

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SICAK İŞ TAKIM ÇELİKLERİNDE GELENEKSEL  
OLMAYAN KRYOJENİK İŞLEM UYGULAMASININ  
MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Kübra ELBEYİOĞLU**

**Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME  
MÜHENDİSLİĞİ**  
**Tez Danışmanı : Prof.Dr. Sakin ZEYTİN**

**Eylül 2021**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SICAK İŞ TAKIM ÇELİKLERİNDE GELENEKSEL  
OLMAYAN KRYOJENİK İŞLEM UYGULAMASININ  
MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Kübra ELBEYİOĞLU**

**Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME  
MÜHENDİSLİĞİ**

**Bu tez ..... tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.**

...  
**Jüri Başkanı**

...  
**Üye**

...  
**Üye**

## **BEYAN**

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Kübra ELBEYİOĞLU

16.09.2021

## ÖNSÖZ

Lisans ve yüksek lisans hayatım boyunca bana her konuda destek veren, başta değerli hocam Sayın Prof. Dr. Sakin Zeytin olmak üzere, deneysel çalışmalarım sırasında her türlü imkanlarından yararlandığım Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine ve araştırma görevlilerine, emeklerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca yanımda olan, bugünlere gelmemi sağlayan annem ve babam Aynur-İlhan Elbeyioğlu'na, bu süreçte benden desteğini esirgemeyen, her zaman yanımda olan sevgili eşim Selman Baş'a, en büyük manevi desteğim canım oğlum Bartu Efe Baş'a minnetlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ .....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	v
TABLOLAR LİSTESİ .....	vi
ÖZET .....	vii
SUMMARY .....	vii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2.	
ÇELİK TANIMI .....	3
2.1. Çelikler ve Isıl İşlemler İle İlgili Terimler .....	6
BÖLÜM 3.	
TAKIM ÇELİKLERİ .....	7
3.1. Takım Çeliklerinin Genel Özellikleri .....	7
3.2. Takım Çeliklerinin Sınıflandırılması .....	9
3.2.1. Soğuk iş takım çelikleri .....	11
3.2.2. Sıcak iş takım çelikleri .....	12
3.2.3. Yüksek hız çelikleri .....	12
3.2.4. Plastik kalıp çelikleri .....	13
BÖLÜM 4.	

SICAK İŞ TAKIM ÇELİKLERİ .....	14
4.1. Sıcak İş Takım Çelikleri Sınıfları .....	15
4.1.1. Kromlu sıcak iş takım çelikleri .....	16
4.1.2. Molibdenli sıcak iş takım çelikleri .....	16
4.1.3. Tungstenli sıcak iş takım çelikleri .....	16
4.2. Sıcak İş Takım Çeliklerinin Mekanik Özellikleri .....	19
4.3. Sıcak İş Takım Çeliklerinin Seçimi .....	19
4.4. Sıcak iş takım çeliklerinin kullanım alanları .....	21
4.5. Sıcak İş Takım Çeliklerinde Hasar .....	21
4.5.1. Aşınma türleri ve aşınmaya etki eden faktörler .....	21
4.5.2. Isıl yorulma .....	25
4.5.3. Kırılma mekanizması .....	26
BÖLÜM 5.	
TAKIM ÇELİKLERİNİN TASARIMI VE ÜRETİMİ .....	28
5.1. Tasarım .....	29
5.1.1. Isıl işlem açısından tasarım .....	29
5.2. Takım Çelikleri Üretim Yöntemleri .....	30
5.2.1. Geleneksel çelik üretimi .....	31
5.2.2. Toz metalurjisi yöntemi ile takım çeliği üretimi .....	32
5.2.3. Püskürtme şekillendirme ile üretim (osprey) .....	32
BÖLÜM 6.	
ISIL İŞLEM .....	33
6.1. Takım Çeliklerinin Isıl İşlemi .....	37
6.2. Takım Çeliklerinde Alaşım Elementleri Ve Etkileri .....	37
6.3. Sıcak İş Takım Çeliğinin Isıl İşlemi .....	41
6.3.1. Ön ısıtma .....	42
6.3.2. Ostenitleme .....	42
6.3.3. Su verme .....	42
6.3.4. Sıfırlı işlemler (subzero) .....	43
6.3.5. Temperleme (menevişleme) .....	44

## BÖLÜM 7.

KRİYOJENİK İŞLEM .....	45
7.1. Kriyojenik İşlem Aşamaları .....	46
7.1.1. Soğutma aşaması .....	47
7.1.2. Islatma/emdirme aşaması .....	47
7.1.3. Isıtma ve temperleme aşaması .....	48
7.2. Takım Çeliklerinde Kriyojenik İşlem .....	49
7.3. Kriyojenik Sıcaklıkların Malzemelerin Mekanik Özelliklerine Etkisi .....	50
7.4. Kriyojenik İşlemin Takım Çeliklerinin Mekanik Özelliklerine Etkisi .....	50

## BÖLÜM 8.

DENEYSEL ÇALIŞMA .....	51
8.1. Çalışmanın Amaç ve Kapsamı .....	51
8.2. Deneylerde Kullanılan Malzeme .....	54
8.3. Deneylerin Yapılışı .....	54

## BÖLÜM 9.

ARAŞTIRMA BULGULARI .....	59
9.1. Optik Mikroskop Görüntüleri .....	59
9.2. SEM ile Mikro yapı İncelemesi .....	66
9.3. SEM ile Kırık Yüzey İncelemesi .....	71
9.4. SEM-EDS Analizleri .....	77
9.4.1. SEM-EDS kırık yüzey analizleri .....	83
9.5. Sertlik Ölçümleri .....	86
9.6. Darbe Deneyi Sonuçları .....	87
9.7. Aşınma Deneyi Sonuçları .....	87

## BÖLÜM 10.

DEĞERLENDİRME .....	94
---------------------	----

BÖLÜM 11.

GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER ..... 99

KAYNAKLAR ..... 100

ÖZGEÇMİŞ ..... 105



## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

AISI	: American Iron and Steel Institute
EDS	: Enerji Dağılım Spektrometrisi
ESR	: Cüruf Altı Ergitme
HRC	: Rockwell Sertlik Ölçü Birimi
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1. Takım Çeliklerinde Alaşım Elementleri Ve Etkileri [16].....	9
Tablo 3.2. Takım çeliklerinin AISI sistemine göre sınıflandırılmış ana gruplar ve bu grupları temsil eden harfler [17].....	10
Tablo 3.3. Takım çeliklerinin mekanik özelliklerinin kıyaslanması [13] .....	11
Tablo 3.4. Takım çeliklerinin mekanik özelliklerinin kıyaslanması [13] .....	13
Tablo 4.1. Uddeholm firmasına ait patentli sıcak iş takım çeliklerinin kimyasal bileşim tablosu [24].....	17
Tablo 4.2. Sıcak iş takım çeliklerinin kullanım alanları ve imal edilen ekipmanlar[1] .....	20
Tablo 6.1. Takım Çeliklerinde Alaşım Elementlerinin Mekanik Özellikler Üzerindeki Etkisi.....	38
Tablo 7.1. Elde edilen düşük sıcaklık değerlerinin zaman içindeki dağılımı [45]... 46	
Tablo 8.1. Çalışmanın tasarımı .....	53
Tablo 8.2. Formvar isimli çeliğin nominal kimyasal bileşimi (ağ. %). .....	54
Tablo 8.3. Bu tez çalışmasında incelenen numunelere ait bilgiler.....	55
Tablo 9.1. Numunelerin sertlik değerleri .....	86
Tablo 9.2. Charpy v çentikli numunelerle yapılan darbe deneyi sonuçları (Joule)..	87
Tablo 9.3. Hacim kayıpları ( $10^{-3}$ mm <sup>3</sup> ) .....	88
Tablo 9.4. Ortalama sürtünme katsayısı değerleri .....	88

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Demir Karbon Denge Diyagramı [5] .....	3
Şekil 4.1. Uddeholm firmasına ait patentli sıcak iş takım çeliklerinin aşınma tokluk kriterleri [24] .....	17
Şekil 4.2. Uddeholm firmasına ait patentli bazı sıcak iş takım çeliklerinin sıcak akma mukavemeti ile sıcaklık arasındaki ilişki [24].....	18
Şekil 4.3. Uddeholm firmasına ait patentli bazı sıcak iş takım çeliklerinin sertlik zaman arasındaki ilişkisi [24].....	18
Şekil 4.4. Sıcak iş takım çeliği ile üretilmiş kalıp [27] .....	20
Şekil 4.5. Aşınma mekanizmaları [29].....	21
Şekil 4.6. Adhesif aşınma mekanizması [30].....	22
Şekil 4.7. Abrasif Aşınma [30] .....	23
Şekil 4.8. Yorulma aşınması [30].....	23
Şekil 4.9. Darbeli aşınma mekanizmaları [33].....	24
Şekil 4.10. Sertleştirme ve Temperleme sonrasında çekme dayanımının ısıl yorulma çatlaklarına (sıcak yırtılma) etkisi[36] .....	26
Şekil 4.11. Kırık yüzey örneği - üst kısımda gevrek, alt kısımda sünek kırılmaya örnek[37] .....	27
Şekil 5.1. ESR Yönteminin Şematik Gösterimi[38] .....	31
Şekil 6.1. Isıl işlem ile özelliklerin belirlenmesini etkileyen faktörlerin birbirleriyle ilişkisi [39].....	34
Şekil 6.2. Uddeholm firmasına ait patentli sıcak iş takım çeliği olan Formvar'ın sürekli soğuma diyagramı [25].....	43
Şekil 7.1. Soğutma (Cool-down), ıslatma/emdirme (soak), ısıtma (Heat-up) ve temperleme (Tempering) aşamalarında oluşan tipik bir kriyojenik işlem döngüsü [48].....	46
Şekil 8.1. Charpy darbe deneyinin şematik gösterimi. ....	56

Şekil 8.2.	V-çentikli Charpy darbe test numunesi. ....	57
Şekil 9.1.	Isıl işlem uygulanmamış 1 numaralı yumuşak FORMVAR çeliğinin, (a) 100X, (b) 200X, (c) 500X, (d) 1000X büyütmede optik mikroskop mikroyapı fotoğrafları .....	59
Şekil 9.2.	Isıl işlem uygulanmış 2 numaralı FORMVAR çeliğinin (48 HRC Sertlik), (a) 100X, (b) 200X, (c) 500X, (d) 1000X büyütmede optik mikroskop mikroyapı fotoğrafları .....	60
Şekil 9.3.	Isıl işlem uygulanmış 3 numaralı FORMVAR çeliğinin (50 HRC Sertlik), (a) 100X, (b) 200X, (c) 500X, (d) 1000X büyütmede optik mikroskop mikroyapı fotoğrafları .....	61
Şekil 9.4.	Isıl işlem uygulanmış 4 numaralı FORMVAR çeliğinin (50 HRC Sertlik), (a) 100X, (b) 200X, (c) 500X, (d) 1000X büyütmede optik mikroskop mikroyapı fotoğrafları .....	62
Şekil 9.5.	Su vermeden sonra 1 h kriyojenik işlem görmüş 5 numaralı FORMVAR çeliğinin, (a) 100X, (b) 200X, (c) 500X, (d) 1000X büyütmede optik mikroskop mikroyapı fotoğrafları .....	63
Şekil 9.6.	Su vermeden sonra 2 h kriyojenik işlem görmüş 6 numaralı FORMVAR çeliğinin, (a) 100X, (b) 200X, (c) 500X, (d) 1000X büyütmede optik mikroskop mikroyapı fotoğrafları .....	64
Şekil 9.7.	Su vermeden sonra 3 h kriyojenik işlem görmüş 7 numaralı FORMVAR çeliğinin, (a) 100X, (b) 200X, (c) 500X, (d) 1000X büyütmede optik mikroskop mikroyapı fotoğrafları .....	65
Şekil 9.8.	Isıl işlem uygulanmamış 1 numaralı yumuşak FORMVAR çeliğinin (a) ve (b) SEM sekonder elektron görüntüleri.....	66
Şekil 9.9.	Isıl işlem uygulanmış 2 numaralı FORMVAR çeliğinin, (a), (b) ve (c) SEM sekonder elektron görüntüleri .....	67
Şekil 9.10.	Isıl işlem uygulanmış 3 numaralı FORMVAR çeliğinin, (a) ve (b) SEM sekonder elektron görüntüleri.....	68
Şekil 9.11.	Isıl işlem uygulanmış 4 numaralı FORMVAR çeliğinin, (a) ve (b) SEM sekonder elektron görüntüleri.....	68
Şekil 9.12.	Su vermeden sonra 1 h kriyojenik işlem görmüş 5 numaralı FORMVAR çeliğinin, (a) ve (b) SEM geri saçılan elektron görüntüleri.....	69

Şekil 9.13. Su vermeden sonra 2 h kriyojenik işlem görmüş 6 numaralı FORMVAR çeliğinin, (a) ve (b) SEM sekonder elektron görüntüleri .....	70
Şekil 9.14. Su vermeden sonra 3 h kriyojenik işlem görmüş 7 numaralı FORMVAR çeliğinin, (a), (b) ve (c) SEM sekonder elektron görüntüleri .....	71
Şekil 9.15. Isıl işlem uygulanmamış 1 numaralı yumuşak FORMVAR çeliği kırık yüzeyinin SEM-SEI görüntüleri. a) Düşük büyütme, b) yüksek büyütme.	72
Şekil 9.16. Isıl işlem uygulanmış 2 numaralı (48 HRc sertlikli) yumuşak FORMVAR çeliğinin kırık yüzeyinin SEM-SEI görüntüleri. a) Düşük büyütme, b) yüksek büyütme.....	72
Şekil 9.17. Isıl işlem uygulanmış 3 numaralı (50 HRc sertlikli) yumuşak FORMVAR çeliğinin kırık yüzeyinin SEM-SEI görüntüleri. a) Düşük büyütme, b) yüksek büyütme.....	73
Şekil 9.18. Isıl işlem uygulanmış 4 numaralı (52 HRc sertlikli) yumuşak FORMVAR çeliğinin kırık yüzeyinin SEM-SEI görüntüleri. a) Düşük büyütme, b) ve (c) yüksek büyütme. ....	74
Şekil 9.19. Su vermeden sonra 1 saat kriyojenik işlem görmüş 5 numaralı yumuşak FORMVAR çeliğinin kırık yüzeyinin SEM-SEI görüntüleri. a) Düşük büyütme, b) ve (c) yüksek büyütme. ....	75
Şekil 9.20. Su vermeden sonra 2 saat kriyojenik işlem görmüş 6 numaralı yumuşak FORMVAR çeliğinin kırık yüzeyinin SEM-SEI görüntüleri. a) Düşük büyütme, b) yüksek büyütme. ....	75
Şekil 9.21. Su vermeden sonra 3 saat kriyojenik işlem görmüş 7 numaralı yumuşak FORMVAR çeliğinin kırık yüzeyinin SEM-SEI görüntüleri. a) Düşük büyütme, b) ve (c) yüksek büyütme. ....	76
Şekil 9.22. Isıl işlem uygulanmamış 1 numaralı yumuşak numunenin EDS nokta analiz sonuçları.....	77
Şekil 9.23. Su verme ve temperleme ısıl işlemi yapılmış 2 numaralı FORMVAR çeliği EDS nokta analiz sonuçları. ....	78
Şekil 9.24. Su verme ve temperleme ısıl işlemi yapılmış 3 numaralı FORMVAR çeliğinin genel EDS analiz sonuçları. ....	79
Şekil 9.25. Su verme ve temperleme ısıl işlemi yapılmış 4 numaralı FORMVAR çeliğinin genel EDS analiz sonuçları. ....	79

Şekil 9.26. Su verme sonrası kriyojenik işlem görmüş 6 numaralı FORMVAR çeliğinin genel EDS analiz sonuçları. ....	80
Şekil 9.27. Su verme sonrası kriyojenik işlem görmüş 6 numaralı FORMVAR çeliğinin genel EDS analiz sonuçları. ....	81
Şekil 9.28. Su verme sonrası kriyojenik işlem görmüş 6 numaralı FORMVAR çeliğinin genel EDS analiz sonuçları. ....	82
Şekil 9.29. Su verme sonrası kriyojenik işlem görmüş 6 numaralı FORMVAR çeliğinin genel EDS analiz sonuçları. ....	82
Şekil 9.30. Su verme sonrası kriyojenik işlem görmüş 7 numaralı FORMVAR çeliğinin genel EDS analiz sonuçları. ....	83
Şekil 9.31. Su verme ve temperleme ısıl işlemi yapılmış 4 numaralı FORMVAR çeliğinin kırık yüzey genel EDS analiz sonuçları. ....	84
Şekil 9.32. Su verme sonrası kriyojenik işlem görmüş 6 numaralı FORMVAR çeliğinin kırık yüzey genel EDS analiz sonuçları. ....	85
Şekil 9.33. Su verme sonrası kriyojenik işlem görmüş 6 numaralı FORMVAR çeliğinin kırık yüzey genel EDS analiz sonuçları. ....	86
Şekil 9.34. Zamana bağlı olarak sürtünme katsayısında meydana gelen değişim. ..	89
Şekil 9.35. 1 numaralı numune aşınma SEM görüntüleri .....	90
Şekil 9.36. 2 numaralı numune aşınma SEM görüntüleri .....	91
Şekil 9.37. 3 numaralı numune aşınma SEM görüntüleri .....	92
Şekil 9.38. 4 numaralı numune aşınma SEM görüntüleri .....	94
Şekil 9.39. 5 numaralı numune aşınma SEM görüntüleri .....	95
Şekil 9.40. 6 numaralı numune aşınma SEM görüntüleri .....	96
Şekil 9.41. 7 numaralı numune aşınma SEM görüntüleri .....	96

## ÖZET

Anahtar kelimeler; kriyojenik işlem, soğubilim, sıfırlı işlemi takım çeliklerinde hasar

Sıcak iş takım çeliklerinin birçok endüstriyel uygulamada tercih sebebi olan bir çelik grubu olmasının sebebi; yüksek sıcaklıklarda aşınma-kopma dayanımlarını koruyabilmeleri, tokluk değerlerinin yüksek olması ve yüksek sıcaklıklara çıktığında darbe dirençlerinin de yüksek olmasından dolayıdır. Ekstrüzyon, enjeksiyon gibi yüksek sıcaklık uygulamalarında sıcak iş takım çelikleri kullanıldığından, uzun ömürlü olmaları beklenmektedir.

Sıcak iş takımlarının ömrü, malzemelerin kalitesi ve türüne bağlıdır. Çelik malzemedeki karbon oranı ile diğer alaşım elementleri, doğrudan metalurjik işlem, plastik şekil verme ve ısıtma sırasında meydana gelen yapı ve faz dönüşümlerini etkiler. Sertlik, aşınma direnci. Darbe direnci ve tokluk malzemelerin performansını, kullanım ömrünü ve dayanımlarını etkileyen mekanik özelliklerdir.

Bu çalışmada hedeflenen; sıcak iş takım çeliklerinin geleneksel ısıtma işlem uygulamasına karşılık, kriyojenik işlem uygulamasının yapı ve özelliklerde ne tür değişiklikler meydana getireceğinin belirlenmesidir.

Çalışma süresince DIN 1.2367 kalite sıcak iş takım çeliğine geleneksel ısıtma işlem uygulamalarına karşılık, geleneksel olmayan kriyojenik işlemler uygulanmıştır. Sonrasında optik mikro yapı incelemesi, SEM-EDS analizi ile mikro yapı incelemesi yapılmış ve darbe, sertlik ve aşınma deneylerine tabi tutulmuştur. Deneyler sonucunda, farklı ısıtma işlem uygulamalarının, mikro yapılarda belirgin değişiklikler yaratmadığı, darbe enerjilerinde bariz değişikliklerin olmadığı, sürtünme katsayılarının ve aşınma miktarlarının uygulanan ısıtma işlemle ilişkilendirilmediği görülmüştür.

# **EFFECT OF NON-TRADITIONAL CRYOGENIC PROCESSING ON MECHANICAL PROPERTIES OF HOT WORK TOOL STEELS**

## **SUMMARY**

Keywords; cryogenic treatment, cold science, subzero, damage to tool steels

The reason why hot work tool steels are a preferred steel group in many industrial areas; they can maintain their wear-rupture resistance at high temperatures, their toughness values are high, and their impact resistance is high when high temperatures are reached. Since hot work tool steels are used in high temperature applications such as extrusion and injection, they are expected to have a long service life.

The life of hot work tools depends on the quality and type of materials. The carbon content and other alloying elements in steel directly affect the structure and phase transformations that occur during metallurgical processing, plastic forming and heat treatment. Hardness, wear resistance. Impact resistance and toughness are mechanical properties that affect the performance, service life and strength of materials.

The aim of this study is to determine what kind of changes will occur in the structure and properties of the cryogenic treatment application against the traditional heat treatment application of hot work tool steels.

During the study, non-conventional cryogenic processes were applied to DIN 1.2367 quality hot work tool steel as opposed to conventional heat treatment applications. Afterwards, optical microstructure examination, microstructure examination with SEM-EDS analysis and impact, hardness and wear tests were performed. As a result of the experiments, it was seen that different heat treatment applications did not cause significant changes in microstructures, there were no obvious changes in impact energies, friction coefficients and wear amounts were not associated with the applied heat treatment.



## BÖLÜM 1. GİRİŞ

Çelik malzeme grupları; sahip oldukları geliştirilebilir mekanik özellikleri nedeniyle inşaat, otomotiv, tıp, havacılık gibi endüstriyel alanlarda kullanım alanına sahip metal malzemelerdir. Kimyasal kompozisyonunun değiştirilmesi veya ısıl işlem uygulanması ile yapılarının değiştirilmesi; çelik malzemenin kullanım alanlarının genişlemesine neden olmaktadır.

Karbonun sertleştirici özelliği çok eski yıllarda bilinmesine rağmen; bugün sahip olduğu anlamda kullanımı 1740 yılında başlamıştır. 1856 yılında Sir Henry Bessemer tarafından büyük oranda çelik üretimi gerçekleştirilmiş olup; 1857 'de Sir William Siemens tarafından geliştirilen çelik malzeme üretim yöntemlerinden biri olan açık ocak uygulamasının bulunması ile çelik kullanımı çok yaygınlaşmıştır.

1868 yılında, R.F. Mushet tarafından ilk alaşım çeliği yapılmış (%7 tungsten içeren) ve diğer alaşımli çelik malzemelerin üretimleri gerçekleştirilmiştir.

Takım çelikleri, yüksek alaşım içeren ve dayanımı yüksek çelik gruplarındandır. Aşınma dirençleri ve sertlikleri yüksek olan takım çelikleri metalik ve metalik olmayan malzemelerin şekillendirilmesinde kullanılmaktadır. Sahip oldukları özelliklerin kullanım alanlarına uygun olması ve beklenen performansı sağlamaları için ısıl işleme tabi tutulurlar.

Sıcak iş takım çelikleri günümüzde birçok endüstriyel uygulamada öneme sahip malzemeler grubudur. En büyük kullanım alanları, demir esaslı ve demir dışı metallerin dövülerek şekillendirilmesi, hafif metal ekstrüzyonu ve yüksek basınçlı döküm uygulamaları olmaktadır. Bu çeliklerden üretilmekte olan takım ve kalıpların

sahip olduğu performans, kullanılan malzemenin kalitesine, uygulanan ısıı işleme, yüzey işlemlerine, kalıp tasarımına ve kullanım şartlarına göre değişmektedir [1].

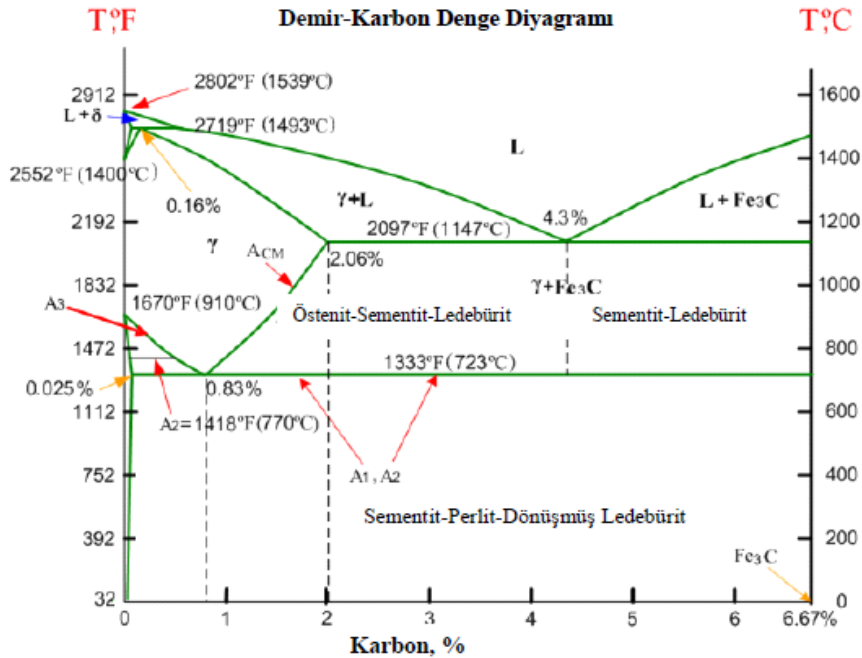
Kriyojenik işlemler; yüksek aşınma altında çalışan takımlarda aşınma direncini arttırmak için uygulanan, ısıı işlemden sonra temperlemeden önce ısıı işleme ilave olarak yapılan işlem 0°C'nin altında farklı sıcaklıklarda uygulanan soğutma işlemidir. Malzemelerin sahip oldukları mekanik özellikleri arttırması sebebiyle özellikle aşınma dirençlerinde sağladığı avantajlarla son zamanlarda önemli bir kullanım alanına sahip olmuştur [2,3].

Yapılan deneysel çalışmalarda, sıcak iş takım çeliklerinde geleneksel olmayan kriyojenik İşlem uygulamasının malzemelerin mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Kriyojenik işlem, 1.2367 muadili FORMVAR kalite sıcak iş takım çeliğine uygulanmış olup, geleneksel ısıı işlem uygulamasına karşılık farklı bir kriyojenik işlem uygulanmasının yapı ve özelliklerde ne tür değişiklikler meydana getirdiği ortaya konmuştur.

## BÖLÜM 2. ÇELİK TANIMI

Çelik, genel tanımıyla; temel alaşım elementi karbon olan demir-karbon alaşım gruplarıdır.

Çelik malzemenin yapısında bulunan karbon, malzemenin yapısını sertleştirmekte ve demir atomlarının kaymasını engellemektir. Alaşım bulunan karbon elementi miktarı çelik malzemenin sertlik, esneklik, süneklik, aşınma ve darbe direnci ile gerilme gücü gibi mekanik özelliklerinin değiştirmesine neden olmaktadır. Karbon oranı artırılarak çelik malzemenin sertliği artırılabilir. Bu durum, çeliğin kırılabilirliğinin artmasına; dolayısıyla kaynaklanabilirlik, süneklik gibi bazı özelliklerin azaltılmasına neden olur [4].



Şekil 2.1. Demir Karbon Denge Diyagramı [5].

Dünya metal üretiminin %95'i demirdir ve karbonla yaptığı alaşımlar diğer adıyla çelikler en yaygın kullanım alanına sahip olan mühendislik malzemeleridir. Ucuz olması, hammadde kaynaklarının fazla olması, sahip olması gelişmiş üretim teknolojileri, çeşitlerinin ve kullanım alanlarının yaygın olması çelik malzemeleri en çok üretilen ve aynı zamanda tüketilen metal malzemeler konumuna getirmektedir [4].

Çelik malzemelere, kullanım yeri ve istenen özelliklerini iyileştirmek için farklı alaşım elementleri katılabilir.

- Sade Karbonlu Çelikler
- Düşük ve Orta Alaşımlı Çelikler
- Paslanmaz Çelikler
- Takım Çelikleri

Çelikleri; genel olarak kimyasal bileşimlerine göre sınıflandırılmakla birlikte, ayrıca;

- Fiziksel özelliklerine (paslanmaz, manyetik, yüksek sıcaklığa dayanıklı çelikler gibi)
- Uygulanan Isıl işlemlere (ıslah, sementasyon, nitrasyon çelikleri gibi)
- Kullanım yerlerine (genel imalat, makine imalat, takım, yay, rulman çelikleri gibi)
- Üretim şekline göre sınıflandırılabilir [1].

## 2.1. Çelikler ve Isıl İşlemler İle İlgili Terimler

- Alaşım: En az biri metal olan iki veya daha fazla elementin birleşerek oluşturduğu, bileşimdir. Örnek olarak çelik bir alaşımdır.
- Alaşım Elementleri: Metallere istenen özelliklerin kazandırılması için ilave edilirler.
- Analiz: Analiz kelimesi senelerdir çeliğin kimyasal bileşimi anlamıyla aynı kullanılmıştır. Yani bir çelik %1.00 C (karbon) ve %1.50 Mn (mangan) içerdiğinde, bu çeliğin analizinin %1.00 C ve %1.50 Mn şeklinde olduğu

söylenir. Demir miktarı genel olarak belirtilmez ve analizin geri kalanının demir olduğu anlaşılır.

- Basma Dayanımı: Malzemenin bir basma yükü altında şekil değiştirmeye başladığı nokta, o malzemenin basma mukavemetini vermektedir.
- Çekme Dayanımı: Bir malzeme iki ucundan çekme gerilmelerine maruz bırakıldığında, kalıcı olarak şekil değiştirdiği noktadaki gerilmesi malzemenin çekme dayanımını verir.
- Karbon Çelikleri: İnşaat demirleri, profiller, teller, saclar daha çok St ile anılırlar. Orta ve yüksek karbonlu çeliklerde kükürt oranı düşüktür. Kolaylıkla işlenebilmeleri, temiz yüzeye sahip olmaları, belli ölçülerde bulunabilme, ısıtılma işlemi elverişlilik, eğilme, bükülme, derin çekme gibi özelliklere sahiptirler.
- Darbe Dayanımı: Çelik malzemelerin darbe yükü altında şekil değiştirmeye karşı gösterdikleri dirençtir. Izod Testi ya da Charpy Testi ile ölçülmektedir.
- Elastisite: Artan ya da azalan yükler karşısında malzemenin şekil değiştirme kabiliyetidir. Çekme deneyi yapılarak tespit edilir.
- Gerilme: Birim alana düşen "çekme" yada "basma" kuvvetidir. Çekme deneyinde uygulanan kuvvetin, numunenin kesitine bölünmesi gerilmeyi verir.
- Gevreklik : Malzemenin kalıcı şekil değişimi olmadan çatlama veya kırılma özelliğidir.
- Kalıntı Ostenit : Ostenitin martensite dönüşmeyen kısmına kalıntı ostenit denir. İstenmeyen bir yapıdır. Su verme sıcaklığı oda sıcaklığının altına düşürülürse, ostenitten martensite dönüşüm devam eder. Bu işlem sıfır altı işlemdir.
- Karbür: Metal ve karbonun meydana getirdiği bileşiklere verilen isimdir. Çelik malzemelerde bulunmaları, aşınma dayanımının artmasını sağlar.
- Martensit: Çeliğin ostenizasyon sıcaklığından su verilerek, sertleştirilmesi ile içyapısında elde edilen ve istenen bir yapı türüdür.
- Ostenit: Çelik malzemenin ısıtılma işlemi tabii olmadan önceki tavlama halindeki yapısıdır. Yüzey merkezli kübik demir kafesinde yer alan karbon yada alaşım elementlerinden oluşan bir katı eriyiktir ve su verme ile bu yapı martensite dönüşür.
- Sertleşebilirlik : Çelik cinslerinin tamamı için kullanılan fiziksel bir ölçüdür. Çelik bir kesitin, sertlik derinliğini ve yüzey sertleşebilirliğini tanımlar.

- Sertlik : Metallerin özellikle çentik etkisiyle kalıcı şekil değişimine karşı direncidir. Takım çeliği kullanıcıları tarafından çeliğin mekanik özelliklerinin tanımlanması amacıyla kullanılan ilk ölçü olmaktadır. Diğer özelliklerle beraber değerlendirilmesi gerekir. Brinell, Rockwell, Vickers gibi yöntemlerle ölçülür.
- Tokluk: Çeliğin, aldığı darbe enerjisini, kırılmadan önce absorbe edebilme yeteneğine verilen addır. Çentikli darbe deneyi olarak adlandırılan, bir numuneye çentik açtıktan sonra, darbe vurularak ölçülür.
- Uzama: Metal malzemeler iki ucundan çekildiğinde, kırılma göstermeden önce uzamaktadır. Uzama oranı her malzemeye göre farklılık gösterir. Uzama, gerçek uzunluğun yüzdesi olarak ifade edilmektedir. Malzemenin % uzama oranı ne kadar yüksek ise, çelik malzeme o kadar sünektir diyebiliriz ve kopmaksızın şekillendirilebilir.
- Yorulma: Periyodik yüklerden kaynaklanan çatlak oluşumu anlamına gelmektedir.
- Yorulma çatlama, genel olarak yüzey düzgünlüğünü bozan keskin köşe, çentik gibi yüzey kusurlarında, içyapıda görülen inklüzyon, kılcal çatlak gibi hataların oluşması ile başlar [6].

## **BÖLÜM 3. TAKIM ÇELİKLERİ**

### **3.1. Takım Çeliklerinin Genel Özellikleri**

Takım çelikleri, metal veya ametal malzeme gruplarının işlenmesinde ve şekillendirilmesinde kullanılmakta olan, kimyasal kompozisyonu sayesinde sertleşebilen ve temperlenebilen alaşımlı çelik gruplarına verilen addır. Dövme, döküm, ekstrüzyon kalıp malzemeleri olarak ya da çeşitli malzemelerin şekillendirilmesi/işlenmesinde kullanılan alaşımlara verilen addır.

Takım çeliklerinin üretimi 1868'de "havada sertleşen tungsten alaşımlı çelik" çeşitlerinin üretimi ile başlamış, 1898'de "yüksek hız çelikleri", 1904'de "vanadyum alaşımlama", 1906'da "elektrik ark fırını uygulamaları", 1970'de "toz metalürjisi uygulamaları", 1980'de "ince film kaplama uygulamaları" ile devam etmiştir [7].

Takım çelikleri, 0,8-1,5% karbon oranına sahip olduklarından dolayı karbon çeliği olarak tanımlanır ve zor yöntemler ile üretilmektedirler [8]. Kullanım alanlarını tokluk, sertlik, yüksek dayanım, yüksek sıcaklık direnci gibi özellikler gerektiren uygulamalar oluşturur [9]. Bütün bu özellikler, metalik ya da metalik olmayan malzemelerin farklı yöntemlerle (talaşlı, talaşsız) şekillendirilmesinde kullanılmaktadır [10].

Takım çeliğinin, işlediği numuneden sert, yüksek dayanımlı ve aşınmaya karşı daha dirençli olması gerekmektedir. Bu sebepten ötürü, takım çeliği üretimi için kullanılacak olan malzemelerin kullanım yerlerinin kullanım koşullarına uygun olması, mümkünse yüksek sertlikte ve yüksek dayanımda ancak buna karşın yeterli sünekliğe sahip olması önemlidir [11].

Takım elikleri, içeriklerinde bulunan alaşım elementlerine, sıcaklık aralığına, uygulama alanlarına, göre dört gruba ayrılırlar. Buna göre takımlar sıcak iř takım çelikleri, soğuk iř takım çelikleri, yüksek hız takım çelikleri ve plastik kalıp çelikleri olarak sınıflandırılır [12].

#### Takım eliklerinden Beklenen zellikler

- Yüksek süneklik,
- Yüksek tokluk,
- Yüksek termal yorulma ve termal şok direnci,
- Homojen mikro yapı,
- Yüksek sertlik,
- Yüksek mukavemet,
- İyi işlenebilirlik,
- İyi parlatılabilirlik,
- Yüksek sertleşebilirlik,
- Isıl işlemlerde boyutsal kararlılık,
- Yüzey işlemlerine uygunluk,
- Yüksek termal iletkenlik,
- Düşük termal genleşme [13].



Tablo 3.1. Takım Çeliklerinde Alaşım Elementleri Ve Etkileri [16].

