



**DÜŞÜK ALAŞIMLI ÇELİKLERİN MEKANİK
ÖZELLİKLERİNE KİMYASAL BİLEŞİMİN VE ISIL
İŞLEMİN ETKİSİ**

İnci YAHYAOĞLU

**2021
YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSİ**

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Yunus TÜREN**

**DÜŞÜK ALAŞIMLI ÇELİKLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE
KİMYASAL BİLEŞİMİN VE ISIL İŞLEMİN ETKİSİ**

İnci YAHYAOĞLU

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Yunus TÜREN**

**KARABÜK
Ekim 2021**

İnci YAHYAOĞLU tarafından hazırlanan “DÜŞÜK ALAŞIMLI ÇELİKLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE KİMYASAL BİLEŞİMİN VE ISIL İŞLEMİN ETKİSİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Yunus TÜREN

Tez Danışmanı, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 29/09/2021

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Mustafa ACARER (SÜ)

Üye : Prof. Dr. Yavuz SUN (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Yunus TÜREN (KBÜ)

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

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

İnci YAHYAOĞLU

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DÜŞÜK ALAŞIMLI ÇELİKLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE KİMYASAL BİLEŞİMİN VE ISIL İŞLEMİN ETKİSİ

İnci YAHYAOĞLU

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Yunus TÜREN

Ekim 2021, 71 sayfa

Bu çalışmada çelik sektöründe önemli yere sahip olan iki farklı karbon içeriğine sahip düşük karbonlu, mikro alaşımlı çeliğin (Bileşim-A ve Bileşim-B) mikroyapısına, sertliğine, çekme dayanımına, çentik darbe direnci özelliklerine ısıtma işlem parametrelerinin etkisi incelenmiştir. Bunun için dökümü yapılan çeliklere uygulanan ısıtma işlem parametreleri iki aşamadan oluşmaktadır. Bunlardan birincisi geleneksel fırında tavlama ve farklı ortamlarda soğutma ile ikincisi ise son yıllarda yenilikçi ısıtma işlem olarak adlandırılan hızlandırılmış soğutma ortamı olarak tanımlanmaktadır. Bunlar; normalizasyon ve fırında kontrollü soğutma (NRM+FRS), normalizasyon, havada soğutma, temperleme ve fırında kontrollü soğutma (NRM+HVS+TMP+FRS) ve normalizasyon, çift su verme, temperleme ve fırında kontrollü soğutma (NRM+FRS+ÇSV+TMP+FRS) ve Hızlandırılmış soğutma ve kendi kendini temperleme ısıtma işlemleridir.

Bu işlemler sonrasında mikroyapı ve mekanik testler ile alaşımlamanın ve ısıtıl işlemin sağlanmış olduğu katkılar mikro yapı ve mekanik özellikler yönünden incelenmiştir. Mikro alaşım ilaveli ve çiftte su verme ısıtıl işlemlili malzemelerin mikro yapısında ince beynit, ferrit ve martenzitik yapı gözlemlenmiştir. HS-KT ısıtıl işlemlili uygulanmış numunelerde beklenildiği gibi daha ince dokulu iğnemsili ferrit + beynit oluşumu şeklinde faz değişimi gözlemlenmiştir. Mekanik test sonuçlarına göre, mikro alaşım ilaveli ve çiftte su verme ısıtıl işlemlili uygulanan Bileşim-A çeliği yüksek sertlik, akma-çekme dayanımına ve düşük sıcaklıklarda -50°C’de yüksek çentik darbe dayanımına sahiptir. En yüksek çekme mukavemeti değerlerine ve aynı zamanda en yüksek sertlik artışına HS-KT kodlu ısıtıl işlemlili koşulunda 60 sn süresi için ulaşılmıştır.

Anahtar Sözcükler : Düşük alaşımlılı çelik, ısıtıl işlemlili, alaşım elementleri, mekanik özellikler.

Bilim Kodu : 91518

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

EFFECT OF CHEMICAL COMPOSITION AND HEAT TREATMENT ON MECHANICAL PROPERTIES OF LOW ALLOY STEELS

İnci YAHYAOĞLU

**Karabük University
Institute of Graduate Programs
Department of Metallurgy and Material Engineering**

Thesis Advisor:

Assoc Prof Dr. Yunus TÜREN

October 2021,71 pages

In this study, the effects of heat treatment parameters on the microstructure, hardness, tensile strength, and notch impact resistance properties of low carbon, micro-alloyed steel (Composition-A and Composition-B), which have an important place in the steel industry, were investigated. For this, the heat treatment parameters applied to the cast steels consist of two stages. The first of these is defined as annealing in a conventional furnace and cooling in different environments, and the second is defined as an accelerated cooling medium, which has been called innovative heat treatment in recent years. These; normalization and controlled cooling in the furnace (NRM+FRS), normalization, air cooling, tempering and controlled cooling in the furnace (NRM+HVS+TMP+FRS) and normalization, double quenching, tempering and controlled cooling in the furnace (NRM+FRS+ÇSV+TMP) +FRS) and Accelerated cooling and self-tempering heat treatments.

After these processes, the microstructure and mechanical tests and the contributions of alloying and heat treatment were examined in terms of microstructure and mechanical properties. Fine bainite, ferrite and martensitic structures were observed in the microstructure of the materials with microalloy addition and double quenching heat treatment. As expected, phase change in the form of finer textured acicular ferrite + bainite formation was observed in the HS-KT heat-treated samples. According to the mechanical test results, Composition-A steel with micro alloy addition and double quenching heat treatment has high hardness, yield-tensile strength and high notch impact strength at low temperatures at -50°C. The highest tensile strength values and at the same time the highest hardness increase were achieved in the heat treatment condition coded HS-KT for 60 seconds.

Key Word : Low alloy steels, heat treatment, alloys elements, mechanical properties

Science Code : 91518

TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ışığında őekillendiren sayın hocam Doç. Dr. Yunus TÜREN'e sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Tez çalıőmasında deney numunelerinin dökümü ve testlerinin yapılmasında destek veren YAHYAOğLU ÇELİK DÖKÜM A.Ő. 'ye sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Sevgili aileme manevi hiçbir yardımı esirgemedен yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	3
ALAŞIMLAR	4
2.1 DEMİR KARBON ALAŞIMLARI.....	6
2.1.1 Demir – Sementit Faz Diyagramı	8
BÖLÜM 3	12
ÇELİKLER	12
3.1 ÇELİKLERİN SINIFLANDIRILMASI.....	13
3.1.1 Düşük Karbonlu Çelikler.....	15
3.1.2 Orta Karbonlu Çelikler	16
3.1.3 Yüksek Karbonlu Çelikler.....	16
3.2. ALAŞIMLI ÇELİKLER.....	16
3.2.1 Mikro Alaşımli Çelikler.....	17
3.2.2 Alaşım Elementleri Etkileri	20
BÖLÜM 4	25

	<u>Sayfa</u>
ÇELİKLERE UYGULANAN ISIL İŞLEMLER	25
4.1 TAM TAVLAMA	28
4.2 SERTLEŞTİRME.....	30
4.2.1 Isıtma İşlemi	30
4.2.2 Tutma Süresi.....	33
4.2.3 Su Verme ve Soğutma	34
4.2.3.1 Doğrudan Su Verme.....	34
4.2.3.2 Soğuma Esnasında Martenzitin Oluşumu	35
4.2.3.3 Kalıntı Östenit	39
4.3 TEMPERLEME	40
BÖLÜM 5	44
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	44
5.1. DÜŞÜK ALAŞIMLI DÜŞÜK KARBONLU ÇELİK MALZEMELER	44
5.2. ALAŞIMLAMA VE DÖKÜM İŞLEMİ	44
5.3. ISIL İŞLEMLER	45
5.3.1 Geleneksel Isıl İşlemler	45
5.3.1.1 Normalizasyon ve Fırında Kontrollü Soğutma	46
5.3.1.2 Normalizasyon, Havada Soğutma, Temperleme ve Fırında Kontrol Soğutma.....	46
5.3.1.3 Normalizasyon, Çift Su Verme, Temperleme ve Fırında Kontrollü Soğutma.....	46
5.3.2 Yenilikçi Isıl İşlem.....	48
5.3.2.1 Hızlandırılmış Soğutma ve Kendi Kendine Temperleme	48
5.4. KİMYASAL BİLEŞİM TESPİTİ	49
5.5. MİKRO YAPI İNCELEMELERİ	49
5.6. XRD ANALİZİ,	49
5.7. ÇEKME TESTİ	50
5.8. SERTLİK TESTİ.....	52

	<u>Sayfa</u>
5.9. ÇENTİK- DARBE TESTİ.....	53
BÖLÜM 6	55
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	55
6.1. XRD SONUÇLARI.....	55
6.2. MİKRO YAPI SONUÇLARI	55
6.2.1 Optik Mikroskop İncelemeleri.....	55
6.2.2 Sem İncelemeleri	57
6.3. SERTLİK TESTİ.....	60
6.4.ÇEKME TESTİ	61
6.4.ÇENTİK DARBE DENEYİ.....	64
BÖLÜM 7	67
GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	67
KAYNAKLAR	68

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. a) Katı Eriyik b) Yer alan katı eriyik c) Arayer katı eriyik oluşumu.	5
Şekil 2.2. Saf demir için ideal ısıtma eğrisi.....	7
Şekil 2.3. Demir-sementit faz diyagramı.....	9
Şekil 3.1. Bileşimine göre çeliklerin sınıflandırılması.	14
Şekil 3.2. Çeliklerin karbon miktarı ile mekanik özellikler arasındaki ilişkiler.....	15
Şekil 3.3. Mikro alaşım elementlerinin oluşturduğu karbür ve nitrür yapılarının oluşum sıcaklıkları ve serbest enerjileri arasındaki ilişkiler.	18
Şekil 4.1. Bir ısıl işlemde genel ısıl işlem süreci	25
Şekil 4.2. Alaşım sız çeliklere uygulanan yumuşatma, normalizasyon, küreselleştirme ve sertleştirme işlemleri için tavlama sıcaklık aralıkları.....	26
Şekil 4.3. % 0,2 Karbon içeren çeliğin tam tavlama sırasında oluşan iç yapı değişikliklerinin şematik gösterimi.	28
Şekil 4.4. Östenitin izotermik parçalanma diyagramı.	29
Şekil 4.5. Alaşım sız çeliklerde östenitleştirme sıcaklığı.....	31
Şekil 4.6. % 0,8 C'lu çelik, 760 °C sıcaklıktan suda ani soğutulmuş X500 (İnce martenzitik yapı).	32
Şekil 4.7. %0,8 C'lu çelik, 1000 °C sıcaklıktan suda ani soğutulmuş X500 (Kaba iğnesel martenzitik Yapısı).....	31
Şekil 4.8. %0,3 C'lu çelik, 740°C sıcaklıktan suda ani soğutulmuş X500. (Ferrit, martenzitik).	32
Şekil 4.9. Soğutma ortamlarının TTT diyagramıyla ilişkisi.....	35
Şekil 4.10. Çeşitli sıcaklık bölgelerinde östenitin parçalanması	35
Şekil 4.11. a) %0,8 C'lu çeliğin TTT diyagramı b) %0,45 C'lu çeliğin TTT diyagramı.....	36
Şekil 4.12. Östenitten (γ) martenzite (α) dönüşümün kafes modeli.....	37
Şekil 4.13. Düşük sıcaklıklarda östenitin martenzite ardı ardına dönüşümü (a)280°C (b) 220°C (c) 200°C (d) 195°C (e) 180°C (f) 175°C..	38
Şekil 4.14. (a) Masif martenzitik, (b) İğnesel martenzitik.....	39
Şekil 4.15. Alaşım sız bir çelikte östenitik karbon (östenit içerisinde çözünmüş) miktarının Ms ve Mf sıcaklığına etkisi.	39

Şekil 4.16. Östenit içerisinde çözünmüş (erimiş) halde bulunan karbon miktarına bağlı olarak kalıntı östenitin değişimi	40
Şekil 4.17. Temperleme sıcaklığına göre matristeki karbon miktarının değişimi.....	42
Şekil 5.1. a) Döküm kalıbı, (b) dökümü tamamlanan numuneler, (c) indüksiyon ocağı.	45
Şekil 5.2. İZOREF marka kamara indirekt ısıtılmalı fırın.....	45
Şekil 5.3. Normalizasyon ve fırında kontrollü soğutma için sıcaklık-zaman grafiği.	46
Şekil 5.4. Normalizasyon, havada soğutma, temperleme ve fırında kontrollü soğutma için sıcaklık-zaman grafiği.	47
Şekil 5.5. Normalizasyon, Çift su verme, temperleme ve fırında kontrollü soğutma için sıcaklık-zaman grafiği.....	48
Şekil 5.6. (a) Hızlandırılmış soğutma düzeneği 3D çizimi, (b) literatür soğutma grafiği, (c) fırında 2 saat bekletilmiş numune, (d) hızlandırılmış soğutma uygulanmış numune	49
Şekil 5.7. Spektral analiz numuneleri.....	49
Şekil 5.8. Oxford marka spektrometre cihazı.....	49
Şekil 5.9. (a) Nikon marka optik mikroskop, (b) Zeiss ultra plus SEM.....	50
Şekil 5.10. Rigaku ultime IV marka XRD cihazı.....	51
Şekil 5.11. Numunenin döküm formu	51
Şekil 5.12. TS EN ISO 6892-1 'e göre çekme test numune hazırlama şekli.....	52
Şekil 5.13. (a)Hidrolik üniversal çekme test cihazı (utm100) ve (b)çekme numunesi	52
Şekil 5.14. Digirock sertlik ölçüm cihazı	53
Şekil 5.15. (a) TS EN ISO 148-1 Standart şekli , (b) çentik Numunesi.....	54
Şekil 5.16. (a) Zwick/Roell RKP450 sarkaç tipi darbe test cihazı, (b) çentik testi yapılmış numuneler	54
Şekil 6.1. Bileşim-A (a) ve Bileşimi-B (b) çelik malzemelerinin XRD görüntüleri .55	
Şekil 6.2. Bileşim-A (a) ve Bileşimi-B (b) çelik malzemelerinin ısıl işlemsiz mikroyapı görüntüleri.....	56
Şekil 6.3. Bileşim-A (a) ve Bileşim-B (b) çelik malzemelerinin geleneksel ısıl işlemler sonucu elde edilen mikroyapı görüntüleri.....	57
Şekil 6.4. Bileşim-A (a) ve Bileşim-B (b) çelik malzemelerinin yenilikçi ısıl işlemler sonucu elde edilen mikroyapı görüntüleri.....	58

Sayfa

Şekil 6.5. Bileşim-A (a) ve Bileşimi-B (b) çelik malzemelerinin yenilikçi ısıtma işlemler sonucu elde edilen SEM görüntüleri.....	60
Şekil 6.6. Bileşim-A (a) ve Bileşim-B (b) geleneksel ısıtma işlem uygulanmış çelik malzemelerinin Brinell (HB) sertlik testi sonuçları.....	61
Şekil 6.7. Bileşim-A (a) ve Bileşim-B (b) yenilikçi ısıtma işlem uygulanmış çelik malzemelerinin Brinell (HB) sertlik testi sonuçları.....	62
Şekil 6.8. Bileşim-A (a) ve Bileşim-B (b) geleneksel ısıtma işlem uygulanmış çelik malzemelerinin akma, çekme ve uzama değerleri.....	63
Şekil 6.9. Bileşim-A (a) ve Bileşim-B (b) yenilikçi ısıtma işlem uygulanmış çelik malzemelerinin akma, çekme ve uzama değerleri.....	64
Şekil 6.10. Bileşim-A (a) ve Bileşim-B (b) geleneksel ısıtma işlem uygulanmış çelik malzemelerinin çentik-darbe değerleri.....	65
Şekil 6.11. Bileşim-A (a) ve Bileşim-B (b) yenilikçi ısıtma işlem uygulanmış çelik malzemelerinin çentik-darbe değerleri.....	65

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 4.1. Manganez miktarına bağılı olarak kritik soğuma hızı.....	35
Çizelge 5.1. Mikro alaşımlı malzemelerin kimyasal bileşimi.....	50

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

C : karbon

Ni_{eş} : nikel eşdeğerliliği

Ag : gümüş

Al : alüminyum

Ar : argon

Au : altın

Cu : bakır

H₂ : hidrojen

Mo : molibden

Ni : nikel

erf(z): hata işlevi

γ : birim hacim ağırlığı

$\Gamma(x)$: gama işlevi

θ : kutupsal açı

σ : normal gerilme

σ_c : tek eksenli basınç dayanımı

KISALTMALAR

- AISI : American Iron and Steel Institute (Amerika Demir ve Çelik Enstitüsü)
- ASTM: American Society for Testing and Materials (Amerika Deneme ve Malzeme Topluluğu)
- AWS : American Welding Society (Amerika Kaynak Topluluğu)
- DIN : Deutsches Institut für Normung (Alman Standartlar Enstitüsü)
- ISO : International Organization for Standardization (Uluslararası Standartlar Teşkilatı)
- IIW : International Institute of Welding (Uluslararası Kaynak Enstitüsü)
- ITAB : Isı Tesiri Altında Kalan Bölge
- TS : Türk Standardı
- ÇŞ : Çökelme Sertleşmesi
- XRD : X-Ray Diffractometer (X-Işını Difraktometresi)
- SEM : Scanning Electron Microscopy (Taramalı Elektron Mikroskobu)
- EDS : Energy Dispersive Spectroscopy (Enerji Yayılımlı Spektroskop)
- NRM : Normalizasyon
- FRS : Fırında Soğutma
- HVS : Havada Soğutma
- TMP : Temperleme
- ÇSV : Çift Su Verme
- HS : Hızlandırılmış Soğutma
- KT : Kendi Kendini Temperleme
- QT : Quenching and Tempering (Su Verme ve Temperleme)

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Tarih süresince medeniyetler bütün malzemeleri, enerjiyle kullanarak insan yaşamının kalitesini yükseltmek amacıyla kullanmışlardır. Günümüz teknolojisinin ve bu teknolojilerin geliştirilmesiyle meydana gelen gereksinimlerden dolayı, mevcut veya keşfedilmek olan malzemelerin bütün özelliklerinin anlaşılması ve de bu özelliklerin geliştirilmesi için birçok inceleme çalışmaları yapılmıştır. Günümüze kadar olan her dönemde insanlığın teknolojiyle olan seviyesi, o dönemlerde kullanılmış malzemeler ile değerlendirilmiştir. Özetleyecek olursak teknolojideki gelişmelerin malzemelerin özelliklerin keşfedilmesiyle daha da arttığı görülmüştür. Örneğin; raylı taşımacılıktaki ilerlemeler çelik sektöründeki gelişmelerle, elektronikte atılan büyük adımlar ise yarı iletkenlerin keşfedilmesi ile gerçekleştirilmiştir [1]. Günümüzde ekonominin büyük bir kısmını, bu tür malzemelerin üretilmesi ve kullanım amacına uygun hale getirilerek geliştirilmesi oluşturmaktadır. Bu malzemelerin üretilmesi için uygun yöntemler mühendisler ile oluşturulmaktadır. Malzemelerin üretiminde, her bir amaç için en üstün özellikli malzemelerin seçilmesi ve bu imalatlarda en iyi yöntemin belirlenmesi, mühendislerin malzemelerin iç yapısı ve istenebilecek özellikleri hakkında bilgi sahibi olmalarını gerektirmektedir [2]. Diğer taraftan, yüksek dayanımlı malzemelere olan talebin artması, daha iyi mekanik özelliklere sahip yeni malzemelerin üretimine olan ilginin artmasına neden olmuştur.

Metallerin endüstride geniş bir kullanım alanına sahip olmalarının nedeni çok farklı içeriklere sahip olmalarındandır. Özellikle çelikler üstün mekanik özelliklere sahip olmalarından dolayı makine ve yapı malzemeleri olarak kullanılmaktadırlar [3]. Diğer taraftan alaşım adı verilmiş metal karışımları istenilen belirli bir özellik için iyileşme sağlamak ya da daha iyi özellikleri ortaya çıkarmak için üretilmekte ve diğer metallere göre çok daha iyi mekanik dayanımları içermektedirler [4]. Bu sebeple alaşımların önemi büyük oranda artmıştır. Bu konuda halen birçok çalışma yapılmaktadır.

Alaşımlı elikler, sade karbonlu çeliklere alaşım elemanlarının eklenmesi ile oluşturulan çeliklerdir. Alaşımlı eliklerin imal edilmesiyle, sade karbonlu çeliklerin bazı dezavantajları minimuma indirilerek, çeliğin kullanım yeri arttırılmıştır. Alaşımlamayla bu tür çeliklerin darbe dayanımlarının önemli ölçüde artacağı bilinmektedir. Alaşımlı eliklerde süneklik ve yüksek gerilme değerleri korunurken, temperlemede ise daha yüksek temperleme sıcaklıklarının uygulanmasına imkan sağlanmaktadır.

Alaşımlı eliklerin yorulma davranışları ve aşınma dirençleri, bazı alaşım elemanlarının ilavesiyle yüksek miktarda artış göstermektedir [5]. Alaşımlı elikler; alaşımsız çeliklerle üretilemeyen, yüksek mukavemet ve sertliğin birlikte istendiği zaman kullanılır. Dolayısıyla alaşımsız çeliklere krom, nikel, mangan, molibden, silisyum, vanadyum, volfram veyahut bakır, kurşun ve kobalt alaşım elementleri ilave edilerek alaşımlı çelikler üretilmektedir [6-11].

Bir taraftan da demir ile beraber %0.25 miktarına kadar karbon ve genelde toplamı %2'den daha az miktarda niyobyum, titanyum, vanadyum, mangan ve almiyumu gibi alaşım elementlerini içeren elik, düşük karbonlu mikro alaşımlı elik olarak bir diğer adıyla yüksek dayanımlı düşük alaşımlı elik olarak bilinmektedir. Düşük alaşımlı çelikler son yıllarda genellikle savunma sanayinde ve otomotiv endüstrisinde büyük ölçüde kullanım alanına sahiptirler. Bu sektörde kullanılan çelikler sanayide döküm mamulü ve hadde mamulü olarak yaygın bir alana sahiptirler. Bunun nedeni ise, bu tip çeliklerin yüksek mukavemet özelliklerinin yanı sıra iyi tokluk özelliklerinin de olmasıdır. Düşük alaşımlı çelikler, maliyetlerinin düşük olması nedeniyle döküm yöntemi ile kompleks (karmaşık) şekilli parçaların üretiminde tercih edilmektedir [12-14]. Düşük alaşımlı çelikler krank millerinde, uçak parçaları yapımında, yaylarda bağlantı elemanlarında, cıvatalarda, basınç kaplarında, oto milleri üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bir demir-karbon alaşımı olarak bilinen çeliklerin mekanik özellikleri içinde bulundurduğu karbon oranıyla önemli ölçüde değişmektedir. Ayrıca, çeşitli bazı alaşım elementlerinin alaşım sistemine ilave edilmesiyle veya seçilecek olan uygun ısıl işlem uygulamalarıyla çeliklere daha üstün mekanik özellikler kazandırmak

mümkün olmaktadır. Bu yüzden, çeliklerin göstermiş olduğu mekanik özellikler iç yapılarıyla büyük ölçüde bağlantılıdır.

Çelikler, içerisinde bulundurduğu karbonun ve diğer alaşım elementlerinin miktarları veya ısıtım işlem uygulamaları, çeliğin iç yapısını önemli ölçüde değiştirerek çok iyi mekanik özelliklerin ortaya çıkmasına olanak tanımaktadır [15].

Alaşımlama ve ısıtım işlemler sonucu faz gelişimi özelliklerinin kontrolü sağlanarak mekanik özellikler ve proses koşullarının kıyaslama yolu ile aralarında ilişki kurulmuştur. Böylelikle elde edilmesi hedeflenen yüksek performanslı düşük alaşımlı çelikler hem bilimsel literatüre katkı sağlaması hem de raylı taşımacılığında kullanılan çeliklerde henüz yaygın olmayan çift su verme ve yüksek sıcaklıkta temperleme işleminin mekanik özelliklere olan etkisinin ileride daha fazla ve daha nitelikli çalışmaların yapılabilmesi için bir temel sağlanmış olması amaçlanmıştır.

