



**BORLU ÇELİKLER VE MİKRO ALAŞIMLI ÇELİKLERE UYGULANAN
TEMPERLEME VE KRİYOJENİK İŞLEMİN MİKROYAPI VE
MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Ömer Faruk KAPLAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ARALIK 2022

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Ömer Faruk KAPLAN

30/12/2022

BORLU ÇELİKLER VE MİKRO ALAŞIMLI ÇELİKLERE UYGULANAN TEMPERLEME VE KRİYOJENİK İŞLEMİN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Ömer Faruk KAPLAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2022

ÖZET

Borlu çelikler, aşınma direnci yüksek ve sertleşebilme kabiliyeti ile ön plana çıkmış bir çeliktir. Mikro alaşımlı çelikler ise düşük oranda, vanadyum, niyobyum ve titanyum ile birlikte düşük maliyette yüksek tokluk, kaynaklanabilirlik, yüksek korozyon direnci ve sertleşebilirliğe önemli etkiler sağlamaktadır. Bu çalışmada sıcak dövme işlemi uygulanmış olan 33MnCrB5-2 borlu çeliğin ve 38MnSiVS5 mikro alaşımlı çeliğe kriyojenik işlem ve temperleme ısı işlemi uygulanarak mekanik olarak sertlik, darbe ve aşınma testi yapılmıştır. Mikroyapı analizleri tarama elektron mikroskobu (SEM) ve optik mikroskop (OM) yardımı ile incelenmiştir. Enerji-dağıtıcı X-ışını spektrometresi (EDS, IXRFSys.) ile ısı işlemleri sonrası mikroyapıdaki farklı bölgelerden element dağılımları analiz edilmiştir. Uygulanan kriyojenik işlem ve temperleme ısı işleminin çökelti dağılımına ve kırınım olduğu düzlemlere etkisini incelemek için X-Işını Kırınım yöntemi (XRD) kullanılmıştır. Bu analiz sayesinde numunelerde meydana gelen dislokasyon yoğunlukları hesaplanarak mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Dislokasyon yoğunluğunun uygulanan kriyojenik işlem ve temperleme ısı işlemi ile nasıl değiştiği ve mekanik özellikler ile ilişkisi araştırılmıştır. Yapılan analizler sonucu ana malzemelere temperleme uygulanmadan sadece kriyojenik işlem uygulandığında sertlik değerlerinin her iki grup malzemede de yaklaşık % 6 azaldığı görülmüştür. Temperleme ısı işlemi sonrası uygulanan kriyojenik işlem ile darbe ve aşınma dayanımının yaklaşık % 50 arttığı gözlemlenmiştir.

Bilim Kodu : FYL-2021-7393

Anahtar Kelimeler : Borlu çelikler, vanadyum mikroalaşımlı çelikler, aşınma, sertlik

Sayfa Adedi : 61

Danışman : Prof. Dr. Bülent BOSTAN

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF TEMPERATURE AND CRYOGENIC
PROCESSING ON MICROSTRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF
BORON STEELS AND MICRO ALLOY STEELS

(M. Sc. Thesis)

Ömer Faruk KAPLAN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2022

ABSTRACT

Boron steels are a steel with high wear resistance and hardenability. Micro-alloyed steels, on the other hand, provide significant effects on high toughness, weldability, high corrosion resistance and hardenability at low rates, together with vanadium, niobium and titanium. In this study, mechanical hardness, impact and wear tests were carried out by applying cryogenic treatment and tempering heat treatment of 33MnCrB5-2 boron steel and 38MnSiVS5 micro-alloyed steel, which were hot forged. Microstructure analyses were examined with scanning electron microscope (SEM) and optical microscope (OM). Element distributions from different regions in the microstructure were analysed after heat treatment with energy-dispersive X-ray spectrometry (EDS, XRF Sys.). X-Ray Diffraction method (XRD) was used to examine the effect of applied cryogenic treatment and tempering heat treatment on the precipitation distribution and diffraction planes. Thanks to this analysis, the effect of dislocation densities in the samples was investigated. How the dislocation density changes with the applied cryogenic treatment and tempering heat treatment and its relationship with mechanical properties were investigated. As a result of the analyses made, it was observed that the hardness values of both groups of materials decreased by an average of 6% when only cryogenic treatment was applied to the main materials without applying tempering. It was observed that impact and abrasion resistance increased by 50% on average with the cryogenic treatment applied after the tempering heat treatment.

Science Code : FYL-2021-7393

Key Words : Boron steels, vanadium micro-alloy steels, wear, hardness

Page Number : 61

Supervisor : Prof. Dr. Bülent BOSTAN

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim süresinde, araştırmalarım ve çalışmalarım tüm tecrübelerini ve bilgi birikimlerini benimle paylaşan, yol gösteren ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen tez danışmanım Prof. Dr. Bülent BOSTAN hocama yoluma ışık tuttuğu, sabırla ve özenle verdiği emekler için teşekkür ederim.

Tez çalışmalarım esnasında gerek literatür gerekse deneysel anlamda yaptığım çalışmalarda birikimlerini ve deneyimlerini benimle paylaştığı ve gösterdiği özen için, desteklerini her daim hem fiziki hem de manevi olarak benden esirgemeyen Öğr. Gör. Gözde ALTUNTAŞ'a teşekkür ederim.

İş hayatında bulunduğum süre zarfında bana zaman yaratan, maddi ve manevi desteğini esirgemeyen tüm tecrübelerini benimle paylaşan ve beni destekleyen Makine Mühendisi Hakan Cihan DOĞAN' a teşekkür ederim.

Yaşamım boyunca benden desteğini esirgemeyen, bugünlere gelmemdeki en büyük emeğe sahip olan, maddi veya manevi olarak koşulsuz şartsız yanımda olan değerli aileme çok teşekkür ederim.

Yüksek Lisans çalışmamız FYL-2021-7393 numaralı Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle bu çalışmayı destekleyen Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi birimine teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. ÇELİK	3
2.1. Çeliklerin Sınıflandırılması.....	3
2.1.1. Düşük karbonlu çelikler	5
2.1.2. Orta karbonlu çelikler	5
2.1.3. Yüksek karbonlu çelikler	5
2.1.4. Alaşımli çelikler	5
2.1.5. Mikroalaşımli çelikler	6
2.1.6. Borlu çelikler.....	7
2.2. Alaşım Elementlerinin Etkisi	8
3. ÇELİKLERE UYGULANAN ISIL İŞLEMLER	15
3.1. Fe-C Denge Diyagramında Fazlar	17
3.2. Isıl İşlem Çeşitleri	18
3.2.1. Tavlama.....	18
3.3. Sertleştirme	20
3.4. Sertleşebilirlik	20

	Sayfa
3.5. Sertleştirme Çeşitleri	21
3.5.1. Suda sertleştirme	22
3.5.2. Sodyumhidroksit ve tuz çözeltilerinde sertleştirme	23
3.5.3. Yağda sertleştirme.....	24
3.5.4. Havada sertleştirme	24
3.5.5. Sıcak banyoda sertleştirme.....	24
3.6. Temperleme.....	25
3.7. Kriyojenik İşlem.....	27
4. METALLERE PLASTİK ŞEKİL VERME	29
4.1. Haddelme.....	29
4.2. Ekstrüzyon.....	29
4.3. Dövme	29
5. TEZ ÇALIŞMASININ LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	31
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	35
6.1. Malzeme	35
6.2. Dövme İşlemi	35
6.3. Kumlama	37
6.4. Manyetik Partikül İle Malzeme Muayene	37
6.5. Isıl İşlem.....	38
6.5.1. Temperleme işlemi.....	38
6.5.2. Kriyojenik İşlem.....	38
6.6. Mikroyapı Analizi	39
6.7. Optik Mikroskop	41
6.8. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)	41
6.9. XRD Analizi.....	42
6.10. Sertlik Testi	42

	Sayfa
6.11. Çentik Darbe Testi	43
6.12. Aşınma Testi	43
7. DENEYSEL SONUÇLAR.....	45
7.1. Mikroyapı İncelemeleri	45
7.2. XRD Sonuçları	50
7.3. Sertlik Test Sonuçları	53
7.4. Darbe Test Sonuçları	54
7.5 Aşınma Test Sonuçları	54
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	55
8.1. Sonuçlar.....	55
8.2. Öneriler	55
KAYNAKLAR	57
ÖZGEÇMİŞ	61

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Alaşım elementleri üst sınır değerleri.....	4
Çizelge 2.2. Alaşım elementlerinin mekanik özellik üzerine etkileri.....	9
Çizelge 6.1. 33MnCrB5-2 malzemesinin kimyasal bileşimi	35
Çizelge 6.2. 38MnSiVS5 malzemesinin kimyasal bileşimi.....	35
Çizelge 7.1. Numunelerin kristalite boyutu ve dislokasyon yoğunluğu değerleri.....	53
Çizelge 7.2. Numunelerin darbe tokluğu değerleri.....	54
Çizelge 7.3. Numunelerin aşınma testi sonrası 1000 metrede ağırlık kaybı değerler.....	54

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Çeliklerin sınıflandırılması	4
Şekil 2.2. Vanadyumun mikroalaşımli çelik üzerindeki etkisi	7
Şekil 2.3. Cr-Fe faz diyagramı.....	11
Şekil 3.1. Isıl işlem prosesi	15
Şekil 3.2. Fe-C denge diyagramı.....	16
Şekil 3.3. Isıl işlem tablosu	18
Şekil 7.1. Numunelerin XRD grafikleri (a) 33Mn, (b) 33Mn+K, (c) 38Mn, (d) 38Mn+K, (e) 33Mn+T, (f) 33Mn+TK, (g) 38Mn+T, (h) 38Mn+TK.....	51
Şekil 7.2. Numunelerin makro sertlik değerleri.....	53

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Hammadde, dövülmüş malzeme ve çapağı	30
Resim 6.1. Isıtma bobini	36
Resim 6.2. İndüksiyon cihazı.....	36
Resim 6.3. Dövme tezgâhı	36
Resim 6.4. Kumlama cihazı	37
Resim 6.5. Manyetik partikül ile muayene cihazı.....	37
Resim 6.6. Isıl işlem fırınları (Ön ısıtma, östenitleme, temperleme).....	38
Resim 6.7. Kriyojenik cihazı	39
Resim 6.8. Kesme cihazı.....	39
Resim 6.9. Bakalite alma cihazı.....	40
Resim 6.10. Zımparalama ve parlatma cihazı.....	40
Resim 6.11. Optik mikroskop	41
Resim 6.12. Taramalı elektron mikroskobu (SEM).....	41
Resim 6.13. XRD Analiz Cihazı.....	42
Resim 6.14. Qness marka makro sertlik test cihazı	42
Resim 6.15. Çentik darbe cihazı	43
Resim 6.16. Aşınma cihazı	43
Resim 7.1. Numunelerin optik mikroskop mikroyapıları (a) 33Mn, (b) 33Mn+K, (c) 38Mn, (d) 38Mn+K, (e) 33Mn+T, (f) 33Mn+TK, (g) 38Mn+T, (h) 38Mn+TK	46
Resim 7.2. Numunelerin SEM mikroyapıları (a) 33Mn, (b) 33Mn+K, (c) 38Mn, (d) 38Mn+K, (e) 33Mn+T, (f) 33Mn+TK, (g) 38Mn+T, (h) 38Mn+T	48
Resim 7.3. Kriyojenik uygulanan numunelerin EDS analizleri.....	50

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
Al	Alüminyum
C	Karbon
Co	Kobalt
Cr	Krom
Fe	Demir
m³	Metreküp
Mn	Mangan
Mo	Molibden
MPa	Megapaskal
N	Azot
Ni	Nikel
P	Fosfor
PPM	Milyonda bir
Si	Silisyum
Ta	Tantal
Ti	Titanyum
V	Vanadyum
Vb	Vebenzeri
W	Wolfram

Kısaltmalar	Açıklamalar
HMK	Hacim Merkezli Kübik
TTT	Time-Temperature-Transformation
YDDA	Yüksek Dayanımlı Düşük Alaşımlı
YMK	Yüzey Merkezli Kübik

1. GİRİŞ

Günümüzde birçok yeni malzemenin sürekli gelişmesine rağmen, çelik hala günümüzün en güvenilir, en çok kullanılan ve en önemli malzemelerinden biridir. Üretim sürecinde kimyasal bileşimine ve termomekanik işlem geçmişine bağlı olarak, mekanik özellikleri çok çeşitli mukavemet, tokluk ve sünekliği kapsayacak şekilde muazzam ölçüde değişebilir. Demir ve çeliklerin endüstride kullanılan alaşımların ağırlığına göre %80'den fazla olması şaşırtıcı değildir.

Çelik terimi birçok farklı demir alaşımı için kullanılır. Bu alaşımlar hem yapılaş şekilleri hem de demire eklenen malzemelerin oranları bakımından farklılık gösterir. Bununla birlikte, tüm çelikler az miktarda karbon ve manganez içerir. Başka bir deyişle, çeliğin kritik sıcaklığının üzerinde sertleşen demir, karbon ve diğer bazı elementlerin kristalimsi bir alaşımı olduğu söylenebilir. Çelikler düz karbon, paslanmaz çelik, alaşımlı çelik gibi birkaç türden oluşmaktadır.

Sanayide zamanla gelişen teknoloji sayesinde malzemelere olan bağlılık artış göstermektedir. Buna bağlı olarak talaşsız imalat yöntemi kullanılarak elde edilen malzemedeki kayıpları azaltmak, tasarruf sağlamak için yeterli olmamaktadır. Metal özelliklerini iyileştirmek bu aşamada önem kazanmaktadır. Bu durumda alaşım elementi ilavesi, ısıtıl işlem ve kaplama gibi yöntemler kullanılmaktadır. Ağır sanayi, makine imalatı gibi işlemlerde çelik diğer malzemelerden daha çok öne çıkmaktadır. Bunun sebebi üretici için çelik malzemesinin geliştirilmesinde daha çok çalışma yapılmasıdır. Daha önce yapılan ar-ge çalışmalarıyla çelik malzemesinin mekanik özellikleri bakımından iyileştirilmesinin mümkün olduğu gözlemlenmiştir. Malzeme homojenliğinin yükseltilmesi ile emniyet katsayısının azaltılması olasıdır. Malzemedeki değer kaybı olmadan ve malzemenin ıslah edilmiş olarak kullanılması konstrüksiyon ağırlığını düşürür. Bu aşamada alaşım elementi ilavesi bir çözüm olmaktadır ancak alaşımların maliyetlerinin fazla olması buna sınırlama getirmektedir. Metal malzemelerde kullanım avantajı sağlanması bakımından homojenlik ve dayanımın yanı sıra korozyon ve aşınma dayanımı da önemlidir. Endüstriyel makinelerde gerçekleşen aşınmanın önüne geçilmesi için yüzey işlemlerine ağırlık verilmektedir. Bu yüzey işlemlerine ilave olarak borlama, plazma püskürtme veya gaz fazından sert madde çökertilmesi gibi yeni yöntemler eklenmektedir. Aşınmanın önüne geçilmesi için aşınma dayanımı yüksek malzemelerin kullanımı giderek artmaktadır.

Malzemenin içerdği fazlar mekanik özellikler üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu çalışmada başlangıçta kırılğan fazlara sahip 33MnCrB5-2 ve 38MnSiVS5 çeliklere su verme işlemi, sonrasında ise temperleme ve kriyojenik işlemler uygulanarak malzemenin sertlik, aşınma, mukavemet ve tokluk değerlerinin arttırılması amaçlanmıştır. İlk olarak malzeme demir-sementit diyagramında östenitleme sıcaklığına kadar ısıtılmıştır. Östenitleme sıcaklığında bekletilen çeliğin kafes yapısı değiştirilerek östenitik yapı elde edilmiştir. İşlem esnasında oksidasyon ve dekarbürizasyonun önüne geçebilmek için koruyucu gaz kullanılmaktadır. Soğutma aşamasında çelik istenilen sertlik değerinin elde edilmesi için soğuma eğrisine uygun bir şekilde yağa daldırılarak hızlı soğutmaya tabi tutulur. Bunun sonucunda çeliğin içerdği faz östenitik yapıdan martenzitik yapıya dönüşür. Martenzitik yapıya dönüşen çelik maksimum sertliğe ve yoğun gerilimlere sahip olur. Yağda soğutulan malzemeye daha sonra temperleme işlemi, sıcaklık ve süre göz önünde bulunarak gerçekleştirilir. Temperleme işlemiyle malzeme kırılğanlığı minimum seviyeye indirilerek içyapıda oluşan gerilimler giderilir. Bu işlem sonrası çelikte tokluk değeri arttırılmakta ve sertlik değeri düşürülmektedir.

Bu çalışmada, literatürde ilk defa pulluk uç demirlerinde kullanılan 33MnCrB5-2 ve mikro alaşımlı çelik olarak adlandırılan 38MnSiVS5 malzemesi temperleme ısıl işlemi öncesi ve sonrası kriyojenik işlem yapılarak aşınma dayanımı, darbe tokluğu ve sertlik gibi mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır. Mekanik özellikler ile dislokasyon yoğunluğu arasındaki bağıntı araştırılmıştır.

2. ÇELİK

Demir sementit denge diyagramına göre içerisinde ağırlıkça %0,02 ile %2,3 C bulunduran demir alaşımlarına çelik denilmektedir. Çelikler bileşimlerine göre alaşımlı ve alaşımsız olarak ayrılmaktadır. Bu malzemeler dövülebilme yetenekleri, kırılma dirençleri, termal işlem özellikleri, mekanik işlenebilirlik ve su verilebilirlik özellikleri sayesinde kullanım alanı olarak önemli bir yere sahiptir. Çelikler dökme ve dövme olarak iki şekilde imal edilebilmektedir.

