İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK KARBONLU BİR ÇELİĞİN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE İZOTERMAL TAVLAMANIN ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mustafa Serdar KUZYAKA

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

EYLÜL 2014

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK KARBONLU BİR ÇELİĞİN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE İZOTERMAL TAVLAMANIN ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mustafa Serdar KUZYAKA
(506111423)

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Murat BAYDOĞAN

EYLÜL 2014

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 506111423 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Mustafa Serdar Kuzyaka**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **"YÜKSEK KARBONLU BİR ÇELİĞİN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE İZOTERMAL TAVLAMANIN ETKİSİ"** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Murat BAYDOĞAN** .....
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENOĞLU** .....
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Erdem ATAR .....
Gebze Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 29 AĞUSTOS 2014
Savunma Tarihi : 2 EYLÜL 2014

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca yaptığım çalışmalarda ve araştırmalarda bütün bilgi ve deneyimini benimle paylaşan, ve bana her konuda destek olan tez danışmanım Doç. Dr. Murat BAYDOĞAN'a, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşarak bana yol gösteren ve desteklerini esirgemeyen hocam Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar çalışmalarımda bana yardımını esirgemeyen, deneyimlerini benimle paylaşan Araş. Gör. Faiz MUHAFFEL'e ve Araş. Gör. Yakup YÜREKTÜRK'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Numunelerin tedariğinde ve deney aşamasında desteğini esirgemeyen Yük. Müh. E.Özgür GÜNGÖR'e ve Ekobant Metal San. ve Tic. Ltd. Şti. çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım. Mekanik Metalurji Laboratuvarında çalışan tüm araştırma görevlilerine ve arkadaşlarıma yardımlarından ve desteklerinden dolayı teşekkürü bir borç bilirim. Tez sürecinde manevi desteğinden dolayı Duygu ESEN'e teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca ilgisini ve desteğini benden esirgemeyen, maddi manevi her zaman yanımda olan ve bugünlere gelmemi sağlayan aileme minnetlerimi sunar ve çok teşekkür ederim.

Eylül 2014

Mustafa Serdar KUZYAKA

Metalurji ve Malzeme Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **v**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
KISALTMALAR ..... **ix**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xi**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xiii**
SEMBOL LİSTESİ ..... **xv**
ÖZET ..... **xvii**
SUMMARY ..... **xix**
1. GİRİŞ **1**
2. SADE KARBONLU ÇELİKLER **2**
2.1. Sade Karbonlu Çeliklerin Özellikleri 2
2.1.1. Sade karbonlu çeliklerin mikroyapısı 2
2.1.2. Sade karbonlu çeliklerin fizksel ve mekanik özellikleri 5
3. ISIL İŞLEMİN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ **7**
3.1. Çeliklere Uygulanan Isıl İşlemler 7
3.1.1. Östenitleme 9
3.1.2. Su verme 9
3.1.3. Temperleme 10
3.1.4. Tam tavlama 11
3.1.5. Normalleştirme (Normalizasyon) 12
3.1.6. Küreleştirme 12
3.1.7. Gerilme giderme 13
3.1.8. İzotermal Tavlama 13
3.1.8.1. Östemperleme 13
3.1.8.2. Martemperleme 14
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR **17**
4.1. Deney Malzemesi 17
4.2. Östenitleme ve İzotermal Tavlama Isıl İşlemleri 17
4.3. Mikroyapı İncelemeleri 19

4.4. Sertlik Deneyleri 19
4.5. Eğme Deneyleri 19
5. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME 21
5.1. Mikroyapı İncelemeleri 21
5.2. Sertlik Deneyi Sonuçları 26
5.3. Eğme Deneyi Sonuçları 29
6. GENEL SONUÇLAR 33
KAYNAKLAR 35
ÖZGEÇMİŞ 37

KISALTMALAR

AISI : Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü (American Iron and Steel Institute)
SAE : Otomotiv Mühendisleri Derneği (Society of Automotive Engineers)
SEM : Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope)
TTT : Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm (Time-Temperature-Transition)
DIN : Alman Standartları (Deutsche Institut für Normung)
Ms : Martensit başlangıç sıcaklığı
Mf : Martensit bitiş sıcaklığı
PID : Oransal İntegral Türevsel (Proportional Integral Derivative)
HRA : Rockwel A sertliği
HRC : Rockwell C sertliği
MPa : Megapascal
ağ. : Ağırlık
s : saniye

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1. : Üç farklı sade karbonlu çeliğin fiziksel ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması 5

Çizelge 3.1: Farklı ısıl işlemlerin AISI 1095 kalite çeliğin mekanik özelliklerine etkisi 16

Çizelge 4.1 : Bu çalışmada kullanılan C70 kalite çelik sacın kimyasal analizi 17

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Demir-karbon faz diyagramı 2

Şekil 2.2 : Perlitin (a) optik ve (b) SEM mikroyapı fotoğrafları. 3

Şekil 2.3 : Ötektoid altı sade karbonlu bir çeliğin optik mikroyapı fotoğrafı 3

Şekil 2.4: Ötektoid, sade karbonlu çelik için izotermal TTT diyagramı 4

Şekil 2.5 : Östenit sahasından farklı sıcaklıklara soğutulan bir çeliğin optik mikroyapı fotoğrafları 4

Şekil 3.1 : Isıl işlem kademeleri 8

Şekil 3.2 : Çeliklere uygulanan ısıl işlemlerin Demir-Karbon denge diyagramı üzerinde gösterilişi 8

Şekil 3.3 : TTT diyagramı üzerinde kritik soğum hızının gösterimi 9

Şekil 3.4 : DIN 42CrMo4 çeliğinin TTT diyagramı..... 11

Şekil 3.5 : (a) ve (b) Martemperleme işlemi ısıl çevrim diyagramları 15

Şekil 4.1 : Deney numunelerin fırına yerleştirildiği kafes sistemi. 18

Şekil 4.2 : (a) Östenitleme ve temperleme fırını ve (b) Tuz banyosunun genel görünümü. 18

Şekil 5.1 : C70 kalite sacın orijinal haldeki optik mikroyapı fotoğrafı 21

Şekil 5.2 : 200°C sıcaklıkta izotermal tavlama uygulanan numunelerin optik mikroyapı fotoğrafları 22

Şekil 5.3 : 250°C sıcaklıkta izotermal tavlama uygulanan numunelerin optik mikroyapı fotoğrafları 23

Şekil 5.4 : 300°C sıcaklıkta izotermal tavlama uygulanan numunelerin optik mikroyapı fotoğrafları 24

Şekil 5.5 : 350°C sıcaklıkta izotermal tavlama uygulanan numunelerin optik mikroyapı fotoğrafları 25

Şekil 5.6 : Temperleme işlemi sonrası (a) 250°C, (b) 300°C ve (c) 350°C sıcaklıkta 30 dakika süreyle izotermal tavlama uygulandıktan sonra temperlenen numunelerin optik mikroyapı fotoğrafları 26

Şekil 5.7 : 200°C'de izotermal tavlama ve temperleme uygulanan numunelerin sertliğinin izotermal tavlama süresine bağlı olarak değişimi 27

Şekil 5.8 : 250°C'de izotermal tavlama ve temperleme uygulanan numunelerin sertliğinin izotermal tavlama süresine bağlı olarak değişimi 28

Şekil 5.9 : 300°C'de izotermal tavlama ve temperleme uygulanan numunelerin sertliğinin izotermal tavlama süresine bağlı olarak değişimi 28

Şekil 5.10 : 350°C'de izotermal tavlama ve temperleme uygulanan numunelerin sertliğinin izotermal tavlama süresine bağlı olarak değişimi 29

Şekil 5.11 : (a) 200, 250, 300 ve 350°C farklı sıcaklıklarda izotermal tavlama uygulanan ve (b) izotermal tavlama sonrası temperlenen numunelerin 3 - noktalı eğme deneyinde elde edilen gerilme – eğme birim şekil değişim eğrileri..... 30

SEMBOL LİSTESİ

γ **:** Östenit

P **:** Perlit

B **:** Beynit

M **:** Martensit

P **:** Temperleme parametresi

T **:** Temperleme sıcaklığı

k **:** Temperleme sabiti

t **:** Temperleme süresi

K **:** Kelvin sıcaklığı

YÜKSEK KARBONLU BİR ÇELİĞİN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE İZOTERMAL TAVLAMANIN ETKİSİ

ÖZET

Çelik, bir demir-karbon alaşımıdır. Çelikte karbon dışında farklı oranlarda alaşım elementleri ve empürite elementler bulunur. Değişik özelliklerde çelik üretmek için farklı oranlarda alaşımlama yapılabileceği gibi, çeşitli ısıl işlemler uygulanarak (östemperleme, normalizasyon, vb.) mikroyapı da değiştirilebilir.

Çelikte ana ısıl işlem prosedürleri genelde östenit dönüşümünü içerir. Bu dönüşüm ürünlerinin özelliği çeliklerin mekanik ve fiziksel özelliklerini belirler. Bu nedenle, çeliğin ısıl işleminin ilk aşaması çoğu kez, malzeme mikroyapısını östenite dönüştümek olmaktadır. Çeliğin östenitlenmesindeki amaç; daha sonra yapılacak olan soğutma işleminde istenilen mikroyapıyı sağlamak içindir. Östenit oluşumu karbonun difüzyon hızına bağlı olarak belirli bir zaman aralığında gerçekleşmektedir.

Yüksek karbonlu çeliklere uygulanan ısıl işlemler, genel olarak, akma ve çekme dayanımını arttırmak, süneklik ve tokluk özelliklerini iyileştirmek, aşınma dayanımını arttırmak, tane yapısını inceltmek ya da malzemenin işlenebilirliğini arttırmak için yumuşatmak amacıyla uygulanmaktadır.

Bu çalışmada C70 kalite çelik saca, östenitleme sonrası, farklı sıcaklıklardaki (200, 250, 300 ve 350°C) tuz banyosunda izotermal tavlama ve ardından temperleme ısıl işlemleri uygulanmış ve bu işlemlerin, malzemenin, mikroyapı, sertlik ve eğme davranışına etkisi incelenmiştir. Çalışmada kullanılan ısıl işlem sıcaklıklarını belirlemede, literatür bilgileri, demir-karbon denge diyagramı ve TTT diyagramları esas alınmıştır.

Bu işlemler sırasında, yukarıda sıralanan her bir izotermal tavlama sıcaklığında 5 saniye ile 90 dakika arasında 11 farklı tavlama süresi esas alımıştır. Böylece belirli bir izotermal tavlama sıcaklığında, farklı tavlama süresinin etkisinin görülmesi mümkün olmuştur. Ayrıca ürünlere uygulanan temperleme ile temperleme sonrası mekanik özelliklerin nasıl değiştiği de belirlenmiştir.

Deneysel çalışmaların sonuçları, izotermal tavlama ısıl işlemiyle başlangıçta ferrit ve perlitten ibaret mikroyapının çoğunlukla martensitik mikroyapıya dönüştüğünü, bazı tavlama sıcaklık ve sürelerinde ise yapıda beynitin de görüldüğünü ortaya çıkarmıştır. Temperleme işlemi sonucu ise temperlenmiş martensitik mikroyapı elde edilmiştir.

Numunelerin sertlik değerleri, tüm sıcaklıklarda, artan izotermal tavlama süresi ile birlikte düşme eğilimi göstermektedir. Temperleme işlemi, beklendiği gibi, izotermal tavlama sonrası elde edilen sertlik değerlerini azaltmaktadır. Ancak temperleme sonrası sertlik değerleri, izotermal tavlama süresine bağlı olarak önemli bir değişim göstermemektedir.

Uygulanan izotermal tavlama işlemi, numunelerin eğme dayanımını arttırırken, eğme birim şekil değişimini azaltarak yapının gevrekleşmesine neden olmuştur. Temperleme sonrasında ise, eğme dayanımı, izotermal tavlama sonrasına göre bir miktar azalırken, orijinal durumdaki numunenin eğme dayanımına göre artmış, eğme birim şekil değişimi de artarak orijinal durumdaki numunenin değerine yaklaşmıştır.

Elde edilen deneysel sonuçlar, numunelere izotermal tavlama ve ardından uygulanan temperleme işlemi ile, orijinal hale göre yaklaşık aynı süneklik fakat daha yüksek eğme dayanımı kazandırılabildiğini dolayısıyla incelenen C70 kalite çeliğin tokluğunun izotermal tavlama ve temperleme işlemleriyle arttırılabildiğini göstermektedir.

EFFECT OF ISOTHERMAL ANNEALING ON MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF A HIGH CARBON STEEL

SUMMARY

Steel is an iron-carbon alloy. It contains various alloying additions in different ratios and impurity elements in addition to carbon. In order to produce steel with different properties, alloying elements can be added into chemical composition or various heat treatments procedures (austempering, normalization etc.) can be followed to alter the microstructure.

Main heat treatment procedures of steels usually involve transformation of austenite into various transformation products depending on cooling rate and temperature. Inherent properties of these transformation products determine the mechanical and physical properties of steel. Therefore the first step in the heat treatment of steel is to transform the microstructure into austenite. The main objective of austenitizing is to provide a completely austenitic structure which will be transformed into various products in the next steps of the heat treatment. Transformation of the initial microstructure into austenite is completed in a time period depending on the diffusion rate of carbon.

Heat treatments applied to high carbon steels, generally have an objective to increase yield and tensile strength, to improve ductility and toughness properties, to increase wear resistance, to reduce grain size and to improve machinability by decreasing hardness of the material.

There are several heat treatment types for steels including, quenching, tempering, normalizing, stress relieving, recrystallization, austempering and martempering. In the quenching heat treatment, parts are heated to the austenite region above the upper critical point varying as a function of carbon content of the steel. They are hold at this temperature for a time enough to transform initial microstructure into austenite. This is the necessary stage of all heat treatment process which aim to produce a different microstructure after the heat treatment. Because all non-equilibrium transformation products such as martensite or bainite can be produced by the transformation of austenite. After the whole parts are transformed into austenite, which generally requires holding the parts at the respective temperature for one hour per one inch of part thickness, the parts are cooled down to room temperature at a cooling rate depending on the type of product. For example, when a martensitic structure after heat treatment is desired, the part must be rapidly cooled down to room temperature to avoid the formation of other transformation products such as pearlite or bainite. Such a high cooling rate can be determined from the TTT diagram of the steel employed and is called as critical cooling rate. This means the minimum cooling rate to be used to obtain a completely martensitic structure. In fact, it is very difficult to perform such a high cooling rate for low carbon and low alloyed steels because transformation curves on TTT diagrams of those steels are very close to the left side of TTT diagram and in practice it is impossible to cool the specimen without

intersecting the transformation curves. In order to be ensure the completely martensitic structure, steel must contain higher carbon and/or higher amount of alloying elements, which shift the transformation curves rightwards and allow to apply a cooling rate higher than the critical cooling rate. These types of steels which can be hardened by quenching are called as heat treatable steels and generally contain 0.4-0.6% carbon in their compositions. After quenching heat treatment, parts are very hard and have limited usage in service due to highly brittle nature of martensite. In order to improve toughness, a post heat treatment following quenching must be perform, which is called tempering. By the application of tempering heat treatment just after the quenching, toughness can be significantly improved at the expense of hardness. However, even though the parts lost their hardness during tempering, they still have enough hardness to be used in service.

