

**T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDE KULLANILAN ÇİFT FAZLI ÇELİKLERİN
FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

SERTAN KEMAL AKAY

**DOKTORA TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI**

BURSA 2005

**T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDE KULLANILAN ÇİFT FAZLI ÇELİKLERİN
FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

SERTAN KEMAL AKAY

**DOKTORA TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI**

Bu Tez 16/12/2005 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ahmet AVİNÇ (Danışman)

Prof. Dr. Naim DEREBAŞI

Prof. Dr. Ali BAYRAM

Prof. Dr. Hikmet AKSEL

Yrd. Doç. Dr. Murat YAZICI

ÖZET

Bu araştırmada, çift fazlı çelik üretmek için % 0.055 C' lu çelik kullanılmıştır. Standartlara göre hazırlanmış yorulma deney örnekleri iki farklı ısıl işleme tabi tutulmuştur. I. grup ısıl işlemden, normalize edilmiş örnekler ostenit bölgesinde 940°C sıcaklıkta 45 dakika tavlansarak suda soğutulmuştur. Daha sonra aynı örnekler, ferrit + ostenit bölgesinde 780°C, 825°C ve 870°C sıcaklıklarında 60 dakika tavlansarak suda soğutulmuştur. II. grup ısıl işlemden, I. grup ısıl işleme üretilen çift fazlı çelikler 400°C' de 2 saat tavlansarak ısı verme işlemi uygulanarak havada soğutma uygulanmıştır. Farklı ısıl işlemlerle üretilen değişik mikro yapıları çift fazlı çelik örneklerine sabit hızda çekme testleri uygulanarak mekanik özellikleri incelenmiştir. Isıl işlem sonrası, çift fazlı çeliklerin kristal yapısı ve bozunumları x ışını kırınımı deneyi kullanılarak ve bu çeliklerin elektrik özdirenç ölçümleri de dört nokta elektrot yöntemi ile elde edilmiştir. Bu örneklerde düşük frekanslarda (50 Hz-100 Hz) mıknatıslama uygulanarak manyetik özellikleri (B – H değişimleri) incelenmiştir. Değişik martenzit miktarına sahip çift fazlı çelik örneklerinin yorulma ömürleri yorulma test cihazı ile belirlenmiştir. Çift fazlı çeliklerin elde edilen yorulma değerleri ferrit + perlit mikro yapısına sahip çeliklere göre iyileşme sağlandığı sonucuna varılmıştır. Çift fazlı çeliklerin yorulma kırılma yüzeyleri elektron mikroskobu ile incelenerek, çatlak başlangıç ve ilerleme mekanizmaları incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çift fazlı çelik, Isıl işlem, X ışınları, Elektrik özdirenç, Yorulma, Elektron mikroskobu.

ABSTRACT

In this research, % 0.055 C steel have been used in order to produce dual phase steels. Two different heat treatment procedures were applied to fatigue specimens prepared according to the standards. In the first group of heat treatment, normalized specimens have been annealed in the region of austenite time of 45 minutes followed by water quenching. Then, the same specimens, in the ($\alpha + \gamma$) region at the temperatures of 780°C, 825°C and 870°C followed by the heat treatment for 60 minute and water quenching. In the second group of the heat treatment, the specimes which are produced in the first group of heat treatment were tempered at the temperature of 400°C for 2 hours and then air cooling. Some mechanical properties are investigated by applying tensile stress at constant rate on dual phase steel specimens having various microstructures produced by different heat treatments. After heat treatments, crystall structure and deformation of dual phase steels have been investigated by the x ray diffraction and electrical resistivity measurements of these steels obtained by the four point probe. The magnetic properties (B-H) of these specimens have been investigated by applying magnetization at low frequencies (50 Hz-100 Hz). Also, the fatigue life of dual phase steels which have various martensite amount are determined by the fatigue test machine. The fatigue properties of dual phase steels compared with the ferrite + pearlite microstructural steels have some improvement. The fatigue fracture surfaces of dual phase steels obtained by the SEM crack initiation and progress mechanism have been investigated.

Keywords: Dual phase steel, Heat treatment, X ray, Electric resistivity, Fatigue, Electron microscope.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER DİZİNİ.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL BİLGİ.....	3
2.1. ÇELİK	3
2.1.1. Çeliğin Temel Özellikleri	3
2.1.2. Çeliklerin Sınıflandırılması	4
2.1.3. Çelik Çeşitleri.....	4
2.1.3.1. Az Alaşımli Çelikler	4
2.1.3.2. Yüksek Alaşımli Çelikler	4
2.2. ÇİFT FAZLI ÇELİKLERİN KEŞFİ ve TANIMI.....	5
2.2.1. Çift Fazlı Çeliklerin Isıl İşlemleri.....	6
2.2.2. ($\alpha + \gamma$) Bölgesinde Tavlama İle Çift Fazlı Çelik Üretimi.....	9
2.2.2.1. Tavlama Sırasında Ostenit Oluşumu	9
2.2.2.2. Tavlamadan Sonra Ostenitin Dönüşümü	9
2.2.2.3. Tavlama Sırasında Ferrit Fazındaki Değişimler	10
2.3. ÇİFT FAZLI ÇELİK OLUŞUMUNUN MİKROSKOBİK ANALİZİ	11
2.4. ÇİFT FAZLI ÇELİKLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE MİKRO YAPI BİLEŞENLERİNİN ETKİSİ	12
2.4.1. Martenzitin Mekanik Özelliklere Etkisi	12
2.4.2. Ferritin Mekanik Özelliklere Etkisi	13
2.5. X IŞINLARI YARDIMI İLE KRİSTAL YAPI TAYİNİ	14
2.5.1. X Işınlmasının Elde Edilmesi ve Özellikleri	14
2.5.1.1. Karakteristik Spektrum	15
2.5.2. Kristal Geometri ve Yapısı	17
2.5.2.1. Kristal Örgü Doğrultuları ve Düzlemler.....	18

2.5.3. Kristal Yapı Tayini	20
2.5.4.1. Kübik Kristal Yapıların İndislenmesi	21
2.5.4.2. Kübik Olmayan Kristallerin İndislenmesi	23
2.6. MANYETİK MADDELER	25
2.6.1. Manyetik Maddelerin Sınıflandırılması	25
2.6.1.1. Manyetik Alan	25
2.6.1.2. Manyetik Alan Şiddeti	25
2.6.1.3. Manyetik Akı Yoğunluğu	25
2.6.1.4. B, H ve M Arasındaki İlişki	26
2.6.2. Ferromanyetik Maddeler	27
2.6.3. Ferromanyetik Maddelerin Manyetik Özellikleri	28
2.6.3.1. Geçirgenlik ve Artık Mıknatıslanma	28
2.6.3.2. Histeresis Eğrisi ve Özellikleri	29
2.6.4. Ferromanyetik Maddelerin Sınıflandırılması	30
2.7. MALZEMELERDE YORULMA OLAYI ve TESPİTİ	31
2.7.1. Malzemelerde Yorulma	31
2.7.1.1. Yorulmada Çatlak Oluşumu ve Büyümesi	31
2.7.1.2. Çatlak İlerlemesinin Mikro Mekanizmaları	32
2.7.1.2.1. Mikro Boşluk Birleşmesi İle Çatlak İlerlemesi	32
2.7.1.2.2. Ayrılma İle Çatlak İlerlemesi	32
2.7.1.2.3. Taneler Arası Çatlak İlerlemesi	32
2.7.2. Yorulma Kırılması	34
2.7.2.1. Yorulma Kırıklarının Görünümü	35
2.7.3. Yorulma Ömrüne Etki Eden Faktörler	35
2.7.3.1. Metalürjik Etkiler	36
2.7.3.2. Gerilim Yoğunlaşması	36
2.7.3.3. Yüzey Etkileri	37
2.7.3.4. Boyut Etkisi	37
2.7.3.5. Sıcaklığın Etkisi	37
2.7.4. Yorulma Deneyleri	38
2.7.4.1. Yorulma Deney Türleri	39

2.7.4.2. Yorulma Deneyi İle İlgili Terimler.....	40
2.7.5. Yorulma Dayanımının Gösterilmesi.....	42
2.7.5.1. Wöhler Yöntemi ve ($\sigma - N$) Diyagramı.....	42
2.7.5.2. Smith Diyagramı.....	44
2.7.5.3. Goodman Diyagramı	45
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	46
3.1. MATERYAL.....	46
3.2. YÖNTEM.....	47
3.2.1. Isıl İşlemler	47
3.2.2. Metalografik İşlemler	48
3.2.3. Mekanik Deneyler	49
3.2.4. Fiziksel Deneyler.....	50
3.2.4.1. X Işını Analizleri	50
3.2.4.1.1. X Işını Kırınımı Yardımı İle Örnek Yüzeylerinin Taranması.....	51
3.2.4.2. Elektrik Özdirenç Ölçümleri.....	52
3.2.4.3. Manyetik Ölçümler	53
3.2.4.3.1. Çekirdekte Manyetik Büyüklüklerin Hesaplanması	53
3.2.4.3.2. B – H Eğrilerinin Elde Edilmesi	56
3.2.5. Yorulma Ömür Ölçümleri	57
3.2.5.1. X Uzunluktaki Bir Kesitte Eğilme Moment İfadesinin Elde Edilmesi	58
3.2.5.2. Düşey Yüklü Bir Çubukta Gerilme İfadesinin Elde Edilmesi.....	60
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI ve TARTIŞMA	64
4.1. MİKRO YAPI SONUÇLARININ YORUMLANMASI	64
4.2. MEKANİK DENEYLERİN YORUMLANMASI.....	72
4.2.1. Çekme ve Sertlik Deney Sonuçları.....	72
4.3. FİZİKSEL DENEYLERİN YORUMLANMASI	75
4.3.1. X Işını Deney Sonuçları	75
4.3.2. Elektrik Özdirenç Ölçümleri	80

4.3.3. B – H Eğrilerinin Değişimi	83
4.4. YORULMA ÖMÜR ÖLÇÜMLERİNİN YORUMLANMASI	95
4.4.1. Yorulma Kırılma Yüzeylerinin Elektron Mikroskobu ile İncelenmesi.....	103
5. SONUÇLAR	110
KAYNAKLAR	113
TEŞEKKÜR	
ÖZGEÇMİŞ	

SİMGELER DİZİNİ

A_1, A_3	: Demir – Karbon diyagramındaki kritik sıcaklık aralığının gösterimi
α	: Demir – Karbon diyagramındaki ferrit fazının kısaca gösterimi
γ	: Demir – Karbon diyagramındaki ostenit fazının kısaca gösterimi
α'	: Martenzit fazının kısaca gösterimi
V_m	: Martenzit hacim oranı
σ_a	: Akma dayanımı
σ_{ζ}	: Çekme dayanımı
σ	: Gerilme (Uygulanan gerilme)
E	: Young modülü (Elastisite modülü)
i	: Akım
\vec{H}	: Manyetik alan şiddeti
\vec{B}	: Manyetik akı yoğunluğu (Manyetik indüksiyon)
N	: Sarım sayısı
μ	: Manyetik geçirgenlik
μ_o	: Boşluğun manyetik geçirgenliği
μ_r	: Bağlı geçirgenlik
V	: İndüklenen gerilim
t	: Zaman
Φ	: Manyetik akı
\vec{M}	: Mıknatıslanma
χ	: Manyetik alınganlık
T	: Sıcaklık
T_c	: Curie sıcaklığı
H_w	: Moleküler alan
f	: Frekans
ρ	: Elektrik öz direnç
\vec{E}	: Elektrik alan
l_{Fe}	: Ortalama manyetik yol
A_{Fe}	: Çekirdeğin demir kesiti
V_{ort}	: İndüklenen gerilimin ortalama değeri

V_{rms}	: İndüklenen gerilimin etkin değeri
t	: Kalınlık
β	: Demir – Karbon diyagramındaki sementitin gösterimi
C	: Karbon
Fe	: Demir
CR	: Kritik soğutma hızı
M_{nE}	: Manganez eşdeğeri
s	: Saniye
λ	: Dalga boyu
x,y,z	: Üç boyutta koordinat eksenlerinin gösterimi
A	: Genlik
K,L,M	: Bir atomda çekirdeği çevreleyen yörüngelerin gösterimi
a,b,c	: Bir kristalde örgü sabitleri
hkl	: Miller indisleri
d_{hkl}	: Bir kristalde miller indisleri arasındaki uzaklığın gösterimi
θ	: Gelen ve yansıyan ışınların kristal düzlemlerindeki atomlar ile yaptığı açı
θ	: Eğilme açısı
M_s	: Doyum mıknatıslanması
H_c	: Sıfırlayıcı alan
σ_{maks}	: En büyük gerilme değeri
σ_{min}	: En küçük gerilme değeri
σ_m	: Ortalama gerilme
$\Delta\sigma$: Gerilme aralığı
R	: Gerilme oranı
N	: Çevrim sayısı
$+\sigma$: Çekme gerilmesi
$-\sigma$: Basma gerilmesi
σ_{ort}	: Ortalama gerilme
d	: Ortalama tane boyutu
L	: Çizgi boyu
V	: Mikroskobun büyütme oranı

P	: Çizgi sayısı
n	: Çizgiler tarafından kesilen tane sayısı
X	: Karbonun yüzde ağırlık oranı
a	: Elektrotlar arası uzaklık
ΔV	: Potansiyel farkı
I	: Akım
M	: Moment
I_z	: Z – eksenine göre eylemsizlik momenti
P	: Uygulanan yük
x	: Uzaklık

KISALTMALAR

H.S.L.A	: Yüksek mukavemetli düşük alaşımlı (High strenght low alloy)
YMK	: Yüzey merkezli kübik kristal (Face center cubic)
HMK	: Hacim merkezli kübik kristal (Base center cubic)
HMT	: Hacim merkezli tetragonal (Base center tetragonal, bct)
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu (Scanning electrone microscope)
EDX	: Elektron yayınımlı x ışınları spektroskopisi (Electron dispersive x ray spectroscopy)
TSE	: Türk standartları enstitüsü
ASTM	: Amerikan test malzemeleri derneği (American society of testing materials)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Çift fazlı, yüksek mukavemetli az alaşımlı (HSLA) ve az karbonlu Çeliklere ait gerilme – birim şekil değiştirme eğrileri	6
Şekil 2.2. Fe – C faz diyagramı.....	7
Şekil 2.3. Çift faz mikro yapısının elde edilmesinin şematik izahı	7
Şekil 2.4. Çift faz ısı işlemleri için sıcaklık aralıkları.....	8
Şekil 2.5. Tipik çift faz mikro yapısı, $\alpha'\alpha'$, $\alpha\alpha$ kristal sınırları ve $\alpha\alpha'$ faz sınırlarının görüntüsü	11
Şekil 2.6. $(\alpha + \gamma)$ Bölgesinde tavllanmış çelikte, karbon miktarının ve tavlama sıcaklığının martenzit hacim oranına etkisi.....	13
Şekil 2.7. X ışınları oluşumunun şematik izahı.....	14
Şekil 2.8. 35 kV' da molibdene ait karakteristik spektrum.....	15
Şekil 2.9. Bir atomda elektronik geçişler	16
Şekil 2.10. Üç boyutlu uzayda bir birim hücrenin büyüklüğü ve şeklinin örgü sabitleri a, b ve c ile gösterimi	17
Şekil 2.11. Bravais' in tanımladığı kristal yapılardan bazıları (a): Basit kübik yapı, (b): Hacim merkezli kübik yapı, (c): Basit tetragonal yapı (d): Hacim merkezli tetragonal yapı	18
Şekil 2.12. Doğrultman indislerinin gösterimi.....	19
Şekil 2.13. (a) ve (b) Miller indisleriyle düzlemlerin gösterilişi.....	19
Şekil 2.14. Kübik kristal yapıların miller indislerinin görünümü	22
Şekil 2.15. Tetragonal sisteme ait örgü sabit değerlerinin %C oranına bağlı değişimleri.....	24
Şekil 2.16. Tetragonal sistemin olası miller indisleri.....	24
Şekil 2.17. Ferromanyetizma	27
Şekil 2.18. Histeresis eğrisi.....	29
Şekil 2.19. B – H eğrilerinin oluşumu.....	30
Şekil 2.20. Çok kristalli metallerde yorulma çatlak ilerlemesinin birinci ve ikinci safhalarının şematik gösterimi	33
Şekil 2.21. Yorulma çatlak ilerleme mekanizması (2. Safha) (a): Sıfır veya en büyük basma yükü, (b): Küçük çekme yükü, (c): En büyük çekme yükü,	

(d): Küçük basma yükü	33
Şekil 2.22. Kayma bantlarının gösterimi	34
Şekil 2.23. Yorulma çatlaklarının en yüksek gerilme yoğunluğu yolunu takibi.....	36
Şekil 2.24. σ_m ' in çevrimsel gerilim üzerindeki etkisi.....	41
Şekil 2.25. $\sigma - N$ eğrisi.....	43
Şekil 2.26. Smith diyagramı.....	44
Şekil 2.27. Goodman diyagramı	45
Şekil 3.1. Deney örneği.....	46
Şekil 3.2. Fe – C diyagramı ve ısı işlemlerin uygulandığı sıcaklıklar	
(a): I. grup ısı işlem.....	47
(b): II. grup ısı işlem	48
Şekil 3.3. X ışını spektrometresi	51
Şekil 3.4. Dört nokta elektrot yönteminin şematik gösterimi	52
Şekil 3.5. Mıknatıslama devresi	53
Şekil 3.6. Schenck yorulma deney cihazı.....	57
Şekil 3.7. Ucuna P tekil yükü etkileyen çubuk	58
Şekil 3.8. (a): Eğilmeden önce örnek, (b): Eğilmeden sonra örnek,	
(c): Eğilen uçlardan alınan kesit.....	60
Şekil 4.1. Isıl işlem uygulanmamış örneğin optik mikroskop görüntüsü (100x).....	65
Şekil 4.2. 910°C' de 45 dakika tavlanylup havada soğutulan başlangıç örneğinin	
optik mikroskop görüntüsü (100x).....	65
Şekil 4.3. I. grup ısı işlemle üretilen çift fazlı çeliklerin mikro yapıları, (a), (b)	
780, 825°C sıcaklıklarda 60 dakika tavlanylup suda soğutulmak suretiyle	
üretilen çift fazlı çeliklerin optik mikroskop görüntüleri (200x)	66
(c) : 870°C sıcaklıkta 60 dakika tavlanylup suda soğutulmak suretiyle	
üretilen çift fazlı çeliklerin optik mikroskop görüntüsü (200x).....	67
Şekil 4.4. II. grup ısı işlemle üretilen çift fazlı çeliklerin mikro yapıları	
(a): 940°C' de 45 dakika tavlanylup su verildikten sonra ($\alpha + \gamma$)	
bölgesinde 780°C tavlama sıcaklığında 60 dakika tavlanylup su verilerek	
üretilen ve 400°C sıcaklıkta 2 saat ısı verme işlemi ile üretilen	
çift fazlı çeliğin optik mikroskop görüntüsü (200x)	67
(b), (c): 940°C' de 45 dakika tavlanylup su verildikten sonra ($\alpha + \gamma$)	

bölgesinde 825, 870°C tavlama sıcaklıklarında 60 dakika tavlama su verilerek üretilen ve 400°C sıcaklıkta 2 saat ısı verme işlemi ile üretilen çift fazlı çeliklerin optik mikroskop görüntüleri (200x)	68
Şekil 4.5. I. grup çift fazlı çeliklerde tavlama sıcaklığına bağlı olarak martenzit yüzde hacim oran değişimi.....	69
Şekil 4.6. I. grup çift fazlı çeliklerde tavlama sıcaklığına bağlı olarak martenzit tane boyutu değişimi	70
Şekil 4.7. II. grup çift fazlı çeliklerde tavlama sıcaklığına bağlı olarak martenzit yüzde hacim oran değişimi.....	71
Şekil 4.8. II. grup çift fazlı çeliklerde tavlama sıcaklığına bağlı olarak martenzit tane boyutu değişimi	71
Şekil 4.9. I. ve II. grup çift fazlı çeliklerin sertlik değerlerinin tavlama sıcaklığına bağlı değişimi	73
Şekil 4.10. I. grup çift fazlı çeliklerin sertlik değerlerinin martenzit yüzde hacim oranlarına bağlı değişimi.....	74
Şekil 4.11. II. grup çift fazlı çeliklerin sertlik değerlerinin martenzit yüzde hacim oranlarına bağlı değişimi.....	74
Şekil 4.12. 780°C’ de 60 dakika tavlama suda soğutulmuş üretilen çift fazlı çelik örneğin x ışını kırınımı deney sonuçlarına göre martenzit ve ferrit kristal yapılarının incelenmesi.....	75
Şekil 4.13. 825°C’ de 60 dakika tavlama suda soğutulmuş üretilen çift fazlı çelik örneğin x ışını kırınımı deney sonuçlarına göre martenzit ve ferrit kristal yapılarının incelenmesi.....	77
Şekil 4.14. 870°C’ de 60 dakika tavlama suda soğutulmuş üretilen çift fazlı çelik örneğin x ışını kırınımı deney sonuçlarına göre martenzit ve ferrit kristal yapılarının incelenmesi.....	78
Şekil 4.15. 30 kV’ da Fe ve C’ a ait karakteristik spektrumlar	79
Şekil 4.16. I. grup çift fazlı çeliklerde, tavlama sıcaklığının elektrik özdirenç değerlerine bağlı değişimi	81
Şekil 4.17. II. grup çift fazlı çeliklerde, tavlama sıcaklığının elektrik özdirenç değerlerine bağlı değişimi	81
Şekil 4.18. I. grup çift fazlı çeliklerin 50 Hz de elde edilen B – H eğrileri	88

Şekil 4.19. I. grup çift fazlı çeliklerin 100 Hz de elde edilen B – H eğrileri	88
Şekil 4.20. II. grup çift fazlı çeliklerin 50 Hz de elde edilen B – H eğrileri	89
Şekil 4.21. II. grup çift fazlı çeliklerin 100 Hz de elde edilen B – H eğrileri	89
Şekil 4.22. I. grup çift fazlı çeliklerin 50 Hz de elde edilen $\mu_r - B_m$ eğrileri	90
Şekil 4.23. I. grup çift fazlı çeliklerin 100 Hz de elde edilen $\mu_r - B_m$ eğrileri	90
Şekil 4.24. II. grup çift fazlı çeliklerin 50 Hz de elde edilen $\mu_r - B_m$ eğrileri.....	91
Şekil 4.25. II. grup çift fazlı çeliklerin 100 Hz de elde edilen $\mu_r - B_m$ eğrileri.....	91
Şekil 4.26. Isıl işlem uygulanmamış örneğin ($\sigma - N$) Wöhler eğrisi.....	97
Şekil 4.27. Normalizasyon tavlaması uygulanmış örneğin ($\sigma - N$) Wöhler eğrisi.....	97
Şekil 4.28. 780°C’ de 60 dakika tavlانیp suda soğutulmuş çift fazlı çelik örneğin ($\sigma - N$) Wöhler eğrisi	98
Şekil 4.29. 825°C’ de 60 dakika tavlانیp suda soğutulmuş çift fazlı çelik örneğin ($\sigma - N$) Wöhler eğrisi	98
Şekil 4.30. 870°C’ de 60 dakika tavlانیp suda soğutulmuş çift fazlı çelik örneğin ($\sigma - N$) Wöhler eğrisi	99
Şekil 4.31. 780°C’ de 60 dakika tavlانیp suda soğutulmuş daha sonra 400°C de 120 dakika tavlانیp havada soğutulan çift fazlı çelik örneğin ($\sigma - N$) Wöhler eğrisi	99
Şekil 4.32. 825°C’ de 60 dakika tavlانیp suda soğutulmuş daha sonra 400°C de 120 dakika tavlانیp havada soğutulan çift fazlı çelik örneğin ($\sigma - N$) Wöhler eğrisi	100
Şekil 4.33. 870°C’ de 60 dakika tavlانیp suda soğutulmuş daha sonra 400°C de 120 dakika tavlانیp havada soğutulan çift fazlı çelik örneğin ($\sigma - N$) Wöhler eğrisi	100
Şekil 4.34. Yorulma deney sonucu kırılma gerçekleşen yüzeyin görüntüsü	103
Şekil 4.35. Isıl işlem uygulanmamış örneklerin, yorulma deney sonucu kırılma yüzeylerinin SEM ile görüntülenmesi (a): 100x, (b): 4000x.....	104
Şekil 4.36. Normalizasyon tavlaması uygulanmış çeliğin yorulma deney sonucu kırılma yüzeylerinin SEM ile görüntülenmesi (a): 100x, (b): 1500x.....	105

Şekil 4.37. I. Grup çift fazlı çeliklerin yorulma deney sonucu, kırılma yüzeylerinin SEM ile görüntülenmesi. (a): 200x, (b): 5000x	106
Şekil 4.38. II. grup çift fazlı çeliklerden seçilen örneğin yorulma deney sonucu kırılan yüzeyinin SEM ile görüntülenmesi (600x)	107

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa No
Çizelge 3.1. Deneysel malzemesinin kimyasal kompozisyonu	46
Çizelge 4.1. I. grup çift fazlı çeliklerde, çift faz mikro yapılarına ait martenzit yüzde hacim oranı ve tane boyutu değerleri	69
Çizelge 4.2 II. grup çift fazlı çeliklerde, çift faz mikro yapılarına ait martenzit yüzde hacim oranı ve tane boyutu değerleri	70
Çizelge 4.3. I. ve II. grup çift fazlı çeliklere ait akma, çekme mukavemet ve sertlik değerleri.....	72
Çizelge 4.4. 780°C' de 60 dakika tavlama suda soğutulmuş elde edilen çift fazlı çelik örneğin x ışını kırınım deney sonuçları.....	75
Çizelge 4.5. 825°C' de 60 dakika tavlama suda soğutulmuş elde edilen çift fazlı çelik örneğin x ışını kırınım deney sonuçları.....	77
Çizelge 4.6. 870°C' de 60 dakika tavlama suda soğutulmuş elde edilen çift fazlı çelik örneğin x ışını kırınım deney sonuçları.....	78
Çizelge 4.7. I. ve II. grup çift fazlı çeliklerin dört nokta elektrot yöntemi ile ölçülen öz direnç değerleri	80
Çizelge 4.8. I. grup çift fazlı çeliklerin 50 Hz de ölçülen B_m , H ve μ_r değerleri.....	84
Çizelge 4.9. I. grup çift fazlı çeliklerin 100 Hz de ölçülen B_m , H ve μ_r değerleri.....	85
Çizelge 4.10. II. grup çift fazlı çeliklerin 50 Hz de ölçülen B_m , H ve μ_r değerleri	86
Çizelge 4.11. II. grup çift fazlı çeliklerin 100 Hz de ölçülen B_m , H ve μ_r değerleri ...	87
Çizelge 4.12. Yorulma deneyinde elde edilen sonuçların gösterimi.....	96

1. GİRİŞ

Günümüzde özellikle enerji fiyatlarındaki artış üretim dallarında düşük maliyetli üretimin ön plana çıkmasına neden olmaktadır. Bu olay, otomotiv endüstrisini de etkilemiş ve taşıtlarda yakıt açısından yeni geliştirilen motor tasarımlarının yanında, hareket ettirilmesi gereken taşıt kütlelerinin azaltılmasının da önemli olduğu ortaya çıkmıştır. Zira, taşıt ağırlığı ile yakıt tüketimi arasında bağlantılı bir ilişki vardır; taşıt ağırlığında yapılacak %50'lik bir azalma, %35 dolayında bir yakıt tasarrufu sağlamaktadır.

Bir otomobil üretiminde, taşıt ağırlığının yaklaşık %74-78'i arasında çelik, %14-18'i arasında polimer esaslı malzeme, %3-5 arasında demir dışı metal ve alaşımları ile %3-5 arasında dökme demir türü malzemeler kullanılır. Çelik malzemenin bu yüksek yüzdesini düşürebilmek amacıyla, çelik malzemenin özelliklerinin iyileştirilmesine ve yeni malzemelerin kullanılmasına gerek vardır. Taşıtlarda yüksek mukavemetli çeliklerin yerine çift fazlı çeliklerin, kullanımını her geçen yıl artmaktadır.

Çift fazlı çelikler sünek (yumuşak) ve küçük taneli ferrit ve sert martenzit fazlarından oluşan bir mikro yapıya sahiptir (Durmuş 2000). Diğer çelik türlerine göre, çift fazlı çelikler, kolay şekil verilebilirlik özellikleri ve düşük üretim maliyetleri ile üstünlük sağlamaları nedeniyle otomotiv endüstrisinde tercih edilir duruma gelmiştir. Bu çeliklerle ilgili çalışmalar hala devam etmektedir. Halfpenny (2000), %80-90 arasındaki tüm yapısal hataların yorulma mekanizmasından ileri geldiğini ve Amerika Birleşik Devletlerinin bu olaydan dolayı yıllık kaybının 1.5 milyar \$ olduğunu belirtmiştir.

Çift fazlı çeliklerin üretimi kadar yorulma özelliklerinin bilinmesi de önemlidir. Yorulma olayında malzemenin akma dayanımından daha düşük değerlerde hasar meydana gelebilir. Özellikle taşıtlar kullanım sırasında tekrarlı yüklere maruz kalırlar. Bu olay sonucunda gerilme yığılmasının meydana geldiği ani kesit değişim bölgelerinde başlayan çatlak ilerleyerek kırılmalara neden olur.

Bu araştırmada, farklı ısıl işlemlerle üretilen çift fazlı çeliklerin martenzit tane boyutu ve martenzit yüzde hacim oranlarının x – ışını kırınımı, elektrik özdirenç, manyetik özellikler ve mekanik özellikler üzerine etkileri incelenmiştir. Ayrıca farklı martenzit miktarlarına sahip çift fazlı çeliklerin yorulma ömür değerleri belirlenerek, ferrit + perlit mikro yapısına sahip çeliklerle karşılaştırma yapılmıştır.

%0.055 C içeren elik örneklere farklı ısıl işlemler uygulanarak değişik oranlarda martenzit tane boyutu ve martenzit yüzde hacim miktarları içeren çift fazlı çelikler üretilmiştir.

Üretilen ift fazlı çeliklerin kristal yapılarını belirlemek için, seçilen örnekler x ışını kırınımı deneyine tabi tutulmuştur. Elde edilen kırınım desenlerinden hareketle çift fazlı elik örneklerin kristal yapıları belirlenmiştir. Çift fazlı elik örneklerin ısıl işlem sonrası elektrik özdirenç değerleri dört nokta elektrot yöntemi ile ölçülmüştür. Ayrıca üretilen çift fazlı çeliklerin düşük frekanslarda (50 Hz - 100 Hz) mıknatıslama işlemi uygulanarak, manyetik alan şiddeti (\vec{H}), manyetik akı yoğunluğu (\vec{B}) ve bağlı manyetik geçirgenlik (μ_r) değerleri ölçülerek, B – H ve $\mu_r - B_m$ değişimleri elde edilerek sert fazın manyetik özellikler üzerine etkisi incelenmiştir.

Mekanik zellikleri belirlemek için, farklı ısıl işlemlerle üretilen çift fazlı çeliklere sabit hızda çekme testleri uygulanarak akma ve çekme mukavemet değerleri belirlenmiştir.

Değişik oranlarda martenzit miktarına sahip çift fazlı çeliklerin yorulma ömür değerleri yorulma testleri ile belirlenerek, martenzit miktarının yorulma dayanımı üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Son olarak, çift fazlı çeliklerin yorulma sonrası kırılma yüzeyleri incelenerek çatlak başlangıç ve ilerleme mekanizmaları incelenmiştir.

2. KURAMSAL BİLGİLER

2.1. ÇELİK

Çelik, bir demir (Fe) karbon (C) alaşımıdır. C' dan başka farklı oranlarda alaşım elementleri de bulunabilir. Çeliğe farklı özellikler kazandıran içerdiği elementlerin kimyasal bileşimi ve çeliğin içyapısıdır. Çeliğe değişik oranlarda alaşım elementleri katılabileceği gibi, çeşitli işlemler (ıslah, normalizasyon vs.) ile içyapı da kontrol edilerek kullanım amacına göre değişik özelliklerde çelik elde edilmektedir. Alaşım, bileşik ve katı eriyik özelliklerini tanımlamaktadır ¹⁾.

Çelik demir cevherinden veya hurdadan geri dönüşüm ile iki şekilde üretilmektedir. Sıvı çelik üretildikten sonra döküm ile ingot olarak veya sürekli döküm yöntemi ile kütük olarak şekillendirilir.

2.1.1. Çeliklerin Temel Özellikleri

1) Çeliklerin büyük çoğunluğu ısı işlemlere karşı duyarlıdır. Kimyasal bileşimin yanı sıra uygulanan ısı işlemler sonucunda istenen sertlik, mekanik ve elektriksel özellik, korozyona ve yüksek sıcaklığa dayanım özelliklerine tam olarak kavuşturulabilir.

2) Çelikler yapılarının gerektirdiği sıcaklıklara kadar ısıtıldıklarında şekillenme özelliğine kavuşur (Haddeme, Presleme, Dövme).

3) Ayrıca kimyasal bileşim ve içyapı olarak uygun olan çelikler haddeme, presleme gibi yöntemlerle soğuk olarak da şekillendirilebilir.

4) Talaş kaldırıcı tezgâhlarda işlenerek, istenilen şekil ve yüzey düzgünlüğüne getirilebilir.

2.1.2. Çeliklerin Sınıflandırılması

Yaklaşık 6727 çeşit çelik vardır. Çelikler çeşitli ölçütlere göre sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırma çeşitleri; karbon ve alaşımlı çelik olarak bileşimlerine göre, üretim yöntemlerine göre, son üretim yöntemine göre ve ürün şekline göredir.

2.1.3. Çelik Çeşitleri

Çelikler; yüksek karbonlu çelikler, orta karbonlu çelikler, az karbonlu çelikler, yüksek alaşımlı çelikler, az alaşımlı çelikler ve paslanmaz çelikler diye gruplara ayrılmaktadır. Bundan sonraki kısımda az ve yüksek alaşımlı çelikler hakkında bilgi verilmiştir.

2.1.3.1. Az Alaşımlı Çelikler

Alaşım elemanlarının ağırlık olarak toplam miktarı %5 veya %5' ten az çeliklerdir. Bu çeliklerin kodlama işaretindeki ilk rakam karbon miktarının 100 katı olup, bu sayıdan sonra alaşım elementi veya elementlerinin sembolleri ile daha sonraki sayı ve sayılarla da alaşım elementinin yüzde olarak ağırlıkları verilmektedir. Bu sayılar aşağıdaki alaşım elementi çarpanına bölünerek o elementin yüzde ağırlığı bulunur.

Cr, Mn, Si, Ni, Co, W için "4", Al, Cu, Pb, Mo, V, Ti, Zr, Ti, T için "10", C, S, P, N için "100", B için "1000"

2.1.3.2. Yüksek Alaşımlı Çelikler

Alaşım elementlerinin ağırlık olarak toplam miktarı %5'ten fazla olan çeliklerdir. Yüksek alaşımı belirlemek için tüm ifadenin başına bir "X" işareti konulmuştur. "X" harfinden sonra gelen sayı ortalama C miktarının 100 katıdır. Bu sayıdan sonra alaşım elementlerinin sembolleri ile bunların yüzde olarak ağırlıklarının miktarları verilir. Tüm alaşım elementlerinin çarpanları "1" olarak kabul edilir ¹⁾.

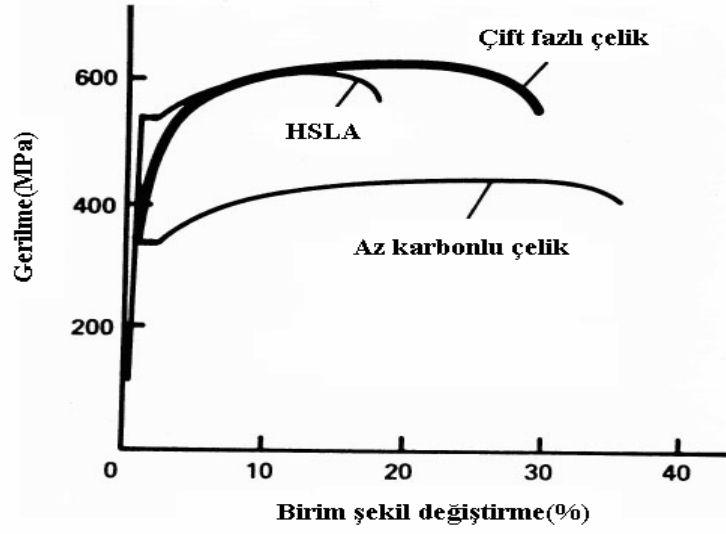
2.2. ÇİFT FAZLI ÇELİKLERİN KEŞFİ ve TANIMI

1970'li yıllarda yaşanan petrol krizi, otomobillerde yakıt tüketimini azaltıcı yönde önlemler alınmasını gerektirmiştir. Bu amaçla daha hafif otomobillerin üretiminde yüksek mukavemetli çeliklerin kullanımı gündeme gelmiştir. Yüksek mukavemetli az alaşımlı (H.S.L.A) çelikler, diğer karbon çelikleri ile karşılaştırıldığında şekil verilebilirlik özelliklerinin iyi olmadığı gözlemlenmiş ve yeni bir malzeme arayışına geçilmiştir. Bu bağlamda çift fazlı çelikler geliştirilmiştir.

Çift fazlı çeliklerle ilgili ilk çalışma 1975 yılında yapılmıştır. Hayami ve Furakawa (1975), kritik sıcaklık aralığında devamlı tavlama yöntemiyle üretilen çeliklerin ferrit ve martenzit mikro yapısına sahip olduğunu bulmuşlardır. Üretilen bu çelikler yüksek mukavemetli az alaşımlı çelikler ile karşılaştırıldığında mükemmel şekil verilebilirlik özelliklerine sahip oldukları gözlenmiştir.

Çift fazlı çelikler, mikro yapılarında ferrit dizey içinde adacıklar şeklinde martenzit fazı içeren, az alaşımlı veya alaşımsız yüksek mukavemetli çelik türüdür. Çift faz teriminin kullanılması bu çeliklerin üretiminde kullanılan ısıl işlem özelliği ve sonuçta elde edilen mekanik özelliklerden kaynaklanmaktadır. Çift fazlı çelikler, az alaşımlı veya alaşımsız az karbonlu çeliklerin Fe – C faz diyagramındaki $A_1 - A_3$ sıcaklık aralığında (ferrit + ostenit bölgesinde) bir süre tutulup, bu sıcaklıkta ferrit ile birlikte bulunan ostenitin uygun hızdaki soğutma ile martenzite dönüştürülmesiyle üretilirler (Davies 1978).

Genellikle az karbonlu olarak üretilen çift fazlı çeliklerde ferrit ve martenzitin yanı sıra mikro yapılarında perlit, beynit, sementit ve kalıntı ostenit de bulunabilir (Cribb ve Rigsbee 1979). Ayrıca çift fazlı çeliklerin, devamlı akma davranışı, %0.2 düşük akma gerilmesi, yüksek çekme gerilmesi ve daha yüksek toplam (%) uzama gibi temel özelliklere de sahip oldukları tespit edilmiştir (Speich 1981).