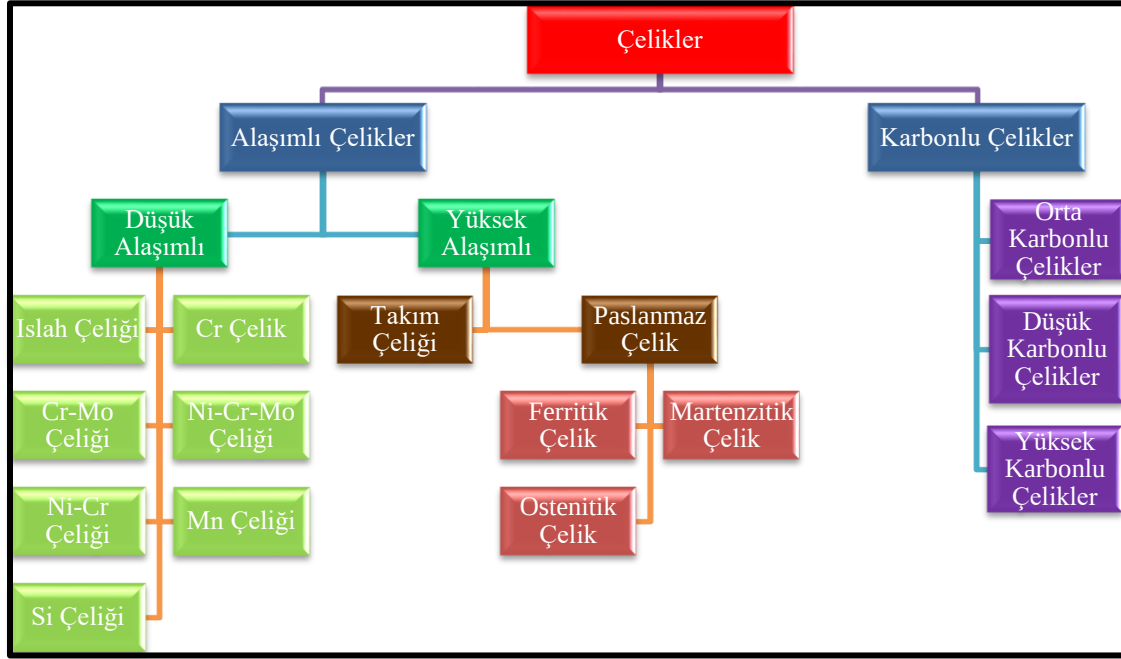
Çelik $7,850 \text{ g/cm}^3$ yoğunluğa sahiptir Çeliğin erime noktası 1520°C 'dir. Bu ergime sıcaklığı çoğu metalden yüksektir. Çelik 20°C 'de metre başına μm cinsinden doğrusal genleşme katsayısı 11,1'dir. Bu kimyasal reaksiyonda malzeme içinde karbon miktarı 2,3'ün üzerine artarsa dökme demir olarak adlandırılır. Çeliğin kimyasal yapısında baş element olan demir yeryüzünde oldukça fazla olan bir elementtir. Bu skalada demir ve karbon arasında oluşan kimyasal bağ sonucu, ortaya oldukça kuvvetli bir yapı meydana gelir. Oluşan kafes şeklindeki mikroyapı çeliğin mekanik özellikleri olarak adlandırdığımız mukavemet ve sertlik gibi özelliklerin ortaya çıkarılmasında oldukça etkilidir. Piyasadaki bütün çelikler yapı olarak demir ve karbon içerse de farklı çelik türlerinin kimyasal yapısında farklı miktarlarda elementler bulundurulur. Bu elementlere örnek olarak nikel, molibden, manganez, vanadyum, titanyum, bor ve kobalt gibi elementler verilebilir.

Yüksek çekme mukavemeti ve düşük maliyeti nedeniyle çelik; binalarda, altyapı elemanlarında, çeşitli teçhizatlarda, gemilerde, trenlerde, arabalarda, makinelerde, elektrikli cihazlarda, silahlar gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır [1].

2.1. Çeliklerin Sınıflandırılması

Çelikler, içerdikleri karbon miktarı ve yapısında bulundurdıkları alaşım elementlerine göre sınıflandırılmaktadır. Çeliğin yapısındaki karbon ve alaşım elementi miktarları karakteristik özelliğinin belirlenmesinde en önemli rolü oynamaktadır. Çelik malzemeler aşağıda şekil 2.1'de gösterildiği gibi bileşim bakımından sınıflandırılmasının yanı sıra üretim biçimi, mikroyapısı, mukavemet değerleri, gerçekleştirilen son işlem, dayanım seviyesi ve uygulanan ısıtıl işlem yöntemleri gibi birçok alanda da sınıflandırılmaktadır.

Sınıflandırmadaki temel amaç ortak özellikler göz önünde bulundurularak gruplandırma ile daha kolay incelenebilir hale getirmektir [2].



Şekil 2.1. Çeliklerin sınıflandırılması [2]

Sade karbonlu çelikler temel olarak içerisinde demir, karbon ve mangan içermektedir. Bu çelikler tablo 2.1’de belirtilen üst sınır değerler kadar alaşım elementleri de içermektedir [2].

Çizelge 2.1. Alaşım elementleri üst sınır değerleri

Elementler	Silisyum	Mangan	Fosfor	Bakır	Kükürt	Alüminyum
% Ağırlık	0.5	0.8	0.09	0.5	0.06	0.1

Çelikleri alaşımlandırmanın temel sebebi, sade karbonlu çeliklerin sağlayamadığı özellikleri kazandırmaktır.

Sade karbonlu çeliklerin içerdikleri karbon miktarı ile yapısal özellikleri doğrusal ilişki içerisinde. Karbon miktarının artışı çelikte sertlik, akma ve çekme dayanımını artırırken darbe dayanımı, sünekliği azaltmaktadır. Sade karbonlu çelikler karbon içeriğine göre üç gruba ayrılmaktadır.

1. Düşük karbonlu çelik (% 0,01-0,25 karbon)
2. Orta karbonlu çelik (% 0,25-0,65 karbon)
3. Yüksek karbonlu çelik (% 0,65-2,3 karbon) [3].

2.1.1. Düşük karbonlu çelikler

Demire benzer özelliklere sahiptir. Karbon içeriği arttıkça metal daha sert ve daha dayanıklı hale gelir ancak daha az süneklik gösterir ve kaynaklanması daha zordur. Daha yüksek karbon içeriği erime noktasını düşürür ve sıcaklık malzemenin akma dayanımını değiştiremez. Çelikler içerisinde az miktarda karbon içerdiği için kolayca şekillendirilebilmektedir ve bu grubu genellikle sac, şerit gibi haddelenmiş ürünler oluşturmaktadır.

2.1.2. Orta karbonlu çelikler

Bu çeliklerin kimyasal yapısındaki karbon miktarı artışı düşük karbonlu çeliklerden daha sert olmasını sağlar. Isıl işlem ile mekanik özellikleri ve işlenebilirlikleri perlit hacim oranı daha yüksek olduğu için iyileştirilebilmektedir. Bu çelikler özellikle işleme veya dövme yüzey sertliğinin istendiği alanlarda kullanılmaktadır. Bu yerlere şaftlar, akslar, dişliler örnek verilebilir.

2.1.3. Yüksek karbonlu çelikler

İçeriğindeki karbon oranı arttıkça sertlikleri de artmaktadır ve karbon çelikleri içerisinde en mukavemetli karbon çelikleri grubunu oluşturmaktadır. Yüksek karbonlu çelikler sade karbonlu çelikler içerisinde en düşük sünekliğe sahiptirler. Bu çelikler yüksek mukavemet ve aşınma direncine ihtiyaç duyulan el aletleri, yay malzemeleri, yüksek mukavemetli teller ve benzeri yerlerde kullanılmaktadır [4].

2.1.4. Alaşımli çelikler

Düşük alaşımli ve yüksek alaşımli olarak ikiye ayrılmaktadır. Alaşım elementi miktarı %5'in altında olan çeliklere düşük alaşımli çelik, %5'in üzerinde olan çeliklere ise yüksek alaşımli çelik denilmektedir [5]. Düşük alaşımli çelikler sade karbonlu çelikler ile neredeyse aynı

özellikleri göstermektedir. Birbirlerine çok benzemesine rağmen bu iki çeliği ayıran temel faktör sertleşebilme kabiliyetleridir. Çeliklerde alaşım ilavesinin nedenleri;

- Çekme dayanımını arttırmak
- Korozyon dayanımını arttırmak
- Yüksek sıcaklıklarda mukavemeti arttırmak
- Sertleşebilirlik ve tokluğu arttırmak
- Manyetikliği arttırmak [3].

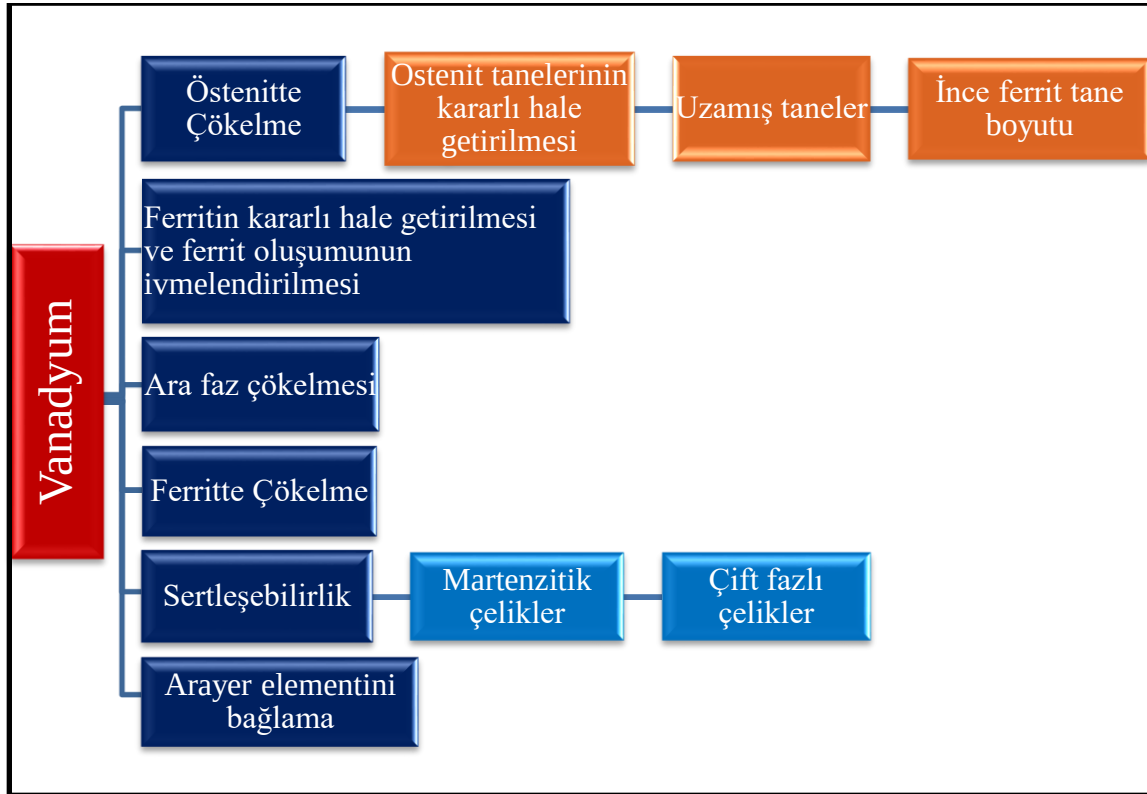
Düşük alaşımlı çeliklerde yukarıdaki özellikler sağlanamaması durumunda alaşım elementlerinin miktarının artırılması ile yüksek alaşımlı çelikler elde edilir. Yüksek alaşımlı çelikler temel olarak takım çelikleri ve paslanmaz çeliklerden oluşmaktadır. Bu çelik gruplarında korozyon, kesme ve delme, şekillendirme gibi aşınmaya maruz uygulamalarda yüzey sertliği sağlayarak kullanım ömrünü yükseltmek için alaşım elementleri yüksek miktarlarda kullanılmaktadır.

2.1.5. Mikroalaşımlı çelikler

Haddelme ile imal edilen mikroalaşımlı çelikler, nispeten düşük maliyetleri, orta derecede mukavemetleri ve çok iyi tokluk ve yorulma mukavemetleri ile kolayca kaynaklanabilmeleri nedeniyle birçok mühendislik uygulamasında çekici bir öneridir.

Bu çeliklerde elde edilen normal akma dayanımı aralığı yaklaşık 350 ila 550 MPa arasında değişmektedir. Mukavemet termomekanik işlemle, manganez içeriği ağırlıkça %0,5 ila 1,5 arasında değiştirilerek ve ağırlıkça %0,03 ila %0,1'in üzerinde olan mikro alaşım ilaveleri kullanılarak kontrol edilir. Niyobyum tek başına veya vanadyum ile birlikte kullanılırken titanyum diğer iki karbür oluşturu element ile birleşim halinde kullanılabilir. Bu elementler arasındaki etkileşimler karmaşıktır, ancak genel olarak niyobyum östenit içinde, karbür veya karbo-nitrür olarak vanadyumdan daha kolay çöker, dolayısıyla bir tane inceltici olarak nispeten daha etkilidir. Vanadyum karbürün östenit içindeki daha yüksek çözünürlüğü, bu elementin titanyumla daha az oranda paylaşılan üstün dağılım güçlendirme potansiyelini de vurgulamaktadır [6].

Vanadyum elementi mikroalaşımli çeliğe etki eden elementler arasında çelikteki en fazla çözünürlüğe sahiptir. Bu çözünürlük sayesinde vanadyum, çökeltme sertleşmesinin oluşmasında önemli rol oynar. Vanadyumun çözünmesine azot olumsuz yönde etki etmektedir. Vanadyum ferrit oluşturuca bir element olmasından dolayı ferrit katı çözeltisinde bulunmaktadır. Vanadyumun mikroalaşımli çeliğe etkileri şekil 2.2’de görülmektedir [7].



Şekil 2.2. Vanadyumun mikroalaşımli çelik üzerindeki etkisi [7].

2.1.6. Borlu çelikler

Çeliğe bor eklemenin ana yararı, sertleşebilirliği iyileştirmektir. Burada küçük miktarlar sertliği önemli ölçüde artırır. Çeliğin tipine ve karbon içeriğine bağlı olarak, fark yaratmak için bor miktarı 3 ppm kadar düşük olabilir. Çeliğe özelliklerini değiştirmek için başka maddeler eklenebilir, ancak diğer elementlerin üzerinde bor kullanılması, nispeten düşük tavlama sıcaklığında çelik özelliklerini iyileştirebilir ve enerji maliyetlerini düşürmeye yardımcı olabilir. Bor elementinin bir başka faydası da benzer sertliğe sahip çeliklerle karşılaştırıldığında daha iyi işlenebilir olmasıdır.

Bu özellikler, bor içeren karbon çeliklerinin, temel çeliğin aşınma direnci gibi çoğu özelliği karşıladığı, ancak sertleşebilirliğin çok düşük olduğu yerlerde kullanıldığı anlamına gelir. Bu durumda bor, farklı bir alaşım kullanmaktan daha ucuz bir seçenektir. Bor çeliğinin ana kullanımlarından biri, özellikle Avrupa pazarında, otomotiv endüstrisindedir. Güvenlik çubukları, iç direkler ve gösterge panellerinde bor içeren çelik kullanılmıştır [8,9].

2.2. Alaşım Elementlerinin Etkisi

Çeliğin içeriğine eklenen her bir alaşım elementinin belirli bir amacı vardır. İstenilen amaç doğrultusunda gerçekleştirilen alaşımlandırma işlemini yapabilmek için elementlerin spesifik özelliklerinin iyi bilinmesi gerekmektedir. Çelik üzerindeki alaşım elementlerinin mekanik özellikler üzerindeki etkileri aşağıdaki tablo 2.2’de gösterilmiştir.

Sade karbonlu çeliklere alaşım elementi eklenmesinin sebebi ısıtılma işlemi sırasında çeliğin davranışlarını değiştirerek fiziksel ve mekanik özelliklerini iyileştirmektir. Çeliklere eklenen alaşım elementleri demir elementiyle katı çözümleri oluşturmaktadır. Bu oluşum atom çapı oranı ve kristal yapı ile ilişkilidir. Alaşım elementlerinden Cr, Al, Ti, Ta, Si, Mo, V ve W, α -demirde çözümleri ve ferrit yapıcılar olarak adlandırılırken, Ni, C, Co, Mn, N ise östenit yapıcılar olarak adlandırılmaktadır [10].

Çizelge 2.2. Alaşım elementlerinin mekanik özellik üzerine etkileri [10]

ALAŞIM ELEMENTLERİNİN ÇELİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ															
ALAŞIM	SERTLİK	DAYANIM	AKMA NOKTASI	UZAMA	KESİT DARALMASI	DARBE DİRENCİ	ELASTİKİYET	YÜKSEK SICAKLIĞA DAYANIM	SOĞUTMA HIZI	KARBÜR OLUŞUMU	AŞINMA	DÖVÜLEBİLİRLİK	İŞLENEBİLİRLİK	OKSİTLENME	KOROZYON DİRENCİ
Si	↑	↑	↑↑	↓	~	↓	↑↑ ↑	↑	↓	↓	↓ ↓ ↓	↓	↓	↓	--
Mn*	↑	↑	↑	~	~	~	↑	~	↓	~	↓ ↓ ↓	↑	↓	~	--
Mn*	↓↓↓	↑	↓	↑↑ ↑	~	--	--	--	↓ ↓ ↓	--	--	↓↓ ↓	↓↓↓	↓ ↓ ↓	--
Cr	↑↑	↑↑	↑↑	↓	↓	↓	↑	↑	↓ ↓ ↓ ↓	↑↑	↑	↓	--	↓ ↓ ↓ ↓	↑↑↑
Ni*	↑	↑	↑	~	~	~	--	↑	↓ ↓ ↓ ↓	--	↓ ↓	↓	↓	↓	--
Ni**	↓↓	↑	↓	↑↑ ↑	↑↑	↑↑ ↑	--	↑↑↑	↓ ↓ ↓	--	--	↓↓ ↓	↓↓↓	↓ ↓ ↓	↑↑
Al	--	--	--	--	↓	↓	--	--	--	--	--	↓↓	--	↓ ↓ ↓	--
W	↑	↑	↑	↓	↓	~	--	↑↑↑	↓ ↓	↑↑	↑ ↑ ↑	↓↓	↓↓	↓ ↓ ↓	--
V	↑	↑	↑	~	~	↑	↑	↑↑	↓ ↓	↑↑ ↑↑	↑ ↑	↑	--	↓	↑
Co	↑	↑	↑	↓	↓	↓	--	↑↑	↑ ↑	--	↑ ↑ ↑	↓	~	↓	--
Mo	↑	↑	↑	↓	↓	↑	--	↑↑	↓ ↓	↑↑ ↑	↑ ↑	↓	↓	↑ ↑	--
S	--	--	--	↓	↓	↓	--	--	--	--	--	↓↓ ↓	↑↑↑	- -	↓
P	↑	↑	↑	↓	↓	↓↓ ↓	--	--	--	--	--	↓↓ ↓	↓↓↓	↓ ↓	↑↑
*Perlitik çeliklerde **Östenitik çeliklerde		↑ Arttırır			↓ Azaltır			~ Önemsiz ya da bilinmiyor			-- Değiştirmez				

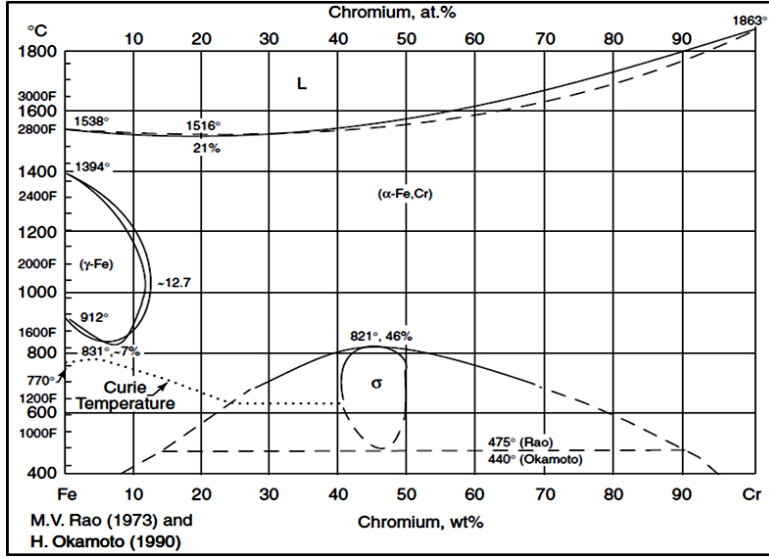
Alaşım elementleri arasında östenit yapıcı en önemli elementler C, Ni ve Mn'dir. Çeliği oda sıcaklıklarında östenitik yapıda tutmaya yarayan elementler büyük oranlarda kullanılan Ni ve Mn'dir [11].