Another common heat treatment is normalizing applied to steels which have been subjected to some previous thermal and/or deformation processes such as, casting, plastic deformation, welding etc. These type of production techniques result in a coarser grain structure and the grain distribution throughout the microstructure as well. In these cases, normalizing heat treatment refines the grain structure and makes them more uniform. Normalizing is similar to quenching heat treatment in that heating and holding stages of the heat treatment are the same but the cooling stage is different. The cooling rate must be slower with respect to that of quenching. Therefore, the parts are generally cooled in air in normalization.

Stress relieving heat treatment does not lead to microstructural transformation but relieves the internal stresses produced by casting, welding or plastic deformation processes. Stress relieving heat treatment consists of heating the parts to a temperature lower than the lower critical temperature (A1), holding at this temperature for a while and then cooling the parts to the room temperature in air. Recrystallization heat treatment is similar to stress relieving heat treatment in that the achieved temperatures during heating. It also requires heating the parts to a temperature lower than the lower critical temperature (A1), holding at this temperature for a while and then cooling the parts to the room temperature in air. This temperature should be higher than the recrystallization temperature of the part which is generally higher than 40% of absolute melting temperature of the part in Kelvin. Recrystallization removes the deformed grain structure by producing new and undeformed grains within them.

There are two most commonly used isothermal heat treatments for steels such as austempering and martempering. Austempering involves cooling the part which has been already austenitized to a temperature between the nose of TTT diagram and Ms temperature. The parts are soaked at these temperatures for a time enough to complete the transformation. It means that parts must be soaked for a time which is higher than the time corresponding the second transformation curve on TTT diagram. The resulting microstructure is upper bainite or lower bainite depending on the isothermal transformation temperature. Temperatures close to the nose of TTT diagram produce upper bainite and temperatures close to Ms temperature produce lower bainite. Bainitic structures generally have lower hardness but higher toughness with respect to the martensitic structures.

Another isothermal heat treatment is called as martempering. It involves rapid cooling the austenitized parts to a temperature just above the Ms temperature or between the Ms and Mf temperatures, soaking the parts at this temperature for a time

and cooling the parts to room temperature before the first transformation curves are crossed. Martempering produces a martensitic microstructure and therefore requires a tempering heat treatment afterwards. The main objective of applying martempering instead of conventional quenching is to decrease the temperature difference between the surface and center which is usually the case in large section size parts. As a result of decreasing temperature difference, more uniform martensitic structure can be obtained.

In this study, isothermal annealing was performed to C70 quality steel sheet in a salt bath at 200, 250, 300 and 350°C after austenitizing performed at 850°C for 150 s and the samples were then tempered at 415°C for 150 s. Effect of these heat treatments on microstructure, hardness and bending properties was then investigated. Heat treatment temperatures used in this study are based on information from the literature and TTT diagrams.

For the experimental procedure performed in this study, steel samples were supplied from Ekobant Metal San. Tic. Ltd. Şti. in the form of 0.8 mm thick sheets. Chemical composition of the steel was as follows (in. wt%): 0.73C, 0.27Si, 0.55Mn, 0.014P, 0.008S, 0.21 in total for Cr, Ni, Mo, Cu, Al, Ti and V and the balance Fe. According to the information given by the supplier, the sheets were first procuced by continiuous casting in the form of slab with a thickness of 200 mm. The slabs were then further rolled into a thickness of 65 mm by a slab press first and then into a thickness of 4 mm by series of hot rolling process, and the hot rolled sheets were obtained. Followed by acid cleaning and trimming of the hot rolled sheets, the thickness were reduced into 4 mm, 2 mm and 0.85 mm by successive cold rolling and intermediate recrystallization steps, and the sheets were finally subjected to temper rolling reducing the thickness of the sheets into 0.8 mm as the final thickness.

For microstructural examinations, samples mounted in bakelite were prepared by the standard metallographic procedure and examined by a Leica DM750M optical microscope. Hardness were measured by Rockwell A hardness scale (HRA) by using a Zwick/Roell ZHR hardness tester. At least five measurements were taken on the wide surfaces of the samples and the results were averaged.

For bending tests, samples with the dimensions of 80 mm (l) x 22 mm (w) and 0.8 mm (t) were used. The tests were performed in 3-point bending apparatus by Shimadzu AGS-J universal testing system with a load cell of 10 kN. In the 3-pont bending tests diameter of the mandrel and supports was 5 mm and the length between the supports was 25 mm.

Three successive heat treatment process were used in this study: Austenitizing, isothermal annealing and tempering. For austenitizing, samples cut from the sheets in the dimensions given above were loaded in a Kerr 915 model furnace by hanging on a steel frame. After austenitizing performed at 850°C for 150 s was completed, the samples were rapidly removed from the furnace and transferred to a salt bath for isothermal annealing. Isothermal annealing was performed in a salt bath established in a stainless steel container containing AS135 annealing salt. The isothermal annealing furnace was a vertical Nabertherm HO 60/E model furnace. After the predetremined isothermal annealing times at a given isothermal annealing temperature, the samples were removed from the salt bath and then air cooled to room temperature. After cooled to room temperature in air, the samples were then loaded to tempering furnace. Tempering as the final heat treatment was performed in the same furnace with austenitizing.

In the isothermal annealing, 11 annealing durations at a given isothermal temperature in between 5 seconds and 90 minutes were employed. This made possible to see the effect of annealing time at a given annealing temperature. In addition, tempering performed just after isothermal annealing revealed effect of tempering heat treatment on the properties of the samples.

Experimental results showed that the initial ferrite and pearlite microstructure generally transformed into martensite. And some temperature and times produced a bainitic microstructure. Tempered martensitic microstructure was obtained after tempering heat treatment.

Hardness of the samples has a decreasing tendency with increasing annealing times at a given annealing temperature. Tempering heat treatment decreases the hardness values obtained after isothermal annealing, as expected. However, hardness values after tempering did not exhibit a significant variation with respect to isothermal annealing time.

The applied isothermal annealing increases bending strength and decreases bending strain and thus made the material more brittle. On the other hand, bending strength values significantly decrease with respect to those obtained after isothermal annealing and increase with respect to the original specimen. Bending strain also increases getting closer to values exhibited by the original sample.

Experimental results showed that a higher bending strength and almost the same bending ductility with respect to the original sample can be obtained by proper selection of isothermal annealing and tempering heat treatment. Finally results also indicated that toughness of C70 quality steel could be improved by isothermal annealing and tempering.

1. GİRİŞ

Yapılarında, demir, karbon, manganez ve silisyumun yanı sıra kükürt ve fosfor gibi çelik üretim yöntemlerinden gelen empürite elementler bulunduran demir karbon alaşımlarına sade karbon çelikler denir. Kullanım alanları yapı ve imalat sektörü olduğundan ötürü imalat çelikleri olarak da bilinirler [1].

Sade çelikler karbon oranına göre üç ana sınıfa ayrılırlar: Düşük karbonlu çelikler (<%0.2C), orta karbonlu çelikler (%0.2-0.5 C) ve yüksek karbonlu çelikler (>%0.5C) [2]. Öte yandan, karbon oranı, % 0.8'in altında olanlar ötektoid altı, % 0.8 olanlar ötektoid çelikler ve % 0.8'in üzerinde olanlar ötektoid üstü çelikler olarak bilinir. Sade karbonlu çelikler, Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü (AISI) tarafından tanımlandığı şekliyle, en fazla % 1.65 manganez, % 0.60 silisyum, % 0.60 oranında bakır ve çok düşük miktarlarda diğer elementlerden içerebilir. Bu çelikler için kompozisyon aralıkları Otomotiv Mühendisleri Derneği (SAE) ve AISI tarafından belirlenmiştir [3].

Karbon oranlarına göre üçe ayrılan bu çeliklerden, yüksek karbonlu çeliklerin sertlik ve darbe özellikleri, karbon oranına bağlı olarak önemli ölçüde değişmektedir. İçinde alaşım elementi olsun ya da olmasın, orta ve yüksek karbonlu çeliklere, uygun mekanik özellikler sağlamak için ısıl işlem uygulanmaktadır. Çeliklere uygulanan ısıl işlem yöntemleri, tavlama, sertleştirme ve temperleme olarak 3 ana grupta toplanabilir. Genel anlamda ısıl işlem, metal veya alaşımlara istenilen özellikleri kazandırmak amacıyla katı halde uygulanan kontrollü ısıtma ve soğutma işlemleri olarak tanımlanır. Türk standartlarındaki tanımı ise, katı haldeki metal veya alaşımlara belirli özellikler kazandırmak amacıyla bir veya daha çok sayıda, yerine göre ardışık olarak uygulanan ısıtma ve soğutma işlemleri olarak belirtilmektedir [4].

Bu tez çalışmasında C70 kalite yüksek karbonlu bir çeliğe, östenitleme sonrası, farklı sıcaklık ve sürelerde izotermal tavlama, daha sonra da temperleme ısıl işlemi uygulanmıştır. Uygulanan ısıl işlemlerin, çelik mikroyapısı ve mekanik özelliklerine etkisini incelemek amacıyla, metalografik mikroyapı incelemesinin yanı sıra sertlik ve eğme deneyleri yapılmıştır.

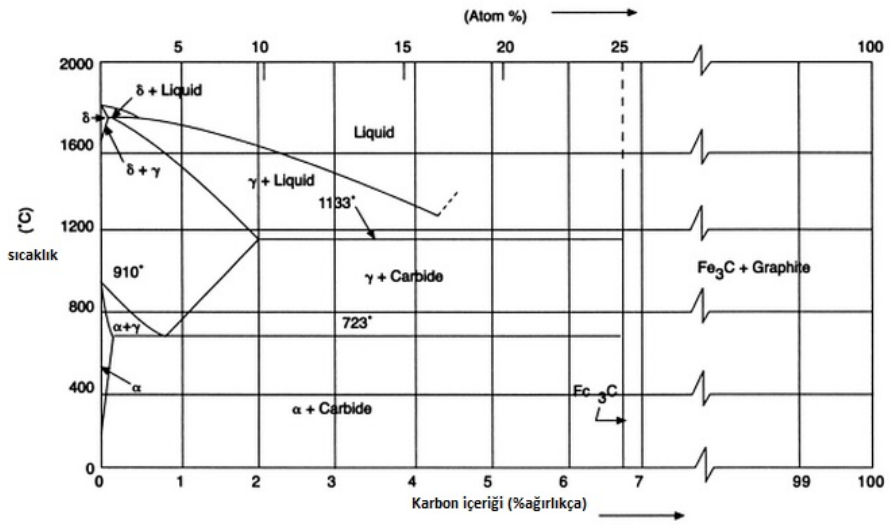
2. SADE KARBONLU ÇELİKLER

Sade karbonlu çelikler öncelikli olarak, sac ve şerit formlarında, tüketim malları imalatı gibi alanlarda kullanılmaktadır. Kullanım alanının geniş bir aralıkta değişmesi, yeterli dayanıma sahip olması, kaplama işlemlerine ve seri üretime uygun olmalarından dolayı çok sayıda araştırmaya konu olmuştur [5,6].

2.1. Sade Karbonlu Çeliklerin Özellikleri

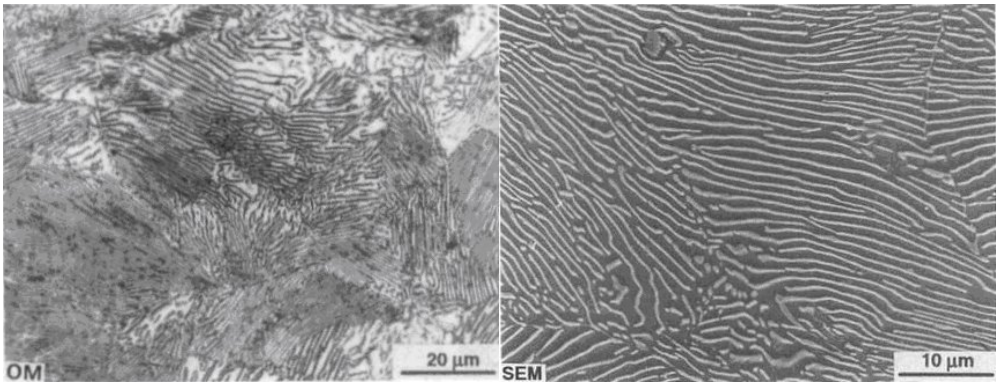
2.1.1. Sade karbonlu çeliklerin mikroyapısı

Şekil 2.1'de verilen Fe-C faz diyagramına göre, kimyasal bileşiminde % 0.8 karbon içeren bir çeliğin mikroyapısı, 723°C'nin üzerinde östenit, altında ise ferrit ve sementitten ibarettir. Dolayısıyla, bu çelik östenit sahasından saate 50°C gibi bir hızla oda sıcaklığına yavaşça soğutulduğunda, 723°C'nin altında lameler morfolojide ferrit ve sementit oluşacaktır. Ferrit ve sementitin bu morfolojisinden oluşan yapıya perlit, östenitin soğuma sırasında 2 katı faza dönüşme reaksiyonu ise ötektoid reaksiyon olarak bilinmektedir. Perlitin, optik ve SEM mikroyapı fotoğrafları, Şekil 2.2'de görülmektedir. Çeliğin karbon oranı % 0.8'den az olduğunda (ötektoid altı çelik), mikroyapı, ferrit ve perlit (Şekil 2.3), % 0.8'den fazla olduğunda (ötektoid üstü çelik) ise mikroyap ferrit ve sementtiten ibaret olmaktadır [7].