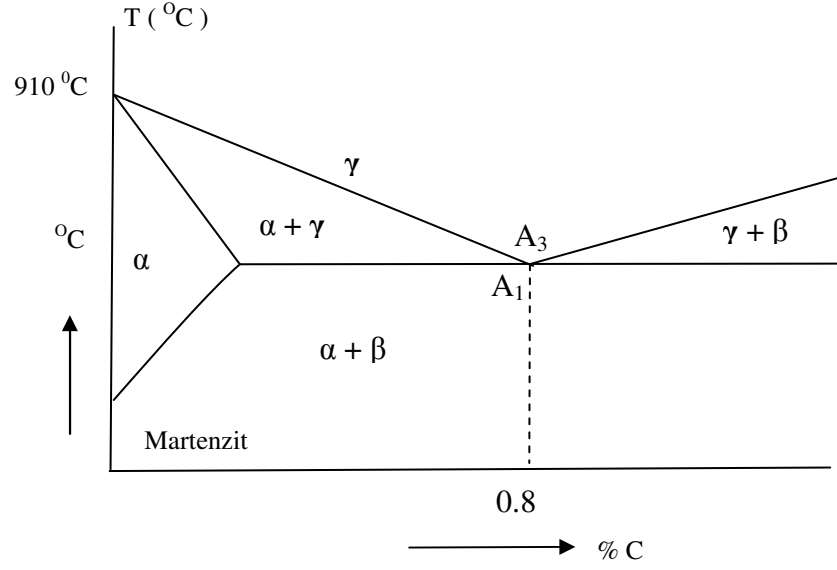


Şekil 2.1. Çift fazlı, yüksek mukavemetli az alaşımlı (HSLA) ve az karbonlu çeliklere ait gerilme – birim şekil değiştirme eğrileri (Speich 1981).

Çift fazlı çeliklerin mekanik özellikleri yüksek mukavemetli az alaşımlı ve az karbonlu alaşımsız çeliklerden oldukça farklıdır (Speich 1981). Eşit çekme mukavemetine sahip çift fazlı çelikler ile yüksek mukavemetli az alaşımlı ve az karbonlu çelikler kıyaslandığında, çift fazlı çeliklerin daha düşük akma gerilmesi ve daha yüksek toplam (%) uzamaya sahip olduğu görülmektedir (Şekil 2.1.).

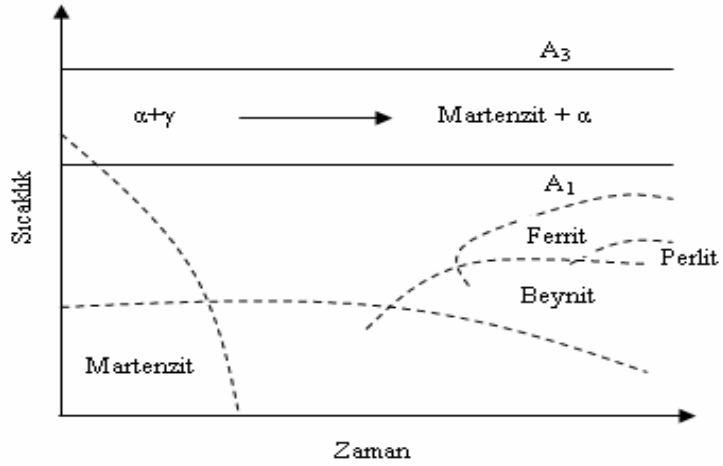
2.2.1. Çift Fazlı Çeliklerin Isıl İşlemleri

Çift fazlı çelikler esas olarak, az alaşımlı veya alaşımsız az karbonlu çeliklerin Fe – C faz diyagramındaki $A_1 - A_3$ sıcaklık aralığında (ferrit + ostenit bölgesinde) bir süre tutulup, bu sıcaklıkta ferrit ile birlikte bulunan ostenitin uygun hızdaki soğutma ile martenzite dönüşmesiyle üretilirler (Şekil 2.2.) (Davies 1978).



Şekil 2.2. Fe – C faz diyagramı.

Çeliklerde çift faz mikro yapısı, Şekil 2.3.'de şematik olarak gösterildiği gibi, $A_1 - A_3$ kritik sıcaklık arasında ısıtmayı izleyen, çeliğin sertleşme kabiliyetine bağlı olarak, uygun bir hızda soğutulmasıyla elde edilir.

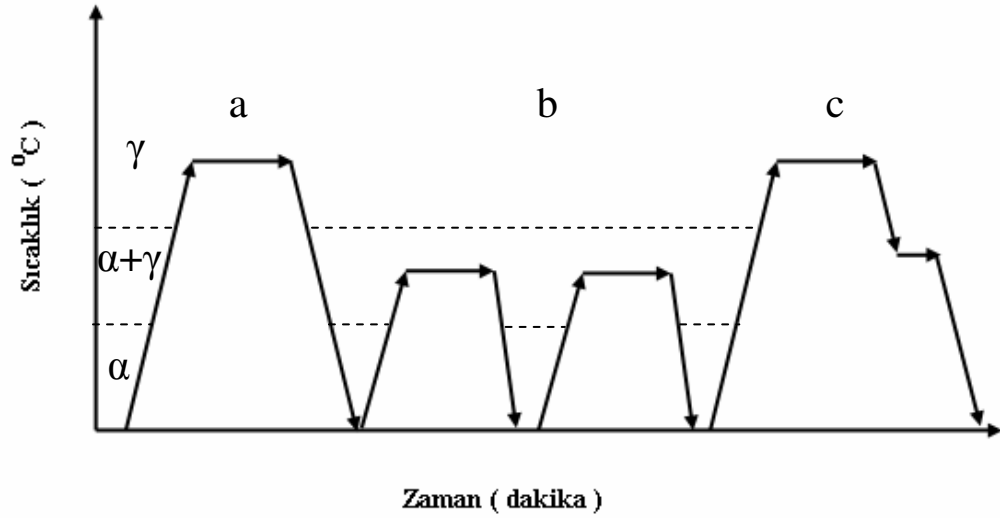


Şekil 2.3. Çift faz mikro yapısının elde edilmesinin şematik izahı.

Kritik sıcaklıklar arasında oluşan ostenitin, perlit veya beynite dönüşmeden, martenzit yapısının ortaya çıkmasına izin verecek şekilde soğutma hızı seçilir. Martenzit dönüşümü olurken de ostenitin bir kısmı kalıntı ostenit olarak dönüşmeden kalır (Morrow ve Tither 1978). Elde edilen mikro yapıda ostenit, martenzit ve ferrit bulunur.

Ostenit ve martenzit ikinci faz olarak kabul edilip, martenzit fazı diye adlandırılmaktadır. Böylece çift fazlı çelik mikro yapısının ferrit ve martenzitten meydana geldiği kabul edilmektedir.

Genellikle az karbonlu olarak üretilen bu çeliklerde ferrit ve martenzitin yanı sıra mikro yapıda perlit, beynit, sementit ve kalıntı ostenit de bulunabilir. Çift fazlı çelikler; ferrit + ostenit bölgesinde bir süre bekletilmeyi içeren, ara su verme (intermediate quenching), doğrudan su verme (intercritical annealing) ve kademeli su verme (step quenching) olarak bilinen üç farklı ısıl işlem yöntemi ile üretilebilir (Durmuş 2000).



Şekil 2.4. Çift faz ısıl işlemleri için sıcaklık aralıkları (Durmuş 2000).

Şekil 2.4.a' da önce ostenit bölgesinde tavlama yapılarak hızla soğutulur. Meydana gelen yapı martenzittir. Sonra tekrar ($\alpha + \gamma$) bölgesinde tavlaniırsa martenzit tane sınırlarında ostenit çekirdekleri oluşur. Bu sıcaklıktan su verilirse ferrit düzey içerisinde dağılmış martenzit oluşmaktadır (Intermediate quenching).

Şekil 2.4.b.'de, başlangıçta ferrit ve perlitten ibaret olan yapı ($\alpha + \gamma$) bölgesine tavlaniır. Ferrit sementit ara yüzeylerinde oluşan ostenit çekirdekleri zamanla büyür. Su verildikten sonraki mikro yapı, ferrit sınırları boyunca küresel martenzitten ibaret olmaktadır (Intercritical annealing).

Şekil 2.4.c' de, kademeli su verme işleminde, önce ostenit bölgesine tavllanır, sonra ($\alpha + \gamma$) bölgesine soğutulur. Ostenit kristal sınırlarında ferrit çekirdekleri oluşur. Ferrit ve ostenitten oluşan yapı, hızla soğutulduğunda ferrit yapı tarafından çevrelenmiş kaba martenzit parçacıkları meydana gelir (Step quenching) (Durmuş 2000).

2.2.2. ($\alpha + \gamma$) Bölgesinde Tavlama İle Çift Fazlı Çelik Üretimi

2.2.2.1. Tavlama Sırasında Ostenit Oluşumu

($\alpha + \text{perlit}$) \rightarrow ($\alpha + \gamma$) dönüşümü difüzyon kontrollü bir reaksiyondur. Bu sebeple karbon atomlarının ostenit fazına yayınma hızı, zaman ve sıcaklığa bağlıdır. ($\alpha + \gamma$) ostenit bölgesinde tavlama ile ferrit + perlit yapısının ferrit + ostenit yapısına dönüşümü sırasında çeşitli dönüşüm kademeleri meydana gelmektedir. İlk kademede, perlitte ostenitin aniden çekirdeklenmesi ve bunu karbür veya perlit eriyinceye kadar sementit kristal sınırında hızlı büyümeyle ostenit oluşması izler. Yüksek sıcaklıklarda ($\approx 850^\circ\text{C}$) ostenit içindeki karbon yayınmasının ve düşük sıcaklıklarda ($\approx 750^\circ\text{C}$) ferrit içindeki manganez yayınmasının ostenitin ferrite doğru büyümesini kontrol etmesi ikinci kademeyi oluşturur. Üçüncü kademede, ostenit içindeki manganez yayınması, ferrit ve ostenitin çok yavaş olan son dengeleme hızını kontrol eder (Speich 1981).

2.2.2.2. Tavlamadan Sonra Ostenitin Dönüşümü

Tanaka ve ark. (1979), yaptıkları deneyler sonucunda, çift fazlı çelik mikro yapısını elde etmek için gereken minimum soğutma hızı ile ilgili bir bağıntı geliştirmişlerdir.

$$\text{Log CR } [^\circ\text{C/s}] = -1.7 \text{ Mn}_E + 3.95 \quad (2.1)$$

Burada; CR kritik soğutma hızı ve Mn_E ise manganez eşdeğeridir. Manganez eşdeğerine krom ve molibden de etki eder ve bu değer;

$$\text{Mn}_E [\%] = (\% \text{Mn}) + 1.3 (\% \text{Cr}) + 2.67 (\% \text{Mo}) \quad (2.2)$$

bağıntısı ile bulunabilir.

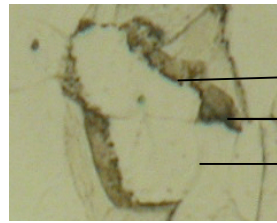
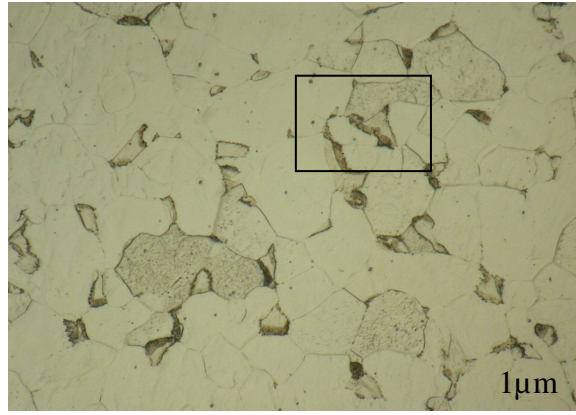
Çeliğin mikro yapısında $A_1 - A_3$ kritik sıcaklık aralığında ferrit ile birlikte bulunan ostenitin dönüşümü soğutma hızına bağlıdır. Yavaş soğutma sırasında (2°C/s) mikro yapıda daha fazla ferrit oluşurken, soğutma hızının biraz daha artması (5°C/s) ostenitin perlitte ve soğutma hızının daha da artması (8°C/s) ostenitin martenzite dönüşmesine neden olmaktadır. Ostenitin tamamen martenzite dönüşmemesi mikro yapıda kalıntı ostenitin bulunmasına neden olmaktadır (Piplani ve Raghavan 1981).

2.2.2.3. Tavlama Sırasında Ferrit Fazındaki Değişimler

Ferrit, kritik sıcaklıklarda ostenitle birlikte bulunduğundan, bu sıcaklıklar üzerinden soğutma, dönüşüm mekanizmasının bir parçası olarak ostenit içerisinde ferritin büyümesine neden olur. Soğuk işlenmiş çeliklerde ferritin yeniden kristalleşmesi hızlı bir şekilde oluşur ve genellikle çelik kritik sıcaklıklara ulaşmadan önce tamamlanır Ferritin karbon oranındaki değişimler, kritik sıcaklıklarda tavlama sırasında meydana gelir. Bu değişimlere birkaç etken etki etmektedir. Bunlardan ilki, ferrit içerisindeki karbon çözünmesinin kritik sıcaklıklarda daha az olmasıdır. İkincisi ise, ferritin karbon oranının artan alaşımlar nedeniyle azalmasıdır (Durmuş 2000).

2.3. ÇİFT FAZLI ÇELİK OLUŞUMUNUN MİKROSKOBİK ANALİZİ

Metalik malzemelerin mekanik özellikleri sadece kristal fazlarıyla değil, aynı zamanda kristal ve faz sınırları yardımıyla da belirlenmektedir. Mikro yapının değişmesi, kristal ve faz sınırlarının oluşum ve yoğunluğunu da değiştirir. Çift faz yapısı, $\alpha\alpha'$ faz sınırı $\alpha\alpha$ ve $\alpha'\alpha'$ gibi iki tür kristal sınırlarıyla belirlenir (Becker ve Hornbogen 1979). Şekil 2.5.'de faz ve kristal sınırlarının, çift fazlı çelik örneklerin çekilen optik mikroskop görüntüsü üzerindeki yerleşimi görülmektedir.



- Faz Sınırı $\alpha\alpha'$
- Kristal Sınırı $\alpha'\alpha'$
- Kristal Sınırı $\alpha\alpha$

Şekil 2.5. Tipik çift faz mikro yapısı, $\alpha'\alpha'$, $\alpha\alpha$ kristal sınırları ve $\alpha\alpha'$ faz sınırlarının görüntüsü. α : Ferrit, α' : Martenzit.

2.4. ÇİFT FAZLI ÇELİKLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE MİKRO YAPI BİLEŞENLERİNİN ETKİSİ

Bu bölümde çift fazlı çeliklerin mikro yapısında bulunan ferrit ve martenzit fazlarının özellikleri ve bu fazların çift fazlı çeliklerin mekanik özellikleri üzerine etkisi incelenmiştir.

2.4.1. Martenzitin Mekanik Özelliklere Etkisi

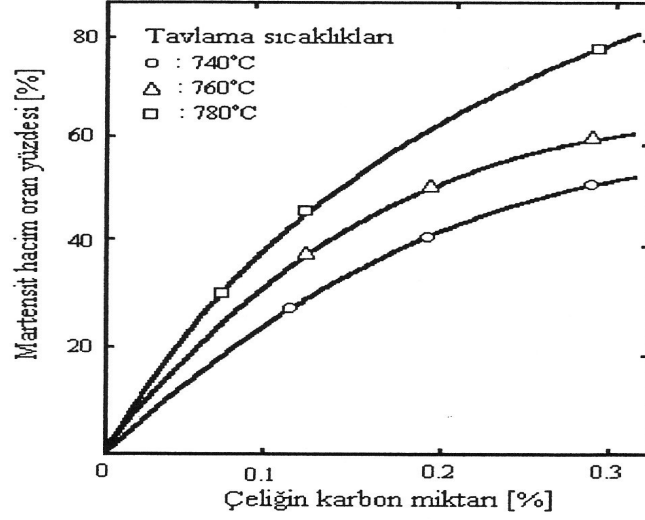
Çift fazlı çeliklerin mekanik özelliklerini kontrol eden en önemli mikro yapı bileşeni martenzit fazıdır. Çelik mikro yapısında martenzitin, perlitin yerini alması akma ve çekme mukavemetini artırmaktadır (Tamura ve ark. 1973). Martenzit miktarının mukavemet üzerine olduğu gibi süneklik (yumuşaklık) üzerine de etkisi vardır. Speich ve Miller (1979), martenzit hacim oranının artmasıyla sünekliğin azaldığını gözlemişlerdir.

Çift fazlı çeliklerin mekanik özelliklerini belirleyen en önemli mikro yapı bileşeni olan martenzit hacim oranı (V_m);

- 1) Çeliğin karbon içeriğine,
- 2) Tavlama sıcaklığına,
- 3) Ostenit tanelerinin sertleşme kabiliyetine,

bağlıdır (Speich 1979).

Speich ve Miller (1979), çift fazlı çeliğin mikro yapısında bulunan martenzit miktarının artan tavlama sıcaklığı ve karbon miktarı ile değiştiğini bulmuşlardır. Ancak tavlama sıcaklığının artması martenzit fazının karbon içeriğinin azalmasına sebep olmaktadır (Şekil 2.6.).



Şekil 2.6. $(\alpha + \gamma)$ Bölgesinde tavllanmış çelikte, karbon miktarının ve tavlama sıcaklığının martenzit hacim oranına etkisi (Speich ve Miller 1979).

Martenzit fazının miktarını etkileyen diğer bir değişken olan, $(\alpha + \gamma)$ bölgesinde tavlama ile oluşan ostenit tanelerinin sertleşme kabiliyeti, soğutma hızı ile kontrol edilebilir. Yüksek soğutma hızı ile ostenit martenzite dönüşmekte ve artan soğutma hızı ile martenzit miktarı da artmaktadır (Speich 1981).

2.4.2. Ferritin Mekanik Özelliklere Etkisi

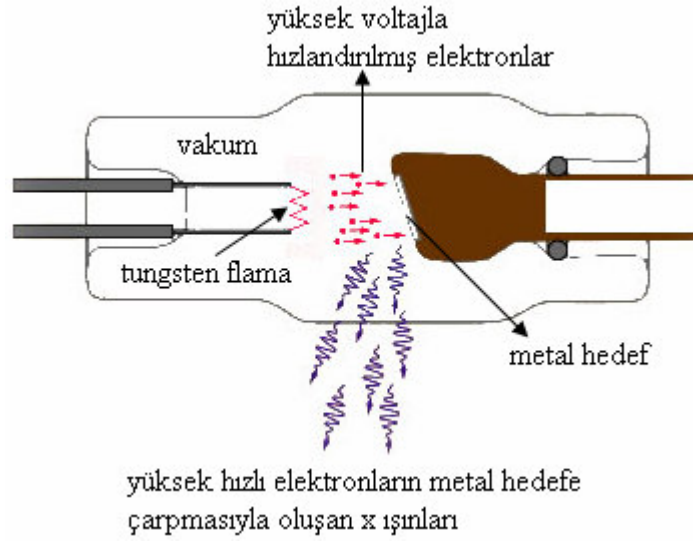
Çift fazlı çeliklerde ferritin kristal boyutu küçüldükçe hem mukavemet hem de süneklik artmaktadır (Kunio ve Suzuki 1977). En uygun çift faz çelikleri, ferrit tanelerinin eş eksenli ve ferrit tane boyutunun mümkün olduğunca küçük ($<5\mu\text{m}$) tutulması ile sağlanmaktadır.

Speich ve Miller (1979), ferrit özelliklerinin çelik akma mukavemeti ve sünekliği üzerinde etkin rol oynadığını gözlemişlerdir. Ferrit özelliği; ferritin kristal boyutu ve saflığı olmak üzere iki faktöre bağlıdır.

2.5. X IŞINLARI YARDIMI İLE KRİSTAL YAPI TAYİNİ

2.5.1. X Işıklarının Elde Edilmesi ve Özellikleri

X ışınları, bir x ışını tüpünde, birkaç on bin voltluk yüksek voltaja sahip hızlandırılmış elektronların, metal bir hedefe bombardımanı sonucunda meydana gelirler ve her doğrultuda yayılırlar. O halde bir x ışını tüpü; bir elektron kaynağı, bir hızlandırıcı ve bir metal hedef ihtiva etmelidir (Şekil 2.7.).



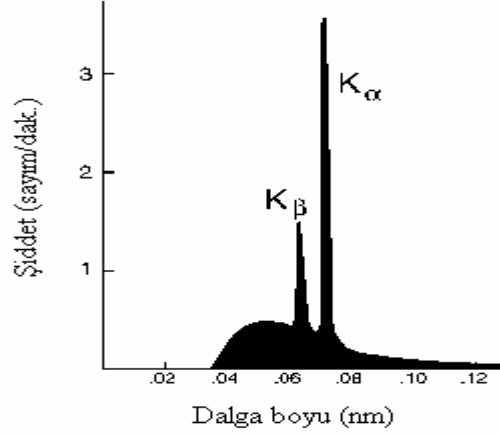
Şekil 2.7. X ışınları oluşumunun şematik izahı ²⁾.

1895 yılında, Alman fizikçi Röntgen tarafından keşfedilen x ışınları, günümüzde tıp ve bilim alanında geniş olarak kullanılmaktadır. 1912 yılında x ışınlarının kristallerden kırınımının keşfedilmesiyle, x ışınlarının gerçek tabiatı belirlenmiştir. Bu keşifle birlikte, x ışınlarının hem dalga karakterinde oldukları ispatlanmış, hem de maddenin ince yapısını belirleyen yeni bir yöntemin gelişmesine yardımcı olmuşlardır.

X ışınları, ışıkla tamamen aynı özelliklere sahip fakat daha kısa dalga boylu ışımadır. Kırınımında kullanılan x ışınlarının dalga boyları 1 ile 3 Å arasında. Görünen ışığın dalga boyu 6000 Å mertebesindedir. O halde x ışınları elektromanyetik spektrum içinde mor ötesi ışın ile gama ışınları arasındaki bölgeyi işgal etmektedir.

2.5.1.1. Karakteristik Spektrum

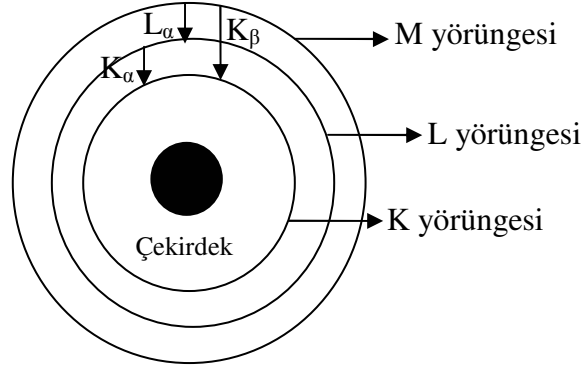
Eğer bir x ışınları tüpünde, voltaj hedef metal için karakteristik olan belirli bir değerin üstüne yükseltirse belirli bazı dalga boylarında sürekli spektruma ilaveten keskin şiddet tepeleri görülür. Bunlar çok dar ve dalga boyları kullanılan hedef metalin karakteristiği olduğundan bunlara karakteristik çizgiler denir. K, L, M gibi artan dalga boyları sırasında olası takımlara ayrılırlar ve çizgilerin hepsi birden kullanılan hedef metalin karakteristik spektrumlarını oluştururlar. X ışınlarının kırınımında daima K çizgilerinin kullanılması gelenek haline gelmiştir. Şekil 2.8.' da 35 kV da Molibdene ait spektrum görülmektedir.



Şekil 2.8. 35 kV' da molibdene ait karakteristik spektrum (Sümer 1966).

Karakteristik x ışını W. H. Bragg tarafından keşfedilmiş ve H. G. Moseley tarafından sistematik hale getirilmiştir.

Sürekli spektrum, elektronların hedef tarafından çabucak yavaşlatılmasından meydana geldiği halde karakteristik spektrumun kaynağı hedef maddenin kendisidir. Bu olayı anlamak için; olası kabuklar üzerinde bulunan elektronlarla çevrilmiş merkezi bir çekirdek düşünülebilir (Şekil 2.9.).



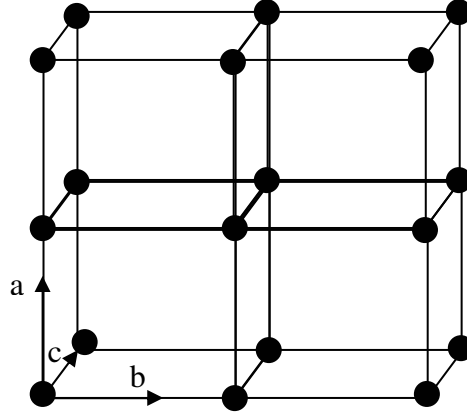
Şekil 2.9. Bir atomda elektronik geçişler (K_{α} , K_{β} , L_{α} geçişleri oklarla gösterilmiştir).

Hedefi bombardıman eden elektronlardan biri yeterli derecede kinetik enerjiye sahip ise K kabuğundan dışarıya bir elektron fırlatabilir ve atomu uyarılmış hale yani yüksek enerji durumuna geçirir. Daha dıştaki elektronlardan biri hemen K kabuğundaki boşluğa düşer ve bu işlemde enerji yayınlanmış olur. Bu durumda atom bir kez daha normal enerji durumuna geçer. Yayınlanan enerji radyasyon şeklindedir ve gerçekte karakteristik K radyasyonudur. K kabuğundaki boşluk dış kabuklardaki herhangi bir elektron tarafından doldurulabilir. Bu suretle, K serisinin çizgileri meydana gelir (K_{α} , K_{β} gibi). K_{α} ve K_{β} çizgileri, K kabuğundaki boşluğun sırasıyla L veya M kabuğundaki elektronlarla doldurulmasından ileri gelmektedir (Sümer 1966).

2.5.2. Kristal Geometri ve Yapısı

X ışınlarının elde edilmesi ve özelliklerinden sonra, kristallerin neden x ışınlarını kırınımına uğrattıklarını anlamak için kristal geometrisi ve yapısını ele almalıyız.

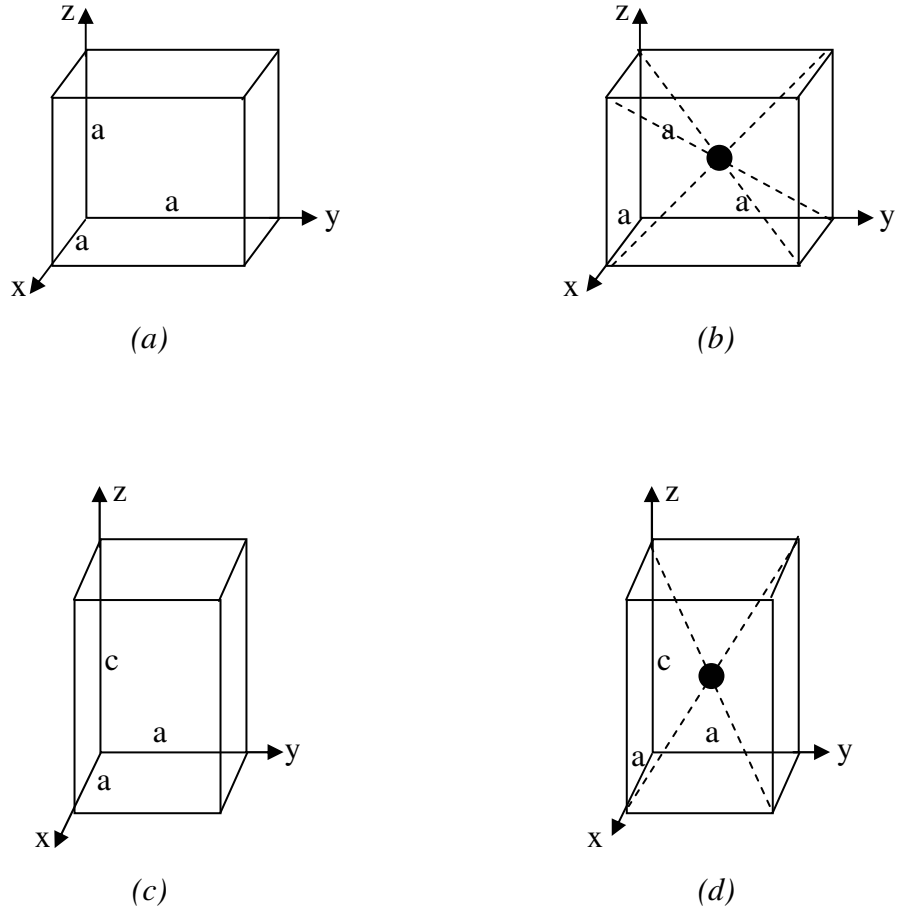
Bir kristal, üç boyutlu uzayda atomların periyodik olarak tekrarlanmasından meydana gelmektedir.



Şekil 2.10. Üç boyutlu uzayda bir birim hücrenin büyüklüğü ve şeklinin örgü sabitleri a , b , c ile gösterimi.

Atomlar ve moleküller kristal içinde düzenli, üç boyutta ise geometrik yapıda düzenlenmiştir. Kristallerin yapısını ve simetrisini Bravais (1848) uzay örgü fikrini tanımlayarak açıklamıştır. Kristaller birim hücre temelinde sınıflandırılmaktadırlar. Temel birim hücre uzay örgüsünde en küçük hücredir. Bu hücrenin kenarları birbirine eşittir. Hücredeki atomların hareketleri çevrelerinde eşit yerler kazanmaları ile mümkün olmaktadır. Her hücre açıları dik olması gerekmeyen üç eksenle tanımlanmıştır. Bu üç eksendeki uzaklıklar birim hücrenin kenarlarına uygun olarak a , b ve c ile gösterilmektedir (Şekil 2.10.).

Bravais tüm uzayı dolduran ve birbirleriyle bitişik eşit hücrelerin eksenlerine göre yedi sistem olduğunu göstermiştir. Bunlar sırasıyla; triklinik, monoklinik, ortorombik, hekzagonal, tetragonal, trigonal ve kübik sistemlerdir. Metallerle ilgili olan en basit kristal sistemleri (Şekil 2.11.)'de ele alınmıştır.

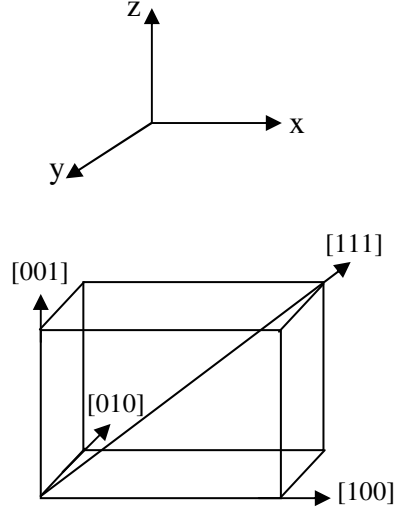


Şekil 2.11. Bravais' in tanımladığı kristal yapılardan bazıları. (a) Basit kübik yapı, (b) Hacim merkezli kübik yapı, (c) Basit tetragonal yapı, (d) Hacim merkezli tetragonal yapı.

2.5.2.1. Kristal Örgü Doğrultuları ve Düzlemler

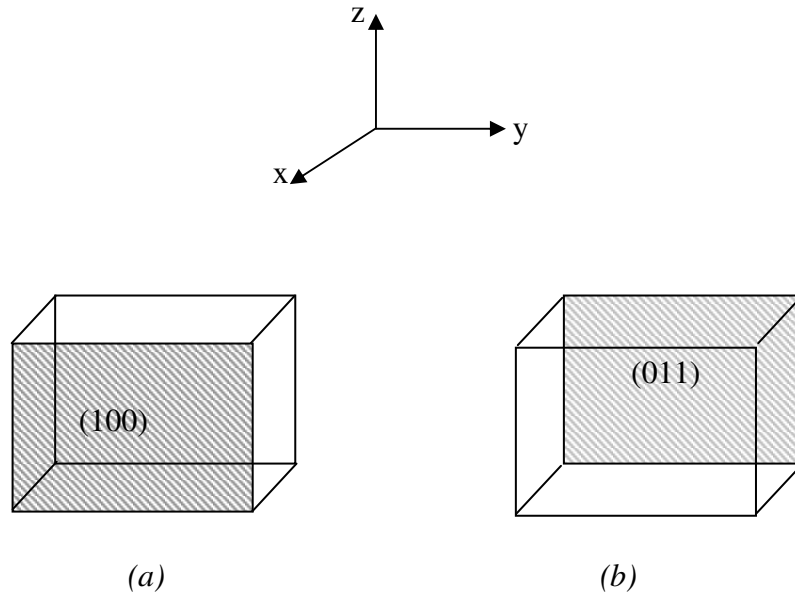
Bir örgü içindeki herhangi bir doğrunun doğrultusu, önce orijinden verilen doğruya bir paralel çizip ve sonra orijinden çizilen doğru üzerindeki herhangi bir noktanın koordinatlarını vererek belirtebiliriz. Doğru birim hücrenin orijininin ve koordinatları u , w , v olan noktadan geçsin. Köşeli parantez içine yazılmış $[uvw]$ doğrunun doğrultusunun indisleridir (Şekil 2.12.). Örgü sonsuz ve herhangi bir noktadan alınabildiğine göre, bunlar aynı zamanda bu doğruya paralel herhangi bir doğrunun da indisleri olurlar. Bir örgü içindeki düzlemin yönlenmesini ilk kez Miller bulmuştur. Miller indisleri, kısaca düzlemin eksenleri kestiği noktaların orijine olan kesirsel mesafelerinin tersi olarak tanımlanmaktadır ve (hkl) şeklinde ifade

edilmektedir. Bir düzlemin Miller indisleri (hkl) ise, düzlem eksenleri, $\frac{1}{h}, \frac{1}{k}, \frac{1}{l}$ kesirsel mesafelerde keser ve eksen uzunlukları a, b, c ise düzlem eksenleri $\frac{a}{h}, \frac{b}{k}, \frac{c}{l}$ mesafelerinde kesmektedir.



Şekil 2.12. Doğrultman indislerinin gösterimi.

Benzer şekilde, Şekil 2.13.'de herhangi bir örgü düzleminin miller indisleri ile gösterimi görülmektedir.



Şekil 2.13. (a) ve (b) Miller indisleriyle düzlem gösterilişi.

Bir örgüde düzlem takımlarının olası düzlemler arası mesafeleri vardır. Düzlemler arasındaki d_{hkl} mesafesi hem (hkl) indislerinin hem de a, b, c örgü sabitlerinin fonksiyonudur. Kübik sistem için düzlemler arası uzaklık,

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (2.4)$$

şeklinde tanımlanır. Tetragonal sistemde düzlemler arası uzaklık denklemi, genel olarak a ve c eşit olmadığından her iki örgü sabitini içermektedir.

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2(a^2/c^2)}} \quad (2.5)$$

d_{hkl} : Düzlemler arası uzaklık(A°), h, k, l, : Düzlem miller indisleri, a ve c kristal örgü sabitleri (A°) şeklinde tanımlanmaktadır.

2.5.3 Kristal Yapı Tayini

Bir cismin kristal yapısı, cismin kırınım desenini tayin etmektedir. Birim hücrenin büyüklüğü ve şekli kırınım çizgilerinin açısız mevkilerinden belirlenmektedir.

Kristal yapı tayini için kullanılan yöntem, deneyerek bulma yöntemidir. Başlangıçta, bir yapı tahmin edilir. Kırınım deseni hesaplanır. Hesapla bulunan desen, gözlenen desen ile karşılaştırılır. Eğer iki desen tüm hatlarıyla birbirine uyuyorsa kabul edilen desen doğrudur. Eğer uymuyorsa, doğru çözüm bulununcaya kadar bu işleme devam edilir. Bilinmeyen bir yapının tayini üç adımda belirlenebilir. Bunlar sırasıyla;

- 1) Birim hücrenin şekli ve büyüklüğü kırınım çizgilerinin açısız mevkilerinden çıkarılır. Önce bilinmeyen yapının yedi kristal sistemden hangisine ait olduğu hakkında bir tahmin yapılır. Daha sonra bu tahmine dayanılarak yansımaların her birine doğru miller indisleri verilir. Bu adıma “deseni indisleme” denir ve ancak kristal sistemi doğru seçilirse mümkün olur. Bu yapılmıca kristal

sisteminden birim hücrenin şekli bilinmiş olur ve büyüklüğü kırınım çizgilerinin mevkilerinden ve miller indislerinden hesaplanabilir.

- 2) Bir birim hücredeki atomların sayısı birim hücrenin şekli, büyüklüğü, kimyasal bileşimi ve ölçülerek bulunmuş yoğunluğundan hesaplanır.
- 3) Son olarak, atomların birim hücre içindeki mevkileri kırınım çizgilerinin şiddetlerinden belirlenir (Sümer 1966).

2.5.4.1. Kübik Kristal Yapıların İndislenmesi

Bir kübik kristal, Bragg yasası ve kübik sistemin düzlem mesafeleri denkleminde elde edilen aşağıdaki bağıntıyı doğrulayan $\sin^2\theta$ değerli çizgiler verir:

$$\frac{\sin^2 \theta}{(h^2 + k^2 + l^2)} = \frac{\sin^2 \theta}{s^2} = \frac{\lambda^2}{4a^2} \quad (2.7)$$

$s^2 = (h^2+k^2+l^2)$ toplamı daima tam ve $\lambda^2/4a^2$ herhangi bir desen için sabit olduğundan, kübik bir sistemi indisleme problemi bir “s” tam sayılar takımı bulma işlemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Doğru “s” tam sayıları bulununca, çizgilerin her birinin *hkl* indisleri belirlenebilir.

En çok rastlanan üç kübik örgü tipinin her biri kırınım çizgilerinin karakteristik sıralanışından tanınabilir (Sümer 1966). Bunlar;

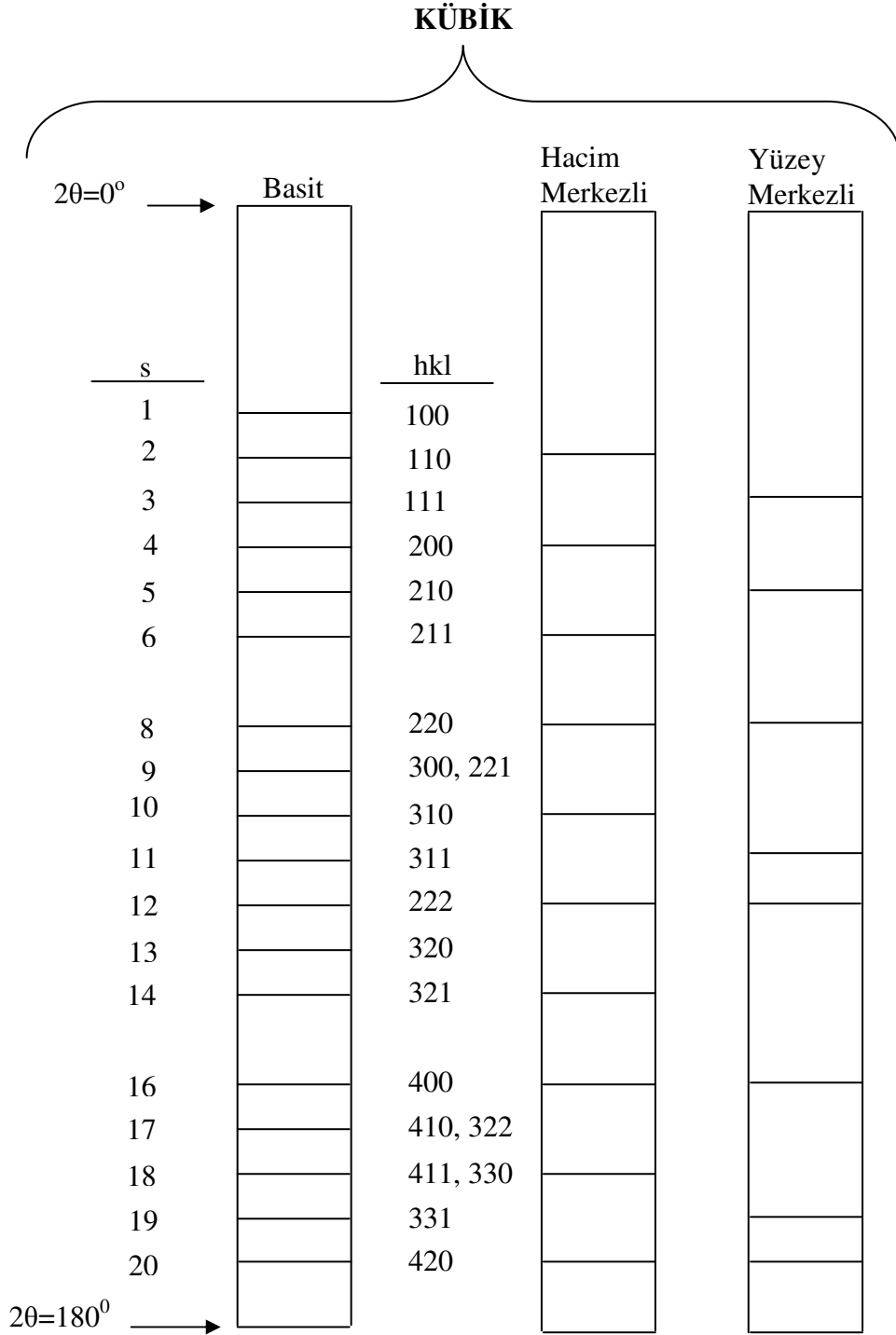
Basit Kübik : 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 16,

Hacim Merkezli Kübik : 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16,

Yüzey Merkezli Kübik : 3, 4, 8, 11, 12, 16,

şeklindedir.

