

T.C.
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

AISI 1117 ÇELİĞİNİN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

SULTAN DÜNDAR

HAZİRAN 2008

ÖZET

AISI 1117 ÇELİĞİNİN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

DÜNDAR, Sultan

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Hüseyin Aktaş

Haziran 2008, 55 sayfa

Bu tez çalışmasında, AISI 1117 çeliğinde gözlenen faz dönüşümlerinin yapısal özellikleri çeşitli fiziksel yöntemler kullanılarak araştırılmıştır. AISI 1117 çeliğinde ilk olarak ferrite fazı gözlenmiştir. Daha sonra uygulanan ısı işlem sonucunda AISI 1117 çeliği iki farklı soğutma ortamında soğutulmuştur. Fırında soğutulan (FC) AISI 1117 çeliğinde pearlite yapı, oda sıcaklığında suda soğutulan (WQ) AISI 1117 çeliğinde ise austenite yapı, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) yardımı ile gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çelik, AISI 1117, Isıl İşlem, SEM

ABSTRACT

INVESTIGATION OF PHYSICAL PROPERTIES IN AISI 1117 STEEL

DÜNDAR, Sultan

Kırıkkale University

Graduate School Of Natural and Applied Sciences

Department of Physics, M. Sc. Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Hüseyin Aktaş

June 2008, 55 pages

In this thesis study; structural properties Which are observed in AISI 1117 steel, have been investigated using various physical characterization methods.

An AISI 1117 type low carbon steel was studied by means of Scanning Electron Microscopy. This steel is as received state at room temperature was ferritic. After application heat treatment two different procedures applied for cooling steel. In the first procedure the cooling occurred in furnace. In the second steel procedure the cooling occurred in water at room temperature. In consequence this situation in first steel is observed pearlite structure and the other steel is observed austenite structure by Scanning Electron Microscopy.

Key Words: Steel, AISI 1117, Heat Treatment, SEM

TEŞEKKÜR

Hazırlamıő olduğum bu tezin her aşamasında bana yardımcı olan, desteklerini ve bilgilerini benimle paylaőan tez yöneticisi hocam **Sayın Prof. Dr. Hüseyin Aktaş'a**, araőtırmalarım esnasında benimle bilgi ve tecrübelerini paylaőan **Sayın Yrd. Doç. Melek Güler'e** ve **Sayın Dr. őule Ocak Araz'a**, yapılan bu çalışma süresince bana destek olan **aileme**, her türlü yardımdan kaçınmayan ve yanımda her zaman varlığıyla güven veren **kardeőim Sibel'e** teşekkür ederim.

SİMGELER DİZİNİ

fcc	Yüzey Merkezli Kübik Yapı
bcc	Hacim Merkezli Kübik Yapı
hcp	Sıkı Paketli hegzagonal Yapı
P_s	Austenite-pearlite faz dönüşümünün başlama sıcaklığı
P_f	Austenite-pearlite faz dönüşümünün başlama sıcaklığı
B_s	Austenite-bainite faz dönüşümünün başlama sıcaklığı
B_f	Austenite-bainite faz dönüşümünün bitiş sıcaklığı
M_s	Austenite-Martensite faz dönüşümünün başlama sıcaklığı
M_f	Austenite-Martensite faz dönüşümünün bitiş sıcaklığı
A_s	Martensite-austenite ters dönüşüm austenite başlama sıcaklığı
A_f	Martensite-austenite ters dönüşüm austenite bitiş sıcaklığı

KISALTMALAR

T.T.T	Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm (Time-Temperature-Transformation)
C.T.T	Sürekli-Soğuma-Dönüşümü (Continuously-Cooling-Transformation)
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope)
AISI	American Iron and Steel Institute
TSE	Türk Standartları Enstitüsü

ŞEKİLLER DİZİNİ

ŞEKİL

1.1. Saf Demirin Allotropisi	6
1.2. Soğutma Ortamlarının T.T.T Diyagramlarıyla İlişkisi	34
2.1. SEM' in Şematik Yapısı	45
3.1. Isıl İşlem Görmemiş AISI 1117 Çeliğinde Gözlenen Ferrite Yapının SEM Görüntüsü	47
3.2. 1000°C de 1 Saat Isıl İşlem Gören ve Fırın İçersinde Soğutulan AISI 1117 Çeliğinde Gözlenen Pearlite Yapının SEM Görüntüsü	48
3.3. 1000°C 'de 1 Saat Isıl İşlem Gören ve Su içersinde Soğutulan AISI 1117 Çeliğinde Gözlenen Austenite Yapının SEM Görüntüsü	49

ÇİZELGELER DİZİNİ

ÇİZELGE

1.1. Bazı Demir-Karbon alaşımlarının Karbon Yüzdesi ve Tipik Mekanik Özellikleri.....	29
1.2. AISI 1117 Çeliğinin Kimyasal Bileşimi	35
2.1. Çalışılan Numunelere Uygulanan İşlemler	41

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER DİZİNİ	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
1. GİRİŞ	1
1.1. Metal Alaşımları ve Genel Özellikleri.....	2
1.2. Demir Bazlı Alaşımlar.....	4
1.3. Demir Bazlı Alaşımların Faz Diyagramları.....	8
1.3.1. Ferrite.....	12
1.3.2. Sementit.....	12
1.3.3. Austenite	13
1.3.4. Pearlite	14
1.3.5. Bainite	17
1.3.6. Martensite	18

1.4. Fe-C Alaşımları	23
1.4.1. Dökme Demirler	23
1.4.2. Çelikler	23
1.4.2.1. Düşük Karbonlu Çelikler	25
1.4.2.2. Orta Karbonlu Çelikler	26
1.4.2.3. Yüksek Karbonlu Çelikler	26
1.5. Çeliklerin Genel Özellikleri	27
1.6. Çeliklerde Isıl İşlem	30
1.6.1. Çeliklerde T.T.T Diyagramları	32
1.7. AISI 1117 Çeliğinin Genel Özellikleri.....	34
1.8. Kaynak Özetleri.....	35
1.8.1. Çalışmanın Amacı	38
2. MATERYAL VE YÖNTEM.....	40
2.1. Materyal	40
2.1.1. SEM İncelemeleri İçin Numunelerin Hazırlanması	41
2.2. Yöntem.....	42
2.2.1.Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....	41
3. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	46
3.1. Taramalı Elektron mikroskop (SEM) Bulguları	46

4. SONUÇ	50
KAYNAKLAR.....	52

1. GİRİŞ

İnsanoğlu gelişiminin ilk evrelerinden itibaren kendisi için hem kolay temin edilebilecek hem de kullanışlı olup hayatını kolaylaştırabilecek malzemeleri araştırmıştır. Böylece demir, ilkçağlardan itibaren insanoğlunun vazgeçilmez materyalleri arasına girmiştir. Teknoloji ilerledikçe birçok değişik metal keşfedilmiş ve bunların birbirleriyle değişik oranlarda veya başka malzemelerle karıştırılmasıyla yeni alaşımlar elde edilmiştir. Metal ve alaşımları bu doğrultuda yaygın uygulama alanlarına sahip olmuşlardır. Bunun yanında saf metallerin akma, çekme ve sertlik dayanımlarının alaşımlardan daha az olması nedeniyle demir bazlı alaşımlar oldukça fazla rağbet görmüştür⁽¹⁾. Geçmişten günümüze gelinceye kadar demir ve çelik üretmek için pek çok yöntem geliştirilmiştir. Demir ve özellikle çelik üretiminde meydana gelen hızlı gelişmeler sonucunda endüstri devrimi gerçekleştirilmiş, üretim araçlarındaki niteliksel gelişmelerle de teknoloji alanında ileriye doğru adımlar atılmıştır⁽²⁾. Özellikle iyi dayanım, tokluk, süneklik, nispeten düşük maliyet gibi özellikleri bir arada bulundurdukları için demir bazlı alaşımlar (çoğunlukla çelikler) dünya metal üretiminin büyük bir kısmını oluşturmaktadır⁽³⁾. Günümüzde ise demir ve çelik sanayi sektörünün temel girdisi haline gelmiş, demir-çelik üretimi ve tüketimi ülkelerin gelişmişlik düzeyinin bir ölçüsü olarak kabul edilmiştir⁽²⁾. Demir bazlı malzemelerin endüstride bu denli yaygın olarak kullanılmasının başlıca nedenleri ise doğada diğer malzemelere göre daha fazla bulunması, üretiminde diğer

malzemelere nazaran daha az enerji gerektirmesi ve özelliklerin istekler doğrultusunda ve geniş sınırlar içerisinde değiştirilebilmesidir.

Özellikle şekil verme, alaşımlama ve ısı işlemler sayesinde diğer malzemelerde elde edilmesi biraz daha güç olan özellikler demir bazlı malzemelerde kolaylıkla elde edilebilir. Bu çalışmada ayrıntılı olarak ele alacağımız demir bazlı malzemelerden biri olan çelikler bu gruba dâhildir. Çelik bir Fe-C alaşımıdır⁽¹⁾. Tüm bu sebeplerden ötürü çelik hala endüstri ve teknolojide düşük maliyet ve geniş uygulama alanı nedeniyle çok daha fazla tercih edilen bir malzemedir. Çeliklerin dikkate değer yararları bulunmaktadır; istenilen doğrultuda ihtiyaca karşılık çeliklerin özellikleri bilinen birçok işlem ile bilimsel olarak geliştirilebilir. Bunun yanında çeliklere değişik alaşım elementleri katarak farklı özellikler elde edilebilmektedir. Çelikler özellikle de otomotiv endüstrisi ve yan sanayi parçaları, makine yapım sanayisi ve ekipmanları, kalıp ve takım sanayi, savunma sanayi ve tıbbi cihazlarda geniş kullanım alanlarına sahiptir.

1.1. Metal Alaşımları ve Genel Özellikleri

Uygulanan bir elektrik alanın etkisi altında elektriği iyi ileten katıya metal denir⁽⁴⁾. Doğada bulunan elementlerin çoğu metaldir. Metaller katı durumda kristal yapıya sahiptirler. Kristal yapı, belirli bir yerleşim düzeninin içerisinde bir araya gelen atomların ortaya koydukları yerleşim düzenin üç boyutta tekrarı ile oluşur⁽⁵⁾. Metallerin kristal yapıları, ısıtma, şekil değiştirme, ısı ve elektrik iletimi gibi fiziksel olaylardaki davranışlarını etkiler⁽⁶⁾. Üç boyutlu bir düzene göre dizilen ve denge konumunda bulunan atomların

merkezlerinin birleştirilmesi ile ortaya çıkan görünüme ise kristal örgü denir⁽⁷⁾. Metallerde en sık görülen örgü türleri olan; yüzey merkezli kübik (fcc), hacim merkezli kübik (bcc) ve sıkı paketlenmiş hegzagonal (hcp) rg tipleridir⁽⁸⁾. Metallerin kristal yapıya sahip olmaları nedeniyle atomik dizilme oldukça önemlidir. Yani atomik dizilme, katı bir malzemenin mikro yapı ve davranışını belirlemede önemli rol oynar. Metallerde bazı atomik dizilmeler çok iyi süneklik sağlarken, bazılarında ise çok iyi dayanıma neden olur. Örneğin yüzey merkezli kübik yapı çok sünek iken, hegzagonal yapı çok az sneklige sahiptir⁽⁶⁾.

Metallerin saf halde yüksek iletkenlik, korozyona dayanıklılık gibi bazı özellikleri olmasına rağmen genellikle yumuşak, düşük mukavemetli ve pahalıdır. Saf metaller birçok mühendislik uygulamalarında kullanılırlar. Fakat çoğu kez iyileştirilmiş mekanik özellikler istendiğinde alaşımlar şeklinde veya diğer malzemelerin karışımı ile birlikte kullanılırlar. Bu nedenle metallerin, alaşımlandırma, soğuk şekil verme ve ısıl işlem gibi yöntemlerle sertlik ve mukavemetleri artırılabilir⁽⁹⁾. İki veya daha fazla metalin ya da en az birisi metal ve diğeri metal olmayan elementlerin bir araya gelmesi ile oluşturulan yeni malzemeye alaşım denir. Alaşımlar, alaşım tipine bağlı olarak kendisini oluşturan elementlerin özelliklerini taşıyabileceği gibi, bu elementlerin özelliklerinden bambaşka, yepyeni bir özellikte malzeme oluşturabilirler. Metal alaşımlarının sahip olduğu fiziksel özellikler daha çok kendi içyapılarına bağlıdır. Uygulanan herhangi bir işlem sonucu meydana gelen değişimin sebebi içyapı incelenerek tespit edilebilir⁽⁸⁾. Endüstride kullanılan metallerin ve metal alaşımlarının türleri çok fazladır bu nedenle özellikle de alaşımlar teknolojiye geniş kullanım alanına sahiptir.

Metal alaşımları iki grup altında toplanabilir. Bunlar; demir bazlı alaşımlar ve demir dışı alaşımlardır. Demir bazlı alaşımlarda başlıca alaşım metali demir, demir dışı alaşımlarda ise ana alaşım metali demirden başka bir metaldir⁽⁹⁾. Demir dışı alaşımlar içerdikleri ana elemana göre adlandırılırlar. Ana elemanların yanında bir veya birden daha fazla alaşım elemanı katarak değişik türde demir dışı metaller üretilir. Demir dışı alaşımlara örnek olarak alüminyum alaşımları ve bakır alaşımları verilebilir.

1.2. Demir Bazlı Alaşımlar

Demir bazlı alaşımlarda ana eleman demirdir. Saf demir 1535°C ergime sıcaklığı, 2735°C buharlaşma sıcaklığı, 7,89 gr/cm³ özgül kütlesine sahip atom ağırlığı 55,85 gram olan 26 atom numaralı elementtir. Demir yüksek plastik işlenebilme özelliğine sahiptir ve korozyona iyi dayanır. Ham demir yumuşak ve düşük mukavemetlidir. Eğer demirin içine karbon eklenirse sertliği ve mukavemeti artarken sünekliliği ve tokluğu azalabilir.

