

**METALİK MALZEMELERDE TANE BOYUTUNUN PEKLEŞME
KATSAYISINA ETKİSİ**

Deniz AKTAŞ

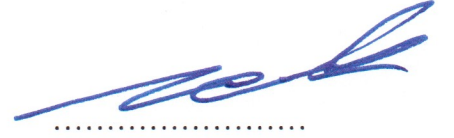
**Bartın Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**BARTIN
Ağustos 2012**

KABUL:

Deniz AKTAŞ tarafından hazırlanan “METALİK MALZEMELERDE TANE BOYUTUNUN PEKLEŞME KATSAYISINA ETKİSİ” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek, Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliğiyle kabul edilmiştir. (14.08.2012)

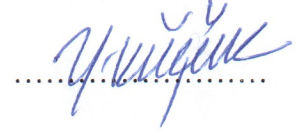
Başkan: Prof. Dr. Galip SAİD (BÜ)



Üye: Yrd. Doç. Dr. M. Sabri GÖK (BÜ)

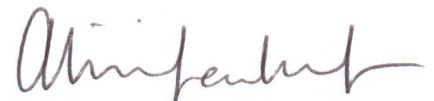


Üye: Yrd. Doç. Dr. Yılmaz KÜÇÜK (BÜ)



ONAY:

Yukarıdaki imzaların adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylıyorum. 3.../9/2012



Prof. Dr. Ali Naci TANKUT
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

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

Deniz AKTAŞ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

METALİK MALZEMELERDE TANE BOYUTUNUN PEKLEŞME KATSAYISINA ETKİSİ

Deniz AKTAŞ

Bartın Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Galip SAİD

Ağustos 2012, 113 sayfa

Bu çalışmada tane boyutunun pekleşme katsayısına etkisi düşük karbonlu alaşımsız SAE/AISI 1020 yapı çeliği ve düşük karbonlu alaşımlı SAE/AISI 8620 sementasyon çeliği kullanılarak incelenmiştir. Kullanılan çelikler demir-sementit (Fe-Fe₃C) faz diyagramının ostenit bölgesinde A₃ sıcaklığının üzerindeki üç farklı sıcaklıkta tavlama işlemine tabi tutulmuştur. Tavlama sıcaklıklarının artırılması ile çeliklerin tane boyutları da artmıştır. Tane boyutları optik mikroskop yardımıyla belirlenmiştir. Tane boyutlarının artması ile çeliklerin akma gerilmesi, çekme gerilmesi gibi mekanik özelliklerinde düşüş gözlemlenmiştir. Çeliklerin pekleşme katsayılarının tayini için çeliklerden hazırlanmış olan silindirik numuneler tek eksenli çekme deneyine tabi tutulmuştur. Elde edilen gerilme-gerinme diyagramlarından her numune için pekleşme katsayısı tayin edilmiştir. Farklı sıcaklıklarda tavlama tane boyutları ve pekleşme katsayıları göz önüne alındığında tane boyutu arttıkça pekleşme katsayısının da arttığı sonucuna varılmıştır.

Anahtar Sözcükler: Tane Boyutu, Pekleşme Katsayısı.

Bilim Kodu: 625.02.05

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

THE EFFECT OF GRAIN SIZE ON THE STRAIN HARDENING COEFFICIENT ON METALIC MATERIALS

Deniz AKTAŞ

Bartın University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor: Prof. Dr. Galip SAİD

August 2012, 113 pages

In this study, the effect of grain size on the strain hardening coefficient has been investigated using SAE/AISI 1020 low carbon unalloyed structural steel and SAE/AISI 8620 low carbon alloyed case hardening steel. Steels used has been annealed on the austenite region of iron-cementite diagram on three different temperatures over A_3 temperature. The grain sizes of steels have been increased by increase of annealing temperatures. The grain sizes have been determined using optical microscope. Decrease in the mechanical properties as yield stress, tensile stress has been observed by increase of grain sizes. Uniaxial tension test has been performed on samples which are prepared from steels in order to determine strain hardening coefficient of steels. Strain hardening coefficient have been determined for each sample from obtained stress-strain diagrams. Increase in strain hardening coefficient has been observed by increase of grain sizes in view of grain sizes and strain hardening coefficients.

Key Words: Grain Size, Strain Hardening Coefficient.

Science Code: 625.02.05

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasında danışmanlığını üstlenerek başından sonuna kadar değerli aba ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Galip SAİD'e sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, tez alışması boyunca yardımlarını ve tavsiyelerini hiçbir zaman esirgemeyen Doç. Dr. Fikret KOCABAŐ'a, Yrd. Doç. Dr. M. Sabri GÖK'e ve Arş. Gör. Azmi ERDOĞAN'a, deneysel kısımlarda yardımcı olan Yrd. Doç. Dr. Halil AYTEKİN'e, Arş. Gör. Uğur SORGUCU'ya ve öğrenciliğim boyunca maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen başta kardeşim olmak üzere tüm aileme candan teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
TABLolar DİZİNİ	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xix
BÖLÜM 1 GİRİŞ	1
BÖLÜM 2 METAL VE ALAŞIMLARI	3
2.1 SAF DEMİR VE GENEL ÖZELLİKLERİ	4
2.2 DEMİR-SEMENTİT (Fe-Fe ₃ C) FAZ DİYAGRAMI	5
2.3 ÇELİKLER.....	12
2.3.1 Çeliklerin Sınıflandırılması	12
2.3.1.1 Çeliklerin Karbon Oranlarına Göre Sınıflandırılması	12
2.3.1.2 Çeliklerin Alaşım Miktarına Göre Sınıflandırılması.....	14
2.3.1.3 Esas Alaşım Elementlerine Göre Çelikler.....	15
2.3.2 Alaşım Elementleri ve Kalıntı Elementlerinin Çelik Yapısına Etkisi.....	17
2.3.2.1 Alaşım Elementlerinin Çelik Yapısına Etkisi	18
2.3.2.2 Kalıntı Elementlerinin Çelik Yapısına Etkisi.....	23
2.3.3 Çeliklerde Mukavemet Arttırma Yöntemleri	25
2.3.3.1 Alaşım Sertleşmesi	26
2.3.3.2 Çökeltme Sertleşmesi	26
2.3.3.3 Dispersiyon Sertleşmesi	27

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
2.3.3.4 Soğuk İşlem	27
2.3.3.5 Tane Boyutunu Küçültme	29
2.3.3.6 Deformasyon Yaşlanması	31
2.3.3.7 Martenzitik Dönüşüm	32
2.3.3.8 Radyasyonla Sertleştirme	32
BÖLÜM 3 ÇOK KRİSTALLİ MALZEMELERDE TANE YAPISI	33
3.1 GİRİŞ	33
3.2 TANE SINIRLARI	33
3.3 TANE ŞEKLİ VE BOYUTU	36
BÖLÜM 4 TANE BOYUTUNU ETKİLEYEN ISIL İŞLEMLER	39
4.1 ISIL İŞLEMLERİN GENEL GRAFİĞİ	41
4.2 ISIL İŞLEM ÇEŞİTLERİ.....	42
4.2.1 Rekristalizasyon (Yeniden Kristalleştirme Tavı)	42
4.2.2 Homojenleştirme Tavlama (Homojenizasyon).....	45
4.2.3 Tam Tavlama.....	45
4.2.4 Tam Olmayan Tavlama	48
4.2.5 Küreselleştirici Tavlama	48
4.2.6 İzotermik Tavlama	51
4.2.7 Normalleştirme (Normalizasyon).....	52
4.2.8 Gerilim Giderme Tavı ve Ara Tavı	54
BÖLÜM 5 MALZEMELERİN DEFORMASYONU	55
5.1 ELASTİK DEFORMASYON	55
5.2 PLASTİK DEFORMASYON	56
5.2.1 Metalik Malzemelerde Plastik Deformasyon Mekanizmaları.....	56
5.2.1.1 Kayma	57

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
5.2.1.2 İkizlenme.....	59
5.2.1.3 Tane Sınırı Kayması.....	60
BÖLÜM 6 ÇEKME DENEYİ.....	61
6.1 ÇEKME DENEYİNDEN ELDE EDİLEN VERİLER	61
BÖLÜM 7 POLİKRİSTALLERİN DEFORMASYON PEKLEŞMESİ	69
BÖLÜM 8 LİTERATÜR ÇALIŞMALARI	73
BÖLÜM 9 DENEYSEL ÇALIŞMALAR	77
9.1 TEZ ÇALIŞMASINDA KULLANILAN ÇELİKLER	77
9.2 ÇELİKLERİN NUMARALANDIRILMASI	78
9.3 ÇELİKLERE UYGULANAN ISIL İŞLEMLER	79
9.4 ÇEKME DENEYİ.....	80
9.5 ORTALAMA TANE BOYUTUNUN HESAPLANMASI	84
BÖLÜM 10 SONUÇLAR VE TARTIŞMA	87
10.1 AISI 1020 VE AISI 8620 ÇELİKLERİ İÇİN YAPILAN TAVLAMA ISIL İŞLEMLERİ	87
10.2 AISI 1020 ÇELİĞİNİN TANE BOYUTU, KUVVET-DEPLASMAN GRAFİĞİ VE PEKLEŞME KATSAYISININ DEĞERLENDİRİLMESİ	87
10.3 AISI 8620 ÇELİĞİNİN TANE BOYUTU, KUVVET-DEPLASMAN GRAFİĞİ VE PEKLEŞME KATSAYISININ DEĞERLENDİRİLMESİ	95
BÖLÜM 11 SONUÇLAR.....	107

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
KAYNAKLAR	109
ÖZGEÇMİŞ	113

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>		<u>Sayfa</u>
2.1	Saf demirin soğuma eğrisi ve allotropik dönüşümleri	5
2.2	Demir-Sementit (Fe-Fe ₃ C) Denge Diyagramı	7
2.3	Ostenitin mikroyapı fotoğrafı	8
2.4	Ferritin mikroyapı fotoğrafı	9
2.5	Sementitin mikroyapı fotoğrafı	9
2.6	Ledeburitin mikroyapı fotoğrafı	11
2.7	Karbon miktarının haddelenmiş haldeki alaşımsız çeliğin mekanik özelliklerine etkisi.....	19
2.8	HMK kafesli çelikler için alaşım elementi miktarının akma dayanımına etkisi.....	23
2.9	Çökelme sertleşmesinin safhaları ve çökelme sertleşmesi sırasındaki mikroyapısal değişimler.....	27
2.10	Soğuk işlem miktarının malzeme mukavemetine ve şekil değiştirmesine etkisi.....	29
2.11	İnce ve kaba taneli malzemelere ait mikroyapı fotoğrafı	30
2.12	Akma geriliminin tane boyutu ile değişimi.....	31
2.13	Az karbonlu bir çelikte deformasyon yaşanmasının çekme diyagramına etkisi.....	31
3.1	Küçük açılı tane sınırları	34
3.2	Büyük açılı ve küçük açılı tane sınırları.....	35
3.3	İkiz sınırları	36
3.4	Tanelerin geometrik şekilleri	37
4.1	Alaşımsız çeliklere uygulanan yumuşatma, normalizasyon, sertleştirme ve küreselleştirme işlemleri için tavlama sıcaklık aralıkları.....	40
4.2	Isıl işlemlerin genel grafiği	41

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>		<u>Sayfa</u>
4.3	Rekristalizasyon işleminin şematik gösterimi.....	44
4.4	Çeliklerin II. tür tavlama için ısıtma sıcaklıkları. 1-tam tavlama; 2- tam olmayan tavlama; 3- küreselleştirici tavlama; 4- normalleştirici tavlama	46
4.5	%0.2 C içeren çeliğin içyapısında tavlama işlemi sırasında meydana gelen değişimlerin şematik gösterimi	47
4.6	Ötektoid altı Çelikler (<%C 0,8) İçin Tam Tavlama İşleminin Genel Grafiği	48
4.7	Rulman çeliğinin (C=0,95-1,05, Si=0,17-0,34, Mn=0,2-0,4, Cr=1,30-1,65) sertlik değerinin üç farklı soğuma hızına, tavlama sıcaklığına bağımlılığı: 1) 100 °C/saat; 2) 30 °C/saat; 3) 5 °C/saat	50
4.8	Ötektoid altı çelikler için izotermik tavlama işleminin TTT diyagramı	51
5.1	Bir alüminyum alaşımının elastik deformasyonunu gösteren gerilme-birim uzama eğrisi.....	56
5.2	Çekme kuvveti uygulanan silindir biçimindeki tek kristalin kayma düzlemi üzerindeki kuvvet bileşenleri	58
5.3	İkizlenmenin kristalografik gösterimi	59
5.4	İkiz bandının görünümü	60
5.5	Tane sınırı kaymasının şematik gösterimi	60
6.1	Daire kesitli ve silindirik başlı çekme numunesi	61
6.2	Düşük karbonlu yumuşak bir çeliğin çekme diyagramı.....	62
6.3	Belirgin akma göstermeyen bir malzemenin akma dayanımının belirlenmesine ilişkin diyagram.....	64
6.4	Gevrek ve sünek malzemelerin kırılma şekilleri.....	65
6.5	Gerilme-birim uzama eğrisi yardımıyla şekil değiştirme enerjilerinin (rezilyans ve tokluk) belirlenmesi	66
6.6	İmalat çeliğine (C60) uygulanan farklı ısıl işlemlerden sonra elde edilen çekme diyagramları	67

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>		<u>Sayfa</u>
7.1	YMK kafesli polikristallerin plastik deformasyon aşamaları.....	70
7.2	Monokristal ve polikristallerin deformasyon pekleşme grafiği	71
9.1	Çekme numunesi boyutları ve şekli.....	81
9.2	Üniversal çekme cihazı	81
9.3	Pekleşme katsayısının tayini için kullanılan a. kuvvet-deplasman diyagramı b. $\ln\sigma_1$ - $\ln\epsilon_1$ eğrisi	82
9.4	950 °C’de tavllanmış düşük karbonlu alaşımsız çeliğin optik mikroskopta 100x büyütülmüş fotoğrafı.....	84
10.1	950 °C’de tavllanmış AISI 1020 çeliği için kuvvet-deplasman grafiği	88
10.2	950 °C’de tavllanmış AISI 1020 çeliği için $\ln\sigma_1$ - $\ln\epsilon_1$ grafiği	89
10.3	AISI 1020 çeliğinin ısıtılmış işlem görmemiş durumdaki mikroyapı fotoğrafı.....	89
10.4	AISI 1020 çeliğinin 950 °C’de tavlama ısıtılmış işlemine tabi tutulmuş optik mikroyapı fotoğrafı.....	90
10.5	1100 °C’de tavllanmış AISI 1020 çeliği için kuvvet-deplasman grafiği.....	91
10.6	1100 °C’de tavllanmış AISI 1020 çeliği için $\ln\sigma$ - $\ln\epsilon$ grafiği	91
10.7	AISI 1020 çeliğinin 1100 °C’de tavlama ısıtılmış işlemine tabi tutulmuş optik mikroyapı fotoğrafı.....	92
10.8	1250 °C’de tavllanmış AISI 1020 çeliği için kuvvet-deplasman grafiği.....	93
10.9	1250 °C’de tavllanmış AISI 1020 çeliği için $\ln\sigma$ - $\ln\epsilon$ grafiği	93
10.10	AISI 1020 çeliğinin 1250 °C’de tavlama ısıtılmış işlemine tabi tutulmuş optik mikroyapı fotoğrafı.....	94
10.11	950 °C’de tavllanmış AISI 8620 çeliği için kuvvet-deplasman grafiği.	96
10.12	950 °C’de tavllanmış AISI 8620 çeliği için $\ln\sigma$ - $\ln\epsilon$ grafiği	96
10.13	AISI 8620 çeliğinin ısıtılmış işlem görmemiş optik mikroyapı fotoğrafı.....	97

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>		<u>Sayfa</u>
10.14	AISI 1020 çeliğinin 950 °C’de tavlama ısıl işlemine tabi tutulmuş optik mikroyapı fotoğrafı.....	97
10.15	1100 °C’de tavllanmış AISI 8620 çeliği için kuvvet-deplasman grafiği.....	99
10.16	1100 °C’de tavllanmış AISI 8620 çeliği için $\ln\sigma$ - $\ln\epsilon$ grafiği	99
10.17	AISI 8620 çeliğinin 1100 °C’de tavlama ısıl işlemine tabi tutulmuş optik mikroyapı fotoğrafı.....	100
10.18	1250 °C’de tavllanmış AISI 8620 çeliği için kuvvet-deplasman grafiği.....	101
10.19	1250 °C’de tavllanmış AISI 8620 çeliği için $\ln\sigma$ - $\ln\epsilon$ grafiği	101
10.20	AISI 1020 çeliğinin 1250 °C’de tavlama ısıl işlemine tabi tutulmuş optik mikroyapı fotoğrafı.....	102

TABLULAR DİZİNİ

<u>No</u>		<u>Sayfa</u>
2.1	Az alaşımlı çeliklerin Türk Standartları'na göre gösteriminde kullanılan katsayılar	15
4.1	Bazı çeliklerin yumuşatma tavına tabi tutulmuş ve normalize edilmiş durumlardaki mekanik özellikleri	53
9.1	AISI 1020 çeliğinin kimyasal içeriği	77
9.2	AISI 8620 çeliğinin kimyasal içeriği	78
9.3	Çeliklerin numaralandırılması	78
9.4	AISI 1020 çeliği için ısıl işlem rejimleri.....	79
9.5	AISI 8620 çeliği için ısıl işlem rejimleri.....	80
10.1	Numunelerin akma gerilimi, ortalama tane boyutu, pekleşme katsayısı	90
10.2	Numunelerin akma gerilimi, ortalama tane boyutu, pekleşme katsayısı	92
10.3	Numunelerin akma gerilimi, ortalama tane boyutu, pekleşme katsayısı	94
10.4	Numunelerin akma gerilimi, ortalama tane boyutu, pekleşme katsayısı	98
10.5	Numunelerin akma gerilimi, ortalama tane boyutu, pekleşme katsayısı.	100
10.6	Numunelerin akma gerilimi, ortalama tane boyutu, pekleşme katsayısı.	102
10.7	Tüm numunelerin akma gerilimi, ortalama tane boyutu, pekleşme katsayısı.....	104
10.8	Numunelerin tavlama sıcaklığına bağlı ayrıntılı özellikleri.....	105

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

kN	: kiloNewton
σ_p	: Plastik deformasyon gerilmesi
σ_i	: Sürtünme gerilmesi
G	: Kayma elastiklik modülü
P	: Dislokasyon yoğunluğu
σ_y	: Akma gerilmesi
σ_0	: Dislokasyon hareketine karşı koyan sürtünme gerilmesi
d	: Tane boyutu
t_{rbs}	: Rekristalizasyon başlangıç sıcaklığı
T_{er}	: Metalin ergime sıcaklığı
E	: Elastisite modülü
σ	: Gerilme
ϵ	: Birim şekil değiştirme
F	: Kuvvet
A_0	: İlk kesit alan
S	: Gerçek gerilme değeri
e	: Gerçek birim şekil değiştirme
n	: Pekleşme katsayısı
μm	: Mikrometre
B	: Mukavemet katsayısı

KISALTMALAR

YMK	: Yüzey merkezli kübik
HMK	: Hacim merkezli kübik
AISI	: American Iron and Steel Institute
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
ASTM	: American Society for Testing and Materials

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Metal ve alaşımları yüksek mekanik özellikleri ve uygun maliyetlerinden dolayı hayatın her sahasında geniş uygulama ve kullanım alanına sahiptir. Metal ve alaşımlarından optimum seviyede plastiklik ve mukavemet özellikleri talep edilir. Mukavemet parçanın dayanabileceği gerilme dirençlerini ifade ederken, plastiklik ise parçanın kırılmadan şekil değiştirebilme özelliğini ifade eder. Metal ve alaşımlarının mekanik özellikleri tane boyutları ile şekillendirilebilme özellikleri ise pekleşme katsayısıyla doğrudan ilişkilidir. Plastik şekillendirme rejimleri metalik malzemeler için pekleşme katsayısıyla ilişkili olduğundan tane boyutunun pekleşme katsayısına etkisi büyük önem arz etmektedir.

Bu çalışmada farklı kimyasal bileşime sahip iki farklı çelik kullanılarak hazırlanmış numunelerin tane boyutunun pekleşme katsayısına etkisi incelenmiştir. Farklı tane boyutları elde etmek için numuneler fırında ostenit bölgede farklı sıcaklıklara kadar ısıtılmıştır. Numunelerin deformasyona maruz kalmamış olan baş kısımları optik mikroskopta incelenerek tane boyutları tayin edilmiştir. Daha sonra numuneler 100 kN kapasiteli üniversal çekme cihazında aksenal çekme testlerine tabi tutularak iki farklı çelik için gerilme-gerinme diyagramları elde edilmiştir. Bu diyagramlardan yararlanarak numunelerin pekleşme katsayıları bulunmuştur. Numunelere ait tane boyutu değerleriyle beraber gerilme-gerinme grafiğinden elde edilen pekleşme katsayıları değerlendirilerek tane boyutunun pekleşme katsayısı üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

BÖLÜM 2

METAL VE ALAŞIMLARI

Metaller; ısı ve elektrik iletkenliği iyi olan, parlak, homojen yapılı element, bileşik ya da alaşımlardır (URL-1, 2012). Atomik dizimleri pozitif yüklü protonla yüklenmiş çekirdek ve çekirdek etrafındaki orbitlerde negatif yükle yüklenmiş elektronlardan ibarettir. En dış orbitlerinde en fazla 4 elektron bulunur ve bunlar serbest haldedir. Sıcaklık metalde serbest halde bulunan elektronların hareketini hızlandırır. Hızlanan elektronlar birbirlerine çarparak birbirlerine engel olurlar. Bundan dolayı metallerde sıcaklık arttıkça elektrik iletkenliği azalır. Doğada ametallere göre daha az bulunmalarına rağmen periyodik cetveldeki 106 elementin yaklaşık 76'sı metalik özellik taşır (Said 2011). Metaller doğada cevher halde bulunurlar ve yüksek sıcaklıklarda işlenerek ham maddeye dönüştürülürler. Sanayide en çok kullanılan metal demirdir. Demir atom numarası 26 olan, periyodik cetvelde yer alan ve yer kabuğunda en çok bulunan metaldir (URL-1, 2012). Metalik malzemelerin mekanik özellikleri malzemenin bileşimine ve içyapısına bağlıdır. Metallerin özelliklerini belli bir yönde iyileştirmek veya değiştirmek öncelikli olarak onların bileşimlerini ve içyapısını değiştirmekle mümkün olur. Saf metaller yüksek plastikliğe, tokluğa sahip olmasına rağmen gerilme dayanımları düşüktür. Bundan dolayı saf metaller makine parçası yapımında kullanılmazlar. Sanayide makine parçalarının hepsi alaşımlardan yapılır (Said 2011).

Metal alaşımları saf metalin özelliklerinden en az birisini iyileştirmek amacıyla metale bir ya da daha fazla element veya elementlerin eklenmesiyle oluşur. Metal alaşımlarının plastikliği saf metale göre düşük olmasına rağmen mukavemet özellikleri saf metallere göre çok yüksektir. Bu yüzden endüstride saf metal yerine metal alaşımları kullanılır (Said 2011). Metaller ve alaşımları birbiriyle temas halinde olan birçok kristalden oluşurlar. Bundan dolayı metaller çok kristalli malzemeler olarak da bilinir. Metal yapısındaki her bir kristale tane denir. Tane boyutları 10 mikrondan 10 mm'ye kadar değişebilir (Eroğlu 1997). Metal ve

alaşımlarının yüksek plastikliğe sahip olmasının nedeni bunların kristal kafese sahip olmasındandır. Eğer bir malzeme kristal kafese sahip değilse o malzemede plastik deformasyondan bahsedilemez. Tane; içerisinde atom düzlemlerinin özdeş olduğu malzemenin bir kısmıdır. Atom diziliş yönlenmesi veya kristal yapı her bitişik tane için farklıdır. Her tane içinde kafes yapısı aynıdır fakat yönlenmeleri farklıdır. Metalik malzemelerin analizinde mikroanaliz ve makroanaliz olmak üzere 2 yöntem kullanılır.

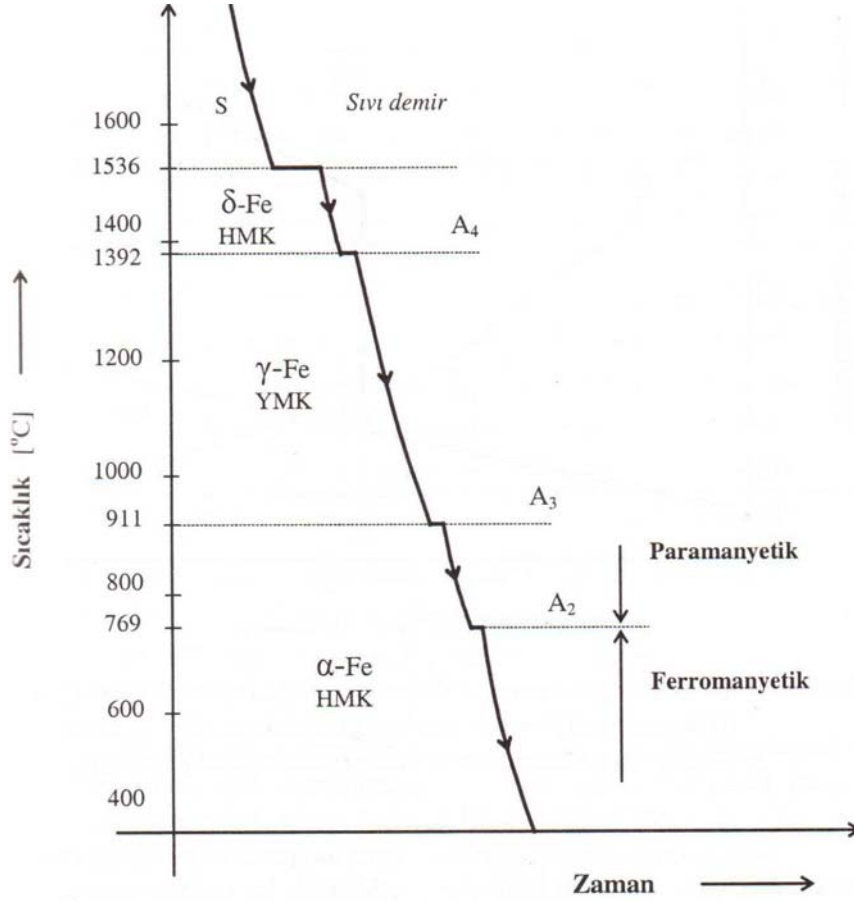
Makro Analiz Yöntem: (30-40)^xe kadar büyütme ile analiz yapılan yöntemdir. Makro analizde metal veya alaşımın içerisindeki çeşitli çatlaklar, gaz boşlukları, metal dışı katkıları veya parça yapımında kullanılan teknolojik operasyon (kesme, basma vs.) ve kaba tane unsurları tayin edilebilir.

Mikro Analiz Yöntem: Optik mikroskoplarla yaklaşık olarak 1500^xe, elektron mikroskoplarla 100000^xe kadar büyütme ile analiz yapılan yöntemdir. Metal anabilim dalında genellikle mikro analiz yöntem kullanılır. Mikro analiz yöntemde malzemeyi oluşturan bütün unsurlar; metal taneleri, metal içerisinde bulunan bileşikler, fazlar vs. mikroskoplar yardımıyla incelenebilir.

2.1 SAF DEMİR VE GENEL ÖZELLİKLERİ

Demir tabiatta saf halde bulunmaz. Fe₃O₄, Fe₂O₃, FeCO₃, 2Fe₂O₃ gibi bileşenler içeren cevherlerden elde edilir. Bu haldeki cevherlerden elde edilebilecek demir oranı teorik olarak %70 civarındadır.

Saf demir oda sıcaklığında hacim merkezli kübik yapıdadır (α -Fe: HMK). Sıcaklığa bağlı olarak demirin kristal yapısı değişir. Değişik sıcaklıklar için demirin α -Fe, γ -Fe ve δ -Fe olmak üzere üç ayrı polimorf yapısı vardır. Şekil 2.1'de saf demirin soğuma eğrisi ve allotropik dönüşümleri verilmiştir.



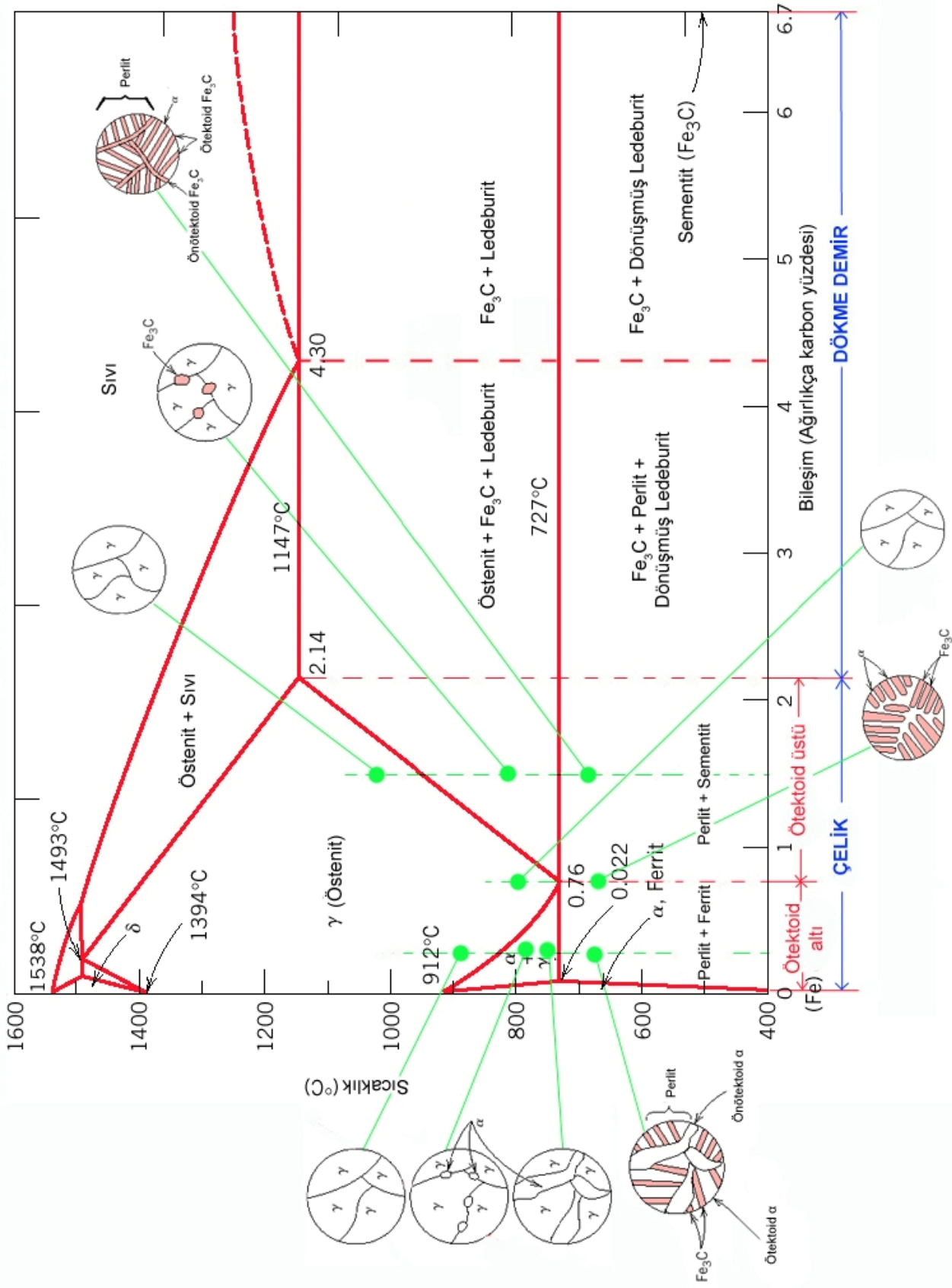
Şekil 2.1 Saf demirin soğuma eğrisi ve allotropik dönüşümleri (Demirci 2004).

Sıvı demir 1536 °C’de HMK kristal yapısında δ -demir olarak katılaştır. Soğutulmaya devam edilirse 1392 °C’de demir YMK kristal yapılı γ -demire dönüşür. γ -demire ve katı eriyiğine ostenit denilir. Soğutmaya devam edilirse demir 911 °C’de tekrar HMK kafesli kararlı bir faz olan α -demire dönüşür. α -demire ferrit de denilir. 769 °C’de sıcaklık düşüşünde görülen süreksizlik önceki gibi bir kristal yapı değişimini değil, demirin ferromanyetik özellik kazandığını gösterir (Demirci 2004).

2.2 DEMİR-SEMENTİT (Fe-Fe₃C) FAZ DİYAGRAMI

Karbon (C) elementi demir esaslı malzemelere çok az miktarda bile katılırsa büyük ölçüde özellik değişimine yol açar. Atom yarıçapı küçük olduğundan kristal yapı içerisinde arayerlerde dağılmış olarak bulunabilir, özellik değişimlerine etkisinin büyüklüğü bu yüzden (Demirci 2004).

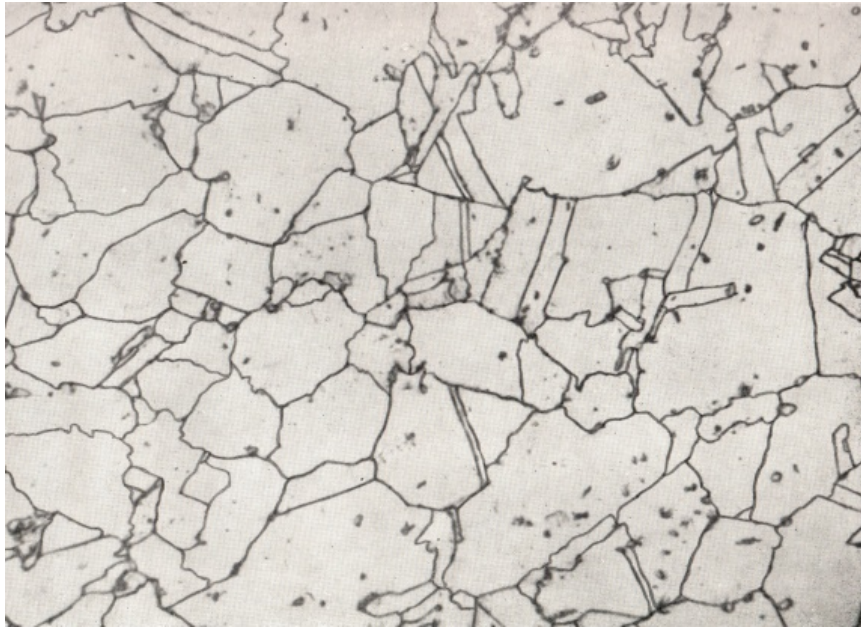
Sementit (Fe_3C) ağırlık olarak %6,67 oranında karbon içeren demir bileşimidir. Söz konusu bileşimin oluşması durumunda, demir-karbon sistemi için demir-sementit ($\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$) diyagramı geçerli olur. $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ denge diyagramı Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi diyagram peritektik, ötektik ve ötektoid noktaları içerir. Karbon oranı %0,8 olan çeliklere ötektoid çelikler, karbon oranı %0,8’den az olan çeliklere ötektoid altı çelikler, karbon oranı %0,8’in üstünde olan çeliklere ötektoid üstü çelikler denilir (Savaşkan 2009).



Şekil 2.2 Demir-Sementit (Fe-Fe₃C) Denge Diyagramı (URL-2, 2012).

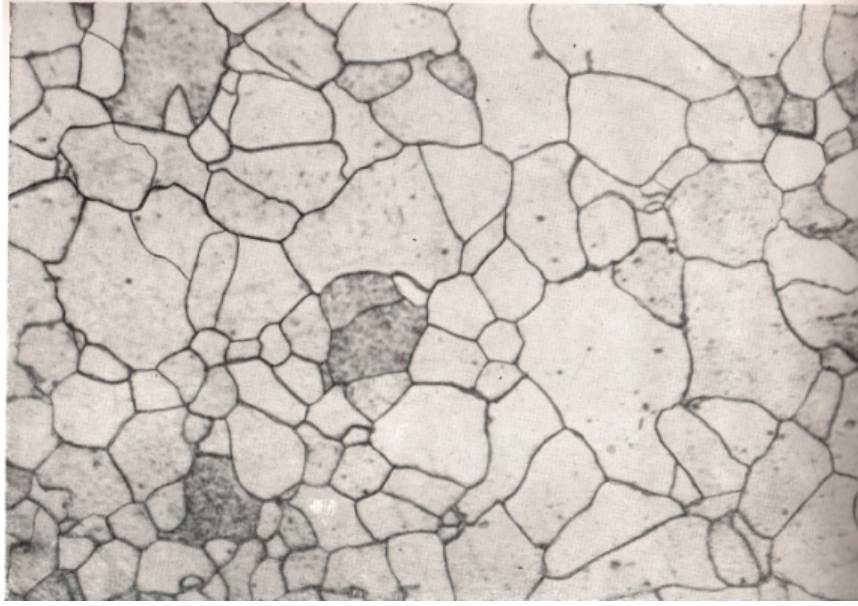
a) Ostenit (γ): Karbonun γ demirindeki katı eriyiğidir. YMK kafes sistemine sahiptir (911-1392 °C). Düşük akma gerilimi, yüksek çekme gerilimine sahiptir. Ostenit plastik deformasyona maruz kaldıkça mukavemeti artar, pekleşir (Said 2011).