Şekil 2.14.'de kübik kristal yapıların miller indislerinin hesaplanması görülmektedir. Kübik bir yapıyı indisleme işlemi, eğer cismin kübik yapıda olduğu ve örgü parametresi biliniyorsa kolaydır. Bunun için en kolay yol, $\lambda^2/4a^2$ değerini hesaplamak ve bu değeri gözlenen $\sin^2\theta$ değerine bölüp çizgilerin her biri için "s" değerini bulmaktır.



Şekil 2.14. Kübik kristal yapıların miller indislerinin görünümü (Sümer 1966).

2.5.4.2 Kübik Olmayan Kristallerin İndislenmesi

İndisleme de analitik ve grafik yöntemleri kullanılmaktadır. Analitik yöntemler gözlenen $\sin^2\theta$ değerleri arasında bazı bağıntılar bulmak amacıyla yapılan aritmetik işlemlerden oluşmaktadır. Kristal sistemlerinin her biri $\sin^2\theta$ değerleri arasında özel bağıntılar oluşturduğundan bu bağıntıların görülmesi, kristal sistemini tanımaya ve çizgi indislerinin bir çözümüne yardımcı olmaktadır (Sümer 1966).

Örneğin tetragonal sistemde $\sin^2\theta$ değerleri;

$$\sin^2\theta = A (h^2+k^2) + C l^2 \quad (2.8)$$

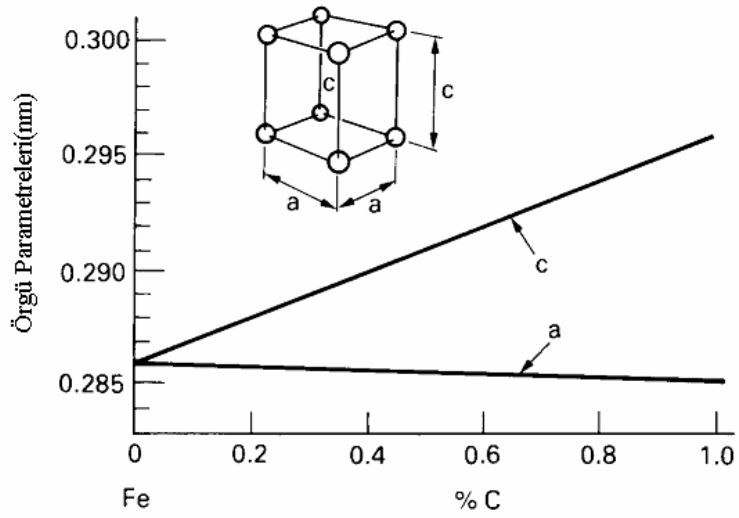
bağıntısına uymalıdır. Bu bağıntıda $A(=\lambda^2/4a^2)$ ve $C(=\lambda^2/4c^2)$ herhangi bir desen için sabittir. Problem bu sabitleri bulmaktır. Bu sabitler bulununca a ve c örgü sabitleri bulunabilir ve çizgilerin indislerinin hesaplanması mümkün olur. A' nın değeri hk0 olan çizgilerinden elde edilir. $l=0$ olunca (2.8) denklemi;

$$\sin^2\theta=A(h^2+k^2) \quad (2.8a)$$

şekline dönüşmektedir. (h^2+k^2) 'in mümkün değerleri 1, 2, 4, 5, 8, vs. dir. Böylece hk0 çizgisi, bu tam sayıların oranlarına uygun $\sin^2\theta$ değerlerine sahip olmalıdır. C sabiti diğer çizgilerden,

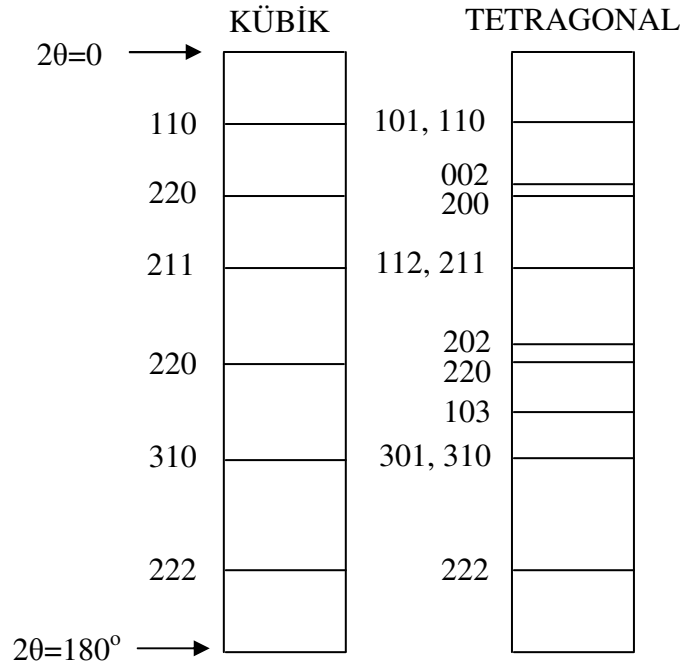
$$\sin^2\theta - A(h^2+k^2) =Cl^2 \quad (2.8b)$$

elde edilir. Denklemin sol tarafındaki farklar h ve k' nın kabul edilen olası değerleri için hesaplanır ve bu değerlerin 1, 4, 9, 16, vs. ile orantılı olması gereken Cl^2 değeri ile uyuyup uyuşmadığına bakılır. Burada tetragonal sistem üzerinde durma nedenimiz, martenzit fazının tetragonal kristal yapısında olmasından dolayıdır. Şekil 2.15.'de tetragonal sistemin hesaplanmış örgü parametrelerinin %C oranına bağlı değişimleri görülmektedir.



Şekil 2.15. Tetragonal sisteme ait örgü sabit değerlerinin %C oranına bağlı değişimleri (Sümer 1966).

Şekil 2.16.'da, tetragonal kristal yapıya ait olası miller indislerinin, kübik sistem ile karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil 2.16. Tetragonal sistemin olası miller indisleri(Sümer 1966).

2.6. MANYETİK MADDELER

2.6.1. Manyetik Maddelerin Sınıflandırılması

Manyetik alan tarafından az veya çok mıknatıslanabilen maddelere manyetik maddeler denir. Bu maddeler manyetik özelliklere bağlı olarak diamanyetik, paramanyetik ve ferromanyetik madde diye sınıflandırılırlar (Chikazumi 1986).

2.6.1.1. Manyetik Alan

Manyetik alan, uzayda birim hacimdeki enerji değişimi olarak tanımlanmaktadır. Bu enerji değişimi, elektrik yüklerinin ivmelenmesi, akım taşıyan bir telde oluşan kuvvet ve belirli atomlarda elektron spinlerinin yön değiştirmesi gibi etkilere neden olmaktadır. Manyetik alan, elektronların hareketi sonucu oluşmaktadır. Bir iletken üzerindeki elektrik akımı manyetik alan kaynağıdır.

2.6.1.2. Manyetik Alan Şiddeti

Manyetik alan şiddeti (\vec{H}), birim uzunluktaki bir iletkenden geçen akım olarak bilinir ve sadece kendisini üreten akımın büyüklüğüyle orantılıdır. Manyetik alan şiddeti Biot-Savart ve Amper devre yasaları kullanılarak hesaplanmaktadır.

2.6.1.3. Manyetik Akı Yoğunluğu

Akım ile bir ortamda manyetik alan oluşturulduğu zaman, ortamın buna tepkisi manyetik akı yoğunluğudur (\vec{B}). Manyetik alan uzayda nerede var ise orada manyetik akı (Φ) var demektir.

Manyetik indüksiyon ile manyetik alan arasındaki ilişki, ortamın manyetik geçirgenliği (μ) olarak isimlendirilmektedir. Birçok ortamda \vec{B} , \vec{H} 'nin doğrusal fonksiyonudur. Boşluk için manyetik alan ile manyetik indüksiyon arasındaki bağıntı,

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (2.9)$$

şeklinde tanımlanır. Burada μ_0 , boşluğun geçirgenliği olup değeri $4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m' dir. Eğer \vec{B} ' nin değeri bilirse, \vec{H} ' nin değeri bu bağıntı yardımı ile hesaplanabilir. Fakat ferromanyetik maddelerde \vec{B} , \vec{H} ' nin doğrusal bir fonksiyonu değildir ve ortamın manyetik geçirgenliği manyetik indüksiyon ile değişmektedir. Bu yüzden bir ferromanyetik maddenin B - H eğrisi, o madde hakkında birçok bilgi vermektedir. Ferromanyetik maddelerde \vec{B} ve \vec{H} arasındaki bağıntı,

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.10)$$

ile verilmektedir. Burada μ , ortamın manyetik geçirgenliği olup, manyetik indüksiyona bağlı olarak doğrusal olmayan bir şekilde değişmektedir. Manyetik indüksiyon ve akı, Faraday ve Lenz yasaları yardımı ile hesaplanmaktadır (Küçük 2003).

2.6.1.4. B, H ve M Arasındaki İlişki

\vec{M} , mıknatıslanmayı göstermek üzere \vec{B} , \vec{H} ve \vec{M} arasındaki bağıntılar,

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad (2.11)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{M} \quad (2.12)$$

ile verilmektedir. \vec{M} , mıknatıslanması sıfırlanmış veya hiç mıknatıslanmamış bir ferromanyetik madde için sıfırdır. Bir manyetik maddenin mıknatıslanma yeteneği olarak tanımlanan ve χ ile gösterilen alınganlık,

$$\chi = \frac{\vec{M}}{\vec{H}} \quad (2.13)$$

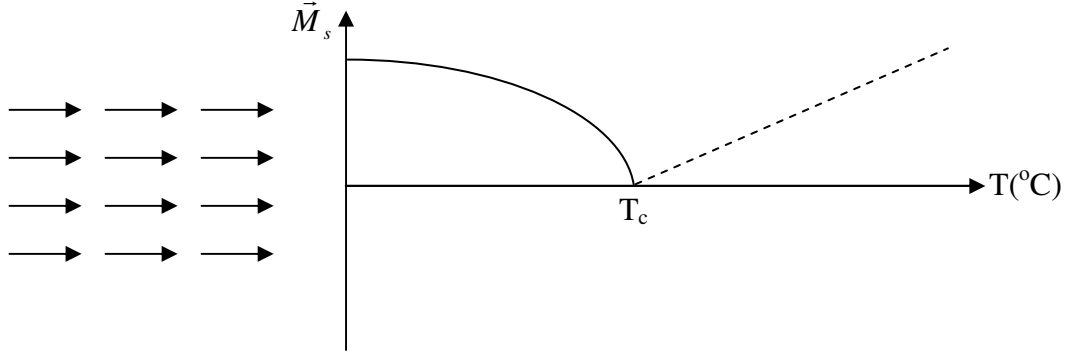
şeklinde ifade edilmektedir. Bir ortamın manyetik geçirgenliğinin, boşluğun manyetik geçirgenliğine oranı ise bağıl geçirgenlik olarak tanımlanmaktadır ve

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (2.14)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

2.6.2. Ferromanyetik Maddeler

Ferromanyetik maddelerde spinler birbirine paralel yönelmiştir. Böylece komşu spinler arasında kuvvetli bir etkileşme vardır. Bu kuvvetli etkileşme ferromanyetik maddeyi kendiliğinden doyum mıknatıslanması değerine ulaştırmıştır. Sıcaklıkla spin düzeni uyarılmaktadır. Şekil 2.17.'de görüldüğü gibi, mıknatıslanma sıcaklığın artması ile azalır ve belli bir sıcaklık değerinde sıfır olur. Bu sıcaklığa Curie sıcaklığı (T_c) denilmektedir. Bu sıcaklıktan sonra mıknatıslanma tekrar artar ve madde paramanyetik özellik gösterir. Metaller için Curie sıcaklığı yaklaşık olarak 770°C 'dir.



Şekil 2.17. Ferromanyetizma.

Ferromanyetik maddelere örnek olarak, demir, nikel ve kobalt verilebilir.

2.6.3. Ferromanyetik Maddelerin Manyetik Özellikleri

Manyetik maddelerin en önemlisi ferromanyetik maddelerdir. Bu maddelerin uygulama alanları çok çeşitlidir. En önemli özellikleri, kararlı manyetik alanlarla elde edilen kuvvetli manyetik indüksiyon, yüksek geçirgenlik ve artık mıknatıslanmadır.

Ferromanyetik maddelerin manyetik özellikleri iki bölüm altında incelenir. İlki, yapıya bağlı özellikler, ikincisi ise yapıya bağlı olmayan özelliklerdir. Yapıya bağlı özellikler; sıfırlayıcı alan, geçirgenlik ve histeresis kayıpları, yapıya bağlı olmayan özellikler ise, atom başına manyetik moment ve doyum mıknatıslanması olarak belirtilmektedir (Jiles 1988, Bida 2000).

2.6.3.1. Geçirgenlik ve Artık Mıknatıslanma

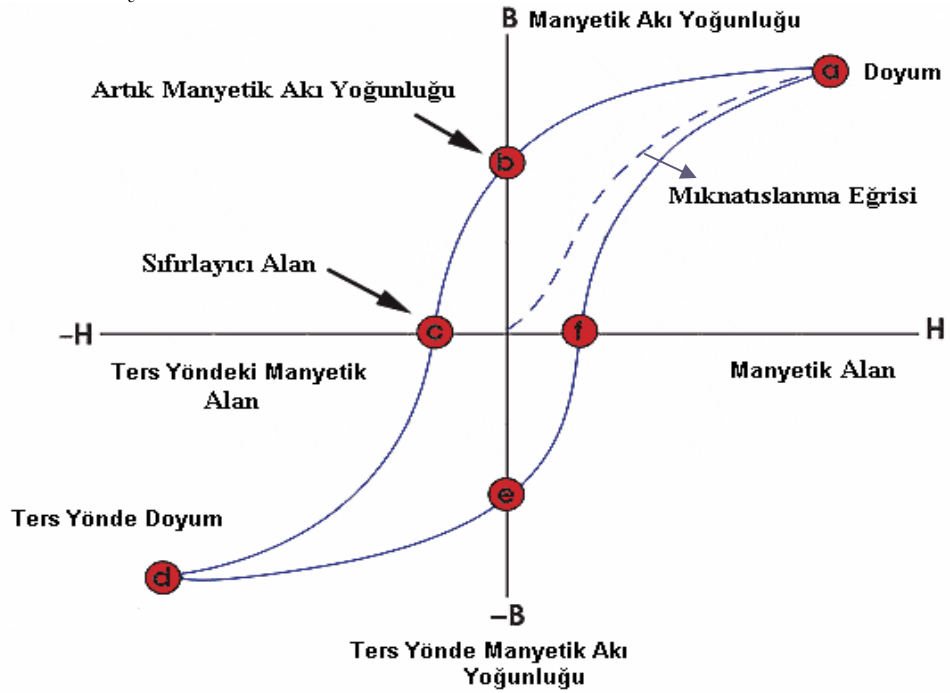
Ferromanyetik maddelerin en önemli özelliği yüksek geçirgenliğe sahip olmalarıdır. Bu maddelerin geçirgenliği manyetik akı yoğunluğunun fonksiyonudur. Bir ferromanyetik maddenin özelliklerini belirlemek için manyetik alanın sürekli olduğu bir aralıkta manyetik alanın fonksiyonu olarak manyetik akı yoğunluğunu ölçmek histeresis eğrisini elde etmek için önemlidir. Ferromanyetik maddeler için başlangıç geçirgenliği $10^3 - 10^5$ arasındadır.

Ferromanyetik maddeler bir manyetik alana konulduğunda mıknatıslanmaktadır. Manyetik alan kaldırılrsa bile maddede artık mıknatıslanma kalır. Artık mıknatıslanma ferromanyetik maddelere ait bir özelliktir.

2.6.3.2. Histeresis Eğrisi ve Özellikleri

Ferromanyetik maddelerin manyetik özelliklerini belirlemenin yolu manyetik akı yoğunluğunun manyetik alanla değişimini çizmektir.

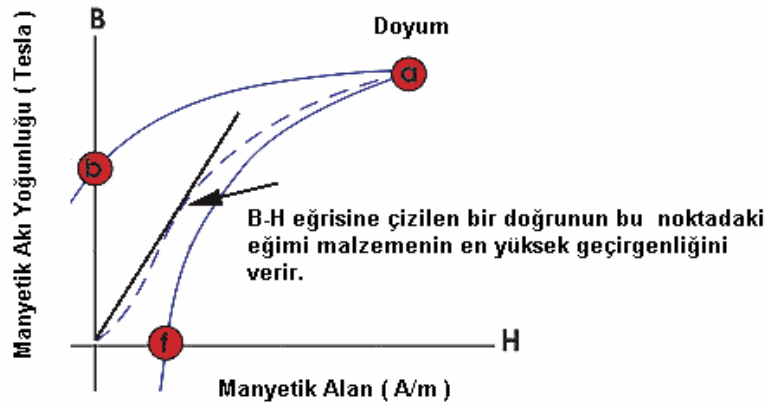
Ferromanyetik maddelerin uygulama için elverişliliği, temel olarak oluşturdukları histeresis eğrisinin gösterdiği özellikten belirlenmektedir. Şekil 2.18.'deki, mıknatıslanma ile domainlerin şeklinde meydana gelen değişiklikleri gösterilen histeresis eğrisi, ferromanyetik maddelerin manyetik özelliklerini belirler (Küçük 2003). Bu manyetik özellikler; Manyetik doyum (\vec{M}_s), artık manyetik indüksiyon (\vec{B}_r) ve sıfırlayıcı alan (\vec{H}_c)'dır.



Şekil 2.18. Histeresis Eğrisi ³⁾.

Histeresis eğrisi manyetik alanın, manyetik akı yoğunluğuna bağlı değişimi olarak bilinmektedir. Daha önce herhangi bir mıknatıslanmaya maruz kalmayan veya mıknatıslanması giderilmiş ferromanyetik malzeme, H'nin arttığı kesikli çizgiyi izlemektedir. Kesikli çizgide görüldüğü gibi, uygulanan manyetik alan ne kadar büyükse, malzeme daha büyük bir manyetik alana sahip olur. "a" noktasında tüm manyetik domainler birbirine paraleldir. Mıknatıslanma kuvvetindeki ek artış manyetik akıda daha az bir artışa neden olmaktadır ve bu noktada malzeme manyetik doyuma

ulaşmaktadır. Manyetik kuvvet sıfıra doğru azaldığında, eğri “a” noktasından “b” noktasına hareket edecektir. “b” noktasında mıknatıslama sıfıra doğru azalsa da malzemede bir miktar mıknatıslanmanın kaldığı görülmektedir. Mıknatıslama kuvveti terslendikçe akının sıfır olduğu “c” noktasına doğru eğri hareket etmektedir. Bu nokta sıfırlayıcı alan olarak belirtilmektedir. Mıknatıslama kuvveti ters yönde arttıkça, malzeme ters yöndeki manyetik doyum noktasına ulaşmaktadır “d”. Azalan manyetik kuvvet eğriyi sıfır noktasına yani “e” noktasına götürmektedir. Pozitif yönde artan manyetik kuvvet manyetik akı yoğunluğunu sıfıra götürmektedir. Bu döngü bu şekilde devam etmektedir.



Şekil 2.19. B-H eğrisinin oluşumu ³⁾.

Histeresis eğrisinden hareketle malzemelerin manyetik özellikleri belirlenebilmektedir (Şekil 2.19.).

2.6.4. Ferromanyetik Maddelerin Sınıflandırılması

Ferromanyetik maddeler, sıfırlayıcı alana göre sınıflandırılırlar. Sıfırlayıcı alan madde yapısına duyarlı bir manyetik özelliktir. Farklı sıcaklık ve mekanik işlemler altında maddenin sıfırlayıcı alanı değişebilir. Ancak doyum mıknatıslanması bu olaylarla değişmez. Ferromanyetik maddeler sert ve yumuşak olmak üzere ikiye ayrılırlar. Manyetik olarak sert maddelerin sıfırlayıcı alanı 10 kA/m' nin üzerinde, yumuşak maddelerin ise 1 kA/m' nin altındadır. Yumuşak manyetik maddeler elektromıknatıslarda, transformatör ve rölelerin çekirdeklerinde, sert manyetik maddeler ise manyetik kayıt ortamları gibi mıknatıslanmanın kolay değişimi istenmeyen uygulamalarda kullanılmaktadır (Küçük 2003).

2.7. MALZEMELERDE YORULMA OLAYI ve TESPİTİ

2.7.1. Malzemelerde Yorulma

Tekrarlı veya değişen yük gerilmelerine maruz kalan malzemelerde oluşan mekanik kusurlara, yorulma denilmektedir. Çekme ve akma mukavemetinin çok altındaki gerilme değerlerinde bile, malzeme, kırılma meydana gelebilir. Bunun nedeni yorulma olayıdır.

Yorulma kırılması gevrek türde olduğundan, malzemenin neresinde ve ne zaman oluşacağını önceden kestirmek zordur. 1852 yılında Wöhler tarafından esasları ortaya konulan yorulma olayı, halen günümüzde tam anlamıyla çözülememiştir.

2.7.1.1. Yorulmada Çatlak Oluşumu ve Büyümesi

Bir malzemenin içinde mevcut olan veya sonradan oluşan bir çatlak, malzemeye uygulanan gerilmelerin etkisi altında, ilerleyerek malzemeyi iki veya daha çok parçaya ayırmasına kırılma adı verilmektedir.

Malzemelerde yorulma üç aşamada meydana gelerek kırılmaya yol açmaktadır. Bunlardan ilki, çatlak oluşumu, diğeri mikroskobik boyuttaki çatlakın büyüyerek makroskobik boyuta ulaşması ve son olarak da malzemenin kopmasıdır. Çatlak ilerlemesi kararlı veya kararsız olabilmektedir. Kararlı çatlak ilerlemesinde, çatlak boyunu belirli bir miktar arttırabilmek için yükü de belirli bir miktar arttırmak gerekmektedir. Kararsız çatlak ilerlemesinde ise, çatlak yükün arttırılmasına gerek duymaksızın hızla ilerlemektedir. Kararlı olarak ilerleyen çatlak belirli bir uzunluğa ulaştıktan sonra kararsız hale gelebilir (Eryürek 1993).

2.7.1.2. Çatlak İlerlemesinin Mikro Mekanizmaları

2.7.1.2.1. Mikro Boşluk Birleşmesiyle Çatlak İlerlemesi

Bu kırılma tipi “lifli kırılma” veya “yırılma” olarak da adlandırılır. Bu tip çatlak ilerlemesinde, en yüksek kayma gerilmesi düzlemlerindeki plastik süreksizlik sonucunda, metal olmayan kalıntılarla metal arasındaki bağlar koparak buralarda mikro boşluklar oluşur. Daha sonra bu boşluklar yine plastik süreksizlikle birleşerek çatlağın ilerlemesini sağlar (Eryürek 1993).

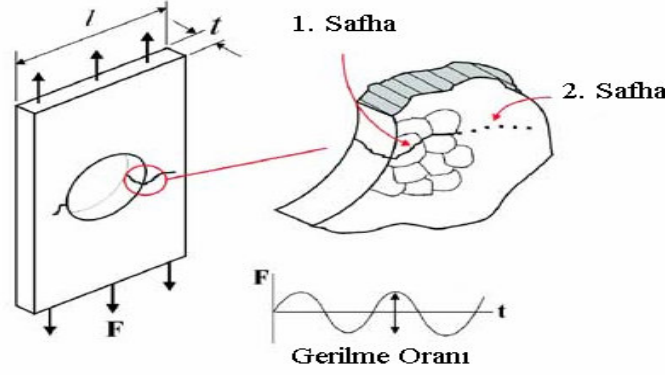
2.7.1.2.2. Ayrılma ile Çatlak İlerlemesi

Hacim merkezli kübik (hmk) yapıya sahip metallerde, özellikle de çeliklerde gözlenmektedir. Çatlak kristal içinde düşük miller indisli düzlemleri takip ederek ilerlemektedir.

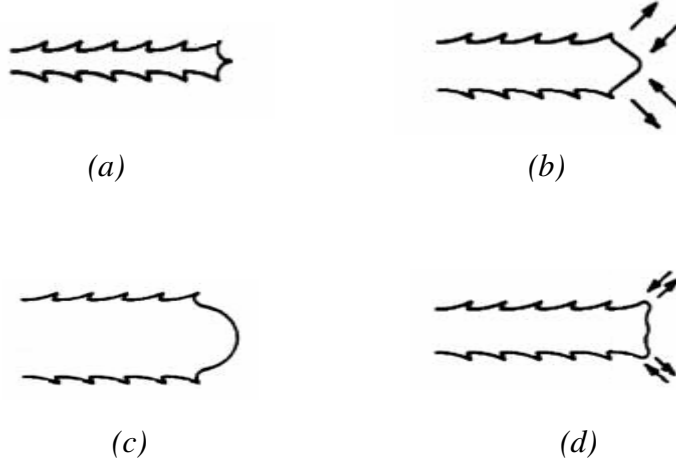
2.7.1.2.3. Taneler Arası Çatlak İlerlemesi

Kristal sınırları, kristal içinden daha yüksek dayanıma sahiptir. Bu nedenle çoğunlukla tane içi çatlak ilerlemesi oluşmaktadır. Ancak kristal sınırlarında, sınırları gevşekleştirici bir faz bulunuyorsa veya malzeme, kristal sınırlarının kristal içinden daha zayıf olduğu durumdaysa, çatlama kristal sınırları boyunca oluşmaktadır (Eryürek 1993).

Şekil 2.20. ve Şekil 2.21.’de çatlak ilerleme mekanizmaları görülmektedir. Bu alanla ilgili yapılan çalışmalarda çatlağın kayma bantları üzerinde meydana geldiğini bilinmektedir.

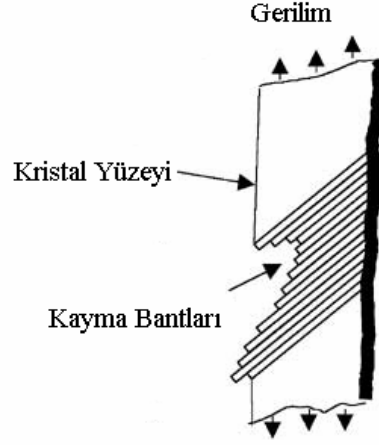


Şekil 2.20. Çok kristalli metallerde yorulma çatlak ilerlemesinin birinci ve ikinci safhalarının şematik gösterim (Halfpenny 2000).



Şekil 2.21. Yorulma çatlak ilerleme mekanizması (2. Safha), (a) Sıfır veya en büyük basma yükü, (b) Küçük çekme yükü, (c) En büyük çekme yükü, (d) Küçük basma yükü. Yükleme eksenini diktir (Halfpenny 2000).

Yorulma olayında yüzeyde görülen en önemli değişiklik kayma bantlarının hareketine bağlı olarak ortaya çıkan çıkıntı (kayma bandının bir yerinde malzemenin dışarıya doğru itilmesi) ve girinti (kayma bandının bir yerinde malzemenin içeriye doğru bastırılması) adı verilen girinti ve çıkıntılarının meydana gelmesidir (Şekil 2.22.).



Şekil 2.22. Kayma Bantlarının gösterimi (Halfpenny 2000).

2.7.2. Yorulma Kırılması

Yorulma, ya yüzey düzgünlüğünü bozan çentik, keskin köşe, girinti, çıkıntı ve de benzeri gibi yüzey kusurlarından ya da içyapı içinde eş dağılımlılığı bozan, kalıntı, kılcal çatlak, keskin uçlu çökelti ve parçacıklardan kaynaklanır. Önce bir kılcal çatlak oluşur. Kılcal çatlak hemen kırılmaya yol açmaz; uygulanan değişken gerilimin her çevrimiyle birlikte çelik içinde çok yavaş olarak ilerler. Gerilim ne denli yüksek ise, çatlak ilerlemesi de o denli büyük ve hızlı olur. Çatlağın bu tür ilerlemesi bir sürtünme de yarattığından, yorulma kırılması gösteren yüzeyin bu bölümü düzgündür. Sonunda çatlak öyle bir yere dek ilerler ki çeliğin kesit alanının geri kalan çatlamaşmış bölgesi uygulanan gerilimi taşıyamaz ve olağan çekme dayanımı aşıldığında da çelik kırılır.

Aşırı zorlanan bir bölgede, çatlağın başlaması halinde yorulma kırılmasının önlenmesi çok zordur. Çatlağın ilerleyerek kırılmanın oluşması çevrim sayısına bağlıdır. Yorulma sonucu oluşan çatlak bir çentik etkisi yaratacaktır. Böyle gerilmeler daha da büyüerek kesitin sürekli küçülmesi ve çatlağın ilerlemesine neden olacaktır. Gözlemler yorulma çatlak ilerleme hızının, çatlak derinliğinin karesiyle arttığını göstermiştir (Kavurmacı 1980).

2.7.2.1. Yorulma Kırıklarının Görünümü

Çeliklerde yorulma kırıklarının görünümü, zorlamanın şekli ve seviyesi ile zorlamanın zamanla değişimi hakkında bilgiler vermektedir. Çeliklerin kırık yüzeylerinde birbirinden tamamen farklı iki bölge ortaya çıkmaktadır. Bunlar;

- 1) Düzgün ve mat, bazen sürtünme nedeniyle parlamış bölge (yorulma çatlak),
- 2) Kaba kristalli, yarıklar içeren, kısmen kalıcı şekil değiştirmiş ve son çevrim sırasında zorunlu olarak ani kırılmış bölge (son kırılma yüzeyi)'dir.

Çekme ve eğme zorlamalarında görülen yorulma kırılmalarında kırık yüzey daima gerilmelere dik yönde meydana gelir. Aynı anda etkiyen kayma gerilmelerinin yorulma çatlaklarının ilerlemesinde hiçbir katkısı yoktur. Buna karşı, kayma gerilmeleri sünek malzemelerde son kırılmayı etkileyebilir. Bu durumda son kırılma normal gerilmeye göre 45° lik açıyla oluşur (Kavurmacı 1980).

2.7.3. Yorulma Ömrüne Etki Eden Faktörler

Yorulma olayının, tekrarlanan gerilme altında malzemede mikroskobik boyutta bir çatlak oluşumuyla başlayan ve malzemenin kopmasıyla sonlanan bir olay olması, yorulma olayında en önemli faktör olarak tekrarlanan gerilmeleri karşımıza çıkarmaktadır. Yorulma kusurları başlıca üç faktörden etkilenirler (Kavurmacı 1980, Kızıl 1999).

- 1) En büyük çekme gerilmesi,
- 2) Uygulanan gerilmenin oldukça geniş değişimi veya dalgalanması,
- 3) Uygulanan gerilmenin yeteri kadar çok tekrarlama sayısıdır.

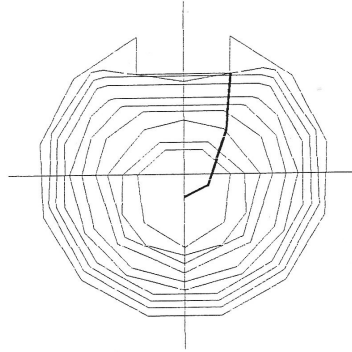
Bunların dışında; gerilim yoğunluğu, yüzey etkisi, boyut etkisi, sıcaklık etkisi ve metalürjik etkiler de yorulma olayını etkilemektedir.

2.7.3.1. Metalürjik Etkiler

Metalürjik etkiler; sıcak ve soğuk şekil verme usulleri, katı hal reaksiyonları, fazların dağılımı gibi malzemenin ısı ve mekanik özellikleriyle ilgilidir. Gerek ısı ve gerekse de mekanik işlemler, malzemedeki iç gerilmelerin dağılımı, kristal yapısı, şekil bozukluğu gibi etkiler mekanik özelliklerde değişimlere sebep olmaktadır. Metalürjik etkilere örnek olarak; tane sınırlarında oksitlenme, iç çatlak kümeleri, sertleştirilmiş çeliklerde yapı farklılıkları, ağ şeklinde yoğunlaşmış serbest karbürler, sertleştirilmiş veya sertleştirilmemiş çelik parçalarının yüzeyinde karbon azalması, kaynak dikişlerinde gaz boşlukları verilebilir (Kızıl 1999).

2.7.3.2. Gerilim Yoğunlaşması

Yorulma mukavemeti, çentik veya delik varlığıyla önemli ölçüde düşer. Parça kesitinde meydana gelen bu tür süreksizlikler gerilme yoğunlaşmasına neden olurlar. Yorulma çatlakları en büyük gerilim yoğunlaşma yolunu takip etme eğilimindedirler. Şekil 2.23.'de bu durum görülmektedir.



Şekil 2.23. Yorulma çatlaklarının en yüksek gerilme yoğunluğu yolunu takibi (Kızıl 1999).

2.7.3.3. Yüzey Etkileri

Uygulamada tüm yorulma hataları malzeme yüzeyinde oluşmaya başlar. Eksen doğrultusundaki gerilmenin tüm kesitte düzgün olarak dağılması beklenirken, rasgele yönelmiş çok taneli malzemelerde, gerilme düzgün olarak dağılmayıp, en büyük değerlerini yüzeyde alabilir (Kızıl 1999). Bir malzemenin yorulması sırasında yüzeyi etkileyebilecek etkenler; yüzey pürüzlülüğü ve malzeme yüzeyinin yorulma mukavemetinin değişimi örnek olarak verilebilir.

2.7.3.4. Boyut Etkisi

Yapılan araştırmalarda, büyük parçaların yorulma mukavemetlerinin küçük parçaların yorulma mukavemetlerinden düşük olduğu gözlenmiştir. Kullanılan çeliğin sertliği arttıkça bu fark daha da belirginleşmektedir. Büyük boyutlu malzemelerin yorulma testlerini yapabilecek çok az sayıda yorulma test cihazı vardır. Yorulma örneği boyutunu değiştirmek iki faktörün değişimiyle sonuçlanır. İlki; çapı artırmaktır. Bu örneğin hacmini veya yüzey alanını artırır. Yüzeydeki değişim yorulma hatalarının hacmini veya yüzey alanını artırır. Yüzeydeki değişim yorulma hatalarının çoğunlukla yüzeyden başlaması açısından önemlidir. İkincisi ise; düzgün veya çentikli örneklerin eğmeli veya bükmeli yüklemelerde çaptaki artış, çap boyunca gerilme gradyanını düşürür ve yüksek gerilmeli malzemenin hacmini artırır.

2.7.3.5. Sıcaklığın Etkisi

Oda sıcaklığının altında yapılan deneylerde, sıcaklık düştükçe yorulma dayanımı artmaktadır. Ancak sıcaklığın oda sıcaklığının altına inmesi malzemenin çentik hassasiyetini artırmaktadır.

Oda sıcaklığının üstünde yapılan deneylerde, genellikle sıcaklık yükseldikçe, yorulma dayanımını düşürmektedir. Sadece düşük karbonlu çeliklerde, 200 ile 300°C arasında yorulma dayanımında artış görülür. Bu olay 200 – 300°C arasında düşük

karbonlu çeliklerin bozulma yaşlanmasına uğrayarak çekme mukavemetlerinin artmasına bağlıdır (Kızıl 1999).

Deney sıcaklığı belirli bir sıcaklığa çıktığı zaman, sürtünme olayı daha etkili olur. Kopma, yorulmadan çok sürtünme sonucunda gerçekleşir. Bu iki olayı birbirinden ayıran kırılma türüdür. Yorulmada kırılma tane içinde, sürtünmede tane sınırında olmaktadır.

2.7.4. Yorulma Deneyleri

Küçük bir yorulma deneyi rneği üzerinde elde edilen deney sonuçlarını karmaşık bir parça tasarımında kullanmak oldukça güçtür. Laboratuvar da, standart boyut ve belirli yüzey özelliğindeki örneğe, belirli türde sabit gerilmeler uygulanarak deney yapılır. Endüstride kullanılan parçada ise, koşulların hepsi değişiklik gösterirler. Karmaşık olmalarından dolayı bu koşulların analizi de güçtür. Bu nedenle yorulma deney sonuçları, çekme deneyi sonuçları gibi kesin ve tam güvenilir şekilde kullanılamazlar.

Yorulmaya etki eden değişimler, uzun yıllar yorulma deneyi ile ilgili standartların hazırlanamamasına neden olmuştur. Değişik araştırıcı ve araştırma merkezleri, özel cihazlar ve özel örnekler kullanarak konuyla ilgili çalışmalarını sürdürmüşlerdir (Kavurmacı 1980).

2.7.4.1. Yorulma Deney Türleri

Çalışma esnasında bir parçaya gelecek gerilme değişik tür ve şiddette olabilmektedir. Ancak yorulma deneylerinde, malzemelerin tekrarlanan dinamik zorlamalar karşısında göstereceği direnç hakkında bilgiler edinebilmek için, uygulamada en sık rastlanan belirli gerilme türleri ele alınmıştır. Bu tür gerilmelerin düzgün periyotlarla uygulanması halinde elde edilen sonuçlar ölçüt kabul edilerek teknik yorumlar yapılabilmektedir.

Deneyde kullanılan gerilme türü, yorulma deneyine de adını vermektedir. Gerilme türüne göre başlıca yorulma deneyi türleri şunlardır:

- 1) Eksen Doğrultusunda Gerilmeli Yorulma Deneyi: En basit sistem olan bu sistemde, örneğe uzunluğu boyunca değişen çekme ve basma gerilmeleri uygulanır. Uygulanan gerilme örneğin enine düzgün olarak dağılır.
- 2) Eğme Gerilmeli Yorulma Deneyleri: Bu deney türü kendi arasında ikiye ayrılmaktadır.
 - a) Düzlemsel Eğme Gerilmeli Yorulma Deneyi: Bu deney türünde örnek nötr bir sisteme göre tekrarlanan eğme gerilmeleri altındadır. Bu tür gerilmelerin oluştuğu en güzel örnek taşıtların yaprak yaylarıdır.
 - b) Dönen Eğme Gerilmeli Yorulma Deneyi: Bu deney türünde, örneğe devamlı dönen bir tarafsız eksene göre tekrarlanan eğme gerilmeleri altındadır. Bu tür gerilmelere örnek, hareket halindeki taşıtların akslarında meydana gelen gerilmeler gösterilebilir (Kavurmacı 1980).