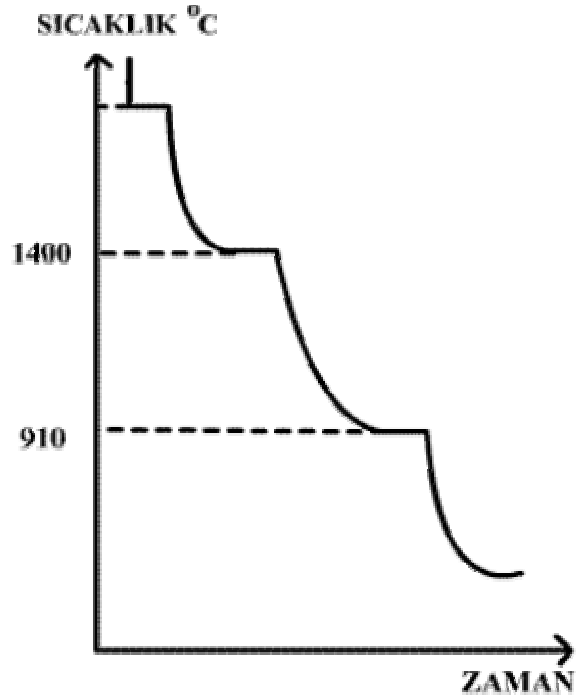
Endüstride büyük önem taşıyan metallerden birisi olan demir allotropik bir metaldir. Allotropi, bir malzemenin ergime, katılaşma, buharlaşmanın dışında belli bir sıcaklıkta özellik veya faz değişimi göstermesi şeklinde tarif edilebilir. Böylece bir metal farklı sıcaklıklarda farklı kristal kafes yapısına sahip olabilir. Metallerdeki kristal yapının ve buna bağlı olarak özelliklerinin değişimlerini ifade eden bu tür ara fazlara allotropi, bu tür duraklamaları gösteren metallere de allotropik metal denilmektedir. Metallerin ısıl eğrilerinde görülen bu duraklamaların sebebi, atomların var olan enerjilerinin

bir kısmını kristal kafes yapılarını değiştirmek için harcamaları bir kısmını da dışarıya ısı enerjisi olarak vermeleridir⁽¹⁰⁾.

Saf demir allotropik davranış gösteren bir malzemedir. Yani demir değişik sıcaklıklarda farklı kristal kafes sisteminde bulunur⁽²⁾. Şekil 1.1 de görüldüğü gibi demirin α , γ ve δ olmak üzere üç allotropik hali vardır. Eriyik haldeki demirin soğuma sırasında sıcaklığı 1538°C de sıvı halden katı hale geçerken önce hacim merkezli kübik (bcc) kafes yapı oluşur. Bu yapıda her demir atomu üç boyutlu çevresinde sekiz komşu demir atomu ile sarılmıştır⁽⁶⁾. Bu kristal kafes yapısına sahip demire ferrite ya da δ -demiri denir ve 1400°C sıcaklığına kadar bozulmadan yapısını muhafaza eder. δ -demiri daha büyük olan kafes parametresi dışında tamamen manyetik olmayan bir α -demirine benzer⁽⁶⁾.

δ -demirinin sıcaklığı 1400°C ye düştüğü zaman hacim merkezli kübik (bcc) yapısı bozularak, yüzey merkezli kübik (fcc) yapısına dönüşür. Bu yeni faza austenite ya da γ -demiri denir. Yeni yapıda her demir atomu üç boyutlu çevresinde on iki komşu demir atomu ile sarılmıştır. Bu sayede bir önceki yapıya göre daha sıkı paket bir yapı oluşmuştur⁽⁶⁾. γ -demiri 910°C e kadar bozulmadan yapısını korur. Austenite 910°C ta yüzey merkezli kübik (fcc) yapısından tekrar hacim merkezli kübik (bcc) yapısına dönüşür. Oluşan bu faza ise α -demiri ya da ferrite denir. α -demirinin sahip olduğu kristal kafes yapısı oda sıcaklığına gelene kadar bir daha değişim göstermez^(9,10). $\gamma \rightarrow \alpha$ dönüşümü, dönüşüm atomlarının birbirleri içersine karışması ile gerçekleşmez. Dönüşüm sonucu atomlar birbirlerinden biraz uzaklaşır ve köşe atomları merkezdeki atoma göre eşit mesafelere yerleşir. Böylece α -

demirinin birim kafesi meydana gelir. Atomların birbirinden uzaklaşmaları yapıda ani bir hacim büyümesine neden olur. Gerçekte 768°C 'de bir diğer durak noktası mevcuttur ancak bu sıcaklıkta herhangi bir kristal kafesi değişimi meydana gelemez. Demir bu noktada ısıtma ve ergime sırasında kaybolan manyetik özelliklerine tekrar kavuşur (Curie noktası)⁽⁶⁾. Bu nedenle demir Curie sıcaklığının üstündeki sıcaklıklarda, sahip olduğu manyetiklik özelliğini kaybeder.



Şekil 1.1. Saf Demirin Alotropisi

Demirin soğuması esnasında meydana gelen dönüşümler demir ısıtıldığında ise ters yönde gerçekleşir. Ancak bu durak noktaları sadece

yavaş bir soğutma için geçerlidir. Normal bir soğutmada durak noktaları birkaç derece daha yüksek değerlere kayabilir. Bunun nedeni ise atomların daima buldukları andaki durumu muhafaza etmeye çalışmalarıdır. Hızlı bir ısıtmada dönüşüm daha başlamadan sıcaklık durak noktasının biraz üzerine yükselir. Hızlı bir soğutmada ise, dönüşümün başlamasından önce sıcaklık durak noktasının altına düşer. Sıcaklıkların aynı dönüşüm için ısıtma ve soğutma sırasında gösterdiği bu farka histerisis denir⁽⁶⁾. Demirin katı haldeki dönüşümleri önemlidir. Çünkü basit bir ısıtma ve soğutma işlemi ile kristal yapısının istenen biçime getirilmesi sağlanabilir ve malzemenin özellikleri belli sınırlar içinde değiştirilebilir⁽⁶⁾.

Saf demir, başka maddelerle alaşımlandığında aynı kafes dönüşümleri gerçekleşir fakat dönüşüm sıcaklıkları farklıdır. Demirin en önemli alaşım elementi karbondur ve demir bazlı alaşımlarda karbon daima bir alaşım elamanı olarak bulunur. Demir bazlı alaşımlarda ferrite ve austenite her ikisi de demir içinde arayer karbon alaşımlarının katı eriyiğidir. fcc kafesinde arayer boşlukları bcc yapıdaki boşluklardan bir miktar daha büyük olduğu için fcc demire daha çok sayıda karbon atomu yerleşebilir. Bu nedenle karbonun ferrite içinde maksimum eriyebilirliği çok daha azdır. Eriyebilirlik miktarı α -demiri içinde %0,035 C ve δ -demiri içinde ise % 0,08 C dir. Katı eriyikler nispeten yumuşak ve sünektirler, ancak karbonun katı eriyik mukavemetlenmesi nedeniyle, katı eriyiklerin mukavemeti, saf demirden daha fazladır⁽¹⁾.

Demir alaşımları öncelikle demir-karbon bazlı olan sade karbonlu çelik alaşımlarını, takım çeliklerini, paslanmaz çelikleri ve dökme demirleri

içerirler⁽¹⁾. Demir bazlı alaşımlar diğer metal ve alaşımlara oranla çok daha büyük miktarlarda üretilip, kullanılan malzemelerdir. Bunlar özellikle yapı malzemesi olarak çok önemlidir ve endüstride yaygın olarak kullanılırlar. Demir bazlı alaşımlardan olan çelikler düşük maliyetleri ve geniş mekanik özellik aralığında üretilmeleri nedeniyle metal alaşımlarının en önemlisidir.

1.2. Demir Bazlı Alaşımların Faz Diyagramları

Bir malzemenin yapı bakımından homojen kısmına faz denir ve bir malzeme içindeki her faz kendine özel bir atom dizilimi gösterir. Bir fazın her yerinde yapı ve atomik diziliş aynıdır. Bitişik ve civar fazlar arasında kesin bir ara yüzey vardır ve bir faz kabaca her yerinde aynı kimyasal bileşim ve özelliklere sahiptir⁽¹⁾. Cisimler bağ kuvvetleri etkisi altında en düşük enerjili denge konumunda bulunan atom gruplarından oluşurlar. Homojen olarak dizilmiş bu atomların denge hali belirli bir faz olarak tanımlanır⁽¹¹⁾. Ancak uygulanan bir fiziksel etken ile enerji içeriği değişir, denge bozulur bunun sonucunda atomlar daha düşük enerji gerektiren başka bir duruma geçecek şekilde dizilirler ve böylece yeni bir faz meydana gelir. Yani belirli fazlardan oluşan bir denge yapısından, değişik fazlardan oluşan başka bir denge yapısına geçiş olayına faz dönüşümü denir⁽⁹⁾. Faz dönüşümü sırasında kristali oluşturan atomların birbirine göre konumları veya komşulukları değiştirerek meydana gelen dönüşümlere difüzyonlu faz dönüşümü denir. Atomların birbirlerine göre konum veya komşuluklarını değiştirmeden meydana gelen faz dönüşümlerine ise difüzyonsuz dönüşümü denir ve bu dönüşümde kristal yapı bir bütün olarak ötelenir⁽¹²⁻¹³⁾. Genelde metal ve

alaşımlar atomların difüzyonlu bir oluşumla yer değiştiremeyecekleri kadar hızlı bir şekilde soğutulduklarında ve ısıtıldıklarında difüzyonsuz faz dönüşümü gösterirler⁽¹⁴⁾. Faz dönüşümü, dışarıdan uygulanan mekaniksel zorun etkisi altında veya ani sıcaklık değişimi sonucunda meydana gelir⁽¹⁵⁾ Sistemler daima sahip oldukları enerjiyi azaltan konumlara doğru yönelerek daha kararlı hale geçme eğilimi gösterirler. Bu nedenle fazların oluşumunda ve dönüşümünde ana neden enerji içeriğidir. Enerji içeriğini değiştiren üç ana etken vardır. Bunlar; sıcaklık, basınç ve alaşımın bileşimidir. Bu değişkenler etkisinde doğacak fazların türlerini ve bunların özelliklerini bilmek uygulamada önemlidir⁽⁸⁾. Eğer çevre koşulları değişirse malzemenin mevcut enerji dengesi bozulur ve böylece atomlar buldukları konumdan daha düşük enerji gerektiren başka bir denge konumuna geçmeye zorlanırlar. İşte bu atomsal hareket sonucunda içyapı değişir ve yeni bir denge yapısı elde edilir. Dolayısıyla bu faz dönüşümü sonucunda malzemenin özellikleri değişir.

Bir metal veya alaşım ısıtıldığında ya da soğutulduğunda yeni bir kristal yapıya veya katı bir faza dönüşür. Fiziksel olarak faz dönüşümü sırasında sistem üzerindeki çevre şartlarının değişmesi atomlar arası bağ kuvvetlerinin değişmesine yol açarken, aynı zamanda sistemin kararlılığında da değişme olur. Bir sistemin kararlılığı, iç enerjisine bağlı olup en düşük iç enerjiye sahip sistemler en kararlı durumdadırlar. Çevre şartlarının değiştirilmesi ile atomik düzenleri bozulan sistemler, daima kararlı durumlarını korumak isteyecek ve en düşük enerjili atomik düzenlenimleri tercih edeceklerdir. Sıcaklık, basınç gibi değişkenler veya bir sistemin üzerine etkiyen elektrik ve manyetik alan gibi diğer değişkenler değiştirildiğinde

sistemin serbest enerjisi değişir⁽¹⁶⁾. Her faz, verilen bir alaşım için sıcaklık ve bileşimin bir fonksiyonu olarak değişen bir serbest enerjiye sahiptir. Serbest enerjideki değişimler, kristalin atomik yapısında bir değişikliğe neden oluyorsa o zaman bir faz dđnüşümünün veya geçişinin olduğu söylenir⁽¹⁶⁾. Daima serbest enerjisi minimum olan yapılar kararlı olur. Bir dđnüşüm sonucunda oluşan fazların kararlı olabilmesi için serbest enerji değişiminin olması gerekir⁽⁹⁾. Düşük sıcaklıklarda meydana gelen katı fazları, güçlü atomik bağlanmaya ve en düşük iç enerjiye sahip olduklarından dolayı en kararlı fazları oluştururlar.

Bir katı tek fazlı olduğu halde değişik yönlerde dizilmiş bir sürü kristallerden meydana gelir. Böylece bir kristal kümesindeki bireysel kristale tane denir. Metal ve alaşımları tanelerden oluşur. Çok kristalli metallerde farklı yönelimdeki taneleri birbirinden ayıran kusurlu yüzeylere ise tane sınırları denir⁽¹⁷⁾. Tane sınırlarının yüksek enerjisi ve gevrek yapısı çökeltilerin çekirdeklenmesi ve büyümesi için uygun bir ortam oluşturur. İdeal koşullar altında tek kristal halinde bulunan bir metal en düşük serbest enerjiye sahiptir. Metaldeki iri tanelerin serbest enerjileri arasındaki fark tane büyümesi için gerekli kuvveti oluşturur ve kafesin rijitliği (atomlar arasındaki bağ kuvveti) bu kuvvete karşı koyar. Sıcaklık arttıkça rijitlik azalır ve tane büyüme hızı artar⁽²⁾. Tane büyümesi sonucu süneklik artar fakat sertlik ve mukavemet azalır.