Karbon çelik içerisinde bulunan en temel alaşım elementidir. Karbon miktarı artışı alaşımsız çeliklerde dayanım ve sertliği artırmaktadır. Çelikteki karbon artışı yapıdaki perlit oranını artırarak çekme dayanımı ve akma dayanımını da artırır. Karbon miktarı artışı çeliğin sünekliğini, dövülebilirliğini, derin çekme kabiliyetini ve kaynaklanabilirliğini azaltırken ısıtılarda, çatlama ve deformasyona yatkınlığını artırır [12].

Mangan elementi çelik içerisine cevherden gelmektedir ve çeliğin özelliklerini iyileştirdiği için her zaman yapıda belli bir miktar bulunması istenir. Yapıya alaşım elementi olarak eklendiğinde miktarı artırılır, mekanik özellikler olarak dayanım artırıcı etki gösterirken süneklikte bir miktar azalmaya sebep olur. Her %1 mangan artışında yaklaşık 100 MPa çekme dayanımı artar ve bu %3'e kadar devam eder. %3-%8 aralığında çekme dayanımı artışı daha azdır ve %8'den sonra düşme gözlemlenir. Mangan çelikte dövülebilirlik, sertleşebilirlik ve yüzey kalitesini iyileştirmektedir.

Nikel mikroyapıdaki ferrit tanelerinde katı çözelti sertleşmesine neden olarak dayanımı artırır. Dayanım artışı süneklikte belirgin azalmaya sebep olmamaktadır. Krom ile karşılaştırıldığında daha az da olsa sertleşebilirliği iyileştirir. Alaşım elementi olarak içeriğinde nikel bulunduran yapı çelikleri krom ilavesiyle birlikte mekanik özelliklerde artış gözlemlenir. Yüksek süneklik, yüksek sertleşebilirlik ve yüksek yorulma direnci sağlar. Krom ile birlikte tufallaşma ve ısıca karşı dayanımı artırır.

Ferrit Oluşturucu Elementler ise Cr, Si, Mo, W, Al'dir. Fe-Cr denge diyagramından da gözlemlenebileceği gibi ferritin kararlılığı olduğu bir bölge mevcuttur ve %13 Cr üzerinde Cr içeriğine sahip olan Fe-Cr alaşımları ergime sıcaklığına kadar ferritik mikroyapıda bulunmaktadır. Ferritik çeliklere en iyi örnek %3 Si içeren düşük karbonlu çelikten imal edilen transformatör saç malzemeleridir [12].



Şekil 2.3. Cr-Fe faz diyagramı [13]

Krom, paslanmaz çeliklerde ve takım çeliklerinde mekanik özellikleri iyileştirdiği için kullanılan en temel alaşım elementlerindendir. Krom, karbür yapıcı element olduğu için çekme dayanımı ve sıcaklık dayanımını artırırken, sünekliği düşürmektedir. Bazı durumlarda temper kırılganlığına sebep olmasının önüne geçmek için nikel ve molibden ile birlikte kullanılmaktadır. En genel özelliği oksidasyon ve korozyon dayanımını, aşınma direncini ve sertleşebilirliği arttırmasıdır.

Silisyum çelik üretiminde deoksidan element olarak görev almaktadır. Farklı üretim biçimleri, çeliğin içeriğindeki silisyum oranını değiştirmektedir. Döküm alaşımsız çeliklerde akıcılık sağlamak için kullanılmaktadır ve en fazla %6 oranında bulunmaktadır. Bu oran düşük alaşımlı çeliklerde ve yay çeliklerinde %2'ye düşmektedir. Elektroteknikte kullanılan silisyumlu çeliklerde bu oran %5'i bulabilmektedir. Silisyum ferrit içerisinde çözünerek malzemenin süneklik ve tokluğunu düşürmeden, dayanımı ve sertliği artırır. %14-15 Si içeren çeliklerin sertleşebilirliği, aşınma dayanımı, elastikiyeti, korozyon ve ısı dayanımı yüksektir ancak kırılgandırlar, dövülemezler. Bu durumda yüzey kalitesi de olumsuz etkilenmektedir. Çelikte silisyum miktarı artışı ile tane büyüklüğü de artmaktadır.

Molibden nitrür ve karbür yapıcı elementtir. Düşük alaşımlı çeliklerde krom ve nikel ile birlikte %0.15-0.30 oranında kullanılarak, çeliğin temper gevrekliği eğilimi giderilir. Molibden ilavesi ile temper sonrası darbe dayanımı yükselir. Çelikte sertleşebilirlik, akma ve çekme dayanımı, sıcaklık dayanımı aşınma direncini arttırırken temper kırılganlığını

azaltır. Paslanmaz çeliklerde oyuklanma korozyon direncini arttırmak için kullanılırken, mikro alaşımlı çeliklerde nitrür ve karbonitrür oluşturmak için kullanılır.

Volfram çelikte dayanım artırıcı olarak kullanılmaktadır. Yüksek hız çeliklerinde ve ıslah çeliklerinde alaşım elementi olarak bulunmaktadır. Hız çeliklerinde ikincil sertleşme oluşturarak temper dayanıklılığını artırır. Bunun sonucunda oluşan karbürlerde aşınma direncini artırır. Yüksek sıcaklıklarda temperleme sertliğini stabil tuttuğu için sıcaklık dayanımlı, çelik üretiminde kullanılır. Takım çeliklerinde takım ömrünü uzatır, yüksek ısıya dayanım sağlar ve kesici kenar sertliklerini korur.

Alüminyum alaşım elementleri arasında en güçlü oksijen gidericidir. Azot ile birlikte güçlü nitrür oluşturur, nitrasyon çeliklerinin temel alaşım elementidir. Isıtma esnasında tane büyümesi ve çeliğin yaşlanma eğilimini azaltırken, taneleri inceltir. Mekanik olarak akma dayanımını ve darbe tokluğunu artırır. Bazı mikroalaşımlı çeliklerde nitrür ve karbonitrür oluşturmak için mikro alaşım elementi olarak kullanılır [14].

Yüksek alaşımlı çeliklerin yapısında en az üç farklı alaşım elementi içermektedir ve çeliklerin mikroyapıya dair bilgileri üçlü faz diyagramlarından elde edilmektedir. Üçlü faz diyagramları denge koşullarını temsil ettiği ve ısıtma işlemi aşamasında yeterli bilgi sağlayamadığı için çok alaşımlı çeliklerin üretiminde Schaffler diyagramı kullanılmaktadır. Bu diyagram orijinalinde Ni ve Cr içerirken modifiye edilmiş diyagramda diğer alaşım elementleri de bulunmaktadır.

Mikroyapıda ferrit oluşmasını sağlayan elementler aynı zamanda karbür oluşumunu da sağlamaktadır. Karbür yapıcı elementler de demire bağlı olarak ferrit oluşumunu sağlayabilmektedir. Cr, W, Mo, V, Ti, Nb, Ta, Zr elementleri karbür oluşumuna teşvik eden ana elementlerdir ve karbon afiniteleri Cr'den Zr'ye doğru artmaktadır.

Vanadyum çelikte sertleşebilirliği arttırmaktadır. N ile birlikte nitrür oluşturur ve ferritik yapıda tane küçülmesi sağlar. Buna bağlı olarak mekanik özelliklerde çentik darbe dayanımını artırır. Aşınma ve sıcaklık dayanımı sağlamak için takım çeliklerinde volfram ile birlikte, sıcaklık dayanımı yüksek çeliklerde ise krom ile birlikte kullanılmaktadır.

Vanadyum, Molibden, Wolfram ve Niyobyum gibi kuvvetli karbür yapıcı alaşım elementlerinden birisidir. Çeliklerin genelinde tane inceltici görev üstlenirken östenitik çeliklerde yapıda denge sağlar. En güçlü özelliklerinden birisi korozyona karşı dirençli olması ve bütün metaller içinde en yüksek dayanıklılık-ağırlık oranına sahip olmasıdır.

Niyobyum refrakter metaller içerisinde en düşük ergime sıcaklığına, yoğunluğa ve elastik modülüne sahip iken en yüksek termal genleşme katsayısına sahiptir. YDDA çeliklerinde haddeleme ve soğutma ile özellikleri iyileştirmek için sıcaklık dayanımı yüksek çeliklerde kullanılmaktadır. Korozyon dayanımı oldukça yüksektir. Hava ortamında 200 °C'nin üzerinde oksitlenme gözlemlenir. Elementler arasında kuvvetli karbür ve nitrür yapıcılardandır. Mekanik özelliklerden sertliği ve akma dayanımını arttırırken, taneleri incelterek şekil değiştirilebilirliği azaltmaktadır [15].

Zirkonyum, korozyon direnci mükemmel olduğu için refrakter özelliğinden dolayı ve katı olması sebebiyle alaşım elementi olarak tercih edilmektedir. Genellikle yüksek dereceli uygulamalarda kullanılmaktadır. Oda sıcaklığında katı haldedir, genleşebilirliği ve dövülebilirliğinin yanı sıra sert ve kırılgan olabilmektedir. Aşınmaya karşı yüksek dirence sahiptir.

Karbür kararlaştırıcı elementler kısmında, kararlı karbür yapısı çelik içerisindeki alaşım elementlerinin miktarına bağlıdır. Karbürlerin kararlılık dereceleri ise elementlerin sementit ve matriksleri arasındaki paylaşımına bağlıdır.

Nitrür oluşturu elementlerde ise karbon oluşturmak için kullanılan tüm elementler nitrür oluşturmak için de kullanılmaktadır. Farklı alaşım elementleri ilavesi ile sert nitrürler oluşturma veya çökelme sertleşmesi yollarıyla çeliğin sertliğindeki artma ve azalma eğilimleri gösterilmiştir. Nikel nitrür oluşturmamayan bir element olduğu için sertlikte de bir artış gözlemlenmemektedir.

Alaşım elementlerinin tane büyümesine etkisi hususunda vanadyum tane büyümesinin kısıtlanmasında etkisi olan önemli bir elementtir. Çelik içerisinde vanadyumun az miktarda dahi kullanılması tane büyümesini engellemektedir. Nedeni ise vanadyumun sertleştirme sıcaklıklarında eşit miktarda dağılmış karbürler ve nitrürler olarak bulunmasıdır. Yapı içerisinde bu şekilde bulunan karbürler ve nitrürleri çözündürebilmek için yüksek sıcaklığa

ihtiyaç duyulmaktadır. Vanadyumun bu özellikleri akabinde sıkça kullanılan sertleştirme sıcaklıklarında oluşan tane büyümesi engellenmiş olur. Fakat sıcaklık normal seviyesinden daha fazla bir değere ulaşırsa vanadyum çözündürülebilir. Bu durum oluştuğunda çelikte tane büyümesi meydana gelir. Böylelikle çelikte darbe mukavemeti gibi dayanım özelliklerinde azalma gözlemlenmektedir. Tane büyümesine engel teşkil eden vanadyum benzeri elementler ise Ti, Nb, W, Mo'dir.

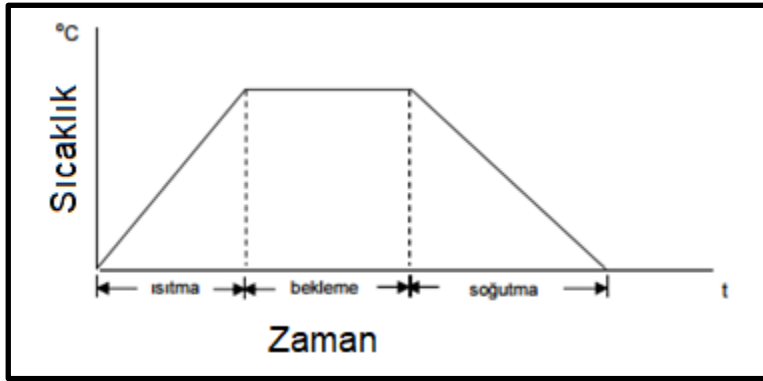
Malzemenin yüzeyini sertleştirmek amacıyla tercih edilen ince taneli çeliklerde, sertleştirme işlemleri Al katkısıyla olmaktadır. Bu yöntem için kullanılan basit bir uygulama işlemi bulunmaktadır. Öncelikle yapıdaki oksijen miktarını belirlenen bir seviyeye indirmek ve sonrasında çeliğin yapısında bulunan azot seviyesine göre Al takviye edilmektedir.

Alaşım elementlerinin ötektoid noktasına etkileri ise demir-karbon denge diyagramında Al sıcaklığını azaltan elementler, yapıda östenit oluşmasına da yardımcı olan elementlerdir. Al sıcaklığını yükselten elementler ise yapıda ferrit oluşmasına yardımcı olan elementlerdir. Faz diyagramında ötektoid nokta 723 °C sıcaklığa ve 0,8 C oranına denk gelmektedir. Alaşım elementlerinin martenzitin oluştuğu sıcaklığa etkisi kobalt dışındaki tüm elementler martenzitin oluştuğu sıcaklığı düşürürler. Ayrıca % 0,5 den yüksek değerlerde karbon çeliklerinin tamamının martenzit sıcaklıkları, oda sıcaklıklarının altındadır. Buradan yola çıkarak, çeliklere uygulanan sertleştirme işlemlerinin az miktarda dönüşmemiş östenit içerdiği sonucuna varılabilir [16].

3. ÇELİKLERE UYGULANAN ISIL İŞLEMLER

Günümüz teknolojisinde çeliklerin diğer malzemelere nazaran daha fazla kullanılmasıyla malzemede gelişmiş özelliklere ihtiyaç duyulmuştur. Bu gelişmiş özellikler başlıca, sertlik, mukavemet, süneklik, elektriksel iletkenlik, tane boyutu ve işlenebilirlik gibi mekanik özelliklerdir. Bu özellikler günümüz teknolojisinde alaşım elementleri veya ısıtılma işlemi yoluyla kazandırılmaktadır.

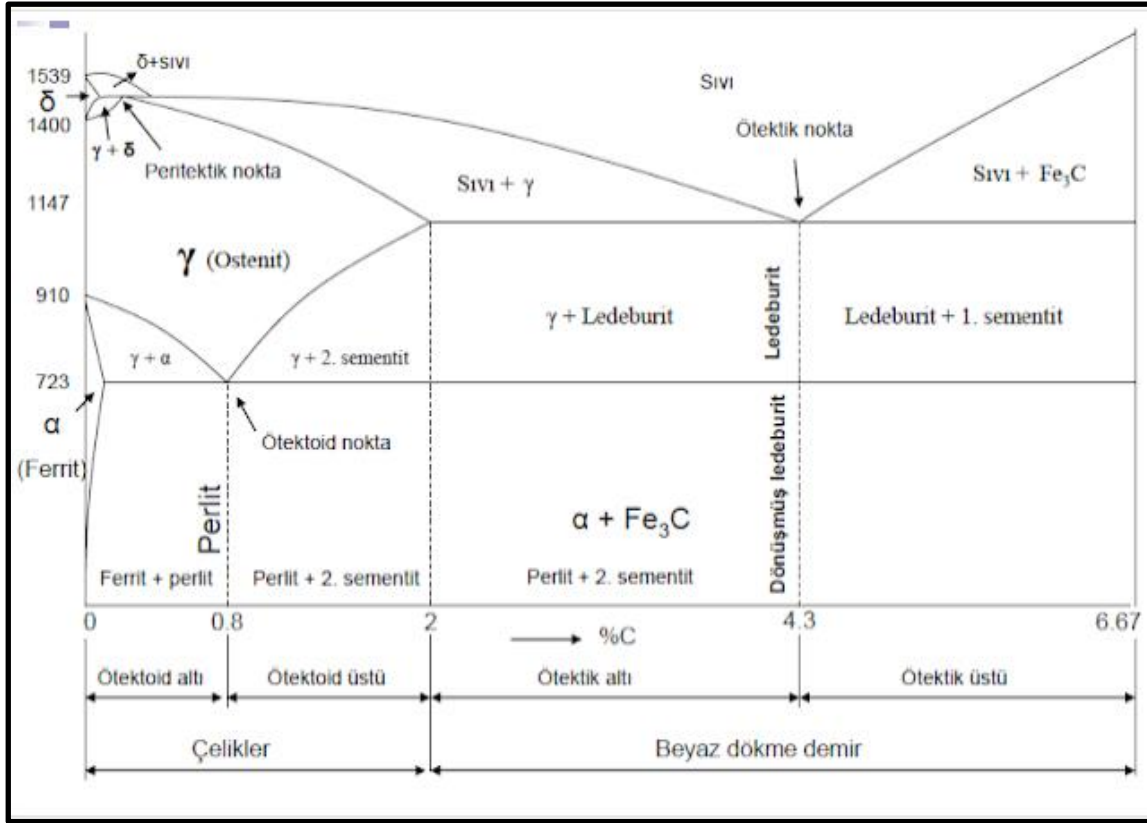
Isıl işlem, malzemenin belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılmasıyla, ısıtılan malzemenin o sıcaklıkta belirlenen süre kadar beklemesiyle ve ortam koşulları doğrultusunda soğutulması ile meydana gelen temel olarak üç aşamalı bir işlemdir [12].



Şekil 3.1. Isıl işlem prosesi [1]

Çeliğin ısıtılma işlemdeki fazlarını, sıcaklıkları ve dönüşümleri iyi anlamak ve yorumlamak için Demir-Karbon denge diyagramına ihtiyaç duyarız.