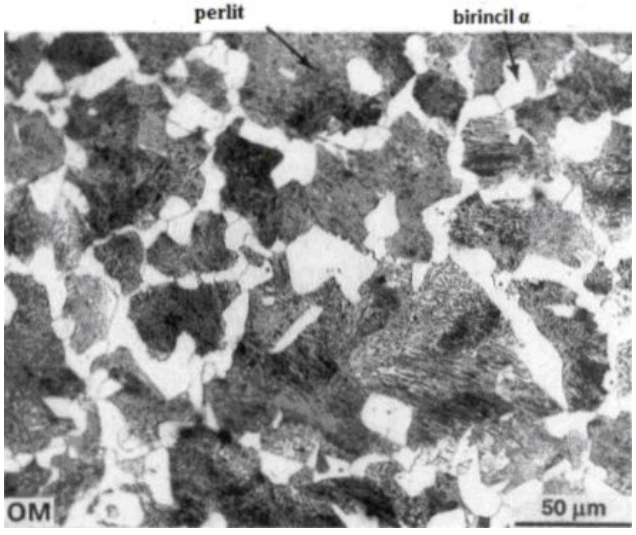
Şekil 2.1 : Demir-karbon faz diyagramı [7].

Düşük alaşımlı çeliklerde denge dışı soğuma koşullarında oluşan faz ya da yapılar ise TTT diyagramları üzerinde gösterilir (Şekil 2.4). Bu diyagramlarda, dönüşümün başladığı ve tamamlandığı sıcaklık ve zaman değerlerini gösteren dönüşüm eğrileri bir C eğrisi şeklindedir. Dönüşüm eğrilerinin burun noktası yaklaşık 550°C'dir ve östenit sahasından soğutulan ötektoid bir çelikte, östenit, burun noktasının üzerinde perlite altında ise beynite dönüşmektedir. Şekil 2.5'de östenit sahasından farklı sıcaklıklara kadar havada soğutulan, bu sıcaklıkta bir süre bekletildikten sonra ise suda soğutulan çelik mikroyapıları görülmektedir. Buna göre, östenit bölgesinden havada soğutma yapılırken, sıcaklık düştükçe, dönüşüm eğrileri arasında daha sağa yakın bir noktaya erişildiğinden, beynit miktarı daha fazla olarak gerçekleşmektedir. Bu sırada, henüz dönüşüm tamamlanmadığından yapıda beynit ile birlikte dönüşmemiş östenit bulunmakta ve suda soğutma sonucu martensite dönüşmektedir. Sonuç olarak nihai mikroyapı, beynit ve martensit olmaktadır.

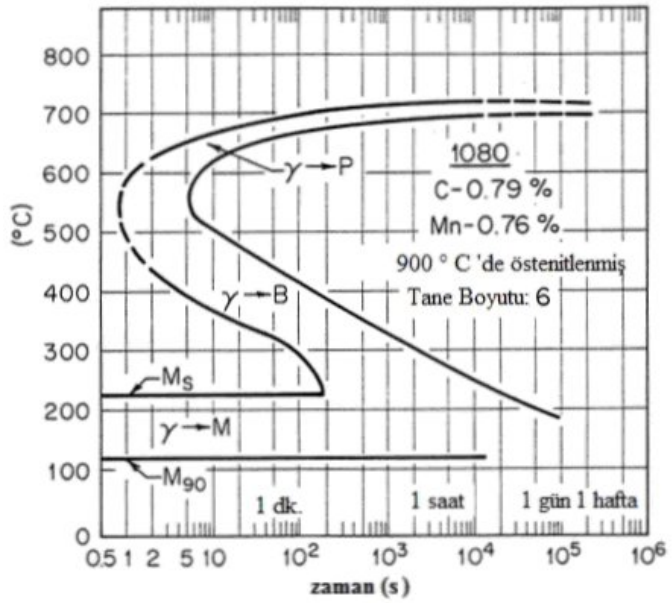


(a) (b)

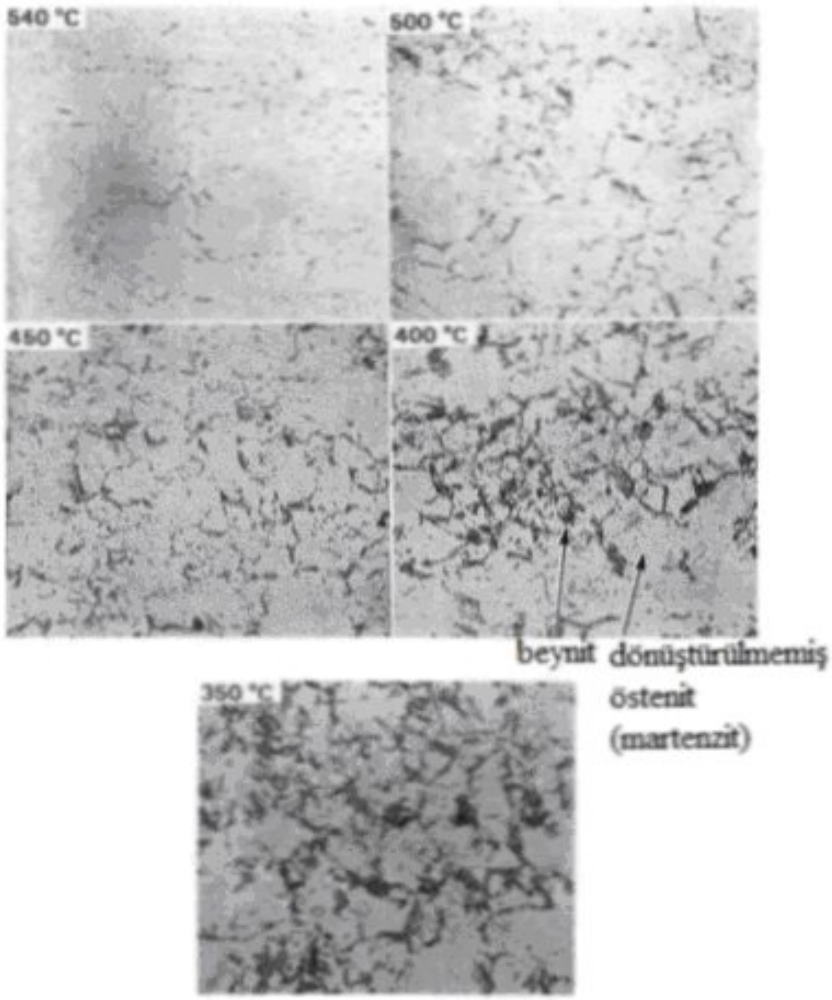
Şekil 2.2 : Perlitin (a) optik ve (b) SEM mikroyapı fotoğrafları [7].



Şekil 2.3 : Ötektoid altı sade karbonlu bir çeliğin optik mikroyapı fotoğrafı [7].



Şekil 2.4: Ötektoid, sade karbonlu çelik için izotermal TTT diyagramı [8].



Şekil 2.5 : Östenit sahasından farklı sıcaklıklara soğutulan bir çeliğin optik mikroyapı fotoğrafları [8].

2.1.2. Sade karbonlu çeliklerin fizksel ve mekanik özellikleri

Farklı oranlarda karbon içeren sade karbonlu çeliklerin, fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 2.1'de görülmektedir [9]. Buna göre karbon miktarı arttıkça yoğunluk, ısıl iletkenlik, ısıl genleşme katsayısı ve kopma uzaması azalmakta fakat çekme dayanımı artmaktadır. Elastisite modülü karbon oranına göre değişmemektedir. Öte yandan, sade karbonlu çeliklerde, karbon oranının artması ile kaynak kabiliyeti, dövülebilirlik ve talaşlı işlenebilirlik azalmaktadır.

Çizelge 2.1 : Üç farklı sade karbonlu çeliğin fiziksel ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması [9].

Karbon oranı, %	Yoğunluk, g/cm^3	Isıl İletkenlik, $Jm^{-1}K^{-1}s^{-1}$	Isıl Genleşme Katsayısı, $10^{-6}K^{-1}$	Elastisite Modülü, GPa	Çekme Dayanımı, MPa	Kopma uzaması, %
0.2	7.86	50	11.7	210	350	30
0.4	7.85	48	11.3	210	600	20
0.8	7.84	46	10,8	210	800	8

Çeliklerin büyük çoğunluğu ısıl işlemlere karşı olumlu cevap verir. Kimyasal bileşimin değiştirilmesinin yanı sıra sertlik ve dayanım gibi mekanik özellikler, elektriksel özellikler ve korozyona özellikleri ile yüksek sıcaklığa dayanım özellikleri ısıl işlem yoluyla da geniş bir aralıkta değişebilmektedir.

Sade karbonlu çelikler bazı kayda değer özelliklere sahip olmakla birlikte aşağıda sıralanan bazı kısıtlamalar da bulunmaktadır:

- Malzeme derinliği boyunca martensit yapı oluşturulamaz, dolayısıyla sertlik derinliği sınırlıdır,
- Sade karbonlu çelikler düşük sıcaklıklarda düşük darbe direncine sahiptir,
- Korozyon direnci zayıftır,
- Yüksek sıcaklıklarda oksidasyn direnci zayıftır,
- Kalınlık boyunca yeterli sertlik derinliği elde etmek için gereken hızlı su verme, orta karbonlu çeliklerde distorsiyona ve çatlamaya sebep olabilir. [10].

Sade karbonlu çeliklerin, karbon oranına göre, düşük, orta ve yüksek karbonlu olarak tanımlandığı göz önüne alınarak, bu üç ana grubun temel özellikleri aşağıda belirtilmiştir.

Düşük karbonlu çelikler, düşük üretim maliyetleri nedeniyle, yapısal ve kaynaklı uygulamalarda, yüksek şekil ve kalınlık alternatifleri nedeniyle otomotiv başta olmak üzere pek çok sektörde kullanılmaktadır. Düşük karbonlu çeliklerin mekanik özellikleri düşük olmakla birlikte, soğuk işlemle iyileştirilebilir [11]. Düşük karbonlu çelikler genellikle soğuk haddelenmiş ve tavlanmış durumda, yassı haddelenmiş ürünler (levha veya şerit) olarak, otomobil gövde panelleri, teneke, levha, tel, dikişsiz boru, kazan ve plaka uygulamalrında kullanılmaktadır.

Orta karbonlu çelikler, % 0.2 - % 0.5 arasında karbon içermektedir ve mekanik özellikleri ısıl işlemle arttırılabilir. Ayrıca, bu çelikler dövme uygulamalarında olduğu kadar, yüksek yüzey sertliği gereken alanlarda da kullanılabilmektedir.

Yüksek karbonlu çelikler, % 0.5'den fazla karbon içeren çeliklerdir. Isıl işlem uygulanmış halde iyi bir aşınma direnci göstermektedir. Maksimum sertlikte çelik kırılgandır ve temperleme ısıl işlemi uygulanarak sertlik bir miktar düşürülürken tokluk arttırılır. Sertlik derinliği düşük olduğundan bu çeliklerin kullanım alanı sınırlıdır [12].

3. ISIL İŞLEMİN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

3.1. Çeliklere Uygulanan Isıl İşlemler

Günümüzün gelişen teknolojisi ile birlikte çeliklerin yaygın kullanımı ve buna bağlı olarak mekanik ve metalografik özelliklerinin iyileştirilmesinde, çeliğe uygulanan ısıl işlemler giderek önem kazanmaktadır [13].

Isıl işlem ile metalin özelliklerinde belirgin bir değişiklik sağlamak amacıyla metal veya alaşımların ısıtılması, ısıtıldığı sıcaklıkta bir süre tutulması ve son olarak oda sıcaklığına soğutulması işlemlerine "ısıl işlem" denir. Isıl işlem istenen değişikliklerin yanı sıra istenmeyen değişiklikler de yaratabilir. Isıl işlem istenerek yapılabileceği gibi başka bir işlemin sonucu veya yan etkisi olarak da ortaya çıkabilir. Buna örnek olarak kaynak veya kesme sırasında oluşan sıcaklıktan dolayı ürünün kesme veya kaynak bölgelerinde mikroyapı değişiklikleri gösterilebilir.

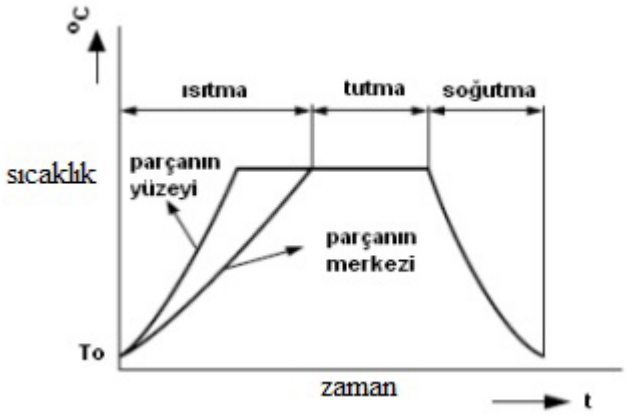
Katı fazda çeliklere uygulanan ısıl işlemler ile geniş sınırlar içinde özellikler değiştirilmekte ve böylece çeliklerin kullanımları daha geniş bir sahaya yayılmaktadır. Bu durum, her şeyden önce demirin, östenit-ferrit allotropik dönüşümü ile mümkündür. Bu nedenle, östenit-ferrit allotropik dönüşümü göstermeyen, östenitik veya ferritik çeliklerde, normalleştirme (normalizasyon) veya sertleştirme gibi ısıl işlemler yapılamamaktadır. Çeliklere uygulanan bütün ısıl işlemler, ısıtma, tutma ve soğutma olmak üzere üç aşamada gerçekleştirilmektedir:

Oda sıcaklığından tavlama sıcaklığına ısıtma: Isıtma hızı ve tavlama sıcaklığı malzemeden istenen özelliklere göre ayarlanmaktaır. Şekil 3.1'de görüldüğü üzere, kesit kalınlığı yüksek malzemelerde, yüzey ve merkez arasında sıcaklık farkı olmaktadır.

Tutma: Malzemenin kalınlığına uygun bir süre bekleterek tüm yapının homojen olması sağlanmaktadır.

