklerde azalmıştır. İki hafta boyunca kriyojenik işlem görmüş olan numunelerin

sertlik değerlerinin, hiç kriyojenik işlem görmemiş olan numunelerin sertlik değerlerinden daha düşük olduğu belirlenmiştir. Oluşan değişimler austenit yapıdaki dönüşümler ile ilişkilendirilmiş ve karbür çökelmeleri sonucunda martenzit yapının geliştiği öne sürülmüştür.

Meng vd. (1994), farklı sıcaklıklarda (-80°C ve -180°C) kriyojenik işlem uygulanan Cr ve Mo alaşımlı takım çeliklerinin aşınma direncinin iyileşmesinde karbür çökmesinin rolünü araştırmışlardır. Yapılan çalışma sonucunda, kriyojenik işlemin ardından aşınma değerlerinde %110 ile % 600 arasında iyileşmelerin olduğu görülmüştür. Mikroyapı incelemelerine de bakıldığında aşınma direncine katkıda bulunan kriyojenik işlem mekanizmasının, martenzit yapının dayanımı ve tokluğunu geliştiren karbür çökelmeleri yerine kalıntı austeniti ortadan kaldırması şeklinde yorumlanmıştır.

Collins ve Dormer (1997), yaptıkları çalışmada; kriyojenik işlem görmüş olan AISI D2 takım çeliğinin aşınma direncini incelemişlerdir. Kriyojenik işlem için çeliğe -140°C ile -196°C sıcaklıkları aralığında sıvı azot uygulaması yapılmıştır. Kriyojenik işlem sonrasında çeliğin tokluk, aşınma dayanımı ve sertlik değerlerinde iyileşmeler görülmüştür. Sertlik değerindeki artışın, yumuşak yapıda olan kalıntı austenit fazının sert bir yapı olan martenzit fazına dönüşmesi olarak yorumlanmıştır. Aşınma direnci ve tokluk değerlerindeki iyileşmeler ise mikroyapıdaki karbürlerin daha homojen bir hal alması ve daha ince dağılımlı çökmesi şeklinde yorumlanmıştır.

Yun vd. (1998), M2 ve T1 çeliklerine farklı bekleme sürelerinde (24 ve 48 saat) uygulanan kriyojenik işlemin mekanik özellikler üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Sonuçlar kriyojenik işlem görmüş çeliklerin mekanik özelliklerinde iyileşmeler olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte 48 saat bekleme süresi uygulanan numune, 24 saat bekleme süresi uygulanan numuneye göre daha yüksek mekanik özellikler sağladığı ve bu durumun kriyojenik işlem sonrasında kalıntı austenit fazının martenzit fazına dönüşmesi ile ilişkili olduğu belirtilmektedir.

Kim vd. (1999), yaptıkları çalışmada; Al 644 ve Al 648 alüminyum alaşımlarının oda sıcaklığındaki ve -196°C 'deki çekme özelliklerini karşılaştırmışlardır. -196°C 'de yapılan çekme deneyi sonucunda her iki alüminyum alaşımının da akma ve çekme gerilmesi değerleri artmış, uzama değerleri azalmıştır.

Chen vd. (2002), kriyojenik işlemin kalıntı gerilme, çekme mukavemeti, sertlik ve yorulma ömrü üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Malzeme olarak havacılık ve uzay araçlarında kullanılan bir alüminyum alaşımı tercih edilmiştir. Kriyojenik işlemten sonra; kalıntı gerilmeler azalmış, çekme mukavemeti ve sertlik bir miktar artmış ve yorulma ömründe ise önemli bir değişiklik olmamıştır. Çalışma kapsamında kriyojenik işlem ile martenzit yapıdaki karbür oluşumunun kolaylaştığı ve karbür oranının artmasının yanı sıra daha homojen karbür dağılımının meydana geldiği belirtilmektedir.

Huang vd. (2003), kriyojenik işlem uygulamasının ardından M2 takım çeliğinin mikroyapısında meydana gelen değişiklikleri incelemişlerdir. Bu çalışmada, kriyojenik işlemin karbür yığılmalarını kolaylaştırmasından dolayı çeliğin aşınma direncini iyileştirdiği belirlenmiştir.

Prabhakaran vd. (2004), $+20^{\circ}\text{C}$, -80°C ve -196°C sıcaklıklarında EN 353 çeliğine uygulanan kriyojenik işlemin darbe direncine etkisini incelemişlerdir. En düşük darbe direnci oda sıcaklığında elde edilirken, -80°C ve -196°C sıcaklıklarında uygulanan kriyojenik işlemin darbe direncini yaklaşık olarak benzer oranlarda iyileştirdiği görülmüştür. Mikroyapı incelemesine bağlı olarak; austenit yapının martenzite dönüşmesi ve ince karbür dağılımları sonucunda sertlik ve aşınma direncinde iyileşmeler kaydedildiği ileri sürülmüştür.

Zhirafar vd. (2007), kriyojenik işlem uygulanan soğuk iş takım çeliklerinin mekanik özelliklerini ve mikroyapısını incelemek üzere deneysel çalışmalar yapmışlardır. Yorulma, darbe ve sertlik testleri yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Geleneksel ısıtma işlemi uygulanan çeliklerle karşılaştırıldığında kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin tokluk değerlerinin daha düşük, yorulma

mukavemeti ve sertlik değerlerinin ise biraz daha yüksek olduğu görülmüştür. Kriyojenik işlem görmüş olan numunelerin iyileşen yorulma direnci ve sertlik değerlerinde anahtar faktörün kalıntı austenitin martenzite dönüşmesi olduğu belirtilmiştir.

Akhbarizadeh vd. (2009), kriyojenik işlemin D6 takım çeliğinin aşınma davranışı üzerindeki etkilerini araştıran bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada, kriyojenik işlem sıcaklığının (sığ ve derin sıcaklıklar), kriyojenik işlem zamanının (20 ve 40 saat kriyojenik sıcaklıkta bekletme) ve stabilizasyonun (1 hafta oda sıcaklığında bekletme) etkileri araştırılmıştır. Aşınma deneyleri, iki farklı yük (120 ve 180N) ve üç farklı hız (0,05, 0,1 ve 0,2 m/s) ile pin-on-disk aşınma deney cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler, kriyojenik işlem uygulamasının ve bekleme süresindeki artışın kalıntı austenit faz yapısını azalttığını ve böylece sertliği ve aşınma direncini iyileştirdiği ileri sürülmüştür.

Nirbhavne ve Dhokey (2009), D3 çeliğine kriyojenik işlemten sonra uygulanan çift temperleme uygulamasının aşınma direnci üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Numuneler kriyojenik işlem sonrasında pin-on disk aşınma cihazı kullanılarak aşınma deneyine tabi tutulmuşlardır. Çalışmada, D3 takım çeliğinin aşınma direnci özelliğini artırmada etken olan metalurjik mekanizmayı anlayabilmek için aşınmış yüzeyin sertliği, mikroyapısı, aşınma kaybı ve SEM analizleri incelenmiştir. Mikroyapı analizleri incelendiğinde; kriyojenik işlem uygulaması ile karbür boyutlarında belirgin azalmaların olduğu ve ince karbürlerin homojen yayıldığı, temperleme sayısının artması ile karbür boyutlarının artarak kalınlaştığı belirtilmiştir. Çalışma kapsamında; karbür boyutlarında meydana gelen bu değişimlerin sertlik ve aşınma direncini doğrudan etkilediği düşünülmektedir.

Amini vd. (2010), Cr ve Mo alaşımlı çeliğinin aşınma davranışı üzerinde kriyojenik işlemin etkisini incelemiştir. Bu amaçla çeliğe sığ ve derin kriyojenik sıcaklık olmak üzere iki farklı sıcaklık uygulanmıştır. Derin kriyojenik işlem sıcaklığındaki bekleme sürelerinin karşılaştırılması amacıyla altı farklı bekleme süresi (4, 8, 12, 24, 36, 48 saat) belirlenmiştir. Elde edilen veriler

değerlendirildiğinde; kriyojenik işlem uygulanan çeliklerin aşınma dayanımlarında belirgin iyileşmeler olduğu görülmüştür. Aşınma direncinin ve sertliğin en yüksek olduğu değerler bekleme süresi 48 saat iken ortaya çıkmıştır. Mikroyapı analizleri incelendiğinde kriyojenik işlem ile austenit miktarının azalarak martenzite dönüştüğü ve homojen karbür dağılımının artışı ileri sürülmektedir. Bu değişimlerin aşınma direncini iyileştirdiği savunulmaktadır.

Das vd. (2010), AISI D2 çeliğinin maksimum aşınma direnci için optimum bekletme süresini belirlemek amacıyla, 77 K sıcaklıkta 0-132 saat arasında farklı bekleme sürelerinde (1, 12, 36, 60, 84, 132 saat) kriyojenik işlem uygulamışlardır. Farklı sürelerde bekletilen numunelerin yapısal özelliğinin incelemesi sonucunda en iyi aşınma direncinin 36 saat boyunca kriyojenik işlem uygulanmış çeliklerde olduğu belirtilmiştir. Sertlik değerleri dışında mekanik özelliklerde meydana gelen iyileşmelerin kalıntı austenit miktarının azalması ve homojen karbür dağılımından kaynaklanması şeklinde yorumlanmıştır.

Koneshlou vd. (2011) kriyojenik işlemin AISI H13 çeliğinde meydana getirdiği mekanik özellik ve mikroyapı değişimleri üzerindeki etkileri araştırmışlardır. AISI H13 çeliği sıg ve derin olmak üzere 2 tür kriyojenik işleme maruz bırakılmıştır. İşlem uygulamaları sonrasında malzeme içerisindeki kalıntı austenit fazı martenzit fazına dönüşmüştür. Uygulama sıcaklığı düşürüldükçe daha fazla kalıntı austenit fazının martenzit fazına dönüştüğü görülmüştür. Ayrıca mikroyapı üzerinde daha ince ve homojen karbür dağılımı sağlanmıştır. Mikroyapıda oluşan bu değişimlerin AISI H13 sıcak iş takım çeliğinin mekanik özelliklerini iyileştirdiği ileri sürülmektedir.

Senthilkumar vd. (2011), AISI 4140 çeliğinin kalıntı gerilme durumu üzerine kriyojenik işlemin etkisini araştırmışlardır. Kriyojenik işlem uygulama sıcaklığında (-80°C ve -196°C) meydana gelen azalmanın daha yüksek miktarda austenit fazını martenzit fazına dönüştürdüğü belirtilmektedir.

Akhbarizadeh vd. (2012), kriyojenik işlem görmüş AISI D2 çeliğinin aşınma dayanımı ve korozyon davranışının incelenmesi üzerine bir araştırma yapmışlardır. Kriyojenik işlemten sonra korozyon dayanımının ve aşınma direncinin iyileştiği görülmüştür. Kriyojenik sıcaklıklardaki en uygun bekleme süresi; daha yüksek korozyon ve aşınma dayanımı görülmesi nedeni ile 48 saat olarak seçilmiştir. Aşınma davranışında ve korozyon direncinde meydana gelen iyileşmelerin; kriyojenik işlem sonucunda mikroyapıdaki austenit fazının azalmasına ve karbürlerin daha homojen dağılmaları ile izah edilmiştir.

Amini vd. (2012), yaptıkları çalışmada; farklı bekleme süreleri boyunca uygulanan kriyojenik işlemin AISI D3 çeliği üzerindeki karbür dağılımı, mikroyapı değişimleri, mikro ve makro sertlik değerlerine olan etkisini araştırmışlardır. Yapılan çalışmanın sonucunda, 36 saat bekletme süresinde mikroyapı homojenliği, karbür yüzdesi, makro ve mikro sertliğin en uygun değerlere ulaştığı belirtilmiştir.

Sri Siva vd. (2012), kriyojenik işlemin AISI 52100 çeliğinin aşınma dayanımını iyileştirmesi için çalışma yapmışlardır. Kriyojenik işlem uygulanmış olan çeliklerin aşınma dayanımlarının klasik işlem uygulanmış olan numunelere oranla %37 oranında arttığı belirlenmiştir. SEM analizi sonucunda kriyojenik işlem uygulamasının ardından mikroyapıda bulunan karbürlerin daha homojen bir şekilde yayıldığı ve küçüldüğü görülmüştür. Bu sonuç kriyojenik işlem ile kalıntı austenit fazının martenzit fazına dönüşmesi şeklinde yorumlanmıştır. Bu çalışma ile kriyojenik işlem uygulanan rulman çeliğinin aşınma direnci, sertlik ve mikroyapısında iyileşmeler olduğu ileri sürülmüştür.

Kıvak ve Şeker (2012), kriyojenik işlemin Ti6Al4V alaşımlı çeliğin takım ömrü ve mikroyapısı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Kriyojenik işlem ve temperleme işlemi uygulanmış takımların, işlem uygulanmamış takımlara göre takım ömründe %87 oranlarında bir artış sağlamıştır. Buna ek olarak uygulanan kriyojenik işlemin, karbür dağılımının homojen olmasını, karbür boyutlarının incelmelerini ve kalıntı austenitin martenzit fazına dönüşmesini sağladığı düşünülmektedir.

Çiçek vd. (2012), yaptıkları çalışmada; kriyojenik işlemin AISI D2 çeliğindeki takım aşınması, mikro sertlik, mikroyapı ve takım ömrü etkilerini incelemişlerdir. Elde edilen mikroyapı görüntüleri ve mikro sertlik değerleri uygulanan kriyojenik işlemin, daha homojen karbür dağılımı sağlamada ve kalıntı austenit fazın martenzit fazına dönüştürmede önemli bir rol oynadığını göstermiştir. Kriyojenik işlem görmüş olan takımların takım ömrü ve aşınması açısından daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Dixit vd. (2013), çalışmalarında kriyojenik işlem görmüş AISI D5 çeliğinin aşınma dayanımını ve sertlik değerini incelemişlerdir. Klasik ısıtma işlemi ile kriyojenik işlem karşılaştırıldığında; kriyojenik işlem görmüş numunelerin daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç, kriyojenik işlemin kalıntı austeniti azaltması ve buna bağlı olarak aşınma dayanımını ve sertlik değerlerini artırması şeklinde yorumlanmıştır.

Vahdat vd. (2013), kriyojenik işlemin W, Cr, ve V alaşımlı çeliğin mikroyapı ve çekme dayanımları üzerine olan etkisini araştırmışlardır. Numunelere -196°C sıcaklığında ve 3 farklı saat bekleme süresinde (12, 36 ve 48 saat) kriyojenik işlem uygulanmıştır. Tokluk, çekme dayanımı ve sertlik değerlerinde meydana gelen en fazla artışların 36 ve 48 saat bekleme sürelerinde olduğu tespit edilmiştir. Bekleme süresindeki artış ikincil karbürlerin hacimsel olarak artmasını sağlamıştır. 36 saat bekleme süresine kadar ikincil karbürlerin yoğunluğu artmış ve bu bekleme süresinden sonraki sürelerde azalmaların meydana geldiği ileri sürülmüştür.

Yan ve Li (2013), W9Mo3Cr4V yüksek hız çeliğine uygulanan kriyojenik işlemin çeliğin aşınma dayanımı, mekanik özellikleri ve mikroyapı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. 4 saat bekleme süresi boyunca numunelere kriyojenik işlem uygulanmıştır. Kriyojenik işlem sonrasında numunelerin aşınma dayanımlarında ve sertlik değerlerinde artışlar meydana gelmiştir. Bu artışların nedeni, kriyojenik işlem uygulamasıyla kalıntı austenit fazının martenzite dönüşmesi ve homojen ikincil karbür çökmesi şeklinde açıklanmıştır.

Uzun vd. (2014), yaptıkları araştırmada kriyojenik işlem görmüş ve farklı sıcaklıklarda temperlenmiş Vanadis 4 soğuk iş takım çeliğinin aşınmaya karşı davranışını incelenmişlerdir. Çelik numuneler gerekli zımparalama kademelerinden geçirilerek -145°C 'de (0.5, 1, 2, 4, 8, 12 ve 24 saat) süresince kriyojenik işleme tabi tutulmuşlardır. Aşınma dayanımı için deneyler, kuru ortamda 10 ve 20 N yükler altında, 0.3 m/s kayma hızı ile ve oda sıcaklığında ball-on-disk aşınma cihazında yapılmıştır. Kriyojenik işlem bekletme süresinin 1 saatten 12 saate yükselmesi ile birlikte tanelerin ince ve daha homojen olarak dağıldığı ve işlem süresinin 24 saate çıkarılması ile tanelerin tekrar irileştiği belirtilmiştir. Kriyojenik işlemin 24 saat bekleme süresinden sonra mekanik özellikleri negatif yönde etkilediği ileri sürülmüştür.

Amini vd. (2014), kriyojenik işlemin, AZ91 magnezyum alaşımlı çeliğinin aşınma direnci üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Malzemeler austenitleme sıcaklığına kadar ısıtıldıktan sonra yağda, suda ve sıvı azotta soğutularak sertleştirilmişlerdir. Isıl işlem sonrasında numunelerin -196°C 'de sıvı azot ortamında 24 saat bekletilmesi ile birlikte kriyojenik işlem uygulaması yapılmıştır. Numunelerin aşınma ve sertlik değerleri bakımından karşılaştırması yapıldığında, en düşük aşınma oranı ve en yüksek sertlik değerinin suda soğutularak sertleştirildikten sonra kriyojenik işlem uygulanmış olan numuneden elde edildiği belirtilmiştir. Çalışma kapsamında; SEM ve EDX incelemeleri sonucunda mikroyapıdaki karbür çökeltilerinin $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ bileşimli olduğu ve martenzit yapının oluştuğu savunulmaktadır.

Güneş ve vd. (2016), yaptıkları çalışmada; kriyojenik işlem görmüş soğuk iş takım çeliğinin (Vanadis 4) aşınma performansını incelemişlerdir. Numunelere -145°C 'de uygulanan kriyojenik işlem için farklı bekleme süreleri (0, 1, 12 ve 24 saat) seçilmiştir. 175°C ve 525°C 'lerde iki farklı temperleme işlemi uygulanmıştır. Aşınma deneyleri, ball-on-disk aşınma cihazında gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlar; 24 saat boyunca kriyojenik işlem uygulanmış ve 525°C 'de temperlenmiş numunelerin en iyi aşınma performansına sahip olduğunu göstermiştir. Bu durum artan sertlik

değerleri, ince homojen karbür parçacıklarının oluşumu ve austenitin tamamen martenzite dönüşmesi ile açıklanmıştır.

Li vd. (2016), kriyojenik işlemin, yüksek vanadyum alaşımlı çeliğin sertlik, darbe dayanımı ve aşınma direnci üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Kriyojenik işlem sonrasında büyük miktarlarda küçük ikincil karbür çökelmeleri tespit edilmiştir. Sertlik değeri hariç diğer mekanik özelliklerin geleneksel ısıtılma işlemi ile karşılaştırıldığında artışı belirlenmiştir. Kriyojenik bekleme süresinin artması ile çeliğin darbe dayanımı ve aşınma direnci daha da artmış, sertlik değeri ise giderek azalmıştır.

Demir ve Uygur (2017), yaptıkları çalışmada; sfero dökme demir ve gri dökme demir numunelerine 12 saat ve 36 saat bekleme sürelerinde -80°C sıcaklıkta kriyojenik işlem uygulamışlardır. Kriyojenik işlem görmüş ve görmemiş numunelerin çekme dayanımları, mikroyapısal değişimleri ve sertlik değerleri belirlenmiş olup birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Kriyojenik işlem ile gri dökme demir numunelerinde lamellerin homojen bir şekilde dağılım gösterdiği ve yoğun lamel kümelerinin oluştuğu, sfero dökme demirde ise küre şekil dağılımlarının daha düzenli hale geldiği ve mikroyapıda yoğun olarak dağıldığı görülmüştür. Kriyojenik bekleme süresi 36 saate çıkarıldığında ise her iki demir grubu içinde homojen matris yapılarının bozulduğu ve mekanik özelliklerin zayıfladığı belirtilmiştir. Sertlik ve çekme değerlerindeki düşüşün mikroyapıdaki bu değişim olduğu düşünülmektedir.

Durica vd. (2018), çalışmalarında -140°C 'de ve farklı bekleme sürelerinde (12, 24 ve 36 saat) kriyojenik işleme tabi tutulmuş olan Cr-V içerikli ledeburitik takım çeliğinin (Vanadis 6) mikroyapısını, faz yapısını ve sertlik değerlerini incelemiştir. Işık ve taramalı elektron mikroskopları ile mikroyapı, X-ışını kırınım cihazı ile faz değerlendirmeleri ve vickers sertlik ölçme yöntemi ile de sertlik değerleri belirlenmiştir. Kriyojenik işlemin austenit miktarını yaklaşık olarak %85 oranında azalttığı ve küçük, küresel karbür yapıları oluşturduğu görülmüştür.

Tablo 2.1’de tez konusu ile ilgili yapılmış olan çalışmaların literatür özet bilgilerine yer verilmiştir.

Tablo 2.1 Literatür özeti

Referans	Malzeme	Kriyojenik Koşullar	Mekanik Özellikler	Mikro Yapı	Özel Not
Gordon ve Cohen (1942)	Tungsten alaşımlı çelik	-196 °C	σ :+ σ_{∞} :- H:+	Karbür çökmesi:+ $\gamma \rightarrow M$	-
Tavazde vd. (1975)	Cr-Mn çeliği	+20°C, -78°C, -196°C ve -253°C	σ :+ σ_{∞} :- Süneklik:- H:+	$\gamma \rightarrow M$	Kriyojenik işlem sıcaklığı ↓ - Mekanik özellikler ↑
Stepanov ve Lokhankina (1979)	Cr-Mn çeliği	-196°C	σ :+ Yorulma direnci:+	$\gamma \rightarrow M$	-
Barron (1982)	Paslanmaz çelik Takım çeliği	-84°C ve -196°C	Aşınma direnci:+	-	-
	Dökme demir Düşük karbonlu çelik	-84°C ve -196°C	Aşınma direnci:-		
Krzanowski (1988)	Fe-30Mn-9Al-0.9C çeliği	-76°C ve -196°C	σ :+ σ_{∞} :- H:+	HMK→YMK $\gamma \rightarrow M$	Kriyojenik işlem sıcaklığı ↓ - Mekanik özellikler ↑
Koshelev vd. (1991)	KhN35VTYu alaşımlı çelik	-196°C ve -253°C	σ :+ σ_{∞} :+ Süneklik:- Darbe dayanımı:-	γ çökmesi Homojen martenzit	Kriyojenik işlem sıcaklığı ↓ - Mekanik özellikler ↑
Ma vd. (1992)	Austenitik çelik	-196°C	σ :+ Süneklik:-	$\gamma \rightarrow M$	-
Collins ve Moore (1993)	Vanadis 4 AISI H13 AISI D2	-40°C, -100°C ve -196°C	H:+	Karbür çökmesi:+ $\gamma \rightarrow M$	Temperleme sıcaklığı ↑ - H ↓ Kriyojenik bekleme süresi ↑ - H ↑ Kriyojenik işlem sıcaklığı ↓ - H ↑
Meng vd. (1994)	Cr ve Mo alaşımlı takım çelikleri	-80°C ve -180°C	Aşınma direnci:+	$\gamma \rightarrow M$	-
Collins ve Dornier (1997)	AISI D2	-140°C ve -196°C	Aşınma direnci:+ H:+ Tokluk:+	$\gamma \rightarrow M$	Homojen ve ince karbür dağılımı
Yun vd. (1998)	M2 ve T1 çelikleri	-196°C (24h ve 48h)	σ :+ σ_{∞} :- H:+	$\gamma \rightarrow M$	Kriyojenik bekleme süresi ↑ Mekanik özellikler ↑
Kim vd. (1999)	Al 644 Al 648	-196°C	σ :+ σ_{∞} :+	-	-
Chen vd. (2002)	Al alaşımı	-196°C	σ :+ H:+ Yorulma direnci:Sabit	$\gamma \rightarrow M$	Homojen karbür dağılımı
Prabhakaran vd. (2004)	EN353 çeliği	20°C, -80°C ve -196°C	Darbe direnci:+ H:+ Aşınma direnci:+	$\gamma \rightarrow M$	Homojen ve ince karbür dağılımı
Zhirafar vd. (2007)	Soğuk iş takım çeliği	-196°C	H:+ Yorulma direnci:+ Tokluk:-	$\gamma \rightarrow M$	-
Akhbarizadeh vd. (2009)	D6 takım çeliği	-80°C ve -196°C (20h ve 40h)	H:+ Aşınma direnci:+	$\gamma \downarrow$	Kriyojenik bekleme süresi ↑ - Mekanik özellikler ↑ Kriyojenik işlem sıcaklığı ↓ - Mekanik özellikler ↑
Nirbhavne ve Dhokey (2009)	D3 çeliği	-196°C	H:+ Aşınma direnci:+	Karbür boyutları ↓	Homojen ve ince karbür dağılımı
Amini vd. (2010)	Cr ve Mo alaşımlı takım çelikleri	-80°C ve -196°C	H:+ Aşınma direnci:+	$\gamma \rightarrow M$	Kriyojenik bekleme süresi ↑ - Mekanik özellikler ↑ Kriyojenik işlem sıcaklığı ↓ - Mekanik özellikler ↑
Das vd. (2010)	AISI D2	-196°C	σ :+ H:- Aşınma direnci:+	$\gamma \downarrow$	Optimum bekleme süresi: 36h
Koneshloou vd. (2011)	AISI H13 çeliği	-80°C ve -196°C	σ :+ σ_{∞} :- H:+	$\gamma \rightarrow M$	Homojen ve ince karbür dağılımı
Akhbarizadeh vd. (2012)	AISI D2	-196°C	Korozyon dayanımı:+ Aşınma direnci:+	$\gamma \rightarrow M$	Homojen ve ince karbür dağılımı
Amini vd. (2012)	AISI D3	-196°C	H:+	Karbür çökmesi:+	Optimum bekleme süresi: 36h
Sri Siva vd. (2012)	AISI 52100	-196°C	H:+ Aşınma direnci:+	$\gamma \rightarrow M$ Karbür boyutları ↓	Homojen ve ince karbür dağılımı
Kıvak ve Şeker (2012)	Ti6Al4V alaşımlı çelik	-196°C	Aşınma direnci:+ Takım ömrü:+	$\gamma \rightarrow M$ Karbür boyutları ↓	Homojen ve ince karbür dağılımı
Çiçek vd. (2012)	AISI D2	-196°C	H:+ Aşınma direnci:+ Takım ömrü:+	$\gamma \rightarrow M$	Homojen ve ince karbür dağılımı
Dixit vd. (2013)	AISI D5	-196°C	H:+ Aşınma direnci:+	$\gamma \downarrow$	Kriyojenik işlem sıcaklığı ↑ - Mekanik özellikler ↑
Vahdat vd. (2013)	W, Cr, ve V alaşımlı çelik	-196°C (12h, 36h ve 48h)	σ :+ H:+ Tokluk:+	İkincil karbür artışı	Optimum bekleme süresi: 36h
Yan ve Li (2013)	W9Mo3Cr4V yüksek hız çeliği	-196°C	H:+ Aşınma direnci:+	$\gamma \rightarrow M$	Homojen ve ince karbür dağılımı
Uzun vd. (2014)	Vanadis 4	-145°C	0-12h Aşınma direnci:+ 12h-24h Aşınma direnci:-	0-12h Karbür boyutları ↓ 12h-24h Karbür boyutları ↑	0-12h Homojen ve ince karbür dağılımı 12h-24h İn karbürler
Güneş vd. (2015)	Vanadis 4	-145°C (Temperleme: 175°C ve 525°C)	H:+ Aşınma direnci:+	$\gamma \rightarrow M$	Optimum bekleme süresi: 24h Optimum temperleme sıcaklığı: 525°C
Li vd. (2016)	Yüksek vanadyum alaşımlı çelik	-196°C	H:- Aşınma direnci:+ Darbe direnci:+	$\gamma \rightarrow M$	Küçük ikincil karbür çökelmeleri
Demir ve Uygur (2017)	Sfero dökme demir Gri dökme demir	-80°C (12h ve 36h)	0h-12h σ :+ H:+ Aşınma direnci:+ 12h-36h σ :- H:- Aşınma direnci:-	0h-12h Düzgün mikroyapı 12h-36h Mikro yapıda bozulma	Kriyojenik bekleme süresi ↑ - Mekanik özellikler ↓
Durica vd. (2018)	Vanadis 6	-140°C	σ :+ H:-	$\gamma \downarrow$	Küçük ve küresel karbür dağılımı

Kapsamlı bir şekilde yapılmış olan literatür taraması; kriyojenik işlemin çeliklerin mekanik özelliklerini iyileştirdiğini göstermiştir. Aşınma dirençlerindeki artış, kriyojenik işlem ile kalıntı austenit fazının martenzit fazına dönüşmesi ve homojen karbür çökelmelerinin oluşması şeklinde açıklanmıştır.

Sonuç olarak yukarıda yer alan çalışma özetlerine de bakıldığında, kriyojenik işlemin malzemelerin çekme dayanımı, kırılma tokluğu, yorulma dayanımı, mikroyapı, aşınma dayanımı, kalıntı austenit, kalıntı gerilme değerlerinde iyileşmeler sağladığını belirlemiştir. Sertlik değerleri ile ilgili genel bir artış olduğu tespit edilmiş olmakla birlikte bazı çalışmalarda tam tersi olarak sertlik düşüşlerinin ya da önemsiz artışların olduğu belirlenmiştir.

Son yıllarda yapılan çalışmalarda, daha çok çeliklerin mekanik özelliklerini iyileştirmek amacı ile kriyojenik işlem parametrelerinin ve bekleme sürelerinin en uygun değerlere getirilmeye çalışıldığı görülmektedir.