Demir-karbon denge diyagramı, çelik ve dökme demirin farklı fazlarını anlamak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Hem çelik hem de dökme demir, demir ve karbon karışımıdır. Ayrıca, her iki alaşım da az miktarda alaşım elementi içerir. Bu demir karbon faz diyagramı, X ekseninde ağırlıkça karbon konsantrasyonları ve Y ekseninde sıcaklık ölçeği ile çizilir.



Şekil 3.2. Fe-C denge diyagramı [12]

Demir karbon faz diyagramının X eksenı üzerindeki ağırlık yüzdesi ölçeği, %0'dan %6.67'ye kadar karbon miktarını temsil etmektedir. Karbon ağırlılığının %0,008'i kadar maksimum karbon içeriğine kadar, metale basitçe demir veya saf demir denir. Oda sıcaklığında α -ferrit formunda bulunur. %0,008'den % 2,3'e kadar karbon içeriğine sahip demir karbon alaşımına elik denir. Bu aralıktta, düşük karbonlu elik (veya yumuşak elik) , orta karbonlu elik ve yüksek karbonlu elik olarak bilinen farklı elik kaliteleri vardır. Karbon içeriği % 2'nin üzerine çıktığında, dökme demir aşamasına ulaşılmaktadır. Dökme demir çok serttir ancak kırılđanlıđı, uygulamalarını ve şekillendirme yöntemlerini ciddi şekilde sınırlar.

Demir-Karbon denge diyagramında bazı önemli sıcaklık noktaları mevcuttur. Bu noktalara aşağıda yer verilmiştir:

A_{cm} sıcaklığı, ötektoid üstü çeliklerde ısıtma anında östenitin sementite geçiş yaptığı sıcaklık olarak adlandırılır. A_1 sıcaklığı, A_1 eğrisi östenit fazının başladığı kritik sıcaklık olarak geçmektedir. A_3 sıcaklığı, A_3 eğrisi ferrit + östenit bölgesinin tamamen östenit fazına dönüştüğü bölge olarak adlandırılmaktadır [17].

3.1. Fe-C Denge Diyagramında Fazlar

Östenit (γ), YMK kristal yapıya sahip γ demiri içerisinde %2 karbon çözünmesiyle meydana gelen ara yer katı çözeltilisidir. Oda sıcaklığında kararsız faz olan östenit bazı özel durumlarda elde edilebilir. Mekanik özelliklere bakıldığında çekme mukavemeti 1030 MPa, kopma uzaması %10'dur. Tokluğu oldukça yüksek olan bu faz 1147 °C sıcaklıkta %2 karbon çözmemektedir.

α -Ferriti, Demir-Karbon denge diyagramı içerisindeki en yumuşak faz olarak bulunan bu yapı, hacim merkezli kübik yapıdadır. α demirde düşük miktardaki karbon çözünmesiyle meydana gelen bir ara yer katı çözeltilisidir. 270 MPa çekme dayanımına sahip bu faz 118 MPa akma dayanımı göstermektedir. Normal şartlarda manyetik özellik gösteren (ferromanyetik) bu faz, sıcaklığın 768°C'ye çıkmasıyla bu özelliğini kaybedip paramanyetik özellik göstermektedir. Karbon çözünürlüğü bakımından ise 723°C sıcaklıkta en fazla % 0.025 karbon çözünürken bu oran oda sıcaklığında % 0.008'e düşmektedir.

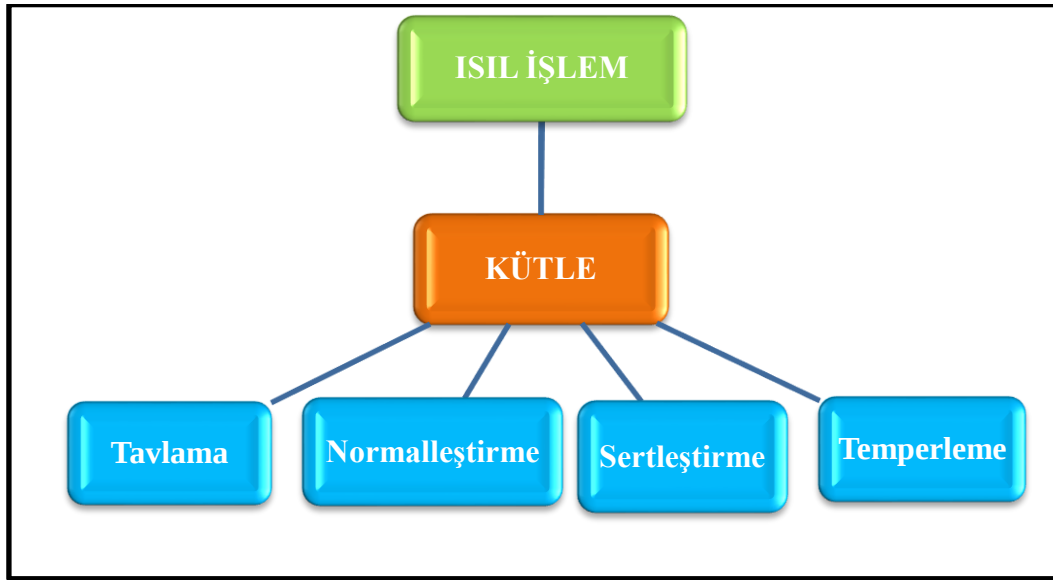
δ Ferriti, δ demir içerisinde çözünen karbonun oluşturduğu HMK yapılu bir ara yer katı çözeltilisidir. Kafes parametresi α -ferrite göre daha büyük olmakla birlikte, karbon çözünürlüğü 1492 °C'de en yüksek değeri olan yaklaşık %0,1 değerine ulaşmaktadır. Bu faz yüksek sıcaklık fazı olduğundan dolayı düşük sıcaklıklarda ve alaşımsız çeliklerde gözlemlenemez.

Sementit (Fe_3C), ortorombik kristal yapıya sahip olan bu faz %6,67 karbon oranına sahip bir ara yer bileşimidir. Demir-karbon denge diyagramındaki fazlar arasında en sert yapıya sahiptir ve yüksek basma dayanımına sahiptir. Yaklaşık 1227 °C'de erimektedir.

Perlit ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$), ferrit ve sementit fazlarının birleşiminden oluşan %0,8 karbon içeren çeliğin ötektoid dönüşüm sonucunda oluşturduğu yapıdır. Ötektoid dönüşüm östenit bölgesinden yavaş soğutulma sırasında A_1 sıcaklığında meydana gelir. Metalografik yapısı incelendiğinde ferrit beyaz sementit ise siyah görülmektedir. Mekanik özellikleri incelendiğinde çekme dayanımı 825 MPa, % uzama miktarı ise 2 inçte %20 kadardır. Sertlik değeri ise 20 HRC'dir.

Ledeburit, östenit(γ) ve sementit(Fe_3C) fazlarından oluşan ve %4,3 karbon içeriğine sahip bir yapıdır. 1147 °C’de ötektik dönüşümle demir-karbon alaşımlarının katılaşması ile meydana gelmektedir. Metalografik olarak incelendiğinde karbürler içerisinde dağılmış olarak bulunan östenit fazları görülmektedir. Oda sıcaklığında kararsız bir yapıya sahiptir. A_1 sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda yer alan ve östenitin perlitte dönüşmesi sebebiyle oluşan yapıya dönüşmüş ledeburit denir ve yapı perlit-sementit birleşiminden oluşmaktadır [17].

3.2. Isıl İşlem Çeşitleri



Şekil 3.3. Isıl işlem tablosu [12]

3.2.1. Tavlama

Tavlama adı altında yapılan işlem malzemelerde oluşan gerilmeleri gidermek, içyapıda homojenliği sağlamak, tane boyutunu küçültmek veya büyültmek gibi işlemlerdir.

Normal tavlama işlemindeki amaç malzeme üzerindeki homojensizliklerin giderilmesi ve ince taneli yapıya ulaşmaktır. Bu amaç doğrultusunda ötektoid altı çeliklerde A_3 sıcaklığı üzerine kadar beklemeden denge sıcaklığının altına kadar alt soğuma işlemi gerçekleştirilmelidir.

Bu işlemi gerçekleştirmek için tavlanan parçaların durgun havada soğutulması yeterli olacaktır. İnce taneli parçalarda yaklaşık olarak 550°C ile 600°C’de bulunan tuz banyolarında ani soğutulması şartıyla çok ince lamelli perlitik yapı elde edilmesi mümkün olacaktır. Kullanılan bu yöntem piyasada patentleme olarak isimlendirilir ve ayrıca yay ve halat gibi ürünlerin imalatında kullanılır. Ayrıca karbonu düşük miktarda olan çeliklerde bu yöntemden perlitleştirme tavlama olarak da kullanılır. Bu tavlama çeşidi sıklıkla yüksek sıcaklıklarda dövülmüş, kaynak dikişinin farklı bölgelerde bulunduğu ısıya maruz kalmış malzemelerde uygulanır [12].

Yumuşak tavlama ise, her malzemenin yüksek mekanik kuvvetlere dayanacak şekilde tasarlanması gerekmez. Örneğin, frezelenmiş yuvalara sahip kavisli bir sac ile, malzemenin yüksek kuvvetleri absorbe edebilmesi gerekli değildir. Bunun yerine, malzeme seçiminde odak noktası çeliğin iyi şekillendirilebilirliği ve işlenebilirliğidir. Bu, özellikle büyük parti büyüklüklerine sahip otomatik üretimde, üretimi ekonomik hale getirmek için önemli bir rol oynar.

Bu nedenle, bir çeliğin mikroyapısını, daha iyi şekillendirilebilecek veya işlenebilecek şekilde uyarlamak gerekebilir. Bu nedenle, özellikle şekillendirilebilirlik ile ilgili olarak, uygun şekilde yumuşak bir mikroyapının üretilmesi gereklidir. Bu yapı yumuşak tavlama ile elde edilebilir.

Bu tavlama işlemi ötektoid altı çeliklerin A₁ sıcaklığının altında çok uzun süre tutulmasıyla ve ferrit içerisinde konumlanmış sementitin küresel hale getirilmesiyle elde edilir. Tavlama işleminin ardından malzeme yavaş soğumaya bırakılmalıdır. Perlit içindeki şerit sementit küresel sementite (küresel sementit) dönüşür. Sementit yuvarlak şekle parçalandıktan sonra çelik yavaş yavaş soğutulur. Ötektoid altı çeliklerin aksine, ötektoid üstü çelikler, yumuşak tavlama sırasında PSK hattının hemen üzerinde veya çevresinde salınım yaparak ısıtılır.

İnce bölünmüş küresel sementit içeren özellikle homojen bir mikroyapı, çeliğin yumuşak tavlamadan önce sertleştirilmesiyle elde edilebilir. Küresel sementit daha sonra nispeten homojen martenzit mikroyapısından oluşturulur. Yumuşak tavlamadan sonra çelik, küresel sementit şekli nedeniyle çok daha iyi şekillendirilebilirlik gösterir [12].

Gerilim giderme tavlaması malzemedeki iç gerilmeleri azaltmak veya tamamen yok etmek için yapılır. Malzemede iç gerilme çekirdek ve cidar arasındaki dönüşüm gerilmeleri plastik şekillendirme ve talaşlı şekillendirme gibi nedenlerle meydana gelir. Bu tavlamada iç gerilmeler sürünme olaylarıyla minimum seviyeye indirilmesi amaçlanır. Gerilim giderme tavlaması yapılırken sıcaklık maksimum kullanım sıcaklığı üzerinde özellik değişimlerinin gerçekleştiği sıcaklığın ise altında seçilir [18].

3.3. Sertleştirme

Metal sertleştirme, adından da anlaşılacağı gibi metalin çeşitli mekanik özelliklerinin yanı sıra sertliğini iyileştirmek için kullanılır. Sonuç olarak daha sert, daha dayanıklı bir metal elde edilmektedir. İşlem sırasında alaşımlar, metalin kritik dönüşüm sıcaklığını geçen bir seviyeye kadar ısıtılır ve daha sonra yumuşak olan başlangıçtaki malzemesinin daha sert ve daha güçlü bir yapıya dönüşmesi için hızlı bir şekilde soğutulur. Bu alaşımlar, malzemede kaç tane alaşım elementi bulunduğuyla bağlı olarak hava ile veya yağ, su veya diğer sıvılarda su verme yoluyla soğutulabilir. Sertleştirilmiş malzemeler daha sonra tokluklarını daha da geliştirmenin bir yolu olarak tipik olarak tavlanaacak veya gerilim azaltılacaktır. En yaygın olanlardan biri, su verme ve temperleme olarak da bilinen martenzitik dönüşümdür. İlk olarak, çeliği aşırı bir sıcaklığa ısıtılır. Ardından, çeliğin içindeki kristal yapı, daha fazla karbonun çözünmesine izin verecek şekilde değişir. Bu noktada, metalin yeterince hızlı bir şekilde su verilmesi veya soğutulması gerekir, böylece karbon metalde diğer istenmeyen malzemeleri oluşturmak için zamana sahip olmaz. Hızlı soğutma, sertleştirilmiş durumda kalmasını sağlayarak, onu çok fazla aşınma ve yıpranmaya dayanacak daha güçlü bir malzeme haline getirir. İşlem sırasında geçtiği farklı durumlara östenit ve martenzit denir [19].

3.4. Sertleşebilirlik

Çeliklerde yüksek mukavemete giden geleneksel yol, martenzit oluşturmak için su vermektir. Bu martenzit daha sonra ara bir sıcaklıkta yeniden ısıtılır veya tavlana, böylece çok büyük bir mukavemet kaybı olmadan çeliğin tokluğu artar. Çeliğin su verme sırasında martenzit oluşturma kabiliyetine sertleşebilirlik denir. Bu nedenle, optimum mukavemet gelişimi için çeliğin önce tamamen martenzite dönüştürülmesi gerekir. Bunu başarmak için,

ferrit, perlit ve beynit gibi ürünlere soğutma sırasında östenitin ayrışmasını önlemek için çeliğe yeterince hızlı bir oranda su verilmelidir.

Su verme iki faktöre bağlı olacaktır:

- Numunenin geometrisi
- Çeliğin bileşimi.

Belirli bir ortamda su verilen büyük çaplı bir çubuk, benzer bir işlem uygulanan küçük çaplı bir çubuktan açıkça daha yavaş soğuyacaktır. Bu nedenle, küçük çubuğun tamamen martenzitik hale gelmesi daha olasıdır. Bir çeliğe alaşım elementlerinin eklenmesinin genellikle TTT eğrisini daha uzun sürelerle taşıdığı, böylece bir su verme işlemi sırasında eğrinin burnunu geçmeyi kolaylaştırdığı, yani alaşım elementlerinin mevcudiyetinin kritik hızı azalttığı zaten gösterilmiştir ve alaşım elementlerinin varlığı, bir çelik numuneyi tamamen martenzit yapmak için gereken kritik soğutma hızını azaltmaktadır. Bu kritik soğutma hızına ulaşılmazsa, bir çelik çubuk daha hızlı soğuyan dış bölgelerde martenzitik olacak, ancak çekirdekte daha yavaş soğutma hızı, kesin koşullara bağlı olarak beynit, ferrit ve perlite yol açacaktır. Bu, standart boyuttaki çelik çubuklar için, standart bir su verme işleminden sonra martenzite %50 dönüşümün olduğu yüzeyin altındaki mesafe olarak basitçe ifade edilebilir ve bu nedenle sertleşme derinliğinin bir ölçüsüdür [20].

3.5. Sertleştirme Çeşitleri

Dönüşüm ile sertleştirmede ilk olarak çelik gereken sıcaklığa kadar ısıtılır ve östenitleştirme sıcaklığı adı verilen bu sıcaklıkta istenilen yapı elde edinceye kadar bekletilir. Isıtma yapıda karbürizasyon ya da oksidasyon oluşmasına engel olacak bir hidrokarbon atmosferinde ya da tuz banyosunda gerçekleştirilir. Isıtma sıcaklığının yeterli homojenlikte bir östenitik yapı elde etmeyi ve mevcut özel karbürlerin gereken kadarının çözünmesini sağlayacak, fakat tane büyümesine de imkân vermeyecek düzeyde olması zorunludur. Bu işlemler esnasında çeliğin farklı sıcaklıklardaki tane büyümesi eğilimi karbürlerin varlığı ve bunların ne şekilde çözülüp dağıldığını bilmek gereklidir. Östenit dönüşüm sıcaklığı her çelikte aynı olmayıp alaşım elementi cinsine ve miktarına bağlıdır.

Isıtma ile elde edilmiş östenitik yapılı çeliğin soğuma hızının büyüklüğü için göz önünde bulundurulacak ölçü, östenitin perlitte dönüşme hızıdır. Dönüşüm hızı soğuma esnasında her noktada eşit büyüklükte değildir ve sıcaklıkla orantılıdır. Martenzit oluşumunun sağlanması için ve perlit oluşumunun engellenmesi için en düşük soğuma hızı Ac_1 altındaki sıcaklık değerine bağlıdır. Dönüşüm hızının mutlak değeri karbon miktarı ve alaşım elementi durumuyla alakalıdır. Yüksek karbon içeriği durumunda perlitik dönüşüm hızı daha yüksektir. Bu fazla hız durumu zengin karbona sahip östenitten karbonun büyük bir oranda difüzyon yoluyla ayrılması ile gerçekleşir. Perlit aşamasında dönüşüm hızı azalan karbon miktarıyla azalır, ara aşama yapısında artar [12].

3.5.1. Suda sertleştirme

Su verme sertleştirme, çelik ve dökme demir alaşımlarının güçlendirilip sertleştirildiği mekanik bir işlemdir. Bu metaller demirli metaller ve alaşımlardan oluşur. Bu, malzemeye bağlı olarak malzemenin belirli bir sıcaklığa ısıtılmasıyla yapılır. Bu, malzemenin soğutulma hızına göre değişen yüzey sertleştirme veya tam sertleştirme yoluyla daha sert bir malzeme üretir. Daha sonra malzeme, su verme sertleştirme işleminden artabilecek kırılabilirliği azaltmak için genellikle temperlenir. Su verme öğeleri arasında dişliler, miller ve aşınma blokları bulunur. Su verme süreci, numunenin ısıtılmasıyla başlayan bir ilerlemedir. Çoğu malzeme 815°C ile 900°C arasında ısıtılır ve iş parçası boyunca sıcaklıkların aynı kalmasına özen gösterilir. Eşit olmayan ısınmayı ve aşırı ısınmayı en aza indirmek, istenen malzeme özelliklerini vermenin anahtarıdır.