Alaşım Elementi	Sertlik	Mukavemet	Akma Noktası	Uzama	Kesir Daralması	Darbe Direnci	Elastisite	Yüksek Sıcaklığa Dayanım	Soguma Hızı	Karbür Oluşumu	Aşınma Direnci	Dövülebilirlik	İşlenebilirlik	Oksitlenme Eğilimi	Korozyon Dayanımı
Si	↑	↑	↑	↓	~	↓	↑↑	↑	↓	↓	↓↓	↓	↓	↓	-
Mn*	↑	↑	↑	~	~	~	↑	~	↓	~	↓↓	↑	↓	~	-
Mn*	↓↓	↑	↓	↑↑	~	-	-	-	↓↓	-	-	↓↓	↓↓	↓↓	-
Cr	↑↑	↑↑	↑↑	↓	↓	↓	↑	↓	↓↓	↑↑	↑	↓	-	↓↓	↑↑
Ni	↑	↑	↑	~	~	~	-	↑	↓↓	-	↓↓	↓	↓	↓	-
Al	-	-	-	-	↓	↓	-	-	-	-	-	↓↓	-	↓↓	-
W	↑	↑	↑	↓	↓	~	-	↑↑	↓↓	↑↑	↑↑	↓↓	↓↓	↓↓	-
V	↑	↑	↑	~	~	↑	↑	↑↑	↓	↑↑↑	↑↑	↑	-	↓	↑
Co	↑	↑	↑	↓	↓	↓	-	↑↑	↑↑	-	↑↑	↓	~	↓	-
Mo	↑	↑	↑	↓	↓	↓	-	↑↑	↓↓	↑↑↑	↑↑	↓	↓	↑↑	-
S				↓	↓	↓	-	-	-	-	-	↓↓	↑↑	-	↓
P	↑	↑	↑	↓	↓	↓↓	-	-	-	-	-	↓↓	↓↓	↓↓	↑↑

\* perlitik çeliklerde  
\*\* östenitik çeliklerde

Uygun malzeme seçimi ve ısıl işlemin kalitesi kadar dizayn koşulları da takım çeliğinin kullanım ömrünü etkiler. Bir takım çeliği bütün şartlar yerine getirilerek kullanılırsa kullanım ömrünü başarılı olarak tamamlar [14]. Çelikler genel olarak; maksimum aşınma dayanımı, maksimum tokluk ve yüksek sıcaklıkta sertliğini kaybetmeme gibi özellikleri bir arada içermezler. Takım çeliklerinden beklenen özellikler ise; iyi sertleşebilirlik, yüksek aşınma direnci, yüksek tokluk, yüksek sıcaklıkta sertliğini ve mukavemetini kaybetmeme ve boyut kalıcılığıdır [15].

### 3.2. Takım Çeliklerinin Sınıflandırılması

AISI (American Iron and Steel Institute) tarafından geliştirilen sınıflandırma sistemi ile takım çelikleri sınıflandırılır. Buna göre, alaşımlama, uygulama veya ısıl işlem gibi karakteristik özellikler ele alınarak gruplandırma yapılır [7].

Tablo 3.2. Takım çeliklerinin AISI sistemine göre sınıflandırılmış ana gruplar ve bu grupları temsil eden harfler [17].

Grup	Sembol
Suda Sertleşen Takım Çelikleri	W
Şok dirençli takım çelikleri	S
Soğuk iş takım çelikleri	
Yağda sertleşen	O
Havada sertleşen	A
Yüksek karbonlu yüksek kromlu	D
Sıcak iş 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

- Soğuk iş takım çelikleri; yaklaşık 200°C ve altındaki malzeme şekillendirmelerinde,
- Sıcak iş takım çelikleri; yaklaşık 200°C ve üzerindeki malzeme şekillendirmelerinde,
- Plastik kalıp çelikleri; plastiklerin enjeksiyon, ekstrüzyon, şişirme gibi tekniklerle şekillendirmelerde,
- Yüksek hız çelikleri; özellikle yüksek aşınma direnci gerektiren işlemlerde kullanılır.

Tablo 3.1. Takım çeliklerinin mekanik özelliklerinin kıyaslanması [13].

Soğuk İş Takım Çelikleri	Sıcak İş Takım Çelikleri	Plastik Kalıp Çelikleri	Yüksek Hız Takım Çelikleri
Aşınma Direnci	Tokluk	İşlenme Kabiliyeti	Aşınma Dayanımı
Tokluk	Süneklik	Kaynak Edilebilirlik	Tokluk
Süneklik	Yüksek Sıcaklıkta Akma	Erozyon ile işleme	Basma Dayanımı
	Yüksek Sıcaklıkta Sertlik	Yüzey işlemlerine uygunluk	Sertleşebilirlik
	Sertleşebilirlik	Korozyon direnci	Boyutsal Kararlılık
	Basma Dayanımı	Partlatılabilirlik	Yüzey işlemlerine uygunluk

### 3.2.1. Soğuk iş takım çelikleri

Soğuk iş takım çelikleri, genel olarak 200 °C altında çalışan, kesme, eğme, bükme, haddeleme, toz metalürjisi alanlarında kullanılan çeliklerdir. Endüstriyel uygulamalarda kesme takımlarında kullanılan bıçaklar iş parçalarının şekillendirilmesinde kullanılan ve yüksek özellik gerektiren takım çeliklerinden üretilirler [18].

Bütün bu uygulamalar esnasında takım çeliğin yüzeyi ile iş parçası arasında mekanik kuvvetler mevcuttur ve bu nedenle aşınma direnci ve plastik deformasyona karşı dayanımın istenen düzeyde olması için malzeme sertliğinin yüksek olması önem arz eder.

Soğuk iş takım çelikleri, yüksek gerilim altında çalıştıklarında; aşınma; eğme ve darbeye dirençli olmaları gerekmektedir. Bu nedenle sürekli takım çeliğinin ömrünü uzatarak dayanımı arttıracak; mekanik özellikleri daha iyi çeliklerin geliştirilmesi için çalışılmaktadır.

En çok kullanılan soğuk iş takım çelikleri arasında 1.2379, 1.2363, 1.2767, 1.2842 ve 1.2436 kalite çelikleri sayılabilir [19].

### 3.2.2. Sıcak iş takım çelikleri

Sıcak iş takım çelikleri 200°C ve üzeri uygulamalarda kullanılan çelik gruplarıdır ve kullanım alanlarından dolayı sahip olması gereken en önemli özellik kimyasal kompozisyonu sayesinde tekrarlanan sıcak şekillendirme uygulamalarında yumuşamaya karşı yeterli dayanımı göstermesidir.

Sıcak iş takım çeliklerinin, kullanım yerlerinden dolayı yüksek sıcaklıkta mekanik özelliklerini korumaları gerektiğinden sıcak sertliği sağlayan alaşım elemanları bulunmaktadır [1].

En çok kullanılan sıcak iş çelikleri: DIN 1.2344, 1.2343, 1.2365, 1.2367, 1.2714, 1.2581, 1.2606, 1.2713, 1.2885.

### 3.2.3. Yüksek hız çelikleri

Yüksek hız takım çelikleri; diğer takımların işleme ve talaşlı imalatında; yaklaşık 400-600°C sıcaklıklara kadar kullanılabilme kabiliyetine sahiptir. Bu karakteristik özelliklerinin yanında sertlik, aşınma ve darbe direnci gibi mekanik özellikleri de oldukça gelişmiştir.

Yüksek sıcaklıklarda daha iyi mekanik özelliklere sahip olmalarının nedeni, içerdikleri tungsten, krom, molibden, vanadyum elementleridir. En az %0,65 karbon içermektedirler [6].

Tablo 3.2. Takım çeliklerinin mekanik özelliklerinin kıyaslanması [13].

	Standart	Orta Alaşımlar
Kimyasal Analiz Değeri		
Minimum Karbon İçeriği	0,65%	0,70%
Minimum Krom İçeriği	3,50%	3,25%
Minimum Vanadyum İçeriği	0,80%	0,80%
Minimum Tungsten İçeriği+%1,8 Mo	11,75%	6,50%
Minimum Alaşım Oranı(Co<%5)	22,50%	13%
Minimum Alaşım Oranı(Co>%5)	21%	12%
Sertlik Sonuç Değerleri		
Ostenitleme Sonrası Minimum Sertlik	63 HRC	62 HRC

Yüksek hız takım çeliklerinin sertlik ve tokluk istenen alanlarda kullanımının geniş olmasının sebebi alaşım elementlerine ve uygulanan ısıl işlemin özelliklerine göre sahip olduğu mikro yapı ve mekanik özelliklerin kontrol edilebilmesidir [21].

#### 3.2.4. Plastik kalıp çelikleri

Plastik Kalıp Çeliklerinin korozyon dirençleri ve parlatılabilme özellikleri iyidir. Endüstriyel uygulamalarda genellikle plastik enjeksiyon, ekstrüzyon gibi şekillendirme kalıplarında, kalıp hamillerinde, korozif plastiklerin şişirme kalıplarında kullanılırlar. En yaygın kaliteler; 1.2738, 1.2311, 1.2312, 1.2316 ve 1.2083 çelikleridir [19].

## **BÖLÜM 4. SICAK İŞ TAKIM ÇELİKLERİ**

Sıcak iş takım çelikleri, 200°C ve üzeri sıcaklık uygulamalarında kullanılan çelikler grubudur ve en temel özelliği kimyasal kompozisyonu sayesinde tekrarlanan sıcak şekillendirme uygulamalarında yumuşamaya karşı yeterli dayanımı göstermesidir.

Sıcak iş takım çeliklerinin, kullanım yerlerinden dolayı yüksek sıcaklıkta mekanik özelliklerini korumaları gerektiğinden sıcak sertliği sağlayan alaşım elemanları bulunmaktadır [1].

Sıcak iş takım çelikleri; yüksek sıcaklıkta aşınma ve kopma dayanım değerlerini koruyabilmeleri, yüksek tokluk değerlerine sahip olmaları ve yine yüksek sıcaklıklarda darbe dirençlerinin yüksek olması sebebiyle pek çok endüstriyel alanda tercih edilen bir çelik grubudur [7].

Yüksek sıcaklıkta kullanılan takım çeliklerinin sahip olması gereken genel özellikler aşağıdaki şekilde sıralanabilir;

**Çalışma Sıcaklıklarında Deformasyon Dayanımı:** Sıcak iş takım çeliklerinin, diğer takım çeliklerinden ayrılmasını sağlayan en önemli özellik deformasyona dayanımdır. Diğer takım çeliklerine bakıldığında oda sıcaklığında yapılan uygulamalarda yüksek performans görülürken, yüksek sıcaklık kullanılan uygulamalarda malzeme sertliklerinin düştüğü görülmektedir.

**Mekanik ve Termal Şok Dayanımı:** Yüksek termal şok dayanımı ve mekanik dayanım ve aynı zamanda yüksek çentik darbe dayanımı, çatlak oluşumu ve hasar oluşumunu engelleyebilmek için gerekli ve istenen bir durumdur. Karbon oranının düşük veya orta miktarlarda bulunması bu özellikleri sağlamaktadır.

**Yüksek Sıcaklıklarda Aşınma Dayanımı:** Takım ve kalıplarda uzun ömürlülüğün sağlanması için en önemli parametrelerden biri yüksek sıcaklıklarda erozyon ya da aşınma dayanımıdır. Alaşım elementi ve uygun mikro yapının bulunması yüksek sıcaklıklarda sertlik özelliğinin geliştirilebilmesini sağlar. Fakat bu durumda tokluk düşebilir.

**Isıl İşlem Distorsiyonuna Dayanım:** Üretim esnasında meydana gelebilecek olan distorsiyon ve ölçüsel değişiklikler azaltılmış olmalıdır. Sertleştirilebilirlik özelliğine sahip yüksek alaşımlı çeliklerde, en iyi ısıl işlem distorsiyon dayanımı elde edilmektedir [22].

**İşlenebilirlik:** Yumuşak çelikler, örneğin yüksek ferrit içeren düşük karbonlu takım çelikleri, işleme takımı ve işlenecek parça arasındaki adhezyondan kaynaklı olarak zor işlenebilmektedir. Bu nedenle takım çelikleri, ferrit-perlit mikro yapısına sahip normalize edilmiş halde işlenmelidir [23].

**Gerilme Çatlaklarına Dayanım:** Gerilme ve ısıtma işlemlerinin tekrar edilmesi sonucu sıcak iş takım çeliklerinin yüzeyinde, derin olmayan ve servis ömürlerini belirleyen ince çatlaklar oluşmaktadır. Uygun alaşım, işleme koşulları ve ısıl işlem seçimi ile gerilme çatlaklarına dayanımda en iyi sonuçlara ulaşmak mümkündür [22].

#### **4.1. Sıcak İş Takım Çelikleri Sınıfları**

##### **4.1.1. Kromlu sıcak iş takım çelikleri;**

Düşük karbonlu kromlu sıcak iş takım çeliklerinin esas uygulama alanları alüminyum, çinko ve magnezyum enkrüzyon ve döküm kalıpları, dövme kalıpları ve tüm sıcak iş kalıplarıdır. Kromlu sıcak iş takım çeliklerinin temel ortaya çıkma amacı alüminyum enjeksiyon dökümüdür.

Kromlu sıcak iş takım çelikleri AISI standartlarında H10 - H19 türleri arasında olup, sıcaklığın etkisi ile yumuşamaya karşı dayanıklıdır. Bunun sebebi orta derecede krom

içeriği ve karbür oluşturacak elementlere (molibden, tungsten, vanadyum) sahip olmasıdır.

Başta H11 olmak üzere, H12, H13 ve H19 kromlu çeliklerin en temel özellikleri yüksek tokluk ve şok dirençleri olmaktadır [22].

#### **4.1.2. Molibdenli sıcak iş takım çelikleri;**

H42 ve H43 çelikleri bu gruba dahildir. H42 çeliğinin kimyasal kompozisyonuna bakıldığında nominal olarak %5 Mo, %6 W, %2 V, %4 Cr ve değişen oranlarda karbon içerdiği görülmektedir. Yüksek orandaki karbür yapıcı element içeriği sertleştirilebilirliği sağlarken, temperleme sırasında ikincil sertleşebilirlik sayesinde yüksek sertliği mümkün kılmaktadır. Molibdenli sıcak iş takım çelikleri, dekarbürizasyona karşı olan duyarlılıklarından dolayı, tavlama ve ıslah sırasında koruyucu atmosfere ihtiyaç duyulmaktadır [22].

#### **4.1.3. Tungstenli sıcak iş takım çelikleri;**

Genellikle temel alaşım elementleri karbon, tungsten, krom ve bazı uygulamalar için vanadyum olmaktadır [13]. %9-19 arasında tungsten, düşük miktarda karbon, krom ve vanadyum barındırırlar [22]. Yüksek orandaki alaşım elementi içeriği, yüksek sıcaklıkta yumuşamayı en aza indirgemektedir. Krom içeren sıcak iş takım çelikleri ile karşılaştırıldığında, bu açıdan daha avantajlı, ancak daha gevrekler. Normal çalışma sertlikleri 42-45 HRC arasındadır [24].

### **4.2. Sıcak iş Takım Çeliklerinin Mekanik Özellikleri**

Yüksek sıcaklıkta, sertlik, akma ve çekme dayanımı, temper direnci gibi mekanik özelliklerini koruyabilmesi, yeterli aşınma direnci ve ısı iletkenliğinin yüksek olması, sıcak iş takım çelikleri için olması gereken özelliklerdir. En önemli mekanik özelliklerden biri olan aşınma dayanımı; yüksek sıcaklık uygulamalarından dolayı sıcak iş takım çeliklerinde önemlidir.

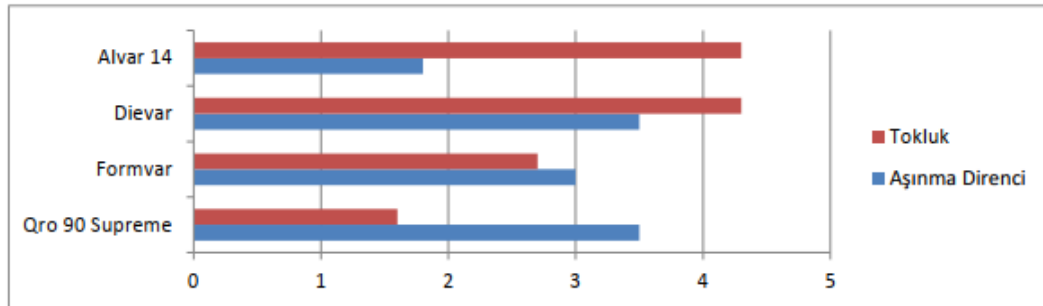


Kullanım sırasında, bazı ekstrüzyon kalıplarında çatlama ya da kırılma gibi hasarların oluşması, bölgesel aşırı yüklemelerden, malzeme kusurlarından ve takım parça temas yüzeyindeki aşınmalardan meydana gelebilmektedir.

En sık görülen mekanik çatlak yayılmasının nedeni yorulmadır ve bu genel olarak oksidasyon ve sürünmeden kaynaklanır. Takım performansının ne yüzey şartlarının iyileştirilmesi, üretimi yapılan parçanın kalitesini ve takımın verimliliğini arttıracaktır. Isıl yorulma en sık görülen kırılma nedenidir ve çoğu kalıbın ömrünü direkt olarak etkilemektedir. Malzemenin sıcak akma dayanımı, sıcaklık direnci, ısıl iletkenlik, termal genişleme katsayısı, süneklik ve tokluk çoğunlukla kimyasal kompozisyona bağlıdır.

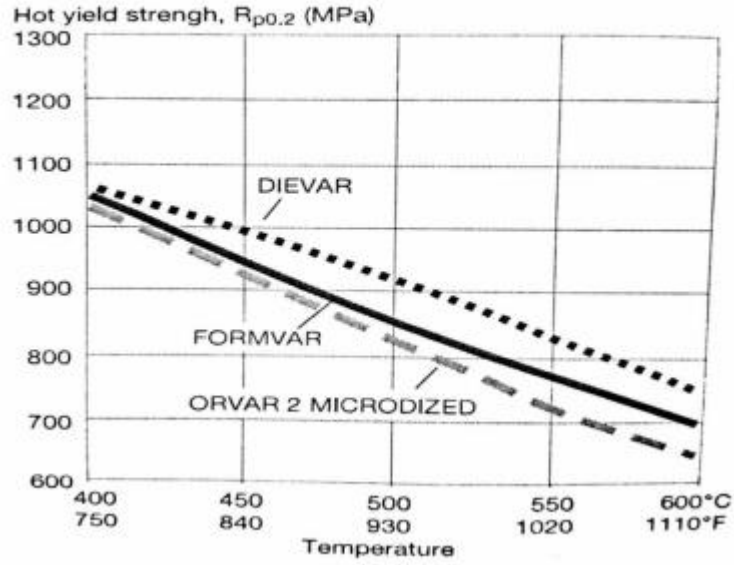
Tablo 4.1. Uddeholm firmasına ait patentli sıcak iş takım çeliklerinin kimyasal bileşim tablosu[24].

Standart Gösterimleri	Bileşimleri							
	ISO/DIN	AISI	C	Si	Mn	Cr	Mo	Diğer
Alvar 14	~1.2714 HT	6F3	0,55	0,3	0,7	1,1	0,5	1,70Ni 0,10 V
Dievar	ÖZEL ALAŞIM							
Formvar	PATENT							
Qro 90 Supreme			0,38	0,3	0,75	2,6	2,3	0,90 V



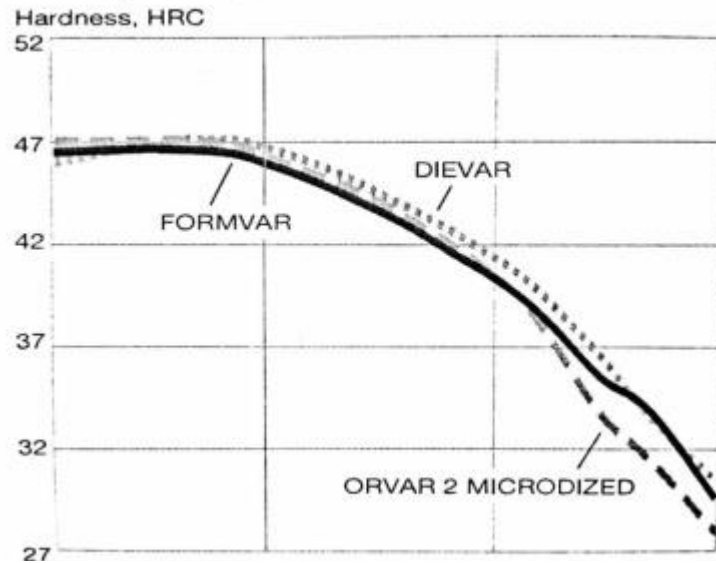
Şekil 4.1. Uddeholm firmasına ait patentli sıcak iş takım çeliklerinin aşınma tokluk kriterleri [24].

### RESISTANCE TO PLASTIC DEFORMATION AT ELEVATED TEMPERATURE



Şekil 4.2. Uddeholm firmasına ait patentli bazı sıcak iş takım çeliklerinin sıcak akma mukavemeti ile sıcaklık arasındaki ilişki [24].

### TEMPERING RESISTANCE AT 600°C (1110°F)



Şekil 4.3. Uddeholm firmasına ait patentli bazı sıcak iş takım çeliklerinin sertlik zaman arasındaki ilişkisi [24].

### 4.3. Sıcak İş Takım Çeliklerinin Seçimi

Üretim parametreleri, çelik malzemenin ısıtma işlemi yatkınlığı, proses koşulları gibi kriterler sıcak iş takım çeliklerinin seçilmesinde dikkate alınır. Proses esnasında işlem görecektir olan sıcak iş takım çeliğinin seçimi, malzemenin maruz kaldığı şartlar dikkate alınarak yapılmalıdır. Örneğin hafif metal ekstrüzyonu yapılacak ise; sıcak iş takım çeliğinin yüksek sıcaklık dayanımının ve yüksek aşınma direncinin iyi olması gerekmektedir. Eğer proseste darbe var ise tokluk, önemli bir parametre olacaktır. Isıl yorulmaların görüldüğü proseslerde ise ESR (cüruf altı yeniden ergitme), VAR (vakum ark yeniden ergitme) gibi ikincil metalurjik işlemler ile çeliğin yüksek saflığa ve homojenliğe sahip olması tercih edilmektedir. Bunlar dışında; kullanılacak sıcak iş takım çeliğinin ısıtma işlemi yatkınlığı seçimi etkileyen faktörlerden biridir [1].

### 4.4. Sıcak İş Takım Çeliklerinin Kullanım Alanları

Sıcak iş takım çelikleri, yüksek sıcaklıklarda termal şok ve aşınmalara karşı gösterilen dayanımı, ısıtma iletkenlikleri ile tokluk değerleri yüksek, ısıtma şoklara dayanıklı malzemeler olup demir ve demir dışı metaller ile alaşımların kesmeden şekillendirilmesi için kullanılırlar. Endüstride alüminyum gibi hafif metallerin enjeksiyon ve ekstrüzyon, sıcak dövme kalıplarında, kalıp ve boru presleri/aksamlarında; delici zımba/kalıplarında ve plastik enjeksiyon aşındırıcı plastiklerin kalıplarında kullanılırlar. Malzemenin yüksek sıcaklık ve basınç altında şekillendirilmesi veya yüksek sıcaklıklarda ergitilip döküm yöntemiyle şekillendirilmesi metotlarında kullanılan; yüksek gerilme ve sıcaklıklara direnç gösterebilen çelik grubudur [26]. Kullanıldıkları takımın ömrünün uzun olması, takımın performansı kullanılan çeliğinin aşınma direncine, sertliğine, tokluğuna ve dayanımına göre değişmektedir [27].

Tablo 4.2. Sıcak iş takım çeliklerinin kullanım alanları ve imal edilen ekipmanlar[1]

Dövme	Ekstrüzyon	Yüksek Basıncılı Kalıp Döküm
Kalıp(Çekiç)	Kalıp	Kalıp Çekirdekleri
Kalıp(Pres)	Dami Blok	Kovanlar
İtici Pimler	Kovan	Maçalar
	Piston	İtici Pimler
	Mandrel	Topuklar
	Destek Bloğu	Kovan Karşılıkları



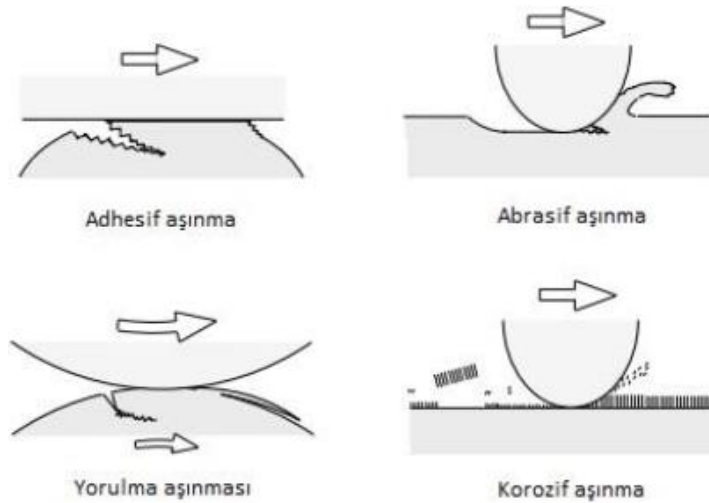
Şekil 4.4. Sıcak iş takım çeliği ile üretilmiş kalıp [27].

Sıcak iş takım çeliklerinin kullanım alanları genellikle hafif metallerin üretimi, sıcak ekstrüzyon ekipmanları, plastik kalıp çelikleri, kalıp döküm ekipmanları ve kalıp insert malzemesi olmaktadır [28].

## 4.5. Sıcak İş Takım Çeliklerinde Hasar

### 4.5.1. Aşınma türleri ve aşınmaya etki eden faktörler

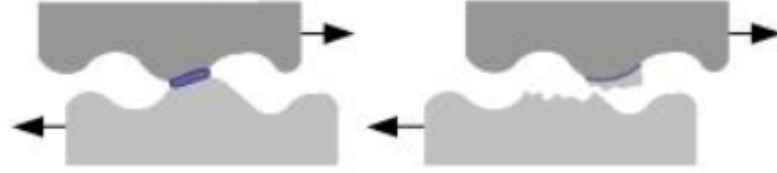
Aşınma, malzemenin başka bir yüzeyle teması sonucunda malzemenin yüzeyinden parçaların yer değiştirmesi veya kopması olayıdır. Aşınma olayında meydana gelen bu fiziksel ayrışma; mikro çatlaklar, kimyasal değişim veya yüzeyler arasındaki erime gibi çeşitli sebeplerden dolayı meydana gelebilir. Bu nedenle mekanizmasına bağlı olarak aşınma türleri Şekil 4.5.'de görüldüğü gibi adhesif, abrasif, korozif aşınma ve yorulma aşınması şeklinde sınıflandırılırlar. Fakat aşınma sırasında meydana gelen ısınma, kimyasal tabaka oluşumu gibi malzemenin yüzeyinde meydana gelen değişimler mekanizmanın değişmesine sebep olabilir. Adhesif ve abrasif aşınma plastik deformasyon sonucunda oluşurlar. Yorulma aşınması ve korozif aşınma plastik veya elastik olabilir [29].



Şekil 4.5. Aşınma mekanizmaları [29].

Eğer aşınma benzer yüzeyler arasında meydana geliyorsa, yüzeyler arasında kaymayı zorlaştıran adhesif bağ kuvvetleri oluşur ve plastik deformasyon başlar. Adhezyon kuvvetinin artmasıyla deformasyon artar, çatlak oluşur ve yüzeylerden biri diğerinden parça koparır. Bu tür aşınmalar adhesif aşınma olarak adlandırılır. En çok karşılaşılan

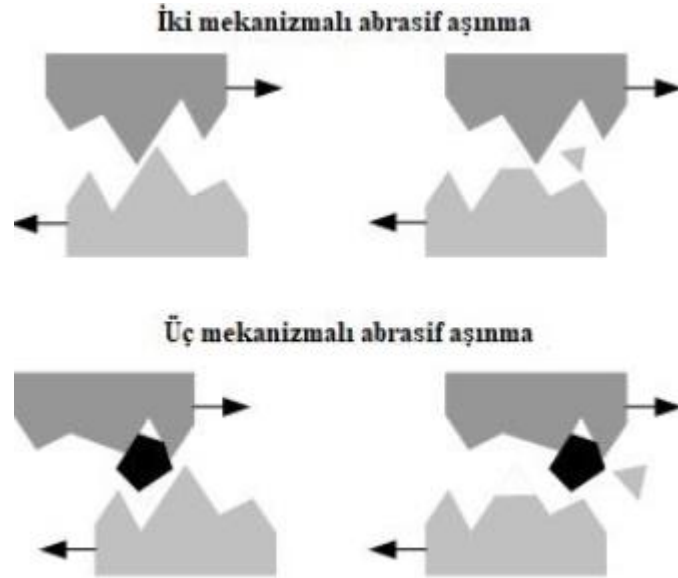
aşınma türüdür. Adhesif aşınmayı azaltmak için daha uygun malzeme seçimi yapılabilir, uygulanan yük azaltılabilir ve yağlayıcı kullanılabilir [30].



Şekil 4.6. Adhesif aşınma mekanizması [30].

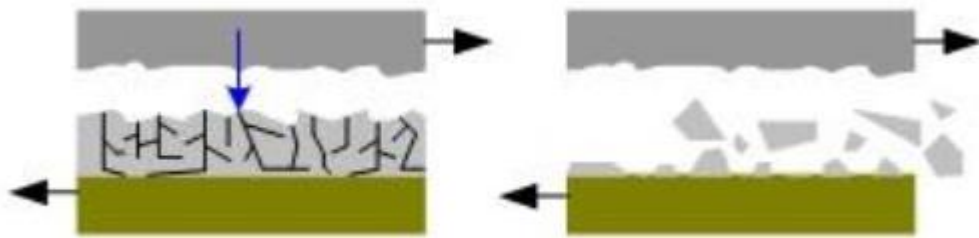
Abrasif aşınma, sert ve yumuşak iki farklı malzemenin teması sonucu oluşan plastik deformasyon veya kırılma ile sert olan malzemenin yumuşak malzemeye zarar vermesidir. Düşük kırılma tokluğuna sahip olan kırılma malzemelerde aşınma, gevrek kırılma şeklinde olur. Fakat yüksek kırılma tokluğuna sahip sünek malzemelerde aşınma plastik deformasyon sonucunda oluşur [31].

Abrasif aşınma, Şekil 4.7.'de de görüldüğü gibi iki mekanizmalı ve üç mekanizmalı olmak üzere iki gruba ayrılır. Eğer aşınma sadece iki malzeme arasında oluyorsa bu, iki mekanizmalı abrasif aşınmadır. Fakat iki yüzey arasına bir partikül giriyorsa ya da kopan parçalar üçüncü eleman gibi davranıyorsa buna üç elemanlı abrasif aşınma denir [31].



Şekil 4.7. Abrasif Aşınma [30].

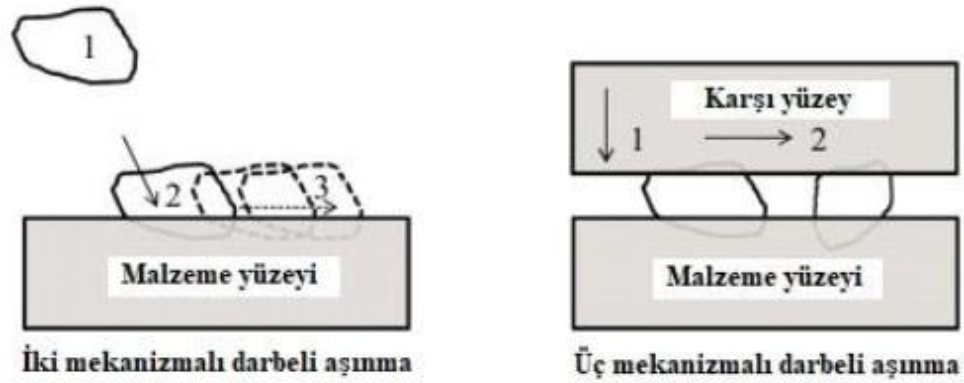
Malzemenin sürtünme esnasında sabit ve sürekli bir yüke mağruz kalması sonucu, eğer uygulanan yük yorulma direncinden düşükse yorulma aşınması meydana gelir. Yorulma çatlakları yüzeyde başlar ve malzemenin içine doğru devam eder. Çatlakların birleşmesi, Şekil 4.8.'de de görüldüğü gibi malzemenin kırılarak ayrılması ve delaminasyon ile sonuçlanır [32].



Şekil 4.8. Yorulma aşınması [30].

Malzemelerin korozif bir ortama maruz kalması sonucunda meydana gelen aşınma korozyon aşınmasıdır. Korozyon aşınması sadece iki yüzeye bağlı bir aşınma türü değildir ve iki kademeli olarak meydana gelir. Üç mekanizmalı olan bu aşınmada sisteme etki edecek olan üçüncü yapı, malzemelerin çevreyle etkileşime girmesi sonucu oluşan korozyon parçacıklarıdır [32].

Takım çeliklerinde rastlanan, malzemeye hem darbenin hem kaymanın etki ettiği aşınma türü darbeli aşınmadır. Bu tür aşınmalar farklı koşullarda oluşabilir ve bu açıdan iki mekanizmalı ve üç mekanizmalı olmak üzere iki grupta sınıflandırılmışlardır. Şekil 4.9.'da görüldüğü gibi iki mekanizmalı darbeli aşınmada, parçacık yüzeye çarpar ve darbeden sonra yüzeyde kayarak aşınmayı meydana getirir. Üç mekanizmalı darbeli aşınmada ise darbe ve kayma etkisi sisteme etki eden üçüncü bir parça tarafından sağlanır. Malzeme üzerinde yer alan partiküllere üçüncü parçanın uyguladığı yük yardımı ile darbe ve kayma aşınması meydana gelir [33].



Şekil 4.9. Darbeli aşınma mekanizmaları [33].

Aşınma mekanizmasının ortaya çıkmasına neden olan faktörler aşağıdaki gibidir:

Metalurjik Değişkenler:

- Sertlik
- Tokluk
- Mukavemet
- Mikro yapı
- Kimyasal Bileşim



Çalışmaya Bağlı Değişkenler:

- Temas Eden Malzeme
- Basınç veya Mukavemet
- Hız
- Sıcaklık
- Yüzey Düzgünlüğü

Diğer Faktörler;

- Yağlama
- Korozif Etki [34].

#### 4.5.2. Isıl yorulma

Metal enjeksiyon, ekstrüzyon gibi sıcak iş takım çeliklerinin kullanıldığı uygulamalarda, prosesten dolayı oluşan hasara verilen addır ve tekrar eden termal çevrim sonrasında kalıbın yüzeyinde görülen ısı gradyanına bağlı meydana gelen ısıl genişmeye bağlı gerilim hasarı oluşturur.

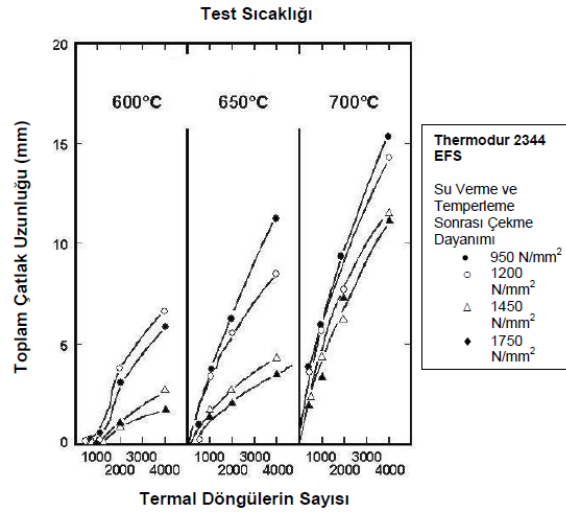
Çeliğin termal genişleme katsayısı sebebiyle yüzeylerde oluşacak ani genişme; genişleyen yüzeyim basma geriliminin artmasına ve soğuk olan alt yüzeydeki çekme gerilmesinin oluşmasına neden olur Bu gerilmeler altında malzemenin akma mukavemetinin üzerine çıkıldığında yüzeyde kılcal yorulma çatlakları oluşur ve ilerleyerek hasara neden olur [1].

Sıcak Yırtılma; alüminyum enjeksiyon kalıpları gibi sıcak iş takım çeliklerinin kullanıldığı uygulamalarda; görülme ihtimali vardır.

Sıcak yırtılmanın önemli olduğu durumlarda, uygun ısıl işlem ve proseslerin kontrolü ile mümkün olabilecek özellikler aşağıdaki gibidir.

- Uniform mikroyapı

- Homojen karbür dağılımı
- Uniform martensitik yapı
- Yüksek sertlik
- Yüksek tokluk [35].



Şekil 4.10. Sertleştirme ve Temperleme sonrasında çekme dayanımının ısıl yorulma çatlaklarına (sıcak yırtılma) etkisi [36].