2.7.4.2. Yorulma Deneyi İle İlgili Terimler

Yorulma konusunun incelenmesinde özel terimler kullanılmaktadır. Bu terimlerde bazıları aşağıda verilmiştir.

Çevrim: Birçok deney cihazında zamanla sinüs eğrisinde bir değişme oluşturacak gerilme uygulanır.

En Büyük Gerilme (σ_{maks}) : Uygulanan gerilmeler arasında en büyük sayısal değeri olan gerilmedir. Diğerlerinde olduğu gibi çekme gerilmeleri pozitif (+), basma gerilmeleri negatif (-) işaretlerle gösterilmektedir.

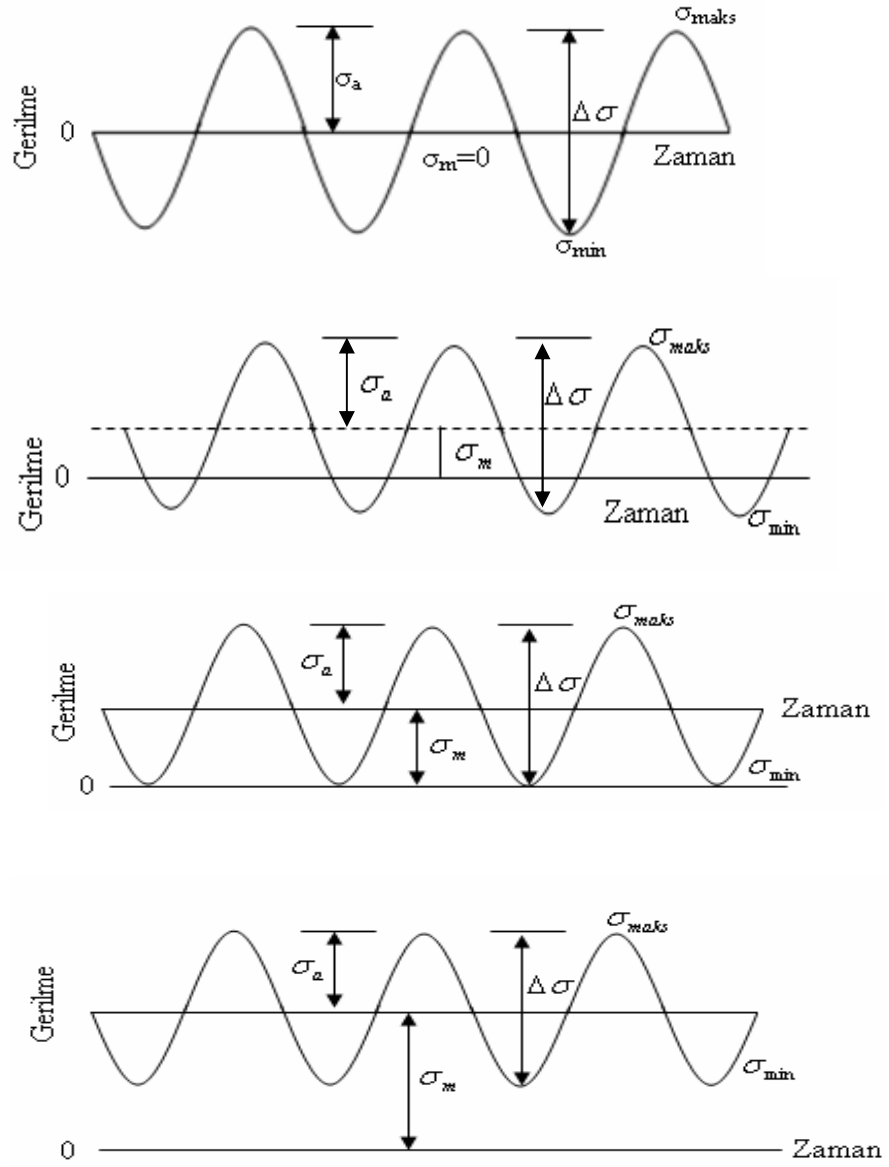
En Küçük Gerilme (σ_{min}) : Uygulanan gerilmeler arasında en küçük sayısal değeri olan gerilmedir.

Ortalama Gerilme (σ_m) : En büyük ve en küçük gerilmelerin toplamının ortalamasıdır.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{maks} + \sigma_{min}}{2} \quad (2.15)$$

Gerilme Aralığı: Şekil 2.24.'de görülebileceği gibi, gerilme genliği gerilme aralığının yarısına eşittir. Bir başka deyişle, en büyük ve en küçük gerilme ile ortalama gerilme arasındaki farktır ⁴⁾.

$$\sigma_a = \sigma_r / 2 = \frac{\sigma_{maks} - \sigma_{min}}{2} \quad (2.16)$$



Şekil 2.24. σ_m ' in çevrimsel gerilim üzerindeki etkisi ⁴⁾.

Gerilme Oranı: Genellikle iki türlü gerilme oranı tanımlanır. En çok kullanılanı R ile gösterilip minimum gerilmenin en büyük gerilmeye oranıdır.

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (2.17)$$

İkincisi ise A ile gösterilip gerilme genliğinin ortalama gerilmeye bölünmesiyle elde edilir.

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} \quad (2.18)$$

2.7.5. Yorulma Dayanımının Gösterilmesi

Yorulma deneyleri en çok $(\sigma - N)$ diyagramı, Smith diyagramı, Goodman diyagramı ile temsil edilmektedir.

2.7.5.1. Wöhler Yöntemi ve $(\sigma - N)$ Diyagramı

Bu yöntem; biçim ve yüzey kalitesi bakımından tümüyle aynı olan deney parçalarının her biri için aralıksız şekilde ve farklı seviyelerde zorlanarak kırılmanın olduğu çevrim sayılarını tespit etme amacına dayanmaktadır. Bir deney serisinde genellikle 8 ile 10 tane deney parçası kullanılır.

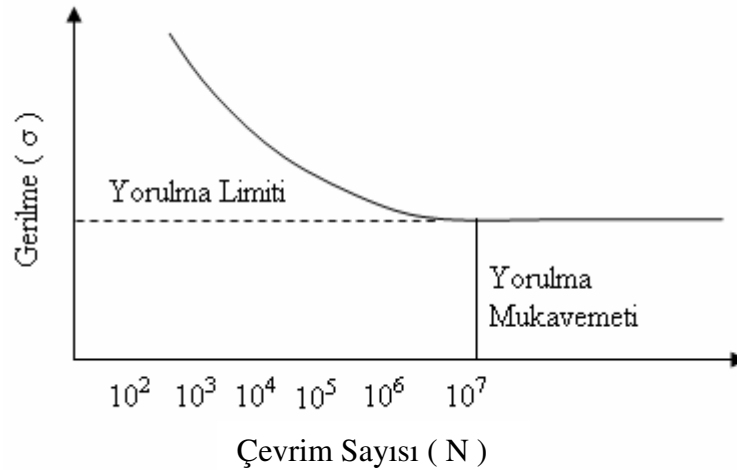
Pratikte, aşağıda belirtilen yöntemlerden biri kullanılarak laboratuvar da yorulma deneyi yapılır.

- 1) En küçük gerilmenin en büyük gerilmeye oranı yani R' yi sabit tutarak, her bir sabit R değeri için farklı örneklerde, en büyük gerilme değiştirilerek kırılmaya kadar geçen yükleme sayısı kaydedilir.
- 2) Ortalama gerilmeyi sabit tutarak, her bir değeri için gerilme genliği değiştirilir. Kırılmaya kadar geçen yükleme sayısı kaydedilir.

Kırılmaya kadar geçen yükleme sayısını apsise, gerilme değerini de ordinata yerleştirilerek Wöhler eğrisi elde edilir. Wöhler eğrisindeki gerilme en büyük gerilme olabileceği gibi gerilme genliği de olabilir. Her iki halde de ordinattaki gerilmenin hangisi olduğu belirtilmelidir. Wöhler eğrisi üzerinde bulunan her nokta deney şartları

altında verilen bir gerilme için malzeme ömrünü vermektedir. Benzer şekilde, belirli bir yükleme sayısında malzemeyi kırarak gerilme değeri Wöhler eğrisini kullanarak belirlenebilir. Böylece Wöhler eğrisi altındaki bölge, deney şartları altında malzemenin tahrip olmadan çıkabileceği, gerilme ve yükleme sayısı değerleri için de bulunabilir. Bir başka deyişle, Wöhler eğrisinin altında malzeme tahrip olmaz. Fakat Wöhler eğrisi üzerindeki bölgede çalışıldığında malzemenin tahribi kaçınılmazdır. Bazı malzemelerde, özellikle demir – çelik alaşımlarında, bir gerilme – yükleme sayısı noktasından sonra eğri, yatay eksene paralel hale gelmektedir. Wöhler eğrisine asimptot olan gerilme değerinin altında kaldıkça sonsuz sayıda yüklemeye dahi malzemenin tahrip olmayacağı kabul edilebilir. Bu gerilme değerine “Yorulma limiti” adı verilmektedir. Bu şekil 2.25.de görülmektedir.

Yorulma limiti değerinin sadece deney şartları için geçerli olduğu, aynı malzeme deney şartları dışında çalıştırıldığında yorulma limiti değerinin tam olarak geçerli kabul edilmemesi gerektiği gözden kaçırılmamalıdır. Aynı deney şartlarında malzemenin geometrisindeki ufak bir değişiklik, yorulma limiti değerini değiştirebileceği gibi, bazı malzemelerde, Wöhler eğrisi apsis eksenine paralel hale gelmemektedir (Kızıl 1999).



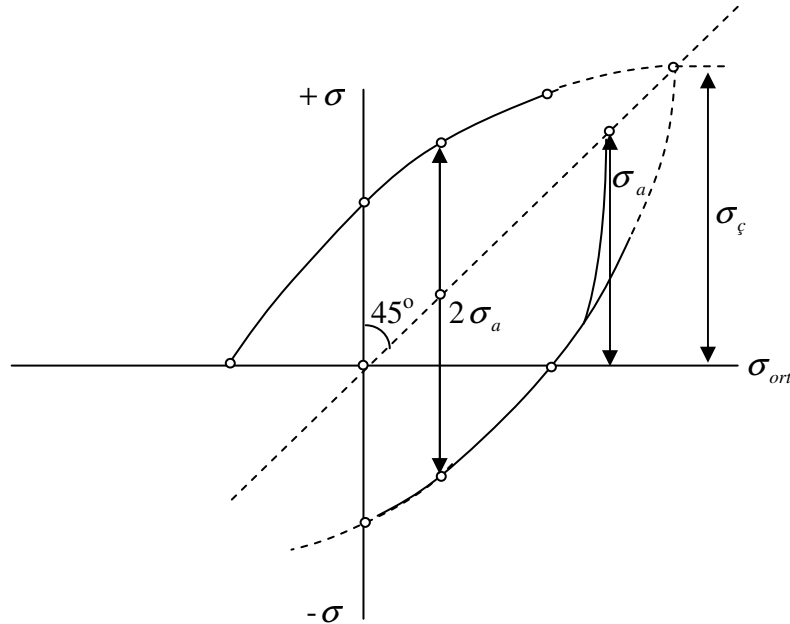
Şekil 2.25. $\sigma - N$ Eğrisi⁴⁾.

Wöhler eğrilerinin kırılmaya kadar geçen yüklemeyi gösteren apsis eksenini genellikle logaritmiktir. Sınır çevrim sayısı çelikler için 10×10^6 (düşük sıcaklıkta), 100×10^6 (yüksek sıcaklıklarda) olarak alınır. Deney süresinin kısaltılması amacı ile çelik için 2×10^6 çevrim sayısı da kullanılmaktadır (Kızıllı 1999).

Wöhler eğrilerinin elde edilmesi için uygulanan yükleme alternatif çekme ve basma şeklinde olabileceği gibi, eğme ve diğer bir yükleme tarzında da olabilir.

2.7.5.2. Smith Diyagramı

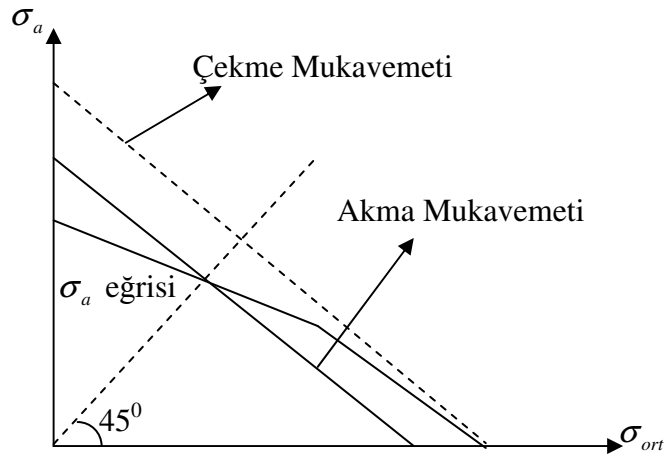
Yüklemede sabit bir ortalama gerilme değeri için, iki tane yorulma limiti elde edilmektedir. Birincisi; en büyük yorulma limiti, ikincisi ise, en küçük yorulma limitidir. Bu iki yorulma limiti değerini kullanarak bir diyagram çizmek mümkündür. Apsis ekseninde ortalama gerilme, ordinat ekseninde de en büyük ve en küçük yorulma limiti değerinin yerleştirilmesi ile elde edilen diyagrama Smith diyagramı veya sürekli mukavemet eğrisi denilmektedir. Smith eğrisi kapalı bir eğridir. Eğri içinde kalan alan emniyetli bölgedir. Gerilme değerleri eğrinin dışında kalırsa, malzeme tahrip olmaktadır. Smith diyagramı Şekil 2.26. da görülmektedir.



Şekil 2.26. Smith diyagramı ⁴⁾.

2.7.5.3. Goodman Diyagramı

Amerika'da sıkça kullanılan bu diyagramın yatay eksenine ortalama gerilme değerleri, dişey eksene ise, gerilme genliği yerleştirilir. Bu arada statik mukavemet sınırları da diyagramın yatay ve dişey eksenine işaretlenir. Goodman diyagramı Şekil 2.27.da görülmektedir.



Şekil 2.27. Goodman diyagramı ⁴⁾.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

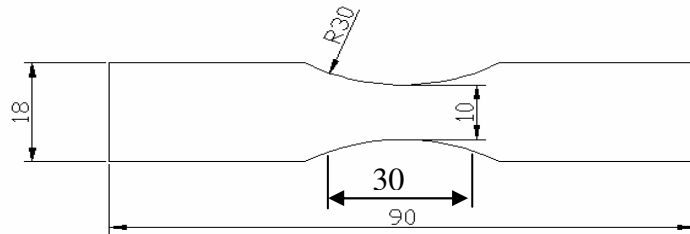
3.1. MATERYAL

Çift fazlı çelik elde etmek için deneysel çalışmalarda kullanılan Erdemir 6114 tipi çeliğin kimyasal kompozisyonu Çizelge 3.1.'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Deney malzemesinin kimyasal kompozisyonu.

Element	% Ağırlık	Element	% Ağırlık	Element	% Ağırlık
Karbon (C)	0.0550	Nikel (Ni)	0.0012	Vanadyum(V)	0.00636
Silisyum (Si)	0.0162	Alüminyum(Al)	0.0343	Volfram (W)	0.005
Mangan(Mn)	0.272	Kobalt (Co)	0.00243	Kurşun (Pb)	0.002
Fosfor (P)	0.0051	Bakır (Cu)	0.00883	Kalay (Sn)	0.00747
Kükürt (S)	0.012	Nubidyum(Nb)	0.00299	Antinom(Sb)	0.0046
Krom (Cr)	0.019	Titanyum (Ti)	0.0019	Demir (Fe)	99.56
Molibden(Mo)	0.00511				

Çift fazlı çeliklerin yorulma ömürlerinin belirlenmesinde kullanılan örnekler (Şekil 3.1.)' de ASTM E466-82'e göre hazırlanmıştır. Örnek boyutları mm olarak alınmıştır.



Şekil 3.1. Deney örneği.

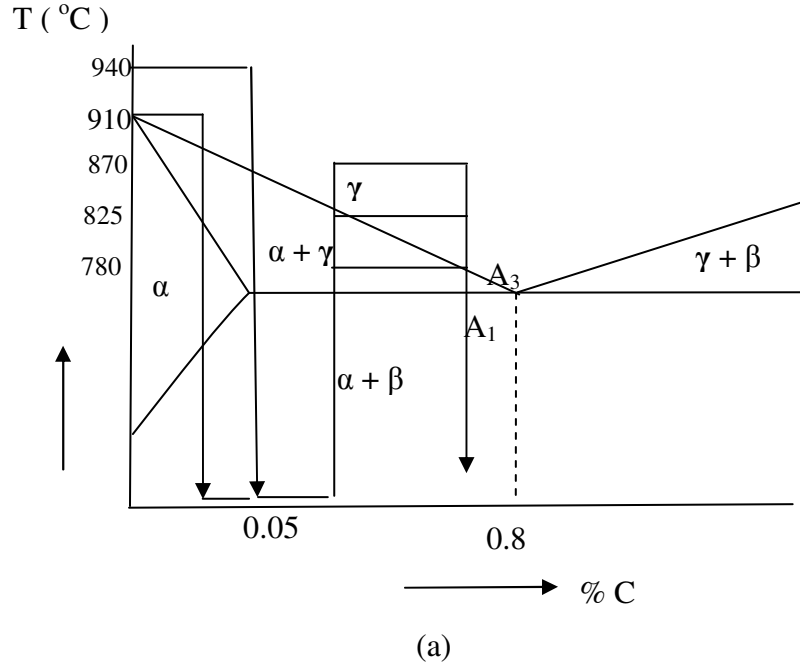
3.2. YÖNTEM

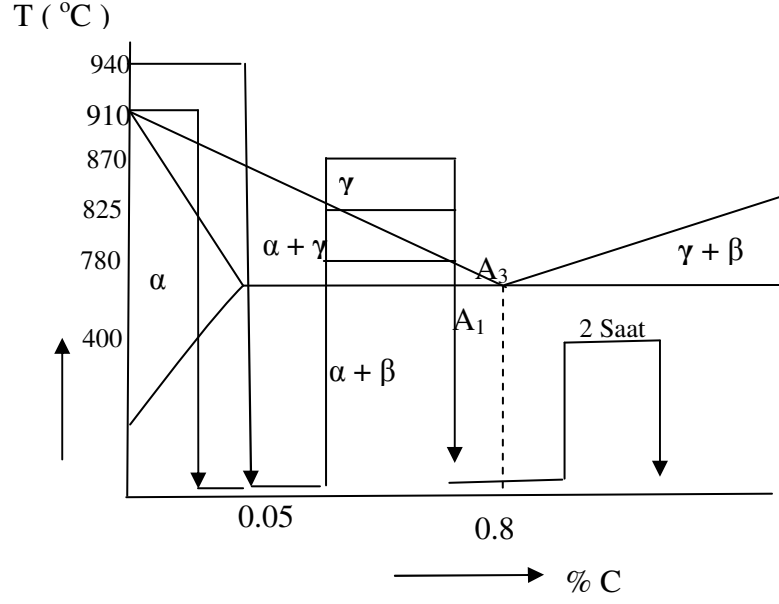
3.2.1. Isıl İşlemler

Aynı başlangıç örneğine ulaşmak için, çelik örnekler, 910°C'de 45 dakika tutup, havada soğutularak normalizasyon tavlaması uygulanmıştır. Normalizasyon tavlaması; başlangıçta ferrit + perlitten oluşan yapının ostenit bölgesine tavlanaarak, plastik bozunuma uğramış malzemenin normal yapısını yeniden kazanması ve eşit büyüklükte yuvarlak ince taneli hale gelmesi için gerçekleştirilen ısıl işlemdir. Bu işlem sonucunda haddelenmiş, çekilmiş veya kristal büyümesine maruz kalmış yapılar düzelir ve malzeme mekanik özelliklerini yeniden kazanır. Normalize edilmiş çeliklere, farklı martenzit morfolojisi ve tane boyutu içeren çift faz mikro yapısı elde etmek için aşağıdaki ısıl işlemler uygulanmıştır.

I. Grup: Normalize edilmiş örnekler 940°C'de (γ) 45 dakika tutulup su verildi. Daha sonra aynı örnekler 780°C, 825°C ve 870°C ($\alpha + \gamma$) tavlama sıcaklıklarında 60 dakika tutuldu ve su verilerek soğutuldu (intermediate quenching) (Şekil 3.2a.).

II. Grup: I no' lu grupta, ısıl işlem ile üretilen örnekler, 400°C'de 2 saat tutulup havada soğutularak ısı verme işlemleri gerçekleştirildi (Şekil 3.2b.).





(b)

Şekil 3.2. Fe-C diyagramı ve ısıt işlemlerin uygulandığı sıcaklıklar. (a): I. Grup Isıt işlem, (b) II. Grup ısıt işlem.

3.2.2. Metalografik İşlemler

Farklı ısıt işlemler ile üretilen çift fazlı çeliklerin martenzit hacim oranı ve kristal (tane) boyutunun tespiti için metalografik inceleme yapıldı. Bu amaçla, örnek levhaların baş kısımlarından kesilen parçalar bakalite alınıp uygulanan kimyasal bileşim ile parlatıldıktan sonra % 5 nital ile dağlandı. Optik mikroskopla mikro yapı fotoğrafları çekilen örneklerin martenzit hacim oranı ile tane boyutları nokta sayma yöntemi⁵⁾ kullanılarak belirlendi. Hacim oranları alan hesabı ile belirlenirken, martenzit tane boyutlarının bulunmasında Kasumagic (1985) tarafından geliştirilen yöntem kullanıldı. Kesme yöntemi olarak isimlendirilen bu yöntem, mikro yapı fotoğrafı üzerine çizilmiş daire çemberinin kesmiş olduğu tane sayısının belirlenmesi esasına dayanır. Kesme yönteminde tane boyutu:

$$d = \frac{L.P.10^3}{n.V} \quad (3.1)$$

bağıntısı kullanılarak hesaplandı. Burada, d : Ortalama tane boyutu (μm), L : Çizgi boyu (mm), P : Çizgi sayısı, n : Çizgiler tarafından kesilen tane sayısı ve V : Mikroskobun büyütme oranıdır.

Çift fazlı çeliklerin üretiminde kullanılan fırın vakum ünitesine sahip olmadığından kontrollü soğutma işlemi gerçekleştirilememiştir. Bu nedenle örnek yüzeylerinde oluşan kalıntıların giderilmesi ve tüm örneklerin aynı kalınlık değerlerine sahip olması için yüzey taşlama işlemi yapılmıştır. Başlangıç örneğimiz 25 mm kalınlığında iken, ısıl işlem sonrası gerekli yüzey taşlama işlemi sonucunda örnek kalınlığı 12,5 mm değerine çekilmiştir.

3.2.3. Mekanik Deneyler

Isıl işlem uygulanmış örneklerin çekme özelliklerini belirlemek amacı ile bilgisayar destekli Zwick Roell test cihazında 10 mm/dakika çekme hızında çekme deneyleri yapıldı. Levha şekilli örneklerin çekme deneyinde, her ısıl işlem şartı için 5 örnek kullanıldı. Bu 5 örnek için tespit edilen özelliklerin ortalaması alınarak, o ısıl işlem şartı için mukavemet (akma, çekme) özellikleri bulundu. Çekme test örnekleri TSE 138' e göre hazırlandı.

Reicherter mikro sertlik cihazı kullanılarak örneklerin sertlikleri ölçüldü. Örnekler üzerinde 5 farklı bölgede sertlik ölçümü yapıldı, bunların ortalaması alınarak sertlik değerleri belirlendi. Elde edilen ölçümler Vickers HV 0.1 ve $F = 0.980 \text{ N}$ eşliğinde gerçekleştirildi.

3.2.4. Fiziksel Deneyler

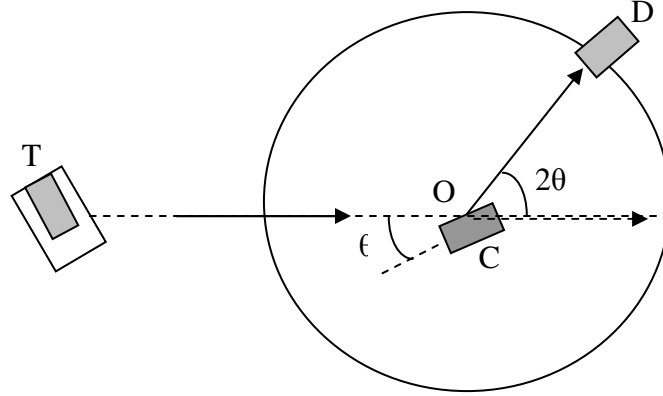
Farklı sıcaklıklarda üretilen çift fazlı çelik örneklerin ısı işlem sonrası mikro yapılarındaki değişimler (kristal yapı ve kusurlar) x – ışını kırınımı deneyi ile incelendi. X ışını kırınımı deneyi ile aynı zamanda optik mikroskop görüntüleri sonucunda belirlenen fazlara ait kristal yapıların doğrulaması yapıldı. Isıl işlem sonrası, çift fazlı çelik örneklerin yüzey dirençlerinin ölçümü dört nokta elektrot yöntemi kullanılarak belirlendi. Son olarak, farklı sıcaklıklarda üretilen çift fazlı çeliklerin manyetik özellikleri incelenerek her bir ısı işlem şartı için B - H eğrileri belirlendi.

3.2.4.1. X – Işını Analizleri

X-Işınları bir maddeye yöneltildiğinde kristal içindeki atom veya iyon düzlemleri tarafından yansıtılırlar. X- Işını kırınımı ile fazların nicel olarak tahmini, karışımdaki her bir faz için tüm kırınım uçlarının tamamlanmış şiddetlerinin ele alınan fazın yüzde hacim oranıyla orantılı olduğu ilkesine dayanmaktadır. Yansıma açısı x-ışınları dalga boyu ile düzlemler arasındaki mesafeye bağlıdır.

X-Işınları kırınımı deneyini kullanarak ısı işlemle üretilen çift fazlı çelik örneklerimizin kristal yapılarını inceledik. Farklı ısı işlemlerle üretilen çift fazlı çelik örnekler 1 cm²'lik alana sahip olacak şekilde kesilip hazırlandı. 10° ile 90° arasındaki bantta CuK_α radyasyonu kullanılarak, $\lambda = 1.541 \text{ \AA}$ lük dalga boylu x-ışını gönderilerek örnek yüzeyleri tarandı. Bragg açısına karşı şiddet değerleri belirlenerek, Şiddet – Bragg açısı grafikleri çizildi. Çizilen grafiklerde meydana gelen değişimlerin ilk önce hangi kristal yapısına ait olduğunu belirleyip, bu değişimlerin olası hangi düzlemlerden yansıdığını miller indislerini hesaplayarak belirledik. X – ışını kırınımı deneyleri sadece I.grup ısı işlemle üretilen çift fazlı çelik örneklere uygulanmıştır. X ışını ölçümleri için, Rigaku D – Max. Rint 2200 Series X – Işını Difraktometre cihazı kullanıldı.

3.2.4.1.1. X – Işını Kırınımı Yardımı İle Örnek Yüzeylerin Taranması



Şekil 3.3. X-Işını spektrometresi.

T tüpünden çıkan x-ışınları spektrometrenin O merkezinden geçen bir eksen etrafında döndürülerek gelen demete nazaran istenilen açıda konulabilen C kristali üzerine düşer. D difraksiyona uğramış x-ışınlarının şiddetini ölçen herhangi bir sayıcıdır. Bu sayıcı da O etrafında dönebilir ve istenilen açısal duruma getirilebilir. Kristale öyle bir durum verilir ki, yansıtıcı düzlemleri gelen demetle özel bir θ açısı yapar ve D bu özel açığa karşılık gelen 2θ durumuna konur. Sonra difraksiyon demetinin şiddeti ölçülür ve Bragg yasasından dalga boyu hesaplanır. Bu işlem olası θ açıları için tekrarlanır (Şekil 3.3.).

Yukarıdaki spektrometrenin çalışma prensibinden hareketle I. grup ısıtma işlemi üretilen çift fazlı çelik örneklerin kristal yapıları ve yansımaların meydana geldiği düzlemlerin miller indisleri belirlendi.

Mikro yapıda oluşan martenzitin örgü sabitlerini hesaplamak için literatür de belirtilen denklemler kullanıldı. Bu örgü sabitlerinden hareketle de hem kristal yapı hem de yansımanın gerçekleştiği düzlemlerin miller indisleri hesaplandı (Sümer 1966).

Martenzit (Cisim Merkezli Tetragonal) için;

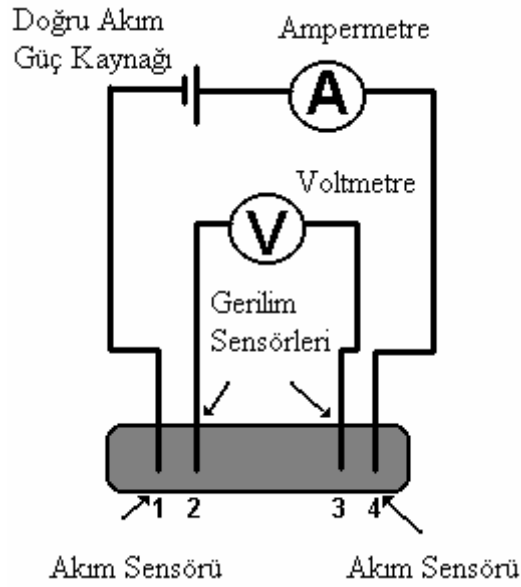
$$a = 2.867 - 0.044X \quad (3.2a)$$

$$c = 2.867 + 0.116X \quad (3.2b)$$

kristal örgü sabitleri Eşitlik (3.2a ve 3.2b) yardımı ile hesaplandı. Burada, a ve c martenzitin örgü sabitleri, X ise, karbonun ağırlık yüzdesidir.

3.2.4.2. Elektrik Özdirenç Ölçümleri

Farklı ısıl işlemlerle üretilen çift fazlı çeliklerin yüzey dirençlerinin ölçümü dört nokta elektrot yöntemi kullanılarak belirlendi. Bu ölçümler “Jandel four point universal probe” cihazı kullanılarak ölçüldü. Dört nokta elektrot yönteminin şematik gösterimi Şekil 3.4.’deki gibidir ⁶⁾.



Şekil 3.4. Dört nokta elektrot yönteminin şematik gösterimi⁶⁾.

Şekildeki deney düzeneği ve Eşitlik (3.3) kullanılarak farklı sıcaklıklarda ısıl işlemlerle üretilen çift fazlı çeliklerin elektrik özdirenç değerleri ölçüldü. Bu ölçümler kullanılarak, örnek elektrik özdirençlerinin tavlama sıcaklığına bağlı değişimleri belirlendi.

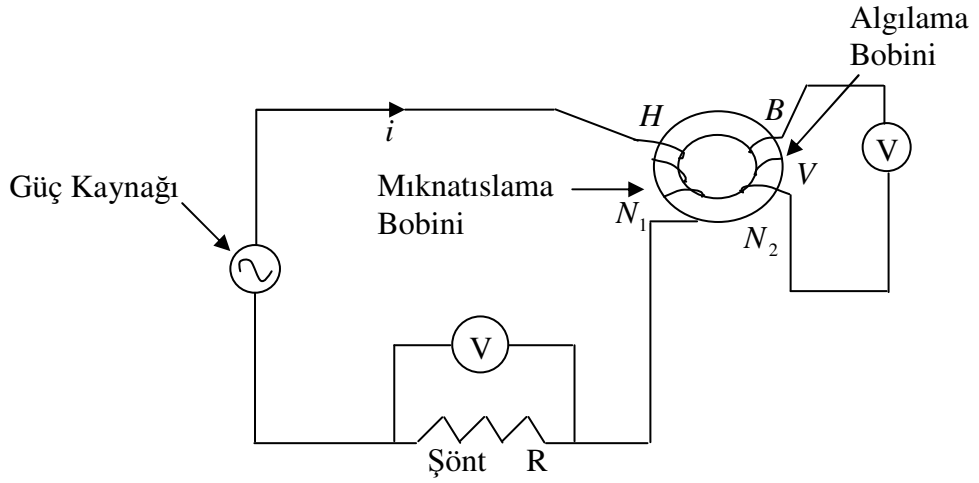
$$\rho = 2.\pi.a.\frac{\Delta V}{I} \quad (3.3)$$

Burada; ρ ; Elektrik özdirenç (Ωm), a ; uçlar arası uzaklık (m), ΔV ; 2 ve 3 uçları arasındaki potansiyel farkı (mV) ve I ; 1 ve 4 uçları arasından geçen akım (mA) şiddetidir.

3.2.4.3. Manyetik Ölçümler

3.2.4.3.1. Çekirdekte Manyetik Büyüklüklerin Hesaplanması

Şekil 3.5.'de basit bir mıknatıslama devresi görülmektedir. Şönt direnç üzerindeki gerilim yardımı ile çekirdeğe verilen akım (i) ve buradan manyetik alan şiddeti (H), Faraday yasasına göre algılama bobininde indüklenen gerilim yardımı ile de manyetik akı yoğunluğu (B) hesaplanmaktadır.



Şekil 3.5. Mıknatıslama devresi (Küçük 2003).

Çekirdek içinde dolaşan manyetik akı yoğunluğu zamana bağlı bir sinüs fonksiyonu ise,

$$B(t) = \sum_{n=1} a_n \sin(\omega t + \phi_n) \quad (3.4)$$

şeklinde ifade edilir. Herhangi bir $t = t'$ anında B' nin tepe değeri,

$$B(t') \equiv B_m = \sum_{n=1} a_n \sin(n\omega t' + \phi_n) \quad (3.5)$$

olur. Yarım periyot sonra $\left(t = \frac{\pi}{\omega} = \frac{1}{2f} \right)$

$$B\left(t' + \frac{\pi}{\omega}\right) = \sum_{n=1} a_n \sin(n\pi + n\omega t' + \phi_n) \quad (3.6)$$

dir ve n ' nin tek sayı değerleri için,

$$B\left(t' + \frac{\pi}{\omega}\right) = -B(t') \quad (3.7)$$

olmaktadır. Böylece Eşitlik (3.4) ana frekansın yarım periyotlarında negatif ve pozitif en büyük değerlere ayrılacaktır. Ayrıca Faraday yasasına göre,

$$V(t) = -\frac{d\phi}{dt} = -A_{Fe} \frac{dB}{dt} \quad (\phi = BA) \quad (3.8)$$

olduğundan, Eşitlik (3.4)' ün zamana göre türevi,

$$\left(\frac{dB}{dt}\right) = \sum_{n=1} a_n n \cos(n\omega t + \phi_n) \quad (3.9)$$

olmaktadır ve $t = t' + n\pi/\omega$ da Eşitlik (3.9)' un değeri sıfırdır. Bundan dolayı dB/dt ' in ana frekansın yarım periyodu üzerinden ortalama değeri alınırsa,

$$\left(\frac{dB}{dt}\right)_{ort} = \frac{\omega}{\pi} \int_{t'}^{t'+\pi/\omega} \sum_{n=1} a_n n \omega \cos(n\omega t + \phi_n) dt \quad (3.10)$$

elde edilir ve bu integralin sonucu,

$$\left(\frac{dB}{dt}\right)_{ort} = \frac{\omega}{\pi} \sum_{n=1} a_n [\sin(n\omega t' + \phi_n) - \sin(n\pi + n\omega t' + \phi_n)] \quad (3.11)$$

olur. Buradan,

$$\left(\frac{dB}{dt}\right)_{ort} = \frac{2w}{\pi} \sum_{n=1} a_n \sin(nwt' + \phi_n) \quad (3.12)$$

dir. Eşitlik (3.4), Eşitlik (3.12)' de yerine yazılırsa,

$$B_m = \frac{\pi}{2w} \left(\frac{dB}{dt}\right)_{ort} \quad (3.13)$$

elde edilir. Algılama bobininden indüklenen gerilim ; $\left[V = NA \left(\frac{dB}{dt}\right)\right]$ ve açısal frekans ($w = 2\pi f$) ifadeleri Eşitlik (3.13)' de yerine konulursa,

$$B_m = \frac{V_{ort}}{4N_2 A_{Fe} f} = \frac{V_{rms}}{4.44 N_2 A_{Fe} f} \quad (3.14)$$

olur. Burada V_{ort} , algılama bobininden indüklenen gerilimin ortalama değeri (V), N_2 , algılama bobininin sarım sayısıdır. Eşitlik (3.14), çıkış sinyalinin dalga şekli sinüs olduğundan geçerlidir. Eğer sinyalde bir bozulma meydana gelirse, sinyalin harmonikleri oluşmaya başlar. Bu durumda Eşitlik (3.14) kullanılamaz. Bu nedenle standartlara uygun veri alabilmek için yapı çarpanı (FF) olarak isimlendirilen bir büyüklük tanımlanmıştır ve

$$FF = \frac{V_{rms}}{|V_{ort}|} \quad (3.15)$$

olarak verilir. Form faktörünün değeri $1.111 \pm \%1$ ise standart bir veri alınmış demektir. Böylece Eşitlik (3.14) yeniden,

$$B_m = \frac{V_{rms}}{4FF N_2 A_{Fe} f} \quad (3.16)$$

şeklinde yazılabilir.

Ampère yasasına göre kapalı bir yol boyunca N sarımdan geçen akı,

$$N_i = \oint H dl_{Fe} \quad (3.17)$$

şeklinde verilmektedir. Akım sinüs eğrisi ise değeri,

$$i(t) = i_m \sin(\omega t + \phi) \quad (3.18)$$

dir. Manyetik alan kapalı yol boyunca düzgün ise H integral dışına alınabilir (Küçük 2003).

$$N_1 i_m = H_m l_{Fe} \quad (3.19)$$

$$H_m = \frac{N_1 i_m}{l_{Fe}} \quad (3.20)$$

Burada H_m , çekirdeğin merkezinden ortalama yarıçap r_m kadar uzaklıktaki manyetik alan şiddetinin en büyük değeri (A/m), N_1 , mıknatıslama bobininin sarım sayısı, i_m akımın en büyük değeri (A) ve l_{Fe} çekirdeğin ortalama demir çevre uzunluğudur (m).