Ostenit 1147 °C sıcaklıkta %2,0 oranında karbon çözündürür. Çekme mukavemeti 1030 MPa, kopma uzaması %10 ve sertliği 40 RSD-C civarında olan ostenitin tokluğu yüksektir. Normalde oda sıcaklığı için kararsız bir faz olmasına rağmen, özel durumlar için oda sıcaklığında da ostenit elde edilebilir (Savaşkan 2009). Ostenitin mikroyapı fotoğrafı Şekil 2.3'de görülmektedir.



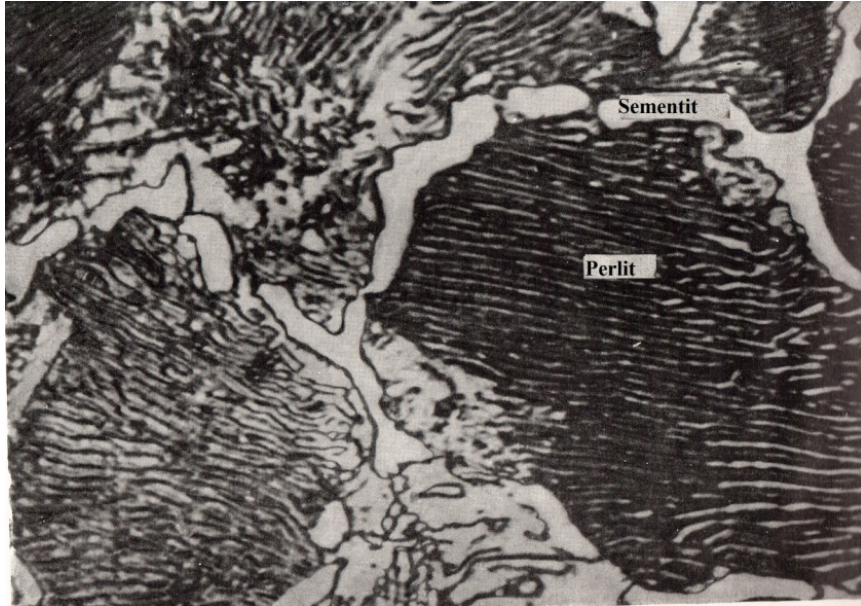
Şekil 2.3 Ostenitin mikroyapı fotoğrafı (Bolhovitinov ve Bolhovitnova 1959).

b) Ferrit (α): HMK yapıları demir içerisinde çok az oranda karbon çözünmesiyle oluşan bir arayer katı çözeltilisidir. Bu faz içerisinde 723 °C sıcaklıkta %0,025 oranında karbon çözünürken, bu oran oda sıcaklığı için %0,008 değerine kadar düşmektedir. Ferrit demir-karbon sistemindeki en yumuşak fazdır. Sertliği 90 RSD-B, çekme dayanımı 270 MPa ve kopma uzaması %40 civarındadır. Ferrit düşük mukavemete, yüksek plastikliğe sahiptir (Savaşkan 2009). Ferritin mikroyapı fotoğrafı Şekil 2.4'de görülmektedir.



Şekil 2.4 Ferritin mikroyapı fotoğrafı (Bolhovitinov ve Bolhovitinova 1959).

c) Sementit (Fe_3C): Bir arayer bileşiği olan sementit ortorombik kristal yapıya ($a \neq b \neq c$ ve $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$) sahiptir. Fe-C sistemindeki en sert faz sementittir (Savaşkan 2009). Yumuşak faz olan ferrit içerisinde dislokasyon hareketini engelleyen fazdır (Said 2011). Şekil 2.5’de mikroyapı fotoğrafında perlitini kuşatmış sementit, ağ şeklinde görülmektedir.



Şekil 2.5 Sementitin mikroyapı fotoğrafı (Bolhovitinov ve Bolhovitinova 1959).

d) Perlit ($\alpha + Fe_3C$): Fe- Fe_3C diyagramındaki ötektoid alaşıma (723 °C, %0,8 C) perlit denilir (Can 2010). Metalografik yapısı ferrit ve sementit lamellerinden oluşur. Perlitini oluşturan

fazlardan ferrit ışık mikroskobu altında beyaz, sementit ise siyah gözüktür. Perlitin mikroyapı fotoğrafı Şekil 2.5’de gösterilmiştir.

Perlit, sertliği yüksek olan sementit ve çok yumuşak, sünek ferrit fazından oluşan kompozit bir mikroyapıdır. Perlit içindeki sementit ve ferrit lamelleri arasındaki mesafenin azalması, perlitin sertlik ve dayanımının artmasını sağlar.

Sementit lamellerinin yapısı çeliğin şekillendirilebilirliğini etkiler. İnce sementit lamel yapılı çelik daha kolay deforme olurken, kalın lamelli yapıya sahip olan çelikler ise kırılarak çatlak oluşumuna neden olabilirler.

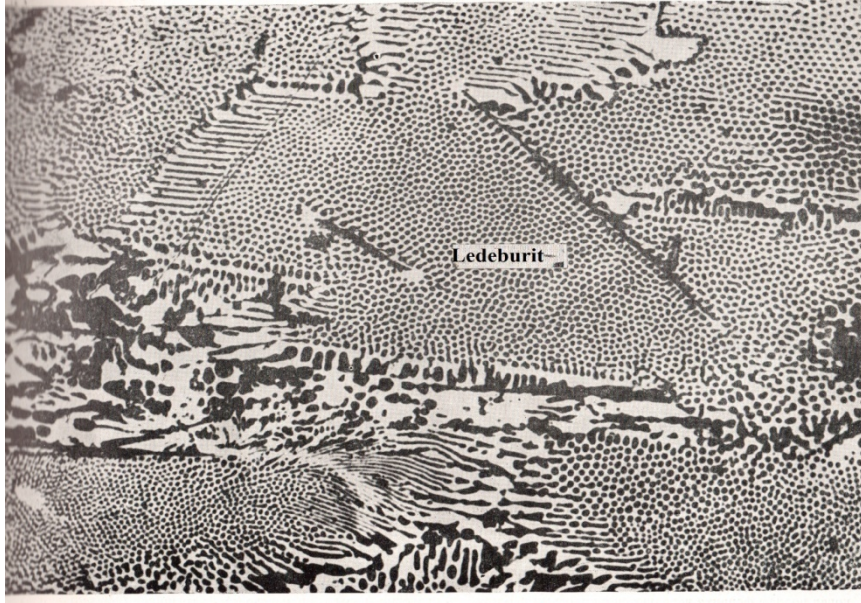
%100 perlitik çelikler, yüksek mukavemet, yüksek sertlik ve iyi aşınma direncine sahiptir. Düşük süneklik ve tokluk özellikleri gösterirler. Perlitik çeliğin çentik darbe geçiş sıcaklığı oda sıcaklığının oldukça üstündedir. Bu nedenle perlitik çelikler tokluğun önemli olduğu yerlerde kullanılmazlar.

Perlitik çelikler, demiryolu rayları, tekerleri ve yüksek mukavemetli tellerin yapımında kullanılır. Perlitik ray çelikleri ray/teker arasında mükemmel aşınma direnci sağlar (Can 2010).

e) Ledeburit: Fe-Fe₃C diyagramındaki ötektik alaşıma (1147 °C, %4,3 C) ledeburit denilir. Ledeburit ostenit (γ) ve birincil sementit (Fe₃C) fazlarından meydana gelir. Sıvıdan ayrılan sementite birincil sementit (primer sementit) denilir.

Ötektik ayrışma: Sıvı \longrightarrow γ + Fe₃C

Karbon oranı % 2,06’ya kadar olan Fe-Fe₃C alaşımlarına çelik, karbon oranı % 2,06’dan büyük olan Fe-Fe₃C alaşımlarına ise dökme demir denilir (Can 2010). Şekil 2.6’da ledeburitin mikroyapı fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 2.6 Ledeburitin mikroyapı fotoğrafı (Bolhovitinov ve Bolhovitinova 1959).

f) Dönüşmüş Ledeburit: Ledeburit içindeki ostenitin karbon oranı, sıcaklık düşüşüyle azalır. Ostenit içerisindeki karbon oranı %0,8 C olunca, perlit olarak dönüşür. Bundan dolayı 723 °C'nin altındaki ledeburite dönüşmüş ledeburit denilir (Can 2010). Ötektoid dönüşüm sıcaklığının (723 °C) altındaki sıcaklıklarda ostenit tanelerinin perlite dönüşmesi nedeniyle bu yapı perlit ve sementit karışımından oluşur (Savaşkan 2009).

Demir-Sementit Sistemindeki Faz Dönüşümleri

- a) **Peritektik dönüşüm ($S + \delta \rightleftharpoons \gamma$):** Bu dönüşüm % 0,18 C içeren alaşımsız çelikte 1492 °C sıcaklıkta meydana gelir.
- b) **Ötektik dönüşüm ($S \rightleftharpoons \gamma + Fe_3C$):** Bu dönüşüm % 4,3 C içeren Fe-C alaşımında 1147 °C sıcaklıkta meydana gelir.
- c) **Ötektoid dönüşüm ($\gamma \rightleftharpoons \alpha + Fe_3C$):** % 0,8 C içeren çelikte 723 °C sıcaklıkta meydana gelir.

2.3 ÇELİKLER

Demir elementine belli oranda karbon (C) eklenmesiyle oluşan alaşımlara çelik denir. Saf demirin mukavemeti yüksek olmadığı için genellikle içerisine %0,2 ila %2,1 arasında C ilave edilerek mukavemet değerleri yükseltilir. Çeliğin içerisinde başka alaşım elementleri de vardır. Çelik içerisinde bulunan farklı elementler çeliğe farklı mekanik özellikler kazandırır. Kullanım alanına göre belli mekanik özelliklerde çelik elde etmek için alaşım elementlerinin miktarları talep edilen özelliklere göre ayarlanabilir ya da çeliğe çeşitli ısıl işlemler uygulayarak içyapısı değiştirilir ve aranan özellikte çelik elde edilir.

Çelikler genel olarak aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilirler;

- Bileşimlerine göre,
- İmalat yöntemlerine göre,
- Üretilen mamül şekline göre,
- Son üretim yöntemine göre,
- Kullanım yerleri, üretim programları ve deoksidasyon durumlarına göre (Kara 2005).

2.3.1 Çeliklerin Sınıflandırılması

2.3.1.1 Çeliklerin Karbon Oranlarına Göre Sınıflandırılması

Yapılarında az miktarda mangan, silisyum, kükürt ve fosfor gibi çelik üretim yöntemlerinden gelen elementler bulunduran demir karbon alaşımlarına karbonlu çelikler denilir. Kullanım alanları yapı ve imalat sektörü olduğundan ötürü imalat çelikleri olarak da bilinirler.

Karbonlu çeliklerin tüm özellikleri, içerdikleri karbon miktarına bağlı olarak, sahip oldukları yapılarla doğrudan ilişkilidir. Artan karbon miktarı ile çeliklerde sertlik, akma ve çekme dayanımı artarken, süneklik (% uzama ve % kesit daralması) ve darbe dayanım özellikleri azalmaktadır. Karbon miktarının artışı (bu özelliklere bağlı olarak) çeliklerin plastik şekil alma kabiliyetlerini düşürücü rol oynamaktadır. Buna karşın martenzitik dönüşümde çok önemli ve etkili bir element olarak, çeliklerin su verme adını verdiğimiz mekanizma ile sertleştirilmelerini mümkün kılmaktadır. Karbon miktarındaki artış çeliğin su alma

kabiliyeti ile kaynak kabiliyeti üzerine ters etkiye bulunmaktadır. Karbonlu çelikler, karbon içeriğine göre üç grup içerisinde ayrımına tabi tutulabilmektedirler (URL-3, 2012).

Düşük Karbonlu Çelikler

%0,25'e kadar karbon içeren çeliklere düşük karbonlu çelikler denir. Mekanik özellikleri göz önüne alındığında düşük karbon oranı nedeniyle yumuşak çelikler olarak da adlandırılırlar.

Özellikle inşaat sektörü ve temel yapılarda kullanılan çelik profil ve çelik çubuklar düşük karbonlu çelik sınıfındadırlar. Bu sınıftaki çelikler düşük miktarda karbon içerdiğinden ısıtım işlemiyle de yeterince sertleştirilemezler. Ancak sementasyon, nitürasyon gibi ısıtım işlemleriyle yüzeyleri sertleştirilebilir (URL-3, 2012).

Çok yumuşak çelikler: Karbon oranı %0,07 ile %0,15 arasında olan çeliklerdir. Soğuk şekillendirmeye uygundur.

Yumuşak çelikler: Karbon oranı %0,15 ile %0,25 arasında olan çeliklerdir. Bu çelikler yaygın olarak kullanılan alaşımsız çeliklerdir. İyi kaynak edilebilirler ancak su verme yöntemiyle iyi sertleştirilemezler (Kara 2005).

Orta Karbonlu Çelikler

Bu gruptaki çelikler %0,25 ile %0,55 arasında karbon içeren çeliklerdir. Karbon oranlarından dolayı orta derecede mekanik özelliklere sahiptirler. Orta karbonlu çelikler ısıtım işlemleriyle yeteri derecede sertleştirilebildiklerinden dolayı özellikle imalat sanayi tarafından tercih edilirler. Bu gruptaki çeliklerin şekillendirilmesi, işlenmesi düşük karbonlu çeliklere göre daha zordur. Orta karbonlu çelikler düşük karbonlulara göre daha hızlı soğuduğundan kaynak kabiliyetleri de düşük karbonlu çeliklere göre daha düşüktür. Kaynak esnasında oluşan ısıtım etkileri çeliğin yapısal değişimini kontrolsüz olarak değiştirdiğinden malzemelerde hatalara neden olur. Bu sebepten dolayı orta karbonlu çeliklerin bilhassa alaşımlı olanlarının kaynak işlemlerinde özel itina göstermek gerekir (URL-3, 2012).

Bu çelikleri karbon oranlarına göre kendi içinde genel dövme çelikleri, mil çelikleri ve aşınmaya dayanıklı çelikler olmak üzere üç gruba ayırabiliriz.

Genel Dövmeye Çelikleri: Karbon oranı %0,25-%0,35 arasında olan çeliklerdir.

Mil Çelikleri: Karbon oranları %0,35-%0,45 arasında olan çeliklerdir. Mil, tel ve dingil yapımında kullanılırlar.

Aşınmaya Dayanıklı Çelikler: %0,45-%0,55 oranında karbon içerirler. Ray, ray tekerleği, silindir ve pres kalıplarının yapımında kullanılırlar (Kara 2005).

Yüksek Karbonlu Çelikler

%0,55 ile %0,9 arasında karbon içeren çeliklerdir. Yüksek karbonlu çelikler normal şartlarda yüksek mukavemete ve düşük sünekliğe sahiptirler. Isıl işlemler uygulanarak yüksek sertlik değerleri kazanırlar. Yüksek sertlik değerlerine ulaşabildiklerinden aşınmaya dayanıklı ve kesici özelliklere sahiptirler. Düşük karbonlu çeliklere göre yüksek mukavemet ve sertliğe sahip olmalarına rağmen işlenme ve şekil alabilme özellikleri daha düşüktür (Kara 2005).

Yüksek Karbonlu Takım Çelikleri

%0,9 ile %1,6 arasında karbon içeren çeliklerdir. Yüksek aşınma direnci ve yüksek mukavemet özelliklerine sahiptirler. Torna kalemi, matkap uçları gibi yüksek aşınmaya ve gerilmeye maruz kalan parçalar yüksek karbonlu takım çeliklerinden imal edilirler (Kara 2005).

2.3.1.2 Çeliklerin Alaşım Miktarına Göre Sınıflandırılması

Az Alaşımli Çelikler

Alaşım elemanlarının ağırlık olarak toplam miktarı %5 veya %5' ten az olan çeliklerdir (URL-4, 2012). Bu çeliklerin gösteriminde C işareti kullanılmaz. Ortalama yüzde karbon oranının yüz katı yazıldıktan sonra, alaşım elementlerinin simgeleri oran sırasına göre ve Tablo 2.1'deki katsayılarla çarpılarak tam sayıya yuvarlatılarak yüzde olarak yazılır.

Tablo 2.1 Az alaşımlı çeliklerin Türk Standartları'na göre gösteriminde kullanılan katsayılar (Gök 2010).

Alaşım Elementi	Katsayı
Cr, Co, Mn, Ni, Si, W	4
Al, Be, Cu, Pb, Mo, Nb, Ta, Ti, V, Zr	10
P, S, N, Ce, C	100
B	1000

Örneğin bileşiminde % 0,25 C ve %0,75 Cr bulunan az alaşımlı çelik 25Cr3, bileşiminde % 0,20 C ve %0,50 Mo bulunan az alaşımlı çelik 20Mo5 olarak gösterilir (Gök 2010).

Otomat Çelikleri

Karbon oranı düşük alaşımlı çeliklerde olduğu gibi yazılır. Çelikte bulunan elementler S, Mn, Pb ve P sırasına göre yazılır ve sadece kükürdün ortalama yüzde oranı yüz ile çarpılarak gösterilir. Örneğin; bileşiminde % 0,50 C, % 0,15 S ve % 0,5-%0,8 Mn bulunan otomat çeliği 50SMn15, bileşiminde % 0,09 C, % 0,15 - % 0,30 S, % 0,90 - % 1,30 Mn ve % 0,15 - % 0,30 Pb bulunan otomat çeliği ise 9SMnPb23 şeklinde gösterilir (Gök 2010).

Yüksek Alaşımlı Çelikler

Yüksek alaşımlı çelikler gösterilirken gösterimin başına ilk olarak X harfi gelir. Karbon oranı düşük karbonlu çeliklerde olduğu gibi yazılır. Her bir alaşım elementinin çelikteki yüzde oranı sembollerinden sonra yazılır. İkinci dereceden önem arz eden alaşım elementlerinin yüzde oranları yazılmayabilir. Örneğin; bileşiminde %0,05 C, %15 Cr ve %8 Ni bulunan bir çelik X5Cr15Ni8 şeklinde gösterilir (Gök 2010).

2.3.1.3 Esas Alaşım Elementlerine Göre Çelikler

Manganlı Çelikler

Bütün ticari çeliklerin, oksijenini gidermek ve kükürtle karıştırılarak küresel MnS oluşturmak için %0,25-%1 oranında mangan eklenir. Elementlerin mukavemet arttırıcı özelliği ve maliyet artışına etkisi düşünüldüğünde diğer alaşım elementlerine göre mangan kullanmak daha

ekonomiktir. Bu nedenle yumuşak çelikten daha yüksek dayanım ve kaynaklanabilirlik gerektiğinde, % 1,6 - % 1,9 arasında Mn içeren çelikler yaygın olarak kullanılmaktadır. Düşük alaşımlı manganlı çeliklerin AISI 13xx serisi % 0,30'dan % 0,45'e varan karbon ve % 1,75 mangan nominal düzeyine sahiptir. Bu 13xx çelikleri alaşımsız çeliklerle karşılaştırıldıklarında daha yüksek dayanıma ve sertleştirilebilme özelliğine sahiptir. Dingiller, şaftlar, vitesler, otomobiller için hareket kolları ve tarım aletlerinin yapımında kullanılırlar (URL-5, 2012).

Molibden Çelikleri

Az karbonlu çeliklere düşük miktarlarda molibden eklenmesiyle dayanımı ve sertliği artırılan çeliklere molibden çelikleri denilir. 40xx serisi ile gösterilen düşük karbonlu alaşımlı molibden çelikleri için tokluk, sertleşebilirlik ve dayanımın optimal molibden miktarı %0,25'dir. Bu miktar deneysel olarak belirlenmiştir. Bu çelikler genellikle arka aks dişlileri ve güç iletim millerin tasarımında kullanılırlar (URL-5, 2012).

Krom-Molibden Çelikleri

Molibden çeliklerine %0,5-%0,9 oranında krom ilave edilmesiyle krom-molibden çelikleri elde edilir. Krom ilave edilen çeliklerin sertleşebilirliği, mukavemeti, aşınmaya direnci aynı karbon oranına sahip çeliklere göre daha da fazladır. Ancak krom ilavesi çeliğin temper kırılma eğilimine de artırır. Düşük alaşımlı krom-molibden çeliklerinde martenzit oluşturmak için su yerine yağda soğutma yapmak daha avantajlıdır. Çünkü yağda yapılan soğutma işlemi yavaş olduğundan sıcaklık gradyanları ve hacimsel çekilmeden kaynaklanan iç gerilmeler ve su verme arasındaki genleşme, çarpılma ve çatlak eğilimleri azaltılabilir (URL-5, 2012).

Nikel-Krom-Molibdenli Çelikler

Düşük alaşım çeliklerine ortalama %1,8 Nikel, %0,5-0,8 Krom ve %0,20 Molibden ilave edilerek üretilen çeliklere nikel-krom-molibdenli çelikler denilir. Az karbonlu düşük alaşımlı çeliklerde kromla beraber ilave edilen nikel daha yüksek elastiklik, sertleşebilirlik, darbe ve yorulma direnci sağlar. Mo ilavesi ise temper kırılma eğilimini azaltır ve sertleşebilirliği iyileştirir (Gök 2010).

Nikel-Silisyum-Krom-Molibden Çelikleri

Nikel-krom-molibdenli çelik alaşımına %2 oranında silisyum eklenmesi mukavemeti ve tokluğu oldukça arttırır. Tokluktaki artış ilave edilen silisyumun temperlenmiş martenzitteki kalıntı ostenitlerin sementite dönüşmesine engel olmasına ve ϵ karbürün kararlı hale gelmesine bağlanır. Düşük silisyumlu su verilmiş ve temperlenmiş çeliklerde 200-370 °C'de kalıntı ostenit etrafında sementit film tabakaları oluşur (Gök 2010).

2.3.2 Alaşım Elementleri ve Kalıntı Elementlerinin Çelik Yapısına Etkisi

Çeliğin mekanik özelliklerini değiştirmek için kasıtlı olarak ilave edilen elementlere alaşım elementi, üretilen çelikte cevher halinden itibaren bulunan ya da üretimde giren elementlere kalıntı elementler denir. Hangi elementin kalıntı elementi hangi elementin alaşım elementi olduğu çeliklere göre değişebilir. Mesela kükürt otomat çelikleri için alaşım elementi iken pek çok çelik için kalıntı elementtir. P, S, O, H, Sn, Sb elementleri genellikle çelikler için kalıntı element olarak kabul edilir. Alaşım elementi eklenmesinde genel amaçlar şunlardır:

- 1- Sünekliği düşürmeden çekme dayanımını arttırmak
- 2- Tokluğu iyileştirmek
- 3- Sertleşme kabiliyetini iyileştirmek
- 4- Yüksek sıcaklık dayanımını arttırmak
- 5- Korozyon dayanımını arttırmak
- 6- Aşınma dayanımını iyileştirmek
- 7- Tane yapısını inceltmektir.

Alaşım elementleri mikroyapıda ve buna bağlı mekanik özelliklerde önemli değişikliklere sebep olur. Alaşım elementlerinin oluşturduğu önemli mikroyapı değişiklikleri:

Ostenit Oluşturucu Elementler: Bu grubun en önemli elementleri karbon, nikel ve mangandır. Nikel ve mangan oranının artması çeliği oda sıcaklığında bile ostenit halde tutar. Örnek olarak %13Mn içeren Hadfield çeliği (%1C, %13Mn, %1,2Cr) ve %8Ni içeren paslanmaz çeliktir (18Cr, %8Ni).

Ferrit Oluşturucu Elementler: Bu grubun en önemli elementleri krom, silisyum, molibden, tungsten ve alüminyumdur. %13'den daha fazla krom içeren çok az karbonlu çelik oda sıcaklığında ferritik yapıdadır. Ferritik olan önemli bir çelik de %3 silisyum içeren düşük karbonlu transformatör sacıdır.

Karbür Oluşturucu Elementler: Ferrit oluşturucu elementler, aynı zamanda karbür yapıcıdır. Karbür yapıcı elementlerin etkinlikleri, kuvvetliden zayıfa, sırasıyla şöyledir: Zr, Ta, Nb, Ti, V, Mo, W.

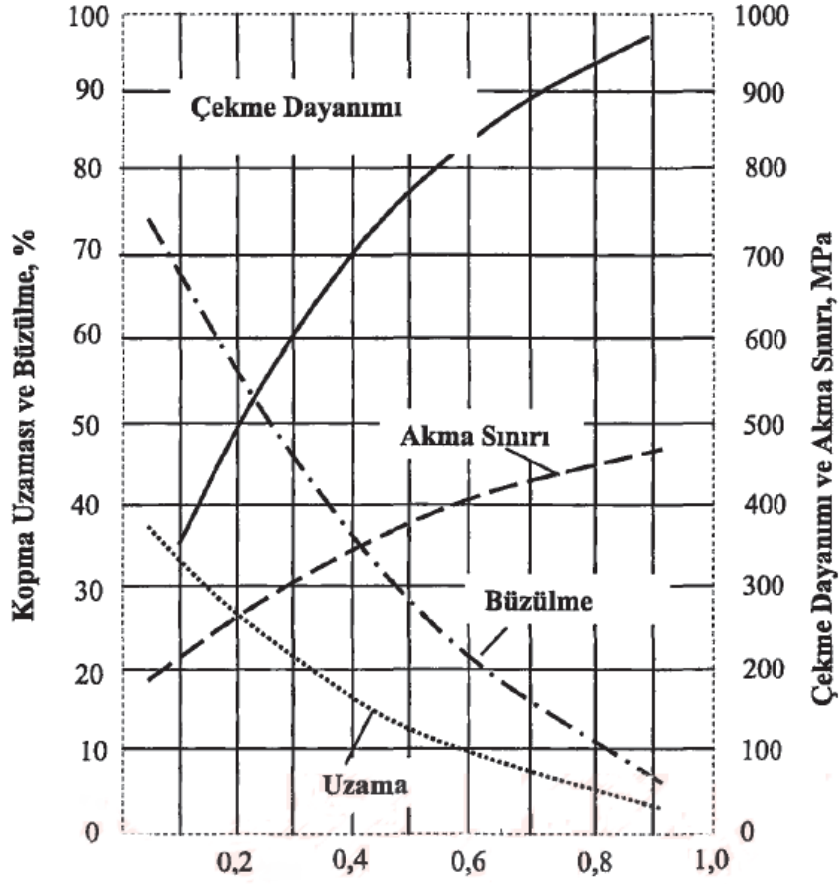
Çelik içinde bulunabilen bazı karbürler: TiC, ZrC, HfC, VC, V₄C₃, NbC, Nb₄C₃, Cr₇C₃, Mn₇C₃, W₂C, VC, Mo₂N, MnN, Mn₂N, Mn₄N, Fe₂N, Fe₄N, Si₃N₄, BN.

Nitrür Oluşturucu Elementler: Karbür oluşturucu elementlerin pek çoğu aynı zamanda nitrür oluşturucudur. Çelikte görülen bazı nitrür bileşikleri şunlardır: AlN, TiN, NbN, ZrN, TaN, VN, W₂N, CrN, Cr₂N, MoN, Mo₂N, MnN, Mn₂N, Mn₄N, Fe₂N, Fe₄N, Si₃N₄, BN (Can 2010).

2.3.2.1 Alaşım Elementlerinin Çelik Yapısına Etkisi

Karbon (C)

Çeliğin en önemli elementi alaşım elementidir. Saf demirin akma sınırı düşük oranda karbon eklenmiş çeliğe göre bile çok düşüktür. Çeliğe eklenen karbon (C) elementi demir (Fe) ile birleşerek sementiti (Fe₃C) oluşturur. Çelikteki C oranı arttıkça Fe₃C oranı da artar. Sementit çelikte sertliği ve mukavemeti artırırken dövülme kabiliyetini, kaynak edilebilirliği, tokluğu ve plastikliği düşürür. Isıl işlemler ile Fe₃C'nin çelik içerisindeki dağılımı değiştirilerek mekanik özellikler de önemli derecede değiştirilebilir. Fe₃C'nin çelik içerisinde çökmesine izin verilmediğinde martenzit yapı oluşur ve mekanik özellikler önemli derecede değişir (Can 2010). Şekil 2.7'de karbon miktarının alaşımsız çeliğin mekanik özelliklerine etkisi görülmektedir.



Şekil 2.7 Karbon miktarının haddelenmiş haldeki alaşımsız çeliğin mekanik özelliklerine etkisi (Kara 2005).

Mangan (Mn)

Oda sıcaklığında Ferrit içinde %10 Mangan (Mn) çözülebilir ve karbür oluşturabilir. Ötektoid noktayı sola kaydırır ve dönüşüm sıcaklıklarını düşürür. Mn çeliğin sertleşme kabiliyetini artırır. Alaşımsız çeliklerde %1,6'ya kadar Mn olabilir. Çelik içerisinde bulunan ve çeliğin özelliklerini olumsuz etkileyen kükürtle (S) MnS bileşiği yaparak kükürdün etkisini giderir. Çelik içerisindeki kükürdün tamamen bağlanması için çelik içerisindeki kükürt miktarının 2-8 katı kadar Mn ilave edilmesi tavsiye edilir. MnS'nin bir kısmı cürufa geçer, bir kısmı ise çelik içerisinde kalır. Çelik içerisindeki kısmı haddelene esnasında haddelene yönüne uzanır. Bu yüzden MnS içeren çeliklerde haddelene yönünde ve haddelene yönüne dik yönde farklı özellikler meydana gelir. Buna anizotropi de denir. Çeliğe %11-14 gibi yüksek oranlarda Mn ilave edilirse bu çeliğe ostenitik çelik denir. Bu çeliğin sertliği yüksek ve sünekliği iyidir; yüksek deformasyon sertleşmesi oranına sahiptir, aşınma direnci yüksek ve darbeye maruz parçalar için idealdir.

Mangan az karbonlu çeliklerde çeliğin çentik darbe özelliğini iyileştirirken yüksek karbonlu çeliklerde ters etki yapar.

Mangan çeliğin dövülebilme, haddelenebilme ve talaşlı işlenebilme özelliklerini iyileştirir. Çeliğin derinliğine sertleşme kabiliyetini arttırırken sertleşirken çatlama meylini de arttırır (Can 2010).

Silisyum (Si)

Çeliklerin oksitini alan elementtir. Yabancı maddeleri çelik üzerinde toplar, cüruflaştırır ve dışarı atılmasını sağlar. Normal olarak çelikte %0,3'e kadar silisyum bulunur. Özel maksatlar için çelik içine %6,5'a kadar silisyum katılabilir. Silisyum çeliğin dayanımını ve akma sınırını yükseltir, çeliklerin kritik soğuma hızını düşürür. Bu nedenle silisyumlu çelikler çekirdeklerine kadar sertleşirler. Silisyum çelikleri genellikle yapı, ıslah ve yay çelikleri olarak kullanılırlar. Yay çeliklerinde %12 Si ve %0,4-0,7 C vardır. Yay çeliklerinde mangan bulunması durumunda daha iyi sonuç alınır. Yüksek silisyumlu çelikler %14 kadar silisyum içerirler ve kimyasal etkilere dirençleri yüksektir. Dövülerek şekillendirmeye elverişli değildirler. Kolay kırılabilir ve bu özelliğini kolay kaybedebildiği için %4 silisyum %0,1 karbonlu çelikler endüvi, transformatör ve jeneratör yapımında kullanılırlar (URL-7, 2012).

Bakır (Cu)

Bakır çeliğin akma sınırını ve çekme dayanımını yükseltir. Asitlere ve korozyona karşı direnci arttırır. Çeliğin içerisinde fosforla beraber bulunursa çeliğin atmosfer etkilerine direncini yükseltir (URL-7, 2012).

Krom (Cr)

Çeliğe katılan krom karbonla birleşerek çok sert olan krom karbürlerin oluşmasına neden olur. Çeliğin dönüşmesini yavaşlatan krom bu özelliğiyle dönüşme hızının düşük olmasına neden olur. Bu da kromlu çeliklerin daha fazla ve çekirdeklerine kadar sertleşmesini sağlar. Krom çeliğin ince kristalli olmasını sağlar. Çeliklerin dayanımını, akma gerilmesini ve sertliğini önemli derecede yükseltir. Sertlik karbon artışı ile de mümkün olmasına rağmen krom karbon kadar toklukta düşüş meydana getirmez. Krom çeliğe yüksek aşınma

mukavemeti verir ve kesme özelliğini artırır. %13'e kadar krom eklenmiş çelikler takım çeliği olarak kullanılırlar. Çeliğe %13'ün üstünde krom eklenmesi çeliğin paslanmazlık özelliği kazanmasını sağlar. Paslanmaz çeliklerde krom nikel birlikte bulunur. Bu çeliklerde krom oranı genellikle nikel oranının yarısı kadar kullanılır (Can 2010). Krom çeliklerin manyetiklik özelliğini de yükseltir. İçerisinde %3 kadar krom bulunan çelikler süreli mıknatıs yapımında kullanılırlar. Kromlu çelikler makine işçiliğine tabi tutulmadan önce yumuşatılmalıdırlar. Yüksek kromlu çeliklerde krom karbürün erimesi için sertleştirme sıcaklığında uzun müddet tutulmalıdır. Kromlu çelikler dövme ve ısı işlemlerine karşı hassastırlar bu yüzden dikkatle işlenmelidirler (URL-7, 2012).

Nikel (Ni)

Nikel darbe tokluğunu ve ısı işlem görmüş çeliklerde dayanımı artırır. Nikel ostenitik paslanmaz çelikler için kromdan sonraki en önemli alaşım elementidir. Ostenitik paslanmaz çeliklerde nikel oranı %7-20 arasındadır. Nikel çeliğin dayanımını silisyum ve mangan kadar arttırmaz. Çelikte nikel özellikle kromla birlikte bulunduğu zaman sertliğin daha derinlere inmesini sağlar. Krom nikelli çelikler paslanmazdır, ısıya ve kabuklaşmaya da dayanıklıdır. Düşük sıcaklıklarda makine yapım çeliklerinin çentik dayanımlarını artırır (Kara 2005).

Nikel kristalleri inceltir. Dayanımı arttırmaktan çok elastikliği artırır. Nikelli çelikler çekirdeğe kadar sertleşirler. Otomotiv endüstrisinde miller, sübaplar ve benzeri makine elemanları nikelli çeliklerden yapılır. Nikelli çelikler bakırla beraber çeliğin korozyona direncini arttırlar. Sementasyon çeliklerinde %0,5-1,5 oranında nikel bulunur. İçerisinde %22 oranında nikel bulunan çelikler tuzlu su ve korozyona dayanıklıdırlar. %24-32 oranında nikel sahip olan çelikler elektrik direnç telleri yapımında kullanılırlar (URL-7, 2012).

Molibden (Mo)

Molibden çeliklerin çok az kısmında yalnız başına kullanılır. Genellikle nikel, krom gibi elementlerle beraber kullanılır. Molibden çeliğin sertliğini ve tokluğunu artırır. Çeliğin dönüşüm sıcaklıklarını yükseltir, martenzit başlama sıcaklığını düşürür. Çeliklere karbondan sonra en fazla sertliği molibden verir. Molibden çeliğin tane büyüklüğünü azaltır ve bu sayede tokluk ve dayanım özellikleri iyileşir.

Molibdenin yüksek karbonlu çeliklerin sertleşmesine etkisi orta karbonlulara göre daha fazladır. Krom molibdenin sertleştirme etkisini azaltırken, nikel ise artırır (Can 2010).

Vanadyum (V)

Vanadyum çeliklerde tane boyutunu azaltarak akma ve çekme dayanımlarını önemli miktarda artırır. Ayrıca çeliğin sertleşme kabiliyetini de artırır. Çok düşük miktarlarda kullanıldığında çeliğin sıcağa dayanımını artırır. Vanadyum alaşımlı makine yapı çeliklerinin tane yapılarının ince olmasını ve fiziksel özelliklerinin geliştirilmesini sağlar. Aynı zamanda çelik kesici uçlarının uzun süre keskin kalmasını sağlar. Vanadyumun karbür yapmaya karşı eğilimi yüksektir (Kara 2005).

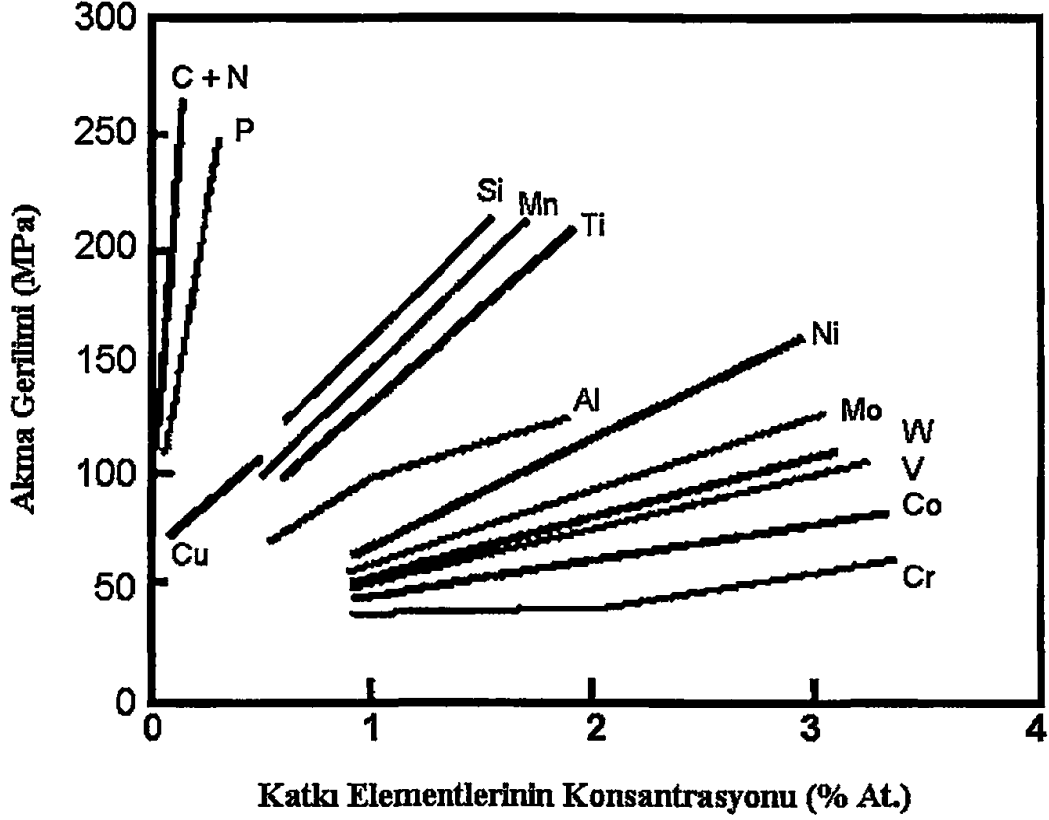
Wolfram (Tungsten) (W)

Çelik için önemli bir alaşım elementidir. Demirle birleşerek Fe_3WC karbürünü oluşturur. Bu karbür çelikte sertliği artırır. Aynı zamanda çelik için yüksek kesme özelliği sağlar. Wolfram çeliğin soğuma hızını çok düşürür, yani dönüşmeyi yavaşlatır. Bu nedenle wolframlı çelikler çok az sertleşirler. Çelikte wolfram miktarı arttırıldığı oranda karbon miktarı da arttırılmalıdır. Çünkü wolfram karbonla birleşerek demiri karbonsuz bırakabilir. İçeriğinde %0,5-0,8 C ve %4-7 wolfram bulunan çelikler mıknaş yapımında kullanılırlar. Wolfram çeliği tava karşı dayanıklı yapar, bu yüzden kesici kalemlerin yapımında kullanılırlar (URL-7, 2012).