3. TAKIM ÇELİKLERİ

3.1 Takım Çeliklerinin Tanımı ve Genel Özellikleri

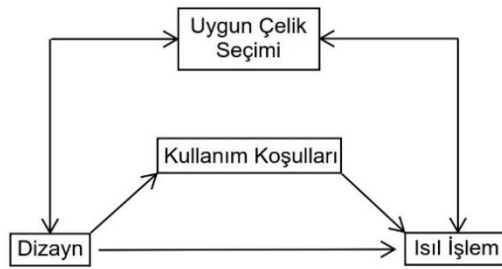
Çelik genellikle belirli oranda karbon içeriğinin yer aldığı bir demir-karbon alaşımı olarak tanımlanır. Çeliğin karbon değeri yaklaşık olarak %0,07 ile %2 arasında değişmektedir. Bazı durumlarda %2'den fazla karbon içeren yüksek alaşımlı çelikler, yüksek orandaki alaşım elementleri nedeni ile çelik grubuna dahil edilirler. Kimyasal bileşimine göre çelikleri alaşımlı çelikler ve alaşımsız çelikler olmak üzere iki gruba ayırmak mümkündür. Alaşımlı çeliklerde, kendi içinde düşük ve yüksek alaşımlı çelikler olmak üzere iki alt sınıfa ayrılırlar. Düşük alaşımlı çeliklerde alaşım elementleri toplamda % 5'in altında olmakta iken takım çelikleri ve paslanmaz çelikler gibi yüksek alaşımlı çeliklerde %30'lara kadar çıkmaktadır. Kompozisyonuna, sahip olduğu fazlara ve içerdiği bileşenlerine bağlı olarak çelikler çok geniş bir özellik yelpazesine sahiptirler.

Takım çelikleri, çelik sınıflandırılmasında ayrı bir grup olarak ele alınmakta ve incelenmektedir. Bunun nedeni çeliklere nazaran özellikle çalışma koşulları bakımından farklılık göstermeleridir. Diğer sınıflardaki çeliklere göre daha ağır çalışma koşullarında kullanılan takım çeliklerinden, düşük veya yüksek sıcaklıklardaki kullanımları sırasında, yüksek hızlarda ve yüksek gerilmelerde sürekli aynı performansı göstermeleri istenir. Çalışma koşullarının gerektirdiği özellikler, karbonun yanı sıra bileşiminde bulunan alaşım elementleri ile sağlanır. Bu çeliklere üstün özellikler kazandıran başlıca alaşım elementleri; krom, molibden, vanadyum, volfram ve kobalttır.

Takım çelikleri, toplam çelik üretiminin nispeten küçük bir yüzdesini oluşturmakla beraber diğer çelik ürünlerinin ve mühendislik malzemelerinin üretiminde kullanıldıkları için önemli bir pozisyona sahiptirler. Takım çelikleri, sıcak ya da soğuk haldeki iş parçasını kesme, dövme, delme, eğme, bükme, form verme, ekstrüzyon ve benzeri yöntemlerle şekillendiren takım ve kalıpların yapımında kullanılan çelik grubudur. Yüksek nitelikte üretilen takım çelikleri, takım ve kalıp yapımı dışında uç özelliklere sahip makine parçalarının imalatında da

kullanılmaktadır. Takım çeliklerinin arzu edilen özelliklerinden bazıları yüksek aşınma direnci, yüksek sertlik, yüksek tokluk, yüksek sıcaklık mukavemeti, yüksek işlenebilirlik, yüksek sertleşebilirlik ve homojen mikroyapıda olmalarıdır.

Takım çeliklerinin kullanım ömrü, uygun çeliğin seçilmesi ve ısıtılmasının iyi olması kadar dizayn ve kullanım koşullarına da bağlıdır. Şekil 3.1’de takım çeliklerinin kullanım ömrünü etkileyen etmenlerin birbiriyle olan ilişkileri gösterilmektedir. Bu zincirin herhangi birinde bir bozukluk ve yanlışlık olması durumunda takım çeliğinde çatlamlar veya kırılmalar meydana gelebilir.



Şekil 3.1 Takım çeliklerinin kullanım ömrünü etkileyen etmenler

3.2 Takım Çeliklerinin Sınıflandırılması

Günümüzde 500’den fazla farklı bileşim ve özellikte takım çeliği mevcuttur. Otomotiv Mühendisleri Derneği (SAE) ve Amerikan Demir Çelik Enstitüsü (AISI), sertleştirme ortamlarını ve genel kullanım alanlarını göz önüne alarak takım çeliklerini Tablo 3.1’ de görüldüğü gibi farklı harflerle simgelemiş ve 7 ana gruba ayırmıştır.

Tablo 3.1. Takım çeliklerinin sınıflandırılması

Grup	Sembol
Suda Sertleşen Takım Çelikleri	W
Şok Dirençli Takım Çelikleri	S
Soğuk İş Takım Çelikleri	
Yağda sertleşen	O
Havada sertleşen	A
Yüksek karbonlu yüksek kromlu	D
Sıcak İş Takım Çelikleri	
Kromlu	H10-H19
Volframlı	H20-H39
Molibdenli	H40-H59
Yüksek Hız Takım Çelikleri	
Volframlı	T
Molibdenli	M
Plastik Kalıp Takım Çelikleri	P
Özel Amaçlı Takım Çelikleri	L

3.3 Soğuk İş Takım Çelikleri

Soğuk iş takım çeliklerinin içerdiği karbon miktarı %0,3 ile %2,5 arasında değişir ve yüksek alaşımlı soğuk iş takım çeliklerinde bu değer %3' e kadar ulaşır. Alaşım elementi olarak karbür oluşturan krom, vanadyum, molibden ve volframın yanı sıra nikel ve manganda bulundurulur. Yüksek sıcaklıklarda kullanılmadıkları için bileşimlerinde, yüksek sıcaklık mukavemetini kararlı kılan kobalt elementi bulunmamaktadır. Düşük alaşımlı soğuk iş takım çeliklerinde alaşım elementi miktarı %5 seviyelerinde iken yüksek alaşımlılarda bu oran %10 ile %30 arasında değişmektedir. Sertleşme derinliği özellikle krom, molibden ve nikel gibi elementlerle artırılabilir. Alaşımlama türü ve miktarına göre havada, yağda veya gerektiğinde sıcak banyoda su verme ile sertleştirilirler. Diğer takım çeliklerine göre daha geniş kullanım alanına sahip olan ve takım çeliklerinin önemli bir sınıfını oluşturan soğuk iş takım çelikleri daha çok 200°C'nin altındaki sıcaklıklarda bulunan iş parçalarının, talaşlı ve talaşsız şekil verme işlemlerinde (eğme, kesme, bükme, form verme ve sıvama vb.) kullanılmaktadırlar. (Takmaz, 2018) İçerdiği karbon oranına ve alaşım elementine göre yeterli aşınma dayanımı, yüksek sertlik değeri,

yüksek tokluk, homojen mikroyapı ve kolay işlenebilirlik gibi özellikler kullanım amacına göre sağlanabilmektedir.

3.3.1 Soğuk iş takım çeliklerinin çeşitleri

Soğuk iş takım çelikleri, AISI ve SAE'ye göre soğutma şartları, bileşimleri ve sertleşme sıcaklıkları dikkate alınarak üç şekilde gruplandırılırlar. Ayrıca bu üç grubun dışında özel olarak üretilen standart dışı soğuk iş takım çelikleri de mevcuttur.

3.3.1.1 Yağda sertleşen soğuk iş takım çelikleri

Yağda sertleşen soğuk iş takım çelikleri, yüksek karbonlu (%0,90-1,50 C) çeliklerdir ve yapılarında krom, volfram ve mangan içerirler. O simgesi ile gösterilirler. Suda sertleşen takım çeliklerinden daha yüksek sertleşebilirliğe sahiptirler. Isıl işlemde çarpılmaya uğrama ve çatlama riski suda sertleşen takım çeliklerine göre daha düşüktür. Tablo 3.2'de yağda sertleşen soğuk iş takım çeliklerinin kimyasal bileşimlerinin limitlerine ve çeşitlerine yer verilmiştir. O6 kalite çeliği oldukça yaygın olarak kullanılan yağda sertleşen soğuk iş takım çeliklerindendir. (Yamanoğlu, 2015) O6 kalite çeliği, yapısındaki karbonun bir kısmını grafit olarak bulundurmaktadır. Bu nedenle diğerlerine göre talaşlı işlemeye daha elverişlidir. Ayrıca yapısında bulunan grafit partikülleri çalışma şartlarında yağlama etkisi yaratarak takım ömrünün iyileşmesine sebep olmaktadır.

Tablo 3.2 Yağda sertleşen soğuk iş takım çeliklerinin çeşitleri ve kimyasal bileşimlerinin limitleri (Arslan, 2010)

AISI	Kimyasal Bileşim(ağ.%)							
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	W	V
O1	0,85-1,00	1,00-1,40	0,50 maks	0,40-0,60	0,30 maks	...	0,40-0,60	0,30 maks
O2	0,85-0,95	1,40-1,80	0,50 maks	0,50 maks	0,30 maks	0,30 maks	...	0,30 maks
O6	1,25-1,55	0,30-1,10	0,55-1,50	0,30 maks	0,30 maks	0,20-0,30	...	...
O7	1,10-1,30	1,00 maks	0,60 maks	0,35-0,85	0,30 maks	0,30 maks	1,00-2,00	0,40 maks

3.3.1.2 Havada sertleşen soğuk iş takım çelikleri

Havada sertleşen soğuk iş takım çelikleri A harfi ile gösterilirler. Bu grupta bulunan çelikler, yaklaşık olarak %1 karbon, en fazla %5 krom, %1 molibden ve %2 mangan içerirler. Bileşimlerinde molibden ve mangan gibi alaşım elementlerinin bulunması ile sertlik değeri artırılabilir. Bu nedenle havada sertleşen soğuk iş takım çeliklerinin çoğu oldukça iyi derecede sertleşme yeteneğine sahiptirler. Yağda sertleşen soğuk iş takım çelikleri ile karşılaştırıldıklarında aşınma dirençlerinin daha yüksek olmasına rağmen, yüksek sıcaklık dirençleri iyi değildir. Tablo 3.3’de havada sertleşen soğuk iş takım çeliklerinin kimyasal bileşimlerinin limitleri ve çeşitlerine yer verilmiştir.

Tablo 3.3 Havada sertleşen soğuk iş takım çeliklerinin çeşitleri ve kimyasal bileşimlerinin limitleri (Yamanoğlu, 2015)

AISI	Kimyasal Bileşim(ağ.%)							
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	W	V
A2	0,95-1,05	1,00 maks	0,50 maks	4,75-5,50	0,30 maks	0,90-1,40	...	0,15-0,50
A3	1,20-1,30	0,40-0,60	0,50 maks	4,75-5,50	0,30 maks	0,90-1,40	...	0,80-1,40
A4	0,95-1,05	1,80-2,20	0,50 maks	0,90-2,20	0,30 maks	0,90-1,40	...	...
A6	0,65-0,75	1,80-2,50	0,50 maks	0,90-1,20	0,30 maks	0,90-1,40	...	...
A7	2,00-2,85	0,80 maks	0,50 maks	5,00-5,75	0,30 maks	0,90-1,40	0,50-1,50	3,90-5,15
A8	0,50-0,60	0,50 maks	0,75-1,10	4,75-5,50	0,30 maks	1,15-1,65	1,00-1,50	...
A9	0,45-0,55	0,50 maks	0,95-1,15	4,75-5,50	1,25-1,75	1,30-1,80	...	0,80-1,40
A10	1,25-1,50	1,60-2,10	1,00-1,50	...	1,55-2,05	1,25-1,75	...	...

Havada sertleşen soğuk iş takım çelikleri arasında en çok kullanılanları A2 ve A7 kalite çelikleridir. A2 kalite takım çeliğinden imal edilen kalıplara aşınma direncini ve yüzey sertliğini iyileştirmek amacıyla konvansiyonel ısıtma işleminden sonra nitrürleme işleminin uygulanması gerekebilir. Bileşiminde yüksek oranda karbon ve vanadyum içeriğine sahip olan A7 kalite çeliği, aşınma dayanımının yüksek olmasına

rağmen tokluğun en önemli kriter olduğu çalışma koşulları için tercih edilmemelidir. A8 ve A9 kalite çelikleri, karbon içerikleri düşük olduğundan diğer çeliklere göre daha yüksek darbe dayanımına ve daha düşük aşınma dayanımına sahiptirler. A10 kalite çeliği ise yağda sertleşen soğuk iş takım çeliği gibi yapısında grafit bulundurur.

3.3.1.3 Yüksek karbonlu ve yüksek kromlu soğuk iş takım çelikleri

Bu sınıfa ait soğuk iş takım çeliklerinin kimyasal bileşiminde yüksek oranda karbon (%1,40-2,50 C) ve %12 düzeyinde krom bulunmaktadır. Yüksek karbonlu ve yüksek kromlu soğuk iş takım çelikleri D simgesi ile gösterilirler. Ayrıca vanadyum, molibden, kobalt ve volfram gibi alaşım elementlerini de içerebilirler. Bu çeliklerin molibden içerenleri havada soğutma ile sertleşebilirken, molibden içermeyen grubu yağda su verilerek sertleştirilirler. Tablo 3.4’de yüksek karbonlu yüksek kromlu soğuk iş takım çeliklerinin kimyasal bileşimlerinin limitleri ve çeşitlerine yer verilmiştir. Yüksek karbonlu yüksek kromlu soğuk iş takım çeliklerinin ısıtılmasında çarpılma ve çatlama riski az seviyededir. (Takmaz, 2018) Bu çeliklerin abrasif aşınma dayanımı, yapısında bulunan iri karbürlerin ($M_{23}C_6$ - M_7C_3) varlığından ötürü yüksektir. Ayrıca kimyasal bileşiminde var olan karbon, molibden ve vanadyum miktarlarının artması sonucunda MC, M_2C tipi gibi yüksek sertlik değerlerine sahip karbürlerin oluşumu artacağı için aşınma dayanımları da artar.

Tablo 3.4. Yüksek karbonlu yüksek kromlu soğuk iş takım çeliklerinin çeşitleri ve kimyasal bileşimlerinin limitleri (Arslan, 2014)

AISI	Kimyasal Bileşim(ağ.%) [*]							
	C	Mn	Si	Cr	Mo	W	V	Co
D2	1,40-1,60	0,60 maks	0,60 maks	11,00-13,00	0,70-1,20	...	1,00 maks	...
D3	2,00-2,35	0,60 maks	0,60 maks	11,00-13,50	...	1,00 maks	1,00 maks	...
D4	2,05-2,40	0,60 maks	0,60 maks	11,00-13,00	0,70-1,20	...	1,00 maks	...
D5	1,40-1,60	0,60 maks	0,60 maks	11,00-13,00	0,70-1,20	...	1,00 maks	2,50-3,50
D7	2,15-2,50	0,60 maks	0,60 maks	11,50-13,50	0,70-1,20	...	3,80-4,40	...

^{*}Ni %0,30 maks.

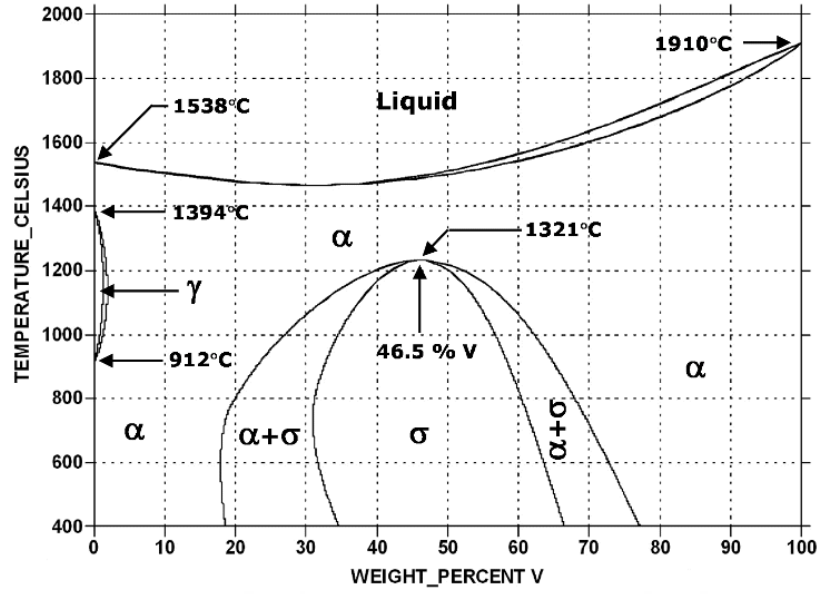
D7 kalite soğuk iş takım çeliği, bu gruptaki çelikler arasında abrasif aşınma dayanımı en yüksek olan fakat işlenebilirliği ve tokluğu en düşük olan soğuk iş takım çeliğidir. D5 kalite soğuk iş takım çeliği ise kimyasal bileşiminde kobalt içermesinden ötürü yüksek sıcaklıklarda (400°C'ye kadar) kesme ve şekillendirme işlemlerinde kullanılmaktadır. (Yamanoğlu, 2015) Yüksek karbonlu yüksek kromlu soğuk iş takım çelikleri grubunda yer alan çelikler arasında en geniş kullanım alanına D2 kalite soğuk iş takım çelikleri sahiptirler.

3.3.1.4 Özel soğuk iş takım çelikleri

Piyasada bazı özel üretim yöntemleri ve yeni nesil takım çelikleri geliştirmek amacı ile özel olarak üretilen soğuk iş takım çelikleri de bulunmaktadır. Bu tez kapsamında yeni nesil vanadyum içerikli çelikler kullanılmıştır.

Vanadyum elementi özellikle yüksek alaşımlı soğuk iş takım çelikleri ile yüksek hız takım çeliklerinde kullanılmaktadır. Vanadyum, mikroyapıda karbür oluşturu element olarak yer almakta ve genellikle düşük oranlarda kullanılmaktadır. Çeliğin yapısına eklenen oldukça az orandaki vanadyum alaşımı bile çeliğin özelliklerini büyük ölçüde etkilemektedir. Genel olarak çelik bileşiminde artan vanadyum oranına bağlı olarak karbon oranı da artmaktadır. Kararlı karbür yapma özellikleri nedeni ile daha çok kesici takımlarda tercih edilmektedirler. Vanadyum, mukavemeti artıran bir element olup tane büyümesini engelleyici olarak davranmakta ve kesici uçların ömrünü uzatmaktadır.

Genellikle alaşımlı takım çeliklerinde bulunan vanadyumun oranı %0,025-3,2 arasında değişmektedir. Takım çeliklerinde özellikle krom ile birlikte ve yüksek hız çeliklerinde de volfram ile birlikte kullanılırlar. Vanadyum çelikler içerisinde çok düşük oranlarda (ağırlıkça %0.1) kullanıldıklarında bile ısıtma işlemi sırasında tane büyümesine engel olmaktadır. Böylece tane yapılarında incelme ve fiziksel özelliklerde iyileşmeler sağlanmaktadır. Çelikler içerisinde yüksek miktarlarda (ağırlıkça %3-15) kullanıldıklarında ise aşınma ve sertlik gibi mekanik özellikleri artırmaktadır.

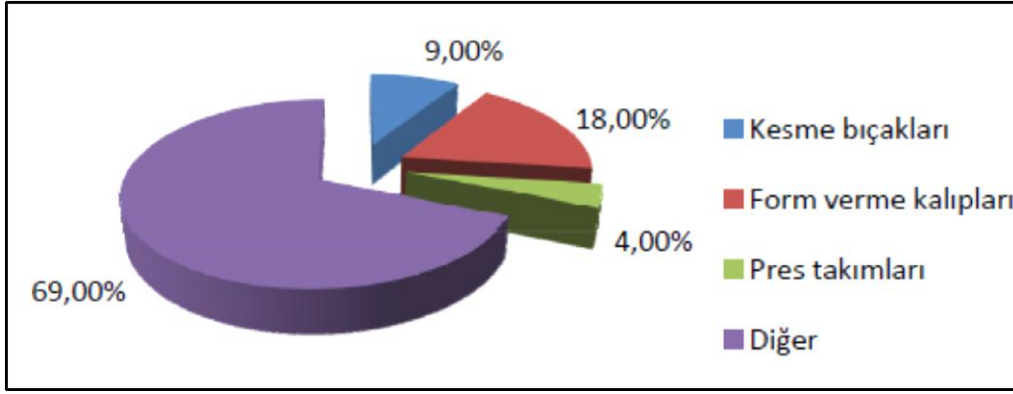


Şekil 3.2 Yüzde ağırlıkça vanadyum (Smith, 1984)

Şekil 3.2’de Fe-V denge diyagramı görülmektedir. Bu diyagramda vanadyum içerikli çeliklere ait olan austenitleme sıcaklığının 912°C ile 1394°C aralığında değiştiği görülmektedir. Vanadyum içerikli çeliklerin sertleşmesini sağlayan durum, austenitleme sıcaklığında belirlenen süre beklenmesi ile oluşan *austenitin*, hızlı soğuma işlemi sonrasında hacim merkezli tetragonal kristal kafes yapısına sahip olan *martenzit* fazına dönüşmesidir.

3.3.2 Soğuk iş takım çeliklerinin kullanım alanları

Soğuk iş takım çeliklerinin kullanım alanları TS 3921 ve ASTM A681 grupları ile standartlaştırılmıştır. Bu standartlara göre kullanım alanları; kesme bıçakları, bükme kalıpları, sıvama kalıpları, soğuk form verme kalıpları, baskı makaraları, zimbalar, pres takımları, ölçme aletleri ve benzeri soğuk iş uygulamaları olarak belirlenmiştir. Şekil 3.3’de soğuk iş takım çeliklerinin endüstrideki kullanım yüzdeleri verilmiştir.

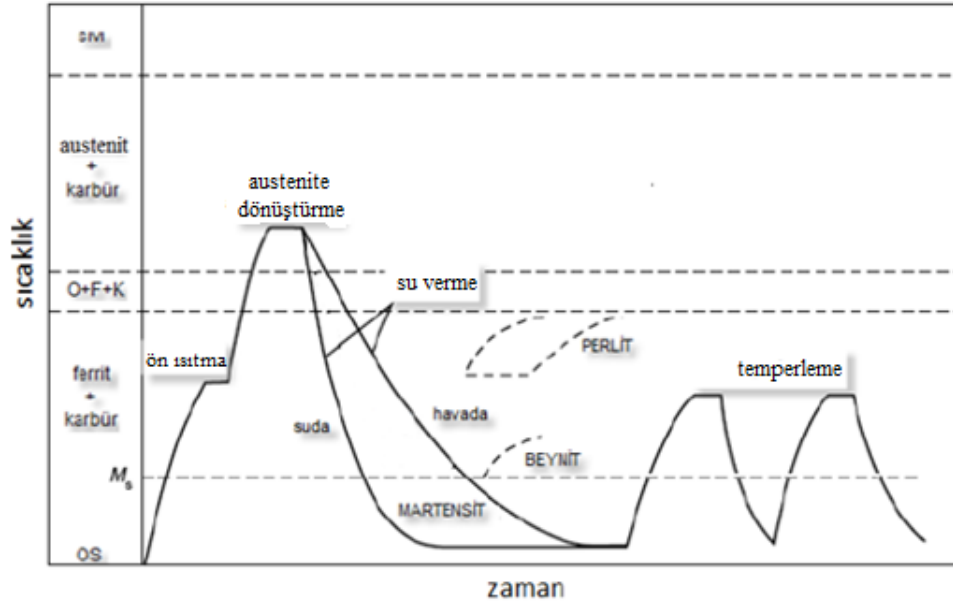


Şekil 3.3 Soğuk iş takım çeliklerinin endüstrideki kullanım yüzdeleri

3.3.3 Soğuk İş Takım Çeliklerine Uygulanan Isıl İşlemler

Takım çelikleri üzerine bir takım ısı işlemleri uygulanarak mekanik özellikleri daha da geliştirilebilmektedir. Uygulanan ısı işlem ve ısı işlem sonrasında elde edilen mikroyapılar takım çeliğinin mekanik özelliklerini fazlasıyla etkilemektedir. Aşınma direnci, tokluk ve yorulma direnci gibi mekanik özellikleri austenitleme, soğutma ve temperleme işlemleri ile olumlu ya da olumsuz yönde değiştirmek mümkün olmaktadır. Soğuk iş takım çelikleri diğer takım çeliklerine göre en zor ortamlarda çalışan grup olmakla birlikte yanlış uygulanan ısı işlem takım performansını olumsuz yönde etkileyerek kısa sürede hasarlara neden olabilmektedir. Bu nedenle oluşacak olan hasarları en aza indirmek amacıyla ısı işlem adımlarının ve parametrelerinin uygun bir şekilde seçilmesi gerekmektedir. Soğuk iş takım çeliklerine uygulanan ısı işlem basamakları sırasıyla aşağıdaki gibidir;

- 1- Ön ısıtma,
- 2- Austenitleme,
- 3- Su verme,
- 4- Kriyojenik işlem,
- 5- Temperleme.

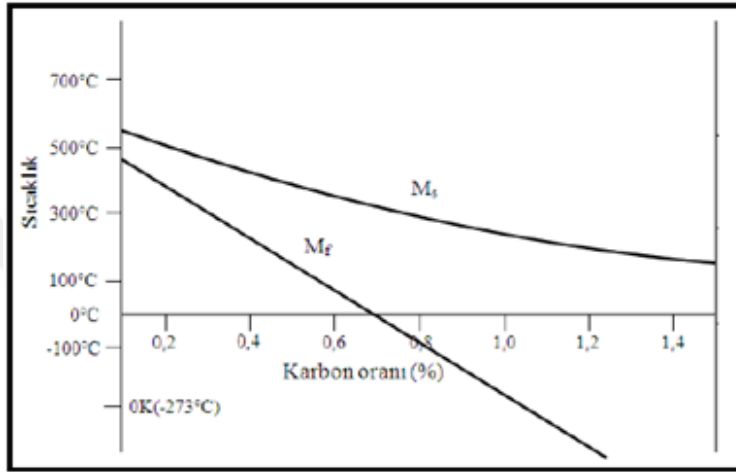


Şekil 3.4 Takım çeliklerinin sertleştirilmesinde uygulanan konvansiyonel ısıtım işlem basamakları
(Arslan, 2014)

Ön ısıtma işlemi, takım çeliklerinde ulaşılması gereken nihai sıcaklık olan austenitleme sıcaklığına çıkışı mümkün olduğunca daha az termal gerilme oluşturarak gerçekleştirmek için uygulanan işlemdir.

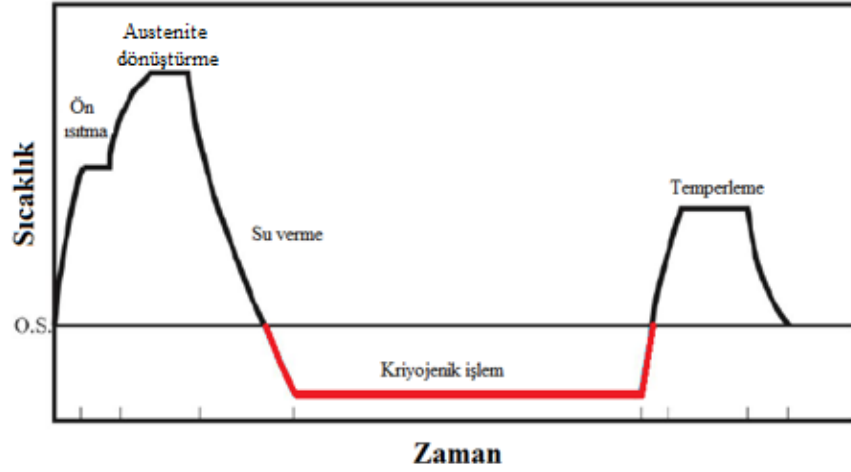
Austenitleme işlemi, çözme tavlı olup takım çeliklerinin aşınma dayanımı, tokluk gibi mekanik özelliklerini doğrudan etkileyen işlemlerden biri olup son derece önem arz eden bir basamaktır. Austenitleme işlemi, takım çeliklerinde ön ısıtma adımının ardından uygulanır ve işlem süresince tüm kesit boyunca ferrit (α) austenit (γ) dönüşümünün yanı sıra yeterli karbür çözünmesini sağlar. Artan austenitleme sıcaklığı ile takım çeliği matrisinde daha fazla oranda karbon ve diğer alaşım elementleri bulunması çeliğin sahip olduğu M_s sıcaklığını düşürerek su verme sonrasında martenzite dönüşmeden kalmış austenit miktarını artırır. Sonrasında artan austenitleme sıcaklığı ile artacak olan kalıntı austenitin tamamen martenzite dönüştürülmesi takım çeliğinin başta sertlik ve aşınma direnci olmak üzere mekanik özelliklerini pozitif yönde etkiler.

Austenitleme işleminin ardından gerçekleştirilen su verme işlemi (quenching) çelikte sertleştirme sonrası elde edilmesi istenen nihai yapı olan martenzitik yapının elde edilmesi sağlar. Martenzit yapısının sabit bir sıcaklıkta oluşmak yerine M_s ve M_f (martenzit başlama ve bitiş sıcaklıkları) olarak tanımlanan sıcaklık aralıklarında oluştuğu bilinmektedir. Bu durum çeliğin soğutulması ile daha fazla austenit yapısının martenzit yapısına dönüşümünün sağlanması mümkün kılar. Martenzit dönüşümü, martenzit bitiş sıcaklığına (M_f) erişilene kadar devam eder.



Şekil 3.5 Çeliğin karbon oranına bağlı olarak M_s ve M_f sıcaklıklarının değişimi (Uluğ, 2006)

Çeliğin yapısında yumuşak olan kalıntı austenit ile sert martenzitin bir arada bulunması istenmeyen bir durumdur. Yapıdaki kalıntı austenit, çeliğin başta sertliği olmak üzere tüm mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkiler. Bu nedenle kalıntı austenitin martenzite dönüşümü gereklidir. Bu dönüşüm, neredeyse kalıntı austenitin tamamına yakınının martenzite dönüştüğü kriyojenik işlem ile veya daha düşük oranlarda martenzit dönüşümünün sağlandığı temperleme ile gerçekleştirilebilir.