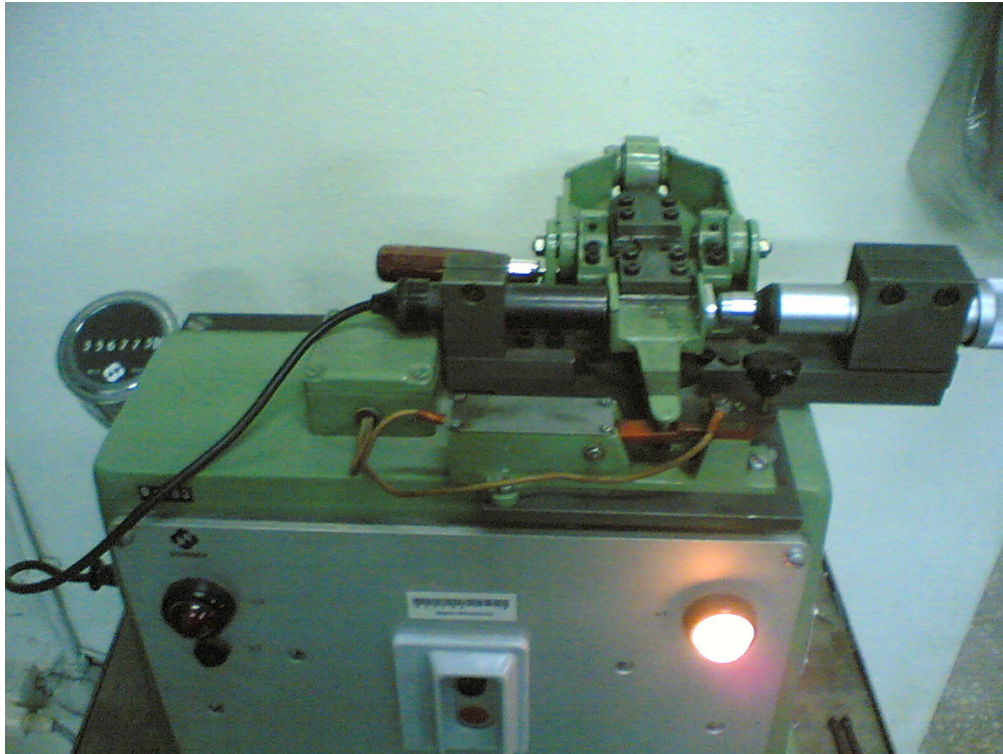
3.2.4.3.2. B-H Eğrilerinin Elde Edilmesi

Farklı sıcaklıklarda ısıl işleme üretilen çift fazlı çelik örneklerin manyetik özelliklerinin, özellikle de B-H değişimlerinin elde edilmesi için (Erdem 2006)' ün kullandığı sistemden yararlanıldı. Çift fazlı çeliklerin üretilmesinde kullanılan deney örneklerinin (Şekil 3.1.) ısıl işlemler sonrası orta kısımlarına en ince bobinden 10' ar sarım sarıldı. Her ısıl işlem şartı için iki örnek kullanıldı. B_m değerleri 0.1-1.5 (Tesla), f (Frekans) değerleri de 50 ve 100 Hz alınarak, Eşitlik 3.14 yardımıyla I. ve II. grup çift fazlı çelikler için V_{rms} değerleri belirlendi. Belirlenen V_{rms} değerleri ayarlanarak üreteçten gönderilen sinyalle çekirdeğin üzerinde bulunan örnekte sarılı bobinlerden indüklenen gerilim ölçüldü. Ölçümler sırasında hem giriş hem de çıkış sinyali osiloskopta görüntülenerek eğrilerin sinüs dalga şeklinden sapmamasına dikkat edildi. Her ölçüm sonucunda örnek üzerinde oluşan kalıcı mıknatıslığın giderilmesine özen

gösterildi. Bu deneysel sistem yardımıyla alınan ölçümlerden hareketle de çift fazlı çelik örneklerin ısıtılma sonrası B – H eğrileri elde edilerek karşılaştırılma yapıldı. Isıtılma işleminin manyetik özellikler üzerindeki etkileri incelenmeye çalışıldı.

3.2.5. Yorulma Ömür Ölçümleri

Yorulma ömür değerlerinin belirlenmesi ve $\sigma - N$ grafiklerinin elde edilmesi için, I. ve II. grup ısıtılma işlemiyle üretilen çift fazlı çelik örnekler, düzlemsel eğme gerilmeli yorulma deney türüne göre Şekil 3.6.'da görülen deney cihazında teste tabi tutuldu. Örneklerin bir ucu sistemde sabitlenirken, öteki ucuna ise değişik açılarda ayarlanabilen hareketli kol üzerinden yükleme uygulandı. Deneylere başlamadan önce sistem kalibre edildi.



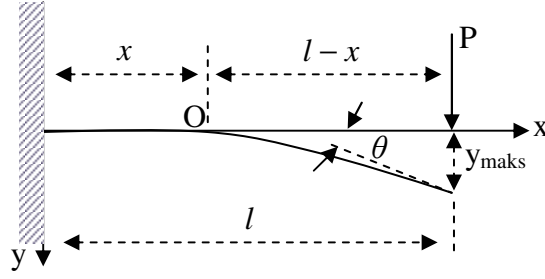
Şekil 3.6. Schenck yorulma deney cihazı.

Gerilme yük tekrar sayısı eğrilerinin oluşturulması için yapılan deneylerde, toplam yedi açı değerinde ölçümler yapıldı. Yükleme seviyesi seçilen en yüksek açı değerinden ikişer derece inilerek örneğin kırılmadığı açı değerine kadar bu işleme

devam edildi. Her açı değerinde, çift fazlı çelik örneklerden üçer kez ölçüm alındı. Sonsuz ömürdeki mukavemet değeri, eğrinin eğiminin azalma göstermeye başladığı bölgeden itibaren açı değerlerinin azaltılması ile deneyler yapılarak yaklaşık 2×10^6 çevrim değerine ulaşılarak belirlendi.

3.2.5.1. X Uzunluktaki Bir Kesitte Eğilme Moment İfadesinin Elde Edilmesi

Kullanılan sistemde, örneğin hareketli ucuna etkiyen yük yardımıyla eğilme moment değerinin eğme açısına bağlı ifadesinin türetilmesi için Şekil 3.7.'den yararlanıldı.



Şekil 3.7. Ucuna P tekil yükü etkiyen çubuk.

Şekil 3.7.'deki sistemde, x uzaklıktaki bir kesitte meydana gelen eğilme moment ifadesini elde etmek için, O noktasına göre moment alınmıştır. O noktasına etkiyen moment,

$$M_o = -P(l - x) \quad (3.21)$$

olmaktadır.

Elastik eğri diferansiyel denklemi (Pakdemirli ve ark. 1973) ise,

$$EI_z \frac{d^2 y}{d^2 x} = P(l - x) \quad (3.22)$$

şeklinde olup gerekli integraller alınarak Eşitlik(3.22a ve 3.22b) elde edilmiştir.

$$EI_z \frac{dy}{dx} = -\frac{P(l-x)^2}{2} + c_1 \quad (3.22a)$$

$$EI_z y = \frac{P(l-x)^3}{6} + c_1 x + c_2 \quad (3.22b)$$

$x=0$ için $\frac{dy}{dx} = 0$ ve $y=0$ sınır şartları ile

$$c_1 = \frac{Pl^2}{2} \quad (3.23)$$

$$c_2 = -\frac{Pl^3}{6} \quad (3.24)$$

elde edilmektedir. Buradan hareketle, eğim denklemi,

$$\frac{dy}{dx} = \frac{P(2lx - x^2)}{2EI_z} \quad (3.25)$$

şeklinde elde edilmektedir. $x=l$ değeri için eğim,

$$\theta = \frac{Pl^2}{2EI_z} \quad (3.26)$$

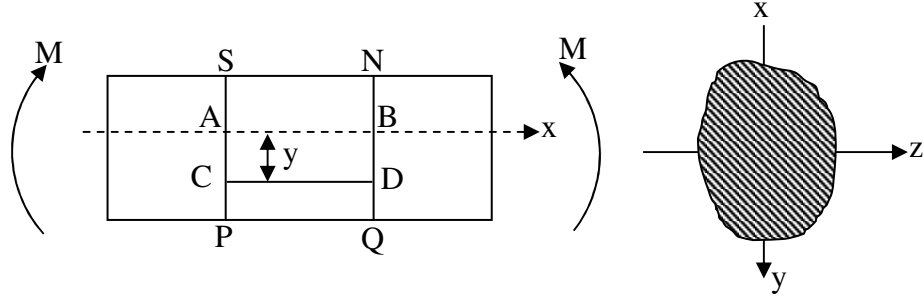
ifadesi şeklinde elde edilmektedir. Burada θ : Eğilme açısı, P: Uygulanan yük, E: Young modülü ve I_z ise tarafsız eksenin eylemsizlik momentidir. Moment, $M = Pl$ ise eğilme açısının momente bağlı değişiminin son ifadesi,

$$\theta = \frac{M.l}{2EI_z} \quad (3.27)$$

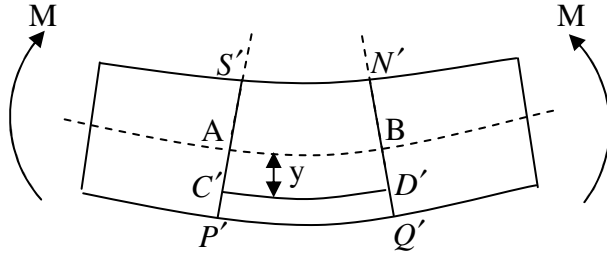
şekline dönüşmektedir.

3.2.5.2. Düşey Yüklü Bir Çubukta Gerilme İfadesinin Elde Edilmesi

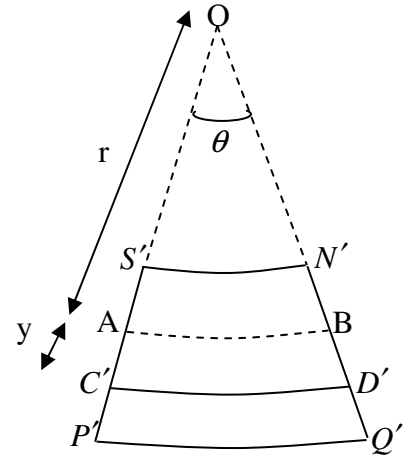
Düşey yüke maruz kalan bir çubuğun herhangi bir kesitinde meydana gelen gerilmenin elde edilmesi için Şekil (3.8a. , 3.8b. ve 3.8c.)' den yararlanıldı.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.8. (a): Eğilmeden önce örnek, (b): Eğilmeden sonra uçlarda meydana gelen eğilme, (c): Eğilen uçlardan alınan bir kesit (Pakdemirli ve ark. 1973).

Her iki ucundan yalnızca M eğilme momentine maruz kalan bir çubuğun eğilmesi incelendiğinde, eğilme momentinden dolayı meydana gelen gerilmeleri bulmak için çubuğun şekil değiştirmesini göz önüne almak gerekir.

Böyle bir sistemde, y kadar uzaklıktaki bir CD kenarının birim uzaması;

$$e = \frac{C'D' - CD}{CD} = \frac{(r + y)\theta - r\theta}{r\theta} = \frac{y}{r} \quad (3.28)$$

olarak bulunmaktadır. Hooke kanunundan yararlanarak, eksenenden y kadar uzaklıktaki bir kenarda meydana gelen normal gerilme;

$$\sigma = Ee = \frac{E}{r} y \quad (3.29)$$

şeklinde elde edilir.

Çubuğun kesitine etki eden iç kuvvetlerin, M momentini dengeleyecek şekilde bir kuvvet çifti oluşturması gerekmektedir. Başlangıç ekseninden y kadar uzaklıkta bir dA alan elemanına etkiyen kuvvet $\sigma \cdot dA$ olmaktadır.

O halde, dA elemanına etki eden kuvvetin başlangıç eksenine göre momenti;

$$\frac{E}{r} y^2 dA \quad (3.30)$$

olmaktadır.

Bütün kesit için elde edilecek toplam moment M dış momentine eşit olmalıdır. O halde;

$$\int_A \frac{E}{r} y^2 dA = \frac{E}{r} \int_A y^2 dA = M \quad (3.31)$$

yazılabilir.

$\int_A y^2 dA$ İfadesi, kesitin z eksenine göre eylemsizlik momenti olduğundan Eşitlik

(3.31)' da yerine yazarsak,

$$\frac{1}{r} = \frac{M}{EI_z} \quad (3.32)$$

bağıntısına ulaşılır. Eşitlik (3.32)' yi eşitlik (3.29)' deki yerine yazarsak,

$$\sigma = \frac{My}{I_z} \quad (3.33)$$

Buradan hareketle, kesitte meydana gelen en büyük çekme ve basma gerilmelerini elde etmek için y yerine $\frac{h}{2}$ yazmamız gerekmektedir.

Eşitlik (3.33)'den momenti çeker ve eşitlik (3.27)'deki yerine yazarsak, eğme sırasında çubukta meydana gelen gerilme ile eğme açısı arasındaki ilişkiyi bulmuş oluruz.

$$\sigma = \theta \cdot \frac{E \cdot y}{l} \quad (3.34)$$

Burada σ : Gerilme (MPa), E: Young modülü (MPa), y : Örnek kalınlığı, θ : Eğme açısı ve l : Cihaza bağlanmış örneğin orta kısmı ile eksantrik kolun bağlantı noktası arasındaki uzaklık (mm) tır.

Eşitlik (3.34) kullanılarak yükleme yapılan açı değerlerinden hareketle örnekte eğme esnasında uygulanan gerilme değerleri belirlendi. Hesaplanan gerilme değerleri ile bulunan çevrim sayılarını kullanarak Wöhler ($\sigma - N$) eğrileri elde edildi.

Isıl işlemler vakum kontrollü tavlama fırınında gerçekleştirilemediğinden, ısıl işlem sonrası örnek yüzeylerinde oluşan kalıntı ve pürüzlükleri ortadan kaldırmak ve yüzey etkilerini azaltmak için tüm örnekler taşlanarak temizlenmiştir.

Isıl işlem öncesi ve ısıl işlem sonrası örneklerin yüzey pürüzlülük testleri Taylor – Hobson Surtronic 3t cihazı kullanılarak ölçülmüştür.

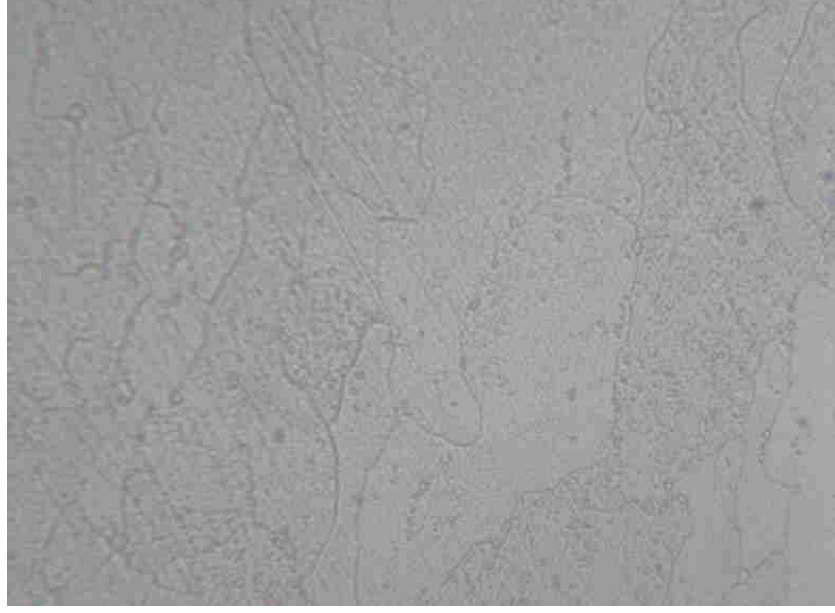
I. ve II. grup çift fazlı çeliklerin yorulma deney sonucu kırılan yüzeylerinin incelenmesi taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yorulma deney sonucu kırılan örneklerden alınan 1 cm²'lik alana sahip kesitlerle gerçekleştirilen ölçümlerde, kırılma başlangıcı, ilerleyişi, kırılmanın hangi fazdan başladığı ve kırılma türü gözlenmeye çalışılmıştır. Isıl işlem uygulanmamış, normalizasyon tavlaması uygulanmış, I. ve II. grup çift fazlı çeliklerden alınan toplam sekiz örnek üzerinde inceleme gerçekleştirilmiştir. SEM ölçümleri JSM – 5910LV Joel marka cihazda 10 kV' lük gerilim altında gerçekleştirilmiştir.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI ve TARTIŞMA

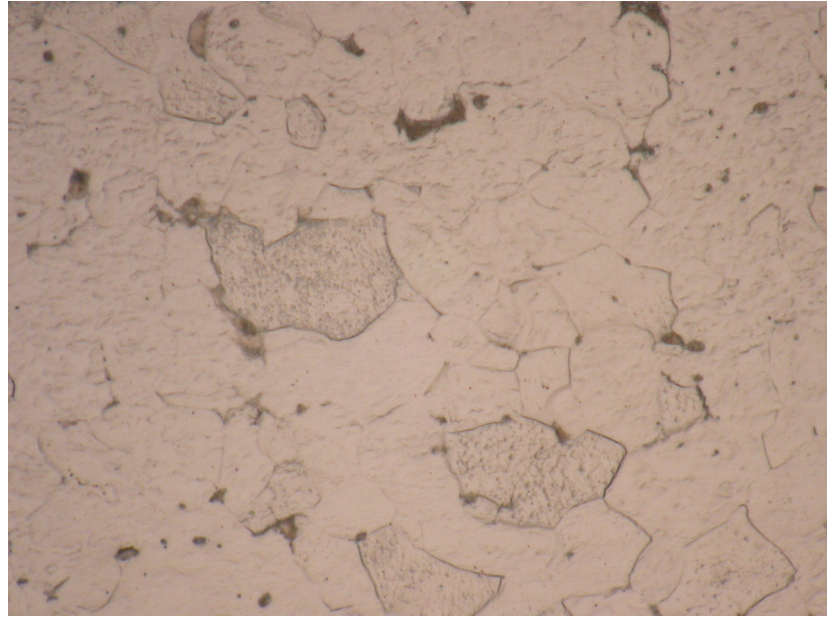
4.1. MİKRO YAPI SONUÇLARININ YORUMLANMASI

($\alpha + \gamma$) bölgesindeki farklı tavlama sıcaklıklarında 45 ve 60 dakika tavlama, suda soğutulmuş olarak üretilen çift fazlı çeliklerin optik mikroskop görüntüleri bu bölümde ele alınmıştır. Isıl işlem uygulanmamış örneğin optik mikroskop görüntüsü Şekil 4.1.'de görülmektedir. 910°C'de 45 dakika tavlama havada soğutulan başlangıç örneğimizin optik mikroskop görüntüsü Şekil 4.2.'de verilmektedir. 940°C'de 45 dakika tavlama suda soğutulduktan sonra, ($\alpha + \gamma$) bölgesinde 780°C, 825°C ve 870°C de 60 dakika tavlama suda soğutulmak suretiyle üretilen çift fazlı çeliklerin optik mikroskop görüntüleri Şekil 4.3.(a, b, c) de verilmektedir. Ayrıca, 940°C'de 45 dakika tavlama, suda soğutulduktan sonra, ($\alpha + \gamma$) bölgesinde 780°C, 825°C ve 870°C de 60 dakika tavlama suda soğutulmak suretiyle üretilen çift fazlı çeliklerin 400°C sıcaklıkta 2 saat ısı verilerek elde edilen iç yapı görüntüleri Şekil 4.4.(a, b, c) de görülmektedir.

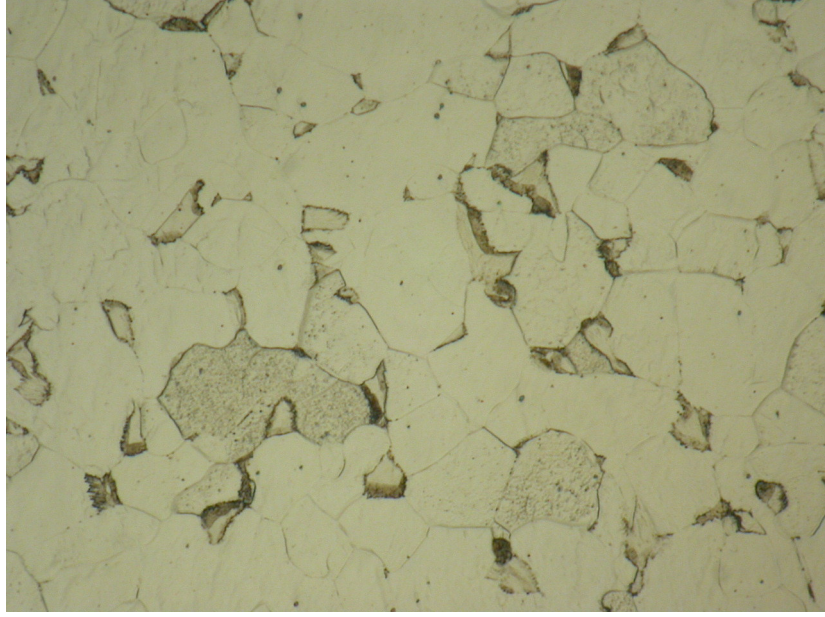
Mikro yapı fotoğraflarında koyu renk alanlar martenzit, açık renkli alanlar ise ferrit fazını göstermektedir. Mikro yapı fotoğrafları incelendiğinde ferrit tanelerinin martenzit fazı tarafından çevrelendiği görülmektedir.



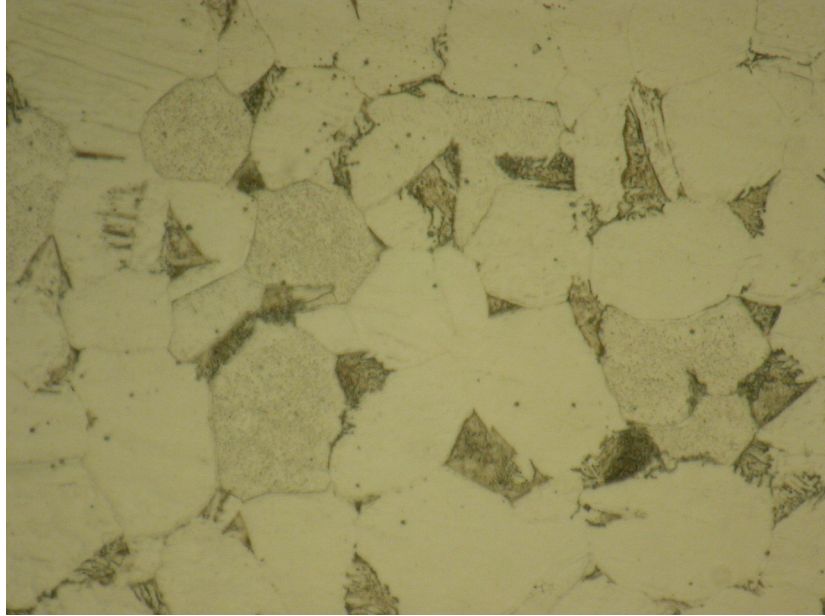
Şekil 4.1. Isıl işlem uygulanmamış örneğin optik mikroskop görüntüsü(100x).



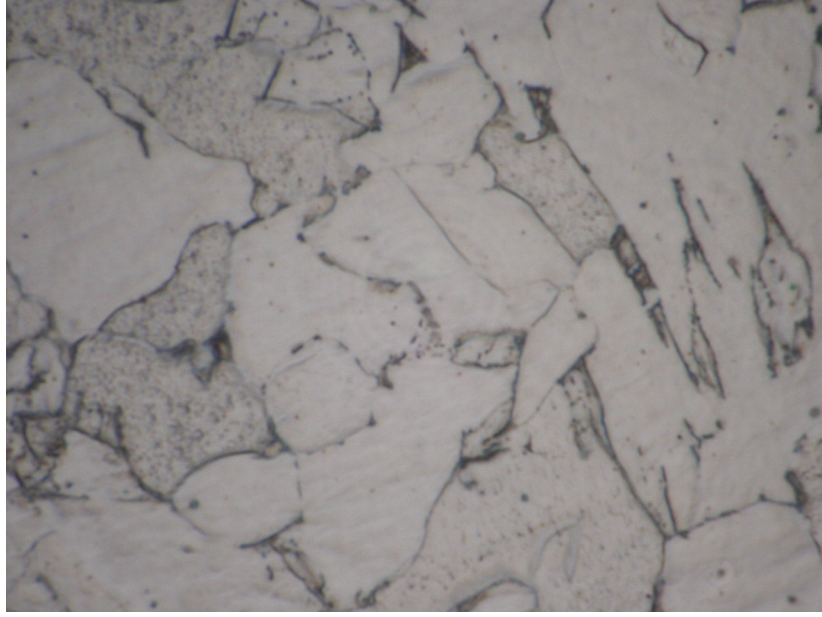
Şekil 4.2. 910°C' de 45 dakika tavlanylıp havada soğutulan başlangıç örneğimizin optik mikroskop görüntüsü (100x).



Şekil 4.3.(a)



Şekil 4.3.(b)

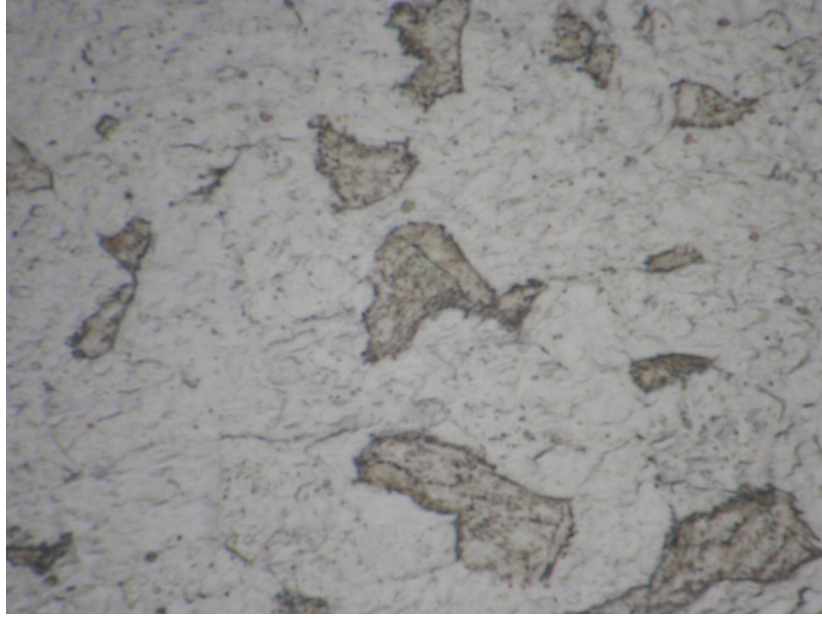


Şekil 4.3.(c)

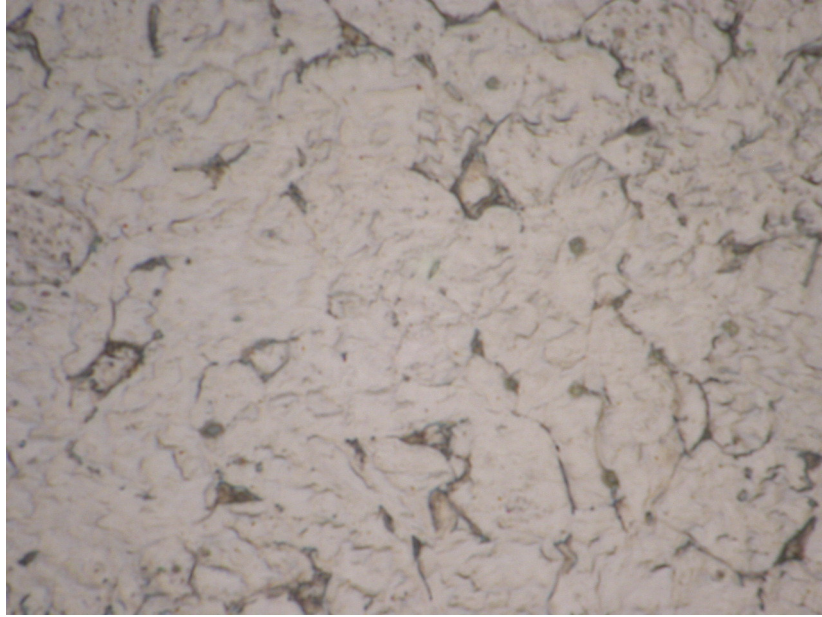
Şekil 4.3. I. Grup ısıtma işlemle üretilen çift fazlı çeliklerin mikro yapıları.(a),(b)ve (c) sırasıyla 780, 825, 870°C sıcaklıklarda 60 dakika tavlama ve suda soğutulma suretiyle üretilen çift fazlı çeliklerin optik mikroskop görüntüleri(200x).



Şekil 4.4.(a)



Şekil 4.4.(b)



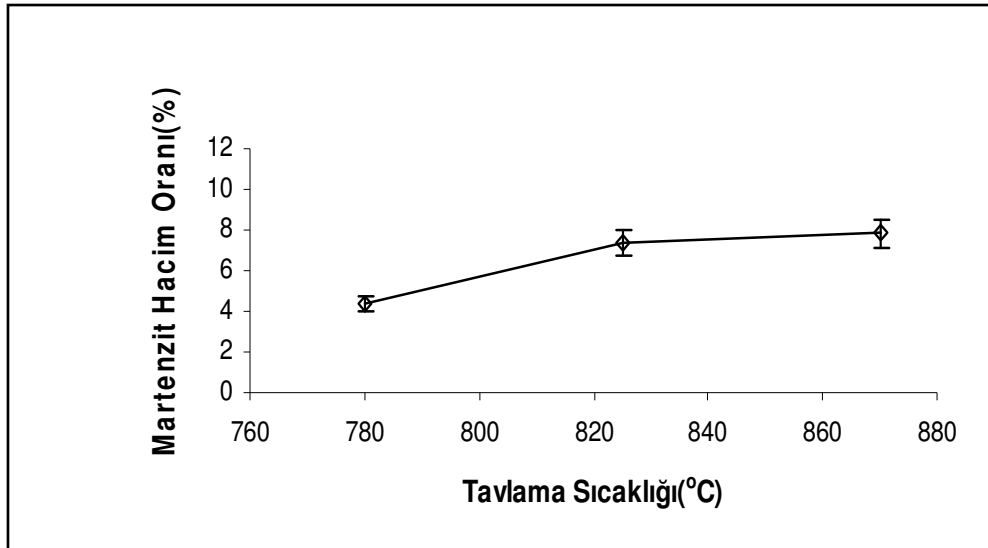
Şekil 4.4.(c)

Şekil 4.4. II. grup ısıtma işlemi ile üretilen çift fazlı çeliklerin mikro yapıları. (a),(b),(c) 940°C' de 45 dakika tavlama ve su verildikten sonra, ($\alpha + \gamma$) bölgesinde sırasıyla 780, 825, 870°C tavlama sıcaklıklarında 60 dakika tavlama ve su verilerek üretilen ve 400°C sıcaklıkta 2 saat ısı verme işlemi ile üretilen çift fazlı çeliklerin optik mikroskop görüntüleri(200x).

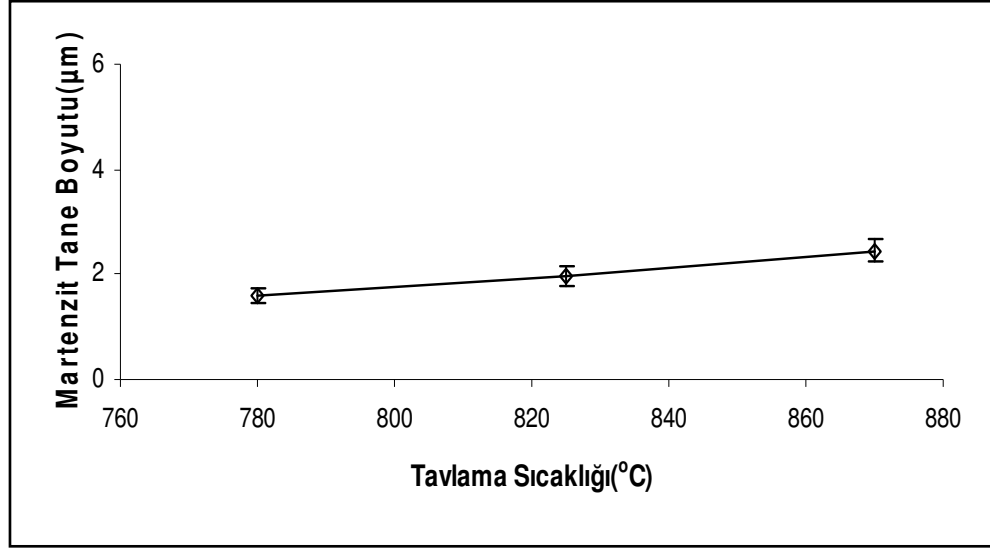
Mikro yapı fotoğrafları incelendiğinde, I. grup çift fazlı çeliklerde tavlama sıcaklığı ve süresi arttıkça martenzit hacim miktarının ve martenzit tane boyutunun arttığı görülmektedir (Şekil 4.3.). Çizelge 4.1.'den de görüldüğü gibi, çeliğin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde martenzit hacim oranındaki artıştan daha ziyade tane boyutunda meydana gelen artışların belirleyici olduğunu söyleyebiliriz. Elde edilen bu sonuçlar Yazıcı (2003)' nin sonuçlarıyla benzerlik göstermektedir.

Çizelge 4.1. I. grup çift fazlı çeliklerde, çift faz mikro yapılarına ait martenzit yüzde hacim oranı ve tane boyutu değerleri.

Uygulanan Isıl İşlem		Martenzit Hacim Oranı[%V _m]	Martenzit Tane Boyutu (d) [µm]
I. Grup Isıl İşlem	780°C / 60 dakika	4.41 ± 0.04	1.6 ± 0.02
	825°C / 60 dakika	7.35 ± 0.11	1.96 ± 0.03
	870°C / 60 dakika	7.85 ± 0.16	2.45 ± 0.05



Şekil 4.5. I. grup çift fazlı çeliklerde tavlama sıcaklığına bağlı olarak martenzit yüzde hacim oran değişimi.



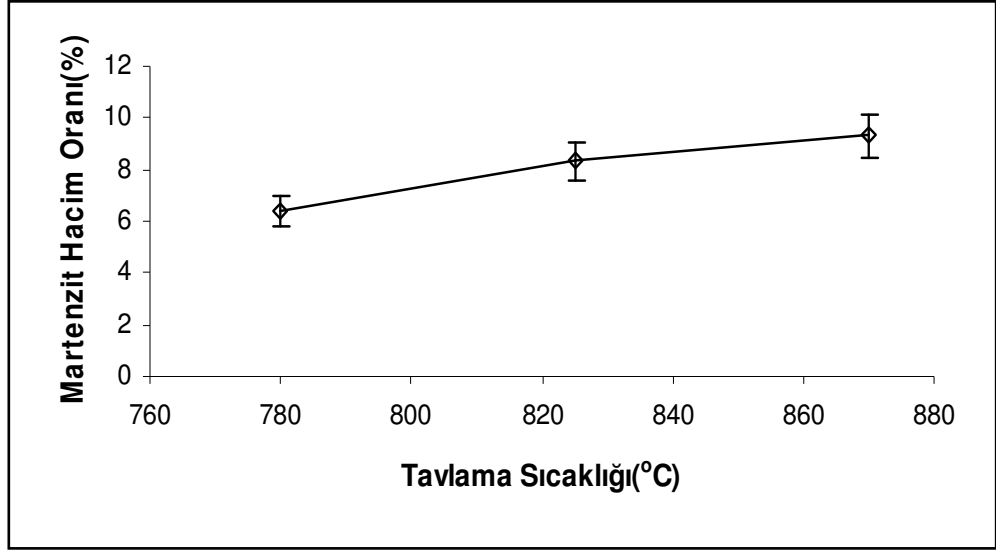
Şekil 4.6. I. grup çift fazlı çeliklerde tavlama sıcaklığına bağlı olarak martenzit taneboyutu değişimi.

I. grup çift fazlı çeliklerin martenzit yüzde hacim oranı ve martenzit tane boyutunun tavlama sıcaklığına bağlı değişimlerinin belirlenmesinde hata oranımız $\% \pm 1-2$ olarak hesaplanmıştır.

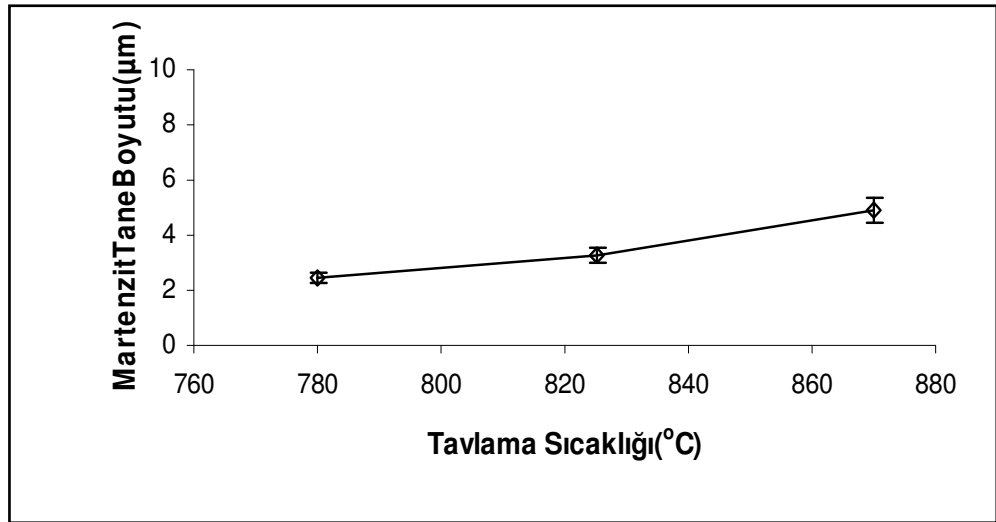
II. grup çift fazlı çeliklerde tavlama sıcaklığına göre martenzit yüzde hacim oran ve martenzit tane boyutu değişimleri ise Çizelge 4.2.ve Şekil 4.7.ve Şekil 4.8.'de görülmektedir.

Çizelge 4.2. II. grup çift fazlı çeliklerde, çift faz mikro yapılarına ait martenzit yüzde hacim oranı ve tane boyutu değerleri.

Uygulanan Isıl İşlem		Martenzit Hacim Oranı[%V _m]	Martenzit Tane Boyutu (d) [μm]
II. Grup Isıl İşlem	780°C / 180 dakika	6.37 ± 0.06	2.45 ± 0.02
	825°C / 180 dakika	8.33 ± 0.01	3.26 ± 0.04
	870°C / 180 dakika	9.31 ± 0.14	4.9 ± 0.08



Şekil 4.7. II. grup çift fazlı çeliklerde tavlama sıcaklığına bağlı olarak martenzit yüzde hacim oran değişimi.



Şekil 4.8. II. grup çift fazlı çeliklerde tavlama sıcaklığına bağlı olarak martenzit tane boyutu değişimi.

II. grup çift fazlı çeliklerde martenzit yüzde hacim oranı ve martenzit tane boyutunun tavlama sıcaklığına bağlı değişimlerinde hata oranımız $\% \pm 1-1,5$ olarak hesaplanmıştır.

4.2. MEKANİK DENEYLERİN YORUMLANMASI

4.2.1. Çekme ve Sertlik Deney Sonuçları

I ve II. grup ısıtma işlemleriyle üretilen çift fazlı çeliklere ait çekme testleri sonucu elde edilen mekanik özellikler Çizelge 4.3.'de verilmektedir.

Çizelge 4.3. I. ve II. grup çift fazlı çeliklere ait akma, çekme mukavemet ve sertlik değerleri

Isıl İşlemler	$\sigma_{A 0.2}$ [MPa]	σ_{ζ} [MPa]	Sertlik [HV]
780°C	366	478	214 ± 2.57
825°C	348	459	217 ± 2.6
870°C	320	399	223 ± 2.67
Havada Soğuma	274	343	119 ± 3.57
780°C T.	264	325	129 ± 4.26
825°C T.	266	321	131 ± 4.32
870°C T.	262	318	135 ± 4.45
Isıl İşlemsiz	210-250	270-350	110 ± 5.5

I. grup ısıtma işlemiyle üretilen çift fazlı çeliklerin akma, çekme ve sertlik değerleri, II. grup ısıtma işlemiyle üretilen çift fazlı çeliklerle karşılaştırıldığında, hem akma, çekme mukavemeti hem de sertlik değerlerinin arttığı görülmektedir. Elde edilen bu değerler ısıtma işlemi uygulanmamış çeliklerle karşılaştırıldığında ise, I. grup ısıtma işlemiyle üretilen çift fazlı çeliklerin mekanik özelliklerinin arttığı, fakat II. grup ısıtma işlemiyle üretilen çift fazlı çeliklerin mekanik özelliklerinin ise beklenen değerler arasında gerçekleştiği görülmektedir. I. grup ısıtma işlemiyle üretilen çift fazlı çeliklerin mekanik özelliklerindeki artışın çeliğin mikro yapısında bulunan martenzit fazından ileri geldiğini söyleyebiliriz.