BÖLÜM 2

ALAŞIMLAR

Farklı özelliklere sahip olan elementlerin birleştirilmesiyle, daha iyi özelliklerin şartlara uygun olarak tek bir malzemede toplanması için yapılan uygulamaya alaşımlama denilmektedir. İçerisinde yalnız bir element bulunan metale spesifik bir özellik katmak amacıyla minimum başka bir elementin ilave edilmesiyle meydana gelen ve metalik karaktere sahip olan yeni oluşmuş bu yapı alaşım olarak adlandırılmaktadır. Bununla beraber alaşımlardaki katkı elemanları ametal veya metal olabilir [16].

Alaşım sisteminde, olması gereken bütün kimyasal bileşimlere sahip birçok alaşım vardır. İki elementin bir araya gelerek oluşturdukları sisteme ikili alaşım sistemi, üç elementin bir araya gelerek oluşturdukları bu sistemeye üçlü alaşım sistemi denilir. Doğada bulunmuş 45 adet metal yaklaşık olarak 990 adet ikili, 14000 adette üçlü sistem oluşturmaktadır. Bu elementlerin kimyasal bileşim %1 civarlarında değiştirilirse, her bir ikili veya üçlü sistem için yaklaşık olarak 100 farklı alaşım oluşturulmaktadır. Ticari olarak kullanılan alaşımların birçoğu, çok sayıda element içerdiğinden mevcut elementlerle yaklaşık olarak onuz sayıda alaşım oluşturulabileceği sonucu çıkarılabilmektedir [17].

Bir X metaline bir Y metali alaşım yapması için ilave edilirse, Y elementinin ilave oranına ya da miktarına ve alaşımın içinde bulunduğu sıcaklığa göre birden fazla yapı ve düzen oluşturulabilmektedir. Bu elementlerden küçük bir kısmı hepsiyle bir katı çözelti oluşturabilecek durumda davranış gösterir [16]. Kısaca eklenen element kristal içerisinde bileşik veya katı çözelti olarak bulunmaktadır.

Bu katı çözeltiler genellikle katı eriyik olarak da tanımlanmaktadır. Bir çözelti, çözünen ve çözen olarak iki farklı bileşenden oluşmaktadır. Çözeltinin içindeki

miktarının ilave oranı yüksek olan bileşenine çözen veya çözücü, miktarının ilave miktarı düşük olan bileşenine ise çözünen adı verilmiştir [17].

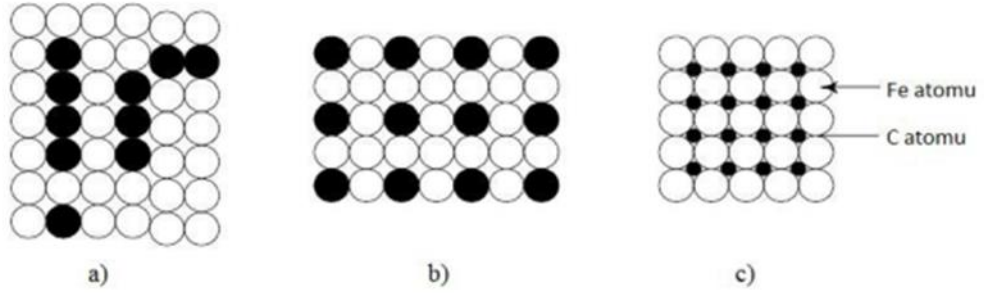
W. Hume-Rothery ve arkadaşları katı eriyik oluşumunu önceden belirlemeyi sağlayan bazı yasalar belirlemişlerdir. İki elementin arasında bir katı eriyik oluşumunun gerçekleşebilmesi için bazı koşulların oluşturulması gerekir.

Farklı iki elementin büyük oranda yoğunlaşma göstererek katı eriyik oluşumunu gerçekleştirebilmesi için kafes sisteminin aynı veya birbirine çok yakın olması gerekmektedir. Bu nedenle metal atomları arasındaki yarıçap farkı %15'ten büyük olursa katı eriyik oluşması çok zorlaşmaktadır. Alaşım sistemlerinde elementlerden birinin yüksek elektropozitif, diğerinin ise yüksek elektronegatif olması katı eriyik oluşumundan bağımsız olarak bileşik yapılar oluşturur. Bu durum farklı özelliklere sahip elementlerin oluşturduğu alaşım sistemlerinde de ortaya çıkar [16,18].

Alaşım eriyik halde bulunurken genelde homojendirler. Bu sebeple tek bir sıvı çözültiden oluşmuşlardır. Katı haldeyse yalnızca bir katı çözülti içeren homojen ya da çok sayıda katı çözülti, ara bileşik, saf metal kristali içerirken heterojen bir iç yapıda oluşur [19]. Diğer bir deyişle farklı türdeki atomlar sıvı fazda iken homojen sıvı eriyik oluştururlar. Katılaşma esnasında yabancı elementler buldukları kafes yapısında dizilimini korursa katı eriyik elde edilir. Yani iki bileşen katı halde birbiri içerisinde tamamen çözünerek ortak bir kafes meydana getirirler [20].

Katı eriyikler katkı elementinin ana kafes yapısı içinde yerleşim yerlerine göre yer alan katı eriyikler ve ara yer katı eriyikler olmak üzere 2 gruba ayrılır.

Yer alan katı eriyikler; eriyen atomlar eriten atomların yerine geçtiğinde yer alan katı eriyik olarak adlandırılır. Ara yer katı eriyik; eriyen atomlar eriten atomların kafes boşluklarına yerleştiğinde ara yer katı eriyikleri oluşmaktadır.



Şekil 2.1. a) Katı Eriyik b) Yer alan katı eriyik c) Arayer katı eriyik oluşumu [21].

Alaşımdaki iki atom tipi arasındaki çekme kuvvetleri aynı tipteki atomların birbiri arasındaki çekme kuvvetlerinden daha değişik değil ise, yani değişik atomlar birbirine etkisiz davranıyorlarsa, düzensiz bir yapı oluşumu gerçekleşir. Ancak farklı tipteki atomların birbirleri arasındaki çekme kuvvetleri aynı tip atomların birbirleri arasındakiine göre daha kuvvetliyse, süper kafes olarak adlandırılan düzenli bir yapı oluşumu gerçekleşir.

Diğer taraftan belirli bir düzen oluşturulabilmesi, yer değişimleri için gerekli olan sürenin sağlanmasıyla ilişkilidir.

Bu sebeple belirtilen süper kafes diziliminin gerçekleşebilmesi, uyumlu olan katı eriyiklerin yüksek sıcaklıklar belirli zaman bekletildikten sonra yavaş soğumasıyla oluşturulabilmektedir. Hızlı soğutulduklarındaysa düzenli bir kafes yapısı elde edilememektedir.[19].

2.1. DEMİR KARBON ALAŞIMLARI

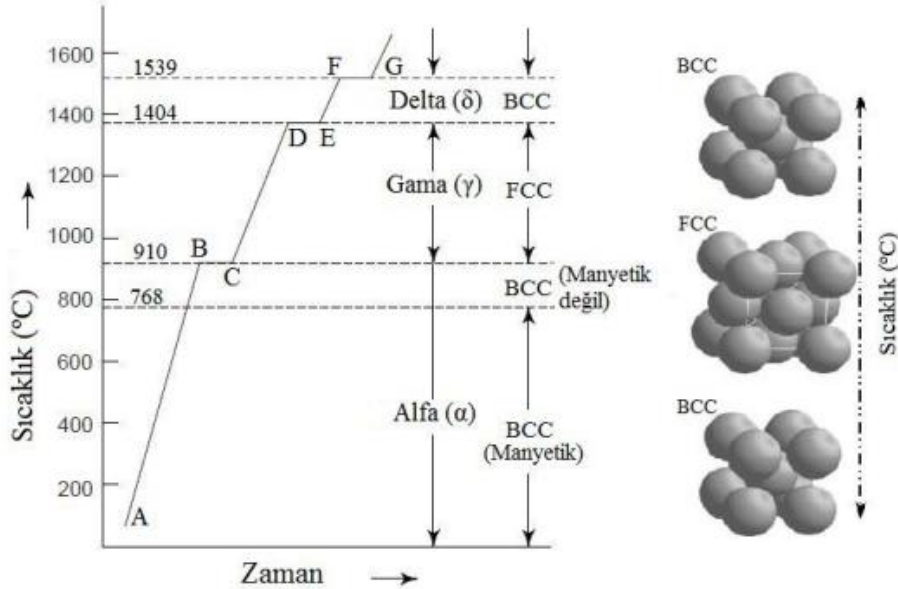
Metallerin ve de alaşımların yüksek mukavemet, süneklik, tokluk gibi özelliklere sahip olduklarından bunun yanında maliyetlerinin hemen hemen düşük olması nedeniyle mühendislik malzemelerinde, nispeten düşük maliyet gibi avantajlarından dolayı geniş bir uygulama alanına sahiptir. Çok farklı özellikleri birlikte içerdiklerinden dolayı demir esaslı alaşımlar (genellikle çelikler) dünyadaki metal imalatının %90'nı oluşturmaktadırlar [22].

Demir esaslı metallerde ana element demirdir ve bunun yanında karbon daima bir alaşım elementi olarak bulunmaktadır [20]. Saf demire alaşım elementi eklendiğinde eriyik halde iken oda sıcaklığına kadar soğuması ya da oda sıcaklığından eriyik hale gelinceye kadar ısıtılması uygulamaları esnasında dönüşümler gözlenebilmektedir.

Ancak bu dönüşümler çok farklı sıcaklıklarda meydana gelirler. Ek olarak demirin kafes yapısı içerisindeki yabancı atomların miktarı artırıldığında, dönüşüm sıcaklıklarında oluşan ötelenmelerde aynı miktarda değişiklik gösterir.

Saf demir gama (γ), alfa (α) ve delta (δ) olarak üç farklı allotropik yapıda gösterilmektedir. Şekil 2.2’de verilen saf demirin soğuma eğrisi bu kristalografik yapıların her biri için denge halinde olduğu sıcaklık değerlerini belirtmektedir.

Demir, oda sıcaklığından 910°C’ye kadar hacim merkezli kübik yapıdadır ve bu yapıya α demiri ismi verilmiştir. (α) demiri 910°C’ye kadar ısıtılırsa yüzey merkezli kübik γ demire dönüşümü gerçekleşir. 1404°C’ye kadar ısıtıldığında γ demir yeniden hacim merkezli kübik δ demire dönüştürülmüş olur [23].



Şekil 2.2. Saf demir için ideal ısıtma eğrisi [21,24].

Buradaki demir, kristal yapısına ve ortamdaki sıcaklığa bağlı olarak farklı miktarda karbon içermektedir. Örneğin, (α) demiri en fazla 723 °C’de %0,025 düzeylerinde

karbon içerirken, oda sıcaklığında neredeyse hiç karbon içirme kabiliyeti yoktur. Yüksek sıcaklıklarda ihtiva eden γ demiri ise 1147 °C'de %2 ve 723 °C'de %0,8 düzeylerinde karbon içermektedir.[25].

Karbon oranının artması ve sıcaklığın düşmesine bağlı olarak oluşan fazla karbon atomlarının tek başına veya demir atomlarıyla birlikte oluşturabildikleri kristal türlerine göre iki ana katılma söz konusu olmaktadır. Karbon atomlarının birleşimiyle ortaya çıkan kristallerinden oluşan hekzagonal kafesli grafit kristali oluşturabilirler. Bu türdeki bir toplanma için katı ortamda, her bir karbon atomunun uzun yol alması gerekmektedir.

Ancak toplanma için difüzyon zamanının uzun ve sıcaklığın yüksek olması gereklidir. Bu tür katılma stabil katılma denir.

Diğer bir deyişle karbon atomları birleşerek grafiti oluşturmak için yeterli zamanı bulamazlar ise, demir atomlarıyla birlikte, Fe_3C kristalini meydana getirirler ve bu bileşiğe sementit adı verilmiştir. Bu türdeki katılma da metastabil katılma denilir [25].

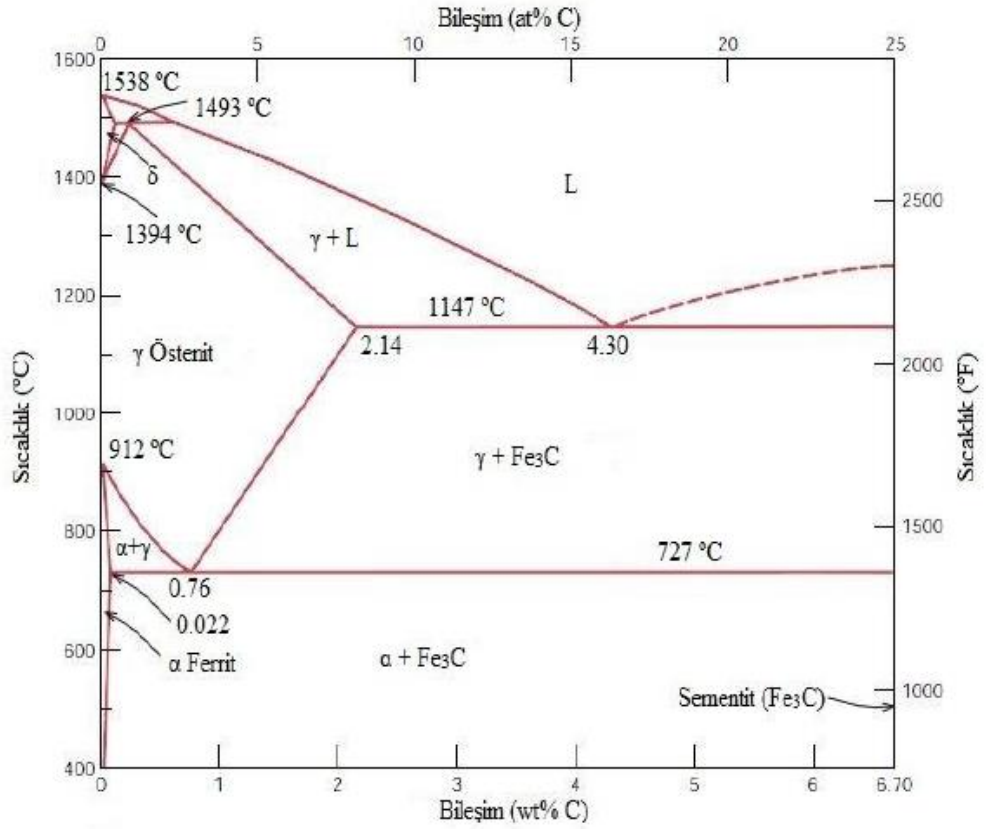
2.1.1. Demir – Sementit Faz Diyagramı

Alaşımın durumunu termodinamik sistemi ele alarak belirleyebiliriz. Şöyle ki termodinamik sistemde; sıcaklık, basınç ve bileşim büyüklüğüne bağlı olarak fazların varlığından bahsetmek termodinamik denge durumunda olması şartı ile mümkündür. Analiz edilen veriler faz diyagramlarının yardımıyla bir arada belirtilmektedir [26].

Karbon, demir içerisinde çözünerek birbirinden farklı ara yer katı çözeltileri oluşturmaktadır. Katı çözelti dışında kalan karbon, demirle bir ara yer bileşiği (Fe_3C) oluşturursa demir-sementit faz diyagramı, tamamen serbest yani grafit (C) halinde bulunur ise demir-grafit faz diyagramı kullanılır. Çelik ve dökme demirlerin incelenmesinde bu faz diyagramlarından faydalanılır. Ek olarak belirtilen diyagramlar karşılaştırıldığında sementitin yerine grafitin geçmesi ve bazı küçük değişimlerin yanı

sıra, bilinen reaksiyonlardan ciddi bir farkı yoktur. Çelikler genelde grafitleşme gösteremezler [17].

Metastabil katılaşma ve katı hal dönüşümü süresince demir-karbon ikili alaşımının, karbon oranına ve sıcaklıkla ilişkili olarak, hangi fazların oluşması gerektiği Şekil 2.3'te verilmiş olan demir-sementit faz diyagramında belirtilmiştir.



Şekil 2.3. Demir-sementit faz diyagramı [27].

Diyagramda faz dönüşümlerinin başladığı ve tamamlandığı sıcaklık değerlerinin, sıvı halde veya demir kristalleri içerisinde erimiş halde bulunan karbon miktarına bağlı olarak değişiklik gösterdiği anlaşılmaktadır. Görüldüğü üzere karbon bileşimine bağlı olarak değişen dönüşüm sıcaklık değerleri diyagramdaki faz bölgelerinin sınır çizgilerini oluşturmaktadır.

Demir sementit denge diyagramında birçok katı faz bulunmaktadır. Bunlar ferrit (α), östenit (γ), ferrit (δ), sementittir. Bu fazlara ilave faz olarak dengesiz durumda olan hızlı soğutma ile sağlanmış martenzit fazı vardır.

Ferrit (α), hacim merkezli kübik demir kristal kafesinde, karbonun ara yer katı çözeltilisidir. (α) fazında karbon minimum oranda çözünmektedir. 727 °C'de maksimum %0.025 miktarında karbon çözünmektedir. Ferrit, demir-karbon sisteminde en yumuşak faz olarak bilinmektedir.

Delta ferrit (δ) ise, α fazı gibi bir katı çökelti olup yalnızca olduğu sıcaklık aralığı α ferritten farklıdır. (δ) ferrit fazı kısmen yüksek sıcaklık değerlerinde kararlı olup, teknolojik açıdan bir öneme sahip değildir. Hacim merkezli kübik yapıya sahip bu faz, karbonun en yüksek katı çözünürlüğü 1495 °C'de, %0.09'dur [28].

Yüzey merkezli kübik demir kafesinde karbonun ara yer katı çözeltilisi Östenit (γ) olarak bilinmektedir. Östenit fazının katı çözünürlüğü karbonunkinden daha düşüktür. 1148 °C'de %2,11 miktarlarında karbon çözünürken, bu miktar 727 °C'de %0,77'ye kadar düşmüştür. Çeliklerin ısıl işlemi için, östenit fazından başlayarak oluşan faz dönüşümleri çokça önemlidirler.[28].

Sementit (Fe_3C), karbonun demirle bir araya gelerek meydana getirdiği metaller arası bileşiğe verilmiş isimdir. Sementitin bileşimi %6,67 karbon ve %93,3 demirdir. Sementit; sert, gevrek ve kırılğan bir yapıdadır. Ayrıca ortorombik kristal yapıya sahip olan bu sementit fazının varlığı ile bazı çeliklerin mukavemetinin artırıldığı bilinmektedir [28,17].

Demir-sementit faz diyagramı her biri sabit sıcaklıkta olan ve üç fazın bir arada bulunduğu bölgelerde, değişmeyen reaksiyonlara sahiptir. Bu reaksiyonlar ötektik, ötektoid ve peritektik reaksiyonlarıdır [29].

1495 °C'de, peritektik tepkime noktasında %0.53 karbon içeren sıvı, %0.09 karbon içeren δ ferritle birleşerek, %0.17 karbon içeren γ östeniti oluşturmaktadır. 1148 °C'de ise ötektik tepkime noktasında %4,3 karbonlu sıvı, %2.08 karbonlu γ östenitini ve

%6,67 karbon içeren sementit (Fe_3C) bileşimini oluşturmuştur. 723 °C'de, ötektoid tepkime noktasında ise %0,8 karbonlu katı östenit, %0,02 karbonlu α ferrit ve %6,67 karbonlu sementiti (Fe_3C) oluşturur. Tamamen katı halde meydana gelen bu tepkime bazı çeliklerin ısıl işlem uygulamalarında oldukça önemlidir [22].

BÖLÜM 3

ÇELİKLER

Metalik malzemeler, demir esaslı ve demir dışı malzemeler olarak ikiye ayrılırlar. Demir esaslı malzemeler, kimyasal bileşimlerinde demir (Fe) elementinin ana bileşen olarak bulunduğu malzemeler olarak tanımlanmaktadır ve çeliklerle dökme demirleri kapsadığı bilinmektedir.

Demir esaslı malzemeler demir içeren bileşiklerin yeryüzünde fazla miktarda bulunması nedeniyle oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Demir metalinin cevherden ayrıştırılması, arıtılması, alaşımlandırılması ve üretilmesi işlemlerinin göreceli olarak ekonomik olarak daha uygun bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir; demir alaşımlarına geniş aralıklarda mekanik ve fiziksel özellikler kazandırılabilir.

Çelikler, diğer bazı alaşım elementlerini bileşimlerinde buldukları gibi bir demir-karbon (Fe-C) alaşımıdır. Değişik bileşimlerde veya değişik ısıl işlemlere tabi tutulmuş binlerce çelik türleri bulunmaktadır. Çeliklerin mekanik özellikleri içerisinde bulundurduğu karbon miktarından büyük oranda etkilenmektedir ve karbon oranı genellikle %1'in aşağısındadır [30].

Çeliklerin sahip olduğu özellikler, içerdiği elementlerin kimyasal bileşimi ve mikroyapı arasındaki ilişkiye bağlıdır. Çeliklerin büyük bir kısmı ısıl işlem uygulamalarına karşı duyarlı olduğundan kimyasal bileşiminin yanında uygulanmakta olan ısıl işlem uygulamaları sayesinde istenilen sertlik, mekanik ve elektriksel özellik, fiziksel özellik, yüksek sıcaklığa ve korozyona dayanım gibi özelliklere sahip olabilmektedir. Çelikler gerekli sıcaklıklara ısıtıldığında şekillenebilme özelliğine kavuşmaktadırlar. Kimyasal bileşimi ve içyapısı uygun olan çelikler soğuk olarak da şekillendirilebilir. Östenitik olmayan çelikler (çeliklerin büyük bölümü)

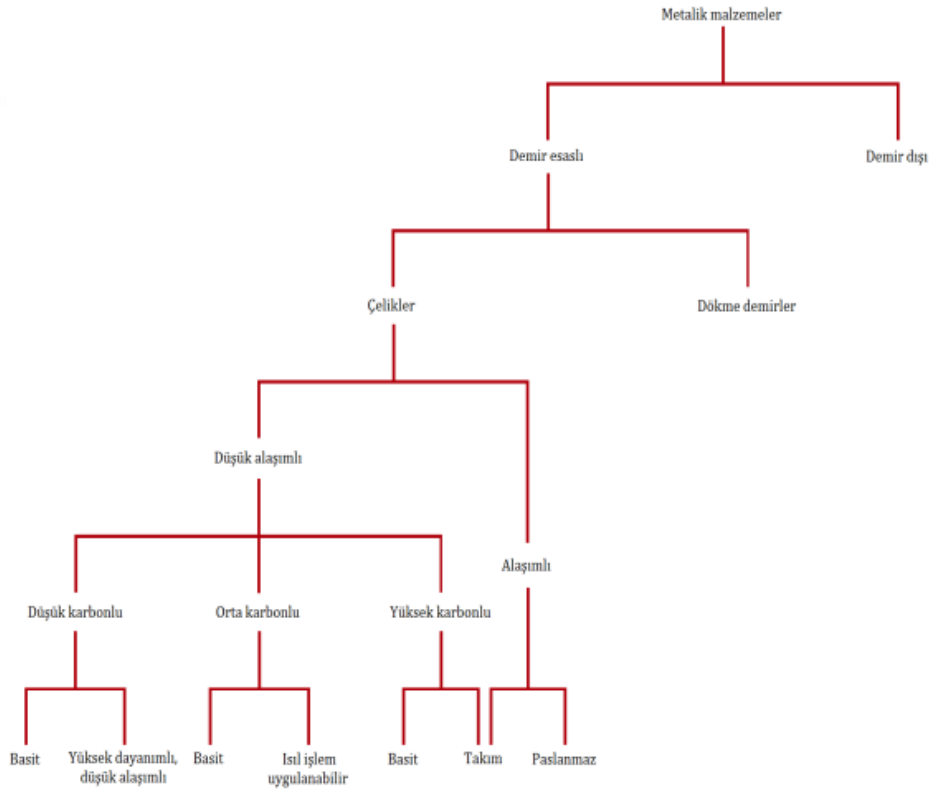
mıknatıslanabilir. Çelik, talaş kaldıran tezgâhlarda işlem görerek istenilen yüzey düzgünlüğü ve istenilen şekilde elde edilebilir. Kimyasal bileşimleri uyumlu olan çelikler kaynak yöntemi ile birleştirilebilmektedir. Çelik malzemelerin birçoğu metallerle ya da plastik maddelerle kaplanmaya, boyanmaya ve emaye yapılmaya elverişlidir. Çeliklerin düşük alaşımlı olanları genelde asitlerden ve korozif tuz çözeltilerinden etkilenir fakat alkalilerden etkilenmezler. Özel alaşımlı çelikler ise yüksek korozyon direncine sahiptirler [31].