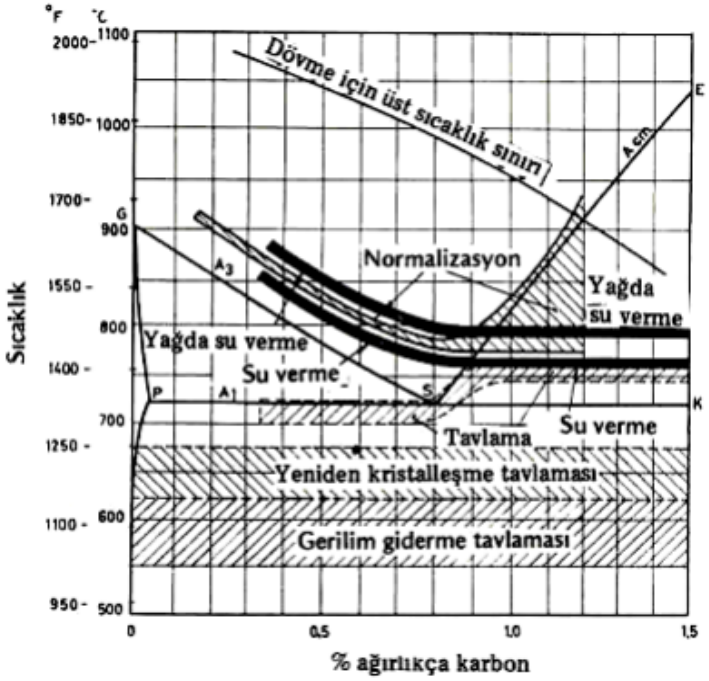
Soğutma: Soğuma hızına bağlı olarak farklı mikroyapıların oluşması için, fırında, havada, yağda veya suda soğutma gerçekleştirilir.

Isıl işlemlerden istenen özellikleri sağlayabilmek için, bekletme sıcaklığı (tav sıcaklığı) ve soğutma şekli (süresi) birinci derecede önemli olan etkenlerdir. Çeliğin kullanım yerine, başka bir ifade ile çelikten beklenen mekanik ve fiziksel özelliklere bağlı olarak, tav sıcaklığında en uygun sürede bekletilen malzeme, durgun havada, yağda veya suda soğutulabilir.



Şekil 3.1 : Isıl işlem kademeleri [13].

Çeliklere uygulanan ısıl işlemler Şekil 3.2'deki Fe-C denge diyagramı üzerinde gösterilmiştir. Çeliğe uygulanan çoğu ısıl işlemde elde edilen mikroyapı, östenitin dönüşümünün bir sonucudur. Bu dönüşüm ürünlerinin özelliği ve görünüşü çeliğin fiziksel ve mekanik özelliklerini birinici dereceden belirler ve etkiler. Isıl işlemde ilk adım östenit oluşturmak için malzemenin belli bir kritik sıcaklığa ısıtılmasıdır.



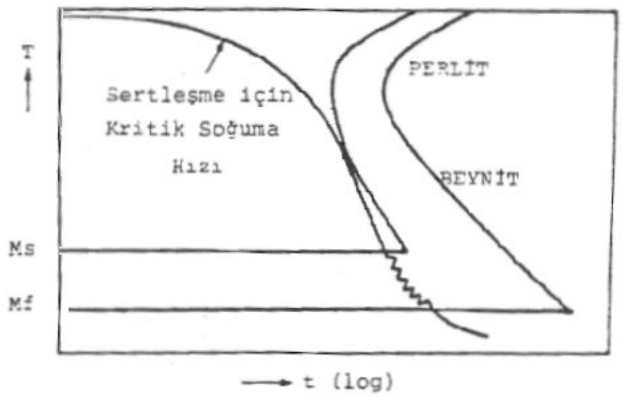
Şekil 3.2 : Çeliklere uygulanan ısıl işlemlerin Demir-Karbon denge diyagramı üzerinde gösterilişi [13].

3.1.1. Östenitleme

Bir çeliği östenitlemede amaç; daha sonraki soğuma işleminde arzu edilen mikroyapıyı sağlamak içindir. Östenit teşekkülü karbonun diffüzyon hızına bağlı olarak belirli bir zaman aralığında oluşmaktadır. Martensit mikroyapısının sertliği, martensitteki % C oranına bağlıdır. Östenitleme sonrası mekanik özellikleri etkileyen önemli unsurlardan biri, östenitlemenin homojen yapılması, diğeri ise aşırı tane büyümesine yol açmamasıdır. Homjen bir östenitleme ile su verme sonrasında, sertlik maksimum değerine ulaşır. Burada unutulmaması gereken konu, martensitin sertliğinin karbon oranına bağlı olarak önemli ölçüde değiştiğidir. Östenitleme sıcaklığının artmasıyla, östenit tane boyutu da arttığından, aşırı tane irileşmesinden kaçınmak için östenitleme sıcaklığı optimize edilmelidir.

3.1.2. Su verme

Su verme (sertleştirme) ısıl işlemi, östenitleme tamamlandıktan sonra, çeliğin östenitleme sıcaklığından, bu çelik için kritik soğutma hızından daha hızlı soğutulmasıdır. Amaç çoğunlukla martensitten oluşmuş ve çok sert bir yapı elde etmektir. Şekil 3.3'deki şematik TTT diyagramında su verme için gereken kritik soğuma hızı görülmektedir.



Şekil 3.3 : TTT diyagramı üzerinde kritik soğum hızının gösterimi [13].

Su verme işleminin kalitesi ve sonucu, malzeme ve ortam ile ilgili çok sayıda faktöre bağlıdır. Bunlar aşağıda sıralanmıştır:

(a) Malzemenin kendisi ile ilgili faktörler,

-Sertleşebilirlik, (çeliğin kimyasal bileşimi),
-Hacmi ve şekli (kesit kalınlığı, yüzey alanı),
-Yüzey durumu (tufal, oksit v.b gibi ısı transferini etkileyen faktörler).

(b) Su verme ortamıyla ilgili faktörler:

-Su verme ortamının termo-fiziksel özellikleri (viskozite, özgül ısı vb.),

-Su verme ortamının sıcaklığı.

(c) Su verme dononımı ile ilgili etkenler:

-Su verme ortamının karıştırılma hızı,

-Akış yönü,

-Su verme ortamının basıncı.

3.1.3. Temperleme

Sertleştirme sonucu oluşan martensit çok kırılgandır ve pratik amaçlar için kullanılan bir çelik temperlenmeden kullanılmaz. Temperleme genellikle toklukta bir artış ve sertlikte bir azalma ile sonuçlanır. Temperleme işlemi sırasında meydana gelen yapısal dönüşümler şu şekilde belirtilmektedir:

I. 80 - 160°C arası, karbonca zengin "ε-karbür" fazının çökelmesi. Bunun sonucu martensit matriksdeki karbon yaklaşık % 0.3'e kadar düşer,
II. 230-280°C arası, kalıntı östenit, beynit benzeri bir yapıya dönüşmektedir,
III. 160- 400°C arası, "ε-karbür" yerine sementit oluşur ve büyür,
IV. 400 - 700°C arası sementitin büyümesi ve küreselleşmesi.

Buna göre, temperleme sırasında martensit, ferrit ve sementite ayrışır. Bunun anlamı hacimde sürekli bir düşüş demektir. Yüksek sıcaklıklarda temperleme sonucu, hacim tekrar artar ve sertleştirme öncesi orijinal değerine ulaşır. Temperleme sırasında martensitin sürekli ayrışması aynı zamanda gerilmelerin de sürekli düşmesine neden olur.

Yüksek kromlu çelikler, sıcak-iş çelikleri ve yüksek hız çeliklerinde, kalıntı östenitin dönüşümü daha yüksek sıcaklıklarda meydan gelir. Dönüşüm ürünü olan beynit ya da martensit oluşumu temperleme sıcaklığına bağlıdır. Beynit oluşumu izotermaldir. Yani temperleme işlemi sırasında sabit bir sıcaklıkta olur. Buna karşı martensit, çelik temperleme sıcaklığından soğutulurken oluşulur. Temperleme işlemine, su verme işleminden hemen sonra çelik 50-75°C'ye soğuduğunda başlanmalıdır. Bazı hallerde parçanın temperleme işleminden önce oda sıcaklığına kadar soğumasına izin verilirse çatlaklar oluşur. Temperleme için ısıtma, konveksiyon tipi mufl veya çukur fırınlarda veya temperleme işlemlerinde kullanılan bir tuz banyosunda yapılır. Karmaşık şekilli parçaların temperleme sıcaklığına ısıtılmaları yavaş yapılmalıdır.

Temperleme sırasında martensit ve kalıntı östenit çeşitli yapısal fazlara dönüşür. Bu dönüşüm yalnız sıcaklığa değil, zamana da bağlıdır. Bu nedenle bazı durumlarda zaman faktörü çok önemlidir. Bu bakımdan temperleme parametresi (P) olarak isimlendirilen ve Eşitlik 3.1 ile belirtilen bir formül geliştirilmiştir.

$$P = T(k + \log t) \tag{3.1}$$

Burada,

T = temperleme sıcaklığı (K),

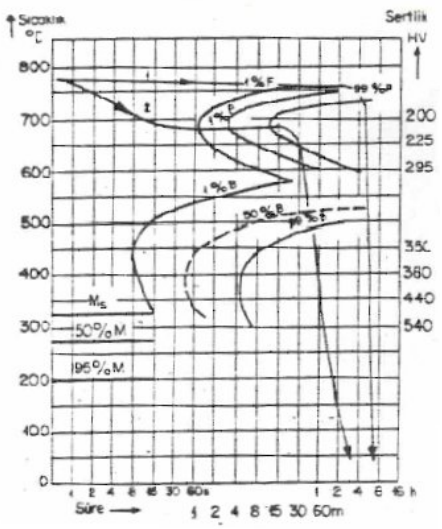
k = sabit (k = 20) ve

t = temperleme süresi (saat) olarak tanımlanmaktadır.

450°C'ye kadar olan sıcaklıklarda, temperleme süresi, çeliğin temperleme sonrası sertliğini çok az etkilemektedir. Bununla beraber daha yüksek sıcaklıklarda zaman faktörü önemlidir. Elde edilen değerler, aynı çelik için tek bir eğri de toplanır. Her çeliğin P değeri o çeliğin ana eğrisindeki bir sertlik değerinin karşılığıdır.

3.1.4. Tam tavlama

Bu işlem önce A1 üzerinde uygun bir sıcaklıkta östenitleme ve daha sonra da A1 altındaki dönüşüm sıcaklığına yavaş soğutma işlemlerini kapsar. Uygun sıcaklık ve soğuma hızlarının seçilmesi için TTT diyagramlarından yararlanılır. Şekil 3.4'de DIN 42CrMo4 çeliğinin TTT diyagramı görülmektedir. Burada 1 nolu eğri tam tavlamayı, 2 nolu eğri ise normalizasyon tavlamasını göstermektedir. 2 nolu eğri, dönüşüm tamamlandığı zaman çeliğin oda sıcaklığına serbestçe soğutulabileceğini göstermektedir.



Şekil 3.4 : DIN 42CrMo4 çeliğinin TTT diyagramı [14].

3.1.5. Normalleştirme (Normalizasyon)

Normalleştirme ısıl işleminin amacı, örneğin dövme veya kaynak için yüksek sıcaklığa ısıtılması sonucu iri taneli hale gelen çeliğin ince taneli bir yapıya getirilmesidir. Normalleştirme, esas olarak sade karbonlu ve düşük alaşımlı çeliklere uygulanır.

3.1.6. Küreleştirme

Perlitik yapılı bir çelik tavlandığı zaman, sementit lamelleri küresel hale gelir ve malzemenin tokluğu artar. Kimyasal bileşiminde, %0.35-0.8 arası karbon içeren çelikler için küreselleştirme tavı sıcaklığı A1'in hemen altında (680-720°C), %0.8'den yüksek karbonlu ötektoid üssü çeliklerde ise A1'in üzerindedir.

Küreleştirme ısıl işlemi, A1'in altında yapıldığı zaman soğuma hızı, oda sıcaklığındaki son sertliğe etki etmez. Tavlama A1 üzerinde yapıldıktan sonra yavaş soğutma yapılırsa küreleşmemiş yapı büyük ölçüde aynen kalır. Çelik soğudukça östenitte çözünen karbon, karbür küreleri üzerinde ayrışır. Tav sıcaklığı daha yüksek olduğu taktirde daha büyük miktarda karbür çözünür ve sementit bir lamel şeklinde ayrışır. Dönüşümün olduğu A1'in altındaki sıcaklık (soğuma hızına bağlıdır) elde edilen yapının morfolojisini belirleyen bir faktördür. Dönüşüm sıcaklığı A1'e yaklaştıkça küresel yapı daha iri ve yumuşak olur. Dönüşüm sıcaklığı A1'den uzaklaştıkça (hızlı soğuma) elde edilen yapı daha ince ve sert, lamel sayısı daha fazla olur.

Bu durumda, sade karbonlu veya düşük alaşımlı çeliklerin küreleştirme tavı söz konusu olduğunda uygulanacak temel kurallar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- 775°C'de 2 saat süre ile östenitleme,
- 725°C'ye kadar 10°C/saatlik bir hızla yavaş soğutma.

Çelikte başka yapısal hiçbir dönüşüm olmayacağından östenit dönüştürüldükten sonra oda sıcaklığına soğutma mümkün olduğu kadar hızlı yapılmalıdır. Elde edilen küreleşmiş yapı en düşük sertliğe sahiptir, ancak bu yapı, delme, planya, tornalama veya raybalama gibi bazı işlemler için uygun değildir. Gerektiğinde tav sıcaklığı arttırılarak daha sert ve daha fazla lamelli bir yapı elde edilebilir.

Ötektoid üssü çeliklerinin, tane sınırlarındaki sementiti makul bir süre içinde küreleştirmek için A1 üzerindeki sıcaklıklarda tavlanması gerekir. % 0.5-0.8 arasında karbon ihtiva eden karbon ve düşük alaşım çeliklerinin, ya da ötektoid üssü

çeliklerinin küreleştirilmesi için uygun tavlamadan önce A1'in 25°C altında ön tavlama yapmak veya tav sıcaklıklarını A1 civarına yükseltip indirmek suretiyle hızlandırılabilir.

3.1.7. Gerilme giderme

Çelik plastik olarak işlendiği veya deforme edildiği zaman, soğuk işlenen yüzeylerde gerilmeler oluşur. Bu gerilmeler, sertliği bölgesel olarak arttırır ve sürekli işlemeyi giderek daha da güçleştirir. Ayrıca çeliğin daha sonraki ısıl işlemler sırasında eğilmesine yol açılabilir, bu yüzden söz konusu gerilmelerin 1-2 saatlik gerilme giderme tavı ile azaltılması veya yok edilmesi gerekir. Sade karbonlu ve düşük alaşımlı çelikler için 550-650°C, sıcak işlem ve yüksek hız çelikleri için 600-750°C sıcaklık gereklidir. Bu işlem herhangi bir faz değişimine neden olmaz, ancak yeniden kristalleşmeye yol açar. Soğuma sırasında ısıl gerilmelerin oluşmaması için, parçaların fırında yaklaşık 500°C'ye kadar yavaş soğutulması, daha sonra havada soğutulması iyi bir uygulamadır.

