T. C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ç - 4140 ÇELİĞİNİN, MİKRO YAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE SU VERME ORTAMININ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Ethem KESTİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KONYA, 2009

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ç - 4140 ÇELİĞİNİN, MİKRO YAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE SU VERME ORTAMININ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Ethem KESTİ

Selçuk Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd.Doç.Dr. Yusuf YILMAZ

2009, 91 Sayfa

Jüri: Yrd. Doç. Dr. Yusuf YILMAZ

Prof. Dr. Ahmet AVCI

Yrd. Doç. Dr. Hüseyin İMREK

Bu çalışmada Ç-4140 çeliğin su verme ortamı ve faklı temperleme sıcaklıkları sonucunda malzemedeki değişimler deneysel olarak incelenmiştir. Bunun için, çekme, darbe ve metalografik deney numuneleri hazırlandı. Hazırlanan bu deney numuneleri 4 gurupta toplandı. Bunlar hiçbir ısıl işlem görmeyecek olan deney numuneleri, sadece normalizasyon ısıl işlemine tabi tutulacak deney numuneleri, sadece sertleştirme işlemine tabi tutulacak numuneler ve sertleştirme sonrasında temperleme işlemlerine tabi tutulacak olan deney numuneleridir.

Yapılan ısıl işlemler sonucunda bu numuneler TS 138 EN 10002-1/2004'e göre çekme, TS EN 10045-1/1999'e göre de darbe deneyine tabi tutulmuş ve mikro yapıları irdelenmiştir. Bunun sonucunda su verme ortamına göre ve farklı temperleme sıcaklıklarınına göre Ç-4140 çeliğinin mekanik ve mikroyapı özellikleri tespit edilmiştir. Aynı su verme ortamları için farklı temperleme sıcaklıkları sonuçları arasındaki farkları ile farklı su verme ortamlarının aynı temperleme işlemleri sonundaki farkları incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler : Çelik, Su Verme Ortamı, Temperleme, Isıl İşlem, Çekme Deneyi, Darbe Deneyi, Mikro Yapı.

ABSTRACT

Master Thesis

INVESTIGATION OF EFFECT OF QUENCHING MEDIA ON MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF Ç-4140 STEEL

Ethem KESTİ

Selcuk University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Advisor: Yrd. Doç. Dr. Yusuf YILMAZ

2009, 91 Pages

Jury : Yrd. Doç. Dr. Yusuf YILMAZ

Prof. Dr. Ahmet AVCI

Yrd. Doç. Dr. Hüseyin İMREK

In this study, the variations in the steel with a code of Ç-4140 which were arisen from quenching environment and various tempering temperatures of the material were experimentally investigated. Some samples for tensile, impact, and metallographic experiments were prepared for the investigation. The samples prepared were categorized within four groups. The categories are the samples which were not treated with any heat treatment at all, those which were only treated with the normalization heat treatment, those treated only with hardening, and the samples treated in a tempering process after the hardening.

The samples, after the heat treatments, were examined by setting up a tensile test according to TS 138 EN 10002-1/2004, and by an impact test according to TS EN 10045-1/1999. Moreover, the values of the hardness were obtained from the measurements and microstructures were investigated. As a result, the mechanical and microstructural characteristics of the Ç-4140 were obtained with respect to the quenching circumstances and different tempering temperature values. An examination was also conducted in regard with the outcomes from different tempering temperatures in constant quenching circumstances and with the results from different quenching circumstances and unchanging tempering treatments.

Key words: Steel, Quenching circumstance, Tempering, Heat Treatment, Tensile test, Impact test, Microstructure.

ÖNSÖZ

Çalışmalarım boyunca bana her türlü desteği esirgemeyen ve yol gösteren tez danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Yusuf Yılmaz'a minnet ve şükranlarımı sunarım.

Aynı zamanda deneysel çalışmalarda fabrikanın tüm imkanlarını kullanmama izin veren Eti Alüminyum A.Ş. 'nin değerli yöneticilerine teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca bu çalışmalar boyunca bana hep destek olan aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET....ii

ABSTRACT....iii

ÖNSÖZ....iv

İÇİNDEKİLER....v

SEMBOLLER....viii

1. GİRİŞ....1

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI....4

3. ÇELİKLER VE ISIL İŞLEMİ....7

3.1. Çelikler....7

3.1.1. Alaşımsız çelikler (sade karbonlu çelikler).... 7

3.1.2. Alaşımlı çelikler....8

3.1.2.1. Düşük alaşımlı krom-molibdenli (Cr-Mo) çelikler....12

3.1.2.1.1. Ç-4140 çelikleri 14

3.2. Çeliklerin Isıl İşlemi.... 20

3.2.1. Demir karbon denge diyagramı.... 21

3.2.2. Östenit soğuması ve faz değişimleri.... 23

3.2.3. Tavlamalar.... 24

3.2.3.1. Homojenleştirme tavlaması....24

3.2.3.2. İri tane tavlaması....26

3.2.3.2. Normalizasyon....27

3.2.3.3. Gerilim giderme tavlaması....28

3.2.3.4. Yeniden kristalleştirme tavı....29

3.2.3.5. Küreselleştirme tavlaması....30

3.2.4. Sertleştirme.... 31

3.2.4.1. Isıtma.....33
3.2.4.2. Bekleme 33
3.2.4.3. Soğutma (Su verme).....34
3.2.4.3.1. Perlit kademesinde dönüşüm..... 36
3.2.4.3.2. Beynit kademesinde dönüşüm..... 37
3.2.4.3.3. Martensit kademesinde dönüşüm.....38
3.2.4.4. Su verme ortamları.....41
3.2.4.4.1. Su verme ortamı olarak su..... 41
3.2.4.4.2. Soğutma ortamı olarak yağ..... 42
3.2.4.5. Su verme çeşitleri.....42
3.2.4.5.1. Doğrudan (basit) su verme..... 42
3.2.4.5.2. Kesikli su verme..... 43
3.2.4.5.3. Duraklı (kademeli) su verme (martemperleme)..... 43
3.2.5. Temperleme..... 44
3.2.5.1.Temper gevrekliği.....47
3.2.5.2.Temperleme süreleri.....48
3.2.5.3. Çoklu temperleme.....49
3.2.5.4. Martemperleme.....49
3.2.5.5. Ostemperleme (beynitleme).....50
4. DENEYSEL ÇALIŞMA.....51
4.1. Malzeme.....51
4.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması..... 51
4.3. Deneylerin Yapılması..... 53
4.3.1. Normalizasyon işlemi..... 55
4.3.2. Sertleştirme işlemi 56
4.3.3. Temperleme işlemi 57

4.3.4. Çekme deneyi..... 57
4.3.5. Darbe deneyi..... 58
4.3.6. Metalografi deneyi.....60
5. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....62
5.1. Normalizasyon İşleminin Mekanik Özelliklere Etkisi.....62
5.2. Isıl İşlem Parametrelerinin Mekanik Özellikler Üzerindeki Etkisi..... 65
5.2.1. Isıl işlem parametrelerinin sertlik üzerindeki etkisi.....67
5.2.2. Isıl işlem parametrelerinin çekme dayanımı üzerindeki etkisi..... 68
5.2.3. Isıl işlem parametrelerinin akma dayanımı üzerindeki etkisi..... 70
5.2.4. Isıl işlem parametrelerinin darbe dayanımı üzerindeki etkisi.....72
5.2.5. Isıl işlem parametrelerinin kesit daralması ve kopma uzaması üzerindeki etkisi..... 74
5.3. Isıl İşlem Parametrelerinin Mikroyapı Özellikleri Üzerindeki Etkisi..... 76
6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME.....84
7. KAYNAKLAR.....87

SEMBOLLER

L : Eriyik Çelik

y : Östenit

Fe_3C : Sementit

a : Ferrit

M : Martensit

M_s : Martensit başlangıcı

M_f : Martensit bitişi

B : Beynit

P : Perlit

Ac_1 : Çeliklerin ısıtılmalarında perlitin östenite kritik dönüşüm sıcaklığı

Ac_3 : Çeliklerin ısıtılmalarında çelik hacminin östenite kritik dönüşüm sıcaklığı

Ar_1 : Çeliklerin soğutulmasında östenitten perlite kritik dönüşüm sıcaklığı

Ar_3 : Çeliklerin soğutulmasında östenitten ferrite kritik dönüşüm sıcaklığı

s : Malzeme kalınlığı, çapı

1. GİRİŞ

Bütün demir alaşımlarına (dökme demir hariç) çelik adı verilir. Eskiden çeliğin sertleşmesi çeliğin başlıca özelliği kabul edilirdi. Halbuki bugün çeliğin sertleşmesinin yanında birçok özelliğinin olduğu da bilinmektedir. Ayrıca bazı çelik türleri yüksek sıcaklıkta birden soğutulduklarında sertleşeceklerine daha da yumuşamakta ve sünekleşmektedir. (Akbaş ve ark., 1998)

Günümüzde en çok kullanılan metal türü olan çeliği tam olarak tanımlamak oldukça güçtür. Çünkü değişik amaçlara hizmet için oldukça fazla miktarlara varan çeşitliliği içerisinde ortak bir paydada birleşip kesin bir tanımlama yapmak güçtür. Ancak bir gerçek vardır ki çelik hayatımızın her alanında karşımıza çıkar. Çeliğe ihtiyaç duyulmayan hiçbir alan yoktur.

Bir makinede bulunması gereken en önemli teknik özellik; gereç olarak yapımında kullanılan çeliğin doğru seçilmiş olmasıyla yeterli ve verimli olarak görevini yapması, istenen sürede aşınmadan ve bozulmadan dayanması, teknik özellikleri yanı sıra, fiziksel ve kimyasal yapısıyla da çok yakından ilgilidir. Bütün bunlar, kullanılan çeliğe yeterli ölçülerde alaşım elementlerinin katılmasıyla oluşan özel niteliğe bağlıdır.

Günümüzde gelişen teknoloji ile birlikte çeliklerin yaygın kullanımı ve buna bağlı olarak mekanik ve metalografik özelliklerinin iyileştirilmesinde, çeliğe uygulanan ısıl işlemler giderek önem kazanmaktadır (Metals Handbook, 1993).

Teknolojik yöntemlerle kazanılan bu özellikler, çeliğin ya da alaşımın, ısıl yöntemine uyulmasıyla istenilen düzeye getirilir. Bu işlem çeliğin yapımı kadar önemlidir. Isıl işlem yöntemi, çelikte olumlu en üstün koşulları sağlama tekniğidir. Isıl işlemin başarıya ulaşabilmesi için teknik ekipman, personelin yetenek ve teknik bilgisinin yeterli olması gereklidir.

Düşük alaşımlı orta karbonlu çelikler son yıllarda özellikle otomotiv endüstrisi ve savunma sanayinde önemli ölçüde kullanım alanı bulmuştur. Bu çelikler sanayide hadde mamulü ve döküm mamulü olarak çok geniş bir kullanım alanına sahiptirler. Bunun nedeni de, bu çeliklerin yüksek mukavemete sahip olmalarının yanında iyi tokluk özellikleri de göstermeleridir. Düşük alaşımlı çelikler, düşük maliyetli olması sebebiyle döküm yöntemiyle kompleks (karmaşık) şekilli parçaların üretilmesinde tercih edilir (Şen, Bindal ve Yılmaz, 1995; Tekin, 1992; Güleç ve Aran, 1987).

Ç-4140 çelikleri makine imalat endüstrisinde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Örneğin Ç-4140 makine imalat çeliği, talaşlı imalat endüstrisinde yaklaşık %10 oranında kullanılmaktadır ve içerdiği alaşım elementleri nedeni ile yüksek sertleşebilirlik özelliğine sahip bir çeliktir (MKE, 1993).

Ç-4140 çeliğinin en önemli özelliği, içerdiği Cr ve Mo alaşım elementleri nedeniyle, su verme sonrasında sert martenzitik bir yapı oluşturabilmesi, mukavemet, süneklik ve tokluk gibi mekanik özelliklerin bir arada sağlanmasına imkan vermesidir. Tüm bu nedenlerle Ç-4140 çeliği her zaman kullanım alanı yaygın olan bir çeliktir. (Avner, 1986; Choo ve ark., 2000). Çoğu makine elemanlarında özgül sıcaklık değerlerinde temperleme sırasında oluşabilecek gevreklik, en büyük dezavantajlarındandır (Oliveira ve ark., 2000). Bu olumsuz etkiyi önlemek için, uygun temper sıcaklığının seçilmesi çok önemlidir (Charre, 2004; Buytoz, 2004) Uygulanan östenitleme işlemi ve sonrası temper şartlarına bağlı olarak, farklı metalurjik özelliklerle birlikte malzemelerin aşınma özellikleri de değişmektedir. Dolayısıyla Ç-4140 çeliğinin temperleme sonrası oluşan özelliklerinin tespit edilmesi gerekir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Sinan Köksal N., Uzkut M. Ve Sadık Ünlü B., 2004, Farklı Karbon İçerikli Çeliklerin Mekanik Özelliklerinin Isıl İşlemle Değişimi adlı bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmalarında, farklı karbon oranlarındaki çeliklere, su verme işleminin ardından 100, 200, 400 ve 600ºC sıcaklıklarda temperleme işlemi uygulanmış ve malzemelerin mekanik özelliklerinin değişimi araştırılmıştır.

Uzkut M. Ve Özdemir İ. 2001, Farklı Çeliklere Uygulanan Değişen Isıtma Hızlarının Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada Ç1020 (düşük karbonlu), Ç1040 (orta karbonlu) ve Ç4140 (düşük alaşımlı) çelikleri ostenit bölgesine kadar ısıtarak havada soğutmuşlardır. Uygulanan yavaş, orta ve hızlı ısıtma hızlarının bu çeliklerin mekanik özelliklere olan etkileri incelenmiştir.

Özçatalbaş Y., 1996, 1050, 4140 ve 8620 Çeliklerinin Isıl İşlemle Değişen Mikroyapı Ve Mekanik Özelliklerine Bağlı İşlenebilirlikleri adlı çalışmada , haddelenmiş 1050, 4140 ve 8620 çeliklerinin tam tavlama ve normalleştirme ısıl işlemleri ile değiştirilen mikroyapı ve mekanik özelliklerine bağlı işlenebilirliği araştırılmıştır.

Karagöz İ., 2007, Sementasyon çeliklerinde düfüzyon ve sertlik derinliğini arttıracak ısıl işlem koşullarının belirlenmesi adlı bir yüksek lisans tez çalışması yapmışlardır. Bu çalışmada çelik kavramı üzerinde durulmuş, sementasyon çeliklerinin sınıflandırılması yapılmış, semente çeliklerine uygulanan ısıl işlemler, sertlik derinliğine etki eden faktörler, difüzyon ve difüzyon olayına etki eden faktörler ile alaşım elementlerinin sertlik ve difüzyona olan etkileri incelenmiştir.

Tayanç M. ve Zeytin G., 2000, Yüksek Hız Çeliklerinin İç Yapı Ve Isıl İşlem Özellikleri isimli çalışmalarında hız çeliklerinin çeşitlerini, kullanım alanlarını,

kesici takım malzemesi olarak istenen özellikleri, bu özellikleri sağlamak için gerekli bileşim ve uygulanan ısıl işlemleri incelemişlerdir.

Özsaraç U., Yılmaz R., Alparslan Ekerer F. ve Uzun H., Sementasyon işlemi yapılan çeliklerde mikro sertlik ve mikroyapı değişimlerinin incelenmesi" isimli çalışmalarında karbon emdirilmiş SAE 8620 çelikleri için değişik karbürleme süreleri seçilmiş, daha sonra suda sertleştirilmiştir. Numunelerden yüzeyden iç kısma doğru sertlik değerleri alınmış, elde edilen sertlik değerleri metalloğrafik inceleme sonucundaki görülen mikroyapılarla karşılaştırılmıştır.

Ulutan M., 2007, çalışmasında yüksek mukavemetli düşük alaşımlı Ç-4140 çeliğine, üç farklı yüzey işlemi uygulanarak, mikro yapıda oluşacak değişimlerin malzemenin sertliğine ve aşınma davranışları üzerine etkilerini araştırmıştır.Mikroyapı incelemelerinde optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve noktasal analiz teknikleri (EDS, EDX) ile birlikte X-ısını difraksiyonu (XRD) tekniklerinden yararlanılmıştır. Ç-4140 deney numunelerine sertleştirme sonrası; 350, 450, 550, ve 650 ^{o}C'de dört farklı sıcaklıklarda temperleme işlemi yapılmış olup mikro yapıları incelenmiştir.

Demirezen M., Bayrak M., Öztürk F., 2006, araştırmalarında otomotiv rot endüstrisinde yaygın olarak kullanılan DIN 41Cr4 ve DIN 42CrMo4 çeliklerini incelemişlerdir. Maliyet açısından DIN 42CrMo4 daha pahalı olmasına rağmen mekanik özellikler açısından tercih sebebidir. Bu çalışmada ısıl işlemle DIN 41Cr4 ve DIN 42CrMo4 malzemeleri farklı sıcaklıklarda temperlenmiş olup, Temperleme sonucunda elde edilen mekanik özellikler karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak temperleme sıcaklığının değiştirilmesi ile 41Cr4 malzemesinin 42CrMo4 malzemesinin mekanik özelliklerine sahip olabileceği tespit edilip. 42CrMo4 malzemesinin yerine 41Cr4 malzemesinin kullanılması halinde maliyet açısından tasarruf sağlanacağı ve malzeme kullanımındaki farklılıkların ortadan kalkacağı tespit edilmiştir.

Turhan E. (2001), “Islah Çeliklerinde , Isıl İşlem Parametrelerinin Aşınma Davranışına Etkisi” adlı çalışmasında, 42 CrMo4 Islah çeliğinin abrasiv aşınma davranışı incelemiştir. Aşınmaya çalışan uygulamalarda 42 CrMo4 ıslah çeliğinin aşınma dayanımına ısıl işlem parametrelerinin etkisi bu tezde incelenmiştir. 850°C ve 900°C de 10 dakika süreyle su verilen 42 CrMo4 çeliği 250°C, 500°C ve 650°C de 60 dakika süreyle temperlenmişlerdir.

Çökelek M. (2001), “Islah Çeliklerinde , Isıl İşlem Parametrelerinin Yorulma Limitine Etkisi” adlı çalışmasında, su verme işlemleri neticesinde çekme ve akma değerlerine göre yorulma numuneleri dönen eğmeli yorulma deneyine tabi tutulmuşlardır. Malzemelerin yorulma ömrü açısından en uygun ısıl işlem parametreleri belirlenerek malzeme israfını önlemek amaçlanmıştır.

3. ÇELİKLER VE ISIL İŞLEMİ

3.1. Çelikler

Ham demiri arındırarak kullanıma elverişli hale getirmek için yüksek ham demir eritilerek içindeki karbon oranı azaltılır ve diğer zararlı maddelerden de arındırılır. Bu şekilde elde edilen ürüne "çelik" adı verilir.

Demir cinsi malzemelerin içinde %3-%5 oranlarında karbon ve malzemenin özelliğini bozacak oranlarda da mangan (Mn), silisyum (Si), fosfor (P), kükürt (S) gibi elementler vardır. Malzemenin içinde yüksek oranda karbon ve diğer elementlerin bulunması malzemeyi dayanıksız ve kırılgan yapar. Bu malzemeler birbirine kaynatılmaya, eğmeye, bükmeye, çekmeye ve döverek şekillendirmeye elverişli değildir. Bu olumsuzlukları ortadan kaldırıp demire üstün özellikler kazandırmak için, içindeki zararlı elementler kimyasal olarak ayrıştırılarak atılır. Böylece üstün niteliklere sahip çelik elde edilmiş olur.

Elementler	**%C**	**%Si**	**%Mn**	**%P**	**%S**
Ham Demir	3,60	0,40	0,60	1,90	0,05
Çelik	0,17	0,20	0,20	0,03	0,03

Şekil 3.1 Ham demir ve çeliğin kimyasal bileşimleri

3.1.1. Alaşımsız çelikler (sade karbonlu çelikler)

Bunlar yapılarında az miktarda mangan silisyum oksijen azot ve kükürt gibi çelik üretim yöntemlerinden gelen elementler bulunduran demir karbon alaşımlarıdır.

Alaşımsız çelikler ucuz ve kolay şekillendirilebilirler. Mekanik özellikleri yapılarında bulunan karbon oranına bağlı olarak değişir. Bugün için demir çelik endüstrisinde üretilen çeliklerin büyük bir çoğunluğu alaşımsız çeliklerdir. Sertleşme yetenekleri azdır, sertleştirme işlemlerinden sonra parçada çatlama ve çarpılmalar meydana gelir. Kalın kesitli parçalar ise istenilen düzeyde sertleştirilemezler. Korozyona karşı dayanımı azdır. Alevle ve indüksiyonla yüzey serleştirilme yapılabilir. Yapılarındaki karbon oranlarına göre alaşımsız çelikler 3 kısma ayrılırlar.

- Düşük karbonlu çelikler : %0,05 - 0,3 karbon içerir.
- Orta karbonlu çelikler : %0,3 – 0,8 karbon içerir .
- Yüksek karbonlu çelikler : % 0,8 - 1,7 karbon içerir.

Az karbonlu çelikler sertleştirilemezler bunların uygun yöntemlerle yüzeylerin sertleştirilmesi mümkündür. Orta karbonlu çelikler ısıl işlemlere oldukça yatkındır dayanımları az karbonlu çeliklere oranla daha iyidir. Yüksek karbonlu çeliklerin sünekliği azdır. Kesilmeleri ve işlenmeleri güçtür. Talaş kaldırma işlemine yumuşatma tavlaması ile yatkınlık kazandırılabilir.

3.1.2. Alaşımlı çelikler

Alaşımlı çelikler, sade karbonlu çeliklere alaşım elemanlarının ilavesi ile elde edilen çeliklerdir. Alaşımlı çeliklerin üretilmesiyle, sade karbonlu çeliklerde bulunan bazı dezavantajlar azaltılarak, çeliğin kullanım alanı genişletilmiştir. Çeliklere alaşım elemanı ilavesinin yararları şöyle sıralanabilir:

- Kalın kesitli parçaları derinliğine sertleştirilme olanağı doğar.

- Sade karbonlu çeliklerde tüm kesit boyunca martensitik bir yapı elde etmek için çeliklerin çok hızlı soğutulması gerekmektedir. Bu durum çarpılma ve çatlama riskini arttırmaktadır. Halbuki alaşımlı çeliklerde, yağda hatta havada yapılan soğutmalarla bile kolaylıkla martensitik yapı elde edilebilmektedir.

- Alaşımlama ile bazı çeliklerin darbe dayanımları önemli ölçüde yükseltilebilir.

- Sade karbonlu çeliklerin korozyon direnci oldukça zayıftır. Yüksek sıcaklıklarda kolayca oksitlenir ve yüksek sıcaklık korozyonuna maruz kalırlar. Alaşımlama yoluyla çeliklerde korozyon dayanımı büyük oranda arttırılır.

- Alaşımlı çeliklerde yüksek gerilme ve süneklik değerleri korunurken, temperlemede daha yüksek temperleme sıcaklıklarının kullanılmasına olanak sağlanır.

- Alaşımlı çelikler, hem düşük ve hem de yüksek sıcaklıklarda çalışma durumlarında, büyük ölçüde mekanik özelliklerini korurlar.

- Alaşımlı çeliklerin aşınma direnci ve yorulma davranışı, bazı alaşım elemanlarının katkısıyla büyük oranda artma gösterir. (Ulutan, 2007)

Alaşımlı çelikler; alaşımsız çeliklerle elde edilemeyen, yüksek sertlik ve mukavemetin bir arada istendiği durumlarda kullanılmaktadır. Bu nedenle alaşımsız çeliklere nikel, krom, molibden, mangan, silisyum, volfram, vanadyum ve bazen de kobalt, bakır ve kurşun alaşım elementleri eklenerek alaşımlı çelikler üretilir (Topbaş, 1998; Ashby ve Jones, 1994; Savaşkan, 1999; Erdoğan, 2000; Meyrick ve Glyn, 2001; Yıldırım ve ark., 2001).

Alaşımlı çeliğin içerdiği molibden, mangan, krom ya da nikel elementleri çeliğin sertleşebilirliğini büyük ölçüde arttırmaktadır. Böylece çelikte, kalın kesitli parçalarda bile, martenzit oluşumu kolaylaştığından, parça sertliği büyük oranda yükselmektedir. Bunun için % 0.2-0.6 C ile birlikte, çeliğe % 2-7 oranlarında alaşım elemanı katkısının yapılması yeterli olmaktadır.

Alaşımlı çeliklerden, örneğin az mangan katkılı olanları düşük soğutma hızlı yağ ortamında ve az oranlarda krom molibden - volfram katkılı olanları da daha yavaş soğutma ortamı olan havada soğutarak martenzit oluşturmak mümkündür.

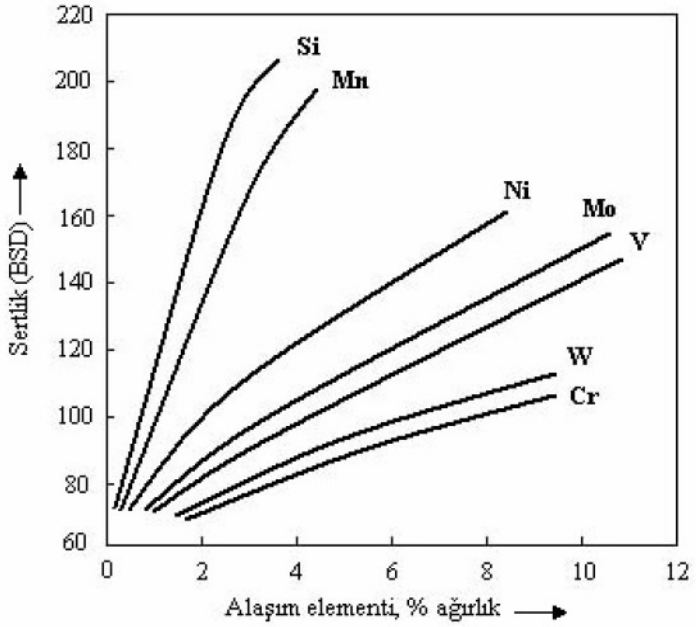
Martenzit oluşumundan sonra, sertleştirilmiş çeliklerde, temperleme ile istenen mukavemet ve toklukta bileşime ulaşılabilmektedir.

Düşük alaşımlı çeliklerde, alaşım elemanları ferrit ve östenit içerisinde büyük oranda çözündüklerinden ilave bir ısıl işlem gerektirmeden iyi düzeylerde çözelti sertleşmesi sağlarlar. Böyle çeliklerde, beynit oluşumu kolaylaştığından, kısmen kaynak edilebilme yeteneği artar. (Ashby ve Jones, 1994; Cheremisinoff, 1996).

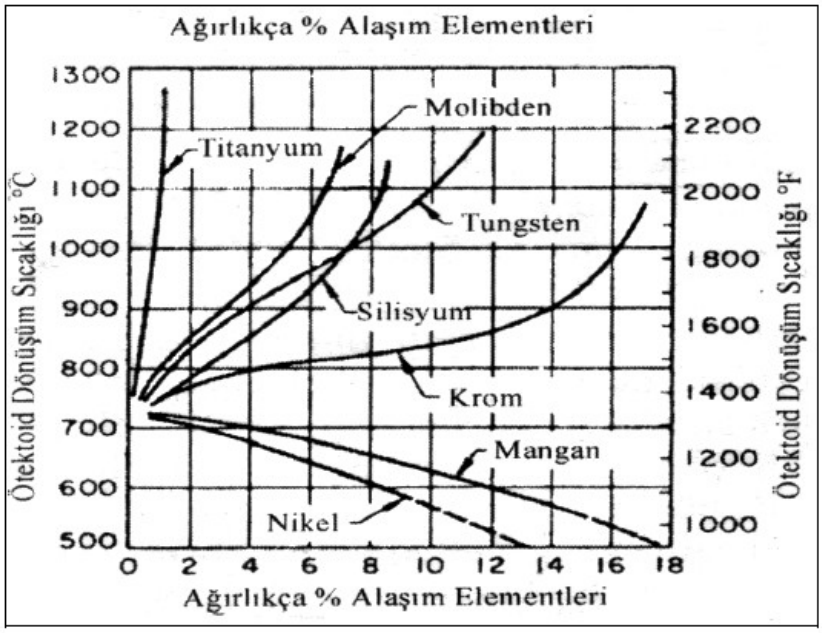
Düşük alaşımlı çelikler krank millerinde, civatalarda, yaylarda, bağlantı elemanlarında, basınç kaplarında, uçak parçaları yapımında, oto milleri üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Alaşımlı çelikler, karbondan başka elementlerin katıldığı, kendine özgü karakteristik özelliklere sahip olan çelikler olarak tanımlanır (Yıldırım ve ark., 2001). Alaşımlı bir çelikte alaşım elementlerinin dağılımı ve oluşturdukları yapılar, çeliğin bileşimine bağlı olarak değişmektedir. Bu elementlerin sayısı ve miktarı arttırıldığında çelik içerisinde etkileşimler ve bunun sonucundaki oluşumlar çok karmaşık olabilmektedir (Şekil 3.2).