3.1. ÇELİKLERİN SINIFLANDIRILMASI

Çelikler daha kolay incelenebilmek için sınıflandırılmaktadırlar. Çeliklerin sınıflandırılması, çeliklerin bazı ortak özelliklere dayanarak gruplara ayrılması veya sistematik olarak düzenlenmesidir. Çelikleri şu şekilde sınıflandırmak mümkündür: Bileşimine göre; örneğin basit (yalın) karbonlu çelik veya alaşımlı çelik. Üretim metoduna göre; örneğin Bazık Oksijen Fırını çeliği veya Elektrik Ark Fırını çeliği. Son işlem metoduna göre; örneğin sıcak haddelenmiş veya soğuk haddelenmiş levha. Mikroyapısına göre; örneğin ferritik veya martenzitik. Gerekli dayanım seviyesine göre; ASTM (American Society for Testing and Materials) standartlarında belirtildiği gibi. Isıl işleme göre; örneğin tavllanmış veya su verilmiş ve menevişlenmiş. Kalite tanımlayıcısına göre; örneğin dövme kalitesi veya yapısal kalite. Mamul şekillerine göre; örneğin çubuk, levha, şerit [32].

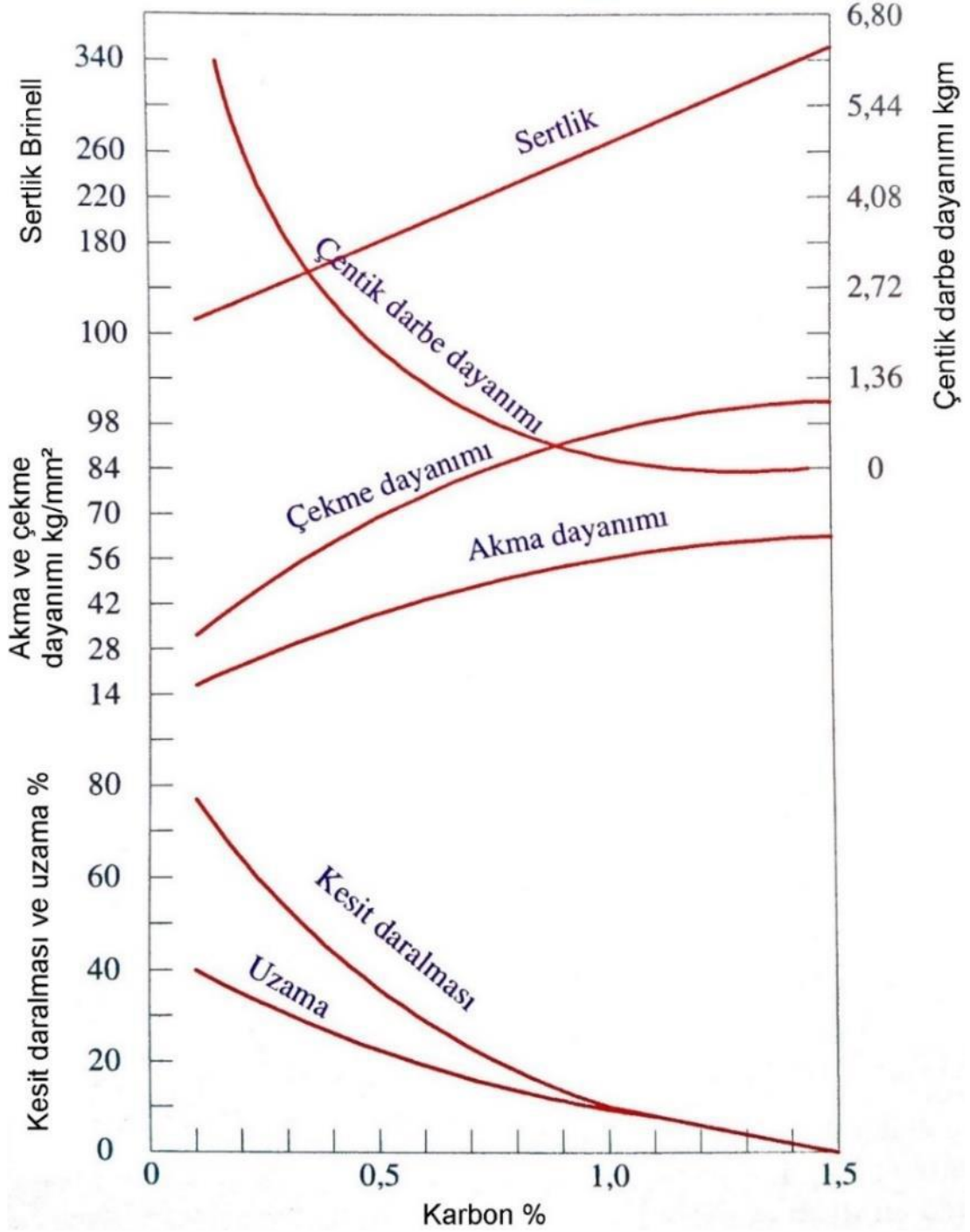
Çelikler için yapılan bu sınıflandırmalardan en yaygın olarak kullanılanı bileşimine göre çeliklerin sınıflandırılmasıdır. Çelikler yüksek karbonlu, orta karbonlu ve düşük karbonlu olarak 3 farklı gruplara ayrıldığı sınıflandırma türü Şekil 3.1'de verilmektedir.

Bileşimine göre çelikleri Şekil 3.1'deki gösterimlerinden farklı olarak basit (yalın) karbonlu çelikler ve alaşımlı çelikler olarak da sınıflandırmak mümkündür. Basit karbonlu çelikler sadece karbon içermemekle birlikte, çelik üretimi sırasında hammaddeden kaynaklanan mangan (Mn), kükürt (S), fosfor (P) ve silisyum (Si) elementlerinden maksimum mangan limiti %1,65'i ve maksimum silisyum limiti %0,60'ı geçmemelidir [33]. Alaşımlı çelikler, özellikle belirli oranlarda eklenmiş olan alaşım elementlerini içerisinde bulunduran çeliktir.



Şekil 3.1. Bileşimine göre çeliklerin sınıflandırılması [30].

Karbon yüzdelerine göre çelikler, genel ve kesin olmayan bir ifadeyle, içerdikleri karbon miktarına göre düşük karbonlu çelik (karbon oranı %0,25'e dek), orta karbonlu çelik (karbon oranı %0,25 ile %0,6 arası) ve yüksek karbonlu çelik (karbon oranı %0,6 ile %1,4 arası) olarak sınıflandırılır [30]. Çeliklerde karbon miktarı arttıkça mekanik özelliklerin nasıl değiştiği Şekil 3.2'de verilmiştir. Artan karbon miktarı ile çeliklerin sertlik, akma ve çekme dayanımlarının arttığı bilinirken darbe dayanımının ve sünekliliğin (% uzama ve % kesit daralması) azaldığı görülmüştür.



Şekil 3.2. Çeliklerin karbon miktarı ile mekanik özellikler arasındaki ilişkiler [34].

3.1.1. Düşük Karbonlu Çelikler

Bu çelik sınıfının çoğunluğunu genellikle sac veya şerit gibi düz haddelenmiş ürünler oluşturmaktadır. Yapılarında %0,25 oranında karbon ihtiva ederler. Aralarında karbon içerenler orta karbonlu, çok düşük miktarda karbon içerdikleri için kolay

şekillendirilebilirler [33]. Çelik türleri arasında günümüzde en çok üretilen ve geniş kullanım alanı olan düşük karbonlu çelikler, düşük dayanımın ve nispeten yumuşak olmalarının yanında, yüksek tokluk ve sünekliğe sahiptir. Ek olarak çelikler talaşlı imalatta, kaynakla birleştirilmeye yatkın özellikler göstermekte olup diğer çelik türlerine göre daha düşük üretim maliyeti mümkün olmaktadır. Otomotiv sektöründe, çeşitli mühendislik yapılarının imalatında düşük karbonlu çelik kullanılmaktadır [30].

3.1.2. Orta Karbonlu Çelikler

Yapısında %0,24-0,56 değerlerinde karbon içerenler, orta karbonlu çelik olarak bilinmektedirler. Bileşimindeki karbon miktarı arttığından düşük karbonlu çeliklere göre daha serttirler. Orta karbonlu çeliklerin ısıtılma işlemi ile mekanik özelliklerini iyileştirmek mümkündür [30]. Şaftlar, akslar, dişliler, krank mili orta karbonlu çeliklerin kullanım yerlerine örnek olarak verilebilir.[33].

3.1.3. Yüksek Karbonlu Çelikler

Yapılarında %0,56-2 değerlerinde karbon içeren çelik yüksek karbonlu çelik olarak tanımlanmaktadır. Yüksek karbonlu çelikler artan karbon oranına bağlı olarak oldukça serttirler ve sade karbonlu çelikler arasında en dayanıklı grupta olup en düşük sünekliğe sahiptirler [30].

Bazı el aletleri, yay malzemeleri ve yüksek mukavemetli teller, yüksek karbonlu çeliklerin kullanım yerlerine örnek olarak verilebilir [33].

3.2. ALAŞIMLI ÇELİKLER

Karbonlu çeliklerden normal bir şekilde ulaşılamayan özellikleri oluşturabilmek amacıyla içerisinde karbonlu çeliklerde ancak belirli sınırlara kadar bulunabilen alaşım elementlerini içeren çelikler, alaşımli çelikler olarak tanımlanmaktadır [34]. Alaşımli çelikleri kendi arasında yüksek ve düşük alaşımli çelikler olarak ikiye ayırmak mümkündür.

Bileşiminde %5'ten az alaşım elementi içeren çeliğe düşük alaşımli çelik, %5'ten çok alaşım elementi içeren çeliğe ise yüksek alaşımli çelik olarak adlandırılmaktadır [35].

3.2.1. Mikro Alaşımli Çelikler

Mikro alaşımli çelikler, çeşitli termomekanik işlemlerin uygulanması ile yüksek mukavemet, tokluk, yüksek korozyon dayanımı, üstün kaynaklanabilirlik gibi özelliklere sahip çelik grubudur.

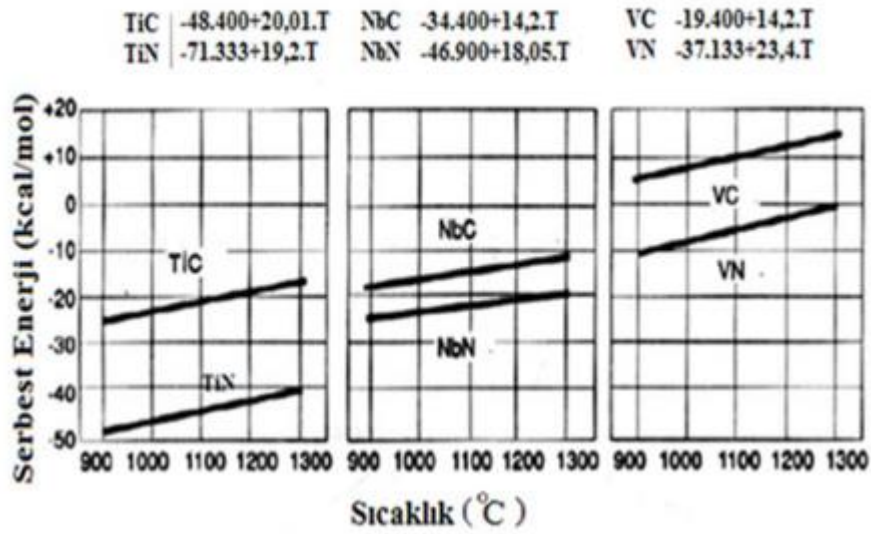
Mikro alaşımli çelikler, metalürjik tasarımları ve uygun termomekanik işlem kombinasyonları ile geliştirildikleri için yapı çelikleriyle karşılaştırıldıklarında daha yüksek mukavemet ve tokluk gösterirler.

Çelikten üretilen küresel tank, basınçlı kap, köprü ve nükleer enerji tesislerindeki konstrüksiyonlarda kullanılan ince taneli çelikler, gitgide artan büyüklüklerde kullanılmaktadırlar. İnce taneli ve yüksek dayanımlı çelikler, genelde düşük karbonlu mikro alaşımli çelik olarak üretilir ve normal tavlı veya ıslah edilmiş olarak kullanılmaktadırlar. Bu çeliklerin en düşük akma sınırları 255 ile 500 MPa değerleri arasındadır.

Mikro alaşımli çelikler genellikle -100 °C-300 °C civarlarında geniş bir sıcaklık aralıklarda kullanılırlar. Yüksek kırılma korunumunun ve zor şartlara rağmen güvenli kaynaklanabilmenin istendiği durumlarda klasik yapı çeliklerinden daha üstün özellikler içermeleri tercih sebeplerindedir [36].

Mikro alaşımli çeliklerin imalatında en dikkat çekici nokta düşük karbon, fosfor ve kükürt içeriklerinin oluşturulmasıdır. Özellikle karbonun az oranda kullanılması ile kolayca şekillendirilme sonrasında çeliğe yeterli tokluk ve mukavemet kazandırılmıştır. Mikro alaşım elementlerinin çeliğin katılaşması anında oluşmuş nitrür, karbür ve karmaşık karbonitrür çökeltilerinin etkisiyle çalışmaktadır. Mikro alaşımli çeliklerde, Mikro alaşım elementlerinin katılması ile oluşturulan mikroalaşımlama işleminde, östenit tane boyutunun kontrolü ve matris sertliğinin çok küçük çökelti dağılımı ile artırılması direkt olarak sağlanabilmektedir.

Tane boyutu kontrolü ve ince çökelti dağılımı açısından oluşturulmuş olan çökeltinin çözünürlüğü ve çözünürlük sıcaklık değerleri dikkate alınır. Mikro alaşım elementlerinin oluşturabildiği karbür, nitrür ve karbonitrür çökelti, östenit yapısı içinde çözünme sıcaklıkları açısından farklılıklar oluşturmaktadırlar. Örneğin; Nb (CN) östenit içerisinde 1250 °C'nin üzerinde çözünürken V (CN) için bu sıcaklık 1150 °C olmaktadır. Bu sebeple östenitleme işlemi 1100 -1300 °C gibi geniş bir sıcaklık aralıklarında yapılmaktadır. Mikro alaşımli çeliklerinin mukavemeti; çökeltme sertleşmesi, ferrit tane incelmesi, dislokasyon sertleşmesi (pekleşme) mekanizmalarının bir arada kullanılmasıyla arttırılmıştır. Alternatif olarak kullanılan bu mukavemet arttırma mekanizmaları, mikro alaşımli çeliklerin mukavemetinin arttırılmasında martenzit, perlit veya beyritte de olduğu gibi yüksek oranda karbon içeriğine bağlı olmamaktadır [37,38].



Şekil 3.3. Mikro alaşım elementlerinin oluşturduğu karbür ve nitrür yapılarının oluşum sıcaklıkları ve serbest enerjileri arasındaki ilişkiler [39].

Mikro alaşım elementleri olarak anılan Nb, V, Ti, Mo vb. gibi karbür oluşturu elementler, yapısal çeliklerde sağladıkları mukavemet ve tokluk artışından faydalanılması sonucu yaygın olarak uygulanan elementlerdir. Esas olarak bu elementlerin güçlü etkisi, östenitin sıcak deformasyon prosesi süresince ve daha sonraki aşamalarda gösterdikleri davranışlardan gelmektedir. Genel olarak, mikro alaşım elementlerinin; tane sınırları, yeniden kristalleşme sınırları ve dislokasyonlar

gibi kristal hatalarını engelledikleri bilinir. Bu engellemeyi ya çözünmüş olarak (hafif engelleme) ya da çökelti olarak (güçlü engelleme) buldukları durumda sağlarlar. Bundan dolayı mikro alaşım elementleri tane kabalaşmasını, statik yeniden kristalleşmeyi ve dislokasyon hareketini sınırlar [40]. Bu elementler östenitte katı çözelti içinde olduklarından sertleşebilirliği de artırılırlar ve böylece daha düşük dönüşüm sıcaklıklarına adım atılır [41]. Hem tane kabalaşmasının hem de yeniden kristalleşmenin sınırlanması, östenitin mikro yapısının kontrol edilmesine imkân sağlar ki bu etki, sertleşebilirlik ile birlikte dikkate alındığında, nihai mikro yapı da kontrol altına alınmış olur [42].

1970'lerin ortalarında, birçok çalışma basit ferrit-perlit çeliklerinden ziyade mikro alaşım elementlerinin kullanımı üzerine olmuştur. Bu çelikler bir miktar daha fazla C, Mn, Si ve mikro alaşım elementi içermekteydi ve ilk araştırmaların çoğu sıcak haddelenme tarafından nihai mikro yapı kontrol edilerek, mukavemet ve tokluk özelliklerini optimize etmek yönünde olmuştur. Bu çeliklerin akma mukavemeti hedefleri günümüz çeliklerinden bir miktar daha düşüktür. Sıcak haddelenmiş levha için akma mukavemeti yaklaşık 450 MPa ve sıcak haddelenmiş şerit için akma mukavemeti yaklaşık 560 MPa'dır. Ancak bu mukavemet değerleri düşük karbonlu QT (Quenching and Tempering) çelikleri ile rekabet edebilecek düzeyde değildi (Akma mukavemeti ≥ 560 MPa). Bunun üzerine yapılan geliştirme çalışmalarıyla sıcak haddelenmiş C-Mn-Si çeliklerinde akma mukavemetinde yaklaşık %50 artış sağlanmıştır [42].

Bu ilk mikro alaşımlı çelikler C-Mn-Si çeliklerine göre sadece daha mukavim değil, aynı zamanda toklukları da daha iyiydi. Bu iyileştirilmiş tokluk değerleri daha ince ferrit taneleri ve azaltılmış perlit miktarı (perlitten sağlanan mukavemete gereksinim kalmaması nedeniyle) sonucu oluşan gevrek kırılma riskine karşı direnci de artırılmıştır [43].

3.2.2. Alaşım Elementleri Etkileri

Çeliğe katılan her bir alaşım elementinin özel bir amacı vardır. İstenilen amaca uygun olarak alaşımlandırma yapabilmek için de alaşım elementlerinin özelliklerinin iyi bilinmesi gerekmektedir.

Çelikteki önemli alaşım elementlerinin çelikler üzerinde nasıl etkileri olduğu Tablo 2.1’de verilmiştir. Isıl işlem sırasında davranışlarını değiştirmek için yalın karbonlu çeliklere alaşım elementleri eklenir ve bu da çeliğin mekanik ve fiziksel özelliklerinin iyileştirilmesini sağlar.

Alaşım ilaveleri aşağıdaki nedenlerden bir veya birkaçı için yapılır [32].

- Sünekliği belirgin şekilde düşürmeden çekme dayanımını artırmak
- Tokluğu artırmak
- Sertleşebilirliği artırmak
- Yüksek sıcaklıklarda mukavemeti korumak
- Daha iyi bir korozyon dayanımı elde etmek
- Aşınma direncini artırmak
- Çeliğe ince tane boyutu vermek

Tablo 3.1. Çelikler üzerinde alaşım elementlerinin etkisi [34].

Alaşım elementi	Sertlik	Mukavemet	Akma noktası	Yüzde uzama	Kesit daralması	Darbe direnci	Elastisite	Yüksek sıcaklık dayanımı	Soğutma hızı	Karbür oluşumu	Aşınma direnci	Dövülebilirlik	İşlenebilirlik	Oksitlenme eğilimi	Korozyon direnci
Si	↑	↑	↑↑	↓	~	↓	↑↑↑	↑	↓	↓	↓↓↓	↓	↓	↓	-
Mn*	↑	↑	↑	~	~	~	↑	-	↓	~	↓↓	↑	↓	~	-
Mn**	↓↓↓	↑	↓	↑↑↑	~	-	-	-	↓↓	-	-	↓↓↓	↓↓↓	↓↓	-
Cr	↑↑	↑↑	↑↑	↓	↓	↓	↑	↑	↓↓↓	↑↑	↑	↓	-	↓↓↓	↑↑↑
Ni*	↑	↑	↑	~	~	~	-	↑	↓↓	-	↓↓	↓	↓	↓	-
Ni**	↓↓	↑	↓	↑↑↑	↑↑	↑↑↑	↑↑	↑↑↑	↓↓	-	-	↓↓↓	↓↓↓	↓↓	↑↑
Al	-	-	-	-	↓	↓	-	-	-	-	-	↓↓	-	↓↓	-
W	↑	↑	↑	↓	↓	-	-	↑↑↑	↓↓	↑↑	↑↑↑	↓↓	↓↓	↓↓	-
V	↑	↑	↑	~	~	↑	↑	↑↑	↓	↑↑↑↑	↑↑	↑	-	↓	↑
Co	↑	↑	↑	↓	↓	↓	-	↑↑	↑↑	-	↑↑↑	↓	~	↓	-
Mo	↑	↑	↑	↓	↓	↑	-	↑↑	↓↓	↑↑↑	↑↑	↓	↓	↑↑	-
S	-	-	-	↓	↓	↓	-	-	-	-	-	↓↓↓	↑↑↑	-	↓
P	↑	↑	↑	↓	↓	↓↓↓	-	-	-	-	-	↓↓↓	↓↓↓	↓↓	↑↑
* Perlitik çeliklerde					↑				-	~					
** Östenitik çeliklerde					Artırır	Azaltır	Değişmez			Önemsiz ya da bilinmiyor					

Karbon (C) Karbon, çelik için en temel alaşım elementi olarak bilinir. Karbon oranının artırılmasıyla birlikte sertlik ve dayanımın büyük oranda arttığı görülmektedir. %0,83 karbon içeriğine kadar çekme gerilmesi ve akma sınırının değeri artmaktadır. Ancak bu değerin değişmesinden sonra kırılma riski artacaktır. Çeliklerde karbon miktarı bazı özellikleri (süneklik, kaynak kabiliyeti, dövülebilirlik gibi) olumsuz şekilde etkilenmektedir. Ayrıca yüksek karbonlu çeliklerin ısıtma işlemlerinde çatlama riski çok yüksektir [44].

Mangan (Mn) Mangan genelde sünekliği azaltıp, çeliğin dayanımını artırıcı bir özelliği vardır. Çeliğin dövülebilirlik özelliğini iyileştirirken kaynak kabiliyetini de olumsuz yönde etkilemez. Manganın pozitif yöndeki etkileşimi karbon miktarının artmasıyla beraber artış göstermektedir [44].

Mangan, tüm ticari karbon çeliklerinde %0,03 ile %1,00 arasında bulunarak kükürdü gidermek üzere işlev görür ve çelik eriyiğinde deoksidan olarak görev yapar.[33].

Silisyum (Si) Çelik üretimi sırasında oksijen giderici olarak kullanılmaktadır. Silisyum, çeliğin akma sınırını, çekme dayanımını ve sertliğini artırmaktadır. Ancak artan silisyum miktarıyla çeliğin darbe dayanımı düşmekte, dövülebilirlik ve kaynak kabiliyeti azalmaktadır [45].

Kükürt (S) Kükürt genel olarak çeliğin içinde istenmeyen bir elementtir. Çeliğin içerisinde yer alan kükürt miktarı arttıkça çeliğe aşırı derecede kırılma riski sağlar ve düşük sıcaklıklarda da çatlaklar oluşturur. Kükürdün mangan ile dengelenmesi gerekmektedir. Çeliğe kükürt miktarının iki katı kadar mangan katılması ile kolay talaş kaldırılabilen ve temiz yüzey elde edilebilen bir malzeme olan otomat çelikleri elde edilir. Otomat çelikleri talaşlı imalat için oldukça yaygın kullanıma sahiptir [45].

Kurşun (Pb) Sadece otomat çeliklerine katılan kurşun çelikte çok ince ve iyi dağılımı sayesinde talaşlı işlemede talaşların kırılma riskini ve temiz yüzey elde edilmesini sağlarken mekanik özellikleri etkilemez [31].

Selenyum (Se) Selenyum otomat çeliklerine talaş kırılğanlığı vermek için katılan bir alaşım elementidir [31].

Fosfor (P) Fosfor genel olarak çeliğin içinde istenmeyen bir elementtir. Çeliğin ekme ve korozyon dayanımını az miktarda yükseltmesine rağmen çeliğin içerisinde yer alan fosfor miktarı mümkün olduğunca düşük tutulmaya çalışılır. Çeliğin içerisinde yer alan fosfor miktarı arttıka kırılğanlık özelliği artmakta; biçimlendirilme, kaynak edilebilme ve talaş kaldırılabilme kabiliyetleri azalmaktadır [45].

Kalsiyum (Ca) Kalsiyum, silisyumla beraber oksitlenmeyi azaltıcı bir özellik göstermektedir [31].

Krom (Cr) eliklere belirli bir oranda krom katılırsa korozyona karşı dayanım artmaktadır. Çeşitli durumlarda, özellikle atmosfere açık durumlarda paslanma ve korozyona karşı direnç gösteren paslanmaz çelikler, kimyasal bileşimlerinde minimum ağırlıkça %11 miktarında krom içermektedirler [30].

Krom, eliğin yalnız korozyon dayanımını artırmakla kalmaz, aşınma direncini, sertleşebilirliğini, çekme dayanımını ve yüksek sıcaklık dayanımını da artırır [44]. Kromlu eliklerin sertlikleri fazla olduğundan darbelere karşı dayanıklı değillerdir ve soğuk şekillendirilebilme kabiliyetleri düşüktür [45].

Nikel (Ni) Genellikle krom ile birlikte kullanılan nikel, paslanmaya, korozyona, kimyasal maddelere, yüksek sıcaklığa ve darbelere karşı dayanımı, elastikiyet özelliğini artırmaktadır [45]. Ayrıca nikel içeren yapı çelikleri, yüksek sertleşebilirlik ve yüksek yorulma direnci gösterirler [44].

Seryum (Ce) Kuvvetli bir oksitlenme önleyici olan seryumun çelikte temizleyici ve kükürt giderici etkisi vardır [31]

Molibden (Mo) Molibden genellikle kromla beraber kullanılmaktadır. Çeliğin sertleşebilirliğini, çekme dayanımını ve yüksek sıcaklığa dayanımını artırır.[44].

Molibden kaynak kabiliyetini olumlu yönde etkilemesine rağmen dövülebilirliği azaltmaktadır [34].

Vanadyum (V) Vanadyum çeliğin sertleşebilirliğini artırır. Aynı zamanda tane küçültme etkisine de sahiptir ve darbe dayanımını artırır. Vanadyum güçlü bir karbür yapıcı olmasından dolayı, aşınma ve sıcaklığa karşı dayanımın artırılması için takım çeliklerinde volframla, sıcağa dayanıklı çeliklerde kromla beraber katılır [44].

Volfram (W) Volfram, çok iyi bir karbür yapıcı olduğundan mukavemeti, sertliği, kesme kabiliyetini ve dayanıklılığı yükseltmekte, yüksek sıcaklıklarda mukavemetin muhafazasını sağlamaktadır. Bu yüzden volfram, ısıya dayanıklı çeliklerin üretiminde kullanılmaktadır [34].

Niyobyum (Nb) Niyobyum tane inceltici etkiye sahip olup, akma sınırını yükseltmekte ve karbür yapıcı özelliği ile sertliği artırmaktadır [44].

Titanyum (Ti) Titanyum büyük oranda sertliği arttırmaktadır. Ayrıca en bilinen özelliği karbür yapıcı olmasıdır. Çeliğin üretimi aşamasında deoksidan olarak da kullanılan titanyum, tane inceltici bir özelliğe sahiptir [44].

Kobalt (Co) Kobalt, çeliğin sertliğini, yüklere ve sıcaklığa karşı dayanımını artırarak, ince taneli bir yapı oluşmasını sağlar [45]. Yüksek sıcaklıklarda tane büyümesini yavaşlatıcı bir etkisi olan kobalt, sıcağa dayanıklı çeliklere ilave edilmektedir [44].

Alüminyum (Al) Alüminyum güçlü bir deoksidan olup tane inceltici etkisi vardır. Çelik içerisinde silisyum gibi hareket eden alüminyum, yüksek miktarlarda kullanıldığında çeliği kaba taneli yapmaktadır [34]

Bor (B) orta ve düşük karbonlu çeliklerin sertleşebilirliğini yükselici özelliğe sahiptir [44].

Bakır (Cu) Bakır, sertlik, çekme ve akma dayanımları ile korozyon ve sıcaklık direncini artırırken dövülebilirliği azaltmaktadır [31].

Azot (N) Akma mukavemetini yükselten azot, uzama ve çentik darbe mukavemetini çok düşürmektedir [34]. Azotun en önemli yararı, yüzeyde nitrür oluşturarak çok sert yüzeyler elde edilmesini sağlamaktır [31].

Oksijen (O) Çelik üretimi sırasında çeliğe geçen oksijen sıcak kırılmalığa yol açtığı için çeliğin içerisinde %0,07'den fazlası istenmemektedir [34].

Hidrojen (H) Hidrojen, çelik içerisinde çok az miktarda dahi olsa oldukça zararlıdır ve kırılmalığa yol açmaktadır [34].

Zirkonyum (Zr) Genellikle arıtılmayan elementleri denetlemek için yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çeliklerde kullanılmaktadır. Özellikle, sülfürün türünü değiştirir ve çeliğin sünekliğini artırmaktadır [44].

BÖLÜM 4

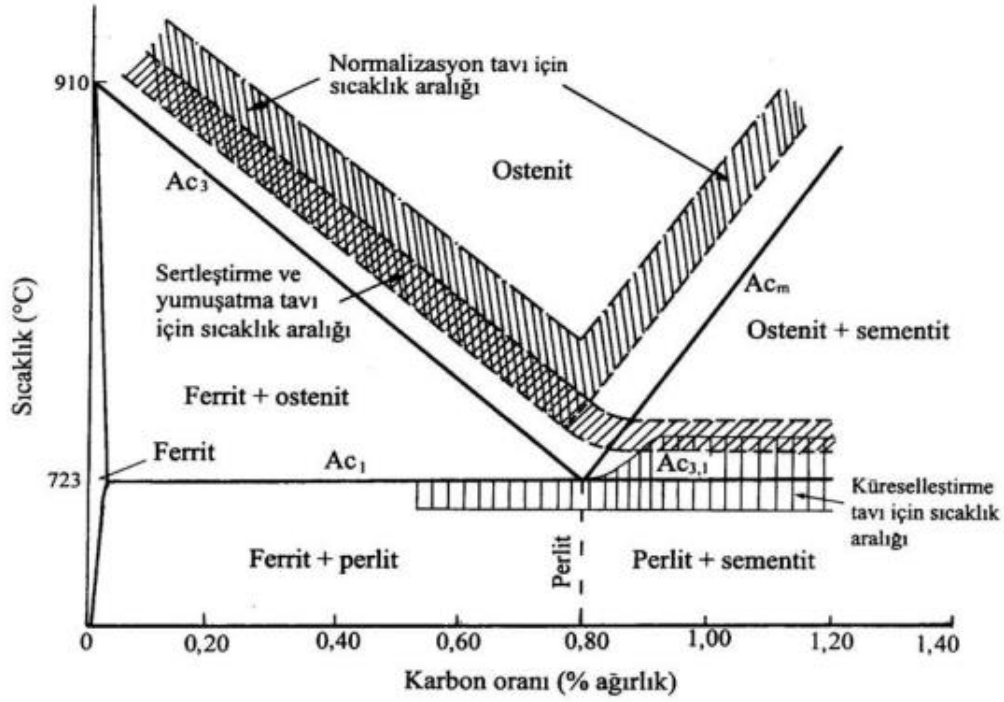
ÇELİKLERE UYGULANAN ISIL İŞLEMLER

Isıl işlem uygulamasından, malzemelerin katı haldeki sıcaklık değişimleri ile bir ya da art arda birkaç kez yapılan işlem ile, istenilene yakın veya birebir özellikler elde edilmesi anlaşılmaktadır. Isıl işlemler, genel kapsamda, parçaların belli bir sıcaklığa kadar ısıtılması (ısıtma), burada yeterli miktarda tutulması (bekleme) ve belirli kurallara eşliğinde bu sıcaklığın oda sıcaklığına kadar düşürülmesi (soğutma) üç adımda (Şekil 4.1.) uygulanmaktadır. Böylece istenilen özellik değişimleri elde edilir [26].



Şekil 4.1. Bir ısıl işlemde genel ısıl işlem süreci.

Literatürde, çeliklere uygulanan ısıl işlem uygulamaları esnasında meydana gelen fazlar ile mekanik özelliklerin ilişkisinden bahsedilmektedir. Aşağıda verilen grafikte (Şekil 4.2) karbon miktarına bağlı olarak ve istenen özelliklere göre uygulanacak ısıl işlem uygulama sıcaklıkları belirtilmiştir.



Şekil 4.2. Alaşım-sız çeliklere uygulanmakta olan küreselleştirme, yumuşatma, normalizasyon ve sertleştirme ısıl işlemleri için tavlama sıcaklık değerleri [46].

Çeliklere uygulanmakta olan bu ısıl işlemlerin hepsi östenit fazının dönüşümüyle ilgilidir. Dönüşüm ürünlerinin çeşitleri, bileşimleri ve metalografik yapıları çeliğin mekanik ve fiziksel özellikleri önemli ölçüde etkilenmektedir.

Östenitleştirme; çeliğin Ac_1 sıcaklık çizgisinin üzerinde olan bir sıcaklığa kadar ısıtılması ve yapının tamamen östenite dönüşümüne kadar bekletilmesi anlamına gelmektedir. Ötektoid altı çeliklerde östenitleştirme işlemi üst kritik sıcaklık çizgisinin (Ac_3) 40-60 °C üzerindeki sıcaklık değerlerinde gerçekleştirilmektedir. Bu çeliklerin Ac_1 ile Ac_2 arasındaki sıcaklıklarda tavlama ile ferrit ve östenitten oluşmuş bir yapı elde edilir. Tavlama işlemi sonrasında, çelikler kısmen daha yavaş soğuma hızlarında soğutulduklarında ise östenit içerisinde çözülmüş halde bulunan karbon atomları difüzyon ile östenit fazından ayrılmaktadırlar. Ardından, demir atomları bulunduğu bölgeleri az da olsa değiştirerek yeni bir hacim merkezli kübik yapı oluşturmaktadırlar. Burada östenit (γ)-ferrit (α) dönüşümü, zamana bağlı bir çekirdeklenmesi ve ardından büyümesi olayı şeklinde olur.

Soğuma hızı arttırıldığında, karbon atomları difüzyon ile östenit yapıdan ayrılmak için yeterli zamanı bulamazlar.

Demir atomları mikron boyutunda kıvılcıklar bile, karbon atomlarının yapı içerisinde hapsedilmelerinden dolayı hacim merkezli kübik yapıya dönüşüm gerçekleşemez ve bambaşka bir yapı oluşur. Hızlı soğuma sonrasında oluşan bu yapıya martenzit adı verilmektedir [17].

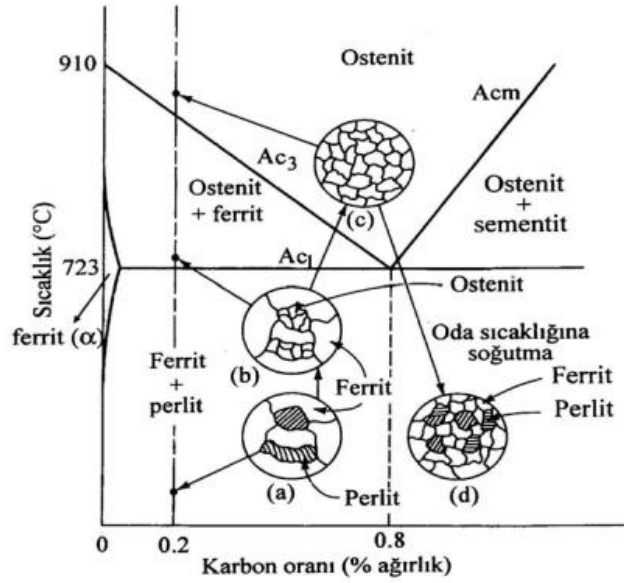
Ayrıca çeliğe ilave edilen krom, nikel ve mangan gibi alaşım elementleri, soğuma esnasında karbon atomlarının difüzyonunu yavaşlatmaktadır. Dolayısıyla daha uygun bir soğuma hızı karbonun kafes yapıda kalmasını ve martenzit oluşumunu sağlar. Yüzey merkezli kübik östenit katı eriyiği hacim merkezli tetragonal martenzite dönüşürken %5,4 oranında hacim artışı olur. Bu kristal kafesi sürekli (kesiksiz) kayma düzlemleri içermediği için şekil değiştirmesi büyük oranda zorlaşmış olur. Böylece oluşan bu yapı her türlü şekil değişimine karşı yüksek bir mukavemet (yüksek bir sertlik) gösterir [20].

Martenzitin en önemli özelliği ise, aşırı sert bir faz olarak bilinmesidir. Aslında, çeliklerde bulunan sementit fazından sonra gelen en sert faz martenzit olmaktadır. Martenzit sertliğinin asıl nedeni, karbon atomlarını demir kafes yapısı içerisinde zorla hapsediyor olabilmeleridir. Dolayısıyla yüksek sertlik değerlerine, yalnızca içerisinde yeterli miktarlarda karbon içeren çeliklerde ulaşılabilir.

Çeliklere ilave edilen alaşım elementleri ile ferrit fazı içerisinde küçük miktarlarda çözünerek karışım kristalleri oluştururlar. Yabancı atomların yapıya girmesi ile kristal kafesi gerilir ve kalıcı şekil değişimine karşı daha güçlü bir direnç oluşturulur. Dolayısıyla akma sınırı ve mukavemet artar. Yüksek sıcaklıklarda alaşım elementleri östenit içerisinde çözünür ve kristal kafesin dönüşümü esnasında karbon difüzyonunu zorlaştırırlar. Bu sebeple karbon yalnızca çok küçük mesafeler kat eder ve östenitin parçalanması ile ince lamelli perlit oluşturur. Normal soğuma sonrasında oluşan bu ince perlit, alaşımsız çeliklerin hızlı soğuması sonrasında oluşmuş ince perlit ile karşılaştırılabilir. Bu durumda alaşımlı çelik %0,8'den daha az karbon içerse bile saf perlitik bir yapı oluşur [47].

4.1.TAM TAVLAMA

Tam tavlama çeliğin optimum sıcaklıkta ısıtılması ve faz dönüşümü için genelde fırın içerisinde yavaş yavaş soğutulmasından ibaret olmakla birlikte soğutma işlemi oda sıcaklığına kadar devam edebilmektedir. Bu ısıl işlem uygulamasının amacı, sertliği düşürmek, taneleri küçültmek, elektriksel ve manyetik özelliklerini geliştirmek ve işlenebilirliği arttırmak için yapılmaktadır. Ötektoidal çelikler tam tavlama için Ac_3 (üst kritik) sıcaklığının 30-50 °C üzerlerine ısıtılmıştır. Faz dönüşümünün tamamlanmasının ardından fırında yavaşça soğutulmaktadır. Soğuma hızı alaşımli çeliklerde ortalama olarak 30-100°C/saat, karbonlu çeliklerde ise 200 °C/saat olarak alınmıştır. Şekil 4.3'te kaba taneli bir ötektoidal çeliğin tam tavlama ile küçültülmesi şematik olarak verilmiştir.

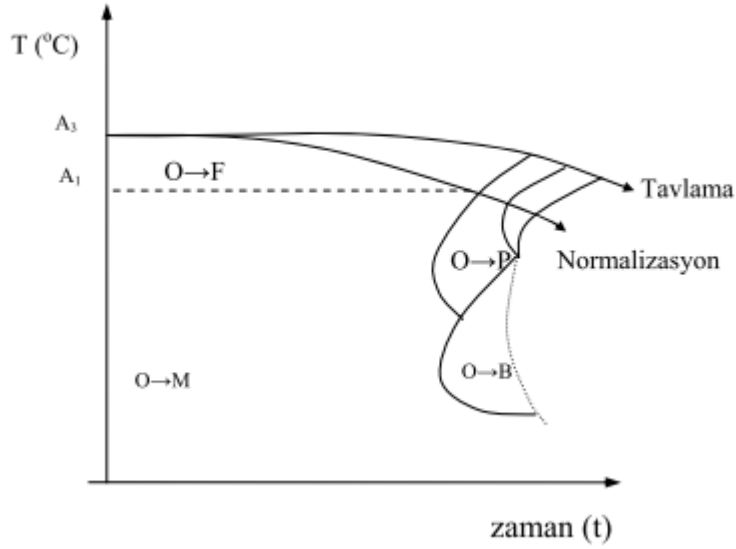


Şekil 4.3.%0,2 karbon içeren çeliğin tam tavlama sırasında oluşan iç yapı değişikliklerinin şematik gösterimi [17].

Bu çelik Ac_1 'e kadar ısıtılsa bile tanelerinde bir değişiklik meydana gelmez. Ac_1 'in hemen üzerinde perlit yalnızca küçük taneli östenite dönüşmektedir. Ferrit asla değişmez. İşlem Ac_3 sıcaklığına kadar devam ederse kaba ferrit taneleri küçük östenit tanelerine dönüşür ve Ac_3 sıcaklığının ortalama 30-50 °C kadar üzerinde ise mikro yapı tamamen küçük taneli östenitten ibaret olur. Soğutma işleminin fırın içerisinde çok düşük hızlarda olması ve bunun oda sıcaklığına kadar devam edebilmesi

durumunda küçük östenit taneleri küçük ferrit ve perlit bölgelerinden oluşur. Sonuçta oluşmuş bu fazlar, çeliğin mekanik özelliklerine pozitif yönde etki ederek, kırılmaya karşı olan direnci büyük oranda arttırdığı söylenir [48, 49].

Tam tavlamaıyla, östenitin izotermik olarak parçalandığı diyagram Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.4. Östenitin izotermik parçalanma diyagramı.

Çalışmalardan yola çıkarak, çelik malzemeler östenit bölgesinden (911-1392 °C) yüksek sıcaklıklara kadar hızlı bir şekilde ısıtılırlarsa buradaki östenit tanelerinin de büyüme hızı çok yüksek olacaktır. Bu sebeple östenitlerin tane boyutları aşırı şekilde büyüyecek ve bu bölgelerden soğutulursa tane boyutları değişmeyecektir.

Sonuç olarak bir metal tanesi yüksek sıcaklıkta östenit bölgesinden soğutulursa taneleri iri olacaktır ve bu malzemenin mekanik özelliklerini düşüreceklerdir.

Bu durumun engellenmesi için tam tavlama işlemi östenit çekirdeklerinin aşırı büyümeye başlayamayacağı sıcaklık aralığında $A_{c3} + (30-50) ^\circ C$ gerçekleşir [50].

Ötektoidüstü çeliklere, tam tavlama ısı işlem uygulamaları genelde yapılmaz. Bu tip çeliklerde, yavaş soğutma aşamasında tane sınırlarında sementit ağı oluşur. Sementitin kırılma ve sert olması itibariyle, genellikle çeliğin mekanik özellikleri açısından arzu

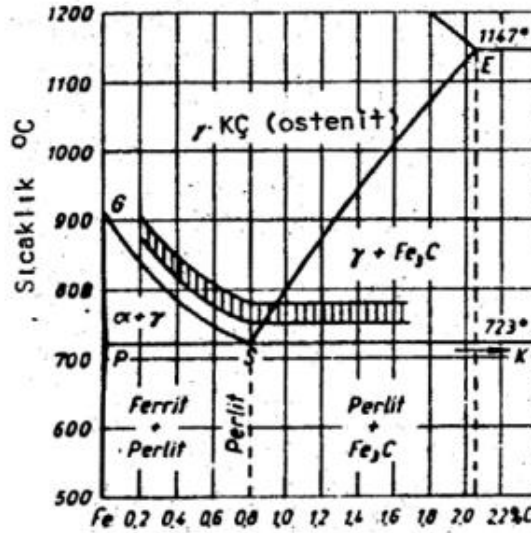
edilmemektedir. Bundan dolayı ötektoidüstü çeliklere genellikle tam tavlama yerine küreleştirme tavlama yaygın olarak kullanılmaktadır [48,49]

4.2. SERTLEŞTİRME

4.2.1. Isıtma İşlemi

Bir çeliğin dönüşüm ile sertleştirilmesi aşamasında, çeliğin bu sıcaklığa kadar ısıtılması ve sertleştirme sıcaklığı ya da östenitleştirme sıcaklığı denilen bu sıcaklıkta, istenen yapı değişimine ulaşmaya kadar beklemesinden ibarettir. Isıtma sıcaklığından yeterli homojenlikte bir östenitik yapı elde edilmeli ve mevcutta bulunan özel karbürlerin gerekli kadarının çözülmesini sağlamak, fakat tane büyümesine de imkân vermeyecek düzeyde olması zorunludur.

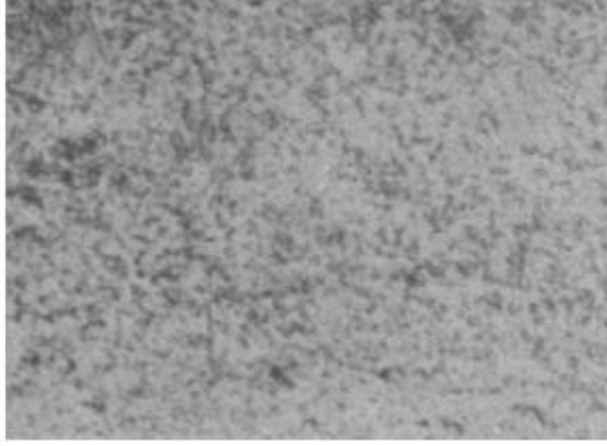
Tüm çeliklerin östenite dönüşüm sıcaklığı benzer olmamakla birlikte, başta karbon olmak üzere alaşım elementlerinin miktarına ve türüne bağlıdır. Sertleştirmek için uygulanan ısıtmadaki tavlama sıcaklığı, alaşımsız çeliklerde karbon oranına bağlı olarak Şekil 4.5'te gösterilmiştir.



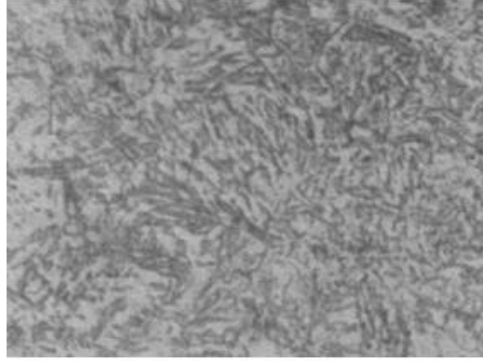
Şekil 4.5 Alaşımsız çeliklerin östenitleştirme sıcaklığı [26].