Su verme işlemindeki ikinci adım ıslatmadır. İş parçaları havada (hava fırını), sıvı banyosunda veya vakumda ıslatılabilir. Islatma süreleri bir vakum içinde biraz daha yüksek olabilir. Isıtma adımı olduğu gibi, ıslatma sırasında numune boyunca sıcaklığın mümkün olduğunca eşit kalması önemlidir. İş parçası ıslatmayı bitirdikten sonra soğutma adımına geçer. Bu adım sırasında parça bir tür su verme sıvısına daldırılır; farklı su verme sıvıları, su verilmiş bir parçanın nihai özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir. Su, maksimum sertliğin istendiği en verimli su verme ortamlarından biridir, ancak bozulmaya ve küçük çatlaklara neden olabilir. Sertlikten vazgeçilebildiğinde, genellikle mineral yağlar kullanılır. Bu yağ bazlı sıvılar, su verme sırasında genellikle oksitlenir ve bir çamur oluşturur, bu da sonuç olarak işlemin verimliliğini düşürür. Yağın soğuma hızı sudan çok daha azdır. Su ve yağ arasındaki oranlar, amaca uygun formüle edilmiş bir susuzluk, ters

çözünürlüğe sahip bir madde ile elde edilebilir ve bu nedenle soğuma hızını yavaşlatmak için nesne üzerinde birikir.

Su verme, nitrojen ve soygazlar gibi gazlar kullanılarak da gerçekleştirilebilir. Azot, yaygın olarak, mutlak 20 bara kadar değişen atmosferik basınçtan daha yüksek basınçta kullanılır. Helyum, termal kapasitesi nitrojenden daha büyük olduğu için de kullanılır. Alternatif olarak argon kullanılabilir; ancak termal kapasitesi, alternatiflerinden daha azdır. İş parçasındaki bozulmayı en aza indirmek için uzun silindirik iş parçaları dikey olarak su verilir; düz iş parçaları kenarda su verilir ve kalın kısımlar önce banyoya girmelidir. Buhar kabarcıklarını önlemek için banyo çalkalanır. Çoğu zaman, su vermeden sonra, bir demir veya çelik alaşımı, martenzitin fazlalığı nedeniyle aşırı sert ve kırılgan olacaktır. Bu durumlarda, demir esaslı alaşımların tokluğunu arttırmak için su verilmiş malzeme üzerinde temperleme olarak bilinen başka bir ısı işlem tekniği gerçekleştirilir. Temperleme genellikle aşırı sertliğin bir kısmını azaltmak için sertleştirmeden sonra gerçekleştirilir ve metalin belirli bir süre için kritik noktanın altındaki bir sıcaklığa ısıtılması ve ardından durgun havada soğumaya bırakılmasıyla yapılır.

3.5.2. Sodyumhidroksit ve tuz çözeltilerinde sertleştirme

Suyun bileşiminin değiştirilmesi ile soğutma etkisi belirli oranlarda artırılıp azaltılabilir. Soğutma etkisini sodyumhidroksit (NaOH) ve mutfak tuzu (NaCl) katılarak artırılabilir. Mutfak tuzu korozyona sebep olduğu için işlem sonrası parçalarda genellikle sodyumhidroksit kullanılır. Ortamın ısı kabiliyeti sodyumhidroksit ilavesi ile artmaz tam tersi azalır. Buna rağmen buharlaşmaya kadar olan süreçte ısı çekmesi artar ve buharlaşma sıcaklığı yükselir. Buhar tabakası 400 °C'nin üzerinde parçalanır. Maksimum soğutma hızına %10 sodyumhidroksit içeren suda ve perlit dönüşümünün maksimum olduğu sıcaklıkta ulaşılır. Sodyumhidroksitin soğutma etkisi perlit hızının maksimum olduğu noktada yaklaşık iki kat artmakta ve parça cidarında hızlı soğuma çekirdeği de etkileyerek sertleştirme derinliğini arttırmaktadır. Daha yüksek bileşimli tuz çözeltilerinin daha az soğutma gücü vardır ve çatlama tehlikesini azaltmak ve yumuşak nokta oluşumunu engellemek için kullanılır. Yüksek konsantrasyonlu tuz çözeltilerinde ulaşılan sertleşme derinliği, suya göre daha azdır. Çoğunlukla küçük kesitli parçaların sertleştirilmesinde bu yöntem kullanılır. Tuz çözeltileri 150 °C'nin altındaki sıcaklıklarda kullanılmaktadır. Mikroyapı bakımından martenzit etkisinin az olduğu bölgelerde tuz çözeltisinin gerilim

giderme etkisi daha fazladır. Martenzit dönüşümlerinde gerilmeler yüksek olacağından dolayı soğuma ortamının homojen yapıda olması ve soğuma hızının düşük olmasını istenir.

3.5.3. Yağda sertleştirme

Yağda soğutma işleminde genel olarak mineral, bitkisel ve hayvanlardan alınan yağ kullanılmaktadır. Bitkisel yağlar perlit oluşma hızına yakın sıcaklıklarda en yüksek soğutma gücüne sahiptirler. Yağlarda banyo sıcaklığı ile soğutma gücünün birbiri ile alakası yoktur. Günümüzde bitkisel yağlar mineral yağlara oranla daha az kullanılmaktadır. Nedeni ise bitkisel yağların tuz banyosunda sabunlaşmasıdır. Mineral yağlar bitkisel yağlara göre daha iyi sonuç vermektedir. Mineral yağlar iki kısımda incelenmektedir. Bunlardan biri parlak soğutma yağlarıdır. Bu soğutma yağları ile adından da anlaşılacağı üzere ani soğutma karşısında parlak bir yüzey elde edilir. Bir diğer yağ ise yüksek güçlü soğutma yağları olarak adlandırılır. Bu soğutma yağında ise yüzeyin rengi siyahtır. Bu yağlarda yüksek soğutma gücüne ulaşılması için yüksek polimer maddeler ilave edilmektedir.

Yağda soğutma işleminde parçanın yüzeyinde kalan yağı temizlemek için temizleme sıvısı kullanılmaktadır. Bu da ayrı bir maliyet gerektirmektedir. Bunu önlemek amacıyla su ile yıkanabilen yağlar tercih edilmektedir. Soğutma hızını etkileyen faktörlerden biri yağın çeşidi iken parça büyüklüğüne de bağlıdır.

3.5.4. Havada sertleştirme

Havada sertleştirme işleminde havanın soğutma gücü parça ile hava arasındaki sıcaklık farkına bağlıdır. Fark ne kadar fazlaysa soğutma gücü o derece güçlüdür. Aradaki sıcaklık farkı parçayı şiddetli gerilmelere maruz bırakabilir. Bu gerilmeler zamanla parçada istenmeyen durumlara yol açabileceği için bu yöntem günden güne terkedilmektedir.

3.5.5. Sıcak banyoda sertleştirme

Bu işlem ilk olarak sadece martenzitik yapı elde edilmesi amacı için geliştirilmiştir. Daha sonrasında beynit-martenzit yapısı oluşturulacak şekilde de bu işlemde yararlanılmaktadır. Sıcak banyoda sertleştirme işleminde yapılacak formlardan bir diğeri parçanın doğrultulması işlemidir. Bu doğrultma işleminde parça östenitik yapıda iken sıcak banyodan alınabilir ve doğrultma işlemi yapılabilir. Bu işlem gerçekleştirilirken çok hızlı olunması gerekmektedir.

çünkü parça ve hava farkından oluşabilecek martenzitik yapı engellenmelidir. Normal yağda soğutma işleminde kazanılacak sertlik sıcak banyodaki işleme göre daha fazladır [12].

3.6. Temperleme

Çelikler, yüksek sertlik ve mukavemet seviyelerine ulaşmaya kadar ısı işleme tabi tutulabilmektedir. Bunu yapmanın nedenleri; yüksek çalışma gerilimine maruz kalan yapısal bileşenlerin, sertleştirilmiş bir yapının yüksek mukavemetine ihtiyaç duymasındır. Benzer şekilde, kalıplar, bıçaklar, kesme cihazları ve şekillendirme cihazları gibi aletler, aşınmaya ve deformasyona direnmek için sertleştirilmiş bir yapıya ihtiyaç duymaktadır. Su verilmiş sertleştirilmiş çelikler o kadar kırılgandır ki, hafif darbelerle bile kırılmaya neden olabilir. Temperleme, bir çeliğin sertliğini ve dayanımını önemli ölçüde düşürmeden kırılganlığını azaltan bir ısı işlemdir. Tüm sertleştirilmiş çelikler kullanımdan önce temperlenmelidir.

Temperleme, sertleştirilmiş bir çeliğin ötektoid sıcaklığın altındaki bir sıcaklığa ısıtılması ve kırılganlığı azaltmak için belirli bir süre bu sıcaklıkta tutulması ve ardından havayla soğutulması aşamalarından oluşur. Temperlemenin amacı, sertleştirilmiş çeliğin kırılganlığını azaltmaktır. Çelik, sertleştikten sonra, kaba ve çok kırılgan olan martenzit içerir. Bu şekilde kullanılamaz. Daha az kırılgan hale getirmek için tavlama esastır. Temperleme sırasında martenzit sertliği de bir dereceye kadar düşebilir.

Sertleştirme ayrıca çeliği kırılgan yapan yüksek iç gerilimlere sebep olur. Martenzitin keskin yapısı da kırılganlığa neden olan üç eksenli gerilim durumuna neden olur. Temperleme sırasındaki martenzit yarı kararlı bir fazdır. Denge fazları ferrit ve sementittir. Temperleme sırasında martenzit, düşük karbonlu martenzite ve ardından denge fazlarına (ferrit ve sementit) dönüşür ve bu da kırılganlığın azalmasına neden olur. İç gerilimler de azaltılarak çeliği daha az kırılgan hale getirir.

Yüksek karbonlu martenzit temperlendiğinde meydana gelen değişiklikler dört aşamaya ayrılmaktadır:

- İlk aşama
- İkinci aşama
- Üçüncü aşama

➤ Dördüncü aşama veya İkincil sertleştirme

Temperlemenin ilk aşaması 50-200°C arasında gerçekleşmektedir. Martenzit, ikizler arasında ϵ -karbür (Fe_{2-4}C) olarak bilinen düşük karbonlu bir marstansiyona ve geçiş çökeltisine parçalanır. İkinci aşama 205-305°C'de ve tutulan östenitin beynite ayrışması ve sertliğin azalması şeklinde gerçekleşmektedir. Üçüncü aşama ise 250-500°C'de düşük karbonlu martenzit ve ϵ - karbür bileşiminin, görünür parçacıklar ve hızlı yumuşama vermek üzere kademeli olarak kabalaşan ferrit ve sementite dönüştürülmesi işlemidir.

Temperlemenin dördüncü aşamasında ikincil sertleştirme gerçekleşmektedir. İkincil sertleştirme bazı çeliklerde temperleme sırasında sertlik azalmak yerine artması olayıdır.

Alaşımli karbürlerin çökmesi sonucu oluşur ve karbür oluşturan alaşım elementleri içeren çelikler ikincil sertleşme gösterir. W, Cr, V vb. içeren çelikler ikincil sertleşme gösterir. %18 W, %4 Cr ve %1 V içeren yüksek hız çeliği ikincil sertleşme gösterir. Takım çelikleri olarak yüksek hız çelikleri kullanılmaktadır. Talaşlı imalat sırasında takım ucunun sıcaklığı yükselir ve diğer çeliklerde yumuşamaya neden olur. Ancak yüksek hız çelikleri, ikincil sertleşme nedeniyle sertliklerini daha uzun süre korur ve bu nedenle daha uzun süre kullanılabilir.

İkincil sertleştirmede temperlemenin dördüncü aşamasında 400-700°C'de alaşımli çelikte karbür değişiklikleri gerçekleşir ve ikincil sertleşme meydana gelir. Bir alaşım ilavesi içeren çeliklerde önce sementit oluşur ve alaşım ona difüze olur. Yeterince zenginleştirildiğinde, Fe_3C bir alaşımli, karbüre dönüşür. Daha fazla zenginleştirmeden sonra, bu karbürün yerini bir başkası alabilir ve bu geçiş karbür oluşumu, denge karbür oluşmadan önce birkaç kez tekrarlanabilir.

Karbür oluşturan elementleri içeren çeliklerde, reaksiyonlar genellikle daha karmaşıktır ve ayrılan karbürleri mutlaka aynı alaşım elementlerine dayanan karbürler takip etmez. Dönüşüm, kayda değer bir sertleşme olmaksızın atomların kademeli değişimi ile yerinde de gerçekleşebilir veya mevcut demir karbürlerin yeniden çözülmesi ve tutarlı karbürün temperleme sırasında meydana gelen normal yumuşamaya karşı koyan bir sertleşmenin yeniden çekirdeklenmesiyle gerçekleşebilir. Bazı alaşımli çeliklerde, sertlik yaklaşık 500 °C'ye kadar sabit tutulur veya bazı durumlarda zirveye yükselir, ardından tutarlılığın

bozulması ve karbür parçacıklarının birleşmesi nedeniyle kademeli bir düşüş olur. Bu yaşlanma sertleştirme işlemi ikincil sertleştirme olarak bilinir ve çeliğin yüksek sıcaklıkta sürünme özelliklerini geliştirir [21].

3.7. Kriyojenik İşlem

Sıfırlı işlem olarak da bilinen bu işlem diğer ısıt işlemler gibi sertlik, yorulma direnci, tokluk ve aşınma direnci gibi konularda iyileştirme yapmak için kullanılmaktadır. İyileştirmeler kalıntı östenitin giderilmesi ve martenzite dönüştürülmesiyle elde edilir. Kriyojenik işlemi -80°C ile -200°C arasında yapılmaktadır. Genellikle -80°C ticari kriyojenik işlem, -190°C derin kriyojenik işlem olarak geçmektedir. Kriyojenik işlemde sonra genellikle temperleme işlemi devamında gelmektedir. Bunun sebebi ise malzemenin mekanik özelliklere katkısının olmasıyla alakalıdır [22].

Malzemelere yapılan kriyojenik işlem sayesinde mekanik özelliklere avantaj sağlanırken aynı zamanda bazı dezavantajları da vardır. Bu dezavantajların başında derin kriyojenik işleme tabi tutulan malzemelerde ertelenmiş çatlak olarak adlandırılan çatlak türünün işlemde sonra devam etmesidir. Kriyojenik işlemde kalıntı östenit giderilirken çatlak ilerlemeler de meydana gelebilir. Bunun nedeni kalıntı östenitin çatlak ilerlemesine mani olmasıyla alakalıdır [23].

4. METALLERE PLASTİK ŞEKİL VERME

4.1. Haddeleme

Bir iş parçasının, dönen merdanelerin arasından geçirilerek basma kuvvetine maruz kalmasıyla oluşan plastik deformasyona haddeleme denmektedir. Hadde ürünleri kütük, blum, slab, profil, sac, ray ve boru olabilirler.

Haddeleme işleminde, malzemenin sıcaklığı, merdanelerin sıcaklığı, yağlama, malzeme ve merdane arasındaki mesafe, merdanelerin çapı önemli rol oynamaktadır. Haddeleme işleminin bitiminde yüzey kontrolü ve ultrasonik muayene ile malzemenin hem yüzey hem de iç kısmında oluşan sıkıntılar giderilerek son kontrol yapılmaktadır.

4.2. Ekstrüzyon

Silindirik bir metalin, kovan içine yerleştirilip sonrasında basınç uygulanarak o delikten geçirilmesi işlemine ekstrüzyon denilmektedir. Bu yöntem ile profil, çubuk ve boru türü malzemeler ve karmaşık şekiller de elde edilmektedir. Sıcak ve soğuk olmak üzere iki şekilde de uygulanabilmektedir. Ekstrüzyon sırasında, ekstrüzyon hızı, sıcaklığı ve basıncın önemli etkileri vardır. Ekstrüzyon sırasında malzeme yüzeyinde oluşabilecek çatlaklar tahribatsız muayene yöntemleri ile bulunabilmektedir.

4.3. Dövme

Sıcak ve soğuk olmak üzere her iki çeşitte de bir kalıp içerisine konularak (alt ve üst kalıp) basma kuvvetinin etkisiyle ürün elde edilen plastik şekil verme işlemine dövme denir. Sıcak dövme işlemi gerçekleştirmek için malzemenin şekil verme sıcaklığına kadar ısıtılması gerekmektedir. Daha sonrasında kalıp içerisine yerleştirilerek çekiçler ya da presler yardımıyla dövme işlemi gerçekleştirilir. Bu plastik şekil verme işlemi açık kalıpta dövme ve kapalı kalıpta dövme işlemi olarak da ikiye ayrılmaktadır. Malzemede oluşabilecek yüzey kusurları tahribatsız malzeme muayene yöntemleri arasında yer alan manyetik partikül ile muayene ve penetrant ile muayene yöntemleri ile öğrenilirken, içyapıda oluşabilecek hatalar için de ultrasonik muayene yöntemi kullanılmaktadır [24].



Resim 4.1. Hammadde, dövülmüş malzeme ve çapağı

5. TEZ ÇALIŞMASININ LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Dövme, talaş kaldırmadan kalıplar aracılığı ile malzemelere şekil verme işlemidir. En eski dövme bulguları ise milattan önce 800'lü yıllara dayanmaktadır. Uygulama alanlarının çeşitliliği ve seri üretime uygun olması ile birlikte ihtiyaç duyulan en iyi yöntemlerden de biridir. Dövülmüş olan 38MnSiVS5 ve 33MnCrB5-2 malzemesi aşınma, sertlik, darbe tokluğu gibi mekanik uygulama alanlarında diğer alaşımlı çeliklere nazaran daha çok kullanılmaktadır. Bu malzemelerle ilgili yapılan araştırmalar ise aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

Silva ve arkadaşları mikro alaşımlı çelik için, yüksek çalışma sıcaklığıyla ilişkili yüksek kükürt içeriği, simülasyonlarda tahmin edilebilen haddelenmiş parçalarda büyük merkezi boşlukların oluşumunu belirledi. Karbon çeliği ile yapılan iş parçalarının iç kusur göstermediği koşullarda, mikro alaşımlı çelik 38MnSiVS5 ile yapılan diğer parçalar büyük merkezi oyuklar gösterdi. Yüksek manganerz sülfür içirme ve yüksek sıcaklıklardaki sıcak işleme, iç çatlak oluşumunun en önemli faktörleri olduğu bulundu [25].

33MnCrB5 malzemesiyle yapılan bir çalışmada yapı denklemleri kullanılarak sıcak deformasyon davranışı ve gerilme oranı duyarlılığı yarı statik ve yüksek sıcaklık plastik deformasyon simülasyonları yapılmıştır. Yapılan simülasyonlar sonucunda, deneysel çalışmalarda 10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3} s^{-1} gerinim hızlarında akma gerilmeleri sırasıyla 627 Mpa, 632 Mpa ve 638 Mpa olarak elde edilmiştir [26].