Kalıntı gerilmelerden en çok arındırılması gereken çok büyük takımların veya makine parçalarının gerilme giderme işlemlerinde başlangıçtaki soğutma hızı çok düşük örneğin 300°C altına kadar saatte sadece birkaç °C düzeyinde olmalıdır. Tavlama sıcaklığı ve tavlama süresi arttıkça, işlem sonrası yapıda daha az kalıntı gerilme kalacaktır. Örneğin 450°C'de 1 saatlik tavlama sadece % 50 oranında bir kalıntı gerilme azalmasına yol açarken, tam bir gerilme giderme için 650°C'de 1 saat veya 600°C'de 15 saatlik bir tavlama gerekmektedir.

3.1.8. İzotermal Tavlama

İzotermal tavlama ısıl işlemleri, östenitleme sonrası, dönüşümün sabit sıcaklıkta gerçekleştiği ısıl işlemleri kapsar. Genel olarak çeliklere uygulanan izotermal tavlama ısıl işlemleri, östemperleme ve martemeperleme olarak 2 gruba ayrılmaktadır.

3.1.8.1. Östemperleme

Östemperleme, çeliğin, TTT diyagramının burun noktası ile Ms sıcaklığı arasındaki sabit bir sıcaklıkta, dönüşüm tamamlanana kadar tutularak, yapının beynite dönüştürülmesi için yapılan bir ısıl işlemdir. Östemperleme ısıl işlemi aşağıdaki gibi 3 adımda uygulanmaktadır:

- Çelik östenitleme sıcaklığına ısıtılır ve tüm yapı östenit olana dek bu sıcaklıkta tutulur,
- Östenitlemenin tamamlanmasını takiben, 260 – 400°C arasında sabit bir sıcaklıkta tutulan tuz banyosuna hızlıca aktarılan çelik, bu banyoda dönüşüm tamamlanana kadar tutulur,
- Dönüşüm tamamlandıktan sonra, tuz banyosundan çıkarılan çelik havada oda sıcaklığına kadar soğutulur.

Östemperleme ısıl işlemi sonunda, klasik su verme ve temperleme işlemlerine göre daha yüksek tokluk elde edilebilir ve bu sayede çatlama ve distorsiyonlar azaltılabilir. Bu bakımdan östemperleme, su verme ve temperleme yerinde de tercih edilebilen bir ısıl işlemdir. Bazı uygulamalarda, östemperleme bilinen su verme ve temperleme işleminden daha ucuzdur. Bu durum özellikle otomatik sürekli ocaklarda küçük parçaların işlenmesi sırasında ortaya çıkar. Böyle uygulamalarda, bilinen su verme ve temperleme işlemi üç aşamalı bir çalışma gerektirirken, östemperleme de sadece iki aşamalı bir çalışmaya gerek duyulur. Bu da bu işlemi cazip kılmaktadır.

Öte yandan östemperleme, perlitik dönüşümünün engellenebileceği parçalarla sınırlıdır ve parça, perlit dönüşümünü engellemeye yetecek kadar hızlı soğutulmalıdır. İnce kesitli parçalar daha hızlı soğutulabilir [14].

İzotermal tavlama işlemleri genellikle tuz banyoları içinde gerçekleştirilmektedir. Bunun nedeni tuz banyolarının aşağıdaki özelliklere sahip olmasıdır [15]:

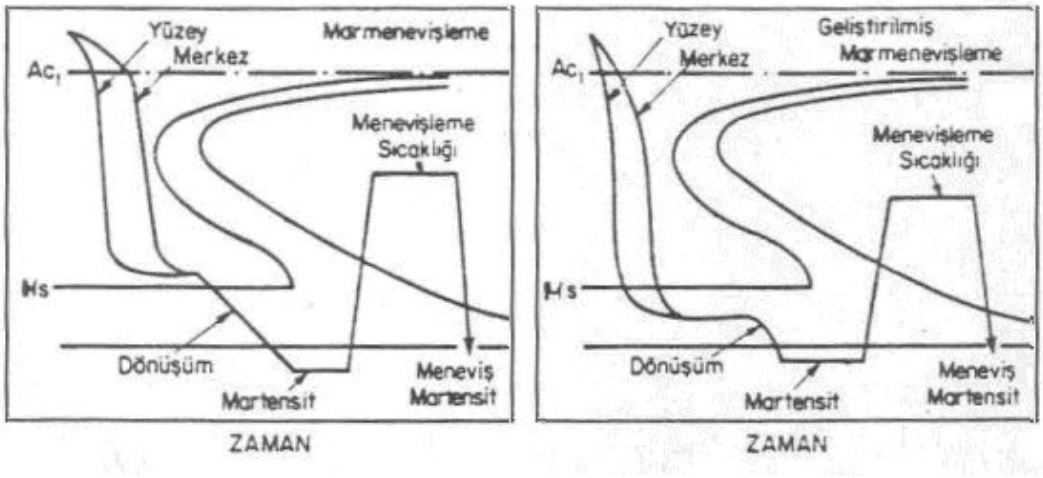
- Hızlı ısı transferi,
- Buhar örtüsünün oluşmaması,
- Çok geniş bir sıcaklık aralığında viskozitesinin aynı olması,
- Viskozitesinin östemperleme sıcaklığında düşük olması ve bu sayede kayıpların en aza inmesi
- Suda tamamıyla çözünür olması; böylece daha sonraki temizleme işlerini kolaylaştırması.

3.1.8.2. Martemperleme

Martemperleme ısıl işleminin faydası, büyük ve farklı kesit kalınlıklarına sahip parçalarda ortaya çıkar. Bu tür parçaların ince kesitleri ya da yüzeyleri, normal su verme ısıl işleminde çok hızlı soğuyarak martensite dönüşürken, parçanın merkezi ya da kalın kesitleri, çok hızlı soğuyamadıklarından martensite dönüşemez. Bu da farklı mikroyapı ve mekanik özelliklerin elde edilmesine ve çarpılmaların ortaya çıkmasına neden olur. Martemperleme sırasında ise, martensit oluşum sıcaklığında parça bir

süre bekletildiği için hem yüzeyin hem de merkezin aynı sıcaklığa ulaşması ve tüm parçada homojen bir şekilde martensit oluşumu sağlanabilmektedir.

Martemperleme ısıl işleminin ısıl çevrim diyagramı, Şekil 3.5'de verilmiştir. Şekil 3.5a'da görülen klasik martemperlemede, parça östenitleme sıcaklığından, sıcaklığı Ms sıcaklığının hemen üzerinde bulunan bir yağ ya da tuz banyosuna hızla soğutulur, bu sıcaklıkta parçanın tamamı aynı sıcaklığa gelene kadar bekletilir, ancak beynit oluşum eğrisinin geçilmemesine dikkat edilmelidir. Daha sonra havada soğutularak işlem tamamlanır. Şekil 3.5b'de görülen gelişmiş martemperleme işleminde ise, parça östenitleme sıcaklığından Ms ve Mf arasındaki sabit bir sıcaklığa soğutulur. Böylece daha hızlı soğutma hızları elde edilebilmektedir.



(a) (b)

Şekil 3.5 : (a) ve (b) Martemperleme işlemi ısıl çevrim diyagramları [14,15].

Parça oda sıcaklığına soğurken, martensit oluşumu parçanın her yerinde hemen hemen aynıdır ve böylece çok fazla miktarda kalıntı gerilme oluşmaz. Martemperlenmiş parça oda sıcaklığına geldikten sonra, mikroyapısı martensittir. Bu nedenle, klasik su verilmiş parçalar gibi temperleme işlemine tabi tutulur [16].

Martemperleme işleminde kontrol edilmesi gereken değişkenler aşağıda sıralanmıştır [17]:

- -Östenitleme sıcaklığı,
- -Martemperleme banyosunun sıcaklığı,
- -Parçanın martemperleme banyosunda bekleme süresi,
- -Tuz banyosunun temiz olması,
- -Soğutma hızını arttırmak için tuz banyosuna su ilavesi,
- -Karıştırma ve martemperleme banyosundan oda sıcaklığına soğuma hızı.

Yukarıda sıralanan bazı ısıl işlemlerin alaşımsız AISI 1095 çeliğinin mekanik özelliklerine etkisi Çizelge 3.1'de görülmektedir. Buna göre aynı kimyasal bileşime sahip bir çelikte, farklı ısıl işlemler uygulanarak özellikle tokluk ve süneklik değerlerinin büyük ölçüde değiştirilebildiği görülmektedir.

Çizelge 3.1: Farklı ısıl işlemlerin AISI 1095 kalite çeliğin mekanik özelliklerine etkisi [14].

Isıl İşlem	Sertlik, HRC	Darbe Direnci, ft.lb	Kopma uzaması, %
Suda su verme ve temperleme	53.0	12	0
Suda su verme ve temperleme	52.5	14	0
Martemperleme ve temperleme	53.0	28	0
Martemperleme ve temperleme	52.8	24	0
Östemperleme	52.0	45	11
Östemperleme	52.5	40	8

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Deney Malzemesi

Deneysel çalışmalarda Çizelge 4.1'de kimyasal analizi verilen 0.8 mm kalınlığında C70 kalite çelik sac kullanılmıştır. Ekobant Metal San. Tic. Ltd. Şti. firmasından temin edilen malzemelerin üretim süreci şu şekildedir: C70 kalite çelik bileşiminde ve 200 mm kalınlığında üretilen slabın kalınlığı, önce slab presi ile 65 mm'ye daha sonra bir dizi sıcak haddeleme işlemiyle 4 mm'ye düşürülmektedir ve bu sayede sıcak haddelenmiş rulo elde edilmektedir. Asitle temizleme ve kenar kesme sonrasında, ardışık soğuk haddeleme ve yeniden kristalleşme işlemleri ile kalınlık önce 4 mm'den 2 mm'ye, sonra 0.85 mm'ye düşürülmekte ve tekrar yeniden kristalleşme tavlaması uygulanmaktadır. Son olarak temper haddesi uygulanan sac 0.8 mm nihai kalınlığında elde edilmektedir.

Çizelge 4.1 : Bu çalışmada kullanılan C70 kalite çelik sacın kimyasal analizi.

Kimyasal bileşim, % ağ.						
C	Si	Mn	P	S	Diğer*	Fe
0.73	0.27	0.55	0.014	0.008	0.21	Kalan

*Cr+Ni+Mo+Cu+Al+Ti+V

4.2. Östenitleme ve İzotermal Tavlama Isıl İşlemleri

Bu tez çalışmasında C70 kalite çelik saca östenitleme, izotermal tavlama ve temperleme ısıl işlemleri uygulanmıştır. Bu amaçla, 22 mm genişliğinde ve 80 mm uzunluğunda kesilerek hazırlanan numuneler, yüzeylerindeki yağ ve kirliliğin uzaklaştırılması amacıyla, önce saf su ve alkolle temizlenmiş, daha sonra fırın atmosferinde homojen bir ısıtma sağlanması amacıyla tasarlanan ve Şekil 4.1'de görülen düzeneğe asılarak, östenitleme, izotermal tavlama ve ardından temperleme işlemleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.1 : Deney numunelerin fırına yerleştirildiği kafes sistemi.

Çalışma kapsamında numunelerin östenitleme ve temperleme ısıl işlemleri, Kerr 915 model PID kontrollü bir ısıl işlem fırınında gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.2a). İzotermal tavlama ısıl işlemleri için ise Nabertherm HO 60/E model dikey fırın içerisine pota konularak oluşturulan bir tuz banyosu kullanılmıştır (Şekil 4.2b). Tuz banyosunda Petrofer AS135 marka ısıl işlem tuzu kullanılmıştır. Çalışma boyujnca yapılan tüm ısıl işlemlerde (östenitleme, izotermal tavlama ve temperleme), fırın sıcaklıkları, Ni-NiCr bir termokupl ile sürekli kontrol edilmiştir.



(a) (b)

Şekil 4.2 : (a) Östenitleme ve temperleme fırını ve (b) Tuz banyosunun genel görünümü.

Östenitleme ısıl işlemi, tüm numuneler, 850°C'de 150 s bekletilerek gerçekleştirilmiştir. Söz konusu ısıl işlem koşullarının seçiminde literatür bilgileri

esas alınmıştır. Belirtilen östenitleme süresi sonunda, numuneler östenitleme fırınından çıkarılarak hızlıca tuz banyosuna daldırılmış ve izotermal tavlama ısıl işlemi uygulanmıştır. İzotermal tavlama ısıl işlemi, numuneler, 200, 250, 300 ve 350 °C sıcaklıklarda 5 s-90 dakika arasında 11 farklı sürede (5 s, 8 s, 15 s, 1 dakika, 3 dakika, 5 dakika, 10 dakika, 30 dakika, 60 dakika, 75 dakika ve 90 dakika) tutularak gerçekleştirilmiştir. Öngörülen izotermal tavlama süresi sonunda, tuz banyosundan çıkarılan numuneler havada soğutulurken, bazı numunelere, ilaveten temperleme işlemi de uygulanmıştır. Temperleme işlemi, seçilen numunelerin 415°C sıcaklıkta 150 s tutulmasıyla uygulanmış, ardından numuneler havada soğutularak ısıl işlem aşaması tamamlanmıştır. Isıl işlemleri takiben, mikroyapı incelemesi, sertlik ölçümü ve 3-noktalı eğme deneyleri yapılmıştır.

4.3. Mikroyapı İncelemeleri

Deney numunelerinin mikroyapısı, temin edildiği (orijinal) halde ve ısıl işlem uygulanmış halde incelenmiştir. Bu amaçla, bakalit ile kalıplanan numuneler, 1200 numara zımpara kademesine kadar zımparalndıktan sonra, alumina ile parlatılmış, ardından %2'lik Nital ile dağlanarak Leica DM750M model optik mikroskop altında incelenmiştir.

4.4. Sertlik Deneyleri

Numunelerin sertliği, Rockwell A skalasına göre (HRA) ölçülmüştür. Bu amaçla, ölçümler Zwick/Roell ZHR model sertlik cihazında elmas batıcı uç ve 60 kg ana yük kullanılarak ve numunelerin geniş yüzeylerinden ölçümler alınarak belirlenmiştir. Her bir numune için en az 5 ölçüm alınarak sonuçların ortlaması numunenin sertlik değeri olarak belirtilmiştir.