Faz dđnüşümleri iki aşamada oluşur. Birincisi yeni faz çekirdeklerinin doğması, diğeri doğan çekirdeklerin büyümesidir⁽⁹⁾. Yüksek sıcaklıklarda

oluşan yeni kristallerin çekirdeklenme hızı düşük, fakat yayılım dolayısıyla büyüme hızı yüksektir. Düşük sıcaklıklarda ise sıcaklık gradyanı büyük olduğundan çekirdeklenme hızı yüksek fakat büyüme hızı düşüktür. Faz dönüşümleri ve dönüşüm sonucu oluşacak içyapılar soğuma koşullarına bağlıdır⁽⁹⁾. Buna göre faz dönüşümü sıcaklığı üstündeki bir metalde hızlı soğuma sonucunda çekirdeklenme daha düşük sıcaklıklarda başlayacağı için oluşum hızı yüksek fakat tane boyutları küçük olur ve sonuçta ince taneli bir yapı elde edilir. Yavaş soğutmada az sayıda fakat büyük taneler oluşur ve dolayısıyla kaba taneli bir yapı oluşur.

Metallerde dengeli soğutma süresinde oluşan yapılar kararlı olup belirli bazı özelliklere sahiptirler. Soğuma sırasında faz dönüşümleri zorlayıcı bir etki bulunmaksızın kendiliğinden tamamlanır. Ancak kontrollü ısıtma ve soğutma işlemleriyle sağlanan aşırı koşullar altında (su içinde soğutma gibi) denge hali faz dönüşümleri kısmen veya tamamen önlenemez. Bu koşullarda elde edilecek bazı denge dışı yarı kararlı fazlar üstün özelliklere sahip olabilirler⁽⁹⁾. Böylece amaca uygun özelliklere sahip malzeme üretimine olanak sağlanır⁽¹⁸⁾. Farklı ısıtma işlemleri, soğutma teknikleri ve kimyasal bileşimler nedeniyle çelikler martensite⁽¹⁹⁻²¹⁾, bainite^(18,22,23), ferrite ve pearlite⁽²⁴⁾ gibi farklı faz oluşumları gösterebilir. Oluşan bu fazlar çeliğin austenite fazından oluşur ve önemli endüstriyel uygulamalar için birçok farklı fiziksel özellikler sergilenebilir⁽²⁵⁾.

1.3.1. Ferrite

Oda sıcaklığında bulunan α - demire ferrite denir. Ferrite demir içersinde çok az orandaki karbonun çözünmesiyle oluşan arayer katı çözümlüdür ve hacim merkezli kübik (bcc) kristal yapısına sahiptir ve oda sıcaklığında ferromanyetikdir⁽²⁶⁾. Bu faz hacim merkezli kübik yapıya sahip olduğundan atomlar arası boşluk çok azdır ve küçük karbon atomlarını arasına rahatlıkla alamaz. Bu nedenle karbon eritebilirliği çok azdır. Ferrite fazı içersinde 723°C sıcaklıkta % 0,025 oranında karbon çözünürken, bu oran oda sıcaklığında % 0,08 değerinde olmaktadır. Ferrite, oda sıcaklığında en fazla % 0,08 oranında karbon çözdürebildiği için saf demir olarak kabul edilir⁽¹⁾. Fe-C sistemindeki en yumuşak fazdır⁽²⁾. Ayrıca ferrite fazı düşük mukavemetlidir, iyi şekil değiştirebilir, sünek ve 768°C nin altında manyetikdir⁽⁹⁾.

1.3.2. Sementit

Yüksek sıcaklıklarda saf demir içine bir miktar karbon katıldığında karbonun tamamı demir içersinde erir. Ancak demir-karbon alaşımı soğutulduğunda yani sıcaklık katılaşma sıcaklığına indiği zamanda demirin karbonu eritebilirlik oranı az olduğundan Fe₃C kimyasal bileşiğindeki demir karbürü meydana getirir. Yani oda sıcaklığında karbonun α -demiri içersindeki çözünürlüğü çok düşüktür. Bu nedenle karbon atomları tek tek demir atomları arasında çok seyrek bulunurlar. Ferritte çözünebilir karbon miktarının düşük olması karbonun demir-karbür bileşiğini oluşturduğunu gösterir. Karbonun

demir ile yaptığı bu bileşiğe sementit adı verilir. Kısaca katı demir içinde eriyebilirlik sınırı aşıldığında metaller arası bir bileşik olan sementit oluşur⁽¹⁾. Kimyasal formülü Fe_3C (demir karbür) olan sementit aşırı derecede sert ve kırılgandır ve ticari çeliklerin hepsinde bulunur. Ayrıca elektrik ve ısı iletkenliği düşüktür ve sert olması dolayısıyla biçimlendirebilme özelliği yoktur. Demirde karbon oranı ne kadar fazla ise sementit o kadar fazla olacağından meydana gelen alaşımın sert, kırılgan ve dayanımının o kadar yüksek olması muhtemeldir⁽²⁷⁾. Bir demir karbon alaşımı hızlıca soğutulacak olursa, karbon kristalleşecek zamanı bulamaz ve demir karbür (Fe_3C) meydana gelir. Bu metal bileşiği daha çabuk kristalleşir ve kendisine has karmaşık bir kristal kafesi meydana getirir⁽⁶⁾. Sementit % 6,67 ağırlık oranında karbon içerir. Fe-C diyagramındaki en sert fazdır ve ortorombik kristal yapısına sahiptir⁽²⁾. Bu faz çeliklerin mukavemetli olmasının başlıca nedenidir bundan dolayı şekil değiştirme kabiliyeti olmamakla beraber yüksek mukavemet gösterir. Ayrıca sementit fazı 215 °C sıcaklıkta mıknatıslanma özelliğini kaybeden bir yapıya sahiptir⁽¹⁰⁾. Sementit miktarının boyut ve şekli uygun bir şekilde kontrol edilerek, çeliğin özellikleri istenen doğrultuda yönlendirilebilir.

1.3.3. Austenite

Katı eriyiğin en önemli özelliği karışık kristallerden meydana gelmesi ve alaşımı oluşturan elemanların, birbirleri içinde çözünmesidir. Demir karbon alaşımında, ana eleman demir olduğundan, demir karbon atomlarını kendi kristal kafesi içinde çözündürür. İlk başlarda Karbonca fakir olan bu kristaller,

devam eden büyüme sonucu gittikçe karbonca zenginleşir. Aynı zamanda geriye kalan sıvının miktarı da azalmaya başlar. Karışım kristalleri sıvıyı emer. Katılaşma sona erdiğinde, tamamen karışım kristallerinden meydana gelen bir içyapı oluşur. Bu yapıya austenite ismi verilmiştir⁽⁶⁾. Austenite, karbonun yüzey merkezli kübik (fcc) yapılı γ -demiri içerisinde çözünmesiyle oluşan bir arayer katı çözültisidir. Austenite içinde karbonun çözünme miktarı ferritten çok daha fazladır. Atomlar arası mesafe fcc kristallerinde daha büyük olduğundan ferrite fazından çok daha fazla karbon çözündürebilir. Bu faz 1147°C sıcaklıkta %2,0 oranında karbon çözündürür⁽¹⁾. Austenitenin özellikleri içinde en mühimleri yumuşak olması ve manyetik olmamasıdır. Ayrıca austenitenin biçimlendirilebilme özelliği yumuşak olması dolayısıyla çok yüksektir, ısı ve elektriği iyi iletmez⁽²⁷⁾. Alaşımlı çelikler oda sıcaklığında austenite ihtiva etmezler. Ancak oda sıcaklığında kararsız bir faz olmasına karşın bazı özel durumlarda oda sıcaklığında da austenite elde edilebilir.

1.3.4. Pearlite

Demir-karbon sisteminde gelişen α -kristalleri ve Fe_3C nın lamelli yapısı pearlite olarak adlandırılır. Pearlite, sementitin austenite taneleri içinde tercihen tane sınırlarına dik lameller halinde çökmesi ile meydana gelir. Pearlite dönüşümü ilk önce sementitin çekirdeklenmesi ile başlamaktadır. Karbon atomları austenitte ancak 723°C üzerinde erimiş olarak bulunabilir. Bu sıcaklığın altında bulunan karbon atomları austenitte kalamazlar ve austenitten ayrılarak serbest hale geçerler. Ancak serbest kalmaları imkansız olduğundan bir kısmı demir ile birleşerek sementit meydana getirirler.

Austenitenin dönüşümü ile bir taraftan sementit meydana gelirken, diğer taraftan karbon atomlarının yapıdan ayrılması ile karbonsuz kalan saf demir, ferrite kristallerini meydana getirmektedir. Bu olay bütün austenite bitinceye kadar devam eder. İlk önce bir sementit plakası meydana gelir ve bunun etrafını ferrite plakaları kaplar⁽²⁷⁾. Pearlite, birbiri üzerine dizilmiş, ferrite ve sementit katmanlarından oluşan lamelli bir yapıya sahiptir. İzotermal dönüşüm sonucunda oluşan pearlitenin inceliği (lameller arası uzaklık) ve sertliği dönüşüm sıcaklığına bağlıdır. Hem sıcaklığa hem de zamana bağlı olan dönüşümlere izotermal dönüşüm adı verilir. İzotermal dönüşüm sıcaklığı azaldıkça pearlite incelir başka bir deyişle ferrite ve sementit katmanları arasındaki uzaklık azalır ve yapının sertliği artar. Sıcaklığın azalması ile pearlite meydana gelen incelme, ferrite ve sementit tabakalarının birbirleriyle ayırt edilemeyecek bir görünüme sahip olmalarına neden olur. Demir-karbon sisteminin en ilginç bileşimi olan % 0,8 karbondur. Bu alaşım sıvı halden soğutulacak olursa önce austenite fazına dönüşür sonrada pearlite meydana gelir. % 0,8 den daha az karbon içeren alaşımlarda önce austenite katı eriyiği oluşur, daha sonra austeniteden ferrite fazı çöker, 727°C a gelince geriye kalan (fcc) austenite genelde sık tabakalar halinde ferrite ve sementit içeren pearlite dönüşür⁽⁹⁾. Pearlite yakından incelenirse Fe₃C lamelinin α tarafından kuşatıldığı görülür⁽¹⁾.

Normal koşullar altında pearlite kümeler ve koloniler halinde büyür. Her koloni içinde lamelin dizilimi benzerdir. Koloniler orijinal austenite tanelerinin tane sınırlarında çok kolay çekirdeklenir. Bu yapı inci gibi parlak ve parmak izi şeklinde olması dolayısıyla pearlite adını almıştır. Ferrite ve sementit lamellerinden oluşan bu yapı % 0,8 oranında karbon ihtiva eder ve

bu orandan daha az karbon içeren alaşımlara pearlite altı, % 2,0 ye kadar karbon içerenlere ise pearlite üstü alaşımlar denir. Autektoid sıcaklığın hemen altında soğutma yapılırsa austenite sadece çok az alt soğutulmuş olur. Dengeli ferrite ve sementit çekirdeği oluşumundan önce uzun zaman gereklidir. Çekirdeklenme, (P_s) pearlite başlangıç sıcaklığının zamanına yaklaşılan kadar başlamaz. Pearlite büyümeye başladıktan sonra atomlar hızla difüz eder ve kaba pearlite oluşur. Dönüşüm (P_f) pearlite bitiş sıcaklığının zamanında tamamlanır. Austenite düşük sıcaklıklara soğutulduğunda bir hayli alt soğutulmuş olur. Bu nedenle çekirdeklenme daha hızlı olur. Pearlite başlangıç zamanı kısalmış ve ince pearlite oluşur. Büyüme hızının yavaş olmasına rağmen, hızlı çekirdeklenmeden dolayı dönüşüm için gerekli zaman kısalmıştır. Düşük dönüşüm sıcaklıklarında pearlitedeki lameller oldukça ince ve sonuçta ferrite ve sementit arasındaki sınır çok büyük olabilir. Ayrıca eğer dönüşüm sırasında soğuma hızı yavaş ise karbon atomları daha büyük mesafelere difüz edebilir ve kaba pearlite oluşur. Fakat soğuma hızı hızlanırsa difüzyon daha kısa mesafelerle sınırlandırılır. Bunun sonucunda ise ince pearlite oluşur⁽²⁸⁾. Demir bazlı alaşımlarda pearlite fazının oluşumu yapıdaki karbon miktarı ve soğutma koşullarına bağlıdır. Pearlite fazı genellikle az karbon içeren alaşımlarda sıklıkla gözlenen bir fazdır. Pearlite yapının oluşumunun başlaması için uzun bir zaman gereklidir⁽²⁹⁾. Uygun bir ısı işlem uygulandığında tüm çeliklerde pearlite yapı oluşturulabilir⁽³⁰⁾.

1.3.5. Bainite

İlk olarak Bain ve Davenport tarafından özel bir yapı olarak tanımlanan pearlite kademesi ve martensite kademesi arasındaki alana ara kademe dönüşümü veya bainite adı verilir⁽³¹⁾. Bainite daha geniş bir alt soğutmada austenite dönüşümü ile elde edilen ferrite ve sementitin lamelli olmayan karışımıdır. Ferrite ve sementit karışımından oluşan bu yapıyı ilk bulan kişi olan E. C. Bain adına atfen bainite adı verilmiştir⁽²⁾. Oluşum mekanizması açısından bainite, pearlitten farklıdır. Pearlite dönüşümü ilk olarak sementitin çekirdeklenmesi ile başlamaktadır. Halbuki bainitte durum tam tersidir. Bainitte dönüşüm ilk önce karbonu atan austenitenin ferrite halinde çekirdeklenmesi ile başlar. Ferrite ve sementit ara yüzeyindeki enerjiden dolayı çeliğin toplam enerjisi çok yükselebilir. Bu nedenle çelik iç enerjisini, sementitin ferrite içerisinde ayrı yuvarlanmış parçacıklar halinde çökmesini sağlayarak düşürür. Böylece ferrite ve sementitin yeni düzenlenmesi olan bainite oluşur. Yüksek sıcaklıklarda oluşan bainite pearliti andırır, buna karşın düşük sıcaklıklarda meydana gelen bainite daha tüylü bir görünüme sahiptir. Bainitenin dönüşümü, (B_s) bainite başlangıç sıcaklığının zamanında başlar ve (B_f) bainite bitiş sıcaklığının zamanında sona erer⁽¹⁾. Dönüşüm sıcaklığı devamlı azaldığında austeniteden bainite dönüşüm için gerekli olan dönüşüm başlangıç ve bitiş zamanı artar ve bainite incelir⁽¹⁾.