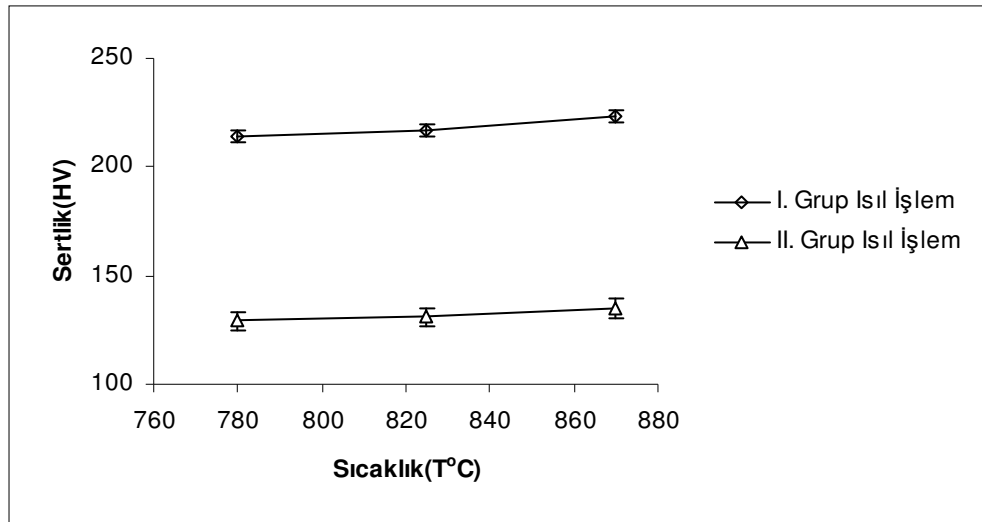
Normalize edilmiş çift fazlı çelik örnekleri, I. grup ısıtma işlemiyle üretilmiş çift fazlı çelikler ve II. grup çift fazlı çeliklere ait mühendislik çekme diyagramları incelendiğinde; başlangıç malzemesi ve II. grup ısıtma işlemi uygulanmış çift fazlı çeliklerde akma noktası civarında bir süreksizlik olduğu görülmüştür. I. grup çift fazlı çeliklerde ise, sürekli akma meydana gelmiştir. Ostenitin martenzite dönüşümü

sırasında ve martenzitin çevrelediği ferrit artık gerilmelerin sürekli akma mukavemetine yol açtığı bilinmektedir (Durmuş 2000).

I. grup ısıtıl işlem ile üretilen çift fazlı çeliklere ait mikro yapı fotoğrafları incelendiğinde tavlama sıcaklığı ve süresinin artması ile martenzit tanelerinin irileştiği görülmektedir. Tane boyutu artışı ile malzemenin mukavemetinde düşüş olacağı bilinmektedir (Durmuş 2000).

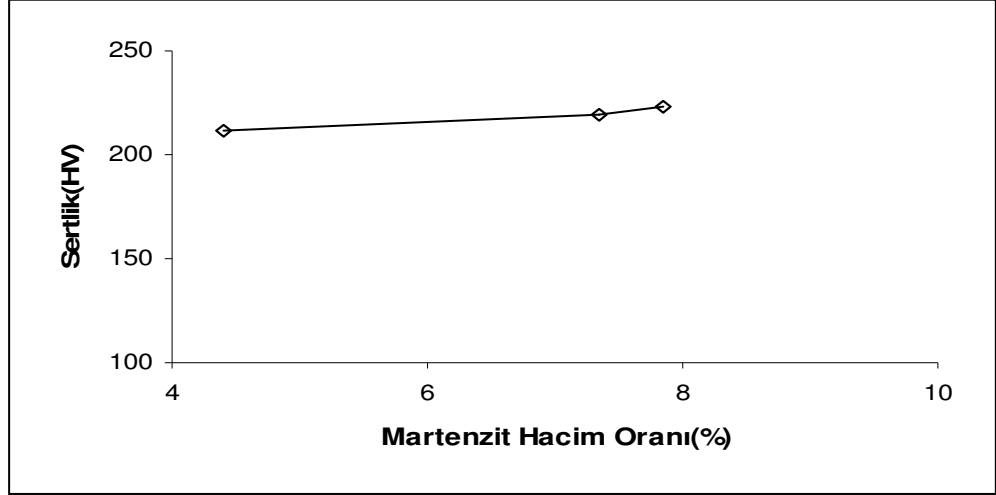
I. ve II. grup çift fazlı çeliklerin sertlik değerlerinin değişimi Çizelge 4.3.'de görülmektedir. Tavlama sıcaklığı ve süresinin artmasına bağlı olarak sertlik değerlerinde meydana gelen artmanın, martenzit tanelerindeki küçülmeden ileri geldiği açıktır. Ayrıca I. ve II. grup çift fazlı çeliklerin sertlik değerleri karşılaştırıldığında, II. grup çift fazlı çeliklerin, I. grup çift fazlı çeliklerin sertlik değerlerine göre %61 oranında bir azalmanın meydana geldiği görülmüştür.

I. ve II. grup çift fazlı çeliklerin sertlik değerlerinin tavlama sıcaklığına bağlı değişimleri Şekil 4.9.'da verilmektedir. I. grup çift fazlı çeliklerin sertlik değerlerinin belirlenmesinde hatamız $\% \pm 1.2$, II. grup çift fazlı çeliklerde ise $\% \pm 3$ oranında gerçekleşmiştir.

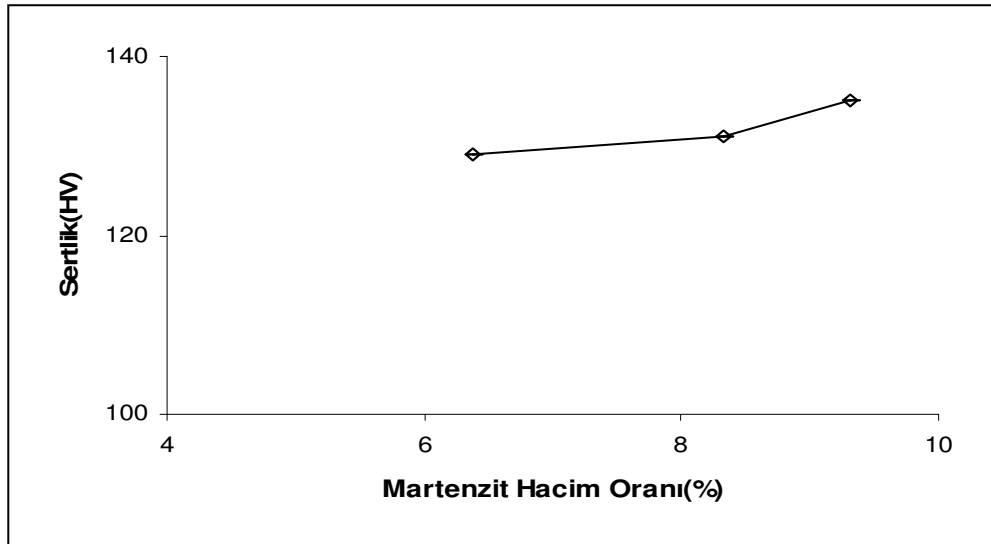


Şekil 4.9. I.ve II. grup çift fazlı çeliklerin sertlik değerlerinin tavlama sıcaklığına bağlı değişimi.

Ayrıca I. ve II. grup çift fazlı çeliklerin sertlik değerlerinin martenzit yüzde hacim oranlarına bağlı değişimleri incelendiğinde, martenzit yüzde hacim oranları ile sertlik değerlerinin arttığı gözlenmiştir (Şekil 4.10.ve Şekil 4.11.).



Şekil 4.10. I. grup çift fazlı çeliklerin sertlik değerlerinin martenzit yüzde hacim oranlarına bağlı değişimi.



Şekil 4.11. II. grup çift fazlı çeliklerin sertlik değerlerinin martenzit yüzde hacim oranlarına bağlı değişimi.

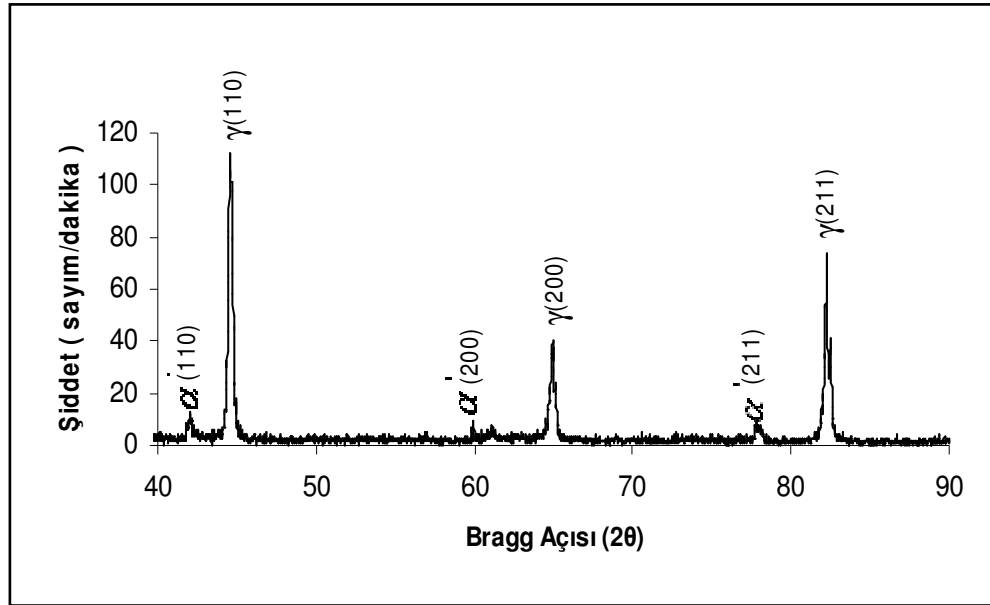
4.3. FİZİKSEL DENEYLERİN YORUMLANMASI

4.3.1. X Işını Deney Sonuçları

Çift fazlı çelik mikro yapısının incelenmesinde başvurulan metalografik inceleme mikro yapıda oluşan martenzit ve ferrit fazının gözlenmesinde, x ışınları analizi de ferrit ve martenzitin kristal yapısının incelenmesinde kullanılmıştır. I. grup çift fazlı çeliklerin x ışınları analiz sonuçları Çizelge 4.4. 4.5. 4.6. ve Şekil 4.12. 4.13. ve 4.14.'de verilmektedir.

Çizelge 4.4. 780°C' de 60 dakika tavlaniıp suda soğutulularak elde edilen çift fazlı çelik örneğın x-ışını kırınımı deney sonuçları.

Çizgi	2θ	θ	Sinθ	Sin ² θ	h ² +k ² +l ²	a(A°)	c(A°)	hkl
1	42.04	21.02	0.359	0.129	2	2.86	2.87	110
2	44.6	22.3	0.379	0.144	2	3.57	--	110
3	59.98	29.99	0.499	0.250	4	2.86	2.87	200
4	64.94	32.47	0.537	0.288	4	3.57	--	200
5	78.06	39.03	0.630	0.396	6	2.86	2.87	211
6	82.26	41.13	0.658	0.433	6	3.57	--	211

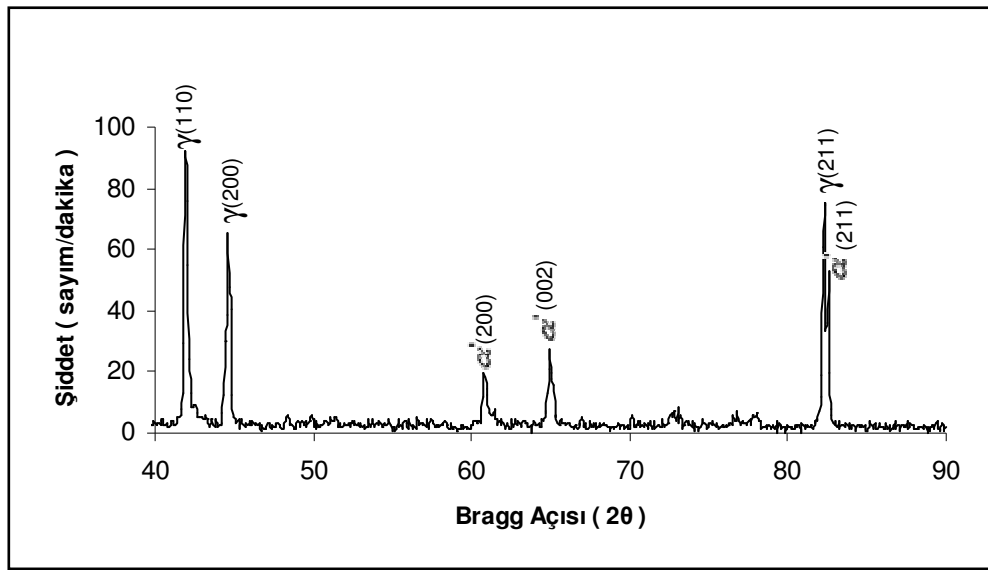


Şekil 4.12. 780°C' de 60 dakika tavlaniıp suda soğutulularak üretilen çift fazlı çelik örneğın x-ışını kırınımı deney sonuçlarına göre martenzit ve ferrit kristal yapılarının incelenmesi, α' : Martenzit, γ: Kalan ostenit.

Şekil 4.12.'de oda sıcaklığında CuK α radyasyonu kullanılarak elde edilmiş kırınım deseni görülmektedir. Kırınım çizgileri incelendiğinde ymk ostenit (yüzey merkezli kübik, fcc) ve hmt martenzit (hacim merkezli tetragonal, bct) yapılar açıkça görülmekte ve yansımaların meydana geldiği kristal düzlemleri de miller indisleriyle etiketlenmiştir. $\alpha'(110)$, $\alpha'(200)$ ve $\alpha'(211)$ düzlemleri ısıtma işlem sonrası mikro yapıda meydana gelen yapı değişiminin yani ostenitin martenzite dönüşümünün göstergesidir. Amar ve ark. (2004), x ışınları analizi yardımıyla inceledikleri ısıtma işlem uygulanmış paslanmaz çelikte aynı yansıma düzlemlerinin hacim merkezli martenzite ait olduğunu belirtmiştir. Ayrıca kırınım deseninde belirtilen $\gamma(110)$, $\gamma(200)$ ve $\gamma(211)$ yansıma düzlemleri martenzite dönüşmeden kalan ostenit parçacıklarından oluşan yansımaları göstermektedir. Yansıma düzlemlerinin şiddet değerlerinin yüksek olması, ostenitin çok az bir miktarının martenzite dönüştüğünün göstergesidir. Martenzit miktarının az olması spektral analiz sonuçlarından da görülebileceği gibi malzemenin ihtiva ettiği karbon miktarının az olmasından kaynaklanmaktadır.

Çizelge 4.5. 825°C' de 60 dakika tavlaniıp suda soğutularak elde edilen çift fazlı çelik örneğin x-ışını kırınımı deney sonuçları.

Çizgi	2θ	θ	Sinθ	Sin ² θ	h ² +k ² +l ²	a(A°)	c(A°)	hkl
1	41.92	20.96	0.358	0.128	2	3.57	--	110
2	44.64	22.32	0.380	0.144	4	3.57	--	200
3	60.88	30.44	0.507	0.257	4	2.86	2.87	200
4	64.96	32.48	0.537	0.288	4	2.86	2.87	002
5	82.32	41.16	0.658	0.433	6	3.57	--	211
6	82.56	41.28	0.660	0.435	6	2.86	2.87	211

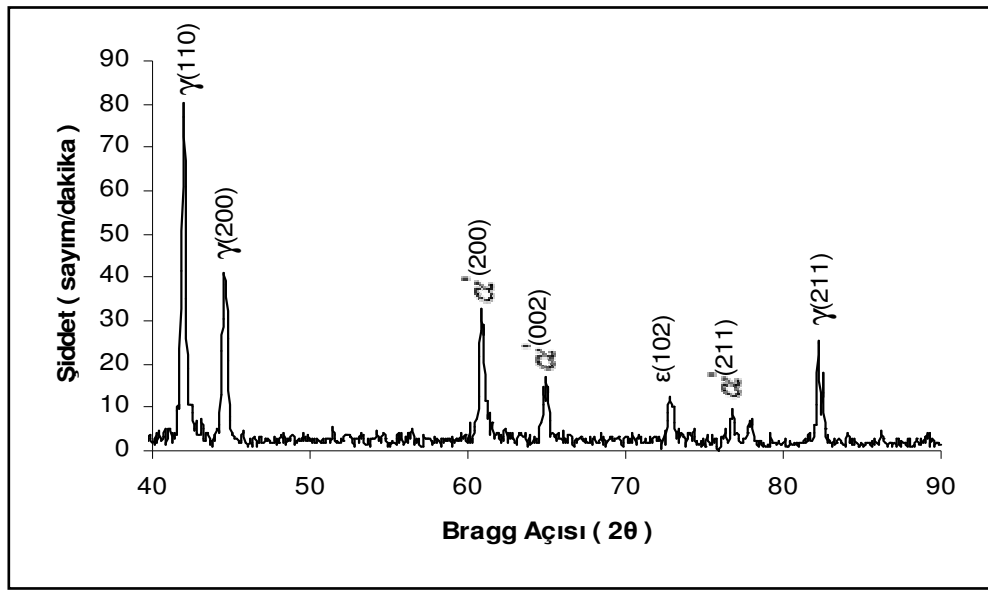


Şekil 4.13. 825°C' de 60 dakika tavlaniıp suda soğutularak üretilen çift fazlı çelik örneğin x-ışını kırınımı deney sonuçlarına göre martenzit ve ferrit kristal yapılarının incelenmesi.

Şekil 4.13.ve Çizelge 4.5. incelendiğinde, bir önceki x ışını kırınım sonuçlarıyla benzer noktalara sahip oldukları görülmektedir. Ancak kırınım düzlemlerinden meydana gelen yansımaların şiddetleri incelendiğinde, hmt martenzit yapıdan gelen yansımanın \approx %20 oranında artışına karşılık ymk ostenit yapının \approx %18 oranında azaldığı görülmektedir. Bu değişimler Amar ve ark. (2004) belirttiği gibi, kristal yapıların dönüşümü sırasında malzemede oluşan iç gerilme ve martenzit yüzde hacim oranının değişiminden ileri gelmektedir.

Çizelge 4.6. 870°C ' de 60 dakika tavlaniıp suda soğutularak elde edilen çift fazlı çelik örneğin x-ışını kırınımı deney sonuçları.

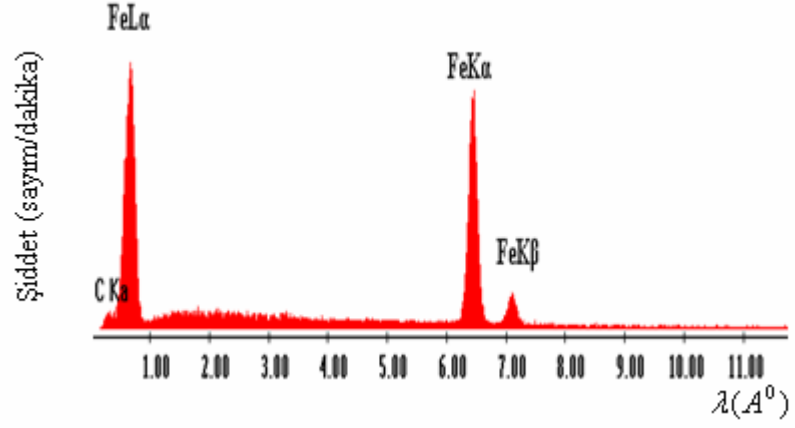
Çizgi	2θ	θ	$\text{Sin}\theta$	$\text{Sin}^2\theta$	$h^2+k^2+l^2$	$a(\text{Å})$	$c(\text{Å})$	hkl
1	42.80	21.40	0.365	0.133	2	3.57	--	110
2	44.64	22.32	0.380	0.144	4	3.57	--	200
3	60.88	30.44	0.507	0.257	4	2.86	2.87	200
4	65.12	32.56	0.538	0.290	4	2.86	2.87	002
5	72.88	36.44	0.594	0.353	5	--	--	102
6	76.88	38.44	0.622	0.386	6	2.86	2.87	211
7	82.32	41.16	0.658	0.433	6	3.57	--	211



Şekil 4.14. 870°C ' de 60 dakika tavlaniıp suda soğutularak üretilen çift fazlı çelik örneğin x-ışını kırınımı deney sonuçlarına göre martenzit ve ferrit kristal yapılarının incelenmesi.

Şekil 4.14.ve Çizelge 4.6. incelendiğinde, hem ymk ostenit hem de hmt martenzit yapıdaki değişimler görülmektedir. Martenzit yüzde hacim oranındaki artış bu iki yapıdan oluşan kırınım düzlemlerini etkilediği sonucuna varılmaktadır. Ele alınan I. grup çift fazlı çeliklerin, x ışını analizleri sonucunda kristal yapı ve yansımaların meydana geldiği düzlemlerin indislerinin belirlenmesi işlemi Smith ve Synder (1979) geliştirdikleri yöntem eşliğinde Gebze Yüksek Teknoloji enstitüsünden temin edilen paket program yardımıyla da test edilmiştir.

Farklı sıcaklıklarda üretilen çift fazlı çeliklerin ayrıca elektron yayılım x ışınları spektroskopisi incelenmiş ve yapıda bulunan Fe ve C elementlerine ait karakteristik spektrumlar gözlenmiştir (Şekil 4.15.).



Şekil 4.15. 30 kV' da Fe ve C' a ait karakteristik spektrumlar.

Spektral analiz sonuçlarının doğrulanması açısından önemli olan bu ölçümler çeliğin içerdiği Fe ve C hakkında bilgi sahibi olmamıza yardımcı olmuştur.

4.3.2. Elektrik Özdirenç Ölçümleri

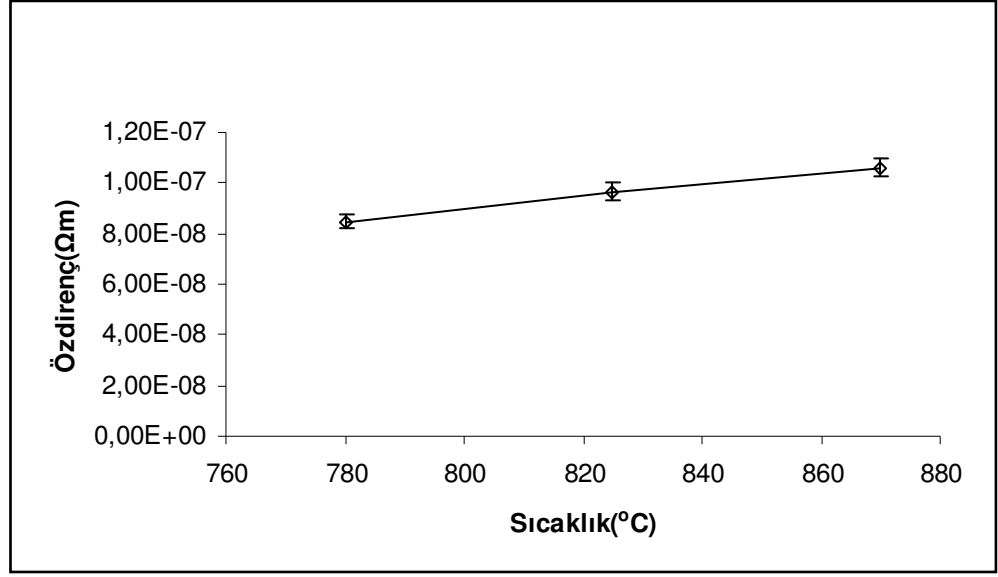
I. ve II. grup çift fazlı çeliklerin oluşumu sırasında meydana gelen fiziksel süreçlerden birisi de, elektrik özdirenç değişimleridir. Isıl işlem uygulanmış ve uygulanmamış örneklerin elektrik özdirenç ölçümleri Çizelge 4.7.'de verilmektedir.

Çizelge 4.7. I. ve II. grup çift fazlı çeliklerin dört nokta elektrot yöntemi ile ölçülen özdirenç değerleri.

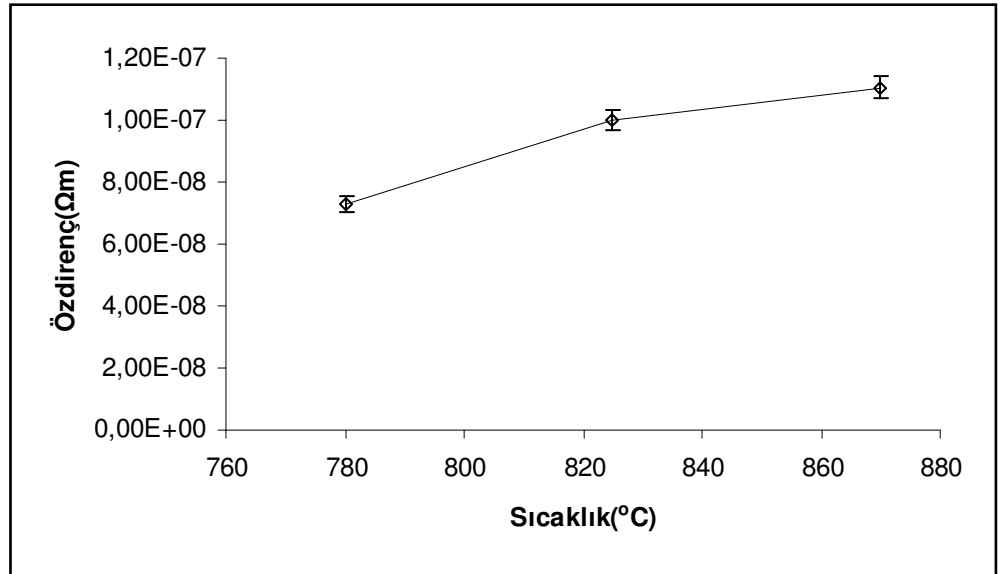
	Uygulanan Isıl İşlem	Akım (I) [mA]	Gerilme (V) [mV]	Özdirenç (ρ) [Ω m]
I. Grup Isıl İşlem	780°C Suda Soğutma	100	0.00169	$8.48 \cdot 10^{-8}$
	825°C Suda Soğutma	100	0.00154	$9.67 \cdot 10^{-8}$
	870°C Suda Soğutma	100	0.00135	$1.06 \cdot 10^{-7}$
II. Grup Isıl İşlem	780°C Havada Soğutma	100	0.00116	$7.28 \cdot 10^{-8}$
	825°C Havada Soğutma	100	0.00159	$9.98 \cdot 10^{-8}$
	870°C Havada Soğutma	100	0.00177	$1.11 \cdot 10^{-7}$
	Isıl İşlem Uygulanmamış	100	0.00156	$9.8 \cdot 10^{-8}$

Çizelge 4.7. incelendiğinde, I. ve II. grup çift fazlı çeliklerin elektrik özdirenç değerlerinin ısı işlem uygulanmamış örneğe göre değişimleri görülmektedir. Uygulanan ısı işlem ve özellikle tavlama sıcaklığının artması ile hem I. grup çift fazlı çeliklerin hem de II. grup çift fazlı çeliklerin elektrik özdirenç değerlerinin artmasına neden olmuştur. Isıl işlem uygulanmamış örneklerle karşılaştırıldığında, düşük tavlama sıcaklıklarında ($\approx 780^\circ\text{C}$) üretilen çift fazlı çeliklerin elektrik özdirenç değerleri, I. grup çift fazlı çeliklerde %14 oranında azalırken, II. grup çift fazlı çeliklerde %26 azalmıştır. Yüksek sıcaklıklarda ($\approx 870^\circ\text{C}$) ise, I. grup çift fazlı çeliklerde, elektrik özdirenç değerleri %8.2 oranında artarken, II. grup çift fazlı çeliklerde bu artışın %13.2 oranında meydana geldiği gözlenmiştir.

I. ve II. grup çift fazlı çeliklerde, elektrik özdirenç ölçümlerinin tavlama sıcaklığına bağlı değişimleri Şekil 4.16. ve 4.17.'de verilmektedir. I. grup çift fazlı çeliklerin elektrik özdirenç değerlerinin hesaplanmasında hata oranımız $\% \pm 3.5$, II. grup çift fazlı çeliklerde ise $\% \pm 3.3$ oranında gerçekleşmiştir.



Şekil 4.16. I. grup çift fazlı çeliklerde, tavlama sıcaklığının elektrik özdirenç değerlerine bağlı değişimi.



Şekil 4.17. II. grup çift fazlı çeliklerde, tavlama sıcaklığının elektrik özdirenç değerlerine bağlı değişimi.

Metal ve alaşımlarının yüksek elektrik özdirenç nedenlerinin başında kristal yapılarının bozulması gelmektedir. Kristal yapılarının bozulmasına neden olan etkenler; faz sertleşmesiyle oluşan gerilme sertleşmesi ve çatlak oluşumudur. Aynı zamanda elektrik özdirenç, farklı fazların boyutu, yoğunluğu ve katı çözeltili bileşenleri arasındaki kimyasal etkileşmelerce de etkilenmektedir (Bida ve ark. 2000). Katı çözeltili olduğu zaman özdirenç artar. Örgü içerisine çözülmüş maddenin atomlarının yerleşmesi bozunmalara neden olur. Aynı zamanda, yoğun elektron saçılmaları nedeniyle elektrik alanında düzensizlikler meydana gelmektedir. Atomlar arası bağ karakterini değiştiren kesme gerilmesi nedeniyle kristal örgüsü bozulur.

Bida ve ark. (2000) yüksek karbon değerine sahip çelik örneklerle yaptıkları deneylerde, ısı işlem uygulanmış örneklerde tavlama sıcaklığının artmasıyla elektrik özdirenç değerlerinin arttığını, ısı verme işlemi uygulanan örneklerde ise tavlama sıcaklığıyla elektrik özdirenç değerlerinin azaldığını bulmuşlardır. Isı verme işlemi uygulanmış çeliklerde elektrik özdirenç azalmasına yüksek değerlerde artan ostenit parçacıklarının neden olduğunu gözlemişlerdir. Isıl işlem sırasında tavlama sıcaklığının artmasıyla martenzit ve kalıntı ostenitin azaldığı sonucuna varmışlardır. Ayrıca iç gerilmelerin azalması ve şekil bozukluklarının da elektrik özdirenç azalmasına katkıda bulunduğunu belirtmişlerdir.

I. ve II. grup çift fazlı çelik üretiminde elektrik özdirenç değerleri Bida ve ark.(2000)' nın sonuçlarıyla benzerlik taşımaktadır. I. grup çift fazlı çelikler için gerçekleştirilen deneylerde elde edilen sonuçlar uyum gösterirken, II. grup çift fazlı çeliklerle yapılan deneylerde ise farklılık gözlenmiştir. Spektral analiz sonuçlarından da görülebileceği gibi, düşük oranda karbon bulunması ısı işlem sonrası ostenitin tamamen martenzite dönüşmemesine ve martenzitle birlikte fazla miktarda kalıntı ostenitin bulunmasına neden olmuştur. Özellikle I. grup çift fazlı çelikler ele alındığında, x ışınları sonucu elde edilen kırınım deseni incelendiğinde, yüksek şiddetli yansıma düzlemlerinin kalıntı ostenitten meydana geldiği de belirtilmişti.

4.3.3. B – H Eğrilerinin Değişimi

I. ve II. grup çift fazlı çeliklerin 50 Hz ve 100 Hz çalışma frekanslarında oda sıcaklığında yapılan deneyler sonucu elde edilen veriler Çizelge 4.8, 4.9, 4.10 ve 4.11’de, B – H grafikleri Şekil 4.18. 4.19. 4.20. ve 4.21.’de, μ_r - B_m değişimleri Şekil 4.22. 4.23. 4.24. ve 4.25. da verilmektedir.

Çizelge 4.8. I. grup çift fazlı çeliklerin 50 Hz de ölçülen B_m , H ve μ_r değerleri.

B_m [Tesla]	H_{780} [A/m]	μ_{780}	H_{825} [A/m]	μ_{825}	H_{870} [A/m]	μ_{870}
0	0	0	0	0	0	0
0.1	28.8	2765	28.1	2833	40.1	1986
0.2	44.6	3570	43.8	3636	58.8	2708
0.3	56.9	4198	57.1	4183	72.4	3299
0.4	68.5	4649	69	4616	84.4	3773
0.5	79.9	4982	79.9	4982	94.7	4204
0.6	89.6	5332	90.7	5269	106	4507
0.7	100	5573	101	5518	119	4683
0.8	111	5738	113	5637	129	4938
0.9	123	5826	124	5779	141	5082
1.0	134	5942	136	5854	155	5137
1.1	147	5958	149	5879	167	5244
1.2	159	6009	161	5934	181	5279
1.3	172	6018	175	5914	197	5254
1.4	186	5993	189	5898	216	5160
1.5	201	5942	204	5854	236	5060

Çizelge 4.9. I. grup çift fazlı çeliklerin 100 Hz de ölçülen B_m , H ve μ_r değerleri.

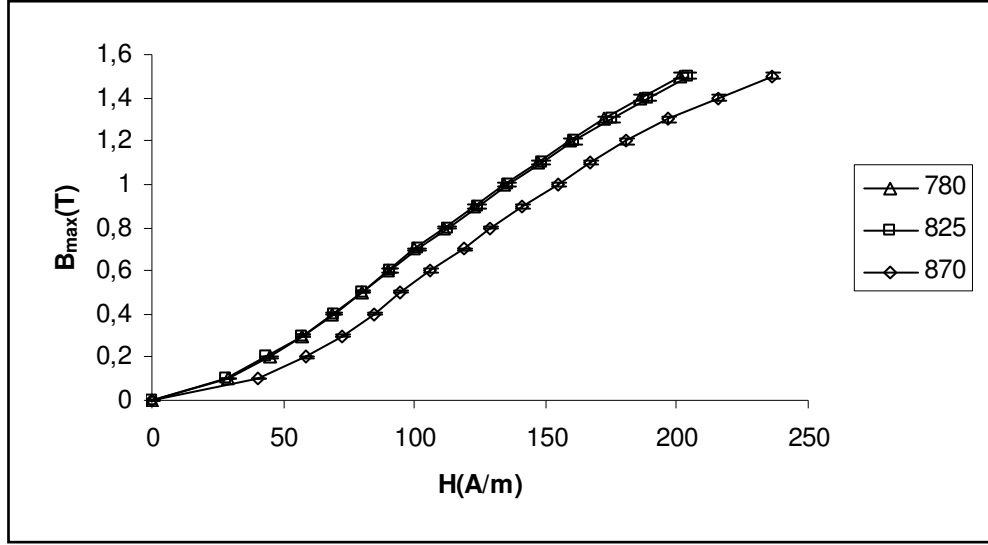
B_m [Tesla]	H_{780} [A/m]	μ_{780}	H_{825} [A/m]	μ_{825}	H_{870} [A/m]	μ_{870}
0	0	0	0	0	0	0
0.1	34.3	2321	30.5	2610	37.7	2112
0.2	51.7	3080	49.2	3237	59.9	2658
0.3	65.6	3641	64.5	3703	75.9	3150
0.4	79.3	4016	78.7	4047	90.7	3511
0.5	91.9	4332	93.1	4281	106	3756
0.6	105	4550	107	4465	120	3981
0.7	119	4683	121	4606	134	4159
0.8	132	4825	136	4683	150	4246
0.9	147	4875	152	4714	165	4343
1.0	162	4915	168	4739	184	4327
1.1	178	4920	186	4709	203	4314
1.2	195	4900	204	4683	221	4323
1.3	214	4837	224	4621	245	4225

Çizelge 4.10. II. grup çift fazlı çeliklerin 50 Hz de ölçülen B_m , H ve μ_r değerleri.

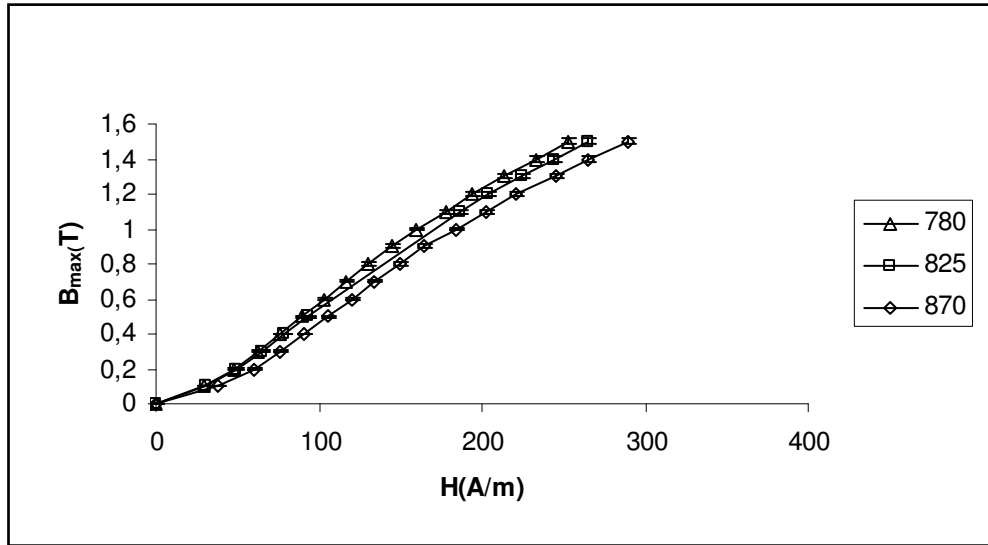
B_m [Tesla]	H_{780} [A/m]	μ_{780}	H_{825} [A/m]	μ_{825}	H_{870} [A/m]	μ_{870}
0	0	0	0	0	0	0
0.1	36.8	2164	34.8	2288	33.2	2398
0.2	54.5	2922	52.8	3016	50.1	3178
0.3	66.8	3576	65.6	3641	63.9	3738
0.4	79.9	3986	77.6	4104	76.4	4169
0.5	90.1	4418	88.4	4503	86.7	4592
0.6	102	4683	99.3	4811	95.8	4987
0.7	112	4976	110	5067	107	5209
0.8	123	5178	121	5264	118	5398
0.9	135	5308	131	5470	128	5598
1.0	148	5380	143	5568	140	5687
1.1	161	5440	158	5543	151	5800
1.2	176	5429	169	5653	163	5861
1.3	190	5448	184	5625	178	5815
1.4	206	5411	194	5746	198	5630
1.5	224	5332	214	5581	205	5826

Çizelge 4.11. II. grup çift fazlı çeliklerin 100 Hz de ölçülen B_m , H ve μ_r değerleri.