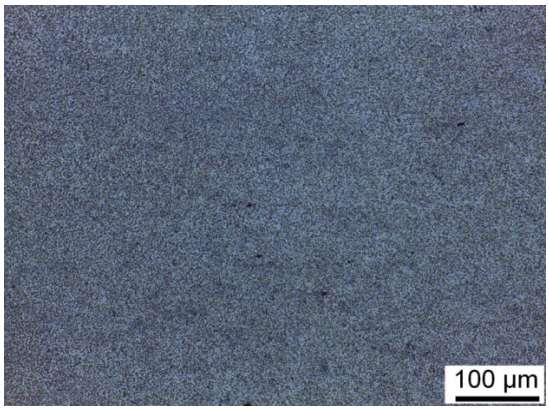
4.5. Eğme Deneyleri

Numunelerin eğme deneyi Shimadzu AGS-J marka 10 kN kapasiteli universal deney cihazında 3-noktalı eğme deneyi prensiplerine göre gerçekleştirşiştir. Eğme deneyinde mesnetler arası mesafe 25 mm, mesnet ve mandrel çapları 5 mm, çene hızı ise 5 mm/dakika olarak uygulanmıştır. Deney sırasında yük – eğilme miktarı eğrisi kaydedilmiş ve daha sonra gerilme-eğme birim şekil değişimi eğrisine dönüştürülmüştür.

5. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

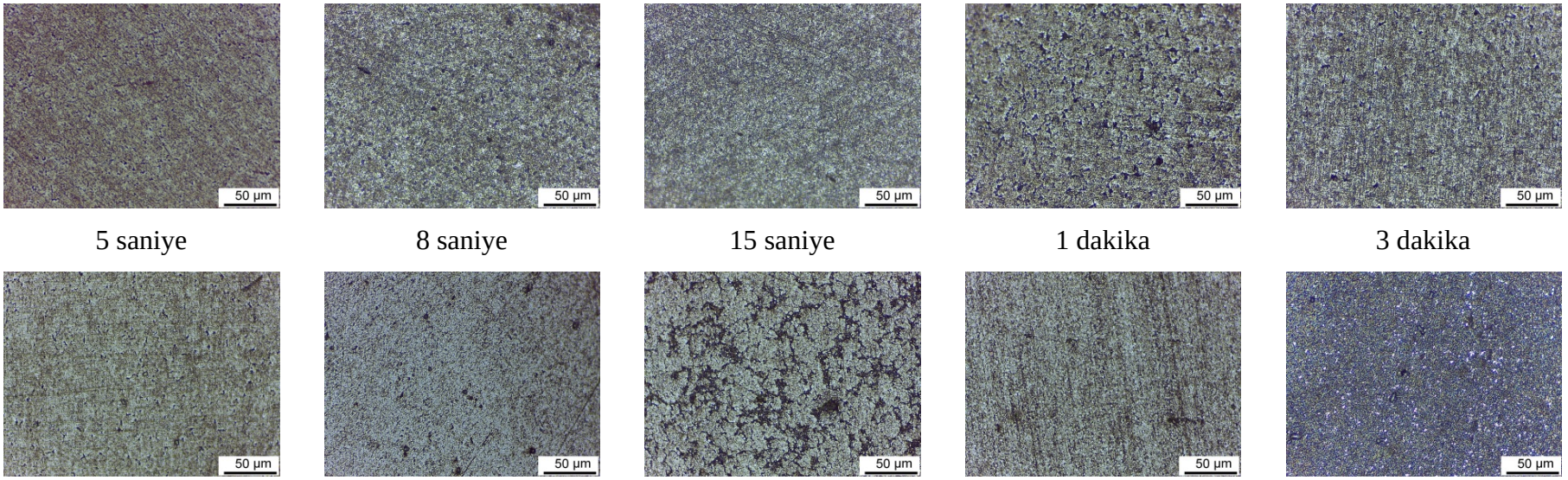
5.1. Mikroyapı İncelemeleri

Bu tez çalışmasında kullanılan C70 kalite çelik sacın temin edildiği haldeki optik mikroyapı fotoğrafı Şekil 5.1'de verilmiş olup, sacın ferrit ve perlitten ibaret homojen bir mikroyapıya sahip olduğu ve belirgin bir süreksizlik içermediği görülmektedir.

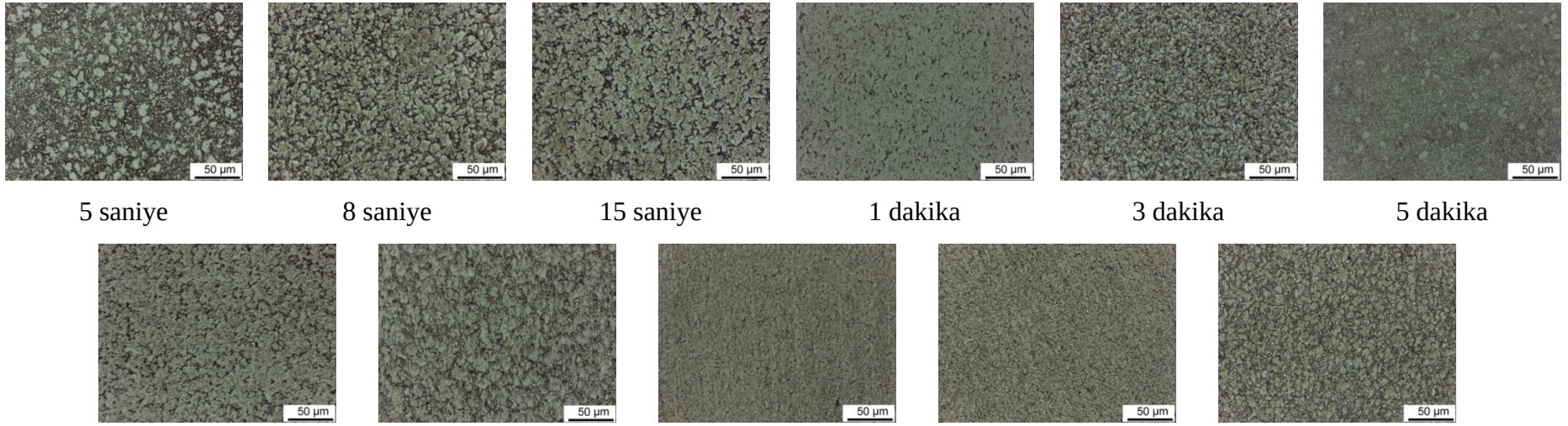


Şekil 5.1 : C70 kalite sacın orijinal haldeki optik mikroyapı fotoğrafı.

Bu tez çalışması kapsamında 200, 250, 300 ve 350°C sıcaklıklarda farklı sürelerde izotermal tavlama uygulanan numunelerin optik mikroyapı fotoğrafları sırasıyla Şekil 5.2 - Şekil 5.5'de verilmiştir. 200°C'de izotermal tavlama uygulanan numunelerin mikroyapısı (Şekil 5.2) beklendiği gibi martensit olarak belirlenmiştir. Bu sıcaklıkta 75 dakika tutulan numunenin mikroyapısında karbür olduğu düşünülen beyaz partiküller de gözlenmiştir. 200°C izotermal tavlama sıcaklığında yapıda beynitik bir morfoloji gözlenmemiştir. Bu durum 200°C'nin malzemenin Ms sıcaklığından düşük bir sıcaklık olduğunu göstermektedir. 250°C izotermal tavlama sıcaklığında da mikroyapı martensit olup (Şekil 5.3), çok kısa izotermal tavlama sürelerinden itibaren yapıda karbür olduğu düşünülen beyaz partiküller gözlenmektedir. Bu sıcaklıkta uygulanan en yüksek izotermal tavlama süresi olan 90 dakika sonunda yapıdaki beyaz renkli karbürlerin miktarı da artmakta ve yapıda homojen olarak dağılmaktadır.

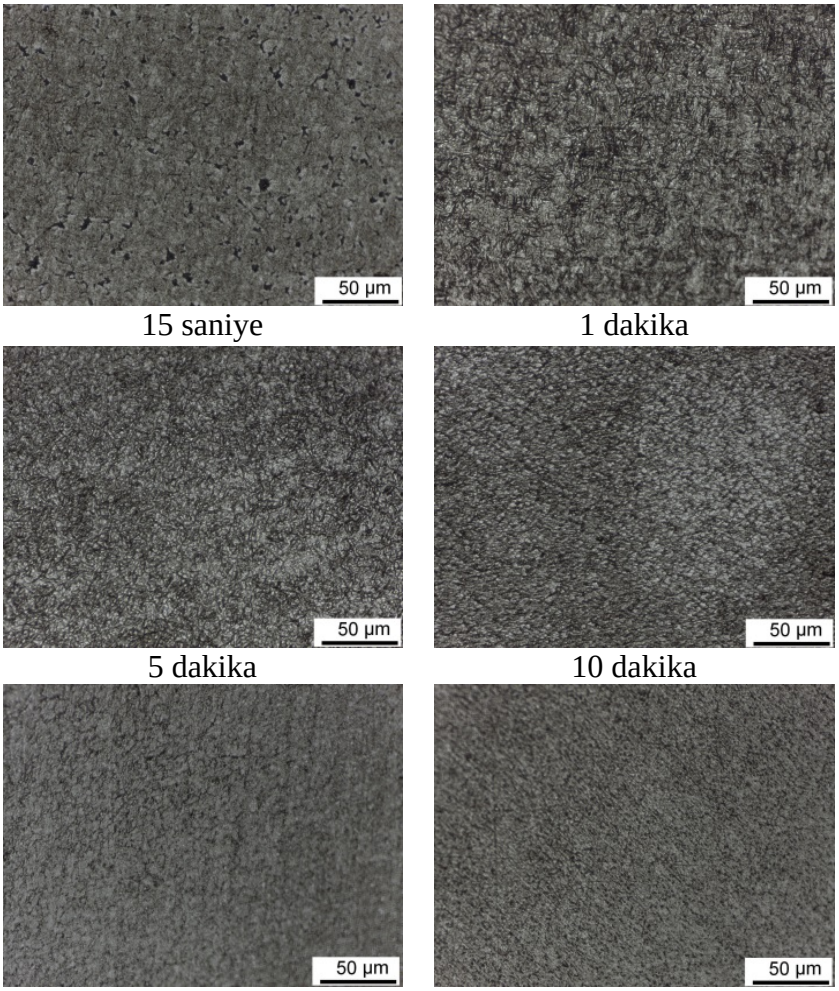


Şekil 5.2 : 200°C sıcaklıkta izotermal tavlama uygulanan numunelerin optik mikroyapı fotoğrafları.

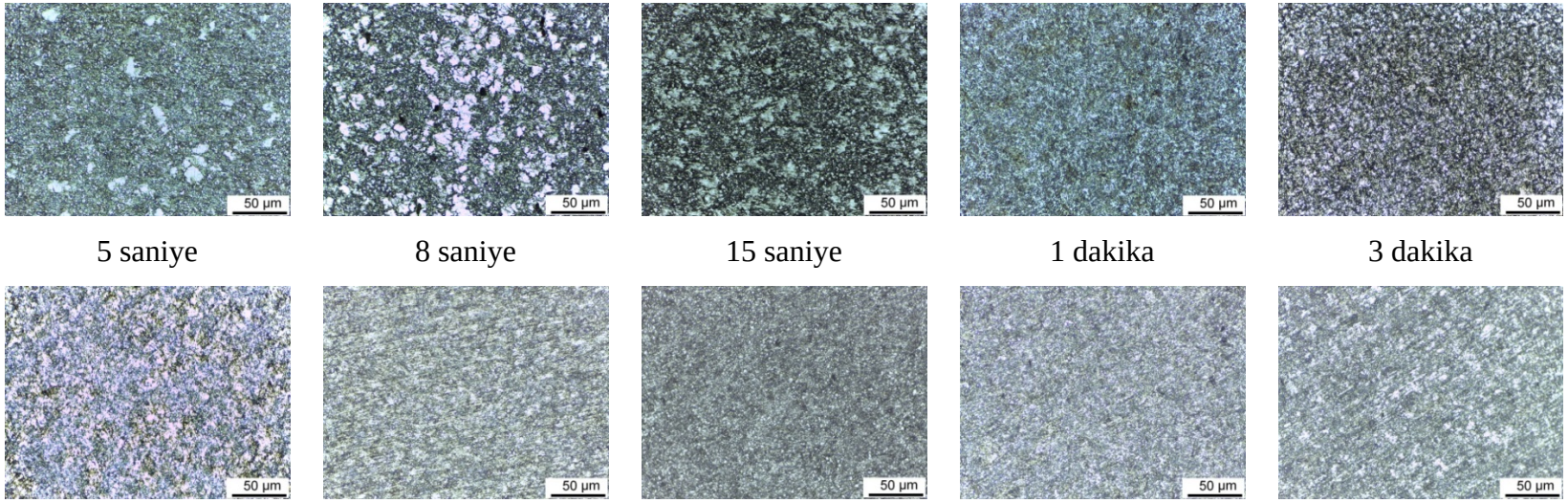


Şekil 5.3 : 250°C sıcaklıkta izotermal tavlama uygulanan numunelerin optik mikroyapı fotoğrafları.

Şekil 5.4’de, 300°C sıcaklıkta izotermal tavlama uygulanan numunelerin optik mikroyapı fotoğrafları görülmektedir. Bu sıcaklıkta kısa izotermal tavlama sürelerinde mikroyapı martensit iken, 1 dakikalık izotermal tavlama süresinden itibaren yapıda beynitik morfoloji gözlenmiştir. 300°C izotermal tavlama sıcaklığında 1 dakikadan kısa sürelerde östenit tane sınırları belirgin biçimde gözlenebilmektedir, ancak daha uzun izotermal tavlama sürelerinde mikroyapıda tane sınırları belirgin değildir. Öte yandan, 200 ve 250°C sıcaklıklarda mikroyapıda gözlenen ve karbür olduğu düşünülen beyaz partiküller, 300°C tavlama sıcaklığında izotermal tavlama uygulanan numunelerin mikroyapısında gözlenmemiştir. Şekil 5.5’de, 350°C sıcaklıkta izotermal tavlama uygulanan numunelerin optik mikroyapı fotoğraflarından, mikroyapının genel olarak martensitik olduğu ve izotermal tavlama süresine bağlı olarak önemli bir değişim göstermediği anlaşılmaktadır.