#### 4.5.3. Kırılma mekanizması

Kırılma, katı cisimlerin uygulanan gerilmelerden dolayı iki ya da daha fazla parçaya ayrılmasıdır. Sıcak iş takım çeliklerinde, malzemenin sahip olması gereken akma dayanımının üstünde uygulanan yüklerde ortaya çıkan hasar tipi kırılma hasarı olarak bilinir ve çeliğin mikro yapısına ve yükleme şekline göre interkristalin ya da transkristalin şekilde ilerleyebilir.

Malzemede bulunan herhangi bir kusur veya ısıl işlem, dizayn, çalışma koşulları, kullanılan çeliğin sahip olması gerekenden daha düşük çekme mukavemetine sahip olması gibi sebepler kırılma hasarına neden olurlar [1].



Şekil 4.11. Kırık yüzey örneği - üst kısımda gevrek, alt kısımda sünek kırılmaya örnek [37].

## **BÖLÜM 5. TAKIM ÇELİKLERİNİN TASARIMI VE ÜRETİMİ**

Çok yüksek özelliklere sahip çelik grubu olan takım çeliklerinin imalatında kullanılan yöntemler, son derece kaliteli ve son derece yüksek teknoloji ürünü proseslerden oluşmaktadır. Genellikle kullanılan çelik üretim yöntemlerine ek olarak, temiz hurda (özellikle paslanmaz çelik hurdası) girdi olarak kullanılmaktadır. Elektrik ark ocaklarında ergitme yapılır. Ergitme işlemi sonrası pota metalurjisi yöntemiyle alaşımlama, gaz alma, Ca enjeksiyonu vb. prosesler, çelik malzemenin kalitesini arttırmak için eriyiğe uygulanır.

Dipten döküm ile döküm gerçekleştirilir. Bu şekilde elde edilen ingotlar, Cüruf Altı Ergitme (ESR) işlemi gördükten (yeniden ergitilerek iç yapı homojenliği yükseltildikten) sonra, dövülerek ısıtılma tabii tutulur. Bu esnada dövülmüş çeliğin mikro yapısı modifiye edilmiş olup, dövme ve ısıtılma sırasında yüzeyde meydana gelen bozunmuş tabakaların çelikten uzaklaştırılması için kütükler talaşlı işleme girer. Bu durumda kabuk soyulmuş duruma gelen bu kütükler, daha sonra ultrasonik çatlak kontrolünden geçirilerek, diğer mekanik inceleme için hazır hale getirilir.

Kütüğün hemen hemen her bölgesinde, çekirdeğinde ve yüzeyinde kimyasal bileşimin belli sınırlar içerisinde aynı olması, işleme kolaylığından, ısıtılma işlemde kalıbın her bölgesinde aynı sertliğinin elde edilebilmesine kadar bazı özellikler kazandırır.

Tokluk ve süneklik takım çeliklerinin en önemli özellikleridir. Ağız dökülmesine, çatlak oluşumuna ve çatlağın ilerlemesine karşı malzemenin gösterdiği direnç olabildiğince yüksek olmalıdır.

Kimyasal bileşim değiştirilerek, yeni bileşimler oluşturularak bu özellikleri arttırabilmenin sınırları vardır. Diğer yandan, iki malzemenin kimyasal bileşimi aynı

olsa bile, mikro yapıları birbirinden farklı olabilir. Çeliğin hücre yapısı olarak anılan mikro yapının ince olması ve her bölgede aynı, yani homojen olması, bu özellikler açısından da çok önemlidir. Taneler ne kadar küçük ve biçimleri de küreye yakınsa, çeliğin özellikleri de o kadar yüksek olacaktır.

Bu sebeplerden dolayı takım çelikleri, vakum altında gaz giderme ile safsızlık oluşturan oksijen, azot ve hidrojenden arındırılırlar. Ca-enjeksiyonu ile sülfürler küresel hale getirilir ve en önemlisi Cüruf Altı Ergitme işlemi ile çelik yeniden ergitilerek içerdiği son safsızlıklardan da kurtulması sağlanır. Böylece, son derece temiz bir mikro yapı ve böylece son derece sünek ve tok bir çelik elde edilmiş olunur. Özellikle Metal Enjeksiyonu söz konusu olduğunda kullanılan kalıp çeliğinin tokluğu ve sünekliği çok büyük bir önem taşır.

## **5.1. Tasarım**

Kalıp ve takımların tasarımı, ekonomik olarak üretilmesi ve kullanılması çok önemlidir. Üretilen parçanın şeklinden başlayarak, olabildiğince fazla üretime olanak tanıyacak şekilde dizayn edilmez. İdeal bir takım çeliğinden yapılmış, uygun ısı işleminden geçmiş bir kalıp, dizayn hatalı ise ısı işlem sırasında bile kırılabilir. Zaman kaybını önlemek ve maliyetleri düşük tutmak için iyi bir tasarım şarttır.

### **5.1.1. Isıl işlem açısından tasarım**

Isıl işlem esnasında, gerek çeliğin içerisindeki yapısal dönüşümlerden kaynaklanan gerilmeler, gerekse de çeliğin yüzeyi ile merkezi arasındaki sıcaklık farklılıkları iç gerilmeler oluşturur. Bu gerilmeler çeliğin çatlama veya kırılma riskini artırır. Eğer "gerilim giderme tavlama" yapılmadı ise, bu risk daha da artar. Tasarımcı mümkün olduğunca simetrik bir şekil çıkarmaya özen göstermelidir. Üretilen parçanın hacmi arttıkça, kalıpta bir alt parça oluşturmanın gerekliliği üzerinde düşünülmelidir. Böyle bir tasarım aşınan veya hasar gören parçaların hızlı bir şekilde değiştirilme avantajını ortaya çıkarır [6].

## 5.2. Takım Çelikleri Üretim Yöntemleri

Takım çeliklerinin üretimi için üç ayrı yöntem kullanılmaktadır. Bunlar;

- Geleneksel Takım Çeliği Üretimi (Electroslag Remelting-ESR)
- Toz Metalurjisi
- Püskürtme Şekillendirme (Osprey)

Cüruf altı yeniden ergitme ile üretilen takım çeliklerinde alaşım elementlerinin birikim eğilimi azaltılsa da iri karbürlerin oluşmasına engel olunamamaktadır. Bu oluşan iri karbürler takım çeliğinin tokluğunu düşürmekte, ısı işlem problemlerini artırmakta ve talaşlı imalatı zorlaştırmaktadır. Bu tür problemlerin çözülebilmesi nedeni ile toz metalurjisi yöntemi takım çeliği üretiminde her geçen gün daha fazla kullanılmaktadır.

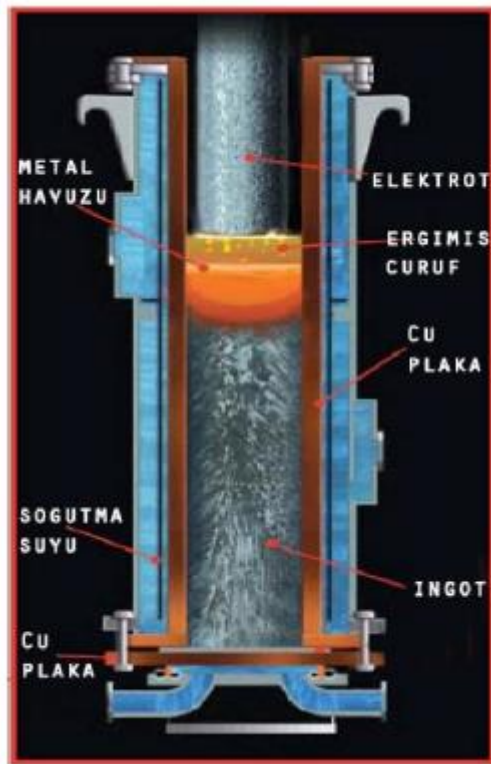
Toz metalurjisi ile üretilen takım çeliklerinin miktarı son 25 yılda düzenli olarak artmış ve günümüzde 1100 ton/yıla kadar ulaşmıştır. Takım çeliklerinin toz metalurjisi ile üretimi en başta homojen ve ince karbür dağılımı sağlayarak yüksek performanslı takım çeliklerinin üretilmesinde tercih sebebi olmaktadır. Fakat toz metalurjisi ile üretilen takım çeliklerinin üretimi fazla sayıda süreç adımı gerektirmekte ve bundan dolayı bitmiş ürün diğer üretim yöntemlerine göre oldukça pahalıdır.

Osprey yöntemi ile takım çeliği üretimi çok yeni bir teknoloji olup üretim aşamasındaki kademeler toz metalurjisine kıyasla daha kolay ve kısadır. Osprey yöntemi, ESR yöntemine göre çok daha üstün olmakla beraber toz metalurjisi üretimine kıyasla da daha iyi mekanik özelliklere sahip takım çeliği üretimine olanak sağlar. Ayrıca toz metalurjisi yönteminin birçok avantajına sahipken onun, çok sayıda işlem basamağı ve tozların depolanması esnasında karşılaşılan güvenlik problemleri gibi bazı önemli dezavantajlarını içermez.

### 5.2.1. Geleneksel çelik üretimi

Takım çeliklerinin imalatında kullanılacak olan yöntemler genellikle ileri teknoloji uygulamalardan oluşmaktadır.

Çelik üretim prosesi genel olarak iki bölümden oluşur. Buna göre, ilk bölüm büyük oranda ergitme, az miktarda rafinasyon ya da rafinasyon olmadan ergitme işlemidir. İkinci kısımda ise sıcak metal elektrik ark fırınından konverter potaya aktarılır. Bu kademedeki rafinasyon işleminin büyük kısmı gerçekleşmektedir. İkincil pota metalurjisi ile fırın zamanı azaltılmakta, genel kapasite artmaktadır. Verim, kalite, üretimin devamlılığı ve tekrarlanabilirlikte de artış sağlanmaktadır.



Şekil 5.1. ESR Yönteminin Şematik Gösterimi [38].

### 5.2.2. Toz metalurjisi yöntemi ile takım çeliği üretimi

Potada konvansiyonel yöntemle üretilmiş eriyik haldeki takım çeliği alaşımı, alt tarafında bulunan küçük bir delik yardımıyla aşağı sızdırılarak nozüllerden argon/azot gazı püskürtülmek sureti ile küçük damlacıklara parçalanır, atomizasyon ve damlacıklar birbirleri ile veya katı yüzeylerle temasa geçmeden hızlıca soğutulur. Böylece hemen hemen aynı kimyasal bileşime sahip toz taneciklerinin elde edilmesi sağlanır ve ayrıca ergimiş alaşımı yüksek enerjili gaz çarpmasına maruz bırakarak geleneksel ingot dökümlerinde kaçınılmaz olarak karşımıza çıkan alaşım elementlerinin birikimi engellenmiş olur. Nozülün tasarım ve geometrisi, atomize eden akışkanın basıncı ve hacmi, sıvı metalin akış çapı gibi parametreler değiştirilerek toz boyutu dağılımı kontrol edilebilir.

Atomizasyondan sonra tozlar atomizasyon tankının altındaki haznede biriktirilir ve daha sonra buradan vakum sistemine sahip kutuya alınır. Daha sonra, kutu içinde atmosferden izole edilmiş tozlar belirli sıcaklık ve basınç altında sıcak preslenirler (hot isostatic pressing-HIP). Sıcak presleme ile içyapının irileşmesine imkân verilmeden, gözeneklerden arınmış ingot halini alırlar. Daha sonra elde edilen ingot istenilen boyutlara indirilmek üzere sıcak deforme edilebilir.

### 5.2.3. Püskürtme şekillendirme ile üretim (osprey)

Gaz atomizasyonu yöntemi ile üretilen metal tozlarının bir altlık üzerinde biriktirilmesi ile kütle oluşturulması işlemidir.

Takım çeliği üretimde de konvansiyonel yöntemle üretilmiş eriyik haldeki takım çeliği alaşımı argon/azot gazı atomizasyonu ile aşırı soğumuş sıvı damlacıkları halinde parçalanarak hareket ettirilebilen su soğutmalı bakır kalıp üzerine biriktirilirler. Burada üst üste biriken aşırı soğumuş sıvı damlacıklar alttan ısı kaybı nedeni ile birikir birikmez neredeyse porozitesiz olarak katılaşır. Daha sonra elde edilen ingot istenilen boyutlara indirilmek üzere sıcak deforme edilebilir. Bu sürekli proses



mikroişlemcilere sahip kontrol sistemi tarafından sürekli olarak izlenerek kontrol altında tutulmaktadır [17].

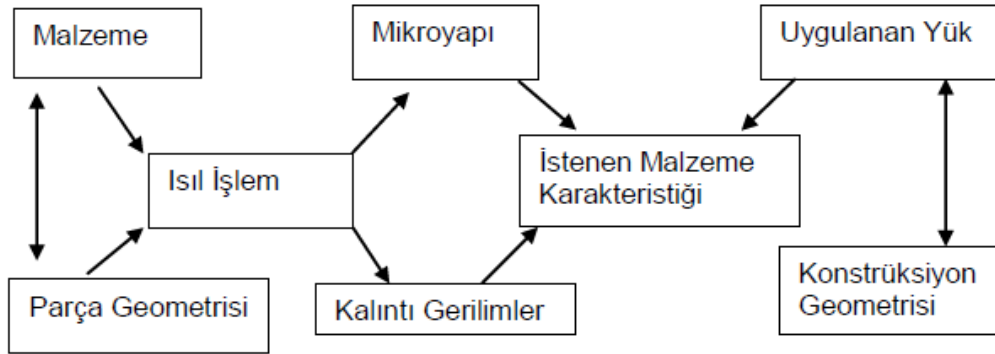
## **BÖLÜM 6. ISIL İŞLEM**

Malzemenin fiziksel veya kimyasal özelliklerini geliştirmek için yapılan termal işlemlere verilen addır.

Metallere uygulanan ısıtım işlemi; metalik malzemenin erime sıcaklığına göre değiştiği ve çok yüksek sıcaklıklara ısıtıldıktan sonra soğutulması esasına dayanmaktadır. Bütün bu işlemlerden sonra malzemeler sertleşir ya da yumuşar. Isıtım işlemi sayesinde iyileştirilen mekanik özellikler şunlardır; sertlik, dayanım, aşınma direnci, darbe dayanımı, ısıtım dayanım ve korozyon direnci gibi.

Sertliğin artması aşınma dayanımını artırırken, kırılabilirliğinde buna bağlı olarak arttığı görülür. Isıtım işlemi esnasında; sıcaklık, zaman ve atmosferin eş zamanlı kontrolü ile uygun şartların oluşturulması ile istenilen özelliklerde malzeme üretilmiş olur.

Uluslararası Isıtım İşlem Federasyonu'nun tabiriyle "ısıtım işlemi; malzemenin termal döngüye maruz kaldığı ve buna bağlı olarak özelliklerinin değiştiği uygulamalardır" [39].



Şekil 6.1. Isıl işlem ile özelliklerin belirlenmesini etkileyen faktörlerin birbirleriyle ilişkisi [39].

Çelik malzemenin kalitesi kadar ısıl işlem ve ısıl işlem sonrası meydana gelen mikro yapıların takımın mekanik ve termal özelliklerine etkisi fazladır [1]. Eğer mikroyapı detaylı olarak tanımlanmışsa, malzemenin sahip olduğu bütün özellikleri bilinir ve bu sayede özellikleri değiştirmek için uygulanacak olan ısıl işlem yöntemi belirlenebilir.

Isıl işlem türleri aşağıdaki gibidir;

- Sertleştirme (Vakum, yağ, su, hava)
- Temperleme (Menevişleme)
- Yumuşatma Tavlama Gerilim
- Giderme Tavlama
- Difüzyon Tavlama
- Yeniden Kristalleşme Tavlama
- Hidrojen Tavlama
- Sementasyon
- Nitrasyon
- Oksidasyon
- Karbonitrasyon
- Islah

- Normalizasyon
- Sıfır altı işlemler (Subzero)
- İndüksiyonla Sertleştirme
- Yaşlandırma [39].

Sertleştirme- Su Verme: Çeliğin türüne göre, belli bir sertleştirme sıcaklığında yapıyı ostenite çevirip; su vererek martensite dönüştürmek sertleştirmenin temel prensibidir.

Temperleme (Menevişleme): Sertleştirilmiş ya da normalize edilmiş çeliğin süneklik ve tokluğunu artırmak amacıyla alt kritik sıcaklığın (A1) aşağısında bir sıcaklığa ısıtılması ve ardından uygun hızda soğutulmasını içeren prosestir.

Yumuşatma Tavlaması: Çeliklere talaşlı veya talaşsız şekil verme işlemlerini kolaylaştırmak ve ötektoid üstü çelikleri gevrekletiren sürekli 2. sementit ağını parçalamak için yapılır.

Gerilim Giderme Tavlaması: İç gerilmeleri gidererek parçanın çarpılma ve çatlamasını önleme, özellikle talaş kaldırma ve kaynak işlemi sırasında oluşabilecek fazla gerilmeleri azaltmak için uygulanan bir işlemdir.

Yeniden Kristalleşme Tavlaması: Soğuk sertleşmeyi gidermek ve soğuk şekil değiştirmeden sonra azalan uzama kabiliyetini yeniden kazanmak amacı ile uygulanır.

Difüzyon Tavlaması: Difüzyon olaylarının etkin olduğu homojenleştirme işlemi ile yapı homojen hale getirilerek, bünyedeki elemanların, özellikle empüritelerin bölgesel bileşim farklılıkları dengeye getirilmesi ve dendritik yapının yok edilmesi amaçlanır. Difüzyon tavlaması, özellikle yüksek alaşımlı çelik döküm için önemlidir.

Hidrojen Tavlaması: Sıvı çelikte erimiş halde bulunan hidrojen, çeliğin sıcak işlem sonrası soğutulması sonucu, “fleykler” adı verilen iç çatlaklara neden olur. Böyle bir çelik 600-650 °C’de birkaç gün ısıtılır ve bunu takiben yavaş soğutulursa, hidrojen miktarı azaltılabilir ve dolayısıyla iç çatlakların oluşum tehlikesi ortadan kalkmış olur.

Sementasyon: İçerisinde karbon verici gazların veya tuzun olduğu fırında çelik yüzeyine (C) karbon emdirilmesi işlemidir. Karbürizasyon olarak da anılır. Yüzeysel sertlik kazandıran yöntemlerden biridir.

Nitrasyon: Nitrasyon bir yüzey işlem prosesidir. Azotun çelik yüzeyine difüzyonun sonucu malzemenin yüzeyinde aşınma direncinin yüksek olduğu sert bir tabaka oluşur. Nitrasyon bazı çeliklerde korozyon direnci ve yorulma dayanımını artırır. Bazı çeliklerde ise korozyon direncini düşürür.

Oksidasyon: Oksidasyon kullanılan metalin korozyon direncini arttıran bir uygulamadır. Oksidasyon yapışma ve buna bağlı adhesif aşınmanın yaşandığı metal enjeksiyon uygulamalarında kalıp yüzeyinde yağlayıcı özelliğe sahip oksit filmi oluşturma işlemidir.

Karbonitrasyon: Çeliğin yüzey sertliğini arttırmak ve aşınmayı azaltmak için kullanılan bir işlemdir.

İslah Etme: İş parçalarına ve yapı elemanlarına büyük dayanım, yüksek bir akma sınırı yüksek süneklik ve ayrıca plastiklik kazandıran bir işlemdir.

Normalizasyon; yüksek sıcaklıkta ısıtma ve tutma işlemlerini kapsar. Normalizasyon bir çeliğin sertleştirme sıcaklığına kabaca yakın bir sıcaklığa (genelde 840 – 880 °C) kadar ısıtılması ve bu sıcaklıkta 10 – 20 dakikalık bir süre tutulması ve bunu takiben durgun havada soğumaya tabi tutulmasıdır. Normalizasyon, herhangi bir nedenle dokusu bozulmuş malzemenin bu dokusunu normalleştirmek için yapılır.

İndüksiyonla Sertleştirme: Çekirdeğin mikro yapısını etkilemeden, dış yüzeye sertleştirilmiş bir katman kazandırmak suretiyle, aşınma direnci, yüzey sertliği ve yorulma ömrünü uzatan bir yüzey sertleştirme işlemidir. Parçaların istenen bölgeleri sertleştirilirken diğer bölgeler ise yumuşak kalır.

Yaşlandırma: Yaşlandırma, metalin yapısındaki alaşım malzemesinin çökelmelerini sağlayarak metale dayanç kazandırmak için uygulanan bir işlemdir [39].

### **6.1. Takım Çeliklerinin Isıl İşlemi**

Takım çeliklerinin mekanik özelliklerine kullanılan çelik malzemenin kalitesi kadar uygulanan ısıl işlemin ve ısıl işlem sonrasında meydana gelen mikro yapıların etkisi çok büyüktür. Ostenitleme, soğutma ya da temperleme prosesleri ile malzemenin aşınma direnci, tokluk ve yorulma direnci gibi mekanik özelliklerini değiştirmek mümkündür. Birçok endüstriyel uygulamada ısıl işlem sonrasında elde edilen mekanik özelliklerin belirlenmesinde kontrol edilen tek parametre takım sertliği ile sınırlı kalmaktadır ancak günümüz yüksek performanslı takımlarında sadece sertlik ölçümü yeterli gelmemektedir. Aynı sertlik değerini birbirinden çok farklı mikro yapılarla ve ısıl işlem parametreleriyle elde etmek mümkündür.

Soğuk iş takım çelikleri diğer takım çelikleri ile mukayese edildiğinde en zor ortamlarda çalışan takım çeliği grubu olup yanlış uygulanan ısıl işlem takım performansına son derece olumsuz etkide bulunarak kısa sürede hasarlara neden olur. Servis sırasında maruz kaldıkları aşınma, darbe, yorulma ve yüklemeler soğuk iş takım çeliklerinin ısıl işleminde aynı anda elde edilmesi zor olan birçok özelliğin kazandırılmasını gerekli kılar. Örnek olarak otomotiv endüstrisinde form verme kalıbı olarak kullanılacak bir soğuk iş takım çeliğinin hem maksimum aşınma direncine sahip olması hem de maksimum darbe direnci göstermesi istemesi birbiri ile çelişen parametrelerdir. Böyle bir uygulamada yüksek tokluk için sertliğin düşük olması, aşınma direnci için ise tam tersine sertliğin yüksek olması gerekir ve dolayısı ile burada ısıl işlemcinin bilgi ve tecrübesinin yanı sıra kullanılan ısıl işlem basamakları da ön plana çıkmaktadır [17].

### **6.2. Takım Çeliklerinde Alaşım Elementleri Ve Etkileri**

Alaşım elementlerinin; başlıca kullanım amaçlarını şu şekilde sıralayabiliriz:

- Dayanımı arttırmak

- Sertliği artırmak
- Sertleşirmeyi kolaylaştırmak
- Çekirdeğe kadar sertleşmeyi sağlamak
- Korozyona karşı dayanımı artırmak
- Yüksek sıcaklıklara karşı dayanımı artırmak
- Aşınma direncini artırmak
- Isı tesiri ile genişmeyi değiştirmek
- Elektrik direncini değiştirmek
- Mıknatıslanma özelliğini geliştirmek

Tablo 6.1. Takım Çeliklerinde Alaşım Elementlerinin Mekanik Özellikler Üzerindeki Etkisi

İstenen Özellikler	Gerekli mikroyapı	Gerekli alaşım elementleri	Çelik grubu ve örnekler
Sertlik	Martenzit, yüksek C çözümlülüğü	% 0,6-1,5 C	Alaşimsız soğuk iş takım çelikleri C100
Sertlik ve aşınma direnci	Martenzit + karbürler	% 1-2 C %12' e kadar Cr W, Mo ve V	Alaşımlı soğuk iş takım çelikleri X210Cr12
Büyük kesitlerde sertlik	Martenzit, dönüşüme dirençli matris	% 0,4-0,6 C % 4' e kadar Ni Mn ve Cr	Havada sertleşen soğuk iş takım çelikleri X45NiCrMo4
Sıcak mukavemet Termo şok direnci	Martenzit ikincil karbür çökeltileri	% 0,3-0,4 C % 5'e kadar Cr Mo ve V	Sıcak iş takım çelikleri X38CrMoV5 1
Sertlik Sıcak aşınma direnci	Martenzit, primer karbürler ikincil karbür çökeltileri	% 0,8-2 C % 18' kadar (W+2Mo) % 4'e kadar V % 10'a kadar Co	Yüksek hız takım çelikleri S6-5-2 S10-4-3-10

Önemli alaşım elemanlarının etkisi, aşağıdaki gibi özetlenebilir:

**Karbon (C):** Çelikte başlıca sertleştirici etkisi olan element olmakla beraber, çeliğin akma ve çekme dayanımını artırır, yüzde uzamayı, esnekliğini, dövülme, şekillendirilme, kaynak edilme ve kesilme özelliğini zayıflatır.

**Mangan (Mn):** Mangan çeliğin dayanımını, sertleşebilme, dövülme ve kaynak kabiliyetini, su verme derinliğini artırır. Paslanmaya korozyona olan dayanımını geliştirir. Ancak esnekliği bir miktar azaltır.

Krom (Cr): Çeliğin sıcağa dayanımını artırır. Kabuk-tufal yapmayı önler. Kritik soğuma hızını düşürür, sertleşebilirliği ve aşınma direncini artırır. Çeliğin paslanmaya karşı dayanımını artırır.

Volfram (W): Aşınma direncini artıran, sıcakta sertliğin muhafazasını sağlayan bir alaşım elementidir. Takım çeliklerinde, kesici kenar sertliğinin artmasını, kullanılma ömrünün uzamasını ve yüksek ısıya dayanımını sağlar. Volfram; çeliğin dayanımını artırır. Belirli yüzdelere kadar kaynak edilebilme özelliğine geliştirici etkiler yapar. Tane İnceltici olarak etki eder, aşırı ısınmaya karşı hassasiyeti azaltır ve aşınma direncini, sıcakta dayanımı ve meneviş dayanımını iyileştiren özel sert karbürler meydana getirir. Kötü yönü, ısı iletme kabiliyetini azaltması ve bununla bağlantılı olarak ısıl işlemlerde çatlak teşekkülü eğilimini arttırmasıdır.

Molibden (Mo): Tane büyümesini önler, sertleşebilme kabiliyetini artırır. Meneviş kırılabilirliğine mani olur ve kuvvetli karbür yapıcı olarak sertliği, aşınma direncini ve meneviş dayanımını artırır. Ayrıca molibden çeliklerin sürünme dayanımını ve aşınma direncini yükseltir. Molibden; çeliğin çekme dayanımını, özellikle ısıya dayanımıyla kaynak edilme özelliğini artırır. Alaşımli çeliklerde molibden; krom nikkelle birlikte kullanıldığında, akma ve çekme dayanımını artırır. Yüksek miktarda molibden, çeliklerin dövülebilmesini güçleştirir.

Vanadyum (V): Sertleşebilme kabiliyetini ve çeliğin sıcağa dayanımını artırır. Aynı zamanda çelik kesici uçlarının, daha uzun zaman keskin kalmasını sağlar. Zor çözülebilen karbürler teşekkül ettirmesi sonucu, yüksek östenitleştirme sıcaklıklarında tane büyümesini engeller ve aşınma direncini artırır. Çeliğin çekme ve akma dayanımını artırır. Bundan dolayı, yüksek vanadyum miktarlarında takımın parlatılabilirliği kötüleşir.

Nikel (Ni): Sertleşme derinliğini iyileştirir ve taneyi inceltir. Nikel ilavesi, darbe ve çarpma zorlamalarıyla çalışan takımlarda sünekliliği artırır. Nikel darbe tokluğunu ve tavlı çeliklerde dayanımı artırır. Krom nikkelli çelikler paslanmaz, kabuklaşmaya ve ısıya dayanımlıdır.



Kobalt (Co): Kobalt Yüksek Hız çelikleri için çok önemli bir alaşım elementidir. Takım çeliklerinin, yüksek sıcaklıklarda çalışabilme ve sertliğini koruyabilme özelliğini kazandırır. Karbür teşkil edici elementlerin östenitte çözülme kabiliyetlerini artırır ve ayrıca sıcakta dayanımı, sıcakta sertliği, meneviş dayanıklılığını ve ısı iletme kabiliyetini yükseltir.

Silisyum (Si): Oksidasyona karşı dayanımı artırır, fakat aynı zamanda karbon azalması (dekarbürize) eğilimi de artar. Elastiklik sınırını yükseltmesinden dolayı, silisyum alaşımlı çelikler iyi yayılma özeliği istenen takımlar için kullanılır. Sıcak iş takım çeliklerinde %1 Si miktarıyla, yapışma eğilimi azaltılır.

Niyobyum (Nb): Mikro alaşımlı çeliklerde tane küçültme etkisi en yüksek olan mikro alaşım elementidir. Paslanmaz çeliklerde titanyumla birlikte veya tek başına kullanılır. Tane inceltici ve karbür yapıcı etkiye sahip olduğundan akma sınırının yükselmesine ve sertliğin artmasına sebep olur.

Alüminyum (Al): Oksijen gidermek için kullanılır. Akma dayanımını ve darbe tokluğunu artırıcı etki gösterir. Ayrıca alüminyumun tane küçültücü etkisi vardır, ısıtma da tane kabalaşması ve yaşlanmayı azaltır.

Bakır (Cu): Akma ve çekme dayanımını artırır, yüzde uzamayı ve şekillenebilirliği azaltır. Soğuk çekilebilirliği kötü yönde etkiler. Korozyon direncini yükselten etki gösterir. Malzemede form verme veya form değiştirme yapan takımlardan, abrasif aşınmaya karşı İyi bir direnç istenmesinin yanında, yeterli süneklikte yüksek bir dayanım da beklenilir.

Yüksek sıcaklıkta şekillendirme için sıcak iş takım çelikleri kullanıldığında, bunlar hem mekanik zorlamaya karşı ve hem de termik zorlamaya karşı koymak zorundadırlar. İyi bir sıcakta sertlik ve sıcakta dayanım dışında, oksidasyon sonucu meydana gelen tufallaşmaya dayanım ile yanma ve sıcakta çatlamaya karşı hassasiyetle ifade edilen, yeterli düzeyde termik dayanıma sahip olmalıdırlar. Eğer takım; pres döküm kalıbı ve dövme kalıbı gibi, periyodik iş akışında çok fazla sıcaklık

değişmelerine maruz kalıyorsa, yanma çatlakları teşekkül edebilir. Isıtılmış malzeme ile direkt temas eden takım yüzeyi, saniyenin çok altında bir süre içerisinde aniden ısınır ve genişir [40].

### 6.3. Sıcak İş Takım Çeliğinin Isıl İşlemi

Takım çeliklerinin kullanıldığı kalıp ömrü, kullanılan çeliğin kimyasal kompozisyonu, üretim prosesi, kalıp ebatı ve dizaynı, kalıp yapım teknikleri, üretim şartları, kalıp bakımı ve ısıl işleme bağlı olarak değişebilir. Sıcak iş takım çeliklerinin metalurjik ve mekanik özellikleri kritik şekilde ısıl işleme bağlıdır. Çoğu sıcak iş takım çeliği yüksek sertleşebilirliğe sahip olmasına ve havada sertleştirilebilmesine rağmen; mekanik özelliklerdeki iyileştirmenin, soğutma hızının artırılmasıyla yükseltilebileceği bilinmektedir. Sertliğe ek olarak; bu prosesler malzemenin tokluğuna ve temper direncine de etki etmektedir.

Sıcak iş takım çeliklerinde beklenen performansın elde edilmesi kaliteli çelik kullanımının yanı sıra ısıl işlemin ve sonrasında elde edilen mikro yapıya bağlıdır. Yüksek sıcaklık direnci, tokluk ısıl yorulma direnci gibi özellikleri ostenitleme, soğutma ve temperleme işlemleri ile olumlu ya da olumsuz olarak değiştirmek mümkündür [1]. Karmaşık şekilli ve değişik kesitli takım ve kalıplara, su verme sırasında meydana gelen gerilmeleri önlemek için gerilim giderme tavı uygulanır. Bu işlem kaba mekanik işlemlerden sonra ve ince mekanik işlemlerden önce yapılır [5].

Takım çeliklerinin sertleştirilmesinde aşağıdaki ısıl işlem basamakları izlenmektedir;

- Ön Isıtma
- Ostenitleme
- Su verme
- Sıfırlama işlemi (subzero)
- Temperleme

### 6.3.1. Ön ısıtma

Ön ısıtma gerilim giderme tavı olarak da adlandırılır ve imalat öncesi uygulanır. Bu ön ısıtma işlemi takım çeliklerinin uzun ömürlü olması açısından önemlidir.

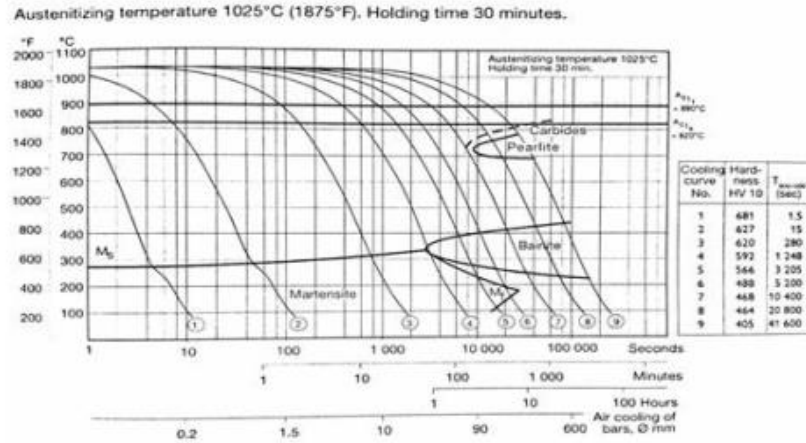
Hammaddenin döküm aşamasında oluşan soğuma hızı farklılıklarından dolayı meydana gelen gerilmeleri gidermek için uygulanır. Bunun için malzeme yavaş bir şekilde 600-650°C den malzeme kalınlığına da bağlı olarak 3,5-4 saat süre ile sabit sıcaklıkta malzemeye homojen bir ortamda ön ısıtma yapılır. Fırından çıkartılmadan fırın içerisinde soğumaya bırakılır.

### 6.3.2. Ostenitleme

Ostenitleme, takım çeliklerinin aşınma dayanımı, tokluk gibi mekanik özelliklerini direkt olarak etkileyen işlemlerden biridir ve takım çeliklerinde ön ısıtma basamaklarından sonra uygulanır. Bu kademeye çıkarken parçanın ısıtma hızı düşer (1saat/inch). Seçilen malzemenin ostenitleme sıcaklığı 1000-1030°C'dir. İşlem süresince tüm kesit boyunca ferrit ostenit dönüşümünün yanı sıra yeterli karbür çözünmesi gerekmektedir.

### 6.3.3. Su verme

Soğutma amacı; sıcak iş takım çeliklerinin soğutulması iki amaca göre yapılır. Birincisi; eğer takım çeliğinden ısıtma işlemi sonunda belli oranda bir yapıya (beynit, martenzit vs.) karşılık sertlik isteniyorsa kademeli soğutma yapılmalıdır. İkincisi; eğer takım çeliğinden sadece sertlik isteniyorsa sürekli soğutma yapılmalıdır. Bu ayrıma göre sıcak iş takım çeliğinin TTT (zaman-sıcaklık-dönüşüm) diyagramında yapılacak soğutma eğrisi operasyonuna göre yol izlenir [41].



Şekil 6.2. Uddeholm firmasına ait patentli sıcak iş takım çeliği olan Formvar'ın sürekli soğuma diyagramı [25].

### 6.3.4. Sıfırtaltı işlemler (subzero)

Kriyojeni, soğubilim olarak adlandırılabilir.  $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin üzerinde çok düşük sıcaklıklar ve etkileriyle ilgilenen bilim dalıdır. Kriyojeni, tıp, gıda ve mühendislik gibi birçok alanda yer edinmiş ve yaygın olarak kullanılmaktadır.

Azot, oksijen, helyum gibi kriyojen sıvılar talaşlı imalat alanında iki farklı şekilde kullanılmaktadır. Birincisi “kriyojenik işleme” denilen işlenebilirliği zor olan malzemelerin (titanyum alaşımları, süper alaşımlar) talaşlı imalatında, kesme sıcaklıklarının azaltılması için kriyojenik sıvıların kullanılmasıdır. İkincisi, “kriyojenik işlem” denen ve 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 bir ısıl işlem türüdür. Su verme ve temperleme işlemleri arasında uygulanmaktadır.