Şekil 3.6 Su verme işlemi sonrası kriyojenik işlem aşaması

Soğuk iş takım çeliklerine uygulanan kriyojenik işlemlerde perlitik ve beynitik dönüşümlere izin verilmeden martenzitik yapı elde edilir. Elde edilen martenzit yapısı son derece sert, kırılgan, kararsız ve gerilimli bir faz olup kullanılabilir bir yapı değildir. Martenzit fazı geçiş fazı olup daha sonra ulaşmak istenilen temperlenmiş martenzit fazı için bir durak niteliğindedir. Soğuk iş takım çeliklerinde temperleme işlemi sonucunda istenilen mekanik özelliklerin sağlanması için kalıntı austenit miktarının %5'in altında olması gerekmektedir. Temperleme işlemi ile çeliğin tokluğunun artırılması ve sertleştirme sonucunda oluşan iç gerilmelerin giderilmesi amaçlanmaktadır. Ancak tokluktaki artış sertlikteki azalmaya neden olacağından temperleme işlemi bu iki karakteristiğin optimum kombinasyonunu sağlayacak şekilde belirlenmelidir.

4. KRIYOJENİK İŞLEM

4.1 Kriyojenik İşlemin Tanımı

Takım çelikleri, yapılarında yüksek sıcaklıkta sertliğini korumasını sağlayacak alaşım elementleri bulunmamasından dolayı uzun süreli yüksek sıcaklıkta ve tekrarlayan ısınma ve soğuma işlemlerinde kullanımları sınırlandırılmıştır. Soğuk iş takım çeliklerine uygulanan işlemler ile takım ömrünü uzatmak, dayanımı artırmak ve mekanik özellikleri iyileştirmek amaçlanmaktadır.

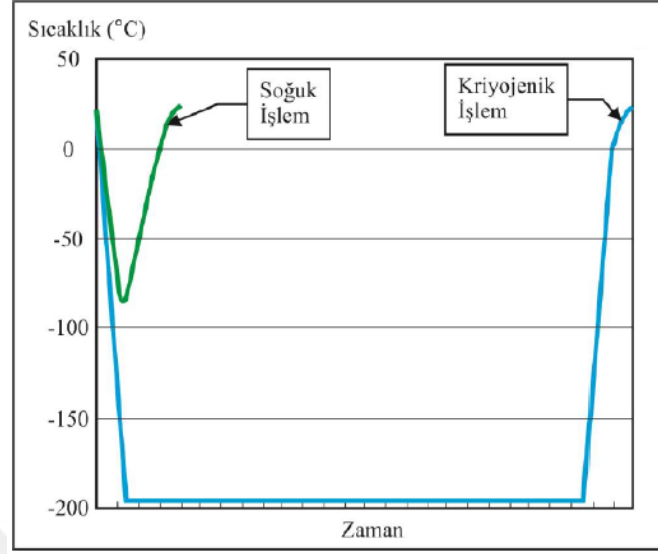
Kriyojenik işlem son yıllarda takımların ömrünü artırmak ve mühendislik malzemelerinin mekanik özelliklerini iyileştirmede yaygın olarak kullanılan konvansiyonel (geleneksel) ısıtma işlemi tamamlayıcı nitelikte bir soğutma işlemidir. Kriyojenik işlem azot tanklarında yapılmakta olup bilgisayar kontrollü kamara adı verilen ekranlardan takip edilmektedir. Böylece işlem tam kontrol ve mükemmel hassasiyet ile gerçekleştirilmektedir.



Şekil 4.1 Kriyojenik işlemin yapıldığı azot tankı görünümü

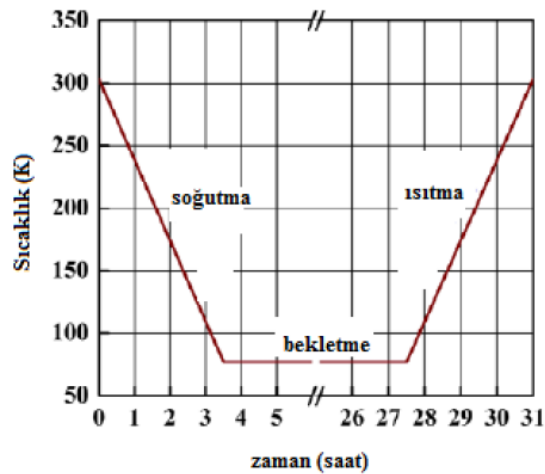
Kriyojenik işlem, malzeme üzerine uygulanan sıcaklıklara bağlı olarak sığ kriyojenik ve derin kriyojenik işlem olarak sınıflandırılmaktadır. Sığ (soğuk) kriyojenik işlem, temperleme işleminden sonra -50°C ile -80°C arasında malzemenin sıvı azot veya nitrojen gazında bekletilmesi işlemidir. Derin kriyojenik işlem ise -

125°C ve -196°C sıcaklık aralığında malzemelerin soğutulması işlemi olarak açıklanmaktadır.



Şekil 4.2 Kriyojenik işlemin sıcaklık-zaman döngüsü (Höke, 2014)

Geleneksel ısıtma işlem sonrasında malzemeler sığ ya da derin kriyojenik işlem sıcaklık değerlerinde belirlenen bir bekleme süresinde, yapısal değişim oluşana kadar tutulur ve sonrasında oda sıcaklığına kadar kademeli olarak ısıtılır. Kriyojenik işlem genel olarak soğutma, bekletme (ısıtma) ve temperleme (ısıtma) olmak üzere üç adımda meydana gelir. Şekil 4.3'de kriyojenik işlem aşamaları verilmiştir.



Şekil 4.3 Kriyojenik işlem aşamaları (Akın, 2015)

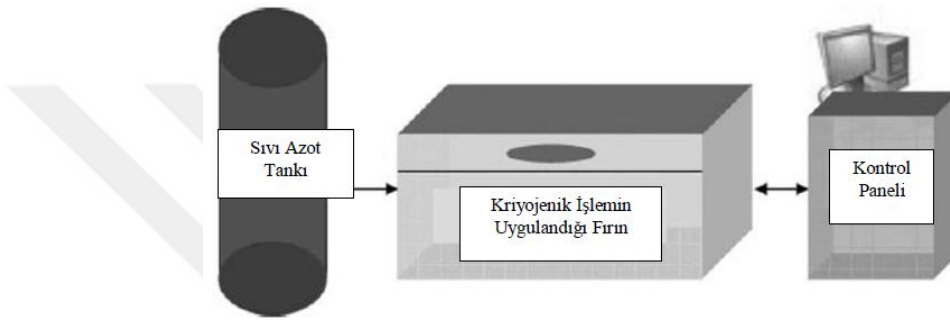
Takım eliklerinde klasik ısıt ışlem sonrasında malzemelerin ömürlerini olumsuz yönde etkileyen kalıntı austenit adı verilen yumuşak bir faz yapısı meydana gelir. Kalıntı austenit fazını gidermenin en etkili yolu kriyojenik ışlem adınının uygulanmasıdır. Kriyojenik ışlem uygulamasında malzeme belirlenen bir bekleme süresi boyunca belirlenen bir sıcaklıkta tutulur ve sonrasında kademeli olarak yavaş bir şekilde oda sıcaklığı değerine kadar ısıtılır. Böylece kalıntı austenit fazın martenzit faza dönüşmesi, çekirdeklenme bölgelerindeki ikincil (ince) karbür keltirlerinin oluşumu ve homojen karbür dağılımı sağlanarak malzeme yapısında yüksek aşınma dayanımı sağlanabilmektedir. Bu ışlem sayesinde takım ömrünün %92-817 oranlarında artığı bilgisi literatürde yer almaktadır. Kriyojenik ışlem, i ve dış yüzey olmakla birlikte malzemenin tüm yapısını etkileyen, sadece bir kere yapılan kalıcı ve ekonomik bir ısıt ışlemidir.

Kriyojenik ışlem, klasik ısıt ışlemin devamı niteliğinde olup daha iyi mekanik özelliklerin elde edilmesine imkan sağlamaktadır. Bu ışlem uygulandığı malzeme türlerine göre değişmekle birlikte yapılan çalışmalara dayanılarak; genel olarak kriyojenik ışlem ile aşağıdaki iyileşmeleri elde etmek mümkündür. Bunlar;

- Daha iyi aşınma direnci,
- Daha yüksek çekme mukavemeti ve tokluk,
- Yorulma ömründe artış,
- Kalıntı gerilme giderme,
- Boyutsal kararlılık,
- İletkenlik özelliğinde iyileşme,
- İşlenebilirlikte iyileşme,
- Malzemenin sadece yüzeyine değil her yerine etki etme,
- Malzemelerin kullanım ömürlerinde artış,
- Sertlik değerlerinde belli belirsiz artış veya düşüşler,
- Kalıcı ve bir kere uygulanan bir ışlem,
- Daha iyi korozyon direnci şeklinde sıralanabilir.

4.2 Kriyojenik İşlemin Uygulanması

Önceleri kriyojenik işlem, parçanın doğrudan sıvı nitrojen içerisine daldırılması şeklinde yapılmakta olup ani ısı değişimlerden ötürü malzemenin termal şoklara maruz kalmasına ve çatlamasına neden olmaktaydı. Gelişen teknoloji sayesinde sıcaklık değerlerinin kademeli olarak düşürülmesine imkan sağlayan bilgisayar kontrollü fırınların gelişmesi ile kriyojenik işlem uygulamaları sorunsuz bir şekilde yapılmaktadır. Şekil 4.4’de bilgisayar kontrolü ile sağlanan bir kriyojenik işlem uygulamasının şematik gösterimine yer verilmiştir.

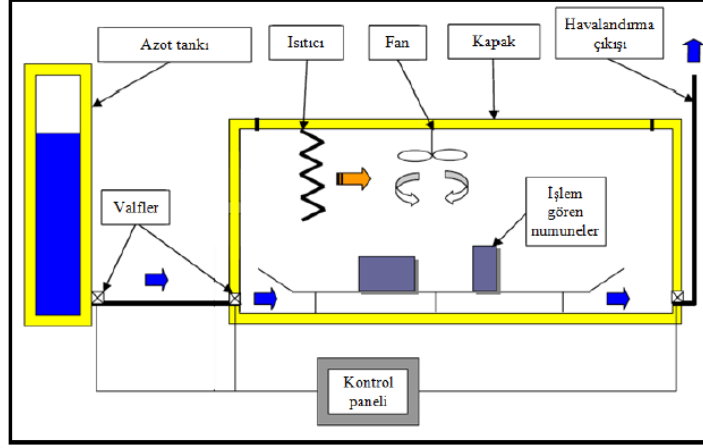


Şekil 4.4 Kriyojenik işlemin uygulandığı sistemin şeması (Akıncıoğlu, 2015)

Uygulamada sıvı azot fırın içerisine girdiğinde gaz fazına dönüşerek sıvı azotun kriyojenik işlem uygulanacak parça ile teması engellenmektedir. Böylece sıvı azotun parça ile teması sonucu olası çatlamaların önüne geçilebilmektedir. Kontrol ünitesi sayesinde sıcaklık kademeli olarak istenilen değere getirilebilmekte ve bu sıcaklıkta istenilen sürede bekletilebilmektedir.

Şekil 4.5’de görüldüğü gibi kriyojenik işlem prosesi; nitrojen tankı, valfler, ısıtıcı, fan, kontrol paneli ve en dışta yalıtımı sağlayan kapaktan oluşmaktadır. Kriyojenik işlem, sıvı nitrojenin valfe gönderilmesiyle başlar. Sıvı halde tanka geçen nitrojen fandan geçerek buharlaşır ve gaz haline gelir. Gaz haldeki nitrojen kriyojenik işlem uygulanacak numune etrafını kaplar. Burada gaz hale gelen nitrojen numune üzerinde sıvıya daldırma işleminden daha üniform bir soğuma oluşturarak çatlaksız ve her noktasında aynı özellikleri gösteren bir yapı oluşturmaktadır. Bundan sonraki işlemde numune dakikada 1°C olmak üzere kriyojenik işlem sıcaklığına

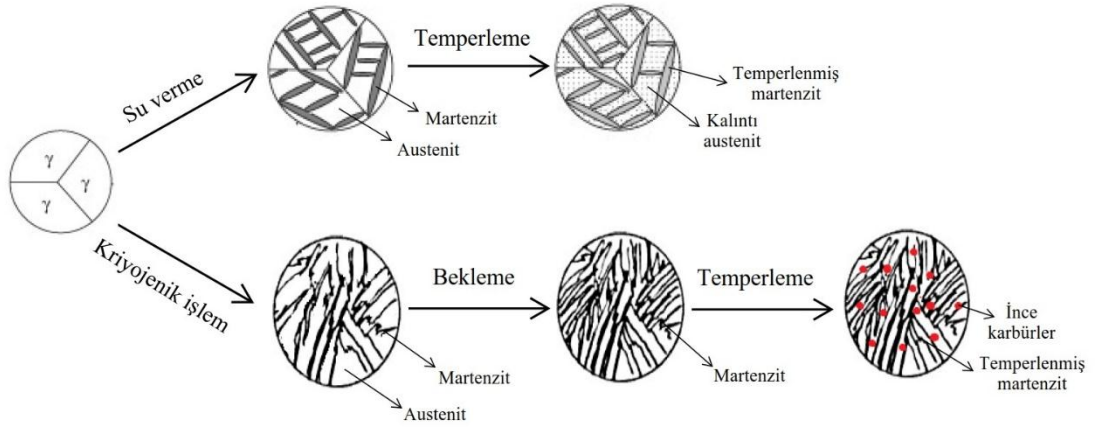
soğutulmaya başlanır. Daha sonra numune bu sıcaklıkta çevrim süresinin gerektirdiği kadar tutulur ve tekrar oda sıcaklığına ısıtılmaya başlanır. Böylece kriyojenik işlem tam bir çevrimi tamamlamış olur.



Şekil 4.5 Tipik bir kriyojenik işlem sisteminin soğutma prensibi (Rubat du Merac, 2005)

Kriyojenik işlem uygulamalarında her çelik grubunun kendisine ait işlem parametreleri (süre ve sıcaklık) bulunmaktadır. Genel olarak kriyojenik işlem sıcaklığına 1–2°C/dakika gibi bir soğutma hızıyla inilmelidir. Ardından malzemeden beklenen özelliklere göre belirlenen işlem sıcaklıklarında ve bekletme sürelerinde kriyojenik işlem gerçekleştirilir. Sonrasında kriyojenik işlem sıcaklığı değerlerinden oda sıcaklığı değerlerine ısıtma 1°C/dakika olacak şekilde hava sirkülasyonu aracılığı ile gerçekleştirilir. Tüm bu işlemlerin bitiminde en az bir defa olmak üzere malzemeye temperleme işlemi uygulanması gerekmektedir. Austenitin martenzite dönüşümü için parçalar su verme sürecinden sonra martenzit bitiş (M_f) sıcaklığının altındaki sıcaklık değerlerine kadar soğutulmaktadır. Bu şekilde yumuşak fazlı kalıntı austenit fazın tamamına yakın bir kısmı daha sert olan martenzite dönüştürülebilmektedir. Buna bağlı olarak malzemenin sertlik değerlerinde bir miktar artışlar gerçekleşebilmektedir. Kriyojenik işlem, takım çeliklerinin yapısında bulunan ve geleneksel ısıtma işlem sonrasında ortaya çıkan kalıntı austenit yapısını giderebilmek amacı ile uygulanabileceği gibi aynı zamanda kriyojenik işlem sonrasında yeniden ısıtma ile oluşan temperlenmiş yapıdaki ince, homojen dağılmış

karbürlerin çökmesine ve buna bağlı olarak da aşınma ve tokluk mukavemetlerinin artırılması amacı ile de uygulanabilir.



Şekil 4.6 Kriyojenik işlem döngüsünde oluşan malzeme mikroyapıları

Kriyojenik işlemin malzeme özelliklerindeki etkisini belirleyen en önemli faktörlerden biri bekletme süresidir. Malzeme cinsine göre farklı bekletme süreleri mevcut olmasına rağmen, kriyojenik işlem için çoğu zaman uzun bekletme süreleri (24–36 saat) önerilmektedir. Kriyojenik işlemde malzemelerin belirlenen düşük sıcaklıklarda bekletme sürelerindeki artışı ile mekanik özelliklerin olumlu yönde değiştiği bilinmektedir.

4.3 Kriyojenik İşlemin Etkileri

Kriyojenik işlem uygulaması ile yaygın bir malzeme çerçevesinde oldukça iyi sonuçlar elde edilmektedir. Uygulandıkları malzeme çeşitlerine göre farklılık göstermekle birlikte kriyojenik işlem ile düzgün bir mikroyapı ve iyileştirilmiş mekanik özellikler elde etmek mümkündür.

4.3.1 Mikroyapıya etkisi

Kriyojenik işlem ile ilgili olarak yürütülen çalışmalarda, farklı malzemelerin mikroyapılarında oluşan üç farklı etki ile karşılaşmıştır;

- Kalıntı austenit fazın martenzit fazına dönüşmesi,
- Yeni karbürlerin oluşması ve karbür dağılımının homojenleşmesi,
- Tane yapısının incelmesidir.

Austenit yapı, yüksek sıcaklık değerlerinde meydana gelen, yüzey merkezli kübik kristal yapıya sahip olan bir demir fazıdır. Çeliğin yapısında, yüksek sıcaklık değerlerinden hızlı soğutulduğu zaman başka bir faza dönüşmeden kalan austenit fazı “kalıntı austenit” olarak tanımlanır. Austenit yapı, martenzit yapısına göre daha sünek bir yapı sergiler ve daha düşük çekme mukavemeti değerlerine sahiptir. Kriyojenik işlem uygulandıktan sonra ise kalıntı austenit daha sert ve mukavemetli bir yapı olan martenzit fazına dönüşmektedir.

Kriyojenik işlem, kalıntı austenit fazını martenzit fazına dönüştürerek matris içerisinde homojen karbür dağılımı sağlar ve ince karbür oluşumlarını meydana getirir. Yeni karbürlerin oluşumu, düşük sıcaklıklarda, kafes içerisinde bulunan karbür yapıcı alaşım elementlerinin çekme gerilmelerinin oluşumu ile kafesten dışarı çıkması ile gerçekleşir. Oluşan karbür taneleri ikincil karbür olarak adlandırılır ve yapıda bulunan birincil karbürlerden oldukça küçüktür. Takım çeliklerinden farklı olarak kriyojenik işlem demir ve demir dışı alaşımlarda mikroyapıda tane boyutunun küçülmesine sebep olmaktadır. (Nalbant, 2018)

4.3.2 Mekanik özelliklere etkisi

Kriyojenik işlemin malzemenin mekanik özelliklerine en önemli etkisi aşınma dayanımı üzerinde gerçekleşmektedir. Kriyojenik işlem özellikle takım çeliklerinin aşınma davranışlarında %800'lere dayanan artışlar sağlamaktadır. Yapılan çalışmalar sonucunda; kriyojenik işlemin kalıntı austeniti martenzite dönüştürmesi ve yeni karbürlerin oluşumu ile birlikte homojen dağılım sağlaması aşınma dayanımındaki iyileşmeleri ortaya koymaktadır. Kriyojenik işlemin diğer bir etkisi de malzemenin sertlik değerleri üzerine olabilmektedir. Yürütülen çalışmalarda kriyojenik işlem sonrasında malzemelerin sertlik değerlerinde artışlar elde edilmiştir. Fakat bazı çalışmalarda; önemsiz derecede oluşan sertlik artışları veya düşüşleri ise kalıntı

austenit miktarının azalması ve yeni karbürlerin çökmesi şeklinde yorumlanmıştır. Kriyojenik işlemin bir diğer olumlu etkisi de çekme mukavemetinde meydana gelen artışlardır. Yapılan bazı araştırmalarda sertlik ve aşınma direncinin yanı sıra çekme mukavemetinin de arttığı görülmüştür. (Nalbant, 2018) Tüm bu olumlu iyileşmeler sonucunda malzeme ömrü belirgin bir şekilde artmaktadır.

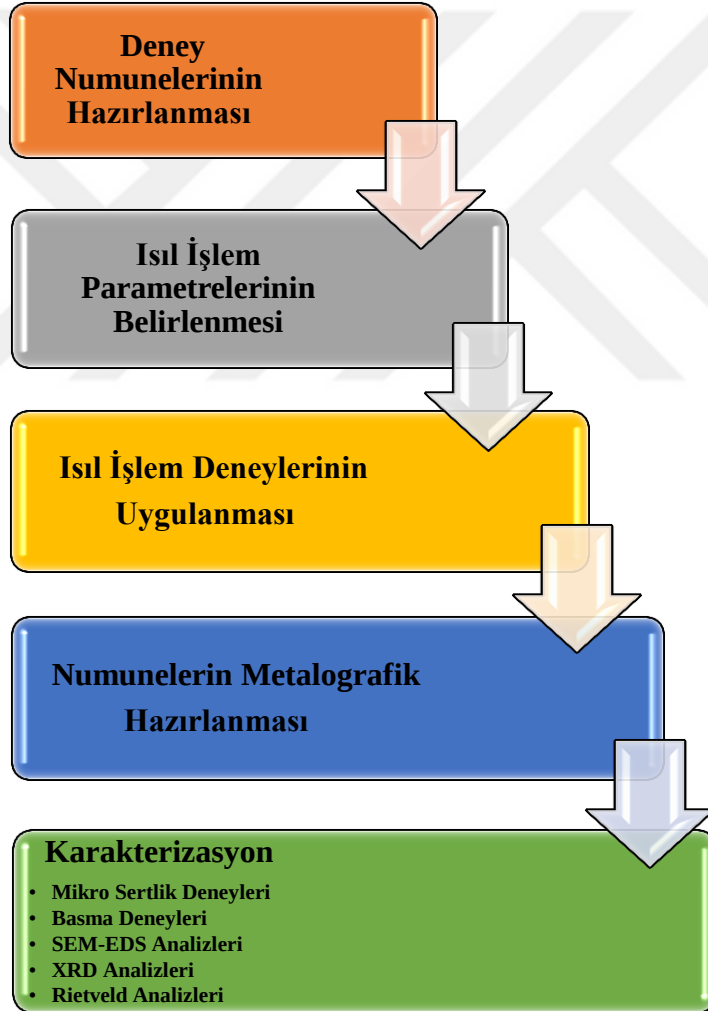
4.4 Kriyojenik İşlemin Uygulama Alanları

Kriyojenik işlem; kalıplama, talaşlı imalat, çelik, dövme, döküm, kaynak, madencilik, kereste, tarım, otomotiv, uzay ve elektronik gibi birçok endüstriyel sektörde uygulama alanı bulmaktadır. Kriyojenik işlem özellikle Amerika ve Avrupa’da yaygın olarak kullanılmaktadır ve bu ülkelerde yer alan büyük şirketlerin öncülüğü ile yurtdışında oldukça yaygınlaşmıştır. Çin ve Hindistan gibi hızla gelişen, ağır sanayi ekonomilerinde de kriyojenik işleme olan ilgi artmaktadır. Kriyojenik işlemin bu kadar üstün özelliği bulunmasına rağmen ülkemizde ancak uygulama alanı bulmuştur.

Son on yıl içerisinde kriyojenik işlem ile farklı alaşımlara sahip olan takım çeliklerinin mekanik ve tribolojik özelliklerini iyileştirmek için yapılan araştırmaların sayısı artmıştır. Yapılan çalışmalar ile sac kalıpları, zimbalar, matkap uçları, kesici takımlar, kamalar, rulmanlar, pistonlar ve krank milleri için servis ömürlerinde önemli artışlar elde edilmiştir. Ayrıca son yıllarda kriyojenik işlem metal ve alaşımlarının dışında plastik ve kompozit malzemelere de uygulanarak; bu malzeme gruplarının da sertlik, aşınma direnci ve dayanımlarında önemli iyileşmeler sağlamıştır.

5. GEREÇ VE YÖNTEM

Çalışma kapsamında kullanılan yeni nesil vanadyum içerikli soğuk iş takım çeliklerine uygulanan farklı ısıtım işlem basamaklarının, çeliklerin mikroyapısında meydana getirdiği değişimler taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Mikroyapıda oluşan elementlerin ve fazların detaylı taraması EDS analizi ile gerçekleştirilmiştir. Meydana gelen faz dönüşümleri ve hacimsel kalıntı austenit oranları X- ışını difraksiyon analizi (XRD) ve Rietveld analizi ile tespit edilmiştir. Ayrıca uygulanan farklı ısıtım işlem parametrelerinin sertlik ve basma dayanımı gibi mekanik özellikler üzerindeki etkisi incelenmiştir.



Şekil 5.1 Deneysel çalışmada izlenecek yolun şematik gösterimi

5.1 Deneylerde Kullanılan Malzemeler

Bu tez çalışmasında kesici takım olarak kullanılan soğuk iş takım çelikleri; İsveçli takım çeliği üreticisi Uddeholm firması tarafından üretilen farklı yüzdekilerde vanadyum içeren, yeni nesil, patentli ve standart dışı Vanadis 4 Extra Superclean®, Vanadis 8 Superclean® ve Vanadis 10 Superclean® serisi soğuk iş takım çelikleri tercih edilmiştir. Bu çelikler piyasada bulunabilecek malzemeler olmasına rağmen kullanımı pek az olduğundan üzerinde pek fazla araştırma yapılmamıştır. Vanadis çelikleri aşınma dayanımı, sertlik, akma mukavemeti, tokluk, işlenebilirlik ve ısıl işlem uyumluluğu gibi üstün fiziksel ve mekanik özelliklere sahiptirler. Bu çelikler özellikle kesme bıçaklarında, hassas kesme işlemlerinde ve malzemelerin form verme kalıplarında kullanılmaktadır.

Vanadis 4 Extra Superclean çeliği Ø10,3 mm x 1500 mm, Vanadis 8 Superclean çeliği Ø25,97 mm x 1500 mm ve Vanadis 10 Superclean çeliği Ø20,4mm x 850 mm ebatlarında temin edilmiştir.



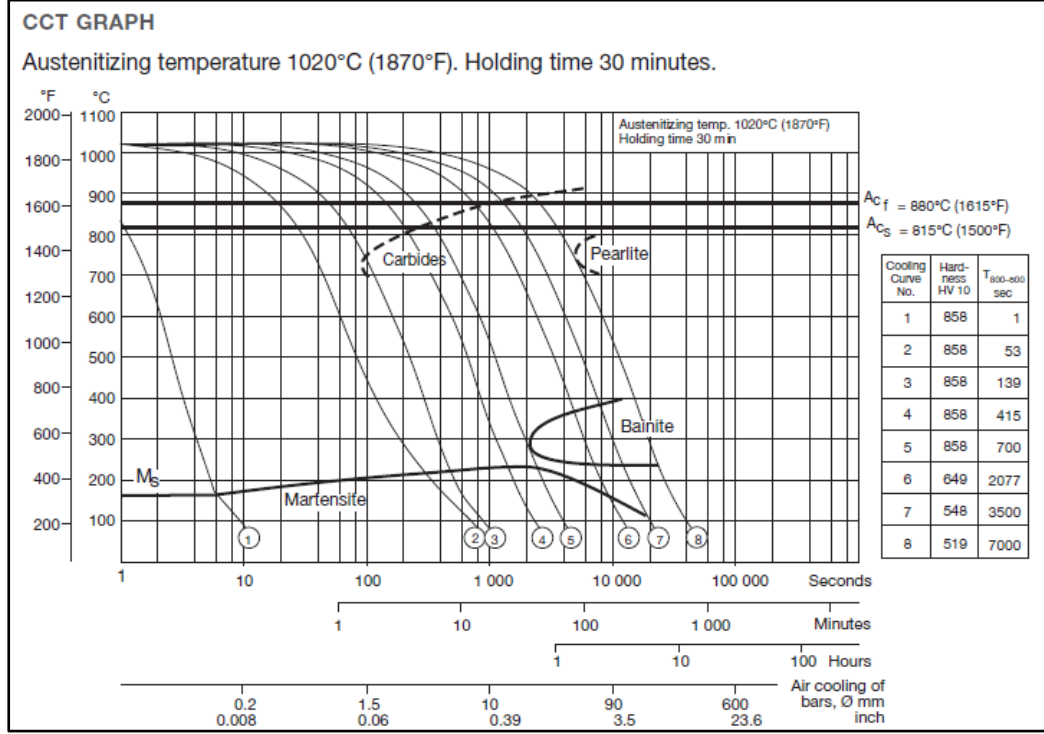
Şekil 5.2 Temin edilen vanadyum içerikli çelik numuneler

5.1.1 Vanadis 4 extra superclean numuneleri

Vanadis 4 Extra Superclean numuneleri bileşim olarak çalışma kapsamında kullanılacak olan en düşük vanadyum oranına sahip olan Vanadis çeliğidir. Bu çeliğin kimyasal bileşimi Tablo 5.1’de ve çeliğe ait CCT diyagramı Şekil 5.3’de detaylı bir şekilde verilmiştir.