Bainite, tüylü bainite (üst bainite) ve iğneli bainite (alt bainite) olmak üzere iki türü vardır⁽³²⁾. Yaklaşık 500°C dolayındaki sıcaklıklarda bainite pearlite benzeyen bir görünüm sergiler ve söz konusu yapıya üst bainite veya tüylü bainite adı verilir. Düşük dönüşüm sıcaklıklarında elde edilen bainite ise

iğneli martensitik yapıyı andırır buna da alt bainite veya iğneli bainite adı verilir⁽²⁾. SEM çalışmalarında, üst bainite içyapısının özellikle dilim sınırlarında çöken karbür partikülleri ile beraber ilerleyen ferrite dilimlerinin en uzun ekseninde paralel dizilmeleri ile meydana geldiğini ortaya çıkarmıştır⁽³³⁾. Bainite, genellikle pearlitten daha güçlü ve sünektir. Pearlitte olduğu gibi, dönüşüm sıcaklığı düştükçe sementit tabakaları arasındaki uzaklık azaldığında bainitenin sertliği artar. Bainitenin sertliği, pearlitenin sertliği ile martensitin sertliği arasında yer alır. Bainitik yapı dayanım, sertlik ve tokluğun bir kombinasyonunu sağlar. Sonuç olarak bainite, austenitenin izotermal dönüşümü sonucunda pearlite bölgesinin alt sınırı ile M_s sıcaklığı arasındaki bölgede meydana gelen ve ferrite ile sementit fazlarından oluşan kararsız dengeli bir yapıdır⁽²⁾.

1.3.6. Martensite

Soğutulan ve dövülen yumuşak demirde çeşitli mikro yapıların oluştuğunu ilk defa Alman bilim adamı Adolf Martens bulmuş ve bu yapılara martensite kristalleri adı verilmiştir. Daha sonra yapılan araştırmalarda martensitik dönüşüm demir ve alaşımlarda gözlenmiştir. Ancak çalışmalar ilerletilince yalnızca demir ve alaşımlarında görüldüğü zannedilen bu dönüşümler diğer pek çok metal ve alaşımlarda gözlenebilmiştir (Örneğin Au, Cu, Zn, Sn gibi.).

Homojenleştirme işleminden sonra çelikler yavaş ya da orta seviyedeki bir hızla soğutulduklarında, austenite içersinde çözünmüş karbon atomları difüzyon ile austenite yapıdan ayrılırlar. Bundan sonra, demir atomları

konumlarını biraz değiştirerek yeni bir hacim merkezli kübik (bcc) kafes yapısı oluştururlar. Bu austenite-ferrite dönüşümü katı durumdaki kafeslerde bir atomik hareket sonucu meydana geldiğinden zamana bağlı olarak gelişen bir çekirdeklenme ve büyüme olayı şeklinde gerçekleşir. Eğer yeterli zaman verilmezse bu olayı açıkladığı gibi tekrarlamayıp daha alçak sıcaklıklarda ve daha başka yapılar meydana gelecek şekilde kendini gösterir. Böylece bu dönüşüm tersinir olarak sonsuz sayıda tekrarlanabilir⁽²⁷⁾.

Buna göre soğuma hızı arttırıldığında karbon atomları austenitenin karbon eritkenliğinin azalması sonucunda yerlerinde kalamayacakları için kristal kafesinden çıkmak isteyeceklerdir. Ancak karbon atomlarının yerlerini terk etmeleri için zaman çok kısa olduğundan karbon atomlarının çözelti içinde hapsedilmeleri nedeniyle kafes yapısı bcc yapıya dönüşmez ve daha farklı bir yapı oluşur. Oluşan bu yapıda α -kristalleri içersinde karbon atomları hapsedilmiş olarak kalırlar. Buda çok fazla karbon eritebilme özelliği olmayan bu kristallerin karbon atomları tarafından kristal kafeslerinin çarpıtılmasına ve şeklinin bozulmasına neden olur. Hızlı soğuma sonucunda meydana gelen bu yapıya martensite adı verilir⁽¹⁾. Martensitik dönüşüm çeşitli araştırmacılar tarafından farklı şekillerde tanımlanmıştır. Christian⁽³⁴⁾ martensitik dönüşümü, basit bir oluşum mekanizması nedeniyle atomik difüzyonun gerekmediği, serbest enerjinin net bir azalımı ile gerçekleşen hızlı bir yeni oluşum olarak tanımlar. Clark ve Wayman⁽¹⁶⁾ dönüşümü, uzun düzende atomik yer değiştirmelerin olmadığı belirli kristalografik sistemlerde oluşan ikizlenme gibi iç uyum bozukluklarına yol açan bir yapılanma olarak tanımlar. Nishiyama⁽²⁶⁾ ya göre martensitik dönüşüm atomların topluca hareket edebildikleri bir faz geçişidir. Sonuç olarak bu tanımlar göze alındığında, Clapp' ın⁽³⁵⁾ yaptığı gibi

kısa ve öz bir tanım vermek daha açıklayıcıdır. Buna göre martensitik dönüşüm, bir atom takımının şekil değişimi ortaya çıkaracak şekilde, bir ara yüzey boyunca topluca hareketi ile oluşan bir faz geçiştir⁽⁸⁾.

Martensitik dönüşüm, metal ve alaşımlarında görülen bir yapısal faz dönüşümü olup austenite faza dışarıdan uygulanan sıcaklık ve zorun ayrı ayrı veya birlikte etkisi ile martensite elde edilmesi olayıdır. Martensitik faz dönüşümü, austenite faza fiziksel etkenlerin uygulanmasıyla meydana gelir. Austenite fazda bulunan bir kristale uygulanan fiziksel etkenler ile oluşturulan martensite kristalleri, yapısı ve dış görünüşlerine göre üç gruba toplanabilirler⁽⁹⁾. Bunlardan ilk gruba giren martensite oluşumlarında yalnızca sıcaklığın etkisi vardır. Numune sıcaklığın hızla değiştirilmesiyle yani soğuma etkisiyle oluşturulan martensite dönüşümlerinin oluşumu ilk kez Bain modeli ile açıklanmıştır⁽³⁶⁾. İkinci gruba numune sıcaklığının hızla düşürülmesi ve austenite yapıya dıştan uygulanan bir mekanik zorun etkisiyle oluşturulmuş martensite dönüşümleri girer. Üçüncü grupta ise M_s martensite başlama sıcaklığının üzerinde zorlanma ile meydana getirilmiş martensite dönüşümleri vardır⁽³⁷⁾.

Martensitik faz dönüşümleri difüzyonsuz faz dönüşümleri olarak tanımlanır. Martensitik faz dönüşümünde austenite yapı tümü ile martensite yapıya dönüşmez. Yani dönüşüm sonrası martensite kristalleri homojen olmayan bir dağılımla, austenite yapının içersinde serpilmiş olarak ortaya çıkar. Bu dönüşümün diğer bir özelliği de dönüşüm sırasında örgü kusurlarının meydana gelmesidir. Ayrıca martensitik dönüşümde zamana bağlılık, sıcaklığa bağlılık, dönüşümün tersinirliği, uygulanan mekanik zorun

etkisi, oluşan yeni fazın şekli ve kararlılığı martensitik faz dönüşümlerinin genel karakteristik özelliklerinin açıklanmasında önemlidir⁽⁸⁾.

Martensite, difüzyonsuz katı hal dönüşümünün bir sonucu olarak oluşan bir fazdır. Reaksiyon difüzyona bağlı olmadığı için martensite reaksiyonu atermaldir. Atermal dönüşüm zamana bağlı olmayıp sadece sıcaklığa bağlı olan dönüşümlerdir. Atermal dönüşümde, austenite fazdaki numunenin sıcaklığı düşürülürse, belirli bir M_s sıcaklığına geldiğinde austenite yapı martensite yapıya dönüşür ve dönüşüm kısa zamanda tamamlanır⁽⁸⁾.

Martensite fazın en önemli özelliği çok sert bir faz olmasıdır. Demir normalde oda sıcaklığında %0,003 C içerir. Martensite ise çeliğin içersindeki karbon miktarı kadar karbon içerdiğinden dolayı martensite karbonla aşırı doymuştur. Bu nedenle martensitin sertliğinin yüksek olması martensitik dönüşüm sırasında malzemenin kafes yapısında meydana gelen aşırı çarpılmadan ve dolayısıyla bu çarpılmaya neden olan karbon miktarına bağlıdır.

Martensite fazın çok sayıdaki demir bazlı alaşımlarda atermal olarak oluştuğu bilinmektedir⁽⁸⁾. Martensitik dönüşüm hızlı bir soğuma sırasında meydana gelebilir ve soğuma engellenirse dönüşüm durur. Bu nedenle bu dönüşüm zamandan bağımsızdır ve sıcaklığın azalmasına bağlıdır. Dönüşüm sırasında oluşan martensite oranı, azalan sıcaklıkla doğru orantılı olarak değişmez. Dönüşümün başlangıç aşamasında az miktarda martensite oluşur. Sonra martensite oranı hızlı bir şekilde artar ve dönüşümün sonuna doğru bu oran tekrar azalır. Martensitik dönüşümün başlangıç sıcaklığı M_s , bitiş

sıcaklığı M_f harfleri ile gösterilir. Eğer M_s sıcaklığının altında bir sıcaklıkta soğutulursa martensitik dönüşüm durur ve sıcaklık düşmedikçe dönüşüm devam etmez. Soğuma hızını değiştirmekle bir alaşımın ne M_s sıcaklığı değişebilir nede martensitik dönüşüm engellenebilir. Teorik olarak austenite tamamen martensiteye dönüşmez yani austenite-martensite dönüşümü hiçbir zaman tamamlanamaz ve çelik içersinde düşük sıcaklıklarda bile çok düşük oranda da olsa kalıntı austenite bulunur. Martensitik yapı kararsız austenite fazı ile ferrite ve sementit karışımından oluşan kararlı yapı arasında bir geçiş fazı olarak kabul edilebilir. Martensite fazı sementitten sonra gelen en sert fazdır⁽²⁾.

Martensite fazın diğer bir özelliği de tersinir bir dönüşüm olmasıdır. Oluşan martensite kristalleri M_s sıcaklığından daha yüksek bir A_s sıcaklığında austenite yapı oluşmaya başlar ve A_f sıcaklığında yapı tamamen austenite yapıya dönüşür. Martensite kristalleri, alaşımın cinsine bağlı olarak ince plaka martensite (plate martensite), iğne martensite (lenticular martensite), kelebek martensite (butterfly martensite), sıkı martensite (compact martensite) ve benzeri şekillerde oluşabilir⁽⁸⁾.

Demir bazlı alaşımlarda genellikle bulunan ve en önemli alaşım elemanı olan karbon demir bazlı alaşımların türlerini birbirinden ayıran en önemli etkendir.

1.3. Fe-C Alaşımları

Endüstride en çok kullanılan demir bazlı alaşımlar Fe-C alaşımlarıdır.

Demir karbon alaşımları içerdikleri karbon oranına göre;

1.Dökme demirler

2.Çelikler

Çelikler kendi aralarında karbon oranına göre üçe ayrılırlar;

a-) Az karbonlu çelikler.

b-) Orta karbonlu çelikler.

c-) Yüksek karbonlu çelikler

olarak adlandırılırlar.

1.4.1. Dökme Demirler

Dökme demirler, %2 den fazla karbon ihtiva eden alaşımlardır ancak alaşım elamanlarının etkisi ile karbon miktarı % 2 den daha düşük değerler kayabilir. Dökme demirler alçak sıcaklıklarda ergirler, maliyetleri düşüktür. Dökme demirler içerisinde karbondan başka Mn, Si, S ve P gibi elementler vardır. Dökme demirlerde manganez fazla ise karbon biçimlendirmeye elverişli değildir ve karbonu tamamen sementit yapar. Bu sebeple de sert ve rengi beyaz olur bu tarz dökme demirlere renklerinin beyaz oluşları nedeniyle beyaz dökme demiri adı verilir. Silisyumu fazla olan dökme demirde karbonun büyük kısmı serbest halde grafit şeklinde bulunur. Kesit kırılarak incelenecek olursa koyu siyaha yakın bir renk görülür bu sebeple de Si fazla olan dökme demirlere kır dökme demiri adı verilir⁽²⁷⁾. Bunun yanında temper

dökme demir, vermicular dökme demir, küresel grafitli dökme demir gibi daha farklı şekilleri mevcuttur. Dökme demirler endüstrinin her kolunda büyük oranlarda kullanılmaktadır. Makine gövdeleri, elektrik direkleri, radyatörler kullanma alanlarından sadece bazılarıdır.