Bor (B)

Sakin dökülmüş çeliklere, çeliğin sertliğinin artması için katılır. Sertleştirme etkisi nikelin 250-750 katı, molibdenin 75-125 katı, kromun 100 katıdır. Düşük karbonlu çeliklerde binde bir oranında bile bulunması yeterlidir. Karbon oranı arttıkça etkisi azalır. Çeliğin sertleşmesinde şiddetli bir etkiye sahiptir, ancak bu etki karbon oranına bağlıdır. Sertleştirme etkisi en fazla sakin çeliklerde (Can 2010).

Alaşım elementi miktarının akma dayanımına etkisi Şekil 2.8'de görülmektedir.



Şekil 2.8 HMK kafesli çelikler için alaşım elementi miktarının akma dayanımına etkisi (Kara 2005).

2.3.2.2 Kalıntı Elementlerinin Çelik Yapısına Etkisi

Fosfor (P)

Çeliğin akma ve çekme dayanımını artırır. Yüzde uzamayı ve eğme özelliklerini çok fazla kötüleştirir, soğuk kırılmalık yapar, talaşlı şekillendirme kabiliyetini artırır. Çeliğin özelliklerini olumsuz etkilediğinden çelik içinde mümkün mertebe az bulunmalıdır. Fosfor çelik üretim işlemlerinden kalan bir elementtir (Kara 2005).

Kükürt (S)

Kükürt demir içinde hemen hemen hiç çözünmez ve FeS fazı meydana getirir. FeS ile demir ergime sıcaklığı düşük olan ötektik bir alaşım oluşturur ve bu alaşım tane sınırlarında toplanmaya meyillidir. Bu alaşımın ergime sıcaklığı düşük olduğundan yüksek sıcaklıklarda çeliğe uygulanacak hadde işleminde taneler arasında çatlaklar meydana gelir ve bu çatlaklar

akkor sıcaklık kırılmalığı meydana getirir. 800-1000 °C için FeS'ün Şekil değiştirme kabiliyeti olmadığından bu sıcaklıklarda kızıl sıcaklık kırılmalığı olur. Bu sebeplerden dolayı kükürt mangan ile birleŐtirilerek 1600 °C'de eriyebilen MnS bileşiği oluŐturulur.

Çelikte kükürt oranı arttıķça kaynak kabiliyeti azalır. Özellikle az karbonlu ve az manganlı çeliklerde yüzey kalitesinin kötüleŐmesine neden olur.

Fosfor ve kükürt çelik içinde çatlaklar meydana getirdiğinden çeliğin yorulma dayanımının ve çentik darbe tokluğunun düşmesine neden olur. Çelik içerisindeki fosfor ve kükürt oranı ne kadar az olursa çelik için yukarıda bahsedilen özellikler o nispette yüksek olur. Bazık astarlı ocaklarda arıtma ile fosfor ve kükürt oranı %0,01 seviyelerine kadar azaltılabilir (Can 2010).

Azot (N)

α-demiri içinde azot 590 °C'de %0,1 civarında çözünür ancak oda sıcaklığında hemen hemen hiç çözünmez. Çelik içerisindeki serbest N atomları oda sıcaklığında aşırı doymuş durumdadır ve zamanla yayınarak iğne biçimli Fe₄N çökeltilerini oluŐtururlar. Çeliğin zamanla gevrekleŐmesi olayına yaşlanma denir.

Çelik soğuk Şekil değiştirme işlemine tabi tutulursa dislokasyon yoğunluğu artar. N atomları dislokasyon bölgelerine yerleşir ve dislokasyon hareketini zorlaştırır. Bu da gevrekleşmeye neden olur. Bu olaya soğuk deformasyon yaşlanması denilir. Azotun bu etkisini ortadan kaldırmak için üretim esnasında çeliğe alüminyum eklenerek AlN bileşiği oluşturulması sağlanır (Can 2010).

Uygun çeliklerin yüzeylerine azot yedirilerek yüzey sertleŐtirmesi yapılabilir, bu olaya nitrürasyon veya azotlama denilir. Bu iŐlemede bitmiŐ ve iŐlenmiŐ parçalar özel bir ocakta 500 °C'ye kadar ısıtılır ve bu sıcaklıkta 14 gün amonyak gazı ortamı içinde tutulur. Amonyak azot ve hidrojenin bir bileŐięidir. 500 °C'de bu bileşik ayrılır ve serbest kalan azot atomları sertleŐtirilecek parçanın yüzeyine yayınır. Bu iŐlemden sonra ocaktan çıkarılan parçalar sertleŐtirilmiŐ olur. Ancak nitrürasyon işleminde bazı kusurlar ortaya çıkabilir. Sertlik tabakası sementasyon işlemindeki gibi düzenlenemez ve 1 mm'den fazla kalınlık sağlanamaz. Diğer bir kusur ise nitrürasyon işlemine her çelik uygun değildir (URL-7, 2012).

Oksijen (O)

Oksijen demirde hemen hemen hiç çözünmez. Çelik üretim esnasında oksijenle teması söz konusu olduğundan çelikte oksijen kaçınılmaz bir olaydır. Oksijen de azot gibi çeliği sert ve gevrek yapar ve sünekliği azaltır. Bazı durumlarda oksijenin meydana getirdiği sertlik uzun süre sonra ortaya çıkar bu olaya zamanla sertleşme veya yaşlanma denilir (URL-7, 2012).

Oksijen demirle birleşerek FeO bileşiği oluşturur ve bu bileşik çeliğe FeS gibi bir etki yapar. Çelikte az miktarda bile oksijen bulunması gevrekliğe neden olur. Si ve Al eklenmesi gibi oksit giderme işlemleriyle SiO₂ ve Al₂O₃ bileşikleri oluşturularak oksijenin zararlı etkileri ortadan kaldırılabilir.

Bahsedilen kalıntı elementlerin zararlı etkilerini ortadan kaldırmak için eklenen ilave elementler MnS, SiO₂, Al₂O₃ gibi kalıntı bileşikler(inklüzyon) oluşturur. Benzer bileşikler çelik üretim esnasında refrakter malzemeden koparak da çelik içerisine girebilir. Tanım olarak metal matriks içindeki yabancı parçacıklara kalıntı bileşikler denir. Çelik içerisindeki bu kalıntılar çeliğin kırılma davranışlarını ve dayanım özelliklerini büyük ölçüde etkilerler ve anizotropi (yöne bağımlılık) meydana getirirler. Esas metal ile kalıntılar arasında ısıl genişleme farkı olduğu için kalıntı bileşikler etrafında çeki gerilmeleri oluşur ve yorulma çatlakları buralardan başlar. MnS dışındaki kalıntılar sert ve kırılmandırlar ve çeliğin tokluğunu azaltırlar (Can 2010).

2.3.3 Çeliklerde Mukavemet Arttırma Yöntemleri

Malzemelerin mekanik özellikleri onların metalürjik yapılarına bağlıdır. Metalürjik yapıda değişim malzemenin kimyasal içeriğini değiştirerek ya da malzemeye mekanik veya ısıl işlem uygulayarak mümkündür. Yani malzemenin mekanik özelliklerini belli yönlerde, amaca uygun şekilde değiştirmek onların kimyasal bileşimini değiştirmek ya da onlara mekanik veya ısıl işlemler uygulamak ile olur. Malzemenin mukavemeti malzemenin en önemli mekanik özelliklerinden birisidir ve birçok mekanik özellik mukavemete bağlı olarak değişir. Bunun için malzemede (çelikte) mukavemet arttırma yöntemlerinden bahsedilecektir.

Mukavemet arttırma için anlatılan ısıl işlemler ve mekanik işlemler ayrı ayrı ya da beraber uygulanabilir. Beraber uygulandıkları zaman termo-mekanik işlemler adını alırlar.

Malzemenin mukavemetini arttırma yöntemleri genel olarak aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir (URL-11, 2012).

- 1- Alaşım Sertleşmesi
- 2- Çökelme Sertleşmesi
- 3- Dispersiyon Sertleşmesi
- 4- Soğuk İşlem
- 5- Tane Boyutunu Küçültme
- 6- Deformasyon Yaşlanması
- 7- Martenzitik Dönüşüm
- 8- Radyasyonla Sertleştirme

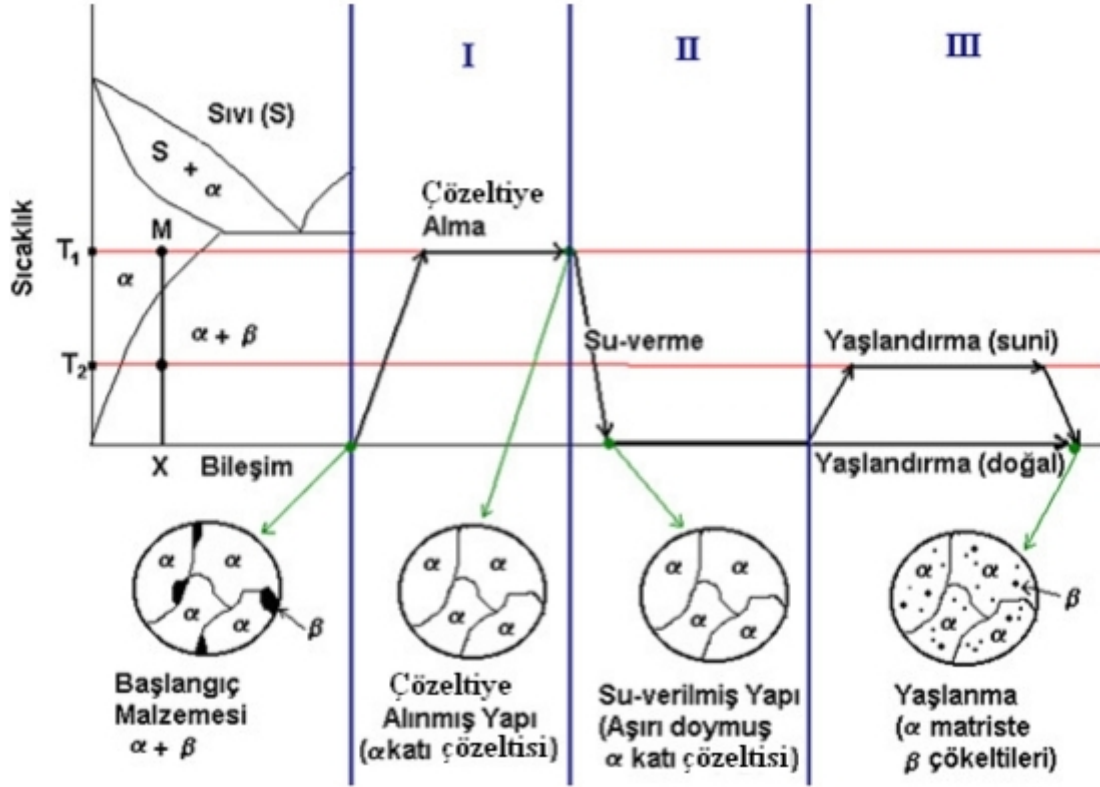
2.3.3.1 Alaşım Sertleşmesi

Alaşım sertleşmesi alaşım elementinin saf metal içinde erimesiyle oluşup, kimyasal bileşimde değişim ile mukavemet arttırılması işlemidir. Saf metal içinde ergiyen elementin tek fazlı bir yapı oluşturması durumunda katı eriyik sertleşmesi, ikinci bir faz oluşturması halinde ise ikinci faz sertleşmesi olarak isimlendirilir (URL-11, 2012).

2.3.3.2 Çökelme Sertleşmesi

Çökelme sertleşmesi ikinci fazın küçük tanecikler halinde matris içinde çözünmesiyle oluşan mukavemet arttırma yöntemlerinden biridir. Genellikle demir dışı metal alaşımların (Al, Mg, Ti alaşımları) ve yüksek mukavemetli çeliklerin sertleştirilmesinde kullanılır. Çökelmeye karşı duyarlı olan bu alaşımlar, aşırı doymuş katı eriyik oluşturan alaşımlardır. Zaman ve sıcaklık etkisiyle aşırı doymuş fazdan yeni bir fazın çökmesiyle malzemenin mukavemeti artar.

Çökelme sertleşmesi işlemi 3 kademede yapılır. Bunlar sırasıyla çözeltiye alma, su verme ve yaşlandırma kademeleridir (URL-11, 2012). Şekil 2.9'da çökelme sertleşmesinin aşamaları görülmektedir.



Şek 2.9 Çökeltme sertleşmesinin safhaları ve çökeltme sertleşmesi sırasındaki mikroyapısal değişimler (URL-12, 2012).

2.3.3.3 Dispersiyon Sertleşmesi

Dispersiyon sertleşmesi işlemleri prensip olarak çökeltme sertleşmesiyle aynıdır. Çökeltme sertleşmesinin dispersiyon sertleşmesinden farkı çökeltme sertleşmesindeki ikinci faz oluşumu doğal olarak gerçekleşir. Dispersiyon sertleşmesinde ise ikinci faz ince tanecikler halinde matris malzemesinin içinde fiziksel olarak dağıtılmıştır.

Dispersiyon sertleşmesi ikinci fazın matris içinde eriyebilirliğinin değişen sıcaklıklarda sabit ve sınırlı olduğu alaşımlarda gerçekleşir. Çökeltme sertleşmesi ise ikinci fazdaki eriyebilirliğin artan sıcaklıklarda gittikçe arttığı alaşımlarda gerçekleşir (URL-11, 2012).

2.3.3.4 Soğuk İşlem

Soğuk işlem malzemeye plastik şekil verme yöntemleriyle birlikte uygulanır. Malzemeye uygulanan soğuk işlem sonucunda malzemedeki mukavemet artışı olması deformasyon sertleşmesinden dolayıdır. Plastik şekil verme bir taraftan dislokasyon hareketini sağlarken

diğer taraftan yeni dislokasyonların oluşmasına neden olur. Dislokasyonların birbirine engel olması ya da dislokasyon hareketini zorlaştıran engellere takılması sonucu deformasyon sertleşmesi olur (URL-11, 2012).

Diğer bir ifadeyle soğuk deformasyon derecesinin artması ile deformasyona direncin (mukavemet ve sertlik) artması, plastik özelliklerin (yüzde uzama ve daralma) azalması dislokasyon yoğunluğunun artması ile ilgilidir. Pekleşmiş metalde dislokasyon yoğunluğunun yüksek olması nedeniyle, mevcut dislokasyonların kayması ve yeni dislokasyonların oluşması ve kayması zorlaşır. Hücrelerin ve alt tanelerin sınırları kayan dislokasyonlara engel olur. Bu engellerin arasındaki mesafe (hücre boyutunun azalması) deformasyon derecesinin artmasında sertleşmeye yardımcı olur.

İletkenliği gerçekleştiren elektronlar noktasal hatalar ve dislokasyonlar tarafından dağıtılır. Bundan dolayı, soğuk plastik deformasyon esnasında kafes hataları sayısının artması elektrik direncini artırır (Said 2012).

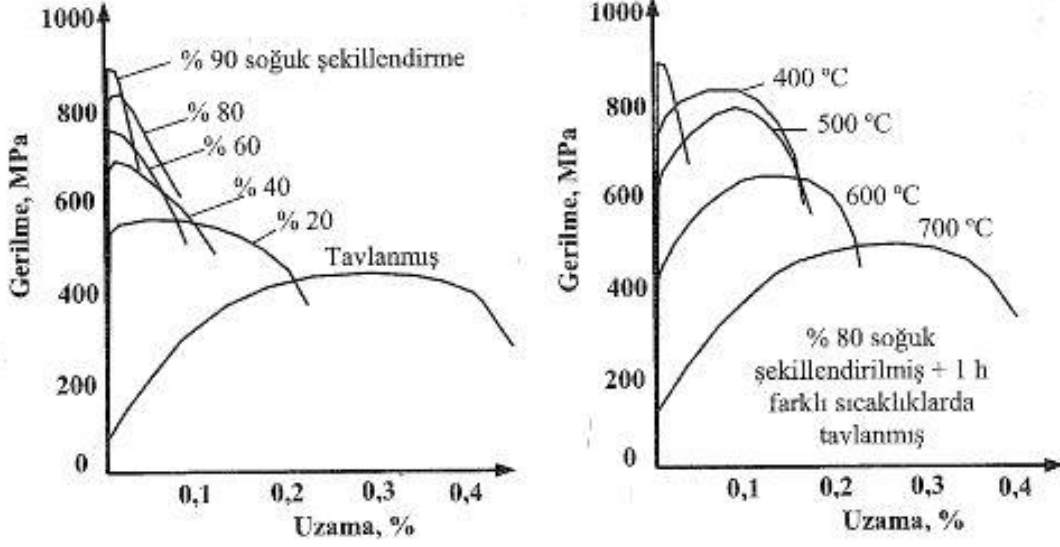
Malzeme mukavemetindeki artış, soğuk işlem miktarıyla orantılıdır. Soğuk işlem sonucunda malzemede oluşan dislokasyon yoğunluğuna bağlı olarak mukavemetteki değişim Eşitlik 2.1'deki gibi hesaplanır (URL-11, 2012).

$$\sigma_p = \sigma_i + \alpha.G.b.\rho^{1/2} \quad (2.1)$$

Denklemden;

- σ_p : Plastik deformasyon gerilmesi
- σ_i : Sürtünme gerilmesi
- G : Kayma elastiklik modülü
- ρ : Dislokasyon yoğunluğu
- α : Bir sabit (Genellikle 0,3-0,6 arası)
- b : Burgers vektörü

Şekil 2.10'da soğuk işlem miktarının malzeme mukavemeti ve şekil değiştirme üstündeki etkisi gösterilmiştir.

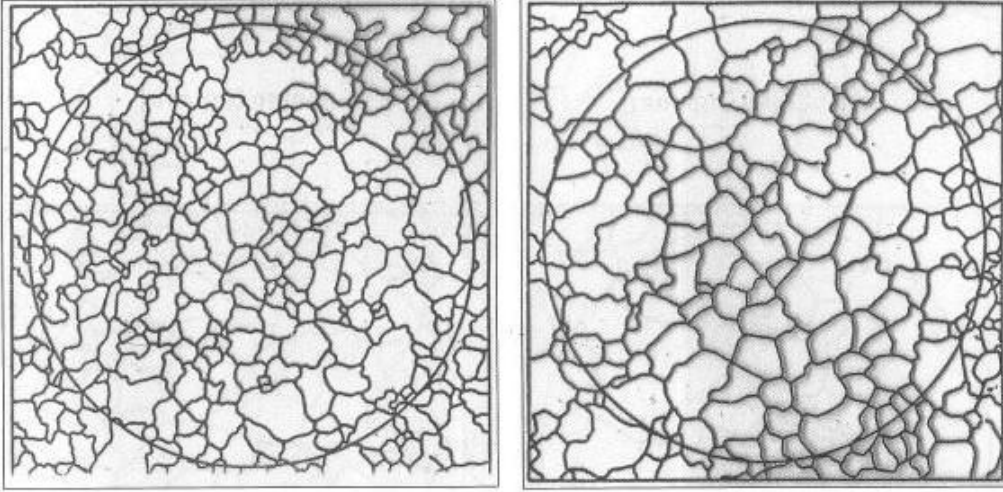


Şekil 2.10 Soğuk işlem miktarının malzeme mukavemetine ve şekil değiştirmesine etkisi (URL-11, 2012).

Soğuk işlem sırasında harcanan enerjinin bir kısmı dislokasyon enerjisine çevrilir, bir kısmı ise ısı halinde kaybolur. Malzemenin mekanik özelliklerindeki değişim soğuk işlemle orantılıdır ancak metaller belli bir sınıra kadar soğuk işleme uğratılabilirler. Çünkü metallerde soğuk işlem sünekliği sıfıra indirir, kırılabilirliği artırır. Yine soğuk işlem miktarının artması malzemede atom boşluklarını artırır ve çatlak oluşumunu önlemek ve soğuk işlemle azalan sünekliği arttırmak için malzeme soğuk işlem sırasında zaman zaman tavlama işlemi yapılır (URL-11, 2012).

2.3.3.5 Tane Boyutunu Küçültme

Tane boyutu değiştirilerek de malzemenin mekanik özellikleri değiştirilebilir. Tane boyutu hızlı soğutma veya malzemeye uygulanan çeşitli termo-mekanik işlemlerle değiştirilebilir. Sertleştirme yöntemleri arasında tokluğu ve gevrekliği beraber arttıran tek yöntem tane boyutunu küçültmedir. Şekil 2.11’de ince taneli bir yapıya sahip bir malzemenin mikroyapı fotoğrafı ve yanında nisbeten daha kaba taneli yapıya sahip bir malzemenin mikroyapı fotoğrafı görülmektedir (URL-11, 2012).



Şekil 2.11 İnce ve kaba taneli malzemelere ait mikroyapı fotoğrafı (URL-11, 2012).

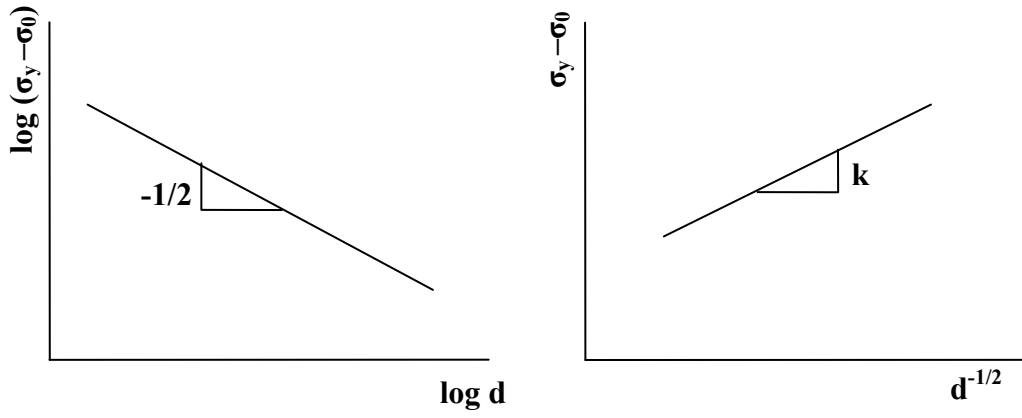
Tane içinde oluşan kayma bantları tane sınırlarında takılıp kalırlar. Çünkü tane sınırları hareket halindeki dislokasyonlara engel olur ve dislokasyon hareketini durdurur. Bu özelliğinden dolayı küçük taneli yapılar iri tanelilere göre daha dayanıklı, yani mukavemetleri daha yüksektir. Tane sınırlarını geçemeyen dislokasyonlar tane sınırlarında yığılırlar. Tane küçülmesi geçiş sıcaklığını azalttığından tokluğu da artırır. Akma dayanımı ve mukavemet arasındaki bağıntı Hall-Petch tarafından aşağıdaki Eşitlik 2.2’de verilmiştir (URL-11, 2012).

$$\sigma_y = \sigma_0 + k \cdot d^{-1/2} \quad (2.2)$$

Bu eşitlikte;

- σ_y : Akma gerilmesini,
- σ_0 : Dislokasyon hareketine karşı koyan sürtünme gerilmesini,
- k : Engellerde sıralanmış dislokasyonlarla ilgili bir sabiti,
- d : Tane boyutunu ifade eder.

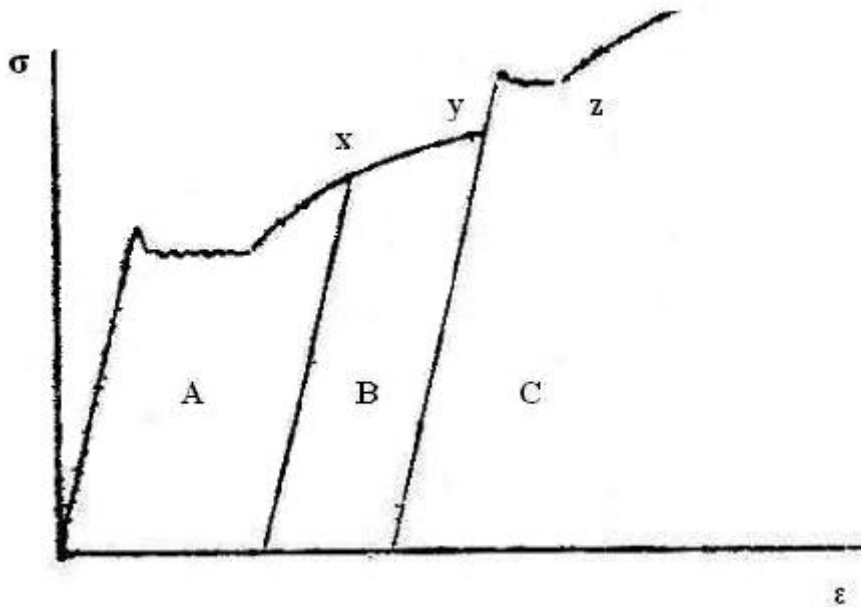
Kimyasal içerikleri aynı fakat tane büyüklükleri birbirinden farklı çeliklerin mukavemetleri birbirinden çok farklı olabilir. Bu da tane boyutunun mukavemete etkisiyle açıklanır. İnce taneli yapılar daha yüksek mukavemet, uzama miktarı ve daha yüksek çentik darbe tokluğuna sahiptir. İri taneli yapılar ise oda sıcaklığında düşük çentik darbe tokluğuna sahiptir. Tane sınırlarında atom düzeni bozulduğundan dolayı tane sınırlarında atomları birbirine bağlayan kuvvetler kristal içerisine göre daha zayıftır. Şekil 2.12’de tane boyutuna bağlı değişen akma gerilim grafikleri verilmiştir (URL-11, 2012).



Şekil 2.12 Akma geriliminin tane boyutu ile değişimi (URL-11, 2012).

2.3.3.6 Deformasyon Yaşlanması

Metalik malzemelerin soğuk deformasyondan sonra düşük sıcaklıklarda tavllanması veya oda sıcaklığında uzun süre bekletilmesi sonucu akma ve çekme mukavemetlerinin artması, sünekliliğinin azalması olayıdır.



Şekil 2.13 Az karbonlu bir çelikte deformasyon yaşlanmasının çekme diyagramına etkisi (URL-11, 2012).

- A: X noktasına kadar çekilmiş süreksiz akma olayı gösteren bir malzeme
B: X noktasından sonra bekletilmeden tekrar çekilmiş
C: 400 °C’de tavlanylıp tekrar çekilmiş (URL-11, 2012).

2.3.3.7 Martenzitik Dönüşüm

Martenzit karbonun α -Fe’deki aşırı doymuş katı eriyiğidir. Martenzit yapı denge dışı bir yapıdır (Said 2011). Bir çelik γ bölgesi içine kadar ısıtılıp homojenleştirmeden sonra yeterli hızda su verilirse martenzitik dönüşüm gerçekleşir (URL-13, 2012). Martenzitik dönüşümün mukavemet arttırma etkisi en fazla Fe-C esaslı alaşımlarda görülür. Çeliğe su verme ile YMK kafesli ostenitten hacim merkezli tetragonal martenzit oluşur (URL-11, 2012).

2.3.3.8 Radyasyonla Sertleştirme

Radyasyonla sertleştirme radyasyon ile malzemenin kristal yapısında nokta hataların oluşturulması ile gerçekleşir. Radyasyonla sertleştirme çok hızlı hareket eden atomik parçacıkların metalik malzemenin atomları ile çarpışarak atom boşlukları ve arayer atomları oluşturması fikrine dayanır. Radyasyonla sertleştirme;

- a) Nötron radyasyonu
- b) α taneleri radyasyonu
- c) β ışınları (yüksek enerjili elektronlar) radyasyonu
- d) γ ışınları radyasyonu

ile yapılabilir.

Nötron radyasyonunda malzemenin ısı ve elektrik direnci artar. Sebebi ise radyasyona uğramış malzemede nokta hatalar sonucu elektron hareketinin zorlaşmasıdır.

Radyasyonla sertleştirme işlemindeki radyasyon etkisinden dolayı bu olay radyasyon hasarı olarak da isimlendirilir. Radyasyon hasarı yüksek sıcaklıklarda yapılan ısıl işlemlerle giderilebilir. Burada ısıl işlemle radyasyon hasarının giderilmesi olayı rekristalizasyon olayı ile benzer şekilde özellikleri etkiler. Ancak radyasyon hasarı rekristalizasyona göre daha düşük sıcaklıklardaki ısıl işlemle giderilebilir. Çünkü nokta hataların giderilmesi yani atomların arayer konumundan kendi konumuna atom boşluğu ile yer değiştirerek geçmesi için gerekli enerji daha azdır (URL-11, 2012).

BÖLÜM 3

ÇOK KRİSTALLİ MALZEMELERDE TANE YAPISI

3.1 GİRİŞ

Metallerin mikro yapıları birçok taneden meydana gelir. Tane, içerisinde atom dizilimlerinin özdeş olduğu malzemenin bir kısmıdır. Bu atomların diziliş yönlenmesi (oryantasyonu) veya kristal yapı, bitişik olan taneler için farklılık gösterir. Bütün taneler için kafes yapısı aynı iken kafeslerin yönlenmeleri farklıdır (URL-8, 2012).

3.2 TANE SINIRLARI

Çok kristalli bir malzemede taneler fiziksel olarak birbirinden ayrı değildirler. Tane sınırları bu kristalleri birbirine bağlayan yüzeydir. Tane sınırları, bireysel taneleri birbirinden ayıran ve atomların düzgün yerleşmediği dar bir alandır. Tane sınırları bitişikindeki taneye göre daha az düzenli atom dizilimine sahiptirler. Tane sınırları ile ilgili gözlemler şu sonuçları ortaya koymaktadır.

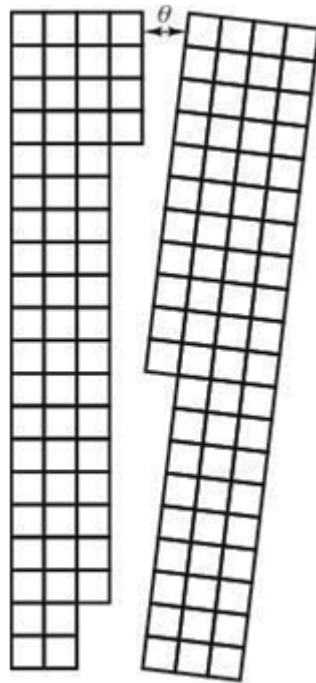
1. Tane sınırları yüzey gibi davranmaktadır ve enerjileri serbest bir yüzeye göre daha azdır.
2. Tane sınırları birkaç atom genişliğinde olacak kadar dar bir alana sahiptir.
3. Bazen atomların düzenli olduğu tane sınırları da görülmektedir. Burada tane sınırındaki atomlar yanında bulunan tanelerin kristal kafesine yerleşir. Böylece bu bölgeler tane içerisindeki dislokasyonları kendilerine çekmektedirler.

Tane sınırları optik mikroskoplarla görülebilir. Çeşitli dağlamalardan sonra mikroskopta bakılan yüzeyde koyu çizgilerle ve bazı durumlarda taneler arasında renk değişimi ile görülmektedirler. Ancak optik mikroskoplar tane sınırlarının genişliği ile ilgili kesin bilgi verememektedirler.

Tane sınırları yoğun miktarda kristal hataları içeren bölgelerdir. Çözünen atomlar tanelere göre tane sınırlarına daha kolay yerleştiklerinden tane sınırlarında segregasyon (yığılma) yaparlar. Tane sınırları katı çözeltili durumundan soğuma süresi boyunca çökelti fazlarının tercih ettiği bölgelerdir. Isıtmada ise ilk olarak tane sınırlarındaki çökelti fazlar çözünmeye başlar. Isıtmada tane sınırları ilk etkilenen bölgelerdir. Bu yüzden metaller ısıtıldığında ergime olayı ilk olarak tane sınırlarından başlar. Tane sınırları difüzyon için de büyük öneme sahiptir. Tane sınırlarında aktivasyon enerjisi düşük olduğundan difüzyon olayı boşluklara göre daha kolaydır. Bu nedenle tane sınırları difüzyon olayı için kolay geçiş yollarıdır.

Küçük açılı tane sınırı, büyük açılı tane sınırı ve ikiz tane sınırı olmak üzere üç tip tane sınırı vardır. Küçük açılı tane sınırı mükemmel bir kristalin aynı düzlemde uzanan seri dislokasyonları olarak ifade edilebilir (Eroğlu 1997).

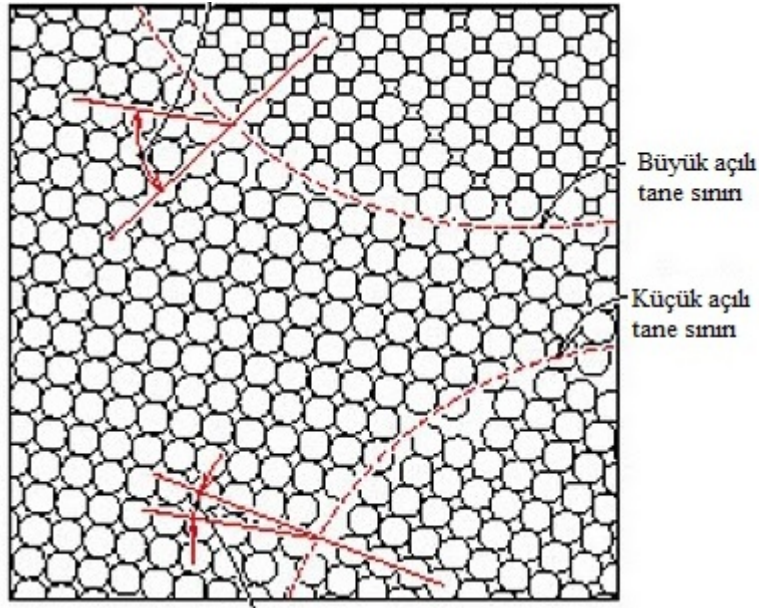
Kristal içerisinde kenar dislokasyonlarının üst üste dizilmesi ile meydana gelir. Dislokasyonların meydana getirdiği iki komşu dizi arasındaki açı 10° 'den küçüktür. Bu yapılar, alt tane (sub grain) olarak da adlandırılır. Şekil 3.1'de küçük açılı tane sınırları görülmektedir (URL-9, 2012).



Şekil 3.1 Küçük açılı tane sınırları (URL-9, 2012).

Büyük açılı tane sınırlarında, sınır boyunca atomlar her iki taneye de uyum sağlayamadığından rastgele dizilmişlerdir ve çok dar bir alanda yapı amorf yapı gibi düşünülebilir. Şekil 3.2’de küçük açılı tane sınırı görülmektedir (URL-10, 2012).

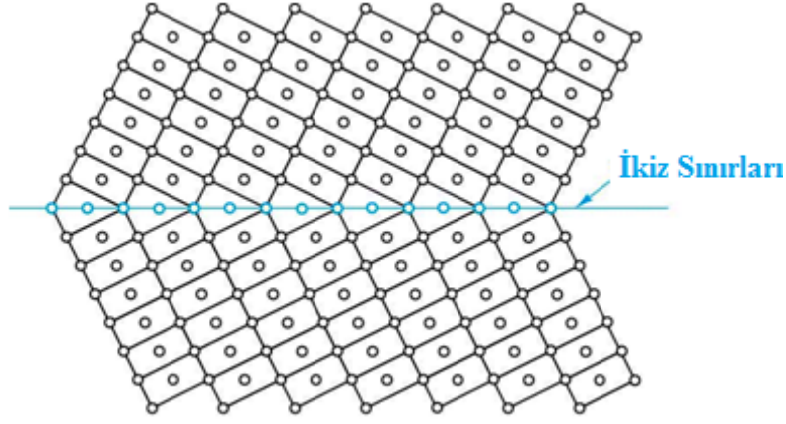
Büyük açılı tane sınırlarına sahip iki komşu tanenin arasındaki hiçbir dislokasyon izini ayırt etmek mümkün olmamaktadır (Eroğlu 1997). Şekil 3.2’de büyük açılı ve küçük açılı tane sınırları görülmektedir (URL-10, 2012).