Alaşımsız çeliğe üçüncü bir element katıldığında, ikili $Fe-Fe_3C$ faz diyagramında kritik sıcaklıklar, ötektik noktanın konumu ve bazı faz bölgelerinin (α ve γ) sınırları değişir. Isıtma sırasında Mn ve Ni Ac_3 sıcaklığını düşürürken, Mo, Al, Si, W ve V bu sıcaklık değerini yükseltir. Ac_3 sıcaklığının düşmesi veya yükselmesi, çeliğin su verme sıcaklığının değişmesine neden olur. Aynı şekilde bu alaşım elemanları Ac_1 sıcaklığını da benzer şekilde etkiler. Alaşım elementlerinin ötektoid dönüşüm sıcaklığına etkileri Şekil 3.3' de görülmektedir.



Şekil 3.2 Fe_3C içerisinde çözünen elementlerin çeliğin sertliğine etkileri (Buytoz, 2006)



Şekil 3.3 Çeşitli alaşım elementlerinin ötektoid dönüşüm sıcaklığına etkileri (Erdoğan, 2000)

Bütün alaşım elementleri $Fe-Fe_3C$ faz diyagramındaki ötektoid noktanın karbon oranını azaltır. Ancak yüksek oranlardaki Ni ve Mn katkısı Ac_1 sıcaklığını düşürerek, yavaş soğuma sırasında östenit dönüşümünü önleyebilir. Bu nedenle, Ni ve Mn'a östeniti engelleyici veya stabilize edici elementler adı verilir. Bu elementler sayesinde östenit fazı oda sıcaklığında korunup kararlı duruma getirilebilir.

Genellikle su verilen malzemeler çok gevrek oldukları için temperleme işlemine tabi tutulurlar. Bu işlem sonucunda çeliklerin tokluğu artarken, sertliği bir miktar azalır. Temperleme sıcaklığı arttıkça, çeliğin sertliği düşer. Alaşım elementleri ise temperleme sırasında çeliğin yumuşama hızını düşürürler. Bu nedenle, istenilen sertliğin elde edilmesi için alaşımlı çeliklerin temperleme sıcaklığının yükseltilmesi gerekir. Ferrit içerisinde çözünen Ni, Si ve Mn gibi elementler temperlenmiş çeliğin sertliğini fazla etkilemezler. Karmaşık karbür oluşturan Cr, W, Mo ve V gibi elementler ise temperleme sırasında çeliğin yumuşama hızını önemli ölçüde düşürürler. Bu elementler, temperleme sıcaklığını yükseltmekten başka, bileşim oranlarının yüksek olması durumunda artan temperleme sıcaklığı ile sertliğin artmasına neden olurlar. Yani yüksek oranda karbür yapıcı alaşım elementi içeren çeliğin sertliği, yüksek sıcaklıklarda yapılan temperleme işleminin belirli devrelerinde artar. Karbür yapıcı element içeren alaşımlı çeliklerin sertliğinde görülen bu artışa ikincil sertleşme adı verilir.

Kromlu ve krom-manganlı çelikler 250–400°C sıcaklıklarda temperlendiklerinde sert krom karbürlerin oluşması temper gevrekliğine yol açar. Bu olumsuzluğu önlemek için, ya çeliğe % 0,3–0,5 Mo katılır, ya da çelik bu sıcaklıklardan hızlı soğutularak karbür çökelmeleri engellenir (Yıldırım ve ark., 2001).

3.1.2.1. Düşük alaşımlı krom-molibdenli (Cr-Mo) çelikler

Krom-molibdenli çelikler bileşimlerinde % 0,38-0,43 C, % 0,15-0,25 Mo ve %0,5-1.1 Cr bulundururlar. Alaşım element miktarlarının farklı olmasından dolayı, her bir alaşım elementinin malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerine etkisi farklı

olmaktadır. Bu tur çelikler AISI standartlarında 41XX rumuzu ile gösterilirler. Tablo 3.1'de çeşitli krom-molibdenli çeliklerin kimyasal bileşimi görülmektedir.

Tablo 3.1 Alaşımlı çeliklerin bileşim aralıkları (Shackelford ve Alexander, 2001).

AISI -SAE	Bileşim aralığı (%)							
	C	Mn	P (maks)	S (maks)	Si	Cr	Ni	Mo
1340	0.38-0.43	1.60-1.90	0.035	0.040	0.15-0.30			
3140	0.38-0.43	0.70-0.90	0.040	0.040	0.20-0.35	0.55-0.75	1.10-1.40	
4037	0.35-0.40	0.70-0.90	0.035	0.040	0.15-0.30	0.20-0.30		
4042	0.4-0.45	0.70-0.90	0.035	0.040	0.15-0.30	0.20-0.30		
4130	0.28-0.33	0.40-0.60	0.035	0.040	0.15-0.30	0.80-1.10		0.15-0.25
4140	0.38-0.43	0.75-1.00	0.035	0.040	0.15-0.30	0.80-1.10		0.15-0.25
4150	0.48-0.53	0.75-1.00	0.035	0.040	0.15-0.30	0.80-1.10		0.15-0.25
4320	0.17-0.22	0.45-0.65	0.035	0.040	0.15-0.30	0.40-0.60	1.65-2.00	0.20-0.30
4340	0.38-0.43	0.60-0.80	0.035	0.040	0.15-0.30	0.70-0.90	1.65-2.00	0.20-0.30
4620	0.17-0.22	0.45-0.65	0.035	0.040	0.15-0.30	1.65-2.00		0.20-0.30
4820	0.18-0.23	0.50-0.70	0.035	0.040	0.15-0.30	3.25-3.75		0.20-0.30

Bu çeliklere değişik standartlarda farklı isimlendirmeler yapılmaktadır. Üretim yöntemine, bileşimdeki ilave alaşım elementine, ısıl işlem şartlarına göre, düşük alaşımlı Cr-Mo'li çelik, ısıl işlenebilir düşük alaşımlı çelik veya ıslah çeliği denir. Bileşimindeki yeterli karbon miktarı ile alaşım elementleri nedeniyle sertleştirmeye elverişli olan ve ıslah edilmiş (sertleştirme + temperleme) durumda belirli bir çekme dayanımında yüksek tokluk gösteren makine yapım çeliği olarak da adlandırılırlar (Krauss, 1997; Tayanç ve Toktaş, 2002).

Krom, çeliğe katılan temel alaşım elementlerinden biridir. Kritik soğuma hızını düşürür. Yüksek sertlik ve aşınma dayanımı sağlayan ve hidrojen gazına karşı dayanıklı olan karbürler oluşturur. Sertleştirici ve tane küçültücü etkileri vardır. Düşük karbon içerikli çeliklerde % 12'in üzerine çıkacak krom katkı değerlerinde çelik paslanmaya ve asitlere karsı korozyon direnci kazanır. Krom içeriği % 17'yi aşan çelikler, ısıya ve yüksek çalışma sıcaklıklarına dayanıklı olur. Kromla birlikte mangan, molibden, vanadyum ve nikelle ısı ve aşınma dayanımını daha da arttırmak mümkündür. Bilyalı ve masuralı rulmanlar için gereken yüksek sertlik ve tokluk

özelliklerinin sağlanması için % 1-1.5 Cr içeren çelikler kullanılır. Krom oranı arttıkça çeliğin kaynak edilebilme yeteneği azalır. Her % 1 Cr artısında malzemenin çekme dayanımı 80-100 (N/mm²) artma gösterir. Aynı oranda olmamakla beraber yine, akma sınırında bir yükselme ve çentik darbe tokluğunda düşme görülür (Yıldırım ve ark., 2001**)**

Molibden γ ve α-demirde sınırlı oranda çözünen ve güçlü bir karbür oluşturucu elementtir. Aşınma dayanımına, sertleşme derinliğine, temper gevrekliğini önlemede, kesme yeteneğini geliştirmede önemli etkileri vardır. Cr gibi çeliklerin gerilmesini ve yüksek sıcaklık sertliğini arttırır. Krom, krom-manganlı çeliklere % 0.3-0.5 Mo ilavesi diğer alaşımlı çeliklere göre, oluşacak temper gevrekliği büyük oranda azaltır. Bu element, sık sık ya Ni veya Cr, ya da hem Ni hem de Cr elementi ile birlikte kullanılır. Sade molibdenli çelikler (40XX ve 44XX) genellikle karbürlenerek şaft ve transmisyon dişli çarklarda yaygın olarak kullanılırlar (Topbaş, 1998; Yıldırım ve ark., 2001).

Cr-Mo'li çelikler (41XX) kaynak kabiliyeti iyi, sünek ve derinliğine sertleşebilen çeliklerdir. Uçak parçalarında, otomobil millerinde ve basınca dayanıklı kaplarda kullanılırlar. Bunlar aşınmaya ve yüksek yorulma direncine sahip, tokluk özellikleri iyi olan çeliklerdir (Topbaş, 1998; Erdoğan, 2000).

3.1.2.1.1. Ç-4140 çelikleri

Ç-4140 çeliği, düşük alaşımlı Cr-Mo'li ıslah çeliklerinin en yaygın kullanılanım alanına sahip olup, krom- molibden çeliği olarak bilinmektedir. AISI 4100 serisi çeliği, düşük alaşımlı yapı çelikleri, dövme kalite çelikler, orta karbonlu çelik ve alaşımlı çelik olarak da isimlendirilir.

Kullanım alanları arasında, otomobil ve uçak yapımı, krank mili, aks mili ve kovanı, yivli mil ve benzeri sünekliği yüksek parçalar, ayrıca dişli çark ve bandaj vb. parçaları sayabiliriz.

Ayrıca, soğuk çekme mil ve çubukları, makine çelikleri, yaylar, türbin motorları, turbo jeneratörlerin fren halka ve kolları, gemi zincir ve demirleri yapımında, demir yol tekerlekleri ve millerinde, starter dişlilerinde ve birçok yerde kullanılmaktadırlar.

Tablo 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 ve 3.7'de Ç-4140 çeliğine ait kimyasal kompozisyonlar, mekanik, ısıl işlem, ısı ve elektrik özellikleri ile kritik sıcaklıklar görülmektedir.

Tablo 3.2 Ç-4140 çeliğinin kimyasal kompozisyonu

Element	**% Ağırlık**
C	0.38-0.45
Mn	0.75-1.00
P	0.035 (max)
S	0.04 (max)
Si	0.15-0.30
Cr	0.80-1.10
Mo	0.15-0.25

Tablo 3.3 Ç-4140 çeliğinin ısıl özellikleri

Özellikler		Koşullar	
		T (°C)	**İşlem**
Isıl Genleşme (10^{-6}/ºC)	12.3	20-100	Yağda sertleştirilmiş, 600°C 'de temperlenmiş
Isıl İletkenlik (W/m-K)	42.7	100	
Özgül Isı (J/kg-K)	473	150-200	

Tablo 3.4 Ç-4140 çeliğinin mekanik özellikleri

Özellikler		**Koşullar**	
		T (°C)	**İşlem**
Yoğunluk (×1000 kg/m³)	7.7-8.03	25	
Poison Oranı	0.27-0.30	25	
Elastisite Modülü (GPa)	190-210	25	
Çekme Dayanımı (Mpa)	655.0	25	815°C 'de tavlanmış
Akma Dayanımı (Mpa)	417.1		
% Uzama	25.7		
% Kesit Daralması	56.9		
Sertlik (HB)	197	25	815°C 'de tavlanmış
Darbe Dayanımı (J)	54.5	25	815°C 'de tavlanmış

Tablo 3.5 Ç-4140 çeliğinin elektriksel özelliği

Özellikler		**Koşullar**	
		Değer	**T (°C)**
Elektrik Direnci (10^{-9} Ω -m)	12.3	222	20

Tablo 3.6 Ç-4140 çeliğinin ısıl işlem özellikleri (Stahlschlüssel, 2004)

Özellikler	**Koşullar**	
	Sıcaklık (°C)	**Soğutma**
Sıcak Şekil Verme	850-1050 °C	
Normalizasyon	840-880 °C	
Yumuşak Tavlama	680-720 °C	
Sertleştirme	820-860 °C	Su
	820-860 °C	Yağ

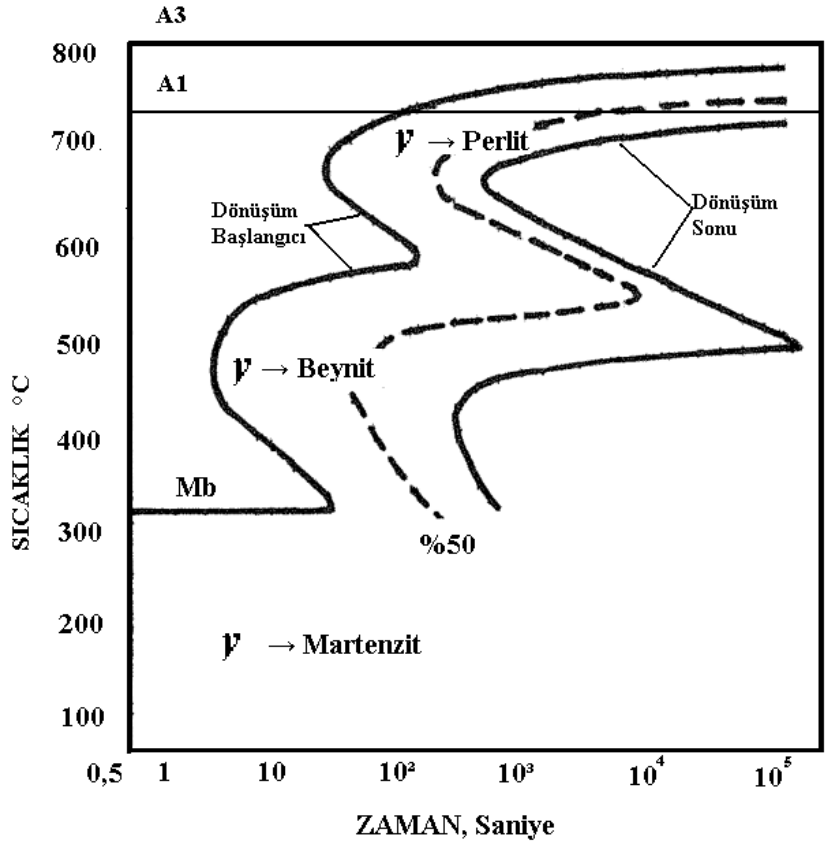
Tablo 3.7 Ç-4140 çeliğinin yaklaşık kritik sıcaklıkları

Element	Mf	Ms	Ar1	Ac1	Ar3	Ac3
Sıcaklık (°C)	260 °C	343 °C	680 °C	732 °C	743 °C	804 °C

Ç-4140 çeliği aynı gruptan çeliklerle kıyaslandığı zaman orta derecede sertleşebilir ancak onlara nazaran dayanım ve tokluğu ise daha iyidir. Fakat çalışma ortamlarındaki performansı normal değerlerdedir. Yüksek karbon içeriğinden dolayı daha iyi sertleşir ve mukavemeti artar. Çekme dayanımları 1650 MPa'a kadar çıkabilir. Sertleştirme ve temperleme ısıl işlemine uygundurlar. Çalışma ortamlarındaki dayanımı 480 °C'den sonra hızlı bir şekilde azalır. Isıl işlem ve gerilme konsantrasyonu ile çeşitli sıcaklıklarda dönüşüme uğrayabilirler.

Ç-4140 çeliğinden yüksek dayanım istendiğinde, ısıl işlem sonucu hidrojen gevrekliği oluşabilir. Ancak bu esnada hidrojen gevrekliğini önlemek ve süneklik kazandırmak için 2-4 saat 190 °C'de ısıl işleme tabi tutulurlar. 540 °C'ye kadar sürünme dirençlerini korurlar. 1100- 1200 °C'de kolayca şekillendirilebilirler ve sıcak şekillendirildikten sonra yavaşça soğutulmalıdırlar. Bu çelikler, bu ısıl işlemlerden sonra kaynak kabiliyeti iyileşir. Soğuk şekillendirme ile % 62 oranında şekillendirilebilirler. Ç-4140 çelikleri çubuk, merdane, levha, plaka, mil veya döküm yöntemiyle üretilip şekillendirilebilirler. Yüksek dayanımlı makine parçaları ve elemanlarında kullanılır (ASM V-1, 1997).

Östenit dönüşümü sırasında görülen ve öncelikle dönüşüm ürününün özelliklerini belirleyen çok yönlü olayların irdelenmesinde zaman-sıcaklık-dönüşüm diyagramlarından faydalanılır. TTT (Time – Temperature - Transformation) ve CCT (Continuously – Cooling - Transformation) diyagramları olarak bilinen bu diyagramlarla dönüşüm olayları sıcaklık ve zamana bağlı olarak gösterilir.

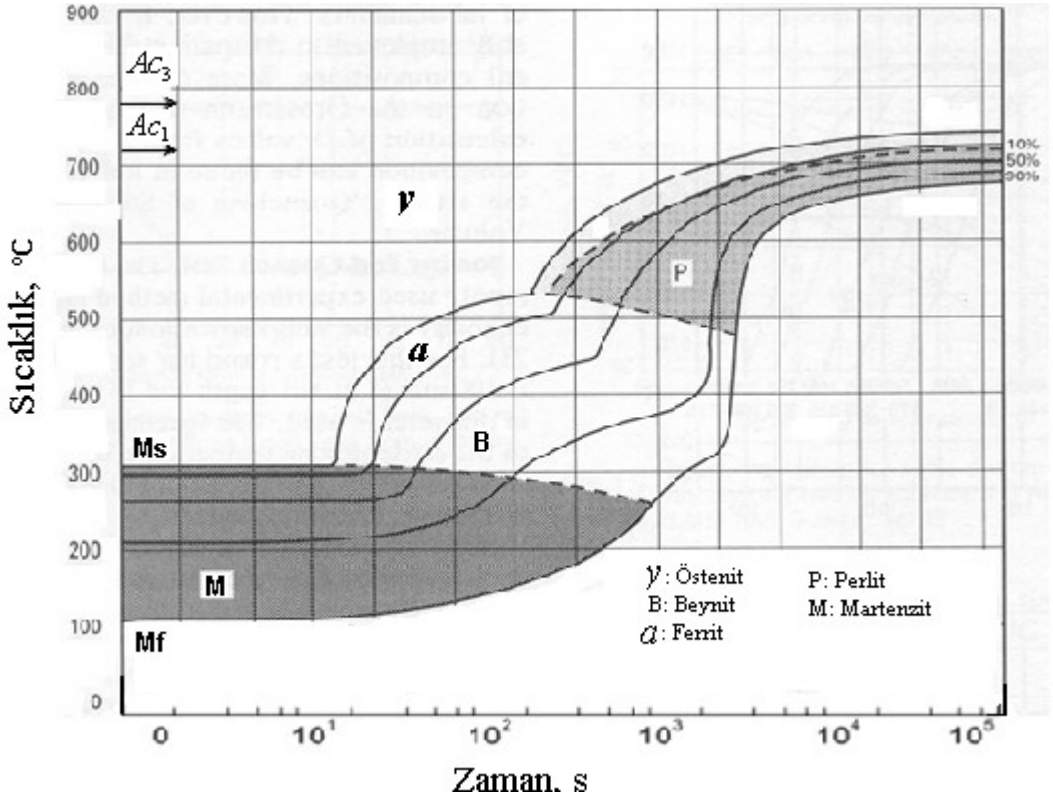


Şekil 3.4 Ç-4140 çeliğine ait TTT diyagramı

Şekil 3.4'te izotermik dönüşüm için Ç-4140 çeliğine ait TTT diyagramı görülmektedir. TTT diyagramı ile malzememiz istediğimiz yapı göz önüne alınarak belirlenen bir sıcaklığa hızla soğutulur ve bu sıcaklıkta bekletilir. İstediğimiz dönüşüm gerçekleşinceye kadar sabit sıcaklıkta bekletilir ve tekrar soğutulur.

Çelikte yapının tamamen perlit ya da beynit olması istendiğinde bu diyagramdan faydalanılır. Ç-4140 çeliğinin yapısının tamamen perlit ya da beynit olmasını istediğimizde Şekil 3.4'teki değerler okunarak bu yapılar elde edilir.

Ç-4140 çeliğine ait CCT diyagramı Şekil 3.5' te görülmektedir. Bu diyagram, özel soğutma ortamlarında ulaşılabilen soğutma hızının, östenitten martenzite veya beynitten perlite faz dönüşümünün etkilerini içermektedir. Bu diyagramlar su verme ortamının etkilerinin teorik olarak görülebileceği diyagramladır (Smith ve ark.).



Şekil 3.5 Ç-4140 çeliğine ait CCT diyagramı (Berns and Theisen, 2008)

Ç-4140 çeliklerinin soğutma prosesini anlamak için hayli kritik öneme sahip olan martensit dönüşümünün başlangıç ve bitiş sıcaklıkları (Ms,Mf) bu diyagramdan okunabilir (Şekil 3.5). Bu sıcaklıklarla birlikte Ç-4140 çeliğine ait olarak çeliğin ısıtılmasında kritik östenit dönüşüm sıcaklıkları olan Ac_1 ve Ac_3 ile çeliğin soğutulmasında östenitten perlite dönüşüm dönüşüm sıcaklığı olan Ar_1 ve östenitten ferrite dönüşüm sıcaklığı olan Ar_3 sıcaklıkları Tablo 3.7'de verilmiştir.

CCT diyagramı ile soğutma hızları sonunda malzemedeki yapılar görülür. Çok hızlı soğutma (örneğin su) ile yapının tamamen martenzite dönüşeceği şekilde çok açık bir şekilde görülmektedir. Çok hızlı olmamak kaydı ile örneğin yağda soğutularak beynitik bir yapı elde edilebilir. Yine Şekil 3.5'te malzemede ferrit ve perlit yapısı oluşturmak için yavaş soğuma gerektiği görülmektedir.

3.2. Çeliklerin ısıl işlemi

Isıl İşlem, katı haldeki metal veya alaşımlara belirli özellikler kazandırmak amacıyla bir veya daha çok sayıda, yerine göre birbiri peşine zamanlanarak uygulanan ısıtma ve soğutma işlemleridir (TS 1112 EN 10052).

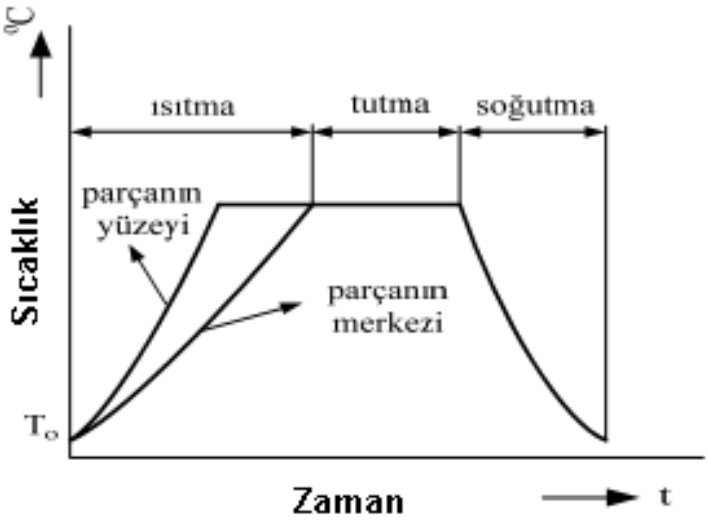
Bir başka ifadeyle ısıl işlem içyapı ve özellikler bakımından belirli bir durumu elde etmek üzere, malzemenin solidüs (katılaşma) sıcaklığının altında uygun sıra ve süre ile ısıtılıp soğutulmasıdır. (Güleç ve Aran, 1987)

Çeliklere ısıl işlem yapılmasının başlıca amaçları;

- Talaşlı işlenebilme özelliğinin iyileştirilmesi
- Dayanımın arttırılması veya azaltılması
- Soğuk şekil vermenin etkisinin yok edilmesi
- Mikrosegregasyon'un giderilmesi
- Tane büyüklüğünün değiştirilmesi
- İç gerilmelerin azaltılması
- Belirli bir içyapının elde edilmesi

şeklinde özetlenebilir.(Güleç ve Aran, 1987)

Isıl işlem, tavlama ve sertleştirme olmak üzere 2 grupta incelenebilir. Tavlama ile içyapı kararlı denge durumuna ulaşırken sertleştirmede yarı kararlı bir içyapı elde edilir.



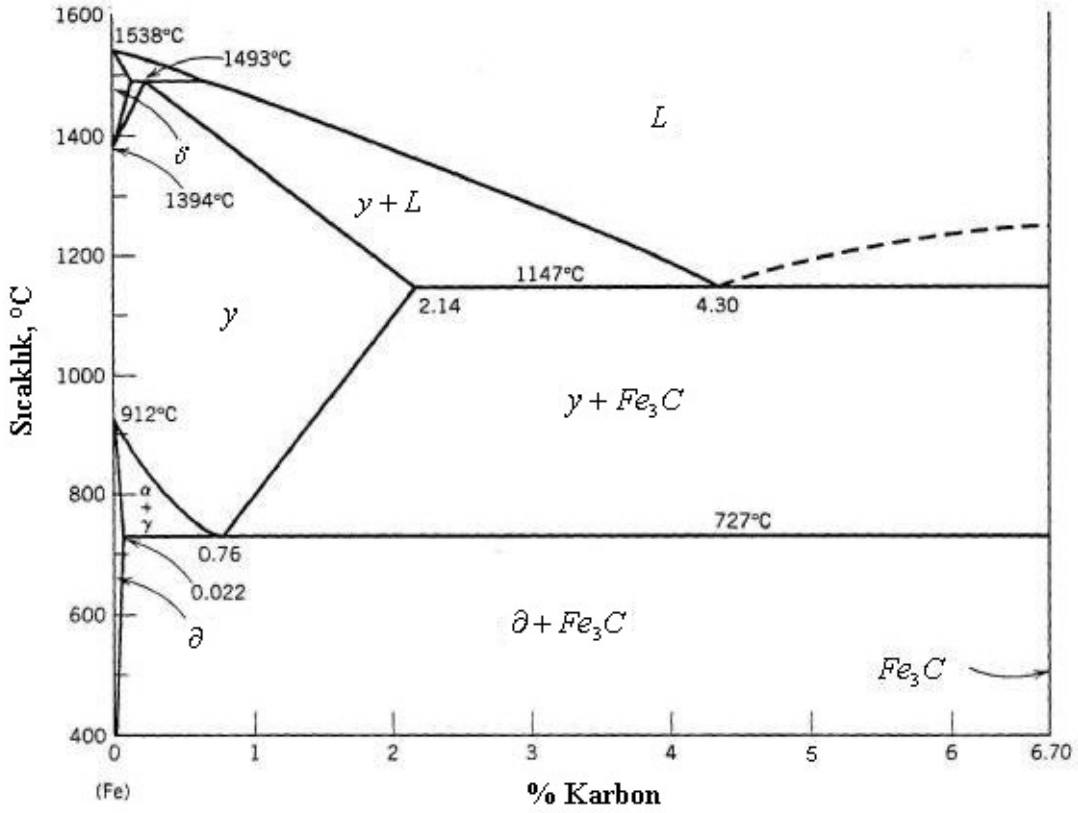
Şekil 3.6 Isıl işlemde sıcaklık-zaman diyagramı

Her ısıl işlem en az 3 aşamadan oluşur (Şekil 3.6);

- Belirli bir sıcaklığa ısıtma
- Bu sıcaklıkta tutma
- Soğutma

3.2.1 Demir karbon denge diyagramı

Şekil 3.7'de demir karbon denge diyagramı gösterilmektedir. Demir karbon denge diyagramında çelikler içerdikleri karbon oranına göre yedi fazdan oluşmaktadır.