1.4.2. Çelikler

Çeliğin ana bileşeni demir, ana alaşımı karbondur. Çelik, herhangi bir işleme tabi tutulmadan dövülebilen yani şekil değişimine elverişli ve en çok %2 oranında karbon içeren demir bazlı bir alaşımdır. Çelikler; mukavemet, tokluk, sertlik, aşınma mukavemeti, ısı işleme kabiliyeti, işlenebilirlik, paslanmazlık gibi birçok özelliklere sahiptir. Çelikteki bu özellikler karbon oranının değiştirilmesiyle, alaşım elemanlarının etkisiyle veya uygulanan çeşitli yöntemler ile değiştirilebilir. Yani çelik, bir demir karbon alaşımı olup, karbon ve alaşım elemanları değişimi ile çok çeşitli özellikler kazanabilmektedir. Örneğin karbon yüzdesi arttıkça sertlik ve mukavemet artarken, işlenebilirlik kabiliyeti ise azalır. Bu nedenle çeliklerde karbon oranı çok önemlidir. Çeliğin yapısındaki karbonun görevi alaşımı sertleştirmek ve demir atomlarının kaymasını engellemektir. Alaşımdaki karbon miktarını arttırarak çeliğin sertliği arttırılabilir, fakat bu işlem çeliğin kırılabilirliğini arttırıp, süneklik gibi bir takım özelliklerini azaltır.

Demir-karbon alaşımının çelik olarak kabul edilebilmesi için en çok %2 oranında karbon içermesi gerekmektedir. Karbon, çeliğin meydana gelmesini sağlayan ana alaşım elemanıdır. Karbon çeliğin ergime derecesini düşürür, oksitlenmeyi azaltır, korozyon ve aşınma dayanımını sağlar, elektrik direnci

ve ısı dayanımını artırır. Karbon oranı çeliğin içyapısında birtakım değişikliklere yol açar bu nedenle karbon oranı çeliğin türünü belirleyen en önemli faktörlerden birisidir. Buna göre çelikler sahip oldukları karbon oranına göre üç ana gruba ayrılırlar. Bunlardan; düşük karbonlu çelikler en fazla % 0.2 oranında, orta karbonlu çelikler % 0.2- % 0.5 arasında, yüksek karbonlu çelikler en fazla % 2 oranında karbon içerirler⁽⁷⁾. Çeliklerde karbon oranı yükseldikçe içyapıda yumuşak ferrite fazının yanında sert ve gevrek olan demir karbür fazının miktarı artar, şekil değiştirme zorlaşır⁽⁹⁾.

1.4.2.1. Düşük Karbonlu Çelikler

Tüm çelikler arasında en büyük miktarda üretilen çelikler bu gruba girerler. Düşük karbonlu çeliklerin karbon oranı $\% 0.1 < C < \% 0.2$ arasındadır. Düşük karbonlu çeliklerin sertlik ve mukavemetleri düşüktür, kolay işlenir, su verme ile sertleştirilemezler, sertlik ve mukavemetleri soğuk şekil verme ile artırılabilir. Genel amaçlar için kullanılan en ucuz çeliklerdir⁽⁹⁾. Düşük karbonlu çelikler, büyük ölçüde plastik şekillendirmeden sonra kırılırlar ve yüksek tokluğa sahiptirler. Bu tip çeliklerde martensite yapısı elde edilemediği için mukavemetlerinin artırılması ancak soğuk işleme ile mümkündür. Düşük karbonlu çelikler; inşaat malzemeleri, uçak ve otomotiv sanayinde kullanılır⁽²⁷⁾.

1.4.2.2. Orta Karbonlu Çelikler

Orta karbonlu çeliklerde $\% 0.2 < C < \% 0.5$ arasında karbon içerirler. Bu çeliklerin mukavemetleri ve toklukları yüksektir, plastik şekil vererek işlenebilirler. Şekil verdikten sonra su verme ile sertlik ve mukavemetleri birkaç kat arttırılabilir. Bu çelikler genellikle yapılarda, makine parçaları, buhar kazanları, demiryolu rayları gibi mukavemet istenen yerlerde kullanılırlar⁽⁹⁾. Orta karbonlu çelikler oldukça sünektirler. Bu çeliklerin; austenitleştirme, hızlı soğutma gibi ısı işlemler ile mekanik özellikleri iyileştirilebilir. Orta karbonlu çelikler düşük sertleşebilirliğe sahiptirler bundan dolayı sadece çok ince kesitleri uygun şekilde sertleştirilebilir. Orta karbonlu çelikler ısı işlemler için çok uygun çeliklerdir. Yani bu çeliklerin yapı ve özellikleri ısı işleme büyük ölçüde değiştirilebilir.

1.4.2.3. Yüksek Karbonlu Çelikler

Yüksek karbonlu çeliklerde karbon oranı $\% 0.5 < C < \% 2$ arasındadır. Bu tür çeliklerde sertlik ve mukavemet yüksek olmakla beraber, süneklik ve tokluk düşüktür. Bu çelikler en sert, en dayanıklı ve en düşük süneklığe sahip karbon çelikleridir. Sert oldukları için işlenmesi zordur. Kaynak yetenekleri iyi değildir, kaynak sırasında yerel sertleşme ve gevrekleşme oluşur ve buna bağlı olarak çatlamlar meydana gelebilir. Bu çeliklere şekil vermek zordur ve su vererek sertleştirilebilirler. Bu çelikler genellikle takım, kalıp ve yay çelikleri olarak kullanılırlar⁽⁹⁾. Yüksek karbonlu çelikler; yüksek mukavemet ve aşınma direnci gerektiren yerlerde

kullanılırlar.

1.5. Çeliklerin Genel Özellikleri

Teknoloji ilerledikçe, gelişen ihtiyaçlar doğrultusunda malzeme özellikleri kullanım açısından çok önemli hale gelmiştir. Bu nedenle malzemeler çeşitli özellikleri nedeniyle değişik kullanım alanlarına sahiptir. Gelişen ihtiyaçlar karşısında malzemelerin özelliklerini belirlemek amacıyla birçok araştırmalar yapılmıştır. Yapılan bu araştırmaların bir sonucu da malzemelerin özelliklerinin sınırlı olarak istekler doğrultusunda değiştirilebilmesidir. Malzemelerin özellikleri; mekanik ve fiziksel özellikler olmak üzere iki grup altında incelenebilir. Mekanik özellikler; uygulanan yük ve gerilemeye karşı malzemenin nasıl davrandığını gösterirler⁽¹⁴⁾. Bir malzemenin uygulanan kuvvetlere karşı gösterdiği tepki ise mekanik davranış olarak tanımlanabilir. Bu davranış değişik tür zorlamalar altında oluşan gerilme ve şekil değiştirmeleri ölçerek ve gözleyerek saptanır. Mekanik özelliklerin kaynağı atomlar arası bağ kuvvetleri olmakla beraber içyapıya ve çevre koşullarına büyük ölçüde bağlı olduklarından aralarında doğrudan bir bağ kurmak olanaksızdır⁽⁹⁾. Malzemelerde içyapı ve mekanik özellikleri arasında yakın bir ilişki bulunmaktadır. Mekanik özellikler kimyasal bileşime, üretim yöntemlerine, uygulanan mekanik şekil verme ve ısıtma yöntemlerine bağlıdır. Katılaşma sürecinde ya da ısı, dış zor veya basınç gibi dış etkenlerle meydana gelen kristal kusurlar katının mekanik ve fiziksel davranışları üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Bunun yanında kristal örgü malzemelerin fiziksel özelliklerini doğrudan etkiler. Elektrik iletkenlik, ısı

iletkenliği, genleşme katsayısı, ısı sığası ve esneklik gibi özellikler katının kristal örgüsünün cinsine bağlıdır⁽¹³⁾. Metallerin fiziksel davranışları çeşitli elektrik, manyetik, optik, ısı ve elastik özelliklerle tarif edilebilir. Bu özelliklerin çoğu atomik yapı, atomik dizilmede yabancı atomları katmakla ve kontrol etmekle önemli ölçüde değiştirilebilir⁽³⁸⁾.

Malzemelerin elastik, süneklik, mukavemet ve tokluk gibi birçok önemli mekanik özellikleri vardır. Bunlardan biri olan tokluk, birim hacimde cismi kırmak için gerekli enerji olarak tanımlanır⁽⁹⁾. Yani malzemenin ani darbeler sonucunda kopmaya karşı gösterdiği dirençtir. Süneklik ise malzemenin kopmaksızın dayanabileceği şekil değiştirme miktarıdır. Bir malzemenin sünekliliği, kopma için yapılması gereken iş ile doğru orantılıdır⁽⁶⁾. Mukavemet, genel anlamda bir malzemeyi koparmak için birim alana uygulanan kuvvet olarak tanımlanabilir⁽¹⁰⁾. Mukavemetin kaynağı atomlar arası bağ kuvvetleridir⁽⁹⁾. Bir malzemenin çizilmeye, kesilmeye, aşınma ve delmeye karşı gösterdiği dirence sertlik denir. Bilimsel olarak bir malzemenin dislokasyon hareketine veya plastik deformasyona karşı gösterdiği direnç ile ifade edilir⁽⁸⁾. Malzemedeki sertliğin yeteri kadar olması malzemelere üstün özellikler sağlar.

Bütün metallerde ve özellikle çelikte sertlik, soğuk şekillendirme ve ısı işlem sonucu geniş sınırlar içinde değişir⁽⁶⁾. Soğuma hızı, parçanın büyüklüğu, sade karbonlu çeliklerde karbon yüzdesi, sertleştirme başlangıcında çekirdeğin tane büyüklüğu, sertleşme sıcaklığı, çelikte bulunan alaşım elemanlarının cins ve miktarları çeliğin sertliğine etki eden

faktörlerdir⁽²⁷⁾. Genelde sertlik, uygulanan yükün numunede oluşturduğu kalıcı izin yüzey alanına bölünmesi ile bulunur. Günümüzde en çok Brinell, Vickers, Rockwel ve Knopp sertlik ölçme yöntemleri kullanılmaktadır⁽⁸⁾.

Çeliğin yapısındaki karbon, çeliğin yapısal ve mekanik özelliklerini çok fazla etkiler. Karbonun başlıca görevlerinden biri de alaşımı sertleştirmek ve demir atomlarının kaymasını engellemektir. Bu nedenle genelde sertliğin derecesini karbon miktarı tayin eder⁽⁶⁾. Alaşımdaki karbon miktarı arttığında, sertlik ve mukavemet artar buna karşılık süneklik azalır. Bu durum çelikte bir ara yer bileşiği olan Fe₃C oranının artan karbon oranı ile artmasından kaynaklanır. Çizelge 1.1'de görüldüğü gibi çeliğin sertliğine önemli derecede etki eden faktörlerden biri olan alaşımdaki karbon oranının yüzdesi arttıkça doğru orantılı olarak sertlik ve mukavemet artar.

Çizelge 1.1. Bazı Demir-Karbon Alaşımlarının Karbon Yüzdesi ve Tipik Mekanik Özellikleri⁽³⁹⁾

Demir karbon alaşımı	%C	Sertlik (Brinell)	Çekme dayanımı MPa	Uzama(%)
Yumuşak çelik	0,2	60-100	200-250	0-60
Orta karbonlu çelik	0,5	140-160	400-500	35
Autektoid çelikler	0,8	240	900-930	10

Malzemenin özellikleri, hazırlama tekniklerine bağlıdır⁽⁸⁾. Isıl işlem, hızlı ve yavaş soğutma, mekanik deformasyon, korozyon gibi tüm bu farklı teknikler atomların düzenini ve dolayısıyla da atomlar arasındaki etkileşme ile özelliklerini etkileyebilir. Bu nedenle elektrik veya ısı iletkenlerini, manyetizmasını, elastikiyet yoğunluğu, reaktifliği gibi özellikleri de etkiler⁽⁴⁰⁾. Aynı zamanda uygulanan bu teknikler malzemelerin bileşenlerinin konsantrasyonunu, yabancı fazların türünü ve dağılışını fazların kararlı veya yarı kararlı oluşunu, çöktillerin türünü ve büyüklüğünü etkilemektedir.

1.6. Çeliklerde Isıl İşlem

Genel anlamda ısıl işlem, metal ve alaşımlara istenilen özellikleri kazandırmak amacıyla katı halde uygulanan kontrollü ısıtma ve soğutma işlemleri olarak tanımlanır⁽²⁾. Isıl işlemde, çeliğe katı haldeyken bir dizi ısıtma ve soğutma işlemi uygulanır. Böylece çelik belli bir sıcaklığa kadar ısıtılıp bu sıcaklıkta bir süre tutulduktan sonra uygun bir hızda soğutulur. Çeliklere uygulanan ısıl işlemlerde esas amaç malzemenin içyapı değişikliği üzerinden giderek ona belirli bir işlenme ve kullanılma özelliği kazandırmaktır. Bu sayede ısıl işlem ile çeliğin içyapısı dolayısıyla da mekanik ve fiziksel özellikleri değiştirilebilmektedir. Çeliklere uygulanan bütün temel ısıl işlemler, austenite fazının dönüşümü ile ilgilidir. Dönüşüm ürünlerinin türü, bileşimi ve metalografik yapısı çeliğin fiziksel ve mekanik özellikleri; içerdiği dönüşüm ürünlerinin cinsine, miktarına ve metalografik yapısına bağlıdır⁽²⁾.

Çelik soğuma esnasında içyapısını değiştiren bir malzemedir. Bu nedenle soğuma hızı da çeliğin içyapısı üzerinde bir takım değişikliklere sebep olabilir. Çok hızlı bir soğuma, denge fazlarının meydana gelmesini tamamen önleyebilir. Bu durum demir bazlı alaşımlarda tamamen yeni bir denge dışı faz meydana getirir. Denge dışı yapılar genellikle malzemelerin atomlarının yeniden dizilerek bir denge yapısı oluşturmaya yeterli zaman ve ısı enerjisine sahip olmalarını önleyecek derecede hızlı soğutulmaları sonucunda elde edilebilirler⁽⁴¹⁾.