Şekil 3.2 Büyük açılı ve küçük açılı tane sınırları (URL-10, 2012).

İkiz sınırları, birbirinin aynadaki simetriği olan iki kristal bölgeyi birbirinden ayıran sınırdır (Eroğlu 1997).

İkiz sınırları dislokasyon kaymasını zorlaştırırlar ve metallerin akma dayanımını arttıırırlar. Şekil 3.3’de ikiz sınırları görülmektedir (URL-10, 2012).

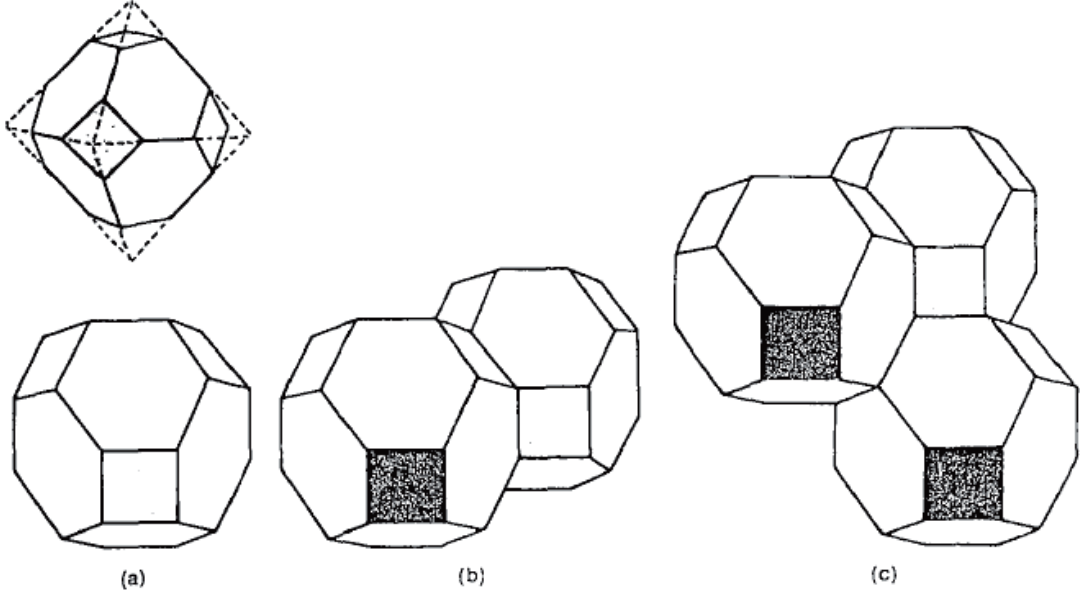


Şekil 3.3 İkiz sınırları (URL-10, 2012).

3.3 TANE ŞEKLİ VE BOYUTU

Çok kristalli malzemelerde taneler önceden oluşan çekirdeklerden oluşurlar. Eğer mevcut şartlar tanenin her yöne rahatça büyümesine el veriyorsa taneler eş eksenli olarak büyürler. Çekirdekler aynı anda oluşmuşlarsa bu çekirdeklerden oluşacak tane boyutları da aynı boyutta olacaklardır. Fakat taneler belli bir sürede çekirdeklendiklerinden tane boyutları da farklılık gösterirler.

Tane sınırları yüzey enerjisine sahiptirler. Bu nedenle taneler enerji kaybetmemek için minimum seviyede yüzey alanına sahip olmak isterler. Birim hacim için minimum yüzey alanına sahip şekil bir küredir. Ancak taneler tane sınırları ile birbirlerine bağlanacaklarından tane yapısı tamamen küre şeklinde olamaz. Taneler küresel bir yapıya sahip olamayacaklarından Şekil 3.4a'daki gibi bir şekil alırlar. Bu şeklin 14 kenarı bulunmakta ve sade haliyle octahedron olarak isimlendirilir. Şeklin bilimsel olarak bilinen tam ismi tetrakaidekahedrondur. Şekil 3.4b ve Şekil 3.4c'deki gibi taneler üç boyutlu bir alanı üniform şekilde doldurmak için birbirlerine bağlanırlar. Bu da denge şartlarında ideal tane şeklini ortaya çıkarır. Ancak taneler her zaman ideal şekli alamayabilirler. Çünkü tane büyümesi gerçekleşirken bazı tanelerin büyümesini engelleyecek fazlar ya da partiküller bulunabilir. Bu sebeple tane boyutları eş eksenli ve aynı boyutta olmayabilir (Eroğlu 1997).



Şekil 3.4 Tanelerin geometrik şekilleri (Eroğlu 1997).

BÖLÜM 4

TANE BOYUTUNU ETKİLEYEN ISIL İŞLEMLER

Metal ve alaşımlardan yapılmış olan mamüllerin içyapı ve özelliklerini öngörüldüğü şekilde değiştirmek için sıcaklık etkisiyle uygulanan sürece ısıtma işlemi denir (Said 2012). Isıtma işlemlerinin Türk standartlarındaki tanımı ise, katı haldeki metal veya alaşımlara belirli özellikler kazandırmak amacıyla bir veya daha çok sayıda, yerine göre birbiri peşine zamanlanarak uygulanan ısıtma ve soğutma işlemleridir (TSE 1112 EN 10052).

Isıtma işlemi, teknikte, metal ve alaşımların özelliklerini değiştirmek için uygulanan en yaygın yöntemdir. Isıtma işlemi metalürji ve makine imalat tesislerinde makine parçaları ve mamulleri üretim sürecinin en önemli halkalarından biridir. Aynı zamanda ısıtma işlemi, teknolojik özellikleri iyileştirmede ara operasyon olarak (deformasyon, talaş kaldırma vb. işlemleri) ve mamulün çalışma karakteristiklerini sağlamak için metale veya alaşıma mekaniksel, fiziksel ve kimyasal özellikler kazandıran son işlem olarak da uygulanabilir. Bir makinenin önemi ne kadar büyükse bu makinede ısıtma işlemi uğraması gereken parça sayısı o kadar fazladır.

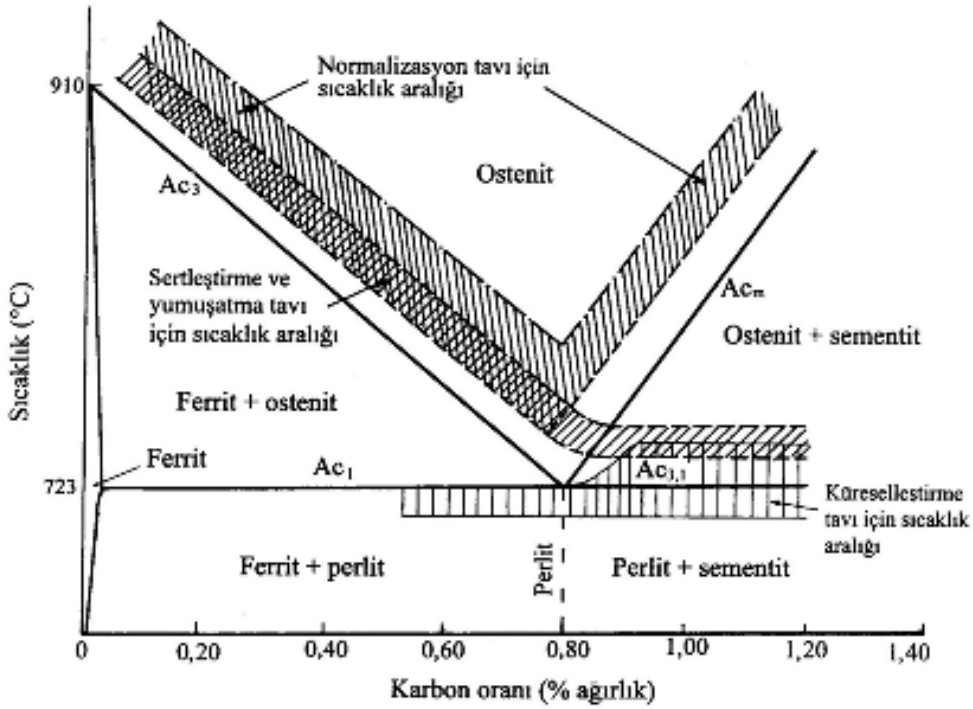
Isıtma ve soğutma periyotlarında metalik malzemenin içyapısı değişir ve bu değişim fiziki, kimyevi ve mekanik özelliklerin değişimine yol açar. Bunun sonucunda metalden üretilmiş olan mamullerin çalışma esnasında davranışı etkilenir.

Isıtma işleminin temelini metallerin veya alaşımlarının sıcaklık etkisiyle yapı ve özelliklerinin değişimi oluşturur. Isıtma işlemi sonucunda metalin yapısı değiştiğinden ve bu değişim çok çeşitli olabildiğinden mekanik işlemler ya da herhangi bir işlem, ısıtma işlemiyle kıyaslanamaz, karşılaştırılmaz (Said 2012).

Çeliklere uygulanan bütün ısıtma işlemleri ostenit fazının dönüşümü ile ilgilidir. Çeliğin fiziksel ve mekaniksel özellikleri, içerdiği dönüşüm ürünlerinin cinsine, miktarına ve metalografik yapısına bağlıdır.

Çeliğin ısıl işlemine ostenitleştirme (ostenitizasyon) ile başlanır. Ostenitleştirme işlemi için çelik kritik bir sıcaklık değerinin (Ac_1) üzerindeki sıcaklığa ısıtılır. Isıl işlemde ısıtma hızı çoğu durum için diğer faktörlerden daha az önem taşır. Ancak çarpılmanın önlenmesi için soğuk şekil değişimine uğramış yani aşırı ölçüde iç gerilime sahip olan malzemeler yavaş yavaş ısıtılmalıdır. Ayrıca kesit farklılıkları olan malzemelerde ısıtma esnasında farklı kesitler için farklı ısınma veya sıcaklık artış hızları ayarlanmalıdır. Isıl işlem esnasında çarpılma olmaması için ince kısımlar kalın kısımlara göre daha yavaş ısıtılmalıdır. Isıl işlem sırasında hasar riskini azaltmak için çelikler genelde yavaş ısıtılır.

Ostenitleştirme, çeliğin Ac_1 gibi kritik bir sıcaklık çizgisi üzerinde uygun bir değere kadar yavaşça ısıtılıp yapısının tamamen ostenite dönüşmesine kadar tavlama anlamına gelir. Ötektoid altı çelikler üst kritik sıcaklık çizgisinin (Ac_3) 40-60 °C üzerindeki sıcaklıklarda ostenitleştirme işlemine tabi tutulurlar. Ac_3 çizgisinin altında çelik içerisinde ötektoid dışı ferrit bulunur ve bu fazın oranı çeliğin karbon oranına bağlıdır (Savaşkan 2009).



Şekil 4.1 Alaşımsız çeliklere uygulanan yumuşatma, normalizasyon, sertleştirme ve küreselleştirme işlemleri için tavlama sıcaklık aralıkları (Savaşkan 2009).

Ötektoid sıcaklığı (A_1) altında yapılan ısıtma işlemleri

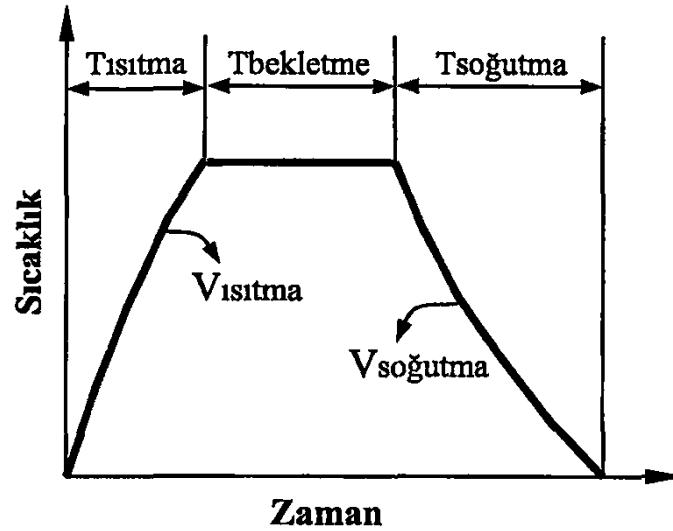
Gerilim giderme, küreselleştirme, temperleme, yeniden kristalleştirme işlemleri ötektoid sıcaklığının altında gerçekleşen ısıtma işlemleridir.

Ötektoid sıcaklığının üzerinde yapılan ısıtma işlemleri

Normalleştirme, su verme, homojenleştirme ve tavlama ötektoid sıcaklığın üzerinde uygulanan ısıtma işlemleridir (Kara 2005).

4.1 ISIL İŞLEMLERİN GENEL GRAFİĞİ

Şekil 4.2’de görüleceği üzere ısıtma işlemde ilk kademede metallerin belli bir sıcaklığa kadar ısıtılması “ısıtma”, ikinci kademede gelinen bu sıcaklıkta metalin uygun bir süre bekletilmesi “bekletme” ve son basamak olarak metal sıcaklığının uygun bir şekilde oda sıcaklığına getirilmesi “soğutma” olarak adlanır. Isıtma işlem rejimleri genel manada bu basamaklara göre uygulanır.



Şekil 4.2 Isıl İşlemlerin Genel Grafiği (Kara 2005).

Çeliklerin ısıtma işleminde önemli olan parametreler şu şekilde sıralanabilir (Kara 2005).

- Çelikteki karbon oranı (%C)

- Diğer alaşım elementlerinin miktarı
- Isıl işlemsiz mekanik özellikler
- Isıl işlemden sonra elde edilmesi amaçlanan özellikler
- Çeliğin kullanım yeri
- Kullanım yerine göre maruz kalacağı zorlamalar

4.2 ISIL İŞLEM ÇEŞİTLERİ

4.2.1 Rekristalizasyon (Yeniden Kristalleştirme Tavı)

Metallerin kristal tane yapısı soğuk Şekil değiştirme esnasında bozulur, dislokasyon yoğunluğu da artar. Bunun sonucu olarak metaller soğuk Şekil değiştirme sonucu gevrekleŐir, sũnekliđi azalır, Şekillendirme işlemi zorlaşır hatta işleme devam edilirse kırılmalar meydana gelir. Soğuk Şekillendirme sonucu gevrekleŐen çeliği yumuşatmak ve diğer özelliklerini iyileştirmek için yeniden kristalleştirme tavı yapılır. Yeniden kristalleştirme tavı metalin ergime sıcaklığına bağlı olarak değişir.

Plastik Şekil değiştirmeye uğramış malzemenin içyapısında dislokasyon yoğunluğu artar ve bu artış homojen değildir. Tane sınırları gibi dislokasyon hareketini engelleyen yerlerde dislokasyon yığılmaları olur. Dislokasyon yığılmalarının olduğu yerdeki atomlar denge durumundan uzaklaŐtıđından dislokasyon yoğunluğunun artması (gerilmiŐ yay gibi) malzemenin iç enerjisini arttırır. Denge durumu bozulan atomlar eski haline dönme eğilimindedir. Eğer dıŐarıdan bir enerji verilirse malzeme eski düzenli haline geri döner. Bu olaya rekristalizasyon (yeniden kristelleŐme) denilir (Can 2010).

Yeniden kristalleŐmede olaylar üç safhada incelenebilir:

- 1- **Toparlanma:** Plastik Şekil değiştirmeye uğratılmış metalin içyapısında büyük deđiŐiklikler olur. Metal taneleri dış kuvvet etkisiyle kuvvet yönünde uzanır ve böyle bir metal anizotropi özelliği gösterir. (Said ders notları). Anizotropi durumundaki metale dış enerji verilince ilk önce kristal hatalarında bir azalma olur. Ara yer atomları boŐ yerlere dağılır, ters iŐaretili dislokasyonlar birbirini yok eder, boŐ yerler bir yerde toplanır, dislokasyonlar aynı hizaya gelerek küçük açılı

tane sınırları oluşur. Bu olaya toparlanma denilir. Toparlanma olayından sonra malzemenin mekanik özelliklerinde fazla bir değişiklik olmaz.

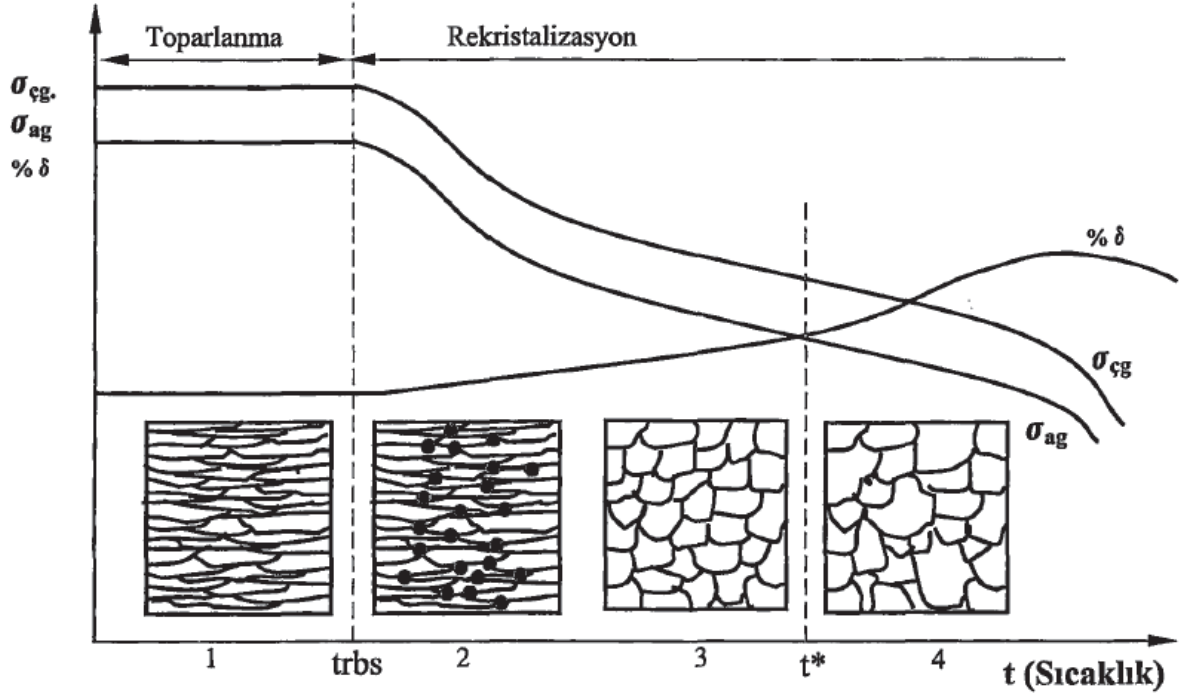
2- Yeniden Kristal Oluşumu: Malzemeye verilen dış enerji arttırıldığında dislokasyon yoğunluğunun çok olduğu yüksek enerjili bölgeler yeni kristal çekirdekleri oluşturur. Bu çekirdekler büyüyerek malzemenin yeniden kristalleşmesi tamamlanır. Yeniden kristalleşen malzemenin kristal tane büyüklüğü, oluşacak çekirdek sayısına, çekirdek sayısı da dislokasyon yoğunluğu fazla olan bölgelerin çokluğuna bağlı olduğundan kristal tane büyüklüğü şekil değiştirme miktarına bağlıdır. Hatta az deformasyon durumunda tane irileşmesi bile olabilir. Yeniden kristalleşme için gerekli enerji malzeme ısıtılarak sağlanır. Malzemenin ısıtılmasına tavlama denilir. Yeniden kristalleşme sıcaklığı, malzemenin bir saat içinde kristalleşmesini tamamlayabildiği sıcaklıktır. Soğuk şekil değiştirme oranı artarken yeniden kristalleşme sıcaklığı düşer.

3- Tane Büyümesi: Malzemeye uygulanan tavlama süresi ve tavlama sıcaklığı arttırılırsa taneler büyüyerek irileşir. Böyle bir yapı çoğu zaman arzu edilmez. Soğuk şekillendirme işlemi genellikle %0,25 ve daha küçük karbon oranına sahip çeliklere uygulandığından yeniden kristalleştirme bu çeliklere uygulanır. Soğuk şekillendirme ile üretilen tüm metallere bu tav uygulanabilir.

Rekristalizasyon işleminin şematik fotoğrafı Şekil 4.3’de görülmektedir.

Malzemeye uygulanan şekil değiştirme işlemi yeniden kristalleştirme sıcaklığının altında uygulanıyorsa soğuk şekillendirme, yeniden kristalleştirme sıcaklığının üzerinde uygulanıyorsa sıcak şekillendirme denilir. Kurşun ve kalay oda sıcaklığında sıcak şekillendirmeye uğrarken az karbonlu çelikler yaklaşık 400 °C’de soğuk şekillendirilmiş olur.

Soğuk şekillendirme ve yeniden kristalleştirme işlemi ile malzemelerin tane boyutları küçültülebilir. Tane boyutu küçük olan malzemenin dayanımı daha yüksek olur. Derin çekme, tel çekme gibi işlemler sonucu malzeme sertleştiğinden dolayı daha fazla şekil verilemez. Böyle bir malzeme tavlansak tekrar tekrar şekillendirilebilir (Can 2010).



Şekil 4.3 Rekristalizasyon işleminin şematik gösterimi (Kara 2005).

Rekristalizasyonun başlangıç sıcaklığı (t_{rbs}) ergime sıcaklığı gibi sabit bir değer değildir. Bu değer birkaç faktöre bağlıdır ve genellikle ampirik formüllerle ifade edilir. Rekristalizasyon sıcaklığı yaklaşık olarak Eşitlik 4.1'deki gibi ifade edilir.

$$t_{rbs} \approx \alpha \cdot T_{er} \quad (4.1)$$

Denklemden;

t_{rbs} : Rekristalizasyon başlangıç sıcaklığı

T_{er} : Metalin ergime sıcaklığı

α : Metalin t_{rbs} için bir katsayıdır.

Saf metaller için $\alpha \approx 0,1-0,2$

Saf teknik metaller için $\alpha \approx 0,3-0,4$

Alaşımlar için $\alpha \approx 0,5-0,6$

Çelikler için $\alpha \approx 0,7$ civarında alınır (Said 2011).

4.2.2 Homojenleştirme Tavlama (Homojenizasyon)

Homojenleştirme tavlama katılma esnasında tane sınırlarında biriken elementleri (fosfor, kükürt vs.) tane içine dağıtmak, mikrosegregasyonu gidermek için çeliğin katılma sıcaklığına yakın sıcaklıklarda karbon oranına bağlı olarak 1100-1300 °C arasında çeliğin uzun süre (50 saat) bekletilmesi ile yapılır. Çelik içerisinde bulunan karbon oranının artması tavlama sıcaklığını azaltır. Tavlama sıcaklığının uygun seçilmemesi çelikte yanmaya sebep olabilir. Homojenleştirme tavlama belirtilen sıcaklık ve süre aynı zamanda tane irileşmesine de neden olur (Can 2010). Tane irileşmesinden dolayı homojenleştirme tavlamasından sonra sıcak şekillendirme ya da normal tavlama kaçınılmaz olur (URL-14, 2012).

Kokil döküm ile elde edilen ingotlar haddelenmeden önce böyle bir tavlama tabi tutulur. Homojenizasyon ile tane sınırlarında biriken ve gevrekleşmeye sebep olan kalıntı elementler (fosfor, kükürt vs.) ve bazı kalıntı bileşikler (metaloksitler, mangansülfür vs.) tane içine doğru dağılır. Al_2O_3 , SiO_2 gibi dağılmayan bileşikler ise küreleşip kalırlar.

Homojenizasyon ile kristal tanesindeki karbonun meydana getirdiği segregasyon hızlı bir şekilde düzelir.

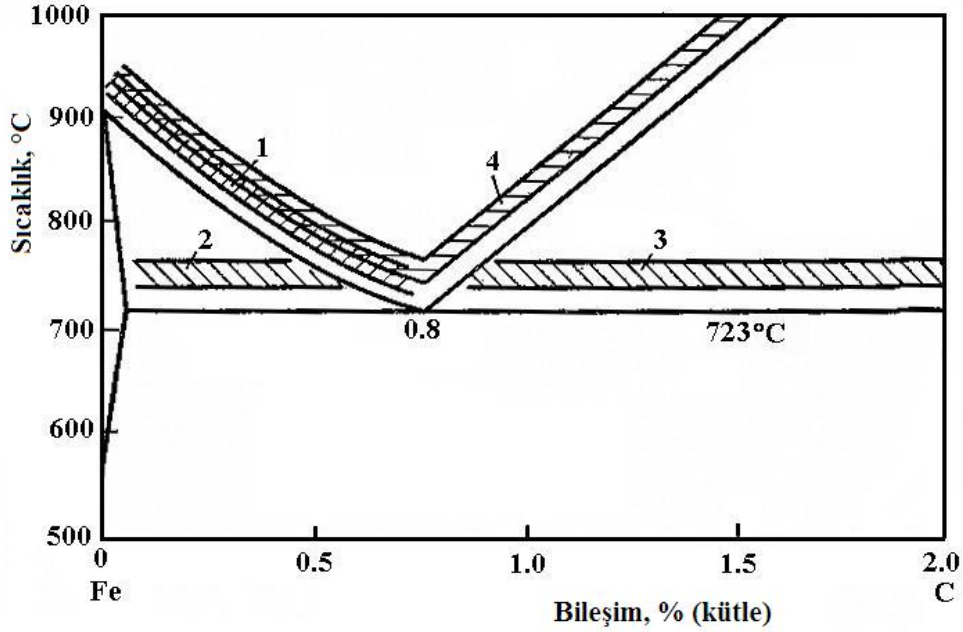
Homojenleştirme tavlama, özellikle yüksek alaşımlı çelikler için önemlidir. Çeliklerde kalıntılardan dolayı meydana gelen dizi hataları normalizasyon ile azaltılabilir ancak tamamen giderilemez. Homojenleştirme tavlama bu hataları giderir.

Su verme işlemine tabi tutulacak çelik döküm parçalarına homojenleştirme tavlama uygulanırsa çatlak riski azaltılır (Can 2010).

4.2.3 Tam Tavlama

Çelik ostenitlendikten sonra havada soğumaya bırakıldığında kimyasal yapısından dolayı sertleşebilir. Çelikte oluşan bu sert yapılar çeliğe uygulanacak talaşlı işlemi zorlaştırır. Yüksek karbonlu ve alaşımlı çeliklerde bu sorun yaşanır. Yüksek alaşımlı çelikler ise tamamen sertleşebilirler. Bu şekilde sertleşme gösteren çelikler için tam tavlama işlemi yapılır (Can 2010).

Tam tavlama ötektoid altı çeliğin Ac_3 'den 20-40 °C yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılması ile uygulanır (Şekil 4.4).



Şekil 4.4 Çeliklerin II. tür tavlama sıcaklıkları. 1- tam tavlama; 2- tam olmayan tavlama; 3- küreselleştirici tavlama; 4- normalleştirici tavlama (Said 2012).

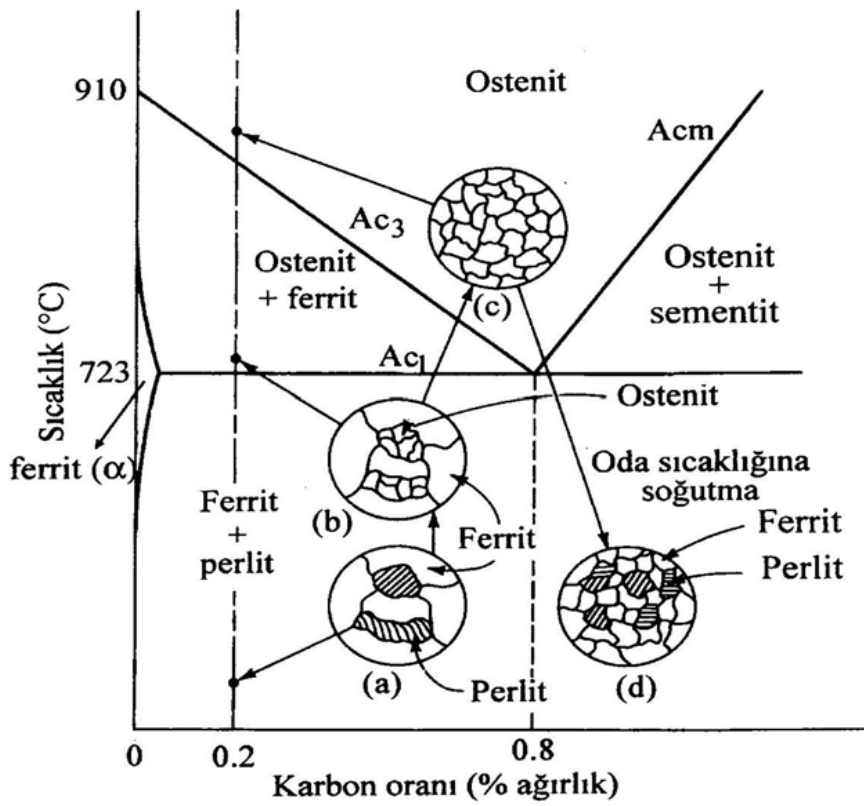
Aşırı soğuma oranında ostenitin çözülmesini sağlamak için, tavlama sıcaklığından itibaren soğutma yavaş hızda gerçekleştirilmelidir. Alaşımli çelikler aşırı soğumaya yatkın olduklarından tavlama esnasında alaşımli çelikler karbonlu çeliklere göre daha düşük hızda soğutulmalıdır. Karbonlu çelikler tavlama hızla 200 °C/saat hızla, alaşımli çelikler ise 30-100 °C/saat hızla soğutulur.

Eğer tavlama tabi tutulan mamullerde ısıl gerilmeler tehlike oluşturmuyorsa, fırından 500-600 °C sıcaklıkta direk olarak çıkartılıp havada soğutulabilir. Ancak tavlamanın hedeflerinden biri karmaşık biçime sahip olan parçada iç gerilmeleri azaltmaksa, bu durumda parça fırında oda sıcaklığına kadar soğutulmalıdır.

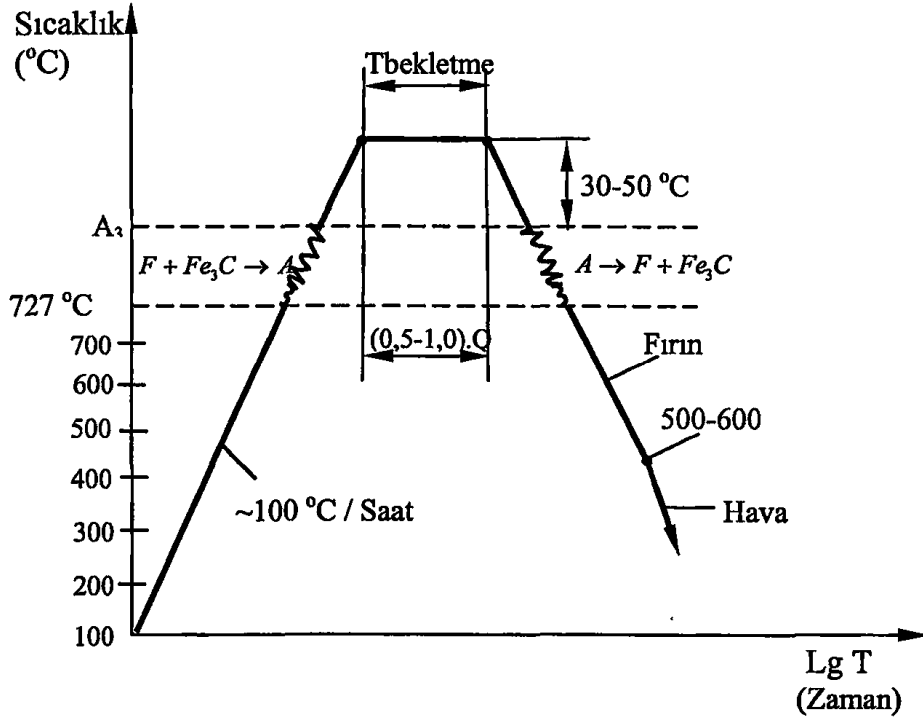
Tam tavlamanın temel hedefleri şunlardır:

- Metalde önceden uygulanmış olan işlemler (döküm, sıcak şekillendirme, kaynak, ısıl işlemler) sonucu meydana gelmiş yapı kusurlarını ortadan kaldırmak
- Çeliği talaş kaldırma işleminden önce yumuşatmak
- İç gerilmeleri azaltmak.

Taneleri ufaklaştıran tam tavlamanın hedefi, taneleri irileştiren tavlama hedefinin tam tersidir. 950-1100 °C sıcaklığa kadar ısıtma ile iri tane elde etmek için uygulanan tavlama, yumuşak düşük karbonlu çeliklerin talaş kaldırma işlemini kolaylaştırmak için yapılır. Böyle çelikler sünek, kesici alet ucundan zor kaldırılan talaş oluşturur. Bu talaş kesici alet yüzeyine yapışarak, işlenen parça yüzeyinin pürüzlü olmasına neden olur. Düşük karbonlu çelik yüzeyinin kalitesini iyileştirmeyi ve kesme esnasında talaşın kırılmasını iri kolonlu plakalı perlit yapı sağlar. Böyle bir yapı ise tane irileştiren yüksek sıcaklıklı tavlama ile elde edilir (Said 2012). Şekil 4.5’de çeliğin içyapısında tavlama esnasında meydana gelen değişimler Şekil 4.6’da ise ötektoid altı çelikler için tam tavlama işleminin genel grafiği görülmektedir.



Şekil 4.5 %0.2 C içeren çeliğin içyapısında tavlama işlemi sırasında meydana gelen değişimlerin şematik gösterimi (Savaşkan 2009).



Şekil 4.6 Ötektoid altı Çelikler (<math>< \text{\%C} 0,8</math>) İçin Tam Tavlama İşleminin Genel Grafiği (Kara 2005).

4.2.4 Tam Olmayan Tavlama

Tam olmayan tavlama ötektoid altı çeliğin Ac_1 'den biraz yüksek, Ac_3 'den düşük bir sıcaklığa kadar ısıtılması ile gerçekleştirilir (Şekil 4.4). Bu tavlamanın ötektoid altı çelikler için kullanımı sınırlıdır. Tam olmayan tavlama sıcaklığında artık (aşırı) ferrit kaybı olmaz. Dolayısıyla, tam olmayan tavlama ile çeliğin yukarıda bahsedilen artık ferritin uygun olmayan boyut ve biçimi ile ilgili kusurlarını ortadan kaldırmaz.

Tam olmayan tavlama ötektoid altı çeliğin talaş kaldırma işleminden önce yumuşatılması amacı ile yapılır. Çünkü ötektoid dönüşüm sonucunda tam olmayan tavlama yumuşak perlit oluşur. Tam olmayan yumuşatıcı tavlama zamandan tasarruf sağlar ve işlem maliyetini azaltır (Said 2012).

4.2.5 Küreselleştirici Tavlama

Küreselleştirme tavı çelikleri Ac_1 sıcaklık değeri civarında uzun süre tutarak ve bu bölgede salımlı olarak tavladıktan sonra yavaş soğutma ile karbürlerin küreselleştirilmesi işlemidir. Bu işlem ostenitleştirmeden sonra kontrollü soğutma ile de yapılabilir (Gök 2010).

Ötektoid üstü çelikler için A_{cm} (ES çizgisi) üzerine ısıtma ile tavlama genellikle kullanılmaz. Çünkü böyle bir ısıtmadan sonra yavaş soğutma esnasında mekanik özellikleri olumsuz etkileyen sekonder sementit oluşumu meydana gelir. Ötektoid üstü karbonlu çeliklere 740-780 °C'a kadar ısıtma ve daha sonra yavaş soğutmadan ibaret olan tavlama geniş alanda kullanılır. Böyle bir ısıtmadan sonra ostenit içerisinde çözünmemiş halde sementit katkıları kalır. Bu katkıları soğuma esnasında ostenitin çökmesinde kristalizasyon merkezleri rolünü oynar.

Sonuç olarak taneler perlit yapısı oluşur (sferodit). Bundan dolayı böyle tavlama küreselleştirici tavlama olarak adlandırılır. Sementitin ufak katkıları tavlama sıcaklığında A_1 - A_{cm} aralığında sementit plakalarının bölünmesi sonucu oluşur. Bölünmede plakalar en ince bölgelerde, sementit veya ostenitte sub tanelerinin fazlar arası yüzeylerine çıkmış olan yerlerinde çözünür (Said 2012).

Küreselleştirici tavlama aşağıdaki yöntemlerden biri uygulanarak yapılabilir.

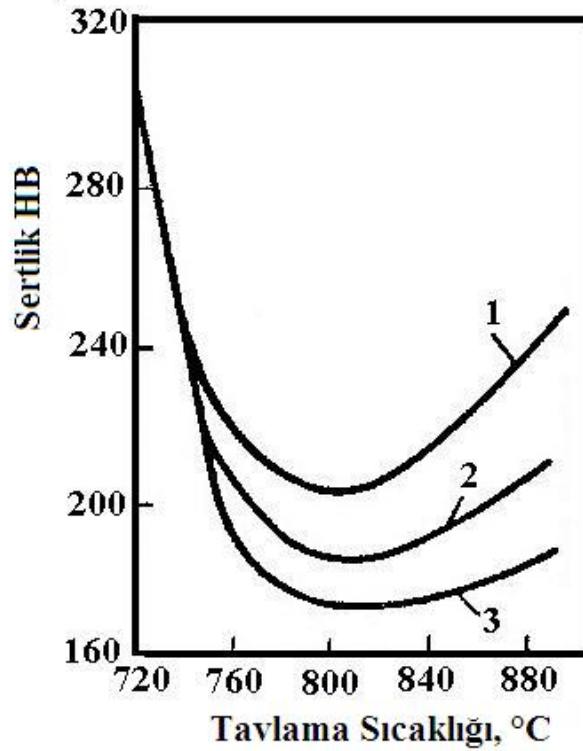
- Çelik A_{c1} sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta (700 °C) uzun süre (15-25 saat) tavllanır.
- Çelik malzeme düşük kritik sıcaklık değerinin (A_{c1}) hemen altındaki ve üstündeki sıcaklıklara ısıtılıp soğutularak, salınımlı olarak tavllanır.
- Malzeme A_{c1} kritik sıcaklığının üstündeki bir sıcaklıkta tavlanaarak fırında çok yavaş olarak soğutulur ya da A_{c1} çizgisinin hemen altındaki bir sıcaklıkta uzunca bir süre tavllanır (Gök 2010).