Şekil 3.7 Demir karbon denge diyagramı

1. ***L*** **:** Eriyik Çelik
2. ***y*** ***+L*** **:** Östenit + Eriyik Çelik
3. ***y*** **:** Östenit
4. ***y*** **+** Fe_3C **:** Östenit + Sementit
5. ***∂*** **:** Ferrit
6. ***∂ + y*** **:** Östenit + Ferrit
7. ***∂*** **+** Fe_3C **:** Ferrit + Sementit

3.2.2. Östenit soğuması ve faz değişimleri

Çelikler %2'ye kadar karbon içeren bileşiklerdir. İçerdikleri karbon oranına göre üç gurupta incelenebilir.

1. Karbon Oranı 0,8 den küçük olan çelikler (ötektoidaltı çelikler)
2. Karbon oranı 0,8 olan çelikler
3. Karbon oranı 0,8 den büyük olan çelikler (ötektoidüstü çelikler)

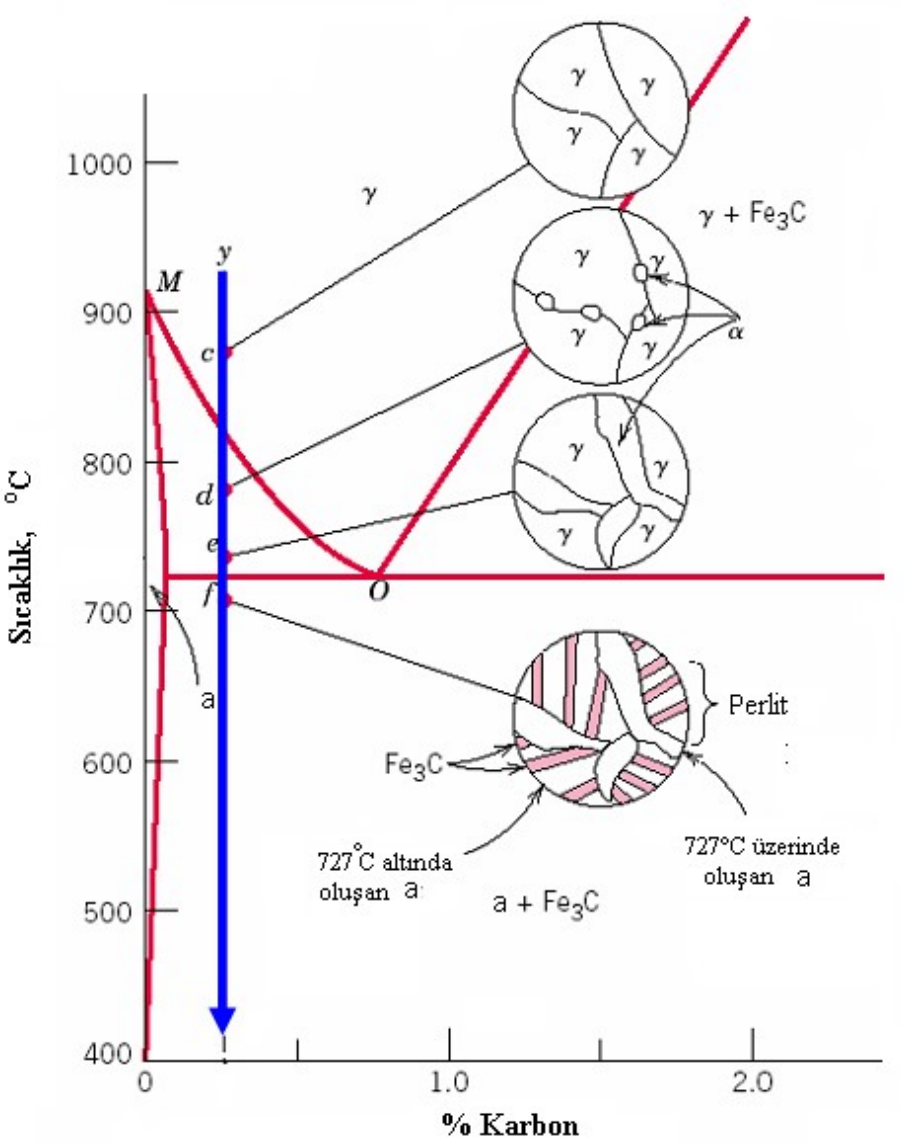
Çeliklerin içerdikleri karbon oranına göre faz dönüşümleri farklılık gösterir. Şekil 3.8'da ötektoitaltı çelikler için faz değişimi görülmektedir:

Aşağıda bu dönüşüm sırasındaki fazlar detaylı olarak anlatılmıştır.

a. **Östenit Fazı (*y*) :** Karbon oranına göre 723-1500°C arasında özelliğini korur.Yüzey merkezli kübik yapıdadır. (c noktası)

b. **Ferrit + Östenit ($\partial + y$) :** Ötektoitaltı çeliklerde 727-900°C aralığında oluşur. Hacim merkezli kübik yapıdadır. (d ve e noktası)

c. **Perlit ($\partial + Fe_3C$) : 727**°C'nin üzerinde oluşan ferrit birincil ferrit,727°C'nin altında oluşan ferrite de ikincil ferrit adı verilir. İkincil ferrit sementitle birleşerek perlit yapısını oluşturur. (f noktası)



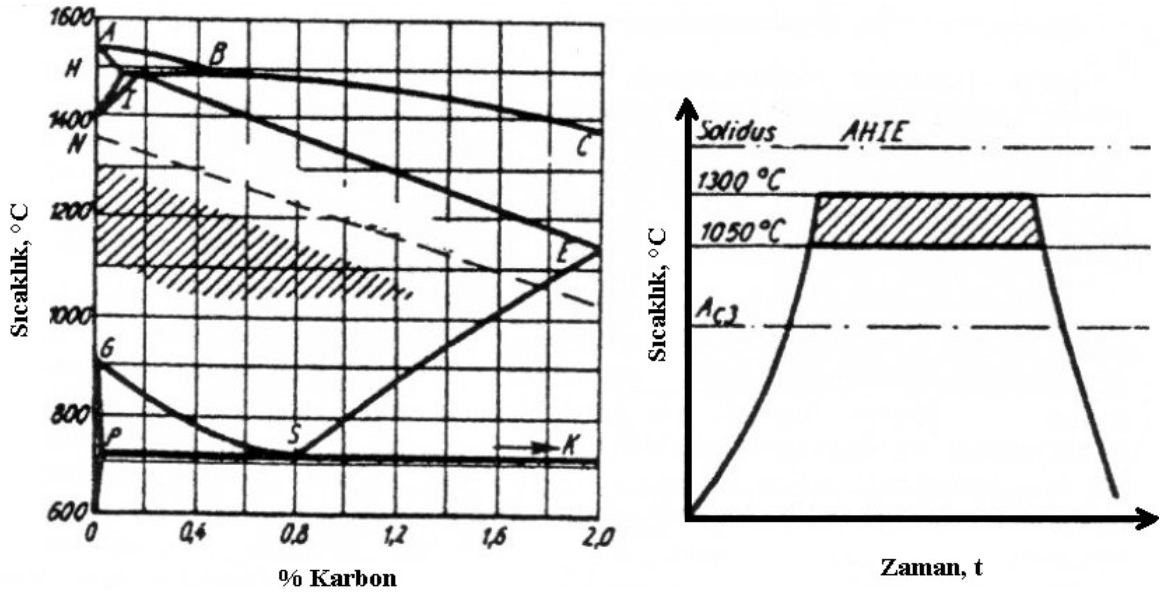
Şekil 3.8 %C < 0,8 olan çelikler için östenit soğuması sonucu faz değişimleri

3.2.3. Tavlamalar

3.2.3.1. Homojenleştirme tavlaması

Homojenleştirme tavlamasının amacı; çelik içerisindeki çözünebilir bileşiklerin iç yapıda düzenli bir şekilde dağılmasını sağlamaktır. Bunun için parça mümkün olan en yüksek sıcaklığa ısıtılıp belli bir süre tutulur. Bunun neticesinde malzeme içinde

katılaşma sırasında ortaya çıkan segregasyonlar (bölgesel bileşim farklılıkları) difüzyon yoluyla giderilir.



Şekil 3.9 Homojenleştirme tavı ısıl işlem diyagramı

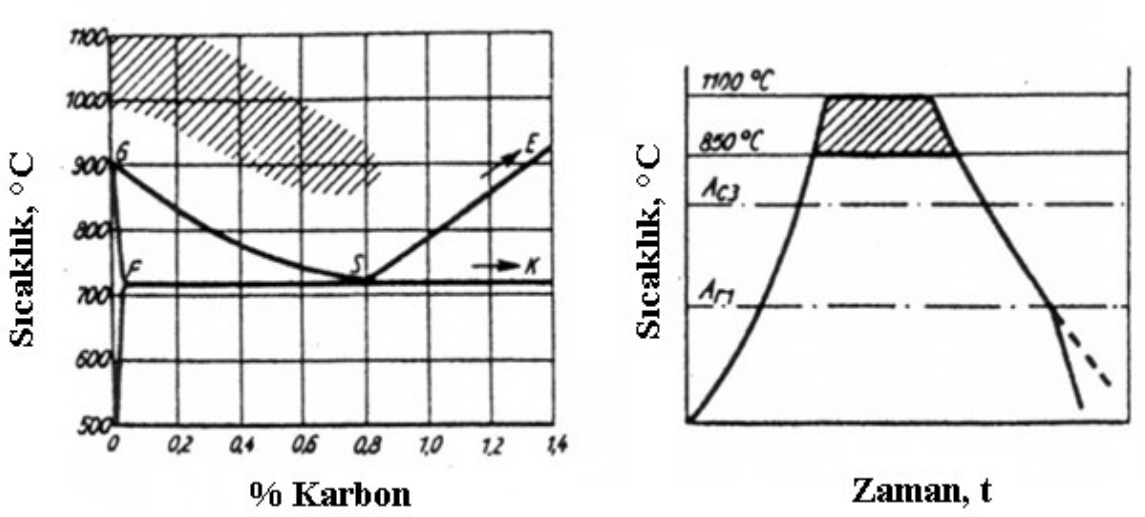
Malzeme içerdiği karbon miktarına göre 1000°C ile 1300°C arasında uzun süre (yaklaşık 50 saat) tavlanır. Artan sıcaklık tane sayısını azalttığından tane irileşmesine sebep olur. Bunun için homojenleştirme sonrası iri tanelerin normalizasyon ile giderilmesi gerekmektedir. Şekil 3.9'da tavlama işleminde çeliğin karbon oranına göre hangi sıcaklık aralığında yapılacağı gösterilmiştir. %

Çözünebilen bileşikler homojenleştirme sırasında tane sınırlarından tane içlerine doğru yayınır. Karbür, oksit ve nitrür gibi çözünmeyen bileşikler ise küresel bir biçim alırlar. Böylece bazı çeliklerin mekanik özellikleri homojenleştirme işlemi ile iyileşme gösterir.

3.2.3.2. İri tane tavlaması

Bu tavlamanın amacı çeliğin tane boyutunu büyüterek, malzemeyi yumuşatmak ve talaşlı imalat kabiliyetini arttırmaktır.

Çelik ostenit sahası içinde, normalizasyon sıcaklığının üzerinde 950° ile 1100°C arasında ısıtılır ve birkaç saat tutulur. Ac_1 sıcaklığına kadar çok yavaş soğuma sağlanır. Daha sonra soğutma işlemi hızlı yapılabilir. Şekil 3.10'de çeliğin karbon oranına göre iri tane tavlaması sıcaklık aralığı görülmektedir.

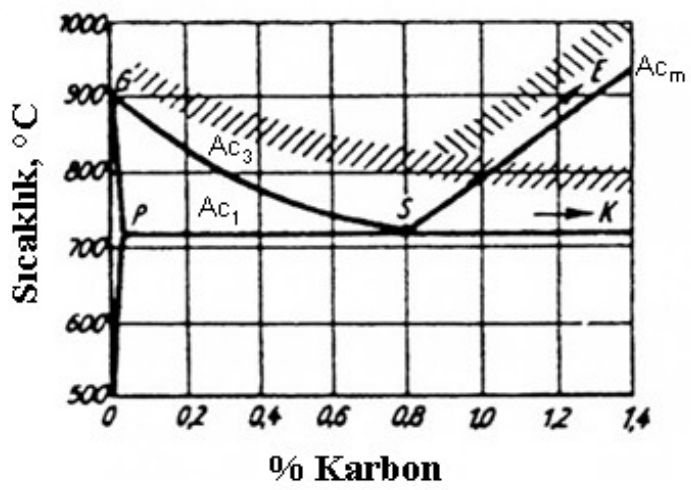


Şekil 3.10 İri tane tavlaması ısıl işlem diyagramı

Bu işlem sonunda çok iri tane yapısına sahip olan çelik, talaşlı imalat sonrasında normalizasyon işlemine tabi tutularak, ince taneli bir yapı elde edilebilir.

3.2.3.2. Normalizasyon

Normalizasyon tavı genelde tane küçültmek, homojen bir iç yapı elde etmek ve çoğunlukla mekanik özellikleri iyileştirmek amacıyla ötektoid altı çelikleri Ac_3 ve ötektoid üstü çelikleri Ac_m dönüşüm sıcaklıklarının yaklaşık olarak 40-50^oC üstündeki sıcaklıklara kadar ısıtıp ,tavlandıktan sonra fırın dışında sakin havada soğutma işlemidir. Normalleme sonrası mikroyapı ince ve orta perliktir. Şekil 3.11'de çeliğin karbon oranına göre normalizasyon tavlaması sıcaklık aralığı verilmiştir.



Şekil 3.11 Normalizasyon tavlaması ısıl işlem diyagramı

Normalizasyon tavının belli başlı amaçları;

a) Tane küçültmek,

b) Homojen bir iç yapı elde etmek,

c) Ötektoid üstü çeliklerde tane sınırlarında bulunan karbür ağını dağıtmak,

d) Çeliklerin işlenme özelliklerini iyileştirmek,

e) Mekanik özellikleri iyileştirmek

f) Yumuşatma tavına tabi tutulmuş çeliklerin sertlik ve mukavemetlerini artırmaktır.

Normalleme derecesinde bekleme süresi tane büyümesine sebep olacağı için uzun tutulmamalıdır. Tablo 3.8'de normalizasyon tavlaması yapılacak malzemenin kalınlığına göre normalizasyon süreleri verilmiştir.

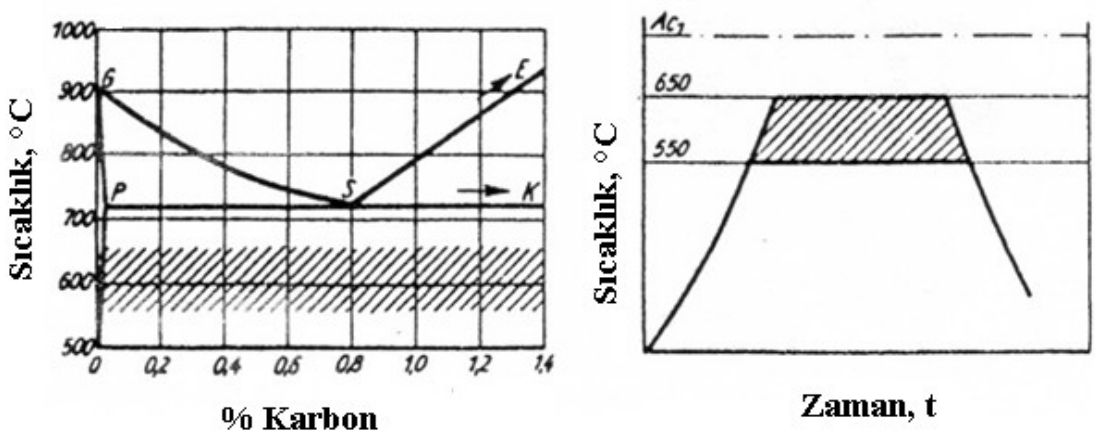
Tablo 3.8 Parça kalınlığına göre normalizasyon ısıl işlem süreleri (Töre, 2007)

Parça Kalınlığı (mm)	Isıtma Süresi (dk.)		Normalleme Derecesinde Bekleme Süresi (dk.)
	Fırın	Tuz Banyosu	
$T \leq 6$	20	10	15
$6.1 \leq T \leq 12$	30	10	25
$12.1 \leq T \leq 25$	45	10	30
$25.1 \leq T \leq 38$	60	15	30
$38.1 \leq T \leq 50$	75	20	30
$50.1 \leq T \leq 63$	90	25	40
$63.1 \leq T \leq 75$	105	30	45
$75.1 \leq T \leq 90$	120	35	55
$90.1 \leq T \leq 100$	135	40	60
$100.1 \leq T \leq 125$	165	50	75
$125.1 \leq T \leq 150$	195	60	90
$150.1 \leq T \leq 180$	225	75	105
$180.1 \leq T \leq 200$	225	90	120

3.2.3.3. Gerilim giderme tavlaması

Çeliklerde kaynak, döküm, plastik şekil verme ve ısıl işlemler sırasında, soğuk işlenen yüzeylerde gerilmeler oluşur. Bu gerilmeler sertliği bölgesel olarak arttırır, sürekli işlemeyi giderek daha da güçleştirir ve beklenilen değerlerin altında kırılmaya yol açarlar. Ayrıca çeliğin daha sonraki ısıl işlemler sırasında eğilmesine yol açılabilir, bu yüzden söz konusu gerilmelerin gerilim giderme tavı ile azaltılması veya yok edilmesi gerekir.

Çeliklerde, bu ısıl işlem faz dönüşüm sıcaklığının altında (550-650°C civarında) 1-2 saat tutma süresi uygulanarak gerçekleştirilir. Soğutma işleminin yavaş yapılması gerekir. Aksi taktirde sıcaklık farklarından dolayı parçada iç gerilmeler yeniden oluşabilir. Aynı nedenlerden ötürü ısıtmanın da yavaş yapılması gerekir. Şekil 3.12'da çeliğin karbon oranına göre gerilim giderme tavlaması sıcaklık aralığı verilmiştir.

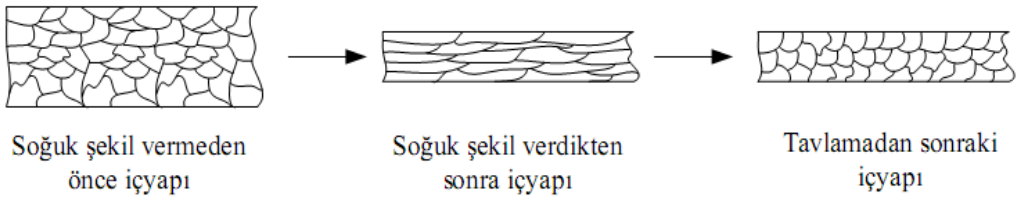


Şekil 3.12 Gerilim giderme tavlaması ısıl işlem diyagramı

3.2.3.4. Yeniden kristalleştirme tavı

Soğuk şekil değiştirme sonucunda malzemelerin kristal ve tane yapısı bozulma, iç gerilmelerde ve mukavemetlerinde artış; süneklik ve şekil alma kabiliyetlerinde ise azalma olur.

Bu tavlamanın amacı, malzemede bir faz dönüşümü oluşturmadan metale iç yapısı da dahil olmak üzere soğuk işlem öncesi özelliklerini kazandırmaktır. Şekil 3.13'de yeniden kristalleştirme aşamalarında tane yapıları gösterilmektedir.

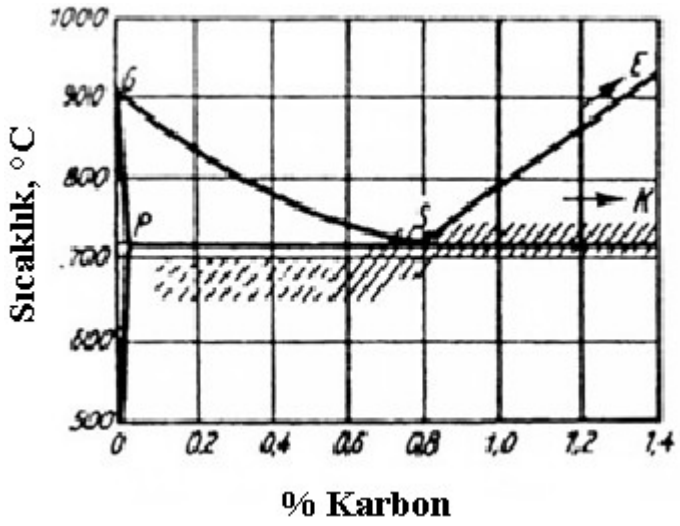


Şekil 3.13 Yeniden kristalleştirme tavlaması aşamalarında tane yapısı

İşlem şekil değiştirme oranı ile diğer ekenlere bağlı olarak 600-700°C civarında gerçekleştirilir.

Yeniden kristalleşmede şekil değişimi oranı, tav süresi ve tav sıcaklığı birbirine uygun seçilmelidir. Aksi durumda tane irileşme tehlikesi vardır. İnce taneli bir iç yapı elde edilebilmesi için işlem, kritik şekil değişimi oranının oldukça üstünde soğuk şekillendirilmiş parçalara uygulanmalıdır.

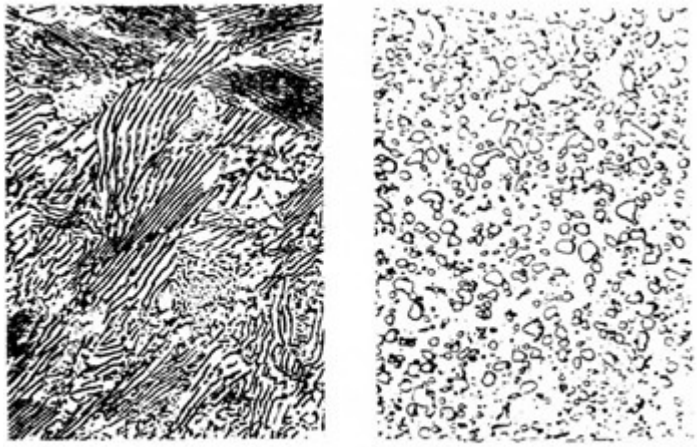
3.2.3.5. Küreselleştirme tavlaması



Şekil 3.14 Küreselleştirme tavı ısıl işlem diyagramı

Bu tavlamanın amacı, %0,5'ten çok C içeren çeliklere talaşlı imalat, haddeleme, bükme, çekme gibi şekillendirme işlemleri öncesinde en yumuşak ve sünek hali kazandırmaktır. Şekil 3.14'de küreselleştirme tavlaması için ısıl işlem diyagramı görülmektedir.

Çelik, Ac_1 sıcaklığı (723°C) civarında tavlandığı zaman, Şekil 3.15'de de görüldüğü üzere sementit lamelleri kısa bir süre sonra karmaşık şekiller alır ve tav işlemine devam edildiğinde lameller uçlardan kürecikler oluşturur. Yani yüksek yüzey enerjili sementit lamelleri bu işlem ile ferrit içinde çözünüp bölünerek düşük yüzey enerjili kürecikler halini alırlar.

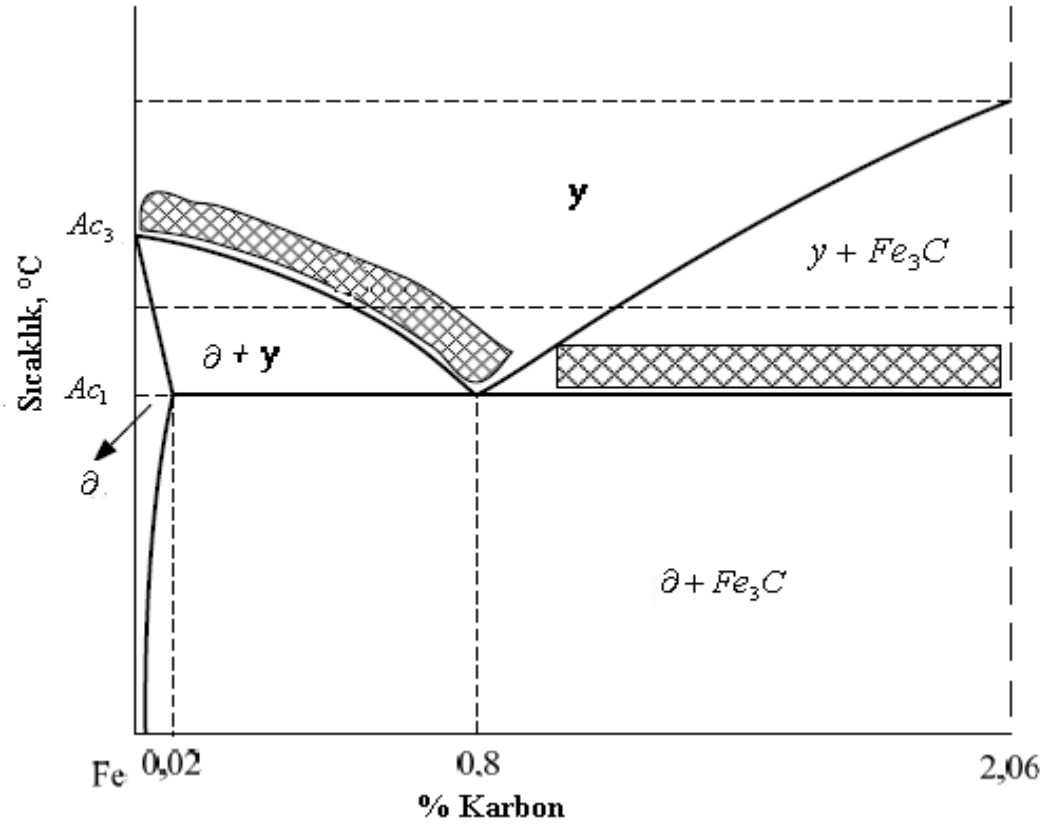


Şekil 3.15 Ötektoid bileşimdeki çeliğin normal perlitik iç yapısı (a) ve küreselleştirme tavı sonrası içyapı (b). (Güleç ve Aran, 1987)

3.2.4 Sertleştirme

Sertleştirme işlemi, östenit derecesine kadar ısıtılan çeliğin bir müddet bekledikten sonra hızlı bir şekilde soğutulmasıdır.

Şekil 3.8'de %C < 0,8 olan çeliklerin östenit soğuması sonucu meydana gelen faz değişimleri gösterilmişti. Bu dönüşümler çok yavaş soğuma sonucu mümkün olan dönüşümlerdir. Atomlar yavaş soğuma sonucu meydana getirebildikleri kristal şekillerini hızlı soğuma olması durumunda oluşturamazlar. Soğuma hızlandırıldığından difüzyon zor olmaktadır. Sertleştirme ile soğutma hızını kritik soğutma hızından yüksek tutarak kristal şekilleri değiştirilir.



Şekil 3.16 Sertleştirme ısıl işlem diyagramı

Sertleştirme işlemi için 3 aşama söz konusudur. Isıtma, bekletme ve soğutma

3.2.4.1 Isıtma

Bu aşamada malzeme su verme sıcaklığına ısıtılmalıdır. Çelik malzemelerde sertleştirmek için ısıtılması gereken sıcaklıklar içerdikleri karbon oranına göre değişiklik göstermektedir (Şekil 3.16)

Ötektoidaltı çeliklerde; $T = Ac_3 + \left(30^o - 50^o C \right)$

Ötektoidüstü çeliklerde; $T = Ac_1 + \left(30^o - 50^o C \right)$

3.2.4.2 Bekletme

Tavlamanın uygun olabilmesi için çeliğin tamamen östenit halinde bulunması gereklidir. Bunun içinde belirli bir süre dönüşüm için o sıcaklıkta tutulmalıdır.