Malzemeler su vermeden sonra kriyojenik sıcaklıklara kademeli olarak soğutulur ve bu sıcaklıklarda bir süre bekletildikten sonra oda sıcaklığına kademeli olarak ısıtılır. Kriyojenik işlem literatürde genellikle iki şekilde uygulanmaktadır. Birincisi “sığ kriyojenik işlem (SKİ)” olup uygulama sıcaklıkları  $-125\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin altındaki sıcaklıklardır. İkincisi “derin kriyojenik işlem (DKİ)” olup uygulama sıcaklıkları  $-125\text{ }^{\circ}\text{C}$  ila  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dir. Literatür çalışmalarında, kriyojenik sıcaklıklarda farklı bekletme

sürelerinin numunelerin mekanik ve fiziksel özelliklerine etkileri araştırma konusu olmuştur. Düşük sıcaklıkların ve bu sıcaklıklarda bekletme sürelerinin etkisiyle kriyojenik işlem demir-karbon alaşımlarında ısıtma işlemi sonrası mikro yapıda kalan ve yumuşak faz olan östenitin sert faz olan martenzite dönüşmesini sağlamaktadır. Ayrıca hem demir-karbon alaşımlarında hem de tungsten karbür malzemelerde temperleme işlemi sonrası ikincil sert karbür yapılarının çökmesini sağlamaktadır. Mikro yapıdaki bu değişimler bu malzemelerin sertlik ve aşınma direncini artırmaktadır.

Sertlik ve aşınma direncinin yanı sıra malzemelerin tokluk, kalıntı gerilme ve yorulma ömründe de iyileşmeler sağlandığına dair bilgiler bulunmaktadır.

### **6.3.5. Temperleme (menevişleme)**

Sertleştirilmiş veya normalize edilmiş çelik malzemenin süneklik ile tokluğunu artırmak amacıyla alt kritik sıcaklığın (A1) daha aşağısında bir sıcaklığa ısıtılması ve sonrasında uygun hızda soğutulmasını içerir. Fakat bu işlem matrisin tane boyutunun artışına sebep olabilir. Çelik malzemeler spesifik mekanik özellikler, su vermede oluşan gerilmeleri gidermek ve boyutsal kararlılık sağlamak amacı ile sertleştirme işleminden sonra tekrar ısıtma yapılarak temperlenirler. Temperleme sıcaklığı, bu sıcaklıkta tutma süresi, bu sıcaklıktan soğutma hızı ve çeliğin kimyasal kompozisyonu temperlenmiş malzemenin mikro yapı ve mekanik özellikleri üzerinde etkilidir.

#### **6.3.5.1. Takım çeliklerinde temperleme**

Takım çeliklerinin temperlenmesi, yüksek sıcaklık uygulamalarında ( $>450^{\circ}\text{C}$ ) nispeten daha kararlı alaşım karbürlerinin oluşmasına sebep olur ve dördüncü basamak olarak adlandırılır.

Cr, Mo, V ve Ti içeren çelik malzemelerde meydana gelen karbürler ikincil sertleşme adı verilen sertleşmeye sebep olurlar. Bu sıcaklıkta eş eksenli tane oluşumu ve yüksek tane büyümesine eğilim meydana gelmektedir. Alaşım karbürlerinin çökmesiyle kalıntı östenit Ms sıcaklığında artış görülür ve temperleme sıcaklığından soğuma

esnasında martensit yapıya dönüşür. Bundan dolayı ikinci temperleme gerekmektedir [13].

## BÖLÜM 7. KRIYOJENİK İŞLEM

Yüksek aşınma direnci altında çalışan takımlarda, aşınma dayanımının artırılması için uygulanan modifiye edilmiş soğutma işlemini kriyojenik işlem olarak adlandırılır. Genel olarak “sığ kriyojenik işlem” ve “derin kriyojenik işlem” olarak 2 kısma ayrılır.

Sığ kriyojenik işlem, diğerine göre daha yaygın kullanılmaktadır ve genel olarak  $-90^{\circ}\text{C}$  sıcaklığına kadar uygulanabilmektedir. Derin kriyojenik işlem ise  $-90^{\circ}\text{C}$  den daha düşük sıcaklıklarda uygulanabilmektedir.

Kriyojenik işlem, ilk olarak Michael Faraday tarafından incelemeye alınmıştır ve gazların sıvılaştırılabildiğini ve  $-100^{\circ}\text{C}$  sıcaklıklara sahip düşük sıcaklıkların üretilebileceğini kanıtlamıştır [42]. 1850-1900'lü yıllarda termodinamik prensiplerinin geliştirilmesi, soğuk bilimindeki gelişmelere ilk katkıyı sağlamıştır. 1950 yıllarında kriyojenik sıvıların kullanılmaya başlanması kriyojenik işlemin en önemli uygulaması olmuştur. 1850-1900'lü yıllarda gazların sıvılaştırma teknolojisi, geliştirilmiştir [43]. Kriyojenik işlem, uzay araştırmaları, gıdaların transferi gibi çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır [44].

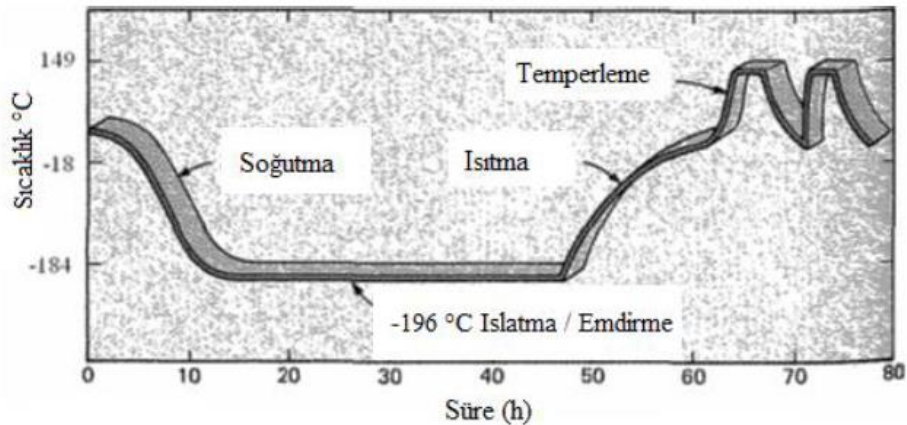
Kriyojenik işlemin tarihi geçmişi inceleyecek olursak, düşük sıcaklıklardaki teknoloji ile imal edilen malzemeler olarak bilinmektedir. Kriyojen kelimesinin kökenine bakmak gerekirse; cryogenic “cryos”, “don” veya “soğuk” demektir. Yunan kökenlidir, “gen” ise İngilizce de fiil kökünü oluşturmak için kullanılır. Günümüzde de bu kelime düşük sıcaklıktaki çalışma ortamları ile ilişkilendirilir [45].

Tablo 7.1. Elde edilen düşük sıcaklık değerlerinin zaman içindeki dağılımı [45].

YIL	1800	1840	1877	1878	1885	1889	1900	1908
SICAKLIK (°K)	223°K	163°K	90°K	77°K	50°K	20,3°K	14°K	4,22°K
YIL	1910	1919	1922	1932	1933	1935	1945	1965
SICAKLIK (°K)	1,04°K	1,0°K	0,83°K	0,71°K	0,27°K	0,004°K	0,00114°K	0,000012°K

### 7.1. Kriyojenik İşlem Aşamaları

1950-1960 yıllarında, endüstrinin kriyojenik işlemlere olan ilgisi, uzay programı ve bunun takım imalatçıları teşviki ile başlamıştır. Başlangıçta takımları sıvı azota daldırmışlar ancak bu yöntemin malzemelerin termal şok sonucu zarar gördüğünü farketmişlerdir. Bundan sonra, termal şok olasılığını azaltma amacıyla programlanabilir sıcaklık denetleyicilerini, sıvı azot akışını kontrol etmek için bir selenoid valfi ve iş parçası sıcaklığını görüntülemek için bir ısı çifti de içeren daha etkili ve kontrollü teknikler geliştirilmiştir [46,47].



Şekil 7.1. Soğutma (Cool-down), ıslatma/emdirme (soak), ısıtma (Heat-up) ve temperleme (Tempering) aşamalarında oluşan tipik bir kriyojenik işlem döngüsü [48].



Kriyojenik işlemler üç aşamadan meydana gelir; birincisi yavaş soğutma aşaması olan, numunelerin buldukları ortamın sıcaklığından kriyojenik sıcaklıklara soğutulduğu aşamadır. İkincisi ıslatma aşaması, numunelerin kriyojenik sıcaklıklarda belli bir süre bekletildiği aşamadır. Üçüncüsü temperleme/ısıtma aşaması olan, numunelerin kriyojenik sıcaklıklardan temper sıcaklığına ısıtıldığı aşamadır. Bu seçenekler, istenilen özelliklere, maliyete ve parçaların şekil ve boyutuna bağlıdır [49,50,51].

### **7.1.1. Soğutma aşaması**

Birinci aşama olan soğutma aşamasında, numuneler buldukları ortam sıcaklığından kriyojenik sıcaklıklara, belirli bir süre zarfında (derece/saat veya derece/dakika) soğutulmaktadır. Soğutma aşamasının, işlem gören malzemenin özelliklerine etkisinin olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla, malzemelerin işlem sıcaklığına, işlem zamanını azaltmak ve böylece maliyeti de azaltmak için termal şoklara sebep olmadan mümkün olduğu kadar hızlı bir şekilde soğutulması tavsiye edilmektedir [52].

### **7.1.2. Islatma/emdirme aşaması**

Islatma aşamasında, numunelerr kriyojenik sıcaklıklarda belirli bir süre (saat) bekletilmektedir. Islatma aşaması, işlem gören numunenin temel özellikleri açısından önemli olduğu bildirilmiştir ve bu aşama, malzeme içerisindeki atomların yeni konumlara yayılması için gerekmektedir [52]. Moore ve Collins yaptıkları çalışma sonucunda “değişken kriyojenik bekletme sürelerinin, D2 takım çeliğinin sertliğini etkilemediğini ancak H13 takım çeliğinin sertliğinin süreye bağlı olarak arttırdığını” göstermişlerdir [53]. Ancak, Collins ve Dormer, “artan süreli kriyojenik sıcaklıkların D2 takım çeliğinin aşınma direncini geliştirdiğini” göstermişlerdir [54]. Araştırmacılar, “karbür sayısı ve sonuç olarak aşınma direnci açısından kriyojenik işleminden azami miktarda fayda elde edilmesi için kriyojenik sıcaklıklarda bekletme süresinin en az 24 saat olması gerektiğini” tavsiye etmişlerdir. Sonuç olarak Collins, “takım çelikleri için kriyojenik sıcaklıklarda daha uzun bekletme süresine bağlı olarak daha iyi karbür dağılımı ve aşınma direncinde daha fazla artış olacağını” belirtmiştir [55,56]. 24 saat ve 48 saat ıslatma süreleri arasında başka bir karşılaştırma da T1 ve

M2 yüksek hız çelikleri için yapılmıştır [57]. T1 takım çeliğinin darbe tokluğu ve eğilme dayanımı 48 saat ıslatma süresi ile artarken, M2 takım çeliğinin sonuçlarının ihmal edilebilir olduğu görülmüştür.

Mohan Lal ve arkadaşları farklı soğuk ve kriyojenik işlem şartlarından sonra M2, T1 ve D3 takım çeliklerinin aşınma karakteristiklerini incelemişlerdir. Araştırmacılar karşılaştırma sonucunda, “-110°C sıcaklıkta 24 saat süre ile işlem gören numuneler ile -180°C sıcaklıkta 6 saat süre ile işlem gören numunelere göre daha iyi sonuçlar elde edildiğini” göstermişlerdir. Bu sonuçlar, ıslatma süresinin, sıcaklığı düşürmekten daha önemli olduğunu kanıtlamaktadır [58].

Lulay ve arkadaşları 7075 alüminyum alaşımının kriyojenik işleminde ıslatma süresinin etkilerini değerlendirmişlerdir. Ancak, “12 saat ve 48 saat ıslatma süreli kriyojenik işlemler arasında, akma dayanımı, gerilme dayanımı, uzama ve sertlik gibi özelliklerin karşılaştırılmasında önemli bir fark olmadığını” göstermişlerdir. Sadece Charpy darbe testi, 48 saat bekletme süreli kriyojenik işlem sonucunda %12 ile en büyük değişimi göstermiştir [59].

### **7.1.3. Isıtma ve temperleme aşaması**

Temperleme, genel olarak kriyojenik işlem uygulamasından sonra, uygulanan malzemelerin darbe dayanımlarını iyileştirmek için gerçekleştirilmektedir. Temperleme, istenen özelliklere göre tek, çift yada üçlü döngüler halinde uygulanabilir [59]. Ancak, nihai sonuçlar için temperlemenin kriyojenik işlem prosesinden önce gerçekleştirilmesi tavsiye edilmemektedir [60]. En önemli faydanın, kriyojenik işlemin sertleştirme (su verme) ve temperleme proseslerinin arasında uygulandığında, meydana geldiği bildirilmiştir [56].

Yun ve arkadaşları, derin kriyojenik işlemin (DCT) üçlü bir temperleme işleminden önce ve sonra olmak üzere T1 ve M2 yüksek hız çeliği malzemelerinin bazı mekanik özellikleri üzerine etkisini incelemişlerdir. Araştırmacılar, “temperleme işleminden önceki derin kriyojenik işlemin darbe tokluğu ve eğilme dayanımı açısından

temperlemeden sonraki derin kriyojenik işleme göre daha iyi sonuçlar gösterdiğini” sunmuşlardır [57].

Molinari ve arkadaşları, H13 takım çeliği için, çift temperleme şartlarından önce ve sonra gerçekleştirilen derin kriyojenik işlemi incelemiştir. Araştırmacılar, “temperleme işleminden önce yapıldığında, derin kriyojenik işlemin H13 takım çeliğinin sertlik ve aşınma dirençlerini artırdığını” göstermişlerdir [61].

Collins, “D2 takım çeliklerinde ince tanecikli karbürlerin ve aşınma oranının iyileşmesi açısından 560°C temperleme sıcaklığı ile kriyojenik işlemin 200°C temperleme sıcaklığı ile kriyojenik işlemden daha iyi sonuç verdiğini” ifade etmiştir [56]. Ancak bu bilgilere ek olarak başka bir çalışmada, “ısıtma aşamasının yavaş olarak gerçekleştirilmesinin gerektiği ve temperleme işlemi için sıcaklığın 500°C’den daha yukarı artırılmasının kriyojenik işlemin yararlı etkilerini ortadan kaldıracığı” belirtilmiştir [52].

## 7.2. Takım Çeliklerinde Kriyojenik İşlem

Çelik imalatının %8’i kadar üretimi yapılan takım çeliklerinin kullanım oranı her yıl artmaktadır. Takım çelikleri, ötektoid kompozisyon üzerinde karbon içermeleri durumunda içyapıda çözünmeyen ve çeliğin aşınma direncini iyileştiren sert karbür yapılarını oluştururlar. Ayrıca, bazı takım çeliği gruplarının martensit bitiş sıcaklığı oda sıcaklığının oldukça altındadır. Konvansiyonel ostenitleme işlemi sonrası oda sıcaklığına kadar bu çeliklerin soğutulması sonucunda çeliğin içyapısı sert faz olan tamamen martensite dönüşmemekte ve içyapıda çeliğin aşınma direncini olumsuz etkileyen ve yumuşak bir faz olan ostenit ısıl işlem tipine bağlı olarak belirli miktarlarda kalmaktadır.

Kriyojenik işlem, ısıl işlem sonrası, kalan ostenit fazının martensite dönüştürme ve sert karbür yapılarını oluşturarak çeliğin sertliğini ve aşınma direncini artırmak için en etkili yöntemdir. Kriyojenik işlem su verme ve temperleme işlemleri arasında düşük

sıcaklıklarda (sıfıraltı) ve belirli sürelerde mühendislik malzemelerine uygulanan konvansiyonel ısıt işleme tamamlayıcı bir ısıt işlem türüdür.

### **7.3. Kriyojenik Sıcaklıkların Malzemelerin Mekanik Özelliklerine Etkisi**

Yüzey merkezli kübik FCC metallerin (Alüminyum, Bakır, Altın,  $\gamma$ -Demir, Kurşun, Nikel gibi)  $-196^{\circ}\text{C}$  sıvı azot sıcaklığında genel olarak sünek bir yapıda olduğu, BCC metallerin düşük sıcaklıklarda kırılma yapıda olduğu ve bazı sıkı düzenli HCP metallerin düşük sıcaklıklarda sünek olarak kaldığı ancak buna rağmen bazılarının kalmadığı belirlenmiştir [62,63].

Sıcaklığın azalmasının birçok malzeme için akma-gerilme mukavemeti, yorulma-darbe dayanımı, sertlik, süneklik, tokluk ve elastikiyet modülü gibi mekaniksel özellikleri arttırdığı tespit edilmiştir [63,64].

### **7.4. Kriyojenik İşlemin Takım Çeliklerinin Mekanik Özelliklerine Etkisi**

Kriyojenik işlem uygulamasından sonra geliştiği görülen mekanik özelliklerden biri sertliktir. Sertlik ise bir malzemenin bölgesel plastik şekil değiştirmeye karşı gösterdiği dirençtir ve malzemenin abrasif aşınma direncinde önemli bir yere sahiptir. Kriyojenik işlem sonrası gerçekleşen ostenitin martensite dönüşümü ile ikincil karbür çökmesi ve mikro yapıdaki homojen karbür dağılımı sebebiyle takımın sertliğinde önemli bir artış olmaktadır [65,66].

## **BÖLÜM 8. DENEYSEL ÇALIŞMA**

### **8.1. Çalışmanın Amaç ve Kapsamı**

Sıcak iş takım çelikleri, göreceli yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılan çelik gruplarıdır. Bunlara sıcak dövme kalıpları, ekstrüzyon kalıpları, mandreller, enjeksiyon kalıpları örnek olarak gösterilebilir.

Sıcak iş takım çeliklerinin en belirgin özelliği, görece yüksek sıcaklıklarda mukavemetlerini korumalarının yanı sıra, sahip olduğu mukavemet ve tokluk değerleri arasındaki dengedir. Takım çelikleri, genel olarak yüksek mukavemet ve düşük tokluk değerlerine sahiptir. Sıcak iş takım çelikleri ise yüksek mukavemete ve tatmin edici yüksek tokluk değerlerine sahiptir.

Sıcak iş takım çelikleri orta düzeyde karbon ile birlikte, yaklaşık %5 mertebesinde Cr ve Mo ve V elementlerinden oluşan bir kimyasal bileşime sahiptir. Karbon miktarının diğer takım çeliklerine nazaran daha düşük olması (ağ. %0,3-0,6 arasında) ısıl işlenmiş halde tokluklarının yeterli olmasının ana sebeplerinden biridir. Krom, molibden ve vanadyum kuvvetli karbür yapıcı elementlerdir. Bu nedenle, yapıdaki karbon ile bu elementlerin alaşım karbürü oluşturması beklenmektedir. Buna karşılık karbonun yüksek olmaması nedeniyle malzemenin ısıl işlemleri yapısında primer karbür bölgeleri ya çok azdır veya hiç görülmez. Bu durum da sıcak iş takım çeliklerine oldukça üniform bir yapı kazandırmaktadır.

Bu çalışmada kullanılan 1.2367 malzeme numaralı sıcak iş takım çeliği ağ. %0,38 C- %5 Cr- %2,3 Mo ve %0,5 V içermektedir. Genel olarak yüksek sıcaklıklarda iyi aşınma direnci, yüksek sertlik ve temperlemeye karşı direnç ile iyi tokluk özelliklerine sahiptir. Yaklaşık 1030°C civarında ostenitlenmekte, basınçlı azot gazı ortamında

sertleştirilmektedir. Sertleştirilmiş haldeki sertlik 56-57 HRc civarındadır. Takiben 500-550 °C civarında 3 kez menevişlenerek istenilen sertlik kazandırılmaktadır. Dövme kalıpları için sertlikler 48-52 HRc civarındadır. Son olarak, bazı uygulamalarda aşınma direncini artırmak için nitrüleme uygulanmaktadır. Sıcak iş takım çeliklerinin karbon içerikleri yüksek olmadığı için, sertleştirme sonrasında dönüşmemiş ostenit problemi söz konusu değildir. Bu nedenle, kriyojenik gibi bir dönüştürme işlemi gerekmez. Bununla beraber, bazı işletmelerde, su verme sonrası kriyojenik işleminin uygulandığı bilinmektedir. Bunun ne derece yararlı olduğu tartışılabilir.

Bu çalışmada, Uddeholm firmasının ürettiği 1.2367 muadili FORMVAR ticari isimli sıcak iş takım çeliği kullanılmıştır. Çalışmanın amacı, geleneksel ısıl işlem uygulamasına karşılık kriyojenik işlem uygulanmasının yapı ve özelliklerde ne tür değişiklikler meydana getirdiğinin ortaya konmasıdır. Bu bakımdan, çalışma iki aşamadan oluşacak şekilde planlanmıştır:

- FORMVAR malzemenin geleneksel ısıl işlem uygulanmış haldeki yapı ve özellikleri,
- Kriyojenik işlem uygulanmış haldeki yapı ve özellikleri.

Çalışmada her iki halde de nitrasyon işlemi uygulanmamıştır.

Dövme veya ekstrüzyon kalıplarında en önemli problem kısa kalıp ömrüdür. Kalıp üretimi zahmetli bir iştir: Malzeme tedariki, işlenmesi (firmada yapılabilir veya başka firmada yapılabilir), ısıl işlemi, yüzey işlemleri hem malzeme, hem zaman alıcıdır ve maddi açıdan önemli bir gider kaynağıdır. Kalıpların kısa ömürlü olması iş verimini çok düşürür, kalıp maliyetlerini ve dolayısıyla parça maliyetlerini artırır. Bu bakımlardan, kalıpların kırılmadan, çatlamadan, aşınmadan olabildiğince uzun süre kullanılabilmesi arzu edilir.

Bu çalışma, kalıp ömürlerinin artırılması için ısıl işlem bazında neler yapılabileceğini ortaya koymak üzere tasarlanmıştır. Isıl işlem dışında, malzeme kalitesi, işleme

kalitesi, uygulanan şekillendirme işlemi ve uygulama biçimi gibi faktörler de kalıp ömrünü etkiler.

Bu çalışmada, her ne kadar kriyojenik işlemin kalıp ömürleri üzerine etkisinin incelenmesi amaçlanmışsa da, çalışma kapsamında sadece kalıp malzemesinin ısı işlem görmüş yapıları incelenmiştir. Ne nitrürleme yapılmıştır, ne de bu işlemleri görmüş kalıplar incelenmiştir. Sadece mikroyapı bazındaki değişimler ve bunların olası sonuçları değerlendirilmiştir.

Tablo 8.1. Çalışmanın tasarımı

<b>Nihai amaç</b>
Kalıp ömrünün artırılması (dolaylı olarak)
<b>Seçenekler</b>
Daha kaliteli malzeme kullanımı
İşleme parametreleri
Isıl işlem uygulamalarında değişiklik
Plastik şekil verme parametreleri (dövmede veya ekstrüzyonda)
<b>Seçilen yol</b>
Isıl işlem uygulamalarında değişiklik
<b>Ayrıntı</b>
Menevişleme öncesinde kriyojenik işlem uygulanması
<b>Malzeme</b>
1.2367 muadili FORMVAR

Sıcak iş takım çeliklerine kriyojenik (derin soğutma) işlemi uygulanması olağan değildir. Bununla birlikte, son yıllarda ısıl işlemciler sıcak iş takım çeliklerine de kriyojenik işlem uygulamaya başlamışlardır. Bu çeliklerde ciddi bir kalıntı ostenit problemi olmadığı için, kriyojenik işlemin kalıntı osteniti martensite dönüştürmek gibi bir amacı olmaktan ziyade, alaşım karbürlerini stabilize ederek temperleme esnasındaki çekirdekleşme ve büyümelerini kontrol altında tutmak olabilir. Yani ikincil karbür çökeltilerinin boyutları ne kadar küçük ve çekirdek sayıları ne kadar fazla olursa temperleme sonrası tokluk ve mukavemetin bundan olumlu etkileneceği öngörülebilir.

Kriyojenik işlem uygulaması, yaygın pratikte, su vermeyi takiben iş parçalarının sıvı azot tanklarında bekletilmesi şeklinde yapılmaktadır. Literatürde, hatta pratikte meneviş çevrimleri arasına sıkıştırılmış farklı uygulamalar da vardır.

## 8.2. Deneyleerde Kullanılan Malzeme

Bu çalışmada, Böhler Uddeholm firmasının lisanslı ürünü olan FORMVAR isimli sıcak iş takım çeliği kullanılmıştır. Bu çeliğin nominal bileşimi Tablo 8.2’de verilmiştir.

Tablo 8.2. Formvar isimli çeliğin nominal kimyasal bileşimi (ağ. %).

Element	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
Ağ. %	0,35	0,20	0,50	5,0	2,30	0,60

## 8.3. Deneyleerin Yapılışı

Formvar çeliğinden 55 mm genişliğine sahip 15 mm kalınlık ve 80 mm boyda parçalar çıkarılmış ve farklı ısıl işlemler için hazırlanmıştır.

Deneyleer vakum fırında yapılmıştır. 650°C ve 850°C’lerde 30 dakika süreli iki ön ısıtma işleminden sonra numuneler 1030°C’de 60 dakika ostenitlemeyi takiben 3 bar basınçlı azot gazı ile su verilerek sertleştirilmiştir. Son olarak 550°C’de 2 saat süreli 3 menevişleme işlemi uygulanmıştır.

Numunelerin bir grubuna ise su verme sonrasında (menevişleme öncesinde) -100°C’de 3 farklı sürede (1-2-3 saat) kriyojenik işlem uygulanmıştır. Kriyojenik işlem sonrasında oda sıcaklığına getirilen numuneler olağan olarak 550°C’de menevişlenmiştir.

Numunelerin optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu ile mikro yapıları incelenmiş, EDS ile faz ve matris analizleri yapılmıştır. Şekil 8.1’de resmedilen V-çentikli darbe numuneleri hazırlanarak oda sıcaklığında darbe enerjileri ölçülmüştür.



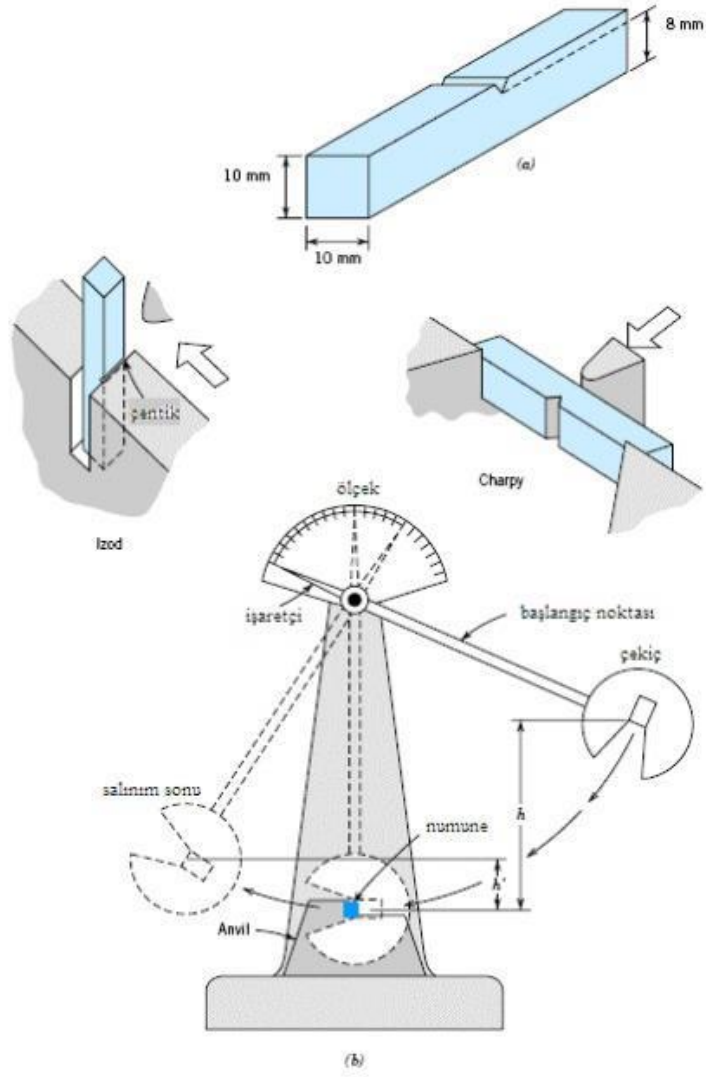
Darbe deneyleri 3 test ortalaması olarak belirlenmiştir. Darbe deneyinde kırılan numunelerin yüzey karakteristikleri SEM ile belirlenmiştir. Numunelerin sertlikleri FutureTech universal sertlik cihazı ile HRC olarak belirlenmiştir.

Numunelerin aşınma ve sürtünme testleri, ball-on-disc tribometre aşınma test cihazında oda sıcaklığında 10 N yük altında kuru kayma koşulları altında yapılmıştır. Testler 6 mm çaplı bir WC bilyesine karşı gerçekleştirilmiştir. İleri-geri hareket eden (reciprocating) test prosedürü 5.4 cm/s kayma hızında ve 50 m toplam kayma mesafesinde, 5.5 mm doğrusal yolda gerçekleştirilmiştir. Aşınma testleri 3 kez tekrarlanmıştır ve ortalama değerler aşınma kaybı olarak belirlenmiştir. Aşınma testlerinden sonra oluşan yolların genişlikleri ölçülerek numunelerin hacim kayıpları hesaplanmıştır. Aşınma izlerinin ölçümleri en az 5 farklı noktadan alınmıştır. Aşınma numunelerin aşınmış yüzeylerinin SEM analizleri, TESCAN MAIA3 XMU model taramalı elektron mikroskobunda yapılmıştır. Çalışmanın ısıl işlem koşulları Tablo 8.3.'de verilmiştir.

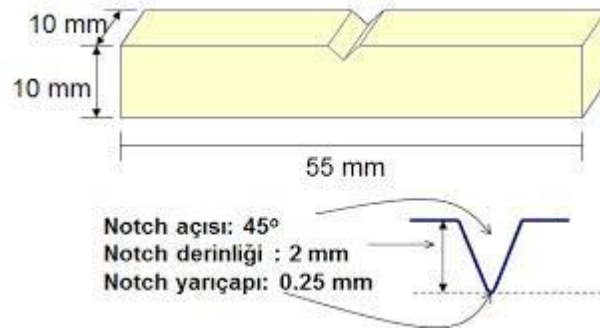
Tablo 8.3. Bu tez çalışmasında incelenen numunelere ait bilgiler

Numune Numarası	Özellikleri	Proses
1	Ham malzeme <20HRc	-
2	Isıl işlem görmüş 48-50 HRc (hedef)	Geleneksel/referans (ek) 1030°C
3	Isıl işlem görmüş 50-52 HRc (hedef)	Geleneksel/referans 1030°C
4	Isıl işlem görmüş 52-54 HRc (hedef)	Geleneksel/referans(ek) 1030°C
5*	Isıl işlem görmüş 50-52 HRc (hedef)	-100°C, 1 h
6*	Isıl işlem görmüş 50-52 HRc (hedef)	-100°C, 2 h
7*	Isıl işlem görmüş 50-52 HRc (hedef)	-100°C, 4 h

\*Su vermeden sonra kriyojenik işlem uygulanmış



Şekil 8.1. Charpy darbe deneyinin şematik gösterimi.



Şekil 8.2. V-çentikli Charpy darbe test numunesi.

Hazırlanan numunelerin karakterizasyonunda aşağıdaki teknik ve yöntemler uygulanmıştır:

- Optik inceleme,
- SEM incelemesi,
- EDS analizi
- Sertlik ölçümü,
- Darbe deneyi
- Aşınma deneyi

Optik İnceleme; Hazırlanan numuneler sırasıyla zımparalama ve parlatma işlemlerine tabii tutulmuştur. Metalurjik olarak hazır hale getirilen numuneler optik mikroskop altında incelenmiştir.

SEM İncelemeleri; Hazırlanan numunelerin detaylı incelemelerinin yapılması amacıyla SEM incelemeleri gerçekleştirilmiştir.

EDS Analizi; Hazırlanan numunelerin elementel kompozisyonlarının tamamlanabilmesi amacıyla EDS analizleri yapılmıştır.

Sertlik Ölçümü; Çalışmada hazırlanan numunelerin sertlik ölçümleri Rochwell (Hrc) metoduna göre yapılmıştır.

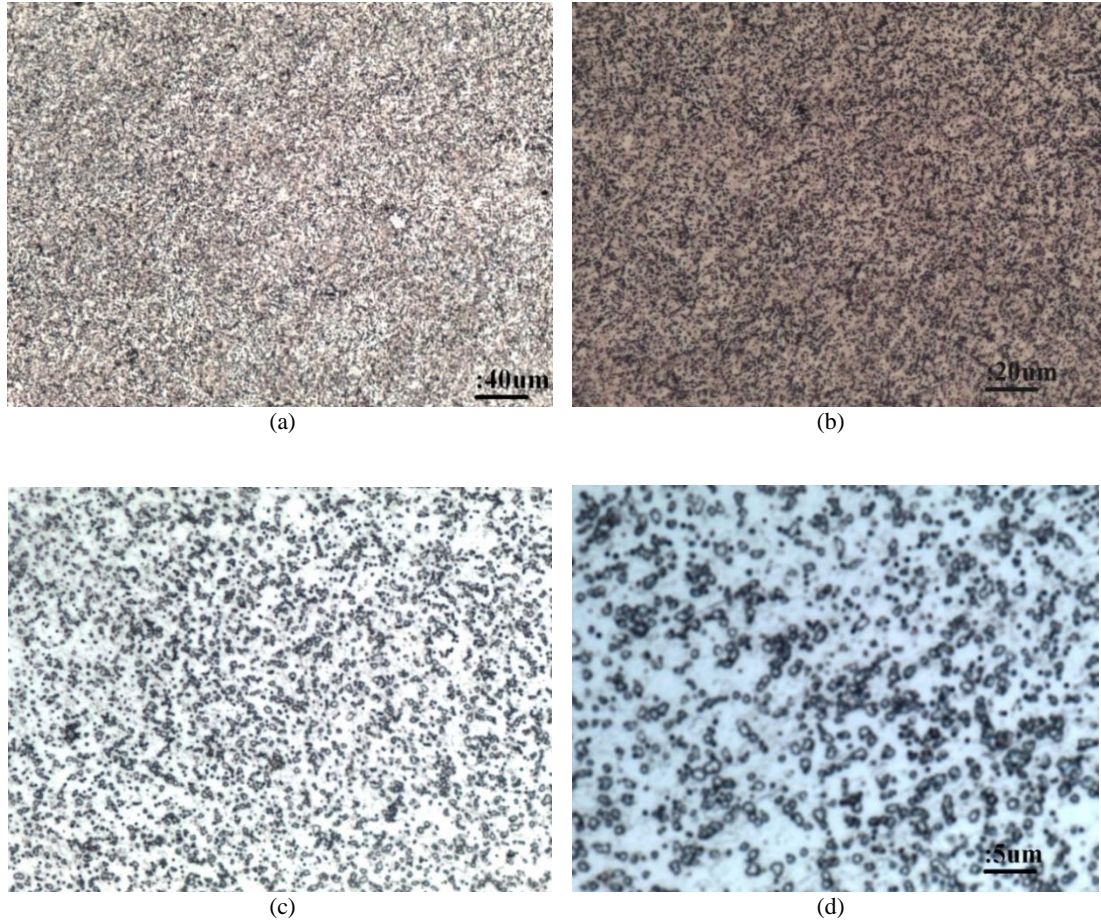
Darbe Deneyi; Hazırlanan numunelerin dinamik zorlanma şartlarında kırılması için gerekli enerji miktarını belirlemek amacıyla darbe deneyi yapılmıştır.

Aşınma Deneyi; Göreceli olarak numunelerin aşınma direncindeki değişimi tayin etmek için, aşınma koşullarının malzemenin aşınma direncine etkilerini belirlemek için yapılmıştır.