Ötektoid çeliklerin küreselleştirici tavlama rejimleri dar “tavlanma sıcaklık aralığı” ile nitelenir. Bu aralığın alt sınırı A_1 nokta üzerinde olmalıdır. Üst sınır ise çok yüksek olmamalıdır. Çünkü ostenitte karbür çekirdeklerinin çözünmesinden dolayı soğuma esnasında plakalı perlit meydana gelir. A_1 ve A_{cm} noktaları ötektoid bileşimde çakıştığından, bileşimi ötektoidde yakın olan çeliklerin “tavlanma sıcaklık aralığı” daha dar olur. Örneğin takım çelikleri için (%C=0,9-1,6) bu aralık sınırları 740-780 °C civarındadır.

Meydana gelen son yapı soğuma sıcaklığı ve küreselleştirici tavlama sıcaklığına bağlıdır. Soğuma hızı ne kadar düşük olursa, ostenitin çökmesinde karbür küreleri de o kadar büyük

olur. Soğuma hızını ayarlayarak, noktasal perlitten iri taneli küresel perlite kadar yapı elde edilebilir. Daha ufak taneli perlit yüksek sertliğe sahiptir.

Küreselleştirici tavlamanın sertliğe etkisi Şekil 4.7’de gösterilmiştir. Tavlama sıcaklığı 800-820 °C’ye kadar arttırıldığında sertlik küreselleşme nedeniyle azalır. Tavlama sıcaklığı arttırıldıkça, meydana gelen plakalı perlit miktarı arttığından sertlik artar.

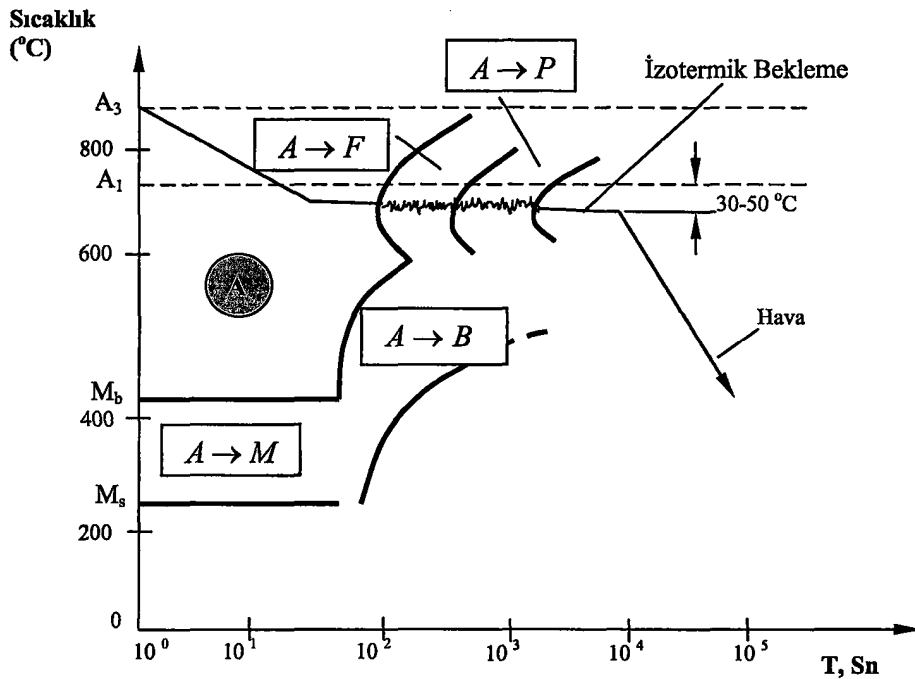


Şekil 4.7 Rulman çeliğinin (C=0,95-1,05, Si=0,17-0,34, Mn=0,2-0,4, Cr=1,30-1,65) sertlik değerinin üç farklı soğuma hızına, tavlama sıcaklığına bağlılığı: 1) 100 °C/saat; 2) 30 °C/saat; 3) 5 °C/saat (Said 2012).

Eğer tek bir tavlama da sementitin küreselleşmesi tam olarak gerçekleşmezse, bu durumda küreselleştirici tavlamanın türleri olan, zig zag veya sarkaç tavlama kullanılabilir. Örneğin, karbonlu çelik sıra ile birkaç defa 740 °C’e kadar ısıtılır ve 680 °C’e kadar soğutulur. Sementit plakası her bir ısıtmada kısmi olarak ostenitte çözünür. Çözünme öncelikli olarak plakanın uçlarından ve kenarlarından gerçekleşir. Her bir soğumada ostenitte çözünmemiş olan sementit plakalardan sementit çökler, çökme öncelikli olarak plaka uçlarına ve kenarlarına uzak yerlerde gerçekleşir. Sıra ile çözünerek ve büyüyerek sementit plakaları yavaş yavaş küreselleşir (Said 2012).

4.2.6 İzotermik Tavlama

Tam tavlamaya oldukça benzeyen ve tam tavlamadaki ostenitleme işlemlerinin tümünün geçerli olduğu izotermik tavlamanın tam tavlamadan farkı ısı işlem uygulanan malzemenin ostenitleme sıcaklığından A_1 sıcaklık değerinin (50-100 °C) altındaki dönüşüm sıcaklık değerine mümkün olduğunca hızlı şekilde soğutulmasıdır. Dönüşüm işlemi tamamlandıktan sonra malzeme oda sıcaklığına kadar serbestçe soğutulabilir. İzotermik tavlama ile ısı işlem süresi tam tavlama göre oldukça kısaltılabilir. Şekil 4.8'de izotermik tavlamanın genel uygulama grafiği gösterilmiştir (Kara 2005).



Şekil 4.8 Ötektoid altı çelikler için izotermik tavlama işleminin TTT diyagramı (Kara 2005).

İzotermik bekletme zamanı, TTT diyagramından belirlenen ostenitin tam izotermal dönüşüm zamanından biraz büyük olmalıdır.

İzotermik bekletme sıcaklığı A_1 noktasına ne kadar yakın olursa, perlitte plakalar arası mesafe o kadar büyük olur ve çelik o kadar yumuşak olur, ancak dönüşüm zamanı da o kadar büyük olur. İzotermik tavlamanın temel amacı çeliği yumuşatma olmasından, pratik olarak öyle bir sıcaklık seçilir ki (A_1 'den 30-100 °C daha düşük), nispeten daha kısa zamanda çeliğin yumuşamasına ulaşılır.

İzotermik tavlamanın her zamanki tavlamaya göre iki avantajı vardır. Eğer hızla soğutma zamanı, izotermal bekletme ve sonraki hızla soğutma zaman toplamı mamulün fırın ile aralıksız yavaş soğutma zamanından az olursa, bu tavlama zamanına göre kazanç sağlar.

İzotermik tavlamanın diğer bir avantajı da çeliğin tüm hacminde homojen yapının elde edilmesidir. Çünkü izotermal bekletmede sıcaklık mamulün kesit yüzeyi boyunca homojen olur ve çeliğin tüm hacminde dönüşüm aynı aşırı soğutma oranında gerçekleşir (Said 2012).

4.2.7 Normalleştirme (Normalizasyon)

Normalleştirme tavlama yöntemi ötektoid altı çelikleri A_{c3} ve ötektoid üstü çelikleri A_{cm} dönüşüm sıcaklıklarının yaklaşık olarak 40-50 °C üstündeki sıcaklıklara kadar ısıtıp, tavladıktan sonra serbest havada soğutma ile yapılır. Normalleştirme tavlama yönteminde amaç tane boyutunu küçültmek, homojen içyapı elde etmek ve çoğunlukla mekanik özelliklerin iyileştirilmesidir. Normalleştirme işleminin amaçları şunlardır:

- Tane küçültmek
- Homojen bir içyapı elde etmek
- Ötektoid üstü çeliklerde tane sınırlarındaki karbürü dağıtmak
- Çeliklerin işlenmesini kolaylaştırmak ve mekanik özelliklerini iyileştirmek
- Yumuşatma tavlama yöntemi tabii tutulan çeliklerin sertlik ve mukavemetini arttırmak

Bu sebeplerden normalleştirme tavlama yöntemi çeliklere son işlem olarak uygulanabilir.

Normalleştirme işleminde soğutma fırın dışında ve sakin havada yapıldığından soğuma hızı nispeten yüksek olur ve bu durum hem ostenitin dönüşümünü hem de en son elde edilen içyapıyı birkaç yönden etkiler. Havada soğutma dengesiz soğuma olduğundan normalize edilmiş çeliğin içyapısındaki ötektoid dışı sementit ve perlit oranlarını hesaplamak için demir-sementit diyagramı kullanılamaz. Havada soğutma sırasında ötektoid dışı fazların oluşumu için yeterli zaman olmadığından normalize edilen ötektoid altı çelikler yumuşatma tavlama yöntemi tabii tutulan çeliklere göre daha düşük oranda ötektoid dışı ferrit, ötektoid üstü çeliklerse daha düşük oranda ötektoid dışı sementit içerirler.

Yumuşatma tavlama yöntemi tabii tutulan ötektoid üstü çeliklerin yapısında oluşan sementit ağının çeliklerin mukavemetini düşürdüğü bilinmektedir. Normalleştirme tavlama yöntemi ise, ötektoid üstü

çeliklerde sementitin parçalanmasını ve bazı durumlarda da büyük ölçüde giderilmesini sağlar. Bu nedenle normalleştirme tavı uygulanan çeliklerin mukavemet değerlerinde artış görülür. Tablo 4.1’de yumuşatma tavına tabi tutulmuş ve normalize edilmiş bazı çeliklerin mekanik özellikleri görülmektedir (Savaşkan 2009).

Tablo 4.1 Bazı çeliklerin yumuşatma tavına tabi tutulmuş ve normalize edilmiş durumlardaki mekanik özellikleri (Savaşkan 2009).

İşlem	Karbon Oranı (%)	Akma Mukavemeti (N/mm ²)	Çekme Mukavemeti (N/mm ²)	Kopma Uzaması (%)	Sertlik (BSD)
Yumuşatma Tavı	0,01	124	283	47	90
	0,20	148	407	37	115
	0,40	303	517	30	145
	0,60	338	667	23	190
	0,80	359	793	15	220
	1,00	359	745	22	195
	1,20	352	703	24	200
	1,40	345	683	19	215
Normalizasyon Tavı	0,01	179	310	45	90
	0,20	310	441	35	120
	0,40	352	586	27	165
	0,60	414	752	19	220
	0,80	483	924	13	260
	1,00	690	1048	7	295
	1,20	690	1055	3	315
	1,40	662	1021	1	300

Normalleştirme genellikle talaş kaldırma ile işlemten önce çeliği yumuşatma, yapı kusurlarını ortadan kaldırmak için ve su vermeden önce metalin içyapısını iyileştirme amacıyla ara operasyon olarak kullanılır. Böylelikle normalleştirmenin ara operasyon olarak görevi tavlamanın görevi gibidir. Ancak normalleştirme her zaman çeliği yumuşatıcı operasyon olarak tavlamanın yerine kullanılamaz. Bu durum şu şekilde açıklanır. Ostenitin aşırı soğumaya yatkınlığı, ondaki karbon ve alaşım elementlerinin artışı ile artar. Bundan dolayı normalleştirmeden ve tavlamadan sonra elde edilmiş olan mekanik özelliklerde ortaya çıkan

fark, çeliğin bileşimine bağlıdır. Örneğin %0,2, %0,45 ve %0,8 C içeren çeliklerin tavlama sonrası sertliği sırasıyla 120, 160 ve 180 HB'ye eşitken aynı C oranına sahip çelikler için normalleştirilmeden sonra sertlik sırasıyla 130, 190 ve 240 HB'ye eşittir.

Normalleştirme tavlama ostentisi zayıf, aşırı soğumaya yatkın az karbonlu çeliklere yumuşatıcı tavlama yerine uygulanabilir. Ancak yüksek karbonlu çelikler için yumuşatıcı tavlama yerine kullanılamaz, çünkü bu çelikler ostentinin aşırı soğumaya yatkınlığından dolayı havada soğutulduğunda önemli derecede sertleşir. Orta ve yüksek alaşımlı çelikler ise, havada soğutulduğunda bu çeliklerde martensit meydana gelebilir, yani havada su verme işlemi gerçekleşir. Normalleştirme kavramı altında öyle bir ısıl işlem anlaşılır ki, havada soğutmada ostentinin çökmesi perlit dönüşüm sıcaklık aralığında gerçekleşir. Bundan dolayı alaşımlı bir çelik havada soğutulduğunda martensit meydana gelirse bu durumun normalleştirmeye hiçbir alakası yoktur.

Normalleştirme, sıcak şekillendirme ve ısıl işlem esnasında oluşan kusurların giderilmesinde tavlama yerine daha yaygın olarak uygulanır. Normalleştirme çoğu durum için tavlama göre daha iyi sonuçlar verir. Örneğin, bantlı yapı çelikte normalleştirme ile daha kolay ortadan kaldırılır. Çünkü ostentite aşırı soğutma uygulandığında ferrit uzanmış olan cüruf ve sülfür katkılarında değil, ostent tanesinin tam hacminde çökler (Said 2012).

4.2.8 Gerilim Giderme Tavı ve Ara Tavı

Gerilim giderme tavı döküm, kaynak, soğuk şekillendirme işlemlerinden sonra oluşan iç gerilmeleri azaltmak için uygulanan tavlama işlemidir. Gerilim giderme tavı metalik malzemeleri dönüşüm sıcaklıklarının altında uygun bir sıcaklığa kadar ısıtma ve sonrasında yavaş soğutma ile uygulanır. Bu işlem dönüşüm sıcaklığı altı ya da kritik sıcaklık altı tavı olarak da bilinir. Çelik malzemeler 540-630 °C arasındaki sıcaklık değerlerinde gerilim giderme tavına tabi tutulurlar.

Ara tavı gerilim giderme tavına benzer. Ara tavı sac veya tel üretiminde ötektoid altı çeliklerin A_{c1} dönüşüm sıcaklığının altındaki bir sıcaklığa (550-680 °C) kadar ısıtılıp yeniden kristalleşme işlemi yapıldıktan sonra tekrar soğutulması işlemidir (Savaşkan 2009). Ara tavı için tav süresi 0,5-1 saat arasındadır. İşlemin başarılı sonuç vermesi için soğutma yavaş bir şekilde yapılmalıdır. Soğutma yavaş şekilde yapılmazsa tekrardan iç gerilmeler oluşabilir.

BÖLÜM 5

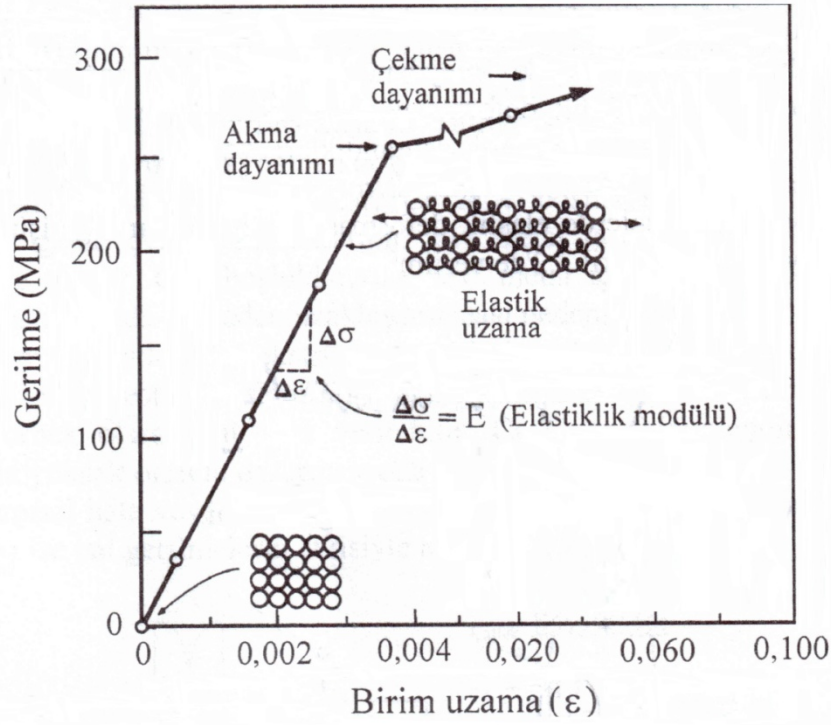
MALZEMELERİN DEFORMASYONU

Malzemeler, uygulanan kuvvetin büyüklüğüne göre elastik veya plastik deformasyona uğrayarak şekil değiştirebilirler.

5.1 ELASTİK DEFORMASYON

Elastik şekil değiştirme, kuvvet uygulanan malzemeye ait atomların komşu atomlardan ayrılmadan aralarındaki mesafenin değişmesi anlamına gelir. Malzemeye uygulanan kuvvet kaldırıldıktan sonra malzeme eski boyutlarına dönüyorsa bu tip deformasyona elastik deformasyon denir. Elastik deformasyonun iyi anlaşılması için atomların birbirine bir yayla bağlanmış oldukları ve bu yayın kopmadığı düşünülebilir. Elastik deformasyonda uygulanan kuvvet sonucu bu yay gerilir ancak kopmaz. Kuvvet kalktığında ise atomlar eski haline döner.

Bir malzemenin elastik davranışını göstermek için malzemenin çekme diyagramından faydalanılır. Çekme diyagramında gerilme ile birim uzamanın lineer olduğu bölge elastik bölgedir. Kristal yapılı malzemelerde, uygulanan çekme gerilmesi (σ) ile elde edilen birim uzama (ϵ) arasında Hook kanunu ile ifade edilen doğrusal bir ilişki vardır ($\sigma=E\epsilon$). Çekme diyagramında elastik kısma ait doğrunun eğimi malzemenin elastikliğini veya elastisite modülünü (E) verir. Şekil 5.1’de bir alüminyum alaşımının elastik deformasyonunu gösteren gerilme-birim uzama eğrisi görülmektedir (Savaşkan 2009).



Şekil 5.1 Bir alüminyum alaşımının elastik deformasyonunu gösteren gerilme-birim uzama eğrisi (Savaşkan 2009).

5.2 PLASTİK DEFORMASYON

Malzemeye uygulanan kuvvetin malzemenin elastiklik sınırını aşması durumunda malzemede kalıcı şekil değişimi meydana gelir. Malzeme kuvvetin etkisiyle başlangıçtaki biçimini kaybeder. Bu şekil değişimine plastik deformasyon denilir. Plastik şekil değiştirme yeteneği, malzemelerin kıyasında kullanılan karakteristik özelliklerin başında gelir. Haddelme, presleme, markalama, dövme, derin çekme, tel çekme ve ekstrüzyon gibi şekil verme işlemleri plastik şekil değişimi ile ilgilidir. Şekil değiştirme işlemlerinin doğru yapılabilmesi için plastik şekil değiştirme mekanizmalarının ve plastik şekil değiştirme esnasında malzeme davranışlarının iyi bilinmesi gerekir.

5.2.1 Metalik Malzemelerde Plastik Deformasyon Mekanizmaları

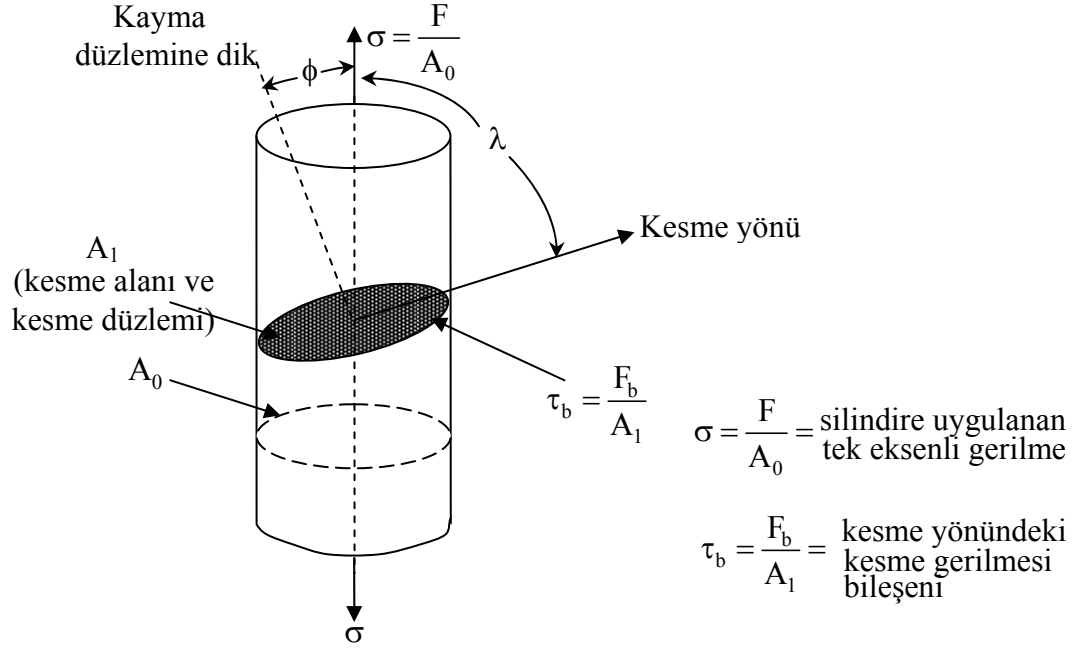
Metalik malzemelerde plastik deformasyon kayma, ikizlenme ve tane sınırı kayması gibi plastik deformasyon mekanizmalarından biri veya birkaçı ile meydana gelir.

5.2.1.1 Kayma

Kayma, dislokasyonların hareketi sonucu atomların birbiri üzerinde kayması veya ötelenmesidir. Kaymanın meydana gelmesi için kristal yapı malzemelerin atom düzlemlerine belli bir değerin üstünde kayma gerilmesi etki etmelidir. Atom düzlemlerine etki eden kayma gerilmesi dislokasyonlar üzerinde kuvvet oluşturarak dislokasyonları iter. Kayma olayının gerçekleşmesi için dislokasyonları iten kuvvetin dislokasyon hareketine karşı olan direnci yenmesi gerekir. Kayma gerilmesinin nasıl oluştuğunu ve hangi parametrelere bağlı olduğunu anlamak için Schmid yasasını incelemek gerekir.

Schmid Yasası

Saf metalin bir silindirik tek kristalini düşünelim. Bu kristal üzerine etkiyen bir eksenli gerilmeyle, bunun sonucunda silindir içindeki kayma sisteminde oluşan kesme gerilmesi bileşeni arasında bağıntı vardır. Şekil 5.2’de gösterildiği gibi, bir eksenli bir σ gerilmesinin bir metal silindir üzerine etkidiğini düşünelim. A_0 ’ı eksenel kuvvet F ’ye dik alan, A_1 ’i de kuvvetin F_b bileşeninin etkidiği kayma düzlemi veya kesme alanı olarak kabul edelim. Kayma düzlemini ve kayma yönünü ϕ ve λ açılarını tanımlayarak belirleyebiliriz. ϕ , bir eksenli kuvvetle A_1 alanı normali arasındaki açıdır, λ ise bir eksenli kuvvetle kayma yönü arasındaki açıdır. Kayma gerilmesi Eşitlik 5.1’deki gibi hesaplanır. Kayma alanına dik kuvvet Eşitlik 5.2’deki gibi, kayma alanı da Eşitlik 5.3’deki gibi ifade edilir ve hesaplanırsa kayma gerilmesi Eşitlik 5.4’e eşit olur (Kınıkoğlu 2006).



Şekil 5.2 Çekme kuvveti uygulanan silindir biçimindeki tek kristalin kayma düzlemi üzerindeki kuvvet bileşenleri (Kınıkoğlu 2006).

$$\tau_b = \frac{F_b}{A_1} \quad (5.1)$$

$$F_b = F \cos \lambda \quad (5.2)$$

$$A_1 = A_0 / \cos \phi \quad (5.3)$$

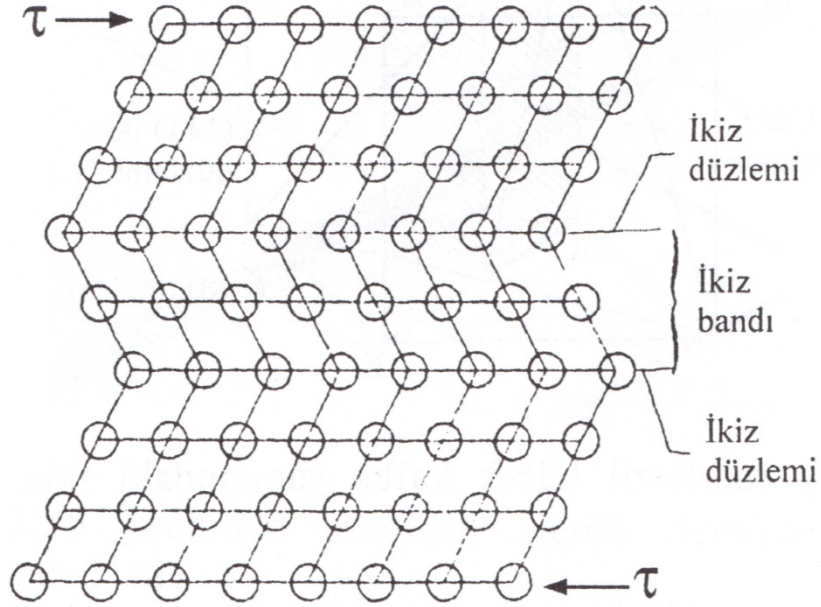
$$\tau = \frac{F \cos \lambda}{A_0 / \cos \phi} = \frac{F}{A_0} \cos \lambda \cos \phi = \sigma \cos \lambda \cos \phi \quad (5.4)$$

Bu denklemden;

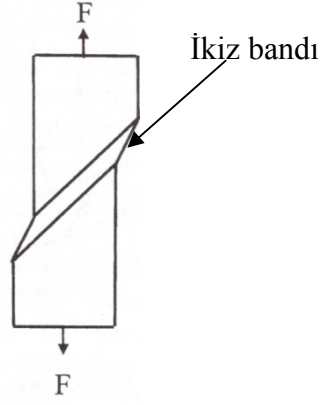
- F : Malzemeye etki eden kuvvet
- A_0 : Malzemenin ilk kesit alanı
- ϕ : Bir eksenli kuvvetle A_1 alanı normali arasındaki açı
- λ : Bir eksenli kuvvetle kayma yönü arasındaki açıdır.

5.2.1.2 İkizlenme

İkizlenme, kaymanın zor olduğu durumlarda örneğin düşük sıcaklıklarda veya yüksek deformasyon hızında meydana gelen plastik şekil değiştirme mekanizmasıdır. İkizlenme hem toplam şekil değişimine katkıda bulunur hem de kaymayı kolaylaştıracak şekilde atom düzlemlerini yönlendirir. İkizlenme olayı atom düzlemlerinin ikiz düzlemine paralel şekilde ters yöne yönelmeleri sonucu birbirinin simetrisi şeklinde iki kısma bölünmesi olarak tanımlanabilir. İkizlenme bölgesindeki atom düzlemlerinin hareket miktarları, bunların ikiz düzlemine olan uzaklıkları ile orantılıdır. Kristal yapının ikizlenmiş kısmı, ikizlenmemiş kısmının aynadaki görüntüsü gibidir. İkizlenmenin kristalografik gösterimi Şekil 5.3'de, ikiz bandının gösterimi de Şekil 5.4'de gösterilmiştir (Savaşkan 2009).



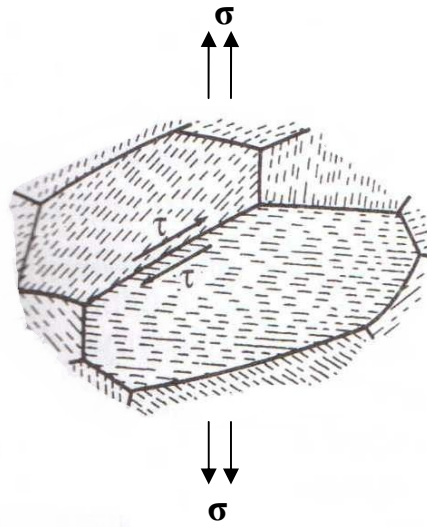
Şekil 5.3 İkizlenmenin kristalografik gösterimi (Savaşkan 2009).



Şekil 5.4 İkiz bandının görünümü (Savaşkan 2009).

5.2.1.3 Tane Sınırı Kayması

Bu deformasyon mekanizması çok kristalli malzemelerde yüksek sıcaklıkta ve düşük deformasyon hızlarında gerçekleşir. Tane sınırı kayması, tanelerin tane sınırı boyunca kayarak birbirlerine göre yer değiştirmeleri manasına gelir. Tane sınırı kayması Şekil 5.5’de gösterilmiştir. Malzemeye uygulanan kuvvet tane sınırlarında kayma gerilmesi (τ) oluşturur. Oluşan kayma gerilmesinin tane sınırlarının kayma mukavemetinden yüksek olması durumunda kayma meydana gelir. Tane sınırlarının çekme eksenine ile 45° ’lik açı yapması durumunda maksimum kayma gerilmesi oluşur ve en büyük kayma bu sınırlarda meydana gelir. Tane boyutu küçüldükçe tane sayısı ve dolayısıyla tane sınırı sayısı fazla olacağından tane sınırı kaymasının toplam deformasyona katkısı yüksek olur (Savaşkan 2009).

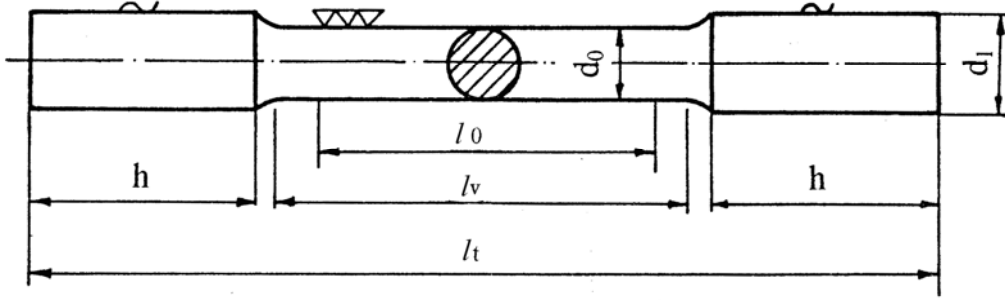


Şekil 5.5 Tane sınırı kaymasının şematik gösterimi (Savaşkan 2009).

BÖLÜM 6

ÇEKME DENEYİ

Çekme deneyi, belli standartlara göre hazırlanan deney numunelerinin tek ekseninde ve sabit bir hızla koparılmaya kadar çekilmesi işlemidir. Çekme deneyi için numune tipi büyük ölçüde malzemenin biçimine göre seçilir. Bunun için öncelik olarak numuneler talaş kaldırma işlemi ile standartlara uygun olarak hazırlanır. Şekil 6.1’de TS 138 A normuna göre hazırlanmış daire kesitli (yuvarlak) silindirik başlı çekme numunesi görülmektedir.



Şekil 6.1 Daire kesitli ve silindirik başlı çekme numunesi (Yıldızlı 2011).

Bu şekilde d_0 numunenin çapını, d_1 baş kısmının çapını ($1,2d_0$), l_v inceltmiş kısmın uzunluğunu ($l_0 + d_0$), l_0 ölçü uzunluğunu ($5d_0$), h baş kısmının uzunluğunu ve l_t numunenin toplam uzunluğunu göstermektedir. Uluslararası standartlara uygun hazırlanan numunelerde genelde $l_0=5,65\sqrt{A_0}$ ve $l_0=11,3\sqrt{A_0}$ bağıntısı geçerlidir. Burada A_0 numunenin ilk kesit alanını göstermektedir (Yıldızlı 2011).

6.1 ÇEKME DENEYİNDEN ELDE EDİLEN VERİLER

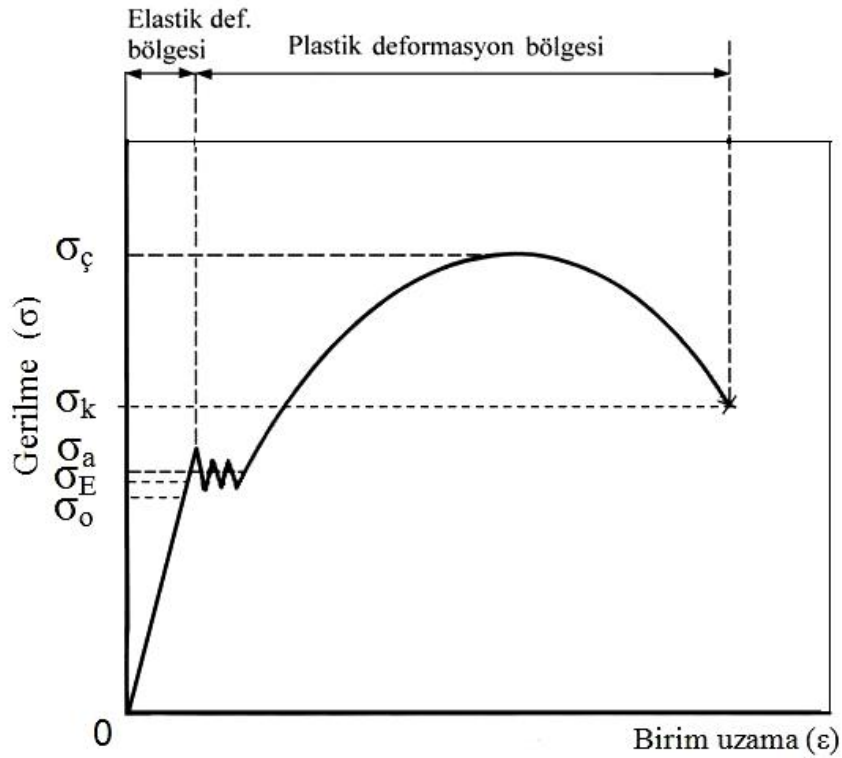
Çekme deneyinden elde edilen gerilme ve uzama değerleri Eşitlik 6.1 ve Eşitlik 6.2 yardımıyla bulunur.

$$\text{Çekme gerilmesi } (\sigma) = F/A_0 \quad (6.1)$$

$$\text{Birim uzama (e veya } \varepsilon) = \Delta l/l_0 \quad (6.2)$$

Burada F çekme kuvvetini, A_0 deney numunesinin ilk kesit alanını, l_0 numunenin ilk ölçü uzunluğunu ve Δl numunede meydana gelen uzama miktarını gösterir.

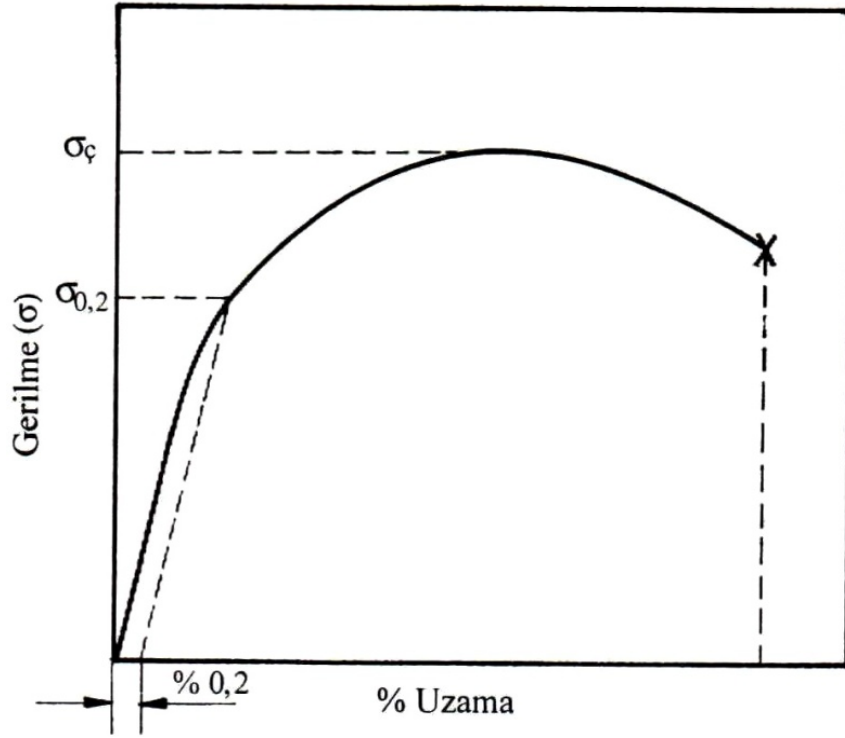
Çekme deneyi sonucunda kuvvet (F)-uzama (Δl) eğrisi elde edilir. Ancak bu eğri farklı kesit alan ve farklı ilk uzunluk için yetersiz kalır. Aynı malzemedeki A_0 kesit alanlı bir numuneye F kuvveti ile Δl kadar bir deformasyon verildiğini düşünelim. Eğer aynı malzeme $2A_0$ kadar kesit alanına sahip olsaydı bu malzeme için Δl deformasyon miktarı değişirdi. Yine l_0 uzunluğunda bir malzemenin F kuvveti ile Δl kadar deformasyona uğratılmış olduğunu düşünelim. Eğer aynı malzeme $2l_0$ uzunluğuna sahip olsaydı bu malzeme için yine Δl miktarı değişirdi. Yani aynı malzemeyi ifade etmek için bile kesit alanına ve malzeme uzunluğuna göre birçok eğri kullanmak gerekirdi (Akgün vd. 2003). Bu nedenle, bu eğri yerine daha evrensel olan gerilme-birim uzama eğrisi kullanılır. Şekil 6.2’de düşük karbonlu yumuşak bir çeliğin gerilme-birim uzama eğrisi verilmiştir.