Malzemenin iç kısımları dış kısımlarına göre daha geç faz dönüşümüne uğrarlar. Bu yüzden çelik tavlama sıcaklığında bir müddet beklemelidir. Bu bekleme sayesinde malzemenin iç kısmı ile dış kısmı aynı yapıya gelecek yani çelik tamamen östenit faza dönüşecektir.

Çeliğin su verme sıcaklığında tutma süresi 20 dakika + kalınlık başına yarım dakika olarak hesaplanabilir. (Güleç ve Aran, 1987; Oygur,1988):

$$T_{Tutma} = 20 + \frac{s}{2}$$

T_{Tutma} : Fırında tutma süresi

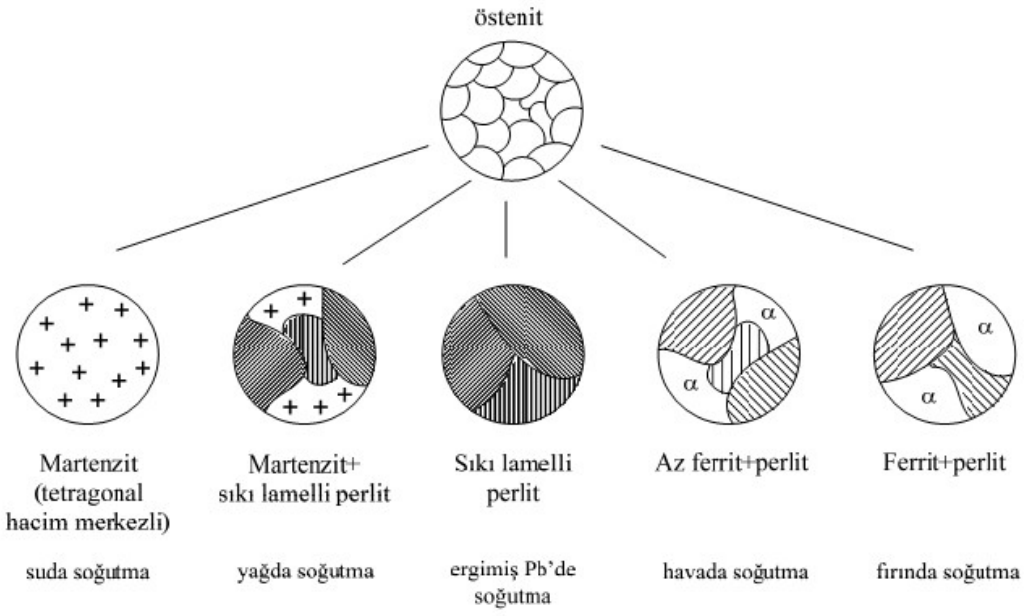
s : İş parçası kalınlığı ya da çapı

3.2.4.3 Soğutma (Su verme)

Çeliğin sertleşmesi için soğutma hızı, malzemenin kritik soğutma hızının üstünde olmalıdır.

Östenit yapıya ulaştırılmış çelik, oda sıcaklığına kadar değişik soğutma hızlarında soğutulursa farklı yapılar kazanırlar. Bu yapılar Şekil 3.17'de gösterilmiştir.

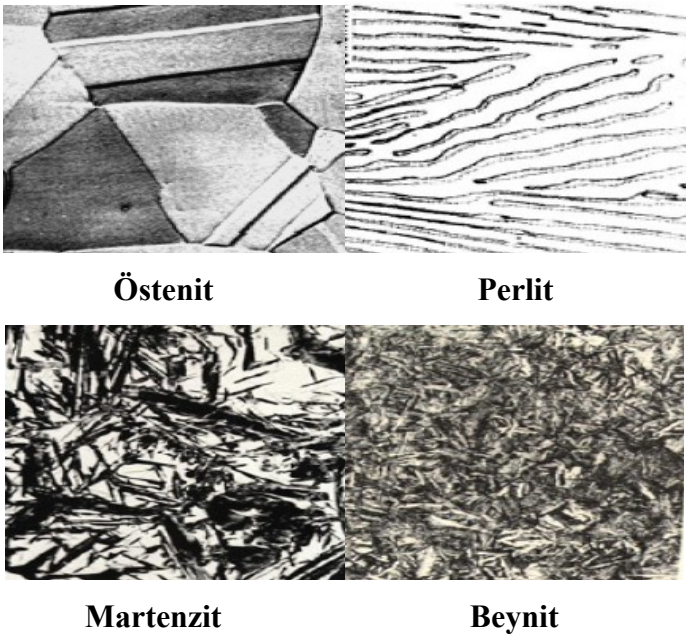
Çelik fırın içerisinde çok yavaş soğutulduğunda birbirlerine yakın oranda ferrit ve perlit içeren bir yapıya dönüşür. Havada soğutmaya bırakılan çeliğin mikroyapısında ise perlit ve az oranda ferrit bulunur. Ergimiş Kurşun ile yapılan daha hızlı soğutmada östenitten ferrite dönüşüm engellenir. Oda sıcaklığında ince sıkı lamelli perlitik bir yapı haline dönüşür. Yağda soğutulan çelikte perlit oluşumu engellenir. Çok sıkı lamelli perlit kristalleri ile martenzit yapısı oluşur. Suda soğutulan çeliğin yapısı ise tamamen martenzite dönüşmektedir. Çok hızlı bir soğuma olduğundan östenitin perlite dönüşü tamamen engellenmiş olur.



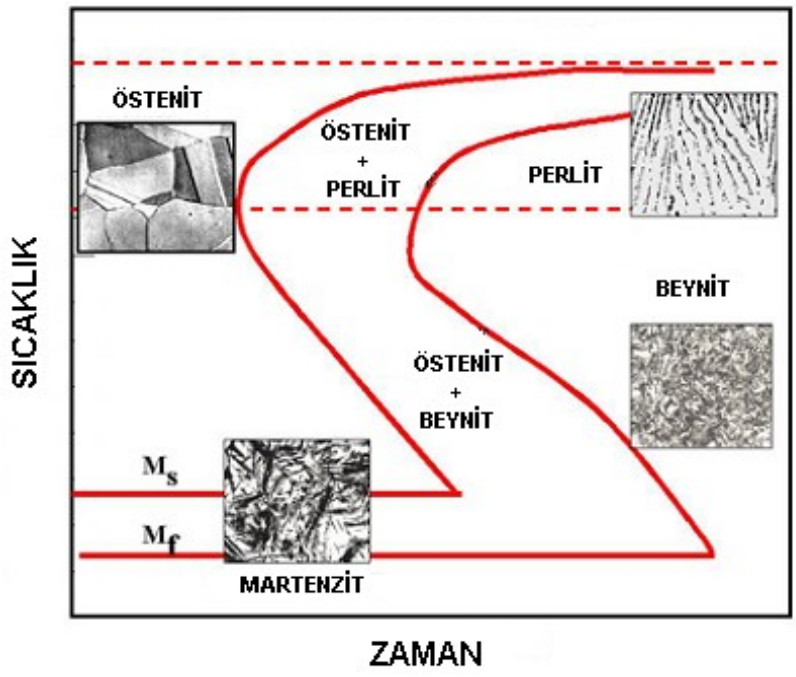
Şekil 3.17 Çeşitli soğutma hızlarında ulaşılan yapılar.

Östenit, çeliğin bileşimine bağlı olarak minimum bir hızın altına inilmeyecek şekilde soğutulur. Aşırı soğumuş östenit, soğutma özellikler açısından farklı dönüşüme uğrar. Şekil 3.18 ve Şekil 3.19'de bu dönüşümler gösterilmiştir. Bu dönüşümler şunlardır:

- Perlit kademesinde dönüşüm
- Beynit kademesinde dönüşüm
- Martenzit kademesinde dönüşüm



Şekil 3.18 Sertleştirme işlemi ile ortaya çıkan yapılar



Şekil 3.19 Eş ısısal dönüşüm eğrileri gösterimi (TTT diyagramı)

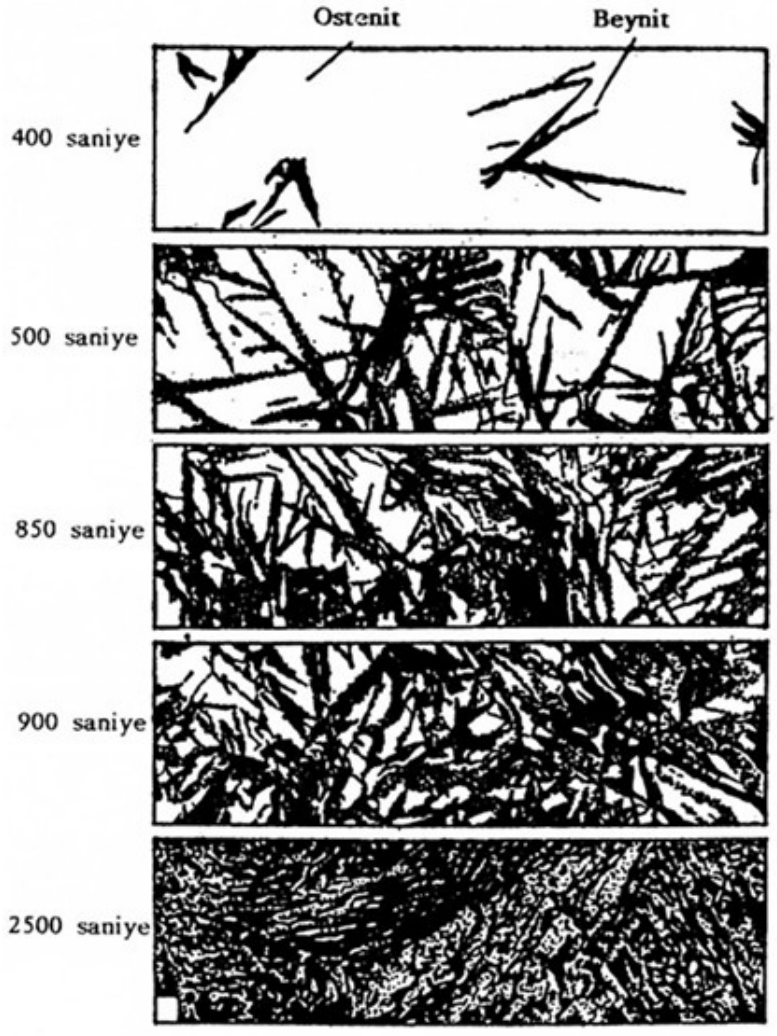
3.2.4.3.1 Perlit kademesinde dönüşüm

Ostenitin bu tür dönüşümü, ferrit ve sementit lamellerinden oluşan bir iç yapı oluşumu ile sonuçlanır. Her iki fazın çekirdeklenmesi ve tane büyümesi, karbon ve demirin yayınması ile gerçekleşir.

Soğuma hızının artması yayınma süresini sınırlar; yani atomların gidebilecekleri yol kısalır. Lamel genişliği azalarak ince lamelli perlitik bir içyapı ortaya çıkar. Lameller arası uzaklık ne kadar küçükse, içyapıda karbonun (ve dolayısıyla sementitin) dağılımı o kadar homojen olur. Bu sebeple sertlik ve dayanım değerleri artar (Güleç ve Aran, 1987).

3.2.4.3.2 Beynit kademesinde dönüşüm

Çeliklerde %100 beynit mikroyapısı, çeliği fırında ya da havada soğutarak elde edilemez. Beynit mikroyapısı için ilk önce sertleştirme işlemi ile östenit bölgenin çok hızlı (kritik derece üstünde) soğuması gerekir. Böylece perlit oluşumunu önüne geçilmiş olacaktır. Martenzit başlangıç derecesinin üzerinde bir dereceye geldiğinde o sıcaklıkta sabit tutularak %100 beynit yapısı oluşuncaya kadar beklenir. (Töre, 2007)



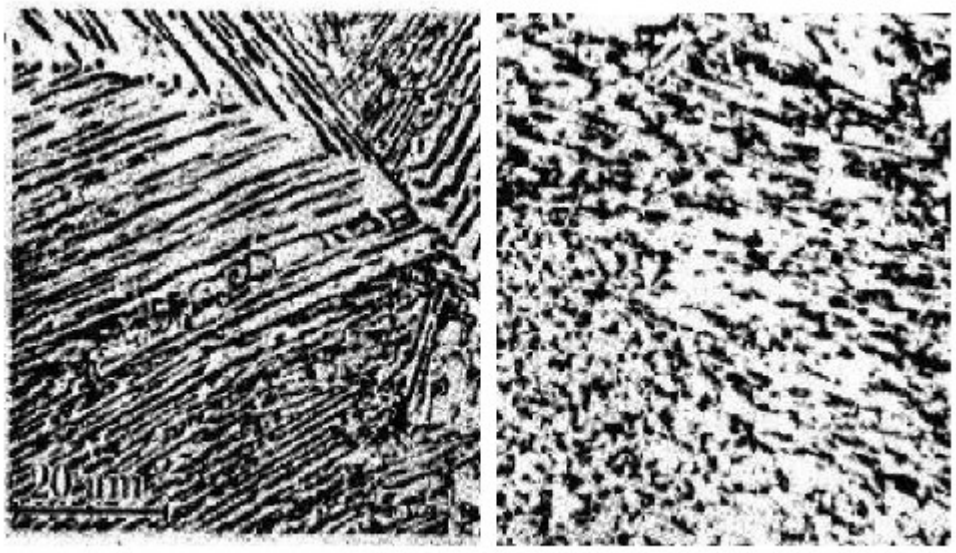
Şekil 3.20 Beynitin zamana göre dönüşüm evreleri.

Beynitik içyapı, alaşımlı çeliklerin karakteristik içyapısıdır. Alaşımsız çeliklerde beynitik yapı elde edilmek isteniyorsa sabit sıcaklık dönüşümü gerekir.

Beynit, iğneli ve taneli beynit olmak üzere iki guruba ayrılır. Bunlara ait iç yapılar Şekil 3.21'de gösterilmiştir.

İğneli beynit, ferrit içerisine gömülmüş karbon parçacıkları olarak tanımlanır. Sürekli soğuma veya sabit sıcaklıkta (izotermik) dönüşüm ile elde edilir. Soğuma hızına bağlı olarak iğneli beynit, kaba ve ince taneli beynit olarak da ikiye ayrılır.

Taneli beynit ise sürekli soğuma ile elde edilen bir yapıdır.

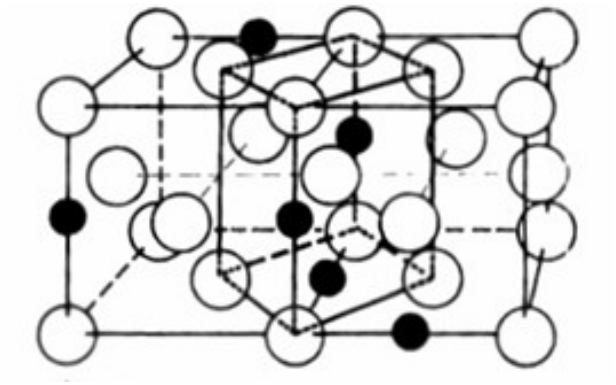


Şekil 3.21 İğneli (a) ve taneli (b) beynit yapısı (Güleç ve Aran, 1987)

3.2.4.3.3 Martensit kademesinde dönüşüm

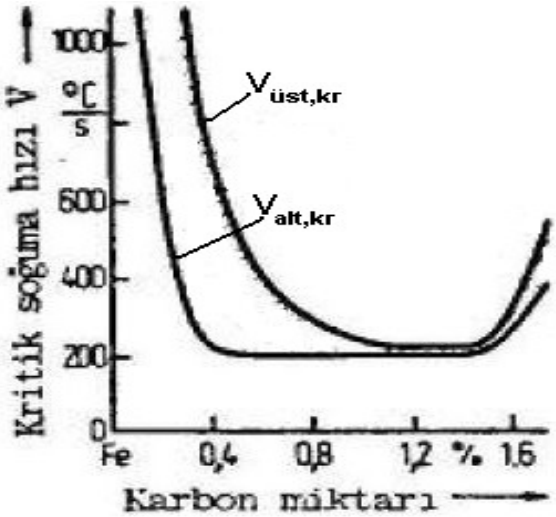
Çeliklerde martensit yapı östenit haldeki çeliğe su verilerek oluşur. Mikroyapı yüzey merkezli kübik yapıdan hacim merkezli dörtgen yapıya dönüşür. Martenzit

yapıda iç yapıda gerilmeler çok fazla olduğundan dolayı dengesiz bir yapıdadır. Bu kırılgan yapı parça üzerinde çatlak oluşmasına sebep olur.



Şekil 3.22 Martenzit dönüşümün şematik gösterimi

Kritik soğuma hızı aşılırsa,ostenit Ms sıcaklığının altında martenzite dönüşür. Soğuma hızının alt kritik soğuma hızına erişmesiyle martenzit oluşumu başlar.

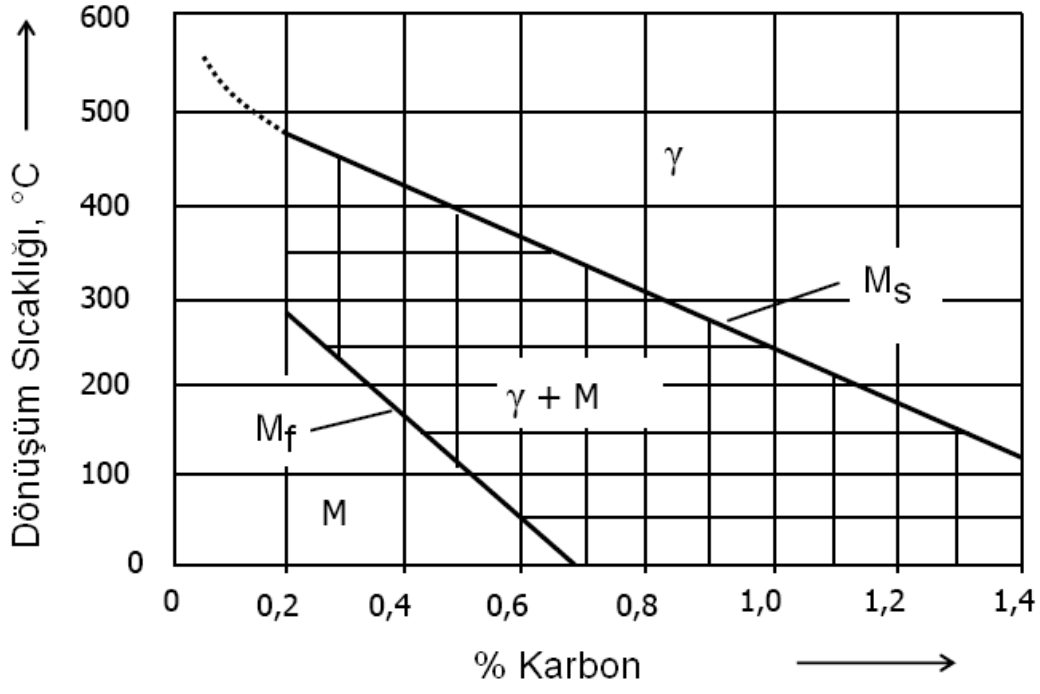


Şekil 3.23 Karbon miktarına göre kritik soğutma hızları

Soğuma hızı üst kritik soğuma hızından daha büyükse, iç yapıda sadece martenzit vardır. (Ancak Mf sıcaklığına inilmezse bir miktar artık ostenit de bulunur).

Karbon miktarının artmasıyla, kritik soğuma hızı azalır (Şekil 3.23). Dönüşüm başlangıcı ve sonu (Ms ve Mf) daha düşük sıcaklıklara ötelenir. Böylece artık ostenit miktarı artabilir.

Küçük karbon oranlarında kritik soğuma hızına ulaşmak, pratik açıdan olanaksız denebilecek kadar güçtür. Bu nedenle martenzitik dönüşüm sonucu sertleşebilir alaşımsız çeliklerde karbon en az %0,2 veya % 0,25 olmalıdır. Şekil 3.24'te karbon oranına göre martensit dönüşümün başlangıç ve bitiş sıcaklıkları görülmektedir.



Şekil 3.24 Martenzit dönüşümün başladığı (*Ms*) ve tamamlandığı (*Mf*) sıcaklıklarının karbon oranına bağlı olarak değişimi

3.2.4.4 Su verme ortamları

İdeal su verme ortamı; malzemenin çatlamasının önüne geçmek için başlangıçta soğuma hızı yüksek, düşük sıcaklıklarda soğuma hızı düşük olmalıdır.

Sanayide kullanılan su verme ortamları, su verme şiddetlerine göre aşağıdaki gibi sıralanır.

a) Tuzlu su
b) Musluk suyu
c) Erimiş veya sıvı tuzlar
d) Yağ ve su karışımı
e) Yağ
f) Hava

3.2.4.4.1 Su verme ortamı olarak su

Östenitleme sıcaklığındaki parça, su içerisine daldırıldığında, parça yüzeyinde oluşan buhar filminin yalıtımı etkisiyle soğuma başlangıçta yavaştır. Sıcaklık 600°C'nin altına indiğinde, atom hareketliliğinin yardımıyla buhar filmi yırtılır, buhar kabarcıklar halinde yükselmeye başlar. Soğuma hızı 400°-500°C civarında en yüksek değerine ulaşır. Bu nedenle su içerisine %5-10 NaCl veya NaOH ilave edilerek, buhar filminin oluşum noktası daha üst sıcaklıklara çekilir ve film oluşumu engellenir. Aynı zamanda bu soğutma ortamında, parçanın sertleşme derinliği artarken çatlama tehlikesi azalır.

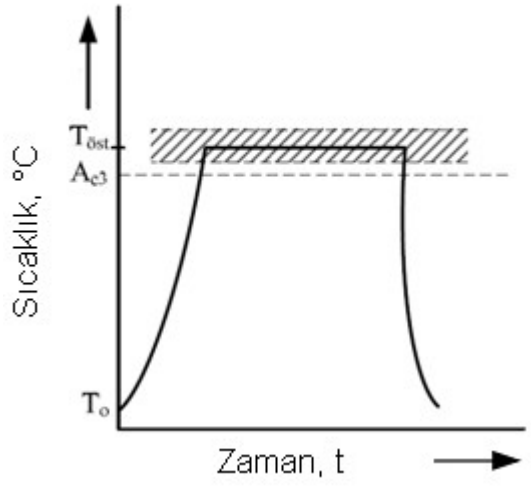
3.2.4.4.2 Soğutma ortamı olarak yağ

Soğutma gücü suya göre üç kat daha azdır. Yağ seçerken kolay temizlenmesine (su bazlı olmasına), tutuşmamasına ve ucuz olmasına dikkat edilmelidir. Alaşımlı çeliklere yağ içinde su verilir ve beynitik yapı elde edilir.

3.2.4.5 Su verme çeşitleri

3.2.4.5.1 Doğrudan (Basit) su verme

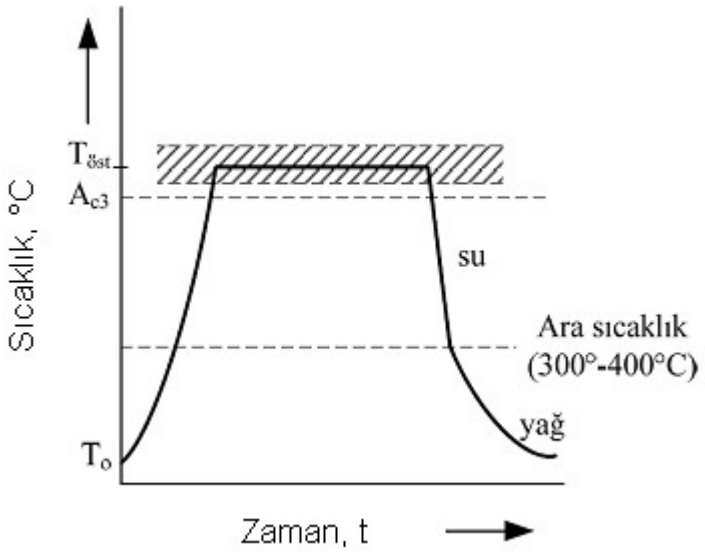
Su veya yağ gibi tek bir ortamda sürekli soğutma işlemidir. Şekil 3.25'te doğrudan su verme işleminin şematik gösterimi verilmiştir. Sertleşme derinliği az olan alaşımsız çeliklerde, özellikle suda yüksek hızda soğutma sonucu, karmaşık şekilli parçaların iç ve dış kısımları arasında doğabilecek sıcaklık farkı nedeniyle, çarpılma ve çatlamalar meydana gelebilir.



Şekil 3.25 Doğrudan su verme işlemi gösterimi

3.2.4.5.2. Kesikli su verme

Östenitten 300°-400°C'ye kadar (ara sıcaklığa) suda hızlı soğutulur. Sonra iç ve dış kısımdaki sıcaklık farkının dengelenebilmesi için yağda soğutmaya devam edilir. Şekil 3.26'te doğrudan su verme işlemi şematik olarak gösterilmiştir. Ara sıcaklığın seçimi ve yakalanması deneyim gerektirdiğinden, seyrek uygulanan bir yöntemdir.



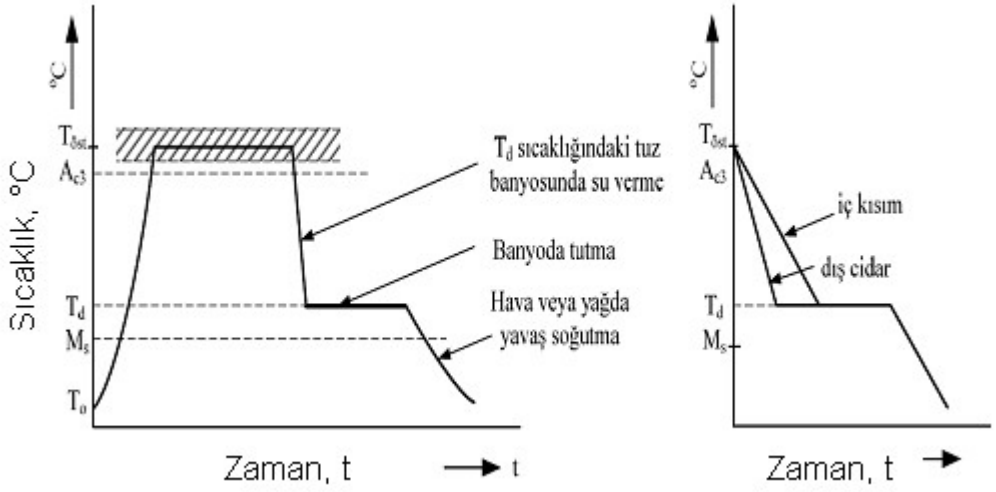
Şekil 3.26 Kesikli su verme işlemi gösterimi

Su verme işlemi sonunda parçanın çatlama tehlikesi, doğrudan su vermeye kıyasla daha azdır.

3.2.4.5.3 Duraklı (Kademeli) Su Verme (Martemperleme)

Özellikle karmaşık şekilli parçalara su verme esnasında deformasyon ve çatlama riskini azaltmak için parçaların kademeli soğutulması, kademeli soğutulması sonucunda da %100 martenzit yapı oluşur. Martemperleme, martenzit oluşumu başlangıcındaki temperlemedir. Şekil 3.27'da kademeli su verme işlemi

gösterilmiştir. Banyoda tutma süresi, beynit oluşumuna imkan vermeyecek şekilde olmalıdır.