Bunun yanında metallerde katılaşma süresindeki soğuma hızı tane büyüklüğünü doğrudan etkiler. Faz dönüşümü sıcaklığı üzerindeki bir metalde hızlı soğuma süresince çekirdeklenme daha düşük sıcaklıklarda başlayacağı için oluşum hızı yüksek, fakat boyutları küçük olur. Sonuçta ince taneli bir yapı elde edilir. Yavaş soğutmada ise az sayıda fakat büyük taneler oluşur ve dolayısıyla kaba taneli bir yapı oluşur⁽⁹⁾.

Örneğin; % 0,4 C' lu çelik yavaş olarak yani fırın içerisinde soğutulursa aynı miktarda ferrite ve pearlitten meydana gelen bir içyapı oluşur. Daha hızlı bir soğutma sonucunda, mesela hareketsiz havada, austenite daha az ferrite kristali ihtiva eden bir içyapıya dönüşür. Ferrite sürekli bir ağ şeklide tane sınırlarında yer alır. Daha hızlı bir soğutma sonucu (mesela kurşun banyosu içinde soğutma) ince lameler pearlitten meydana gelen saf pearlitik bir içyapı teşekkül eder. Bu arada austenitten ferrite ayrışması tamamen engellenmiştir. Çelik şayet hepsinde daha hızlı olarak mesela yağda

soğutulursa, pearlite teşekkülü dahi engellenir ve yeni bir kristal çeşidi olan iğneli yapıdaki martensite ile çok sıkı pearlite kristalleri meydana gelir. Su içerisinde soğutmada ise pearlite teşekkülü tamamen engellenmiş olur ve austenite bütünü ile martensite haline dönüşür⁽⁶⁾.

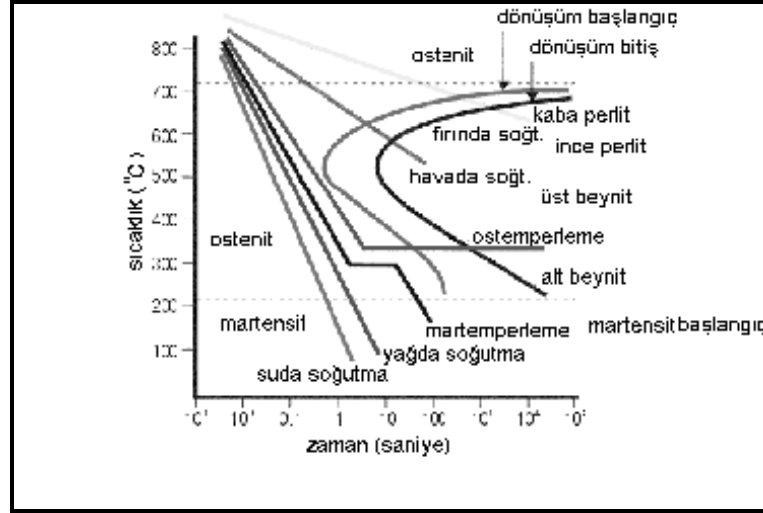
T.T.T diyagramları; soğuma hızı, soğutma ortamı, mikro yapı ve mekaniksel özellikleri hakkında bilgi veririler. Bu nedenle T.T.T diyagramı ısıtma işleminde temel bir anahtardır. Hemen hemen her çeliğin bir T.T.T diyagramı mevcuttur⁽⁴²⁾.

1.6.1. Çeliklerde T.T.T Diyagramları

Austenitenin hızlı soğuma sırasındaki dönüşümü Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm (T.T.T=Time-Temperature-Transformations) diyagramlarından takip edilebilir. T.T.T diyagramlarından austenitenin ne kadar zaman içerisinde ve hangi sıcaklıkta başka bir yapı şekline dönüşmeye başladığı ve bu dönüşümün ne zaman tamamlandığı görülebilir. Austenitenin dönüştüğü diğer içyapılar ferrite, pearlite, bainite ve martensite gibi içyapılardır. Tüm çeliklerde austenite dönüşüm sıcaklığı aynı değildir ve başta karbon oranı olmak üzere alaşım elementlerinin cins ve miktarına bağlıdır⁽⁴³⁾. Austenitenin soğuması sırasında farklı yapısal fazlara dönüşme; dönüşümün başladığı sıcaklığa ve dönüşüm başlaması için gerekli süreye bağlıdır⁽⁴⁴⁾. Bu nedenle

T.T.T diyagramlarından hangi dönüşümlerin hangi fazdayken olduğu belirlenebilir.

T.T.T diyagramlarında soğuma koşulları, sürekli sıcaklık düşmesi veya belirli bir ara sıcaklıkta sabit tutulduktan sonra soğutma tarzlarında olabilmektedir. T.T.T diyagramları yanında aynı diyagram üzerinde ferritik, pearlitik, bainitik ve martensitik dönüşümlerinin başlangıç ve bitişini gösteren eğriler içeren diyagramlar C.C.T (Continuosly-Cooling-Transformations) diyagramları olarak bilinir⁽⁴²⁾. Çeliklere uygulanacak çeşitli ticari ısıtma işlemlerinde değişik soğuma hızlarında çelikte oluşabilecek değişiklikleri gösteren bir diyagram oluşturmak gerekir. Dönüşme reaksiyonunda zaman ve sıcaklık etkilerini ayrı ayrı görebilmek için dönüşme eğrisini değiştirmek gerekir. Bu durumu gösteren eğrilere C.C.T eğrileri adı verilir⁽⁴⁴⁾. C.C.T diyagramlarından, ısıtma işleminden geçen bir malzemenin mikro yapı haritasını oluşturmak için faydalanılır⁽¹⁴⁾. Bu diyagramda soğuma hızının zamanla değişimi gösterilir. Soğutma ortamının sıcaklığı daha düşük seçilirse, örneğin oda sıcaklığında soğutma yapılırsa parçanın sıcaklığı zamana bağlı olarak sürekli azalır. Soğuma ortamı, çeliklerin soğuma hızını doğrudan etkiler böylece farklı soğutma ortamları nedeniyle farklı mikro yapılar oluşabilir. Hava, su veya yağ gibi farklı soğuma ortamlarının T.T.T diyagramıyla ilişkisi aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 1.2. Soğutma Ortamlarının T.T.T Diyagramlarıyla İlişkisi⁽⁴³⁾

1.7. AISI 1117 Çeliğinin Genel Özellikleri

AISI 1117 çeliği iyi şekillendirilebilen yeniden sülfürlenmiş (resulphurized steel) düşük karbonlu bir çeliktir. Çok sünek bir çelik olan AISI 1117 çeliği diğer düşük manganer içeren çeliklerden daha sünektir bu nedenle daha iyi soğuk şekillendirilebilir. AISI 1117 çeliğinin kimyasal içeriği genelde çizelge 1.2 deki değerler aralığında yer almaktadır.

Çizelge 1.2. AISI 1117 Çeliğinin Kimyasal Bileşimi⁽²⁷⁾

Element	AĞIRLIK %
Karbon(C)	0.14-0.20
Mn	1.00-1.30
P	0.04 (max)
S	0.08-0.13

AISI 1117 çeliği serbest şekillendirilebilen çelik (free-machining steel) olarak adlandırılabilir. Bu çeliğin en önemli özelliklerinden biride düşük karbonlu olmasıdır. Düşük karbonlu çelikler genellikle yapı parçaları olarak kullanılırlar. Bunlar çok sünek bir yapıya sahip olmakla birlikte sertleştirilemez karakterdedirler. Bu nedenle düşük karbonlu çeliklerin yüzey sertliği karbürleme adı verilen yöntem ile artırılabilir. Düşük karbonlu çelikler su verme (Water Quenching) sırasında hemen hemen hiç sertleştirilemezler. Düşük karbonlu çeliklerin yumuşak olmaları nedeniyle işlenebilmesi oldukça kolaydır⁽⁹⁾. Bu çelikler diğer çeliklere nazaran daha ucuz maliyete sahiptirler bu nedenle demir çelik sanayinde çok fazla kullanılırlar. Ayrıca TSE standartlarına göre; AISI 1117 çeliği otomat çeliği grubuna girmektedir.

1.8. Kaynak Özetleri

Çelikler ısı ile işleme içyapısı değişebilen malzemelerdir. Bir çelikte arzu edilen bazı özellikleri elde edebilmek için çeliğe katı haldeyken uygulanan bir dizi ısıtma ve soğutma işlemlerinin tümüne ısı işlem denir⁽⁴⁵⁾. Çeliklere

uygulanan ısıt işlemlerde esas amaç malzemenin içyapı değişikliği üzerinden giderek ona belirli bir işleme ve kullanılma özelliği kazandırmaktır. Böylece ısıt işlem ile çeliğin içyapısını dolayısıyla da fiziksel ve mekanik özellikleri değişebilmektedir. Çeliklerin faz dönüşümlerini, mikro yapı özelliklerini ve soğutma ortamlarının çeliğe etkilerinin belirlenmesi için çeşitli çalışmalar yapılmıştır.

E. Güler çalışmasında Fe-12,5%Cr -0,5%C- 0,38%Mn -0,40%Si - 0,25%V (wt%) kimyasal bileşimine sahip yüksek kromlu ve orta karbonlu çeliğin faz dönüşümleri Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Mössbauer yöntemiyle incelenmiştir. Deneysel çalışmaya numunenin (yaklaşık 150 µm) üç parçaya ayrılması ile başlamıştır. Numunenin ilk parçası mikro yapısal inceleme için hazırlanmıştır. Üzerinde herhangi bir ısıt işlem uygulanmamış olan bu parçanın SEM de incelenmesi sonucunda ferrite fazı gözlenmiştir. Numunenin diğer iki parçası ise 24 saatte 1100°C de homojenleştirme işlemine tabi tutulmuştur. Bu homojenizasyondan sonra numunenin ikinci parçası oda sıcaklığında suda soğutulmuştur. Diğer üçüncü parça ise sıvı nitrojende (-196 °C) soğutulmuştur. Daha sonra numunenin ikinci ve üçüncü parçaları SEM için hazırlanmıştır. SEM de gözlenen bu üç parçanın, ilk parçasında ferrite fazı gözlenmiştir. Ferrite fazı oda sıcaklığında çok yaygın gözlenen bir fazdır. Homojenleştirmeden sonra suda soğutulan ikinci parçada ise austenite fazı gözlenmiştir. Bilindiği gibi austenite fazı manyetik olmayan bir katı çözüldür. Aynı zamanda paslanmaz çeliklerde çok fazla tercih edilen bir mikro oluşumdur. Diğer taraftan çelikteki austenitenin bozulması sonucunda belirlenen bainite fazı pearlite bölgesinin alt sınırı ile martensitik

dönüşüm sıcaklığı arasındaki bölgede ferrite ve sementitin bir oluşumudur. Sıvı nitrojende soğutulmuş üçünü parçada ise kalıntı austenite içinde iğneli bainite (alt bainite) fazı gözlenmiştir⁽²⁵⁾.

H.Aktaş ve E.Güler, AISI 1137 tipi orta karbonlu çeliği Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Mössbauer yöntemleri ile incelemiştir. AISI 1137 çeliğin kimyasal bileşimi; Fe-0,14%Cr-0,36%C-1,60%Mn-0,27%Si-0,02%P-0,12%S-0,11%Ni (wt%) şeklindedir. Bu çelik üç parçaya ayrılmıştır ve herhangi bir ısıl işleme tabi tutulmayan çeliğin ilk parçası, oda sıcaklığında ferritik bir mikro yapı sergilemektedir. AISI 1137 çeliğinin diğer iki parçası 1 saatte 1000 °C de homojenleştirilmiştir. Homojenleştirme işleminden sonra sıvı nitrojende (-196°C), diğer üçüncü numune ise oda sıcaklığında suda soğutulmuştur. SEM de yapılan incelemeler sonucunda herhangi bir ısıl işleme tabi tutulmayan ilk parçada daha önce belirtildiği gibi eş eksenli ferrite taneleri gözlenmiştir. Numunenin ikinci parçasında pearlite, son parçasında ise iğneli bainite (alt bainite) oluşumu gözlenmiştir⁽⁴⁰⁾.

S. E. Offerman ve arkadaşları çalışmalarında (wt. %) 0,715 C, 0,611 Mn, 0,266 Cr, 0,347 Si, 0,012 P, 0,03 S, 0,094 Ni, 0,235 Cu, 0,021 Mo, 0,025 Sn bileşimine sahip eutektoid çeliğin izotermal austenite/pearlite dönüşümünü incelemişler. Burada Optik mikroskop incelemesi için 5 mm çapında 10 mm uzunluğunda hazırlanan dört numune 1173 K sıcaklığında 0,5 saatte homojenleştirilmenin ardından 20 K/s hızla 953 K' e soğutulmuştur. Bu dört numune 953 K de sırasıyla 50, 100, 150, 200 saniye bekletildikten sonra oda sıcaklığına soğutulmuştur. Optik mikroskoptaki

incelemelere göre 50 saniyede mikroyapı bireysel pearlite kolonilerinden ibaret iken ;100, 150 ve 200 saniyelerinde bireysel pearlite kolonileri yanında pearlite kolonilerinin oluşturdıkları kümeler büyümeye devam etmiş ve oluşan bu kümeler austenite tane sınırlarında çekirdeklenmiştir⁽⁴⁶⁾.

Ming Gao ve arkadaşları çalışmalarında 86CrMoV7 çeliğinin sıcak haddelenmiş ve haddelenme uygulanmamış durumlarında sürekli soğuma dönüşümlerini incelemişlerdir. Bu çalışmada haddelenmemiş numunelerin yüksek sıcaklıklardan 0,8 °C/s soğuma hızı ile soğutulduğunda martensite fazı gözlenmiştir. Soğuma hızı 0,6 °C/s ' den daha az olduğu durumlarda ise sadece pearlite fazı olduğu gözlenmiştir⁽⁴⁷⁾.