Tablo 5.1 Vanadis 4 Extra superclean kimyasal bileşen içeriği

Vanadis 4 extra superclean deney numunesi kimyasal bileşimi (%)					
C	Si	Mn	Cr	Mo	V
1,4	0,4	0,4	4,7	3,5	3,7

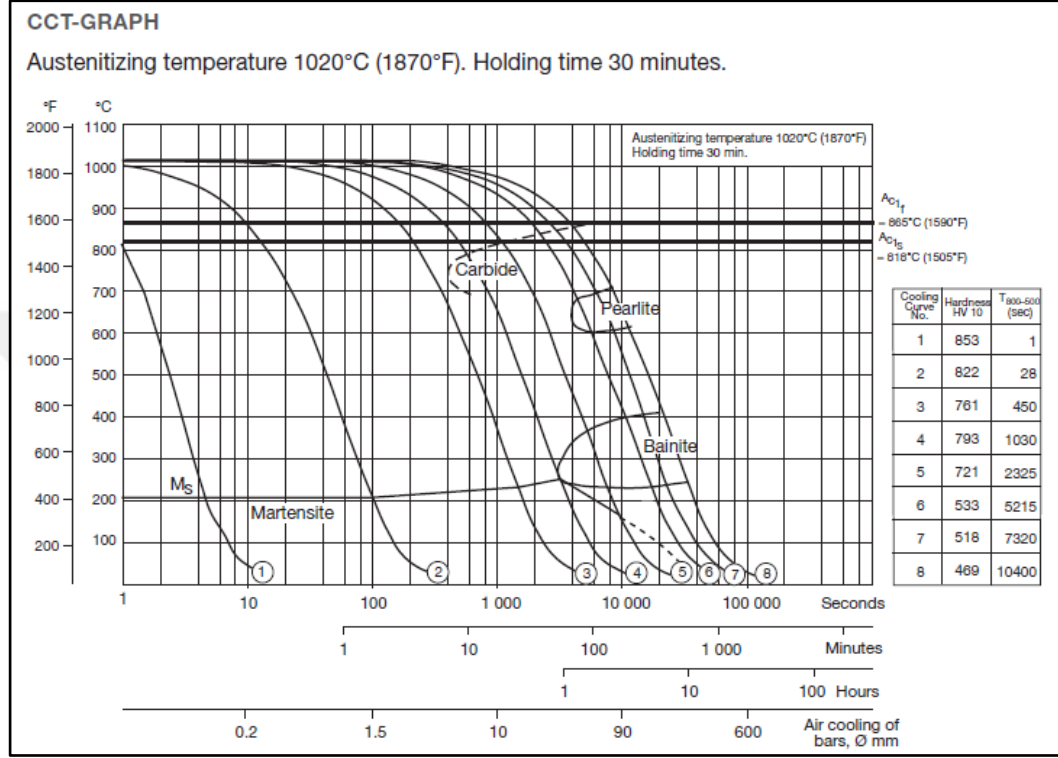
**Şekil 5.3** Vanadis 4 Extra superclean çeliğine ait sürekli soğuma dönüşüm grafiği

5.1.2 Vanadis 8 superclean numuneleri

Vanadis 8 Superclean numuneleri bileşim olarak çalışma kapsamında kullanılacak olan ikinci en düşük vanadyum oranına sahip olan Vanadis çeliğidir. Bu çeliğin kimyasal bileşimi Tablo 5.2’de ve çeliğe ait CCT diyagramı Şekil 5.4’de detaylı bir şekilde verilmiştir.

Tablo 5.2 Vanadis 8 superclean kimyasal bileşen içeriği

Vanadis 8 superclean deney numunesi kimyasal bileşimi (%)					
C	Si	Mn	Cr	Mo	V
2,3	0,4	0,4	4,8	3,6	8,0

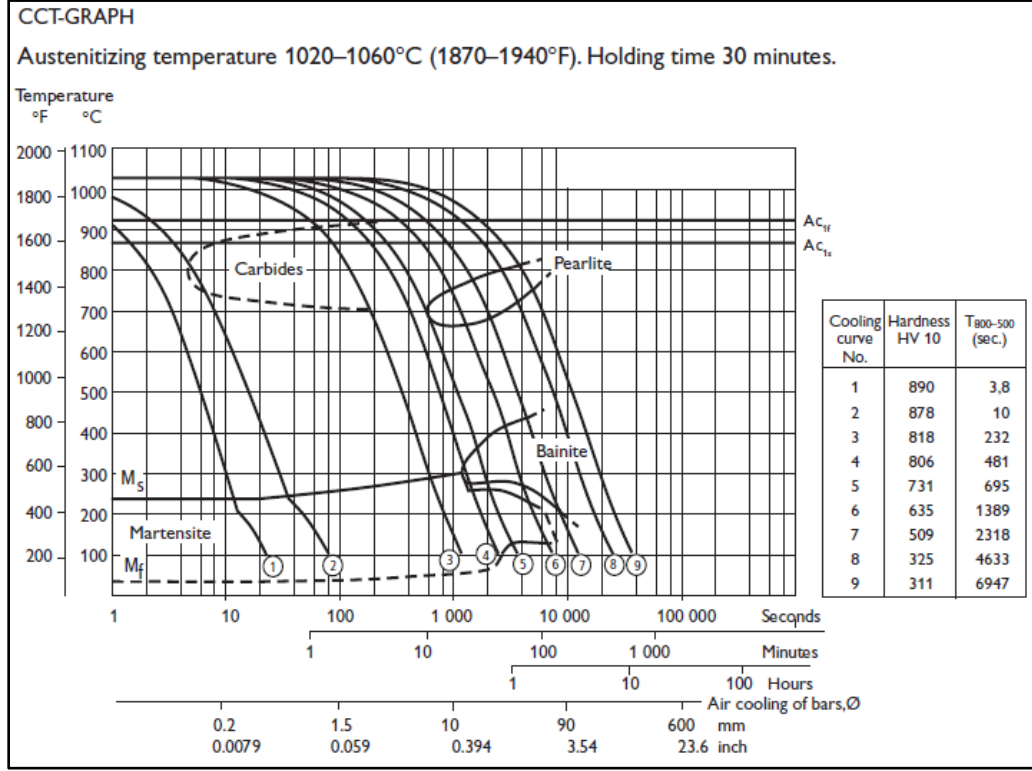
**Şekil 5.4** Vanadis 8 superclean çeliğine ait sürekli soğuma dönüşüm grafiği

5.1.3 Vanadis 10 superclean numuneleri

Vanadis 10 Superclean numuneleri bileşim olarak çalışma kapsamında kullanılacak olan en yüksek vanadyum oranına sahip olan Vanadis çeliğidir. Bu çeliğin kimyasal bileşimi Tablo 5.3’de ve çeliğe ait CCT diyagramı Şekil 5.5’de detaylı bir şekilde verilmiştir.

Tablo 5.3 Vanadis 10 superclean kimyasal bileşen içeriği

Vanadis 10 superclean deney numunesi kimyasal bileşimi (%)					
C	Si	Mn	Cr	Mo	V
2,9	0,5	0,5	8,0	1,5	9,8

**Şekil 5.5** Vanadis 10 superclean çeliğine ait sürekli soğuma dönüşüm grafiği

5.1.4 Sürekli soğuma dönüşüm (CCT) grafiklerinin yorumlanması

Çalışma kapsamında kullanılan vanadyum içerikli üç grup çeliğin CCT diyagramları yukarıda verilmiştir. Bu diyagramlara bağlı olarak çelikler ne kadar hızlı soğutulursa (karbür çökelme hattını kesmeyecek bir soğutma hızında) elde edilen mikroyapı çeliğin performansını o kadar olumlu yönde etkileyecektir. Bu durum Vanadis 4 çelikleri için CCT diyagramında 2 numaralı soğuma eğrisinin, Vanadis 8 çelikleri için 2 ve 3 numaralı eğrilerin, Vanadis 10 çelikleri içinde yine 2 numaralı eğrinin izlenmesi ile gerçekleşir. Böylece sıcaklığın Ms sıcaklığına düşmesi ile birlikte kalıntı austenit miktarı artacaktır. Artan kalıntı austenitin neredeyse

tamamına yakınının martenzite dönüştürülmesi su verme sonrası uygulanacak harici bir soğutma işlemi olmadan mümkün değildir. Bu nedenle kriyojenik işlem sonrasında çeliklere temperlenme işlemi uygulanarak yumuşak yapıdaki kalıntı austenit martenzite dönüştürülür.

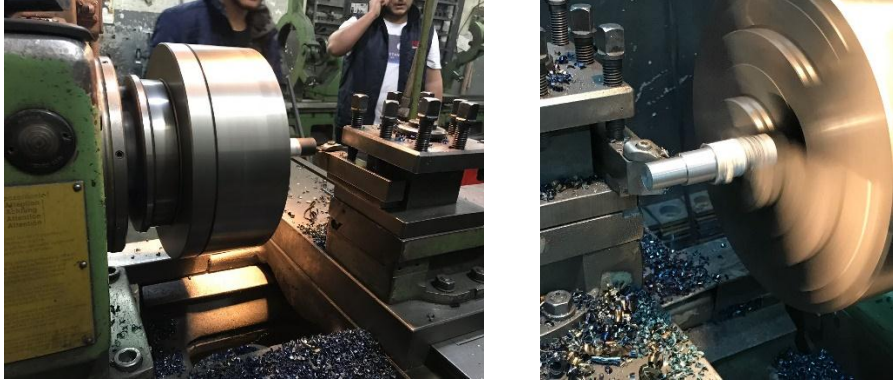
5.1.5 Numune boyutlarının belirlenmesi ve numunelerin oluşturulması

Numunelerin istenilen boyutlarına getirilmesi amacı ile numuneler öncelikle “Armak Laminasyon ve Tekstil Makineleri A.Ş.” firmasında bulunan CNC torna tezgahında kesilerek küçültülmüş, sonrasında uygulanacak olan deney boyutlarına getirilmek üzere işlenmiştir.

Tablo 5.4 Malzeme boyutları ve deney planı

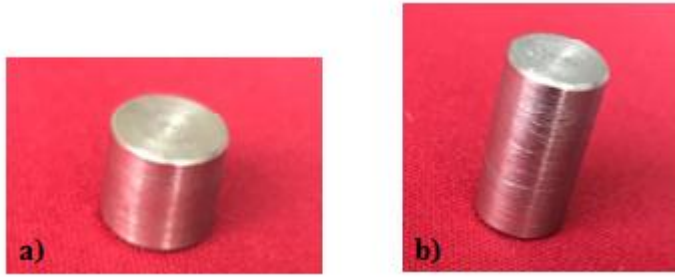
Malzeme Adı	Deney Adı ve Parça Boyutu	
	Sertlik, SEM-EDS, XRD ve Rietveld Analizleri (Ø10 mm x 10 mm)	Basma Deneyi (Ø5 mm x 20 mm)
Vanadis 4 extra	5 adet numune	5 adet numune
Vanadis 8 superclean	5 adet numune	5 adet numune
Vanadis 10 superclean	5 adet numune	5 adet numune
TOPLAM	30 adet numune	

Sertlik, SEM-EDS, XRD ve Rietveld analizleri için 10 mm çapında ve 10 mm boyunda, basma deneyleri içinde 5 mm çapında ve 20 mm boyunda her üç çelik grubuna ait 5'er adet numune olmak üzere toplamda 30 adet numune oluşturulmuştur.



Şekil 5.6 Numunelerin işlenme aşamaları

Numunelerin işlenme aşamasından sonraki nihai görüntüleri Şekil 5.7’de verilmiştir.



Şekil 5.7 Vanadis çeliklerine ait a) Sertlik, SEM-EDS, XRD ve Rietveld analiz numunesi, b) Basma deneyi numunesi

5.2 Kriyojenik İşlem Parametrelerinin Belirlenmesi ve Uygulanması

5.2.1 Kriyojenik işlem parametrelerinin belirlenmesi

Isıl işlem deneylerinden önce Vanadis grubu soğuk iş takım çeliklerinin CCT diyagramları kullanılarak ve numune kesit kalınlıkları göz önünde bulundurularak; ön ısıtma sıcaklığı ve süresi, austenitleme sıcaklığı ve süresi, su verme işlem yöntemi ve süresi belirlenmiştir. Uygulamalarda kullanılan çelikler aşağıdaki gibi kodlanmış ve bu çalışma boyunca bu kodlar ile adlandırılmışlardır.

Tablo 5.5 Çalışmada kullanılan numunelerin kodlamaları (Q: Su verme, DCT: Derin kriyojenik işlem, T: Temperleme)

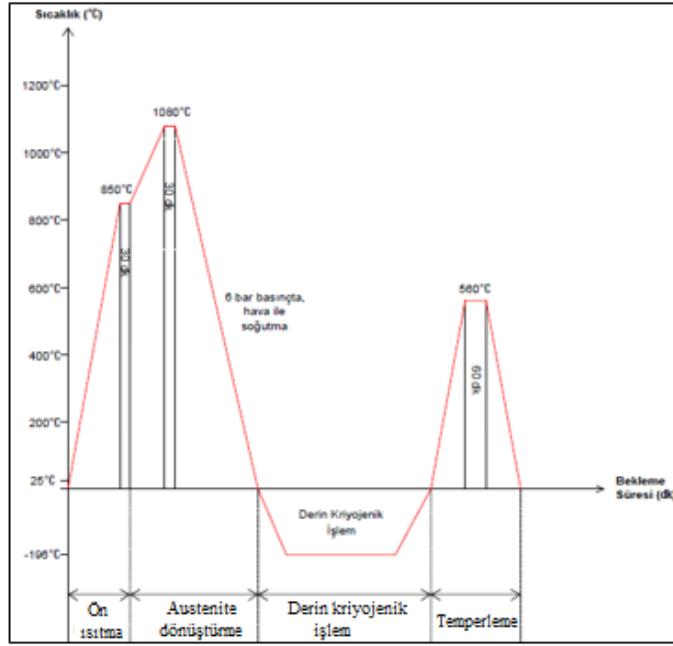
	Vanadis 4 Extra Superclean	Vanadis 8 Superclean	Vanadis 10 Superclean
Referans grubu	V4-0	V8-0	V10-0
Su verme + temperleme	V4-1 (Q+T)	V8-1 (Q+T)	V10-1 (Q+T)
12 saat kriyojenik işlem	V4-2 (Q+DCT12+T)	V8-2 (Q+DCT12+T)	V10-2 (Q+DCT12+T)
24 saat kriyojenik işlem	V4-3 (Q+DCT24+T)	V8-3 (Q+DCT24+T)	V10-3 (Q+DCT24+T)
36 saat kriyojenik işlem	V4-4 (Q+DCT36+T)	V8-4 (Q+DCT36+T)	V10-4 (Q+DCT36+T)

İlk numune grubu hiçbir işlem görmemiş olan referans grubu olarak belirlenmiştir. Diğer dört grup numune için ısıtılma işlemi ilk safhasında belirlenen şartlarda ön ısıtma, austenitleme ve su verme işlemlerinin uygulanmasına karar verilmiştir. Daha sonra su verilen numunelerden bir kısmına yalnızca temperleme işlemi, geri kalan numunelere ise belirlenen bekleme sürelerinde kriyojenik işlem uygulanmıştır. Tablo 5.6’da belirlenen ısıtılma işlemlerinin sıcaklık değerleri ve işlem süreleri verilmiştir.

Tablo 5.6 Numunelere uygulanan ısıtılma işlem parametreleri (2°C/dk soğutma-ısıtma)

Numune	Ön ısıtma	Austenitleme	Su verme	-196°C’de kriyojenik işlem	Temperleme
0	Uygulanmadı	Uygulanmadı	Uygulanmadı	Uygulanmadı	Uygulanmadı
1	850°C’de 30 dk	1080°C’de 30 dk	Basınçlı hava 6 bar	Uygulanmadı	560°C’de 1 saat
2				12 saat	
3				24 saat	
4				36 saat	

Çalışma kapsamında vanadyum içerikli çeliklerin kriyojenik işlem süresinin etkisini ortaya çıkarmak amacıyla da -196°C de sıvı azot ortamında 12 saat, 24 saat ve 36 saat olacak şekilde üç farklı işlem süresinde karar kılınmıştır. Temperleme kademesinde ise çeliklerin kataloglarındaki referans temperleme grafikleri göz önüne alınarak sıcaklık-zaman kombinasyonu belirlenmiştir. Böylece temperleme koşulunun 560°C’de 1 saat olmak üzere uygulanmasına karar verilmiştir. Çalışma kapsamında belirlenen kriyojenik işlem ve temperleme işlemine ait ısıtılma işlem eğrisinin şematik gösterimi Şekil 5.8’de verilmiştir.



Şekil 5.8 Gerçekleştirilen çalışmanın ısıtma işlem parametrelerinin şematik diyagramı

5.2.2 Kriyojenik işlemin uygulanması

Kriyojenik işlem ile malzemelerin çok düşük sıcaklıklara (derin kriyojenik sıcaklık değeri: -196°C) soğutularak istenilen metalurjik ve mikroyapısal özelliklere ulaşması sağlanmaktadır. Bu sıcaklıklara düşülmesi, sisteme bilgisayar kontrollü sıvı azot (N_2) beslenmesi ve en uygun yalıtım malzemelerinin kullanılması ile mümkün olmaktadır.

Çalışma kapsamında kullanılan kriyojenik işlem sistemi; bilgisayar kontrollü ve sıvı azot-parça temasını engellemesi dolayısıyla parça boyutlarında herhangi bir değişim olması engellenmekte ve parçada çatlama riski ortadan kaldırılmaktadır. Bu özel işlem bir yüzey işlemi olmayıp malzemenin her noktasında aynı etki yaratılmaktadır.

Mikroyapı ve mekanik deneyler için işlenen numuneler kriyojenik işlem yapılmak üzere 5 farklı gruba ayrılmıştır. Ayrılan bu numunelerin 3'erli grupları 12, 24 ve 36 saat olmak üzere farklı sürelerde derin kriyojenik işleme tabi tutulmuştur.

Kriyojenik işlem uygulaması “MMD Makine ve Malzeme Teknolojileri ArGe Danışmanlık Mühendislik Hizmetleri San. Ve Tic. Ltd. Şti.”nin Şekil 5.9’da gösterilen “Cryo Üretim” cihazında gerçekleştirilmiştir. Bu cihaz, kriyojenik işlem şartları belirlenen malzemelerin işleme tabi tutulduğu cihazdır. Cihazın iç hacmi 80 lt olup -196°C sıcaklığa ulaşabilmektedir.



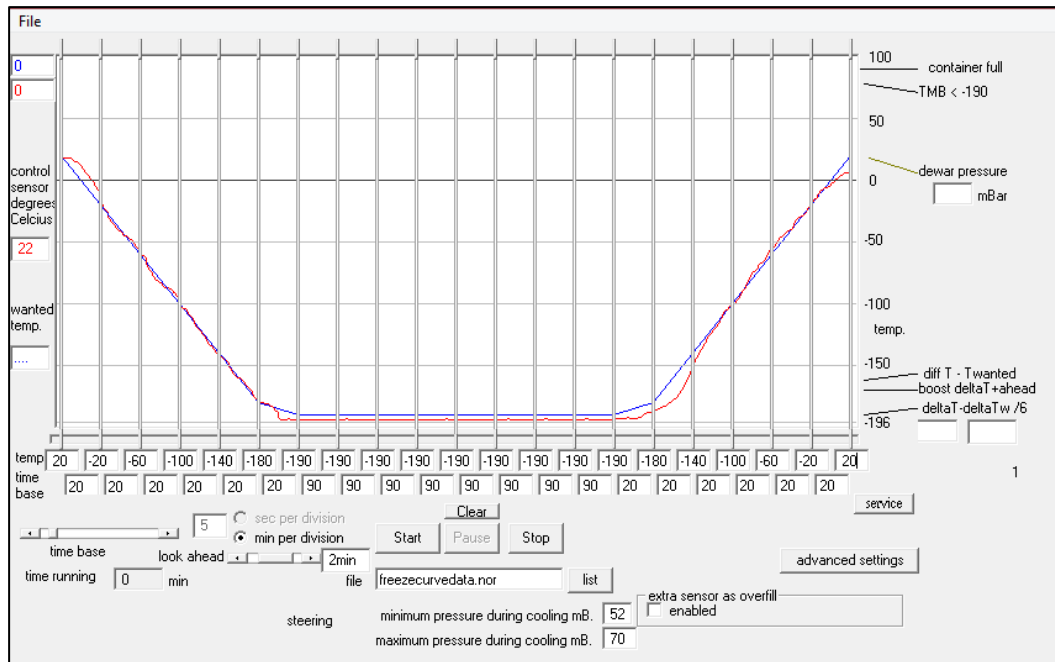
Şekil 5.9 Kriyojenik işlemin gerçekleştirildiği “Cryo Üretim” azot tankı

Kriyojenik işlem için numuneler ortalama $2^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ hızla oda sıcaklığından -196°C ’ye indirilmiş ve bu sıcaklıkta sırası ile 12, 24 ve 36 saat bekletilmiştir. 12, 24 ve 36 saat sonunda yine ortalama $2^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ hızla oda sıcaklığına çıkması sağlanmıştır. Numunelerin termal şoklara ve çatlamalara maruz kalmaması için yukarıda belirtildiği gibi soğutma ve ısıtma işlemleri kademeli olarak gerçekleştirilmiştir.

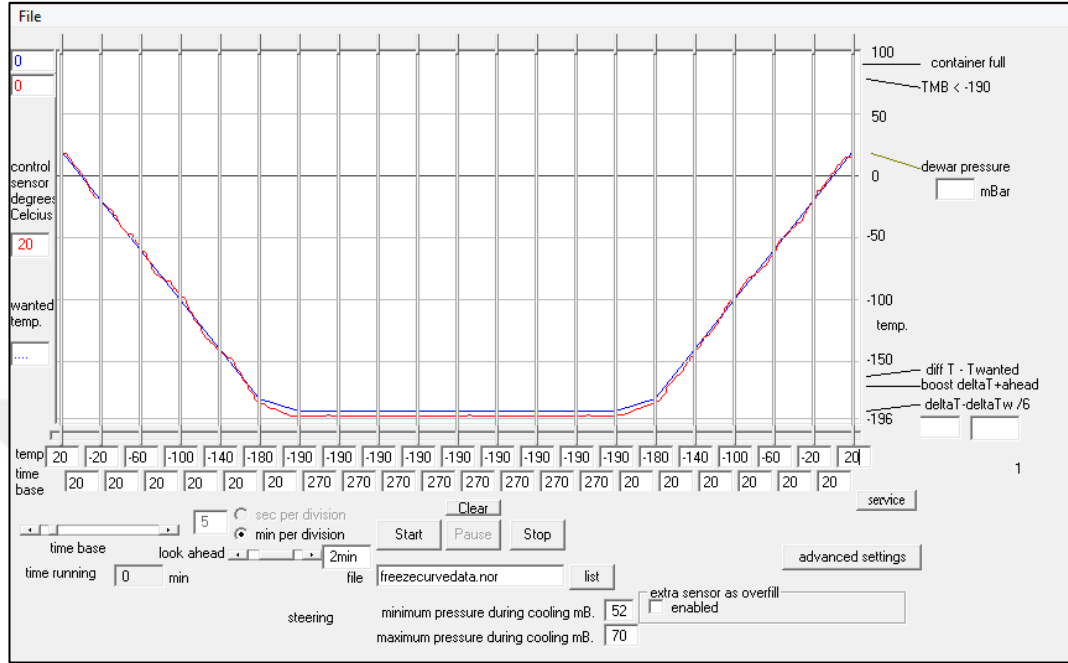


Şekil 5.10 Kriyojenik işlem sonrası deney numuneleri

Şekil 5.11’de çalışma kapsamında uygulanan 12 saatlik kriyojenik işlemin sıcaklık- zaman eğrisinin elde edildiği program ara yüzü gösterilmektedir.



Şekil 5.13’de çalışma kapsamında uygulanan 36 saatlik kriyojenik işlemin sıcaklık-zaman eğrisinin elde edildiği program ara yüzü gösterilmektedir.



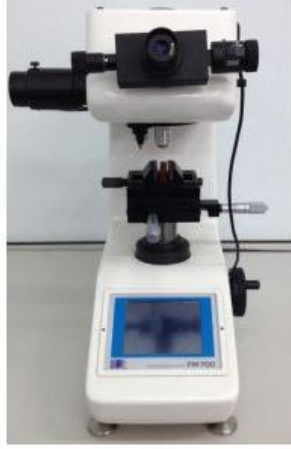
Şekil 5.13 -196°C’de 36 saat kriyojenik işlem görmüş numunelerin sıcaklık eğrisi program ara yüzü

Yukarıdaki sıcaklık-zaman grafiklerinde yer alan mavi renkteki eğriler belirlenen çalışma parametrelerini gösterirken, kırmızı eğriler kriyojenik işlem fırını içerisindeki döngüyü yani ölçüm alınan değerleri göstermektedirler. 3 farklı çalışma şartı için, belirlenen ve ölçülen eğrilerin üst üste çakıştığı saptanmıştır. Bu durum kriyojenik işlemin belirlenen parametrelere uygun olarak gerçekleştiğini göstermektedir.

5.3 Mikro Sertlik Cihazı

Vanadyum içerikli soğuk iş takım çeliklerinden Ø10mm x 10mm boyutlarında kesilen ve işlenen numunelerin Future Tech FM-700 marka mikro sertlik cihazında sertlik ölçümleri yapılmıştır. Numunelerin yüzeylerinde oluşan tabakaların sertlik ölçümleri yüzeyden merkeze doğru 200 gr yükün altında 10 sn uygulama süresi ile

gerçekleştirilmiştir. Her bir numune için 5 sertlik testi yapılmış ve bu değerlerin ortalaması alınmıştır.



Şekil 5.14 Future Tech FM-700 mikroskopik sertlik cihazı

5.4 Basma Deneyi Cihazı

Yapılan çalışmada, kullanılan farklı bekletme sürelerinde kriyojenik işlem görmüş çeliklerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla numunelere basma deneyleri uygulanmıştır. Basma deneylerinde kullanılan 15 adet numune Ø5mm x 20mm boyutlarında hazırlanmıştır.

Basma deneyi, maksimum 100 kN yükleme kapasiteli SHIMADZU Autograph AGS-X marka çekme test cihazında, sabit 1 mm/dk basma hızında gerçekleştirilmiştir. Çekme cihazının çekme çeneleri çıkartılıp, yerine düz basma plakaları monte edilerek test uygulanmıştır.



Şekil 5.15 SHIMADZU Autograph AGS-X marka çekme-basma test cihazı

5.5 Metalografik Numune Yüzey Hazırlama İşlemleri

Numunelerin zımparalama ve parlatma işlemlerinin daha iyi yapılması ve daha düzgün yüzeyler elde edebilmek için numuneler mikroyapı incelemeleri öncesi Şekil 5.16-a'da gösterilen Struers CitoPress-1 marka cihazında da sıcak olarak (bakalit) kalıplanmış ve Şekil 5.16-b'de gösterilen Struers Tegra Pol-21 marka cihazda MD Piano 200 zımpara, MD Allegro ve MD/NP Dap parlatma diskleri kullanılarak metalografik olarak hazırlanmıştır. Parlatma işleminden sonra numuneler SEM incelemeleri için %2'lik nital çözeltisi ile dağlanarak hazırlanmıştır.



a)



b)

Şekil 5.16 (a) Struers CitoPress-1 kalıplama, (b) Struers Tegra Pol- 21 zımparalama cihazları

5.6 SEM-EDS Analiz Cihazı

SEM incelemeleri için Şekil 5.17'de gösterilen Hitachi Regulus 8230 marka/model taramalı elektron mikroskobunda incelenen her üç grup çeliğin ısıtılma işlem görmemiş durumdaki ve kriyojenik işlem görmüş durumdaki tüm deney numunelerine ait $\times 10.000$, $\times 20.000$ ve $\times 50.000$ büyütmelerde 3'er adet SEM görüntüleri alınmıştır. Ayrıca numunelerin mikroyapısındaki elementel dağılımları EDS yöntemiyle analiz edilmiştir.



Şekil 5.17 Hitachi Regulus 8230 SEM-EDS analiz cihazı

5.7 XRD-Rietveld Analiz Cihazı

Çalışma prensibi olarak; numuneye X-ışını gönderilerek kırılma ve dağılıma verilerine göre numunelerin hangi elementlerden oluştuğu tespit edilir. Numunelere ait XRD analizleri Panalytical EMPYREAN marka cihazı ile yapılmıştır. Vanadis çeliklerinin herhangi bir işlem uygulanmamış (orijinal hali), sadece su verme ve temperleme uygulanmış ve 12, 24, 36 saat kriyojenik işlem ve temperleme işlemi uygulanmış numunelerinin yapısında meydana gelen değişimlerin incelenmesi amacıyla elde edilen X-ışını difraksiyon diyagramlarından yapıda bulunan fazlar belirlenmiştir.

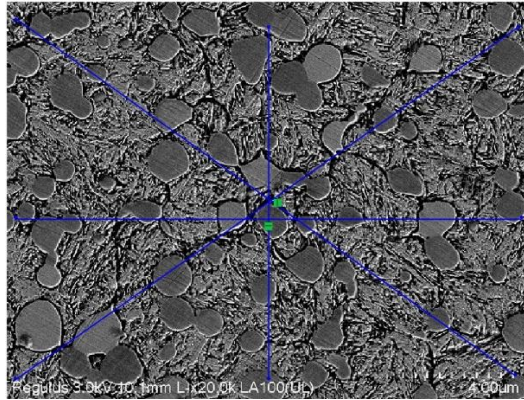
Rietveld analizleri, MAUD (Materials Analysis Using Diffraction) programı kullanılarak yapılmıştır. Rietveld analizi ile kantitatif inceleme, bu çalışma için en uygun olarak belirlenen analitik fonksiyon ile yapılmıştır. Elde edilen görüntü, grafik ve sonuçlar incelenerek kriyojenik işlemin mikroyapıya etkileri, karbür çeşitleri ve kalıntı austenit miktarı değerlendirilmiştir.



Şekil 5.18 Panalytical EMPYREAN XRD analiz cihazı

5.8 Karbür Boyutu Ölçümü

Ortalama karbür boyutlarını sayısal olarak tayin edebilmek için Şekil 5.19’da gösterildiği gibi x20.000 büyütme ile çekilmiş olan mikroyapı görüntülerinden faydalanılmış ve intercept (kesme) yöntemi kullanılarak ASTM E112 standardına uygun olarak Denklem 5.1’deki formüle göre hesaplamalar yapılmıştır.



Şekil 5.19 Karbür boyutu hesaplaması için oluşturulan ve karbürleri kesen çizgiler

$$d_{ort} = \frac{\ell_1 + \ell_2 + \ell_3 + \ell_4}{N_1 + N_2 + N_3 + N_4} \cdot \frac{1}{R} = \frac{\sum \ell_i}{\sum N_i} \cdot \frac{1}{R} \quad (\text{Denklem 5.1})$$

Denklem 5.1’de ℓ_i çizgi boyu, N_i çizginin kestiği karbür sayısı, R ise büyütme oranıdır.