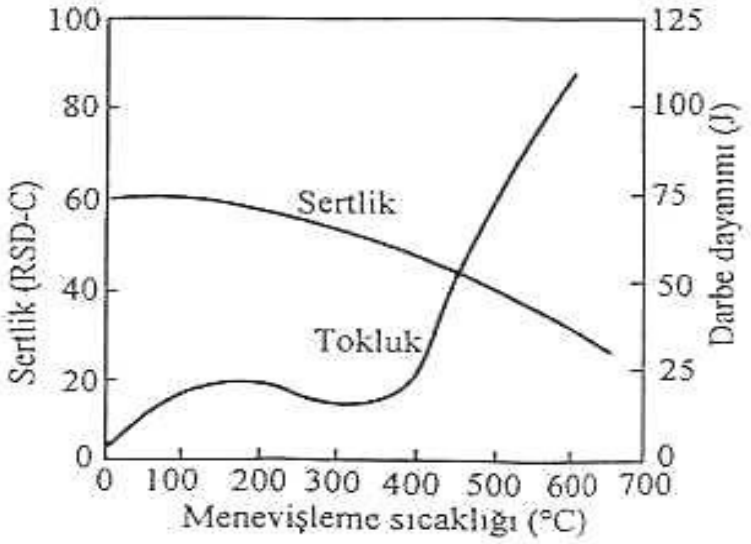


Şekil 3.27 Kademeli su verme işlemi şematik gösterimi

3.2.5 Temperleme

Çeliklerde, su verme işlemi ile elde edilen martenzitik yapı gevrek olduğundan pek çok uygulama için elverişli değildir. Ayrıca martenzit oluşumu çelik içerisinde iç gerilmelerin meydana gelmesine neden olur. Bu nedenlerden dolayı su verilen çeliklere her zaman Ac_1 çizgisinin altındaki sıcaklıklarda uygulanan tavlama işlemine, temperleme ya da menevişleme denir.

Temperlemenin amacı; su verilen çelikteki kalıntı gerilmeleri gidermek ve çeliğin süneklik ve tokluğunu artırmaktır. Su verilen çelikler temperlendiklerinde süneklilikleri artar, buna karşılık sertlik ve mukavemetleri azalır. Şekil 3.28'teki grafikte sertlik ve tokluk değerlerinin temperleme sıcaklıklarıyla olan ilişkisi gösterilmektedir.



Şekil 3.28 1 saat temperlenmiş Ç-4140 çeliğinin sertlik ve çentik darbe tokluğunun menevişleme sıcaklığına göre değişimi (Töre, 2007)

Temper sıcaklığının yükselmesi ile karbon atomlarının martenzit içerisinde mecburi çözelti halinde bulundukları durumdan kurtularak daha kolay difüzyona uğrarlar. 200°C civarında karbon atomları martenzit kafesini terkeder ve ince karbür taneleri halinde biraraya gelir. Temperleme sıcaklığı arttıkça karbonun difüzyonu giderek kolaylaşır. Daha iri karbür taneleri oluşur. 700°C civarındaki bir temperleme sıcaklığı ile iç yapı taneli bir perlite benzer. Karbonun yapı içerisinde ayrışması ile martenzitin sertliği de azalır. Ferrit miktarının artması neticesinde malzemenin uzama kabiliyeti ve sünekliği artar. (Oygur, 1988)

Bu bağlamda temperleme işlemi sırasındaki martensitik yapıdaki değişimleri 4 kademede değerlendirmek mümkündür.

1. Kademe (100-200°C)

Bu aşamada martensit, tetragonelliğini kısmen kaybeder. İnce ε – karbürlerin (Fe_2C) çökelip yapıya dağılmasıyla tetragonel martenzit, kafesi daha az gerilmiş

kübik martenzite dönüşür. Sertlikte önemli bir düşüş görülmez. Aşırı kafes gerilmelerinin giderilmesi ile çelik kullanılabilir duruma getirilmiş olur (Güleç ve Aran, 1987).

2. Kademe (200-350°C)

200°C'nin üstünde karbür çözünür ve çok ince sementit (Fe_3C) çökelir. Martensit tetragonel yapısını tamamen kaybederek bir nevi ferrit oluşur. Temperleme sıcaklığının yükselmesi ile sementitler büyür ve küreselleşir. Sertlik düşer. Yüksek karbonlu çeliklerin mikroyapısında martensitle birlikte bulunan kalıntı ostenit kısmen beynite dönüşerek malzemenin sertliğinde artışa neden olur. Bu sıcaklık aralığındaki temperleme ile sade karbonlu düşük alaşımlı çeliklerin tokluğunda düşme olur (Temper Gevrekliği). Bu nedenle bu sıcaklıkta temperleme işlemlerinden kaçınılır. Ancak temperlemeye karşı direnci arttıran alaşım elementlerinin ilavesi ile temper gevrekliği azaltılabilir.

3. Kademe (350-540°C)

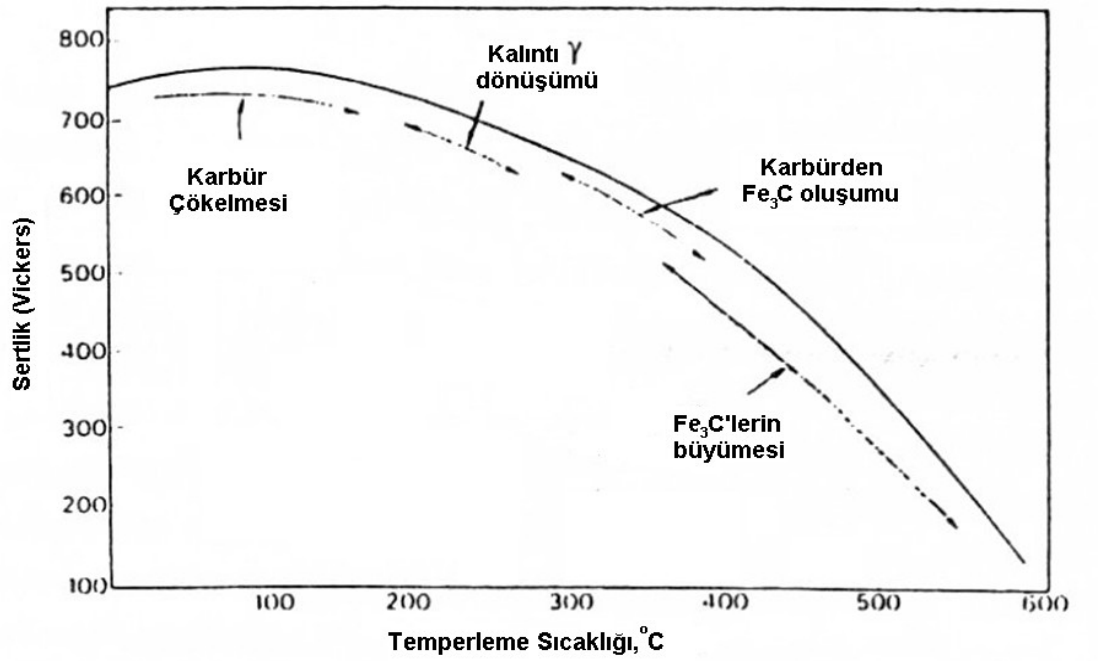
Sementit büyümeye ve küreleşmeye devam eder. Malzemenin sertliği düşerken, tokluğu artar. Tokluk ve mukavemetin optimum kombinasyonu bu aralıkta elde edilir. Yüksek tokluk gerektiren ortamlarda kullanılan sade karbonlu ve düşük alaşımlı yapı çelikleri bu aralıkta temperlenir.

4. Kademe (540-675°C)

Bu bölgede temperlenen yapıda sertlik değerleri ile çekme ve akma dayanımları düşer, darbe dayanımı artar. Bu sıcaklıklarda yeniden kristalleşme olduğundan yapı yeniden kristalleşen ferrit ve küresel sementit halini alır.

Yeniden kristalleşme ile malzeme sınırlarında ve içinde küresel sementit içeren eş eksenli ferrit taneleri oluşur ve daha sonra bu ferrit taneleri büyür. Bu safhada dislokasyonlar yeniden düzenlenir ve dislokasyon yoğunluğu azalır.

Düşük karbonlu çeliklerde yeniden kristalleşme kolay olurken, yüksek karbonlu çeliklerde sementit partiküllerinin yoğunluğu fazla olduğundan, sementitler tane sınırlarında dislokasyon hareketini ve ferrit tane sınırlarını kilitleyerek yeniden kristalleşmeyi zorlaştırır. Şekil 3.29'da temperleme sıcaklıklarının oluşturduğu değişimler görülmektedir.



Şekil 3.29 Sade karbonlu ötektoit çeliklerde temperleme sıcaklığının fonsiyonu olarak çeliğin sertliği ve iç yapısındaki değişikliklerin şematik gösterimi

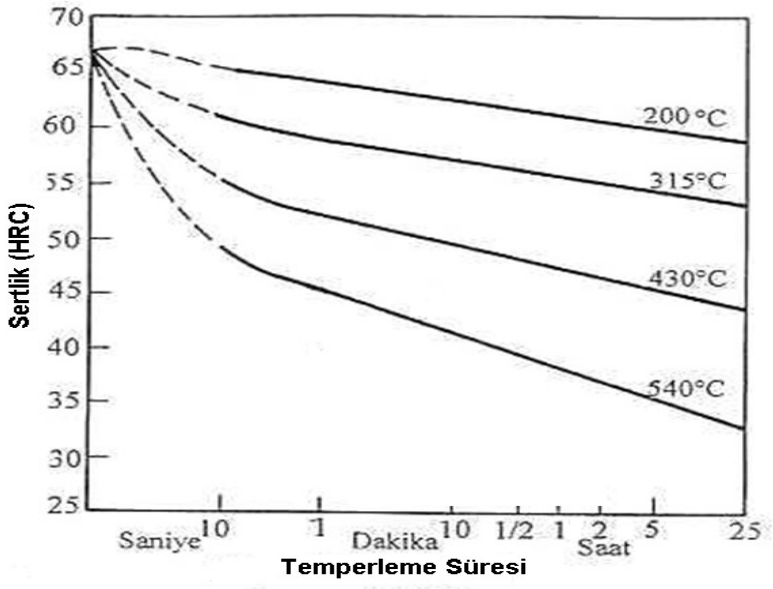
3.2.5.1. Temper gevrekliği

Çeliklerde su verme sonrası bazı meneviş derece aralıklarında kırılgan bir yapı oluşur. Yaklaşık 300-350°C 'de malzemelerin darbe dayanımlarında belirgin bir

düşme görülür. %0.5 molibden alaşımı ilave edilerek bu sorun ortadan kaldırılacağı gibi çok hızlı soğutma ile karbür oluşumunun önüne geçilmek suretiyle de bu gevrekliğin önüne geçilebilir.

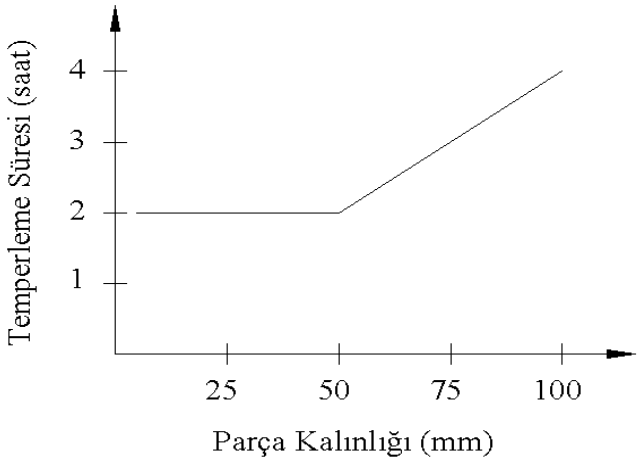
3.2.5.2. Temperleme süreleri

Su verme sonrası temperleme işlemlerinde malzemedeki sertlik düşümü temper derecesinin ilk dakikasında olmaktadır. Daha sonraki sürelerin sertlik değişimine etkisi çok azdır. Şekil 3.30'da da görüldüğü üzere malzemenin 67 HRC'den 48 HRC'ye düşmesi 10 saniye gibi bir sürede gerçekleşirken 1 saat ile 5 saat arasında ki temperleme sürecinde ancak birkaç HRC sertlik düşümü gerçekleşmektedir.



Şekil 3.30 Su verme sonrası değişik derecelerde temperleme süresi ve sertlik değişimi

Temperleme sıcaklığı için bekleme süresi malzemenin kalınlığına göre değişim gösterir. Şekil 3.31'de da görüleceği gibi 50 mm kalınlığa kadar 2 saat menevişlemenin yapılması uygun olacaktır. Bu bütün çelikler için geçerlidir.



Şekil 3.31 Parça kalınlığı ve temperleme süreleri (Töre, 2007)

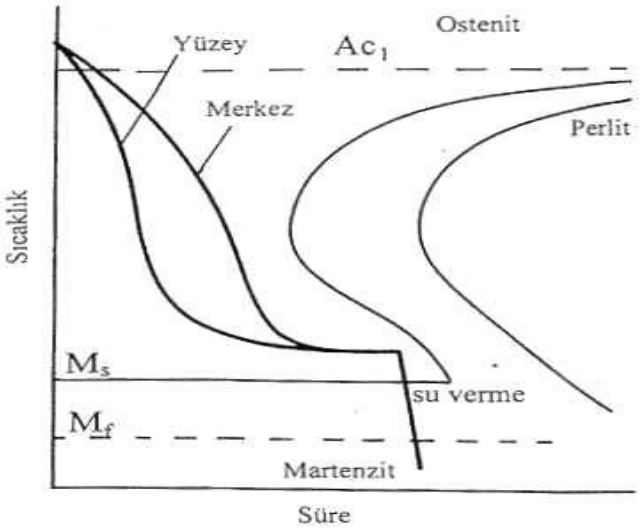
3.2.5.3 Çoklu temperleme

Sertleştirilmiş çeliğin birden fazla aynı ısı derecesinde temperleme işlemi "çoklu temperleme" olarak adlandırılır. Çoklu temperleme işlemiyle, temperleme işlemiyle mikro yapının kararlı hale gelmesi sağlanmış olur.

3.2.5.4 Martemperleme

Sertleştirilecek parça ostenitleştirme işlemine tabi tutulduktan sonra, martenzitik dönüşümün başlama sıcaklığının (Ms) hemen üzerindeki bir sıcaklıkta tutulan kurşun veya tuz banyosuna daldırılır. Yüzeyi ile merkezinin sıcaklıkları aynı

oluncaya, yani bütün kesit boyunca aynı sıcaklık elde edilinceye kadar parça banyo içersinde tutulur. Daha sonra parçaya su verilerek tamamen martenzitik bir iç yapı elde edilir. Bu işlem sayesinde, soğuma ile oluşan büzülme olayı, ostenit-martenzit dönüşümü ile ortaya çıkan genleşme olayından ayrılarak, hem büyük parçalardaki su verme çatlaması önlenir, hem de parça sertleştirilir. Ötektoid bileşimindeki çeliğe uygulanan martemperleme işleminin şematik gösterimi Şekil 3.32'deki gibidir.



Şekil 3.32 Ötektoid bileşime sahip çeliğe uygulanan martemperleme işleminin şematik gösterimi

3.2.5.5 Ostemperleme (Beynitleme)

Sertleştirilecek parça ostenitleştirildikten sonra, martenzitik dönüşümün başlama sıcaklığının (Ms) üzerindeki sıcaklıkta tutulur. Parçanın %100 beynit dönüşümü tamamlanıncaya kadar bekletilir ve sonra havada soğutulur.

Ostemperleme ile martemperleme aynı işlemdir. Martemperlemede bekletme, malzeme yüzeyi ile iç kısmının aynı sıcaklığa gelmesi için yapılırken ostemperlemede bekletme, malzemenin yapısının tamamen beynite dönüşmesine için yapılmaktadır.

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

4. 1 Malzeme

Bu deneyde haddelenmiş düşük alaşımlı Ç-4140 çeliği kullanılmıştır. Eti Alüminyum A.Ş., Kalite Kontrol ve Arge Müdürlüğündeki bulunan laboratuarda ARL ADVANT'X XFR spektrometre cihazında kimyasal analizleri yapılmıştır. Tablo 4.1'de kimyasal analizi verilmiştir.

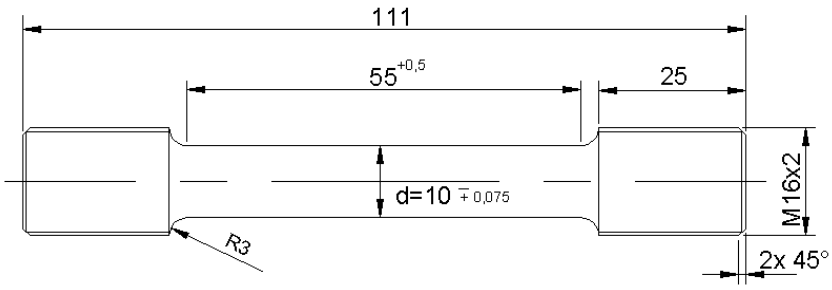
Tablo 4.1 Ç-4140 çeliğinin kimyasal kompozisyonu

Malzeme	**% C**	**% Si**	**% Mn**	**% S**	**% P**	**% Cr**	**% Mo**	**% Ni**
Ç-4140	0,450	0,340	0,790	0,020	0,023	0,860	0,155	0,090

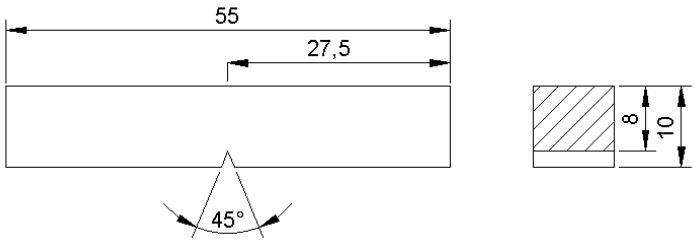
4. 2 Deney Numunelerinin Hazırlanması

Deneylerde kullanılmak üzere Ç-4140 çeliğine ait 24'er adet çekme deney numunesi, darbe deney numunesi ve mikroyapı deney numunesi hazırlanmıştır. Deney numuneleri Eti Alüminyum A.Ş. 'de Makine ve Teçhizat Fabrikasında hazırlanmıştır.

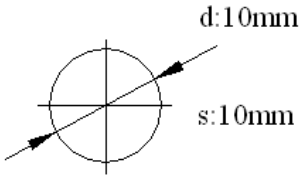
Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'de deney numunelerine ait standartlara göre hazırlanmış numuneler yer almaktadır.



Şekil 4.1 Çekme deney numunesi gösterimi (TS 138 EN 10002-1/2004)



Şekil 4.2 Darbe deney numunesi gösterimi (TS EN 10045-1/1999)



Şekil 4.3 Mikroyapı analiz numunesi gösterimi

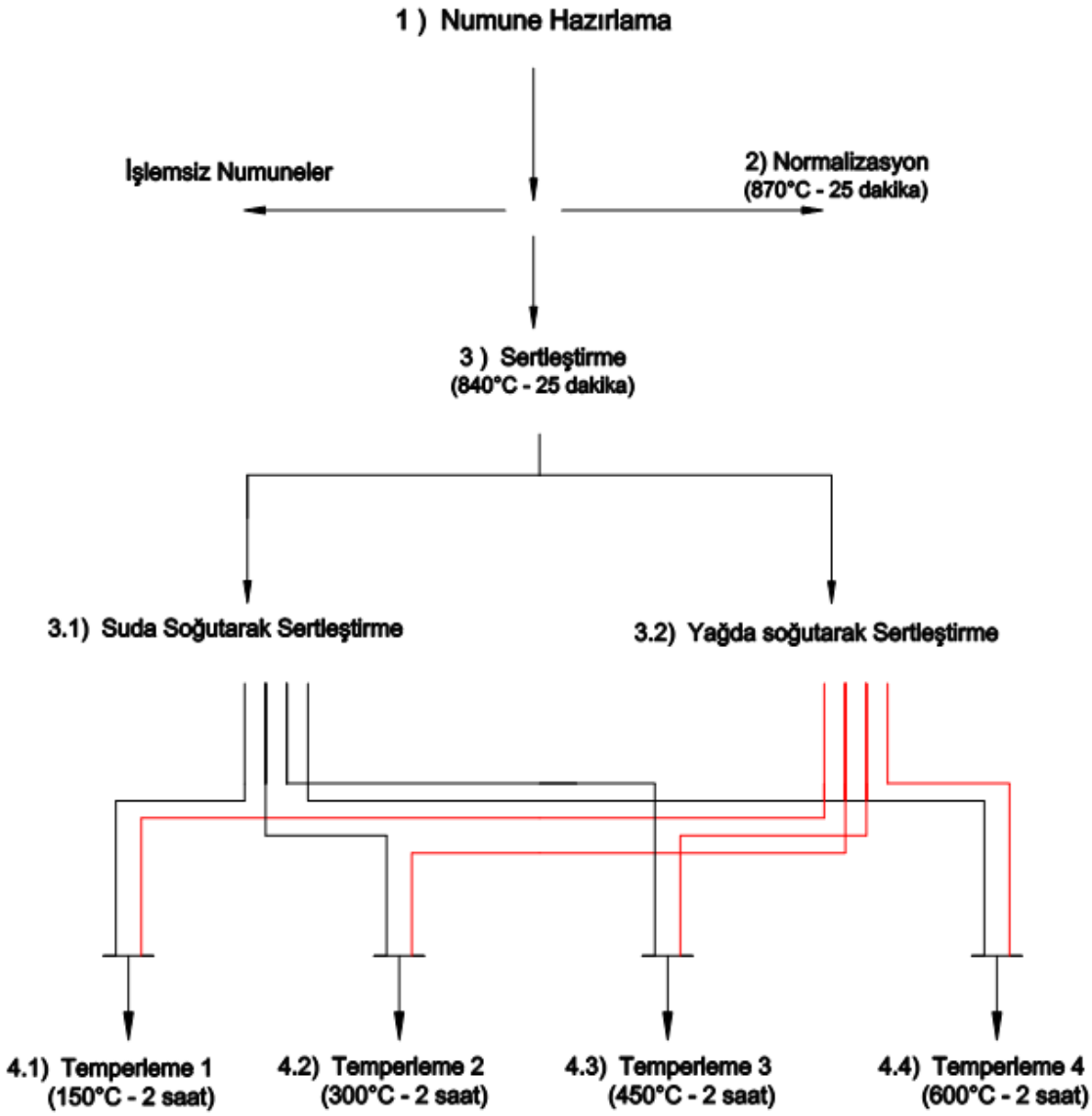
4. 3 Deneylerin Yapılması

Ç-4140 çeliklerinin incelendiği deneylerde kullanılmak üzere 30 adet çekme deney numunesi, 30 adet darbe deney numunesi ve 10 adet metalografik analiz deney numunesi ısıl işlem deneyi öncesi hazırlanmıştır.

Hazırlanan deney numunelerinden 3'er adedi çeliğe hiçbir işlem yapmaksızın deneylere tabi tuttuğumuz numunelerdir.

Hazırlanan deney numunelerinden 3'er adedi de normalizasyon işlemine tabi tutulmuşlardır.

Hazırlanan numunelerden geri kalan 24'er adet çekme, darbe ve mikroyapı deney numuneleri de sertleştirme sonunda temperleme işlemine tabi tutulacak olan deney numuneleridir. Bunlarda 12'şer adedi suda sertleşip temperleme işlemine tabi tutulacak olan numunelerken 12'şer adedi de yağda sertleşme sonrası temperleme işlemine tabi tutulacak olan deney numuneleridir. Temperleme işlemi 4 farklı sıcaklık için gerçekleştirilmiştir. Bu sıcaklıklar 150°C, 300°C, 450°C ile 600°C'dır. Her bir temperleme sıcaklığında, 3'er adet yağda ve 3'er adet suda sertleştirilen çekme, darbe ve metalografik deney numuneleri kullanılmıştır (Şekil 4.4).



Şekil 4.4 Deney akış şeması

Soğutma sıvısı olarak kullanılan yağ, "Shell Voluta C" yağı'dır. Baz yağlardan hazırlanmış, su verme ortamının gerektirdiği az uçuculuğa sahip, oksidasyona karşı dayanıklı, termal stabilitesi olan yağlardır. İçerdiği katıklar su verme işlemi sırasında yağda çamurumsu artıkların oluşmasını engeller. Normal seviyede veya yüksek seviyede alaşımlı çeliklere su verilmesi sırasında soğutma ortamı olarak kullanılabilir. Genel maksatlı bir soğutma yağıdır. Soğutma hızı su ile kıyaslanacak

olursa, 1/3 oranında yavaştır. Bu özelliği sayesinde yüzeyde kılcal çatlakların oluşmasını engeller.

Shell Voluta C Isıl İşlem Yağı	
ISO Viskozite Değeri	32
Viskozite cSt	
40 °C	36
100 °C	5,9
Viskozite İndeksi	103
Yoğunluk 15 °C kg/l	0.872
Akma Noktası °C	-15

Şekil 4.5 Shell Voluta C ısıl işlem yağının özellikleri

4. 3. 1 Normalizasyon işlemi

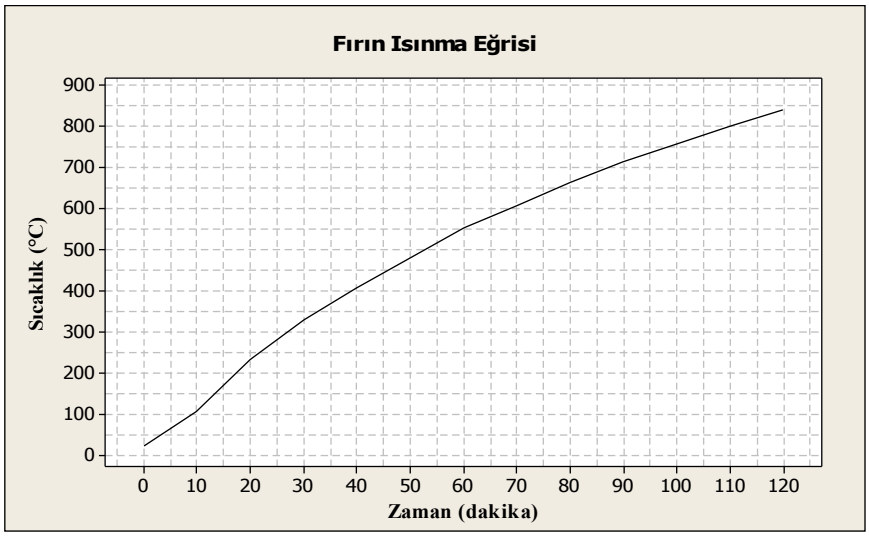
Isıl işlem deneyleri Eti Alüminyum A.Ş. 'de Makine ve Teçhizat Fabrikasının Isıl İşlem Laboratuarında gerçekleştirilmiştir. Kullanılan fırın rezistanslı ısıl işlem fırınıdır.

Hazırlanan numunelerden 2'şer adedi normalizasyon işlemine tabi tutulacaklardır. Normalizasyon için gerekli sıcaklık demir karbon denge diyagramından 870°C olarak belirlenmiştir. Fırına numunelerin yerleştirilmesiyle fırın çalıştırılmaya başlanmıştır.

Fırın sıcaklığı 870°C'e ulaştığında deney numuneleri tablo 3.7'de belirtildiği üzere 25 dakika fırında bekletilmiş ve durgun havada soğutulmaya bırakılmıştır.

4. 3. 2 Sertleştirme işlemi

Hazırlanan numunelerden 20'şer adedi sertleştirme işlemine tabi tutulacaklardır. Sertleştirme işlemi için gerekli sıcaklık demir karbon denge diyagramından 840°C olarak belirlenmiştir. Fırına numunelerin yerleştirilmesiyle fırın çalıştırılmaya başlanmıştır. Fırın çalıştırıldıktan 2 saat sonra sertleştirme sıcaklığına ulaşmıştır. (Şekil 4.7)



Şekil 4.6 Isıl işlem fırının ısınma grafiği

Fırın sıcaklığı 840°C'e geldiğinde numuneler 25 dakika fırında bekletilmiştir. Bu bekletmenin ardından numunelerden 10'ar adedi suda 10'ar adedi ise yağda soğumaya bırakılmıştır. 2'şer adedi suda 2'şer adedi yağda sertleştirilen numuneler deneylere tabi tutulmak üzere ayrılmıştır. Geriye kalan 16'şar adet deney numuneleri temperleme işlemi için ayrılmıştır.