Alaşımsız çeliklerde, eğer çelik ötektoidaltı bir alaşım ise GPS (Ac_3) sınırının 30-50 °C üzerine, ötektoid ya da ötektoidüstü bir alaşım ise SK (Ac_1) hattının pek az üzerine kadar ısıtmak, iç yapının östenitleştirilmesi için yeterli gelir. Bu koşullarda ısıtılmış

östenitik yapının ani soğutulması sonucu elde edilen martenzit, oldukça ince taneli ve diğer koşullarda elde edilenlere göre nispeten sünektir. Şekil 4.6 'da %0,8 C içeren ötektoid bir çeliğin 760 °C'de östenitleştirme sonrasında ani soğutulmuş yapısını göstermektedir. Şekil 4.7'de %0,8 karbonlu çeliğin 1000 °C sıcaklıktan ani soğutma yapısını göstermektedir [26].



Şekil 4.6. %0,8 C'lu çelik, 760 °C sıcaklıktan suda ani soğutulmuş X500 (İnce iğnesel martenzitik yapı).



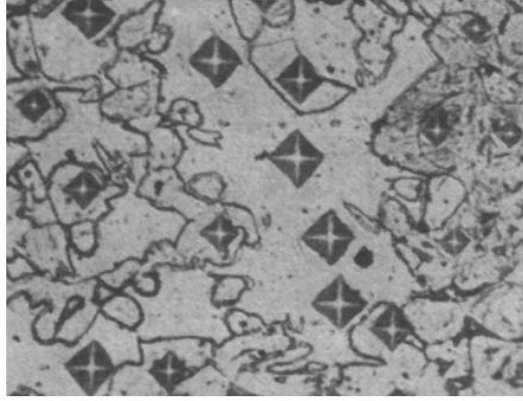
Şekil 4.7. %0,8 C'lu çelik, 1000 °C sıcaklıktan suda ani soğutulmuş X500 (Kaba iğnesel martenzitik yapı).

Şekil 4.6 ile Şekil 4.7 karşılaştırıldığında, kaba martenzitik yapı çok iyi görülebilmektedir. Bu durumdaki yapı ince taneli martenzit nazaran çok fazla kırılmandır ve bu tür uygulamalardan kaçınılmalıdır.

Yüksek ısıtma ile sertleştirilmiş çelikte kabul edilemeyen bir diğer olayda, kalıntı östenit oranının yüksek oranda artmasıdır. Artan östenitleştirme sıcaklığı ile birlikte,

aniden soğuma sonrası dönüşüme uğramadan kalan artık östenit oranı artar ve istenilenden daha çok sertlik düşüşüne neden olur.

Ötektoidaltı çeliklerde, ani soğutma sonrası yapıda ferrit rastlanmasıyla beklenen sertlik değerinden daha düşük değerlere ulaşılır. Çelik malzeme, demir karbon denge diyagramında $\alpha+\gamma$ çift fazlı bölgesinden ani soğutulursa, yapıda martenzitin yanında ferrit de içerir. Şekil 4.8’de %0,3 C’lu çelikte, 740 °C sıcaklığından ani soğutulmuş yapıyı göstermektedir. Yapıda, sert yapı olarak koyu renkli dağlanmış iğnesel martenzit ve yumuşak yapı olarak açık renkli ferritik yapı, gözle fark edilecek biçimde ayırt edilebilmektedir [26].



Şekil 4.8. %0,3 C’lu çelik, 740°C sıcaklıktan suda ani soğutulmuş X500.
(Ferrit, martenzit).

(Ac₁) sıcaklığının 30-50°C üzerinden sertleştirilmiş olan ötektoidüstü çelikler ise, bu sıcaklıkta sementit hemen çözülemeyeceğinden, östenitin yanı sıra ayrıca karbür de bulunur. Martenzitten daha sert olan bu karbürler ani soğutulmasının ardından martenzitik ana yapı içerisinde yerleşerek çeliğin aşınmaya karşı dayanımını artırır ve kısmen de olsa arzu edilen mekanik özelliklere ulaşılmaktadır. Ötektoidüstü çelikler, önceden yumuşak tavlama ya da normal tavlama uygulanmadan sertleştirilirse, tane sınırları band formunda, tane içlerinde ise çubukçuk formda sekonder sementit içereceklerdir. Bu da çelikte fazlaca kırılabilirlik yapacaktır.

Alaşımli çeliklerde karbonun dışındaki alaşım elemanları da ötektoid noktaya önemli ölçüde etki yaptıklarından, alaşım elemanlarının türü ve miktarlarına göre bu sıcaklık

alanı değişmektedir. Alaşım elementleri ötektoid noktayı sola doğru kaydırmasına karşın, mangan ve nikel ötektoid sıcaklığını düşürücü, krom, silisyum, volfram, molibden ve titan ise yükseltici etki gösterir [51].

4.2.2. Tutma Süresi

Sertleştirme sıcaklığında tutma süresi, katı eriyik içine alınması istenilen karbür miktarına bağlıdır. Karbür oranı türlü çelikler için farklı olduğundan tutma süresi aynı sürede çelik türüne bağlı olur. Kolayca çözünür karbürleri içerecek sade karbonlu ve az alaşımlı yapı çeliklerinde sertleştirme sıcaklığına ulaştıktan sonra bu sıcaklıkta 5-15 dakikalık bir tutma süresi genelde yeterlidir.

Orta alaşımlı çelikler için boyutlardan bağımsız olarak 15 ila 25 dakikalık tutma süresi önerilmektedir. Çok net ısıtma sürelerinin ayarlanabileceği alevle veya indüksiyonla sertleştirme halinde, alışılmış sertleştirme sıcaklığından çok daha yüksek sıcaklıklar kullanılmaktadır. Ek olarak tutma süresi birkaç dakikaya kadar ya da bazı durumlarda bir saniyeye kadar kısaltılabilir.

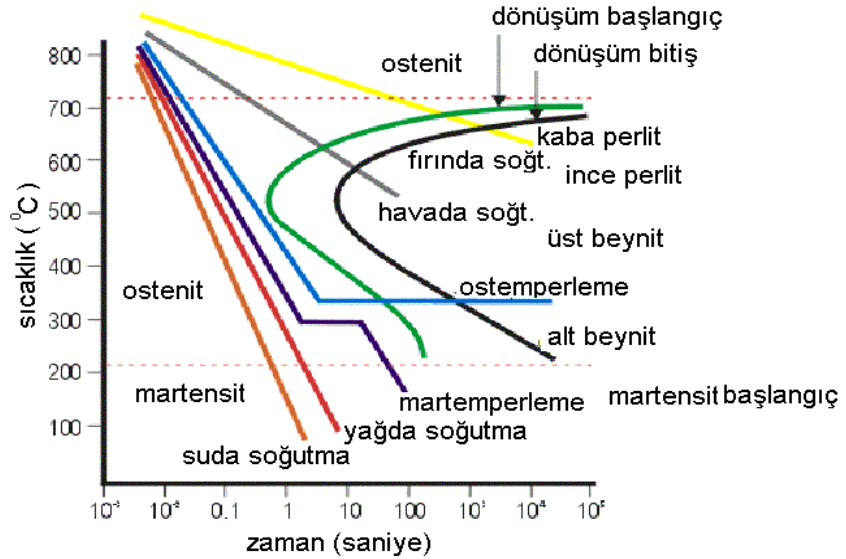
Az alaşımlı takım çeliklerinde istenilen sertliğin yakalanması için kesin bir tutma süresine ihtiyaç vardır. Bu konuda 1 mm parça kalınlığı için 0,5 dakikalık bir süre önerilir. Maksimum ve minimum süreler sırasıyla 1 saat ve 5 dakikadır.

Yetersiz tutma süresi az orandaki karbürlerin katı eriyikle birleşmesi ve sonuçta düşük sertliğe neden olurken fazla uzun tutma süresi de çok oranda kalıntı östenitin bulunmasına ve bununla ilişkili olarak düşük sertliğe neden olmuştur. En ideal olan tutma süresi için önerilen süreler kesit kalınlığının her bir mm için 0,5-0,8 dakika olup, maksimum 1 saat, minimum 10 dakika olarak belirtilmiştir. 0,8 etmeni ise en alt sınırına yakın bir sıcaklıkta uygulanması, 0,5 dakika etmeni sertleştirme işleminin, sertleştirmede sıcaklık aralığının en üst sınırına yakın bir sıcaklıkta uygulanması durumlarında kullanılmaktadır [52].

4.2.3. Su Verme ve Soğutma

4.2.3.1 Doğrudan Su Verme

Doğrudan su vermenin orijinal bir sertleştirme yöntemi olduğu bilinmektedir. Hala yaygın bir kullanım alanı vardır. Bu yöntemde çelik sertleştirme sıcaklığından oda sıcaklığına, ya doğrudan su verilerek hızlıca soğutulmaktadır ya da kullanılmakta soğutma ortamı sıcaklığının minimum üzerinde bir sıcaklığa kadar soğutulur. Bu soğutma ortamı yağ, su veyahut hava olabilmektedir (çelik ve ısıl işlemi). Şekil 4.9'da tek soğutucu ortamda su verme yönteminin ve diğer soğutma ortamlarının TTT diyagramı ile ilişkisi gösterilmektedir [50].

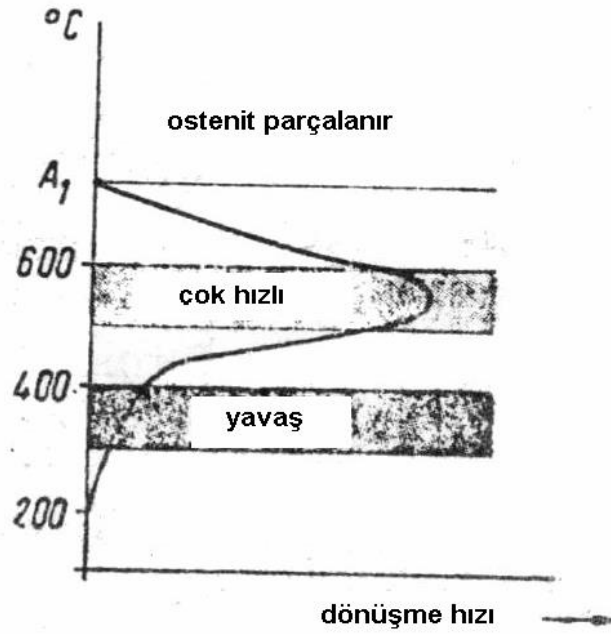


Şekil 4.9. Soğutma Ortamlarının TTT Diyagramıyla İlişkisi

Su verme ortamı, çelikteki sıcaklığın, parçanın kritik soğuma hız sınırını aşacak şekilde absorbe etmelidir. Martenzitik yapı yalnızca bu şekilde östenitten oluşturulur. Çizelge 4.1'den ve Şekil 4.9'dan görüldüğü üzere, çeliğin kimyasal bileşimi kritik soğuma hızıyla ilişkilidir. Alaşimsız çeliklerde karbon miktarı azaldıkça kritik soğuma hızı yükselmektedir. Alaşım elementlerinden biri olan manganez, kritik soğuma hızını düşürür.

Çizelge 4.1. Manganez miktarına bağlı olarak kritik soğuma hızı [48].

C (%)	Mn (%)	Vk (°C/san)
0,6	-	1800
0,6	0,3	750
0,9	1,1	200
0,8	1,5	80



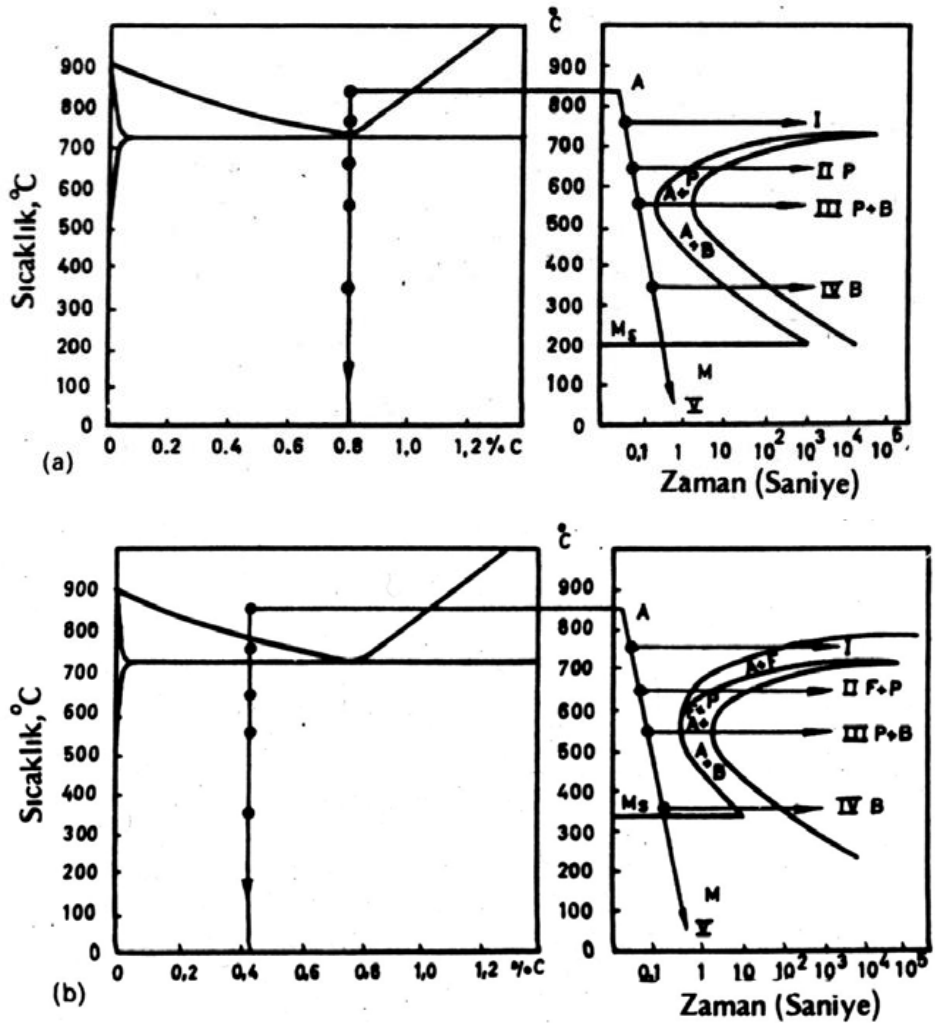
Şekil 4.10. Çeşitli sıcaklık bölgelerinde östenitin parçalanması.

Yüksek soğutma hızında oda sıcaklığına inilinceye kadar devam etmesine gerek yoktur. Burada amaç östenitin perlitte dönüşmesini önlemektir.

Şekil 4.10'da görüldüğü gibi, bu dönüşüm özellikle 550 °C civarında çok çabuk meydana gelmektedir. Bu sıcaklıkta östenit saniyeden daha kısa bir sürede çok çabuk ince lamelli perlit haline dönüşür [48].

4.2.3.2 Soğuma Esnasında Martenzitin Oluşumu

Şekil 4.11 a ve b'de verilen diyagramda eğer soğuma V eğrisiyle temsil edildiği şekilde meydana gelirse, örneğin çok hızlı soğuma, östenit; M hattına ulaşıldığında ferrite dönüşmeye başlayacaktır.

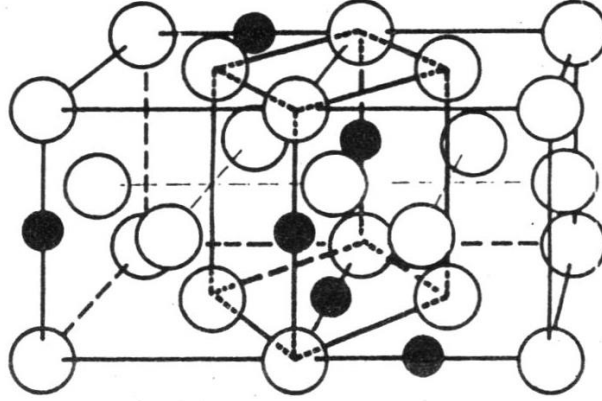


Şekil 4.11. a) %0,8 C'lu çeliğin TTT diyagramı b) %0,45 C'lu çeliğin TTT diyagramı.

Eğer soğumaya MB'nin altında devam edilirse östenitin dönüşümü esnasında az bir karbon hareketi olacaktır ve bu sebeple α demiri katı eriyiğin içerisinde karbon atomları kalacaktır.

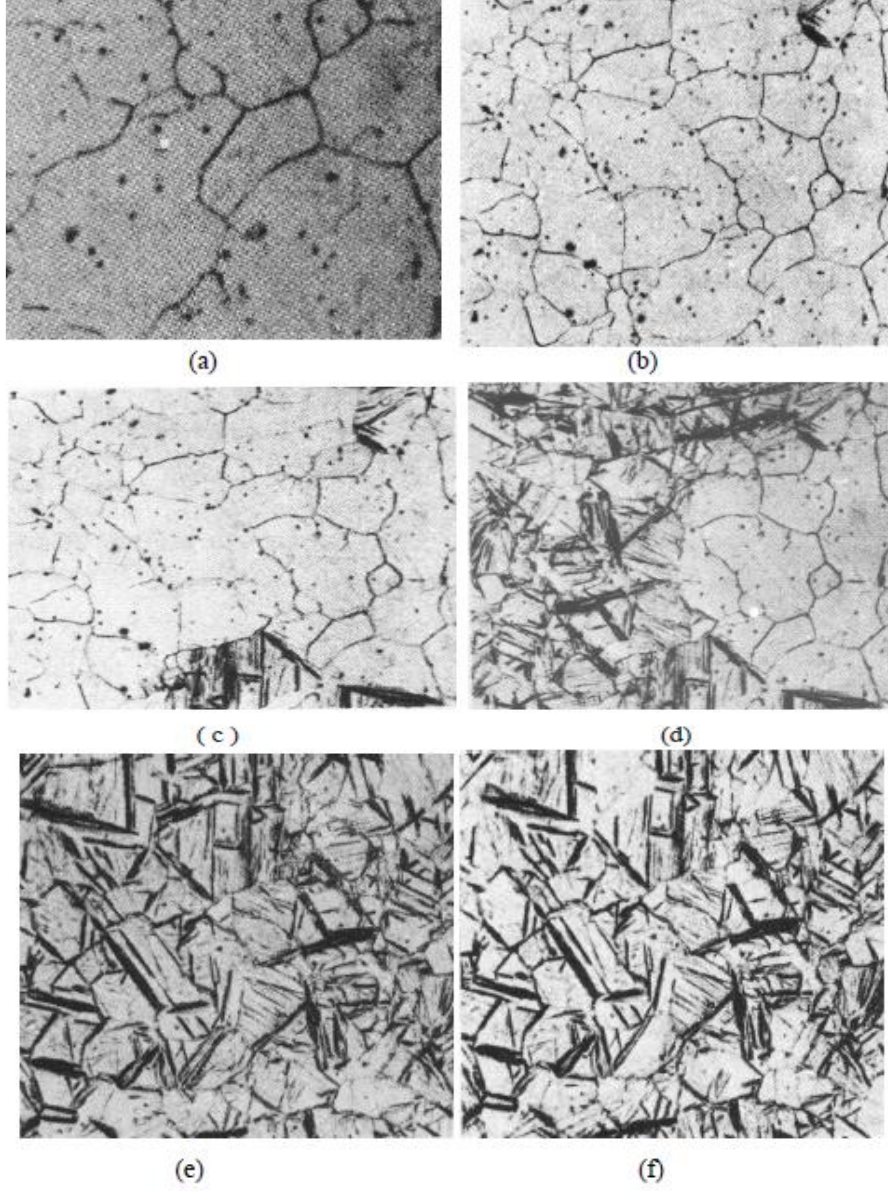
Karbon atomlarının yerleşebileceği var olan boşluklar γ demirine oranı ile α demirinde daha az olduğundan, α demiri kafesinde bir genişleme ihtimali olacaktır. Gerilmeli bir durum olduğunda bu olay çeliğin sertleşmesine yol açmaktadır. Sertleşmeden sonra oluşan ve karbonun α demiri içerisinde aşırı doymuş eriyiği olan bu faza verilen isim martenzittir [48].

Şekil 4.12’de martenzit meydana gelmesi esnasında γ demirinden, α demirine geçişin şematik olarak gösterimi aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.12. Östenitten (γ) martenzite (α) dönüşümün kafes modeli.

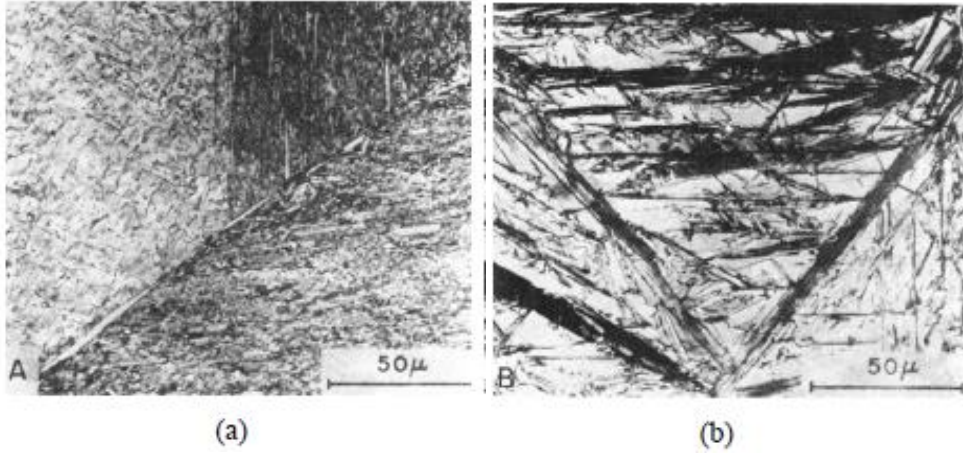
Dönüşüm diyagramlarından da anlaşıldığı, perlit ve beynitin oluşumunun zamanla ilişkili olarak ilerleyebileceği durumlarda, martenzit oluşumunda bur durum mümkün olmamaktadır. Mb altındaki herhangi bir sıcaklıkta belli bir martenzit oluşum yüzdesine denk gelmektedir, fakat oluşan gerçek martenzit miktarı çeliğin türüne, östenitleme işleminin uygulama koşuluna ve sertleştirme için uygulanan soğutma hızlarına bağlı olmaktadır [48]. Şekil 4.13’te martenzit oluşumunun ilerleyişi tek tek gösterilmektedir.



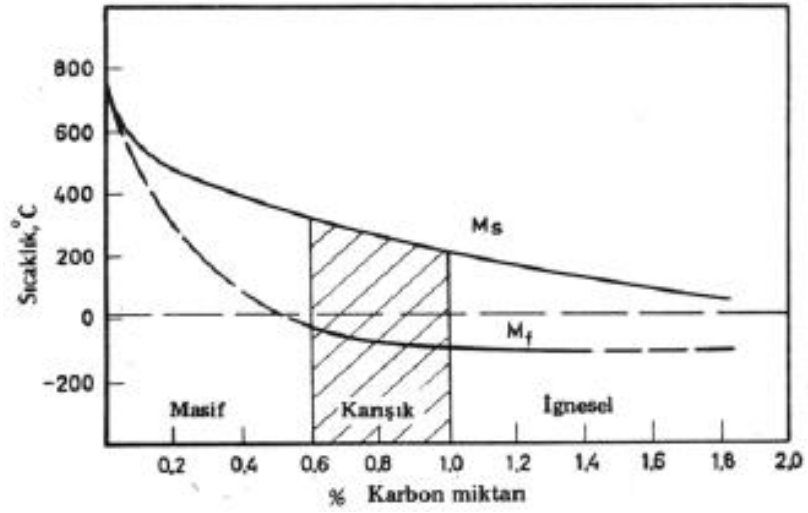
Şekil 4.13. Düşük sıcaklıklarda östenitin martenzite ardı ardına dönüşümü.