Şekil 6.2 Düşük karbonlu yumuşak bir çeliğin çekme diyagramı (Yıldızlı 2011).

Çekme deneyi sonucunda malzemenin orantı sınırı, elastiklik sınırı, akma sınırı ve çekme dayanımı gibi mukavemet değerleri ile kopma uzaması, kopma büzülmesi ve tokluk gibi süneklik değerleri belirlenir. Malzemenin cinsine, kimyasal bileşimine ve metalografik yapısına göre değişen bu özellikler aşağıda açıklanmaktadır.

- a) Orantı sınırı (σ_0):** Gerilme-birim uzama diyagramında Hooke kanununun yani $\sigma=E\varepsilon$ bağıntısının geçerli olduğu doğrusal kısmı sınırlayan gerilme değeridir. Bu bağıntıda orantı katsayısına (E) elastiklik veya esneklik modülü denir ve bu katsayı malzemenin elastik bölgesini ifade eden doğrunun eğimine eşittir. Bir malzemenin elastiklik modülü ne kadar büyükse, elastik şekil değiştirmeye karşı direnci de o kadar büyük olur. Bir malzemenin elastiklik modülü herhangi bir ısı işlem veya mekanik işlemle değiştirilemez.
- b) Elastiklik sınırı (σ_E):** Malzemeye uygulanan kuvvet kaldırıldığı zaman malzemede plastik uzamanın görülmediği en yüksek gerilme değeri olarak ifade edilir. Genellikle, elastiklik sınırı orantı sınırına eşit kabul edilir.
- c) Akma dayanımı (σ_a):** Uygulanan çekme kuvvetinin sabit olmasına rağmen plastik deformasyonun önemli ölçüde arttığı ve çekme diyagramının doğrusallıktan saptığı ilk kısma karşı gelen gerilme değeridir. Akmanın başladığı gerilme değerine üst akma sınırı ($\sigma_{a,u}$) ve akmanın devam ettiği ortalama gerilme değerine alt akma sınırı ($\sigma_{a,a}$) denilir. Şekil 6.2’de gösterildiği gibi düşük karbonlu çelikler akma sınırını belirgin olarak gösterebilir. Ancak bazı malzemeler akma sınırını belirgin şekilde göstermeyebilirler. Bu durumda, genelde %0,2’lik plastik uzamaya ($\varepsilon_{plastik} = 0,002$) karşı gelen çekme gerilmesi akma sınırı veya akma dayanımı olarak alınır. Şekil 6.3’de belirgin akma göstermeyen bir malzemenin çekme diyagramı ile bu malzemenin akma dayanımının nasıl belirlendiği görülmektedir.



Şekil 6.3 Belirgin akma göstermeyen bir malzemenin akma dayanımının belirlenmesine ilişkin diyagram (Yıldızlı 2011).

d) Çekme dayanımı (σ_c): Malzeme kopuncaya veya kırılıncaya kadar ki taşıyabileceği en yüksek çekme gerilmesi olarak tanımlanır. Bu gerilme çekme diyagramındaki en yüksek gerilme değeridir. Deney numunesinin deney esnasında maksimum taşıdığı kuvvetin (F_{maks}) ilk kesit alana (A_0) bölünmesiyle bulunur.

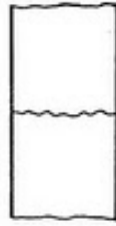
e) Kopma dayanımı (σ_k): Çekme deneyinde, numune kesiti kuvveti artık kaldıramayacak duruma geldiğinde kopma meydana gelir. Çekme diyagramında kaydedilen bu son noktadaki gerilme dayanımına kopma dayanımı denilir.

f) Kopma uzaması (KU): Çekme deneyine tabi tutulan numunenin (çekme numunesi) boyunda meydana gelen en yüksek yüzde plastik uzama oranı olarak tanımlanır. Çekme numunesinin kopan kısımları bir araya getirilerek son boyu ölçülür. Numune boyundaki uzama $\Delta l = l_k - l_0$ formülüyle bulunur. Burada l_0 numunenin ilk uzunluğu, l_k ise kopma anındaki uzunluğudur. Kopma uzaması;

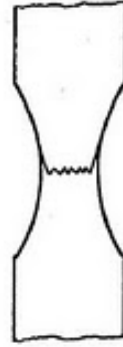
$$KU(\%) = \frac{\Delta l}{l_0} \times 100 \text{ bağıntısı ile bulunur. Bir malzemede akma ve çekme}$$

dayanımını arttıran etkenler genellikle sünekliği azaltırlar. Plastik şekil değiştirmeye yatkın olmayan malzemelere gevrek malzemeler denir. Gevrek malzemeler teorik olarak çok fazla kopma uzaması göstermezler. Pratikte %1-2 gibi düşük oranlarda kopma uzaması gösteren malzemeler gevrek kabul edilir.

- g) Kopma Büzülmesi (KB):** Çekme numunesinin kesit alanında meydana gelen en büyük yüzde daralma veya büzülmedir. $KB(\%) = \frac{A_0 - A_k}{A_0} \times 100$ bağıntısı ile yüzde büzülme hesaplanır. Burada A_0 deney numunesinin ilk kesit alanını A_k ise kopma anındaki kesit alanını ifade eder. Kopma büzülmesi de kopma uzaması gibi sünekliğin bir göstergesidir. Gevrek malzemeler kopmadan önce çok fazla büzülme göstermezken, sünek malzemeler belirgin şekilde büzülme gösterir. Şekil 6.4'de gevrek ve sünek malzemelerin kırılması görülmektedir.



(a) Gevrek malzemenin kırılması (büzülme yok)

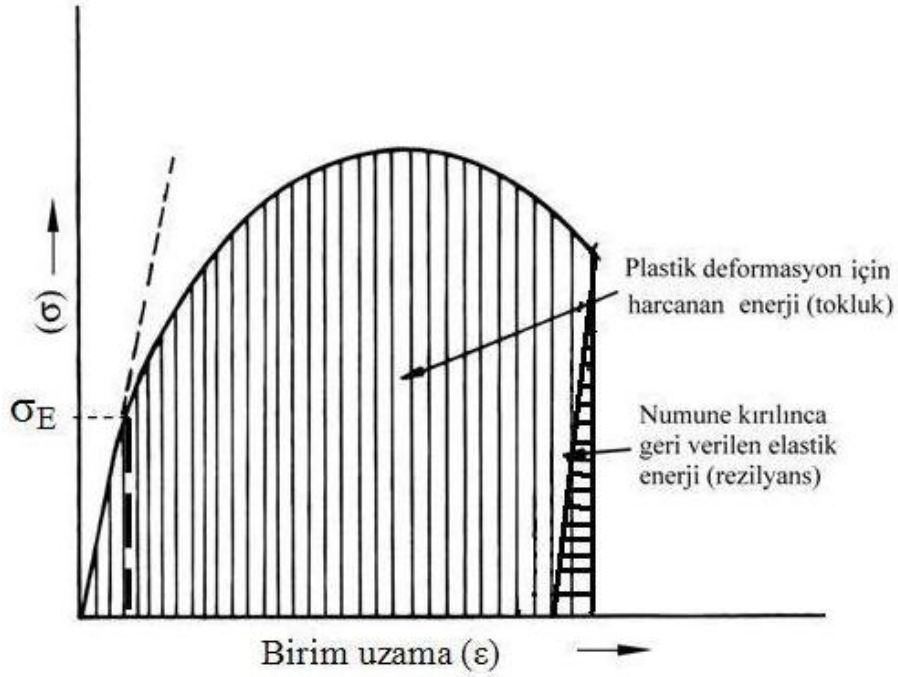


(b) Sünek malzemenin kırılması (büzülme var)

Şekil 6.4 Gevrek ve sünek malzemelerin kırılma şekilleri (Yıldızlı 2011).

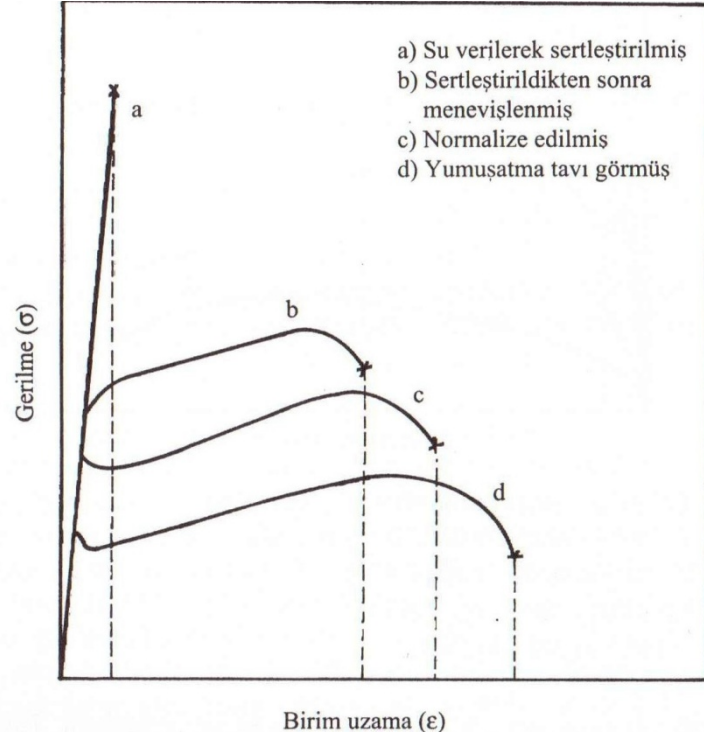
- h) Rezilyans:** Malzemenin elastik şekil değiştirmesi için harcanan enerji veya elastik şekil değişimi sırasında malzemenin depoladığı enerji demektir. Bu enerji, gerilme-birim uzama eğrisinin elastik kısmının altında kalan alan ($\sigma_{el} \cdot \epsilon_{el} / 2$) ile belirlenir ve numune kırılınca geri verilir (Şekil 6.5).
- i) Tokluk:** Plastik şekil değişimine uğrayan malzemenin kırılıncaya ya da kopuncaya kadar depoladığı toplam enerji miktarıdır. Malzemenin kırılmaya veya kopmaya karşı direncinin bir ölçüsü olan tokluk, genellikle gerilme-birim uzama

eğrisinin altında kalan alanın $\left(\int_0^{\epsilon_k} \sigma \cdot d\epsilon\right)$ hesaplanması ile bulunur. Formüldeki ϵ_k malzeme kırılıncaya kadar malzemede meydana gelen toplam birim şekil değiştirme miktarıdır. Tokluğun gerilme-birim uzama eğrisi ile belirlenişi Şekil 6.5’de gösterilmiştir. Malzemenin kırılmaya karşı gösterdiği direncin ölçüsü olan tokluğun karşıtı ise gevrekliktir (Yıldızlı 2011).



Şekil 6.5 Gerilme-birim uzama eğrisi yardımıyla şekil değiştirme enerjilerinin (rezilyans ve tokluk) belirlenmesi (Yıldızlı 2011).

Malzemelerin mekanik özellikleri içyapılarına bağlıdır. İçyapı ise ısı işlemlerle değiştirilebilir. Bu nedenle malzemeye uygulanan ısı işlem türüne göre malzemenin mekanik özellikleri değişebilir. Şekil 6.6’da imalat çeliğine (C60) uygulanan ısı işlemlerden sonra elde edilen çekme diyagramları bu durumu göstermektedir (Savaşkan 2009).



Şekil 6.6 İmalat çeliğine (C60) uygulanan farklı ısı işlemlerden sonra elde edilen çekme diyagramları (Savaşkan 2009).

BÖLÜM 7

POLİKRİSTALLERİN DEFORMASYON PEKLEŞMESİ

Farklı kafes yapısına sahip saf polikristallerin çekme eğrileri birbirlerine çok benzerler. Elastik deformasyon bölgesinden sonra pekleşme görülür ve bu pekleşme Eşitlik 7.1'deki parabolik fonksiyon ile yazılabilir (Zolotorevski 1983).

$$S = S_0 + A \times e^n \quad (7.1)$$

Denklemden;

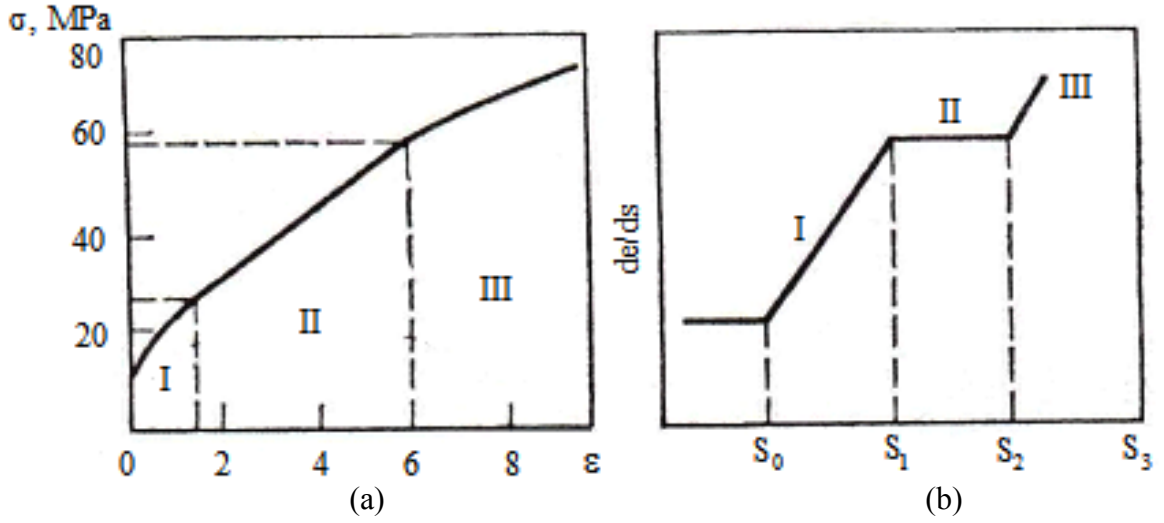
S: gerçek gerilme değeri

A: sabit bir katsayı

e: gerçek şekil değiştirme değeri

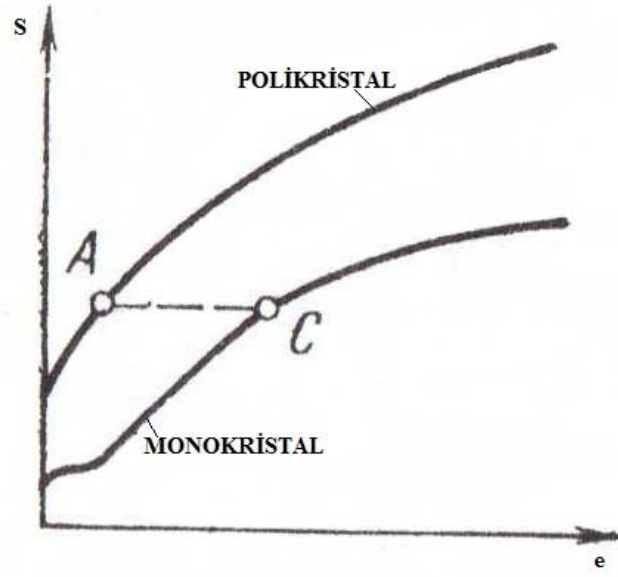
n: pekleşme katsayısıdır ($0 < n < 1$).

YMK kafesli metallerin çekme diyagramlarında düşük sıcaklıklarda ($T \leq 0,2.T_{er}$ K) bazı durumlarda pekleşmenin 3 bölgesi gözetilir (Şekil 7.1a). %1-2 uzamaya kadar S ve e arasında parabolik bağlantı, sonra çizgisel, daha sonra ise yeniden parabolik bir bölge söz konusudur. Örneğin; Nikel ve Bakır üzerinde şu 3 bölgeyi net olarak görmek mümkündür. Eğer koordinat eksenleri S-de/ds için yeniden yapılırsa Ni ve Cu için 3 bölge görülebilir (Şekil 7.1b). Bu koordinatlarda makro elastik bölge (S_0 'a kadar) yataydır. Sonra ise parabolik pekleşmeye uygun olarak I. bölge de/ds deformasyon pekleşme katsayısıyla ters orantılıdır. Çizgisel pekleşme gözetilen II. bölgede de/ds sabit kalır, III. bölgede ise pekleşme katsayısının şiddetli azalması nedeniyle de/ds yeniden büyür (Şekil 7.1b).



Şekil 7.1 YMK kafesli polikristallerin plastik deformasyon aşamaları (Zolotorevski 1983).

Eğer aynı metalin mono ve polikristallerinin deformasyon pekleşme grafikleri birbiriyle karşılaştırılırsa (Şekil 7.2) görülebilir ki bu grafiklerin yüksek deformasyona uygun bölgesi polikristal ve mono kristaller için hemen hemen aynıdır. Ancak polikristallerin pekleşme katsayı değeri monokristalden fazladır. Çok önemli bu durum polikristallerde tane sınırlarının etkisiyle ilgilidir. Böylelikle deformasyon pekleşme katsayısı, akma gerilmesi seviyesi polikristallerde monokristallere göre yüksektir ve deformasyon esnasında gerçekleşen avantajlı kayma aşaması hemen hemen gözetilmez ve birden plastik deformasyonun başlanması ile tane sınırlarında dislokasyonların toplanması nedeniyle şiddetli pekleşme gerçekleşir. Ancak polikristallerin monokristallere göre pekleşmesinin şiddetli olarak artması plastik deformasyonun başlama aşamasında gerçekleşir (Zolotorevski 1983).



Şekil 7.2 Monokristal ve polikristallerin deformasyon pekleşme grafiği (Zolotorevski 1983).

BÖLÜM 8

LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

Kara (2005) AISI 1030, AISI 8620 ve AISI 1016 çeliklerini Fe-Fe₃C faz diyagramında ostenit bölgede farklı sıcaklıklarda tavlarken çeliklerin tane boyutunu değiştirmiştir. Tavlama sıcaklıklarının artmasıyla çeliklerin tane boyutu da artmış ve buna bağlı olarak çeliklerin akma dayanımı, çekme dayanımı vs. gibi mukavemet değerlerinde azalma olduğu gözlemlenmiştir ve kırılma tokluğunun artan tane boyutu ile azaldığı belirlenmiştir.

Eroğlu (1997) çalışmasında düşük karbonlu bir çelikte kaynak enerji girişinin ve başlangıç tane boyutunun kaynağın mikro yapısına ve mekanik özelliklerine etkisini incelemiştir. Çalışmasında SAE/AISI 1020 çeliğinden elde edilen numuneleri tavlarken 4 farklı tane boyutu elde etmiş ve tane boyutları değiştirilen numunelerin ısı iletkenlik katsayılarını ve ısı kapasitelerini belirlemiştir. Yapılan ölçümler sonucunda tane boyutu artışıyla beraber ısı iletkenliğinin azaldığı ve ısı kapasitesinin arttığını gözlemlemiştir.

Gök (2010) çalışmasında SAE/AISI 1030 ve SAE/AISI 4130 çeliklerinin sertleşme kabiliyetine tane boyutunun etkisini incelemiştir. Bahsedilen çeliklerden Jominy deney numuneleri yapılmış ve numunelerin tane boyutunu değiştirmek için numuneler 900 °C, 1000 °C, 1100 °C, 1200 °C’de tavlansmıştır. Yapılan deneyler sonucunda Gök tavlama sıcaklığı arttıkça tane boyutunun arttığı ve artan tane boyutuna bağlı olarak su verme derinliğinin de arttığı sonucuna varmıştır.

Güven (2006) çalışmasında metal ve alaşımlarında pekleşme karakterlerini inceleyebilmek için gerekli olan pekleşme üsteli ile malzemelerin süneklikleri arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Pekleşme üstelinin tayini için Reihle, M.’nin önerdiği yöntemi ve ASTM E 646 – 00 test yöntemini kullanmıştır. Güven numune doğrultusuna göre pekleşme üstelinin artmasıyla numunede kopma uzamasının arttığı, malzeme için maksimum yükten sonra oluşan şekil değişiminin üniform olmaması sebebiyle, maksimum yükten sonraki uzama için pekleşme

üstelinin kopma uzamasını doğrudan etkileyen bir değişken olmadığı, pekleşme üstelinin maksimum uzamaya kadar olan uzamayı doğrudan etkilediği sonuçlarını elde etmiştir.

Andersson (2005) yapmış olduğu çalışmada tane boyutu çeşitliliğin yorulma ömrü üzerine etkisini incelemiştir. Çalışmada tane yapısını simüle etmek için Poisson-Voronoi modeli, küçük çatlak büyümesini simüle etmek için ise Navarro modeli kullanılmıştır. Çalışma sonucunda farklı boyutlarda tanelere sahip olan metallerin eşit boyutlarda tanelere sahip olan metallere göre daha uzun yorulma ömrüne sahip olduğu tespit edilmiştir.

Antoine vd. (2006) çalışmalarında titanyum arayer atomsuz çelik türünün mikroyapısının pekleşme katsayısı üzerine etkisini araştırmışlar ve pekleşme katsayısının değerini mikroyapı parametrelerine bağlı olarak hesaplayabilecek ampirik bir formül elde etmeyi amaçlamışlardır. Bu amaçla farklı tane boyutuna sahip malzemeler hazırlanarak bu malzemeler çekme deneyine tabi tutulmuş ve pekleşme katsayısı ile akma gerilmesi arasında basit lineer bir ilişki kurulmuştur. Tane boyutunu değiştirmek için malzemelere ısıtma işlemi uygulanmıştır. Sonuç olarak mikroyapının değiştirilmesi ve ısıtma işleminin ayarlanması ile pekleşme katsayısının da değiştirilebileceği, tane boyutunun artırılması ile pekleşme katsayısının da arttığı ve akma gerilmesi ile pekleşme katsayısı arasında doğrusal bir bağlılık olduğu sonuçlarına varılmıştır.

Qiu vd. (2012) çok ince taneli çeliklerin pekleşmesini ölçmek için pekleşme katsayısını kullanmışlardır. Yüzde karbon oranı 0,22'nin altında olan çelik türlerinin pekleşme katsayısı değerlerini, akma gerilim değerleri ya da ferrit tane boyutları ile doğrudan hesaplamayı amaçlamışlardır. Çalışmalarında pekleşme katsayısının artan akma gerilmesi ile lineer bir şekilde düştüğünü ve akma gerilmesinin 620 MPa'nın üzerindeki değerlere çıktığında ya da tane boyutunun (d) 1 μm 'nin altındaki değerlere indiğinde pekleşme katsayısının sıfır olduğu sonucuna varmışlardır.

Nagarjuna vd. (2006) Cu-26Ni-17Zn alaşımının tane boyutu ve pekleşme katsayısı arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Çalışmalarında alaşıma farklı tavlama sıcaklığı ve farklı tavlama süresi uygulayarak 15 ile 120 μm arasında tane boyutları elde etmişlerdir. Alaşımdan çekme numuneleri hazırlamışlar ve çekme numunelerini çekme testine tabi tutmuşlardır. Netice olarak artan birim şekil değiştirme ve azalan tane boyutu ile gerçek gerilmenin arttığı, Hall-Petch eşitliğindeki k değerinin artan tane boyutu ile azaldığı ve pekleşme katsayısının değişen

tane boyutlarına rağmen hemen hemen aynı kalması ile pekleşme katsayısının tane boyutundan bağımsız bir parametre olduğu sonucuna varmışlardır.

Fawzy (2008) çalışmasında 300-393 K aralığındaki sıcaklıklarda, farklı tane boyutuna sahip Al-0.86 wt%Mn-0.28 wt%Fe alaşım numunelerinde deformasyon sıcaklığının, birim şekil değiştirme oranının ve tane çapının pekleşme davranışı üzerine etkisini incelemiştir. Çekme deneyleri $\dot{\epsilon} = 2,2 \times 10^{-4}$ 'den $1,0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 'e farklı birim şekil değiştirme oranlarıyla yapılmıştır. Pekleşme parametrelerinin; akma gerilmesinin (σ_y), kırılma gerilmesinin (σ_f), pekleşme katsayısının (n) ve toplam uzama miktarının (ϵ_T) birim şekil değiştirme oranı ($\dot{\epsilon}$), deformasyon sıcaklığı (T) ve numunenin tane çapı (d) ile önemli derecede etkilendiği görülmüştür. Tane çapı değişimine bağlı olarak 2 farklı aşama gözlemlenmiştir. İlk aşamada tane çapının yaklaşık 53 μm 'ye kadar artması ile σ_y , σ_f , n ve ϵ_T değerlerinin de arttığı, ikinci aşamada ise tane çapının daha fazla artması ile bu parametrelerde sert şekilde düşme olduğu görülmüştür.

Fawzy ve Sobhy (2007) çalışmalarında faz dönüşümü esnasında tane çapının Zn-1 wt.% Cu alaşımının pekleşme davranışı üzerine etkisini incelemiştir. Deformasyon sıcaklığının artmasına bağlı olarak incelenen numunelerin pekleşme parametrelerinde; kırılma gerilmelerinde, akma gerilmelerinde ve pekleşme katsayılarında düşüş görülmüştür. Pekleşme parametreleri dönüşüm sıcaklığının öncesinde ve sonrasında farklı 2 davranış sergilemişlerdir. Pekleşme parametrelerindeki düşüş oranının deformasyon sıcaklığının 513 K'nin üstündeki değerlere çıkmasıyla arttığı ve deformasyon sıcaklığının daha büyük değerlere çıkarılmasıyla bu oranın azaldığı görülmüştür. Tane çapının artması ile pekleşme parametrelerinin de arttığı sonucuna varılmıştır. Boyun vermeye karşı maksimum direncin dönüş noktasında (513 K) olduğu tespit edilmiştir.

BÖLÜM 9

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

9.1 TEZ ÇALIŞMASINDA KULLANILAN ÇELİKLER

Tez çalışmasında kullanılan çelikler Ankara Ostim’de bulunan Çağ Çelik’ten alınmıştır. Çeliklerin kimyasal analizleri KOSGEB’in Ankara Ostim’de bulunan laboratuvarında yaptırılmıştır. Tane boyutunun sıcaklıkla kolay şekilde değişmesi için çelikler düşük karbonlu olarak, alaşım elementlerinin etkisinin incelenmesi için ise alaşımlı ve alaşımsız olarak seçilmiştir. Düşük karbonlu alaşımsız çelik ve düşük karbonlu alaşımlı çeliklerden her gruptan on bir tane olmak koşulu ile toplamda yirmi iki adet numune hazırlanmıştır. AISI 1020 düşük karbonlu alaşımsız çeliğinin kimyasal analiz sonuçları Tablo 9.1’de ve AISI 8620 düşük karbonlu alaşımlı çeliğinin kimyasal analiz sonuçları Tablo 9.2’de verilmiştir.

Tablo 9.1 AISI 1020 çeliğinin kimyasal içeriği.

AISI 1020	C	Si	Mn	P	S	Cu
	0,174	0,119	0,482	0,025	0,030	0,313
	Al	Cr	Mo	Ni	V	Ti
	0,014	0,133	0,007	0,109	<0,001	<0,001
	Nb	Co	W	Sn	Pb	B
	0,000	0,003	0,034	0,0286	<0,001	0,0003
	Zn	Zr	Bi	Sb	As	N
	<0,001	0,003	<0,001	<0,001	0,026	0,021

AISI 1020 düşük karbonlu alaşımsız çeliğinin kullanım alanı olarak dingil, şaft, mil, vida bağlantı elemanları, kaynak gerektiren makine parçaları, dişliler vs. sayılabilir.

Tablo 9.2 AISI 8620 çeliğinin kimyasal içeriği.

AISI 8620	C	Si	Mn	P	S	Cu
	0,230	0,258	0,736	0,006	0,008	0,041
	Al	Cr	Mo	Ni	V	Ti
	0,067	0,550	0,176	0,507	<0,001	0,002
	Nb	Co	W	Sn	Pb	B
	0,000	<0,001	0,035	0,000	<0,001	0,0002
	Zn	Zr	Bi	Sb	As	N
	0,002	0,013	<0,001	<0,001	0,002	0,008

Sementasyon çeliği sınıfına giren AISI 8620 düşük karbonlu alaşımlı çeliğinin kullanım alanı olarak oto dişlileri, traktör dişlileri, pimler, miller, zorlamalı parçalar, vites kutusu, direksiyon mekanizması, diferansiyel yüzük dişlileri, uçak motorları, kam mili vs. gösterilebilir.

9.2 ÇELİKLERİN NUMARALANDIRILMASI

Deney numuneleri numaralandırılırken 111 gibi bir sistem kullanılmıştır. Burada soldan ilk basamaktaki rakam çeliğin düşük karbonlu alaşımsız ya da düşük karbonlu alaşımlı çelik olup olmadığını, ikinci basamaktaki rakam bu çeliğe T₁, T₂, T₃ sıcaklık değerlerinden hangisinde ısıtım işlemi uygulandığını ve son basamaktaki rakam ise çeliğin bu gruptaki kaçınıcı numune olduğunu ifade eder.

Tablo 9.3 Çeliklerin numaralandırılması.

	AISI 1020			AISI 8620		
	1	2	3	1	2	3
T ₁ (950 °C)	111	112	113	211	212	213
T ₂ (1100 °C)	121	122	123	221	222	223
T ₃ (1250 °C)	131	132	133	231	232	233

Tablo 9.3’de gösterilen numuneler ısıtım işlemi uygulanmış numunelerdir. Ayrıca ısıtım işlemi uygulanmamış düşük karbonlu alaşımsız ve düşük karbonlu alaşımlı çelikten 2’şer adet olmak üzere toplamda 4 adet ısıtım işlemi görmemiş numune vardır. Bunlar da sırayla 101, 102, 201, 202 olarak numaralandırılmıştır.

9.3 ÇELİKLERE UYGULANAN ISIL İŞLEMLER

Yukarıda görüldüğü gibi numuneler 3 farklı sıcaklıkta ısıl işlem uygulanarak tavlansmıştır. 3 farklı sıcaklık değeri için toplamda 18 numune ısıl işlem görmüştür. Numuneler satıldığı durumdaki kesit çaplarına göre rehber kitaplarda verilen milimetre başına düşen uygun tavlama süresi referans alınarak tavlansmıştır. Isıl işlem görmeyen AISI 1020 düşük karbonlu alaşımsız çelikten ve AISI 8620 düşük karbonlu alaşımlı çelikten 2'şer numune olmak üzere toplamda 4 numune ısıl işlem görmemiştir.

Tablo 9.4 AISI 1020 çeliği için ısıl işlem rejimleri.

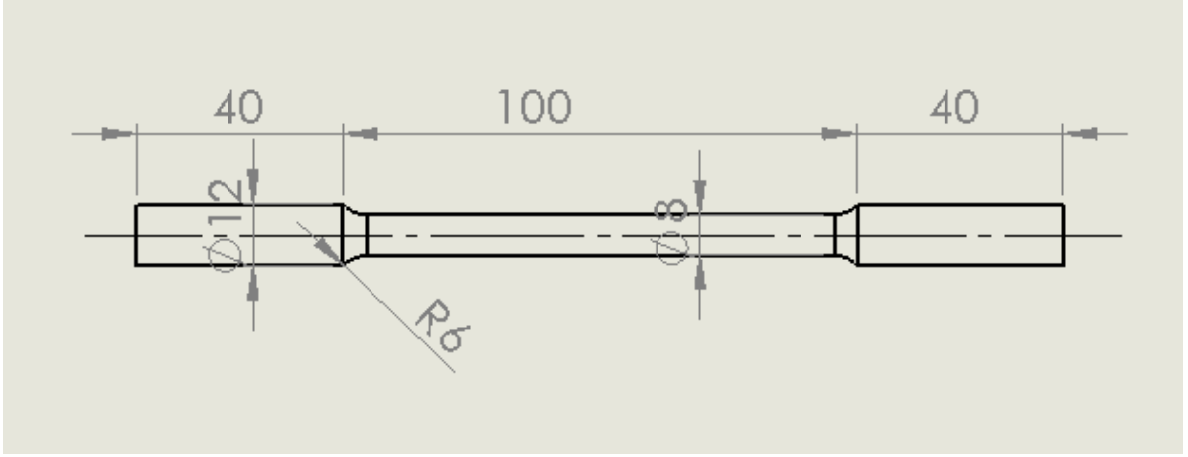
AISI 1020	Tavlama Sıcaklığı	Bekletme Süresi	Soğutma Ortamı	Isıl İşlem Çeşidi
101 102	-	-	-	Satıldığı durum
111 112 113	950 °C	20 dk	Fırında Soğutma	Tavlama
121 122 123	1100 °C	20 dk	Fırında Soğutma	Tavlama
131 132 133	1250 °C	20 dk	Fırında Soğutma	Tavlama

Tablo 9.5 AISI 8620 çeliği için ısıtım işlem rejimleri.

AISI 8620	Tavlama Sıcaklığı	Bekletme Süresi	Soğutma Ortamı	Isıl İşlem Çeşidi
201 202	-	-	-	Satıldığı durum
211 212 213	950 °C	30 dk	Fırında Soğutma	Tavlama
221 222 223	1100 °C	30 dk	Fırında Soğutma	Tavlama
231 232 233	1250 °C	30 dk	Fırında Soğutma	Tavlama

9.4 ÇEKME DENEYİ

Numuneler çekme deneyine tabi tutulmak için çekme numunesi haline getirilmiştir. Çekme deneyi 9 Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mekanik laboratuvarında Shimadzu markalı üniversal çekme cihazında (Şekil 9.2) çene çekme hızı 2mm/dk olacak şekilde yapılmıştır. Çekme deneyinde; numuneler, çeki yüklerinin uygulandığı kenarlarda ankastre sınır şartlarına sahip olup diğer kenarları serbest bırakılmıştır. Deneyler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Belirtilen çekme numunesi boyutları ve şekli Şekil 9.1’de verilmiştir.

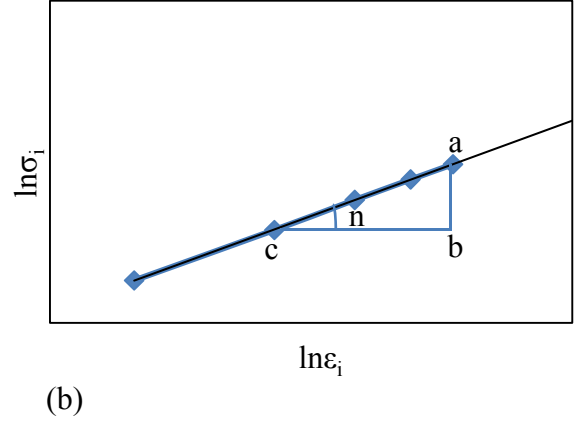
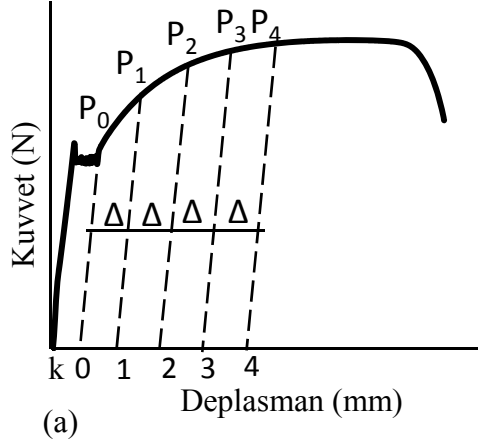


Şekil 9.1 Çekme numunesi boyutları ve şekli.



Şekil 9.2 Üniversal çekme cihazı.

Pekleşme katsayısının tayini için literatürde farklı yöntemler mevcuttur. Bu yöntemler Reihle, M.'nin önerdiği yöntem (1961), ASTM E 646-00 test yöntemi (Güven 2006) ve Said G.'nin geliştirmiş olduğu yöntemdir (Said ve Tasgetiren 2004). Bu çalışmada pekleşme katsayısının tayini için Said G.'nin geliştirmiş olduğu yöntem kullanılmıştır.



Şekil 9.3 Pekleşme katsayısının tayini için kullanılan kuvvet-deplasman diyagramı (a), $\ln\sigma_i$ - $\ln\epsilon_i$ eğrisi (b).

Çekme diyagramının orantılı bölgesi için plastik deformasyonda toplam hacmin sabit kalması ilkesinden yola çıkılarak bu bölge için gerçek gerilme değeri 1945 yılında Holloman tarafından Eşitlik 9.1'deki matematiksel formülle ifade edilmiştir.

$$\sigma_i = B\epsilon_i^n \quad (9.1)$$

Formülde;

σ_i : Gerçek gerilme değeri

B : Mukavemet katsayısı

ϵ_i : Gerçek birim şekil değiştirme

n : Pekleşme katsayısıdır.

Holloman ifadesinin logaritması alındığında ifade Eşitlik 9.2'deki hale gelir.

$$\log \sigma_i = \log B + n \log \epsilon_i \quad (9.2)$$

Logaritması alınan ifade Eşitlik 9.3'de verilen doğrunun denklemine benzer.

$$y=nx+m \quad (9.3)$$

Bu ifade de n doğrunun eğimidir. Logaritmik koordinatlarda çizilen gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme diyagramları da bir doğru halini almaktadır. Bu doğrunun eğimi pekleşme katsayısını verir (Şekil 9.3b).

Said G.'nin yönteminde malzemenin orantılı deformasyon bölgesi 4-5 eşit bölgeye bölünür. Bu bölgeleri sınırlayan çizgiler elastik gerilim çizgisine paralel olacak şekilde çizilir (Şekil 9.3a). Çizgilerin kestiği noktalara denk gelen P kuvvet değerleri okunur (Şekil 9.3a). Eşitlik 9.4 ve 9.5 yardımıyla sırasıyla bu noktalara denk gelen σ ve ε değerleri bulunur.

$$\sigma_i = \frac{P_i}{A_0} \left(1 + \frac{k \times \Delta}{l_0} \right) \quad (9.4)$$

$$\varepsilon_i = \ln \left(1 + \frac{k \times \Delta}{l_0} \right) \quad (9.5)$$

Formüllerde;

- P_i : k doğrularının gerilme-gerinme diyagramını kestiği yerdeki çekme kuvveti
- k : Numunenin elastik gerilim çizgisine paralel olarak çizilen bölgelerin sıralama numaraları sayı ($k=0, 1, 2, 3, 4, 5$)
- A_0 : Numunenin ilk kesit alanı
- Δ : Doğrular arasındaki mesafe
- d_0 : Numunenin ilk kesit çapı
- l_0 : Çekme numunesinin ölçü uzunluğu

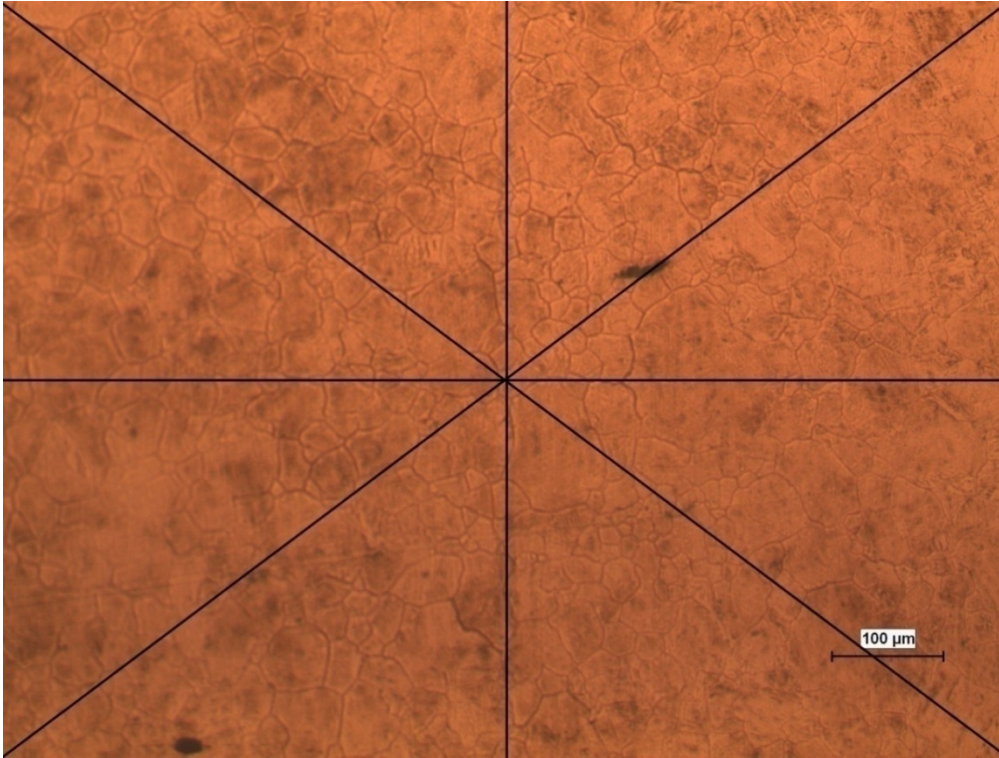
Şekil 9.3b'den görüleceği üzere pekleşme katsayısı Eşitlik 9.6 ifadesine eşit olur.

$$n = \frac{\ln a - \ln b}{\ln b - \ln c} = \frac{\ln(a/b)}{\ln(b/c)} \quad (9.6)$$

Yukarıda anlatıldığı üzere bu doğrunun eğimi pekleşme katsayısını verir. Doğrunun denklemini bilgisayar programında $y=nx+m$ şeklinde çizdirirsek denklemde eğimi ifade eden n pekleşme katsayısını verir. Bu şekilde gerilme-şekil değiştirme diyagramlarından her numune için pekleşme katsayısını buluruz.

9.5 ORTALAMA TANE BOYUTUNUN HESAPLANMASI

Ortalama tane boyutunun hesaplanması için yukarıda Tablo 9.4 ve Tablo 9.5’de gösterilen ısıtma işlemi görmüş 6 gruptan ve ısıtma işlemi görmemiş 2 gruptan numune uçlarından parçalar kesilmiştir. Tane sınırlarının belirgin hale gelmesi için kesilen bu parçalar Afyon Kocatepe Üniversitesi metalurji laboratuvarındaki argon takviyeli fırında 950 °C’de 3 saat kadar tavlandıktan sonra fırın kapağı açılarak hava ile teması sağlanmıştır. Daha sonra bu parçalar malzeme laboratuvarında 240, 320, 400, 600, 800 ve 1200’lük zımparalarla zımparalanmıştır. Zımpara işlemi bittikten sonra parçalar elmas pasta kullanılarak çuhada parlatılmıştır. Parlatma işleminden sonra parçalar %3 HCl derişimli dağlayıcı ile dağlanarak Bartın Üniversitesi Malzeme laboratuvarında bulunan Clemex markalı optik mikroskopta 100x ve 200x büyütme oranlı mikroyapı fotoğrafları çekilmiştir. Şekil 9.4’deki mikroyapı fotoğrafında görüldüğü gibi fotoğraf üzerine dört adet çizgi çizilmiş ve bu çizgilerin kestiği tane sınırları sayılarak ortalama tane boyutu aşığıdaki Eşitlik 9.7 ile hesaplanmıştır.



Şekil 9.4 950 °C’de tavllanmış düşük karbonlu alaşımsız çeliğin optik mikroskopta 100x büyütülmüş fotoğrafı.

$$d_{ort} = \frac{L_1 + L_2 + L_3 + L_4}{N_1 + N_2 + N_3 + N_4} \times \frac{1}{Q} = \frac{\sum L}{\sum N} \times \frac{1}{Q} \quad (9.7)$$

Formülde;

d_{ort} : Ortalama tane çapı (mm)

$L_{1,2,3,4}$: Çizgi uzunlukları (mm)

$N_{1,2,3,4}$: Çizgilerin kesmiş oldukları tane sınır sayıları

Q : Fotoğrafların optik mikroskop büyütme oranlarıdır.

BÖLÜM 10

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

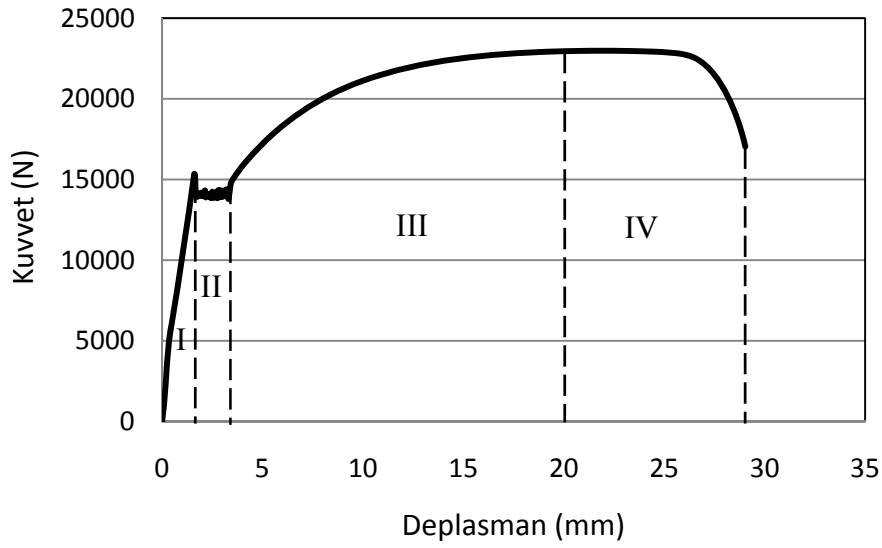
10.1 AISI 1020 VE AISI 8620 ÇELİKLERİ İÇİN YAPILAN TAVLAMA ISIL İŞLEMLERİ

Tablo 9.1 ve Tablo 9.2’de kimyasal bileşimleri verilen AISI 1020 ve AISI 8620 çeliklerine uygulanan tavlama ısıl işlemleri Tablo 9.4 ve Tablo 9.5’de verilmiştir. Numunelere tavlama ısıl işlemi uygulandıktan sonra uygun standartlarda çekme numuneleri hazırlanmış ve sonrasında bu numuneler çekme deneyine tabi tutulmuşlardır.

10.2 AISI 1020 ÇELİĞİNİN TANE BOYUTU, KUVVET-DEPLASMAN GRAFİĞİ VE PEKLEŞME KATSAYISININ DEĞERLENDİRİLMESİ

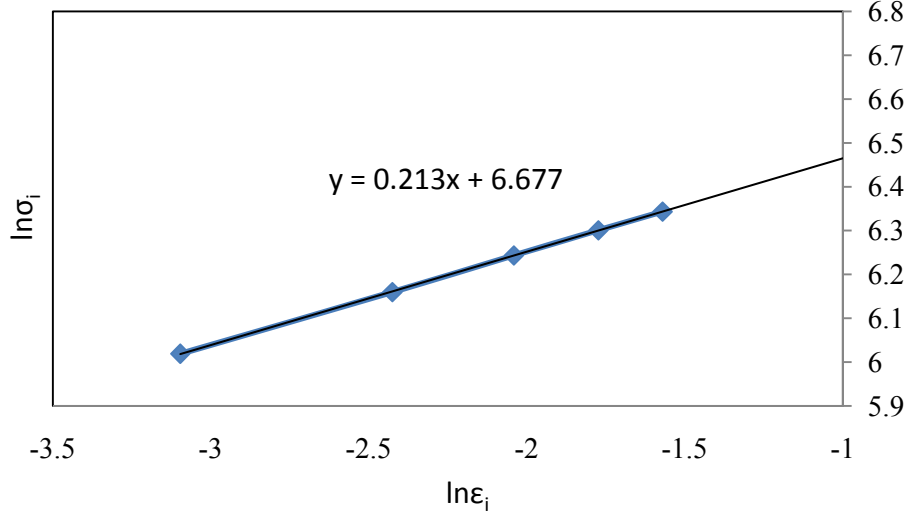
Şekil 10.1’de 950 °C’de tavlama ısıl işlemine tabi tutulmuş AISI 1020 çeliğinin çekme deneyi sonucu elde edilen kuvvet-deplasman diyagramı verilmiştir. Diyagramı 4 farklı deformasyon bölgesinde incelemek mümkündür. Bunlardan birincisi Hook kanununun geçerli olduğu elastik bölgedir. Burada bilindiği üzere atomlar arasındaki bağ kuvvetleri iş görür. Malzeme üzerine kuvvet uygulandığında atomlar arası bağlar gerilir kuvvet kaldırıldığında ise malzeme eski boyutlarına tekrar geri döner. İkinci bölge özellikle düşük karbonlu çeliklerde Cottrell atmosferinin sebep olduğu süreksiz akmanın görüldüğü bölgedir. Burada karbon elementi gibi küçük tane boyutuna sahip atomlar dislokasyonların önünde birikerek dislokasyon hareketini engeller. Kuvvetin artmasıyla dislokasyonlar bu ortamdan kurtularak hareketlerine daha düşük kuvvetlerle devam eder. Bu durum alt ve üst akma dayanımlarının oluşmasına sebep olur. Üçüncü bölge homojen plastik deformasyonun başladığı numunenin boyundaki uzama ile kesit alanındaki daralmanın düzenli olduğu bölgedir. Bu duruma özellikle kenar dislokasyonlarının tercihli düzlemlerde hareket etmesi sebep olur. Ancak belirli bir gerilme değerinden sonra dislokasyonların çoğalması ve dislokasyonların birbirini kitlemesi sonucunda üçüncü bölgenin başlangıç noktası olan akma noktasından tepe noktasına kadar

malzemede pekleşme meydana gelir. Homojen uzamanın görüldüğü bu bölge yukarıda anlatıldığı gibi akma noktasından çekme noktasına kadar birinci bölgede lineer artan elastik gerilim çizgisine paralel çizgilerle belli bir k değeri kadar bölünerek pekleşme katsayısının bulunduğu bölgedir. Bu bölge orantılı bölge olarak da ifade edilir. Dördüncü bölge heterojen bölge olarak tanımlanan çekme diyagramındaki tepe noktasından sonra eğrinin aşağıya doğru meylettığı, plastik kararsızlığın başladığı, kesitin bir bölgede hızla daralarak malzemenin boyun verdiği ve koptuğu bölgedir. Bu bölgede vida dislokasyonlarının da plastik şekil değişimine katkıda bulunduğu söylenebilir.



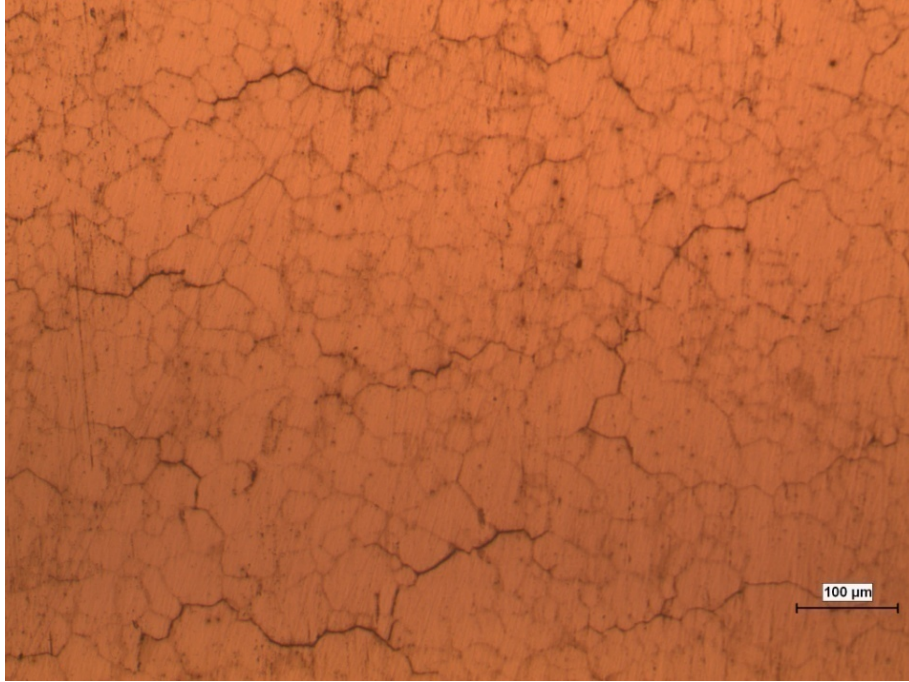
Şekil 10.1 950 °C’de tavllanmış AISI 1020 çeliği için kuvvet-deplasman grafiği.

Şekil 10.1’de verilen kuvvet-deplasman grafiğinin homojen plastik şekil değiştirme bölgesinden faydalanarak ve Said G.’nin (Said ve Tasgetiren 2004) geliştirmiş olduğu yöntem kullanılarak elde edilen pekleşme katsayısı grafiği Şekil 10.2’de verilmiştir. Yine bu grafikten faydalanarak elde edilen pekleşme değeri Eşitlik 9.6’ya göre 0,213 olarak bulunmuştur.

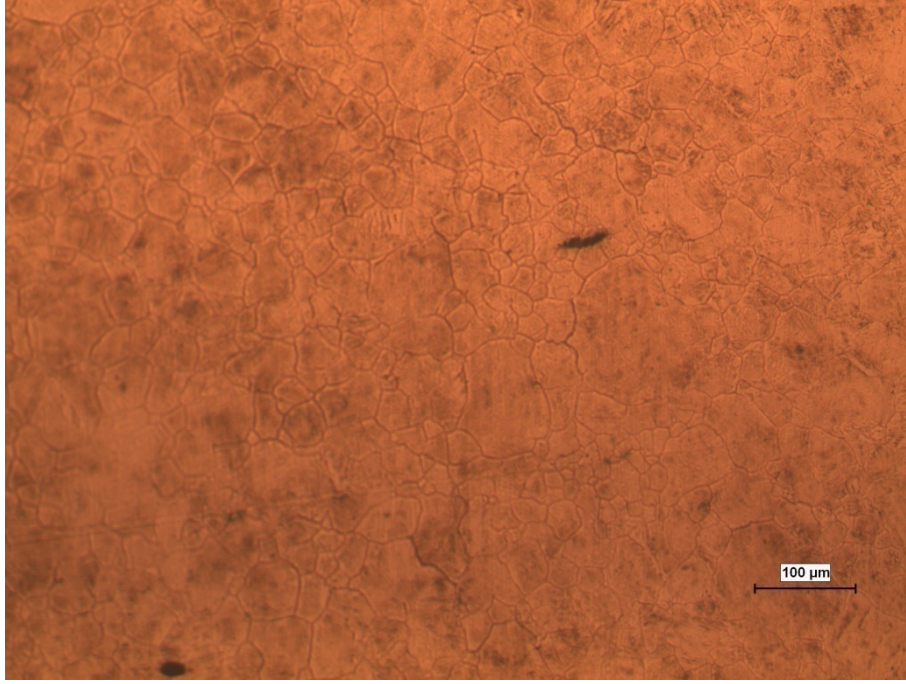


Şekil 10.2 950 °C’de tavllanmış AISI 1020 çeliği için $\ln \sigma_i$ - $\ln \epsilon_i$ grafiği.

AISI 1020 düşük karbonlu alaşımsız çeliğinin ısıtılmış numunenin mikroyapı fotoğrafı Şekil 10.3’de ve 950 °C tavlama işlemine tabi tutulmuş numunenin mikroyapı fotoğrafı ise Şekil 10.4’de verilmiştir.



Şekil 10.3 AISI 1020 çeliğinin ısıtılmış durumdaki mikroyapı fotoğrafı (100x).



Şekil 10.4 AISI 1020 çeliğinin 950 °C’de tavlama ısıl işlemine tabi tutulmuş optik mikroyapı fotoğrafı (x100).

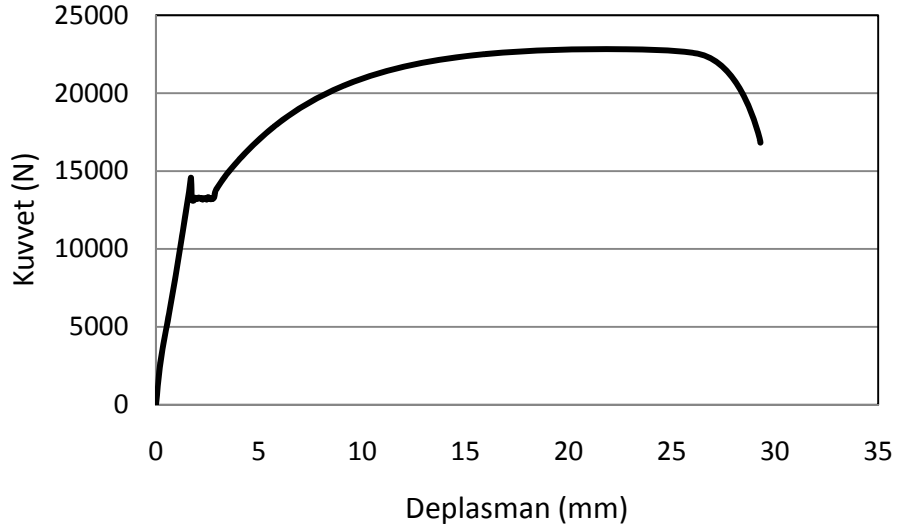
Hem mikroyapı fotoğraflarından hem de ASTM ortalama tane boyutu belirleme standartından yararlanarak oluşturulan Tablo 10.1’de verilen ortalama tane boyutu sonuçları incelenecek olursa 950 °C’lik tavlama işleminden sonra numunenin tane boyutunun büyüdüğü görülmektedir.

Tablo 10.1 Numunelerin akma gerilimi, ortalama tane boyutu, pekleşme katsayısı.

AISI 1020	Akma Gerilimi (σ_a), MPa	Ortalama Tane Boyutu (10^{-3}) mm	Pekleşme Katsayısı
101	-	33,92	-
102			
111	308,420	37,6	0,213
112	283,808		0,227
113	318,671		0,204

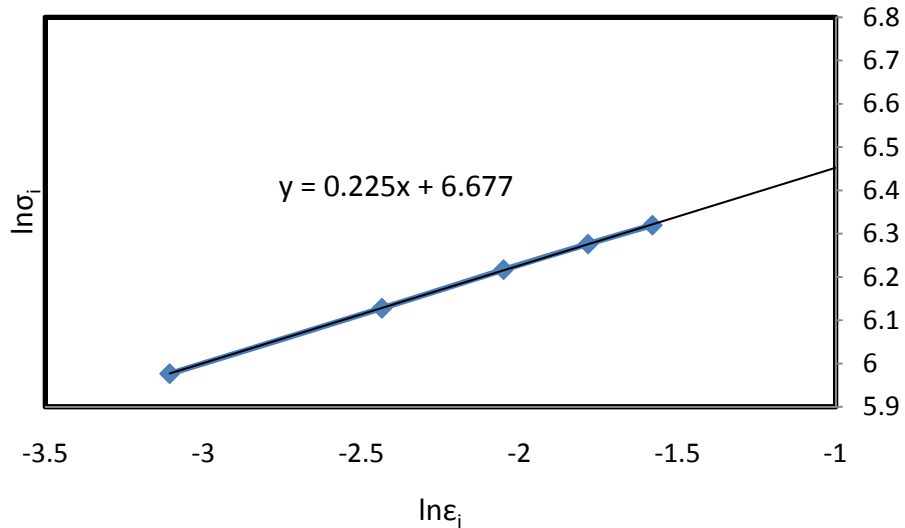
Şekil 10.5’de 1100 °C’de 20 dk süreyle tavlama ısıl işlemine tabi tutulmuş AISI 1020 çeliğinin çekme deneyi sonucu elde edilen kuvvet-deplasman grafiği verilmiştir. Grafikten de görüleceği gibi numunenin akma değeri artan tavlama sıcaklığı ile düşmüştür. Bunun sebebi olarak artan tavlama sıcaklığıyla birlikte ostenit tanelerinin daha da büyümesi (Şekil 10.7) ve

buna bağı olarak soğuma esnasında kaba ferrit-perlit tanelerinin oluşması gösterilebilir. Bu durum malzemenin dayanım değerlerinin düşmesine diğer yandan tanelerinin kabalaşmasına sebep olmuştur.



Şekil 10.5 1100 °C’de tavllanmış AISI 1020 çeliği için kuvvet-deplasman grafiği.

Şekil 10.6’den görüleceği üzere 1100 °C’de tavlama ısıl işlemine tabi tutulan numunenin kuvvet-deplasman grafiğinde plastik şekil değiştirmenin başladığı üçüncü bölgede pekleşme katsayısının 950 °C’de tavllanmış numuneye göre arttığı görülmüştür.



Şekil 10.6 1100 °C’de tavllanmış AISI 1020 çeliği için $\ln \sigma$ - $\ln \epsilon$ grafiği.

1100 °C’de tavlama ısıl işlemine tabi tutulan numunenin optik mikroyapı fotoğrafı incelenecek olursa tanelerin daha da kabalaştığı görülmektedir (Şekil 10.7).



Şekil 10.7 AISI 1020 çeliğinin 1100 °C’de tavlama ısıl işlemine tabi tutulmuş optik mikroyapı fotoğrafı (x100).

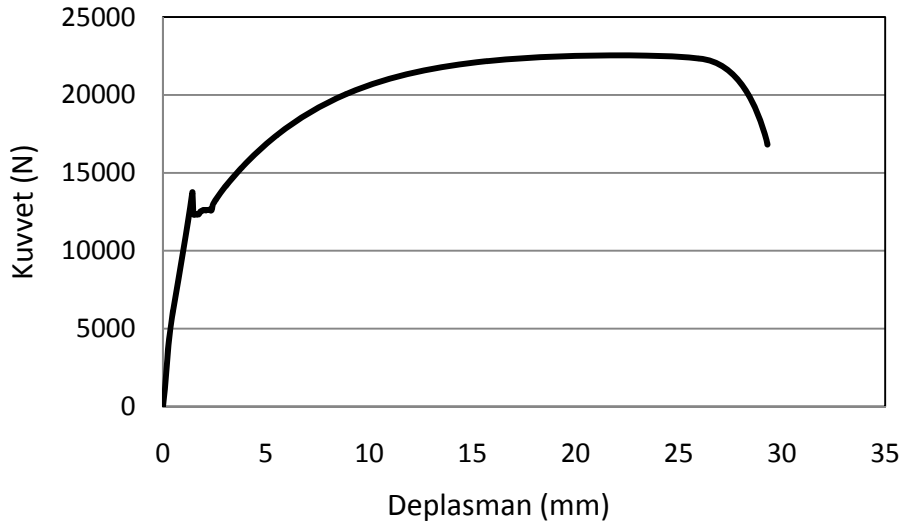
Yine mikroyapı fotoğrafından ve de ASTM ortalama tane boyutu belirleme standartından yararlanarak oluşturulan Tablo 10.2 incelenecek olursa numunenin artan sıcaklıkla birlikte tane boyutunun daha da kabalaştığı görülmüştür.

Tablo 10.2 Numunelerin akma gerilimi, ortalama tane boyutu, pekleşme katsayısı.

AISI 1020	Akma Gerilimi (σ_a), MPa	Ortalama Tane Boyutu (10^{-3}) mm	Pekleşme Katsayısı
121	290,12	41,3	0,225
122	275,463		0,233
123	287,93		0,225

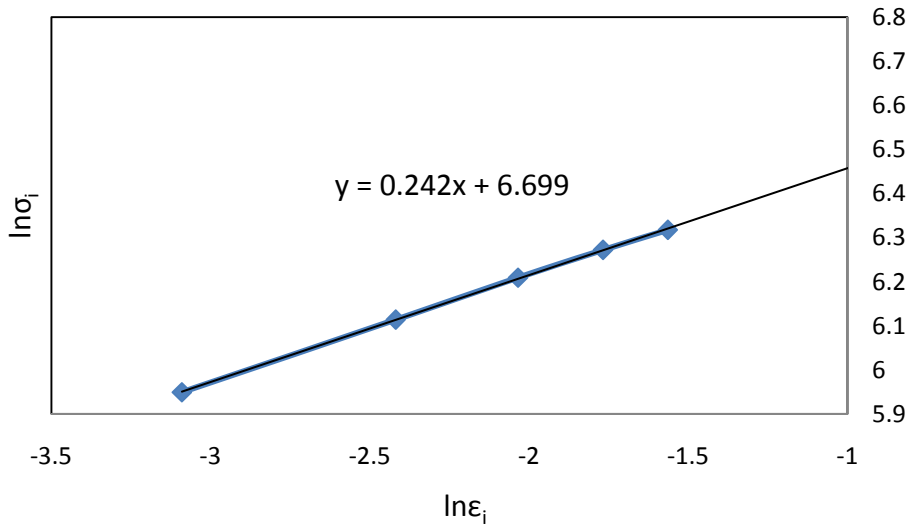
Şekil 10.8’de 1250 °C’de 20 dk süreyle tavlama ısıl işlemine tabi tutulmuş AISI 1020 çeliğinin çekme deneyi sonucu elde edilen kuvvet-deplasman grafiği verilmiştir. En düşük akma gerilmesi değeri bu numunede görülmüştür. Artan sıcaklıkla birlikte difüzyonun daha kolay gerçekleşmesi ve ostenit tanelerinin bir önceki sıcaklığa göre daha büyük değere

ulaşması sonucunda soğuma esnasında oluşan özellikle ferrit taneleri daha büyük boyuta ulaşmıştır.

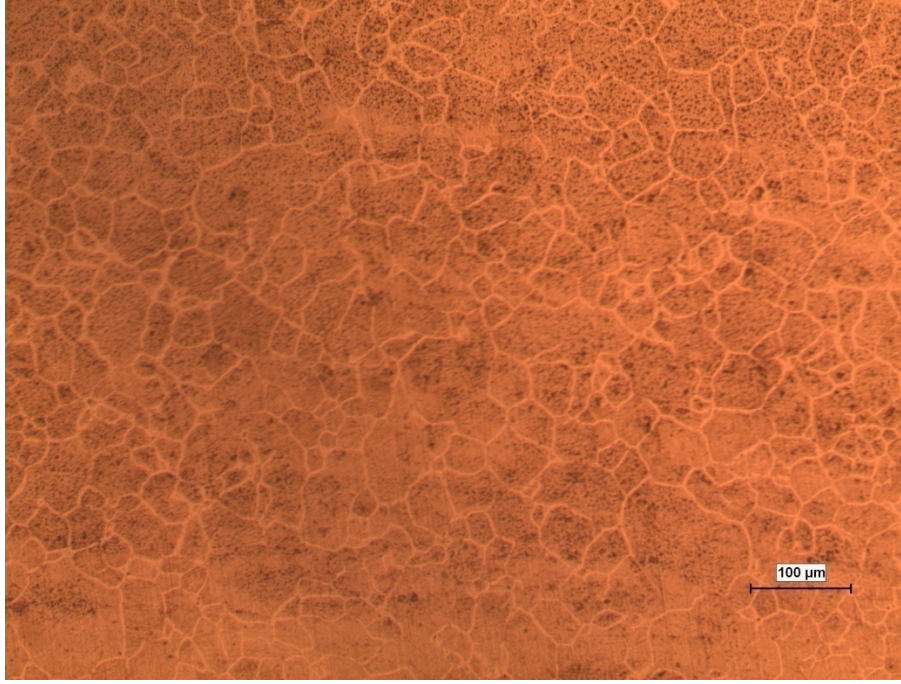


Şekil 10.8 1250 °C’de tavllanmış AISI 1020 çeliği için kuvvet-deplasman grafiği.

Şekil 10.8’de verilen kuvvet-deplasman grafiğinin homojen plastik şekil değiştirme bölgesinden faydalanarak bulunan pekleşme katsayısı göze alındığında en yüksek pekleşme katsayısının 1250 °C’de tavlama ısıl işlemine tabi tutulmuş numunede 0,242 olarak görülmüştür (Şekil 10.9).



Şekil 10.9 1250 °C’de tavllanmış AISI 1020 çeliği için $\ln\sigma$ - $\ln\epsilon$ grafiği.



Şekil 10.10 AISI 1020 çeliğinin 1250 °C’de tavlama ısıl işlemine tabi tutulmuş optik mikroyapı fotoğrafı (x100).

Bu durum ayrıca 1250 °C’de tavlama ısıl işlemine tabi tutulan numunedan alınan optik mikroskop mikroyapı fotoğrafında da görülmektedir. 3 farklı sıcaklık değerinde gerçekleştirilen ısıl işlemlerde en büyük tane boyutu en yüksek sıcaklıkta ısıl işleme tabi tutulan numunede görülmüştür (Şekil 10.10). Bilinmektedir ki ostenit tanesi büyüklüğünün oluşan ferrit ve perlit taneleri üzerinde etkisi bulunmaktadır.

Mikroyapı fotoğrafından ve ortalama tane boyutundan yararlanılarak oluşturulan Tablo 10.3 incelenecek olursa en büyük tane boyutunun bu numunede olduğu görülmüştür.

Tablo 10.3 Numunelerin akma gerilimi, ortalama tane boyutu, pekleşme katsayısı.

AISI 1020	Akma Gerilimi (σ_a), MPa	Ortalama Tane Boyutu (10^{-3}) mm	Pekleşme Katsayısı
131	273,917	48,5	0,242
132	265,81		0,252
133	267,075		0,248

Üç farklı tavlama sıcaklığında tavlama ısıl işlemine tabi tutulan AISI 1020 çeliğinden hazırlanan numuneler kendi aralarında kıyaslanacak olursa en küçük tane boyutu ve en

yüksek akma gerilmesi değeri 950 °C’de ısıl işleme tabi tutulan numunede görülmüştür. Ac_1 sıcaklığının üzerine çıkıldığında önce perlit kaybolur ve perlit içerisindeki ferrit lamelleri ostenite dönüşür. Ostenit yapısına daha fazla karbon alabildiğinden sementit ostenit içerisinde erir ve Ac_3 sıcaklığının üzerinde yapı ince taneli ostenitten oluşur. Yavaş soğuma ile birlikte yapı ince taneli ferrit ve sementite dönüşür. Ancak artan sıcaklıkla birlikte tanelerin büyümesini engelleyen karbürlerin çözülmesi ve ostenit tanelerin irileşmesi 1100 °C sıcaklıkta ve 1250 °C sıcaklıkta tavlama ısıl işlemine tabi tutulan numunelerin daha kaba yapılı oluşmasına, buna bağlı olarak akma dayanımlarının düşmesine, pekleşme katsayılarının ise yükselmesine sebep olmuştur. Hall-Petch bağıntısı göz önüne alındığında artan tane boyutu ile akma gerilmesinin düşmesi doğrulanmıştır.

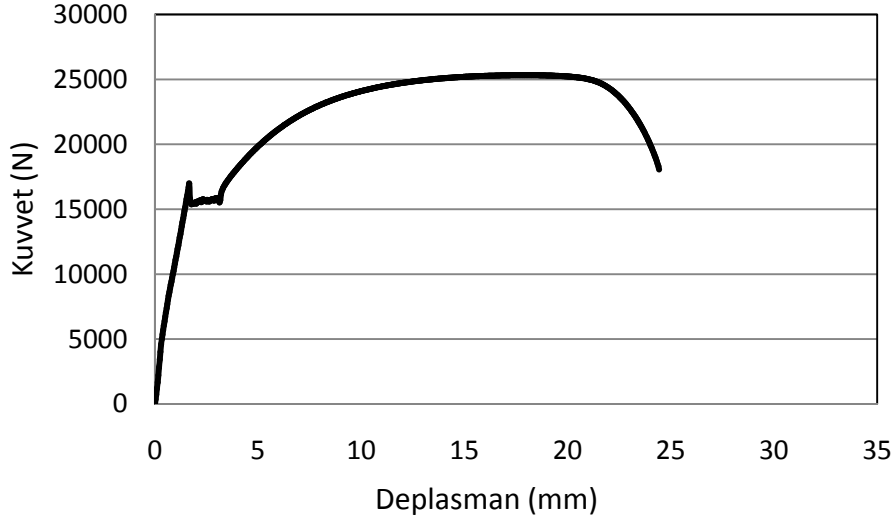
AISI 1020 çeliğinin yapılan ısıl işlemler sonucu tanelerinin büyümesi ile akma gerilmelerinin düşmesi şöyle açıklanabilir: Büyük tanelerde dislokasyonların tane içinde kat edeceği mesafe daha fazladır. Buna bağlı olarak da dislokasyonların tane sınırlarına ulaşması gecikir. Dislokasyonların tane sınırlarına ulaştıklarında boşluklarının yığılması ile meydana gelen mikro çatlaklar ve bunların birleşmesiyle meydana gelen makro çatlakların ikinci tanedeki dislokasyonları harekete geçirmesi için gerekli olan gerilme değerinin oluşması için daha fazla zamana ihtiyaç duyulacaktır. Bu durum tane içerisinde bir rahatlamaya sebep olduğundan gerilme değerini düşürecektir.

10.3 AISI 8620 ÇELİĞİNİN TANE BOYUTU, KUVVET-DEPLASMAN GRAFİĞİ VE PEKLEŞME KATSAYISININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Alaşım elementleri demir üzerinde iki farklı etkiye sahiptir. Bunlardan birincisi ferrit matrisi içerisinde çözünerek katı eriyik faz oluşturması, ikincisi ise karbonla birleşerek karbür olarak matriste yer almasıdır. Zirkonyum, tantalyum, niobyum, titanyum, vanadyum, molibden, wolfram, krom karbür yapıcı elementlerdir. Bunun haricindekiler katı çözelti olarak ferrit içerisinde yer alır.

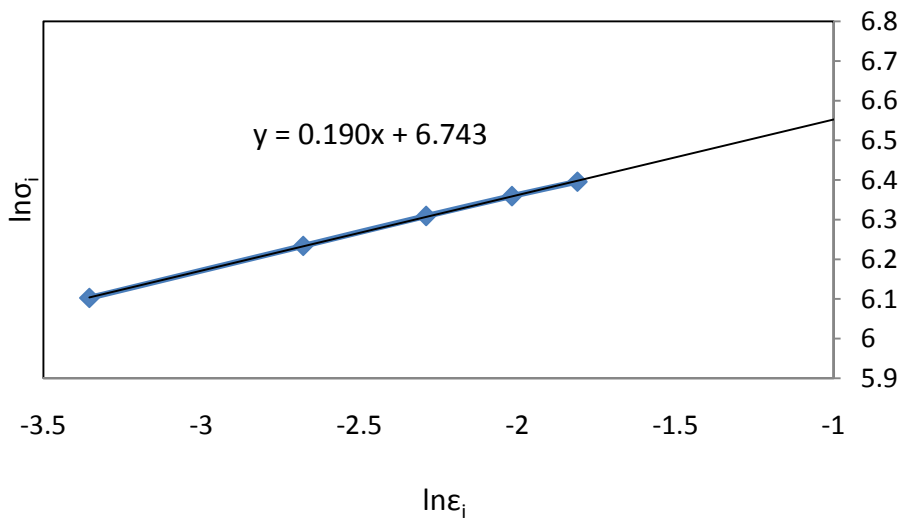
Alaşım elementleri malzemelerin sertlik, mukavemet, akma noktası, yüzde uzama, kesit büzülmesi, darbe direnci, elastisite modülü, sıcaklık dayanımı, aşınma direnci, işlenebilirlik, soğuma hızı vb. gibi mekanik özellikler üzerinde büyük etkiye sahiptir. Bu açıklamalar ışığında AISI 8620 çeliği incelenecek olursa;

Şekil 10.11’de 950 °C’de tavlama işlemine tabi tutulmuş AISI 8620 çeliğinin çekme deneyi sonucu elde edilen kuvvet-deplasman grafiği verilmiştir. AISI 1020 çeliğinde olduğu gibi bu numunede de (AISI 8620) 4 farklı deformasyon bölgesi vardır. Bu bölgeler yukarıda anlatılmıştır.