4. 3. 3 Temperleme işlemi

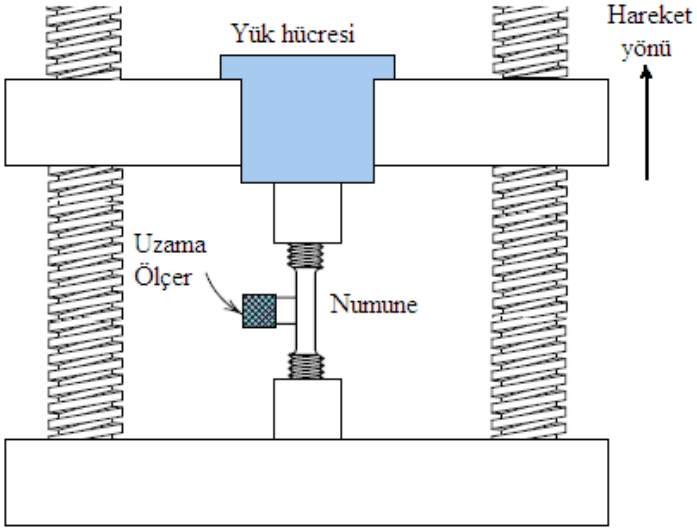
Sertleştirilen numuneler 4 farklı sıcaklık kategotrisinde temperleme işlemine tabi tutulmuşlardır. Bunlar; 150°C, 300°C, 450°C ve 600°C sıcaklıklarıdır. Her bir deney sıcaklığı için su ve yağda soğutulmuş 2'şer adet deney numuneleri kullanılmıştır. Isıl işlem fırını bu sıcaklıklara geldiğinde 2 saat bekletilerek havada soğumaya bırakılmıştır.

4. 3. 4 Çekme deneyi

Çekme deneyi malzemelerin mukavemeti hakkında tasarım bilgilerini belirlemek ve malzemelerin özelliklerine göre sınıflandırılmasını sağlamak amacı ile yapılır. Çekme deneyi numunesi için gerekli şartlar TS 138 EN 10002-1/2004 standartlarında belirlenmiştir. Deney numunesi tek eksende, sabit kabul edilebilecek bir hızla ve sabit sıcaklıkta koparılıncaya kadar çekilmesidir. Deney sırasında, standart numuneye devamlı olarak artan çekme kuvveti uygulandığında, aynı zamanda da numunenin uzaması kaydedilir.

Çekme deneyi sonucunda numunenin temsil ettiği malzemeye ait bazı özellikler bulunabilir. Bunlardan bir kısmı aşağıdaki gibidir.

- Çekme Dayanımı
- Akma Dayanımı
- % Uzama
- Kesit Daralması
- Elastisite Modülü v.s.

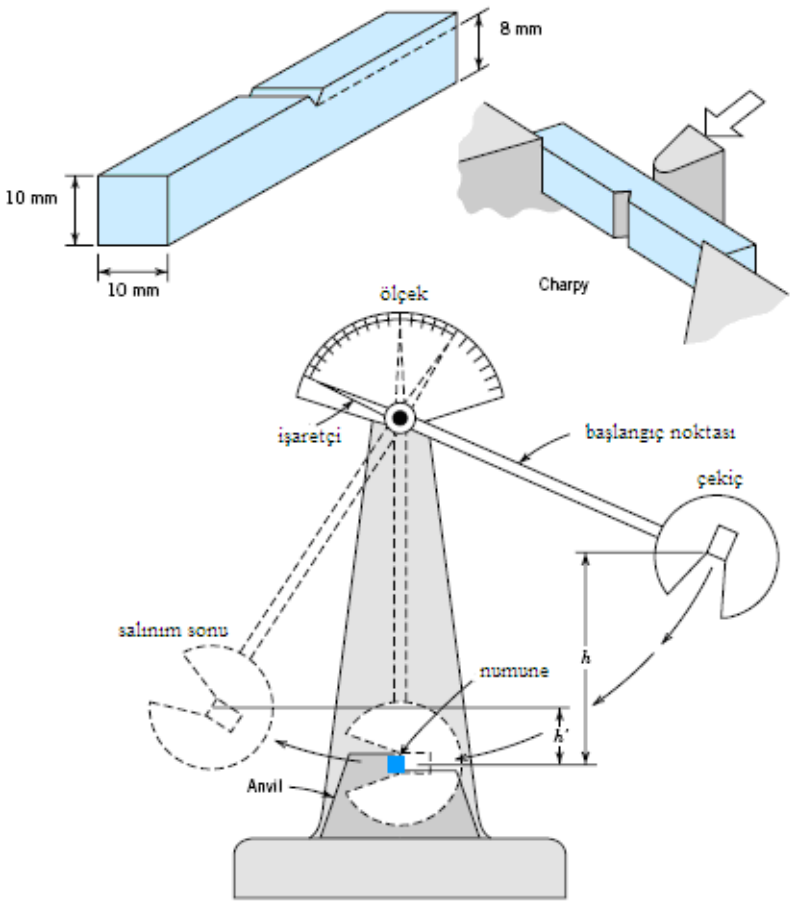


Şekil 4.7 Çekme deneyi cihazının şematik gösterimi

Isıl işlem sonucunda çekme deneyleri ve mikroyapı muayeneleri KOSGEB laboratuvarlarında yapılmıştır. Çekme deneyi için DARTEC M9000 model üniversal test cihazı kullanılmış olup deney TS 138 EN 10002-1/2004 standardına göre yapılmıştır.

4. 3. 5 Darbe deneyi

Darbe deneyi metallerin özellikle gevrek kırılmaya müsait koşullardaki mekanik özellikleri hakkında sağlam bir fikir elde etmek amacıyla uygulanır. Darbe enerjisini ölçmek için Charpy ve İzod testleri kullanılır.



Şekil 4.8 Charpy çentik darbe deney numunesi ve deney makinesi prensip şeması

Deneyin yapılma nedenlerini aşağıdaki şekilde sıralayabiliriz:

- Malzemelerin kullanıma hazır hale getirildiğinde gevrek olup olmadığını anlamak
- Malzemenin çentik etkisinden dolayı gevrek kırılıp kırılmadığını anlamak
- Malzemelerin yaşlanma meyillerinin olup olmadığını anlamak

Charpy çentik darbe deneyi Mitaş Enerji A.Ş. de TS EN 10045-1/1999'a göre yapılmıştır.

4. 3. 6 Metalografi deneyi

Metalografi, en bilinen şekliyle, metallerin iç yapısını inceleyen bilim dalıdır. Metalografi, metallerin iç yapısını inceleyerek onların özelliklerini belirlemeye, tarihçesini açığa çıkarmaya ve gelecekte ona ne gibi işlemler uygulanabileceğini anlatmaya (imalatı yönlendirmeye) çalışır.

Metalografi numunelerinin hazırlanması 4 aşamadan oluşur:

- Kesme
- Kalıplama
- Parlatma
- Dağlama

Numune Alma (Kesme), incelenecek mikroyapı elemanlarına göre, malzemenin neresinden ne tür bir numunenin alınacağı tesbit edildikten sonra kesme makinasında numune kesilir. Her durumda, kesme veya koparma esnasında malzemede en az yapı değişikliğinin meydana gelmesi sağlanmalıdır.

Kalıplama, uygulamada yaygın olarak “bakalite alma” olarak anılmaktadır. Kalıplama, hazırlama işleminin kolayca yapılmasını sağlamak, mikroskobik incelemede mükemmel düz bir yüzey elde etmek ve eli kimyasallardan bir ölçüde korumak açılarından önemlidir. Kimi numuneler, büyüklük ve geometrik olarak uygunsa, kalıplama yapılmadan hazırlanabilir ve mikroskopta incelenebilir.

Zımparalama ve parlatma, kalıplanmış numunelerin (az sayıdaki durumda ise, çıplak bazı numunelerin) mikroskobik incelemeye uygun hale getirilmesi için gereklidir. Parlatma işleminin temel amacı, yüzey pürüzlülüğünü azaltmak suretiyle, ışığı iyi yansıtan bir yüzey elde etmektir. Zira metal mikroskopları numune yüzeyinden yansıyan ışınları incelemektedir. Parlatmakla, aynı zamanda daha önceki işlemler sırasında yüzey bölgesinde oluşan deformasyonun azaltılması

hedeflenmektedir. Bu bakımdan, parlatma işleminin her adımında daha ince aşındırıcılar kullanılmakta, basma kuvveti ve makinanın dönme hızı genellikle adım adım azaltılmaktadır.

Parlatılmış yüzeyler ışığı eşit miktarda yansıttığından yapının detayları gözlenemez; bunu sağlamak için yapıda kontrast oluşturmak gerekir; bunun için dağlama yapılır.

Metalurjik incelemelerin çoğu parlatılmış yüzeylerin uygun bir kimyasal çözelti ile muamele edilmesinden (dağlama) sonra yapılır. Tane boyutu, deformasyon yapısı, segregasyon, mikroyapı, sementasyon-nitrasyon derinlikleri, dekarbürizasyon gibi bir çok parametrenin incelenmesi için dağlama işlemi gereklidir.

5. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

5. 1 Normalizasyon İşleminin Mekanik Özelliklere Etkisi

Normalizasyon işlemi ile malzemenin mikro yapısı iri perlitten ince perlite dönüşmektedir. Bu değişim çeliğin çekme ve akma mukavemetini arttırmaktadır. Bu durum kopma uzaması, kesit daralması ve darbe dayanımında düşüşe neden olmaktadır.

Isıl işlem görmemiş Ç-4140 çelikleri ile bu çeliklerin normalizasyon işlemi sonucundaki mekanik özellikleri Tablo 5.1'de görülmektedir. Tablo 5.2 ve Tablo5.3'te ise yapılan diğer çalışmalarla karşılaştırma yapılmıştır.

Tablo 5.1 İşlemsiz ve normalize edilmiş Ç-4140 çeliklerine ait mekanik özellikler

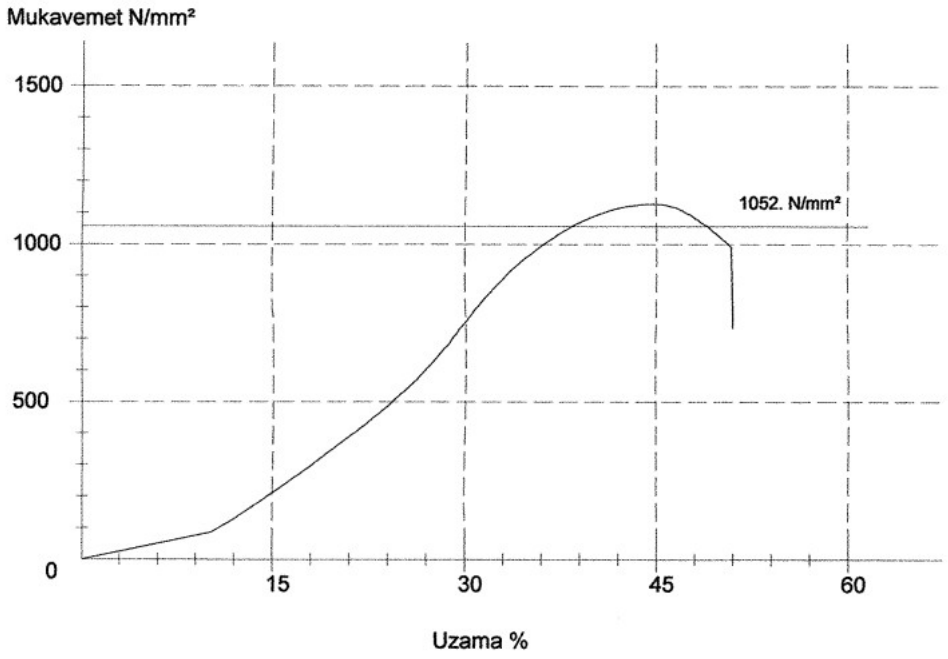
	İşlemsiz	**Normalizasyon**
Sertlik (HRC)	20	26
Çekme Dayanımı (N/mm²)	992	1078
Akma Dayanımı (N/mm²)	723	721
Kopma Uzaması (%)	14	11
Kesit Daralması (%)	33	22
Darbe Dayanımı (Joule)	46	21

Tablo 5.2 İşlemsiz Ç-4140 çeliklerine ait mekanik özelliklerin diğer çalışmalarla karşılaştırılması

Karşılaştırılan	Yaptığımız Çalışma	ASM Handbook	Turhan, Çökelek (2001)
Sertlik (HRC)	20	20	26
Çekme Dayanımı (N/mm²)	992	655	600
Akma Dayanımı (N/mm²)	723	420	500
Darbe Dayanımı (Joule)	46	54	----

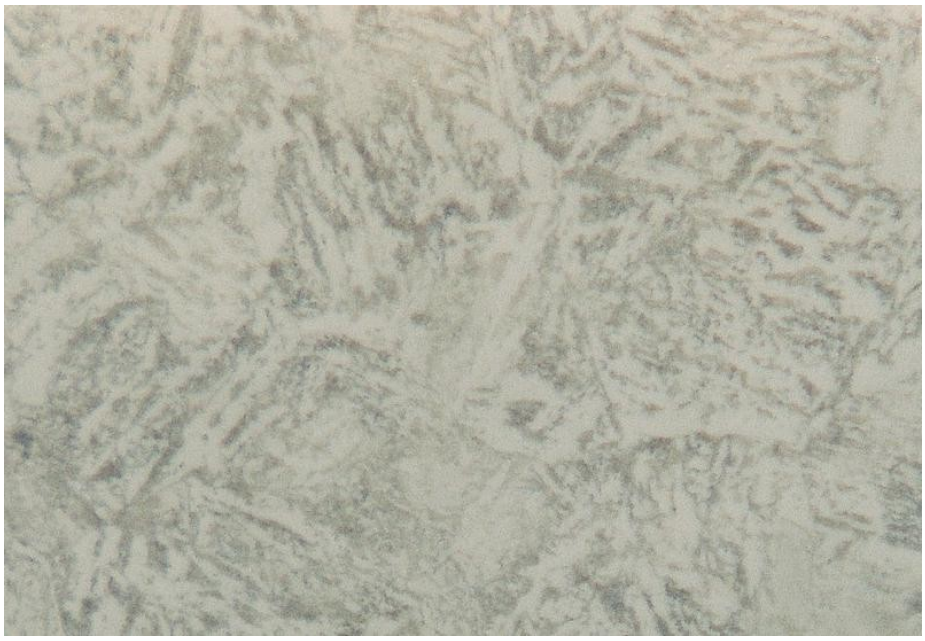
Tablo 5.3 Normalize edilmiş Ç-4140 çeliklerine ait mekanik özelliklerin diğer çalışmalarla karşılaştırılması

Karşılaştırılan	Yaptığımız Çalışma	ASM Handbook	Turhan, Çökelek (2001)
Sertlik (HRC)	26	30	----
Çekme Dayanımı (N/mm²)	1078	1020	1000
Akma Dayanımı (N/mm²)	721	655	950
Darbe Dayanımı (Joule)	21	23	----



Şekil 5.1 Isıl işlem görmemiş Ç-4140 çeliğine ait çekme diyagramı

Şekil 5.2'teki işlem görmemiş Ç-4140 çeliğine ait mikroyapı fotoğrafı konulmuştur. Mikroyapı incelemesinde perlit + ferrit yapısı görülmüştür.



Şekil 5.2 İşlem görmemiş Ç-4140 çeliğinin mikroyapısı (500X)



Şekil 5.3 Normalize edilmiş Ç-4140 çeliğinin mikroyapısı (500X)

Normalizasyon işlemi sonucu meydana gelen yapı Şekil 5.3'de gösterilmiştir. Yapı ferrit + perlit şeklindedir. Beyaz bölgeler ferrit siyah bölgeler perlit yapısı görülmektedir. Yapı, işlem görmemiş çeliğe nazaran daha homojen bir dağılım halindedir.

5.2. Isıl İşlem Parametrelerinin Mekanik Özellikler Üzerindeki Etkisi

Sertleştirme sıcaklığından çok hızlı bir şekilde soğutulan malzemede karbon atomları çok hızlı soğutmanın etkisiyle kafeslerini terk edecek zamanı bulamamıştır. Bununla kafes sistemi çarpılmış ve malzemeye büyük bir gerilim yüklenmiştir. Bunun sonucunda malzemede martenzitik yapı oluşmuştur. Yapılan temperleme işlemi ile karbon atomları kafeslerini terk edecek ortamı bulmuşlar ve temperlenmiş martenzit adı verilen perlit yapısı oluşmaya başlamıştır.

Temperleme sıcaklığının artışı beraberinde mikroyapıda irileşme getirir. Düşük sıcaklıklarda yapılan temperleme ile, malzemeye yüklenen gerilimler alınırken sıcaklık artışı ile sementit fazı oluşur ve ferrit taneleri irileşmeye başlar. Mikroyapıda meydana gelen bu irileşme çekme ve akma dayanımlarında düşüşe, kopma uzaması ve kesit daralmasında artışa sebep olur.

Mikroyapıdaki bu irileşme darbe dayanımında da artışa sebep olmaktadır. 300°C'te temper gevrekliğinin etkisi görülmüş ve dayanımda bir düşüş görülmüştür. Daha yüksek sıcaklıklarda temperleme işleminin yapılmasıyla ferrit taneleri irileşmekte ve darbe dayanımında hızlı bir artışa sebep olmaktadır.

600°C'te martenzitik yapı temperlendiğinde yeniden kristalleşme oluşmaktadır. Bununla malzeme sınırlarında küresel sementit içeren ferrit taneleri oluşur ve büyür. Bununla, çekme ve akma dayanımları düşmeye devam ederken darbe dayanımında artış sürer.

Yapılan sertleştirme işlemi, su ve yağ olmak üzere 2 farklı su verme ortamında gerçekleştirilmiştir. Su ortamında yapılan sertleştirmede numuneler üzerinde çatlaklar tespit edilmiştir. Yağda sertleştirilenler için böyle bir durum gerçekleşmemiştir. Yapılan çalışmalar, Ç-4140 çeliklerinin suda sertleştirilmelerinde böyle durumla karşılaşıldığını göstermektedir (ASM Handbook).

Temperleme işleminde, malzemeler sertleştirme ortamına göre ayrılmıştır. 150°C, 300°C, 450°C ve 600 °C sıcaklıklarında 4 farklı temperleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Temperleme işlemi sonucunda Ç-4140 çeliğine ait mekanik özellikler sertleştirme ortamına göre Tablo 5.4 ve Tablo 5.5'de gösterilmiştir.

Tablo 5.4 Suda sertleştirilen Ç-4140 çeliğinin farklı temperleme sıcaklıklarına göre mekanik özellikleri

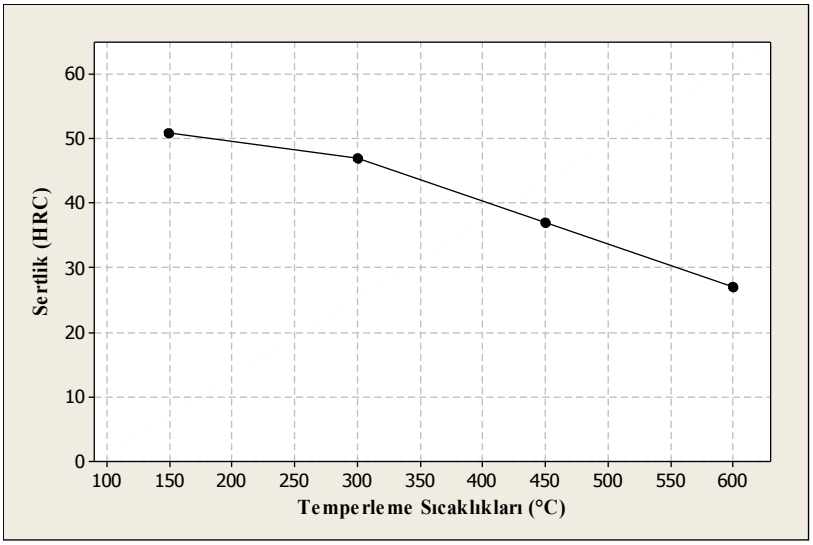
	Temperleme İşlemi (Suda Sertleştirilenler İçin)			
Mekanik Özellikleri	**150°C**	**300°C**	**450°C**	**600°C**
Sertlik (HRC)	55	48	38	26
Çekme Dayanımı (N/mm²)	1017	1781	1320	974
Akma Dayanımı (N/mm²)	-	564	1275	880
Kopma Uzaması (%)	-	6	10,5	14,5
Kesit Daralması (%)	-	31,2	38,5	50,2
Darbe Dayanımı (Joule)	7,16	9,64	35,5	92

Tablo 5.5 Yağda sertleştirilen Ç-4140 çeliğinin farklı temperleme sıcaklıklarına göre mekanik özellikleri

	Temperleme İşlemi (Yağda Sertleştirilenler İçin)			
Mekanik Özellikleri	**150°C**	**300°C**	**450°C**	**600°C**
Sertlik (HRC)	51	47	38	28
Çekme Dayanımı (N/mm²)	1798	1770	1326	972
Akma Dayanımı (N/mm²)	1777	1656	1278	885
Kopma Uzaması (%)	1	8	10	15,5
Kesit Daralması (%)	2,2	30,6	49,5	57,6
Darbe Dayanımı (Joule)	10,3	8,08	34,7	99,1

5.2.1. Isıl işlem parametrelerinin sertlik üzerindeki etkisi

Temperlenen çeliğin sertliği temperleme sıcaklık artışına ters yönde bir eğilim göstermiştir.

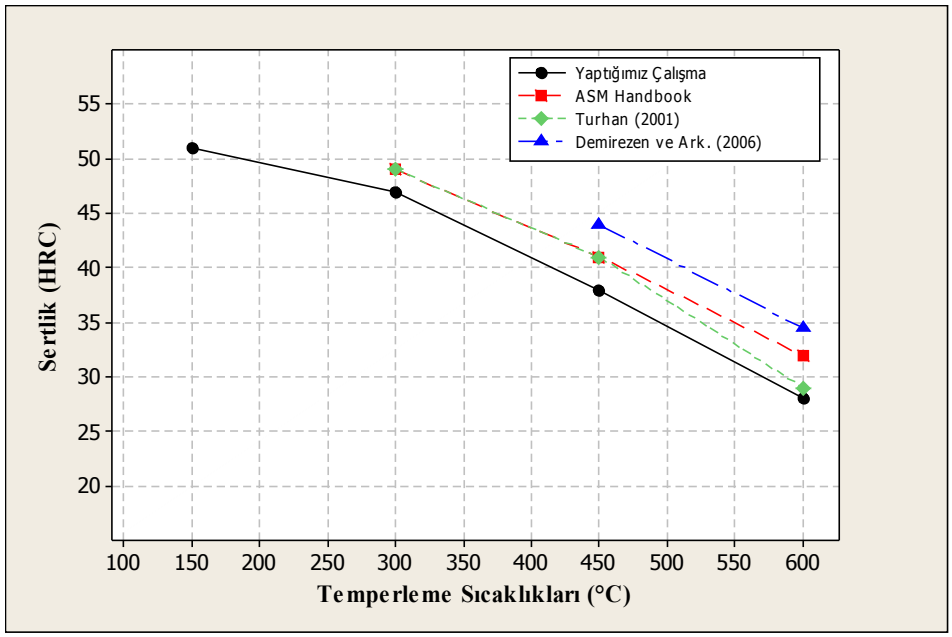


Şekil 5.4 Yağda sertleştirilen Ç-4140 çeliğinin farklı temperleme sıcaklıklarına göre sertlik değerleri grafiği

Yağda sertleştirilip temperlenen çelikte 150°C için bulunan sertlik değeri 51 HRC'dir. 300°C için ise bu serlik değeri 47 HRC'ye, 450°C'de 38 HRC'ye 600°C'de ise bu değer 28 HRC'ye düşmüştür. ASM Handbook için bu değerler sırasıyla 49 HRC, 41 HRC ve 32 HRC'dir. Turhan (2001) ise bu değerleri sırasıyla yaklaşık 49 HRC, 41 HRC ve 29 HRC olarak bulmuşlardır. Demirezen ve arkadaşları ise, 450°C'de temperleme sonucunda sertlik değerini 44 HRC, 600°C'de temperleme sonucunda sertlik değerini 34,5 HRC bulmuşlardır. (Tablo 5.6, Şekil 5.5).

Tablo 5.6 Bulunan sertlik değerlerinin yapılan diğer çalışmalarla karşılaştırılması

	Sertlik (HRC)			
Karşılaştırılan	Yaptığımız Çalışma	ASM Handbook	Turhan (2001)	Demirezen ve Ark.(2006)
150 °C Temperleme	51	----	----	----
300 °C Temperleme	47	49	49	----
450 °C Temperleme	38	41	41	44
600 °C Temperleme	28	32	29	34,5

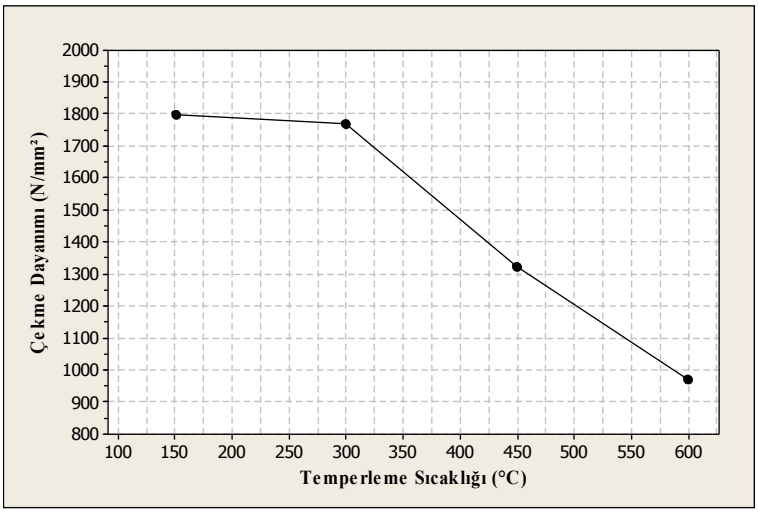


Şekil 5.5 Yağda sertleştirilen Ç-4140 çeliğinin farklı temperleme sıcaklıklarına göre sertlik değerlerinin yapılan diğer çalışmalarla karşılaştırılması

5.2.2. Isıl işlem parametrelerinin çekme dayanımı üzerindeki etkisi

Yağda sertleştirilen çeliklere yapılan ısıl işlemlerde 150°C ve 300°C temperleme sıcaklıklarında çekme dayanımları yaklaşık aynı kalmıştır. 300°C

üzerindeki sıcaklıklarda ise sıcaklık artışıyla paralel olarak çekme dayanımlarında düşüş meydana gelmiştir (Şekil 5.6).