38MnSiVS5 mikro alaşımlı çeliğin izotermal dönüşüm ve termomekanik işleminden sonra kırılma tokluğu davranışı incelendiğinde asiküler ferrit, dövme dereceli orta karbonlu çelik 38MnSiVS5'te termomekanik işlemlerin yanı sıra izotermal olarak da üretilmiştir. 365-400°C'de izotermal işlemle yüksek hacimli bir iğneli ferrit fraksiyonu elde edilebildiği bununla birlikte, daha yavaş soğuma hızları nedeniyle izotermal dönüşüm sıcaklıklarının 400 ° C'den 500 ° C'ye yükselmesiyle ferritin morfolojisi asikülerden beynitik veya poligonal olarak değiştiği gözlemlenmiştir. Östenitin deformasyonu nedeniyle termomekanik işleme yolu, inklüzyonların sayı yoğunluğuna göre tane sınırı çekirdeklenme yerlerinin sayı yoğunluğunun artmasıyla sonuçlandığı, böylece iğnemsî ferrit yerine beynit ortaya çıktığı bulunmuştur. Çalışma, yüksek mukavemetli-yüksek tokluk üretmek için maliyetli su verilmiş ve temperlenmiş çeliklerinin ekonomik açıdan uygun mikro alaşımlı

eliklerle uygun ısıı işlem süreçleriyle değiştirilmesinin mümkün olduğu kavramını güçlendirmiştir [27].

4340 Çeliğin mekanik özelliklerine kriyojenik işlemin etkisi adlı bir araştırmada, genel olarak kriyojenik işlem görmüş numunelerin sertlik ve yorulma dayanımının biraz daha yüksek olduğu, buna karşılık kriyojenik işlem görmüş numunelerin tokluğunun geleneksel işlem görmüş çeliğe göre daha düşük (%14,3 azalma) olduğu gösterilmiştir. Nötron kırınımı, tavlama sırasında olası karbür oluşumu ile birlikte, kalıntı östenitin martensite dönüşümünün meydana geldiğini, kriyojenik olarak işlenmiş numunelerin sertliğini ve yorulma direncini geliştirmede önemli bir faktör olduğunu gösterdi. Çeliğin yorulma sınırı, kriyojenik işlem ve temperlemeden sonra iyileştirildi. Bu durum malzemenin daha yüksek sertlik ve mukavemetine bağlanarak açıklanmıştır [28].

İşlenebilirliği artırmak için talaş kaldırmayı kolaylaştırmak, üretkenliği artırmak ve kesici takımların ömrünü uzatmak için mikro alaşımlı çeliklere kükürt eklenir. Yapılan bir çalışmada 38MnSiVS5 ve 0.39C1.47Mn mikro alaşımlı çeliklerin sıcak işlenebilirliğinin analizi için işleme haritaları yapılmıştır [29].

Zhang ve arkadaşları V–Ti–N yüksek mukavemetli mikro alaşımlı orta karbonlu çeliği değerlendirdi ve çeliğin ferrit ve perlitten oluştuğu sonucuna vardı. Ayrıca, son haddeleme sıcaklığını azaltarak ve haddelemeden sonra soğutma hızını hızlandırarak, ince taneli ferrit ve dar lameller boşluklu perlit içeren bir mikroyapının, ferrit üzerine dağılmış çok sayıda çökelmiş faz ile elde edilebileceğini gözlemlediler [30].

Kim ve Park [2], akış eğrileri ile V-mikro alaşımlı orta karbonlu bir çeliğin dinamik yeniden kristalleşmesinin Avrami kinetiği incelendi ve tane boyutu dağılımının gelişimi analiz edildi. Çeşitli deformasyon koşulları altında akış yumuşama kinetiklerini ve akış eğrilerini modellediler ve akış eğrilerinden tahmin edilen yumuşama fraksiyonlarının, dinamik yeniden kristalleşme kinetiğinin dinamik yeniden kristalleşme kinetiğinin geciktirildiği, daha sonraki bir deformasyon aşamasında dinamik olarak yeniden kristalleşen fraksiyonları olduğundan fazla tahmin etme eğiliminde olduğu sonucuna vardılar [31].

Yapılan bir çalışmada bor katkılı ve katkısız çeliklerin mekanik özelliklerini araştırmış ve bor katkılı çeliklerin gerinim oranı hassasiyetinin bor ilavesiz çeliklere göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir [32].

Literatürde günümüze kadar sırasıyla borlu çeliklere ve vanadyum mikroalaşımli çeliklere çeşitli ısıt işlemler rotaları uygulanmasına rağmen temperleme ve temperleme sonrası kriyojenik prosedürleri tam anlamıyla çalışılmadığı için bu tez konusunun özgünlüğü ortaya çıkmaktadır.

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneylerde kullanılan malzeme gruplarına dair yapılan mekanik testler darbe, aşınma, sertlik ve mikroyapı üzerine olmasından dolayı bu test gruplarında yoğunlaşmıştır.

6.1. Malzeme

Deney çalışmalarda kullanılan ticari olarak Hasco metalden temin edilen 33MnCrB5-2 malzemesinin kimyasal bileşimi çizelge 6.1. ve 38MnSiVS5 malzemesinin kimyasal bileşimi çizelge 6.1.'de verilmiştir.

Çizelge 6.1. 33MnCrB5-2 malzemesinin kimyasal bileşimi

33 MnCrB5 Malzemesinin Kimyasal Bileşimi (%)							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Al	B
0.32	0.19	1.45	0.007	0.004	0.47	0.032	0.0033

Çizelge 6.2. 38MnSiVS5 malzemesinin kimyasal bileşimi

38MnSiVS5 Malzemesinin Kimyasal Bileşimi (%)									
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Al	Cu	V
0.39	0.59	1.29	0.022	0.035	0.16	0.12	0.018	0.22	0.10

6.2. Dövme İşlemi

Deneyisel çalışmalarda kullanılan 33MnCrB5-2 malzemesi ve 38MnSiVS5 malzemesine plastik şekil verme işlemi olan dövme işlemi uygulanmıştır. Numuneler ilk olarak 55mm çapında, 250mm boyunda kesilmiştir. Kesilen numuneler, Erco marka 600 kw'lık indüksiyon cihazında 60mm çapında bobinde kullanılarak indüktans kuvveti ile ısıtma işlemi uygulanmıştır. Bu malzemeler sırasıyla 33Mn ve 38Mn olarak kodlanmıştır.



Resim 6.1. Isıtma bobini



Resim 6.2. İndüksiyon cihazı (600kw)

Isıtma işleminden sonra dövme işlemi 1150 °C’de 6300 tonluk Huta marka havalı çekiç yardımıyla, kalıp malzemesi DIN 1.2714 (EN 55NiCrMoV7) olan çelikte gerçekleştirilmiştir. Malzemelerin kalınlıkları 12mm’ düşürüldükten sonra işlem malzemeler soğumaya bırakılmıştır. Deneyde kullanılan dövme tezgâhı resim 6.3’ de gösterilmiştir.



Resim 6.3. Dövme tezgâhı

6.3. Kumlama

Dövülmüş 33MnCrB5-2 ve 38MnSiVS5 çeliklerine yüzeylerindeki tufalleri giderilebilmesi amacıyla kumlama işlemi uygulanmıştır. Endumak markalı kumlama cihazında, S390 malzemesi olan çelik granürlerle 30 dakika kumlama işlemi uygulanmıştır. Kumlama cihazı Resim 6.4’de gösterilmiştir.



Resim 6.4. Kumlama cihazı

6.4. Manyetik Partikül İle Malzeme Muayene

Dövme işlemi sırasında malzemelerin yüzeyinde meydana gelen, göz ile görülemeyecek derecedeki çatlak ve hasarları görmek amacıyla manyetik partikül ile muayene işlemi uygulanmıştır. Deneyde kullanılan malzemelerin kontrolünde TMM marka, MP 800-2AC modeli çatlak kontrol cihazı kullanılmıştır. Çatlak kontrol cihazı resim 6.5’de verilmiştir.



Resim 6.5. Manyetik partikül ile muayene cihazı

6.5. Isıl İşlem

6.5.1. Temperleme işlemi

Dövülmüş 33MnCrB5-2 ve 38MnSiVS5 çeliklerine mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla su verme ve temperleme ısıl işlemi yapılmıştır. TURHAN ISIL İŞLEM markalı, atmosfer kontrollü fırında, dövülmüş olan 33MnCrB5-2 ve 38MnSiVS5 çelikleri 890 °C östenitlenip su verilmiş ardından 400 °C’de 90 dakika temperleme işlemi uygulanmıştır. Deneyde kullanılan fırın (Ön ısıtma, Östenitleme ve Temperleme) Resim 6.6’da gösterilmiştir. Bu malzemeler sırasıyla 33Mn+T ve 38Mn+T olarak kodlanmıştır.



Resim 6.6. Isıl işlem fırınları (Ön ısıtma, östenitleme, temperleme)

6.5.2. Kriyojenik İşlem

Deneyisel çalışmada Resim 6.7’de kriyojenik işlem için kullanılan HST DWC markalı cihaz verilmiştir. İlk olarak dövme işlemi sonrası -80 °C’de 2 saat kriyojenik işlem yapılmıştır. Bu malzemeler 33Mn+K ve 38Mn+K olarak kodlanmıştır. İkinci olarak temperleme ısıl işlemi sonrası -80 °C’de 2 saat kriyojenik işlem yapılmıştır. Bu malzemeler ise 33Mn+TK ve 38Mn+TK olarak kodlandırılmıştır.



Resim 6.7. Kriyojenik cihazı

6.6. Mikroyapı Analizi

Mikroyapı analizleri için bakalite alınacak numuneler abrasiv kesme işlemine tabi tutulmuştur. Kesme cihazı olarak Resim 6.8’de verilen İmpro markalı, Procut-um modeli kesme cihazı kullanılmıştır.



Resim 6.8. Kesme cihazı

Numunelerin mikroyapısına bakabilmek için İmpro markalı bakalite alma cihazıyla işlem gerçekleştirilmiştir. Cihazın resmi şekil 6.9’de gösterilmiştir.



Resim 6.9. Bakalite alma cihazı

Zımparalama işlemleri Metkon marka zımparalama ve parlatma cihazında, sırasıyla 180,320,400,600,800 ve 1200'lük gridlik SiC zımparalar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Cihazın görseli 6.10'da verilmiştir. Zımparalama işlemi bittikten sonra pürüzsüz bir yüzey görüntüsü elde etmek amacıyla 9 μ m, 3 μ m ve 1 μ m'luk parlatma sıvısı ve keçesi kullanılarak parlatma işlemi uygulanmıştır.



Resim 6.10. Zımparalama ve parlatma cihazı

6.7. Optik Mikroskop

Deneyde kullanılan malzemelerin optik mikroyapı incelemelerinde Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünde bulunan Leica DMI5000 M model araştırma mikroskobu kullanılmıştır. Cihaz, Resim 6.11.' de verilmiştir.



Resim 6.11. Optik mikroskop

6.8. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Deneyde kullanılan malzemelerin mikroyapı incelemelerinde Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünde bulunan JEOL JSM-6060LV markalı Taramalı Elektron Mikroskobu kullanılmıştır (Resim 6.12.).



Resim 6.12. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

6.9. XRD Analizi

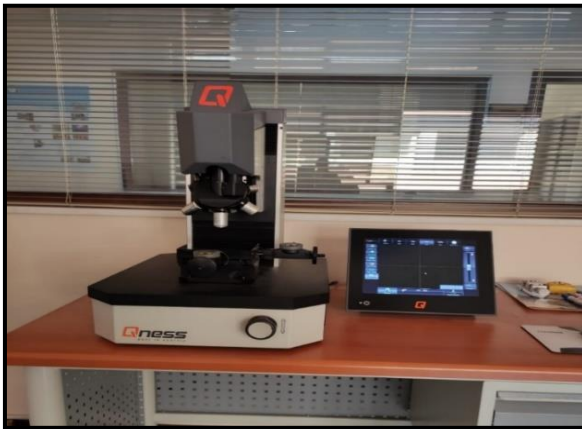
Numunelere yapılacak XRD analizleri için Resim 6.13.'te gösterilen Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde bulunan Bruker4 Marka D8 Advanced marka cihaz kullanılmıştır.



Resim 6.13. XRD Analiz Cihazı

6.10. Sertlik Testi

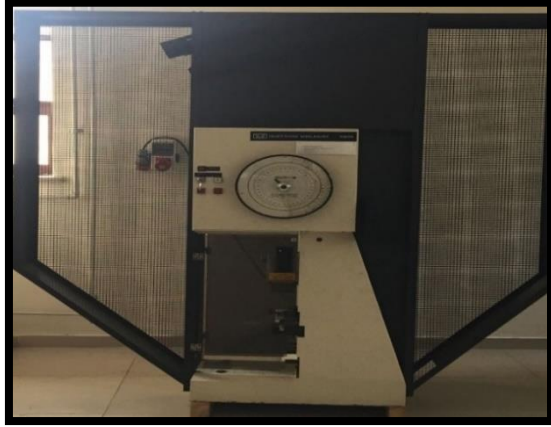
Numunelere metalografik işlemler sonrasında Gazi Üniversitesi'nde bulunan Resim 6.14.'te gösterilen QNESS marka makro sertlik test cihazı ile numunelerin sertlik ölçümleri yapılmıştır. Sertlik ölçümler yapılırken en doğru sonucu almak için her numune yüzeyinden 10 farklı noktadan sertlik ölçümleri alınıp aritmetik ortalamaları hesaplanmıştır.



Resim 6.14. Qness marka makro sertlik test cihazı

6.11. Çentik Darbe Testi

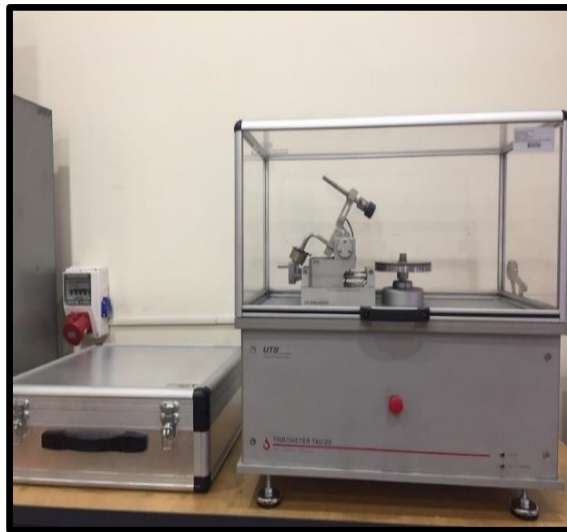
10x10x55 mm boyuna ayarlanan numuneleri test etmek amacıyla, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği bölümünde bulunan Instron-Wolpert PW30 300 J çentik darbe testi cihazı kullanılmıştır (Resim 6.15.).



Resim 6.15. Çentik darbe cihazı

6.12. Aşınma Testi

Numunelerin aşınma performanslarının belirlenmesi için numunelere aşınma testi uygulanmıştır. Uygulanacak aşınma testi için Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği bölümünde bulunan UTS marka Aşınma testi cihazı kullanılmıştır.



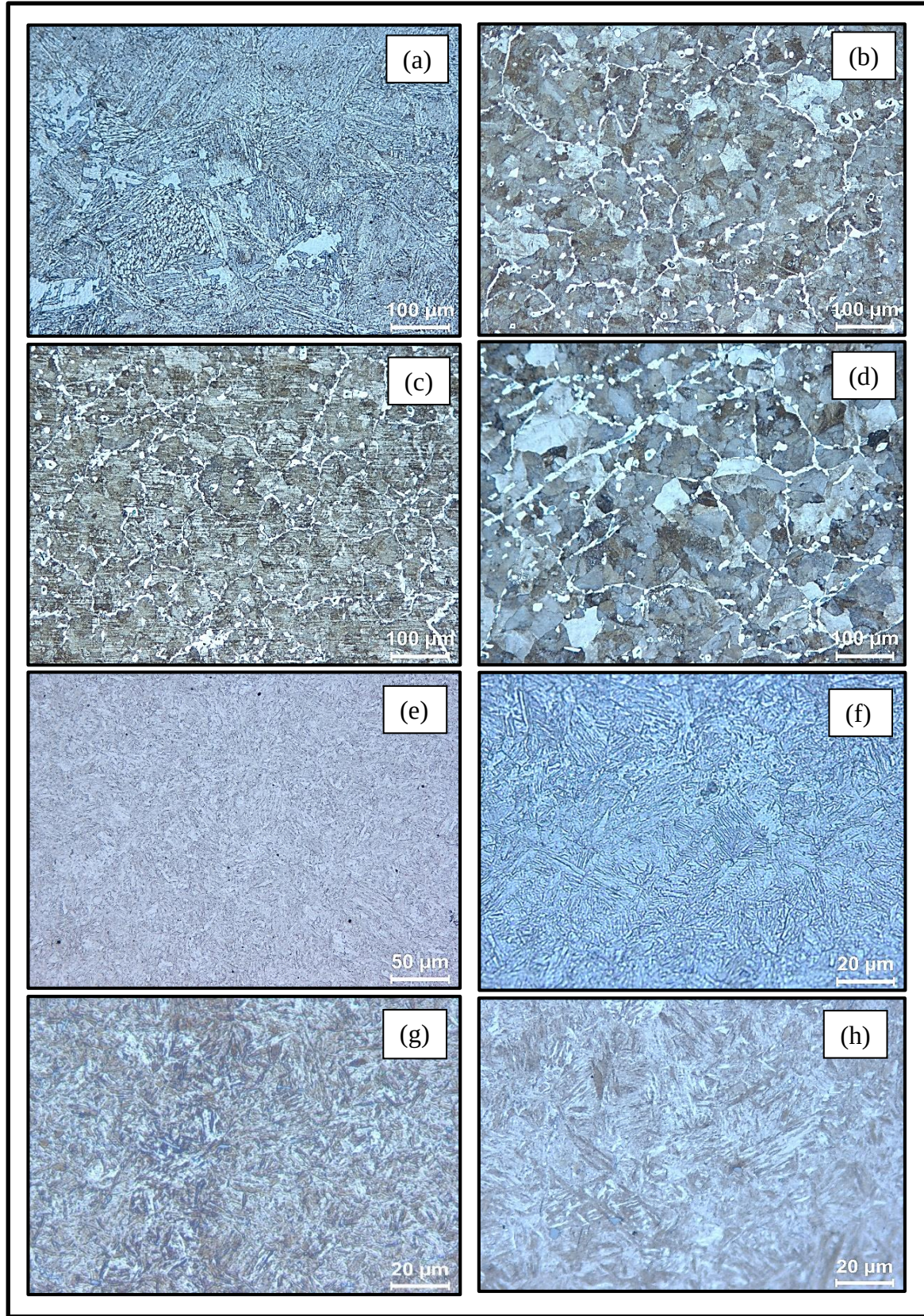
Resim 6.16. Aşınma cihazı

7. DENEYSEL SONUÇLAR

Deneyde kullanılan çeliklerin çalışma alanları ve uygulanan işlemler ile geliştirilecek özellikleri bakımından mikroyapı, XRD, sertlik, darbe ve aşınma analizlerine bakılmıştır. Yapılan testlerin sonuçları aşağıdaki gibidir.