## BÖLÜM 9. ARAŞTIRMA BULGULARI

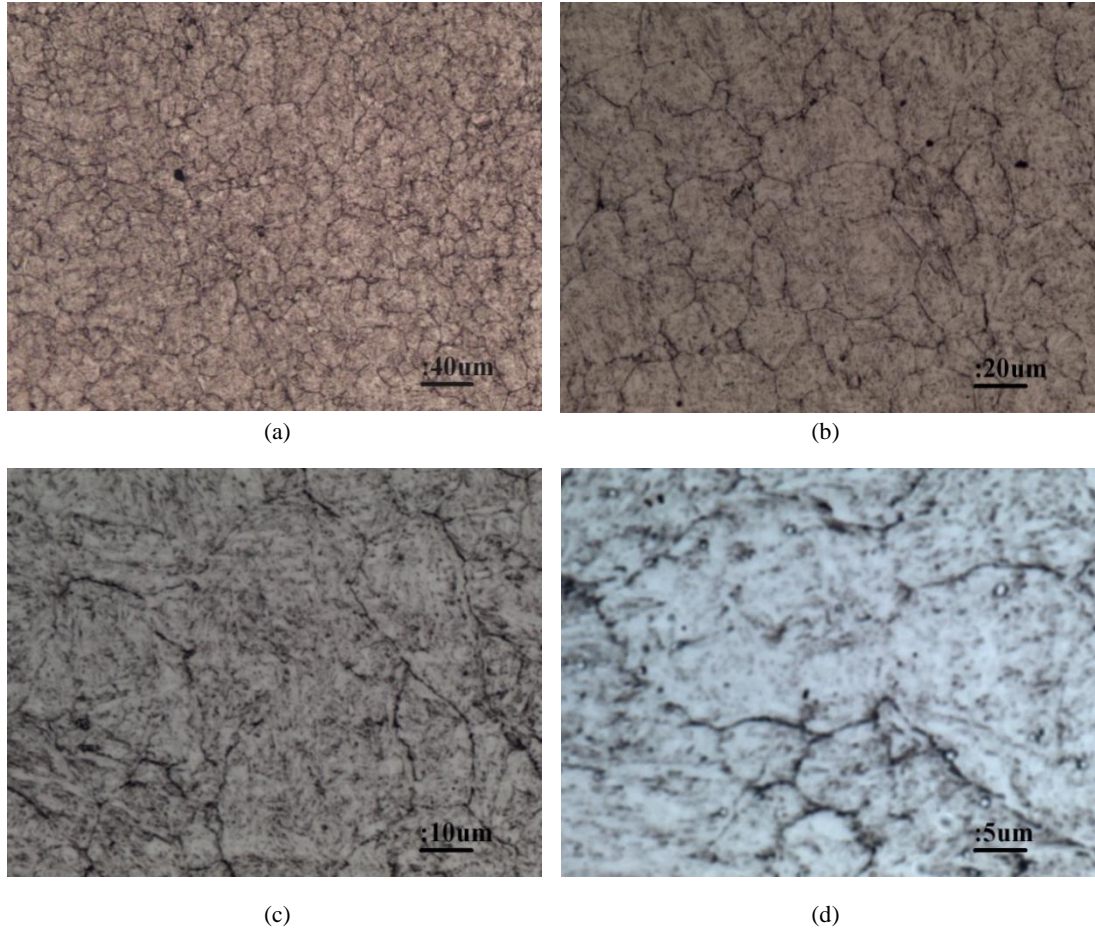
### 9.1. Optik Mikroskop Görüntüleri

Ham haldeki numune ile ısıtılmış numunelerin mikro yapıları optik mikroskop ile incelenmiştir.

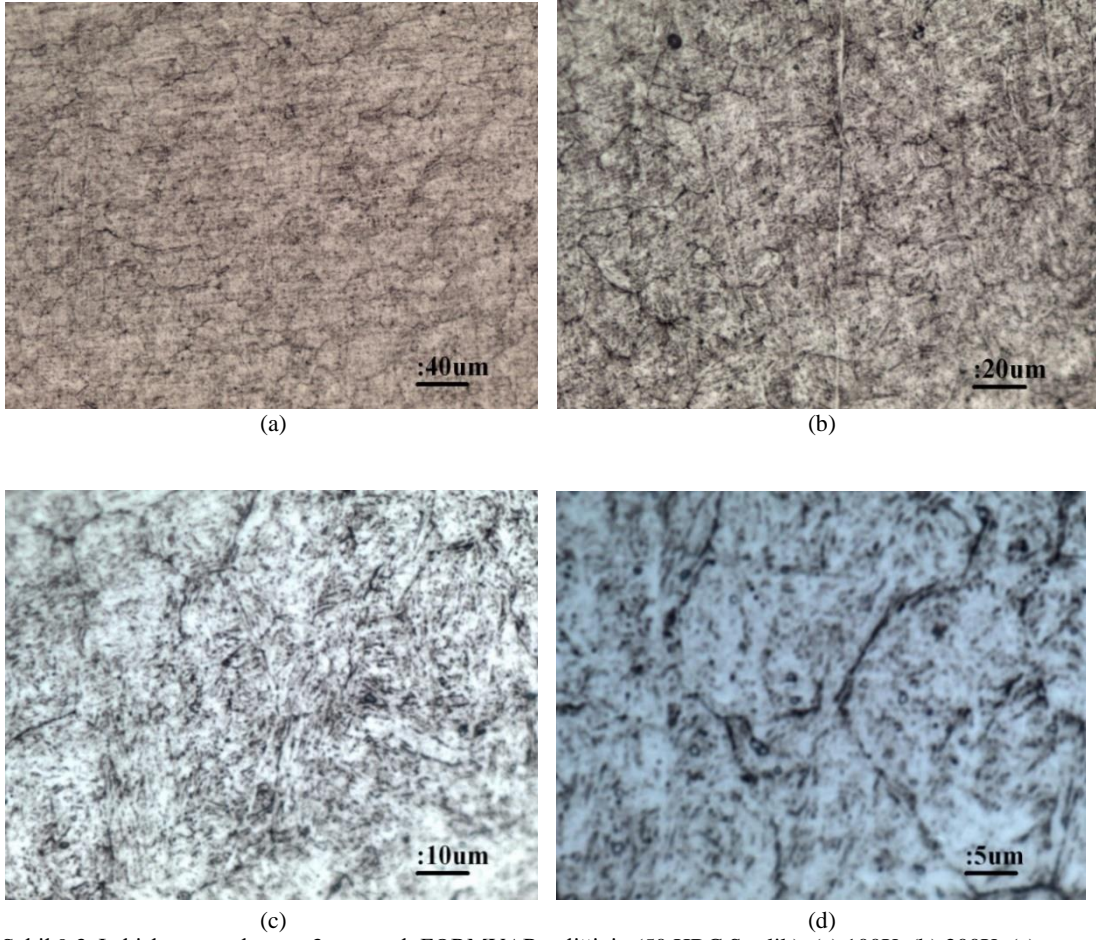


Şekil 9.1. Isıl işlem uygulanmamış 1 numaralı yumuşak FORMVAR çeliğinin, (a) 100X, (b) 200X, (c) 500X, (d) 1000X büyütmede optik mikroskop mikro yapı fotoğrafları

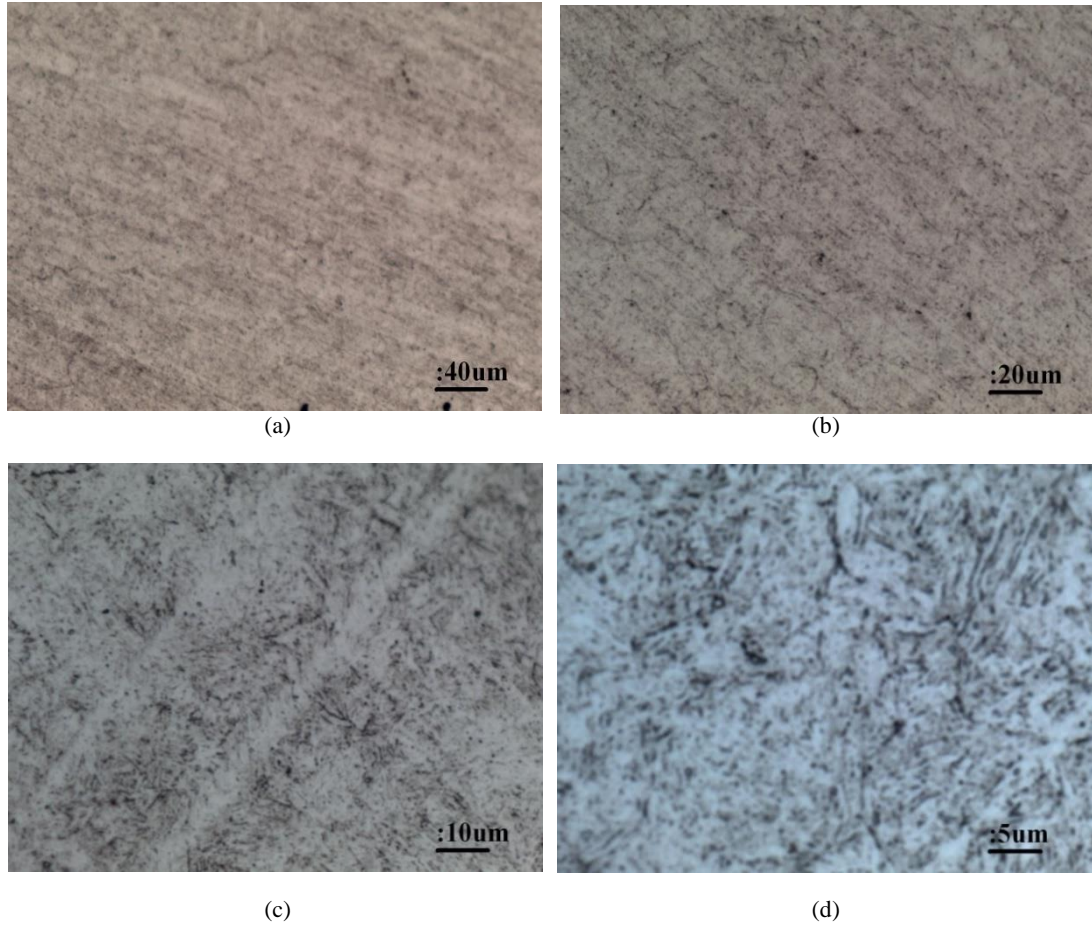
Şekil 9.1.'de ham haldeki numunenin optik mikrografları verilmiştir. Mikro yapıda ferrit matriste dağılmış çok sayıda minik küresel formdaki alaşım karbürleri görülmektedir. Bu mikro yapı malzemenin son olarak tavlama veya küreselleştirme tavlı gördükten sonra sevk edildiğini göstermektedir. Takım çelikleri tavlı, küreselleştirilmiş veya bazen de ön ısıt işlemleri olarak müşteriye sevk edilmektedir.



Şekil 9.2. Isıl işlem uygulanmış 2 numaralı FORMVAR çeliğinin (48 HRC Sertlik), (a) 100X, (b) 200X, (c) 500X, (d) 1000X büyütmede optik mikroskop mikro yapı fotoğrafları



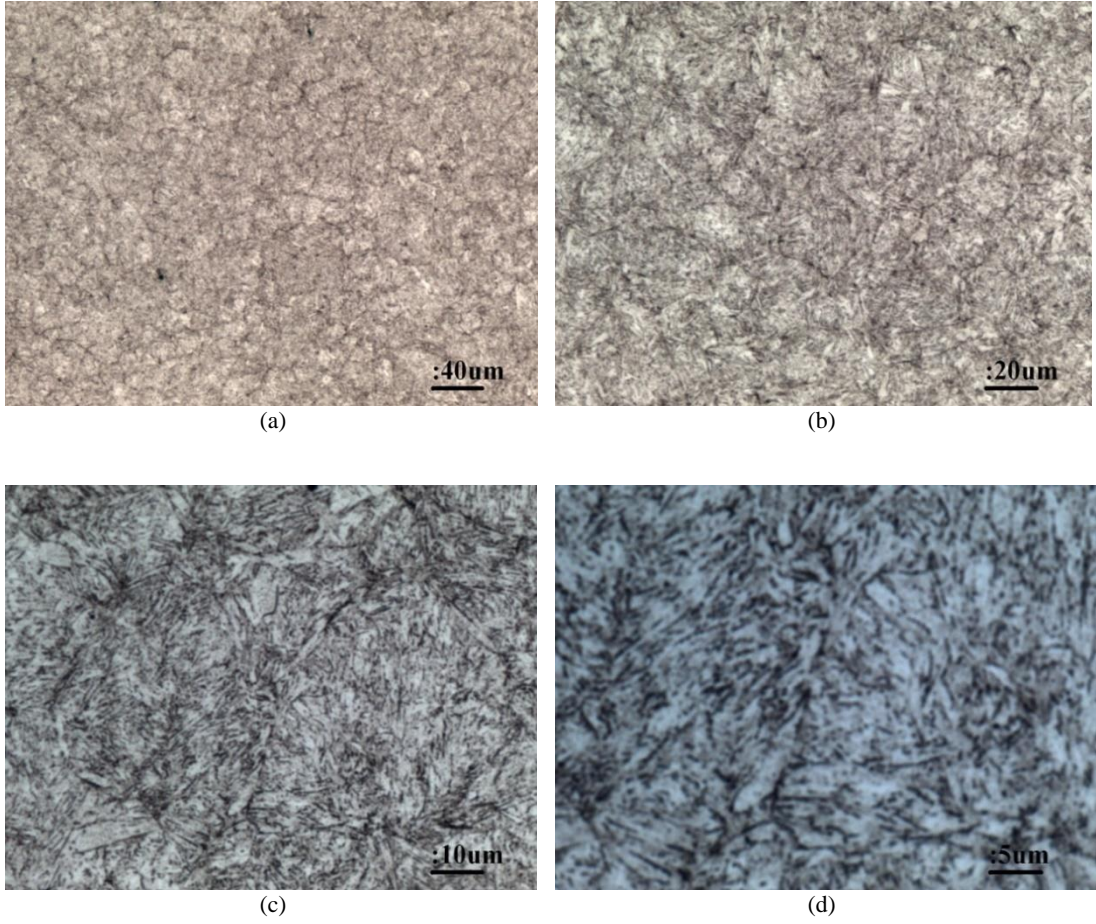
Şekil 9.3. Isıl işlem uygulanmış 3 numaralı FORMVAR çeliğinin (50 HRC Sertlik), (a) 100X, (b) 200X, (c) 500X, (d) 1000X büyütmede optik mikroskop mikro yapı fotoğrafları



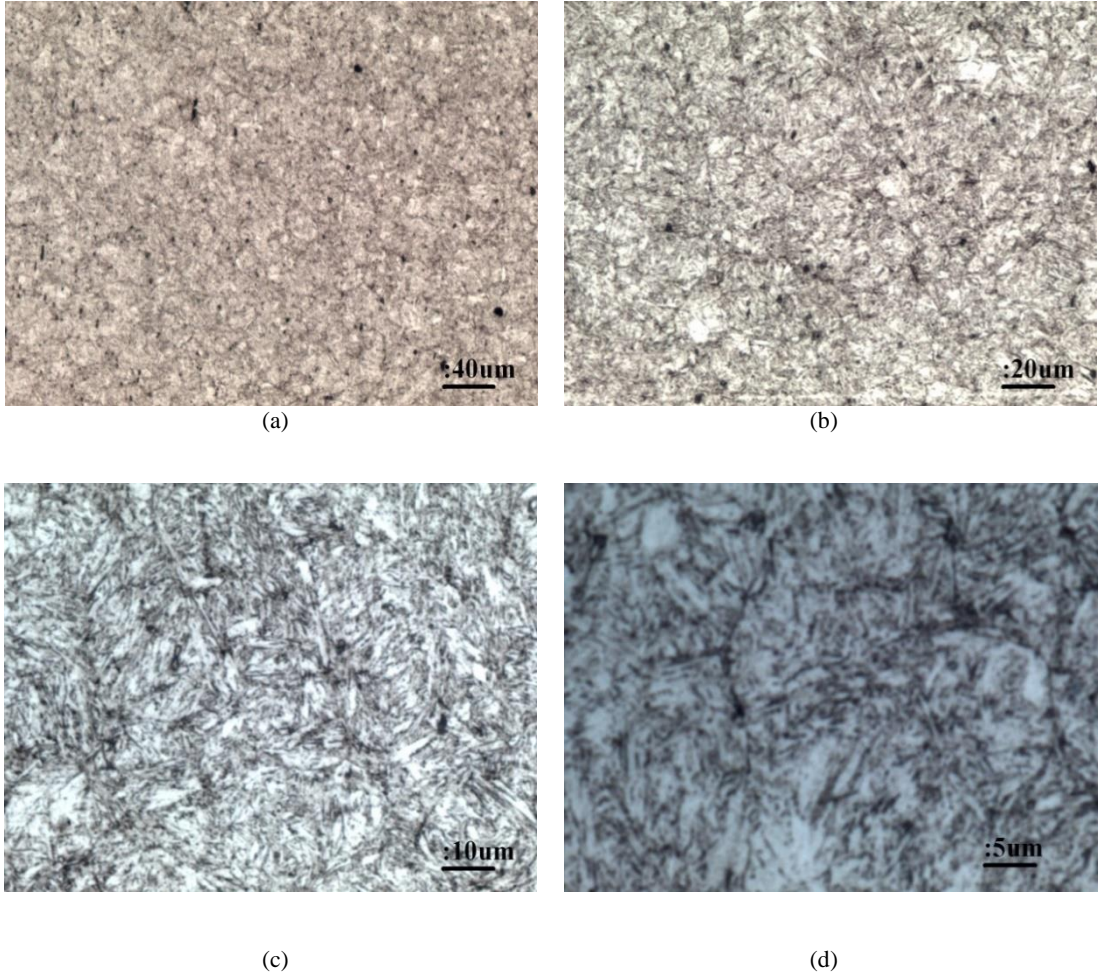
Şekil 9.4. Isıl işlem uygulanmış 4 numaralı FORMVAR çeliğinin (50 HRC Sertlik), (a) 100X, (b) 200X, (c) 500X, (d) 1000X büyütmede optik mikroskop mikro yapı fotoğrafları

Şekil 9.2.-9.4.'te ise geleneksel ısıl işleme tabi tutulmuş ve menevişleme ile sertlik değerleri ayarlanmış üç numunenin optik mikro yapıları gösterilmiştir. Farklı büyütmelerde alınmış mikro yapılarda, malzemenin tane sınırları ve mikro yapısı açık olarak görülmektedir. Isıl işlem sonrasında tane büyüklüğünün yaklaşık 20 mikron mertebesinde olduğu söylenebilir. Malzemelerin mikro yapıları temperlenmiş martensittir. Mikro yapılarda dikkat çekecek ölçüde dönüşmemiş ostenit mevcut değildir.

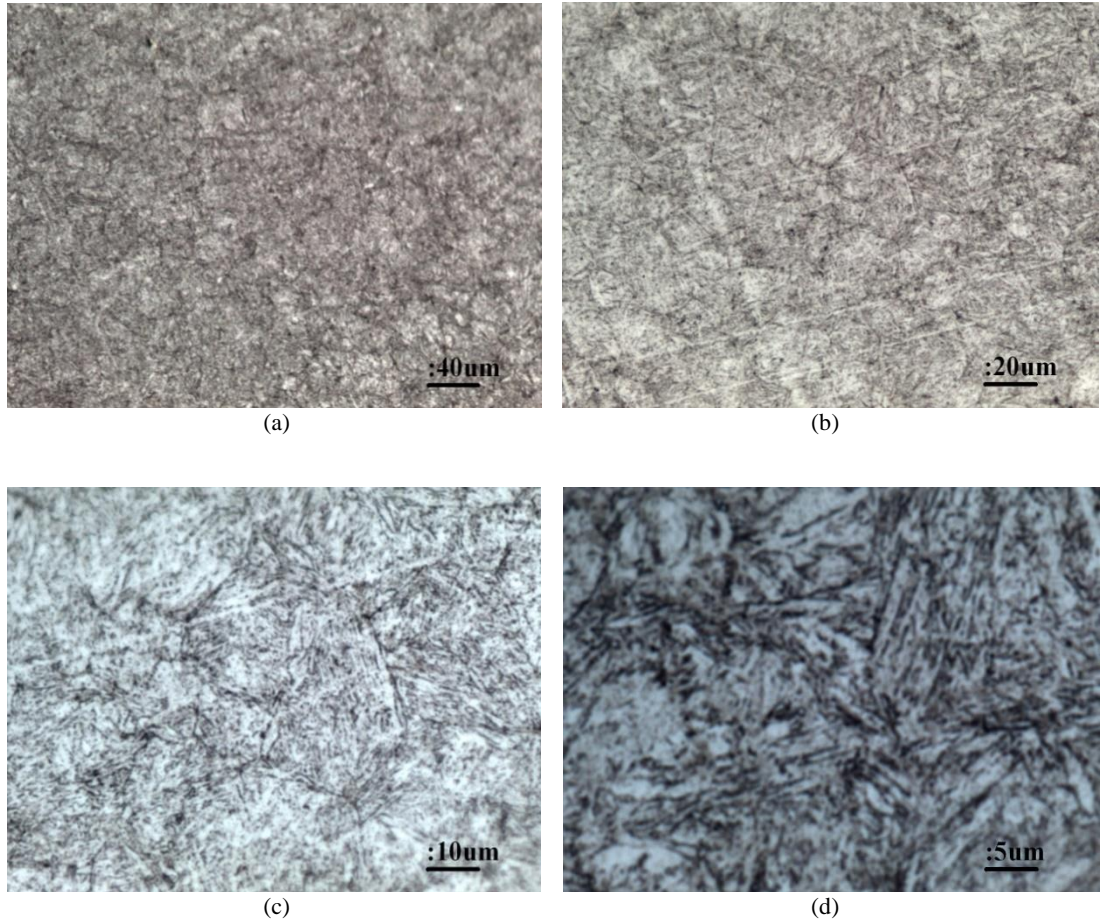




Şekil 9.5. Su vermeden sonra 1 h kriyojenik işlem görmüş 5 numaralı FORMVAR çeliğinin, (a) 100X, (b) 200X, (c) 500X, (d) 1000X büyütmede optik mikroskop mikro yapı fotoğrafları



Şekil 9.6. Su vermeden sonra 2 h kriyojenik işlem görmüş 6 numaralı FORMVAR çeliğinin, (a) 100X, (b) 200X, (c) 500X, (d) 1000X büyütmede optik mikroskop mikro yapı fotoğrafları

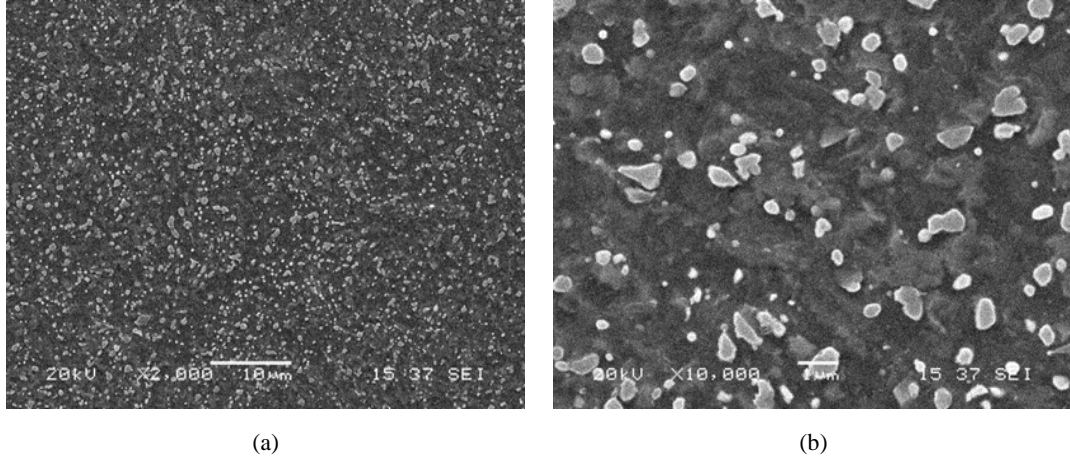


Şekil 9.7. Su vermeden sonra 3 h kriyojenik işlem görmüş 7 numaralı FORMVAR çeliğinin, (a) 100X, (b) 200X, (c) 500X, (d) 1000X büyütmede optik mikroskop mikro yapı fotoğrafları

Şekil 9.5 ila 9.7'de ise su verme sonrası  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 1-2 ve 3 saat süre ile kriyojenik işlem görmüş numunelerin mikro yapıları verilmiştir. Bu mikro yapıların kriyojenik işlem görmemiş geleneksel ısıtılımlı numunelerin mikro yapılarından (Şekil 9.2.-9.4.) bariz farkları yoktur. Mikro yapılar temperlenmiş martensittir ve kalıntı ostenit mevcut değildir. Tane büyüklükleri de yaklaşık 20 mikron mertebesindedir. Bir diğer husus, bu malzemelerin mikro yapısında da serbest karbür görülmemiştir.

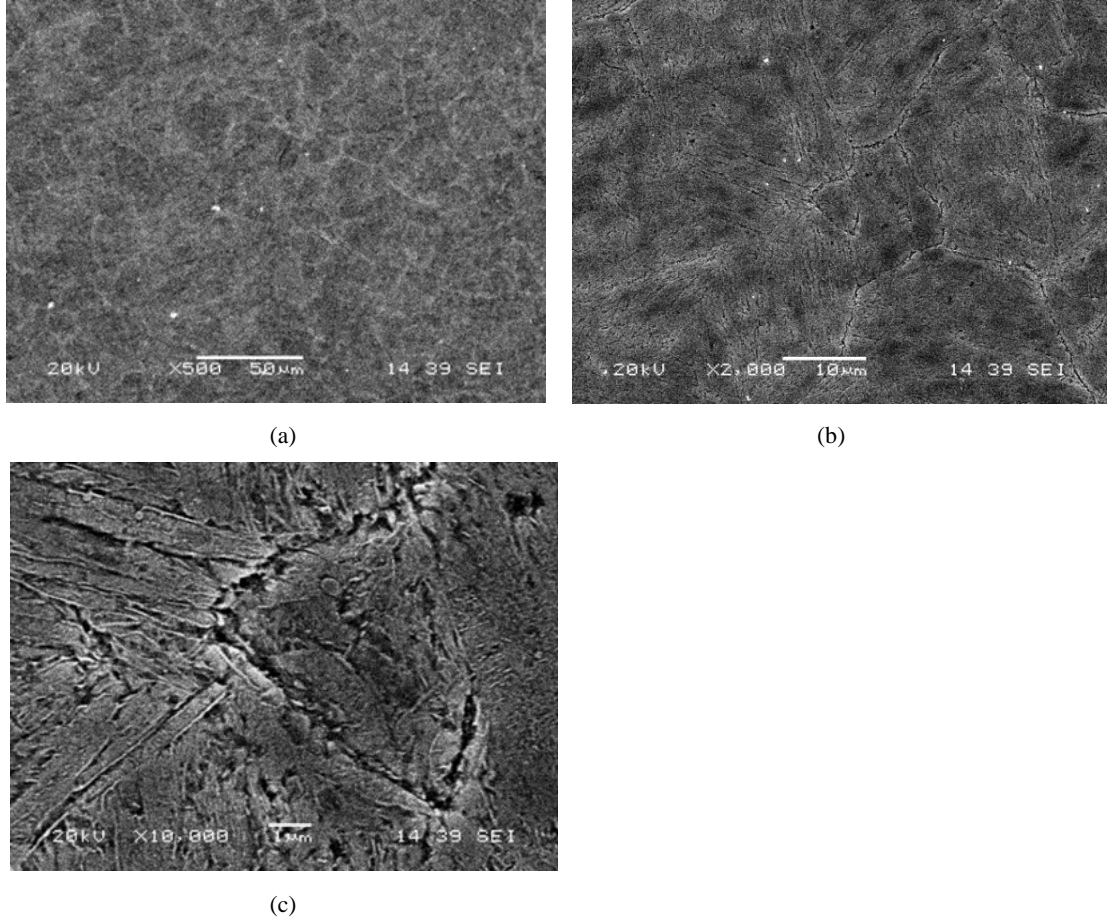
## 9.2. SEM İle Mikro Yapı İncelemesi

Numunelerin mikro yapıları Jeol 6060 LV SEM kullanılarak incelenmiştir.



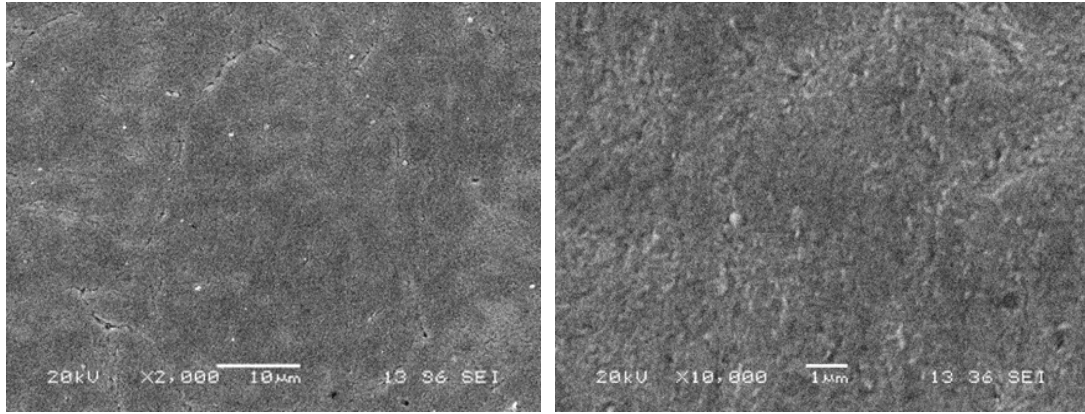
Şekil 9.8. Isıl işlem uygulanmamış 1 numaralı yumuşak FORMVAR çeliğinin (a) ve (b) SEM sekonder elektron görüntüleri

Şekil 9.8’de FORMVAR isimli çeliğin ısıl işlem görmemiş (ham hali) haldeki mikro yapısı sekonder elektron (Şekil 9.8. a-b) modlarında görülmektedir. Mikro yapılarda, 1 mikrondan daha küçük çok sayıda homojen dağılmış partikül olduğu görülmektedir. Bu çelikler, genellikle piyasaya tavllanmış olarak sunulmaktadırlar. Bu bakımdan bu partiküllerin küçük alaşım karbürleri olması yüksek olasılıktır.



Şekil 9.9. Isıl işlem uygulanmış 2 numaralı FORMVAR çeliğinin, (a), (b) ve (c) SEM sekonder elektron görüntüleri

Şekil 9.9.'da ısıl işlem görmüş, sertlik değeri 48 HRc olacak şekilde menevişlenmiş 2 numaralı çelik numunelerin SEM mikrografları verilmiştir. Şekil 9.9 a-b-c, sekonder elektron görüntülerini vermektedir. Mikro yapılarda temperlenmiş martenzit matris açık bir şekilde görülmektedir. Mikrograflarda görülen küçük yuvarlak oluşumlar alaşım karbürleridir. Resimlerden, tane büyüklüğünün 10-20 mikron civarında olduğu anlaşılmaktadır. Bu büyüklükteki taneler ASTM tane büyüklüğü olarak n:8 veya daha ince sınıfına girmektedir. İnce taneli yapılar da takım çeliklerinin tipik özelliklerindedir.

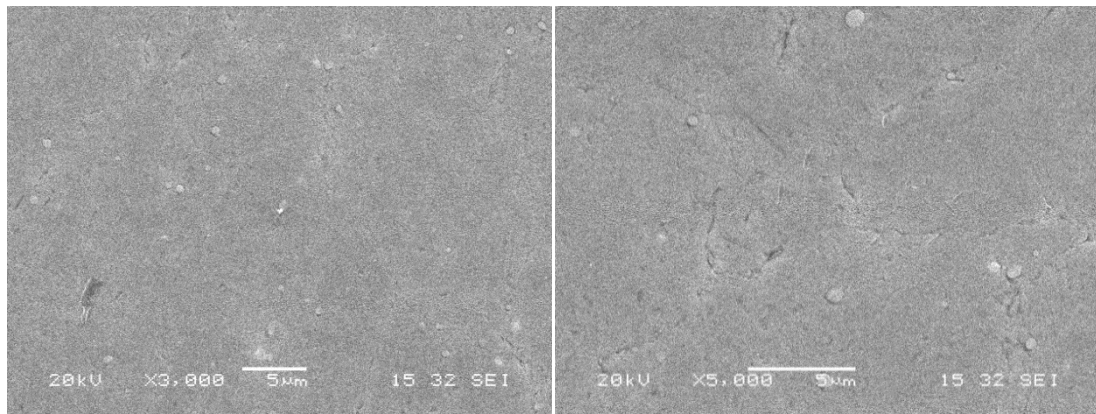


(a)

(b)

Şekil 9.10. Isıl işlem uygulanmış 3 numaralı FORMVAR çeliğinin, (a) ve (b) SEM sekonder elektron görüntüleri

Şekil 9.10.'da ısıl işlem görmüş, sertlik değeri 50 HRc olacak şekilde menevişlenmiş 3 numaralı çelik numunelerin SEM mikrografları verilmiştir. Şekil 9.10. a-b, sekonder elektron görüntülerini vermektedir. Mikro yapılarda temperlenmiş martenzit matris açık bir şekilde görülmektedir. Resimlerden, tane büyüklüğünün 10-20 mikron civarında olduğu anlaşılmaktadır. Bu büyüklükteki taneler ASTM tane büyüklüğü olarak n:8 veya daha ince sınıfına girmektedir. İnce taneli yapılar da takım çeliklerinin tipik özelliklerindedir.

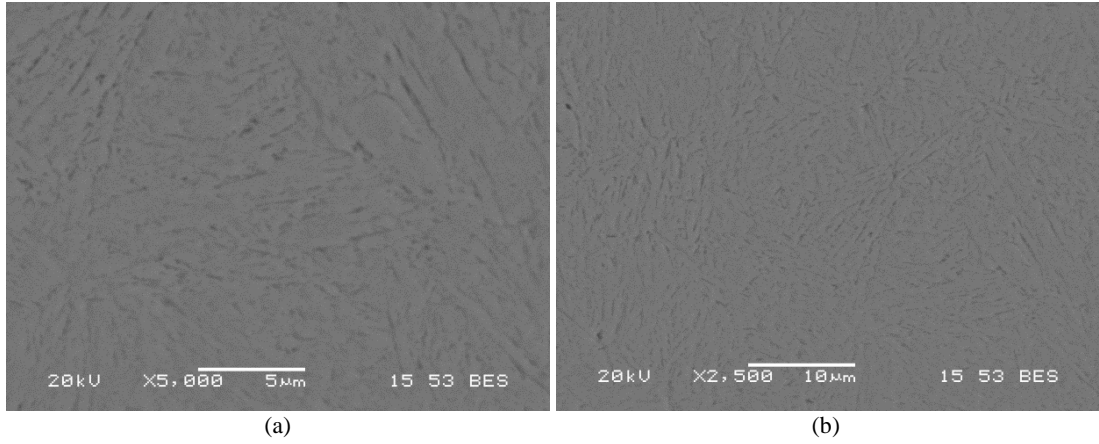


(a)

(b)

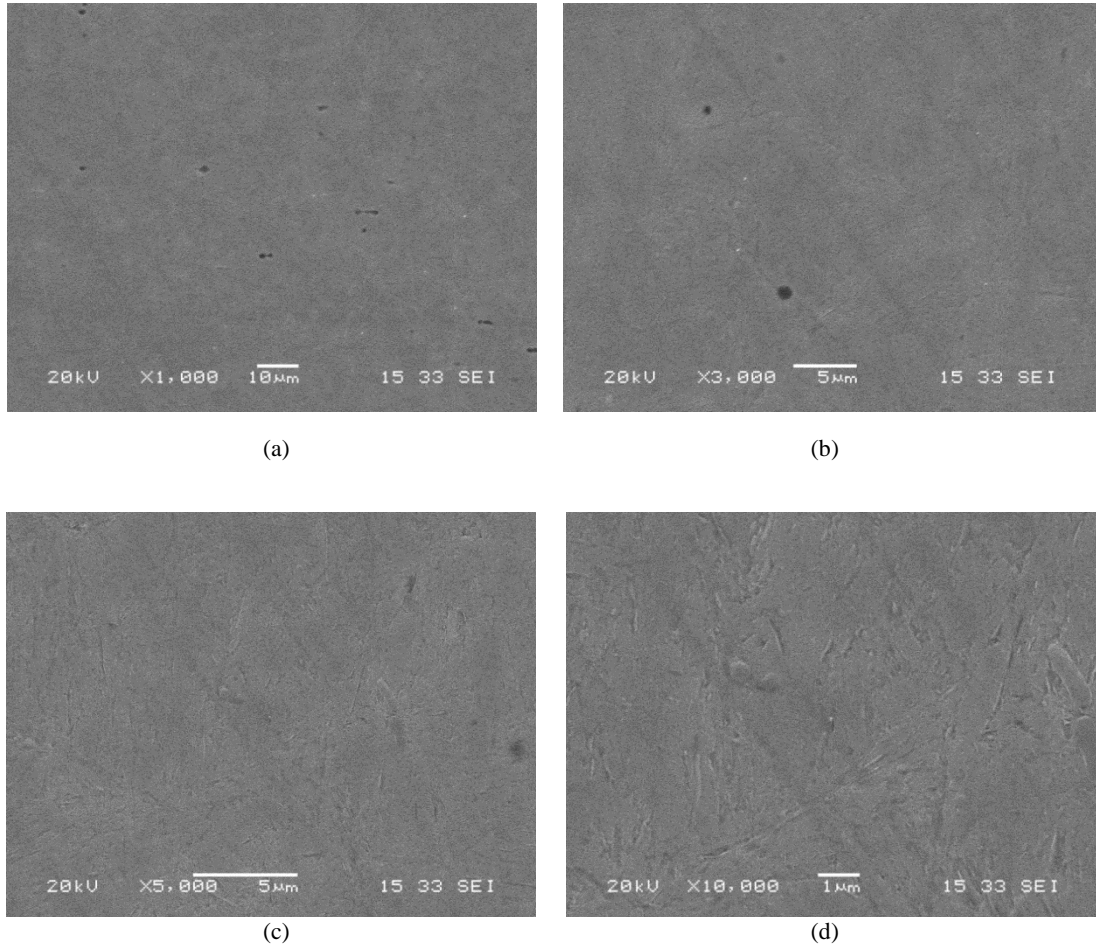
Şekil 9.11. Isıl işlem uygulanmış 4 numaralı FORMVAR çeliğinin, (a) ve (b) SEM sekonder elektron görüntüleri

Şekil 9.11. ısıl işlem görmüş, sertlik değeri 52 HRc olacak şekilde menevişlenmiş 4 numaralı çelik numunelerin SEM mikrograflarını göstermektedir. Şekil 9.11.'de a-b, sekonder elektron görüntüleri verilmektedir.