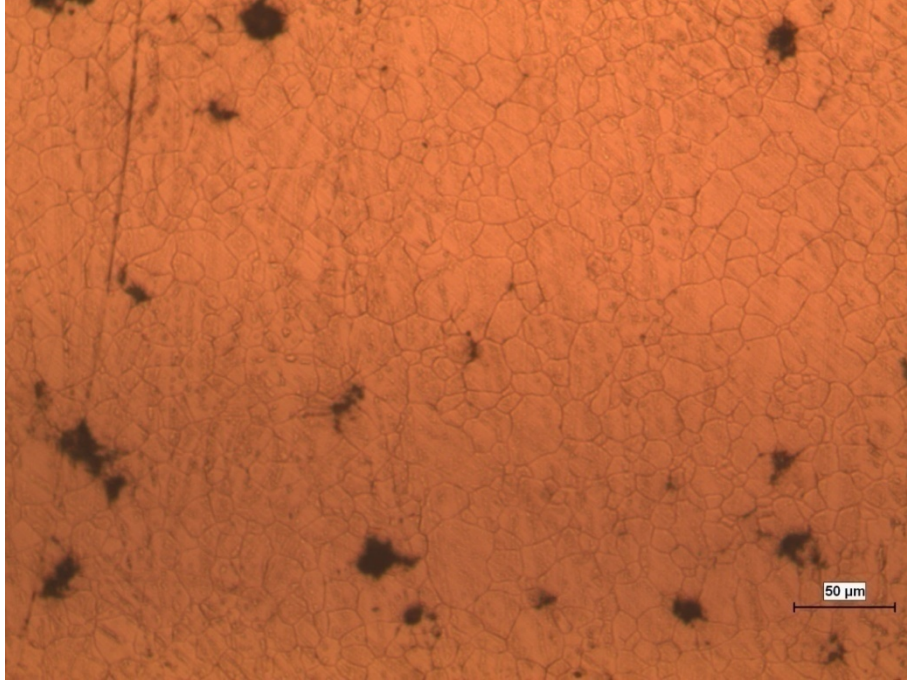
Şekil 10.11 950 °C’de tavllanmış AISI 8620 çeliği için kuvvet-deplasman grafiği.

Şekil 10.11’de verilen kuvvet-deplasman grafiğinin homojen plastik şekil değiştirme bölgesinden faydalanarak 950 °C’de 30 dk kadar tavlama ısıl işlemine tabi tutulmuş AISI 8620 çeliğinin pekleşme katsayısı Şekil 10.12’de görüldüğü üzere 0,190 olarak bulunmuştur.

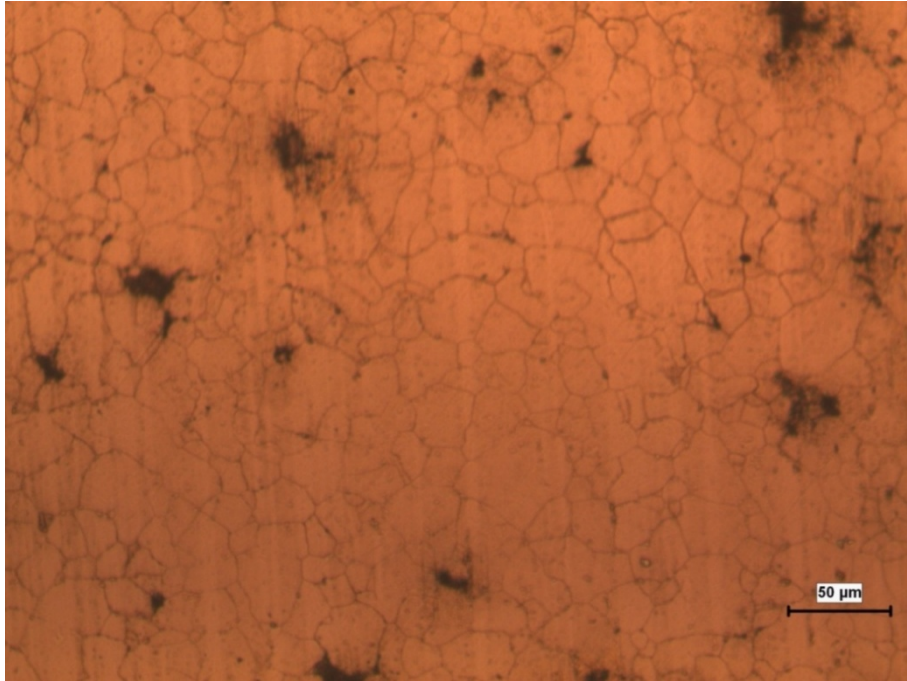


Şekil 10.12 950 °C’de tavllanmış AISI 8620 çeliği için lnσ-lnε grafiği.

Hem mikroyapı fotoğraflarından hem de ASTM ortalama tane boyutu belirleme standartından yararlanarak oluşturulan Tablo 10.4’de verilen ortalama tane boyutu sonuçları incelenecek olursa 950 °C’lik tavlama işleminden sonra numunenin tane boyutunun büyüdüğü görülmektedir (Şekil 10.13 ve Şekil 10.14).



Şekil 10.13 AISI 8620 çeliğinin ısıtılmamış optik mikroyapı fotoğrafı (x200).



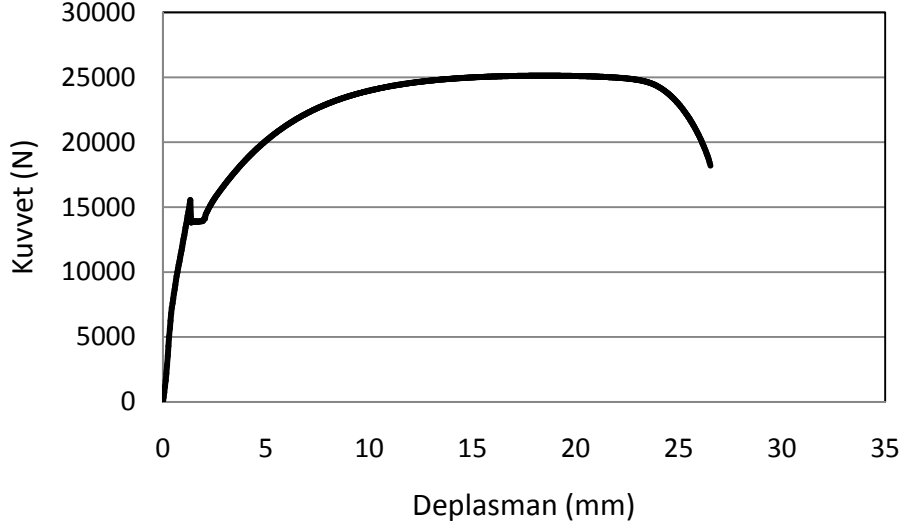
Şekil 10.14 AISI 1020 çeliğinin 950 °C’de tavlama ısıtımına tabi tutulmuş optik mikroyapı fotoğrafı (x200)

Tablo 10.4 Numunelerin akma gerilimi, ortalama tane boyutu, pekleşme katsayısı.

AISI 8620	Akma Gerilimi (σ_a), MPa	Tane Boyutu (10^{-3}) mm	Pekleşme Katsayısı
201	-	15,32	-
202			
211	340,963	21,6	0,190
212	330,173		0,196
213	336,344		0,193

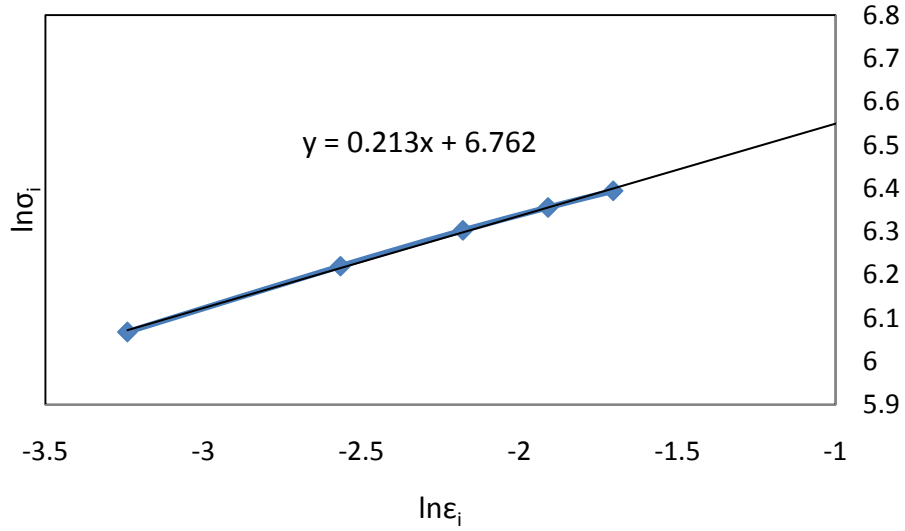
950 °C’de tavlama ısıl işlemine tabi tutulan AISI 1020 çeliği ile AISI 8620 çeliği kendi aralarında kıyaslanacak olursa alaşımlı çeliğin tanelerinin daha küçük boyutta meydana geldiği görülmüştür. Bu durumu alaşımlı çelik içerisinde karbür yapmaya yatkın elementlerin yüzde oranlarının artışıyla açıklamak mümkündür. Çünkü karbür yapıcı elementler çeliğin ostenitleştirme sıcaklığı ve tavlama süresi üzerinde önemli ölçüde etkiye sahiptirler. Karbürlerin bazıları ostenit fazı içerisinde daha yüksek sıcaklıklarda ve daha uzun zaman aralıklarında çözünürler. Bu çözünmeyen karbürler çeliğin tane büyümesini de engellerler. AISI 8620 çeliğinin bileşimi göz önüne alındığında içerisinde bulunan Cr, Mo, Si gibi kuvvetli karbür yapıcı elementlerin tane sınırlarında oluşarak tanenin büyümesine engel olmuş ve dolayısıyla daha küçük tanelerin oluşmasında rol oynamıştır.

Şekil 10.15’de 1100 °C’de 30 dk süreyle tavlama ısıl işlemine tabi tutulmuş AISI 8620 çeliğinin çekme deneyi sonucu elde edilen kuvvet-deplasman grafiği verilmiştir. Grafikten de görüleceği gibi numunenin akma değeri artan tavlama sıcaklığı ile düşmüştür. Yine bunun sebebinin artan sıcaklıkla birlikte ostenit tanelerinin daha büyümesi (Şekil 10.17) ve buna bağlı olarak soğuma esnasında kaba ferrit-perlit tanelerinin oluşmasına bağlayabiliriz. Çünkü artan sıcaklıkla birlikte tanelerin küçük olmasına sebep olan ve tane sınırlarında yerleşen karbürler çözülmüş ve buna bağlı olarak da büyüyen ostenit taneleri daha büyük tane oluşumuna sebep olmuştur. Bu durum malzemenin dayanım değerlerinin düşmesine sebep olmuştur.



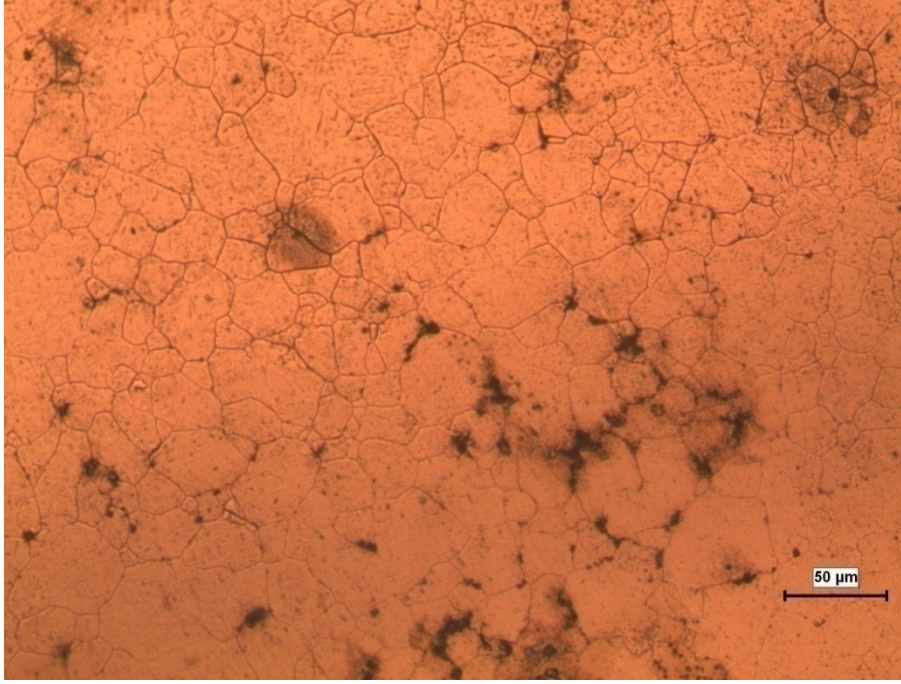
Şekil 10.15 1100 °C’de tavllanmış AISI 8620 çeliği için kuvvet-deplasman grafiği.

1100 °C’de tavlama işlemine tabi tutulan AISI 8620 çelik numunesinin yukarıda bahsedilen metodla kuvvet-deplasman grafiğinin homojen bölgesinden elde edilen pekleşme katsayısı ve grafiği Şekil 10.16’da verilmiştir. Artan tane boyutuna bağlı olarak AISI 8620 çelik numunesinin pekleşme katsayısının 950 °C’de tavllanmış numuneye göre arttığı görülmüştür.



Şekil 10.16 1100 °C’de tavllanmış AISI 8620 çeliği için lnσ-lnε grafiği.

AISI 8620 alaşımlı çeliğinin 1100 °C’de tavlama ısıl işlemine tabi tutulmuş numunenin mikroyapı fotoğrafı Şekil 10.17’de verilmiştir.



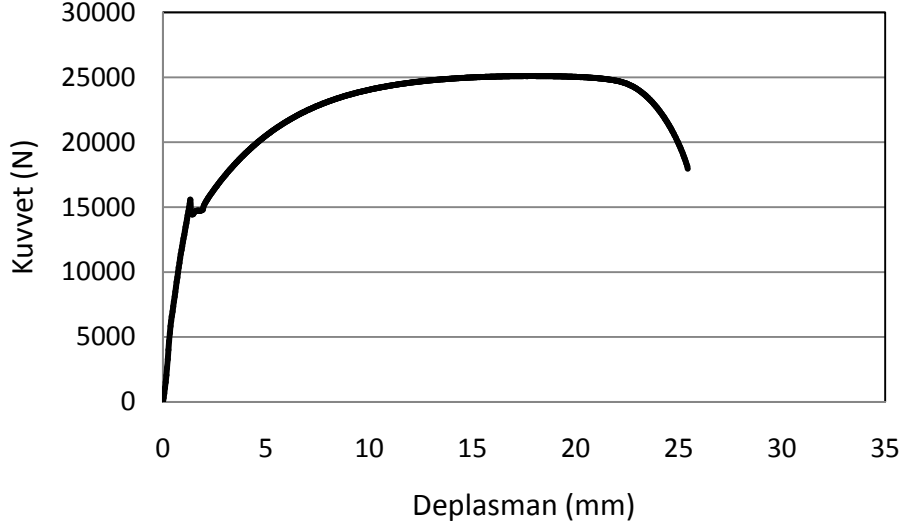
Şekil 10.17 AISI 8620 çeliğinin 1100 °C’de tavlama ısıl işlemine tabi tutulmuş optik mikroyapı fotoğrafı (x200).

Hem mikroyapı fotoğraflarından hem de ASTM ortalama tane boyutu belirleme standartından yararlanarak oluşturulan Tablo 10.5’de verilen ortalama tane boyutu sonuçları incelenecek olursa 1100 °C’lik tavlama işleminden sonra numunenin tane boyutunun 950 °C’de tavlama ısıl işlemine tabi tutulmuş numunenin tane boyutuna göre büyüdüğü görülmektedir.

Tablo 10.5 Numunelerin akma gerilimi, ortalama tane boyutu, pekleşme katsayısı.

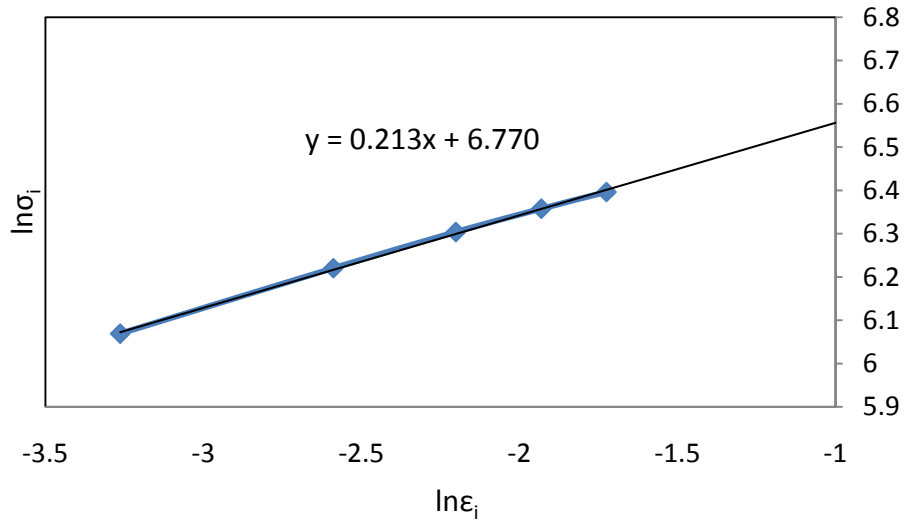
AISI 8620	Akma Gerilimi (σ_a), MPa	Ortalama Tane Boyutu (10^{-3}) mm	Pekleşme Katsayısı
221	308,099	24,1	0,213
222	316,637		0,208
223	300,843		0,218

1250 °C’de 30 dk süreyle tavlama ısıl işlemine tabi tutulmuş AISI 8620 çeliğinin çekme deneyi sonucu elde edilen kuvvet-deplasman grafiği Şekil 10.18’de, pekleşme katsayısı ve grafiği ise Şekil 10.19’da verilmiştir.



Şekil 10.18 1250 °C’de tavllanmış AISI 8620 çeliği için kuvvet-deplasman grafiği.

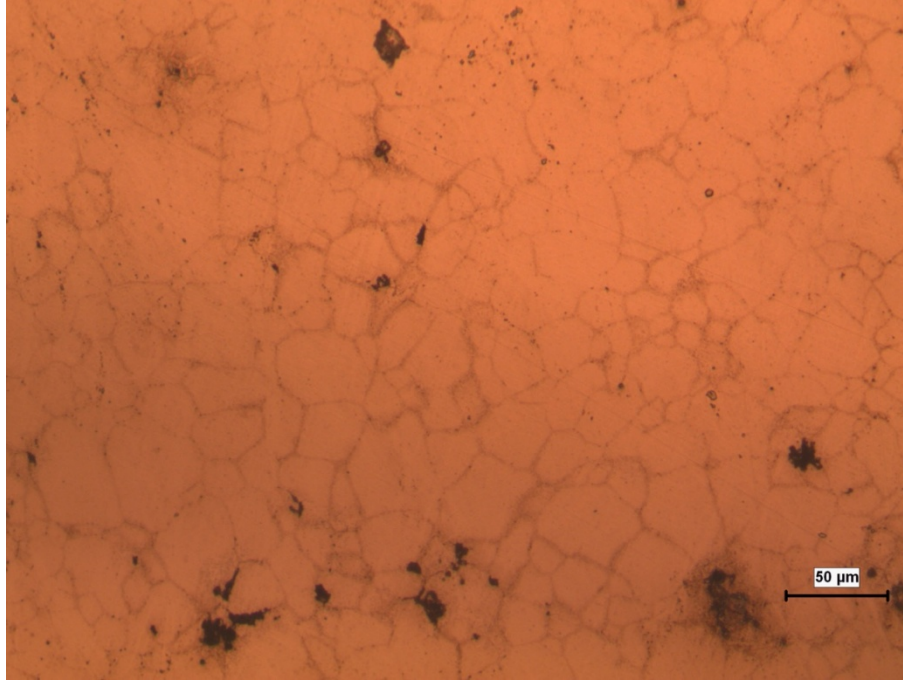
Alaşımli çelik numuneler içerisinde en düşük akma gerilmesi değeri bu numunede görülmüş ancak 1100 °C’de tavlama ısıl işlemine tabi tutulan numune ile arasında çok büyük bir fark görülmemiştir. Bu da hem 1100 °C’de hem de 1250 °C’de tavlama ısıl işlemine tabi tutulan alaşımli çeliğin tane boyutları arasında çok fazla fark olmamasıyla açıklanabilir. Bu durum ise karbürlerin tamamen çözünmemesinden kaynaklanabilir.



Şekil 10.19 1250 °C’de tavllanmış AISI 8620 çeliği için $\ln\sigma$ - $\ln\epsilon$ grafiği.

AISI 8620 çeliğinin 1250 °C’de tavlama ısıl işlemine tabi tutulmuş mikroyapı fotoğrafı Şekil 10.20’de verilmiştir. 1250 °C’de tavlama ısıl işlemine tabi tutulan AISI 8620 çeliğinin tane boyutu 950 °C’de tavlama ısıl işlemine tabi tutulan numuneye göre daha büyük 1100 °C’de tavlama ısıl işlemine tabi tutulan numuneye ise nisbeten daha yakındır.

Bu durum için ya malzemenin içyapısındaki bileşim dağılımı etkili olmuştur veya zamana bağlı olarak bu durum meydana gelmiştir. Çünkü içyapısındaki bileşim dağılımı daha türdeş olan tavlama sonrasında daha kaba taneli bir yapı sergiler. Mikroyapıdaki faz dağılımı homojenlikten uzaklaştıkça (inklüzyonların varlığı) tanelerin büyümesini engeller.



Şekil 10.20 AISI 1020 çeliğinin 1250 °C’de tavlama ısıl işlemine tabi tutulmuş optik mikroyapı fotoğrafı (x200).

Yine mikroyapı fotoğrafından (Şekil 10.20) ve de ASTM ortalama tane boyutu belirleme standartından yararlanarak oluşturulan Tablo 10.6 incelenecek olursa numunenin artan sıcaklıkla birlikte tane boyutunun nisbeten kabalaştığı görülmüştür.

Tablo 10.6 Numunelerin akma gerilimi, ortalama tane boyutu, pekleşme katsayısı.

AISI 8620	Akma Gerilimi (σ_a), MPa	Ortalama Tane Boyutu (10^{-3}) mm	Pekleşme Katsayısı
231	300,762	25,7	0,202
232	311,029		0,213
233	308,757		0,216

Tablo 10.7’de AISI 1020 ve AISI 8620 çelikleri için standart numune (ısıtıl işlem görmemiş) ve tavlama işlemine tabi tutulduktan sonraki akma gerilimi, ortalama tane boyutu ve pekleşme katsayısı değerleri verilmiştir. Bu sonuçlara göre numuneler kendi aralarında kıyaslanacak olursa tüm tavlama sıcaklıklarında AISI 1020 numunesinin daha kaba taneli olduğu görülmüştür. Tavlama sıcaklığının artması hem AISI 1020 hem de AISI 8620 numunelerindeki tane boyutunun artmasına sebep olmuştur. Bu durum artan sıcaklıkla birlikte ostenit tanelerinin büyümesi ile alakadardır. AISI 8620 alaşımlı çeliğinin tüm tavlama sıcaklıklarında daha ince taneli bir yapıya sahip olmasının sebebini içerisindeki alaşım elementleriyle açıklamak mümkündür. Çünkü katılaşma esnasında tane sınırlarında oluşan metal karbürler tanelerin büyümesine engel olmaktadır. Nikel çeliklerin dönüşme sıcaklığını düşürdüğü gibi kristal yapıyı da inceltir. Alaşımsız çelikte tanelerin daha büyük olmasının sebebi katılaşma esnasında tane sınırlarında oluşan Fe_3C karbüründe Fe-C arasındaki bağ kuvvetinin zayıf olmasına bağlanabilir. Buna kıyasen alaşımlı çelikteki küçük taneler yapı içerisindeki artan Cr ve Mo gibi daha kuvvetli karbür yapıcı elementlerin tane sınırlarında daha zor karbürler oluşturmasıyla ilgilidir.

Tablo 10.8’de ise tüm numunelerin tavlama sıcaklığına göre özellikleri ayrıntılı olarak verilmiştir.

Tablo 10.7 Tüm numunelerin akma gerilimi, ortalama tane boyutu, pekleşme katsayısı.

Çelik	Numara	Akma Gerilimi (σ_a), MPa	Ortalama Tane Boyutu	Pekleşme Katsayısı	
		MPa	μm	-	
AISI 1020	101	-	33,92	-	
	102				
	111	308,420	37,6	0,213	
	112	283,808		0,227	
	113	318,671		0,204	
	121	290,12	41,3	0,225	
	122	275,463		0,233	
	123	287,93		0,225	
	131	273,917	48,5	0,242	
	132	265,81		0,252	
	133	267,075		0,248	
	AISI 8620	201	-	15,32	-
		202			
211		340,963	21,6	0,190	
212		330,173		0,196	
213		336,344		0,193	
221		308,099	24,1	0,213	
222		316,637		0,208	
223		300,843		0,218	
231		300,762	25,7	0,202	
232		311,029		0,213	
233		308,757		0,216	

Tablo 10.8 Numunelerin tavlama sıcaklığına bağlı ayrıntılı özellikleri.

Çelik	Tavlama sıcaklığı	Ortalama tane boyutu	Dayanım Katsayısı	Pekleşme katsayısı	$\sigma_i = B\varepsilon_i^n$
	°C	μm	MPa	-	MPa
AISI 1020	950 °C	37,6	793,9	0,213	$\sigma_i = 793,9\varepsilon_i^{0,213}$
			818,9	0,227	$\sigma_i = 818,9\varepsilon_i^{0,227}$
			790,0	0,204	$\sigma_i = 790\varepsilon_i^{0,204}$
	1100 °C	41,3	796,3	0,225	$\sigma_i = 796,3\varepsilon_i^{0,225}$
			791,6	0,233	$\sigma_i = 791,6\varepsilon_i^{0,233}$
			793,9	0,225	$\sigma_i = 793,9\varepsilon_i^{0,225}$
	1250 °C	48,5	811,6	0,242	$\sigma_i = 811,6\varepsilon_i^{0,242}$
			833,0	0,252	$\sigma_i = 833\varepsilon_i^{0,252}$
			822,2	0,248	$\sigma_i = 822,2\varepsilon_i^{0,248}$
AISI 8620	950 °C	21,6	848,1	0,190	$\sigma_i = 848,1\varepsilon_i^{0,190}$
			855,8	0,196	$\sigma_i = 855,8\varepsilon_i^{0,196}$
			855,8	0,193	$\sigma_i = 855,8\varepsilon_i^{0,193}$
	1100 °C	24,1	864,4	0,213	$\sigma_i = 864,4\varepsilon_i^{0,213}$
			861,8	0,208	$\sigma_i = 861,8\varepsilon_i^{0,208}$
			872,2	0,218	$\sigma_i = 872,2\varepsilon_i^{0,218}$
	1250 °C	25,7	834,6	0,202	$\sigma_i = 834,6\varepsilon_i^{0,202}$
			871,3	0,213	$\sigma_i = 871,3\varepsilon_i^{0,213}$
			877,4	0,216	$\sigma_i = 877,4\varepsilon_i^{0,216}$

BÖLÜM 11

SONUÇLAR

Bu çalışmada AISI 1020 ve AISI 8620 çelikleri ostenit bölgede 950 °C, 1100 °C ve 1250 °C’de tavlama ısıl işlemine tabi tutularak tane boyutları değiştirilmiş ve değişen tane boyutlarının pekleşme katsayıları üzerine etkisi araştırılarak aşağıdaki sonuçlar bulunmuştur.

AISI 1020 çeliği için artan tavlama sıcaklığı ile birlikte tane boyutu değerinin de arttığı görülmüştür. En düşük tane boyutu 950 °C’de tavlama ısıl işlemine tabi tutulan numunede görülürken en büyük tane boyutu ise 1250 °C’de tavlama ısıl işlemine tabi tutulan numunede görülmüştür. Numunelerde artan tane boyutu ile birlikte akma gerilmeleri ve çekme gerilmeleri gibi mekanik özelliklerinde düşme görülürken pekleşme katsayısının yükseldiği görülmüştür. Yine en büyük akma gerilmesi 950 °C’de tavlama işlemine tabi tutulan numunede görülürken bunu 1100 ve 1250 °C’de tavlama işlemine tabi tutulan numuneler izlemiştir. AISI 1020 çeliğini pekleşme katsayısı için inceleyecek olursak en büyük pekleşme katsayısı değeri 1250 °C’de tavlama işlemine tabi tutulan numunede görülürken bunu 1100 ve 950 °C’de tavlama işlemine tabi tutulan numuneler izlemiştir.

AISI 8620 çeliği için de artan tavlama sıcaklığı ile tane boyutu değerlerinin arttığı görülmüştür. En düşük tane boyutu 950 °C’de tavlama ısıl işlemine tabi tutulan numunede görülürken bunu 1100 ve 1250 °C’de tavlama ısıl işlemine tabi tutulan numuneler izlemiştir. AISI 8620 çeliği için de artan tane boyutu ile birlikte akma gerilmeleri ve çekme gerilmeleri gibi mekanik özelliklerde düşüş görülmüştür. En büyük akma gerilmesi 950 °C’de tavlama ısıl işlemine tabi tutulan numunede görülürken bunu 1100 ve 1250 °C’de tavlama işlemine tabi tutulan numuneler izlemiştir.

AISI 1020 çeliği ve AISI 8620 çeliği kendi aralarında kıyaslanacak olursa alaşım elementlerinin tane boyutu üzerinde dolayısıyla malzemelerin akma gerilmeleri, çekme gerilmeleri gibi mekanik özellikleri ile birlikte pekleşme katsayısı üzerinde önemli etkiye sahip olduğu görülmüştür. Bu durumu da tanelerin büyümesine engel olan ve daha yüksek

sıcaklıklarda çözünen karbürlerin oluşmasıyla ilişkilendirmek mümkündür. Bu durum göstermektedir ki uygun alaşım elementleri ile alaşımlandırılan malzemelerin yine uygun ısıtım işlem rejimlerinde mekanik özelliklerinin daha da arttırılabileceği anlaşılmıştır. Bunun için farklı bileşime sahip düşük karbonlu alaşımlı çeliklerin aynı yöntem ile incelenmesi önerilebilir.

KAYNAKLAR

- Akgün ÖR, Yazıcıoğlu O ve Kotil T** (2003) *Cisimlerin Mukavemeti*. Beta Yayınları, İstanbul, 722 s.
- Andersson J** (2005) The influence of grain size variation on metal fatigue. *International Journal of Fatigue*, 27: 847-852.
- Antoine P, Vandeputte S ve Vogt JB** (2006) Empirical model predicting the value of the strain-hardening exponent of a Ti-IF steel grade. *Materials Science and Engineering: A*, 433: 55-63.
- Bolhovitinov NF ve Bolhovitinova EN** (1959) *Metal ve Alaşımların Makro ve Mikroyapı Atlası*, Masshinstroyeniye, Moskova, 86 s.
- Can AÇ** (2010) *Tasarımcı Mühendisler İçin Malzeme Bilgisi*. Birsen Yayınevi, İstanbul, 281 s.
- Demirci AH** (2004) *Mühendislik Malzemeleri*. Alfa Aktüel Yayınları, İstanbul, 252 s.
- Eroğlu M** (1997) Düşük Karbonlu Bir Çelikte Kaynak Enerji Girişi ve Başlangıç Tane Boyutunun Kaynak Bölgesinin İç Yapı ve Mekanik Özelliklerine Olan Etkisi. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Eğitimi Anabilim Dalı, Elazığ, 103 s.
- Fawzy A** (2008) Effect of grain diameter, strain rate and deformation temperature on the work hardening characteristics of Al-0.86 wt%Mn-0.28 wt%Fe. *Materials Science and Engineering: A*, 476: 132-139.
- Fawzy A, Sobhy M** (2007) Effect of grain diameter on the work-hardening characteristics of Zn-1 wt.% Cu alloy during phase transformation. *Materials Characterization*: 58: 122-131.
- Gök M** (2010) Çeliklerin Su Verme Derinliğine Tane Boyutunun Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Anabilim Dalı, Afyon, 96 s.
- Güven EA** (2006) Metallerde Pekleşme Üstelinin Sünekliğe Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Kocaeli, 80 s.
- Kara R** (2005) Tane Boyutunun HMK Kafesli Metallerin Temel Mekanik Özelliklerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Anabilim Dalı, Afyon, 112 s.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Kınıkoğlu NG** (2006) *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği*, Literatür Yayıncılık, 811 s.
- Nagarjuna S, Gopalakrishna B ve Srinivas M** (2006) On the strain hardening exponent of Cu-26Ni-17Zn alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 429:169-172.
- Qiu H, Wang LN, Hanamura T ve Torizuka S** (2012) Prediction of the work-hardening exponent for ultrafine-grained steels. *Materials Science and Engineering: A*, 536: 269-272.
- Said G** (2012) *Metallerin Isıl İşlem Teorisi*. 1. Baskı, Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara, 421 s.
- Said G** (2011) Malzeme I Ders Notları (yayımlanmamış). 50 s.
- Said G ve Tasgetiren S** (2004) An express technique for the determination of static and dynamic fracture toughness (K_{IC} , K_{Id}) of bcc metals and alloys. *Mechanics of Materials*, 36: 1129-1142.
- Savaşkan T** (2009) *Malzeme Bilgisi ve Muayenesi*. Derya Kitabevi, Trabzon, 376 s.
- TS 1112 EN 10052** (2002) Demir ve Çelikler İçin Isıl İşlem Terimleri Sözlüğü. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 45 s.
- URL-1** (2012) <http://en.wikipedia.org/wiki/Metal>, Wikipedia, Metal, 14 Mart 2012.
- URL-2** (2012) <http://www.kocaelimakine.com/2010/03/10/demir-karbon-denge-diyagrami>, 8 Haziran 2012.
- URL-3** (2012) <http://comertcelik.com/urunler.asp?code=120000000000>, Cömert Çelik, Karbonlu Çelikler, 2 Nisan 2012.
- URL-4** (2012) <http://www.entimuhendislik.com.tr/Celik%20Nedir.htm>, Enti Mühendislik, 5 Nisan 2012.
- URL-5** (2012) <http://kucuklercelik.com/dokumanlar4.htm>, Küçükler Çelik, Çelik Çeşitleri, 9 Nisan 2012.
- URL-6** (2012) http://www.celmercelik.com/islah_celikleri.htm, Çel-Mer Çelik Endüstrisi, Islah Çelikleri, 10 Nisan 2012.
- URL-7** (2012) www.mert-celik.com/pdf/celikte_alasim_elementleri.pdf, Mert Çelik, Çelikte Alaşım Elementleri, 16 Nisan 2012.
- URL-8** (2012) http://www.teknolojikarastirmalar.com/e-egitim/malzeme/yuzey_hatalari.htm, 6 Mayıs 2012.
- URL-9** (2012) <http://ninova.itu.edu.tr/tr/dersler/kimya-metalurji/1600/mal-201/ekkaynaklar?g160199>, 6 Mayıs 2012.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- URL-10** (2012) <http://www2.isikun.edu.tr/personel/ahmet.aran/mal201.pdf>, 6 Mayıs 2012.
- URL-11** (2012) http://www.yarbis.yildiz.edu.tr/web/userCourseMaterials/akdogan_40f5ae4e1e73c25b9b5efdf47b5a5b5d.pdf, 10 Mayıs 2012.
- URL-12** (2012) <http://www.inplod.com/t/dispersiyon-sertlesmesi-ve-metodlari-nedir>, 25 Temmuz 2012.
- URL-13** (2012) <http://www.scribd.com/doc/76968685/F%C4%B0Z%C4%B0KSEL-METALURJ%C4%B0-Martenzitik-Donu%C5%9Fumler>, 20 Mayıs 2012.
- URL-14** (2012) http://www.bayolmakine.com/web/download/03celik_tavlama.pdf, 24 Mayıs 2012.
- Yıldızlı K** (2011) Çekme/Eğme Deney Föyü. Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Samsun, 11 s.
- Zolotorevski** (1983) *Metallerin Mekanik Özellikleri*. Mashinostroyeniye, Moskova, 350.

ÖZGEÇMİŞ

Deniz AKTAŞ 1987 yılında Ankara’da doğdu; ilk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladı; Ankara Şentepe Lisesi’nden mezun olduktan sonra 2005 yılında Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü’ne girdi; 2009 yılında aynı bölümden mezun oldu. 2010 yılında Bartın Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü’nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı ve halen bu görevini sürdürmektedir.

ADRES BİLGİLERİ

Adres: Bartın Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
Makine Mühendisliği Bölümü
74100 BARTIN

Tel: (378) 223 53 57

Faks: (378) 223 52 58

E-posta: denizaktas@bartin.edu.tr