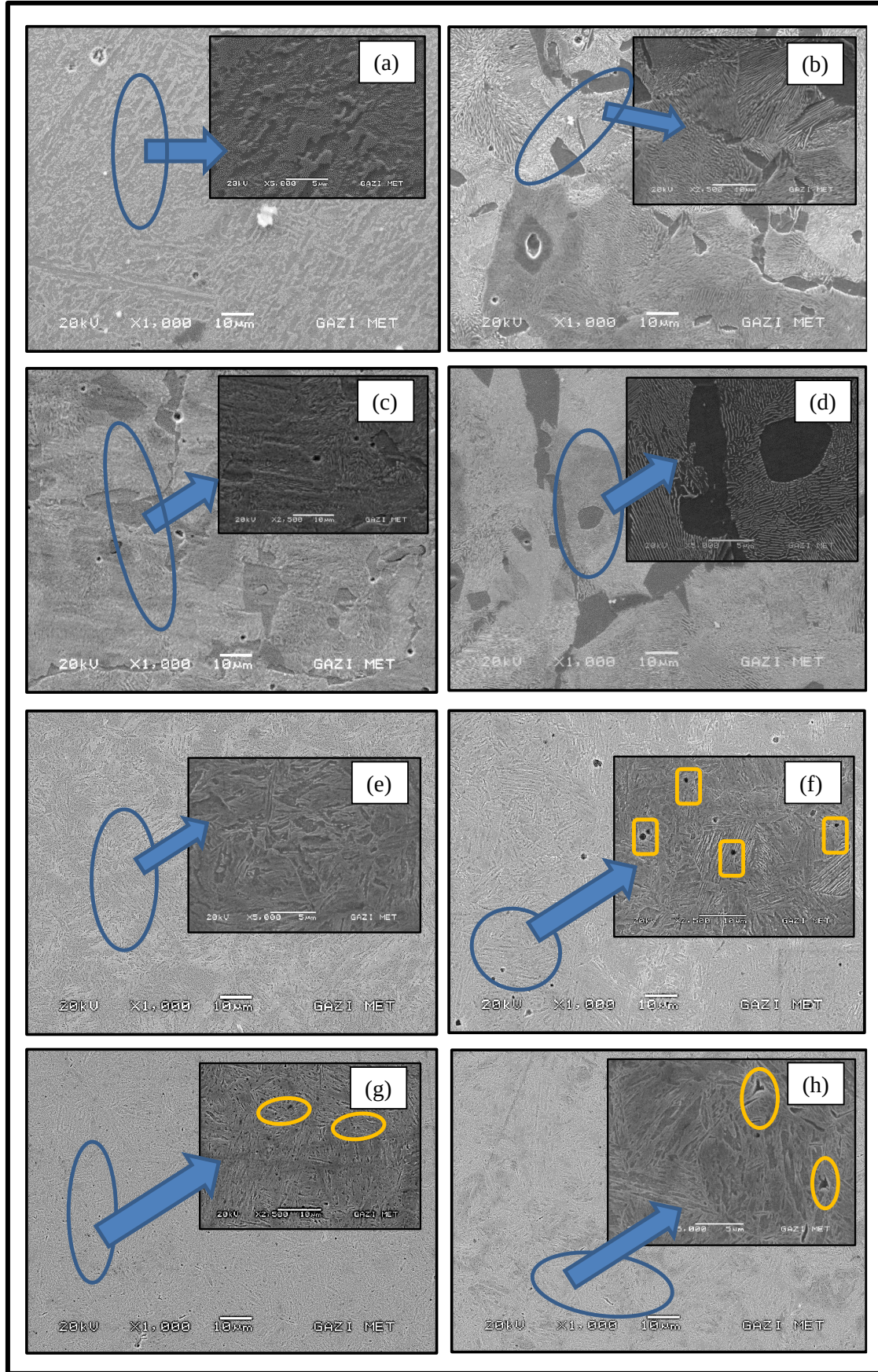
7.1. Mikroyapı İncelemeleri

Resim 7.1. de numunelerin optik mikroyapı görüntüleri verilmektedir. Resim 7.1 (a) da 33Mn olarak kodlanan dövme işlemi sonrası 33MnCrB5-2 malzemesine aittir. Bu yapı ferrit ve perlitten oluşmaktadır. Resim 7.1 (b) de dövme işlemi sonrası -80 °C de kriyojenik işlem uygulanan 33Mn+K numunesi görülmektedir. Mikroyapısı ferrit ve perlitten oluşmaktadır. Kriyojenik işlemin etkisiyle tane sınırlarında ki ferrit ağları daha kaba görülmektedir. Resim 7.1 (c-d) de 38Mn ve 38Mn+K numunelerinin optik mikroyapıları görülmektedir. Burada ferrit ve perlit bantları muhtemelen, Xu ve diğerlerinin belirttiği gibi, alaşım elementleri interdendritik bölgelere itildiğinde ve daha sonra sıcak dövmeden sonra belirgin hale geldiğinde, ilk katılaşma sırasında alaşımın ayrışmasından kaynaklanmaktadır [34,35]. Kriyojenik işlem ile bu bantlaşmaların kabalaştığı görülmektedir. Ötektoid öncesi ferrit, önceki östenit tanelerinde ince, sürekli bir ağ olarak görünür ve artan soğuma hızıyla ferritin hacim fraksiyonu artar. Bu etkiler genellikle soğutma hızının ferritlerin birleşme ve büyüme hızları üzerindeki etkisiyle ilişkilidir [36]. Kriyojenik işlem uygulamaları sonrası daha kaba perlit yapısı görülmüştür. Fakat tane boyutlarında artışa da sebep olmuştur. Soğutma hızlarındaki artış dönüşüm sıcaklığını düşürür ve daha düşük sıcaklıkta perlit formu daha ince perlit taneleri ile sonuçlanır [37]. Resim 7.1 (e-f-g-h) de dövme işlemi sonrası östenitleyip su verdikten sonra temperleme yapılan 33Mn+T, 38Mn+T ve ardından kriyojenik işlem yapılan 33Mn+TK, 38Mn+TK numunelerinin mikroyapıları görülmektedir. Buradaki baskın mikroyapı temperlenmiş martenzittir. Numuneler suda sürekli soğutulduğunda elde edilen mikroyapı, tokluk üzerindeki zararlı etkisinden dolayı arzu edilen bir faz olmayan martenzittir [38]. Bu nedenle bu malzemelere su verme sonrası temperleme ısı işlemi uygulanmıştır.



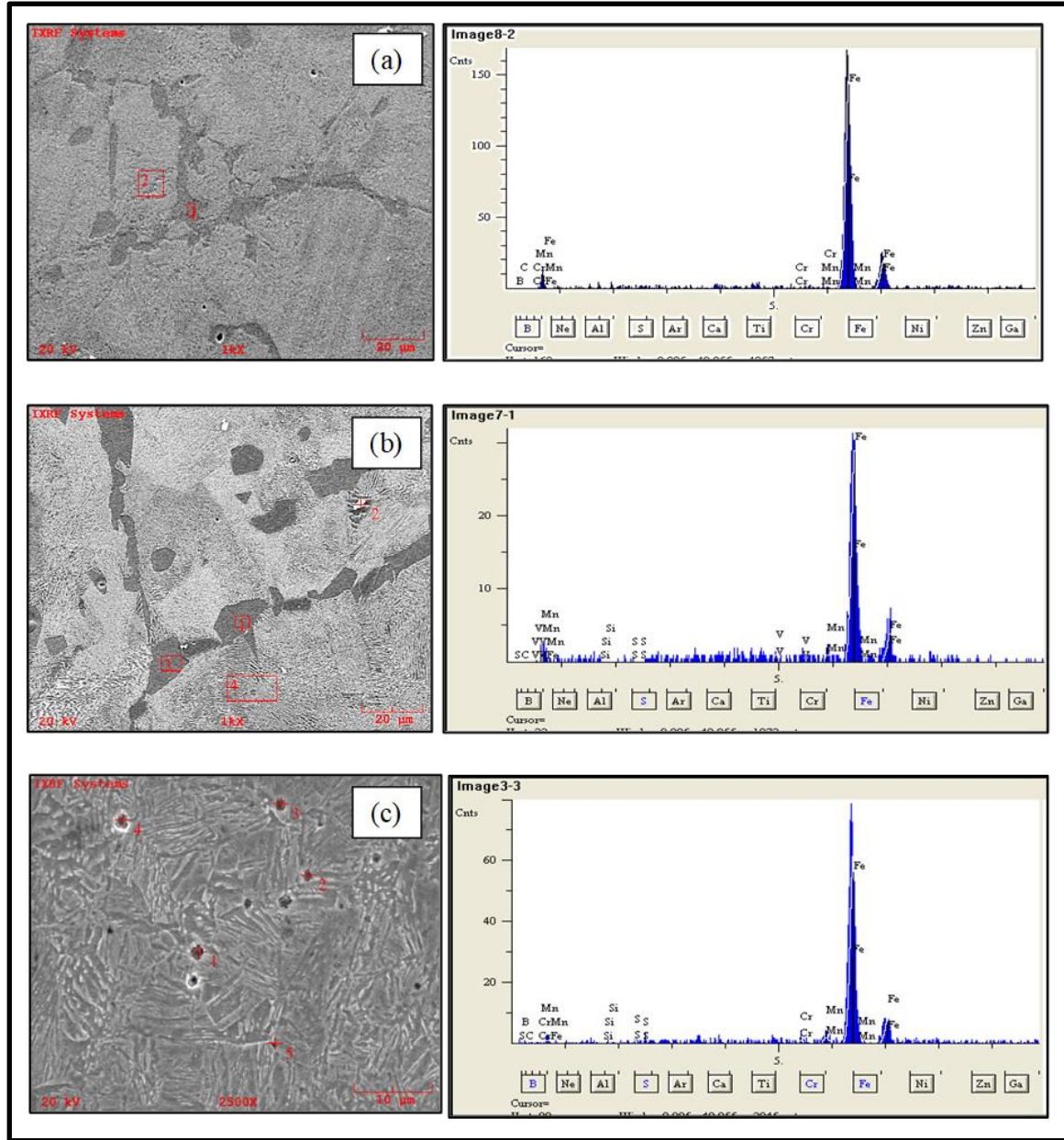
Resim 7.1. Numunelerin optik mikroskop mikroyapıları (a) 33Mn, (b) 33Mn+K, (c) 38Mn, (d) 38Mn+K, (e) 33Mn+T, (f) 33Mn+TK, (g) 38Mn+T, (h) 38Mn+TK

Resim 7.2 de numunelerin x1000 ve x2500 büyütmede SEM mikroyapıları görülmektedir. Optik mikroskoptan daha büyük büyütmelere bakılabildiğinden fazlar daha belirgin halde görülmektedir. Resim 7.2 (a-b ve c-d) 33Mn, 33Mn+K ve 38Mn, 38Mn+K numuneleri yer almaktadır. Kriyojenik işlemin perlit lamellerinin arasını açtığı görülmektedir. Yani daha kaba perlit yapısının oluşmasına sebep olmuştur. Ayrıca tane boyutu da artmıştır. Dövme işlemi sonrası kriyojenik işlem uygulanan numunelerde sertlikte azalma meydana gelmişti. Bu durum hall patch etkisiyle sertliğin neden azaldığını desteklemektedir [39]. Ötektoid öncesi ferrit ağlarının kriyojenik işlem ile genişlediği ve bazı bölgelerdeki ferrit ağlarında ayrılmalar olduğu gözlemlenmiştir. Resim 7.2 (e-f) de 33Mn+T ve 33Mn+TK numunelerinde kriyojenik işlem sonrası karbürlerin küresel formda (sarı bölgeler) sıklıkla olduğu görülmüştür. Bilindiği üzere yapı serbest enerjisinin düşürme eğilimindedir. Kriyojenik işlem ile 0 °C 'nin altında işlem yapıldığından düzensizlikle birlikte entropide azalmaktadır. Düzensizlik azaldığından termodinamik olarak yapının iç dengeyi sağlamak ve serbest enerjiyi azalmak için karbürlerin küresel formda olduğu düşünülmektedir. Resim 7.2 (g-h) de 38Mn+T ve 38Mn+TK numunelerinin görüntüleri yer almaktadır. Bu malzeme de S elementinin olmasıyla MnS inklüzyonlarının olduğu bilinmektedir [35,36]. Kriyojenik işlem ile bu inklüzyonların bazılarının ince uzun olan formdan daha yuvarlak bir şekle dönüştüğü görülmüştür. Bu durumda termodinamik iç dengeyi sağlamak için olduğu düşünülmektedir. 38Mn numunelerinde MnS oluşumu ve MnS'lerin oluşturduğu partiküllerin 33Mn numunesine göre ince uzun ve daha iri boyutlu küresel şekilde meydana gelmesi, 38Mn numunelerinin daha düşük darbe tokluğu vermesine sebep olmuştur.



Resim 7.2. Numunelerin SEM mikroyapıları (a) 33Mn, (b) 33Mn+K, (c) 38Mn, (d) 38Mn+K, (e) 33Mn+T, (f) 33Mn+TK, (g) 38Mn+T, (h) 38Mn+T

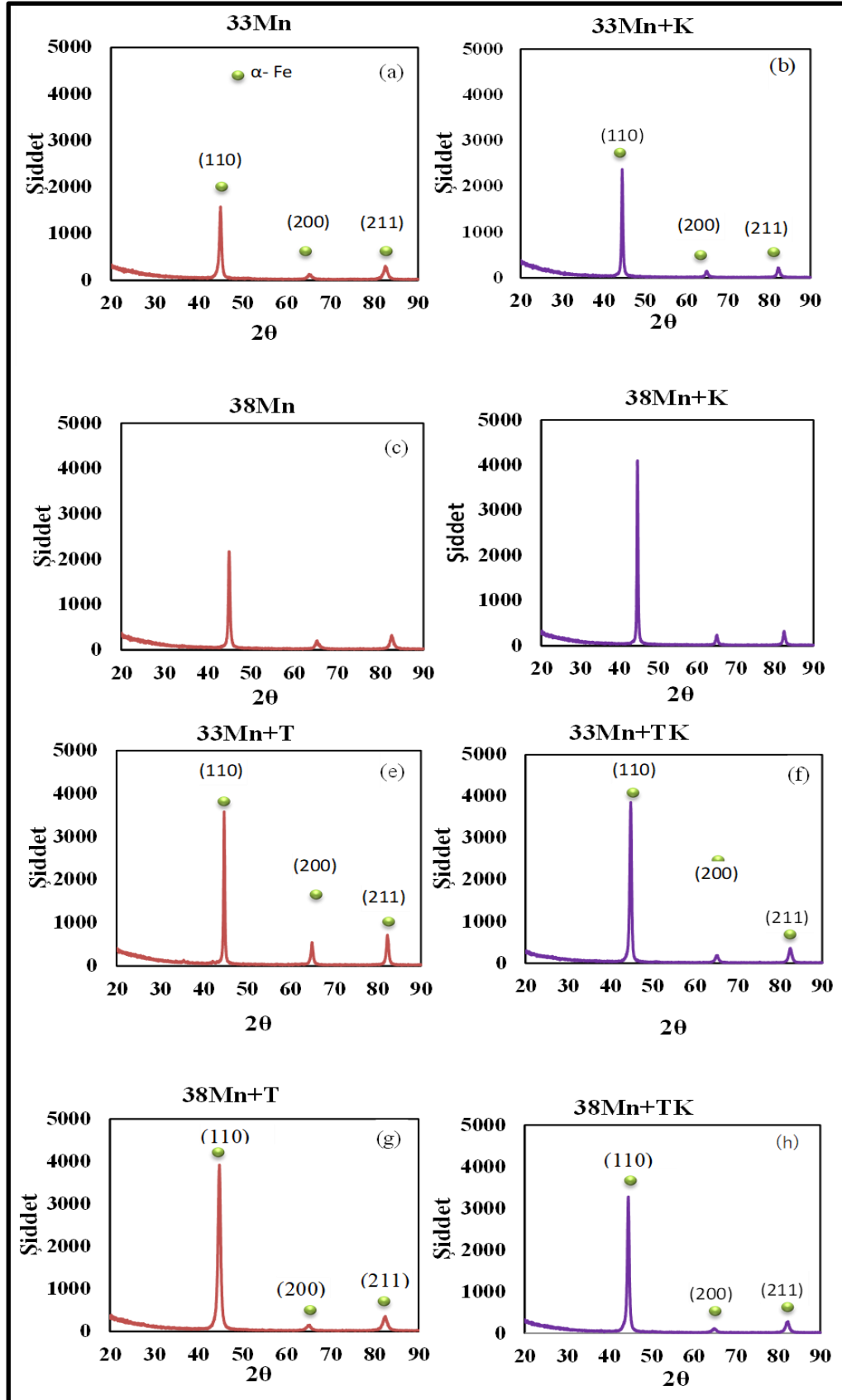
Resim 7.3 de SEM mikroyapıları üzerinden alınan EDS analizleri görülmektedir. Resim 7.3 (a) da yer alan 33Mn+K numunesinin mikroyapıdaki 1.noktada Cr elementinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Cr ferrit oluşturan elementler grubundan yer almaktadır. Bu bölgeler ferrit ağları olarak bilindiğinden Cr elementinin bu nedenle daha yüksek oranda olduğu düşünülmektedir. Resim 7.3 (b) de 38Mn+K numunesinde ferrit ağlarında Si ve V elementinin oranının yüksek olduğu görülmüştür. Si ferrit oluşturu element olduğundan ferrit adacıklarında bu nedenle yüksek oranda çıktığı düşünülmektedir. Vanadyumun oranının yüksek olması da karbür oluşturu etkisiyle tane sınırına yerleşmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Resim 7.3 (b) de 33Mn+TK numunesinde oluşan küresel formdaki karbürler yer almaktadır. Bu bölgelerdeki EDS analizlerinde %15 B ve %3 C elementleri tespit edilmiştir. Kriyojenik işlem ile Bor karbürün kümелendiğı hem EDS analizinde hem de mikroyapılarda görülmektedir.