Şekil 9.12. Su vermeden sonra 1 h kriyojenik işlem görmüş 5 numaralı FORMVAR çeliğinin, (a) ve (b) SEM geri saçılan elektron görüntüleri

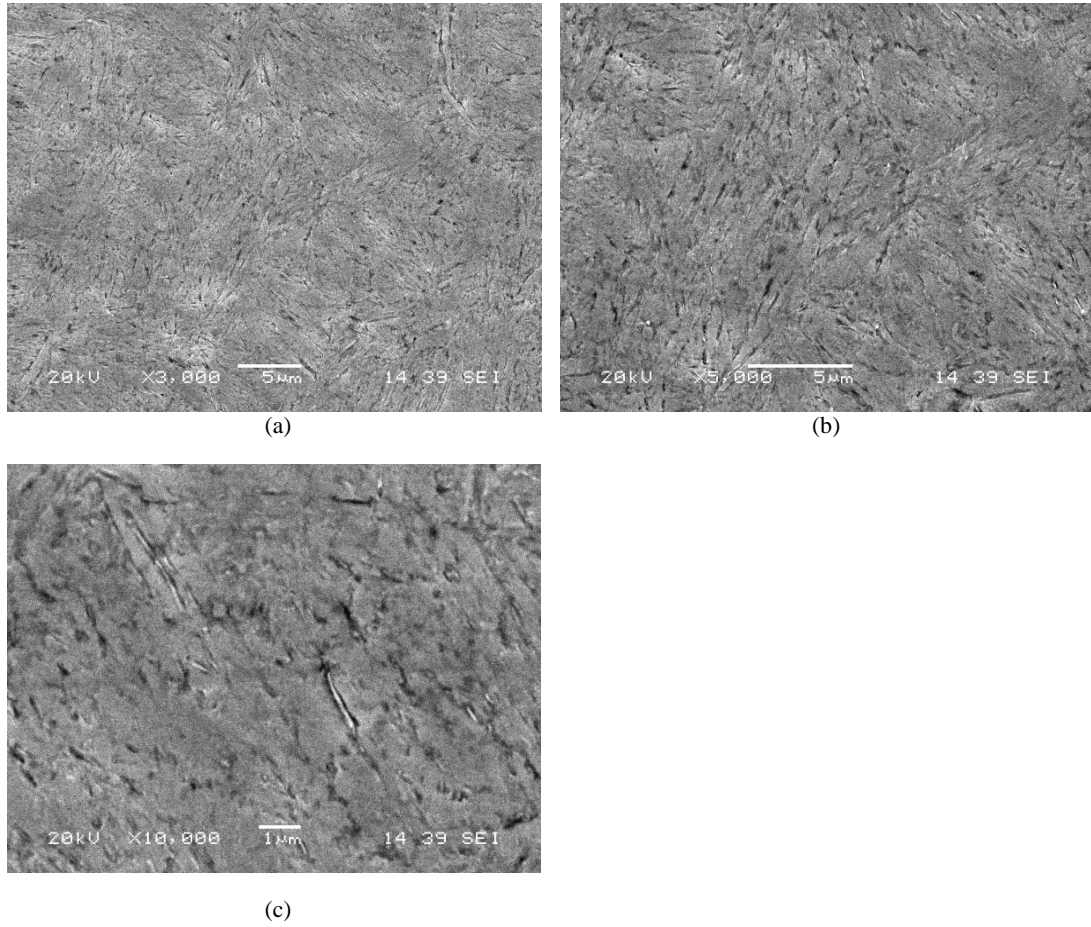
Şekil 9.12.'de su verme sonrası  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  de 1 saat kriyojenik işlem görmüş, 5 numaralı çelik numunelerin SEM mikrografları verilmiştir. Şekil 9.12. a-b, geri saçılan elektron görüntülerini vermektedir. Mikro yapılarda homojen dağılmış alaşım karbürleri de mevcuttur.



Şekil 9.13. Su vermeden sonra 2 h kriyojenik işlem görmüş 6 numaralı FORMVAR çeliğinin, (a) ve (b) SEM sekonder elektron görüntüleri

Şekil 9.13.'de su verme sonrası  $-100^{\circ}\text{C}$  de 2 saat kriyojenik işlem görmüş, 6 numaralı çelik numunelerin SEM mikrografları verilmiştir. Şekil 9.13. a-b-c-d, sekonder elektron görüntülerini vermektedir. Özellikle Şekil 9.13. d resminde serbest alaşım karbürlerinin varlığı dikkat çekmektedir.



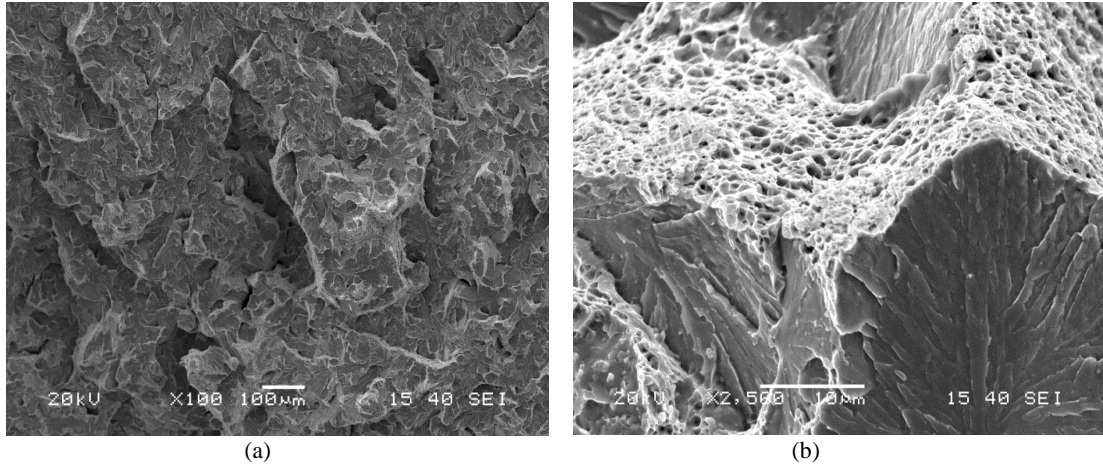


Şekil 9.14. Su vermeden sonra 3 h kriyojenik işlem görmüş 7 numaralı FORMVAR çeliğinin, (a), (b) ve (c) SEM sekonder elektron görüntüleri

Şekil 9.14.'de su verme sonrası  $-100^{\circ}\text{C}$  de 3 saat kriyojenik işlem görmüş, 7 numaralı çelik numunelerin SEM mikrografları verilmiştir. Şekil 9.14. a-b-c, sekonder elektron görüntülerini vermektedir.

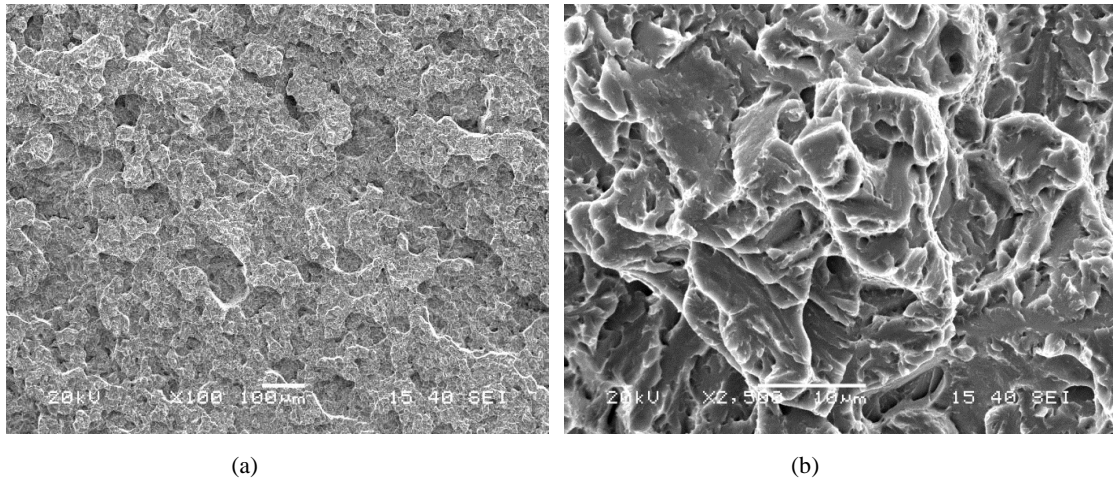
### 9.3. SEM ile Kırık Yüzey İncelemesi

Darbe deneyinde kırılmış numunelerin kırık yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir. Isıl işlem uygulanmamış numunenin kırık yüzeyi düşük büyütmelerde görece kaba (girintili-çıkıntılı) gözükmemektedir (Şekil 9.15 a). Yüksek büyütmelerde kırık yüzeyinde yer yer sünek kırılma karakteristikleri aşikar bir şekilde görülmektedir (Şekil 9.15. b, açık renk bölgeler). Sünek kırılmanın varlığı, bu numunelerin darbe deneyinde yüksek darbe enerjisi ile kırılabileceklerine ait bir işarettir.



Şekil 9.15. Isıl işlem uygulanmamış 1 numaralı yumuşak FORMVAR çeliği kırık yüzeyinin SEM-SEI görüntüleri. a) Düşük büyütme, b) yüksek büyütme.

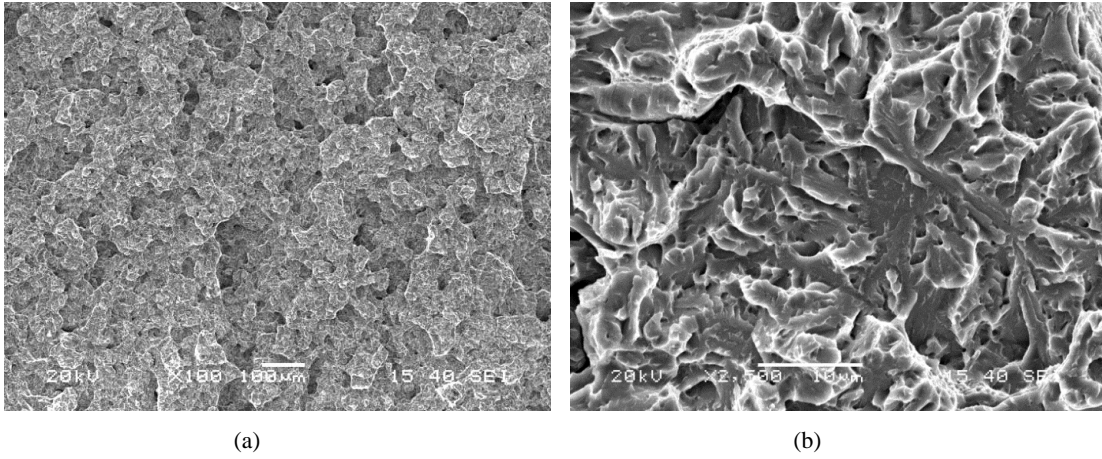
Şekil 9.16.'da su verilmiş ve 48 HRC sertliğe sahip olacak şekilde temperlenmiş 2 numaralı numunenin darbe deneyinde kırılmış numunesinin kırık yüzeylerinin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri verilmiştir. Düşük büyütmelerde kırık yüzeyi neredeyse tamamen düzdür (Şekil 9.16. a). Yüksek büyütmelerde kırılmanın tamamen klivaj çatlak ilerlemesi ile meydana geldiği, dikkati çekecek sünek kırılma işareti olmadığı görülmektedir (Şekil 9.16. b).



Şekil 9.16. Isıl işlem uygulanmış 2 numaralı (48 HRC sertlikli) yumuşak FORMVAR çeliğinin kırık yüzeyinin SEM-SEI görüntüleri. a) Düşük büyütme, b) yüksek büyütme.

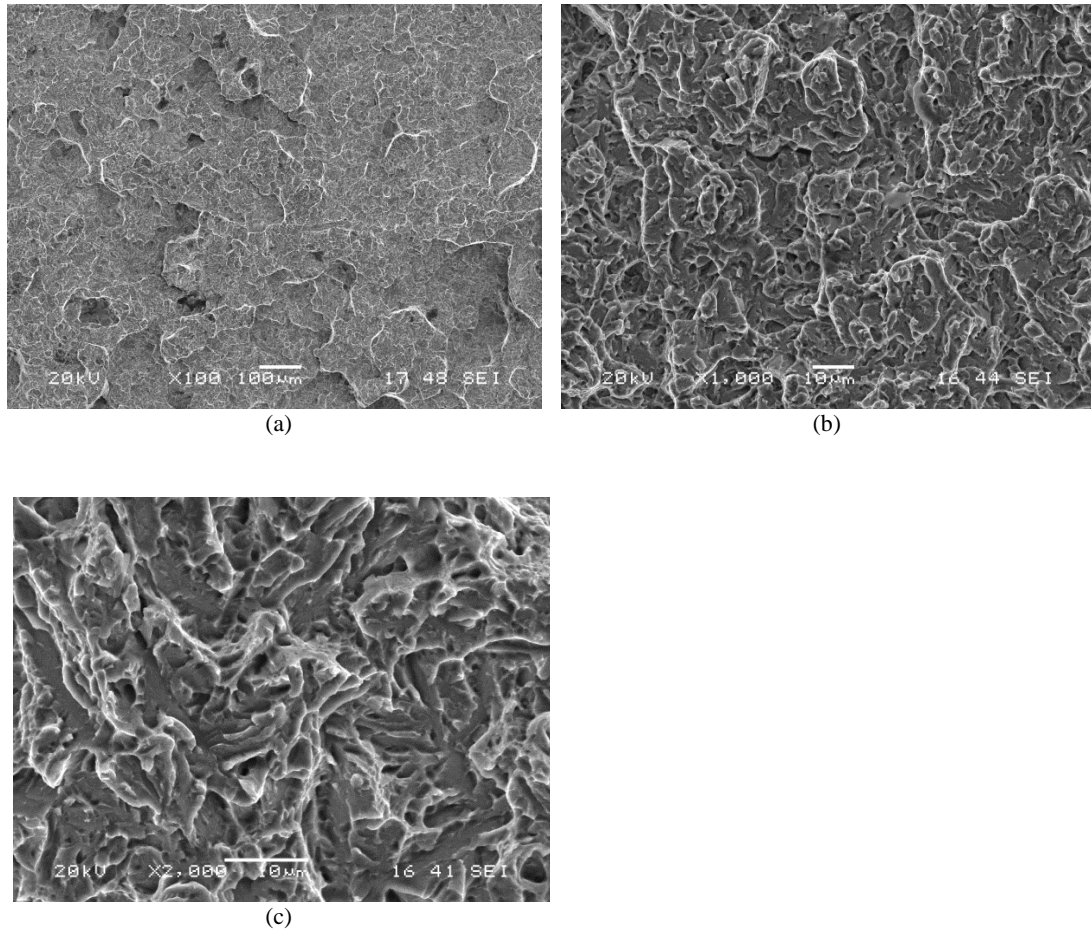
Şekil 9.17.'de su verilmiş ve 50 HRC sertliğe sahip olacak şekilde temperlenmiş 3

numaralı numunenin darbe deneyinde kırılmış numunesinin kırık yüzeylerinin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri verilmiştir. Düşük büyütmelerde kırık yüzeyi neredeyse tamamen düzdür (Şekil 9.17.a.). Yüksek büyütmelerde kırılmanın tamamen klivaj çatlak ilerlemesi ile meydana geldiği, hiç sünek kırılma işareti olmadığı görülmektedir. (9.17.b.)



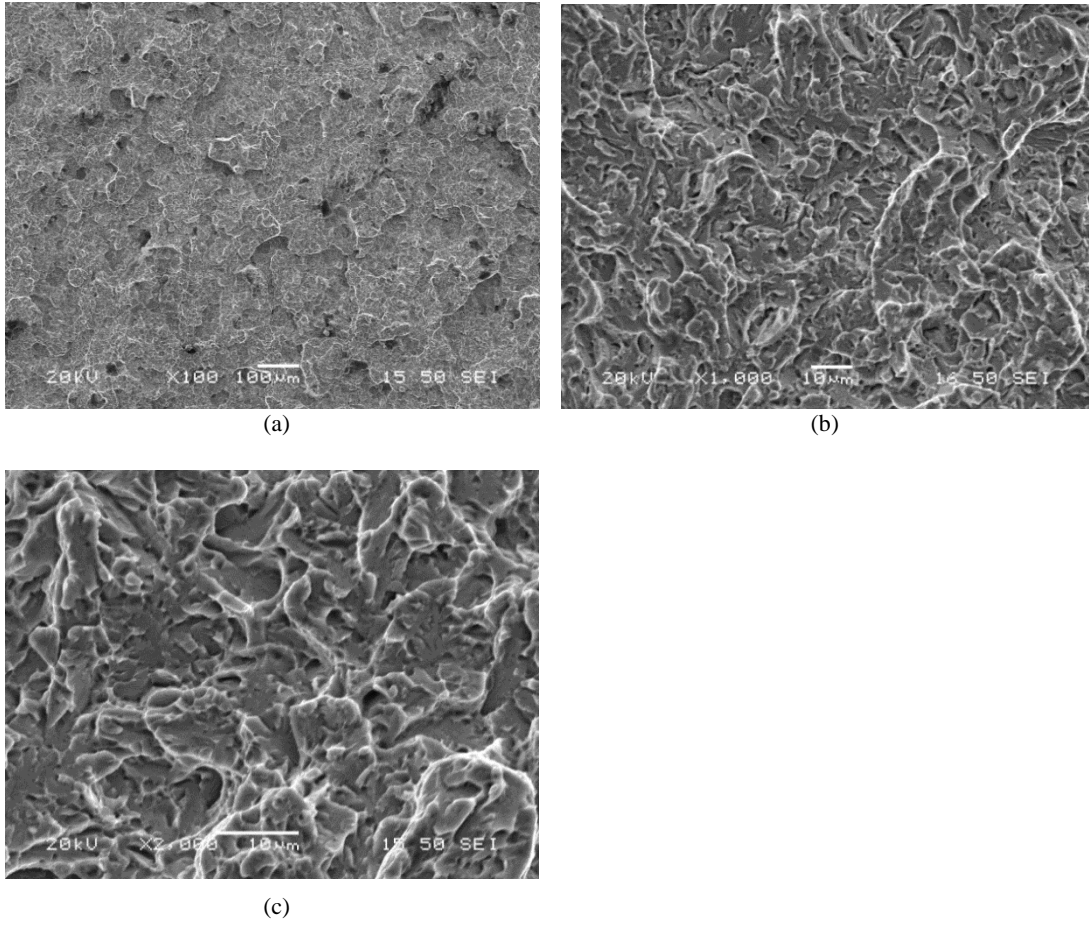
Şekil 9.17. Isıl işlem uygulanmış 3 numaralı (50 HRc sertlikli) yumuşak FORMVAR çeliğinin kırık yüzeyinin SEM-SEI görüntüleri. a) Düşük büyütme, b) yüksek büyütme.

2 ve 3 numaralı numunelerin kırık yüzeylerinin tamamen klivaj kırılması (Şekil 9.16. ve 9.17.) bu numunelerin darbe enerjilerinin görece düşük olabileceğine işaret etmektedir.

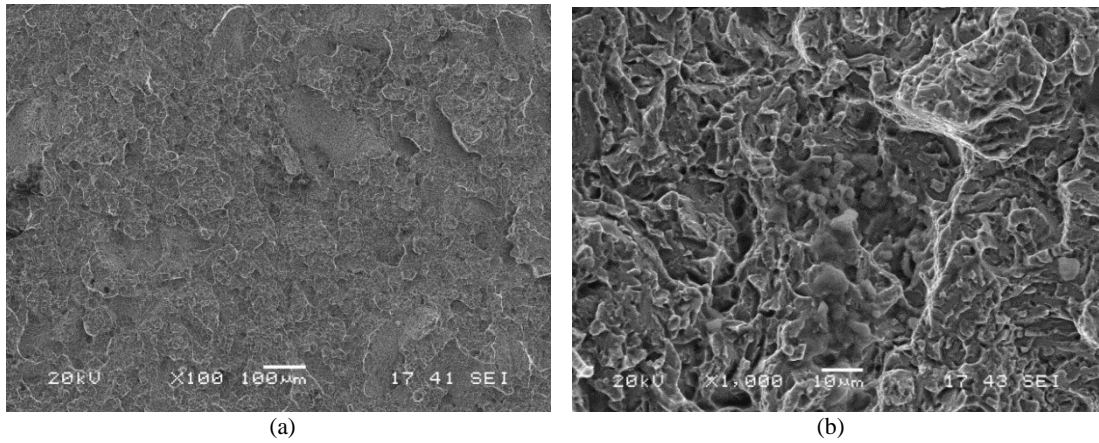


Şekil 9.18. Isıl işlem uygulanmış 4 numaralı (52 HRC sertlikli) yumuşak FORMVAR çeliğinin kırık yüzeyinin SEM-SEI görüntüleri. a) Düşük büyütme, b) ve c) yüksek büyütme.

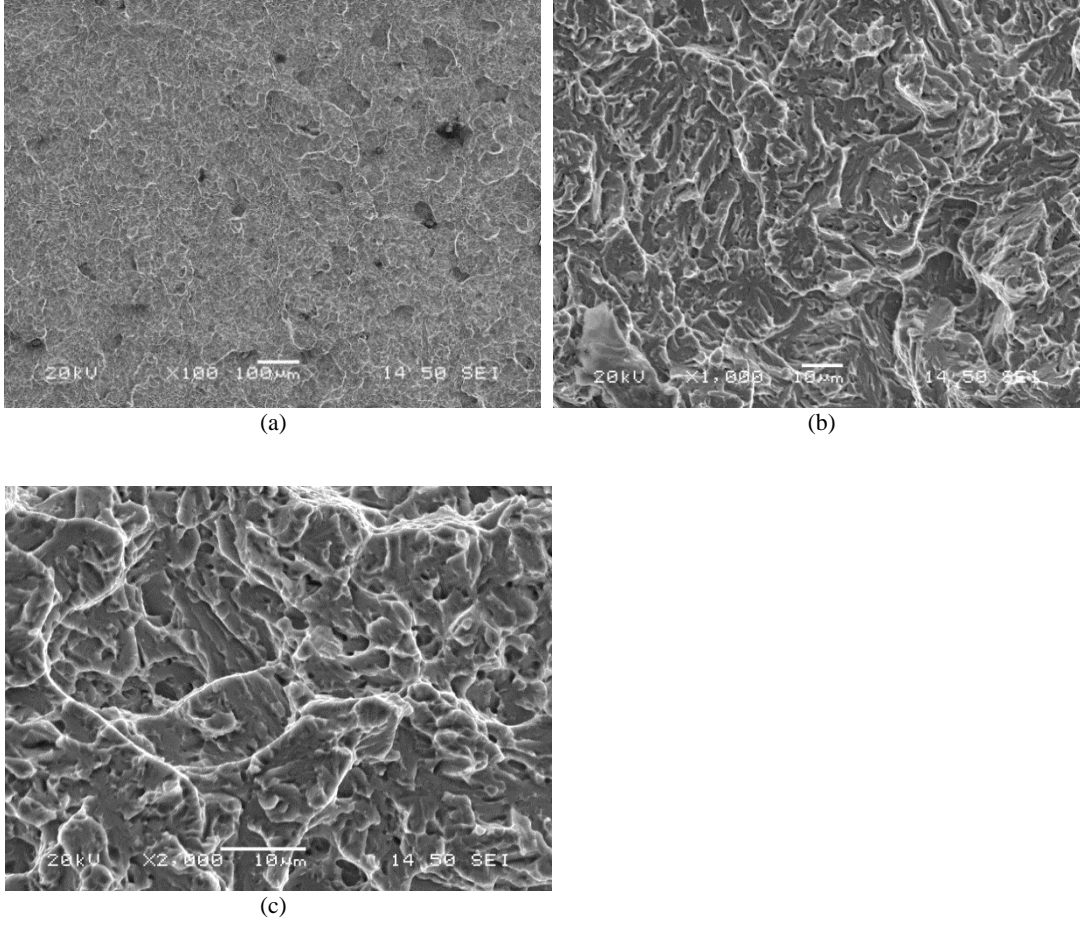
Kriyojenik işlem görmüş numunelerin oda sıcaklığında uygulanan darbe deneyinde kırılmış yüzeylerinin görüntüleri Şekil 9.19. ve 9.21.'de verilmiştir. Bu kırık yüzeylerinde kriyojenik işlem süresine bağlı bir değişiklik olmadığı gibi kriyojenik işlem görmemiş numunelerin kırık yüzeyleri ile de dikkat çekici bir farkları yoktur. Çatlak, ince tane yapısına bağlı olarak küçük klivaj düzlemleri üzerinden yürümüştür. Bununla birlikte Şekil 9.20.'de görülen 2 saat kriyojenik işlem görmüş numunenin kırık yüzeyinde alaşım karbür birikmelerinin olduğu bir bölge de görülmektedir. Bu tür karbür birikmeleri, karbürler çelik matrisi ile kimyasal bağlı olmadıkları için, çatlak başlangıcı için öncelikli yerler olarak görev yaparlar. Şekil 9.20. b.'deki resimde kırık sürekliliğinin o bölgede kesintiye uğradığı açık olarak görülmektedir.



Şekil 9.19. Su vermeden sonra 1 saat kriyojenik işlem görmüş 5 numaralı yumuşak FORMVAR çeliğinin kırık yüzeyinin SEM-SEI görüntüleri. a) Düşük büyütme, b) ve (c) yüksek büyütme.



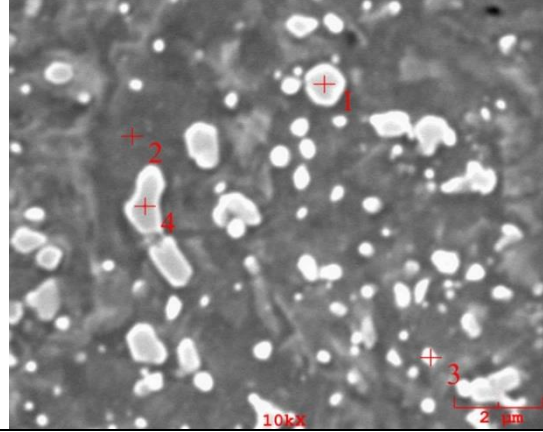
Şekil 9.20. Su vermeden sonra 2 saat kriyojenik işlem görmüş 6 numaralı yumuşak FORMVAR çeliğinin kırık yüzeyinin SEM-SEI görüntüleri. a) Düşük büyütme, b) yüksek büyütme.



Şekil 9.21. Su vermeden sonra 3 saat kriyojenik işlem görmüş 7 numaralı yumuşak FORMVAR çeliğinin kırık yüzeyinin SEM-SEI görüntüleri. a) Düşük büyütme, b) ve (c) yüksek büyütme.

#### 9.4. SEM-EDS Analizleri

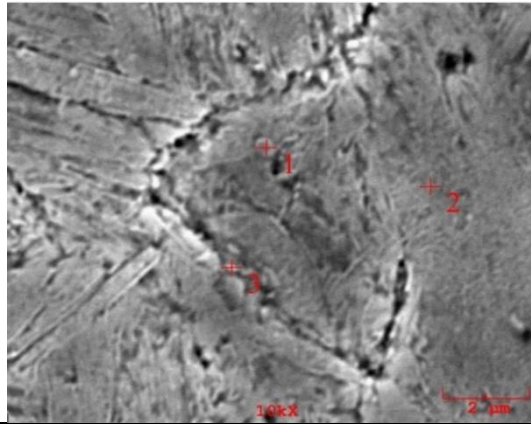
7 grup numunenin mikro yapı bileşenleri taramalı elektron mikroskobuna bağlı enerji dağılımlı x-ışını spektroskopisi (EDS) ile analiz edilmiştir.



Analiz Noktası	C	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Mo
1	0,650	1,047	16,302	-	75,386	0,108	0,898	6,624
2	3,505	0,047	3,113	0,199	91,838	0,301	0,334	0,662
3	2,088	0,425	4,183	0,160	83,527	0,349	0,522	8,745
4	0,803	0,368	7,508	0,000	86,736	0,549	0,700	3,336

Şekil 9.22. Isıl işlem uygulanmamış 1 numaralı yumuşak numunenin EDS nokta analiz sonuçları

Isıl işlem görmemiş numunelerin EDS analizinde, yapıda görülen alaşım karbürlerinin beklendiği gibi, Cr, Mo ve V'ca zengin olduğu görülmüştür (Şekil 9.22.).

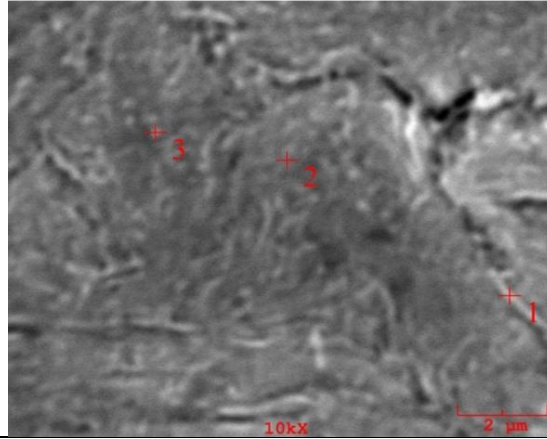


Analiz Noktası	C	Si	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Mo
1	1,178	1,110	5,996	5,276	0,081	81,565	0,472	4,322
2	0,584	0,698	0,344	3,935	0,202	92,022	0,585	1,630
3	1,908	0,944	0,477	4,197	-	90,141	0,197	2,137

Şekil 9.23. Su verme ve temperleme ısıl işlemi yapılmış 2 numaralı FORMVAR çeliği EDS nokta analiz sonuçları

Yapılan EDS analizleri, matris ve alaşım karbürlerini doğrulamaktadır. 1 numaralı alaşım karbürü vanadyumca zengin, 3 numaralı karbür ise krom ve molibden zengindir (Şekil 9.23.).

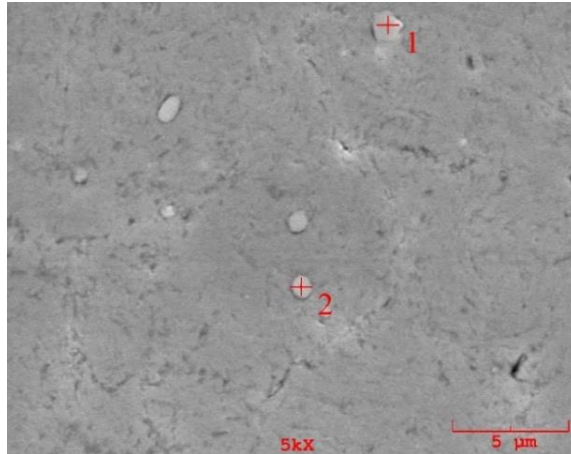




Analiz Noktası	C	Si	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Mo
1	1,273	0,342	0,540	4,536	0,000	90,882	0,470	1,958
2	2,374	0,797	0,410	4,573	0,000	88,967	0,521	2,358
3	2,846	0,329	0,484	3,999	0,166	89,610	0,390	2,177

Şekil 9.24. Su verme ve temperleme ısıl işlemleri yapılmış 3 numaralı FORMVAR çeliğinin genel EDS analiz sonuçları.

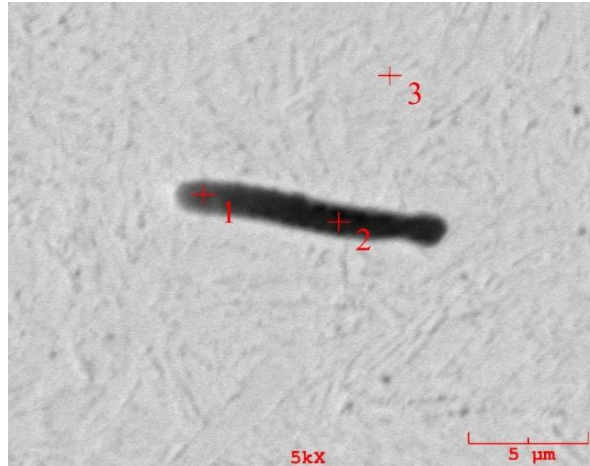
3 numaralı numunedan alınan 3 EDS analizi de yaklaşık matris bileşimindedir (Şekil 9.24.).



Analiz Noktası	C	Si	V	Cr	Mn	Fe	Mo
1	2,690	1,076	2,067	4,589	0,000	47,584	41,993
2	6,886	1,013	1,030	5,257	0,189	59,978	25,647

Şekil 9.25. Su verme ve temperleme ısıl işlemleri yapılmış 4 numaralı FORMVAR çeliğinin genel EDS analiz sonuçları.

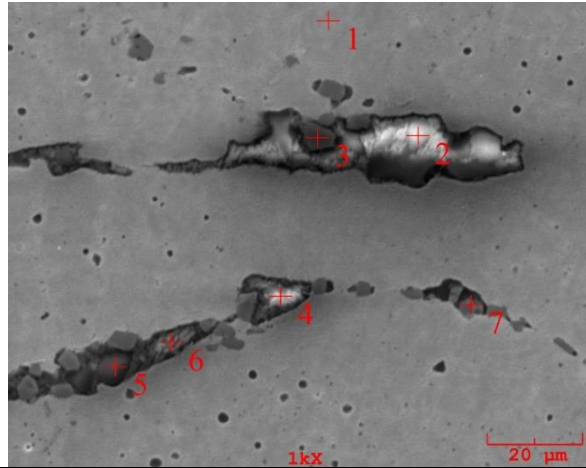
4 numaralı numuneden alınan iki EDS analizi alaşım karbüründen alınmış olup bunlar molibden zengin karbürdür (Şekil 9.25.).



Analiz Noktası	O	Al	Si	V	Cr	Mn	Fe	Mo
1	12,778	5,470	15,437	1,240	4,386	3,601	5,088	-
2	16,672	8,865	20,390	1,695	4,303	8,688	39,388	-
3	--	-	-	0,371	5,158	0,000	92,641	1,830

Şekil 9.26. Su verme sonrası kriyojenik işlem görmüş 6 numaralı FORMVAR çeliğinin genel EDS analiz sonuçları.