(a) 280 °C (b) 220 °C (c) 200 °C (d) 195 °C (e) 180 °C (f) 175 °C

Marder ve Krauss Fe-C alaşımlarında martenzit yapısını analiz etmişler ve “masif martenzit” ve “iğnesel martenzit” adı verilen iki farklı tür martenzitin mevcut olduğunu bulmuşlardır. Şekil 4.14’te bu martenzitlerin biçimleri görülmektedir.



Şekil 4.14. (a) Masif martenzit, (b) iğnesel martenzit

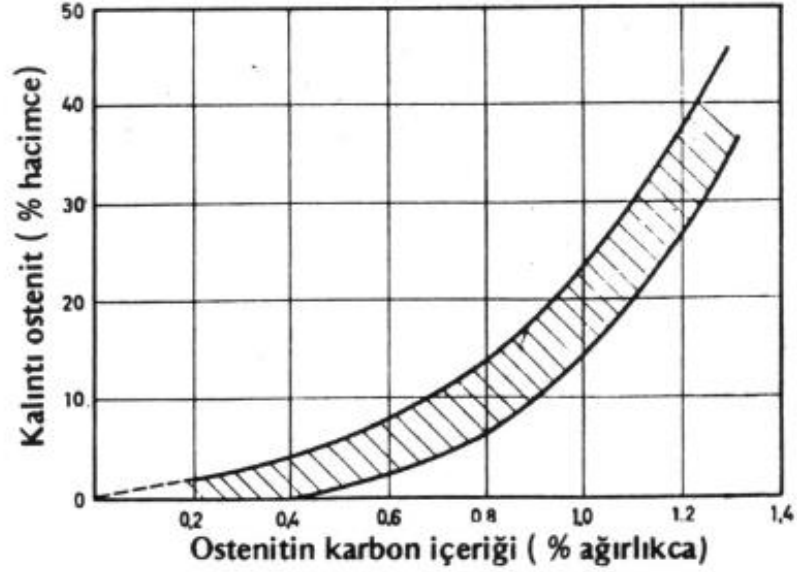


Şekil 4.15 Alaşımısız bir çelikte östenitik karbon (östenit içerisinde çözülmüş) miktarının Ms ve Mf sıcaklığına etkisi.

4.2.3.3. Kalıntı Östenit

Bir ötektoid çelikte östenitin büyük bir miktarı oda sıcaklığına yapılan soğutma esnasında martenzite dönüşmektedir. Soğutma sonunda östenitin dönüşmeden yapıda kalan kısmı kalıntı östenit olarak adlandırılmaktadır. Şekil 4.16'da bir alaşımısız çelikte karbon miktarı ile kalıntı östenit miktarının değişimi görülmektedir. Eğer sıcaklık oda sıcaklığından daha da çok azaltılırsa östenitin martenzite dönüşümü devam edecektir [48].

4.3. TEMPERLEME



Şekil 4.16. Östenit içerisinde çözülmüş (erimiş) halde bulunan karbon miktarına bağlı olarak kalıntı östenitin değişimi.

Bilindiği gibi su verilmiş çeliğin içyapısı martenzit ve kalıcı östenittir. Çelik yapısını denge durumuna getirmek söz konusu fazların parçalanması (dönüşümü) gerekmektedir. Temperleme işleminde ısıtma sıcaklığına göre martenzit ve kalıcı östenit sıcaklık arttıkça daha denge durumundaki iç yapılara dönüşür.

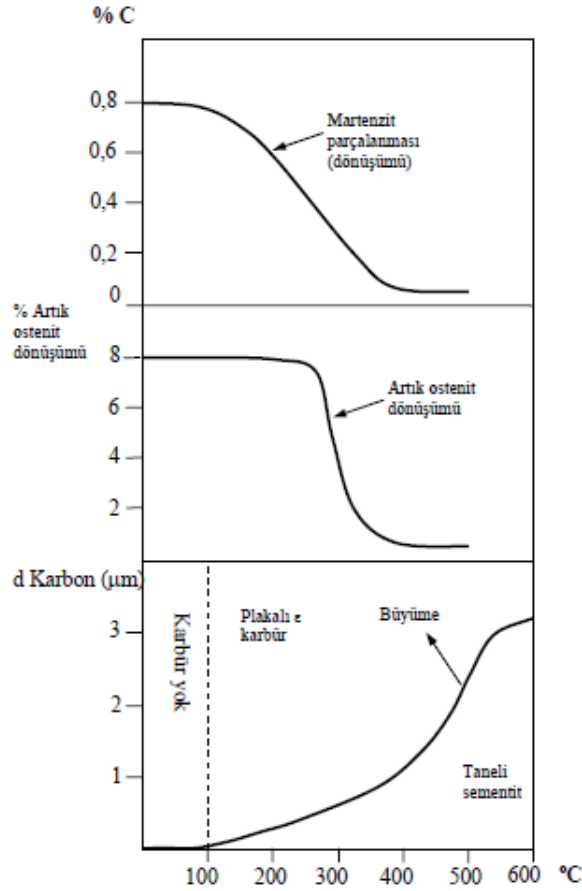
Martenzitin temperlenmesi dört aşama ile olur:

1. Karbon Segregasyonu

100 °C civarında difüzyon aktifliği oldukça düşük olduğundan C atomları en yakın mesafede olan kristal kafes hata noktalarına yerleşir. Böyle bir durum esasen ancak X ışınlarıyla tespit edilir. Martenzitin parçalanmasının ilk aşamasında (100-150 °C) matrisin aşırı doymuş olan katı eriyiğinde martenzitin belirli bölgelerinde ϵ -karbür meydana gelir ve bu karbür etrafındaki karbon miktarı azalmaktadır.

(150-350 °C) civarında martenzitten ϵ -karbürler ayrılır ve martenzit karbür oranına göre azalır. Bu sıcaklıklarda alaşım elementlerinin atomları ise difüzyon yapamaz. Sonuçta 350 °C'nun altında elde edilmiş yapıya temperlenmiş martenzit denilir. Temperlenmiş martenzitin su verilmiş martenzitten farkı tetragonallığın ve iç

gerilimlerin farklı olması, yüksek sertlik ve düşük plastiktir. Meydana gelmiş olan karbürlerin boyutları 350 °C de çok küçük ve dolayısıyla bu sıcaklıklarda matristedeki karbon miktarı denge durumundakine C miktarına göre daha yüksektir. Bu sıcaklıklarda matriste bulunan aşırı karbon karbürlere tamamıyla toplanmamıştır [50]. Şekil 4.17’de temperleme sıcaklığına göre matristedeki C miktarının değişimi kalıcı östenitin ortadan kaldırılması ve meydana gelmiş olan karbür boyutlarının değişmesi (büyümesi) sayısal ifadeyle gösterilmektedir.



Şekil 4.17. Temperleme sıcaklığına göre matristedeki karbon miktarının değişimi.

2.Temperlemede Sekonder Dönüşüm

Artık östenitin parçalanması; daima su verilmiş çelikte bulunan kalıcı östenit temperleme esnasında 200 °C-300 °C den itibaren dönüşüme başlamaktadır ve bu dönüşüm sonuna kadar devam etmektedir. Diğer taraftan kalıntı östenitin parçalanması

çelik malzemenin eksi dereceli sıcaklıklara soğutulmasıyla da ortadan kaldırılmaktadır.

3.Temperlemede Üçüncü Dönüşüm (İç Gerilimlerin Ortadan Kaldırılması)

Bu dönüşüm 350-400 °C arasında gerçekleşmektedir ve kimyasal bileşimi belirsiz olan ϵ -karbür net olarak demir karbüre dönüşmektedir. Bunun dışında karbürler biraz büyür ve küresel şekline yakınlaşmaktadır.

Sonuçta 400 °C yakınlarında meydana gelmiş olan içyapı temperlenmiş troostit denir. Yani 400 °C'e yakın temper martenzit temperlenmiş troostite dönüşmektedir.

4.Temperlemede Dördüncü Dönüşüm (Karbürlerin İrileşmesi)

Bu dönüşüm 500-600 °C'de gerçekleşmektedir. Burada tüm olarak iç gerilmeler ve tetragonallık ortadan kalkmaktadır.

Dolayısıyla ϵ -karbürler büyüyerek taneli Fe_3C 'i oluştururlar ve taneli Fe_3C kendi sırasında 650-680 °C da irileşerek boyutları $3 \mu m$ dan yüksek olur. Ancak küreselleşme ve irileşme işlemleri sonucunda karbür (Fe_3C) parçacıkları ve matris arasındaki kovalent bağ kaybolmaktadır.

Sonuç olarak 600-680 °C (Ac_1 in altındaki sıcaklıklarda) matriste C miktarı azalarak normal durum denge durumuna dönüşmektedir. Aşırı doymuşluk ortadan kalkmaktadır. Çeliğin iç yapısı yumuşak ferrit matrisli tane yapısı sert sementit parçacıklarından ibaret olmaktadır. 600-680°C elde edilen iç yapıya temperlenmiş sorbit denilmektedir. Böylelikle su verilmiş çelikte martenzit temperlenerek sorbit ve troostite dönüşmektedir [49].

Yumuşak matris ve onun içerisinde bulunan sert parçacıklar dış kuvvet etkisinden dislokasyonların hareketini engelleme açısından troostit, sorbit ve perlit birbirinden farklıdır.

Sert parçacıklar sık yerleşmişse dislokasyonların bu parçacıkları keserek ilerlemesi zor olur. Dolayısıyla malzeme yüksek dayanıma sahip olur.

Eğer yumuşak matristeki bu parçacıklar kaba ve seyrek yerleşmiş olursa dislokasyonlar parçaların arasından eğilerek geçmekte ve bu tür parçaların dayanımı da düşük olmaktadır. İlk durumda plastiklik düşük, ikinci durumda ise yüksek olmaktadır [50].

BÖLÜM 5

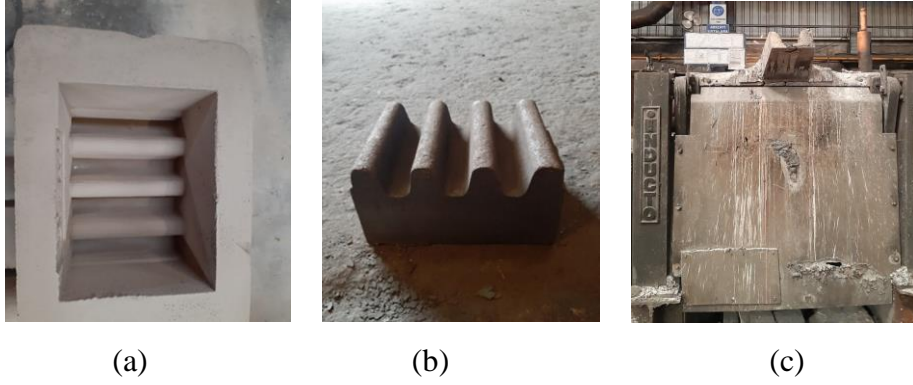
DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. DÜŞÜK KARBONLU DÜŞÜK ALAŞIMLI ÇELİK MALZEMELER

Bu çalışmada, çelik sektöründe önemli yere sahip olan düşük karbonlu düşük alaşımlı çeliklerin mekanik özelliklerine ısıtılma işleminin etkisi incelenmiştir. Düşük alaşımlı çelikler kuma döküm yöntemiyle üretilmiş olup bu yöntemin gerektirdiği zaman, sıcaklık parametreleri kullanılmıştır. Ürünlere 4 farklı ısıtılma işlem parametresi uygulanmıştır. Bu işlemler sonrasında mikroyapı ve mekanik testler ile alaşımlamanın ve ısıtılma işleminin sağladığı katkıları mekanik özellikler yönünden değerlendirilmiştir. Mekanik testler olarak; sertlik testi, çekme testi ve çentik darbe testleri uygulanmıştır.

5.2. ALAŞIMLAMA VE DÖKÜM İŞLEMİ

Bu çalışmada Çizelge 5.1’de belirtilen A ve B bileşimine sahip düşük alaşımlı çelikler Yahyaoğlu Çelik Döküm Fabrikası’nda kuma döküm yöntemiyle üretilmiştir. Ergitme 1 Ton kapasiteli Şekil 5.1’de verilen Inductotherm marka indüksiyon ocağında yapılmıştır. Döküm sıcaklık parametresi olarak 1575 °C tercih edilmiştir. Döküm bozma süresi kesit kalınlığına göre 18 saat tercih edilmiştir. Numuneler mekanik testlerin efektif bir şekilde yapılabilmesi için aşağıda belirtilen (Şekil 5.1) formda dökülmüştür.



Şekil 5.1. (a) Döküm kalıbı, (b) dökümü tamamlanan numuneler, (c) indüksiyon ocağı.

5.3. ISIL İŞLEMLER

Isıl işlem parametreleri iki aşamadan oluşmaktadır. Bunlardan birincisi geleneksel fırında tavlama ve farklı ortamlarda soğutma ile ikincisi ise son yıllarda yenilikçi ısı işlem olarak adlandırılan hızlandırılmış soğutma ortamı olarak tanımlanmaktadır.

5.3.1 Geleneksel Isıl İşlemler

Isıl işlemler 870°C de İZOREF marka kamara tipi indirekt ısıtmalı fırınında (Şekil 5.2) yapılmıştır. Soğutma işlemleri dört farklı şekilde yapılmıştır;

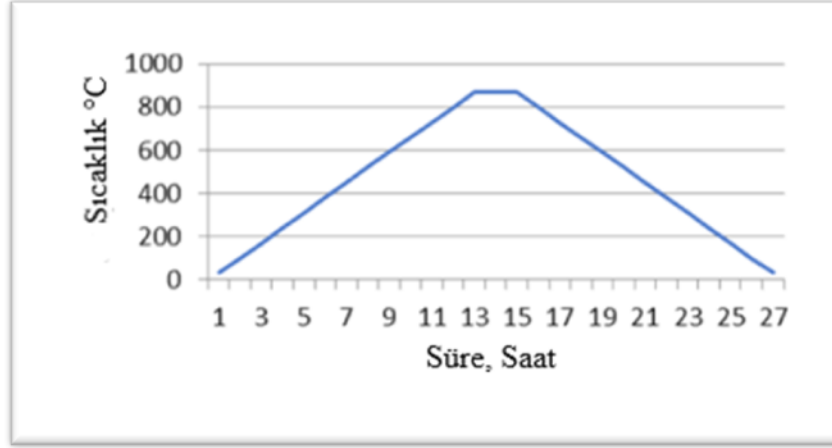
1. Normalizasyon ve fırında kontrollü soğutma (NRM+FRS)
2. Normalizasyon, havada soğutma, temperleme ve fırında kontrollü soğutma (NRM+HVS+TMP+FRS)
3. Normalizasyon, çift su verme, temperleme ve fırında kontrollü soğutma (NRM+FRS+ÇSV+TMP+FRS)



Şekil 5.2 İZOREF marka kamara indirekt ısıtmalı fırın.

5.3.1.1. Normalizasyon ve Fırında Kontrollü Soğutma

Numuneler oda sıcaklığından saatte 70 °C artırılarak 870 °C östenitleme sıcaklığına kadar ısıtılmıştır ve bu sıcaklıkta 2 saat bekletilmiştir. Sonrasında fırın ortamında soğumaya bırakılmıştır. Bu ısıl işleme ait sıcaklık-zaman grafiği Şekil 5.3'te verilmiştir.



Şekil 5.3 Normalizasyon ve fırında kontrollü soğutma için sıcaklık-zaman grafiği.

5.3.1.2 Normalizasyon, Havada Soğutma, Temperleme ve Fırında Kontrollü Soğutma

Numuneler (Şekil 5.4) 30 °C'den saatte 70 °C hızda 870 °C'ye ısıtıldı ve bu sıcaklıkta 2 saat bekletilerek sonrasında havaya alınmıştır. Oda sıcaklığında soğuması beklendi ve oda sıcaklığına kadar soğuyan numuneler 30 °C'den saatte 70 °C hızda 670 °C'ye ısıtılarak bu sıcaklıkta 6 saat temperlenmiş ve kontrollü bir şekilde soğumaya bırakılmıştır.

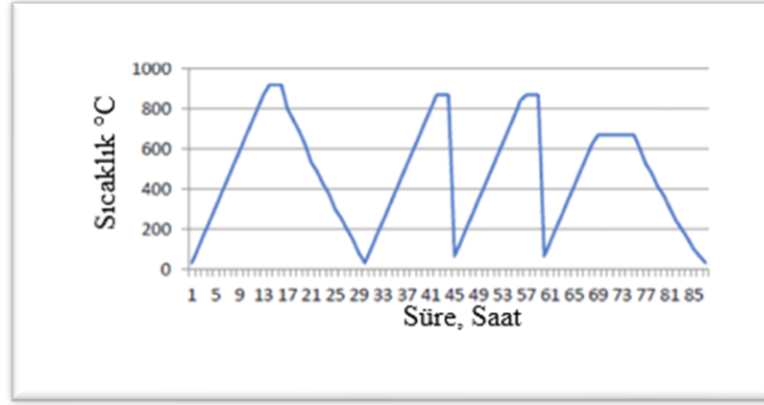


Şekil 5.4 Normalizasyon, havada soğutma, temperleme ve fırında kontrollü soğutma için sıcaklık-zaman grafiği.

5.3.1.3. Normalizasyon, Çift Su Verme, Temperleme ve Fırında Kontrollü Soğutma

Normalize ısıl işlemi için; ilk aşamada, iki farklı bileşime sahip düşük alaşımlı çelik numuneler oda sıcaklığından saatte 70 °C hızda 870 °C' ye ısıtıldı, bu sıcaklıkta 2 saat östenitleştirilerek oda sıcaklığına kadar fırında soğutulmuştur.

İkinci aşamada, çift su verme ısıl işlemi için; numuneler oda sıcaklığından saatte 70 °C hızda 870°C'ye ısıtıldı ve oda sıcaklığına soğuyuncaya kadar tuzlu su ortamında su verme yapılmıştır. Ardından bu işlem bir defa daha tekrarlanmıştır. Temperleme için; numuneler oda sıcaklığından saatte 70 °C. hızda 670 °C' ye ısıtıldı ve bu sıcaklıkta 6 saat temperlenerek kontrollü bir şekilde soğumaya bırakılmıştır. Bu ısıl işleme ait sıcaklık-zaman grafiği Şekil 5.5'te verilmiştir.



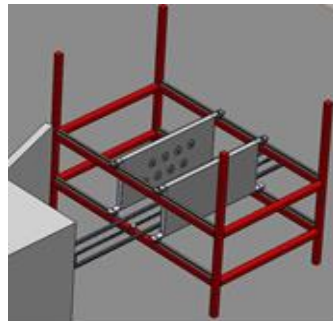
Şekil 5.5 Normalizasyon, Çift su verme, temperleme ve fırında kontrollü soğutma için sıcaklık-zaman grafiği.

5.3.2. Yenilikçi Isıl İşlem

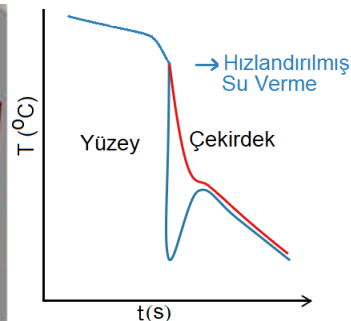
Tokluk arttırılmak istendiğinde çeliklerde tane büyüklüğünü küçük tutmak ve iğnemsî bir yapı oluşturmak için, tavlama işlemini izleyen hava+su karışımı ile numunenin aniden soğutulması, hızlandırılmış soğutma olarak adlandırılmaktadır.

5.3.2.1 Hızlandırılmış Soğutma ve Kendi Kendine Temperleme (HS-KT)

Hızlandırılmış soğutma (Şekil 5.6) işlemi için numuneler 900 °C'ye önceden ısıtılmış fırına konuldu ve 2 saat fırında bekletilmiştir. Ardından bekleme süresini tamamlamış olan numuneler fırından çıkartılarak, 12 barlık hava basıncı ile hızlandırılmış soğutmayı 20-40-60 saniye soğutma süreleri için uygulanmıştır.



(a)



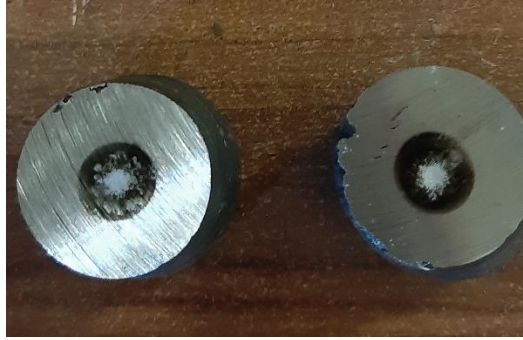
(b)



Şekil 5.6 (a) Hızlandırılmış soğutma düzeneği 3D çizimi, (b) literatür soğutma grafiği, (c) fırında 2 saat bekletilmiş numune, (d) hızlandırılmış soğutma uygulanmış numune.

5.4. KİMYASAL BİLEŞİM TESPİTİ

Malzemelerin spektral analizi için ocaktan alınan numuneler (Şekil 5.7) taşlanmış Oxford marka spektrometre cihazında (Şekil 5.8) YAHYAOĞLU ÇELİK DÖKÜM A.Ş' de yapılmış olup Çizelge 5.1'de incelenen çeliklerin kimyasal bileşimleri verilmiştir.



Şekil 5.7. Spektral analiz numuneleri.



Şekil 5.8. Oxford marka spektrometre cihazı

Çizelge 5.1. Mikroalaşımli malzemelerin kimyasal bileşimi.

Bileşim-A									
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Cu
0,182	0,5	0,892	0,0127	0,0087	0,358	0,307	0,0607	0,0314	0,089
Bileşim-B									
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Cu
0,117	0,488	0,923	0,0124	0,0076	0,174	0,14	0,116	0,0025	0,04

5.5. MİKRO YAPI İNCELEMELERİ

Üretilen malzemelerin döküm ve ısıl işlemlerden sonra mikroyapı analizi için çıkarılan numuneler 80,120, 400, 600, 800, 1000, 1200 ve 2500 mesh'lik zımparalarla zımparalandıktan sonra alüminayla parlatılmıştır. Daha sonra %3'lük nital çözeltisi ile dağlanmışlardır. Mikroyapı analizleri NİKON marka optik mikroskop ve EDS analizi yapabilen Zeiss Ultra Plus Taramalı (SEM) mikroskobu SEM (Şekil 5.9) cihazında gerçekleştirilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 5.9. (a) Nikon marka optik mikroskop, (b) Zeiss ultra plus SEM

5.6.XRD ANALİZİ


İncelenen çeliklerde oluşan faz ve karbürlerin tipini belirlemek için Rigaku Ultime IV cihazında (Şekil 5.10) XRD analizi gerçekleştirilmiştir. XRD analizi sırasında $K\alpha$ ışınması kullanan Cu tüp içinde 40 kV gerilim, 40 mA akım altında 0.02 adım genişliğinde 30-150 aralığında 3,5 o/dakika hızında ölçüm gerçekleştirilmiştir.



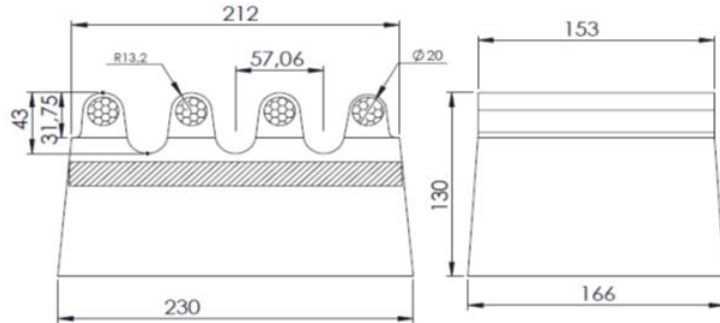
Şekil 5.10. Rigaku ultimate IV marka XRD cihazı.

5.7. ÇEKME TESTİ

Çekme testi (Şekil 5.13) 35 TON / 350kN kapasiteli, TS EN İSO 7500-1, ASTM E4 10002-2, BS 1610 DIN51221'e göre CLASS 1 / 05 hassasiyetli cihazda yapılmıştır.