Bu çalışmalarda görüldüğü gibi SEM araştırmalarında farklı soğutma hızlarında ferrite, bainite, austenite gibi farklı fazlar meydana gelmektedir. Farklı soğutma hızlarının çelikteki mikro yapılarda değişikliğe neden olması endüstriyel uygulamalar için önemlidir. Yine SEM sonuçlarında karbon oranı %0,8 den daha az karbon içeren çeliklerde oda sıcaklığında ferrite fazı görülmektedir⁽⁴⁸⁾.

1.8.1. Çalışmanın Amacı

Çeliğin kimyasal bileşimleri, çelikte bulunan karbon oranı çeliklerin fiziksel ve mekaniksel özelliklerini doğrudan etkileyen unsurlardır. Bunun

yanında ısıtım işlem gibi teknikler doğrultusunda soğutma ortamlarına ve soğutma hızlarına bağlı olarak bainite, pearlite, martensite, ferrite gibi değişik mikro yapılar oluşmaktadır.

Bu çalışmada, düşük karbonlu bir çelik olan AISI 1117 çeliği ısıtım işleme tabi tutulmuş ve bunun sonucunda değişik soğutma ortamlarında oluşan fazların mikro yapılarının incelenmesi amaçlanmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Materyal

Bu tez çalışmasına konu olan AISI 1117 çeliği **Fe-0.11%Cr-0.19%C-1.14%Mn-0.19%Si-0.02%P-0.01%Ni (wt%)** kompozisyonuna sahiptir. AISI 1117 çeliği Makine Kimya Endüstrisinden temin edilmiştir.

Hazırlanan bu AISI 1117 çeliğinden mekanik yolla kesilerek çıkarılan yaklaşık 200 µm kalınlıklı ve 1cm çaplı üç numune hazırlandı. Numunelerden bir tanesi hiçbir işleme maruz bırakılmadan saf halde incelenme için ayrıldı. Saf haldeki bu numune çalışmada kolaylık olması bakımından **A grubu** numune olarak adlandırıldı. Diğer iki numune ise aynı sıcaklıkta ısıl işleme (homojenleştirme) tabi tutuldu ve soğutma biçiminin etkisini inceleyebilmek amacıyla; her iki örnekte farklı yöntem ile soğutuldu. Numuneleri homojen hale getirebilmek için; birinci numuneye 1000°C de 1 saat süre ile ısıl işlem uygulandıktan sonra, numune fırın içerisinde kontrollü olarak oda sıcaklığına kadar soğutuldu. Bu şekilde hazırlanan numuneler **B grubu** numuneler olarak adlandırıldı. İkinci numuneye ise 1000°C de 1 saat süre ile ısıl işlem uygulandı ve numune bu sıcaklıktan oda sıcaklığındaki suyun içine atılarak (water-quench) hızlı soğumaya bırakıldı. Bu şekilde soğutulan numuneler ise **C grubu** numuneler olarak adlandırıldı.

Çizelge 2.1. Çalışılan Numunelere Uygulanan İşlemler

A grubu	B grubu	C grubu
Saf haldeki AISI 1117 çeliği	1000 °C de 1 saat homojenleştirilen ve (FC) fırın soğutma	1000 °C de 1 saat homojenleştirilen ve (WQ) hızlı soğutma yapılan numuneler

2.1.1. SEM İncelemeleri İçin Numunelerin Hazırlanması

SEM ile yapılacak yüzey incelemeleri için; saf haldeki çelik örneği ve ısıtma işlemi uygulanarak homojen hale getirildikten sonra fırın soğutma yapılmış (FC) ve hızlı soğutulmuş (WQ) **A, B, ve C** numunelerinden elmas bıçaklı kesici kullanılarak 350µm kalınlığında numuneler kesildi. Kesilen numunelerin yüzeylerindeki pürüzler, sırasıyla 220, 500 ve 1200' lük su zımparaları ile ortadan kaldırıldı. Yüzeyler 9, 6, 3 ve 1µm'lik elmas pastalar kullanılarak parlatıldıktan sonra numunelerin yüzeyleri metanol ile temizlenip kurumaya bırakıldı.

Yüzey incelemesi yapacağımız numunelerin yüzeylerinde oluşan yapıları ortaya çıkarabilmek için numuneler %3 lük Nital çözeltisi içerisinde yaklaşık 5s bekletilerek dağıldı. Yüzey gözlemleri için hazır hale getirilen bu

numuneler 30 kV' luk hızlandırma gerilimine sahip olan JEOL marka JSM-5600 model taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelendi.

2.2. Yöntem

2.2.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

İnsan gözünün çok ince ayrıntıları görebilme yeteneği sınırlıdır. Bu nedenle görüntü iletimini sağlayan ışık yollarının mercekle değiştirilerek, daha küçük ayrıntıların görülebilmesine olanak sağlayan optik cihazlar geliştirilmiştir. Ancak bu cihazlar, gerek büyütme miktarlarının sınırlı olması gerekse elde edilen görüntü üzerinde işlem yapma imkânının olmayışı nedeniyle araştırmacıları bu temel üzerinde yeni sistemler geliştirmeye itmiştir⁽⁴⁹⁾.

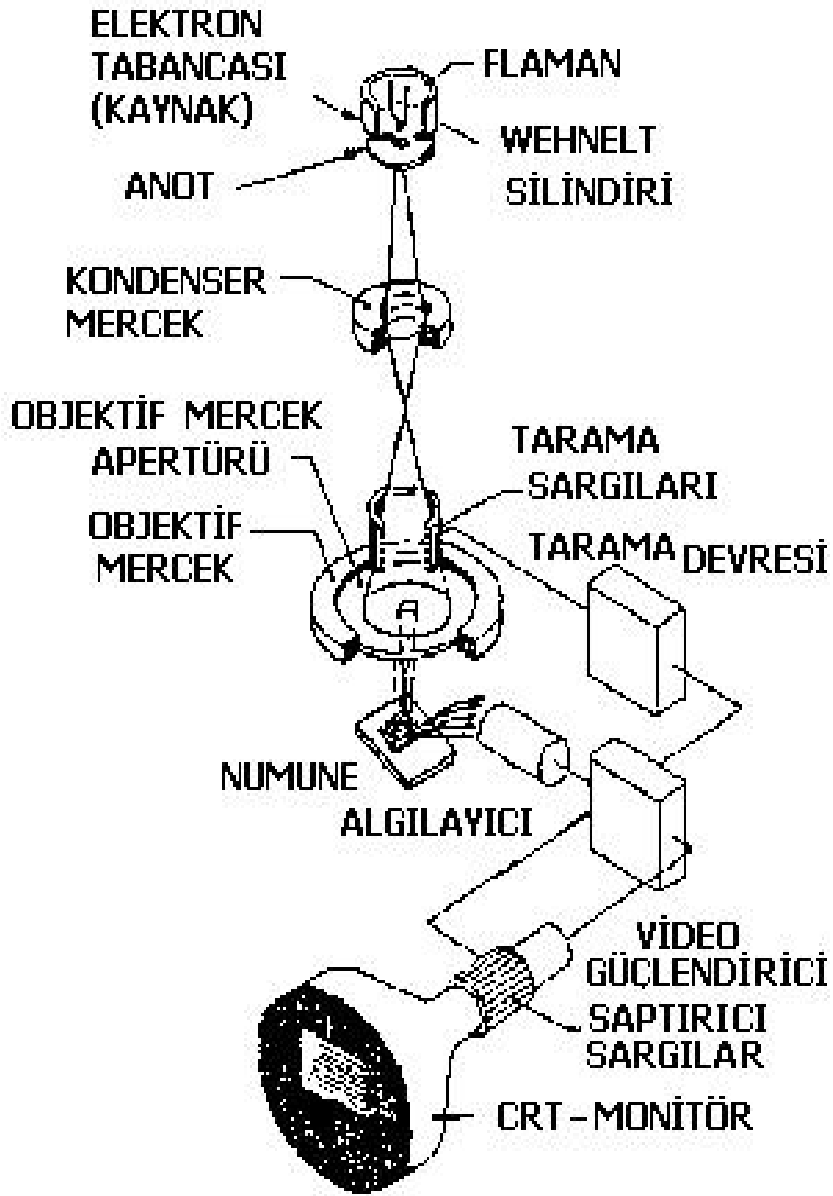
Elektronik ve optik sistemlerin birlikte kullanımı ile yüksek büyütme üzerinde işlem ve analizler yapılabilen görüntülerin elde edildiği cihazlar geliştirilmiştir. Elektro optik prensipler çerçevesinde tasarlanmış taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscope-SEM), bu amaca hizmet eden cihazlardan birisidir. Taramalı Elektron Mikroskobu, odak derinliği, görüntü ve analizi birleştirebilme özelliği nedeniyle araştırma ve incelemede geniş ölçüde kullanılan bir cihazdır. İlk ticari taramalı elektron mikroskobu 1965'de kullanılmıştır⁽⁴⁹⁾.

Genel olarak elektron mikroskopları normal ışık ışınlarıyla çalışan klasik mikroskoplara benzer bir prensiple çalışırlar. Ancak elektron mikroskoplarının dalga boyu görünür ışıktan çok daha küçük ışınlar ile aydınlatma yaptıklarından çözme güçleri çok yüksektir. Bu nedenle yüzey incelemelerinde SEM cihazını kullanmak çok avantajlıdır. SEM katot ışınları tüpü mantığı ile çalışmaktadır. SEM de kopan numunelerin numuneye varmadan hızlarını ve enerjilerin kaybetmelerini engellemek amacıyla, numuneler havası boşaltılmış bir kolona yerleştirilir. Daha sonra uygulanan birkaç volt gerilim ile flamanndan elektronlar kopartılır. Elektron demeti önce uygun potansiyeller altında hızlandırılır. Sonra yüksek voltaj ile hızlandırılmış elektronlar numune yüzeyine düşürülür⁽⁸⁾. Yüzey taraması sırasında elektron demeti ile numune atomları arasında oluşan çeşitli girişimler ve sonucunda meydana gelen etkilerin uygun algılayıcılar tarafından toplanması bunun sonucunda da numuneden yansıyan ışınların katot ışınları tüpünün ekranına aktarılmasıyla görüntü oluşur. Bu görüntüler ile incelenen numunenin yüzeyi hakkında bilgi elde edilebilir.

Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM); malzeme araştırmalarında çok sık kullanılan cihazlardan biridir. Bunun en büyük nedeni, numune hazırlamanın çok kolay olması ve hatta bazı durumlarda numune hazırlama işleminin gerekmemesidir⁽⁵⁰⁾. Ayrıca odak derinliğinin büyük olması sebebiyle kırılma yüzeyleri ve yüzeyin diğer ayrıntılarının incelenmesinde oldukça elverişlidir⁽³¹⁾.

Taramalı Elektron Mikroskopunun şematik yapısı incelenecek olursa; SEM optik kolon, numune hücresi ve görüntüleme sistemi olmak üzere üç temel kısımdan oluşmaktadır⁽⁵¹⁾. Taramalı Elektron Mikroskopunun optik kolon kısmında, elektronları numuneye doğru hızlandırmak için yüksek gerilimin uygulandığı anot plakası, ince elektron demeti elde etmek için kondenser mercekleri, demeti numune üzerine odaklamak için objektif merceği, bu merceğe bağlı çeşitli çapta apartürler ve elektron demetinin numune yüzeyini taraması için tarama bobinleri yer almaktadır. (Şekil 2.1.)

Görüntüyü oluşturmak için elektron tabancası; ısıtılmış bir katot, tek delikli bir kurşun levha ve anottan ibarettir. Elektronlar anota doğru yönlendirilir ve SEM kolonuna girer. Elektronlarca oluşturulan ışık demeti elektro manyetik bobinlerce odaklandırılır⁽¹⁴⁾. Böylece numune üzerinde demetin periyodik olarak soldan sağa ve aynı anda yukardan aşağı kaydırılarak numune analizi yapılabilmektedir. Demetin üzerinde istenilen herhangi bir noktaya odaklanması saptırma bobinlerince kontrol edilir. SEM de incelenen numunelerin iletken olması gerekir. Bu nedenle incelenecek yalıtkan numuneler ince bir altın tabakası ile kaplanır. Organik malzemelerde de bu yöntem uygulanır. Taramalı elektron mikroskobu son yıllarda metalurji, tıp, fizik ve biyoloji gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılır hale gelmiştir.