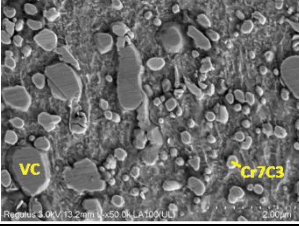
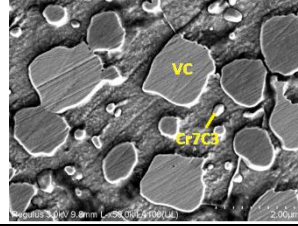
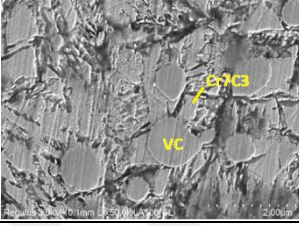
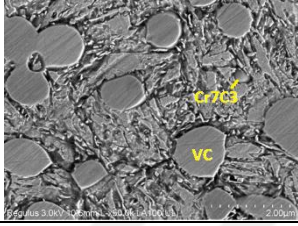
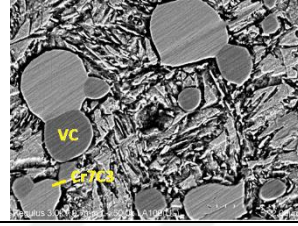
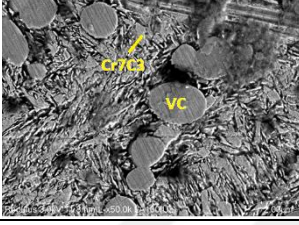
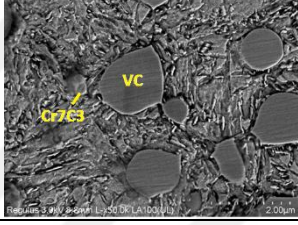
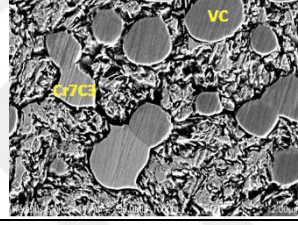
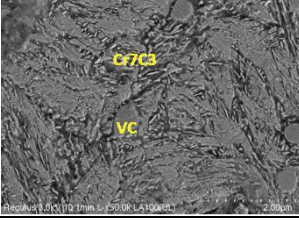
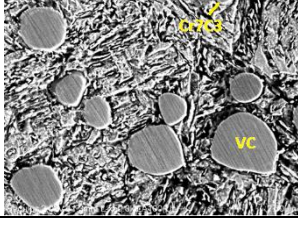
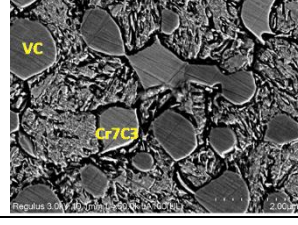
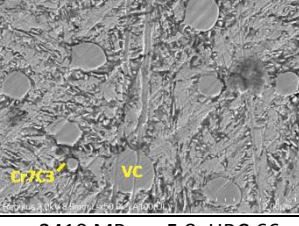
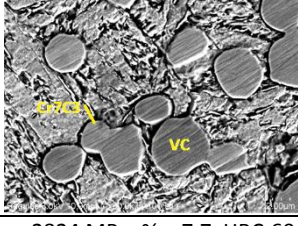
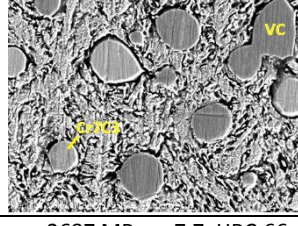
6. BULGULAR

6.1 Mikroyapısal Karakterizasyon Sonuçları

6.1.1 SEM analiz sonuçları

V4, V8 ve V10 çeliklerine uygulanan kriyojenik işlemin, referans numunelere göre mikroyapıda meydana getirdiği değişimleri belirlemek amacıyla SEM’de mikroyapı fotoğrafları çekilmiştir. Elde edilen sonuçlara Şekil 6.1’de yer verilmiştir.



SEM Görüntüleri (x50.000)			
	V4	V8	V10
	% C1,4, V3,7, Cr4,7, Mo3,5	C2,3, V8,0, Cr4,8, Mo3,6	C2,9, V9,8, Cr8,0, Mo1,5
0 (Referans)			
	σ :932MPa, ϵ :11, HRC:40 d_{VC} :4,53 μ m, d_{Cr7C3} :2,13 μ m	σ :870MPa, ϵ :10, HRC:40, d_{VC} :6,18 μ m, d_{Cr7C3} :2,52 μ m	σ :1104 MPa, ϵ :12,5, HRC:40 d_{VC} :2,62 μ m, d_{Cr7C3} :4,86 μ m
1 (Q+T)			
	σ :2969 MPa, ϵ :7,3, HRC:66 d_{VC} :7,56 μ m, d_{Cr7C3} :13,6 μ m	σ :2700 MPa, ϵ :6,7, HRC:64 d_{VC} :8,5 μ m, d_{Cr7C3} :17,0 μ m	σ :2913 MPa, ϵ :8, HRC:67, d_{VC} :5,67 μ m, d_{Cr7C3} :7,56 μ m
2 (Q+DCT12+T)			
	σ :2637 MPa, ϵ :6,75, HRC:66, d_{VC} :8,5 μ m, d_{Cr7C3} :17,0 μ m	σ :26523 MPa, ϵ :8,8, HRC:63, d_{VC} :7,56 μ m, d_{Cr7C3} :8,5 μ m	σ :2657 MPa, ϵ :7, HRC:65, d_{VC} :3,78 μ m, d_{Cr7C3} :9,71 μ m
3 (Q+DCT24+T)			
	σ :2802 MPa, ϵ :7,4, HRC:67, d_{VC} :7,56 μ m, d_{Cr7C3} :11,33 μ m	σ :2794 MPa, ϵ :7,3, HRC:64, d_{VC} :7,56 μ m, d_{Cr7C3} :8,5 μ m	σ :2348 MPa, ϵ :6,3, HRC:65,4, d_{VC} :3,24 μ m, d_{Cr7C3} :7,56 μ m
4 (Q+DCT36+T)			
	σ :2410 MPa, ϵ :5,8, HRC:66, d_{VC} :7,56 μ m, d_{Cr7C3} :9,71 μ m	σ :2824 MPa, ϵ :7,7, HRC:60, d_{VC} :5,23 μ m, d_{Cr7C3} :6,18 μ m	σ :2687 MPa, ϵ :7,7, HRC:66, d_{VC} :6,18 μ m, d_{Cr7C3} :11,33 μ m

Şekil 6.1 Numunelerinin kriyojenik işlem süresine (0-36 saat) bağlı olarak elde edilen SEM mikroyapıları

Hiçbir işlem görmemiş olan V4-0, V8-0 ve V10-0 numunelerinin yapısında XRD ve Rietveld analizlerinde de görüldüğü gibi sadece ferrit ve karbür yapıları bulunmaktadır. Numunelerdeki karbürlerin kaba bir şekilde dağıldığı görülmektedir. Bu numunelere temperleme işlemi uygulanmadığından mikroyapıda herhangi martenzit fazı tespit edilmemiştir. Ayrıca XRD ve Rietveld analizleri sonucunda elde edilen grafiklerin yer aldığı Şekil 6.5, Şekil 6.10, Şekil 6.15 ve Tablo 6.2’de de martenzit yapının olmadığı anlaşılmaktadır.

V4 numunelerinin SEM görüntülerine bakıldığında karbürlerin daha homojen ve küresel bir şekilde dağıldığı, karbür boyutlarının ise küçüldüğü görülmektedir. Bu durum Tablo 6.1’deki karbür boyutu ölçüm sonuçları ile de desteklenmektedir. Kriyojenik bekleme süresi arttıkça martenzit yapının karbürlerin etrafını bir ağ gibi sardığı görülmektedir.

V8 numunelerinin SEM görüntülerine bakıldığında kriyojenik bekleme süresi arttıkça karbürlerin birbirlerine bağlandığı ve karbür boyutlarında çok fazla bir değişimin olmadığı görülmüştür. Yüksek alaşımlı çeliklerde alaşımların oluşturduğu karbürler yapı dönüşümlerinde baskın olmaktadır. Karbürlerin ince dağılımlı olduğu Tablo 6.1’deki karbür boyutu ölçüm sonuçlarından da anlaşılmaktadır. Fakat farklı türdeki VC ve Cr₇C₃ karbürleri birleşerek, karbür boyutları V4 çeliğine göre irileşme eğilimi göstermektedir.

V10 numunelerinin SEM görüntülerine bakıldığında V8 numunelerinde olduğu gibi kriyojenik bekleme süresi arttıkça ince dağılımlı karbürlerin yine birbirlerine bağlandığı, karbür yapılarının düzensiz olduğu ve küreselliğin azaldığı görülmektedir. Karbürlerin etrafındaki boşluklarda ve temperlenmiş martenzit fazı arasında birleşme kusurlarının olduğu görülmektedir. Mikroyapı görüntülerindeki şekilsiz ve iri karbürlerin yeniden yapılanması ile mikro çatlakların olduğu düşünülmektedir. Yüksek alaşımlı çeliklerde alaşımların oluşturduğu karbürler yapı dönüşümlerinde baskın olmaktadır.

Kriyojenik ısıt işlem görmüş olan tüm numunelere ait karbürlerin, ısıt işlem görmemiş ve sadece geleneksel işlem görmüş numunelere göre belirgin bir şekilde daha ince ve daha homojen dağılımlar sergilediği net bir şekilde görülmektedir. Temperleme işlemi ile birlikte yapıda martenzit fazlarının ve birincil-ikincil karbürlerin ortaya çıktığı Rietveld analizi verileri ile de desteklenmektedir. Kriyojenik işlem süresinin artması ile birlikte mikroyapı değişikliklerinde net farklar elde edilmemiştir.

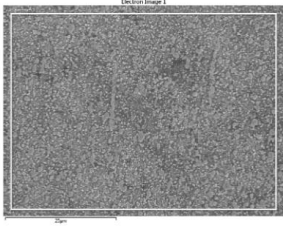
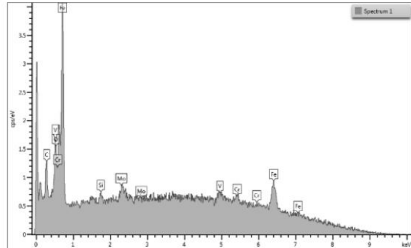
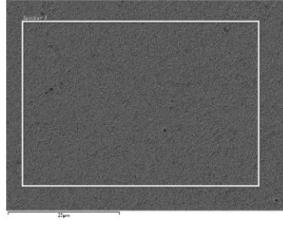
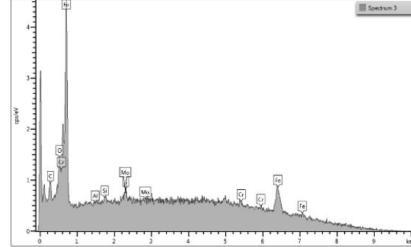
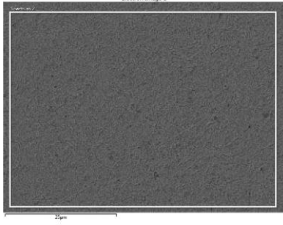
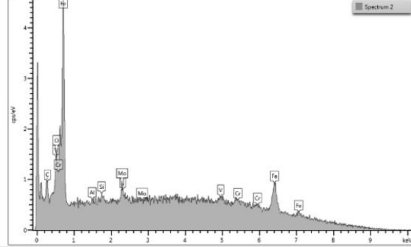
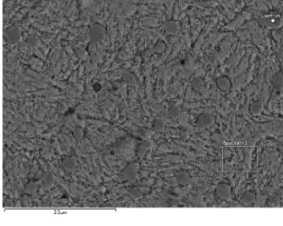
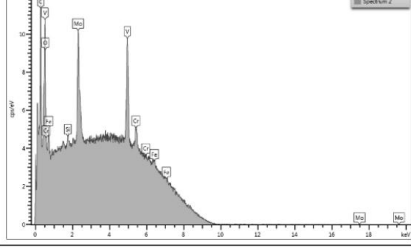
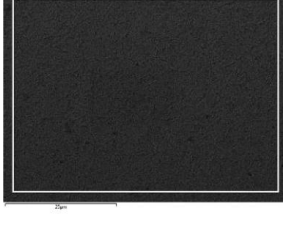
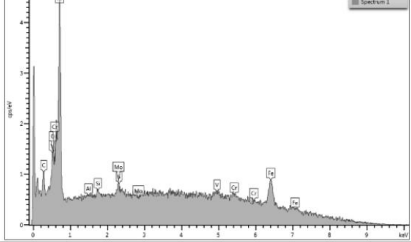
Mikroyapıdaki beyaz alanların azaldığı ve bununla beraber kalıntı austenitin martenzite dönüşümünden dolayı yapıdaki karbürlerin belirginleştiği kanısına varılmıştır. Bu durum EDS analizlerinde daha net anlaşılmış ve martenzit yapıların matrisi oluşturduğu görülmüştür.

6.1.2. EDS analiz sonuçları

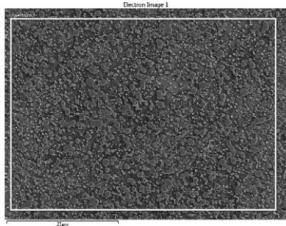
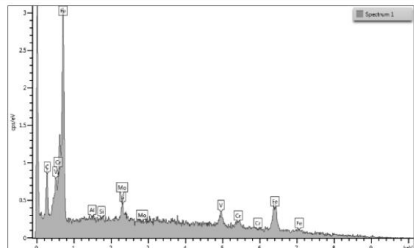
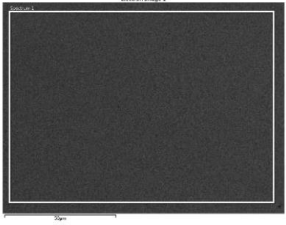
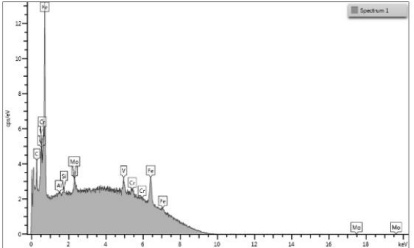
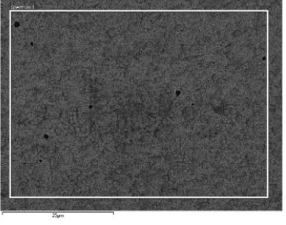
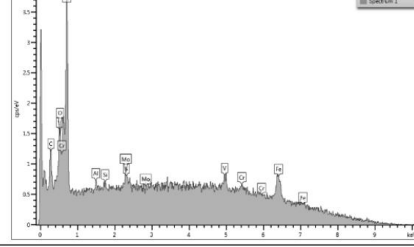
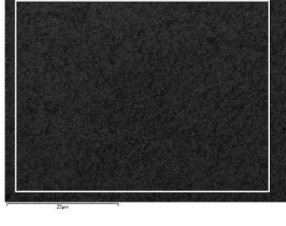
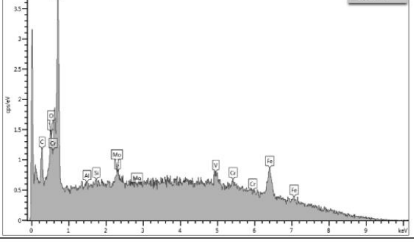
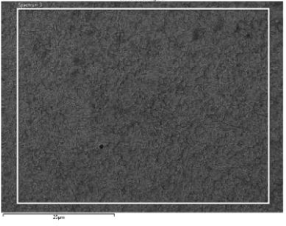
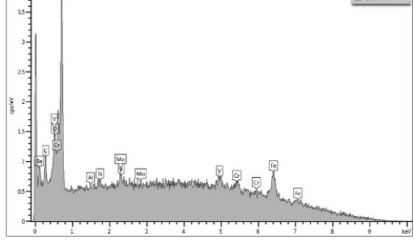
Kriyojenik işlem öncesi ve sonrası numunelerden elde edilen SEM mikrograflarındaki elementlerin türünü belirleyebilmek için EDS analizi yapılmış ve görüntüleri alınmıştır. Elde edilen analiz sonuçları Şekil 6.2, Şekil 6.3 ve Şekil 6.4’de gösterilmiştir.

EDS analizi sonucunda numunelerde genel olarak Fe, Cr, V, S, C, Mo elementlerine rastlanmıştır. XRD analiz sonuçları da demir, krom, vanadyum, karbon ve kükürt karbürlerin oluştuğunu desteklemektedir.

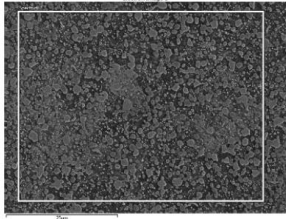
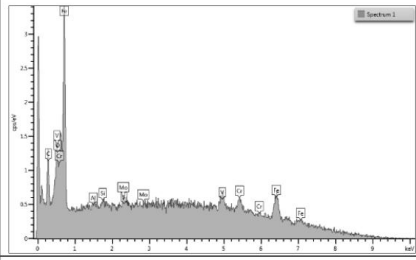
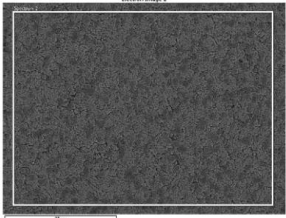
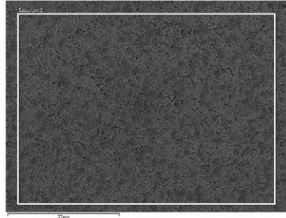
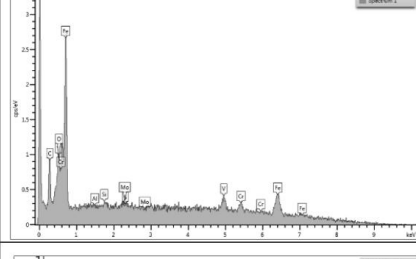
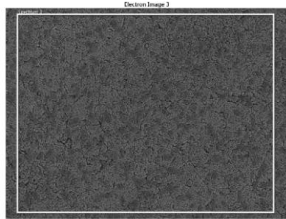
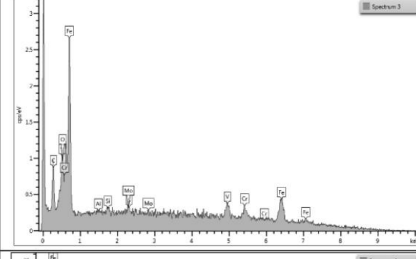
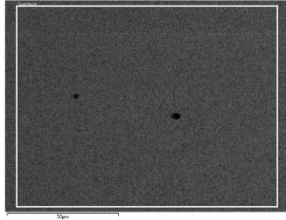
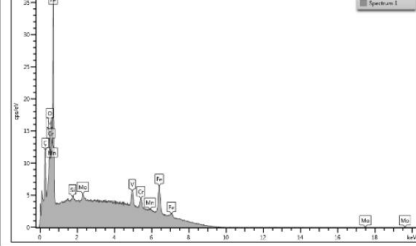
V4, V8 ve V10 çeliklerine ait SEM ve EDS analizleri matrislerin Fe ağırlıklı olduğu ve yüksek alaşım elementi içeriğinden dolayı belirgin olarak mikroyapıdaki koyu küresel alanların V ağırlıklı karbürler, daha açık küresel alanlarında Cr ağırlıklı karbürler olduğunu ortaya koymuştur. Kriyojenik işlem süresinin artmasıyla birlikte genel olarak krom ve vanadyum fazlarında artış tespit edilmiştir.

V4 EDS Analizleri																									
V4-0			<table><tr><th>Element</th><th>Miktar</th></tr><tr><td>C</td><td>9.95</td></tr><tr><td>O</td><td>3.28</td></tr><tr><td>Si</td><td>1.01</td></tr><tr><td>V</td><td>5.90</td></tr><tr><td>Cr</td><td>7.27</td></tr><tr><td>Fe</td><td>68.38</td></tr><tr><td>Mo</td><td>4.21</td></tr><tr><td>Toplam</td><td>100.00</td></tr></table>	Element	Miktar	C	9.95	O	3.28	Si	1.01	V	5.90	Cr	7.27	Fe	68.38	Mo	4.21	Toplam	100.00				
Element	Miktar																								
C	9.95																								
O	3.28																								
Si	1.01																								
V	5.90																								
Cr	7.27																								
Fe	68.38																								
Mo	4.21																								
Toplam	100.00																								
V4-1 (Q+T)			<table><tr><th>Element</th><th>Miktar</th></tr><tr><td>C</td><td>7.43</td></tr><tr><td>O</td><td>3.10</td></tr><tr><td>Al</td><td>0.36</td></tr><tr><td>Si</td><td>0.40</td></tr><tr><td>S</td><td>0.00</td></tr><tr><td>V</td><td>3.82</td></tr><tr><td>Cr</td><td>3.14</td></tr><tr><td>Fe</td><td>76.18</td></tr><tr><td>Mo</td><td>5.57</td></tr><tr><td>Toplam</td><td>100.00</td></tr></table>	Element	Miktar	C	7.43	O	3.10	Al	0.36	Si	0.40	S	0.00	V	3.82	Cr	3.14	Fe	76.18	Mo	5.57	Toplam	100.00
Element	Miktar																								
C	7.43																								
O	3.10																								
Al	0.36																								
Si	0.40																								
S	0.00																								
V	3.82																								
Cr	3.14																								
Fe	76.18																								
Mo	5.57																								
Toplam	100.00																								
V4-2 (Q+DCT12+T)			<table><tr><th>Element</th><th>Miktar</th></tr><tr><td>C</td><td>7.43</td></tr><tr><td>O</td><td>3.10</td></tr><tr><td>Al</td><td>0.36</td></tr><tr><td>Si</td><td>0.40</td></tr><tr><td>S</td><td>0.00</td></tr><tr><td>V</td><td>3.82</td></tr><tr><td>Cr</td><td>3.14</td></tr><tr><td>Fe</td><td>76.18</td></tr><tr><td>Mo</td><td>5.57</td></tr><tr><td>Toplam</td><td>100.00</td></tr></table>	Element	Miktar	C	7.43	O	3.10	Al	0.36	Si	0.40	S	0.00	V	3.82	Cr	3.14	Fe	76.18	Mo	5.57	Toplam	100.00
Element	Miktar																								
C	7.43																								
O	3.10																								
Al	0.36																								
Si	0.40																								
S	0.00																								
V	3.82																								
Cr	3.14																								
Fe	76.18																								
Mo	5.57																								
Toplam	100.00																								
V4-3 (Q+DCT24+T)			<table><tr><th>Element</th><th>Miktar</th></tr><tr><td>C</td><td>18.91</td></tr><tr><td>O</td><td>6.03</td></tr><tr><td>Si</td><td>0.44</td></tr><tr><td>V</td><td>42.33</td></tr><tr><td>Cr</td><td>4.04</td></tr><tr><td>Fe</td><td>10.17</td></tr><tr><td>Mo</td><td>18.08</td></tr><tr><td>Toplam</td><td>100.00</td></tr></table>	Element	Miktar	C	18.91	O	6.03	Si	0.44	V	42.33	Cr	4.04	Fe	10.17	Mo	18.08	Toplam	100.00				
Element	Miktar																								
C	18.91																								
O	6.03																								
Si	0.44																								
V	42.33																								
Cr	4.04																								
Fe	10.17																								
Mo	18.08																								
Toplam	100.00																								
V4-4 (Q+DCT36+T)			<table><tr><th>Element</th><th>Miktar</th></tr><tr><td>C</td><td>8.86</td></tr><tr><td>O</td><td>2.68</td></tr><tr><td>Al</td><td>0.08</td></tr><tr><td>Si</td><td>0.70</td></tr><tr><td>S</td><td>0.00</td></tr><tr><td>V</td><td>3.08</td></tr><tr><td>Cr</td><td>4.89</td></tr><tr><td>Fe</td><td>74.35</td></tr><tr><td>Mo</td><td>5.37</td></tr><tr><td>Toplam</td><td>100.00</td></tr></table>	Element	Miktar	C	8.86	O	2.68	Al	0.08	Si	0.70	S	0.00	V	3.08	Cr	4.89	Fe	74.35	Mo	5.37	Toplam	100.00
Element	Miktar																								
C	8.86																								
O	2.68																								
Al	0.08																								
Si	0.70																								
S	0.00																								
V	3.08																								
Cr	4.89																								
Fe	74.35																								
Mo	5.37																								
Toplam	100.00																								

Şekil 6.2 V4 numunelerinin SEM-EDS analizleri

V8 EDS Analizleri																										
V8-0		 <table><thead><tr><th>Element</th><th>Miktar</th></tr></thead><tbody><tr><td>C</td><td>12.77</td></tr><tr><td>Al</td><td>0.10</td></tr><tr><td>Si</td><td>0.16</td></tr><tr><td>S</td><td>0.00</td></tr><tr><td>V</td><td>9.15</td></tr><tr><td>Cr</td><td>4.75</td></tr><tr><td>Fe</td><td>67.20</td></tr><tr><td>Mo</td><td>5.87</td></tr><tr><td>Toplam</td><td>100.00</td></tr></tbody></table>	Element	Miktar	C	12.77	Al	0.10	Si	0.16	S	0.00	V	9.15	Cr	4.75	Fe	67.20	Mo	5.87	Toplam	100.00				
Element	Miktar																									
C	12.77																									
Al	0.10																									
Si	0.16																									
S	0.00																									
V	9.15																									
Cr	4.75																									
Fe	67.20																									
Mo	5.87																									
Toplam	100.00																									
V8-1 (Q+T)		 <table><thead><tr><th>Element</th><th>Miktar</th></tr></thead><tbody><tr><td>C</td><td>9.24</td></tr><tr><td>O</td><td>2.61</td></tr><tr><td>Al</td><td>0.19</td></tr><tr><td>Si</td><td>0.37</td></tr><tr><td>S</td><td>0.21</td></tr><tr><td>V</td><td>9.49</td></tr><tr><td>Cr</td><td>4.60</td></tr><tr><td>Fe</td><td>69.46</td></tr><tr><td>Mo</td><td>3.83</td></tr><tr><td>Toplam</td><td>100.00</td></tr></tbody></table>	Element	Miktar	C	9.24	O	2.61	Al	0.19	Si	0.37	S	0.21	V	9.49	Cr	4.60	Fe	69.46	Mo	3.83	Toplam	100.00		
Element	Miktar																									
C	9.24																									
O	2.61																									
Al	0.19																									
Si	0.37																									
S	0.21																									
V	9.49																									
Cr	4.60																									
Fe	69.46																									
Mo	3.83																									
Toplam	100.00																									
V8-2 (Q+DCT12+T)		 <table><thead><tr><th>Element</th><th>Miktar</th></tr></thead><tbody><tr><td>C</td><td>11.15</td></tr><tr><td>O</td><td>3.88</td></tr><tr><td>Al</td><td>0.62</td></tr><tr><td>Si</td><td>0.61</td></tr><tr><td>S</td><td>0.32</td></tr><tr><td>V</td><td>9.55</td></tr><tr><td>Cr</td><td>2.70</td></tr><tr><td>Fe</td><td>67.78</td></tr><tr><td>Mo</td><td>3.39</td></tr><tr><td>Toplam</td><td>100.00</td></tr></tbody></table>	Element	Miktar	C	11.15	O	3.88	Al	0.62	Si	0.61	S	0.32	V	9.55	Cr	2.70	Fe	67.78	Mo	3.39	Toplam	100.00		
Element	Miktar																									
C	11.15																									
O	3.88																									
Al	0.62																									
Si	0.61																									
S	0.32																									
V	9.55																									
Cr	2.70																									
Fe	67.78																									
Mo	3.39																									
Toplam	100.00																									
V8-3 (Q+DCT24+T)		 <table><thead><tr><th>Element</th><th>Miktar</th></tr></thead><tbody><tr><td>C</td><td>10.78</td></tr><tr><td>O</td><td>2.89</td></tr><tr><td>Al</td><td>0.24</td></tr><tr><td>Si</td><td>0.27</td></tr><tr><td>S</td><td>0.41</td></tr><tr><td>V</td><td>8.96</td></tr><tr><td>Cr</td><td>3.83</td></tr><tr><td>Fe</td><td>69.40</td></tr><tr><td>Mo</td><td>3.22</td></tr><tr><td>Toplam</td><td>100.00</td></tr></tbody></table>	Element	Miktar	C	10.78	O	2.89	Al	0.24	Si	0.27	S	0.41	V	8.96	Cr	3.83	Fe	69.40	Mo	3.22	Toplam	100.00		
Element	Miktar																									
C	10.78																									
O	2.89																									
Al	0.24																									
Si	0.27																									
S	0.41																									
V	8.96																									
Cr	3.83																									
Fe	69.40																									
Mo	3.22																									
Toplam	100.00																									
V8-4 (Q+DCT36+T)		 <table><thead><tr><th>Element</th><th>Miktar</th></tr></thead><tbody><tr><td>Be</td><td>47.67</td></tr><tr><td>C</td><td>7.09</td></tr><tr><td>O</td><td>1.33</td></tr><tr><td>Al</td><td>0.10</td></tr><tr><td>Si</td><td>0.24</td></tr><tr><td>S</td><td>0.00</td></tr><tr><td>V</td><td>4.29</td></tr><tr><td>Cr</td><td>4.80</td></tr><tr><td>Fe</td><td>32.28</td></tr><tr><td>Mo</td><td>2.22</td></tr><tr><td>Toplam</td><td>100.00</td></tr></tbody></table>	Element	Miktar	Be	47.67	C	7.09	O	1.33	Al	0.10	Si	0.24	S	0.00	V	4.29	Cr	4.80	Fe	32.28	Mo	2.22	Toplam	100.00
Element	Miktar																									
Be	47.67																									
C	7.09																									
O	1.33																									
Al	0.10																									
Si	0.24																									
S	0.00																									
V	4.29																									
Cr	4.80																									
Fe	32.28																									
Mo	2.22																									
Toplam	100.00																									

Şekil 6.3 V8 numunelerinin SEM-EDS analizleri

V10 EDS Analizleri																									
V10-0			<table><tr><th>Element</th><th>Miktar</th></tr><tr><td>C</td><td>12.48</td></tr><tr><td>O</td><td>2.12</td></tr><tr><td>Al</td><td>0.38</td></tr><tr><td>Si</td><td>0.51</td></tr><tr><td>S</td><td>0.14</td></tr><tr><td>V</td><td>10.40</td></tr><tr><td>Cr</td><td>9.59</td></tr><tr><td>Fe</td><td>63.41</td></tr><tr><td>Mo</td><td>0.96</td></tr><tr><td>Toplam</td><td>100.00</td></tr></table>	Element	Miktar	C	12.48	O	2.12	Al	0.38	Si	0.51	S	0.14	V	10.40	Cr	9.59	Fe	63.41	Mo	0.96	Toplam	100.00
Element	Miktar																								
C	12.48																								
O	2.12																								
Al	0.38																								
Si	0.51																								
S	0.14																								
V	10.40																								
Cr	9.59																								
Fe	63.41																								
Mo	0.96																								
Toplam	100.00																								
V10-1 (Q+T)			<table><tr><th>Element</th><th>Miktar</th></tr><tr><td>C</td><td>13.30</td></tr><tr><td>O</td><td>2.18</td></tr><tr><td>Al</td><td>0.00</td></tr><tr><td>Si</td><td>0.73</td></tr><tr><td>S</td><td>0.45</td></tr><tr><td>V</td><td>10.76</td></tr><tr><td>Cr</td><td>9.73</td></tr><tr><td>Fe</td><td>62.04</td></tr><tr><td>Mo</td><td>0.80</td></tr><tr><td>Toplam</td><td>100.00</td></tr></table>	Element	Miktar	C	13.30	O	2.18	Al	0.00	Si	0.73	S	0.45	V	10.76	Cr	9.73	Fe	62.04	Mo	0.80	Toplam	100.00
Element	Miktar																								
C	13.30																								
O	2.18																								
Al	0.00																								
Si	0.73																								
S	0.45																								
V	10.76																								
Cr	9.73																								
Fe	62.04																								
Mo	0.80																								
Toplam	100.00																								
V10-2 (Q+DCT12+T)			<table><tr><th>Element</th><th>Miktar</th></tr><tr><td>C</td><td>14.66</td></tr><tr><td>O</td><td>2.32</td></tr><tr><td>Al</td><td>0.16</td></tr><tr><td>Si</td><td>0.27</td></tr><tr><td>S</td><td>0.33</td></tr><tr><td>V</td><td>11.32</td></tr><tr><td>Cr</td><td>7.72</td></tr><tr><td>Fe</td><td>63.21</td></tr><tr><td>Mo</td><td>0.01</td></tr><tr><td>Toplam</td><td>100.00</td></tr></table>	Element	Miktar	C	14.66	O	2.32	Al	0.16	Si	0.27	S	0.33	V	11.32	Cr	7.72	Fe	63.21	Mo	0.01	Toplam	100.00
Element	Miktar																								
C	14.66																								
O	2.32																								
Al	0.16																								
Si	0.27																								
S	0.33																								
V	11.32																								
Cr	7.72																								
Fe	63.21																								
Mo	0.01																								
Toplam	100.00																								
V10-3 (Q+DCT24+T)			<table><tr><th>Element</th><th>Miktar</th></tr><tr><td>C</td><td>12.75</td></tr><tr><td>O</td><td>2.49</td></tr><tr><td>Al</td><td>0.22</td></tr><tr><td>Si</td><td>0.58</td></tr><tr><td>S</td><td>0.00</td></tr><tr><td>V</td><td>10.06</td></tr><tr><td>Cr</td><td>8.12</td></tr><tr><td>Fe</td><td>63.46</td></tr><tr><td>Mo</td><td>2.32</td></tr><tr><td>Toplam</td><td>100.00</td></tr></table>	Element	Miktar	C	12.75	O	2.49	Al	0.22	Si	0.58	S	0.00	V	10.06	Cr	8.12	Fe	63.46	Mo	2.32	Toplam	100.00
Element	Miktar																								
C	12.75																								
O	2.49																								
Al	0.22																								
Si	0.58																								
S	0.00																								
V	10.06																								
Cr	8.12																								
Fe	63.46																								
Mo	2.32																								
Toplam	100.00																								
V10-4 (Q+DCT24+T)			<table><tr><th>Element</th><th>Miktar</th></tr><tr><td>C</td><td>12.30</td></tr><tr><td>O</td><td>2.51</td></tr><tr><td>Si</td><td>0.28</td></tr><tr><td>V</td><td>10.62</td></tr><tr><td>Cr</td><td>6.94</td></tr><tr><td>Mn</td><td>0.82</td></tr><tr><td>Fe</td><td>64.60</td></tr><tr><td>Mo</td><td>1.94</td></tr><tr><td>Toplam</td><td>100.00</td></tr></table>	Element	Miktar	C	12.30	O	2.51	Si	0.28	V	10.62	Cr	6.94	Mn	0.82	Fe	64.60	Mo	1.94	Toplam	100.00		
Element	Miktar																								
C	12.30																								
O	2.51																								
Si	0.28																								
V	10.62																								
Cr	6.94																								
Mn	0.82																								
Fe	64.60																								
Mo	1.94																								
Toplam	100.00																								

Şekil 6.4 V10 numunelerinin SEM-EDS analizleri

6.1.3. Karbür boyutu ölçüm sonuçları

Numunelere ait mikroyapı görüntülerinden kesme yöntemi ile elde edilen ortalama toplam karbür boyutları Tablo 6.1’de gösterilmektedir. Mikroyapıdaki VC ve Cr₇C₃ karbürleri için de tane boyutları ayrıca hesaplanmış olup, Tablo 6.1’de yer almaktadır.

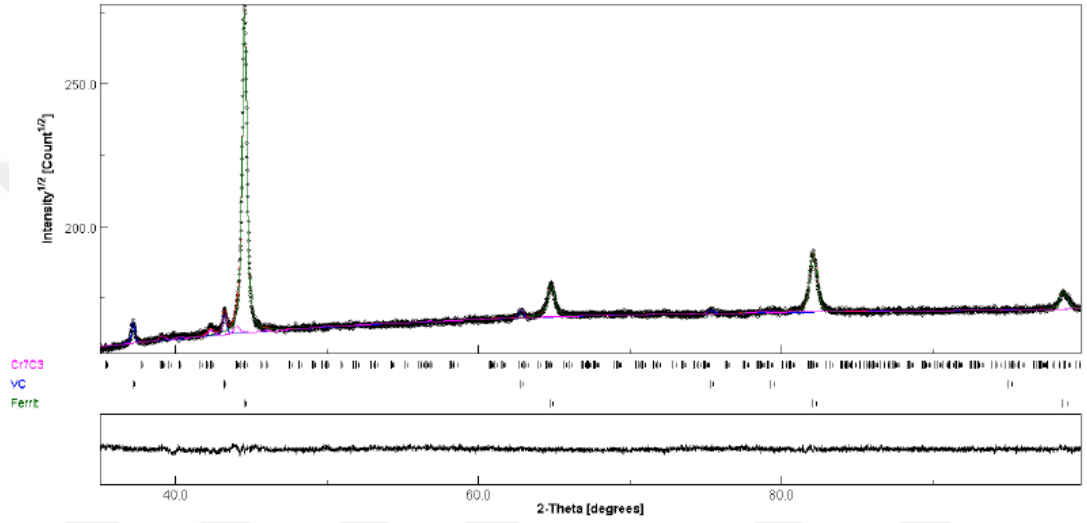
Tablo 6.1 Numunelere ait ortalama karbür boyutu değerleri

Numune	VC için Ortalama Tane Boyutu (μm)	Cr ₇ C ₃ için Ortalama Tane Boyutu (μm)	Ortalama Toplam Tane Boyutu (μm)
V4-0	4,53	2,13	1,45
V4-1	7,56	13,60	4,86
V4-2	8,50	17,00	5,67
V4-3	7,56	11,33	4,53
V4-4	7,56	9,71	4,25
V8-0	6,18	2,52	1,79
V8-1	8,50	17,00	5,67
V8-2	7,56	8,50	4,00
V8-3	7,56	8,50	4,00
V8-4	5,23	6,18	2,83
V10-0	2,62	4,86	1,70
V10-1	5,67	7,56	3,24
V10-2	3,78	9,71	2,72
V10-3	3,24	7,56	2,27
V10-4	6,18	11,33	4,00

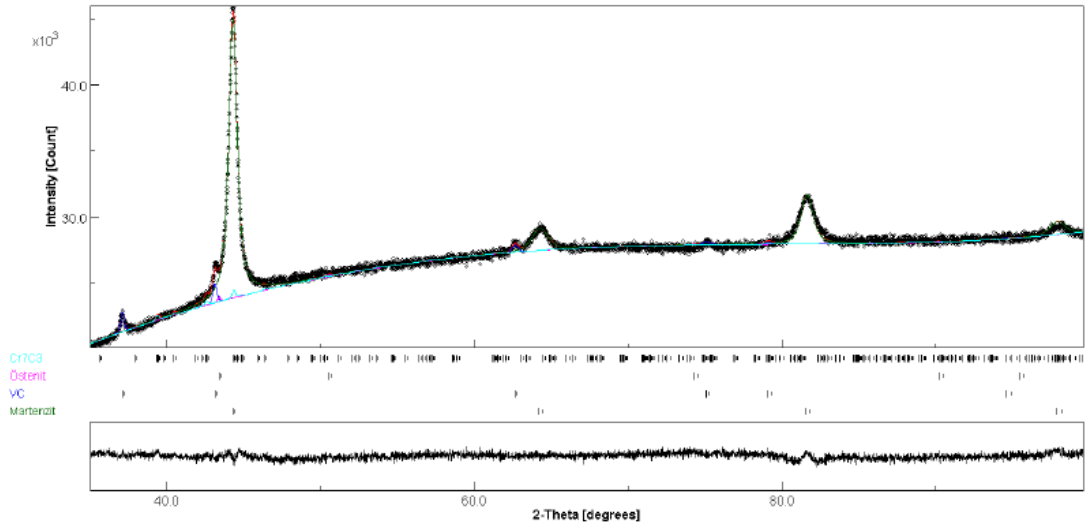
SEM mikroyapı görüntülerinde ve Tablo 6.1’de görüldüğü gibi her referans numunedeki (V4-0, V8-0, V10-0) karbürlerin tane boyutları oldukça küçüktür. Bu durum mikroyapıda martenzit fazının oluşmaması ile ilişkilendirilmiştir. Su verme ve temperleme işlemleri ile birlikte tüm numunelerin (V4-1, V8-1, V10-1) ortalama tane boyutlarında artış görülmektedir. Kriyojenik bekleme süresi arttıkça V4 numunelerine ait karbür tane boyutları küçülmemekte ve homojen dağılım sergilemektedir. V8 ve V10 numunelerinde oluşan ince dağılımlı karbürlerin birleşerek küreselliklerinin bozulduğu ve birleşen karbürlerin irileşme eğilimi gösterdiği anlaşılmaktadır.

6.1.4. XRD ve Rietveld analiz sonuçları

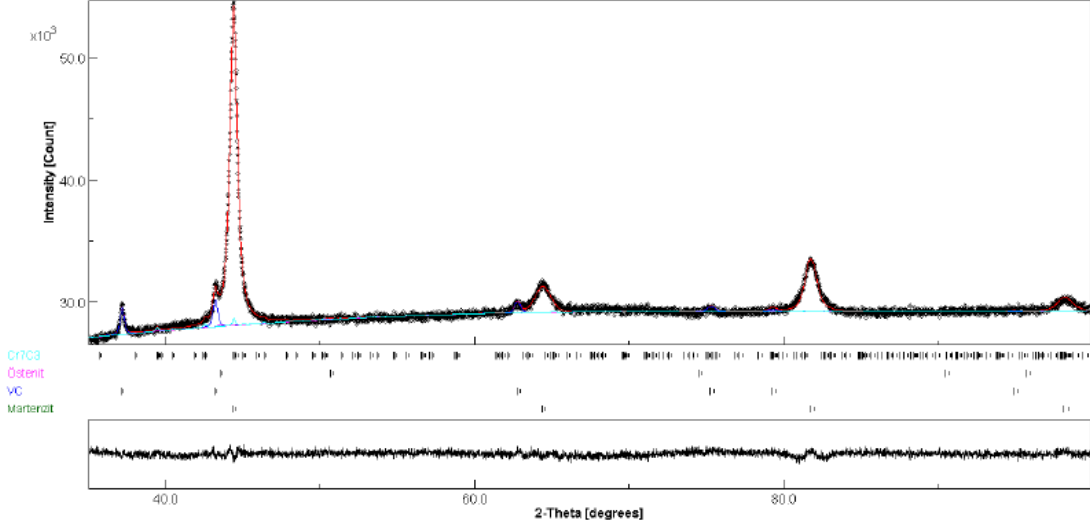
Numunelere ait difraksiyon örnekleri martenzit (α' -Fe), kalıntı austenit (γ -Fe) ve VC ve Cr_7C_3 formunda küresel karbür bileşiklerine ait pikler kırınım düzlemleriyle birlikte belirlenmiştir. Grafiklerde görülen pembe renk austenit miktarını, yeşil renkte martenzit miktarını, mavi renk VC, açık mavi renk Cr_7C_3 alaşım elementlerinin karburlu bileşiklerini göstermektedir. Numunelerdeki faz miktarlarına aşağıdaki grafiklerde yer verilmiştir.



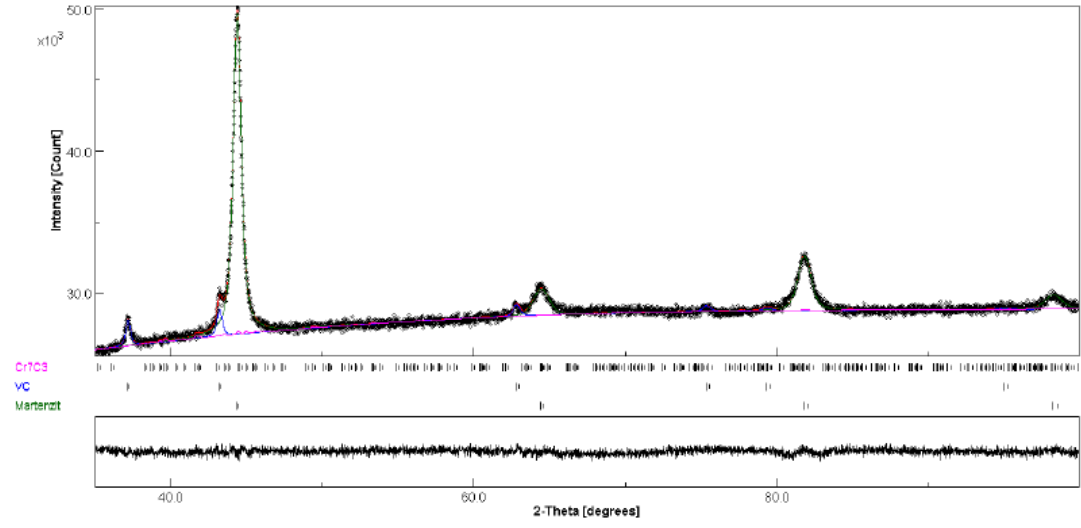
Şekil 6.5 V4-0 kodlu çeliğe ait Rietveld analizi görüntüsü



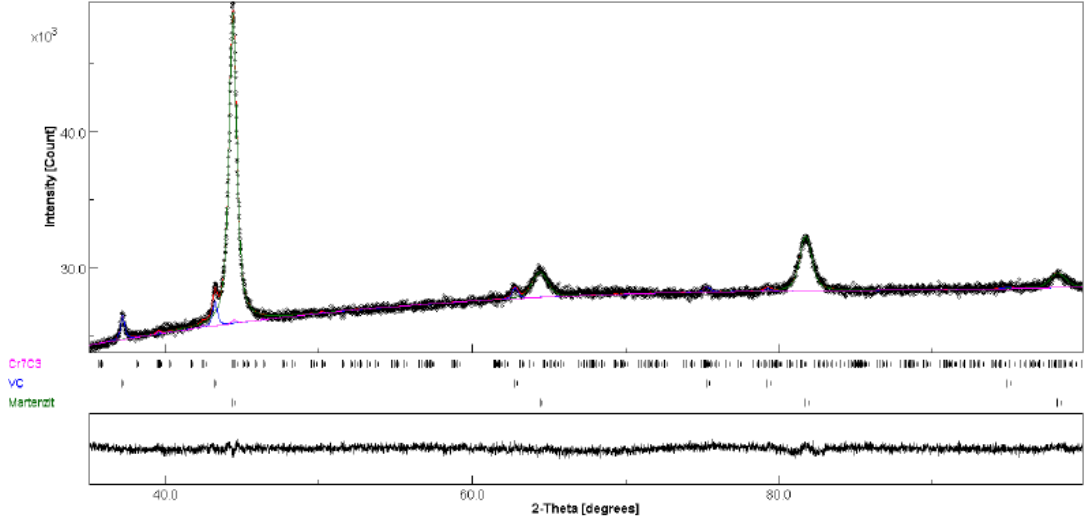
Şekil 6.6 V4-1 kodlu çeliğe ait Rietveld analiz görüntüsü



Şekil 6.7 V4-2 kodlu çeliğe ait Rietveld analiz görüntüsü

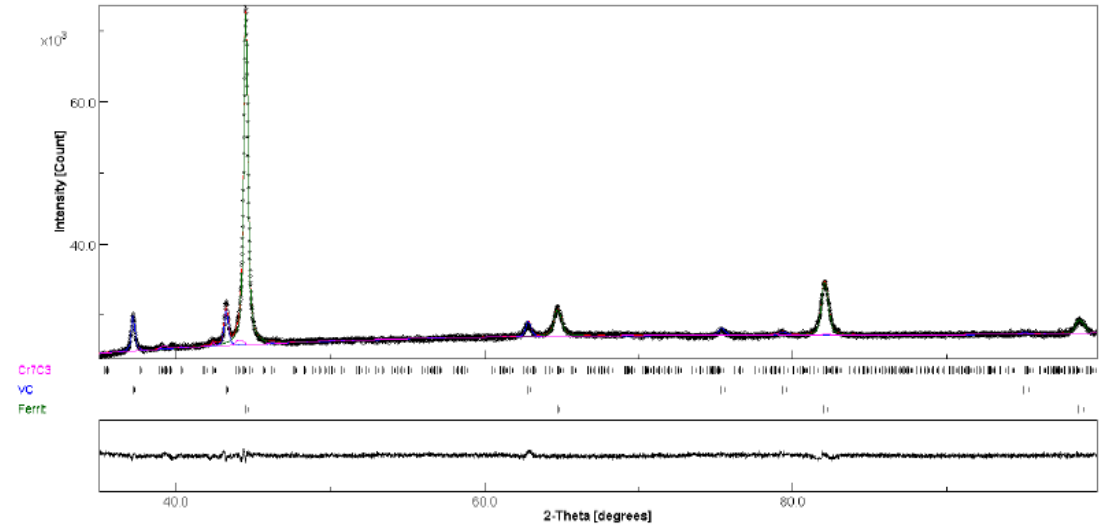


Şekil 6.8 V4-3 kodlu çeliğe ait Rietveld analiz görüntüsü

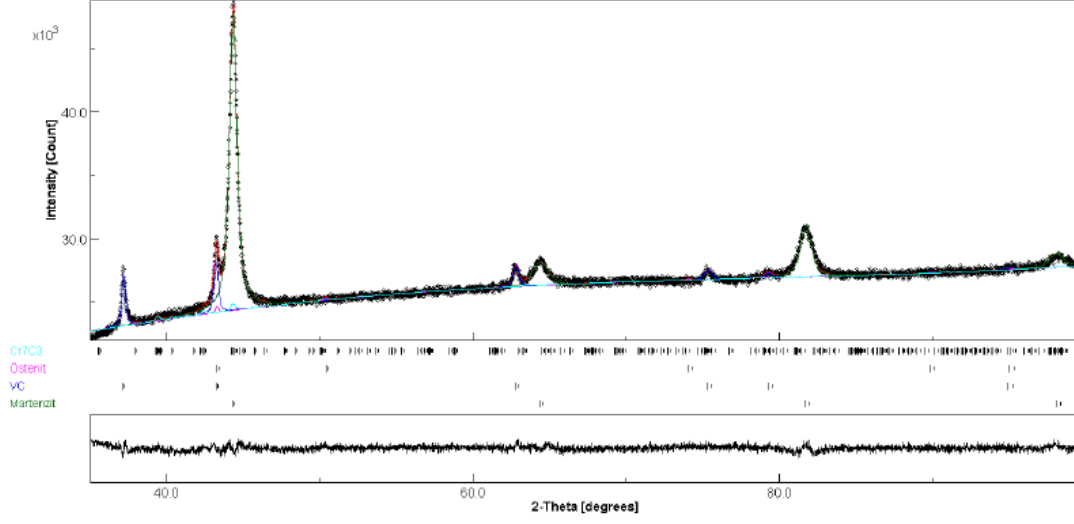


Şekil 6.9 V4-4 kodlu çeliğe ait Rietveld analiz görüntüsü

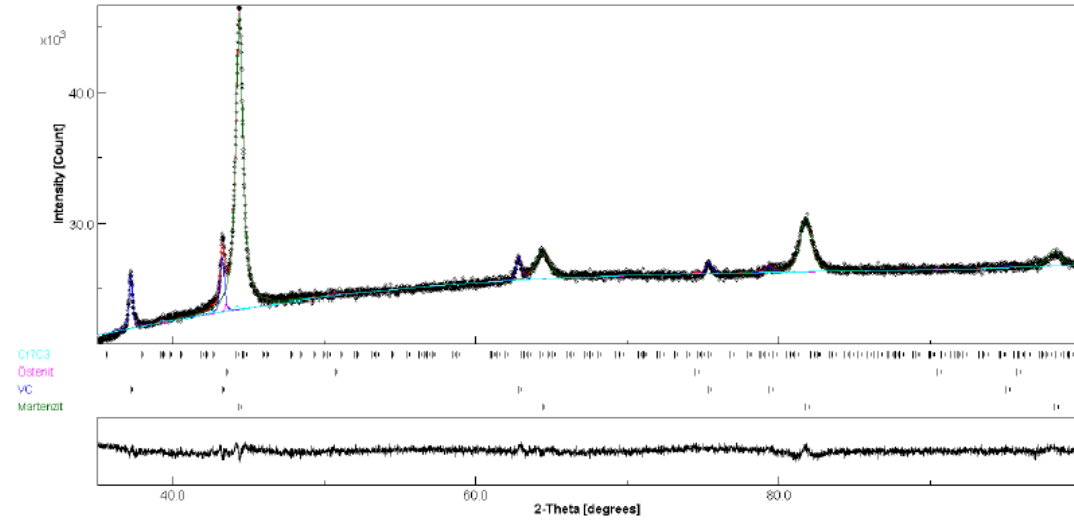
V4 numuneleri rietveld analiz sonuçlarında; V4-0, V4-3 (Q+DCT24+T) ve V4-4 (Q+DCT36+T) numunelerinde austenit yapısı görülmemiştir. V4-0 numunesi tamamen ferrit fazından oluşmaktadır. XRD paternlerinde uygulanan kriyojenik ısıtma işlemde bekleme süresi arttıkça kalıntı austenitin azaldığı ve karbürlerdeki artışlar görülmektedir. Austenit piklerinin şiddeti azaldığı; martenzit piklerinin şiddetlerinin ise önce arttığı sonra bir miktar azaldığı görülmüştür.



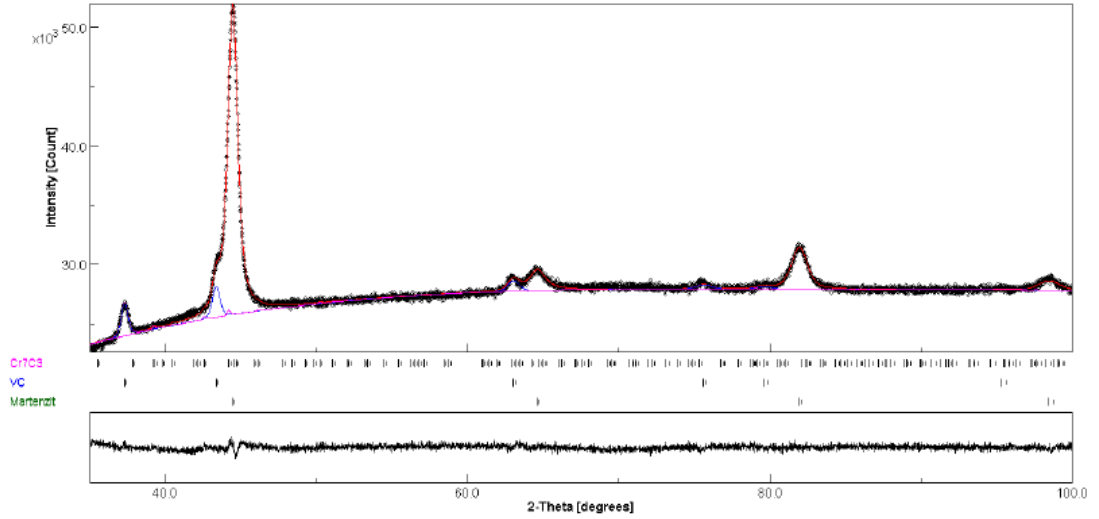
Şekil 6.10 V8-0 kodlu çeliğe ait Rietveld analiz görüntüsü



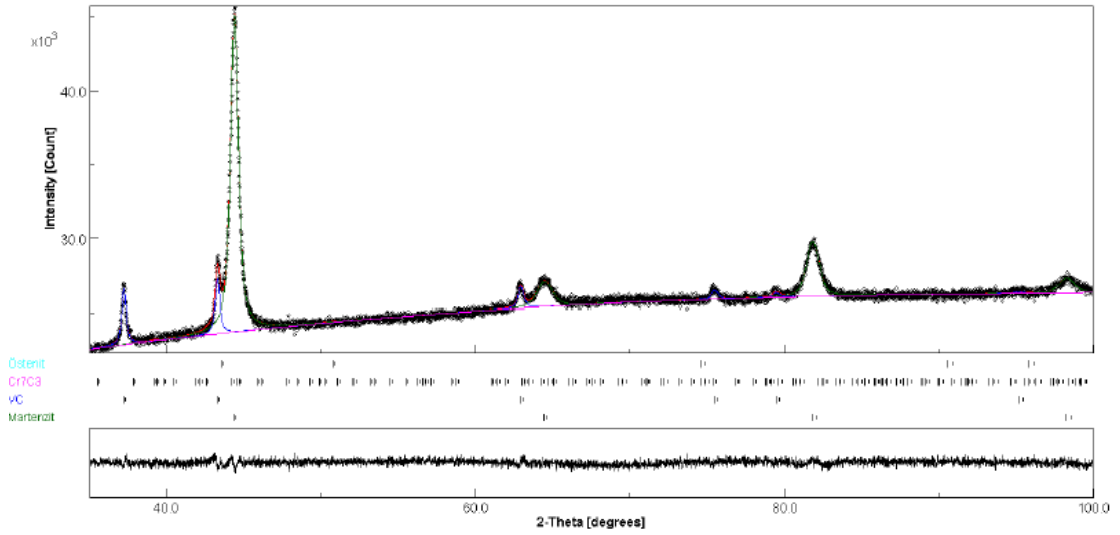
Şekil 6.11 V8-1 kodlu çeliğe ait Rietveld analiz görüntüsü



Şekil 6.12 V8-2 kodlu çeliğe ait Rietveld analiz görüntüsü

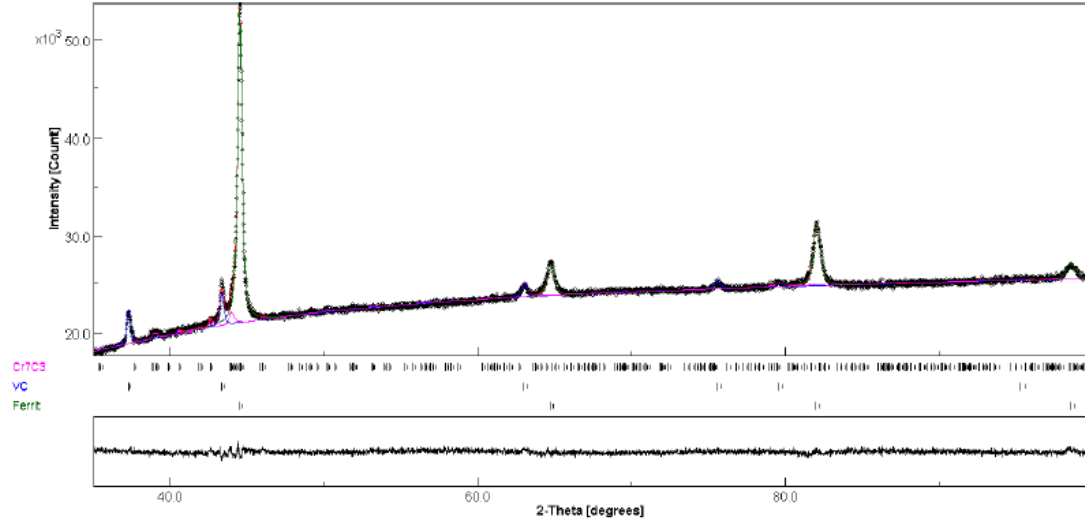


Şekil 6.13 V8-3 kodlu çeliğe ait Rietveld analiz görüntüsü

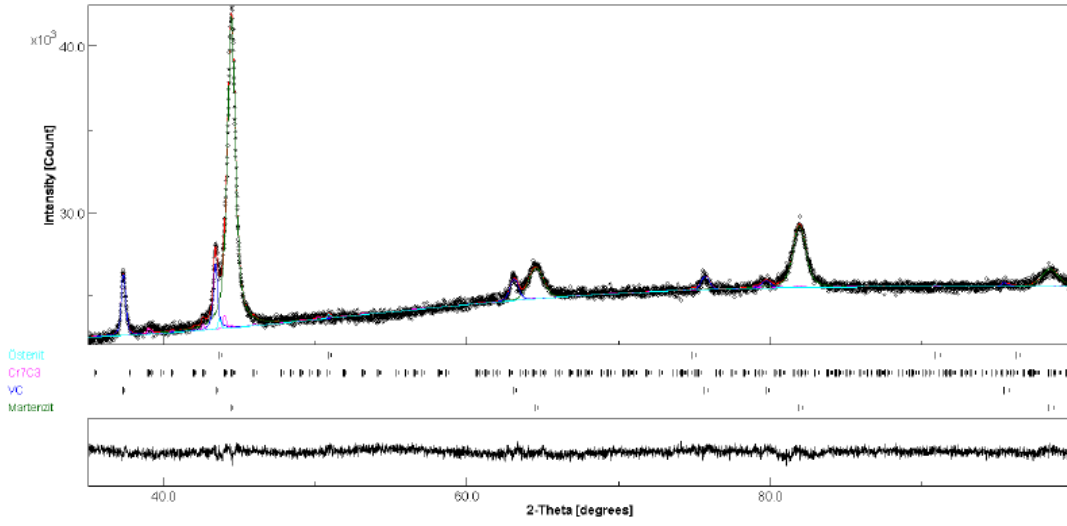


Şekil 6.14 V8-4 kodlu çeliğe ait Rietveld analiz görüntüsü

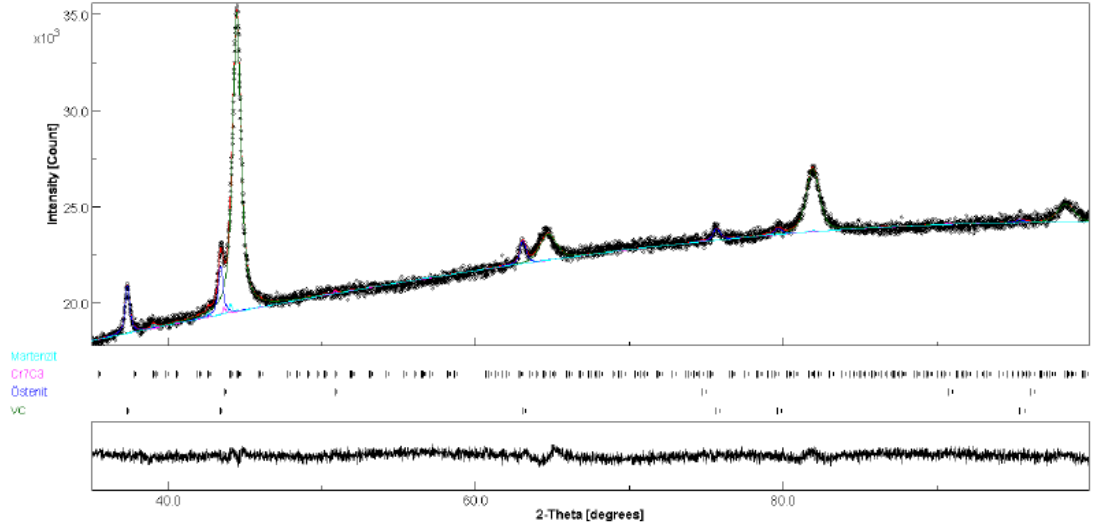
V8 numuneleri rietveld analiz sonuçlarında; V8-0 ve V8-3 (Q+DCT24+T) numunelerinde austenit yapısı görülmemiştir. V8-0 numunesi tamamen ferrit fazından oluşmaktadır. V4 sonuçları ile karşılaştırıldığında V8 çeliklerinde kalıntı austenit miktarının daha fazla olduğu belirlenmiştir. V8 çeliklerinde Cr_7C_3 karbürlerine oranla VC oranları daha yüksektir. Martenzit miktarı V4'e göre daha azdır.