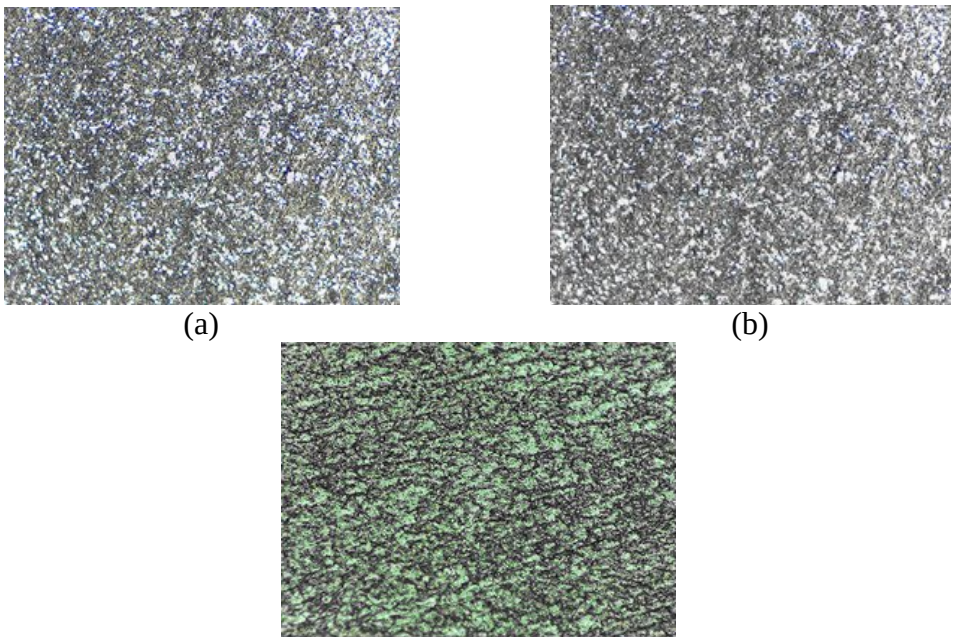


Şekil 5.4 : 300°C sıcaklıkta izotermal tavlama uygulanan numunelerin optik mikroyapı fotoğrafları.



Şekil 5.5 : 350°C sıcaklıkta izotermal tavlama uygulanan numunelerin optik mikroyapı fotoğrafları.

İzotermal tavlama işlemini takiben bazı numuneler 415°C'de 150 s süreyle temperlenmiş ve bu süre sonunda havada soğutulmuştur. Şekil 5.6'da sırasıyla 250, 300 ve 350°C'de izotermal tavlama uygulandıktan sonra temperlenen numunelerin optik mikroyapı fotoğrafları görülmektedir.



(a) (b)

(c)

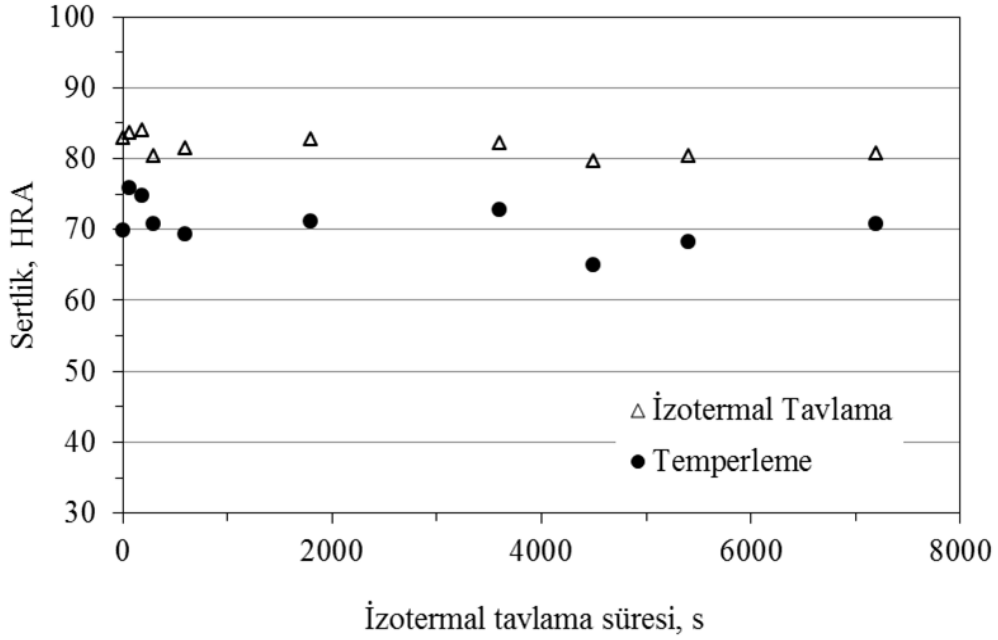
Şekil 5.6 : Temperleme işlemi sonrası (a) 250°C, (b) 300°C ve (c) 350°C sıcaklıkta 30 dakika süreyle izotermal tavlama uygulandıktan sonra temperlenen numunelerin optik mikroyapı fotoğrafları.

Şekil 5.6'da görülen optik mikroyapı fotoğrafları, numunelerin temperlenmiş martensit mikroyapısına sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle 250 ve 300°C sıcaklıklarda (sırasıyla Şekil 5.6a ve 5.6b) izotermal tavlama uygulanan numunelerin temperleme sonrası optik mikroyapı fotoğrafları arasında belirgin bir fark görülmemektedir. Ancak 350°C sıcaklıkta izotermal tavlama uygulandıktan sonra temperlenen numunenin (Şekil 5.6c) optik mikroyapı fotoğrafı daha kaba bir görünümdedir.

5.2. Sertlik Deneyi Sonuçları

Farklı sıcaklıklarda (200, 250, 300 ve 350°C) izotermal tavlama ve sonrasında temperleme uygulanan numunelerin sertliğinin, izotermal tavlama süresine bağlı olarak değişimi sırasıyla, Şekil 5.7-Şekil 5.10'da görülmektedir.

200°C sıcaklıkta uygulanan izotermal tavlama işleminde, 1 dakikadan kısa sürelerde sertlik 84 HRA düzeyinde iken, artan sürelerde sertlik değerlerinin yavaş bir düşme eğilimi gösterdiği ve en uzun izotermal tavlama süresi olan 90 dakika sonunda 81 HRA değerine eriştiği görülmektedir. İzotermal tavlama sonrası yapılan temperleme ile sertlik değerlerinin beklendiği şekilde %10 - 20 oranında azaldığı, tavlama süresine bağlı olarak sertlik değişiminin kararlı ve sistematik bir davranış göstermediği belirlenmiştir.

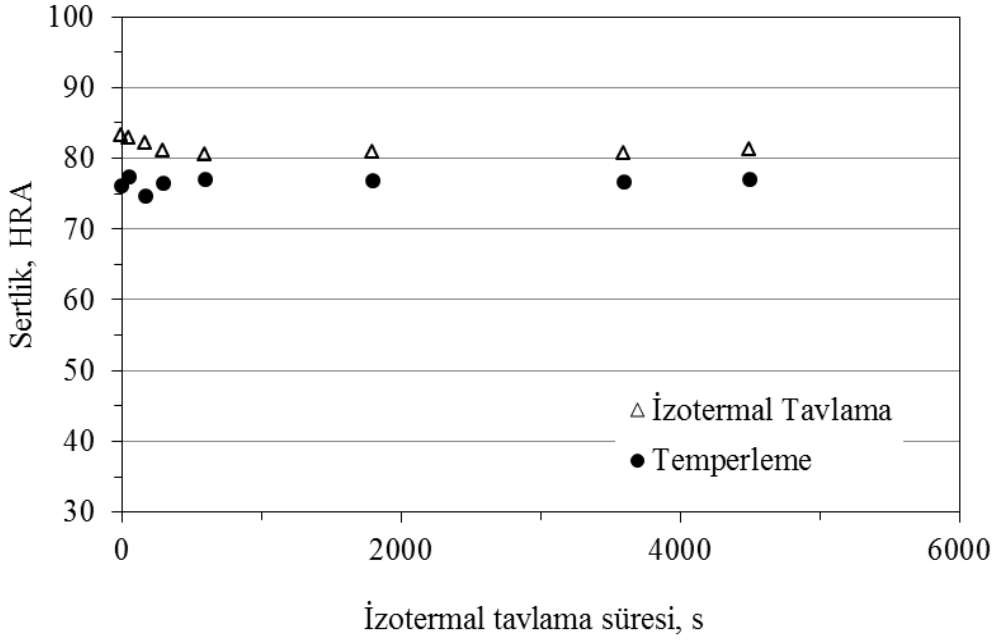


Şekil 5.7 : 200°C'de izotermal tavlama ve temperleme uygulanan numunelerin sertliğinin izotermal tavlama süresine bağlı olarak değişimi.

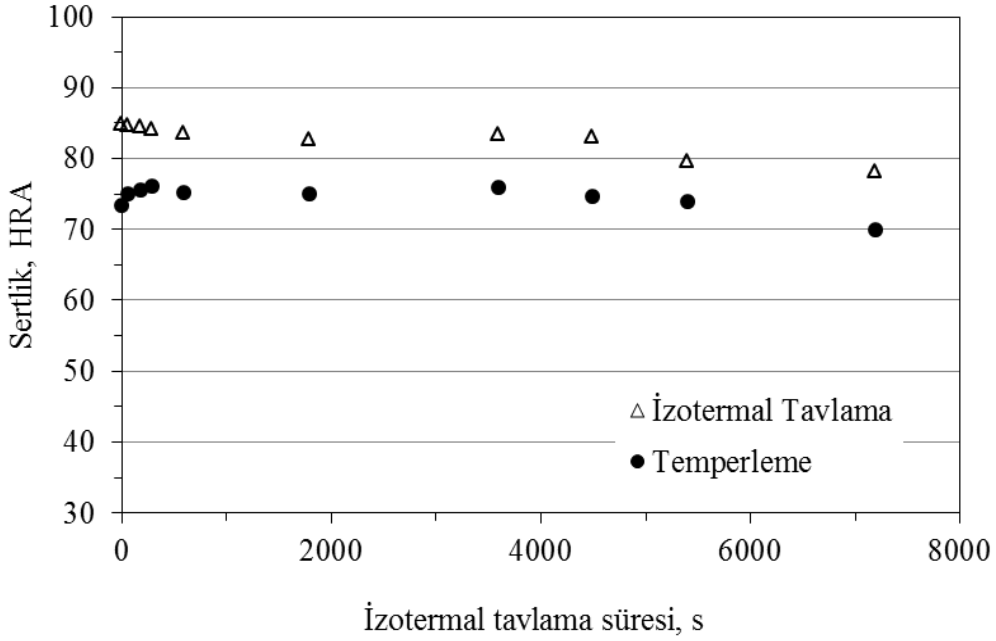
Şekil 5.8'de 250°C sıcaklıkta izotermal tavlama uygulanan numunelerin sertliğinin, izotermal tavlama süresine bağlı olarak değişimi görülmektedir. Buna göre, 1 dakikalık tavlama süresine kadar sertlik nispeten hızlı azalmış daha uzun tavlama sürelerinde ise önemli bir değişim göstermemiştir. 250°C'de sıcaklıktaki izotermal tavlama sonrası yapılan tavlama ile sertlik değerleri beklendiği gibi azalmaktadır. Sertlik değerlerinin azalma oranı, 200°C'ye göre daha düşüktür (yaklaşık % 5-10).

Şekil 5.9'da 300°C'de izotermal tavlama uygulanan numunelerin sertliğinin tavlama süresine bağlı olarak değişimi görülmektedir. Bu sıcaklıkta, 200 ve 250°C'den farklı olarak sertlik, tavlama süresine bağlı olarak sürekli bir azalma göstermekte ve en uzun tavlama süresi olan 90 dakika sonunda ilk kez 80 HRA değerinin altına

düşmektedir. Temperleme sonrası sertlik değerleri % 5-15 arasında azalmaktadır ve temperleme sonrası en düşük sertlik değeri 70 HRA olarak elde edilmiştir.



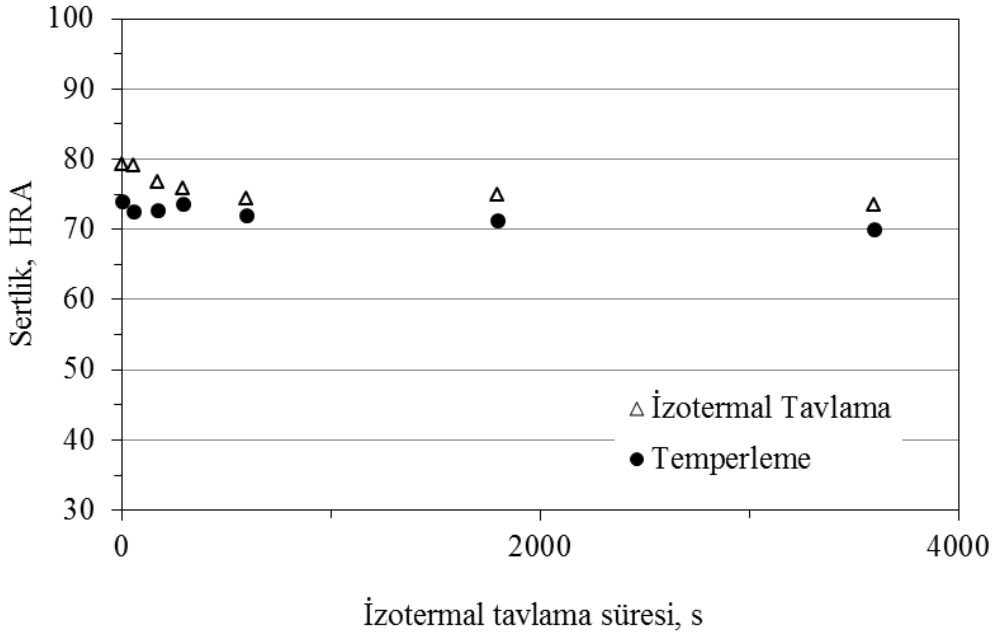
Şekil 5.8 : 250°C'de izotermal tavlama ve temperleme uygulanan numunelerin sertliğinin izotermal tavlama süresine bağlı olarak değişimi.



Şekil 5.9 : 300°C'de izotermal tavlama ve temperleme uygulanan numunelerin sertliğinin izotermal tavlama süresine bağlı olarak değişimi.

Şekil 5.10'da 350°C'de izotermal tavlama uygulanan numunelerin sertliğinin tavlama süresine bağlı olarak değişimi görülmektedir. 350°C tavlama sıcaklığında en

kısa tavlama süresinde sertlik 79 HRA değerinde iken artan tavlama süresine bağlı olarak sürekli azalmaktadır. Temperleme sonrası sertlik değerleri % 3-6 arasında azalmaktadır ve en düşük sertlik değeri 70 HRA olarak elde edilmiştir. Ayrıca, temperleme sonrası sertlik değerlerinin, izotermal tavlama süresine bağlı olarak sürekli bir azalma eğiliminde olduğu görülmektedir.