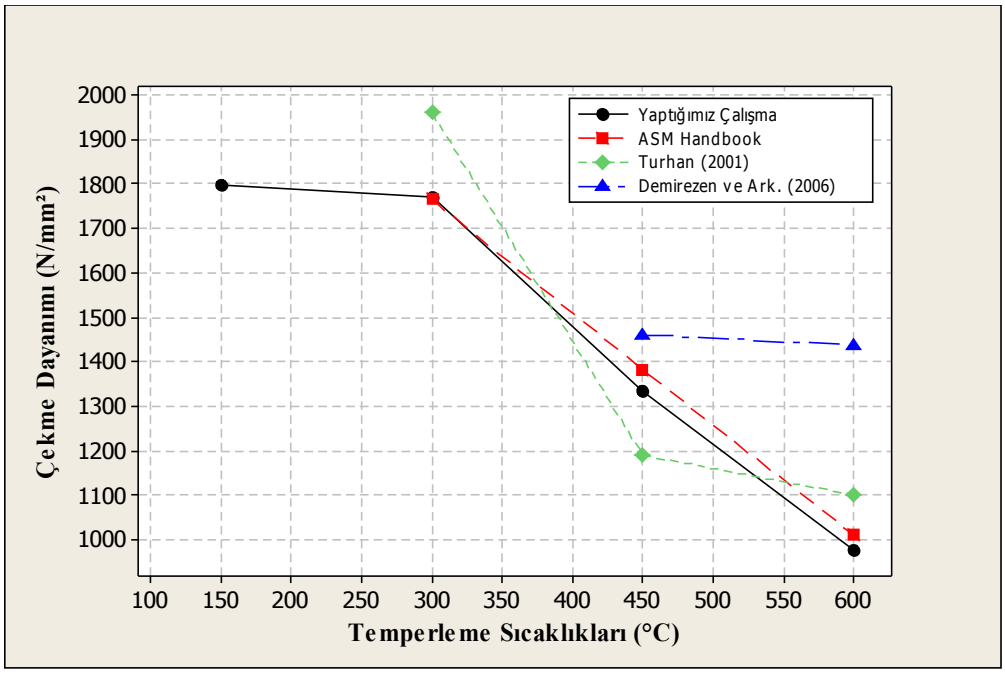


Şekil 5.6 Yağda sertleştirilen Ç-4140 çeliğinin farklı temperleme sıcaklıklarına göre çekme dayanımları grafiği

ASM Handbook'a göre 300°C, 450°C ve 600°C için yapılan temperleme işlemi sonunda çekme dayanımları sırası ile 1765 N/mm², 1382 N/mm² ve 1010 N/mm²'dir. Turhan (2001) bu değerleri yaklaşık olarak sırasıyla 1960 N/mm², 1190 N/mm² ve 1100 N/mm² bulmuşlardır. Demirezen ve arkadaşları ise, 450°C'de temperleme sonucunda çekme dayanımını 1461 N/mm², 600°C için ise 1437 N/mm² bulmuşlardır. (Tablo 5.7).

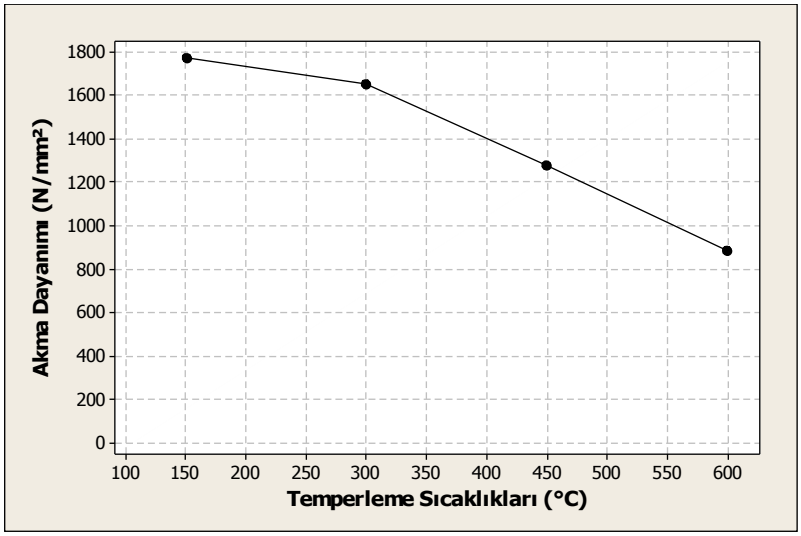
Tablo 5.7 Bulunan çekme dayanımı değerlerinin yapılan diğer çalışmalarla karşılaştırılması

	Çekme Dayanımı (N/mm²)			
Karşılaştırılan	Yaptığımız Çalışma	ASM Handbook	Turhan (2001)	Demirezen ve Ark.(2006)
150 °C Temperleme	1798	----	----	----
300 °C Temperleme	1770	1765	1960	----
450 °C Temperleme	1336	1382	1190	1461
600 °C Temperleme	977	1010	1100	1437



Şekil 5.7 Yağda sertleştirilen Ç-4140 çeliğinin farklı temperleme sıcaklıklarına göre çekme dayanımlarının diğer çalışmalarla karşılaştırılması

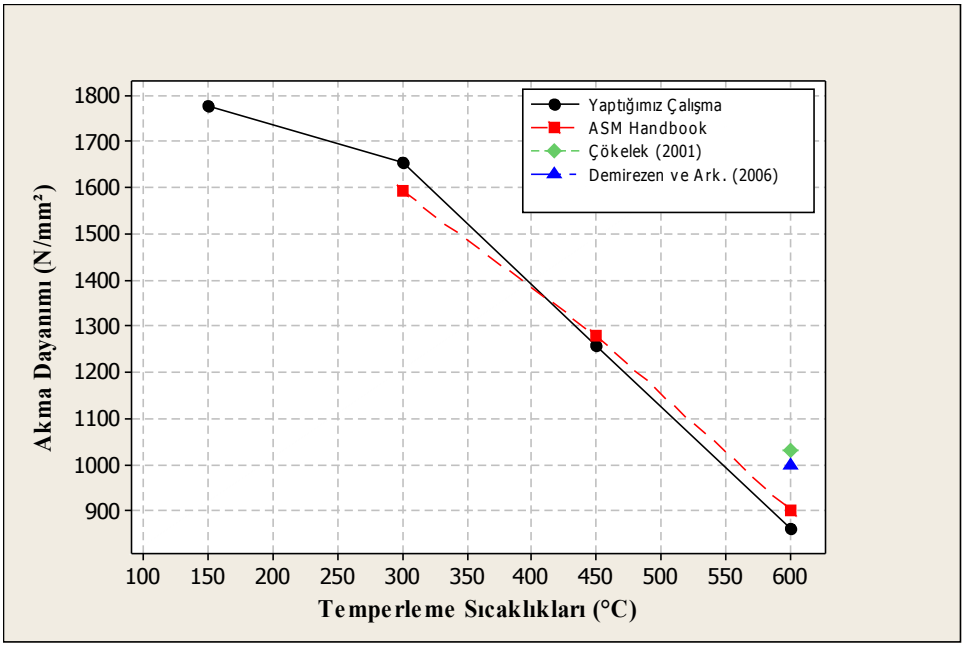
5.2.3 Isıl işlem parametrelerinin akma dayanımı üzerindeki etkisi



Şekil 5.8 Yağda sertleştirilen Ç-4140 çeliğinin farklı temperleme sıcaklıklarına göre akma dayanımları

Yağda sertleştirilen çeliğe yapılan temperleme işleminde 150°C'de akma en yüksek seviyededir. Sıcaklık artışı ile beraber akma dayanımı da düşme eğilimi içerisine girmiştir (Şekil 5.8).

ASM Handbook'ta göre 300°C, 450°C ve 600°C için yapılan temperleme işlemi sonunda akma dayanımları sırası ile 1592 N/mm², 1280 N/mm² ve 900 N/mm²'dir. Çökelek (2001), 600°C'deki temperleme için akma dayanımını 1030 N/mm², Demirezen ve arkadaşları ise 1000 N/mm² bulmuşlardır. (Tablo 5.8, Şekil 5.9).



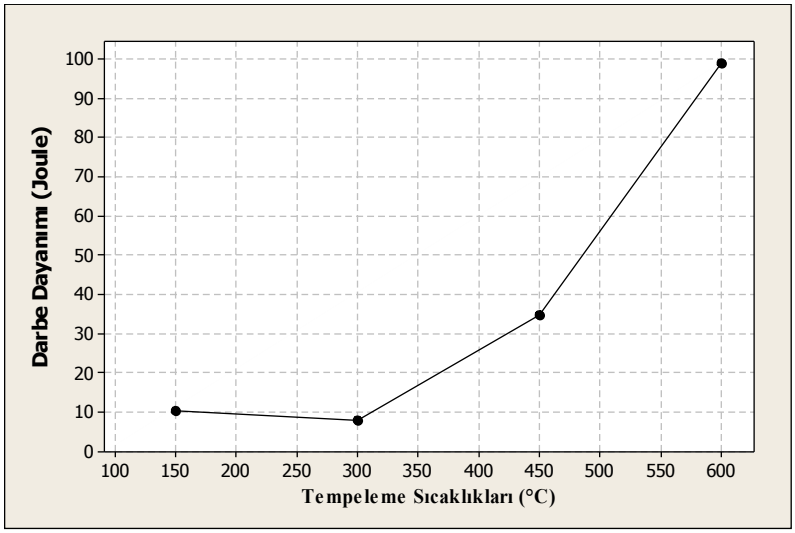
Şekil 5.9 Yağda sertleştirilen Ç-4140 çeliğinin farklı temperleme sıcaklıklarına göre akma dayanımları değerlerinin diğer çalışmalarla karşılaştırılması

Tablo 5.8 Bulunan akma dayanımı değerlerinin yapılan diğer çalışmalarla karşılaştırılması

	Akma Dayanımı (N/mm²)			
Karşılaştırılan	Yaptığımız Çalışma	ASM Handbook	Çökelek (2001)	Demirezen ve Ark.(2006)
150 ºC Temperleme	1777	----	-----	-----
300 ºC Temperleme	1656	1592	-----	-----
450 ºC Temperleme	1258	1280	-----	-----
600 ºC Temperleme	862	900	1030	1000

5.2.4 Isıl işlem parametrelerinin darbe dayanımı üzerindeki etkisi

Sertleştirme ortamı yağ olduğunda ise 300°C'de az bir düşüş meydana gelmiş ve daha sonra darbe dayanımı, hızı artarak devam eden bir yükseliş göstermiştir (Şekil 5.10).

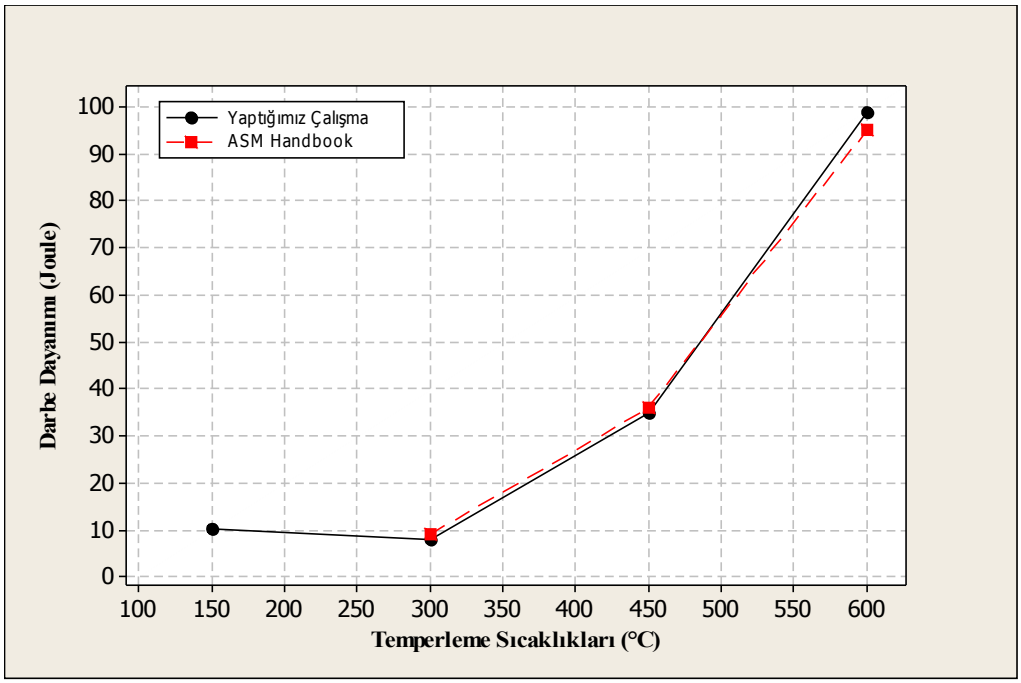


Şekil 5.10 Yağda sertleştirilen Ç-4140 çeliğinin farklı temperleme sıcaklıklarına göre darbe dayanımları grafiği

ASM Handbook'ta göre 300°C, 450°C ve 600°C için yapılan temperleme işlemi sonunda darbe dayanımları sırası ile 9 joule, 36 joule ve 95 joule bulunmuştur (Tablo 5.9, Şekil 5.11).

Tablo 5.9 Bulunan darbe dayanımı değerlerinin yapılan diğer çalışmalarla karşılaştırılması

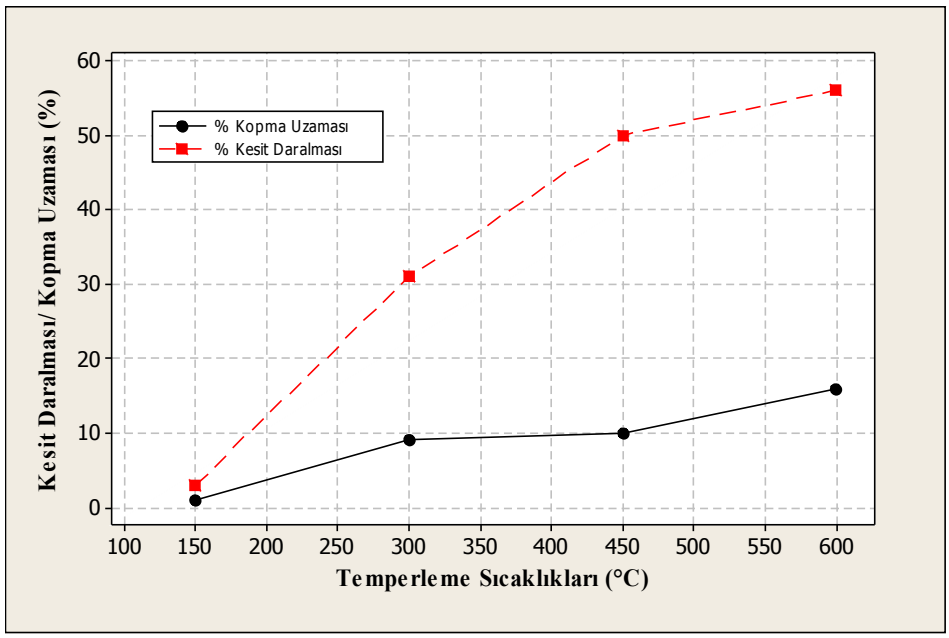
	Darbe Dayanımı (Joule)	
Karşılaştırılan	Yaptığımız Çalışma	ASM Handbook
150 °C Temperleme	10	----
300 °C Temperleme	8	9
450 °C Temperleme	35	36
600 °C Temperleme	99	95



Şekil 5.11 Yağda sertleştirilen Ç-4140 çeliğinin farklı temperleme sıcaklıklarına göre darbe dayanımları değerlerinin diğer çalışmalarla karşılaştırılması

5.2.5 Isıl işlem parametrelerinin kesit daralması ve kopma uzaması üzerindeki etkisi

Yağ ortamında sertleştirilip temperlenen Ç-4140 çeliği, temperleme sıcaklıkları arttıkça kopma uzaması ve kesit daralmasında artış göstermiştir (Şekil 5.12)

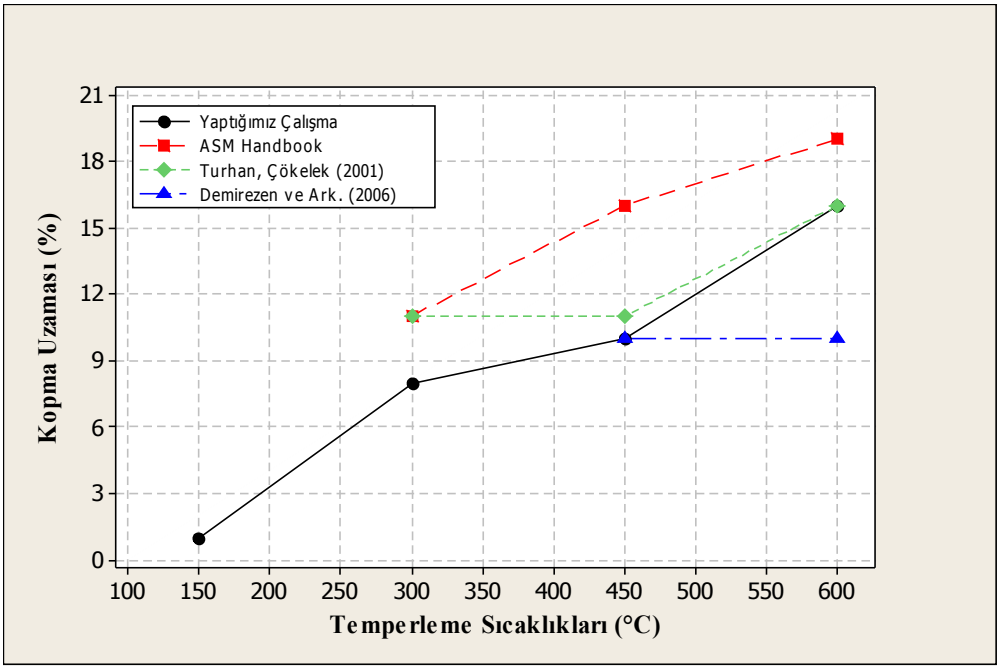


Şekil 5.12 Ç-4140 çeliğinin farklı temperleme sıcaklıklarına göre kopma uzamaları ve kesit daralmalarının karşılaştırılması

Yapılan diğer çalışmalarda alınan kopma uzaması ve kesit daralmasına dair değerler Tablo 5.10 ve Tablo 5.11'da gösterilmiştir.

Tablo 5.10 Bulunan kopma uzaması değerlerinin yapılan diğer çalışmalarla karşılaştırılması

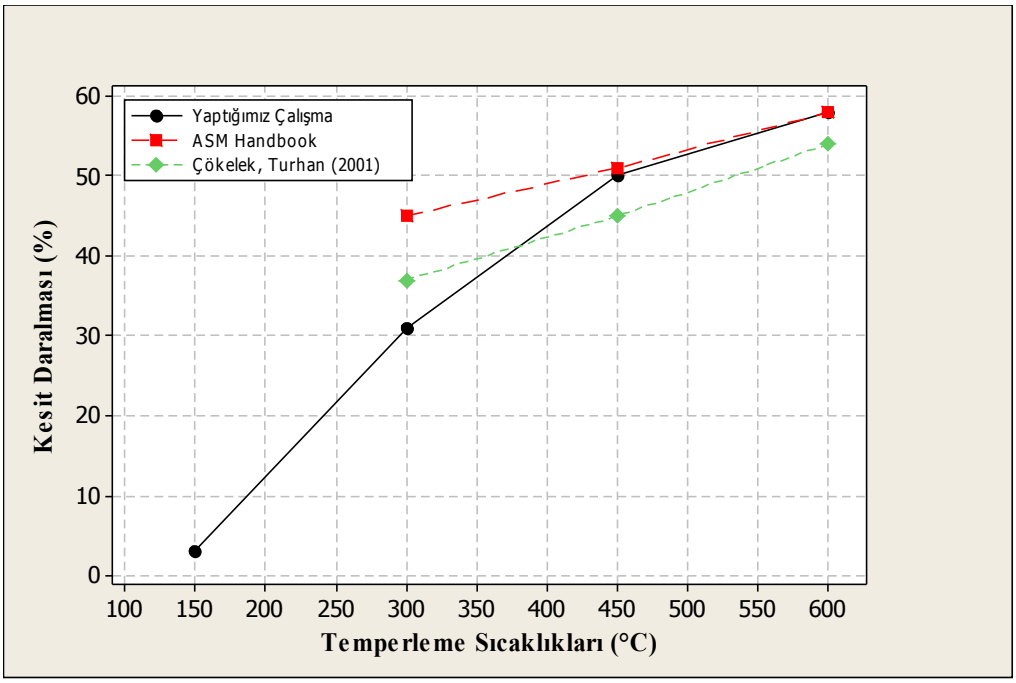
	Kopma Uzaması (%)			
Karşılaştırılan	Yaptığımız Çalışma	ASM Handbook	Çökelek, Turhan (2001)	Demirezen ve Ark.(2006)
150 °C Temperleme	1	-----	-----	-----
300 °C Temperleme	8	11	11	-----
450 °C Temperleme	10	16	11	10
600 °C Temperleme	16	19	16	10



Şekil 5.13 Ç-4140 çeliğinin farklı temperleme sıcaklıklarına göre kopma uzaması değerlerinin yapılan diğer çalışmalarla karşılaştırılması

Tablo 5.11 Bulunan kesit daralması değerlerinin yapılan diğer çalışmalarla karşılaştırılması

	Kesit Daralması (%)		
Karşılaştırılan	Yaptığımız Çalışma	ASM Handbook	Çökelek, Turhan (2001)
150 °C Temperleme	3	-----	-----
300 °C Temperleme	31	45	37
450 °C Temperleme	50	51	45
600 °C Temperleme	58	58	54



Şekil 5.14 Ç-4140 çeliğinin farklı temperleme sıcaklıklarına göre kesit daralması değerlerinin yapılan diğer çalışmalarla karşılaştırılması

5.3. Isıl İşlem Parametrelerinin Mikroyapı Özellikleri Üzerindeki Etkisi

Yapılan ısıl işlem parametreleri sonucu elde edilen martenzitik çelik ve temperlenmiş martenzitik çelik mikroyapıları sırasıyla Şekil 5.15 – 5.23 'te görülmektedir.

Mf sıcaklığının altında yapılan temperleme işleminde (150°C) mikroyapı olarak pek bir fark görülmemiştir.ortaya çıkan yapı temperlenmiş martenzit yapısı olmakla beraber martenzitik yapıdan tek farkı, hızlı soğutmanın etkisiyle yüklenmiş olan gerilimlerden bir kısmının bertaraf edilmesidir. Bu durum, mikroyapıda meydana gelen farklılıktan gözlemlenebilir (Şekil 5.15-Şekil 5.16 ile Şekil 5.20-Şekil 5.21).

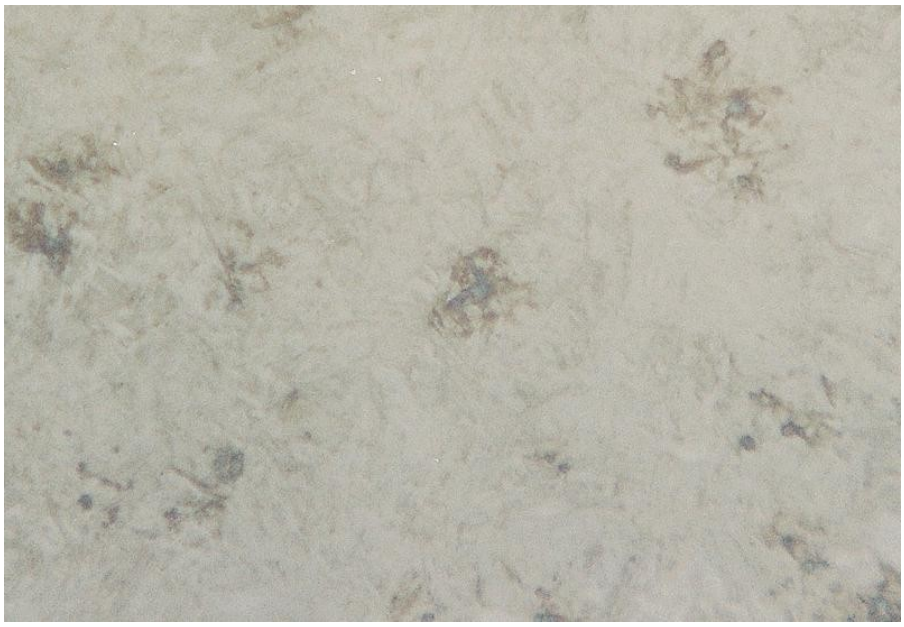
Martenzit oluşum bölgesinde ve üstünde yapılan temperleme işlemlerinde (300-700°C) ferrit ve perlit tane büyüklüğünün arttığı gözlemlenmektedir. Martenzit

dönüşüm bölgesinde 300°C'te yapılan temperleme işlemi ile yapıda homojenlik sağlanmıştır. 150°C ile 300°C'te temperlenen mikroyapılar arasındaki yapı farkı, temperleme sıcaklığının martenzitik dönüşüm bölgesi içinde olup olmamasından kaynaklanmıştır.

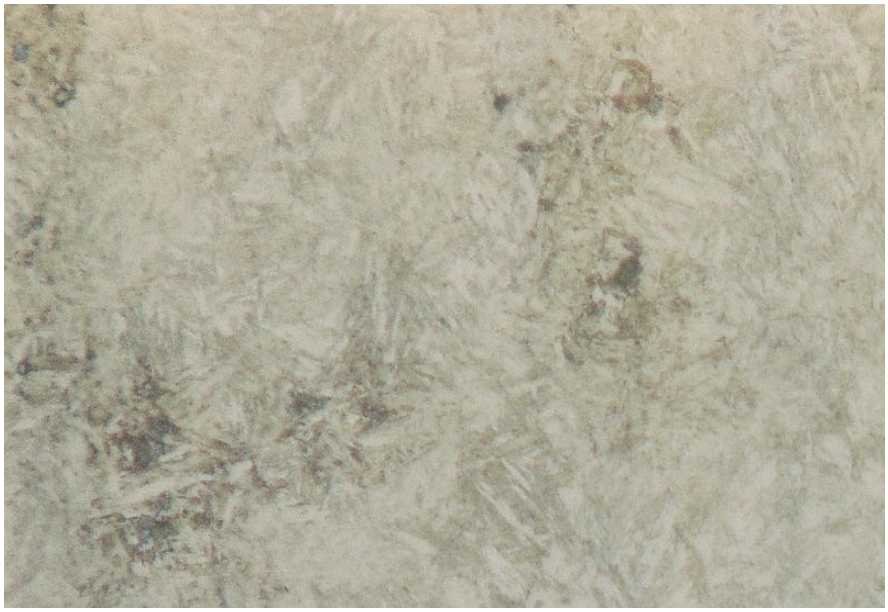
450°C 'te yapılan temperleme işlemi ile taneler 300°C'e nazaran daha da büyümüştür. 600°C te yapılan temperleme işlemi ile belirgin bir yapı değişimi sözkonusu olmuştur. Yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerine çıkmanın da etkisiyle tane yapısında belirgin bir büyüme görülmüştür. Bu sıcaklıktaki temperlemede yeniden kristalleşen ferit ve küresel sementit beynit yapısını oluşturmaktadır.

Şekil 5.15'te suda sertleştirilmiş çeliğin, Şekil 5.16'da suda sertleştirilip 150°C'de temperlenmiş çeliğin mikroyapısı görülmektedir. Suda sertleştirme sonucu yayılma fırsatı bulamayan karbon atomları 150°C' de bir miktar yayılma fırsatı bulmuştur. Yapı temperlenmiş martenzittir.

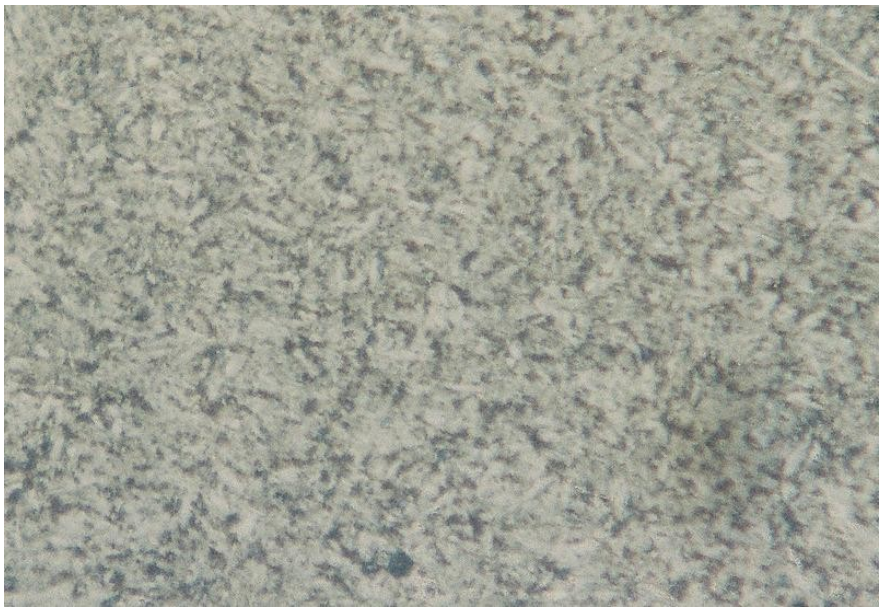
Şekil 5.17 ve Şekil 5.18'de görülen 300°C ve 450 °C'de temperlenmiş çeliğe ait mikroyapıda temperlenmiş martenzit yapısı görülmüştür. 600°C'de yeniden kristalleşmiş taneler görülmektedir. Yapı temperlenmiş martenzit ve beynitten oluşmuştur (Şekil 5.19).