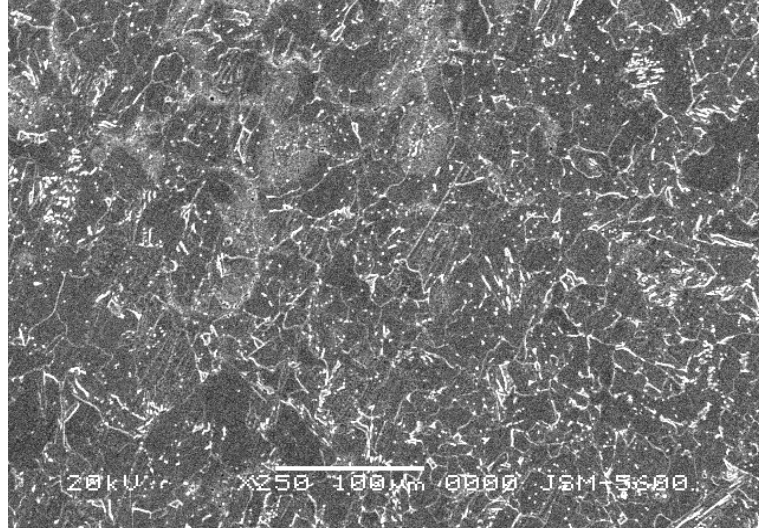


Şekil 2.1. SEM' in Şematik Yapısı

3. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

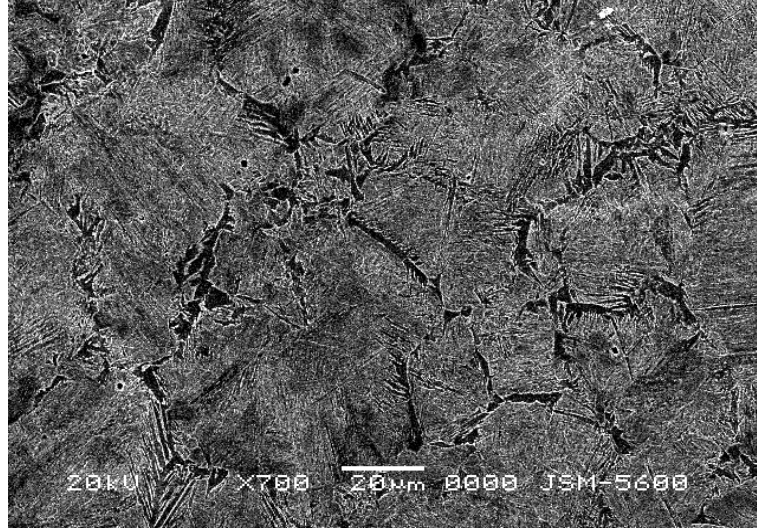
3.1. Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) Bulguları

AISI 1117 eliğinin saf halde hangi faz yapısında bulunduğunu incelemek amacı ile çelikten saf halde alınan A ve homojenleştirildikten sonra iki farklı Şekilde soğutma işlemine tabi tutulan B ve C den alınan örneklerinde oluşan yapının yüzey gözlemleri için taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanıldı. Yapılan yüzey gözlemleri sonucu; saf haldeki elik rneği olan A numunesinde ferrite yapının var olduğu gözlendi. Aynı sıcaklıklarda homojenleştirildikten sonra iki farklı Şekilde soğutulan numunelerden B numunesinin oda sıcaklığında pearlite yapıda olduğu ve C numunesinin ise austenite yapıda olduğu ve bir dönüşümün meydana gelmediği SEM incelemeleri sonucunda belirlenmiştir.



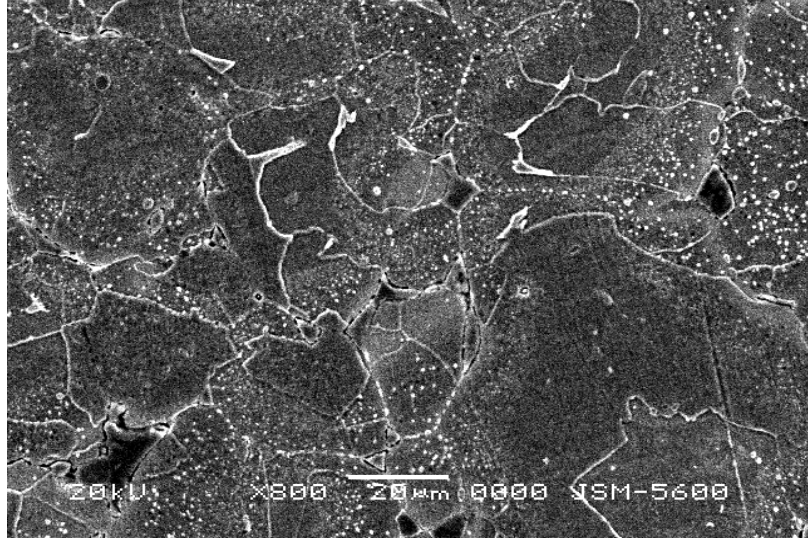
Şekil 3.1. Isıl İşlem Görmemiş AISI 1117 Çeliğinde Gözlenen Ferrite Yapının SEM Görüntüsü

Şekil 3.1.'den anlaşılacağı gibi hiçbir ısıl işleme maruz bırakılmayan saf haldeki AISI 1117 çeliğinden alınan A numunesinde ferritic yapının var olduğu görülmüştür.



Şekil 3.2. 1000°C' de 1 Saat Isıl İşlem Gören ve Fırın İçersinde Soğutulan AISI 1117 Çeliğinde Gözlenen Pearlite Yapının SEM Görüntüsü

Isıl işlemin ve soğutma biçiminin çeliklerdeki önemini incelemek amacı ile incelemeye aldığımız B ve C numunelerinin SEM incelemeleri sonucu da görüldüğü gibi aynı sıcaklıklarda ısıl işleme maruz bırakılan ama yavaş bir biçimde soğutulan numunede (B) pearlite yapının var olduğu ve hızlı bir şekilde soğutulan C numunesinde ise beklenildiği üzere austenite fazın meydana geldiği Şekil 3.3'de görülmüştür. C numunesinde sadece küçük tane boyutlu austenite fazın meydana geldiği ve başka bir yapının bu faz içerisinde oluşmadığı yine SEM incelemesi sonucu belirlenmiştir.



Şekil 3.3. 1000°C 'de 1 Saat Isıl İşlem Gören ve Su İçerisinde Soğutulan AISI 1117 Çeliğinde Gözlenen Austenite Yapının SEM Görüntüsü

4. SONUÇ

Çeliğin uygulanan birçok işlem sonucunda fiziksel ve mekaniksel özellikleri değişebilmektedir. Çelik herhangi bir ısıtma işlemi sonucunda değişik soğuma tarzlarına bağlı olarak kendi içyapısını değiştiren bir malzemedir. Bu nedenle farklı soğutma ortamları nedeniyle farklı mikro yapılar ve fiziksel özellikler sergileyebilmektedir. Çalışmada AISI 1117 çeliğine farklı ısıtma işlemleri uygulanmış ve oluşan fazların morfolojik özellikleri SEM ile incelenerek belirlenmiştir.

Çalışmada AISI 1117 çeliğinin ısıtma işleminden önce yapılan SEM incelemelerinde; hiçbir ısıtma işlemine maruz kalmayan bu çeliğin saf halde ferrite fazda olduğu gözlemlendi. Daha önce bahsedildiği üzere % 0,8 den daha az karbon ihtiva eden çeliklerde oda sıcaklığında genellikle ferrite fazın gözleniyor olduğu bilinmekte idi. Çelikte ısıtma işleminin etkisini gözleyebilmek amacıyla AISI 1117 çeliği 1000°C de 1 saat homojenleştirildikten sonra iki farklı şekilde soğutma işlemi uygulandı. Homojenleşen numune ilk olarak fırın içerisinde yavaş bir şekilde soğumaya bırakıldı ve elde edilen fazın morfolojisi SEM ile incelendi. Böylece karbon atomlarının difüzyonu için yeterli zaman olmasından dolayı kararlı bir faz olan pearlite fazının oluştuğu gözlemlendi. Bir başka soğutma biçimi olarak homojenleştirme işleminden sonra da oda sıcaklığındaki su içerisinde soğutulan çelikte ise hızlı bir soğuma meydana gelmiştir. Hızlı bir şekilde soğutulan bu numunenin austenite fazda olduğu

SEM ile yapılan yüzey incelemeleri sonucu gözlemlendi. Bu bilgi doğrultusunda yapılan bu tez çalışmasının AISI 1117 çeliğine uygulanan ısı işlemler sonucu elde edilen fazların literatür ile uyumlu bir çalışma olduğu belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

1. D.R. Askeland, Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri, Cilt 1., Nobel Yayın, 1998.
2. T. Savaşkan, Malzeme Bilgisi ve Muayenesi, Derya Kitabevi, Trabzon, 1999.
3. W. F. Smith, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, Literatür Yayınları, İstanbul, 2001.
4. M. Dikici, Kati Hal Fiziğine Giriş, 19 Mayıs Üniversitesi Yayınları, Samsun, 1993.
5. T. N. Durlu, Katı Hal Fiziğine Giriş, A. Ü. Fen Fakültesi Yayınları, Ankara, 1989.
6. W. Weissbach, Malzeme Bilgisi ve Muayenesi, Birsen Kitabevi, İstanbul, 1993.
7. W. D. Callister, Materials Science and Engineering An Introduction, 6th ed. John Willey & Sons Inc., New York, 2003.
8. M. Güner, Fe- %32 Ni- %0,4Cr Alaşımında Austenite-Martensite Faz Dönüşümleri ve Bunların Bazı Fiziksel Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, 2003.
9. K. Onaran, Malzeme Bilimi, Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul, 1995.
10. Y. Güngör, Malzeme Bilgisi, Beta Basım A.Ş., İstanbul, 2001.
11. H. E. Stanley, Introduction to Phase Transitions, Oxford Clarendon Press, 1971.

12. J. W. Christian, The Theory of Transformations in Metals and Alloys, Pergamon Press, London, 1975.
13. D. A. Parter and K. E. Easterling, Phase Transformation in Metal and Alloys, Chapman Hall, London, 1981
14. S. Elieyioğlu, eliklerin Isıl işlem Altında Gösterdiği Yapısal Değişikliklerin Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Mössbauer Spektroskopisi İle İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, 2005.
15. D. H. Yeon, P. R. Cha, J. H. Kim, M. Grant and J. K. Yoon, Modelling Simul. Mater. Sci. Eng., A Phase Field Model for phase Transformations An Elastically Stressed Binary, 2005.
16. H. M. Clark and C. M. Wayman, Phase Transformations, ASM, Metals Park, 110,Ohio, 1970.
17. H. Mutluay ve A. Demirak, Malzeme Bilgisi, Beta Basım A.ř, İstanbul,1996.
18. H. K. D. H. Bhadesia, Bainite in Steels, Cambridge University Press, London, 1992.
19. M. Unemoto, J. Mater. Sci., **18**, 2893 (1993).
20. S. Xiaoyan and G. Nanju, ISIJ Int., **36**, 592 (1996).
21. D. R. Ou, Mater. Sci. & Technol., **19**, 87 (2003).
22. M. Enomoto and H. Tsubakino, Mater. Trans. JIM, **32**, 642 (1991).
23. Y. Ohmori and T. Maki, Mater. Trans. JIM, **32**, 631 (1991)..
24. G. Thewlish, Mater. Sci. & Technol., **20**, 143 (2004).
25. E. Güler, Phase Transitionsin in a High- Chromium and Medium- Carbon steel, Hitit niversitesi, orum, 2007.
26. Nishiyama, Martensitik Transformation, Academic Press, London, 1978.
27. G. Baydur, Malzeme, Flaş basıncılık, İstanbul, 1988.

28. L. H. van Vlack, Elements of Metarials Science and Engineering, 6th, Universty of Michigan, Michigan, 1989.
29. R. Özcan, Fe-%3,1 Ni-%0,6 Cr-%0,2 Si-%0,2 Mn Alaşımındaki Kristalografik Faz Dönüşümlerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, 2006.
30. L. H. van Vlack, Elements of metarials and Engineering, University of Michigan, Addison-Wesley Pupliching Co. (1989).
31. Ş. Ocak, Fe-%2Mn-%0,5Cr Alaşımında Austenite- Bainite- Martensite Faz Dönüşümlerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, 2003.
32. M. Oka and H. Okamoto, J. Phys, **5**, 503.(1995).
33. J. M. Oblok, R. H. Goodenow, R. F. Hehemann, Trans. AIME, **230**, 253.(1964).
34. J. W. Christian, The Theory of Transformations in Metals and Alloys, 1th, Pergamon Press, Oxford, 1965.
35. P. C. Clapp, proceeding ICOMAT 95, C. 8-11, Lousenne, (1985).
36. J. W. Christian, Journal of Inst. Metals, **84**, 386 (1965).
37. H. M. Otte, Acta Met., **5**, 614 (1957).
38. D. R. Askeland, Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri, Cilt 2., Nobel Yayın, 1998.
39. H. Yalçın ve M. Gürü, Malzeme Bilgisi, Palme Yayıncılık, Ankara, 2003.
40. E. Güler and H. Aktaş, Mössbauer Studies on an AISI 1137 Type Steel, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, 2006.
41. H. W. W. G. MOFFAT, J. WULFF, Malzemelerin Yapı ve Özellikleri, Cilt 1 Mekanik Özellikler, İTÜ yayınları, İstanbul, 1993.

42. H. Akbulut, Fiziksel Metalurji-II, Ders Notları, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 2007.
43. S. Ulu, Karbonlu ve Düşük Alaşımli Çeliklerin Temel Mekanik Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon, 2004.
44. F. M. Harman, Çeliğin Isıl İşleminin Teorik ve Pratik Esasları, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, İzmir, 2003.
45. W. H. Clobberly, Metals Handbook, Vol. IV Heat Treating- 9th, ASM, Metals Park, Ohio, 1991.
46. S. E. Offerman, L. J. G. W. van Wilderen, N. H. van Dijk, J. Sietsma, M. Th. Rekveldt and S. van der Zwaag, In-Situ Study of Pearlite Nucleation and Growth During Isothermal Austenite Decomposition in Nearly Eutectoid Steel, Delf University of Technology, The Netherlands, 2003.
47. M. Gao, H. Gu, F. Xiao, B. Liao, G. Qiao, K. Yang and Y. Shan, Effect of Hot Deformation on Pearlite Transformation of 86CrMoV7 steel, Yanshan University, China, 2004.
48. W. G. Moffat, The Structure and Properties of Materials, John Willey & Sons Inc. Vol.1, New York, 1967.
49. <http://host.nigde.edu.tr/hytem/YAYINLAR/SEM> Erişim tarihi:15.11.2007
50. R. A. Grange, V. E. Lambert and J. J. Harrington, Trans. ASM, 51: 377, 1959.
51. M. A. Hayat, Principles and Techniques of Scanning Electron Microscopy, New York, Van Nostrand Reinhold CO., 1974.