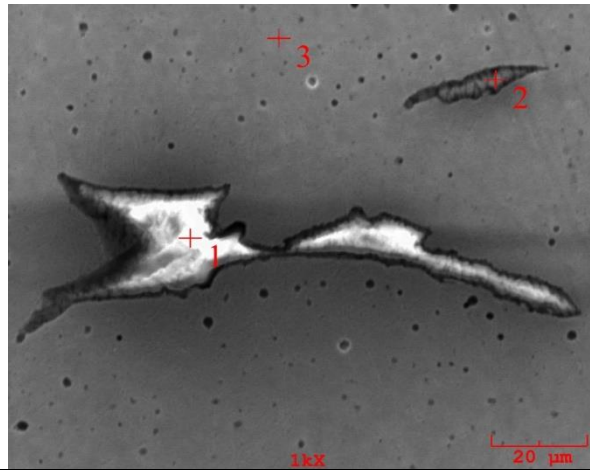
Yapılan EDS analizlerinden ilk ikisi numune üzerindeki bir kirliliğe aittir, üçüncü analiz ise matristen alınmıştır (Şekil 9.26.).



Analiz Noktası	O	Na	Al	Si	V	Cr	K	Mn	Fe	Mo
1	-	-	-	-	0,490	4,394	-	0,387	92,873	1,857
2	39,579	-	0,670	58,451	-	-	-	-	1,300	-
3	0,295	-	2,036	-	18,298	45,376	-	31,249	2,747	-
4	35,787	2,698	6,409	36,042	-	-	0,472	18,110	0,483	-
5	42,742	-	0,945	56,314	-	-	-	-	-	-
6	35,921	2,222	5,137	32,805	-	-	-	22,484	-	1,431
7	20,478	-	4,675	9,015	12,384	23,934	-	27,374	1,598	0,541

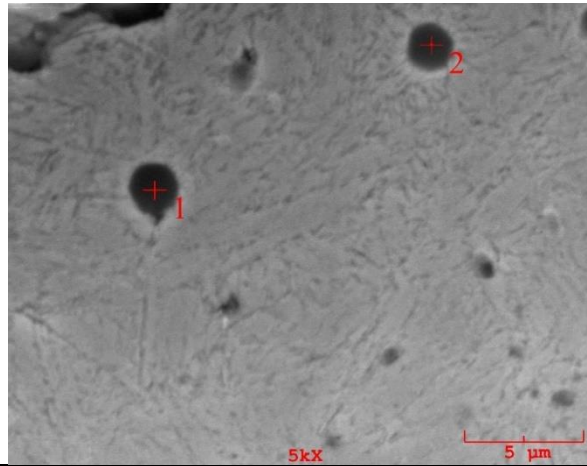
Şekil 9.27. Su verme sonrası kriyojenik işlem görmüş 6 numaralı FORMVAR çeliğinin genel EDS analiz sonuçları.

6 numaralı numunenin kırık yüzey incelemelerinde de karbür birikmeleri görülmüştü. Alınan EDS analizleri hem karbür birikmelerini hem de bazı oksitleri (kalıntıları) göstermektedir. Bu oksitler malzeme için zararlıdır.



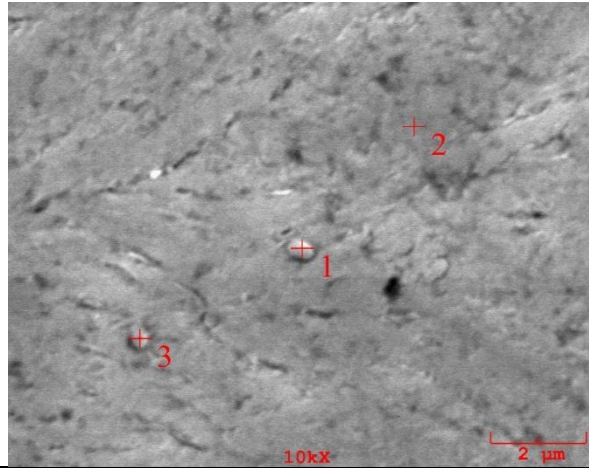
Analiz Noktası	O	Na	Al	Si	S	V	Cr	Mn	Fe	Mo
1	39,289	0,667	2,962	52,318	-	-	-	4,764	-	-
2	26,253	-	3,573	32,178	0,835	0,479	1,60	35,622	-	-
3	-	-	-	0,241	-	-	4,718	0,000	92,401	2,639

Şekil 9.28. Su verme sonrası kriyojenik işlem görmüş 6 numaralı FORMVAR çeliğinin genel EDS analiz sonuçları



Analiz Noktası	O	Si	V	Cr	Mn	Fe	Mo
1	18,435	26,625	0,565	2,983	0,463	49,928	1,001
2	18,494	22,831	0,452	3,777	0,452	52,929	1,066

Şekil 9.29. Su verme sonrası kriyojenik işlem görmüş 6 numaralı FORMVAR çeliğinin genel EDS analiz sonuçları



Analiz Noktası	C	Si	V	Cr	Mn	Fe	Mo
1	3,620	0,267	4,914	4,712	0,000	82,146	4,341
2	-	0,601	0,414	5,252	0,006	91,514	2,213
3	8,824	0,173	1,943	4,600	0,115	80,983	3,362

Şekil 9.30. Su verme sonrası kriyojenik işlem görmüş 7 numaralı FORMVAR çeliğinin genel EDS analiz sonuçları

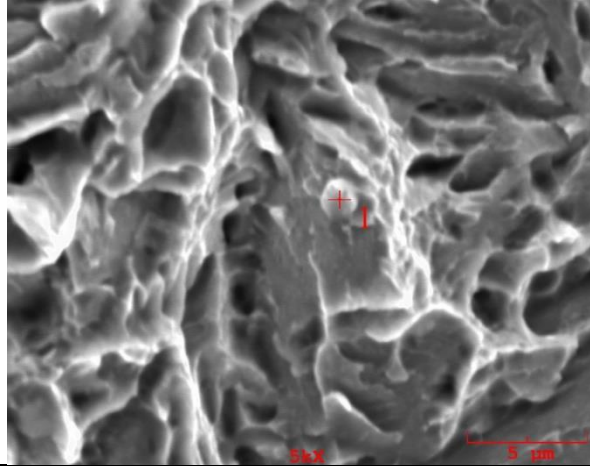
EDS analizindeki noktalar Cr, V ve Mo'ce zengin alaşım karbürleri ve matrisi (2) temsil etmektedir (Şekil 9.30.).

#### 9.4.1. SEM-EDS kırık yüzey analizleri

Geleneksel ısıl işlem görmüş numuneler ile kriyojenik işlem görmüş numunelerde optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu ve darbe deneyi kırık yüzeyi inceleme sonuçlarının benzer olması nedeniyle, kırık yüzey EDS incelemeleri sadece kriyojenik işlem görmüş iki örnekte yapılmıştır. Kırık yüzey karakteristikleri kırık yüzey incelemeleri sırasında anlatıldığı için, burada sadece faz tanımlaması yoluna gidilmiştir.

Şekil 9.31.'de  $-100^{\circ}\text{C}$ 'de 1 saat süre ile sıvı azot tankında bekletilmiş ardından temperlenmiş numunenin kırık yüzeyi görülmektedir. Görüntünün tam ortasında yaklaşık 1 mikron büyüklüğünde bir tek karbür bulunmaktadır ve bu karbür alaşımdaki diğer tüm karbürler gibi Cr-Mo-V karbürüdür. Her ne kadar optik mikroskop

görüntülerinde ve düşük büyütme SEM görüntülerinde bulunmamakla beraber bu karbürler mikro yapının bir parçasıdır. Resimde tesadüfen bulunuyor değildir. Sadece, daha önceki diğer analizlerden de görüleceği gibi, elementel bileşim farklılıklar göstermekte, bazılarında daha fazla vanadyum veya molibden bulunabilmektedir.



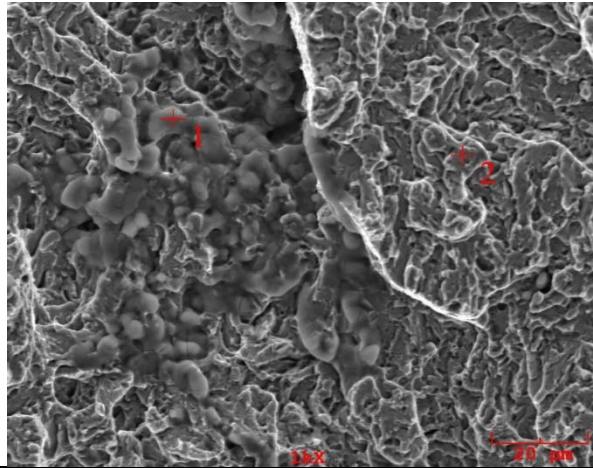
Analiz Noktası	V	Cr	Mn	Fe	Mo
1	0,517	4,357	0,461	92,669	1,996

Şekil 9.31. Su verme ve temperleme ısıl işlemi yapılmış 5 numaralı FORMVAR çeliğinin kırık yüzey genel EDS analiz sonuçları

Şekil 9.32. ve Şekil 9.33. görüntüleri ve EDS analizleri önemli bir bulguyu paylaşmaktadır. Bu şekiller  $-100^{\circ}\text{C}$ 'de 2 saat süre ile sıvı azot tankında bekletilmiş ardından temperlenmiş numunenin kırık yüzeylerini göstermektedir. Şekil 9.32.'deki görüntüde iki farklı noktadan EDS analizi yapıldığı görülmektedir. 1 numaralı analiz noktasının bileşimine bakıldığında, burada görülen mikroyapı unsurunun demir oksit olduğu anlaşılmaktadır. 2 numaralı analiz ise çeliğin matrisine aittir. Demir oksitin yapıda bulunması ilginçtir, aslında yapıda olması beklenmemektedir. Bu tür beklenmeyen yapılar çelik için kirlilik olarak nitelenir ve malzemenin özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilir. Şekil 9.33.'deki EDS analizleri de benzer sonuçları ortaya koymuştur. 1 numaralı analiz matristen alınmış olup çeliği temsil etmektedir. Ancak 2 ve 4 numaralı analizler Fe-Si-O ve 3 numaralı analiz ise Fe-Si birikmelerinin

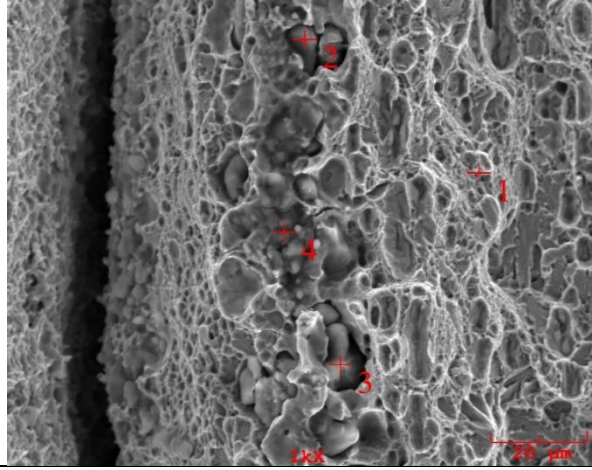
olduğunu göstermektedir; yani yine oksitli yapılar karşımıza çıkmaktadır. Bunların mekanik özellikleri olumsuz etkilediğini tekrar hatırlayalım.

-100°C'de 2 saat kriyojenik işlem görmüş numunelerin parlatılmış kesit incelemelerinde de benzer oluşumlar görülmüştü (Şekil 9.27. ve Şekil 9.28.). Dolayısıyla, bu numunenin kirli bir çelik parçasından alındığını söylemek mümkündür. Burada sözü edilen oksitli fazlar diğer 6 grup numunede görülmemiştir. Örneklerin hepsi aynı parçadan çıkarıldıkları için çeliğin bir yerlerinde kirlilik kaldığı söylenebilir. Bu kirliliklerin mekanik özelliklere etkileri ise Darbe Deneyleri bahsinde görülecektir.



Analiz Noktası	C	O	Cr	Mn	Fe	Mo
1	2,085	39,682	1,361	0,478	56,394	-
2	5,267	-	4,843	0,081	87,207	2,603

Şekil 9.32. Su verme sonrası kriyojenik işlem görmüş 6 numaralı FORMVAR çeliğinin kırık yüzey genel EDS analiz sonuçları



Analiz Noktası	C	O	Si	V	Cr	Mn	Fe	Mo
1	-	-	-	0,979-	5,074	0,036	92,999	0,913
2	-	48,787	46,076	-	0,228	0,170	4,217	0,523
3	-	0,000	42,956	0,887	1,820	0,323	51,29	1,686
4	5,289	34,595	25,900	0,320	1,565	0,000	31,667	0,64

Şekil 9.33. Su verme sonrası kriyojenik işlem görmüş 6 numaralı FORMVAR çeliğinin kırık yüzey genel EDS analiz sonuçları

### 9.5. Sertlik Ölçümleri

Sertlik değerleri 3 ölçümün sonucu olarak belirlenmiştir (Tablo 3). Ham malzemenin sertliği HRc olarak ölçülemeyecek kadar düşüktür (20 HRc'den yumuşak). 2, 3, 4, 5, 6 ve 7 kodlu numunelerin sertlikleri, hedeflenen 48-50 ve 50-52 HRc değerlerini sağlamaktadır.

Tablo 9.1. Numunelerin sertlik değerleri

Numune	1	2	3	4	5	6	7
Sertlik (HRc)	<20	48,5	51,2	53,2	52,2	52,2	52

\*3 ölçüm ortalaması



## 9.6. Darbe Deneyi Sonuçları

Darbe deneyleri 2 mm derinlikli V-çentikli darbe numuneleri üzerinde Anadolu Döküm ve Akademi NDT Laboratuvarlarında oda sıcaklığında yapılmıştır. Sonuçlar Tablo 9.2.'de verilmiştir.

Tablo 9.2. Charpy v çentikli numunelerle yapılan darbe deneyi sonuçları (Joule)

Numune	1	2	3	4	5	6	7
Darbe enerjisi*, Joule	45	13	14,3	11,5	12,6	8,5	10,9

Geleneksel ısıtılmış numunelerin darbe enerjileri 11,5-14,3 Joule olarak ölçülmüş olup, sıcak iş takım çelikleri için bu değerler gayet tatminkârdır. Kriyojenik işlem görmüş numunelerin darbe enerjileri az daha düşüktür. Fakat 6 numaralı numunenin darbe enerjisi diğerlerinden belirgin şekilde azdır. Bunun sebebi, yukarıda sözü edilen çelik bünyesinde kalmış kirliliklerdir.

## 9.7. Aşınma Deneyi Sonuçları

Numunelerin aşınma ve sürtünme testleri, ball-on-disc tribometre aşınma test cihazında oda sıcaklığında 10 N yük altında kuru kayma koşulları altında yapılmıştır. Testler 6 mm çaplı bir WC bilyesine karşı gerçekleştirilmiştir. İleri-geri hareket eden (reciprocating) test prosedürü 5.4 cm/s kayma hızında ve 50 m toplam kayma mesafesinde, 5.5 mm doğrusal yolda gerçekleştirilmiştir. Aşınma testleri 3 kez tekrarlanmıştır ve ortalama değerler aşınma kaybı olarak belirlenmiştir. Aşınma testlerinden sonra oluşan yolların genişlikleri ölçülerek numunelerin hacim kayıpları hesaplanmıştır. Aşınma izlerinin ölçümleri en az 5 farklı noktadan alınmıştır. Numunelerin aşınmış yüzeylerinin SEM analizleri, TESCAN MAIA3 XMU model taramalı elektron mikroskopunda yapılmıştır.

Tablo 9.3. Hacim kayıpları ( $10^{-3} \text{ mm}^3$ )

1	2	3	4	5	6	7
4,555001	6,54126	8,060153	8,376889	10,45323	4,68439	5,758769

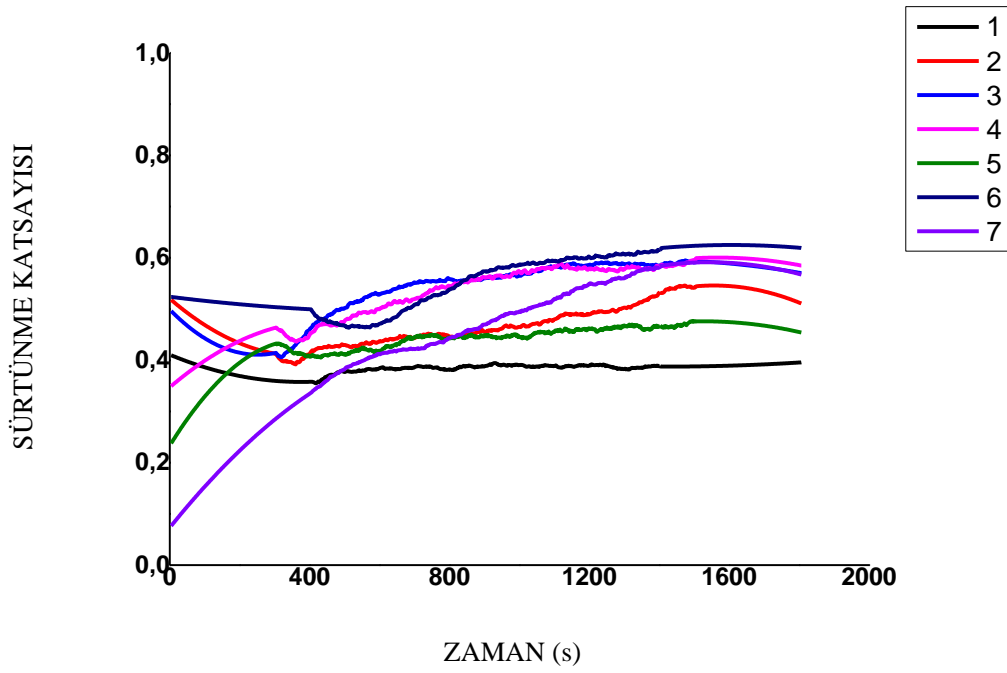
Tabloda görülen değerler aşınma sırasında oluşan izlerin farklı kısımlarından ölçülerek hesaplanmıştır. Bu değerler birbirine çok yakın değerler o sebeple şu numune şundan iyidir gibi bir sonuç çıkarmak pek mümkün değil. Bu farklılıklar deneyler sırasındaki çok küçük değişkenlerde bile meydana gelebilir.

#### Sürtünme Katsayısı

Numunelerin test süresine karşılık sürtünme katsayıları Şekil 9.34.'te görülmektedir. En yumuşak olan 1 numaralı numunenin sürtünme katsayısı en düşüktür ve aşınma deneyi süresince önemli değişim göstermemiştir. En yüksek sürtünme katsayısı ise 6 numaralı numunede ölçülmüştür. Bu numunenin yapısında kirlilikler olduğu daha önce dile getirilmişti. Bu tür gevrekleşebilir unsurlar partikül formuna kolayca geçip sürtünmeyi zorlaştırmış olabilir. Uzun vadede 2 numaralı numune ile  $-100^{\circ}\text{C}$ 'de 1 saat kryojenik işlem gören numune yakın sürtünme katsayılarına sahiptirler. Genel olarak yapılan işlemler ile sürtünme katsayıları arasında bir ilişki kurulamamıştır. Yani geleneksel ısı işlem gören numuneler ile derin soğutulan numunelerin sürtünme katsayıları birbirinden düşük veya yüksek olarak değerlendirilememiştir.

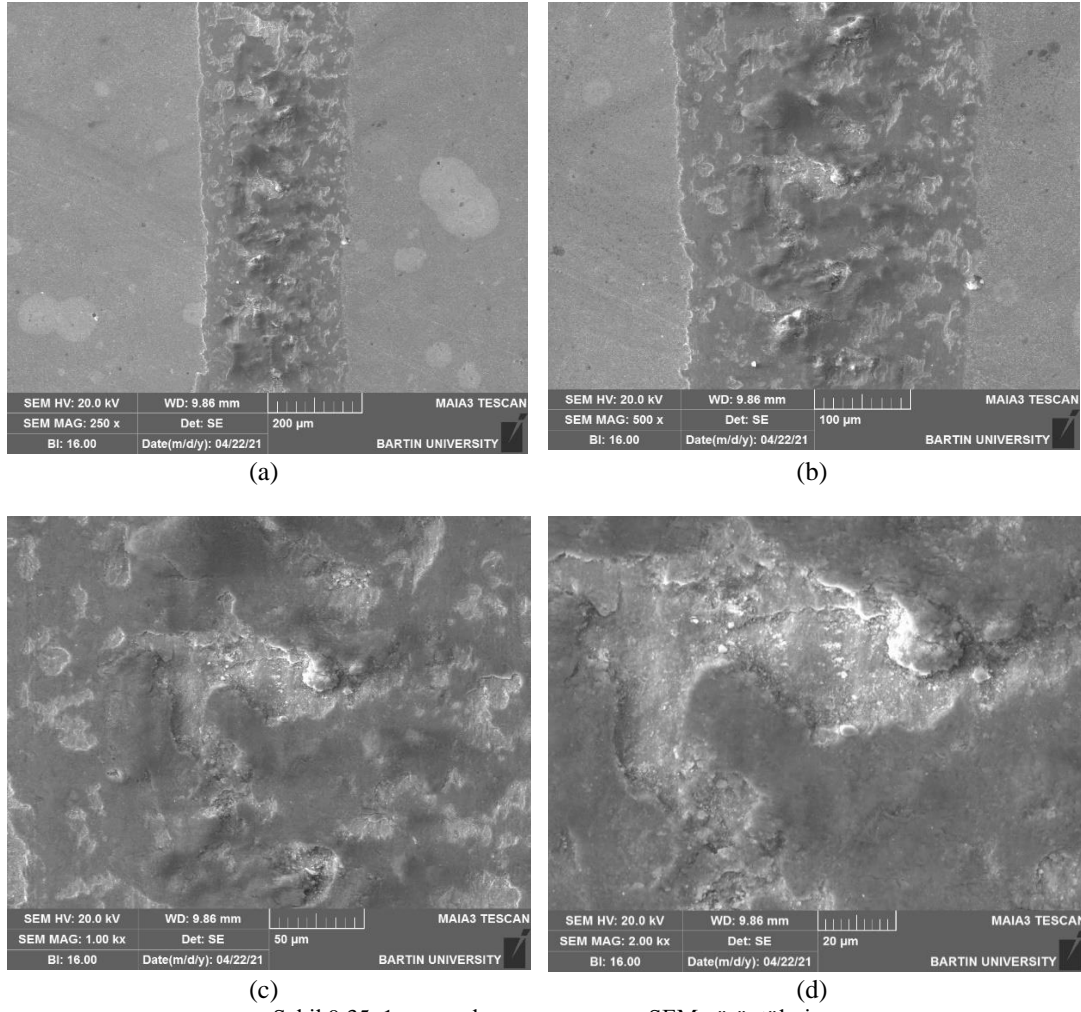
Tablo 9.4. Ortalama sürtünme katsayısı değerleri

1	2	3	4	5	6	7
0,382909	0,474532	0,534876	0,529581	0,434254	0,559031	0,440822



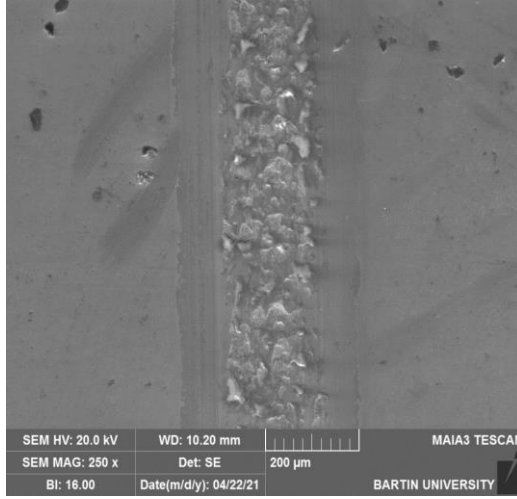
Şekil 9.34. Zamana bağlı olarak sürtünme katsayısında meydana gelen değişim.

Numunelerin aşınma izleri taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir. Bu görüntüler Şekil 9.35. ile Şekil 9.41.'de verilmiştir.

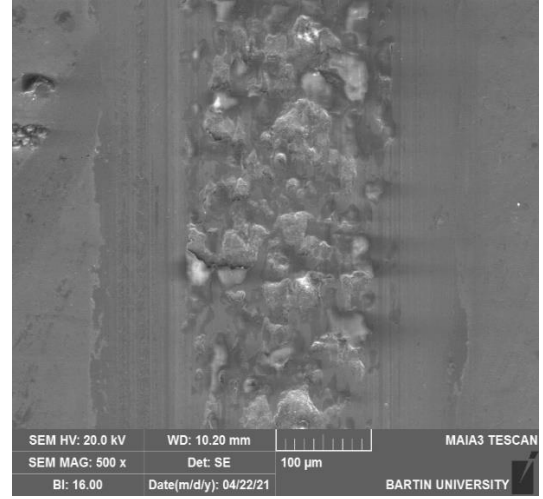


Şekil 9.35. 1 numaralı numune aşınma SEM görüntüleri

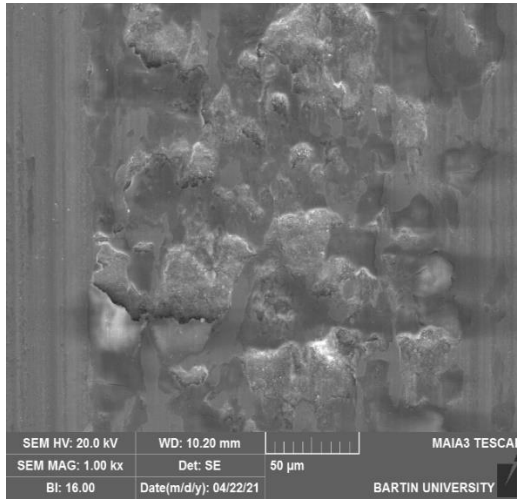
Şekil 9.35. de kuvvetli oksidasyon tipi aşınma görülmüştür. Nispeten yüksek yük altında deneylere tabi tutulan numunenin aşınma izi genişliği yaklaşık 300 mikron civarındadır. Burada aşındırıcı yüzey ile karşı yüzey arasındaki etkileşim düşünüldüğünde yüksek bası kuvvet ve gerilmelerinin meydana geleceğini düşünmek doğrudur. Bu esnada yüzeyler arasında meydana gelen ani sıcaklık artışı yüzeyde oksidasyon tabakasının oluşmasına sebep olmuştur. Sürtünmenin devam etmesi ile birlikte yüzey üzerindeki gerilmeler, oksit ve alt yüzey arasındaki mekanik özelliklerin farklı olması oksit tabakasının kırılarak yüzeyden ayrılmasına sebep olmuştur. Oksidasyon tipi aşınmada yüzeyde oksitin meydana gelmesi ve kırılmasını birçok parametre etkilemektedir, örneğin malzemenin kimyasal bileşimi, etkileşimli yüzeylerin kimyasal yapısı, yüzeyde oluşan oksit tabakasının kalınlığı ve bu oksit tabakasının yüzeye tutunma özellikleri gibi.



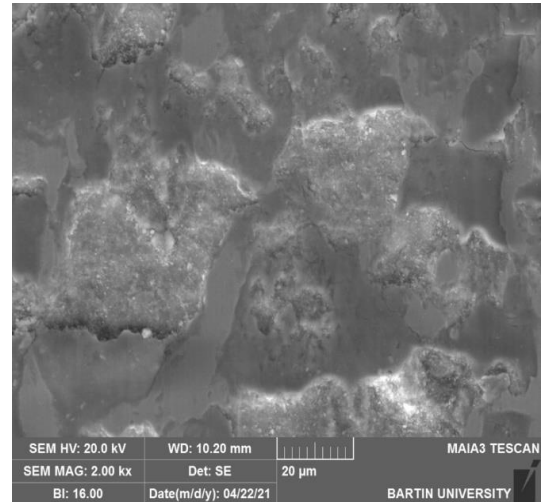
(a)



(b)

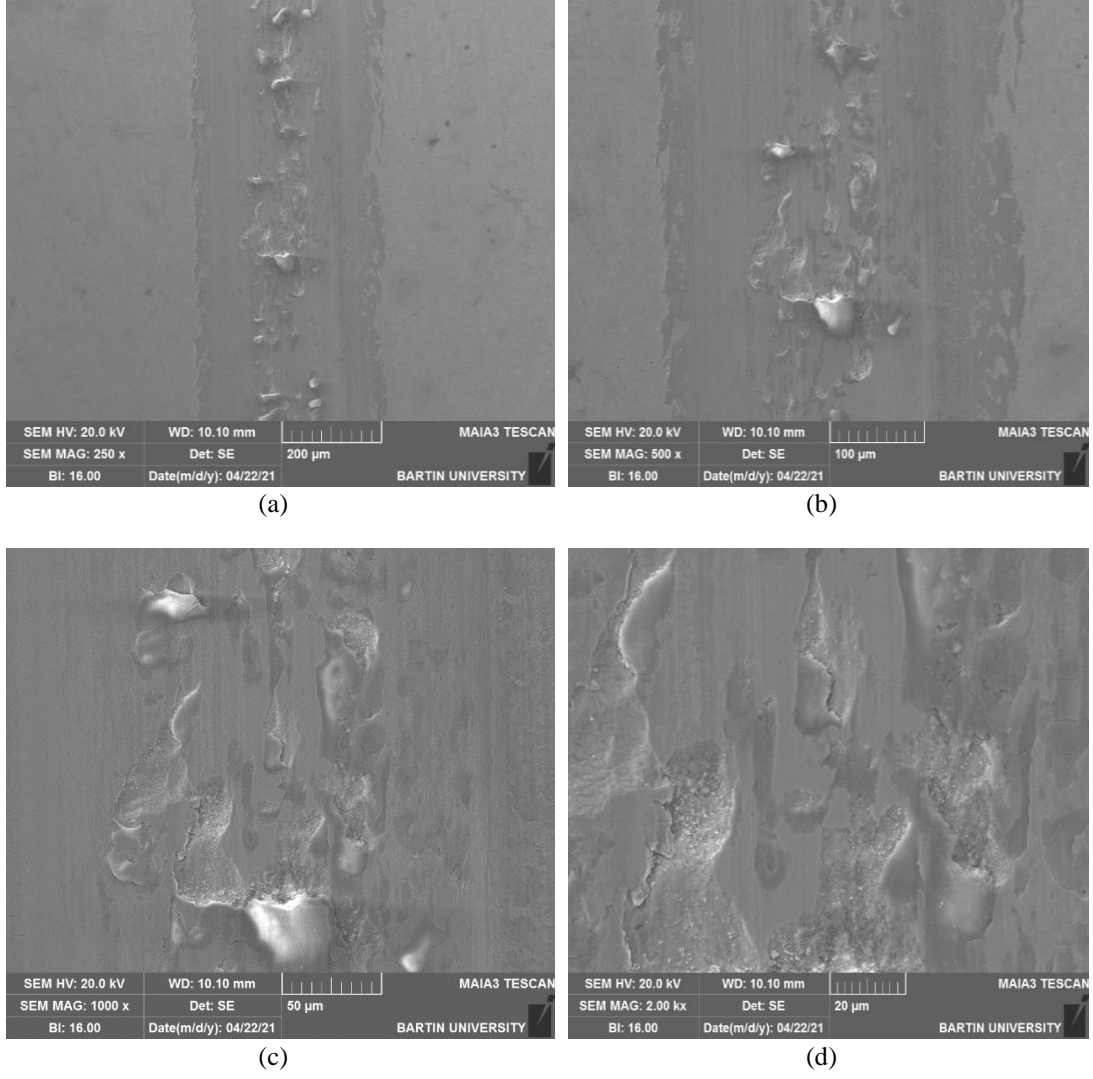


(c)

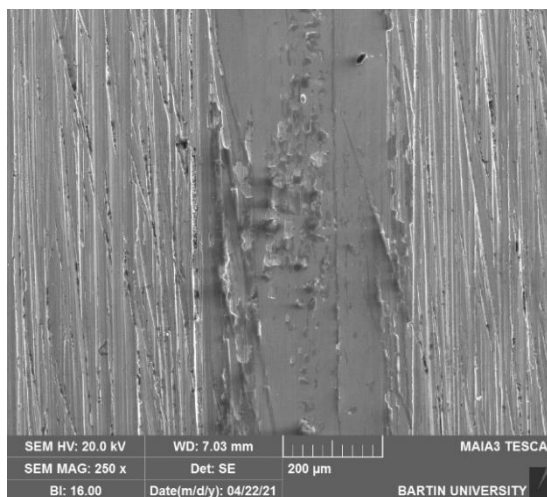


(d)

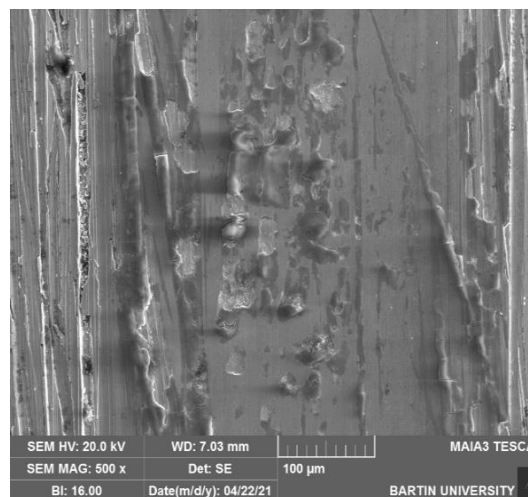
Şekil 9.36. 2 numaralı numune aşınma SEM görüntüleri



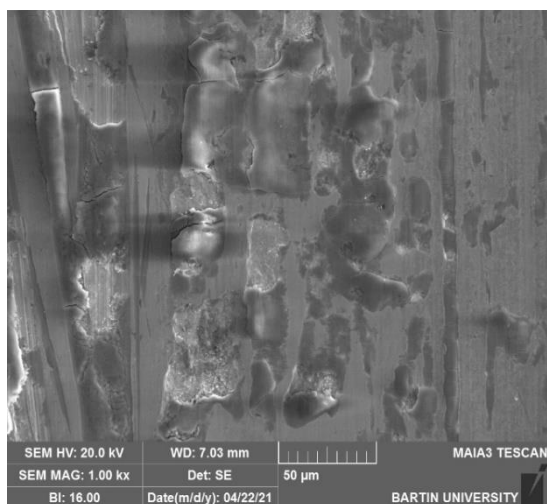
Şekil 9.37. 3 numaralı numune aşınma SEM görüntüleri



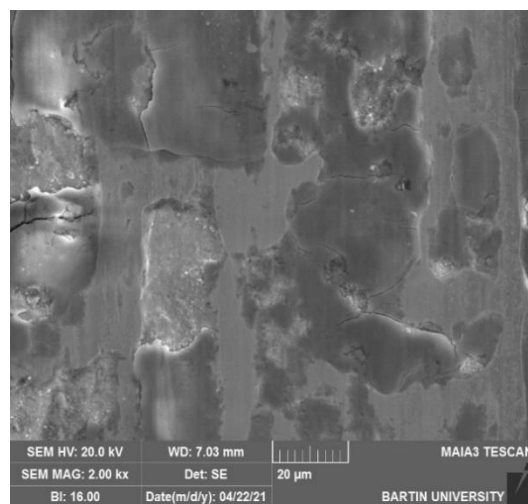
(a)



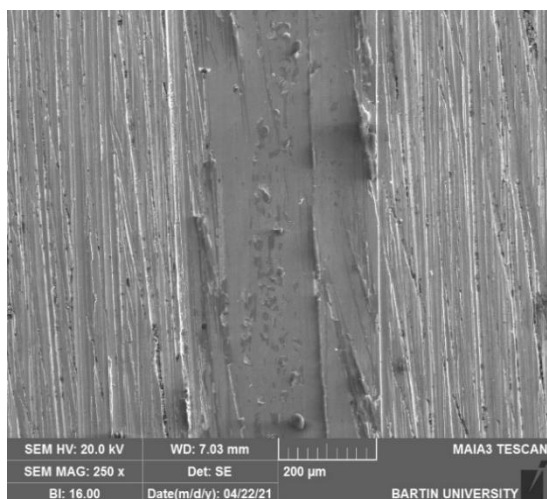
(b)



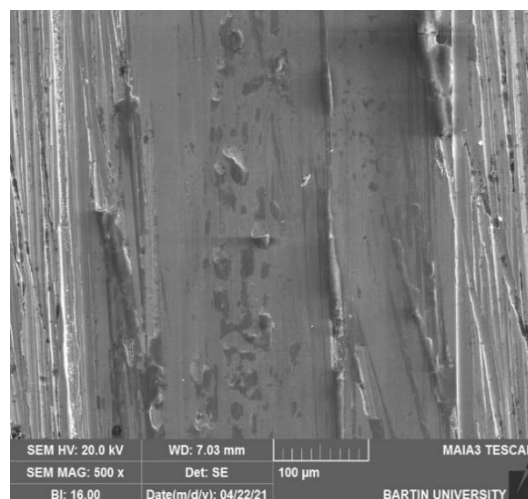
(c)