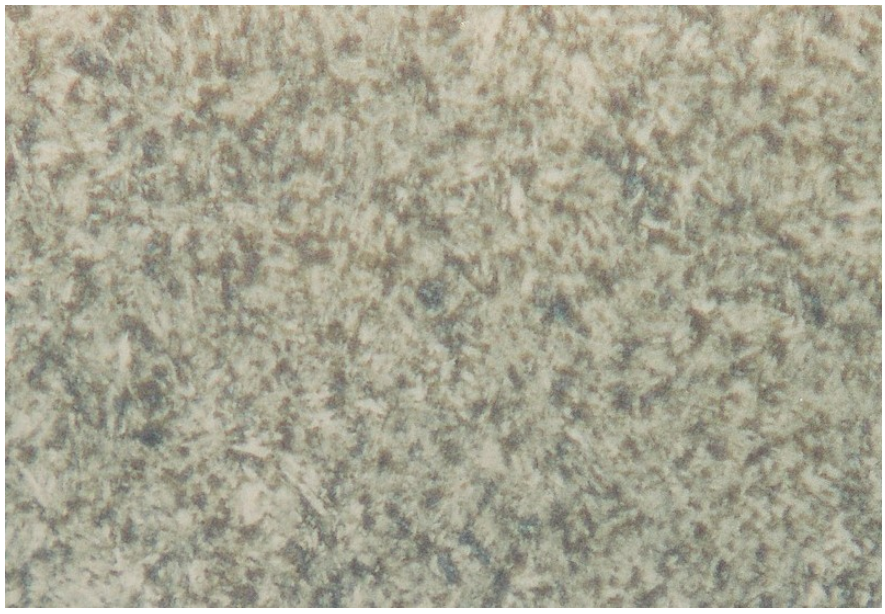
Şekil 5.15 Suda sertleştirilmiş, Ç-4140 çeliğinin mikroyapısı (500X)



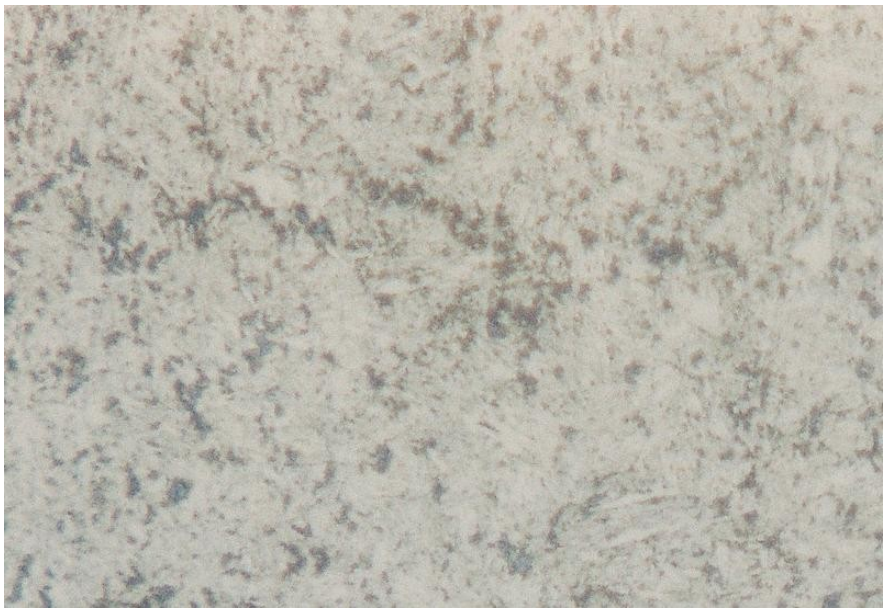
Şekil 5.16 Suda sertleştirilmiş, 150°C'de iki saat temperlenmiş Ç-4140 çeliğinin mikroyapısı (500X)



Şekil 5.17 Suda sertleştirilmiş, 300°C'de iki saat temperlenmiş Ç-4140 çeliğinin mikroyapısı (500X)



Şekil 5.18 Suda sertleştirilmiş, 450°C'de iki saat temperlenmiş Ç-4140 çeliğinin mikroyapısı (500X)

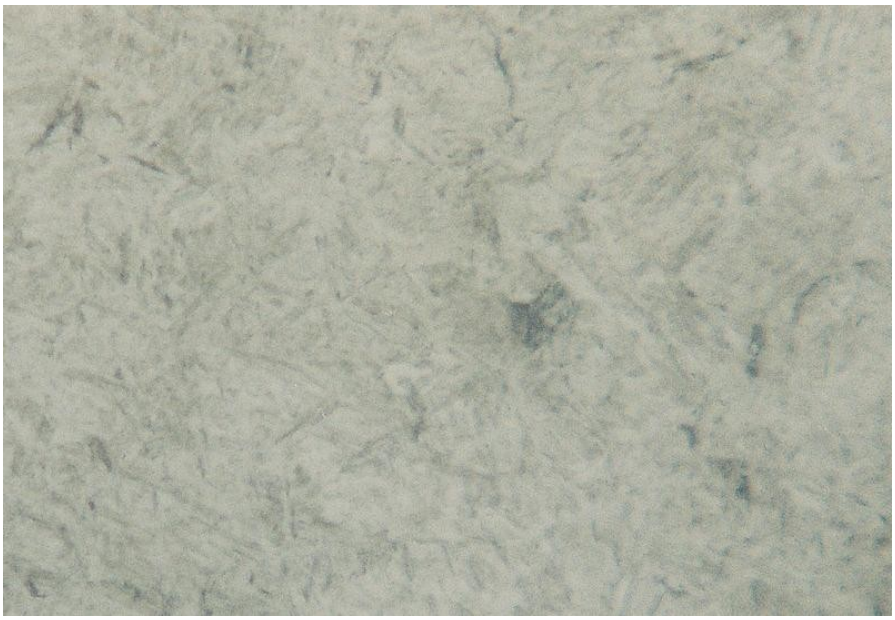


Şekil 5.19 Suda sertleştirilmiş, 600°C'de iki saat temperlenmiş Ç-4140 çeliğinin mikroyapısı (500X)

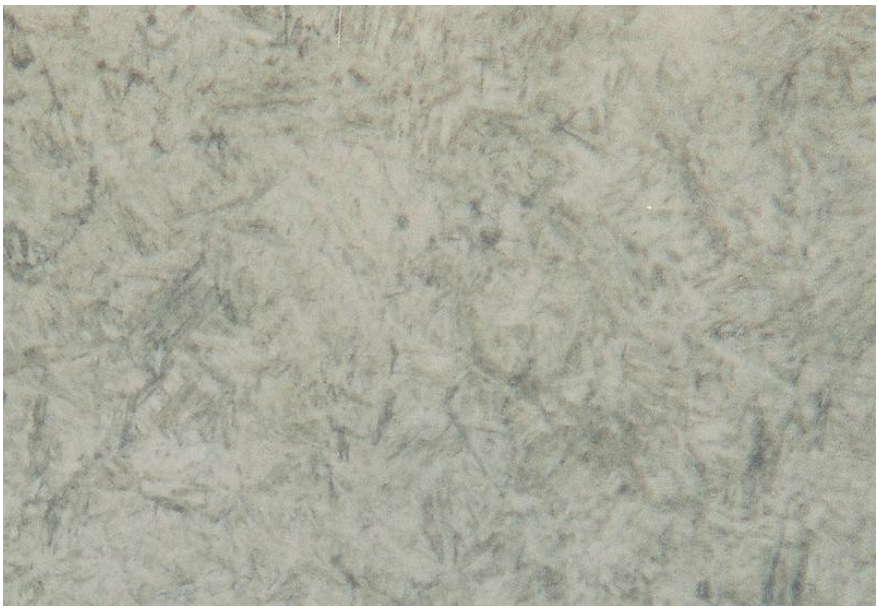
Yağda sertleştirilip 150°C'de temperlenen çeliğe ait mikroyapı temperlenmiş martenzittir (Şekil 5.13). 300°C'de temperlenen yapı 150°C'de temperlenen yapıdan daha homojen bir temperlenmiş martenzit yapıdadır (Şekil 5.14).

300°C'den daha yüksek sıcaklıklara çıkıldıkça temperlenmiş martenzit yapının yanı sıra beynit yapısı da oluşmaya başlamıştır. 600°C'te tanelerde yeniden kristalleşme olayı gerçekleşmiştir. 450°C ve 600°C'te yapılan temperleme işlemi sonucu oluşan yapı temperlenmiş martenzit ve beynitten oluşmaktadır (Şekil 5.15 ve Şekil 5.16).

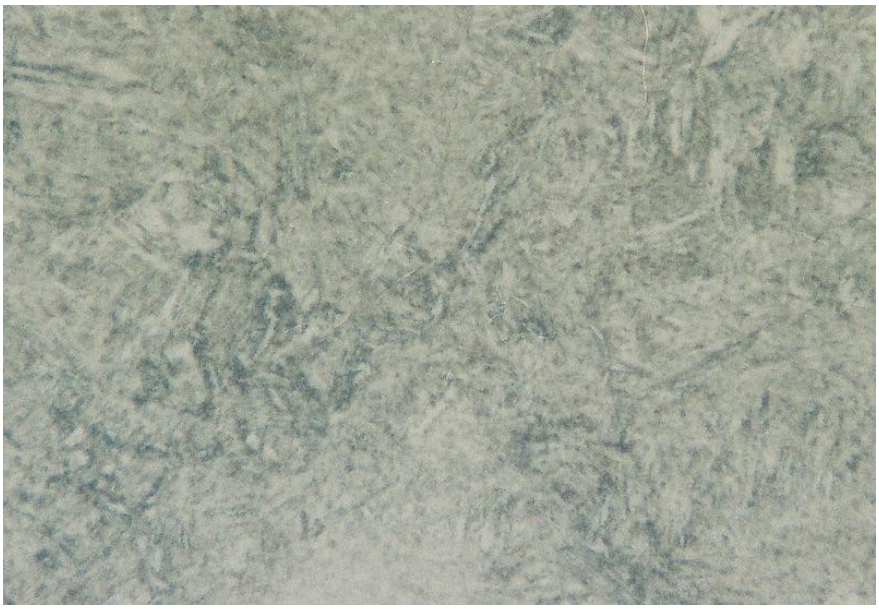
Su ve yağda sertleştirilip temperlenen yapılardaki fark karbon atomlarının dağılımında kendini göstermektedir. Bunun yanında yağda sertleştirilen temperlenmiş çelikte beynit yapısı 450 °C'den itibaren görülürken suda sertleştirilen temperlenmiş çelikte beynit yapısı 600°C'de görülmektedir.



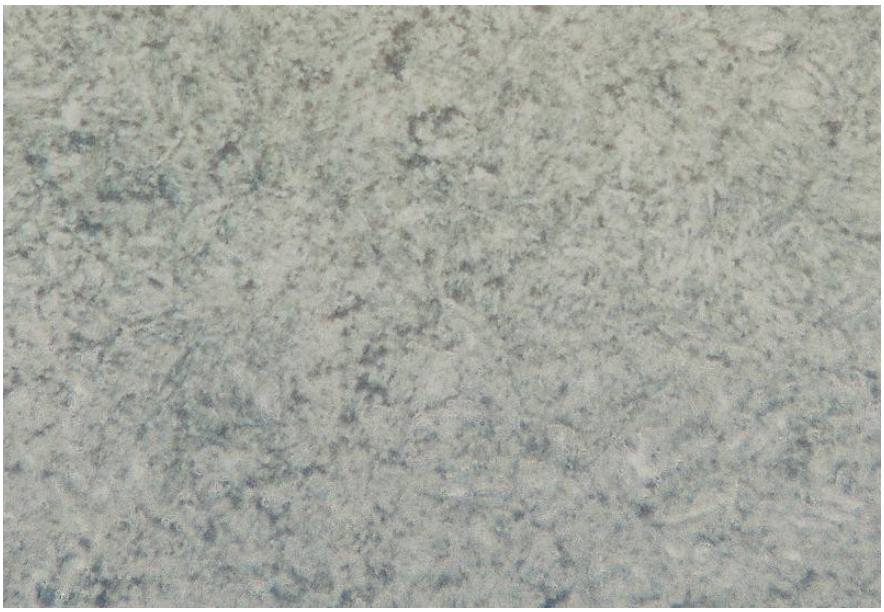
Şekil 5.20 Yağda sertleştirilmiş Ç-4140 çeliğinin mikroyapısı (500X)



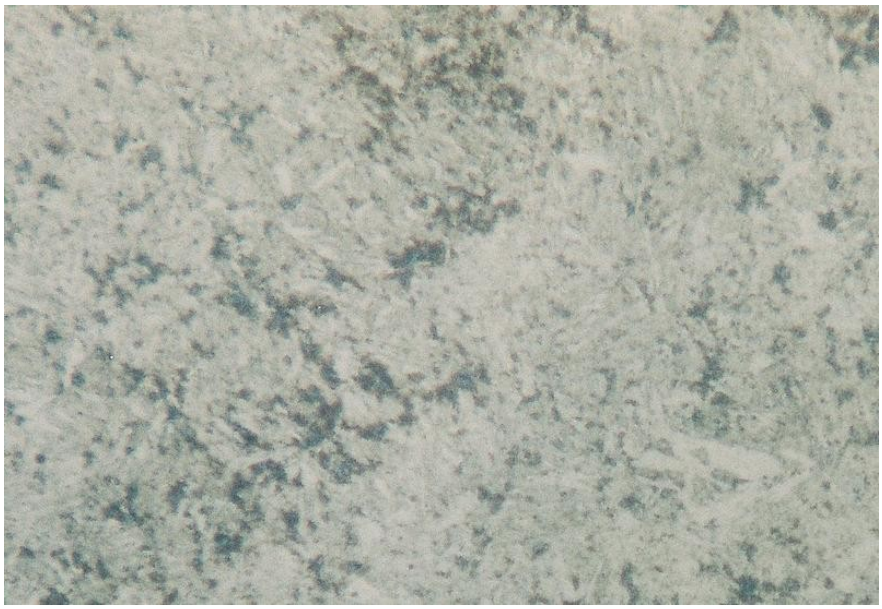
Şekil 5.21 Yağda sertleştirilmiş, 150°C'de iki saat temperlenmiş Ç-4140 çeliğinin mikroyapısı (500X)



Şekil 5.22 Yağda sertleştirilmiş, 300°C'de iki saat temperlenmiş Ç-4140 çeliğinin mikroyapısı (500X)



Şekil 5.23 Yağda sertleştirilmiş, 450°C'de iki saat temperlenmiş Ç-4140 çeliğinin mikroyapısı (500X)



Şekil 5.24 Yağda sertleştirilmiş, 600°C'de iki saat temperlenmiş Ç-4140 çeliğinin mikroyapısı (500X)

6 SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Ç-4140 çeliğine uygulanan ısıl işlemlerde su verme ortamının malzemenin mekanik ve mikroyapı özellikleri üzerindeki etkisinin incelendiği bu çalışmada soğutma ortamı olarak yağ ve su üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Bunun yanında normalizasyon işlemi yapılmış ve işlem görmemiş malzeme ile karşılaştırılması yapılmıştır.

Yapılan deneyler sonucunda;

1. Su ortamında soğutularak sertleştirilen Ç-4140 çeliğinde çatlaklar oluştuğu tespit edilmiştir. Yağ ortamında soğutularak sertleştirilen çeliklerde ise böyle bir problemle karşılaşılmamıştır. Bu durumda suda soğutma, olumsuz sonuçlara sebep olabilecektir. Bu yüzden bu konuda yapılan çalışmalarda tercih edilen soğutma ortamı yağ olmuştur.

2. Yapılan çalışmada yağ ortamında sertleştirilen malzemeye ait çekme ve akma dayanımları, temperleme sıcaklığı artışıyla düşme göstermiştir. En yüksek çekme ve akma dayanımları 150ºC de görülmüştür. Sırasıyla bu değerler 1798 N/mm² ve 1777 N/mm² 'dir. Çekme dayanımları 300°C'de çok az bir düşüşle 1770 N/mm²'ye, 450°C ve 600°C 'de ise ciddi düşüşler yaşayarak sırasıyla 1326 N/mm² ve 972 N/mm² 'ye düşmüştür. Akma dayanımlarında da çekme dayanımlarında olduğu gibi yüksek temperleme sıcaklığıyla beraber düşüş görülmüş, 300°C'de 1656 N/mm²'ye, 450°C'de 1278 N/mm²'ye 600°C'de ise 885 N/mm²'ye kadar inmiştir.

3. Yağda sertleştirilen malzeme, 300°C'de temperlendiğinde darbe dayanımında düşüş olmuş yani temperleme gevrekliği etkisi görülmüştür. Suda sertleştirilmiş malzemede bu etki görülmemiştir. Suda, malzeme çok hızlı soğuduğundan karbür oluşumunun önüne geçilmiştir. 300°C üzerindeki temperlemelerde darbe dayanımında hızlı bir artış gözlenmiştir. Yağda sertleştirilip temperlenen Ç-4140 çeliğinin darbe dayanımı 150°C'de 10 joule olan darbe

dayanımı, 300°C'de 8 joule'ye düşmüş, daha sonra 450°C 'de 35 joule, 600°C'de 99 joule değerine ulaşmıştır.

4. Kopma uzaması ve kesit daralması temperleme sıcaklık artışıyla doğru orantılı olarak artmıştır. Sertlik ise sıcaklık artışıyla beraber düşüş göstermiştir. En yüksek kopma uzaması ve kesit daralması değerlerine 600°C'de temperleme işlemi sonucunda ulaşılmıştır. Bu değerler kopma uzaması için %16, kesit daralması için %58'dir. Sertlik değerleri ise temperleme sıcaklık artışı ile lineer kabul edebileceğimiz bir düşüşle 51 HRC'den 28 HRC'ye düşmüştür.

5. Normalizasyon işlemi ile malzemenin mekanik özelliklerinde artış gözlenmiştir. Çekme ve akma dayanımlarında, mikroyapıdaki perlit yapısının incelmesi nedeniyle artış gözlenmiştir. Buna karşın darbe dayanımı, tane yapısındaki incelmeden dolayı düşüş göstermiştir.

6. Mikroyapı fotoğraflarında normalizasyon ile malzemede homojen bir yapının oluştuğu görülmüştür. Sertleştirilen malzemeye ait mikroyapıda belirli bölgelerde yığılmalar görülmüştür. Ancak temperleme işlemi ile bu yığılmalar ortadan kalkarak homojenlik sağlanmıştır. Sıcaklık artışına paralel olarak homojenleşen yapıda aynı zamanda tanelerin irileştirği de gözlemlenmektedir. 600°C'te yapılan temperleme işlemine ait mikroyapıda yeniden kristalleşmeyi de görmek mümkündür. Sertleştirme işlemi ile ortaya çıkan martenzit yapısı temperleme işlemi ile birlikte temperlenmiş martenzit olarak da ifade edilen perlik-ferrit yapısına dönmüştür. Yağda sertleştirilip 450°C ve 600°C'de temperlenen malzemde ayrıca beynit yapısı da gözlemlenmektedir. Beynit yapısına suda sertleştirme sonrası sadece 600°C'de temperleme işlemi sonucunda ulaşılmıştır.

7. Yapılan bu çalışma sonucunda Ç-4140 çeliğinde en iyi mekanik özelliklere yağda sertleştirme sonucunda ulaşıldığı görülmüştür. Suda sertleştirmenin çatlak oluşumuna sebep olmasından dolayı Ç-4140 çeliğinin suda sertleştirilmesi uygun değildir.

Bir sonraki çalışmalarda su ve yağ karıştırılmak sureti ile ara soğutma hızlarına ulaşılarak aynı işlemler tekrarlanabilir. Su ve yağ belli oranlarda karıştırılarak sudan daha yavaş, ancak yağdan daha hızlı soğutma gerçekleştirilecek ve sonuçlar gözlemlenebilecektir. Bunun yanısıra bu çalışmada denenen temperleme sıcaklıkları dışındaki sıcaklıklarda temperleme işlemi yaparak daha geniş çapta sonuçlar elde edilebilecektir.

Bunun yanısıra sertleştirme işlemleri normalizasyon işleminin hemen ardından yapılmak suretiyle işlemsiz çelik ile normalleştirilmiş çeliğin sertleştirme işlemi sonrası karşılaştırılmaları yapılabilir.

7 KAYNAKLAR

Akbaş, A., Bağcı, M., Yeşilmen, N., Ahmet, S., 1998, Metallerin İşlenmesi Mesleki ve Teknik Öğretim Kitapları, Milli eğitim bakanlığı basımevi, İstanbul

ASM Metals Handbook, 1997. Volume 4, Heat Treating, Tenth Edition

ASM Metals Handbook, 1997. Volume 1, Properties and Selection, Iron, Steel and High Performance Alloys, Tenth Edition, Fifth Printing, Materials Park, Ohio, USA, 1063 s.

Ashby, M. F. and Jones, D.R.H., 1998, Engineering Materials, 2nd ed., Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 125-132 p., (vol. 1). 322p, (vol. 2). 392 s.

Avner, S.H., 1986, Introduction to Physical Metallurgy, McGraw Hill Book Company, 2.ed., New York, 315-336.

Berns H., Theisen W., 2008, Ferrous Materials: Steels and Cast Iron, 39 s.

Buytoz, S., 2004, AISI 4340 celiğinin nitrurasyon ve GTA kaynak yontemi ile yuzey modifikasyonu islemleri sonrası mekaniksel davranıslarının arastırılması, Fırat Univ. FBE, Doktora tezi, Elazığ, 190 s.

Buytoz, S., 2006, Microstructural properties of M7C3 eutectic carbides in a Fe–Cr–C alloy, Materials Letters, 60, 605–608 s.

Çökelek M., 2001, Islah Çeliklerinde , Isıl İşlem Parametrelerinin Yorulma Limitine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta

Charre, M. D., 2004, Microsructure of steel and cast irons, (Trans. J.H. Davidson), Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 2004, 417 s.

Cheremisinoff, N. P., 1996, Materials selection deskbook (pdf form-CRC press), Noyes Publications Westwood, New Jersey, U.S.A, 191 s.

Choo, S., Lee, S. and Golkovski, M. G., 2000, Effects of accelerated electron beam irradiation on surface hardening and fatigue properties in an Ç-4140 steel used for automotive crankshaft, Materials Science and Engineering A293, 56–70 s.

Chuang J. H., Tsay L. W. and Chen C., 1998, Crack growth behaviour of heat-treated 4140 steel in air and gaseous hydrogen, International Journal of Fatigue, Volume 20, Issue 7, Pages 531-536

Davis, J.R., Metals Handbook. 1990: ASM International. p. 197-199, 203 s.

Erdoğan, M., Mühendislik alaşımlarının yapı ve özellikleri, 2000, Nobel Yayın Dağıtım Ltd Şti, Ankara,120-153, 338 s.

Güleç, Ş., Aran, A., 1987. Malzeme Bilgisi, Cilt, 2, TÜBİTAK Yayını, MBEAE Matbaası, Gebze

Krauss, G., 1997. Steel; Heat Treatment and Processing Princeples, Materials Park, Ohio, 548 s.

Kunc R., and Prebil I., 2003, Low-cycle fatigue properties of steel 42CrMo4, Materials Science and Engineering A, Volume 345, Issues 1-2, Pages 278-285

Metals Handbook, 1993, "Heat Treatments of Steels", 10th edition , ASM.

Meyrick, Glyn, 2001, Steel class notes and lecture material for MSE 651.01-Physical Metallurgy of Steel, 111, 174 s.

MKE Kurumu Genel Müdürlüğü, 1993, 1454 sayı 8 Nisan tarihli yazı.

Oliveira, F., Hernandez, L., Berrios, J.A., Villalobos, C., Pertuz, A. and Cabrera, E.S.P., 2000, Corrosion-fatigue properties of a 4340 steel coated with Colmonoly 88 alloy, applied by HVOF thermal spray, Surface and Coatings Technology, 133- 134, 68-77 s.

Oygur, A., 1988, Alaşımsız Çeliklerde Isıl İşlem, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya

Rondeau D., 2004, The effects of part orientation and fluid flow on heat transfer around a cylinder, Master Thesis, Worcester Polytechnic Institute

Savaşkan, T., 1999, Malzeme Bilgisi ve Muayenesi, 213-271, Derya kitapevi, 285 s.

Shackelford, J. F. and Alexander, W., (Editor), 2001, CRC materials science and engineering handbook-3rd ed., CRC Press LLC,(pdf form), 1714 s.

Smith, William F., Structure and Properties of Engineering Alloys. 2nd ed. 1993, New York: McGraw Hill. 156 s.

Stahlschlüssel, 2004, Key to Steel, Verlag Stahlschlüssel Wegst GmbH, Almanya

Şen, U., Bindal, C., Yılmaz, F., 1995. Çeşitli Yenileme İşlemlerine Uğratılan SAE 4140 Tank Palet Çeliklerinin Özellikleri, 6. Denizli Malzeme Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 70-75 s.

Tayanç, M., Toktaş, A., 2002. SAE 4140 Çeliğinin Islahında Menevişleme Sıcaklığının İç Yapı ve Süneklik Üzerine Etkisinin İncelenmesi, Kalıp Dünyası, Yıl, 3, Sayı, 15

Tekin, E., 1992. Mühendisler İçin Çelik Seçimi, MMO Yayın No, 119, 285 s.

Topbaş, M. A., 1998, Çelik ve Isıl İşlem El Kitabı, Prestij Yayıncılık Bas. Hiz. İstanbul, 75-96 ,593 s.

Totik Y., Sadeler, R., Altun, H., ve Gavgalı, M., 2003, "The Effects of Induction Hardening on Wear Properties of AISI 4140 Steel in Dry Sliding Conditions," Materials and Design, 24, 25-30.

Totik, Y., 2006, "The Corrosion Behaviour of Manganese Phosphate Coatings Applied to AISI 4140 Steel Subjected to Different Heat Treatments", Surface and Coatings Technology, Volume 200 İssues 8, Pages: 2711-2717

Töre, C. , 2007, Mekanik Tasarımda Çelik ve Özellikleri, MMO/2007/425

TS 138 EN 10002-1/2004, Metalik Malzemeler – Çekme Deneyi – Bölüm 1: Ortam Sıcaklığında Deney Metodu

TS EN 10045-1/1999, Metalik Malzemeler-Charpy Vurma Deneyi- Bölüm 1: Deney Metodu (V-ve U-Çentikleri)

Turhan E., 2001, Islah Çeliklerinde , Isıl İşlem Parametrelerinin Aşınma Davranışına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta

Ulutan M., 2007 , Ç-4140 Çeliğinin Yüzey Sertleştirme İşlemleri ve Kaplama Yöntemleri Sonrası Mekanik Davranışlarının Araştırılması, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

Unterweiser, Paul M., Boyer, Howard E. James J. Kubbs, ed. Heat treater's guide: standard practices and procedures for steel. 1982, American Society for Metals: Metals Park, Ohio.

Vazdirvanidas A.Pantazopoulos G. and Louvaris A., Failure analysis of a hardened and tempered structural steel (42CrMo4) bar for automotive applications, Engineering Failure Analysis, Volume 16, İssues 4 , Pages: 1033-1038

Yıldırım, M.M., Doğantan, Z.S., Pakdil, M. ve Cakan, A., 2001, Mühendislik Malzemeleri -I- MKU Mustafa Kemal Üniversitesi Yayınları, No:9, İskenderun, 110-116, 180 s.

Yıldırım, M.M., Doğantan, Z.S., Pakdil, M. ve Cakan, A., 2001, Mühendislik Malzemeleri -III-, MKU Mustafa Kemal Üniversitesi Yayınları, No:11, İskenderun, 10-30,(b) 194 s