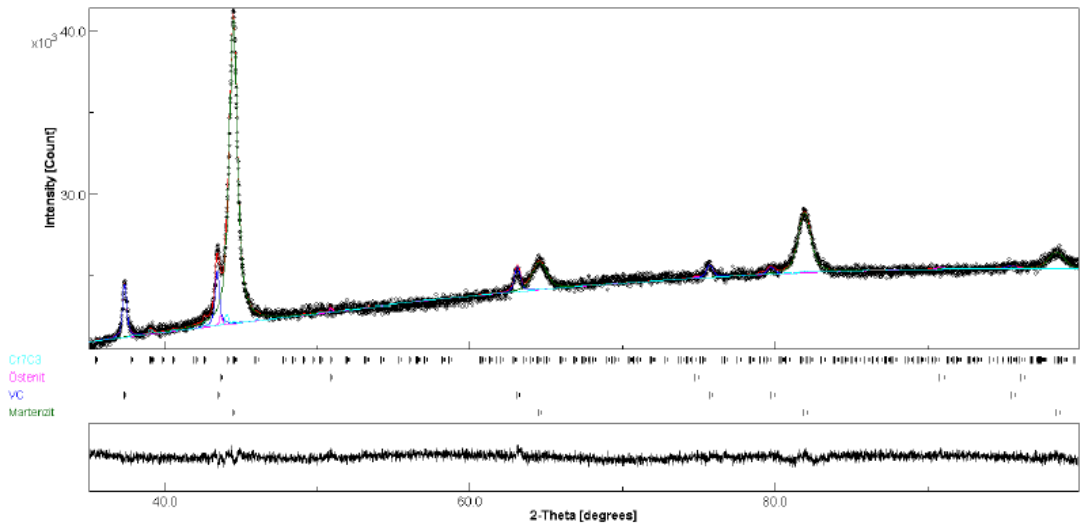
Şekil 6.15 V10-0 kodlu çeliğe ait Rietveld analiz görüntüsü



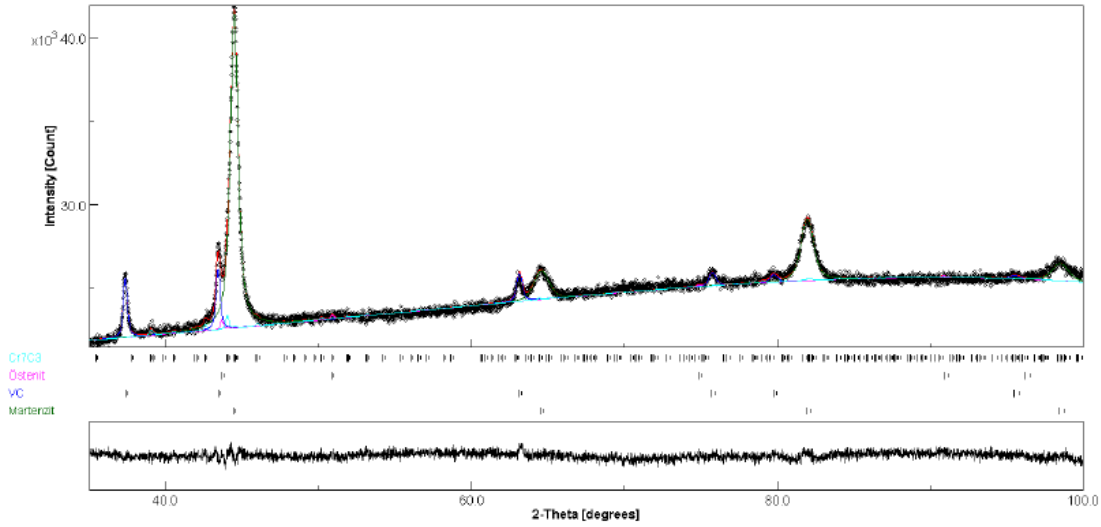
Şekil 6.16 V10-1 kodlu çeliğe ait Rietveld analiz görüntüsü



Şekil 6.17 V10-2 kodlu çeliğe ait Rietveld analiz görüntüsü



Şekil 6.18 V10-3 kodlu çeliğe ait Rietveld analiz görüntüsü



Şekil 6.19 V10-4 kodlu çeliğe ait Rietveld analiz görüntüsü

V10 numuneleri rietveld analiz sonuçlarında; V10-0 numunesinde austenit yapısı görülmemiştir. V4-0 numunesi tamamen ferrit fazından oluşmaktadır. V4 ve V8 sonuçları ile karşılaştırıldığında en fazla kalıntı austenit miktarı V10 çeliklerinde görülmüştür. Martenzit yapısının V8'den de daha az olduğu görülmüştür. VC oranları hemen hemen V8 ile aynıdır. Ferritin büyük miktarı Cr_7C_3 karbürlerine dönüşerek, Cr_7C_3 miktarını V4 ve V8'e göre artırmıştır.

Yapılan Rietveld analizleri ile yapıda bulunan fazların miktarları ve kristalografik özelliklerine ilişkin elde edilen sonuçlar Tablo 6.2'de verilmiştir.

Tablo 6.2 Rietveld analiz sonuçları (a, b, c: kafes parametreleri)

	Martenzit	a	b	c	Austenit	a	VC	a	Cr ₇ C ₃	a	b	c	sigma
V4-0	82.89(*)	2,878	2,878	2,878	-	-	9,73	4,182	7,38	4,552	7,038	12,177	1,184
V4-1	90,95	2,906	2,906	3,392	0,64	3,607	5,46	4,192	2,95	4,530	6,976	12,110	1,132
V4-2	88,14	2,893	2,893	3,138	0,25	3,600	9,39	4,183	2,22	4,534	6,973	12,070	1,185
V4-3	86,39	2,891	2,891	3,046	-	-	11,23	4,182	2,38	4,534	6,975	12,080	1,142
V4-4	87,45	2,894	2,894	3,131	-	-	10,39	4,183	2,16	4,542	7,002	12,005	1,148
V8-0	76.03(*)	2,879	2,879	2,879	-	-	18,44	4,181	5,53	4,545	6,984	12,131	1,214
V8-1	80,14	2,900	2,900	3,361	0,65	3,602	16,49	4,182	2,72	4,545	6,955	12,124	1,217
V8-2	80,39	2,897	2,897	3,278	0,63	3,599	17,39	4,181	1,59	4,526	7,001	12,142	1,216
V8-3	84,26	2,883	2,883	2,962	-	-	14,26	4,168	1,48	4,526	7,010	12,142	1,205
V8-4	75,56	2,870	2,870	3,062	0,15	3,596	23,82	4,177	0,47	4,527	7,010	12,143	1,137
V10-0	74.99(*)	2,879	2,879	2,879	-	-	16,56	4,169	8,43	4,514	7,027	12,264	1,203
V10-1	74,41	2,892	2,892	3,283	1,18	3,585	20,39	4,164	4,02	4,520	7,043	12,217	1,181
V10-2	73,56	2,887	2,887	2,938	0,91	3,589	22,42	4,166	3,11	4,521	7,046	12,200	1,176
V10-3	75,10	2,891	2,891	2,956	0,89	3,589	21,12	4,167	2,89	4,522	7,038	12,203	1,214
V10-4	72,85	2,837	2,837	2,905	0,85	3,585	23,18	4,163	3,12	4,521	7,040	12,200	1,289

(*) Ferrit

Sigma: Analizin doğruluk derecesi (1-2 arasında ve 1'e yakın olması beklenir.)

Sonuç olarak; kalıntı austenit miktarının kriyojenik işlem sonucunda azaldığı tespit edilmiştir. Kriyojenik işlemin mikroyapıdaki kalıntı austeniti martenzite dönüştürdüğü görülmektedir. Bu durum literatür ile uyum içerisindedir. Kriyojenik ısıtım süresinin artmasıyla birlikte hem kalıntı austenit miktarının hem de % karbür (Cr_7C_3) oranında azalmaların olduğu gözlenmiştir. Kalıntı austenit miktarı ve VC karbürlerine oranla daha sert yapıda olan Cr_7C_3 karbürleri sertliği doğrudan etkilemektedir.

6.2 Mekanik Deneylerin Sonuçları

6.2.1 Mikro sertlik deneyi sonuçları

Tablo 6.3, Tablo 6.4 ve Tablo 6.5'te sırası ile V4, V8 ve V10 çeliklerine ait 5 farklı parametrelere sahip olan numunelerin sertlik değerleri gösterilmiştir.

V4 çeliklerine ait sertlik değerleri incelendiğinde; en iyi sonucu 24 saat kriyojenik bekleme süresine tabi tutulan V4-3 (Q+DCT24+T) çeliği vermiştir. V4-3 (Q+DCT24+T) çeliğinden sonra en iyi sertlik değerleri 36 saat kriyojenik bekleme süresine tabi tutulan V4-4 (Q+DCT36+T) çeliğinde elde edilmiştir. En düşük sertlik

değerleri de V4-0 çeliğinde (hiçbir işlem görmemiş olan referans numune) görülmüştür. Kriyojenik bekleme süresi arttıkça sertlik önce artmış sonra azalmıştır. Sonuçlardan anlaşılabacağı gibi kriyojenik işlem sertlik değerleri üzerinde dikkat çekecek bir etki yaratmamıştır.

Tablo 6.3 V4 kodlu numuneye ait mikro sertlik değerleri

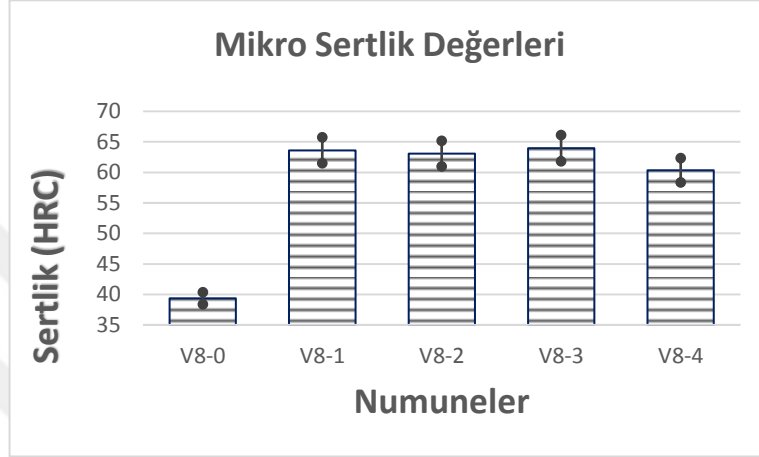
Mikrosertlik Değerleri		
	HV	HRC
V4-0	388,875	39,675
V4-1 (Q+T)	871,55	66,15
V4-2 (Q+DCT12+T)	862,825	65,9
V4-3 (Q+DCT24+T)	898,575	66,9
V4-4 (Q+DCT36+T)	875,75	66,25



V8 çeliklerine ait sertlik değerleri incelendiğinde; en iyi sonucu 24 saat kriyojenik bekleme süresine tabi tutulan V8-3 (Q+DCT24+T) çeliği vermiştir. V8-3 (Q+DCT24+T) çeliğinden sonra en iyi sertlik değerleri geleneksel ısıtılma işlem görmüş olan V8-1 (Q+T) çeliğinde elde edilmiştir. En düşük sertlik değerleri de V8-0 çeliğinde (hiçbir işlem görmemiş olan referans numune) görülmüştür. Kriyojenik bekleme süresi arttıkça sertlik önce artmış sonra azalmıştır. Sonuçlardan anlaşılabacağı gibi kriyojenik işlem sertlik değerleri üzerinde dikkat çekecek bir etki yaratmamıştır.

Tablo 6.4 V8 kodlu numuneye ait mikro sertlik değerleri

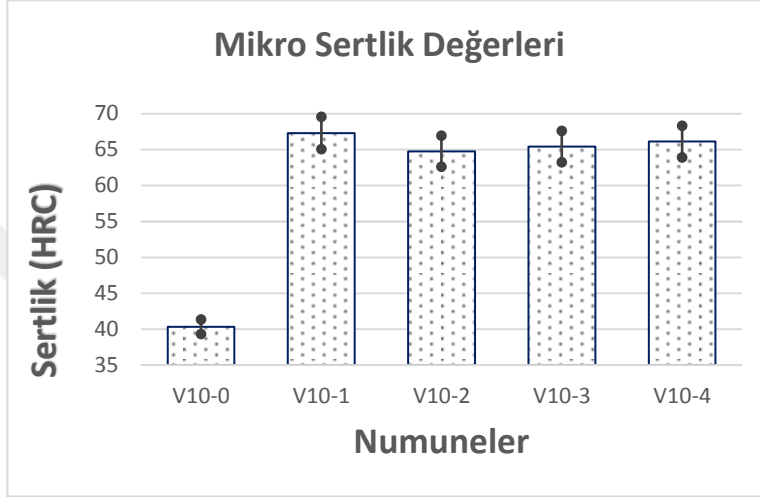
Mikrosertlik Değerleri		
	HV	HRC
V8-0	387,75	39,375
V8-1 (Q+T)	791,725	63,625
V8-2 (Q+DCT12+T)	775,8	63,1
V8-3 (Q+DCT24+T)	801,875	63,975
V8-4 (Q+DCT36+T)	706,4	60,35



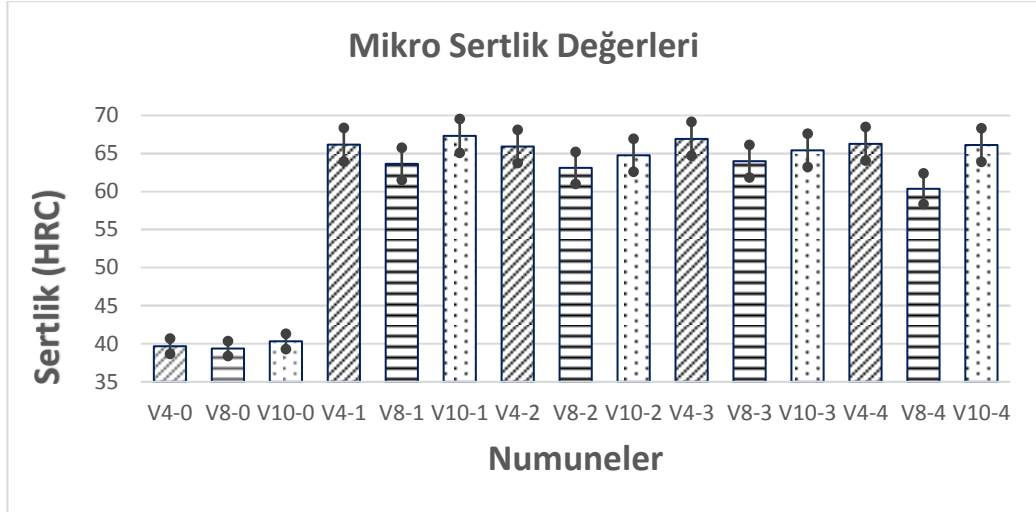
V10 eliklerine ait sertlik değerleri incelendiğinde; en iyi sonucu geleneksel ısıl işlem gormuş olan V10-1 (Q+T) eliği vermiştir. V10-1 (Q+T) eliğinden sonra en iyi sertlik değerleri 36 saat kriyojenik bekleme suresine tabi tutulan V10-4 (Q+DCT36+T) eliğinde elde edilmiştir. En duşuk sertlik değerleri de V10-0 eliğinde (hiçbir işlem gormemiş olan referans numune) gorlmuştur.

Tablo 6.5 V10 kodlu numuneye ait mikro sertlik değerleri

Mikrosertlik Değerleri		
	HV	HRC
V10-0	396,825	40,325
V10-1 (Q+T)	912,75	67,3
V10-2 (Q+DCT12+T)	825,375	64,75
V10-3 (Q+DCT24+T)	846,65	65,4
V10-4 (Q+DCT36+T)	869,45	66,1



Şekil 6.22’de; V4, V8 ve V10 çeliklerine ait tüm numunelerin mikro sertlik değerlerinin karşılaştırıldığı grafik verilmiştir. Elde edilen sonuçlar kriyojenik işlem sonucunda mikroyapının ikincil karbür çökelmesine bağlı olarak değiştiğini göstermektedir. Kriyojenik ve temperleme işlemi ile sertlikteki bu düşüş ve artışlara bazı MC (Mo, V, W, Cr) karbürlerinin ve çökelti fazlarının çözünmesinin sebep olduğu Rietveld analizleri ile de doğrulanmaktadır. V4, V8 ve V10 çeliklerine ısıtıl işlem sonrası uygulanan kriyojenik işlem ile mikro sertlik değerlerinde meydana gelen net olmayan artış veya azalmalar Haizhi Li ve arkadaşlarının yaptığı çalışma (Tablo 2.1) ile de desteklemektedir.



Şekil 6.20 V4, V8 ve V10 çeliklerine ait mikro sertlik değerlerinin karşılaştırılması

En iyi sertlik değerleri tüm numuneler arasında genel olarak V4 çeliklerinde elde edilmiştir. Sertlik bakımından kriyojenik bekleme süresi V4 çeliğinde etkili olurken, V8 ve V10 çelikleri için net bir etkisinden bahsetmek, bu sonuçlara göre zordur.

Yapılan XRD ve Rietveld analizlerinden elde edilen veriler sonucunda kriyojenik işlem sonucu mikroyapıda oluşan VC karbürlerine göre daha sert olan Cr_7C_3 karbürlerindeki artış ve azalış ile doğru orantılı olarak sertlik değerleri de artış ve azalış göstermiştir. Elde edilen tüm sertlik değerleri Rietveld analiz sonuçları ile desteklenmektedir.

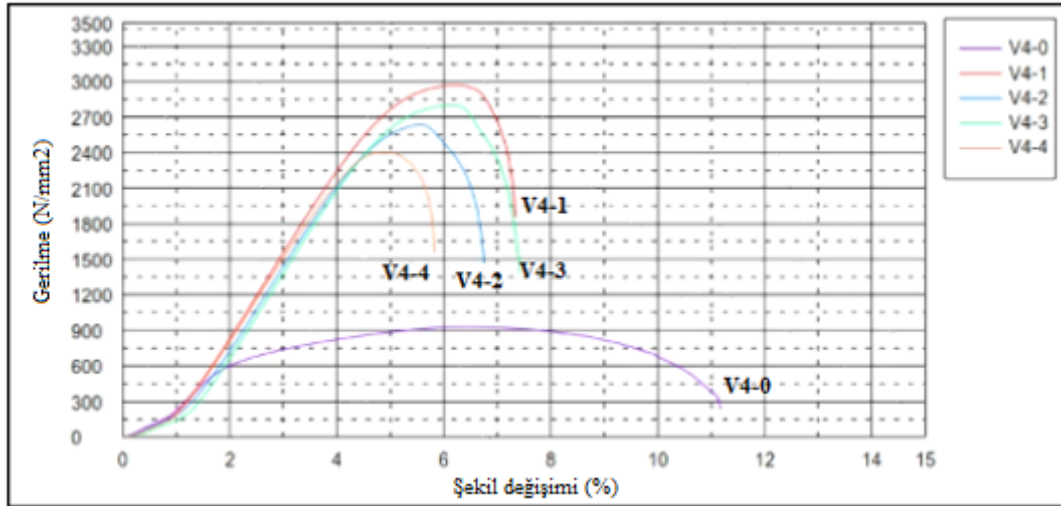
6.2.2 Basma deneyi sonuçları

V4, V8 ve V10 çeliklerinin mekanik özelliklerini belirlemek amacı ile farklı bekleme sürelerine maruz kalan numunelere basma testleri uygulanmıştır. Her bir işlem türüne ait numunelerin maksimum basma dayanımı, kopma gerilmesi ve şekil değişimi değerleri Tablo 6.6’da verilmiştir.

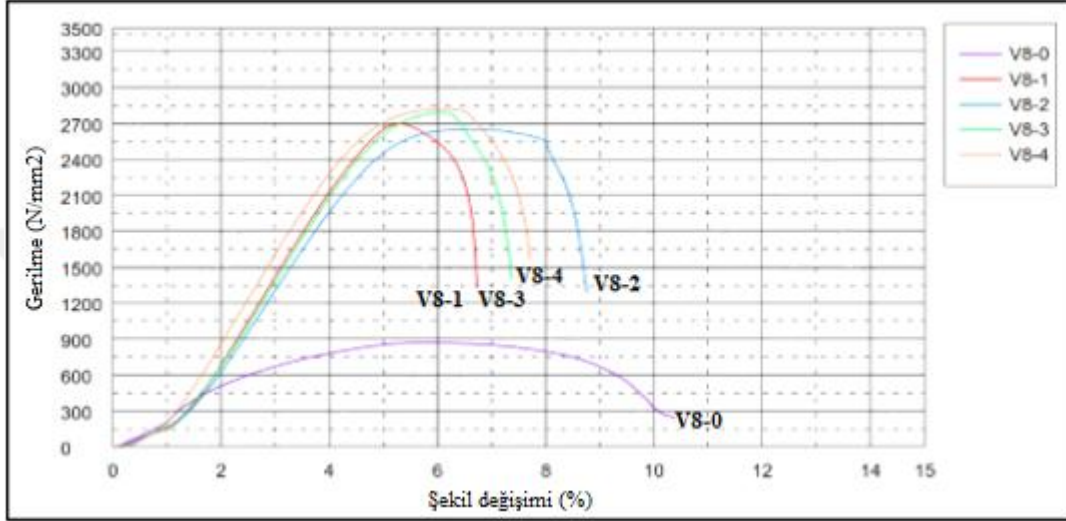
Tablo 6.6 Numunelere ait maksimum gerilme, kopma gerilmesi ve şekil değişimi değerleri

	Max Gerilme (N/mm ²)	Kopma Gerilmesi (N/mm ²)	Şekil Değişimi (%)
V4-0	932,328	238,526	11,18420
V4-1 (Q+T)	2968,790	1859,050	7,33159
V4-2 (Q+DCT12+T)	2637,160	1466,650	6,75277
V4-3 (Q+DCT24+T)	2801,730	1378,300	7,42811
V4-4 (Q+DCT36+T)	2410,330	1556,520	5,82524
V8-0	869,758	234,727	10,40870
V8-1 (Q+T)	2700,520	1328,460	6,73480
V8-2 (Q+DCT12+T)	2652,900	1284,390	8,75940
V8-3 (Q+DCT24+T)	2793,990	1400,500	7,36708
V8-4 (Q+DCT36+T)	2823,760	1557,620	7,71129
V10-0	1104,290	252,332	12,44600
V10-1 (Q+T)	2913,460	1693,860	8,03178
V10-2 (Q+DCT12+T)	2657,100	1401,230	6,98980
V10-3 (Q+DCT24+T)	2347,730	1765,170	6,30526
V10-4 (Q+DCT36+T)	2687,480	1468,700	7,72632

V4, V8 ve V10 numunelerine uygulanan 5 farklı işlem türü için gerilme-şekil değişimi diyagramları Şekil 6.21, Şekil 6.22 ve Şekil 6.23’de verilmiştir.

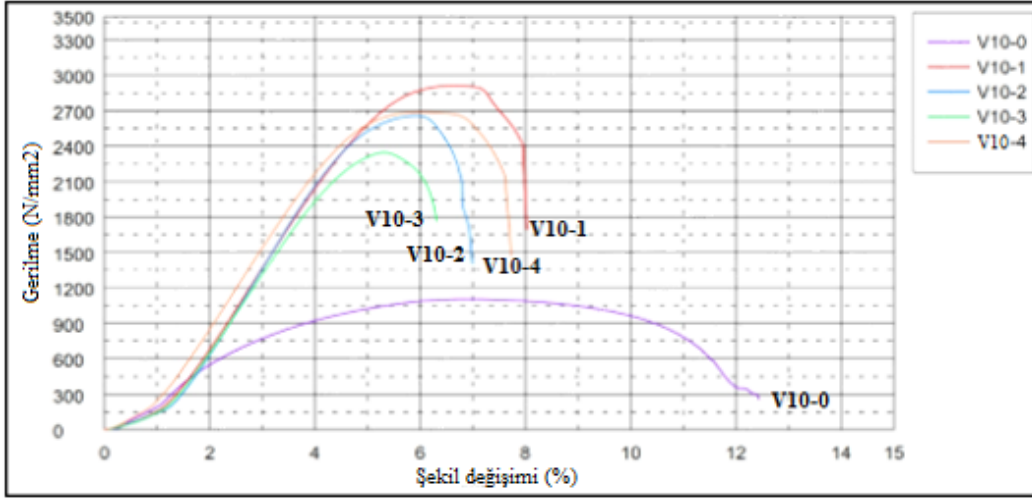
**Şekil 6.21** V4 numunelerine ait gerilme-şekil değişimi diyagramları

V4 numunesine ait gerilme-şekil değişimi diyagramlarından da anlaşılaçağı gibi en yüksek şekil değışimi değeri referans malzeme olan V4-0 numunesinde görölmüşür. Maksimum gerilme değeri ise V4-1 (Q+ T) numunesinde görölmüşür. Kriyojenik işlemin mekanik açıdan en iyi etkisi V4-3 (Q+DCT24+T) numunesinde elde edilmiştir.



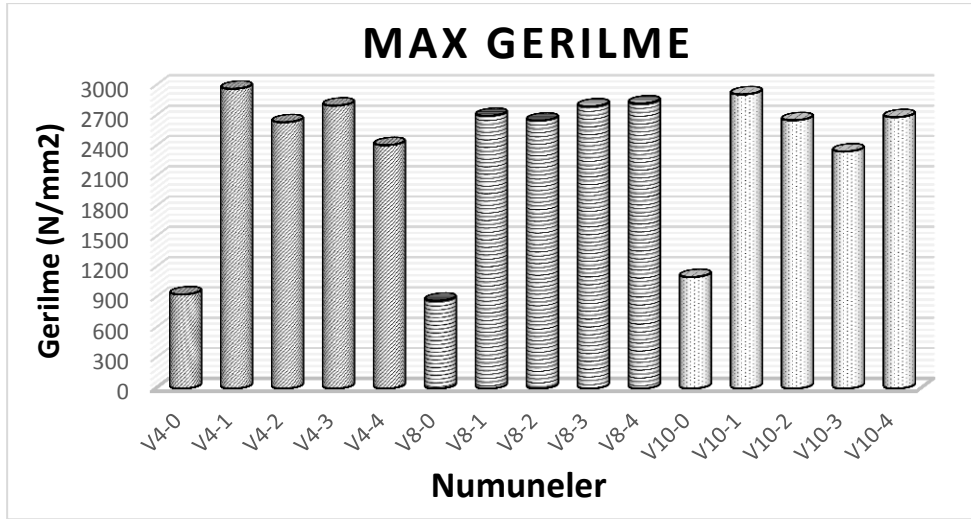
Şekil 6.22 V8 numunelerine ait gerilme-şekil değışimi diyagramları

V8 numunesine ait gerilme-şekil değışimi diyagramlarından da anlaşılaçağı gibi en yüksek şekil değışimi değeri referans malzeme olan V8-0 numunesinde görölmüşür. Maksimum gerilme değeri ise V8-4 (Q+DCT36+T) numunesinde görölmüşür.