(d)

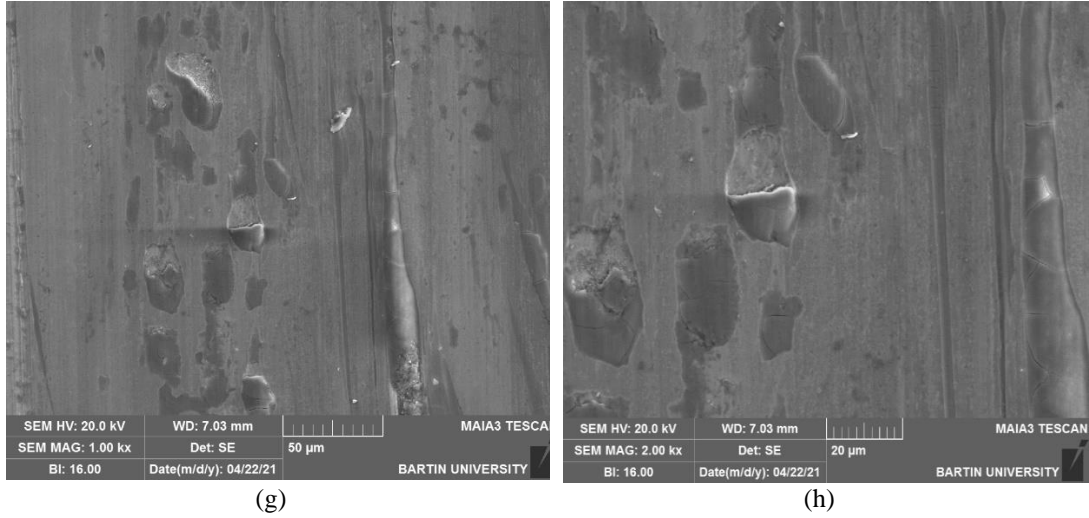


(e)



(f)

Devamı

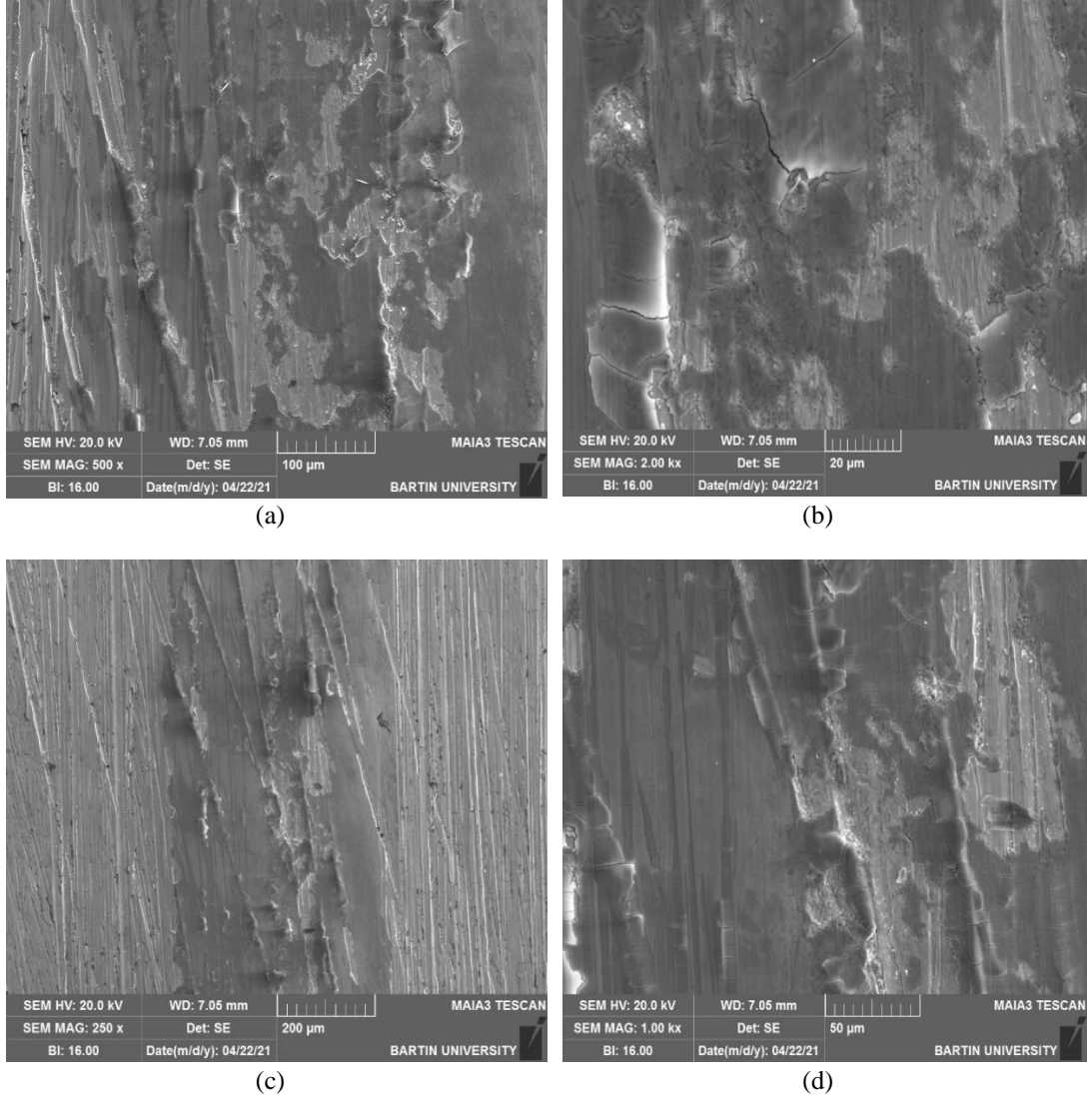


Şekil 9.38. 4 numaralı numune aşınma SEM görüntüleri

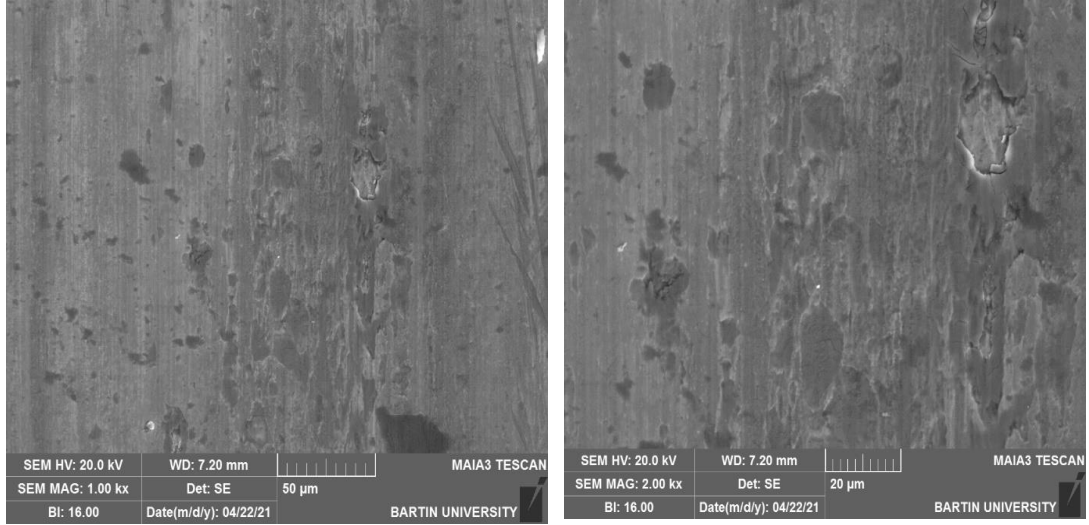
2, 3 ve 4 numaralı numunelerin aşınma sem mikro yapıları incelendiğinde benzer aşınma mekanizmalarına rastlanmıştır. Öncelikle tüm numunelerin yüzeylerinde yine sürtünme ve anlık ısı artışına bağlı olarak oksidasyon meydana gelmiştir. Ancak bir önceki numunede olduğu gibi temas yüzeyinin tümü oksitlenmemiş oksitler daha çok bölgesel olarak oluşmuştur. Oksit özellikleri alt yüzeyden farklı olduğu için yük ve nispi hareketin etkisi ile özellikle aşınma yönüne dik yönde yorulma çatlakları oluşmuştur. Ve bu bölgelerden zamanla delaminasyon tipi ayrılmalar görülmüştür. Delaminasyon tipi aşınmanın 4 mekanizması vardır;

- Yüzeyin plastik deformasyonu,
- Plastik deformasyon nedeniyle alt yüzeyde çatlak çekirdeklenmesi,
- Plastik deformasyon nedeniyle bu çekirdekli çatlaklardan çatlak yayılması,
- Gevşek aşınma tabakalarının oluşması ve yüzeyden ayrılması. Delaminasyona bağlı malzeme kaybı bu şekilde meydana gelmektedir.

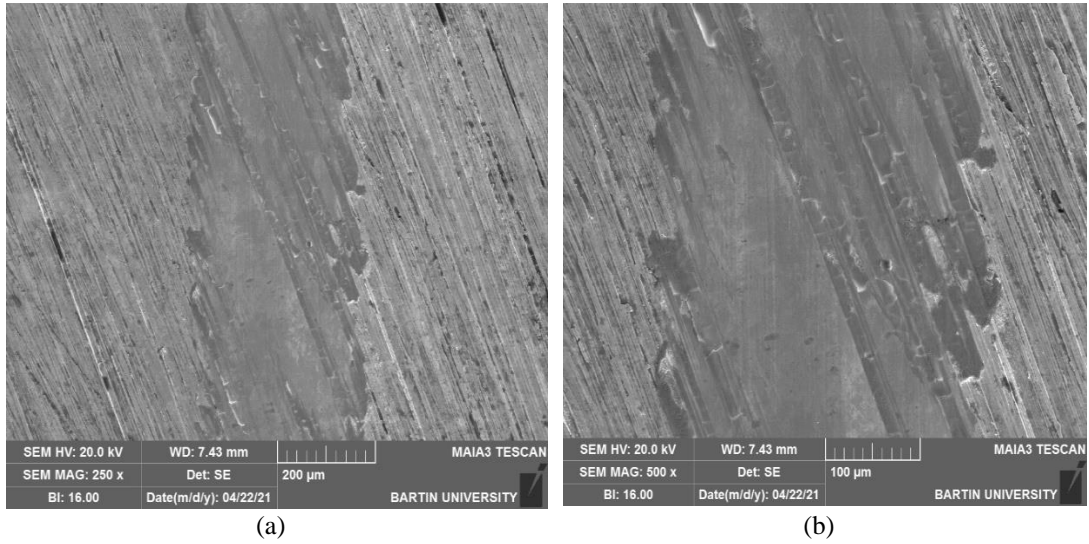




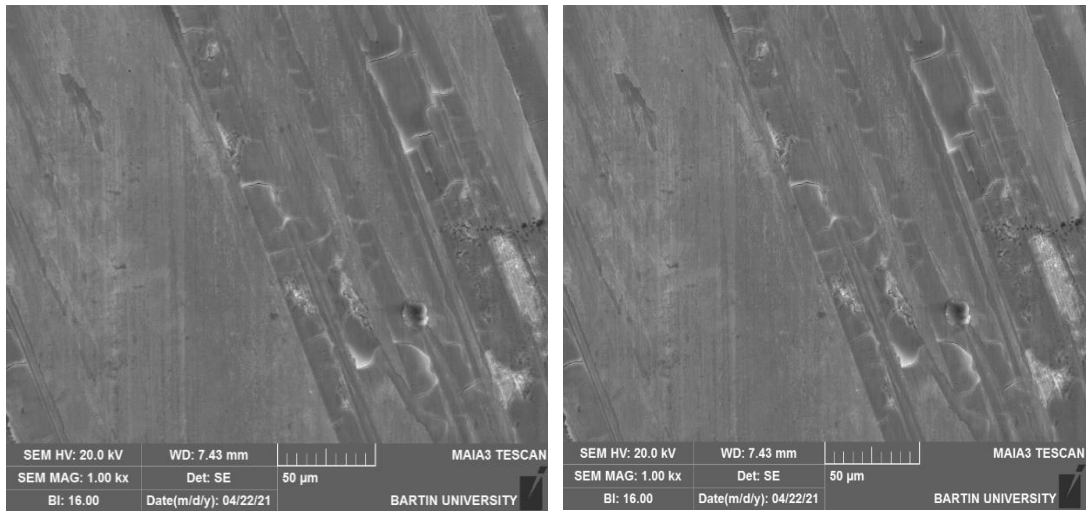
Şekil 9.39. 5 numaralı numune aşınma SEM görüntüleri



(a) (b)  
Şekil 9.40. 6 numaralı numune aşınma SEM görüntüleri



(a) (b)



(c) (d)  
Şekil 9.41. 7 numaralı numune aşınma SEM görüntüleri

5, 6 ve 7 numaralı numunelerde de yine 2,3,4 numaralı numune gruplarında görülen aşınma mekanizmaları görülmüştür. Oksidasyon sonrasında meydana gelen yorulma çatlakları ve aşınmanın devamıyla delaminasyon tipi ayrılma olduğu görülmektedir. Ancak fark olarak sadece oluşan oksit tabakalarının daha ince olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca 6 numaralı numunenin aşınma yüzeyinde diğerlerinde pek belirgin olmayan (ama muhtemelen var) abrazyon işaretleri de mevcuttur.

## BÖLÜM 10. DEĞERLENDİRME

Optik Mikroyapı: Ham malzemenin mikroyapısı ferrit matriste uniform olarak dağılmış minik alaşım karbürlerinden ibarettir. Küresel forma sahip bu karbürler çeliğin servise sunulmadan önce son işlem olarak küreselleştirme tavına tabi tutulduğunu göstermektedir.

Geleneksel ısıtıl işlem görmüş yani su verilmiş ve menevişlenmiş numuneler sertlik bazında üç grup halindedir. Sertlik farklılıkları menevişleme süresine bağlı olarak oluşturulmuştur. Her üç grubun mikroyapıları benzerdir: Temperlenmiş martensit. Bazı görüntülerde çok ince alaşım karbürleri de görülmektedir. Bunların yapıda bulunması herhangi bir mahsur yaratmaz, yeter ki küçük öbekler halinde bulunmasınlar (segregasyon). Optik mikrograflarda dönüşmemiş ostenit belirlenmemiştir.

Kriyojenik işlem görmüş alaşımlar da üç grup halindedir. Gruplar arasındaki fark kriyojenik işlem süreleridir. Bir grup  $-100^{\circ}\text{C}$ 'de 1 saat, ikinci grup 2 saat ve üçüncü grup 3 saat süreyle tutulmuştur. Sertlikler aynıdır. Bu alaşımların optik mikroyapıları da hem kendi içerisinde benzerdir, hem de geleneksel işlem gören numunelerinkilerle benzerdir: Temperlenmiş martensit yapısına sahiptirler. Tek tük minik küresel alaşım karbürleri de yapıda yer almaktadır, fakat kalıntı ostenit görülmemiştir.

SEM Görüntüleri: Ham malzemede alaşım karbürleri ferrit matriste çok bariz şekilde görülmektedir. Karbürler küresel formda olup ortalama boyutları 1 mikron mertebesindedir.

SEM ile yapılan mikroyapı incelemeleri optik mikroskop incelemelerini teyit etmektedir. Gerek geleneksel ısıtıl işlem görmüş numunelerin mikroyapıları ve gerekse

kriyojenik işlem görmüş numunelerin mikroyapıları hem kendi içlerinde hem de birbirleri ile benzer olup temperlenmiş martensitten ibarettir. Kimi numunelerde küresel alaşım karbürleri de mevcuttur; fakat dönüşmemiş ostenit görülememiştir.

Alaşım karbürleri ham malzemede vardır, ostenitleme işlemi esnasında çözünememiş tek tük karbür ısıtılma işlemi yapıldığında görülmektedir. Bunlar ısıtılma işlem süreçleri ile giderilemez, buna ihtiyaç da yoktur. Fakat alaşım karbürlerinin öbek oluşturması istenmez.

**Kırık Yüzeyleri:** Kırık yüzey incelemelerinin bazı karakteristikleri vardır:

- Kırık yüzeyleri düzdür, mikroskopik olarak bakıldığında belirgin sünek kırılma işareti yoktur. Klivaj kırılma tüm numunelerde hakimdir.
- Malzeme ince taneli olduğu için klivaj düzlemleri de görece küçüktür.
- 6 numaralı numune yani  $-100^{\circ}\text{C}$ 'de 2 saat sıvı azot ortamında tutulup ardından menevişlenen numune dışındaki numunelerin kırık yüzeyleri benzerdir. Bu numunede ise kırık yüzeyinde demir oksit birikimleri mevcuttur ve bu kirlilikler darbe enerjisinin düşük olmasına yol açmıştır, yani gevrekliği artırıcı bir etki göstermiştir. Bu numune de klivaj kırılma göstermiştir.

6 numaralı numunedeki kirlilikler tesadüfi bir olaydır, diğer numunelerde görülmemiştir veya varsa da kırılmayı hızlandıracak boyutta değildir.

**Darbe Deneyleri:** Geleneksel ısıtılma işlem gören numuneler ile kriyojenik işlem gören numunelerin Charpy darbe enerjileri önemli farklılıklar göstermemiştir. Bu da uygulanan kriyojenik işlemin çeliğin tokluğu üzerine önemli bir katkısı olmadığını göstermiştir. 6 numaralı numunenin darbe enerjisinin diğerlerinden oldukça daha düşük olduğu açık bir şekilde görülmektedir. Bunun nedeninin bu numunelerde demir oksit esaslı süreksizliklerin olduğu daha önce anlatılmıştı.

**Aşınma Deneyleri:** Deneylerde kullanılan çelik özellikle ekstrüzyon ve dövme kalıp uygulamalarında kullanıldığı için numuneler üzerinde aşınma deneyleri yapılmıştır.

Deney sonuçları sistematik bir dağılım göstermemiş olup kriyojenik işlem gören numunelerin geleneksel ısıtma işlemi uygulanmış numunelerden daha iyi aşınma özellikleri sergilediğini söylemek kolay değildir.

Aşınma deneyleri açısından bakıldığında, sürtünme katsayıları arasında açık bir ilişki bulunamamıştır. Yani, geleneksel işlem gören numuneler ile derin soğutma işlemi gören numunelerin sürtünme katsayısı değerleri, uygulanan işlemlerin sürtünme katsayısını düşürdüğü veya artırdığını söylemek için açık bir veri sağlamamıştır. Sürtünme katsayılarındaki farklılık muhtemelen numunenin yüzey kalitesine ve belki de aşınma yolu üzerinde mikroyapı parametrelerine (örn. alaşım karbürü olup olmadığına) bağlı olabilir. Benzer şekilde, aşınma mekanizmaları açısından hem geleneksel hem de kriyojenik işlem görmüş numunelerin oksidasyona bağlı delaminasyon ile aşınmanın gerçekleştiği görülmektedir. Dolayısıyla, aşınma mekanizmaları uygulanan ısıtma işlemine bağlılık göstermemektedir.

Literatür çalışmaları incelendiğinde kriyojenik sıcaklıklarda farklı bekletme sürelerinin, malzemelerin mekanik ve fiziksel özelliklerine etkilerinin incelendiği görülmüştür. Düşük sıcaklıkların ve bekletme sürelerinin etkisiyle kriyojenik işlem demir-karbon alaşımlarında ısıtma işlemi sonrası östenitin martenzite dönüşmesini sağladığı görülmektedir. Ek olarak hem demir-karbon alaşımlarında hem de tungsten karbür malzemelerde temperlemeden sonra ikincil sert karbür yapılarının çökmesini sağlamadığı anlaşılmaktadır. Mikro yapıda gerçekleşen bu değişimler malzemelerin sertlik ve aşınma direncini artırmakta ve bunun yanı sıra tokluk, kalıntı gerilme ve yorulma ömründe iyileşmeler sağlandığına dair bilgiler bulunmaktadır [13].

Malzemelerin sertlik, tokluk, süneklik, elastik modülü, akma-gerilme muakavemeti başta olmak üzere mekaniksel açıdan incelendiklerinde sıcaklığın azalmasının çoğu malzeme için bu özellikleri arttırdığı anlaşılmaktadır [63,64].

Kriyojenik işlemlerden sonra takım çeliklerinde östenit yapıdan martensit yapıya dönüşüm, ikincil karbür çökmesi ve mikro yapıdaki homojen karbür dağılımından dolayı takım çeliklerinin sertliği artmaktadır [65,66].

A.Sert'in çalışmasında, "AISI M2 takım çeliğinin değişik ısı işlemler sonrası mikro yapı ve tribolojik özelliklerindeki değişimini incelenmiştir ve bu amaçla, su verme + temperleme, su verme + derin kriyojenik işlem + temperleme, su verme + temperleme + derin kriyojenik işlem + temperleme şeklinde üç farklı ısı işlem prosesi uygulanmıştır. Mikro yapı sonuçlarına göre derin kriyojenik işlem sonrasında mikro yapıdaki karbür tanelerinin boyut ve dağılımlarında iyileşme olduğu belirlenmiştir. Üç farklı ısı işlem sonrasında elde edilen sertlik değerlerinde ise belirgin farklılıklara rastlanmamıştır. Ayrıca triboloji testleri sonrasında ise kriyojenik işlemler malzemelerin aşınma oranlarında ve sürtünme katsayılarında düşüş gözlenmiştir. Kriyojenik işlemden hemen önce uygulanan temperleme işleminin sürtünme katsayısını düşürücü etkisi olduğu belirlenmiştir."

AISI M2 çeliği ağ. %0,9 C içeren bir yüksek hız çeliğidir. Çelik ayrıca kuvvetli karbür yapıcı elementler (Cr, Mo, V ve W gibi) içermektedir. Bu tür yüksek karbonlu ve hatta yüksek oranda karbür yapıcı alaşım elementi içeren çeliklerde ısı işlem sonrasında önemli bir kısım ostenitin dönüşmeden kalması beklenen bir şeydir. Anılan çalışmada, XRD paternlerinde kalıntı ostenit görülmeyle beraber miktar analizi yapılmamıştır. Çalışmada, aşınma oranları ve sürtünme katsayılarındaki düşüş kriyojenik işlem sırasında oluşan ince karbürlere bağlanmıştır. Bu karbürler kalıntı ostenitin dönüşümüne bağlı olarak oluşur. Söz konusu çalışmada kriyojenik işlemin sertlik değerlerinde önemli bir değişikliğe yol açmadığı belirtilirken, literatürde kriyojenik işlemin sertliği de artırdığının kaydedildiği vurgulanmıştır.

Literatürde, kriyojenik işlemin sadece sertlik değerlerini değil diğer mekanik özellikleri de (akma ve çekme dayanımı gibi) artırdığı da ifade edilmektedir.

Kriyojenik işlemin mikro yapıyı değiştirdiği (kalıntı osteniti azaltıp ince karbürleri artırdığı), sertlik dahil mekanik özellikleri geliştirdiği, aşınma miktarını ve sürtünme katsayısını azalttığını gösteren bulguların doğru olduğu şüphesizdir [67].. Ancak dikkat edilirse, bu sonuçların tamamı kriyojenik işlemin yüksek karbonlu takım çeliklerine uygulanmasının sonuçlarıdır. Oysa bu çalışmada 1.2367 kalite sıcak iş takım çeliği kullanılmıştır. Sıklıkla vurgulandığı gibi, ısı işlem sonrasında bu çeliğin yapısında ne ciddi miktarda birincil alaşım karbürü vardır, ne de kriyojenik işlem sırasında martensite dönüşebilecek ve bu dönüşüm sırasında ince karbürlerin

ökemesine yol açacak derecede (ölçülebilir derecede) kalıntı ostenit bulunur. Dolayısıyla, çalışılan sıcak iş takım çeliğine kroyjenik işlem uygulanması gerekli değildir.



## BÖLÜM 11. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Sonuç olarak, 1.2367 numaralı sıcak iş takım çeliğine hem geleneksel ısıtma işlemi uygulanmış (su verme + menevişleme) hem de su verme sonrası kryojenik işlem (su verme+derin soğutma+menevişleme) uygulanmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda şu sonuçlara ulaşılmıştır:

- Farklı ısıtma işlem uygulamaları sonucunda numunelerin mikro yapılarında belirgin farklılıklar görülmemiştir,
- Farklı işlem uygulamaları numunelerin darbe enerjilerinde bariz değişiklik meydana getirmemiştir,
- Sürtünme katsayıları uygulanan işlemlere ait farklılıklar ortaya koymamıştır,
- İki farklı ısıtma işlem uygulaması sonucunda, numunelerin aşınma mekanizmalarında bir farklılık söz konusu değildir,
- Numunelerin aşınma miktarlarındaki farklılıklar sistematik değildir ve uygulanan ısıtma işlemleri ile ilişkilendirilememiştir.

Tüm bu incelemeler sonucunda, literatürde farklı sonuçlar olmakla beraber, bu çalışmada çıkan sonuçlar itibariyle, bulgularla da uyumlu olarak, 1.2367 sıcak iş takım çeliğine olağan kryojenik işlem uygulaması (su vermeyi takiben) malzemeye ilave bir üstünlük kazandırmamıştır ve uygulama yapmak avantaj sağlamayacaktır.

Literatürde, kryojenik işlemin farklı şekillerde uygulandığına dair çalışmalar da mevcuttur. Eğer arzu edilirse, bu tür farklı kryojenik işlem uygulamalarının etkisi incelenebilir.

## KAYNAKLAR

- [1] Asan, N.Ö., 2008. Sıcak İş Takım Çeliklerinde Hasar Oluşumu ve Önlemleri, Yüksek Lisans Tezi, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [2] Jha, A. R. (2006). Cryogenic technology and applications. USA: Elsevier Academic Press, 15-20.
- [3] Timmerhaus, K. D., Reed, R. P. (2007). Cryogenic engineering, fifty years of progress. USA: Springer, 20-25
- [4] Kayır, Y.Z., 2001. 1. Demir Çelik Sempozyumu ve Sergisi, Zonguldak.
- [5] Çarkıt, G., 2009. Plazma Nitrülenmiş H11 Sıcak İş Takım Çeliğinin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- [6] Schmolz Bickenbach Çelik A.ğ., 2009. Takım Çelikleri El Kitabı
- [7] Roberts, G., Krauss, G. and Kennedy, R., (1998). Tool Steels, Fifth Edition, ASM International, USA
- [8] Rossi B, E., Welding Engineering, 1954 Mcgraw Hill Book company, Inc
- [9] Erdoğan, M., Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri, Nobel Yayın Dağıtım.
- [10] Güleç, Ş. ve Aran, Ş., Malzeme Bilgisi, 1987 MBEAE Matbaası.
- [11] Balazsi Cs., Cınar F. S., Kasztovszky Zs., Cura M.E., Yesilcubuk A., Weber F., 2003. "Investigation of hot pressed C/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> nanocomposites", ISN'T IT Fourth International Symposium on Nitrides, Mons, Belgium.
- [12] Schmolz Bickenbach Çelik A.ğ., 2009. Takım Çelikleri El Kitabı
- [13] Zeytin, S., Metallerin Isıl İşlemi Ders Notları, Sakarya Üniversitesi, Sakarya 2014.
- [14] ASM Metals Handbook., 1990. Ninth Edition, Vol.3, "Properties and Selection, Stainless Steel, Tool Materials and Special-Purpose Metals"

- [15] Asil Çelik Teknik Yayınları, Mayıs 1990. "Takım Çelikleri", Cilt 7.
- [16] Quantum Takım Sanayi ürünleri, Kalıp Malzemeleri ile İlgili Teknik Bilgiler, V. Baskı, Temmuz 2005.
- [17] Arslan, F. K., Soğuk İş Takım Çeliklerinde Sıfırlatı İşlem Derecesinin Mekanik Özelliklere Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya 2010
- [18] Onur, C. ve Ğnem, B., 2003. AISI W1 Ve L2 Soğuk İş Takım Çeliklerinin Düşük Sıcaklıklarda (120°C) Menevişlenmesi İle Optimum Tokluğun Geliştirilmesi, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., 18, 109-124
- [19] Albaraz, Z., Isıl İşlem Parametrelerinin Ve Kimyasal Kompozisyonun Sıcak İş Takım Çeliklerinin Mekanik Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul 2010
- [20] ASM International Handbook Committee, (1989), ASM Handbook Volume 16 Machining, ASM International, Ohio.
- [21] Maili, I. Rabitsch, R. Liebfahrt, W. Makovec, H. ve Putzgruber, E., (2002). "New Powder Metallurgy High Speed Steel with Excellent Hot Hardness", 6th International Tooling Conference, 10-13 September 2002, Karlstad
- [22] Yapar, U., Arısoy, C. F., Basman, G., Yesilcubuk, S. A., Sesen, M. K., 2004. Influence of Boronizing on Mechanical Properties of EN-C35E Steel, Key Engineering Materials, Volume: 264-268
- [23] Yapar U., Basman G., Arısoy C.F., Yesilcubuk S.A.,Sesen M.K., 2003. Surface modification of EN-C35E steels by thermo-mechanical boronizing process and its properties, 8th. Conference and Exhibition of the European Ceramic Society, 29 June-3 July 2003, Istanbul, Turkey.
- [24] Yesilcubuk A., Oral Y.A., Alkoy S., Sesen M.K., 2002. Deposition of copper oxide thin film with reactive DC magnetron sputtering/PECVD technique on ntype silicon substrate, The 11th International Metallurgy and Material Congress, Istanbul, Turkey
- [25] Tooling Solutions For Tool Steels Selection Guidelines, Uddeholm & ASSAB
- [26] Çalgın, M., 1996. Bazı sıcak iş takım çeliklerinin yüksek sıcaklık aşınma davranışları, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [27] Taktak, ğ., 2007. Some mechanical properties of borided AISI H13 and 304 steels, Materials & Design, 28, 1836-1843

- [28] Mayer, S., Scheu, C., Leitner, H., Clemens, H. and Siller I., 2007. Influence of the Cooling Rate on the Mechanical Properties of a Hot-work Tool Steel, BHM., 152
- [29] Bhushan, B. (2001). Wear Mechanisms. Modern Tribology Handbook, (Vol.1, pp.273-299), Ohio
- [30] [http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=mechanisms\\_of\\_wear](http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=mechanisms_of_wear)  
Erişim tarihi 02.05.2021
- [31] Bhushan, B. (1999). Principles and Applications of Tribology, (pp.294-342), Canada.
- [32] Kovaříková, I., Szewczyková, B., Blaškoviř, P., Hodúlová, E., & Lechoviř, E. (2009). Study and characteristic of abrasive wear mechanisms. Materials Science and Technology. Institute of Production Technologies, Faculty of Materials Science and Technology, Slovak University of Technology.
- [33] Ratia, V. (2015). Behavior of Martensitic Wear Resistant Steels in Abrasion and Impact Wear Testing Conditions. Doctoral dissertation. Tampere University of Technology. Retrieved from <http://www.tut.fi/tutcris>.
- [34] Zeytin, S. ve Kurttepelı, H., TMMOB Met. Müh Oda. Çelik Seçimi Eđitimi, 2324 Mayıs 2008
- [35] Pye, D., Pye Metallurgical Consulting, Meadville.
- [36] Fuchs, K.D., Hot Work Tool Steels With Improved Properties for Die-Casting Applications, Edelstahl Witten-Krefeld GmbH, Quality Department Tool Steel, Germany
- [37] Asan N.Ö., Tekrarlanan Gaz Nitrasyon İşleminin AISI H13 Ekstrüzyon Kalıbının Kırılma Hasarına Etkisi, 7-9 Kasım 2007
- [38] Pek Otomotiv Ürün Katalođu
- [39] Steel, A., Handbook for Materials Research and Engineering, Volume 1 Fundamentals, Edited by Verein Deutscher Eisenhüttenleute
- [40] Osmanlı Alaşımli Çelikler San. Ve Tic. Ltd. Şti., Takım Çeliklerinde Alaşım Elementlerinin Etkisi.
- [41] Ay, İ., Bahçeşehir Üniversitesi, Sıcak İş Takım Çeliklerine Uygulanan Isıl İşlemler, 1997

- [42] Jha, A. R. (2006). Cryogenic technology and applications. USA: Elsevier Academic Press, 15-20
- [43] Timmerhaus, K. D., Reed, R. P. (2007). Cryogenic engineering, fifty years of progress. USA: Springer, 20-25
- [44] Sitting, M., Kidd, S. (1963). Cryogenics, research and applications. New York: D. Van Nostrand Company, 4-209.
- [45] Muldrew, K., McGann, L. E. (1994). The osmotic rupture hypothesis of intracellular freezing injury. *Biophys J.*, 66, 532-541.
- [46] Sweeney, T. P. (1986). Deep cryogenics: The great cold debate. *Cryogenics*, 18(2), 28-32
- [47] Levine, J. (2001). Cryo processing equipment. *Heat Treating Progress*, 2(1), 42-52
- [48] Vaccari, J. A. (1986). Deep freeze improves products. *American Machinist & Automated Manufacturing*, 130(3), 90-92
- [49] Carlson, E. A. (1991). Cold treating and cryogenic treatment of steel. *ASM International*, 4, 203-206.
- [50] Boyles, C. M. (2002). Beecool, *Cutting Tool Engineering*, 54(4), 50-54.
- [51] Chillar, R., Agrawal S. C. (2005, 29 August – 2 September,). Cryogenic treatment of metal parts. Transactions of the International Cryogenic Materials Conference (ICMC), Keystone, Colorado
- [52] Reitz, W., Pendray, J. (2001). Cryo processing of Materials: A review of current status. *Materials and Manufacturing Processes*, 16(6), 829-840
- [53] Moore, K., Collins, D. N. (1993). Cryogenic treatment of three heat-treated tool steels. *Key Engineering Materials*, 86-87, 47-54
- [54] Collins, D. N., Dormer, J. (1997). Deep cryogenic treatment of a D2 cold-work tool steel. *Heat Treatment of Metals*, 24(3), 71-74.
- [55] Collins, D. N. (1996). Deep cryogenic treatment of toolsteels: A review. *Heat Treatment of Metals*, 23, 40-42
- [56] Collins, D. N. (1998). Cryogenic treatment of toolsteels. *Advanced Materials & Processes*, 154(6), 23-29.
- [57] Yun D., Xiaoping, L. and Hongshen, X. (1998). Deep cryogenic treatment of high speed Steel and its mechanism. *Heat Treatment of Metals*, 25(3), 55-59.

- [58] Mohan, L. D., Renganarayanan, S. and Kalanidhi, A. (2001). Cryogenic
- [59] Carlson, E. A. (1991). Cold treating and cryogenic treatment of steel. ASM International, 4, 203-206
- [60] Nordquist, W. N. (1953). Low temperature treatment of metals. Tooling and Production, 72-100
- [61] Molinari, A., Pellizzari, M., Gialanella, S., Straffelini, G. and Stiasny, K. H. (2001). Effect of deep cryogenic treatment on the mechanical properties of tool steels. Journal of Materials Processing Technology, 118, 350-355
- [62] Braton, N. R. (1980). Cryogenic recycling and processing. Florida: CRC Press, 14-23.
- [63] Lady, E. R. (1965, 24 May – 4 June). Cryogenic engineering, a two-week intensive course for engineers and scientists. The University of Michigan Engineering Summer Conferences, Ann Arbor, Michigan.
- [64] Eldridge, E. A., Deem, H. W. (1960). Report on physical properties of metal and alloys from cryogenic to elevated temperatures. Philadelphia: American Society for Testing Materials, 24-28
- [65] Çiçek, A., Çetin, A., Takım Çeliklerinin Kriyojenik İşlemi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 2016
- [66] Arslan, K., Şelte, A., Takım Çeliklerinde Sıfırlı İşlem Mekanizması, TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası, Teknik Yazı
- [67] Abdullah, Sert, AISI M2 Takım Çeliğinin Mikroyapısı ve Mekanik Davranışları Üzerine Derin Kriyojenik İşlemin ve Temperlemenin Etkisi, DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 22 (66), 801-811, 2020.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı :Kübra ELBEYİOĞLU

### ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Sakarya Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Metalurji ve Malzeme Mühendisliği	Devam Ediyor
Lisans	Sakarya Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Metalurji ve Malzeme Mühendisliği	2015
Lise	İntaş Lisesi	2010

### İŞ DENEYİMİ

Yıl	Yer	Görev
2017-Halen	Intertek Kalite Servisleri	Proje Mühendisi
2015-2016	Ürosan Mobilya A.Ş	Kalite Mühendisi

### YABANCI DİL

İngilizce