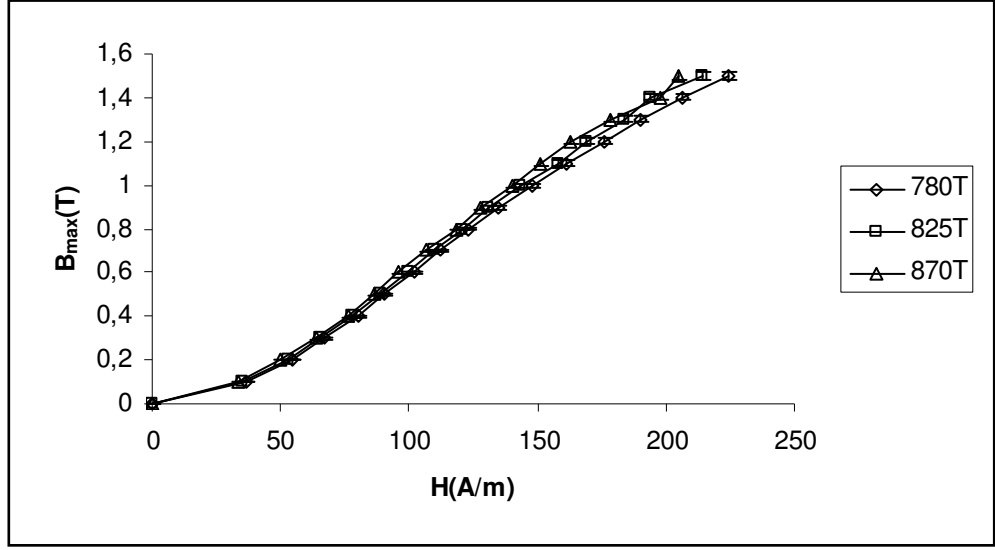
B_m [Tesla]	H_{780} [A/m]	μ_{780}	H_{825} [A/m]	μ_{825}	H_{870} [A/m]	μ_{870}
0	0	0	0	0	0	0
0.1	36.1	2212	34.3	2321	32.3	2465
0.2	55.7	2859	51.7	3080	50.7	3141
0.3	71.9	3341	65.6	3641	64.3	3717
0.4	86.2	3695	79.3	4016	76.6	4158
0.5	101	3942	91.9	4332	88.5	4498
0.6	115	4154	105	4550	101	4730
0.7	130	4287	119	4683	113	4932
0.8	146	4363	132	4825	126	5055
0.9	162	4423	147	4875	140	5118
1.0	180	4423	162	4915	154	5170
1.1	199	4401	178	4920	169	5182
1.2	219	4363	195	4899	189	5055
1.3	242	4277	214	4837	204	5074
1.4	285	3911	251	4441	238	4683



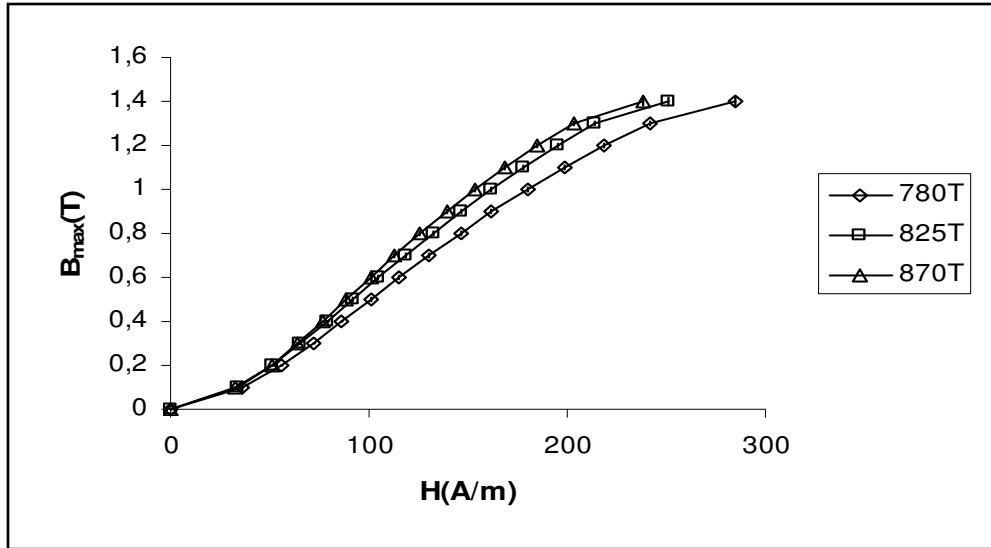
Şekil 4.18. I. grup çift fazlı çeliklerin 50 Hz de elde edilen $B - H$ eğrileri.



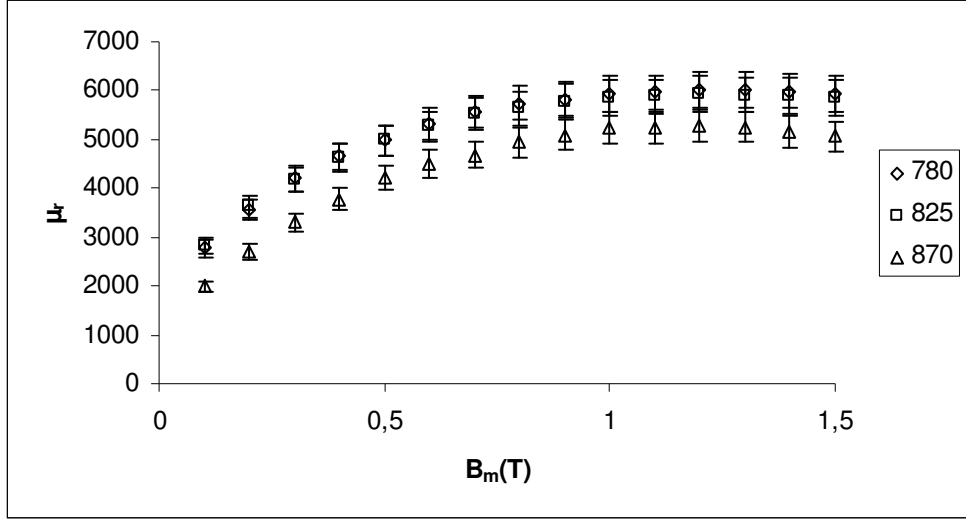
Şekil 4.19. I. grup çift fazlı çeliklerin 100 Hz de elde edilen $B - H$ eğrileri.



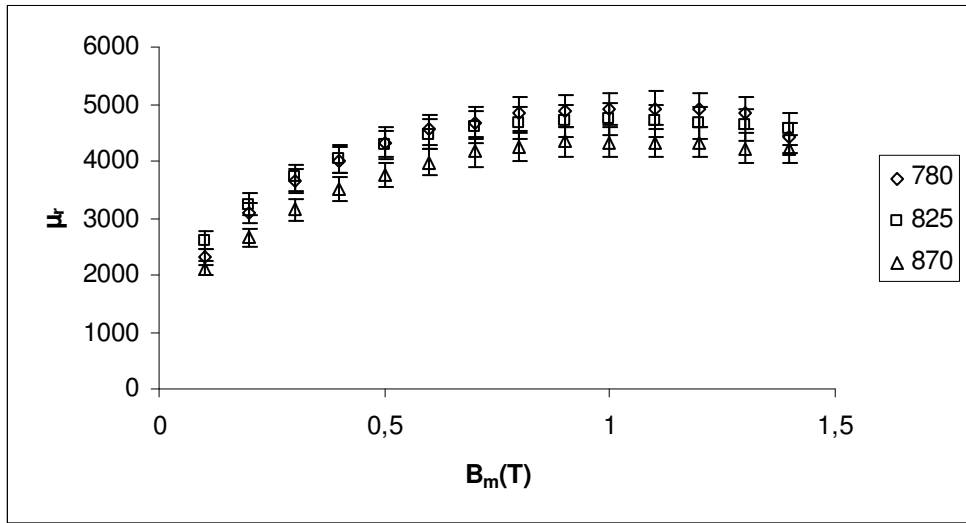
Şekil 4.20. II. grup çift fazlı çeliklerin 50 Hz de elde edilen B – H eğrileri.



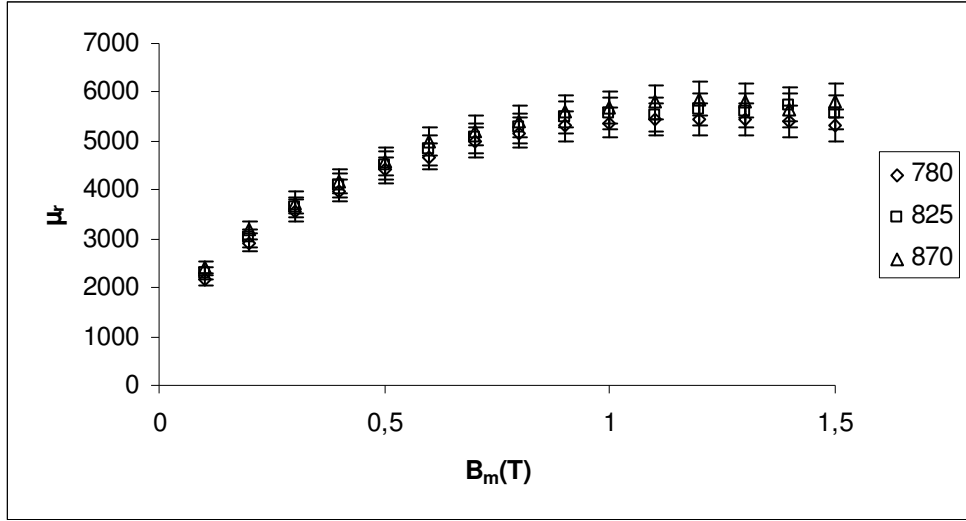
Şekil 4.21. II. grup çift fazlı çeliklerin 100 Hz de elde edilen B – H eğrileri.



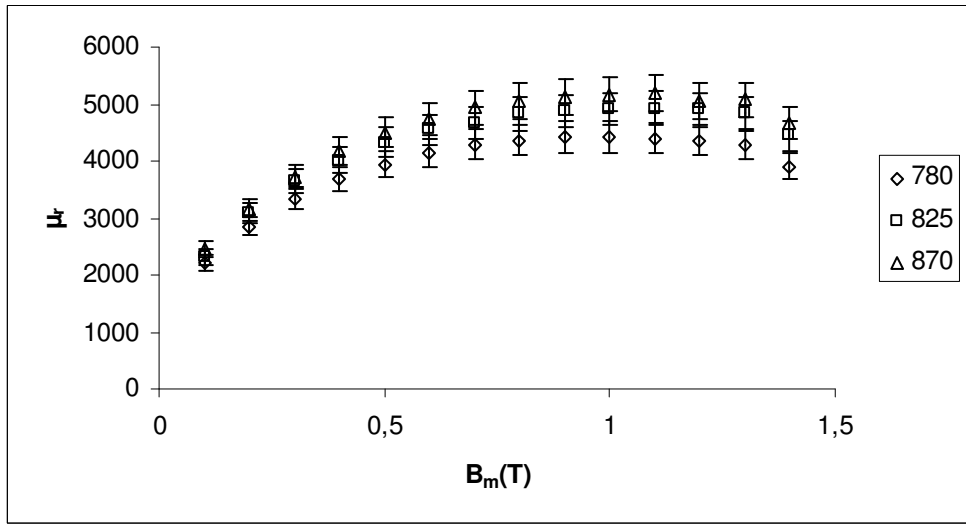
Şekil 4.22. I. grup çift fazlı çeliklerin 50 Hz de elde edilen $\mu_r - B_m$ değişimleri.



Şekil 4.23. I. grup çift fazlı çeliklerin 100 Hz de elde edilen $\mu_r - B_m$ değişimleri.



Şekil 4.24. II. grup çift fazlı çeliklerin 50 Hz de elde edilen $\mu_r - B_m$ değişimleri.



Şekil 4.25. II. grup çift fazlı çeliklerin 100 Hz de elde edilen $\mu_r - B_m$ değişimleri.

Jiles (1988), Curie noktası ($\approx 770^\circ\text{C}$) altındaki sıcaklıklarda tavlamanın yapıya bağlı manyetik özelliklerin değişmesinde etkili olmadığını yaptığı deneylerle göstermiştir. Curie noktası üzerindeki sıcaklıklarda ise, tavlama ile malzemenin sınırlayıcı alan ve geçirgenlik gibi manyetik özelliklerinin değiştiğini belirtmiştir. Ayrıca, demir gibi ferromanyetik malzemelerin mikro yapısında bulunan manyetik olmayan kalıntıların, manyetik özellikleri değiştirdiği sonucuna varmıştır. Bu manyetik

olmayan kalıntılara örnek olarak, boşluk, çatlak ve farklı manyetik özelliklere sahip ikinci bir fazın varlığı verilebilir.

Jiles (1988) ve Bida (2000), belirli sıcaklıklara tavlanan örneklerin soğutma hızı seçiminin de manyetik özellikler üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Soğutma hızının yüksek olması yapıda bulunan karbonun tamamen çözülememesine neden olduğunu ve bunun sonucu olarak da mikro yapıda fazla miktarda karbürün bulunduğu işaret etmişlerdir. Mikro yapıda bulunan bu karbürler kristaldeki iç gerilmeleri artırdığından malzeme mekanik olarak sert bir özelliğe sahip olmaktadır. Sertliğin artması domain duvar hareketini engellediğinden, sıfırlayıcı alan ile histeresis kayıpları artarken, geçirgenliğin azalmasına sebep olmaktadır. Yavaş soğutmada ise meydana gelen durum bunun tam tersidir.

Çizelgelerdeki veriler incelendiğinde, I. ve II. grup çift fazlı çeliklerin 50 Hz ve 100 Hz deki ölçümlerinde, manyetik akı yoğunluğunun artmasıyla manyetik alanın doğrusal olmayan bir şekilde arttığı görülmektedir. Manyetik alan ve manyetik akı yoğunluğunun artmasıyla, manyetik geçirgenliğin doğrusal olmayan bir biçimde azalması, malzemenin manyetik doyuma yaklaştığını göstermektedir. Malzemenin manyetik doyuma ulaşması demek manyetik momentlerin tümünün bir yöne (uygulanan manyetik alan yönüne) yönelmesi demektir. Uygulama frekansının da manyetik alan üzerinde etkisi vardır. Örneğin, I. ve II. grup çift fazlı çeliklerde en büyük manyetik alan değerleri 100 Hz çalışma frekansında elde edilmiştir. 100 Hz frekans değerinde elde edilen manyetik alan, 50 Hz deki değerlere göre %11 oranında bir artma olduğunu göstermektedir.

I. grup çift fazlı çeliklerin B – H eğrileri incelendiğinde, 50 Hz deki ölçümlerde 780, 825 ve 870°C tavlama sıcaklıklarında hızlı soğutma ile üretilen çift fazlı çeliklerin 1 T değerine kadar doğrusal olmayan hızlı bir şekilde arttıkları, 1.1 T değerinden sonra ise daha yavaş bir değişim ile doyuma doğru gitmeye çalıştıkları görülmektedir. Jiles (1988), Bida (2000)' in belirttiği gibi, kristal tane boyutlarının küçük olması iç gerilmeleri artırdığından domain duvar hareketinin engellendiği ve buna bağlı olarak da geçirgenliğin azaldığını söyleyebiliriz. Aynı gruba ait çift fazlı çeliklerin 100 Hz deki ölçümlerinde benzer sonuçlar elde edilmiştir.

II. grup çift fazlı çeliklerde ise, 50 Hz deki ölçümlerde 1.1 T değerine kadar manyetik alanla manyetik akı yoğunluğunun I. gruba benzer olarak doğrusal olmayan hızlı bir şekilde arttığı görülmektedir. Bu değerden sonra eğrilerin daha yavaş bir değişim gösterdiği görülmektedir. II. grup çift fazlı çeliklerin kristal boyutlarının I. gruba göre daha büyük olması, kristal taneleri içerisindeki iç gerilmelerin azaldığı ve buna bağlı olarak da domain duvar hareketinin daha geniş bir alanda gerçekleşebileceğine işaret etmektedir. Fakat mikro yapıda bulunan çökelmelerin domain duvar hareketini burada da engellediği ve sonuçta geçirgenlik değerlerinin I. grup çift fazlı çeliklere göre daha da azaldığı görülmüştür. II. grup çift fazlı çeliklerin 100 Hz deki ölçümleri ele alındığında ise, 0.9 T değerine kadar manyetik alanla manyetik akı yoğunluğunun arttığı, 1 T değerinden itibaren de B – H eğrilerinin doyuma doğru gitmeye başladığı görülmüştür. Geçirgenlik değerlerinin değişimi ele alındığında ise, domain duvar hareketinin engellenmesi ele alınan tüm ölçümler arasında en düşük değerlere sahip oldukları görülmektedir.

Maddeler, Curie sıcaklığı altında ısıtılarak işlem uygulandığında (<770°C) ferromanyetik özellik gösterirken, Curie sıcaklığı üstünde ise paramanyetik özellik göstermektedirler (Küçük 2003).

I. ve II. grup çift fazlı çeliklerin B – H eğrileri incelendiğinde, I. grup çift fazlı çeliklerin B – H eğrilerinin düşük tavlama sıcaklığından büyüğe doğru sıralandığı, II. grup çift fazlı çeliklerde ise bu sıralamanın ters yönde olduğu görülmüştür. Bunun nedeni; seçilen soğutma şeklidir.

I. grup çift fazlı çelikler Curie sıcaklığı üzerinde ısıtılarak maruz kaldıklarından önce paramanyetik özellik göstermişlerdir. Daha sonra seçilen soğutma şekli ile örnek sıcaklığının hızlı bir şekilde azaltılmasıyla Curie sıcaklığı altına inilerek ferromanyetik özellik gösteren bölgeye geçilmiştir. Örnek sıcaklığının aniden düşürülmesi ile ısıtma işlemi sırasında mikro yapıda oluşan iç gerilmelerin giderilmesine fırsat vermediğinden manyetik momentler iç gerilmelerin etkisi altında gelişmiş güzel yönelimine zorlanmışlardır. Manyetik momentlerin gelişmiş güzel yönelimi sonucunda, I. grup çift fazlı çeliklerin mıknatıslanması için daha büyük bir manyetik alana gerek duyulmuştur.

II. grup çift fazlı çeliklerde ise, havada soğutma ile örnek sıcaklığı yavaş yavaş düşürüldüğünden, mikro yapıda ısıtım sırasında oluşan iç gerilmelerin giderilmesiyle manyetik momentler düzenli bir şekilde yönelime gitmişlerdir. Bu grup çift fazlı çeliklerin manyetik momentleri düzenli bir yapıya sahip olduklarından düşük bir manyetik alan uygulanmasıyla örnek mıknatıslanmıştır.

Bu açıklamalar sonucu, II. grup çift fazlı çeliklerin B – H eğrileri, I. grup çift fazlı çeliklerin B – H eğrilerine göre daha doğru bir yönelime sahip olmuşlardır. Bu durum daha önce yapılan araştırma sonuçları ile paralellik göstermektedir (Jiles 1988, Bida 2000).

Malzemenin spektral analiz sonuçlarına bakıldığında (Çizelge 3.1.), malzeme içerisinde mıknatıslanmayı azaltacak veya engelleyecek elementlerin varlığı görülmektedir. Bu elementler; Bakır (Cu), Alüminyum (Al) ve Manganez (Mn) dir. Ayrıca optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde, ısıtım işlemleri sonrası malzeme içerisinde çökelmeler ve karbür oluşumuna da rastlanmıştır. Bu tür oluşumlarda malzemenin manyetik özelliğini etkilemektedir.

Her iki grup çift fazlı çeliklerin B – H değişimleri göz önüne alındığında, manyetik akı yoğunluğuna bağlı manyetik alanlarındaki artışlar mıknatıslanma eğrisi altındaki alanın arttığına işaret etmektedir. Mıknatıslanma eğrisi altındaki alanın artması (Şekil 2.17.) maddenin ferromanyetik olarak yumuşak manyetik madde özelliğini taşıdığı göstermektedir. I. grup ısıtım işlemiyle üretilen çift fazlı çelikler sert manyetik madde özelliği göstermektedir. Ferromanyetik sert maddeler mıknatıslanması kolay değişmesi istenmeyen elektrik makinalarında kullanılmaktadır. II. grup ısıtım işlemiyle üretilen çift fazlı çelikler ise yumuşak manyetik madde özelliği taşımaktadır. Bu tür maddeler elektromıknatıslarda ve motorlarda kullanılmaktadır.

I. ve II. grup çift fazlı çeliklerin B – H eğrilerinin elde edilmesinde ölçümler sonucunda meydana gelen hata oranı $\% \pm 1-1.2$, $\mu_r - B_m$ değişimlerinin elde edilmesinde ise $\% \pm 6$ oranında gerçekleşmiştir.

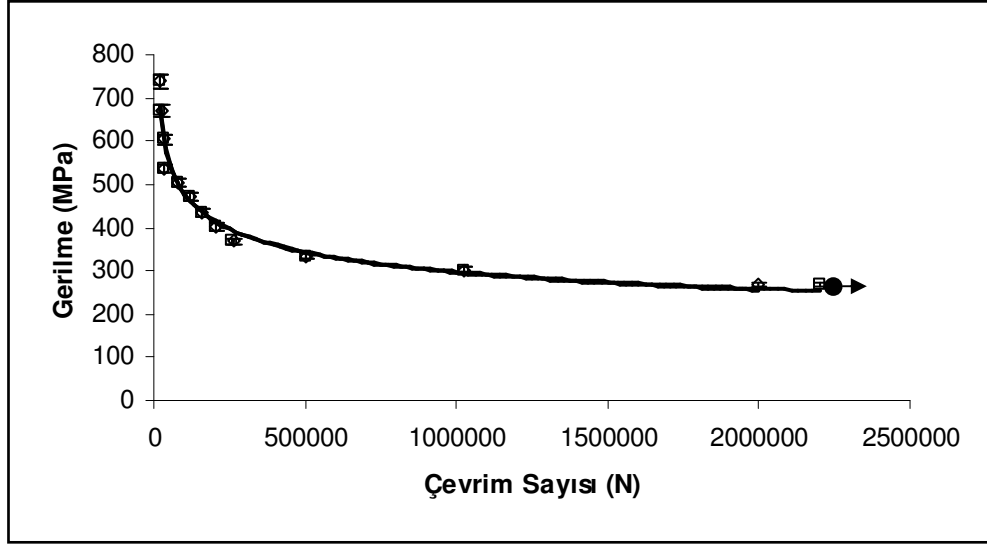
4.4. YORULMA ÖMÜR ÖLÇÜMLERİNİN YORUMLANMASI

Şekil 4.26. – 4.33. arasında sırasıyla ısıtma işlemi uygulanmamış, normalizasyon tavlama uygulanmış, I. grup çift fazlı çeliklerin ve II. grup çift fazlı çeliklerin yorulma deneyine tabi tutulmuş örneklerin gerilme yük çevrim sayısı (Wöhler) eğrileri ve kırılma değerleri verilmiştir. Sonsuz ömürdeki dayanım değeri, eğrinin eğiminin azalma göstermeye başladığı bölgeden itibaren daha küçük açılarda yükleme azaltılmasıyla deneyler yapılarak yaklaşık 2×10^{-6} çevrim sayısına ulaşılarak belirlenmiştir. Her açı değerinde toplam üçer örnek olmak üzere her eğri için ortalama yirmi bir örnek kullanılmıştır. Sonsuz ömürdeki deneylerde peş peşe üç örneğin kırılmaması nedeniyle daha fazla deney yapılmamıştır. 2×10^{-6} çevrim için deney süresi 1400 d/d lık devir sayısında yaklaşık 60 saat olarak gerçekleşmiştir. Çizelge 4.12.'de, yorulma deney sonuçları görülmektedir.

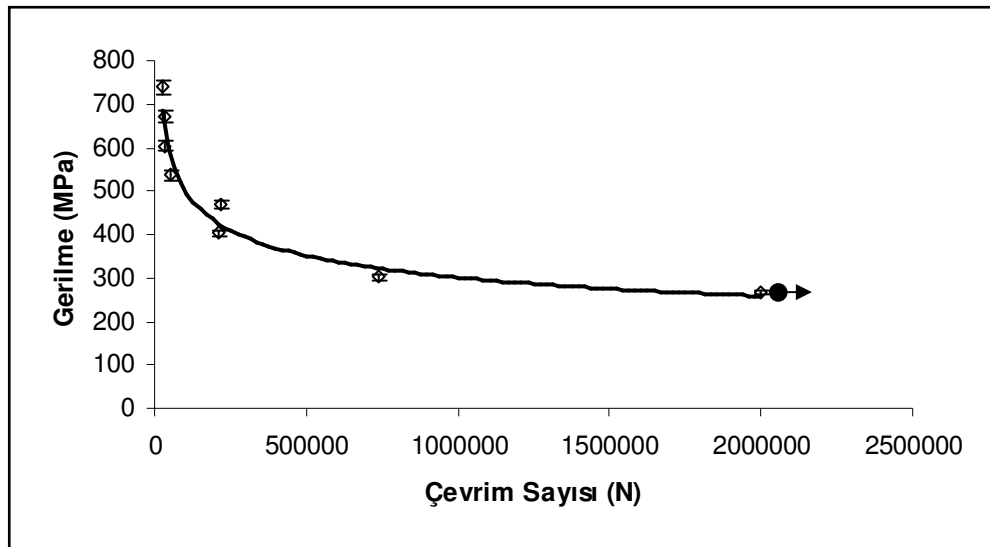
Çizelge 4.12. Yorulma deneyinde elde edilen sonuçların gösterimi.

Derece [θ]	Gerilme [MPa]	Çevrim Sayısı [N]							
		Numune 1	Numune 2	Numune 3	Numune 4	Numune 5	Numune 6	Numune 7	Numune 8
22	738	19000	24500	20400	27500	17700	12700	12500	13000
20	671	25600	33900	31200	32200	22100	17600	15200	17600
18	604	34200	31300	72300	51100	27100	25100	30000	26900
16	537	36000	52400	72500	140300	36300	55000	35800	32700
14	470	118200	215200	253000	395100	121500	88700	57100	56600
13	436	159500	-----	393500	589700	-----	134600	-----	-----
12	403	207900	209800	1100200	1590100	214800	199100	91300	94000
11	369	261300	-----	-----	-----	1181900	-----	-----	-----
10	335	502500	-----	2100000	2000000	1709400	389000	254500	230800
9	302	1024700	738200	-----	-----	-----	434000	423000	371400
8	268	2000000	2000000	-----	-----	2200000	520000	819800	519500
7	235	-----	-----	-----	-----	-----	2000000	1295300	2000000
6	201	-----	-----	-----	-----	-----	-----	2000000	-----

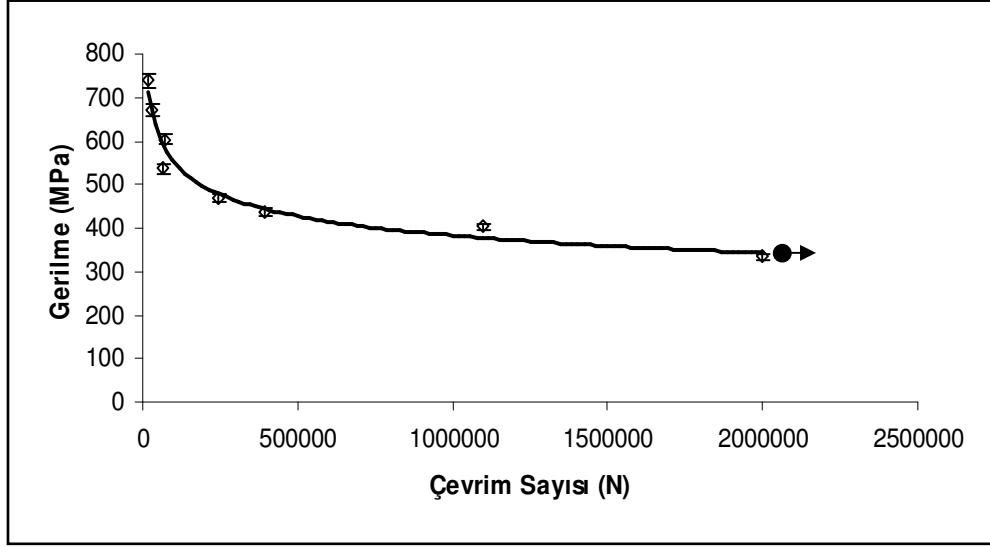
Açıklama: Numune 1: Isıl işlem uygulanmamış, Numune 2: Normalizasyon tavlamaşı uygulanmış, Numune 3: I. Grup ısıl işlem (780°C), Numune 4: I. Grup ısıl işlem (825°C), Numune 5: I. Grup ısıl işlem (870°C), Numune 6: II. Grup ısıl işlem (780°C), Numune 7: II. Grup ısıl işlem (825°C), Numune 8: II. Grup ısıl işlem (870°C).



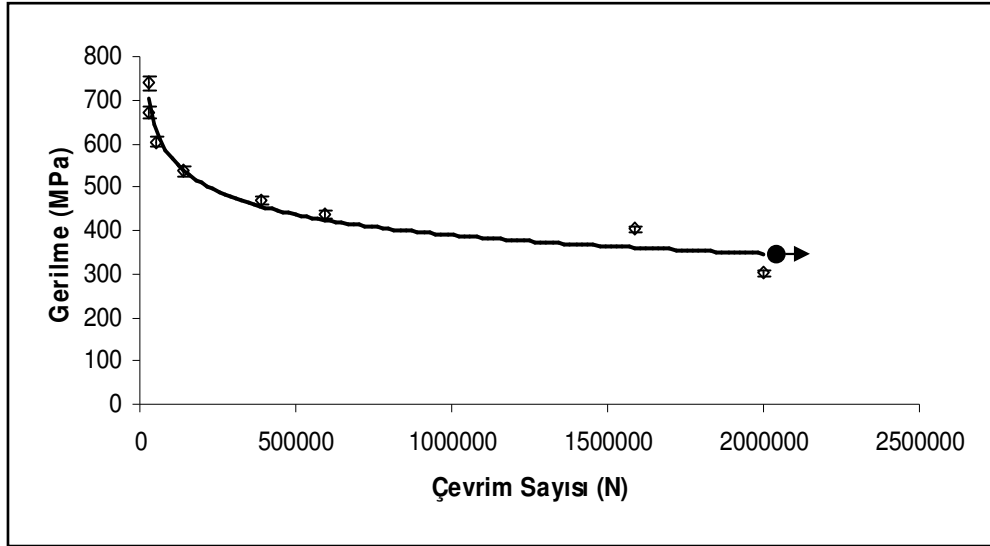
Şekil 4.26. Isıl işlem uygulanmamış örneğin ($\sigma - N$) Wöhler eğrisi.



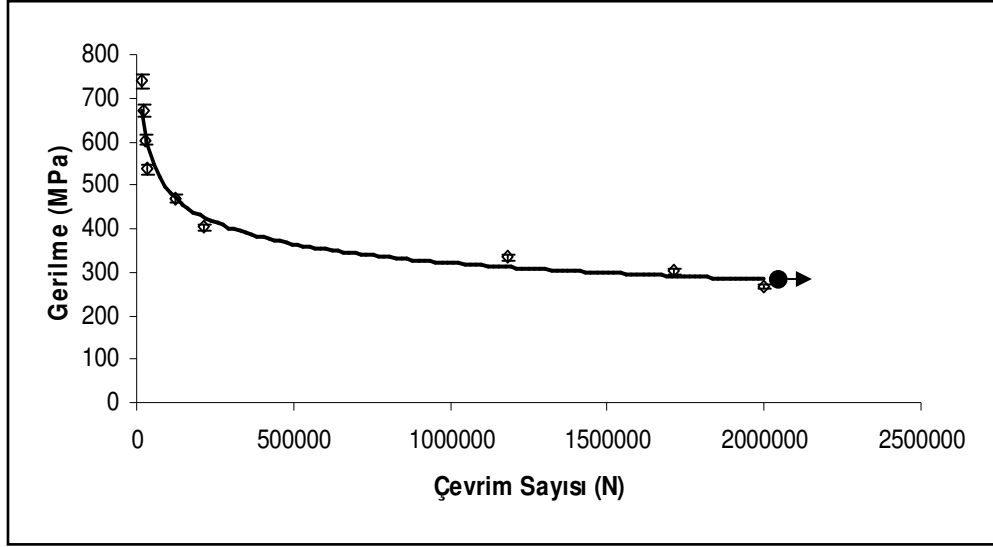
Şekil 4.27. Normalizasyon tavlaması uygulanmış örneğin ($\sigma - N$) Wöhler eğrisi.



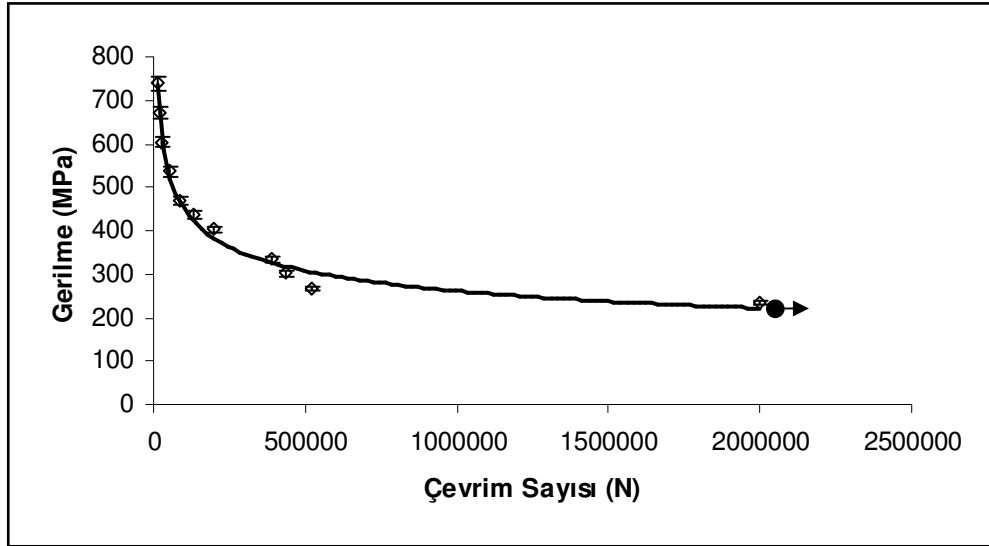
Şekil 4.28. 780°C de 60 dakika tavlانیp suda soğutulmuş çift fazlı çelik örneğinin ($\sigma - N$) Wöhler eğrisi.



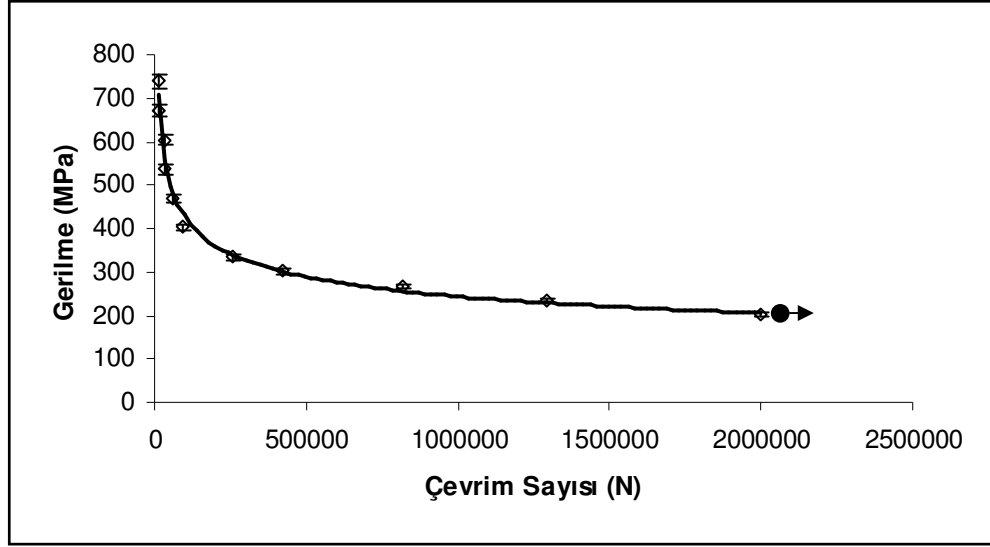
Şekil 4.29. 825°C de 60 dakika tavlانیp suda soğutulmuş çift fazlı çelik örneğinin ($\sigma - N$) Wöhler eğrisi.



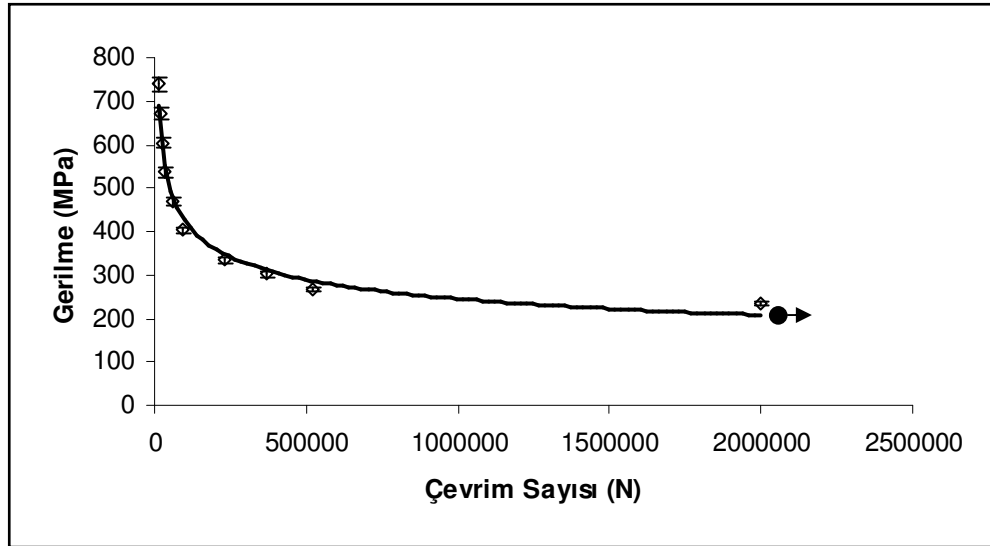
Şekil 4.30. 870°C de 60 dakika tavlaniş suda soğutulmuş çift fazlı çelik örneğinin ($\sigma - N$) Wöhler eğrisi.



Şekil 4.31. 780°C de 60 dakika tavlaniş suda soğutulmuş daha sonra 400°C de 120 dakika tavlaniş havada soğutulan çift fazlı çelik örneğinin ($\sigma - N$) Wöhler eğrisi.



Şekil 4.32. 825° C de 60 dakika tavlanylup suda soğutulmuş daha sonra 400° C de 120 dakika tavlanylup havada soğutululan çift fazlı çelik örneğın ($\sigma - N$) Wöhler eğrisi.



Şekil 4.33. 870° C de 60 dakika tavlanylup suda soğutulmuş daha sonra 400° C de 120 dakika tavlanylup havada soğutululan çift fazlı çelik örneğın ($\sigma - N$) Wöhler eğrisi.

Çift fazlı çelik üretmek için kullanılan örneklerin ısıtılma işlem öncesi yüzey pürüzlülük değerleri $1.1 \mu m$ iken, ısıtılma işlem sonrası örnek yüzeylerinin taşlanmasıyla bu değer $0.3 \mu m$ ' ye düşmüştür. Yüzey pürüzlülük değerlerinde % 27 oranında bir iyileşme gerçekleşmiştir. Yorulma deneyinde yüzey pürüzlülük değerleri önem taşıdığından bunun etkisi deney sonuçlarından görülebilmektedir.

Yorulma ömür ölçümlerinde ilk önce ısıtılma işlem uygulanmamış örneklerin yorulma testleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerde Erdemir 6114 çeliğinin 2×10^{-6} çevrim sayısında yorulma dayanımı 248 MPa bulunmuştur. Elde edilen bu değer hem Erdemir 6114 çeliğinin akma dayanımı altında gerçekleşmesi hem de ısıtılma işlem uygulanmamış malzemenin kırılmadan taşıyabileceği en yüksek gerilme değeri olduğundan başlangıç için önemli bir bulgu olmuştur. Daha sonra normalizasyon tavlama uygulanmış malzemelerin yorulma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Normalizasyon tavlama uygulanmış malzemelerin kırılmadan taşıyabileceği en yüksek gerilme değeri 250 MPa olarak bulunmuştur. Normalizasyon tavlama uygulanmış malzemelerin yorulma ömür değerleri ısıtılma işlem uygulanmamış malzemelere göre iyileşme sağlamıştır. Bu ölçüm sonuçlarına göre ısıtılma işleminin yorulma üzerinde etkisi olduğu ve ısıtılma işleminin yorulma dayanımını arttırdığını söyleyebiliriz. Ayrıca ferrit + perlit mikro yapısına sahip çeliklerin yorulma ömürlerinin, ferrit + martenzit mikro yapısına sahip çift fazlı çeliklere göre daha düşük olduğunu da burada ispatlamış oluyoruz.