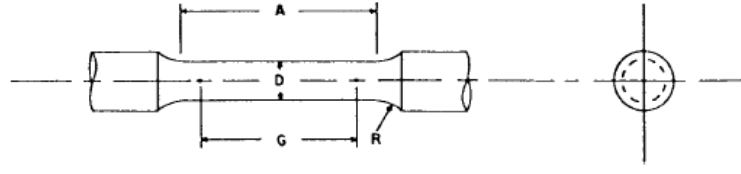
Test deney bloğu, aşağıdaki Şekil 5.11'de şematik olarak gösterildiği gibi “” çıkarılmıştır. Numunelere Telmika model sıcaklık kontrol ünitesi 290x290x450 mm³ hacme sahip bir kül fırınında östenitlendi, ardından numunelere İZOREF marka kamara tipi ısıl işlem fırınında yukarıda belirtilen 3 farklı ısıl işlem parametreleri uygulanmıştır.

Numunelerde TS EN ISO 6892-1 standartlarına uygun bir biçimde Şekil 5.12 'de belirtildiği gibi D-bo: 12 +/- 0,05 mm, G-Lo 60 mm, A- Lc: Min.66 mm olacak şekilde işlenmiştir.



ÇEKME NUMUNESİ

Şekil 5.11. Numunenin döküm formu.



Şekil 5.12 .TS EN ISO 6892-1 'e göre çekme test numune hazırlama şekli.



(a)



(b)

Şekil 5.13. (a) Hidrolik universal çekme test cihazı (utm100) ve (b) çekme numunesi.

5.8. SERTLİK TESTİ

Numune yüzeylerinde gerçekleştirilen sertlik ölçümleri standart deney koşullarında bilyenin çapı 10 mm, uygulanan yük miktarı 3000 kg, yükün uygulanma süresi ise 10-15 sn. olarak uygulanmıştır. Şekil 5.14'te görülen sertlik ölçüm cihazı ile Yahyaoğlu Çelik Döküm A.Ş' de yapılmıştır. En az 3 ölçüm yapılarak ortalama sertlikleri alınmıştır. Yük, malzemeye hassas olarak yavaş yavaş artacak şekilde uygulandı ve darbeli yüklemeleri en aza indirilerek ölçüm yapılmıştır.

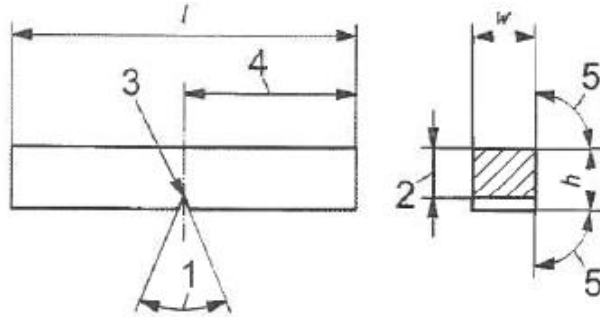


Şekil 5.14. Digirock sertlik ölçüm cihazı.

5.9. ÇENTİK- DARBE TESTİ

Malzemelerin dinamik zorlamalara karşı göstereceği direnci tayin edebilmek adına darbe testleri TS EN ISO 148-1 standardına göre Şekil 5.15 'te gösterildiği gibi hazırlanmış ve Karabük Üniversitesi Laboratuvarında bulunan Zwick marka darbe cihazında oda sıcaklığında ve -50°C sıcaklıkta yapılmıştır (Şekil 5.16). Isıl işlemlerden sonra standarda göre hazırlanmış olan darbe numuneleri 450 J kapasiteli darbe test cihazında darbe dayanımı incelenerek veriler kaydedilmiştir. Darbe testlerinin yapıldığı ortamın sıcaklığı 25°C nem ise %48 olarak belirlenmiştir.

-50°C 'de çentikli kısmın altında kalan alan test cihazından okunan enerji değerine oranlanıp kJ/m^2 cinsinden darbeye karşı gösterdikleri direnç ölçülmüştür.

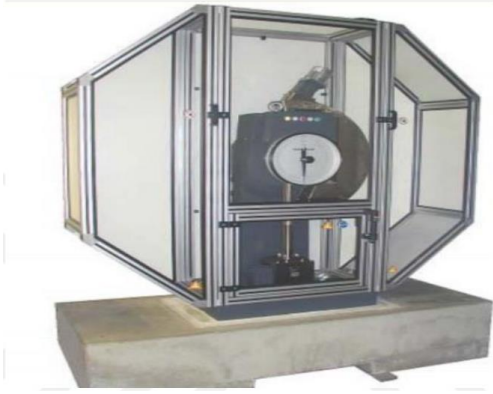


(a)

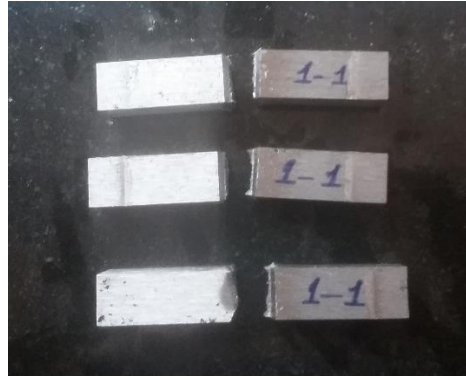


(b)

Şekil 5.15. (a) TS EN ISO 148-1 Standart şekli , (b) çentik numunesi.



(a)



(b)

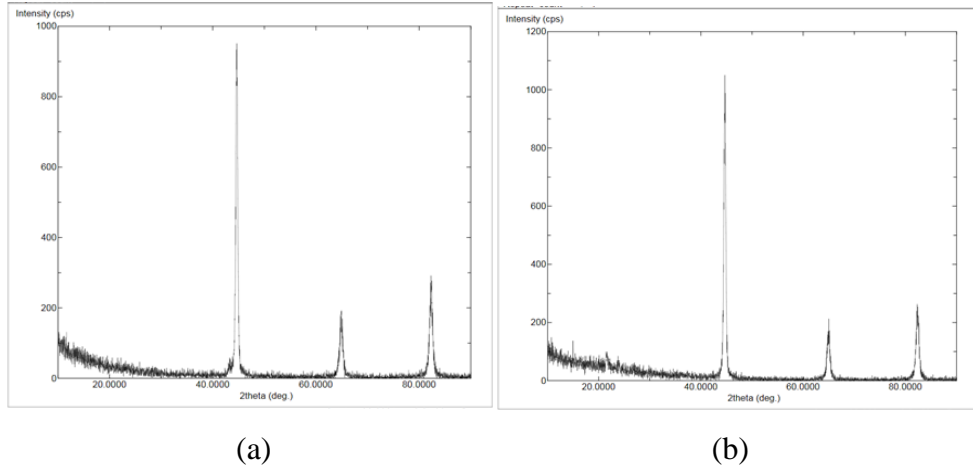
Şekil 5.16. (a) Zwick/Roell RKP450 sarkaç tipi darbe test cihazı, (b) çentik testi yapılmış numuneler

BÖLÜM 6

DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

6.1. XRD SONUÇLARI

İncelenen bileşim A ve bileşim B çeliklerine ait XRD grafikleri Şekil 6.1 'de verilmiştir. Şekil 6.1' den görüldüğü gibi Alfa demire ait x ışını pikleri yer almakta olup mikro alaşım elementlerine ait herhangi bir intermetalik oluşumu tespit edilmemiştir.



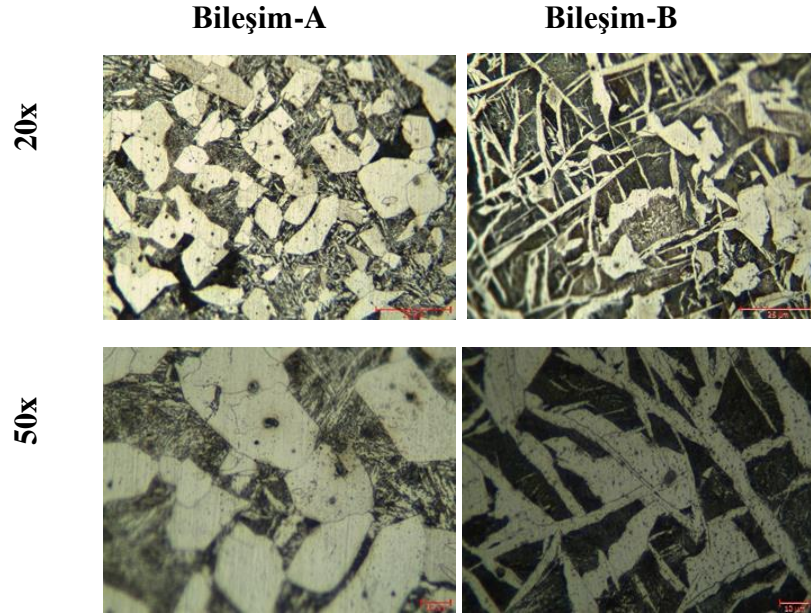
Şekil 6.1. Bileşim-A (a) ve Bileşimi-B (b) çelik malzemelerinin XRD görüntüleri.

6.2. MİKRO YAPI SONUÇLARI

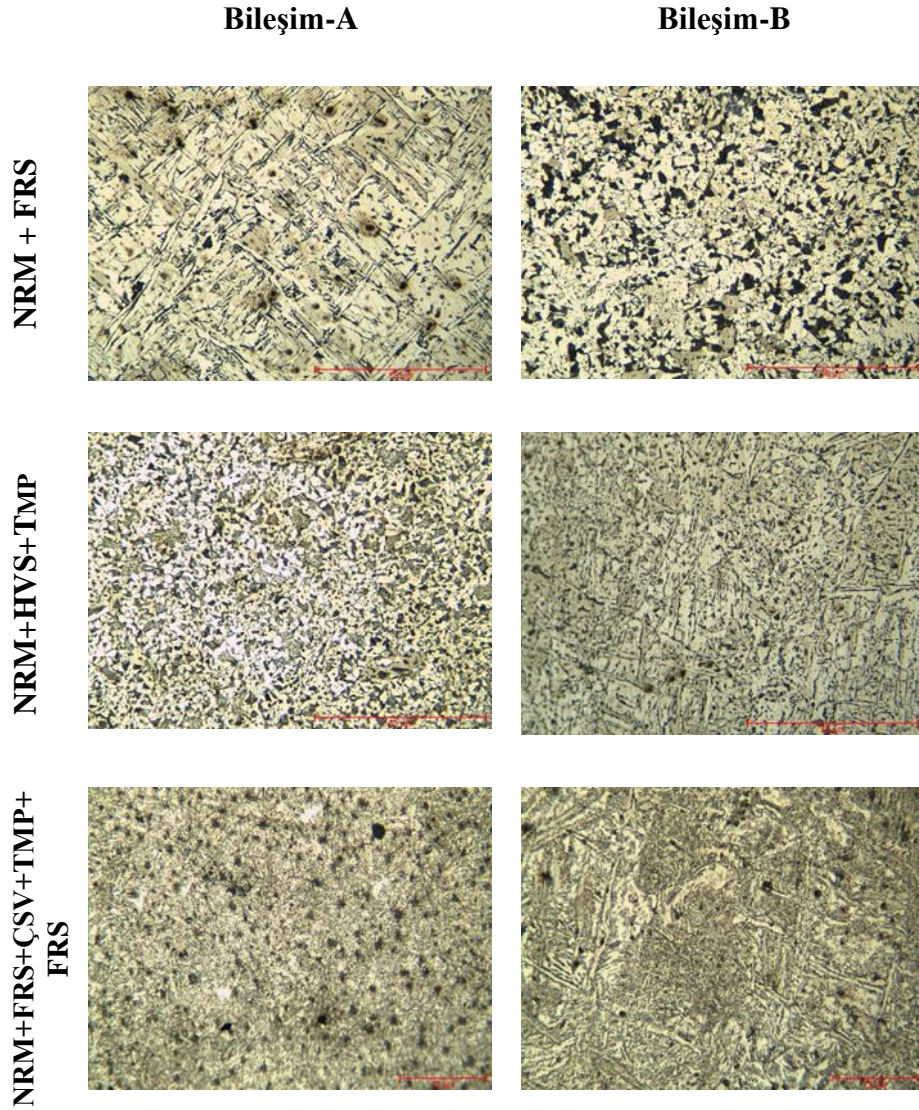
6.2.1. Optik Mikroskop İncelemeleri

Bu çalışmada incelenen iki farklı bileşime sahip (Bileşim-A ve Bileşim-B) çelik malzemelerin ısı işlemsiz döküm haliyle mikro yapı sonuçları Şekil 6.2'de verilmiştir. Farklı ısı işlemler sonucu elde edilen mikroyapı sonuçları Şekil 6.3'te verilmiştir. Mikro alaşımlı Bileşim-A çeliğinin NRM + FRS ısı işlemleri sonrası ferrit miktarının fazla görülmesi krom ve molibdenin ferrit yapıcı özelliklerinden kaynaklanmaktadır.

Bunun yanı sıra Vanadyum ise hem ferrit yapıcı hem de ferrit tane sınırlarında çökelerek mekanik özellikler üzerine olumlu etki bıraktığı bilinmektedir. NRM+HVS+TMP ısıt işleme uygulanmış alaşımların her birinde hem ferrit hem de perlit tanelerinin NRM+FRS ye kıyasla daha ince yapıtlı olduğu görölmüştür. Çift su verme işleminin yapıldığı NRM+FRS+ÇSV+TMP+FRS kodlu ısıt işleme parametresinde Bileşim-A'ya ait mikroyapı ince beynit, ferrit ve martenzitik görünürken Bileşim-B'ye ait mikroyapı kaba beynit, iğnemsı ferrit ve az miktarda da martenzitik yapı içermektedir. Ayrıca incelenen mikroyapılarda temperleme ısıt işleme sonrası yarı küresel görünümünde karbürler ((Fe, Cr, V)₃C) görünmektedir.



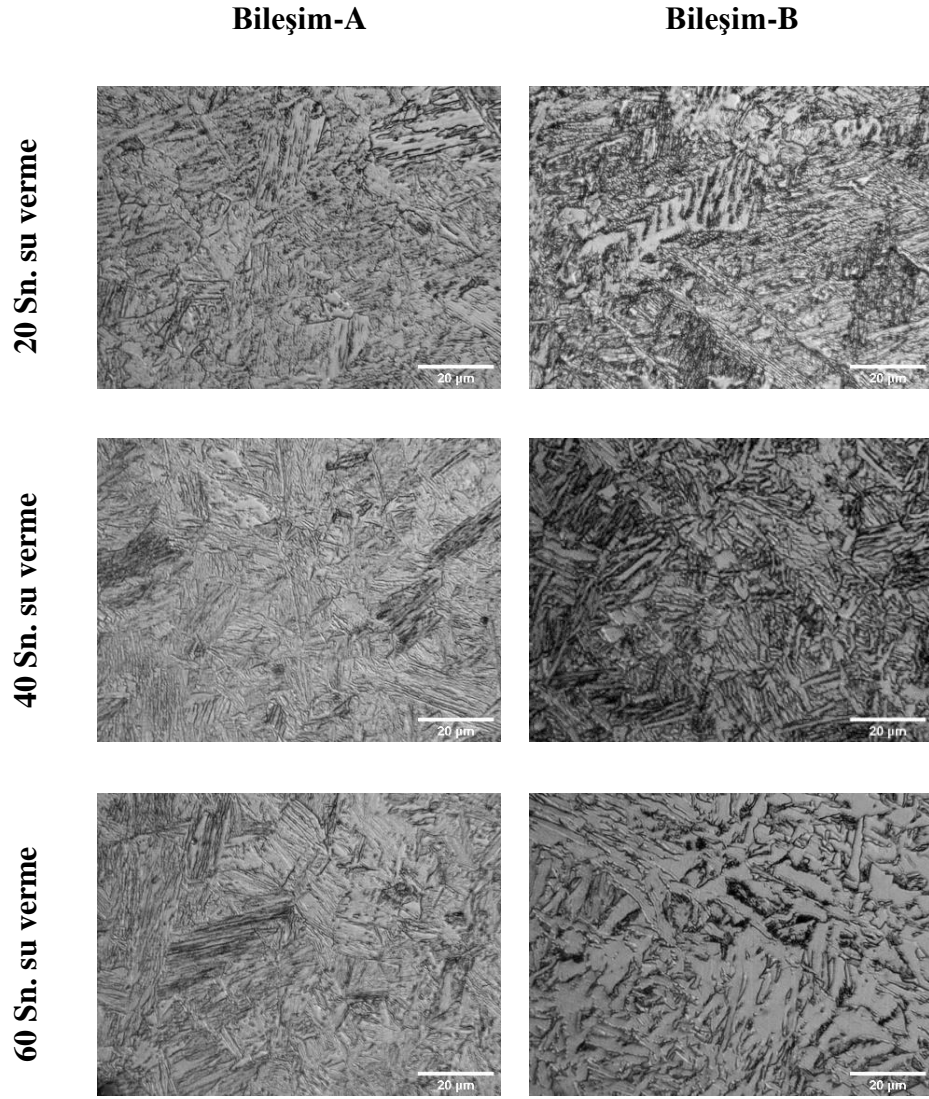
Şekil 6.2 Bileşim-A ve Bileşimi-B çelik malzemelerinin ısıt işlemsiz mikroyapı görüntüleri.



Şekil 6.3 Bileşim-A ve Bileşimi-B çelik malzemelerinin geleneksel ısı işlemleri sonucu elde edilen mikroyapı görüntüleri.

Şekil 6.4 'de Yenilikçi ısı işlem yöntemi olan hızlandırılmış soğutma ve kendi kendini temperleme işlemine tabi tutulmuş Bileşim A ve B çelik malzemelerine ait mikro yapı görüntüleri verilmektedir. Hızlandırılmış soğutma işleminde mikro yapının açılma ferrit +beynit+çok az da olsa martenzit bileşenlerinden oluştuğu ve hava+ su verme süresinin artması ile de daha fazla yapıda incelme meydana geldiği görülmüştür.

Mikro alaşımlı Bileşim A çelik malzemesinde belirli bir soğutma koşulu için diğer bileşime kıyasla yapı daha incedir.



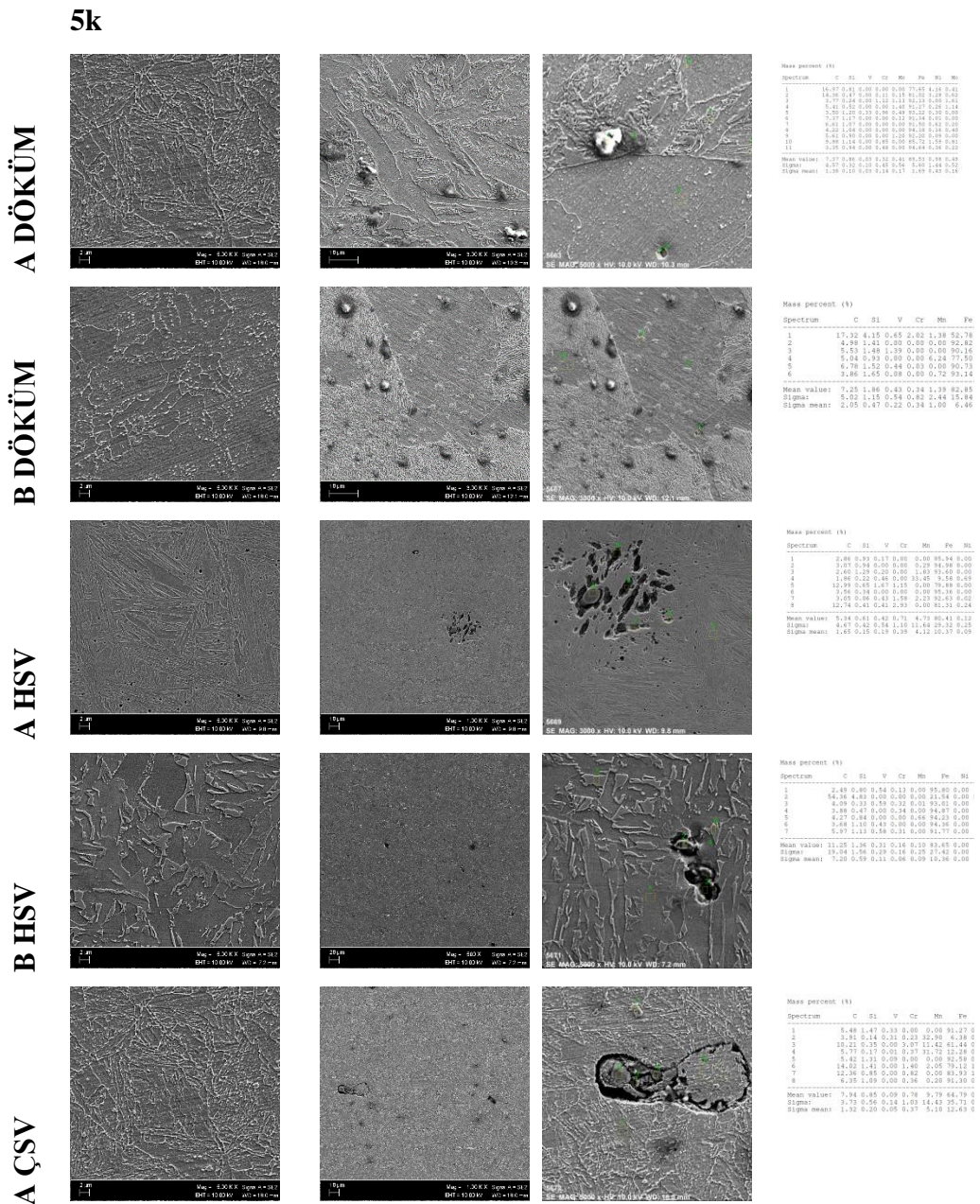
Şekil 6.4 Bileşim-A ve Bileşimi-B çelik malzemelerinin yenilikçi ısıl işlemler sonucu elde edilen mikroyapı görüntüleri.

6.2.2 Sem İncelemeleri

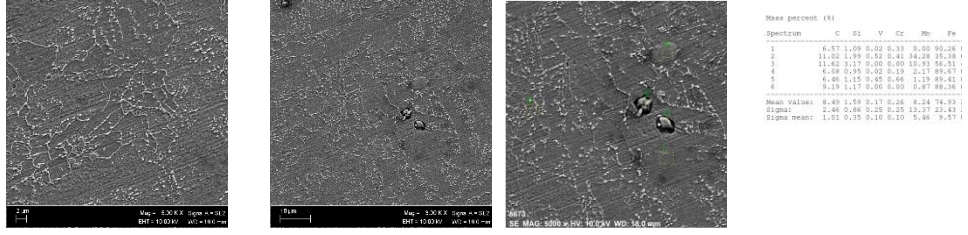
Genel olarak HS-KT ve döküm hallerinde oluşan ince yapının daha iyi anlaşılabilmesi için SEM incelemeleri yürütülmüştür. Bu incelemelerde %3 Nital ile dağlama sonrası mikroyapı görüntülemesi gerçekleştirilmiştir.

HS-KT uygulanmış numunelerde 900 °C’de yenilikçi ısıl işlem sonrası numunelere ait SEM görüntüleri Şekil 6.5’te verilmektedir. HS-KT numuneleri için elde edilen

SEM görüntülerine genel olarak bakıldığında uygulanan ısıtma işlemi başarılı olduğu söylenebilir. Bunun sebebi uygulanan su verme sonrasında numunelerin belirli bir sıcaklığa aniden düşüp sonrasında kendi kendini temperleyerek istenilen fazın oluşturulmuş olmasıdır. Numunelere ait SEM görüntülerinde hızlandırılmış soğutma işlemine tabi tutulmuş numunelerden elde edilen içyapı görüntüsünde diğer ısıtma işlem parametrelerine kıyasla oldukça ince yapılı martenzit+beynit+asiküler ferrit fazlarının oluştuğu gözlemlenmiştir.