Şekil 6.23 V10 numunelerine ait gerilme-şekil değişimi diyagramları

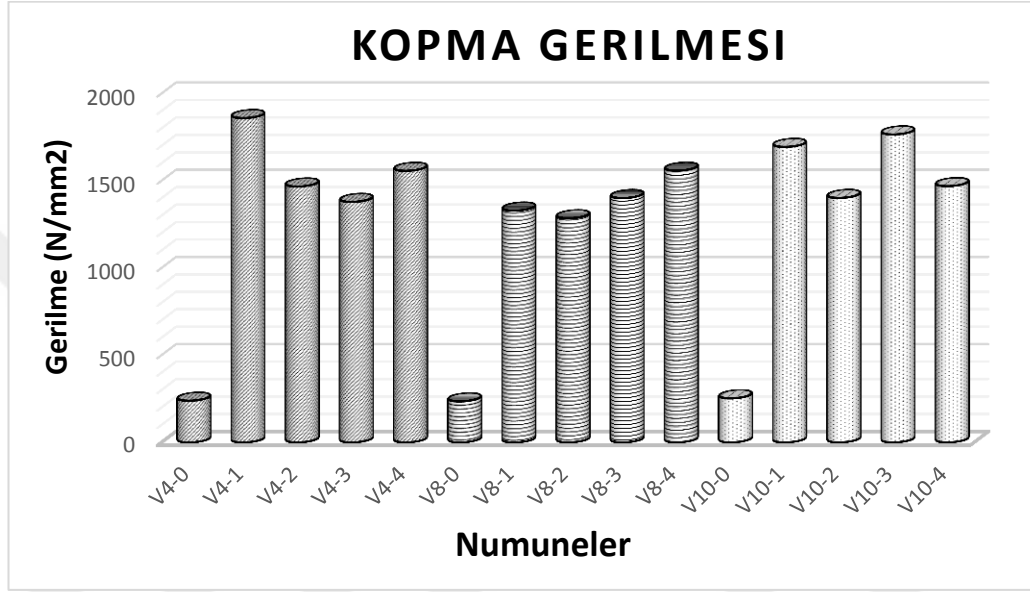
V10 numunesine ait gerilme-şekil değişimi diyagramlarından da anlaşılacağı gibi en yüksek şekil değişimi değeri referans malzeme olan V10-0 numunesinde görülmüştür. Maksimum gerilme değeri ise V10-1 (Q+ T) numunesinde görülmüştür. Kriyojenik işlemin mekanik açıdan en iyi etkisi V10-4 (Q+DCT36+T) numunesinde elde edilmiştir.



Şekil 6.24 Numunelere ait maksimum gerilme değerlerindeki değişimleri

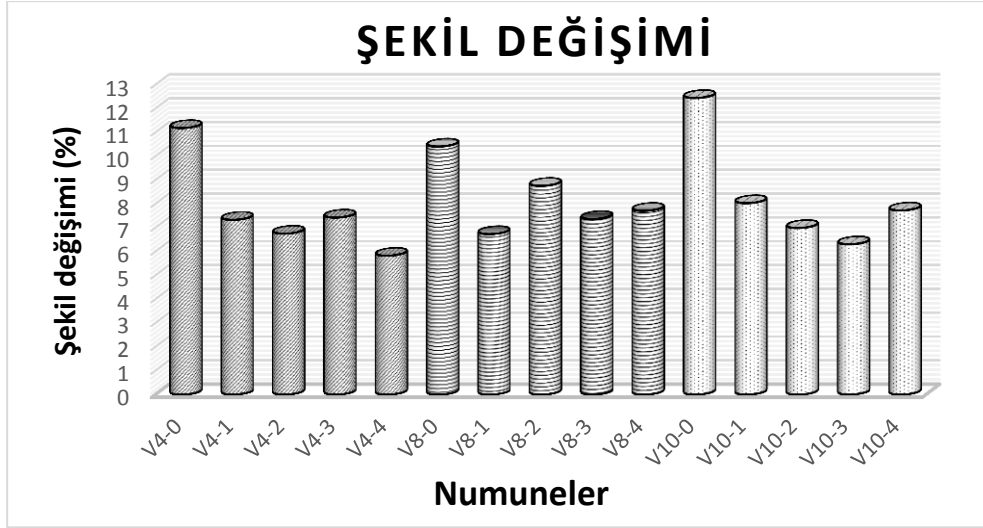
Tüm seri tiplerinde en düşük maksimum gerilme değerleri referans numunelerde görülmektedir. V4 numunelerinde; geleneksel ısıtma işlemi ile en yüksek gerilme değeri

elde edilmiştir. Kriyojenik işlem görmüş numuneler arasında ise en yüksek gerilme değeri 24 saat bekleme süresinde elde edilmiştir. V8 numunelerinde kriyojenik bekleme süresi artıkça gerilme değeri de artmıştır. V10 numunelerinde geleneksel ısıtma işlemi ile en yüksek gerilme değeri elde edilmiştir. Kriyojenik işlem görmüş numuneler arasında ise en yüksek gerilme değeri 36 saat bekleme süresinde elde edilmiştir.



Şekil 6.25 Numunelere ait kopma gerilmesi değerlerindeki değişim

Tüm seri tiplerinde en düşük maksimum gerilme değerleri referans numunelerde görülmektedir. V4 numunelerinde; geleneksel ısıtma işlemi ile en yüksek kopma gerilmesi elde edilmiştir. Kriyojenik işlem görmüş numuneler arasında ise en yüksek kopma gerilmesi 36 saat bekleme süresinde elde edilmiştir. V8 numunelerinde kriyojenik bekleme süresi artıkça gerilme değeri de artmıştır. V10 numunelerinde en yüksek kopma gerilmesi 24 saat bekleme süresinde elde edilmiştir.



Şekil 6.26 Numunelere ait şekil değişimi değerlerindeki değişim

V4, V8 ve V10 çeliklerinden alınan şekil değişimi verilerine göre gerilme değerleri yükseldikçe kopma yüzdeleri azalmaktadır. 12 saat kriyojenik bekleme süresi uygulanan numuneler arasında V8, 24 saat kriyojenik bekleme süresi uygulanan numuneler arasında V4, 36 saat kriyojenik bekleme süresi uygulanan numuneler arasında V10 en yüksek şekil değişimi değerlerine sahiptir. V10 çeliğinin yapısındaki düzensizlikler ve oluşan mikro çatlaklar sertlik ve mukavemet değerlerini doğrudan etkileyerek bu değerlerin düşmesine sebep olmuştur. V4 ve V8 çelikleri ile karşılaştırıldığında; V10 çeliğinin kimyasal bileşiminde bulunan fazla miktardaki krom V10 çeliğinin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilediği düşünülmektedir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, farklı bekleme sürelerinde uygulanan kriyojenik işlemin farklı vanadyum oranlarına sahip olan soğuk iş takım çelikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu çeliklerin metalurjik ve mekanik özellikleri incelenmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- SEM mikrografaları incelendiğinde net bir şekilde referans numuneler dışındaki tüm numunelerde karbür oluşumları ve martenzit yapıları görülmektedir. Referans olarak alınan numuneler hiçbir işlem görmediklerinden mikroyapı sadece ferrit ve göreceli kaba karbürlerden oluşmaktadır. Seçilen vanadyumlu çeliklerde, vanadyum oranının ve kriyojenik bekleme süresinin artırılması mikroyapıda belirgin farklar oluşturmamıştır. Kriyojenik işlem sonrası mikroyapıda oluşan karbürler genel olarak ince ve daha homojen dağılımlıdır.
- EDS analizleri incelendiğinde genel olarak Fe, Cr, V, S, C, Mo elementlerine rastlanmış ve matrislerin Fe ağırlıklı olduğu tespit edilmiştir. Kriyojenik işlem süresinin artmasıyla birlikte genel olarak VC ve Cr_7C_3 karbür miktarlarında artışlar tespit edilmiştir.
- Numunelere ait karbür tane boyutlarının ölçülmesi sonucunda referans numunelerdeki karbürlerin tane boyutlarının oldukça küçük olduğu belirlenmiştir. Kriyojenik bekleme süresi arttıkça V4 numunelerine ait karbür tane boyutlarının küçüldüğü ve homojen dağılım sergilediği, V8 ve V10 numunelerinde ise oluşan ince dağılımlı karbürlerin birleşerek küreselliklerinin bozulduğu ve tane boyutlarının irileşme eğilimi gösterdiği tespit edilmiştir.
- Numunelerden elde edilen XRD analizleri sonucunda yapıda martenzit (α' -Fe), kalıntı austenit (γ -Fe) ve VC ve Cr_7C_3 formunda küresel karbür bileşiklerinin olduğu tespit edilmiştir. XRD paternlerinden görüleceği gibi V4

ve V10 çelikleri için kriyojenik işlem bekleme süresi artıkça kalıntı austenitin azaldığı ve karbür miktarlarında artışların meydana geldiği görülmektedir. Yapılan Rietveld analizi sonucunda da bu bulgular desteklenmiştir. Kalıntı austenit miktarının kriyojenik işlem sonucunda azaldığı ve martenzite dönüştürdüğü görülmüştür.

- Kriyojenik işlem sonrası elde edilen martenzit yapı uygulanan temperleme işlemi ile temperlenmiş martenzite dönüşmüştür. Bu nedenle kriyojenik işlem sonrası uygulanan temperlemenin, karbür çökmesi sonucu yapıdaki sertliği azalttığı görülmüştür. Bununla birlikte kalıntı austenit miktarı ve VC karbürüne oranla daha sert yapıda olan Cr_7C_3 karbürlerinin artışı sertliği doğrudan etkilemektedir. En iyi sertlik değerleri tüm numuneler arasında genel olarak V4 çeliklerinde elde edilmiştir. Bu nedenle sertlik açısından kullanım gerektiren yerlerde V4 çelikleri seçilmesi gerektiği sonucu ortaya çıkmıştır.
- Basma deneyi sonuçları değerlendirildiğinde kriyojenik işlem etkisini en iyi V8 numunelerinde göstermiştir. Bu nedenle dayanım açısından kullanılacak yerlerde çalışma kapsamında kullanılan çelikler arasında V8 çeliği seçilmelidir.
- Kriyojenik işlemin, kimyasal bileşiminde yüksek miktarda krom bulunduran V8 çelikleri üzerindeki etkisinin olumsuz yönde olduğu saptanmıştır. Aynı şekilde vanadyum miktarının %4'ten fazla olması durumunda (V8 ve V10 çelikleri) kriyojenik işlem süresinin bu çelikleri en azından olumlu yönde etkilemediği görülmüştür.

Ayrıca bu çalışmada;

- Kriyojenik işlemin etkili olduğu ancak çok uzun bekleme sürelerinde (12 saatten fazla) etkili olmadığı görülmüştür.

- Kriyojenik işlem, kalıntı austenitin martenzite dönüşümü açısından etkilidir. Yapıda bulunan alaşım elementlerinin (V ve Cr) cinslerinin ve miktarlarının, bu dönüşümü oldukça etkiledikleri açıktır. Kriyojenik işlemin, yapıda ne kadar çok kalıntı austenit kalma olasılığı varsa o oranda etkili olduğu söylenebilir. Özellikle karbür yapıcı alaşım elementlerin miktarı arttıkça ya da M_s - M_f sıcaklıklarına bağlı olarak austenit-martenzit dönüşümü daha kolay gerçekleştiği durumlarda, kriyojenik işlem süresinin etkisi neredeyse yok gibidir. Buna karşılık temperleme ile beraber, yapıdaki austenit fazının daha çok karbüre dönüştüğü ve bir kısmının da yapıda kaldığı sonucuna varılmıştır.

- Kalıntı austenitin martenzite ve/veya karbüre dönüşümü, karbür tane boyutu ve şekil değişimi mekanizmaları birlikte gelişmektedir.

Bu alanda geliştirilebilecek konu önerilerine aşağıdaki gibi yer verilmiştir.

- Seçilen malzeme grubuna hem sıg (-80°C) hem de derin (-196°C) kriyojenik işlem uygulanarak, elde edilen sonuçlar karşılaştırılabilir.
- Seçilen malzeme grubuna kriyojenik işlem sonrasında farklı sıcaklıklarda ve sayılarda temperleme uygulayarak temperleme etkisinin mekanik özellikler üzerindeki etkisi araştırılabilir.
- Farklı bekleme sürelerinde uygulanan kriyojenik işlemin seçilen malzeme grubu üzerindeki takım ömrü ve aşınma davranışları incelenebilir.
- Su verme işlemi sonrası direkt kriyojenik işlem uygulanarak, temperlemenin kriyojenik işlem üzerine olan etkisi yorumlanabilir.
- Kriyojenik işlemi gerçekleştirmek için soğutma ortamında kullanılan azot yerine diğer ortam koşulları (helyum, hidrojen vb.) kullanılarak mekanik özelliklere etkisi incelenip, karşılaştırılabilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Amini, K., Nategh, S. and Shafyei, A.,** 2010, Influence of Different Cryo-Treatments on Tribological Behavior of 80CrMo12 Cold Work Tool Steel, Material Design, 31:4666-4675pp.
- Amini, K., Akhbarizadeh, A. and Javadpour, S.,** 2012, Investigating the Effect of Holding Duration on the Microstructure of 1.2080 Tool Steel During the Deep Cryogenic Heat Treatment, Vac., 86:1534–1540pp.
- Amini, K., Akhbarizadeh A. and Javadpour S.,** 2014, Investigating the Effect of Quench Environment and Deep Cryogenic Treatment on the Wear Behavior of AZ91, Iran, 154-160pp.
- Akhbarizadeh, A., Shafyei V. and Golozar, M.A.,** 2009, Effects of Cryogenic Treatment on Wear Behavior of D6 Tool Steel, Materials and Design, 30:3259–3264pp.
- Akhbarizadeh, A., Amini, K. and Javadpour, S.,** 2012, Effects of Applying an External Magnetic Field during the Deep Cryogenic Heat Treatment on the Corrosion Resistance and Wear Behavior of 1.2080 Tool Steel, Material Design, 41:114–123pp.
- Akıncıoğlu, S.** 2015, Süper Alaşım (Hastelloy C22) Çeliğinin Kriyojenik İşlem Uygulanmış Takımlarla İşlenebilirliğinin Araştırılması, Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 3-27s.
- Arslan, F.,** 2010, Soğuk İş Takım Çeliklerinde Sıfırlatı İşlem Derecesinin Mekanik Özelliklere Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, 3-12s.
- Arslan, F., Altinsoy, D. and Hatman, A.,** 2011, Characterization of Cryogenic Heat Treated Vanadis 4 PM Cold Work Tool Steel, Sakarya University, Sakarya, 370-372pp.
- Arslan, Y.,** 2014, Kriyojenik İşlemin AISI D3 Soğuk İş Takım Çeliğinin Performansına Etkilerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Ankara, 36-76s.
- Barron, R.F.,** 1982, Cryogenic Treatment of Metals to Improve Wear Resistance, Cryog., 22:409–413pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Baykara, T. and Bedir H.,** 2017, Effects of Heat Treatment on the Mechanical Properties of the Vanadis 4 Extra and Vanadis 10 Tool Steels, Dogus University, Istanbul, 6(2):1-3pp.
- Bensely, A., Senthilkumar, D. and Mohan Lal, D.,** 2007, Effect of Cryogenic Treatment on Tensile Behavior of Case Carburized Steel-815M17, Materials Characterization, 58:485–491pp.
- Bensely, A., Venkatesh, S. and Mohan Lal, D.,** 2008, Effect of Cryogenic Treatment on Distribution of Residual Stress in Case Carburized EN 353 Steel, Material Science Engineering, 479:229–235pp.
- Bensely, A., Shyamala, L. and Harish, S.,** 2009, Fatigue Behaviour and Fracture Mechanism of Cryogenically Treated EN 353 Steel”, Material Science Engineering, 30:2955–2962pp.
- Chen, P., Malone, T., Bond, R. and Torres, P.,** 2002, Effects of Cryogenic Treatment on the Residual Stress and Mechanical Properties of an Aerospace Aluminum Alloy”, 5th Conference on Aerospace Materials Processes and Environmental Technology (AMPET).
- Cicek, A., Kara, F. and Kivak, T.,** 2015, Effects of Deep Cryogenic Treatment on the Wear Resistance and Mechanical Properties of AISI H13 Hot-Work Tool Steel, Journal of Materials Engineering and Performance, 24:4431-4439pp.
- Collins, D. N. and Dormer, J.,** 1997, Deep Cryogenic Treatment of a D2 Cold Work Tool Steel, Heat Treat. Metals, 71–74pp.
- Das, D., Dutta, A.K. and Ray, K.K.,** 2009, Optimization of the Duration of Cryogenic Processing to Maximize Wear Resistance of AISI D2 Steel, Cryogenics, 49(5):176-184pp.
- Das, D., Dutta, A.K. and Ray, K.K.,** 2010, Sub-zero Treatments of AISI D2 steel: Part I. Microstructure and Hardness, Bengal Engineering and Science University, India, 2182-2193pp.
- Das, D., Dutta, A.K. and Ray, K.K.,** 2010, Sub-zero Treatments of AISI D2 steel: Part II. Wear Behavior, Bengal Engineering and Science University, India, 527: 2194–2206pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Demir, İ. D. ve Uygur, İ.,** 2017, Kriyojenik İşlem Uygulanmış Dökme Demir Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Düzce Üniversitesi, Bilim ve Teknoloji Dergisi, Düzce, 5:210-219s.
- Dhokey, N.B. and Nirbhavne, S.,** 2009, Dry Sliding Wear of cryotreated Multiple Tempered D-3 Tool Steel, Journal of Materials Processing Technology, 209:1484-1490.
- Dixit, S. S., Nimbalkar, S. R. and Kharde, R. R.,** 2013, Dry Sliding Wear Analysis of D5 Tool Steel at Different Heat Treatments, Int. J. Eng. Sci., 2(5):16–26pp.
- Durica, J., Ptacinova, J. and Hudakova, M.,** 2018, Microstructure and Hardness of Cold Work Vanadis Steel after Subzero Treatment at -140°C, Slovak University of Technology, Slovakia, 1-5pp.
- Firouzdor, V., Nejati, E. and Khomamizadeh, F.,** 2008, Effect of Deep Cryogenic Treatment on Wear Resistance and Tool Life of M2 HSS Drill, Journal of Materials Processing Technology, 206: 467–472pp.
- Gordon, P. and Cohen M.,** 1942, The Transformation of Retained Austenite in High Speed Steel at Subatmospheric Temperatures, Trans. ASM, 30:569-588pp.
- Gunes, İ., Cicek, A. ve Aslantaş, K.,** 2014, Effect of Deep Cryogenic Treatment on Wear Resistance of AISI 52100 Bearing Steel, Transactions-Indian Institute of Metals, 67(6):909-917pp.
- Gunes, I., Uzun, M. and Cetin, A.,** 2016, Evaluation of Wear Performance of Cryogenically Treated Vanadis 4 Extra Tool Steel, Afyon Kocatepe University, 195-204pp.
- Huang, J.Y, Zhu, Y.T. and Liao, XZ,** 2003, Microstructure of Cryogenic Treated M2 Tool Steel, Materials Science and Engineering, 339(1–2):241–244pp.
- Jurci, P., Domankova, M. and Caplovic, L.,** 2015, Microstructure and Hardness of Sub-zero Treated and No Tempered P/M Vanadis 6 Ledeburitic Tool Steel, Czech Republic, 92-101pp.
- Jurci, P., Kusyl, M. and Ptacinova1, J.,** 2015, Long-term Sub-zero Treatment of P/M Vanadis 6 Ledeburitic Tool Steel, Slovakia, 196-202pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Jurci, P., Domankova, M. and Hudakova M.,** 2017, Characterization of Microstructure and Tempering Response of Conventionally Quenched, Short- and Long-Time Sub-zero Treated PM Vanadis 6 Ledeburitic Tool Steel, Slovakia, 398-415pp.
- Jurci P., DlouhY I. and Priknerova, P.,** 2018, Effect of Sub-Zero Treatment Temperatures on Hardness, Flexural Strength, and Fracture Toughness of Vanadis 6 Ledeburitic Die Steel, Czech Republic, 1-15pp.
- Kara, F.,** 2014, AISI 52100 Çeliğinin Yorulma Ömrü ve Taşlanabilirliğine Kriyojenik İşlem Parametrelerinin Etkilerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, 38-43s.
- Kaushal, A., Rajput, RS. and Vardhan, A.,** 2015, Effects of Cryogenic Treatment on Tool Steel AISI-D6, International Journal of Research in Engineering and Technology, 4(3):470-473pp.
- Kıvak, T.,** 2012, Kesici Takımlara Uygulanan Kriyojenik İşlemin Ti-6Al-4V Alaşımının Delinebilirliği Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Ankara, 36-40s.
- Kim, S. S., Shin, K.S. and Kim, N.J.,** 1999, Tensile Behavior of Rapidly Solidified Al-Li-Zr and Al-Li-Cu-Mg-Zr Alloys at 293 and 77K, Metal. Trans. A, 30(8):2254–2258pp.
- Koneshlou, M., Asl, K.M. and Khomamizadeh, F.,** 2011, Effect of Cryogenic Treatment on Microstructure, Mechanical and Wear Behaviors of AISI H13 Hot Work Tool Steel, Iran, 55-61pp.
- Koshelev, P. F., Nikitin, P. N., Yu. Bynin, E. and Pastukhova, T. A.,** 1991, Mechanical Properties of Alloy KhN35VTYu at Low Temperatures, Metal Sci. Heat Treat., 33(5):388–390pp.
- Krzanowski, J. E.,** 1988, The Effects of Heat Treatment and Cold Working on the Room Temperature and Cryogenic Mechanical Properties of Fe-30Mn-9Al-0.9C Steel, Metal. Trans. A, 19(7):1873–1876pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Li, H., Wang, J. and Yang, H.**, 2006, Effect of Cryogenic Treatment on Property of 14Cr2Mn2V High Chromium Cast Iron Subjected to Subcritical Treatment, Journal of Iron and Steel Research, 13(6):43–48pp.
- Li, S., Xie, Y. and Wu, X.**, 2010, Hardness and Toughness Investigations of Deep Cryogenic Treated Cold Work Die Steel, 50:89-92pp.
- Li, H., Tong, W. and Cui, J.**, 2016, The Influence of Deep Cryogenic Treatment on the Properties of High-Vanadium Alloy Steel, Northeastern University, China, 356-362pp.
- Liua, X., Zhaoa, C. and Zhaob, K.**, 2019, Microstructure Evolution and Mechanical/Physical Properties Of 25# Valve Alloys Steel Subjected to Deep Cryogenic Treatment, China, 394-401pp.
- Luo, Q., Wang, H.H. and Li, G.Q.**, 2019, On Mechanical Properties of Novel High-Mn Cryogenic Steel in Terms of SFE and Microstructural Evolution, Material Science and Engineering, 753:91-98pp.
- Ma, L., Liang, G. and Li, Y.**, 1992, Effect of Hydrogen Charging on Ambient and Cryogenic Mechanical Properties of a Precipitate–Strengthened Austenitic Steel, Adv. Cryo. Eng., 38:77–84pp.
- Meng, F., Tagashira, K., Azuma, R. and Sohma, H.**, 1994, Role of Eta–Carbide Precipitation's in the Wear Resistance Improvements of Fe–12–Cr–Mo–V–1.4C Tool Steel by Cryogenic Treatment, ISIJ Int., 34(2):205–210pp.
- Mohan, Lal, D., Renganarayanam, S. and Kalanidhi, A.**, 2001, Cryogenic Treatment to Augment Wear Resistance of Tool and Die Steels, 41:149–55pp.
- Molinari, A., Pellizzari, M. and Gialanella, S.**, 2001, Effect of Deep Cryogenic Treatment on the Mechanical Properties of Tool Steels, Material Process Technology, 118-350pp.
- Moore, K. and Collins D. N.**, 1993, Cryogenic Treatment of Three Heat–Treated Tool Steels, Key Eng. Mater., 86–87:47–54pp.
- Nalbant, H.**, 2018, Derin Kriyojenik İşlemin AISI 4140 Çeliğinin Aşınma Davranışına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, 3-14s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Naravade R.H., Belkar S.B. and Kharde, R.R.,** 2013, Effects of Cryogenic Treatment, Hardening and Multiple Tempering on Wear Behavior of D6 Tool Steel, The International Journal of Engineering and Science, 2(5):1-15pp.
- Perez, M. and Belzunce, F.J.,** 2015, The Effect of Deep Cryogenic Treatments on the Mechanical Properties of an AISI H13 Steel, University of Oviedo, Spain, 32-40pp.
- Podgornik, B., Paulina, I. and Zajec, B.,** 2016, Deep Cryogenic Treatment of Tool Steels, Slovenia, 398-406pp.
- Prabhakaran, A., Bensely, A., Nagarajan, G. and Mohan Lal, D.,** 2004, Effect of Cryogenic Treatment on Impact Strength of Case Carburized Steel–EN 353, Proceedings of IMEC2004 International Mechanical Engineering Conference, Kuwait.
- Ptacinovaa, J., Sedlickaa, V. and Hudakovaa, M.,** 2017, Microstructure-Toughness Relationships in Sub-zero Treated and Tempered Vanadis 6 Steel Compared to Conventional Treatment, Slovakia, 241-258pp.
- Senthilkumar, D., Rajendran, I., Pellizzari, M. and Siirinen, J.,** 2011, Influence of Shallow and Deep Cryogenic Treatment on the Residual State of Stress of 4140 Steel, Journal of Materials Processing Technology, 211:396–401pp.
- Sobotova, J., Jurci, P. and Dlouhy, I.,** 2016, The Effect of Subzero Treatment on Microstructure, Fracture Toughness, and Wear Resistance of Vanadis 6 Tool Steel, Czech Republic, 192-204pp.
- Sri Siva, R., Arockia Jaswin, M. and Mohan Lal, D.,** 2012, Enhancing the Wear Resistance of 100Cr6 Bearing Steel Using Cryogenic Treatment, Tribol. Trans., 55:387–393pp.
- Stepanov, G. A. and Lokhankina, L. K.,** 1979, Low–Cycle Fatigue of Chrome-Manganese Steel at +20 and –196°C, Strength Mater., 11(8):847–849pp.
- Takmaz, A.,** 2018, Kesici Takımlara Uygulanan Kriyojenik İşlemin İşlenebilirliğe Etkisinin Taguchi Yöntemiyle Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, 23-27s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

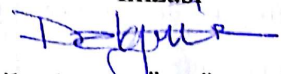
- Tavadze, F. N., Stepanov, G. A., Lokhankina, L. K. and Grikurov, G. N.,** 1975, Effect of Heat Treatment on Properties of Steel 03Kh13AG19 at Cryogenic Temperatures, Met. Sci. Heat Treat., 17(2):153–156pp.
- Tobola, D., Cyboron J. and Letocha, A.,** 2017, Selected Properties of Vanadis 8 Tool Steel after Grinding and Hard Turning, Poland, 864-866pp.
- Uzun, M.,** 2014, Kriyojenik İşlem Görmüş Soğuk İş Takım Çeliğinin Aşınma Davranışının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 7-36s.
- Vahdat, S. E., Nategh, S. and Mirdamadi, S.,** 2013, Microstructure and Tensile Properties of 45WCrV7 Tool Steel After Deep Cryogenic Treatment, Mater. Sci. Eng. A, 585:444–454pp.
- Vimal, A. J., Bensely, A. and Lal, D. M.,** 2008, Deep Cryogenic Treatment Improves Wear Resistance of EN 31 Steel, Materials and Manufacturing Processes, 23:(4)369 – 376pp.
- Yan, X. G. and Li, D. Y.,** 2013, Effects of the Sub-zero Treatment Condition on Microstructure, Mechanical Behavior and Wear Resistance of W9Mo3Cr4V High Speed Steel, Wear, 302 (1–2):854–862pp.
- Yun, D., Xiaoping, L. and Hongshen, X.,** 1998, Deep Cryogenic Treatment of High-Speed Steel and Its Mechanism, Heat Treat. Metal., 3:55–59pp.
- Zhirafar, S., Rezaeian, A. and Pugha, M.,** 2007, Effect of Cryogenic Treatment on the Mechanical Properties of 4340 Steel, Journal of Materials Processing Technology, 186:298–303pp.

TEŞEKKÜR

Akademik hayatımın her aşamasında ve bu tez çalışması süresince benden desteğini, bilgi birikimini ve tecrübelerini esirgemeyen çok değerli danışman hocam sayın Prof. Dr. Rasim İPEK'e; çalışmamın basma deneyi aşamasında bana yardımcı olan değerli arkadaşım Arş. Gör. Hasan Yavuz ÜNAL'a, hayatımın her aşamasında maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, her zaman yanımda olan annem Mine AKGÜMÜŞ ve babam Kemal AKGÜMÜŞ'e, tez çalışmam boyunca bana her konuda destek olan, beni hiç yalnız bırakmayan ve kendisinden güç bulduğum sevgili eşim Öğr. Gör. Serkan GÖK'e ve tezimin yazım aşaması boyunca bana sevgisini sürekli hissettiren, kısa bir süre önce aramıza katılan oğlum Rüzgar Tuna GÖK'e teşekkürlerimi sunarım.

02 / 12 / 2019

İmzası



Dilşad AKGÜMÜŞ GÖK



ÖZGEÇMİŞ

14 Mart 1989 tarihinde İzmir’de doğdu. Lise eğitimini İzmir Büyük Cıgli Anadolu Lisesinde tamamladı. 2012 yılında Ege Üniversitesi Tekstil Mühendisliği bölümünden, 2013 yılında da Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünden mezun oldu. Yüksek lisans eğitimine Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı’nda devam etti. “Yeni Nesil Ağır Ticari Araçların Hava Körüklü Süspansiyon Sistemlerinde Kullanılacak Z Tipi Yaprak Yayların Tasarımı (SANTEZ Projesi)” tezini tamamlayarak 2015 yılında yüksek lisans derecesini aldı. Ardından 2015 yılında Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği Konstrüksiyon ve İmalat Anabilim Dalı’nda doktora eğitimine başladı. 2016 yılından beri İstanbul Aydın Üniversitesi’nde Öğretim Görevlisi olarak çalışmakta ve alanı ile ilgili yayın çalışmaları yapmaktadır.