I. grup çift fazlı çelik örneklerin yorulma deney sonucu elde edilen Wöhler ($\sigma - N$) değişimleri Şekil 4.28. – 4.30. de verilmiştir. $780^{\circ}C$ ve $825^{\circ}C$ sıcaklıklarda üretilen çift fazlı çeliklerin yorulma dayanımları 348 MPa olarak bulunmuştur. $870^{\circ}C$ 'de ise yorulma dayanımı 250 MPa olarak gerçekleşmiştir. I. grup çift fazlı çeliklerin yorulma dayanımının artması martenzit miktarı ile ilgilidir. Artan martenzit miktarı sonucunda malzeme kırılmaya karşı bir direnç uygulamıştır. $780^{\circ}C$ ve $825^{\circ}C$ martenzit fazının etkisi gözlenirken, $870^{\circ}C$ 'de bu etki gözlenmemiştir. Ostenit bölgesine yakın sıcaklıklarda tavlama yapıldığından, optik mikroskop görüntülerine dayanarak bu sıcaklıkta martenzit tanelerinin hem daha küçük hem de geniş bir alana yayıldıkları görülmektedir. Bunun sonucu olarak malzeme kırılmaya karşı gereken

direnci sağlayamamış ve malzeme beklenen değerden önce kırılmıştır. 870°C' deki örneklerin yorulma ömür değerleri, 780°C ve 825°C' deki ölçümlere göre \approx %28 oranında bir azalma göstermiştir.

II. grup çift fazlı çeliklerin yorulma ömür ölçümleri incelendiğinde, yorulma dayanım değerlerinin hem ısıtma işlem uygulanmamış ve normalizasyon tavlama uygulanmış hem de I. grup çift fazlı çeliklere göre daha düşük olduğu görülmüştür. İkinci kez ısıtma işlem uygulanmış bu örneklerde, yorulma dayanımı 200 MPa olarak ölçülmüştür. İkinci kez uygulanan ısıtma işlem malzemenin yaşlanma özelliklerini incelemek için gerçekleştirilmiştir. Yorulma deney sonucunda elde edilen değerler incelendiğinde, ikinci kez uygulanan ısıtma işleminin, çift fazlı çeliklerin yorulma özellikleri üzerine herhangi bir katkısının olmadığı sonucuna varılmıştır.

Sherman ve Davies (1981), çift fazlı çeliklerde artan martenzit miktarının, yorulma ömrü üzerinde yararlı bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Martenzit miktarının artması ile örnekte, toplamda daha düşük bir plastik gerilmenin oluşacağı ve bununla yorulma ömrünün artmasına neden olduğu sonucuna varmışlardır. Gerçekleştirdikleri ölçümlerde, %30 oranından daha az miktarda martenzit içeren örneklerin yorulma özelliklerinin değişmediğini gözlemişlerdir.

Zhongguang ve ark. (1987), çift fazlı çeliklerin yorulma davranışlarını kontrol eden değişkenlerin; ferrit ve martenzit kristal yapıları arasındaki gerilme dağılımı ve iki faz sınırlarına yakın bölgelerdeki şekil bozukluklarının varlığı olduğunu belirtmişlerdir.

Ayrıca, Sherman ve Davies (1981)'nin görüşlerine ek olarak, çift fazlı çeliklerin yorulma davranışlarının martenzit miktarına bağlı olduğu gibi gerilme genliğine de bağlı olması gerektiğini söylemişlerdir. Çift fazlı çeliklerin yorulma davranışlarını belirlemek için gerçekleştirdiğimiz deneylerde, özellikle I. grup çift fazlı çeliklerin yorulma davranışlarının incelenmesinde elde ettiğiniz sonuçlar Zhongguang ve ark. (1987) ile benzerlik taşımaktadır. Buna ek olarak, çevrim yüklemesine maruz kalan çift fazlı malzemelerde, fazların boyutu, şekli ve kristal yapıları arasındaki farklılıklar nedeniyle değişen iç gerilmelerin yorulma özellikleri üzerindeki etkileri de göz ardı edilmemelidir.

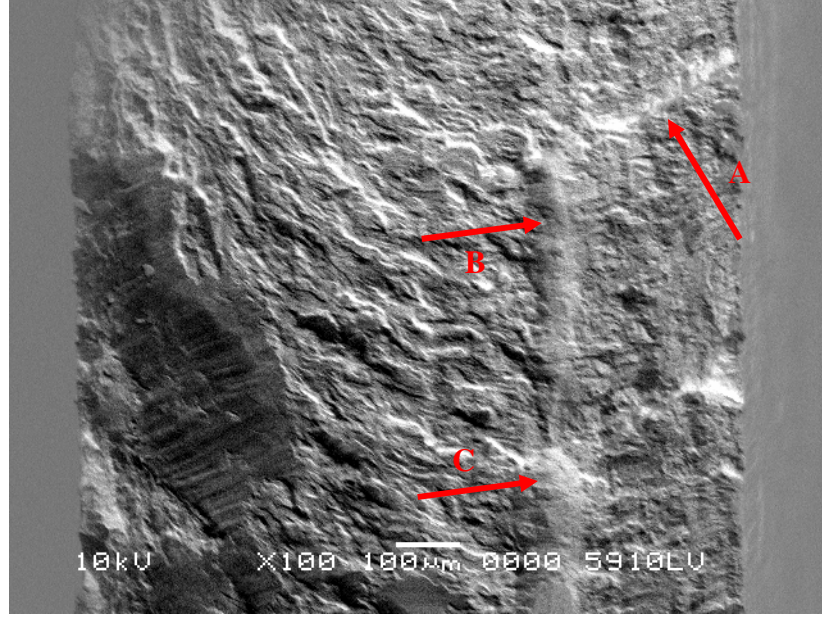
Hashimoto ve Pereira (1996) çift fazlı çeliklerin yorulma ömürlerinin ferrit + perlit mikro yapısına sahip çeliklere göre daha büyük olduğunu bulmuşlardır. Bu değişimin martenzit nedeniyle oluştuğunu belirtmişlerdir. I. grup çift fazlı çeliklerle gerçekleştirdiğimiz deneylerde elde ettiğimiz sonuçlar Hashimoto ve Pereira ile uyum sağlamaktadır. Ferrit + perlit mikro yapısına sahip ısıtıl işlem uygulanmamış örneklerimizin yorulma dayanım değerleri 200 MPa iken, ferrit + martenzit mikro yapısına sahip I. grup çift fazlı çeliklerin yorulma dayanım değerleri 348 MPa olarak bulunmuştu.

4.4.1. Yorulma Kırılma Yüzeylerinin Elektron Mikroskobu ile İncelenmesi

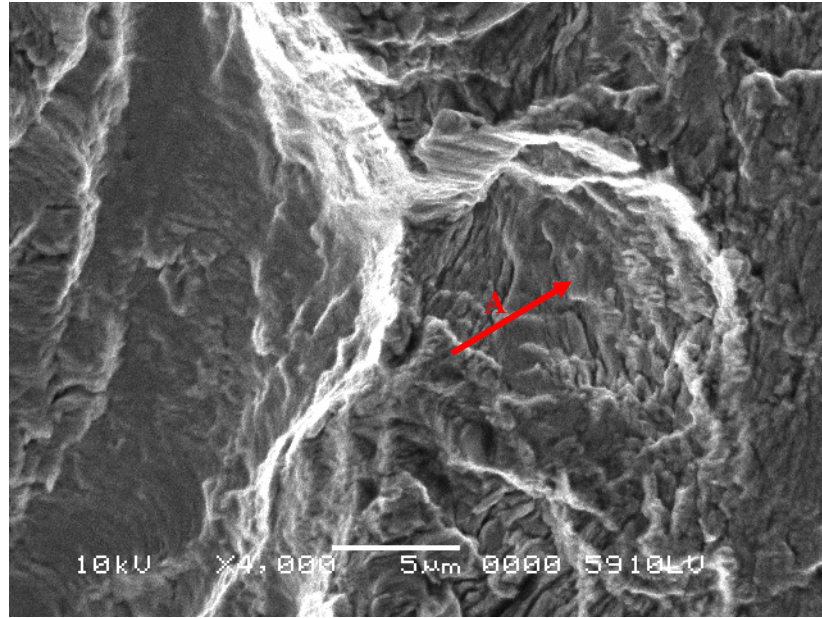
Şekil 4.34.' de yorulma deney sonucunda kırılma gerçekleşen yüzeyin görüntüsü görülmektedir. Isıtıl işlemsiz, Normalizasyon tavlaması uygulanmış, I. grup ve II. grup ısıtıl işlemle üretilen çift fazlı çelik örneklerden iki farklı martenzit miktarına sahip örneklerin, yorulma deney sonrası kırılan yüzeylerin incelenmesi taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Isıtıl işlemsiz örneklerin yorulma deney sonrası kırılma yüzeylerinin görünümü Şekil 4.35a. 4.35b., Normalizasyon tavlaması uygulanan örneklerin kırılma yüzeylerinin görünümü Şekil 4.36a. 4.36b., I. grup ısıtıl işlemle üretilen çift fazlı çeliğin kırılma yüzeyinin görünümü Şekil 4.37a. 4.37b. , II. grup ısıtıl işlemle üretilen çift fazlı çeliğin kırılma yüzeylerinin görünümü Şekil 4.38.' de verilmiştir.



Şekil 4.34. Yorulma deney sonucu kırılma gerçekleşen yüzeyin görüntüsü.

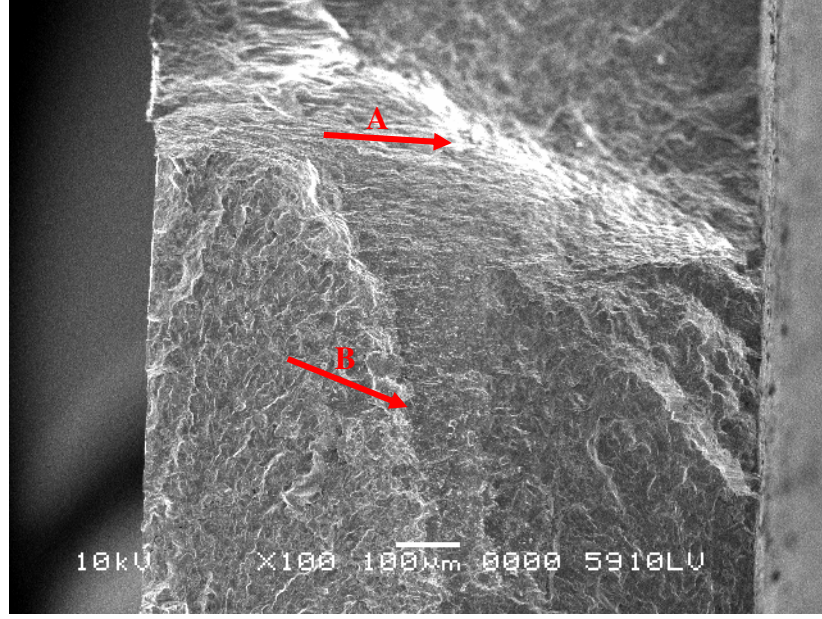


Şekil 4.35a.

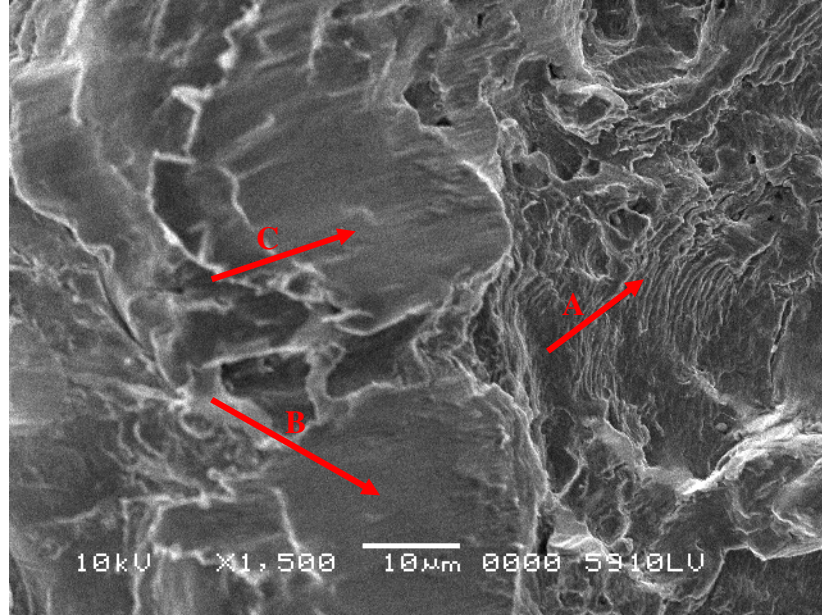


Şekil 4.35b.

Şekil 4.35. Isıl işlem uygulanmamış örneklerin, yorulma deney sonucu kırılma yüzeylerinin SEM ile görüntülenmesi. (a): 500x, (b): 100x.

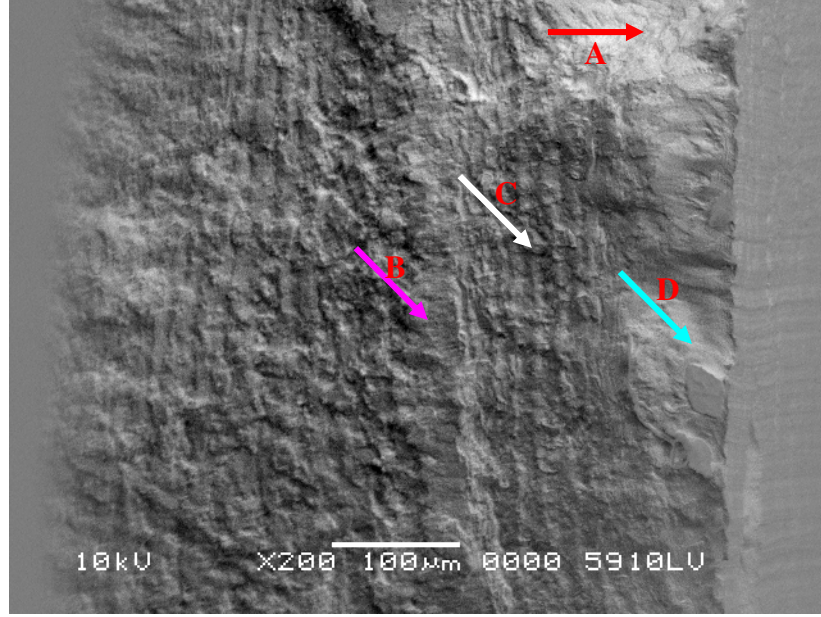


Şekil 4.36a.

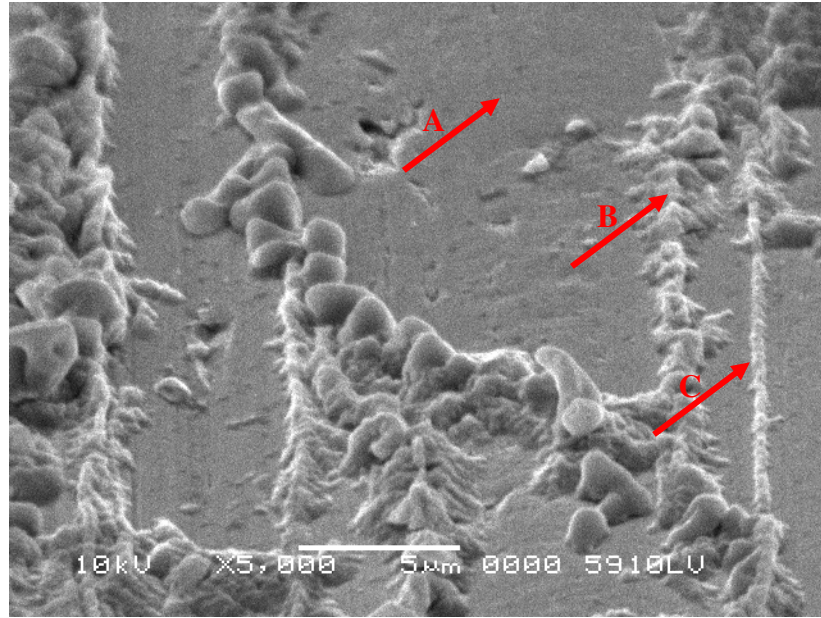


Şekil 4.36b.

Şekil 4.36. Normalizasyon tavlaması uygulanmış çeliğin yorulma deney sonucu, kırılma yüzeylerinin SEM ile görüntülenmesi. (a): 100x, (b): 1500x

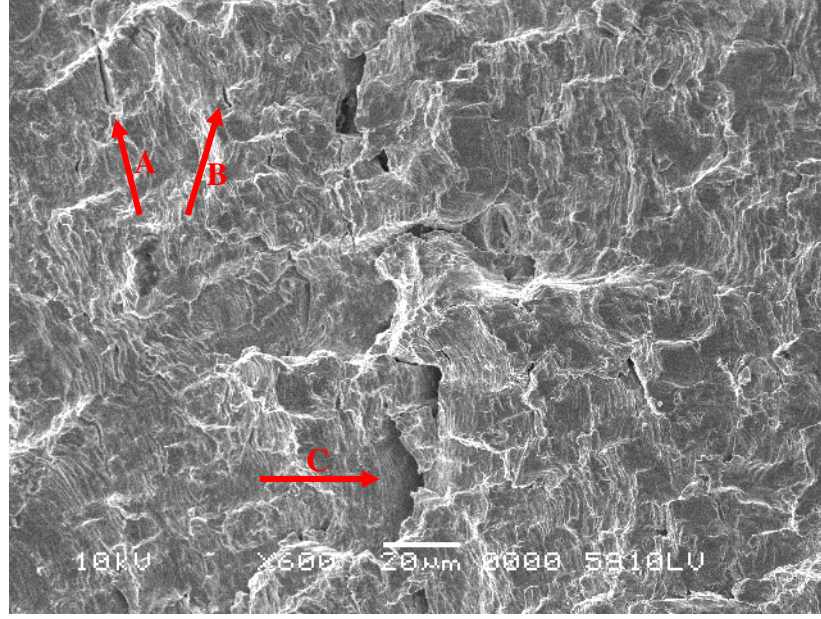


Şekil 4.37a.



Şekil 4.37b.

Şekil 4.37. I. Grup çift fazlı çeliklerin yorulma deney sonucu, kırılma yüzeylerinin SEM ile görüntülenmesi. (a): 200x, (b): 5000x.



Şekil 4.38. II. grup çift fazlı çeliklerden seçilen örneğin yorulma deney sonucu, kırılan yüzeyinin SEM ile görüntülenmesi (600x).

Yorulma deney sonucu kırılma yüzeylerinin incelenmesinde, ilk önce ısıl işlem uygulanmamış örnek ele alınmıştır. Şekil 4.35a. incelendiğinde, A oku, kayma bantlarından başlayan mikro çatlak, uygulanan gerilme doğrultusuna 45° lik açı ile yöneldiğini, B oku, oluşan çatlakın kayma bantlarının yönelimine bağlı olarak uygulanan gerilmeye dik ilerlediğini göstermektedir. C oku ise, çevreden gelen katkılarla şiddetini artıran çatlakın ilerlemesini göstermektedir. Çatlak başlangıç ve ilerlemesi ile elde edilen bu görüntüler Wan ve ark. (1981)' in bulduğu sonuçlarla benzerlik göstermektedir. Yorulma çatlak başlangıcı ve ilerlemesi kayma bantlarında meydana gelmektedir. Malzeme yüzeyindeki kristaller, yüzey altındaki kristallere göre daha kolay bozunuma uğramaktadır. Bunun nedeni yüzey kristallerinin, yüzey altı kristallere göre daha zayıf konumda bulunmalarından kaynaklanmaktadır. Düşük bir gerilmeye dahi mukavemet gösteremeyen bu bölgeler kopmanın meydana geldiği yerler olarak da bilinmektedir (Schijve 2001). Şekil 4.35b.' de ise, beyaz renkte görülen kısım çatlak ilerlemesini belirtmektedir. Çatlak doğrultusunun değişmesi, o bölgede bir kristal varlığından kaynaklanmaktadır. A oku, o belgede bir kristal olabileceğini göstermektedir. Elde edilen görüntüden, kırılmanın sert olan fazdan değil de, daha düşük mukavemete sahip kristal sınırından ilerlediği görülmektedir.

Şekil 4.36a. incelendiğinde, normalizasyon tavlama uygulanmış çelik örnekteki kırılma yönelimi görülmektedir. Burada kırılma iki koldan hareketini sürdürmektedir. A oku, normal kırılma doğrultusunu, B oku ise, kopmanın başladığı ve gerçekleştiği yeri göstermektedir. Şekil 4.36b.'deki görünümde ise, normalizasyon tavlama uygulanmış bir diğer örneğin kırılma yüzeyi görülmektedir. A oku durulma çizgilerini göstermektedir. Durulma çizgileri örneğin kopmaya yakın bölgesinde yer almaktadır. O noktaya kadar örnek üzerine etkiyen gerilmeyi, artık örneğin taşıyamayacağı ve kopmanın meydana geleceği bölgeyi göstermektedir. B ve C okları ise, ayrılma ile kırılmanın meydana geldiği bölgeleri göstermektedir. Bu kopma türü, hmk kristal yapıya sahip çeliklerde özellikle metallerde gözlenen bir kopma türüdür. Ayrılma ile kırılmada çatlak tane içinde düşük miller indisli düzlemleri takip ederek izler. Ayrılma yüzeyleri her bir tanede farklı doğrultuda olduğundan, çatlak taneden taneye geçerken her bir tanede farklı doğrultuda hareket eder. Sonuçta ayrılma ile kırılan bir malzemenin yüzeyi taneli bir yapıda görünmektedir.

Şekil 4.37a.'da, I. grup çift fazlı çeliklerden seçilen örneğin kırılma yüzeyi görülmektedir. A oku, kayma bantlarında meydana gelen çatlak başlangıcını, B oku, çatlağın ilerleme doğrultusunu, C oku, durulma çizgilerinin yönelimini, D oku ise, kopmanın gerçekleştiği bölgeyi temsil etmektedir. Aynı seriden bir diğer örneğin kırılma yüzey görüntüsünden (Şekil 4.37b.), kırılmanın kristal yapılardaki yönelimini görmekteyiz. Kırılma yüzeyi incelendiğinde, A oku, kristal tanesini, B oku ise kristal sınırını belirtmektedir. C oku ise, çatlağın kristal içerisinden geçtiğini göstermektedir. Zhongguang ve ark. (1987), düşük martenzit miktarına sahip çift fazlı çeliklerde, yorulma çatlağının ferrit – martenzit ara yüzeylerinde ve ferrit fazına ait kısımda gerçekleştiğini belirtmişlerdi. Yorulma yüzeyindeki çatlak yönelimini incelediğimizde, elde ettiğimiz sonucun Zhongguang ve ark. (1987)' in ki ile benzerlik taşıdığını görmekteyiz. Şekil 4.37b.'deki görüntüde, A oku martenzit, C oku ise ferrit fazına sahip kristal tanesinin olabileceği durumları göstermektedir.

Şekil 4.38.' de ise, II. grup çift fazlı çeliğin yorulma deney sonucu kırılma yüzeyinin görüntüsü görülmektedir. A ve B okları, örnek yüzeyinde uygulanan gerilme doğrultusuna dik yönde oluşan çatlakları, C oku ise, kopan kristal tanesini

göstermektedir. İncelenen tüm örneklerde Eryürek (1993)'ün belirttiği gibi, yorulma deney sonucu meydana gelen kırılmanın gevrek kırılma olduğu sonucunu çıkarıyoruz. Eğer kırılma yüzeyleri girintili, çıkıntılı görüntü vermiş olsaydı, kırılma türü sünek olacaktı.

5. SONUÇLAR

Yapılan bu çalışmada, farklı ısı işlemlerle üretilen çift fazlı çeliklerin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine ikinci faz (martenzit) etkisi incelendi. Elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler şeklinde verilmektedir.

1) Ferrit + perlit yapısından başlayarak üretilen çift fazlı çeliklerde, ferrit fazının martenzit fazı tarafından çevrelendiği bir mikro yapı elde edilmiştir. Mikro yapının incelenmesi için optik mikroskop görüntüleri elde edilmiştir. Optik mikroskop görüntülerinin analizi sonucunda meydana gelen ikinci fazda martenzit ile birlikte kalıntı ostenitin de varlığına ulaşıldı.

2) I. gruptaki çift fazlı çeliklerde tavlama sıcaklığı ve süresinin artması ile martenzit tanelerinin irileştiği görülmüş ve çift fazlı çeliğin mekanik özellikleri üzerine martenzit tane boyutundan ziyade martenzit hacim oranındaki artışın etkili olduğu tespit edildi.

3) II. grup çift fazlı çeliklerde ise, tavlama sıcaklığı ve süresinin artması ile çift fazlı çeliğin hem akma hem de çekme mukavemeti, I. grup çift fazlı çeliklere göre daha düşük olarak ölçülmüştür. Bu düşüşe martenzit tane boyutundaki artışın neden olduğu görüldü.

4) I. grup çift fazlı çeliklerin ısı işlemi sonrası meydana gelen martenzit fazının hangi kristal yapısında olduğu x ışını kırınımı deneyi ile belirlenmiştir. X ışını kırınımı ile martenzit fazının hacim merkezli tetragonal kristal yapısında olduğu ve bu kristal yapısının hangi kristal düzlemlerinden yansımaların meydana gelebileceği belirlendi.

5) I. ve II. grup çift fazlı çeliklerin ısı işlem sonrası ölçülen elektrik özdirenç değerlerinden hareketle, elektrik özdirenç değerlerinin tavlama sıcaklığı ile arttığı tespit edilmiştir. Meydana gelen artışın kristal yapılarında kusurların oluşmasına neden olduğu tespit edilmiştir. Özellikle sert özelliğe sahip martenzit tanelerinin varlığı ve ısı işlemle çözülen karbon atomlarının kristal yapılarında yerleşmeleri sırasında oluşan

düzensizlikler elektrik özdirenç değerlerinin artmasına neden olduğu yapılan ölçümlerle tespit edildi.

6) I. ve II. grup çift fazlı çeliklerin ısıtılma sonrası manyetik özelliklerindeki değişimlerin hem seçilen soğutma şekli hem de mikro yapıda bulunan farklı özelliklere sahip değişkenlerin varlığından ileri geldiği sonucuna varıldı. Curie noktası üzerinde tavlanan örneklerin soğutulmaları sırasında hem manyetik momentlerin yönelimi hem de mikro yapıda bulunan karbür oluşumu B-H eğrilerinin elde edilmesinde etkili oldu. Suda soğutma ile elde edilen I. grup çift fazlı çeliklerin mıknatıslanması için daha büyük bir manyetik alana ihtiyaç duyuldu. Çünkü suda soğutma sonucu malzeme hızlı bir şekilde paramanyetik bölgeden ferromanyetik bölgeye geçiş yaptığından manyetik momentlerin gelişimi güzel yönelimler aldığı sonucuna varıldı. Havada soğutma ile üretilen çift fazlı çeliklerdeki B-H değişimleri suda soğutulanlara göre daha iyi sonuçlar vermektedir. Havada soğutma sonucu malzemenin sıcaklığının yavaş azalması ile manyetik momentler daha düzgün bir yönetime sahip olur.

7) I. ve II. grup çiftlerde soğutma hızına bağlı olarak mikro yapıda görülen karbür oluşumunun manyetik geçirgenliği etkilediği sonucuna varıldı. Suda soğutma sonucu mikro yapıda gözlenen karbür oluşumunun kristal tanelerindeki iç gerilmeleri arttırdığı ve bununla malzemeye sert manyetik özellik kazandırdığı görüldü. Malzeme sertliğinin artması ile domain duvar hareketinin engellendiği elde edilen manyetik geçirgenlik değerlerinden gözlemlendi. Havada soğutma sonucu ise bunun tam tersinin gerçekleştiği bulundu.

8) I. grup çift fazlı çeliklerin yorulma ömür değerlerinin elde edilmesinde, uygulanan ısıtılma işleminin yorulma dayanımı üzerine etkisi olduğu belirlendi. Isıtılma işlemi uygulanmamış çelik örneklerde yorulma dayanımının, I. grup ısıtılma işlemi ile üretilen çift fazlı çeliklere göre daha düşük olduğu hesaplandı. I. grup çift fazlı çeliklerde oluşan martenzit miktarının yorulma ömür ölçümlerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görüldü. Ayrıca ferrit + martenzit mikro yapısına sahip çeliklerin, ferrit + perlit mikro yapısına ait çeliklere göre daha iyi olduğu bulundu.

- 9) II. grup çift fazlı çeliklerin yorulma ömür ölçümlerinin elde edilmesinde, bu grupta uygulanan ısıl işlemin çeliklerin yorulma dayanımı üzerinde etkisi olmadığı görüldü.
- 10) I. ve II. grup çift fazlı çeliklerin yorulma deney sonucu kırılma yüzeylerinin incelenmesinde yorulma çatlağının kayma bantlarında uygulanan gerilmeye 45° lik açı ile başladığı, uygulanan gerilmeye dik konumda devam ettiği ve sonuçta örneğin uygulanan gerilmeyi taşıyamayıp koptuğu görüldü.
- 11) Normalizasyon tavlama uygulanan çeliklerin kırılan yüzeyleri incelendiğinde kırılmanın ayrılma ile kırılma şeklinde gerçekleştiği görüldü. Elde edilen bu sonuç metallerde özellikle hmk kristal yapılarda gerçekleşen kırılma türüdür.
- 12) Tüm örneklerin kırılma yüzeylerinin incelenmesi sonucunda kırılmanın gevrek kırılma şeklinde gerçekleştiği sonucuna varıldı.

KAYNAKLAR

AMAR, K.D. and D.C. MURDUCK. 2004. Quantitative Measurement of Deformation Induced Martensite in 304 Stainless Steel by X – Ray Diffraction, Scripta Materialia, No. 50, p. 1445-49.

BECKER, J. And E. HORNBOGEN. 1979. Microscopic Analysis of the Formation of Dual Phase Steels, Structure and Properties of Dual Phase Steels, Ed. by. R:A: Kot and J:W: Morris, AIME, p. 21-39.

BIDA, G.V., A.P. NICHIPURUK and T.P. TSAR'KOVA. 2000. Magnetic Properties of Steels after Quenching and Tempering. I. General Carbon Steels, Russian Journal of Nondestructive Testing, Vol. 37, No. 2, p.79-99.

BIDA, G.V., A.P. NICHIPURUK and T.P. TSAR'KOVA. 2000. Magnetic Properties of Steels after Quenching and Tempering. II. Low Alloyed Steels, Russian Journal of Nondestructive Testing, Vol. 37, No. 2, p.100-115.

CHIKAZUMI, S. 1986. Physics of Magnetism. Robert E. Krieger Publishing Co., Florida, p. 7-13.

CRIBB, W.R. and RIGSBEE, J.W. 1979. Work Hardening Behaviour and Its Relationship to the Microstructure and Mechanical Properties of Dual Phase Steels. Ed. by R. A. Koot and J.W. Morris, AIME, p. 91-117.

DAVIES, R.G. 1978. Influence of Martensite Composition and Content on the Properties of Dual Phase Steels, Metallurgical Transaction A, Vol. 9, p. 671-679.

DURMUŞ, A. 2000. Dual Fazlı Çeliklerde Gerilme Şekil Değişirme Eğrilerinin Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, s. 12-26, s 105.

ERDEM, S. 2006. Transformator Çekirdeklerinde Kullanılan Elektrik Çelikleri ve Amorf Şeritlerin Uç Uca Gelen Birleşim Yerlerindeki manyetik Akı Dağılımının Deneysel ve Kuramsal İncelenmesi, Doktora Tezi (Yayınlanmamış), Uludağ Üniversitesi, s. 64-66.

ERYÜREK, B. 1993. Hasar Analizi, İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi, s. 30-33.

HALFPENNY, A. 2000. A Pratical Discussion on Fatigue, nCode nternational Ltd, Sheffield, England.

HASHIMOTO, T.M. and M.S. Pereria. 1996. Fatigue Life Studies in Carbon Dual Phase Steels, Int. J. Fatigue, Vol. 18, p. 529-533.

HAYAMI, S. and T. FURUKAWA. 1975. A Family of High Strenght Cold Rolled Steels, in Microalloying 75, Vanitec, p. 78-87.

JILES, D.C. 1988. Magnetic Properties and Microstructure of AISI 1000 Series Carbon Steels, J. Phys. D: Appl. Phys, No.21, p. 1186-95.

KASUMAGIC, İ. 1985. Optik Metalografi Yöntemleri, MAE Matbaası, Gebze, Türkiye.

KAVURMACI, İ.H. 1980. Elektromagnetik Yorulma Deney Cihazı Tasarımı ve İmalatı, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, s. 4-29.

KIM, N.Y. and G. THOMAS. 1981. Effect of Morphology on the Mechanical Behaviour of a Dual Phase Fe/2 Si/0.1 C Steel, Metallurgical Transaction A, Vol. 12A, p. 483-489.

KIZIL, Ü. 1999. 1.2601, 1.2842, Ck45 Çeliklerinin Yorulma Dayanımı Açısından Optimum Isıl İşlem Şartlarının Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, s. 4-26.

KÜÇÜK, İ. 2003. Çalışma Frekansına ve Geometrik Yapıya Bağlı Olarak Toroid Çekirdeklerin manyetik Özelliklerinin Deneysel ve Kuramsal İncelenmesi, Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi, s. 11-16, 42s, s. 68-71.

MORROW, J. and G. TITHER. 1978. Molbydenum in Intercritically Annealed Dual Phase Steel, Scripta Journal of Metals, Vol. 30(3), p. 16-19.

PAKDEMİRLİ, E., T. ÇAĞLAYAN ve A. ÖZDEMİR. 1973. Grafostatik ve Mukavemet, Elif Matbacılık, Ankara, Türkiye, s. 127-129, 153s.

PIPLANI, R.K. and G. RAGHAVAN. 1981. Microstructure and Its Correlation with Properties in Dual Phase Steels, Steel India, Vol. 4, p. 1-21.

SCHIJVE, J. 2001. Fatigue of Structures and Materials, Kluwer Academic Publishers, London, p. 7-13.

SHERMAN, A.M. and R.G. DAVIES. 1979. Fatigue of a Dual Phase Steel, Metallurgical Transaction A, Vol. 10A, p. 929-933.

SHERMAN, A.M. and R.G. DAVIES. 1981. The Effect of Martensite Content on the Fatigue of a Dual Phase Steel, Int. J. Fatigur, p. 36-40.

SMITH, G.S. and R.L. SYNDER. 1979. F_N = A Criterion for Rating Powder Diffraction Pattern and Evaluating the Reliability of Powder Patt., Journal of Applied Crystallography, No. 12, p. 60-65.

SPEICH, G.R. 1981. Physical Metallurg of Dual Phase Steels, Fundamentals of Dual Phase Steels, Ed. by . R.A. Kot, Bramfit, AIME, p. 3-45.

SÜMER, A.1966. X Işınları Difraksiyonu, İstanbul Teknik Üniversite Matbaası, Gümüşsuyu, İstanbul, Türkiye, s. 8-10, 314-341.

TANAKA, T.M., M. NISHIDA, K. HASHIGURCHI and T. KATO. 1979. Formating and Properties of Ferrite Plus Martensite Dual Phase Structures, Structure and Properties of Dual Phase Steels, Ed. by. R:A: Kot and J:W: Morris, AIME, p. 221-241.

WAN, C.M., K.C. CHOU, M.T. JAHS and S.M. KUO. 1981. Fatigue Studies on Dual Phase Low carbon Steel, Journal of materials Science, Vol. 16, p. 2521-26.

YAZICI, M, A. DURMUŞ and A. BAYRAM. 2003. Influence of Morphology of Martensite on Tensile and Strain Hardening Properties of Dual Phase Steels, Materialprüfung, Vol. 45(5), p. 214-219.

ZHONGGUANG, W., W. GUONAN, K. WEI and H. HAICAI. 1987. Influence of the Martensite Content on the Fatigue Behaviour of a Dual Phase Steel, Materials Science and Engineering, Vol. 91, p. 39-44.

1) <http://www.cemtas.com.tr>

2) <http://www.physik1.uni-rostock.de>

3) <http://www.ndt-ed.org>

4) <http://www.utm.edu>

5) <http://www.usyd.edu.au>

6) <http://www.jandel.co.uk>

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada hiçbir zaman benden yardım ve desteğini esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ahmet AVİNÇ ve yardımcı danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Murat Yazıcı' ya, tezin gelişimindeki katkılarından dolayı Tez İzleme Komitesinin değerli üyeleri Sayın Prof. Dr. Naim DEREBAŞI ve Sayın Prof. Dr. Ali BAYRAM'a, Otomotiv Endüstrisinde Uygulanan Kaynaklı Bağlantıların Mukavemet Analizleri ve Yorulma Açısından Nokta Kaynak Optimizasyonu isimli projeyi destekleyen Uludağ Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Başkanlığına ve Uludağ Üniversitesi Rektörlüğüne, projede hizmet alımı sağlayan Tofaş Türk A.Ş. ,Has Kalıp, Beyçelik ve Tekno Tasarımın Sayın yetkililerine ve çalışanlarına, Ölçümlerde ve bilimsel tartışmalarda sahip olduğu bilgiyi zaman gözetmeden benimle paylaşan Sayın Öğretim Görevlisi Doktor Ali DURMUŞ' a, doktora çalışmalarımın deneysel kısmının temelini oluşturan yorulma ömür değerlerinin belirlenmesinde bana kapılarını açan Orta Doğu Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümüne ve çalışanlarına, metalografik ölçümlerin gerçekleştiği Tübitak Malzeme Birimine, manyetik alan ölçümlerinin gerçekleşmesinde deney sistemini kullanmamda bana yardımcı olan meslektaşım Sayın Araştırma Görevlisi Sezer ERDEM' e, tezimi tamamlamada yardımlarını esirgemeyen meslektaşlarım Sayın Araştırma Görevlisi Ercan PİLİÇER, Sayın Araştırma Görevlisi Kadir ERTÜRK ve Sayın Araştırma Görevlisi M. Cüneyt HACIİSMAİLOĞLU' na ve diğer Araştırma Görevlisi arkadaşlarıma ve okul arkadaşım Sayın Ferhan YALÇIN' a, maddi ve manevi desteğini benden hiçbir zaman esirgemeyen değerli aileme sonsuz teşekkür ederim.

ÖZGEÇMİŞ

Sertan Kemal AKAY, 23 Şubat 1975 tarihinde Kıbrıs'ın Lefke ilçesinde doğdu. İlk ve orta öğrenimini Lefke' de tamamladıktan sonra 1993 yılında Lefke Gazi Lisesinden mezun oldu ve aynı yıl Uludağ Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünde lisans eğitimine başladı. 1997 yılında Fizik bölümünden mezun oldu. 1998 yılının Eylül ayında Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim dalında yüksek lisans eğitimine başlayan Sertan Kemal AKAY Eylül 1998' de Fizik Bölümüne Araştırma Görevlisi olarak atandı. Eylül 2000' de yüksek lisans çalışmasını bitirerek aynı ay Doktora çalışmalarına başladı ve halen Uludağ Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.