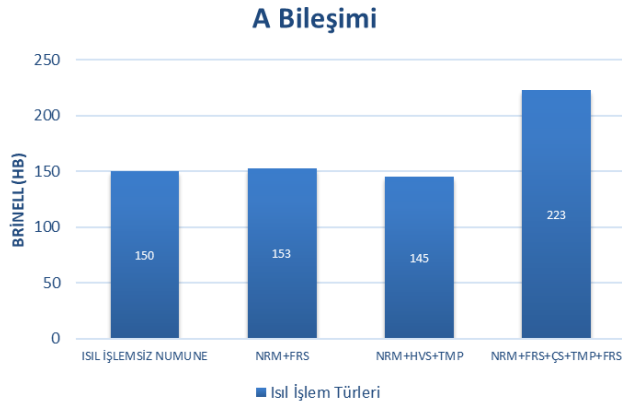
B ÇSV



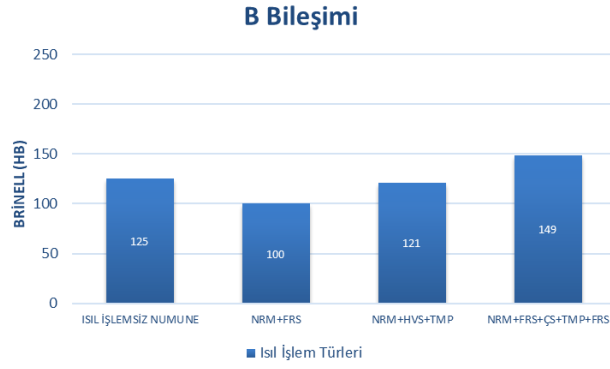
Şekil 6.5 Bileşim-A (a) ve Bileşimi-B (b) çelik malzemelerinin yenilikçi ısıl işlemler sonucu elde edilen SEM görüntüleri.

6.3. SERTLİK TESTİ

Bu çalışmada incelenen sertlik değerleri Şekil 6.6 ve Şekil 6.7’de verilmiştir. Geleneksel ısıl işlem yapılmış çeliklerin Sertlik testleri sonucundan mikro alaşım elementlerinin ilavesiyle Bileşim-A’nın sertliğinin çok daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Bileşim-B sertliğine kıyasla Bileşim-A’nın sertliği hemen hemen %40 oranında artış göstermiştir. Isıl işlem parametrelerinde ise çifte su vermenin sertlik değerindeki etkisi diğer ısıl işlem parametrelerine göre daha yüksek olmuştur.



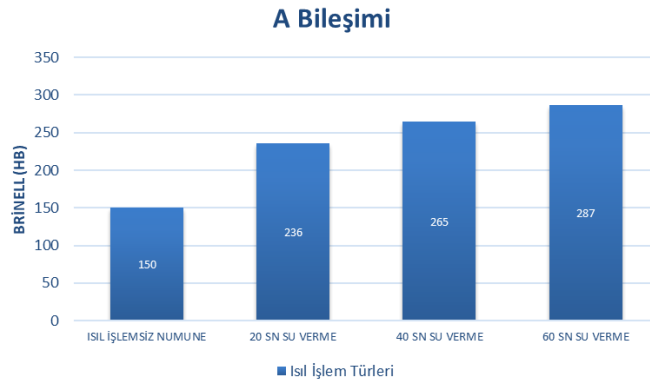
(a)



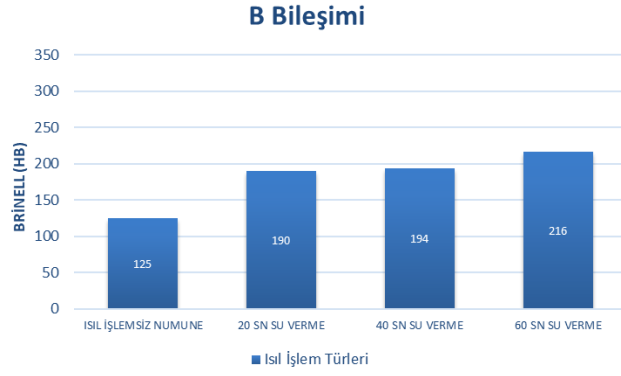
(b)

Şekil 6.6. Bileşim-A (a) ve Bileşim-B (b) geleneksel ısıl işlem uygulanmış çelik malzemelerinin Brinell (HB) sertlik testi sonuçları.

Yapılan çalışmalarda, mikro alaşım ilavesi sonucunda (Bileşim-A) ısıl işlem uygulanmamış numunede +25 HB sertlik artışı olduğu görülmektedir. Bunun yanında yenilikçi ısıl işlem uygulanmış (hızlandırılmış soğutma) numunelerde 20 sn. su verme süresine kıyasla 40 sn ve 60 sn. su verme sürelerinin en iyi sonucu verdiği görülmektedir. Yenilikçi ısıl işlem uygulanmış mikro alaşımlı Bileşim-A ve mikro alaşımsız Bileşim-B numunelerinde beynitik yapıyı oluşturmak için su verme süresinin uzatılması gerektiği öğrenilmiştir. Bu sebeple elde edilen sertlik değerleri ve mikroyapı sonuçları birbirleri ile tutarlıdır.



(a)



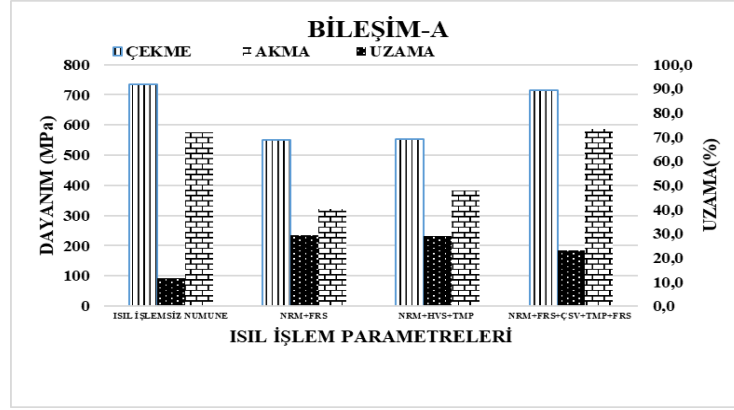
(b)

Şekil 6.7. Bileşim-A (a) ve Bileşim-B (b) yenilikçi ısıl işlem uygulanmış çelik malzemelerinin Brinell (HB) sertlik testi sonuçları.

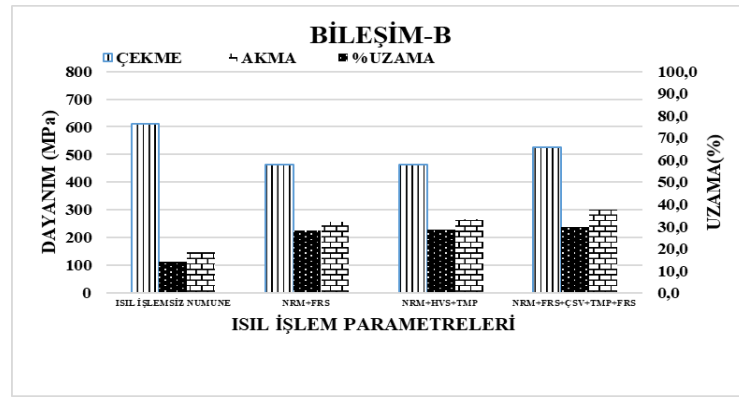
6.4. ÇEKME TESTİ

Bileşim-A ve Bileşim-B malzemelerine ait çekme test sonuçları Şekil 6.8 'de verilmiştir. Bileşim-A'nın çekme, akma ve uzama değerleri göz önüne alındığında ilk iki ısıl işlem parametresi olan NRM+FRS ve NRM+HVS+TMP+FRS kodlu koşullarda mukavemet değerlerin hemen hemen değişmediği, NRM+FRS+ÇSV+TMP+FRS ısıl işlem parametresinde ise en yüksek mukavemet artışının olduğu görülmektedir.

Bileşim-B'de ise ısıl işlem parametresiyle değişen mukavemet değerleri, Bileşim-A'nın mukavemet değerlerinden düşük olmakla birlikte, yaklaşık birbirlerine eşittir. Özellikle mikro alaşım ilaveli Bileşim-A'daki çeliklerde, çifte su verme içeren NRM+FRS+ÇSV+TMP+FRS koşulda en yüksek mukavemet değerlerine ulaşılmıştır. Dayanım ve sertlikteki iyileşmeler, düşük alaşımlı çeliklerde bulunan Cr, Mo, V'un metal karbür oluşturmaya ve vanadyumun çökmesine dayandırılabilir.

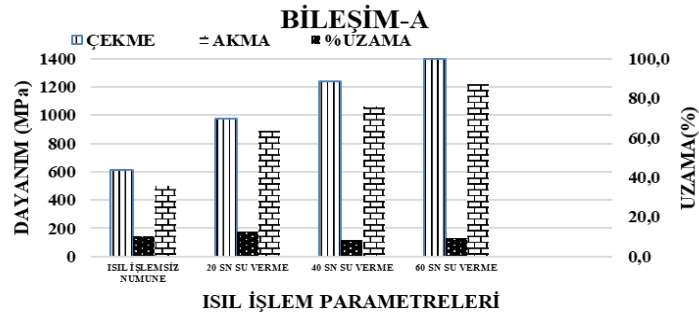


(a)

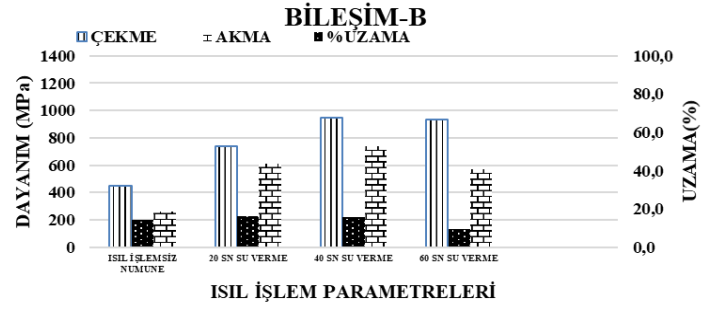


(b)

Şekil 6.8. Bileşim-A (a) ve Bileşim-B (b) geleneksel ısıl işlem uygulanmış çelik malzemelerinin akma, çekme ve uzama değerleri.



(a)



(b)

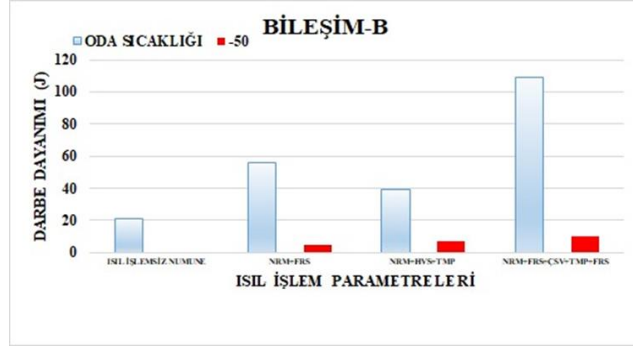
Şekil 6.9. Bileşim-A (a) ve Bileşim-B (b) yenilikçi ısıl işlem uygulanmış çelik malzemelerinin akma, çekme ve uzama değerleri.

Yenilikçi ısıl işlem uygulanmış numunelere bakıldığında 20 sn. su verme işleminde istenilen çekme değerindeki artışa ulaşılmamış olmasına rağmen 40 sn ve 60 sn. su verme sürelerinde hedeflenen düzeyde bir artış olduğu görülmüştür. Mikro alaşım ilaveli (Bileşim-A) numunesine 60 sn. su verme ile en yüksek mukavemet değerine ulaşıldığı görülmüştür. Bu iyileşmelerin HS-KT ısıl işlem sonucunda mikroyapıdaki iğnemsiz fazın oluşumuna ve ani soğuma sonrasında kendi kendine temperlemesine dayandırılabilir.

6.5.ÇENTİK-DARBE DENEYİ

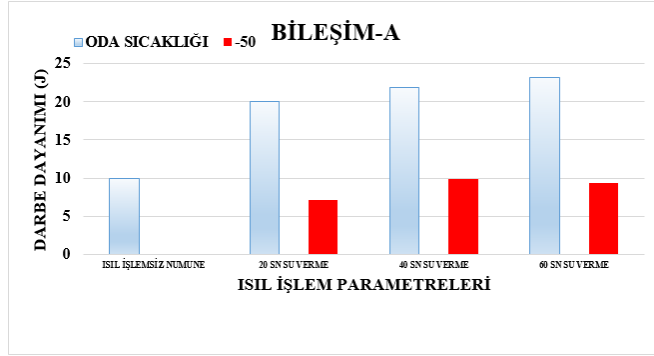


(a)

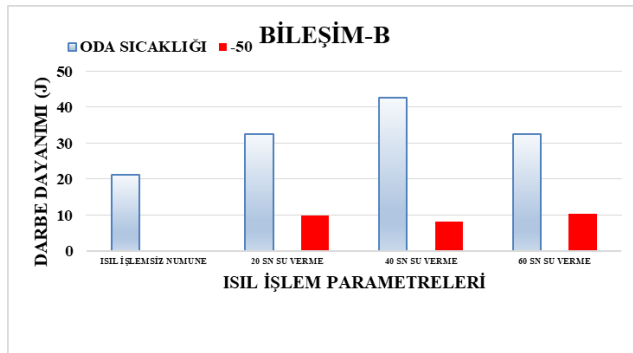


(b)

Şekil 6.10. Bileşim-A (a) ve Bileşim-B (b) geleneksel ısıl işlem uygulanmış çelik malzemelerinin çentik-darbe değerleri.



(a)



(b)

Şekil 6.11. Bileşim-A (a) ve Bileşim-B (b) yenilikçi ısıl işlem uygulanmış çelik malzemelerinin çentik-darbe değerleri.

Şekil 6.10 'da Geleneksel ısıl işlem ve Şekil 6.11 'de Yenilikçi ısıl işlem parametreleri altında ısıl işlem uygulanmış Bileşim A ve Bileşim B ye ait oda sıcaklığı ve $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ' de çentik darbe dayanımı değerleri verilmiştir. Düşük sıcaklıkta ($-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ' de) en yüksek çentik darbe dayanımına mikro alaşım ilaveli bileşim A ve CSV ısıl işlem koşulunda ulaşılmıştır. Yenilikçi ısıl işlem parametresinde ise hem Bileşim A hem Bileşim B çentik darbe dayanımları oda sıcaklığında ve düşük sıcaklıkta oldukça azalmıştır.

BÖLÜM 7

GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada; Düşük karbonlu, mikro alaşımlı Bileşim A ve mikro alaşımsız Bileşim B çelik malzemelerinin mikroyapısına, sertlik ölçümüne, çekme dayanımına ve çentik darbe direncine ısıtma işlem parametrelerinin etkisi incelenmiştir ve elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

1. Mikro alaşım ilaveli ve çifte su verme ısıtma işlemli malzemelerin mikro yapısında ince beynit, ferrit ve martenzitik yapı gözlemlenmiştir. HS-KT ısıtma işlemi uygulanmış numunelerde beklenildiği gibi ince dokulu iğnemsî ferrit + beynit oluşumu şeklinde faz değişimi gözlemlenmiştir.

2. Geleneksel ısıtma işlem parametreleri arasında en yüksek çekme mukavemeti ve sertlik değerlerine NRM+FRS+ÇSV+TMP+FRS kodlu ısıtma işlem koşulunda ulaşılmıştır. Yenilikçi ısıtma işlem parametreleri arasında 60 sn. hava+su verme süresi için Bileşim A , geleneksel ısıtma işlem yöntemlerine kıyasla, daha da yüksek mekanik özelliklerde iyileşme sergilenmiştir.

3. Geleneksel ısıtma işlem ve Yenilikçi ısıtma işlem parametreleri karşılaştırıldığında ÇSV ısıtma işlem kodlu bileşim A'nın çentik darbe test sonuçları en yüksek değeri vermiştir.

KAYNAKLAR

1. Savaşkan, T., 1999, Malzeme Bilgisi ve Muayenesi, 213-271, *Derya kitapevi*, 285 s.
2. Kınıkoğlu, N.G., 2001. Malzeme Bilimi ve Mühendisliği. *Yıldız Teknik Üniversitesi Yayını*, Mart Matbaacılık, 65, 855s. İstanbul.
3. Onaran, K., 2006. Malzeme Bilimi. Bilim Teknik Yayınevi, *Ulus Matbaası*, 383s. İstanbul.
4. Erdoğan, M., 1998. Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri Cilt 1. Nobel Yayınları, *Alemdar Ofset*, 62, 364s. Ankara.
5. Ulutan M., 2007 Ç-4140 Çeliğinin Yüzey Sertleştirme İşlemleri ve Kaplama Yöntemleri Sonrası Mekanik Davranışlarının Araştırılması, Doktora Tezi, *Osmangazi Üniversitesi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir
6. Topbaş, M. A., 1998, Çelik ve Isıl İşlem El Kitabı, *Prestij Yayıncılık Bas. Hiz.* İstanbul, 75-96 ,593 s.
7. Ashby, M. F. and Jones, D.R.H., 1998, Engineering Materials, *2nd ed., Oxford*, UK: Butterworth-Heinemann, 125-132 p., (vol. 1). 322p, (vol. 2). 392 s.
8. Savaşkan, T., 1999, Malzeme Bilgisi ve Muayenesi, 213-271, *Derya kitapevi*, 285 s.
9. Erdoğan, M., Mühendislik alaşımlarının yapı ve özellikleri, 2000, *Nobel Yayın Dağıtım Ltd Şti*, Ankara,120-153, 338 s.
10. Meyrick, Glyn, 2001, Steel class notes and lecture material for *MSE 651.01-Physical Metallurgy of Steel*, 111, 174 s.
11. Yıldırım, M.M., Doğantan, Z.S., Pakdil, M. ve Cakan, A., 2001, Mühendislik Malzemeleri -I- MKU *Mustafa Kemal Üniversitesi Yayınları*, No:9, İskenderun, 110-116, 180 s.
12. Şen, U., Bindal, C., Yılmaz, F., 1995. Çeşitli Yenileme İşlemlerine Uğratılan SAE 4140 Tank Palet Çeliklerinin Özellikleri, *6. Denizli Malzeme Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, 70-75 s.
13. Tekin, E., 1992. Mühendisler İçin Çelik Seçimi, *MMO Yayın No*, 119, 285 s.

14. Güleç, Ş., Aran, A., 1987. Malzeme Bilgisi, Cilt, 2, **TÜBİTAK Yayını**, MBEAE
15. Gülgen, İ.S., 2008. İş Makineleri Tırnakları Üretiminde Kullanılan Az Alaşımli Çeliklerin Isıl İşlemi. **Sakarya Üniversitesi**, Yüksek Lisans Tezi, 100s, Sakarya.
16. Yılmaz, F., Şen, U., 1996. Alaşımların Yapı ve Özellikleri. **Sakarya Üniversitesi**, 18, 114s. Adapazarı
17. Savaşkan, T., 1999. Malzeme Bilgisi ve Muayenesi. Derya Kitabevi, **Beta Basım**, 284s. Trabzon.
18. Erdoğan, M., 1998. **Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri Cilt 1. Nobel Yayınları**, Alemdar Ofset, 62, 364s. Ankara
19. Güleç, Ş., Aran A., 1993. Malzeme Bilgisi Cilt 1. **İstanbul Teknik Üniversitesi** Yayını, 1521, 190s.
20. Onaran, K., 2006. Malzeme Bilimi. Bilim Teknik Yayınevi, **Ulus Matbaası**, 383s. İstanbul
21. Kakanı, S.L., Kakanı, A., 2004. Material Science. **New Age International Publishers**, 640p.
22. Kınıkoğlu, N.G., 2001. Malzeme Bilimi ve Mühendisliği. **Yıldız Teknik Üniversitesi Yayını**, Mart Matbaacılık, 65, 855s. İstanbul.
23. Erdoğan, M., 2000. **Mühendislik Alaşımlarının Yapı ve Özellikleri Cilt 1. Nobel Yayınları**, Arı ofset, 105, 338s. Ankara.
24. Totten, G.E., 2006. Steel Heat Treatment: Equipment and Process Design. **CRC Press**, 696p.
25. Demirci, H., 2004. Mühendislik Malzemeleri. **Aktüel Yayınları**, Motif Matbaacılık, 252s. İstanbul.
26. Topbaş, M.A., 1993. Isıl İşlemler. Prestij Yayınevi, **Ekim Ofset**, 440s. İstanbul
27. Callister, W.D., 2000. Fundamentals of Materials Science and Engineering/ An Interactive. **John Willey and Sons, Inc.**, 524p. USA.
28. Uzun, H., Fındık, F., Salman, S., 2008. Malzeme Biliminin Temelleri. **Değişim Yayınları**, 288s. İstanbul.

29. Erdoğan, M., 2000. Mühendislik Alaşımlarının Yapı ve Özellikleri Cilt 1. Nobel Yayınları, *Arı ofset*, 105, 338s. Ankara.
30. Callister, W. D. and Rethwisch, D. G. (2014). Materials Science and Engineering. *Hoboken*, N.J.: J. Wiley & Sons 394 s.393 396 395 s392
31. Yaşar, H. (2001). Özellik ve Uygulamalarla Malzeme. Ankara: **KOSGEB**.s 230 s 216 s215
32. Davis, J. (2015). Metals Handbook, Desk Edition (2nd Edition). **ASM International**.s203 s215
33. Singh, R. P. (2016). Applied Welding Engineering (2nd Edition): Processes, Codes, and Standards. Kidlington, Oxford; Waltham, MA: **Butterworth Heinemann**, an imprint of Elsevier Ltd. s 57 s59 s8
34. Dikeç, G. (2010). Malzeme Bilgisi ve İmal Usulleri. **İstanbul: T.C. Gedik Üniversitesi**. S 72 s48 s47 s46
35. Onaran, K. (2009). Malzeme Bilimi. İstanbul: **Bilim Teknik Yayınevi** s 316
36. ÇEVİKER, I., 1991, Mikro alaşımlı Dövme Çeliklerde Mikroyapısal Karakterizasyon ve Mikroyapı-Mekanik Özellikler İlişkisi, Yüksek Lisans Tezi, **İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü**.
37. BELELİ, BG., 2010, X42 Mikro alaşımlı çelik malzemeden üretilen petrol doğalgaz hat borularında hasar analizi, Bitirme Çalışması, **Kocaeli Üniversitesi – Metalürji ve Malzeme Mühendisliği**
38. LAGNE BORG, R., SIWECKI, T., ZAJAC, S., HUTCHINSON, B., 1999, The role of vanadium in microalloyed steels, **The Scandanavian Journal of Metallurgy**.
39. ERİŞİR, E., 2012, Çeliklerde Malzeme Bilimi ve Son Gelişmeler, Yüksek mukavemetli yapı çelikleri, **Kocaeli Üniversitesi**, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği, Ders Notları.
40. IRVINE, KJ., PICKERING, FB., GLADMAN, T., 1967, Grain-Refined C-Mn Steels, **Iron Steel Inst J.**, v.205, no.2, 161-182.
41. DEARDO, AJ., GARCIA, CI., PALMIERE, EJ., 1991, Thermomechanical Processing of Steel, **Metals Handbook**, v.3, USA.
42. LEBON, AB., SAINT-MARTIN, LN., 1977, Using Laboratory Simulations to Improve Rolling Schedules and Equipment, **Microalloying'75**, New York, USA, 90-99

ÖZGEÇMİŞ

İnci YAHYAOĞLU ilk ve orta öğrenimini Bursa'da tamamladı. Yenişehir Ertuğrul Gazi Anadolu Lisesi'nden mezun olmuştur. 2011 yılı Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümüne başlamış 2015 yılındaysa bölüm üçüncüsü olarak dereceyle mezun olmuştur. 2015 yılında Zonguldak'ın Kdz.Ereğli ilçesinde YAHYAOĞLU ÇELİK DÖKÜM Fabrikasında iş hayatına başlamış ve hala bu firmada çalışmalarına devam etmektedir.