Resim 7.3. Kriyojenik uygulanan numunelerin EDS analizleri

7.2. XRD Sonuçları

Şekil 7.1 de tüm numunelerin XRD grafikleri verilmiştir. Genel olarak dövme işlemi sonrası uygulanan kriyojenik işlem ile 2 grup malzemedeki de α -Fe' in pik şiddetlerinde artış meydana gelmiştir. En yoğun pik düzlemi tüm numunelerde (110) düzlemi olarak gözlemlenmiştir. Temperleme ısı işlemi hem 33MnCrB5-2 malzemesinde hem de 38MnSiVS5 malzemesinde (211) düzleminin pik şiddetini artırmıştır.



Şekil 7.1. Numunelerin XRD grafikleri (a) 33Mn, (b) 33Mn+K, (c) 38Mn, (d) 38Mn+K, (e) 33Mn+T, (f) 33Mn+TK, (g) 38Mn+T, (h) 38Mn+TK

XRD analizi ile elde edilen FWHM değeri ile tüm malzemelerin kristalite boyutu ve dislokasyon yoğunluğu hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar Williamson–Hall denklemine göre yapılmıştır [40]. Değerler Çizelge 7.1’ de gösterilmektedir. Dövme işlemi sonrası 33Mn malzemenin dislokasyon yoğunluğu kriyojenik uygulandıktan sonra 33Mn+K numunesinde görüldüğü üzere azalmaya sebep olmuştur. Aynı durum 38Mn ve 38Mn+K numunelerinde de görülmüştür. Bu durum dövme sonrası uygulanan kriyojenik işlemin tane boyutunu artmasına sebep olduğundan dislokasyon yoğunluğunu azalttığı düşünülmektedir. Sertlik değerlerine baktığımızda 33Mn+K ve 38Mn+K numunelerinin sertlik değerinin de azaldığı görülmüştü. En yüksek dislokasyon yoğunluğu 38Mn+TK numunesinde hesaplanmıştır. Sertlik değeri bu numunede de paralellik göstererek en yüksek sertlik ölçülmüştür.

Williamson–Hall denklemi;

$$\beta \cdot \cos\theta = k \cdot \lambda / D + 4\epsilon \sin\theta \quad (7.1)$$

Burada;

β = FWHM değeri (radyan)

$k = 0.94$

$\lambda = 1,54 \text{ \AA}$ (Cu-K α)

D = Kristalite boyutu

ϵ = mikro gerinim

Dislokasyon yoğunluğu ise aşağıdaki formülden hesaplanmıştır.

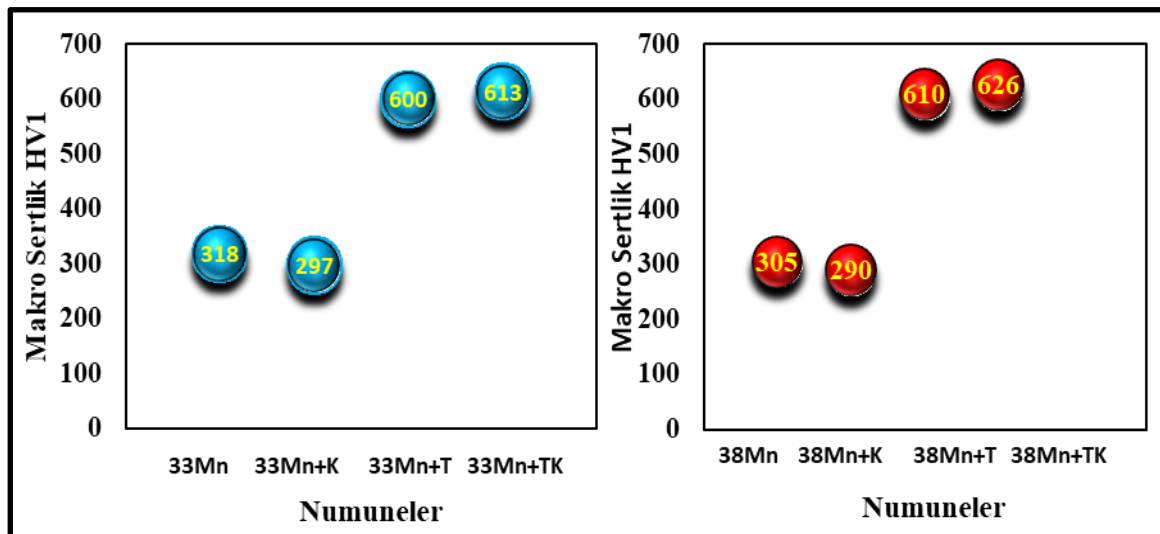
$$\delta = 1/Dp^2 \text{ (1/m}^2\text{)}$$

Çizelge 7.1. Numunelerin kristalite boyutu ve dislokasyon yoğunluğu değerleri

Numuneler	Kristalite boyutu Å	Dislokasyon yoğunluğu (1/m ²)
33Mn	100,43	9,91*10 ¹⁵
33Mn+K	170,12	3,45*10 ¹⁵
38Mn	129,16	5,99*10 ¹⁵
38Mn+K	158,98	3,95*10 ¹⁵
33Mn+T	229,51	1,89*10 ¹⁵
33Mn+TK	128,82	6,02*10 ¹⁵
38Mn+T	99,55	10,08*10 ¹⁵
38Mn+TK	98,30	10,34*10 ¹⁵

7.3. Sertlik Test Sonuçları

Şekil 7.2 de tüm numunelerin sertlik değerleri verilmiştir. Sadece kriyojenik işlem uygulandığında 33Mn+K ve 38Mn+K numunelerinde sertliğin azaldığı görülmüştür. Bu durumun kriyojenik işlemin tane boyutunun büyümesine sebep olduğundan gerçekleştiği düşünülmektedir. Optik mikroyapı görüntüleri bu durumu destelemektedir. Ayrıca XRD analizi ile yapılan kristalite boyutları da büyüme olduğunu kanıtlamaktadır. Temperleme sonrası elde edilen sertlikler literatürle uyuşmaktadır [33]. Temperleme sonrası kriyojenik işlem uygulandığında sertlik 2 farklı malzeme grubunda da artışı sağlamıştır. Özellikle 33Mn+TK malzemesinde yer alan küresel formdaki karbürlerin sertliğin artışı sağladığı düşünülmektedir.



Şekil 7.2. Numunelerin makro sertlik değerleri

7.4. Darbe Test Sonuçları

Çizelge 7.2 de tüm numunelerin darbe tokluğu değerleri görülmektedir. Sadece kriyojenik işlem uygulanan numunelerin darbe tokluğu azalmıştır. Bu numunelerin sertlik değerlerinde de azalma olduğu görülmüştü. Temperleme sonrası kriyojenik uygulanan numunelerin darbe değerlerinde artış görülmüştür. $33\text{Mn}+\text{T} \rightarrow 33\text{Mn}+\text{TK}$ ve $38\text{Mn}+\text{T} \rightarrow 38\text{Mn}+\text{TK}$ numunelerinin mikroyapılarında görüldüğü üzere iğnemsî yapıda olan karbürlerin, kriyojenik işlem ile küresel forma geçtiğinden darbe tokluğunu arttırdığı düşünülmektedir.

Çizelge 7.2. Numunelerin darbe tokluğu değerleri

Numuneler	Darbe Tokluğu (joule)
33Mn	20
33Mn+K	15
38Mn	18
38Mn+K	14
33Mn+T	30
33Mn+TK	34
38Mn+T	22
38Mn+TK	24

7.5. Aşınma Test Sonuçları

Çizelge 7.3 de tüm numunelerin aşınma testi sonrası ağırlık kayıpları verilmiştir. En fazla ağırlık kaybı 38Mn+K numunesin de ölçülmüştür. Bu durum 38Mn+K numunesin aşınma dayanımının en az olduğunu göstermiştir. Tüm mekanik test sonuçları sadece kriyojenik işlem uygulandığında mekanik özelliklerin olumsuz etkilendiğini göstermiştir. 33Mn+TK numunesinde ise ağırlık kaybı en az ölçülmüştür. Su verme işlemi ardına temperleme ve kriyojenik işlem birlikte uygulandığında aşınma dayanımında iyileştiği kanıtlanmıştır.

Çizelge 7.3. Numunelerin aşınma testi sonrası 1000 metrede ağırlık kaybı değerler

Numuneler	Ağırlık Kaybı (mg) 1000metre
33Mn	0,0028
33Mn+K	0,0031
38Mn	0,0030
38Mn+K	0,0051
33Mn+T	0,0022
33Mn+TK	0,0013
38Mn+T	0,0026
38Mn+TK	0,0024

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

8.1. Sonuçlar

Bu çalışmada borlu çelik grubunda yer alan 33MnCrB5-2 malzemesi ile vanadyum mikro alaşımlı çelik olan 38MnSiVS5 malzemesi dövme yöntemi ile şekillendirildikten sonra numunelerin bir kısmı kriyojenik işlem uygulanıp diğer kısmı ise su verme ve temperleme sonrası kriyojenik işlem uygulanıp mikroyapıyı, kristalografiyi ve mekanik özellikleri nasıl etkilediği araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalardan aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

1. Her iki grup malzemede dövme işlemi sonrası kriyojenik işlem uygulandığında sertlik değerinin yaklaşık %6 azaldığı belirlenmiştir.
2. Dövme işlemi sonrası su verildikten sonra temperleme yapılan numunelerin darbe ve aşınma dayanımının ham malzemeye kıyasla yaklaşık %50 oranında arttığı tespit edilmiştir.
3. Dövme işlemi sonrası su verildikten sonra temperleme ve kriyojenik işlem uygulanan numunelerin ham malzemeye kıyasla darbe ve aşınma dayanımının ham malzemeye kıyasla yaklaşık %55 oranında arttığı tespit edilmiştir.
4. En yüksek sertlik değeri 38Mn+TK numunesinde 626 HV1 ölçülmüştür. Aynı zamanda dislokasyon yoğunluğu $10,34 \cdot 10^{15}$ ile en yüksek bu malzemede tespit edilmiştir.
5. En yüksek kristalite boyutu 33Mn+T numunesinde 229,51 Å olarak hesaplanmıştır. Bu durumun doğrudan dislokasyon yoğunluğu ile ilgili olması dislokasyon yoğunluğunun en az bu numunede hesaplandığını göstermiştir.

8.2. Öneriler

1. Dövme işlemi sonrası yapılan temperleme ve kriyojenik işlem sıcaklık ve süreleri değiştirilip farklı bir ısıtım işlem rotası oluşturulabilir.
2. Mikro alaşımlı ve borlu çeliklerin ısıtım işlem öncesi ve sonrası oluşan yapı değişiklikleri TEM mikroskobu ile ayrıntılı incelenebilir.
3. Isıtım işlemleri sonrası yapıdaki faz kinetikleri termal analiz yöntemleri ile çalışılabilir.

KAYNAKLAR

1. Steiner, R. (1993). *ASM handbook properties and selection: irons, steels, and high-performance alloys* (2. Baskı). Ohio: ASM International. 3-305.
2. Dikeç, G. (2010). *Malzeme bilgisi ve imal usulleri*. (1. Baskı). İstanbul: T.C. Gedik Üniversitesi. 46-72.
3. Callister, W. D. and Rethwisch, D. G. (2014). *Materials science and engineering*. (2.Baskı). Hoboken: Wiley & Sons. 392-396.
4. Singh, R. P. (2016). *Applied welding engineering* (2. Baskı). Processes, Codes, and Standards. Kidlington, Oxford: Waltham, MA: Butterworth Heinemann, an imprint of Elsevier Ltd. 8-59.
5. Serfiçeli, Y. S. (2001). *Malzeme Bilgisi*. (2. Baskı). Ankara: Form Ofset Basımevi, 45-66.
6. Bhadeshia, H. Honeycombe, R. (2017). *Steels: microstructure and properties*. (4). Oxford: Butterworth-Heinemann, 271-301.
7. Grip, C., E. Sperle, and Jan, O. (October 1984). *Applications of HSLA steels for beams and small flats. HSLA Steels Technology & [and] Applications: Conference Proceedings of International Conference on Technology and Applications of HSLA Steels*, Philadelphia.
8. Wang, X.M. and He, X.L. (2002). Effect of boron addition on structure and properties of lofw carbon bainitic Steels. *ISIJ International*, 42, 38-46.
9. Er, Ü., Gaşan, H. (2006). 23. *Ulusal Tarımsal Mekanizasyon Kongresi Bildiriler Kitabı Bazı borlu çeliklerin toprak işleme aletlerinin uç demirlerinde kullanımının laboratuvar koşullarında incelenmesi*, Çanakkale: Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarım Makinaları Bölümü, 232-230.
10. Davis, J. (2015). *Metals handbook, desk edition* (2. Baskı). Ohio: ASM International. 203-215.
11. Thelning, K-E., (1984) *Steel and its heat treatment* (2. Baskı.). London: UK Butterworths. 80-90.
12. Topbaş, M.A. (1998). *Çelik ve ısıt işleme el kitabı*. (1. Baskı). İstanbul: Prestij Yayınevi, 6-99.
13. Okamoto, H. (1990). *ASM handbook:alloy phase diagrams*. (3. Baskı) USA Ohio. 12.
14. Totten, G.E. (2006). *Stell Heat Treatment: Metalurgy and Technologies*. (2.Baskı) New York: Taylor&Francis Group, 2-8
15. Erden, M., Yılmaz, A. ve Şen, N. (2020). Nb-V Mikroalaşım Çeliğinde Mekanik Alaşımlama Süresinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi. *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*, 10(4), 42-54.

16. Brooks, C.R. (1996). *Principles of the heat treatment of plain carbon and low alloy steels*. (1. Baskı) Helsinki: ASM International, 7-29.
17. Savaşkan, T. (2007) *Malzeme bilimi ve muayenesi*, (11. Basım). İstanbul: Papatya Bilim Üniversite Yayıncılığı, 213-271
18. Lim, J.K and Chung S.H. (1990). *Stress effect on post.weld heat treatment embrittlement*. (7. Baskı). Philadelphia: American Society for Testing and Materials. 229-255.
19. Güleç, Ş ve Aran, A. (1995). *Malzeme bilgisi*. (2. Baskı). İstanbul: İTÜ Makine Fakültesi Ofset Atölyesi, 32-38
20. Krauss, G. (1990). *Steels: heat treatment and processing principles*, (2. Baskı). Ohio. ASM International, 43-240.
21. Asay, M. (7-9 Ekim 1998). “Yüksek Hız Çeliklerinin Isıl İşlem Sonrası Taşlama Operasyonunda Meydana Gelen Yumuşak Tabakanın Giderilmesi”, 1. Isıl İşlem Sempozyumu, İstanbul
22. Liu, S., Wu, X., Shi, L., Wu, Y. and Qu, W. (2015). Influence of varied cryotreatment on the wear behavior of AISI D2 steel, *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*. 3(9), 297–309.
23. Huang, J. Y., Zhu, Y. T., Liao, X. Z., Beyerlein, I. J., Bourke, M. A., Mitchell, T. E. (2003). Microstructure of cryogenic treated M2 tool steel. *Material Science and Engineering*, A 339 (1–2), 241–244.
24. Çapan. L. (1990). *Metallere Plastik Şekil Verme*. (2. Baskı). İstanbul: Çağlayan Kitap Evi, 119-146.
25. Silva, M. L. N., Pires, G. H. and Button, S. T. (2011). Damage evolution during cross wedge rolling of steel DIN 38MnSiVS5. *Procedia Engineering*, 10, 752-757.
26. Teker, E., Danish, M., Gupta, M. K., Kuntoğlu, M. and Korkmaz, M. E. (2022). Hot deformation behavior and strain rate sensitivity of 33MnCrB5 boron steel using material constitutive equations. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 75(3), 717-726.
27. Singh, P., Batra, U. and Sangal, S. (2017). Fracture toughness behavior of 38MnSiVS5 microalloyed steel after isothermal transformation and thermomechanical processing. *Materials Today: Proceedings*, 4(8), 8528-8537.
28. Zhirafar, S., Rezaeian, A. and Pugh, M. (2007). Effect of cryogenic treatment on the mechanical properties of 4340 steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 186(1-3), 298-303.
29. Da Silva Septimio, R., Button, S. T. and Van Tyne, C. J. (2016). Processing maps for the analysis of hot workability of microalloyed steels 38MnSiVS5 and 0.39 C1. 47Mn. *Journal of materials science*, 51(5), 2512-2528.

30. Zhang, X., Cai, Q., Zhou, G., Chen, Q. and Xiong, Y. (2011). Microstructure and mechanical properties of V–Ti–N microalloyed steel used for fracture splitting connecting rod. *Journal of materials science*, 46(6), 1789-1795.
31. Kim, K. W. and Park, J. K. (2015). A study of the dynamic recrystallization kinetics of V-microalloyed medium carbon steel. *Journal of materials science*, 50(18), 6142-6153.
32. Naderi, M., Ketabchi, M., Abbasi, M. and Bleck, W. (2011). Analysis of microstructure and mechanical properties of different boron and non-boron alloyed steels after being hot stamped. *Procedia Engineering*, 10, 460-465.
33. Dini, G., Vaghefi, M. M. and Shafyei, A. (2006). The influence of reheating temperature and direct-cooling rate after forging on microstructure and mechanical properties of V-microalloyed steel 38MnSiVS5. *ISIJ international*, 46(1), 89-92.
34. Da Silva Septimio, R., Button, S. T. and Van Tyne, C. J. (2016). Processing maps for the analysis of hot workability of microalloyed steels 38MnSiVS5 and 0.39 C1. 47Mn. *Journal of materials science*, 51(5), 2512-2528.
35. Xu, Y., Weins, W. N. and Dhir, A. (1992). A metallographic investigation of banding and diffusion of phosphorus in steels. Metallographic Characterization of Metals After Welding, *Processing, and Service*, 457-470.
36. Jahazi, M. and Eghbali, B. (2001). The influence of hot forging conditions on the microstructure and mechanical properties of two microalloyed steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 113(1-3), 594-598.
37. Askeland, D. R., Phulé, P. P., Wright, W. J. and Bhattacharya, D. K. (2003). The science and engineering of materials.
38. Madariaga, I., Gutierrez, I., García-de Andrés, C. and Capdevila, C. (1999). Acicular ferrite formation in a medium carbon steel with a two stage continuous cooling. *Scripta Materialia*, 41(3), 229-235.
39. Hansen, N. (2004). Hall–Petch relation and boundary strengthening. *Scripta Materialia*, 51(8), 801-806.
40. Williamson, G. K. and Hall, W. H. (1953). "X-ray line broadening from filed aluminium and wolfram, *Acta Metallurgica*. 1(1), 22-31.



Gazili olmak ayrıcalıktır