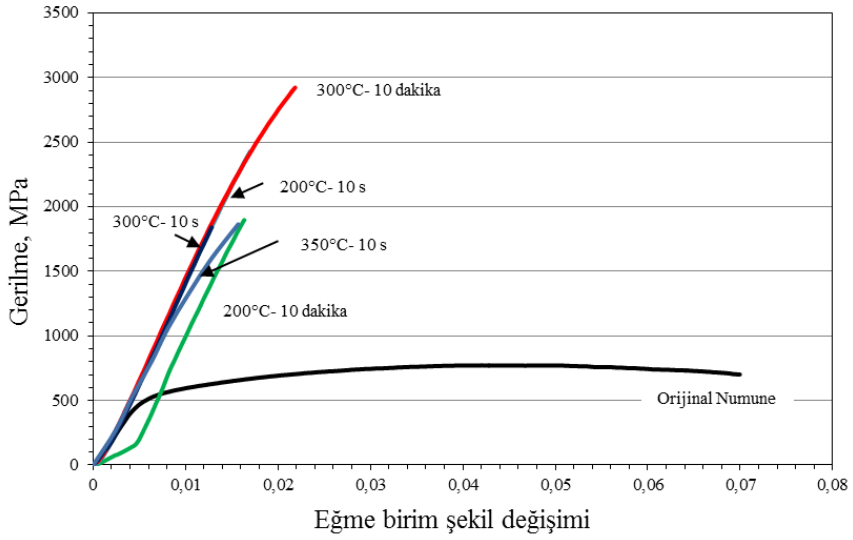
Şekil 5.10 : 350°C'de izotermal tavlama ve temperleme uygulanan numunelerin sertliğinin izotermal tavlama süresine bağlı olarak değişimi.

5.3. Eğme Deneyi Sonuçları

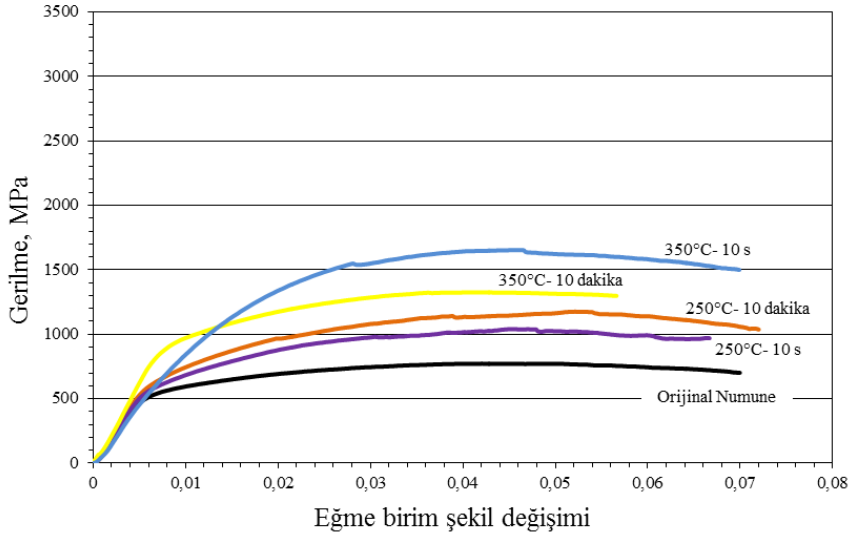
Şekil 5.11'de 200, 250, 300 ve 350°C sıcaklıklarda 10 saniye ve 10 dakika süreyle izotermal tavlama uygulanan ve izotermal tavlama sonrası temperlenen numunelerin 3-noktalı eğme deneyinde elde edilen gerilme- eğme birim şekil değişim eğrileri görülmektedir.

Orijinal haldeki C70 kalite çelik, yaklaşık 790 MPa eğme dayanımına sahiptir ve bu numunede deneyin durdurulduğu % 7 eğme birim şekil değişimine kadar herhangi bir kırılma gözlenmemiştir. İzotermal tavlama sonrasında ise, numuneler beklendiği gibi oluşan martensitik mikroyapıya bağlı olarak gevrekleşmiş ve eğme deneyinde yüksek bir eğme dayanımı (yaklaşık 2000-3000 MPa aralığında) ile düşük bir eğme birim şekil değişimi (yaklaşık %1-2 aralığında) sergileyerek kırılmıştır (Şekil 5.11a). Bu numunelerin eğme dayanımı ve eğme birim şekil değişimi ile, izotermal tavlama

sıcaklık ve süresi arasında belirgin bir ilişki gözlenememektedir. Öte yandan, izotermal tavlama sonrası uygulanan temperleme işlemi, numunelerin eğilme davranışında belirgin bir değişime neden olmuştur. Temperleme uygulanan numunelerin eğme dayanımı, sadece izotermal tavlama uygulananlara göre yaklaşık % 50 azalmakla birlikte (temperleme uygulanan numunelerin eğme dayanımı değerleri 1000-1500 MPa aralığındadır), eğme birim şekil değişim değerleri, izotermal tavlama uygulanalara göre yaklaşık 3-4 kat artarak (temperleme uygulanan numunelerin eğme birim şekil değişimi değerleri % 6-7 düzeyindedir) orijinal numuneninki ile benzer değerlere ulaşmıştır.



(a)



(b)

Şekil 5.11 : (a) 200, 250, 300 ve 350°C farklı sıcaklıklarda izotermal tavlama uygulanan ve (b) izotermal tavlama sonrası temperlenen numunelerin 3 - noktalı eğme deneyinde elde edilen gerilme - eğme birim şekil değişim eğrileri.

Temperleme sonrası, elde edilen eğme dayanımı değerleri, izotermal tavlama sıcaklık ve süresine bağlı olarak değerlendirildiğinde, daha yüksek izotermal tavlama sıcaklığının eğme dayanımını arttırdığı görülmektedir. Ancak belirli bir sıcaklıkta izotermal tavlama süresi ile eğme dayanımı arasında sistematik bir ilişki bulunmamaktadır. Bu durumda, özetle, izotermal tavlama işlemiyle oluşan martensitik esaslı mikroyapının, malzemeleri gevrekleştirdiği ve tokluğunu düşürdüğü, izotermal tavlama sonrası yapılan temperleme işleminin ise, temperlenmiş martensit bir mikroyapı oluşturmasından dolayı, tokluğu arttırdığı görülmektedir. İncelenen tüm ısıl işlem koşulları içerisinde, 350°C'de 10 saniye süreyle tavlandıktan sonra 415°C'de 150 saniye süreyle temperlenen numunenin, en yüksek eğme dayanımı (yaklaşık 1650 MPa) ile birlikte, orijinal durumdaki numuneyle yaklaşık aynı birim şekil değişimi değerine (~%7) sahip olduğu, dolayısıyla en yüksek tokluğa sahip numune olduğu görülmektedir. Eğme deneyi sonuçları, Şekil 5.7-5.10'da verilen sertlik değerleri ile de uyumludur.

6. GENEL SONUÇLAR

C70 kalite çeliğe, 200, 250, 300 ve 350°C'de farklı sürelerde uygulanan izotermal tavlama ve temperleme ısıl işlemlerinin, numunenin mikroyapı, sertlik ve eğme dayanımına etkisini inceleyen bu tez çalışmasında aşağıdaki genel sonuçlara ulaşılmıştır.

1) Bu çalışmada kullanılan C70 kaite çeliğin orijinal haldeki mikroyapısı, ferrit ve perlitten ibarettir. İzotermal tavlama işlemi, tüm tavlama sıcaklıklarında, genel olarak martensitik bir mikroyapı oluşturmuş, 300°C sıcaklıkta 1 dakikadan uzun tavlama sürelerinde yapıda iğnesel morfolojide beynit gözlenmiştir. İzotermal tavlama sonrası yapılan temperleme işlemiyle oluşan mikroyapı, temperlenmiş martensittir.
2) Numunelerin sertlik değerleri, tüm sıcaklıklarda, artan izotermal tavlama süresi ile birlikte düşme eğilimi göstermektedir. Bu etki, özellikle 300°C ve 350°C sıcaklıkta izotermal tavlama uygulanan numunelerde daha belirgindir. İzotermal tavlama sıcaklığına bağlı olarak bir değerlendirme yapıldığında, 200-300°C sıcaklık aralığında sertlik değerlerinin belirgin bir fark göstermediği, ancak 350°C izotermal tavlama sıcaklığında, belirli bir tavlama süresi için daha düşük olduğu görülmektedir. Deneysel çalışmalarda izotermal tavlama uygulanan numunelerde en yüksek sertlik (85 HRA), 300°C'de 5 s tavlanan numunede, en düşük sertlik (74 HRA) ise 350°C'de 60 dakika tavlanan numunede elde edilmiştir.
3) Temperleme işlemi, beklendiği gibi, izotermal tavlama sonrası elde edilen sertlik değerlerini azaltmaktadır. Ancak temperleme sonrası sertlik değerleri, izotermal tavlama süresine bağlı olarak önemli bir değişim göstermemektedir. Temperleme sonrası en yüksek sertlik azalması, 300°C'de tavlanan numunelerde, en düşük azalma ise, 350°C'de tavlanan numunelerde görülmüştür.

4) Eğme deneyinde, orijinal numunenin, yaklaşık 790 MPa eğme dayanımı ve % 7 eğme birim şekil değişimine sahip olduğu görülmüştür. İzotermal tavlama sonrası, numunelerin eğme dayanımı 2000-3000 MPa değerine artarken, eğme birim şekil değişimi %1-2 düzeyinde gerçekleşmiş ve numuneler eğme deneyi sırasında kırılmıştır. Bu sonuç, izotermal tavlama işlemi sonucu oluşan martensit esaslı mikroyapının yapıyı gevrekleştirmesinden kaynaklanmaktadır.

5) İzotermal tavlama sonrasında numunelerin eğme dayanımı ve eğme birim şekil değişimi ile izotermal tavlama sıcaklık ve süresi arasında belirgin ve sistematik bir ilişki bulunmamaktadır.

6) Temperleme sonrası ise, eğme dayanımı değerleri, izotermal tavlama sonrasındaki değerlere göre azalırken, eğme birim şekil değişimi artmakta, dolayısıyla temperleme işlemi ile numunelerin tokluğu artmaktadır. Temperlenen numunelerin eğme dayanımı değerleri, 1000-1500 MPa aralığında olup, orijinal duruma göre yaklaşık 2 kat artmaktadır. Öte yandan temperlenen numunelerin eğme birim şekil değişimi değerleri, orijinal numune ile yaklaşık aynı düzeydedir (% 6-7).

7) İzotermal tavlama sıcaklığının artmasıyla, temperleme sonrası eğme dayanımı artmakta, ancak eğme dayanımı ve eğme birim şekil değişimi, belirli bir sıcaklıktaki izotermal tavlama süresine bağlı olarak sistematik bir değişim göstermemektedir.

8) Elde edilen deneysel sonuçlar, numunelere izotermal tavlama ve ardından uygulanan temperleme işlemi ile, orijinal hale göre yaklaşık aynı süneklik fakat daha yüksek eğme dayanımı kazandırılabildiğini göstermektedir.

9) İncelenen tüm ısıl işlem koşulları içerisinde, 350°C'de 10 saniye süreyle tavlandıktan sonra 415°C'de 150 saniye süreyle temperlenen numune, en yüksek eğme dayanımı (yaklaşık 1650 MPa) ile birlikte, orijinal durumdaki numuneyle yaklaşık aynı birim şekil değişmi değerine (~%7) sahiptir.

KAYNAKLAR

[1] **Davis, J.R. ed.** (1996). Materials Park, OH : ASM International, c1996.

[2] **Stefanescu, D.M.** (1991). ASM Metals Handbook Volume 1 - Properties and Selection - Irons, Steels and High-Performance Alloy, 329-330.

[3] **NIIR Board of Consultants & Engineers.** (2010). The Complete Technology Book on Hot Rolling of Steel, s. 60-61.

[4] **Savaşkan, T.** (2009).“Malzeme Bilgisi ve Muayenesi”, Celepler Yayıncılık, Trabzon,193-199.

[5] **Davis, J.R. ed.** (1996). Materials Park, OH : ASM International, c1996.

[6] **Brooks, C.R.** (1996). Principles of the Heat Treatment of Plain Carbon and Low Alloy Steels- s. 60.

[7] **Brooks, C.R.** (1996). Principles of the Heat Treatment of Plain Carbon and Low Alloy Steels- sf. 7-10,13,25-29.

[8] **Steven, W., Mayer, G.,** (1953). J.Iron and Steel Institute, Vol 174 sf. 36.

[9] **Raghavan V.** (2013). Materials Science and Engineering 4th Edition sf. 396.

[10] **Séblin. B., Jahazeeah, Y., Sujeebun, S., Manohar, W., Ky, B,** (2014). Material Science Material Science Material Science- MECH.

[11] **Akçaoğlu, F.Ü.** (2013). Investigating the Effect Of Deformation and Annealing Texture on Magnetic Anisotropy in Low-C Steel Sheets by Magnetic Barkhausen Noise Method.

[12] **Séblin. B., Jahazeeah, Y., Sujeebun, S., Manohar, W., Ky, B,** (2014). Material Science Material Science Material Science- MECH s. 3.

[13] **Uzkut, M., Özdemir, İ.,** (2001). “Farklı çeliklere uygulanan değişen ısıtma hızlarının mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi,” DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, Cilt: 3, Sayı: 3, s. 65-73.

[14] **Topbaş, M.A.,** (1993) Isıl işlemler. İstanbul Teknik Üniversitesi.

[15] **Topbaş, M.A.,** (1998) Çelik ve Isıl İşlem El Kitabı, (Ekim Ofset Yayınları).

[16] **Tarıkahya, T.,** (1975) Çeliğin Tavlanması, Sertleştirilmesi ve Tretmanı,(W. Malmberg,. 2. Baskı Çevirisi), Makine Müh. Odası Yayınları, Yayım No: 29.

[17] **Topbaş, M.A.,** (1992).Çeliğin Isıl İşlemi,Yıldız Üniversitesi Yayınları sayı= 250.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad **:** Mustafa Serdar KUZYAKA

Doğum Yeri ve Tarihi **:** ÇORUM / 26.10.1988

E-Posta **:** serdarkuzyaka@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** **:** 2011, İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü