

149905

T.C.  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

OSTEMPERLEME KOŞULLARININ ALAŞIMSIZ KÜRESEL GRAFİTLİ  
DÖKME DEMİRİN YORULMA ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN  
İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kadir AZTEKİN

Balıkesir, Eylül - 2004

149905

T.C.  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

OSTEMPERLEME KOŞULLARININ ALAŞIMSIZ KÜRESEL GRAFİTLİ  
DÖKME DEMİRİN YORULMA ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN  
İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kadir AZTEKİN

149905

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Mustafa TAYANÇ

Sınav Tarihi : 27.09.2004

Jüri Üyeleri : Doç. Dr. İrfan AY

Doç. Dr. Ali BAYRAM

Yrd. Doç. Dr. Mustafa TAYANÇ

(BAÜ)

(UÜ)

(Danışman-BAÜ)

Balıkesir, Eylül - 2004

## ÖZET

### OSTEMPERLEME KOŞULLARININ ALAŞIMSIZ KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRİN YORULMA ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Kadir AZTEKİN

Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

(Yüksek Lisans Tezi / Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Mustafa TAYANÇ)

Balıkesir, 2004

Bu çalışmada, 900°C'de 110 dakika süreyle ostentlendikten sonra 3 farklı sıcaklık ve sürede ostemperlenen ve kimyasal bileşimi % C 3.9, % Si 2.104, % Mn 0.63, % P 0.25, % S 0.011, % Ni 0.018, % Al 0.008, % Cu 0.007, % Mg 0.22 olan alaşimsız ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demir (OKGDD) numuneler kullanılarak, ostemperleme sıcaklık ve süresinin alaşimsız OKGDD'lerin yorulma dayanımına etkisi deneysel olarak incelenmiştir.

Yorulma deneyleri, çalışmanın amacına uygun olarak tasarlanıp imal edilen çevresel eğme gerilmeli yorulma cihazında yapılmıştır. Deneyler iki grupta gerçekleştirilmiştir. Birinci grupta 230°C, 330°C ve 430°C'de 1 saat süreyle ostemperlenen KGDD'ler ile ısıtılmış numunelerin Woehler diyagramları çıkartılarak ostemperleme sıcaklığının OKGDD'lerin yorulma dayanımına etkisi ve ısıtılmış duruma göre seviye değişimi incelenmiştir. İkinci grupta 330°C'de 30, 60 ve 120 dakika süreyle ostemperlenen numunelerle ısıtılmış numunelerin Woehler diyagramları çıkartılarak ostemperleme süresinin OKGDD'lerin yorulma dayanımına etkisi ve ısıtılmış duruma göre seviye değişimi incelenmiştir. Birinci grup deney sonuçları değerlendirildiğinde; ostemperleme sıcaklığı 230°C'den 330°C'ye yükselirken OKGDD'lerin yorulma dayanımının arttığı, 330°C'den 430°C'ye yükselirken OKGDD'lerin yorulma dayanımının azaldığı gözlenmiştir. İkinci grup deney sonuçları değerlendirildiğinde; ostemperleme süresi 30 dakikadan 60 dakikaya yükselirken OKGDD'lerin yorulma dayanımının arttığı, 60 dakikadan 120 dakikaya yükselirken OKGDD'lerin yorulma dayanımının azaldığı gözlenmiştir.

Her iki grup içerisinde en yüksek yorulma dayanımı değeri 330°C'de 1 saat süreyle ostemperlenen KGDD numunelerinde gerçekleşmiştir.

**ANAHTAR SÖZCÜKLER:** ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demir / yorulma dayanımı / ısıtılmış işlem / ostemperleme

## **ABSTRACT**

### **THE INVESTIGATION OF EFFECT OF HEAT TREATMENT CONDITIONS ON THE FATIGUE PROPERTIES OF AUSTEMPERED DUCTILE IRON**

**Kadir AZTEKİN**  
**Balıkesir University, Institute of Science,**  
**Department of Mechanical Engineering**

**(M. Sc. Thesis / Supervisor: Yrd. Doç. Dr. Mustafa TAYANÇ)**

**Balıkesir-Turkey, 2004**

In this study, the pure austempered ductile iron (ADI) specimens which were austempered at three temperatures and three times after austenitized at 900°C 110 minutes were used in order to investigate the effect of the austempering temperature and time on the fatigue strength of the ADI's. The chemical composition of the ADI specimens is % 3.95 C, % 2.104 Si, % 0.063 Mn, % 0.025 P, % 0.011 S, % 0.018 Ni, % 0.008 Al, % 0.007 Cu, % 0.022 Mg.

Fatigue tests were performed on the rotating bending machine which was produced for the purpose of the study. Experiments were performed in two groups. In the first group, the Woehler diagrams of the cast specimens and ADI's which were austempered at 230°C, 330°C and 430°C 1 hour were obtained in order to investigate the effect of the austempering temperature on the fatigue strength of the ADI's and compare the difference of the fatigue strengths of the ADI's and cast specimens. In the second group, the Woehler diagrams of the cast specimens and ADI's which were austempered at 330°C 30 minutes, 60 minutes and 120 minutes were obtained in order to investigate the effect of the austempering time on the fatigue strength of the ADI's and compare the difference of the fatigue strengths of the ADI's and cast specimens. From the results of the first group experiments, the fatigue strength of ADI's increased between 230°C and 330°C, decreased between 330°C and 430°C. From the results of the second group experiments, the fatigue strength of ADI's increased between 30 minutes and 60 minutes, decreased between 60 minutes and 120 minutes.

The highest fatigue strength of ADI's in each group was obtained the specimens which were austempered at 330°C 1 hour.

**KEY WORDS:** austempered ductile iron / fatigue strength / heat treatment / austempering



## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET, ANAHTAR SÖZCÜKLER	ii
ABSTRACT, KEY WORDS	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SEMBOL LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xiii
ÖNSÖZ	xiv
1. GİRİŞ	1
2. KONUNUN TEORİK OLARAK İNCELENMESİ	3
2.1 Dökme Demirler	3
2.1.1 Demir-Karbon Denge Diyagramı ve Ötektik Reaksiyon	4
2.1.2 Dökme Demirlerdeki Matris Yapı Bileşenleri	6
2.1.3 Dökme Demir Türleri ve Özellikleri	8
2.1.3.1 Gri Dökme Demir	9
2.1.3.2 Beyaz Dökme Demir	10
2.1.3.3 Temper Dökme Demir	10
2.1.3.4 Vermicular Dökme Demir	11
2.2 Küresel Grafitli Dökme Demirler (KGDD)	12
2.2.1 Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Üretimi	13
2.2.1.1 Ergitme İşlemi	13
2.2.1.2 Ana Metal Analizi	13
2.2.1.3 Kükürt Giderme	14
2.2.1.4 Küreselleştirme	14
2.2.1.5 Küreselleştirme İşlemi Esnasında Kalite Kontrol	14
2.2.1.6 Aşılama	15
2.2.2 Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Matris Yapıları	17
2.2.2.1 Ferritik Yapı	17
2.2.2.2 Ferritik + Perlitik Yapı	17
2.2.2.3 Perlitik Yapı	17
2.2.2.4 Martenzitik Yapı	18
2.2.2.5 Beynitik Yapı	18
2.2.2.6 Ostenitik Yapı	18
2.2.3 Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Standartları	19

2.2.4 Küresel Grafitli Dökme Demirin Kullanım Alanları	20
2.2.5 Küresel Grafitli Dökme Demirlere Uygulanan Isıl İşlemler	20
2.2.5.1 Gerilim Giderme Isıl İşlemi	21
2.2.5.2 Yumuşatma Isıl İşlemi	22
2.2.5.3 Normalizasyon İşlemi	22
2.2.5.4 Su Verme ve Temperleme	23
2.2.5.5 Yüzey Sertleştirme	23
2.2.5.6 Ostemperleme Isıl İşlemi	23
2.3 Ostemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirler	24
2.3.1 Ostemperleme Isıl İşlemi	24
2.3.2 Uygun İşlem (Proses) Aralığı ve Mikro Yapıyı Etkileyen Faktörler	28
2.3.2.1 Alaşım Elementlerinin Mikro Yapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi	29
2.3.2.2 Ostenitleme Sıcaklığı ve Süresinin Mikro Yapıya Etkileri	31
2.3.2.3 Ostemperleme Sıcaklığı ve Süresinin Mikro Yapıya Etkileri	34
2.3.3 OKGDD'lerin Sınıflandırılması	36
2.3.4 OKGDD'lerin Kullanım Alanları ve Üstünlükleri	37
2.4 Yorulma	39
2.4.1 Yorulmaya Etki Eden Faktörler	40
2.4.1.1 Parça Büyüklüğü	42
2.4.1.2 Yüzey Etmeni	42
2.4.1.3 Mikro Yapı	43
2.4.1.4 Metalürjik Faktörler	43
2.4.1.5 Sıcaklık	44
2.4.1.6 Gerilme Birikmesi	44
2.4.1.7 Gerilme Gradyanı	45
2.4.1.8 Artık Gerilmeler	45
2.4.1.9 Frekans	45
2.4.1.10 Korozyon	46
2.4.3 Yorulma Deneyleri	46
2.4.4 Yorulma Deney Numunesi ve Deney Sonuçları	48
<b>3. KONUYLA İLGİLİ DAHA ÖNCE YAPILAN ÇALIŞMALAR</b>	<b>50</b>
<b>4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR</b>	<b>60</b>
4.1 Kullanılan Malzeme ve Özellikleri	60
4.2 Yapılan Deneyler	60
4.2.1 Mikro Yapı Deneyleri	61
4.2.2 Yorulma Deneyleri	66
4.2.2.1 Yorulma Deneylerinde Kullanılan Numune ve Ölçüleri	66
4.2.2.2 Deneylerde Kullanılan Cihazın Özellikleri ve Çalışma Prensibi	67
4.2.2.3 Uygulanan Gerilmenin Hesabı	69
4.2.2.4 Cihazın Deneye Hazırlanması ve Deney Parametreleri	70
4.2.2.5 Woehler Eğrilerinin Çıkarılması	72
4.2.2.6 Birinci Grup Deneyler (Ostemperleme Sıcaklığı Yorulma Dayanımı İlişkisi)	72
4.2.2.7 İkinci Grup Deneyler (Ostemperleme Süresi Yorulma Dayanımı İlişkisi)	77
4.2.3 Kırılma Yüzeyi İnceleme Deneyleri	82

	<b><u>Sayfa</u></b>
4.3 Deneý Sonuçlarının Karşılaştırılması	86
4.4 Tartışma	88
4.4.1 Ostemperleme Sıcaklığının Yorulma Dayanımına Etkisi (Grup 1)	88
4.4.2 Ostemperleme Süresinin Yorulma Dayanımına Etkisi (Grup 2)	91
5. SONUÇLAR	93
6. KAYNAKLAR	94



## SEMBOL LİSTESİ

<b>Simge</b>	<b>Adı</b>	<b>Birimi</b>
DD	Dökme demir	(-)
KGDD	Küresel grafitli dökme demir	(-)
GGG	Küresel grafitli dökme demir (Alman standardı)	(-)
DDK	Küresel grafitli dökme demir (Türk standardı)	(-)
OKGDD	Ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demir	(-)
$C_{eş}$	Karbon eşdeğeri	(-)
HMK	Hacim merkezli kübik	(-)
YMK	Yüzey merkezli kübik	(-)
$Fe_3C$	Sementit	(-)
$\gamma + Fe_3C$	Ledeburit	(-)
$\alpha + Fe_3C$	Perlit	(-)
$\gamma.C$	Grafit	(-)
$\gamma_{yk}$	Yüksek karbonlu ostenit	(-)
$\alpha$	Ferrit	(-)
$\gamma$	Ostenit	(-)
$\delta$	Ostenit	(-)
e-karbür ( $Fe_{2,4}C$ )	Beynitik karbür	(-)
$L$	Liküdüs (sıvı eğrisi)	(-)
$F_s$	Ferrit başlangıç bölgesi	(-)
$F_f$	Ferrit bitiş bölgesi	(-)

<b>Simge</b>	<b>Adı</b>	<b>Birimi</b>
$P_s$	Perlit başlangıç bölgesi	(-)
$P_f$	Perlit bitiş bölgesi	(-)
$B_s$	Beynit başlangıç bölgesi	(-)
$B_f$	Beynit bitiş bölgesi	(-)
$M_s$	Martenzit başlangıç bölgesi	(-)
$M_f$	Martenzit bitiş bölgesi	(-)
$A_1$	Kritik dönüşüm sıcaklığı	(-)
IT	İzotermal dönüşüm diyagramı	(-)
TS	Tane sınırı	(-)
T1-T2	Uygun işlem aralığı	(dakika)
ASTM	Amerikan Standartları Enstitüsü	(-)
$\sigma_{eg}$	Eğme gerilmesi	(MPa)
C	Uygulanan yük ile merkez arası mesafe	(m)
I	Atalet momenti	(m <sup>4</sup> )
R	Yarı çap	(m)
P	Yük	(N)
S	Düşey ekseninde uygulanan gerilme değeri	(MPa)
N	Çevrim sayısı	(-)
D	Çap	(mm)
B	Bağlama yeri uzunluğu	(mm)
L	Toplam numune uzunluğu	(mm)
$t_2$	Numunenin koptuğu zaman	(dakika)
$t_1$	Ağırlığın numuneye uygulandığı zaman	(dakika)
M	Eğme momenti	(Nm)

<b>Simge</b>	<b>Adı</b>	<b>Birimi</b>
$\sigma$	Eğme gerilmesi	(MPa)
$d$	Numune çapı	(m)
$\omega$	Dayanım momenti	(m <sup>4</sup> )
$Me$	Eğilme momenti	(Nm)
$F$	Uygulanan yük	(N)
$l$	Parça boyu	(m)
SEM	Taramalı elektron mikroskobu	(-)
R	Gerilme oranı ( $\sigma_{min} / \sigma_{max}$ )	(-)
TS 1487 UDK669.14	Metallerin yorulma deneyi genel prensipleri	(-)

## ÇİZELGE LİSTESİ

<b>Tablo Numarası</b>	<b>Adı</b>	<b>Sayfa</b>
Tablo 2.1	Değişik tipteki dökme demir türlerinin kimyasal bileşimleri.	8
Tablo 2.2	Çeşitli ülke KGDD normlarının karşılaştırılması ve özellikleri.	19
Tablo 2.3	KGDD'lerin kimyasal kompozisyonları.	20
Tablo 2.4	Küresel grafitli dökme demirlerin türlerine göre kullanım alanları.	20
Tablo 2.5	OKGDD'de östenitleme sıcaklığına göre mikro yapı özellikleri.	31
Tablo 2.6	OKGDD sınıflarının ASTM A 897M'ye göre mekanik özellikleri.	36
Tablo 4.1	Malzemenin kimyasal bileşimi.	60
Tablo 4.2	Numunelerin ostemperleme sıcaklık, süre ve mekanik özellikleri.	60
Tablo 4.3	Yorulma numunesinin ölçüleri.	66
Tablo 4.4	Isıl işlemsiz numunelerin S-N değerleri.	73
Tablo 4.5	230°C'de 60 dakika ostemperlenen numunelerin S-N değerleri.	74
Tablo 4.6	330°C'de 60 dakika ostemperlenen numunelerin S-N değerleri.	75
Tablo 4.7	430°C'de 60 dakika ostemperlenen numunelerin S-N değerleri.	76
Tablo 4.8	Isıl işlemsiz numunelerin S-N değerleri.	78
Tablo 4.9	330°C'de 30 dakika ostemperlenen numunelerin S-N değerleri.	79
Tablo 4.10	330°C'de 60 dakika ostemperlenen numunelerin S-N değerleri.	80
Tablo 4.11	330°C'de 120 dakika ostemperlenen numunelerin S-N değerleri.	81
Tablo 4.12	Bütün KGDD gruplarının yorulma dayanımları.	86

## ÖNSÖZ

Bana bu çalışmamda zaman gözetmeksizin bilgi ve tecrübesinden istifade etme imkanı veren, kendi çalışmalarına rağmen anlayış ve sabırla tezime katkıda bulunan sayın hocam ve danışmanım Yrd. Doç. Dr. Mustafa TAYANÇ'a ne kadar teşekkür etsem azdır.

Yorulma deney cihazının üretiminde ve deneylerin yapılabilmesi için gerekli yardım ve desteğini esirgemeyen ve iş hayatımda bana her zaman yol gösterici olan Öğ.Yb. Osman Şevki DUMAN'a sonsuz teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Yorulma deney cihazının yapımında çok emeği geçen teknisyen arkadaşlarım Yücel ŞAHİN ve Ender KARAKAŞLIOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Balıkesir'e geldiğim ilk günden beri bana her türlü maddi manevi desteklerini hiç esirgemeyen, yüksek lisans çalışmalarını beraber yürüttüğüm can arkadaşım Öğ.Yzb. Ayhan AYTAÇ'a ve sevgili eşi Sevda AYTAÇ'a sonsuz teşekkürler ederim.

Ayrıca bana olan sevgisini her zaman kıskandığım ve hayran kaldığım, beni hayata bağlayan ve tanıştığımız ilk günden itibaren sonsuz anlayış ve desteğini hiçbir zaman benden esirgemeyen sevgili eşim Dr. Işık AZTEKİN'e sonsuz sevgilerimi sunarım.

Balıkesir, 2004

Kadir AZTEKİN



## 1. GİRİŞ

Ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirler (OKGDD), küresel grafitli dökme demirlerin (KGDD) ostemperlenmesi ile elde edilirler. Ostemperleme ısıl işlemi; ostenitleme ve ostemperleme olmak üzere iki kademe gerçeşir. Ostenitleme, 850°C-950°C arasında en az bir saatlik sürede yapılır. Fırından alınan parçalar tuz banyosunda hızla soğutulur ve 230°C-450°C arasındaki sıcaklıklarda bekletilir. Su verme hızı soğuma esnasında perlit oluşumunu engelleyecek şekilde olmalıdır. Ostenitin izotermal olarak beynite dönüşümünün sağlanması için dönüşüm sıcaklığında tutma süresi 0.5-4 saat arasında olmakla beraber, dönüşüm içindeki alaşım içeriğine göre belirlenir [1].

Genel olarak KGDD'lerde osferritik dönüşüm 2 aşamalı reaksiyon olarak tanımlanır [1].

*1nci kademe;* ostenit, beynitik ferrit ve karbonca zengin ostenite ayrışır.

*2nci kademe;* karbonca zengin ostenit, ferrit ve karbüre ayrışır [1].

Ostemperleme ısıl işlemi sonucu elde edilen mikro yapıların mekanik özelliklerini ostemperleme sıcaklığı ve süresi belirlemektedir. Eğer ostemperleme sıcaklığı düşükse (~270°C) yüksek dayanım, sertlik ve aşınma dayanımı sağlanabilmektedir ki bu yapıya *alt beynit* denir. Yüksek ostemperleme sıcaklıklarında ise (~370°C) yüksek yorulma dayanımı ve iyi süneklik özellikleri elde edilmektedir. Bu mikro yapıya ise *üst beynit* denir. Bu mekanik özelliklerinden dolayı son yıllarda özellikle tasarım mühendislerinin ilgi alanı olmuşlardır [1,2].

Yorulma olayı tekrarlı ve değişken yüklere maruz kalan malzemelerin mikro yapılarında oluşan mikro çatlakların zamanla büyümesi ve diğer çatlaklarla birleşerek ani bir kırılmaya yol açması olarak tanımlanabilir. Malzemenin maruz kaldığı gerilme türü yorulma mekanizmasını da belirlemektedir. Bir malzeme aynı

anda birkaç yorulma çeşidine maruz kalabilmektedir. Endüstride meydana gelen malzeme kırılmalarının çoğunun yorulma kırılmasından kaynaklandığı göz önüne alındığında OKGDD'lerin önemi daha da artmaktadır [2].

OKGDD'lerin en yüksek yorulma dayanımının hangi ostemperleme koşullarında elde edildiğini tespit etmek amacıyla yapılmış çalışmalar olmakla beraber yeterli değildir. Özellikle ostemperleme sıcaklık ve süresinin yorulma dayanımı üzerine nasıl etki ettikleri çok önemlidir. Çünkü ostemperleme işlemi boyunca kontrol edilebilecek parametreler sıcaklık ve süredir.

OKGDD'ler çok değişik sıcaklık aralıklarında değişik sürelerde elde edilebilmektedirler. Ayrıca literatürdeki çalışmalar tam bir paralellik göstermemektedir. Bu yüzden OKGDD'lerin yorulma dayanımı hakkında tam bir standart sağlanamamaktadır. Bunun için daha fazla çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır.

## 2. KONUNUN TEORİK İNCELENMESİ

Ostempelenmiş küresel grafitli dökme demirleri ve onların mekanik özelliklerini, özellikle de yorulma özelliklerini daha iyi anlayabilmek için bazı kavramlar hakkında teorik bilgileri hatırlamakta yarar vardır. Bundan sonraki bölümlerde dökme demirler (DD), küresel grafitli dökme demirler (KGDD), ostempelenmiş küresel grafitli dökme demirler (OKGDD) ve yorulma olayı hakkında teorik bilgiler verilecektir.

### 2.1 Dökme Demirler

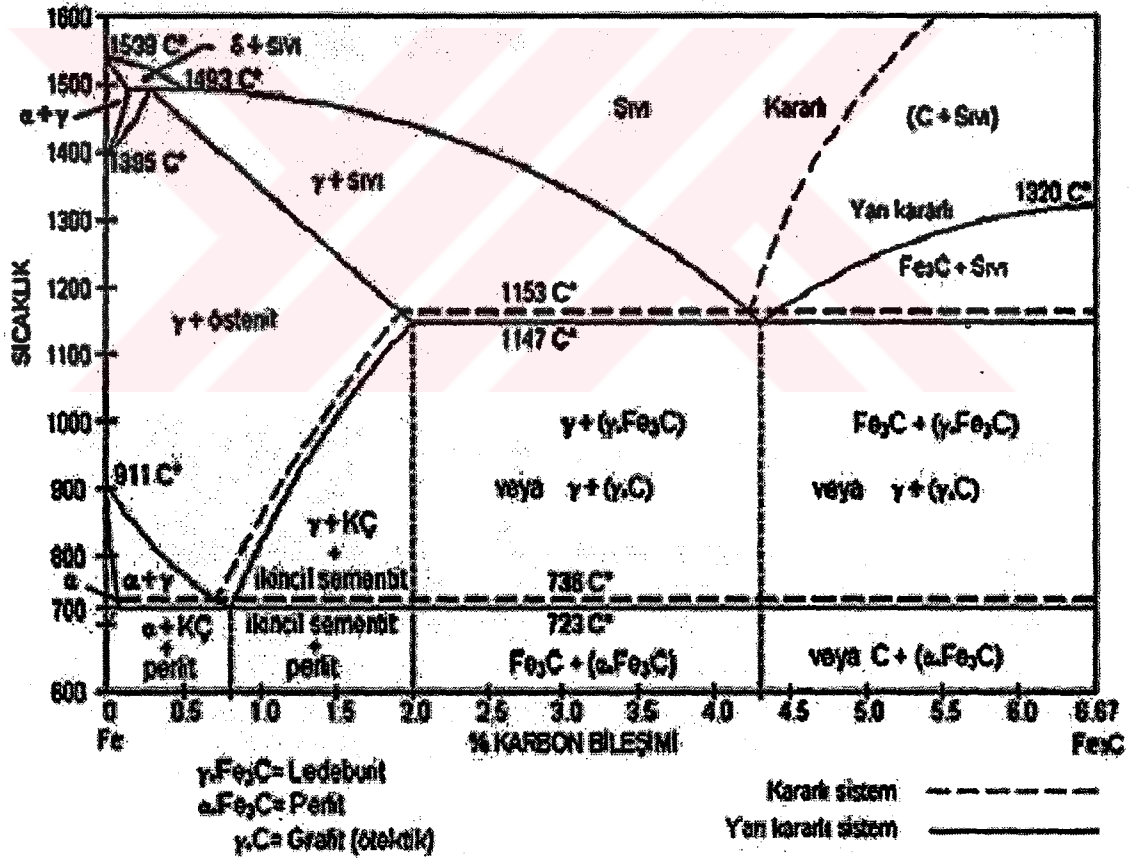
Döküm endüstrisinde en yüksek tonaja sahip ürün dökme demirleridir. Esasen karbon içerikleri % 2 ile % 6.67 arasında değişen demir karbon alaşımları olmalarına rağmen, yüksek karbon içeriğinin dökme demirleri gevrekletmesi sebebi ile ticari olarak üretilen dökme demirlerde karbon içeriği % 2-4 arasındadır. Dökme demirler, bir ötektik reaksiyon ile katılaştıran çok bileşenli demir alaşımlarıdır. Bünyelerinde, % 2-4 C, % 0.4-3.5 Si, % 0.4-0.8 Mg, % 0.1-0.8 P ve % 0.05-0.10 oranlarında S bulunur. Silisyum ve diğer alaşım elementleri ostenit içerisindeki karbon çözünürlüğünü önemli ölçüde değiştirebileceği için, bazı durumlarda bir ötektik reaksiyon ile katılaşabilen % 2'den daha az karbon içeren alaşımlar da dökme demir ailesine dahildir. Yukarıda bahsedilen elementlere ilaveten, nikel, krom, molibden, magnezyum, alüminyum ve bakır gibi alaşım elementlerini de belli oranlarda içerebilirler [3].

Hem iyi bir mühendislik malzemesi, hem de ucuz bir şekilde üretilmeleri, dökme demirlere duyulan gereksinimin başlıca sebepleridir. Dökme demirler, çok az süneklik göstermelerinden dolayı mekanik işlem ile kolayca şekil değiştiremezler. Ancak, kolayca eritilebilirler ve genellikle son boyutlarda imal edilen karmaşık şekillerde dökülebilirler. Uygulanan en uygun imalatın döküm olmasından dolayı,

dökme demir olarak bilinirler. Ayrıca, ergime sıcaklığının düşük olması ve ergitme esnasında meydana gelen karbon kapma olayından etkilenmesi, dökme demirleri döküm malzemesi olarak rakipsiz hale getirmiştir [3].

### 2.1.1 Demir-Karbon Denge Diyagramı ve Ötektik Reaksiyon

Şekil 2.1'deki demir grafit çizgileri dengeli reaksiyonları temsil etmekle beraber, demir karbon alaşımlarında grafitin çekirdeklenmesi çok güç olduğundan, bunun yerine, hemen her zaman dengesiz reaksiyonlar elde edilir [4].

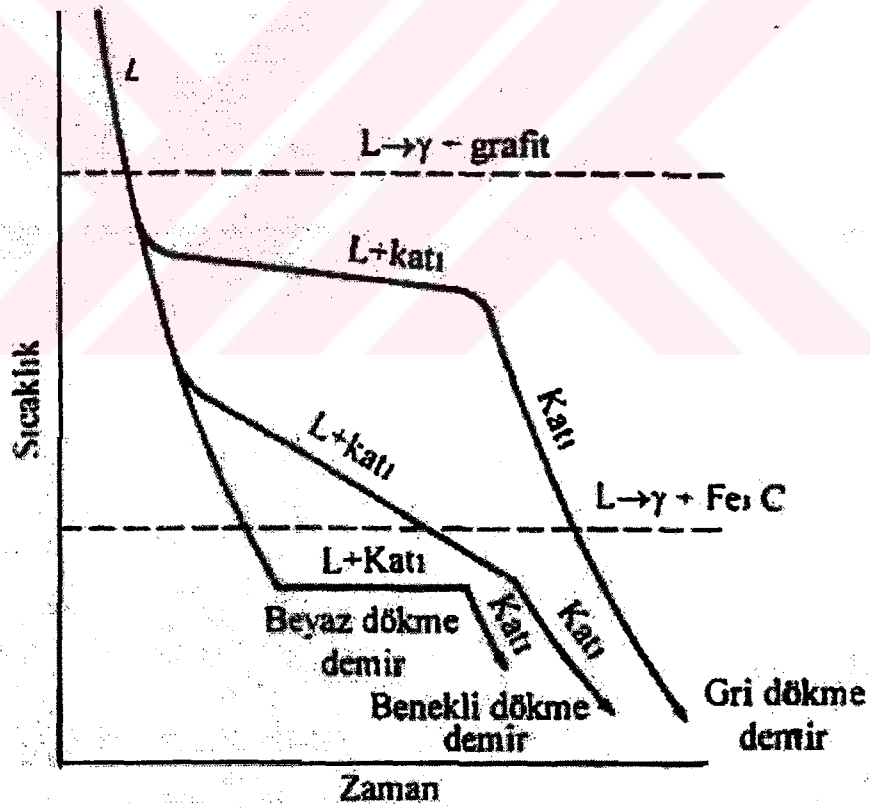


Şekil 2.1 Demir-karbon denge diyagramı [2,4].

İki temel ötektik tipi (kararlı ostenit-grafit [Fe-C] veya yarı kararlı ostenit-demir karbür [Fe-Fe<sub>3</sub>C]), mukavemet, sertlik, tokluk ve süneklik gibi mekanik

özelliklerde büyük farklılıklar gösterirler. İşte bu yüzden, dökme demir üretiminde amaç, istenilen mekanik özellikleri elde etmek için, ötektik tipini, miktarını ve morfolojisini ayarlamaktır. Şekil 2.1'de her iki ötektik sistemini de (Fe-C yada Fe-Fe<sub>3</sub>C) gösteren bir *demir-karbon denge diyagramı* görülmektedir [4].

Katılaşma alt ve üst ötektik sıcaklıklar arasında olursa gri, sünek ve vermicular dökme demir gibi grafit içeren bir dökme demir oluşur. Katılaşma alt ötektik sıcaklığın altında olursa beyaz dökme demir oluşur. Bazı durumlarda her iki ötektik reaksiyon oluşabilir. Benekli dökme demir alt ötektik sıcaklığın üzerinde katılaşmaya başlar, fakat katılaşmayı alt ötektik sıcaklığın altında tamamlar. Beyaz ve gri dökme demir karışımı, hiç bir zaman arzu edilmez [3,4].



Şekil 2.2 Dökme demirin ötektik sıcaklıkları üzerine soğuma eğrilerinin yerleştirilmesi [3].

Dökme demirin yüzeyi beyaz dökme demir oluşturacak yeterli hızda soğurken, dökümün merkezi daha yavaş soğuyarak gri dökme demir

oluşturulduğunda çillendirilmiş dökme demir meydana gelir. Bu dökme demir bazen pahalı olmayan, aşınma direnci gereken parçalar için kullanışlıdır [4].

Dökme demirin yapısında bulunan karbon, silisyum, fosfor gibi alaşım elementlerinin bileşimlerindeki değişiklik, sıvılaşma ve katılaşma sıcaklığı, ötektik bileşim ve mekanik özellikleri etkiler. Bu etkinin derecesi *karbon eşdeğeri* ( $C_{eş}$ ) parametresi ile hesaplanır [3,4].

$$C_{eş} = \% C + (\% Si + \% P) / 3 \quad (2.1)$$

Bu formül ile alaşımın ötektik, ötektik altı veya ötektik üstü kompozisyon da olup olmadığı saptanır. Karbon eşdeğeri ( $C_{eş}$ ) % 4.25 ise dökme demir ötektik yapı gösterir. Aynı değer % 4.25'den küçük olması yada büyük olmasına göre ise, dökme demir sırası ile ötektik altı veya ötektik üstü yapı gösterir [4].

### 2.1.2 Dökme Demirlerdeki Matris Yapı Bileşenleri

Dökme demirlerin mekanik özellikleri, matris yapısı ve karbonun yapıda oluşturduğu faza bağlıdır. Dökme demirlerin önemli yapı bileşenleri grafit, ferrit, perlit, sementit, martenzit, steadit ve ostenittir [2,4].

*Grafit*, dökme demirlerde karbon, bileşik veya serbest halde bulunabilir. Dökme demirlerdeki grafit şekil ve boyut dağılımının özellikler üzerinde önemli etkisi vardır. Gri dökme demirlerde, süneklik özelliğinin olmaması lamel grafitler sebebiyledir. Temper ve küresel grafitli dökme demirlerdeki rozet ve küre grafitler sünekliği lameller kadar kötü etkilemez [2,4].

*Ferrit*, oda sıcaklığında HMK (Hacim Merkezli Kübik) yapıda, demir ile az miktarda karbonun oluşturduğu nispeten yumuşak, sünek ve orta seviyede mukavemetli bir katı eriyiktir. Bileşimdeki silisyum içeren fazdır. Yapısal açıdan dökme demirde serbest halde veya perlit bileşeni olarak bulunabilir. Çekme mukavemeti düşüktür. Silisyum ferriti sertleştirir ve kuvvetlendirir [2,4].

*Perlit*, yan yana sıralanmış ferrit ve sementit tabakalarından oluşmuş iki faz karışımıdır. Mukavemetli, orta sertlikte ve bir dereceye kadar sünektir. Oluşan perlit miktarı yapıdaki grafitleşme derecesi ile orantılıdır [2,4].

*Sementit*, dökme demirlerde, karbon tamamen veya kısmen sementit ( $Fe_3C$ ) halinde kimyasal olarak birleşmiş durumda bulunabilir. Serbest veya kütle şeklindeki sementit, beyaz ve çil uygulanmış dökme demirlerin katılaşması esnasında oluşur. Sementit çok sert ve kırılgan olup, ana bileşimini oluşturduğu dökme demir tiplerine de bu özelliğini yansıtır ve daha çok karbürleştirici ortamda bulunur. Serbest halden başka, perlit ve ledeburit ( $\gamma + Fe_3C$ ) içinde de bulunur. Karbon, dökme demirdeki yüzdesinin yaklaşık 15 katı kadar  $Fe_3C$  meydana getirebilir [2,4].

*Martenzit*, dökme demire alaşım elementi ilavesi ile veya ısıl işlem uygulanarak elde edilir. Çok sert ve kırılgan bir fazdır. Dökme demirin aşınma direnci artırır. Düşük sıcaklıklarda temperlenebilir. Temperleme sıcaklığına bağlı olarak çok farklı mekanik özellikler elde edilir. Alaşım elementlerinden manganez, nikel, molibden, krom, bakır ve kalay sertleşebilirliği artırarak martenzitin oluşumunu teşvik eder [2,4].

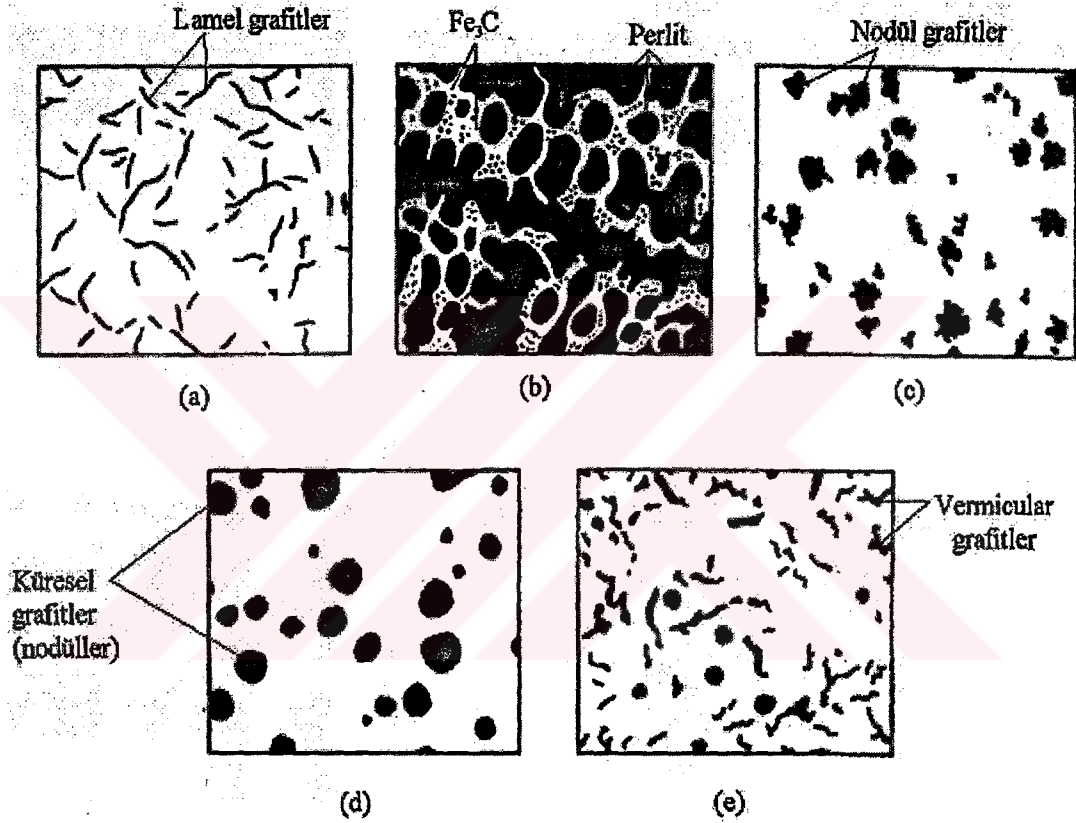
*Steadit*, dökme demirlerde, özellikle gri dökme demirlerde mevcut fosfor (P), düşük ergime dereceli ( $954^{\circ}C-982^{\circ}C$ ) bir  $Fe-Fe_3C-Fe_3P$  ötektiği şeklinde bulunur. Steadit, % 10.2 fosfor içerir. Fosfor, katılaşma esnasında en son katılan bölgelere toplandığından, mikro yapıda steadit bölgeleri çoğunlukla hücreli bir görünüme sahiptir. Demir fosfür de, demir karbür gibi çok sert ve kırılgandır [2,4].

*Ostenit*, demirin yüksek sıcaklıklardaki allotropik şekli olan YMK (Yüzey Merkezli Kübik) demir ile karbonun oluşturduğu, katılaşma esnasında oluşan ve yavaş soğuma ile perlit, ferrit veya ikisinin karışımına dönüşen bir katı eriyik olarak tanımlanabilir. Oda sıcaklığındaki mikro yapıda ostenitin bulunuşu, ancak dökme demirin özel olarak osteniti bu sıcaklıkta kararlı hale getiren nikel ile alaşımlandırılması halinde mümkündür [2,4]. Açıklanan bileşimlerden başka dökme demirlerde metalik olmayan inklüzyonlar da bulunabilir.



### 2.1.3 Dökme Demir Türleri ve Özellikleri

Beş önemli tip dökme demirin her birini üretmek için, uygun ötektik büyümesini teşvik eden modife edici ilaveler ile ötektik katılaşma ve ötektoid dönüşüm veya dökme demirin ısı işleme, çok dikkatli kontrol edilmelidir. Şekil 2.3'te 5 çeşit dökme demirin şematik görünüşleri, Tablo 2.1'de ise dökme demirlerin kimyasal bileşimlerinin alt ve üst sınırları verilmiştir [3].



Şekil 2.3 Beş dökme demirin şematik çizimi. (a) Gri D.D, (b) Beyaz D.D., (c) Temper D.D., (d) Küresel Grafitli D.D., (e) Vermicular Dökme Demir [3].

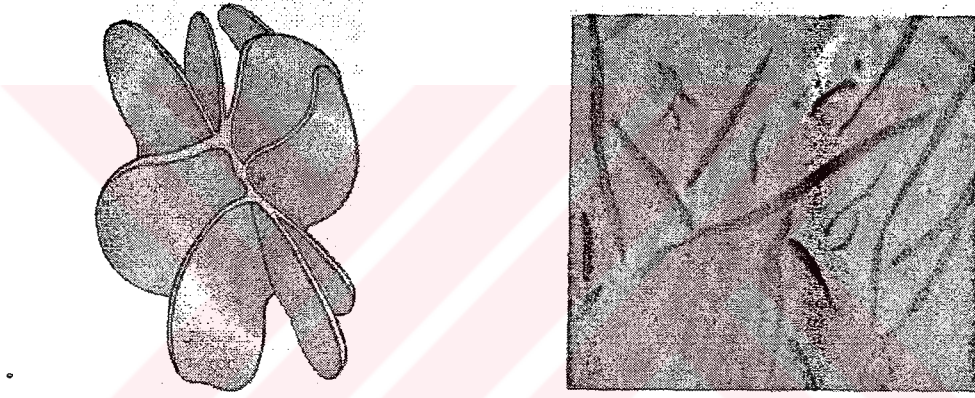
Tablo 2.1 Değişik tipteki dökme demir türlerinin kimyasal bileşimleri [2].

Dökme Demir	% Kimyasal Bileşim				
	C	Si	Mn	P	S
Gri	2.5-4.0	1.0-3.0	0.2-1.0	0.002-1.0	0.02-0.25
Vermicular	2.5-4.0	1.0-3.0	0.2-1.0	0,01-0.1	0.01-0.03
Küresel Grafitli	3.0-4.0	1.8-2.8	0.1-1.0	0.01-0.1	0.01-0.03
Beyaz	1.8-3.6	0.5-1.9	0.25-0.8	0.06-0.2	0.06-0.2
Temper	2.2-2.9	0.9-1.9	0.15-1.2	0.02-0.2	0.02-0.2



### 2.1.3.1 Gri Dökme Demir

Gri dökme demir, dökme demirlerin en yaygın olanıdır. Şekil 2.4'de görüldüğü gibi katılaşma, bir bölgede birbirine yapışmış birçok, kızartılmış patatese benzeyen, birbiriyle bağlantılı grafit lamellerini oluşturur. Lamellerin birleştiği nokta orijinal grafit çekirdeğidir. Gri dökme demir her hücrenin çekirdeklenmesini temsil eden birçok grafit lamel kümelerini, veya ötektik hücreler içerir. Aşılama veya yüksek soğutma hızı, küçük ötektik hücreye sahip ince grafit lamellerinin oluşumuna yardım eder. Bu nedenle dayanım iyileşir [1-4].



Şekil 2.4 Gri dökme demirde grafit lamellerinin çizimi ve fotomikrografi [3].

Gri dökme demir, düşük dayanım ve sünekliğine rağmen birçok cazip özelliklere sahiptir. Pulcuklar baskı yüklemesi altında gerilim artırıcı olarak davranmaz. Bu nedenle gri dökme demir uygun tasarımla büyük yüklemeleri taşıyabilir. Gri dökme demirin işlenebilirliği mükemmeldir. Çünkü grafit lamelleri kırılğan olarak davranır. Kayma aşınmasına karşı direnci iyidir. Grafit yumuşak ve kaygan olduğu için gözenekli pulcuklar yağlayıcı maddeleri emer ve tutar. Grafitin kendisi yumuşak ve kaygan olduğu için kendi kendine bile yağlamayı sağlayabilir. Özellikle lameller kaba olduğunda, titreşimi azaltma özellikleri çok iyidir. Bu özelliklerinden dolayı gri dökme demir motor blokları ve takım tezgahı gövde ve ana parçalar için kullanılır. Buna karşın gri dökme demir çan yapımı için uygun değildir. Küçük boyutlu parçalar, daha çok sürekli kalıplama ile kum ve kokil

döküm olarak, büyük boyutlu ve ağır parçalar ise tek kalıplama ile dökülür. Kayma ve aşınma dayanımından dolayı dişli çark, fren tamburlarında, 600°C'ye kadar yüksek sıcaklıklara dayanım özelliğinden dizel motorların piston ve sekmanlarında, ısıya ve tufallaşmaya dayanıklı olduğundan cam lalibinde ve korozyona dayanımından dolayı tezgah gövdesi ve pis su borusu üretiminde kullanılır [1-4].

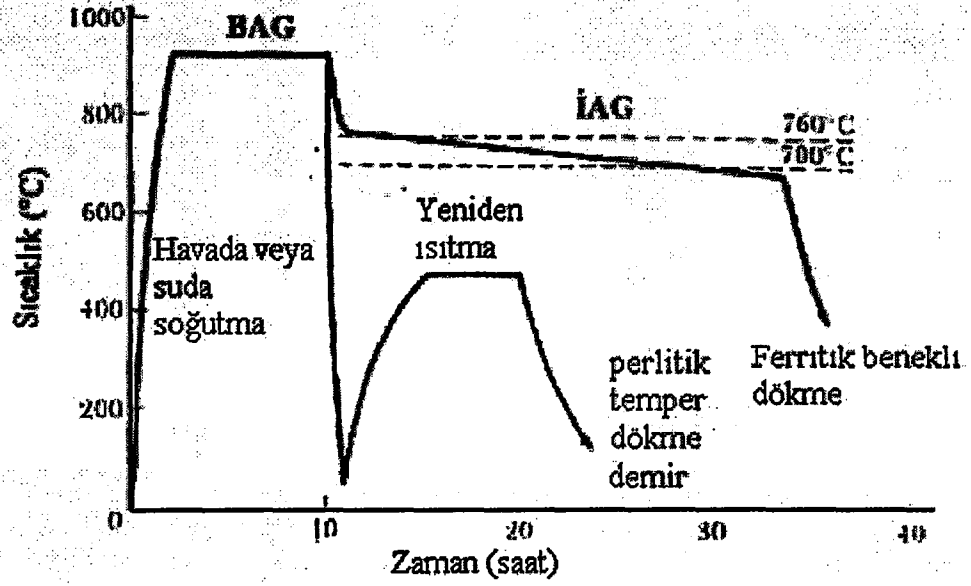
### **2.1.3.2 Beyaz Dökme Demir**

Beyaz dökme demirler katılaşma sıcaklığından hızlı soğuma ile elde edilen ötektoid altı (% 2.5 C ve % 1.5 Si) Fe-Fe<sub>3</sub>C (yarı kararlı) alaşımlarıdır. Karbonun tümüne yakın bir bölümü Fe<sub>3</sub>C ile bileşik halindedir. Tipik mikro yapısı sementit ve perlitten meydana gelir. Yüksek miktarda sementit (Fe<sub>3</sub>C) içerdikleri için çok sert, kırılgan ve aşınmaya karşı dirençlidirler. Mikroskobik yapılarında sementitin bulunması sebebiyle kırılma yüzeyleri beyaz görünümündedir. Bu yüzden bu dökme demir türüne beyaz dökme demir adı verilmiştir [1-4].

Beyaz dökme demirler son derece kırılgan ve işlenmesi zor olduğu için mühendislik alanında pek kullanılamazlar. Sadece taşlanarak işlenebilir. Kendini çekmesinin % 2 olması dökümünü zorlaştırır. Beyaz dökme demirler aşınmaya dayanıklı olması istenen sünekliğin pek önemli olmadığı yerlerde kullanılırlar. Hadde merdanesi buna güzel bir örnektir [1-4].

### **2.1.3.3 Temper Dökme Demir**

Temper dökme demir, alaşımsız beyaz dökme demirin ısı işlemi ile üretilir. Temperleme ısı işlemi esnasında, katılaşma sırasında oluşmuş sementit bozularak, grafit yığınları veya nodüller üretilir. Nodüller veya temper karbon, genellikle patlamış mısıra benzer. Yuvarlanmış grafit şekli, temper dökme demirin iyi bir dayanım ve sünekliğine sahip olmasını sağlar. Temperlenmiş dökme demirin üretimi birkaç aşama gerektirir. Şekil 2.5'de bu ısı işlem aşamaları görülmektedir [1-4].



Şekil 2.5 Ferritik ve perlitik dökme demir için ısıl işlem diyagramı [3].

#### 2.1.3.4 Vermicular Dökme Demir

Vermicular dökme demir ergiyik metalin nodüllesmesinde oluşan yaklaşık % 0.013 kalıntı Mg'la elde edilir. Grafitin şekli, çok sayıda ötektik hücre çekirdeklerine bağlantılı yuvarlanmış çubuk grafitli lamel ve küre arasında bir ara seviyededir. Bu grafitin morfolojisi vermicular (uçları körelmiş yuvarlak grafit) olarak adlandırılır. Bu yapı, küresel grafitli dökme demirdeki aşılama maddeleri azaldığında oluşur [1-4].

Karbonun büyük kısmının lameller yerine küreler (grafit küreleri) şeklinde oluşması için; ergimiş demire az miktarda seryum (Ce), magnezyum (Mg) veya başka bir elementle aşılama yolu ile üretilen dökme demirlere *küresel grafitli dökme demir* denir. Nodüler, sfero, sünek ve düktil demir gibi isimlerle de bilinir. Küreler katılma yoluyla oluştuğu için temper dökme demirden farklı olup, yapıya süneklik ve mukavemet kazandırır. Ayrıca benzer yapıdaki gri dökme demirlere göre daha yüksek tokluk değerine sahiptir [1-4].

## 2.2 Küresel Grafitli Dökme Demirler (KGDD)

Sadece 1940'ların sonlarından itibaren tanınmasına rağmen, küresel grafitli dökme demirin (KGDD) önemi gün geçtikçe büyümektedir. Şu anda gelişmiş ülkelerin üretim pastalarında KGDD üretimi % 20 - % 30'luk bir dilime sahiptir [5].

Küresel grafitli dökme demirlerde grafit, gri dökme demirde olduğu gibi lameller şeklinde değil, küçük küreler şeklindedir. Küresel grafitli dökme demir ile gri dökme demirde toplam karbon miktarı aynıdır. Yapı açısından gri dökme demirden yegane farklığı grafitlerin şeklidir. Grafitler, normal gri demirde lameller halinde bulunur. Bu lamellerden ve içerisindeki boşluklardan dolayı, şekil değiştirebilirlik çok azdır. Grafitin bu kötü etkisini azaltabilmek ve yapının mekanik özelliklerini iyileştirebilmek için, karbonun lamel şeklinden küre haline dönüşmesini sağlamak gerekir. Grafit küre halinde teşekkül ettirilirse yapının dayanım ve sünekliğinde optimum değerlere ulaşılmasının yanı sıra aşınma ve yorulma dirençlerinde de yükselme meydana gelir. Lamel grafitleri küre haline dönüştürmek için döküm esnasında ergimiş demire Mg, Ce, Ca, Li, Na ve Ba gibi alaşımlar ilave edilir. Küreselleştirme işlemi kalıbın yolluğunda da mümkündür. Küresel grafitli dökme demirde grafit partikülleri, ferritik, perlitik yada ferritik-perlitik matris içinde küre şeklinde dağılmış durumdadır. Bu yüzden küresel grafitli dökme demirin gri dökme demire göre çok daha yüksek bir mukavemeti ve dikkate değer ölçüde sünekliği vardır. Küresel grafitli dökme demirin tıpkı diğer özellikleri gibi, bu iki özelliği de ısıtma işlemleriyle ayrıca yükseltilebilir [5-9].

Küresel grafitli dökme demir içindeki küresel grafitler küresel grafitli dökme demire alternatifsiz özellikler verir. Sönüm kabiliyeti ve manyetik özellikleri dışında, gri dökme demirlerin iyi işlenebilirlik ve iyi akışkanlık gibi üstün özelliklerinin yanı sıra çeliklerin de yüksek mukavemet ve tokluk gibi bazı avantajlarını barındırarak mühendislik açısından üstün özelliklere sahip malzemeler haline gelmiştir [5-9].

## 2.2.1 Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Üretimi

Gri dökme demire göre kontrol altına alınması ve dikkat edilmesi gereken bir çok parametre olması sebebiyle üretimi daha sorunludur. Kalite, potadan potaya değişebildiği gibi aynı pota içinde de farklı olabilmektedir. Bu sebeple küresel grafitli dökme demirin yapı ve özelliklerini etkileyen faktörlere dikkat edilmesi çok önemlidir [5-9].

### 2.2.1.1 Ergitme İşlemi

KGDD, indüksiyon ocağında, döner ocaklarda ve kupol ocağında üretilebilir. Gerekli kontroller her ocak için yapılmalıdır. Uygun kok sağlanması ve iyi bir kontrol mekanizması ile KGDD üretiminde kullanılacak en ucuz ve kolay ergitme kupol ocağında sağlanabilir. Kupol ocağında ergitmenin en büyük dezavantajı, koktan kükürt kapılması ve yüksek sıcaklıklara ulaşamamasıdır. Yüksek kükürdün etkisinden korunmak için ocak içinde ve dışında kükürt giderme yöntemleri kullanılmaktadır. İndüksiyon ocakları maliyet ve işletme yönünden kupola göre daha pahalı olmasına karşın yaygın olarak kullanılmaktadır. En önemli avantajları kontrol kolaylığı ve kükürt kapma ve sıcaklık sorunlarının olmamasıdır. Kupol ocağına göre bir diğer avantajı da malzeme kullanımındaki sınırsızlıktır. Yani gerektiğinde % 100 çelik hurda ile KGDD üretimi, gerekli şartlar sağlandığında mümkündür [5-9].

### 2.2.1.2 Ana Metal Analizi

Ana metal analizi karbon, silisyum, mangan, fosfor ve kükürt yüzdesini içerir. Bunlardan en önemlisi karbon eşdeğeri ve kükürt değeridir. Kükürt yüzdesi etkili kalıcı magnezyum miktarının değişmemesi ve ayrıca magnezyumun kükürt dengesinin bozulmaması için % 0.03'den aşağıda olmak durumundadır. Yüksek kükürt oranı genellikle küreselleşmeye etki eder ve lamel grafit oluşumunu teşvik eder.

### **2.2.1.3 Kükürt Giderme**

Bu işlemin uygulanmasının zorunluluğu, şarjı teşkil eden malzemelerin özelliklerine ve seçilen ergitme yöntemine bağlıdır. KGDD'in üretiminde düşük kükürt miktarlarında bir eriyiğin mevcut olması zorunlu olduğundan, kullanılacak karbonlaştırıcının da yüksek karbon ve düşük kükürt miktarına sahip olması gerekir. İndüksiyon ocaklarında banyo yüzeyinin, hacmine oranı çok az olduğundan cüruf reaksiyonları ile kükürt giderme işlemi uygulanamaz [5-9].

### **2.2.1.4 Küreselleştirme**

KGDD'de grafitin küre şeklini almasını sağlayan elementler sayıca fazla olmasına rağmen, pratik uygulamada genellikle az miktarda seryum, kalsiyum ve diğer toprak alkali metallere birlikte magnezyum kullanılır. Grafitin küreselleştirilmesi için gerekli magnezyum miktarı % 0.01'den az olacağı gibi, şartlara bağlı olarak % 0.02'den fazla da olabilir. Sadece magnezyumun küreselleştirici element olarak kullanılması halinde miktarı % 0.02'den az olmaz. Ce, Ca gibi elementlerin birlikte kullanılması durumunda asgari Mg miktarı % 0.01 civarındadır. Eriyiğin kükürt miktarı ile gerekli Mg miktarı artacağından, kükürt miktarı yüksek olan bir baz eriyik ele alındığında, dökümhanelerde kabul edilebilir üst sınır % 0.05 Mg olarak verilebilir [5-9].

### **2.2.1.5 Küreselleştirme İşlemi Esnasında Kalite Kontrol**

Üretim miktarı çok fazla ve hammaddelerin bir kısmında bazı elementlerin analizlerinin bilinmesi halinde veya çok ince kesitli parçaların dökümü söz konusu olduğunda, yaş analiz yöntemlerinin yanında dökümhanelerde spektrometre ve atomik absorpsiyon cihazları da kullanılır. Böylece istenilen hassasiyet sağlanmış olur [5-9].



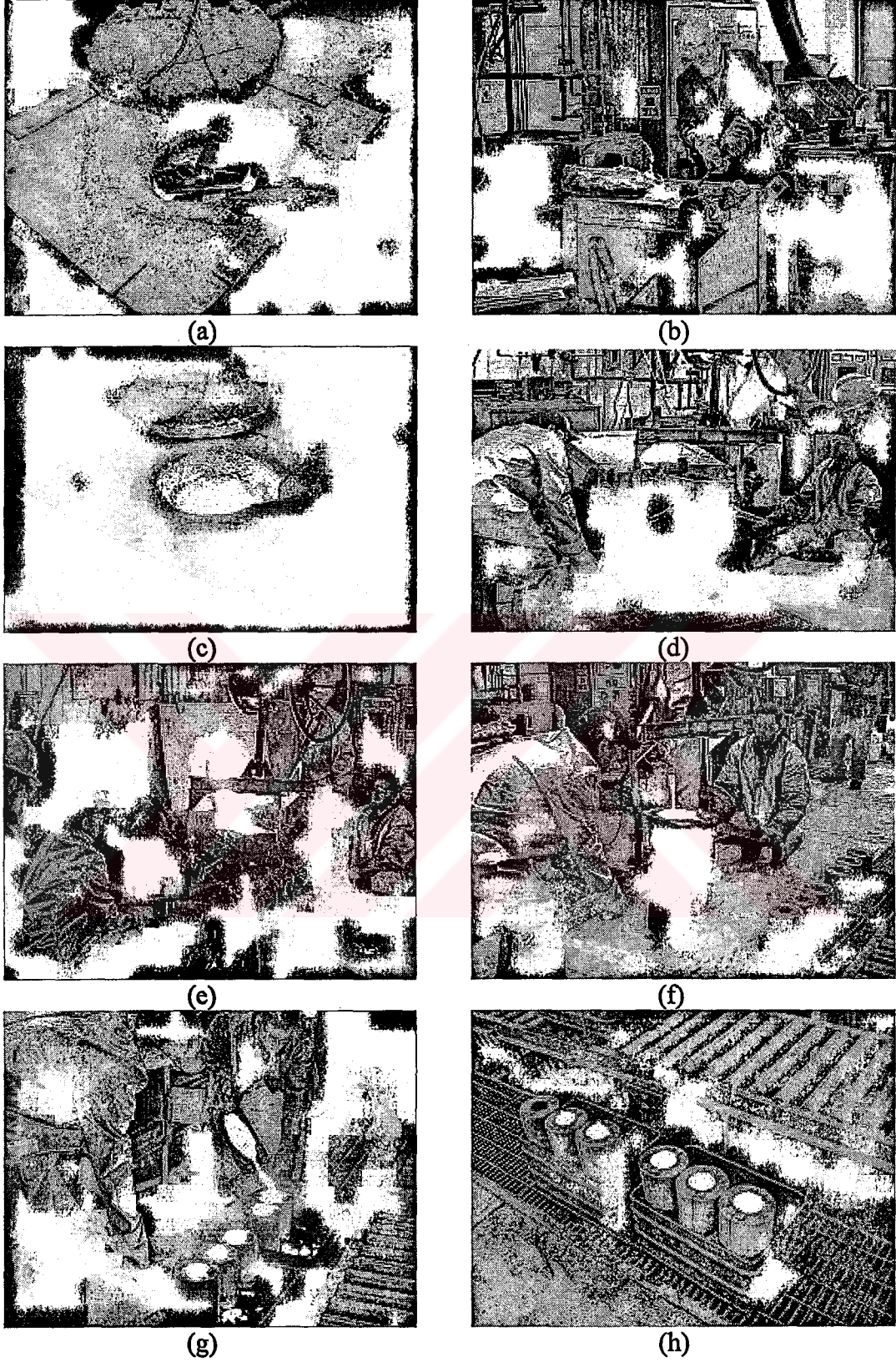
Kalite kontrol çalışmalarının en önemli ve kaçınılmaz olanı hiç şüphesiz grafit şeklinin tespiti olmaktadır. Bu kontrol işlemi her döküm potasından dökülen, yani küreselleştirme işlemi sonunda uygulanmalıdır. Bir pota ile birkaç adet derece sırasıyla dökülecekse, bu durumda en son dökülen parça numune olarak alınmalı ve incelenmelidir. Böylece aşılamanın etkinliğinin azalması ve döküm sıcaklığının düşmesi gibi iki önemli faktörün etkisi göz önüne alınmış olur [5-9].

Metalürjik kaliteyi en hassas ve en doğru şekilde veren büyüklük grafit tane sayısıdır. Değerlendirmeler genellikle 25 mm'lik Y-blok numunesinde yapıldığından, grafit tane sayısı bu şekilde tespit edilmelidir. Grafit tane sayısının asgari sınırı 100 a/mm<sup>2</sup> olarak kabul edilebilir. Tane sayısının tespitinde, hazırlanmış ve dağlanmış numunelerin 100 defa büyütülerek mikroskopik fotoğrafları çekilir ve grafit tane sayısı sıralama resimleri ile karşılaştırma yapılır. Bu işlemin belli zaman aralıkları ile tekrarlanması lazımdır. Özellikle grafit tane sayısının tekrar tespit edilmesi, bize, yöntemsel değişikliğin söz konusu olduğu durumlarda, parça metalürjik özellikleri hakkında seri ve kolay bir biçimde bilgiler verir [5-9].

#### 2.2.1.6 Aşılama

Aşılamanın metalürjik tanımı eriyiğin çekirdek ihtiyacının uygun sayıya getirilmesi işlemidir. Bu çekirdekler, grafitin kristalizasyonu ve büyümesi için elzemdir. KGDD'de aşılama ile küresel grafit kristallerinin oluşumunu sağlayan heterojen nükleler meydana getirilir. Böylece daha önce FeSiMg ile az veya çok yarı aşılansız durumda bulunan eriyik, aşılama yapılması ile çok sayıda çekirdeklere sahip olur. Bu durum karbür oluşumunu da önemli derecede etkiler ve önler. Aşılama, nadiren de olsa magnezyum uygulamasından önce de yapılabilir, fakat yaygın olarak magnezyum uygulaması sonu dökümden hemen önce yapılmaktadır [5-9].

Şekil 2.6'da bir dökümhanedeki küresel grafitli dökme demir üretiminin aşamaları görülmektedir.



Şekil 2.6 KGDD'in üretim aşamaları (a) Ergitme, (b) Kimyasal analiz, (c) Döküme hazır erimiş demir, (d) Erimiş demiri KGDD işlem keçesine almaya hazırlık, (e) Mg ile küreselleştirme, (f) Döküm sıcaklığının ölçülmesi (g) Dökümün gerçekleştirilmesi ve (h) KGDD silindirlere katılması.



## **2.2.2 Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Matris Yapıları**

Dökme demirlerin matrisini ferrit, ferrit + perlit veya sadece perlit teşkil edebilir. Alaşımli dökme demirlerde ise ayrıca ostenitik veya beynitik yapıda bulunabilir. KGDD'lerin mekanik özellikleri önemli ölçüde matris yapısına bağlıdır. Isıl işlem türü, soğuma hızı ve alaşım elementleri, matris yapısını etkileyen faktörlerdir.

### **2.2.2.1 Ferritik Yapı**

Metalik ana yapının çoğunu ferrit ve maksimum % 10 miktarında perlit oluşturmaktadır. Matris ferritik olduğundan, yapının süneklik ve tokluk özelliği son derece yüksek ve aşınma direnci ise düşüktür. Ayrıca yüksek darbe direnci, iyi iletkenlik, iyi işlenebilirliğin yanında ucuz oluşundan dolayı mühendislik alanında önemli yeri vardır. Si, Ti, ve Al ferrit oluşumunu teşvik eden alaşımların başında gelmektedir [5,10].

### **2.2.2.2 Ferritik + Perlitik Yapı**

Matris yapısı ferrit ve perlitten oluşur. Ferritik ve perlitik yapıların ortak mekanik özelliklerini taşımaktadırlar. Bu nedenle en çok tercih edilen KGDD sınıfını teşkil etmektedirler [4,5].

### **2.2.2.3 Perlitik Yapı**

Matris yapısını perlit oluşturur. Ferritik yapıya göre az süneklik ve yüksek mukavemete sahiptir. Aşınma direnci ve işlenebilirliği iyidir. Nispeten kötü darbe direnci gösterirler. Cu, Mn, Ni, B, Sn ve perlit oluşumunu teşvik ederler [4,5].

#### 2.2.2.4 Martenzitik Yapı

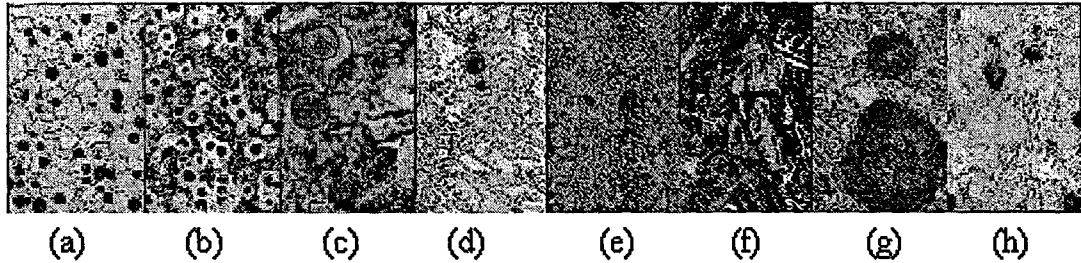
Çok sert ve kırılgan bir yapıdır. Yüksek aşınma direncine sahip bu yapı, ostenit sıcaklığından itibaren (870°C - 925°C) su veya yağ ortamında hızlı soğuma ile elde edilir. Kullanımdan önce genelde temperlemeye tabii tutulur [4,5].

#### 2.2.2.5 Beynitik Yapı

Üst ve alt beynit olarak ikiye ayrılır. Perlite nazaran daha düşük süneklik, darbe direnci ve yüksek mukavemet özelliği gösterirler. Yüksek aşınma direncine sahip bu yapının işlenebilirlik özelliği çok iyidir. Diğer yapılara göre daha pahalıdır. İzotermal olarak veya aşılama ile elde edilebilir. Bu tip dökme demirler ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirler olarak da bilinirler. Bu konu ile ilgili geniş bilgi daha sonraki bölümde verilmiştir [4,5].

#### 2.2.2.6 Ostenitik Yapı

Saf bir demir olarak düşük mukavemet ve yüksek tokluk özelliğine sahiptir. İşlenebilirliği iyidir. Düşük sıcaklıklarda bile (-60°C) ostenitik özelliğini kaybetmemektedir. Minimum % 18 Ni ostenitik matris oluşturmaya yeterlidir. Şekil 2.7'de yukarıda anlatılan matris yapılar gösterilmiştir [4,5].



Şekil 2.7 Küresel grafitli dökme demirlerin değişik tipteki matris yapıları [14]  
(a) Ferritik, (b) Ferritik + Perlitik, (c) Perlitik, (d) Martenzitik,  
(e) Temperlenmiş martenzitik, (f) ve (g) Beynitik ve (h) Ostenitik.

### 2.2.3 Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Standartları

Bir çok ulusun küresel grafitli dökme demirlerle ilgili standartları vardır. Bu normlar genel olarak malzemenin çekme dayanımı, % 0,2 akma sınır, uzama, sertlik ve matris yapılarındaki durumlarına göre yapılmaktadır. Tablo 2.2’de KGDD’lerin uluslararası standartları ve bu standartların karşılaştırmaları, Tablo2.3’de kimyasal kompozisyonları verilmiştir[11].

Tablo 2.2 Çeşitli ülke KGDD normlarının karşılaştırılması ve özellikleri [11].

Ülkeler								Özellikler				
TR	ISO	F	GB	NL	D	USA		Çekme Dayanımı MPa	% 0,2 Uzama dayanımı MPa	Uzama %	Sertlik HB	Doku F: Ferritik P: perlitik
TSE 526	ISO 1083 1976	AFNOR NF 32201	BS 2783 1973	NEN 6002D 1966	DIN 1693 1973	ASTM A536 1972	SAE J434B 1970					
DDK 35.3					GGG 35-3			350	220	22		
	370-17	FGS 370-17	370-17					370	230	17	≤ 179	F
				GN 38				373	245	17	≤ 180	F
DDK 40.3					GGG 40-3			400	250	18		
					GGG 40			400	250	15	120	F
	400-12	FGS 400-12						400	250	12	180	F
				GN 42				412	275	12	≤ 201	F
						60-40-18		414	276	18	< 200	
							D 4018	414	276	18	149	F
DDK 40			420-12					420	250	12	187	F
						65-45-12		448	310	12	≤ 170	
							D 4512	448	310	12	≤ 201	F + P
				GN 50				490	343	7	170	F + P
DDK 50			500-7					500	310	7	207	F + P
	500-7	FGS 500-7			GGG 50			500	320	7	156	F + P
						80-55-06		552	379	6	217	
							D 5506	552	379	6	170	P + F
				GN 60				588	412	2	240	P
DDK 60			600-3					600	350	3	170	P + F
	600-3	FGS 600-3						600	370	3	241	P + F
					GGG 60			600	380	3	170	P + F
				GN 70				686	490	2	241	P
						00-70-03		689	483	3	187	
							D 7003	689	483	3	241	P
DDK 70			700-2					700	400	2	302	P
	700-2	FGS 700-2						700	400	2	229	P
					GGG 70			700	440	2	302	P
DDK 80			800-2					800	460	2	229	P
	800-2	FGS 800-2						800	480	2	302	P
					GGG 80			800	500	2	210	P
						20-90-02		827	621	2	320	

Tablo2.3 KGDD'lerin kimyasal kompozisyonları [11].

Tanım	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cu	% Mg
GGG-40	3.2-4.0	1.5-2.8	0.05-1.0	0.08	0.02	-	0.03-0.08
GGG-50	3.2-4.0	1.5-2.8	0.05-1.0	0.08	0.02	0-0.5	0.03-0.08
GGG-60	3.2-4.0	1.5-2.8	0.05-1.0	0.08	0.02	0-0.7	0.03-0.08
GGG-70	3.2-4.0	1.5-2.8	0.05-1.0	0.08	0.02	0-1.0	0.03-0.08

## 2.2.4 Küresel Grafitli Dökme Demirin Kullanım Alanları

KGDD'ler yüksek mukavemet, çok iyi tokluk, aşınma direnci ve yorulma dayanımı özellikleri gösterdikleri için bir çok sanayi sektöründe kullanım alanı bulmuşlardır. Bu parçaların bazı sektörlerle göre dağılımı Tablo 2.4'te verilmiştir[11].

Tablo 2.4 Küresel grafitli dökme demirlerin kullanım alanları [11].

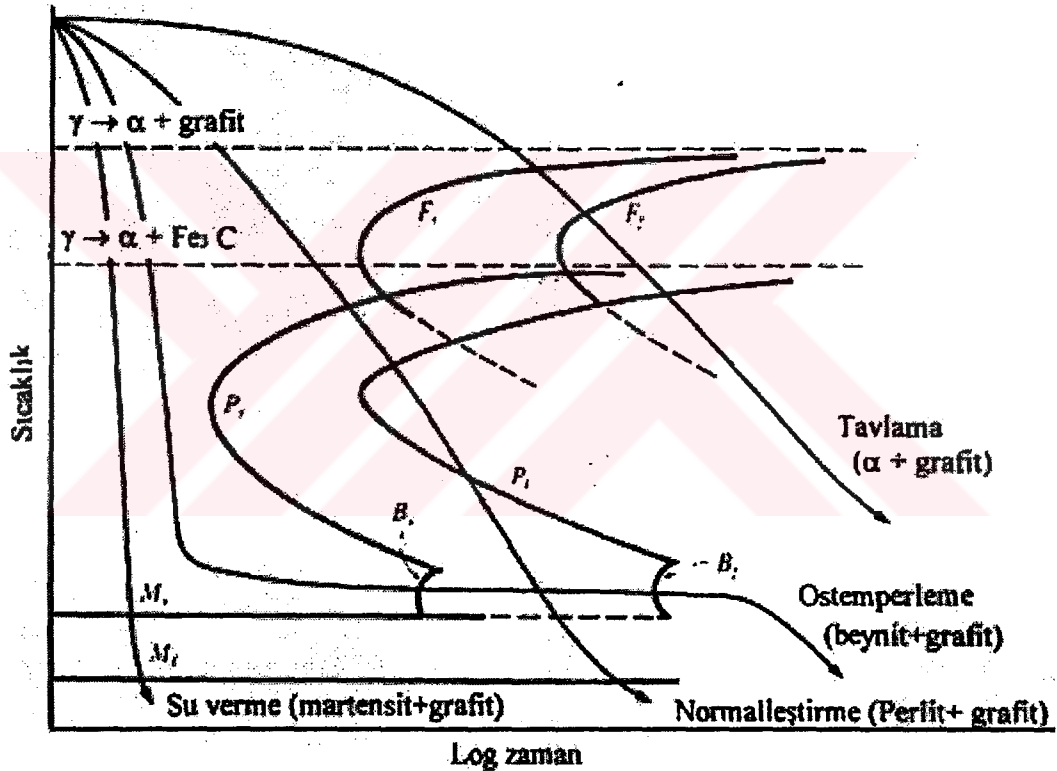
DDK-40	DDK-50	DDK-60	DDK-70	DDK-80	DDK-35,3 DDK 40,3
<ul style="list-style-type: none"> <li>• İnşaat iskele parçaları</li> <li>• Fren merkezleri</li> <li>• Büyük tekerlekler</li> <li>• Potalar</li> <li>• Fırın ve ocak kapakları</li> <li>• Pnömatik makas pistonları</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kompresör pistonları</li> <li>• Tekerlekler</li> <li>• Pompa gövdeleri</li> <li>• Dişli kutuları</li> <li>• Traktör parçaları</li> <li>• Tarım makine parçaları</li> <li>• Valfler</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Büyük dişliler</li> <li>• Kağıt sanayinde kullanılan haddeler</li> <li>• Hidrolik kontrol alet yatakları</li> <li>• Uçak motor parçaları</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kam milleri</li> <li>• Kazıcı uçlar</li> <li>• Kavramalar</li> <li>• Pistonlar</li> <li>• Kalıplar</li> <li>• Makine parçaları</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Piston kolları</li> <li>• Hadde silindirleri</li> <li>• Krank milleri</li> <li>• Soğuk kalıplar</li> <li>• Kam milleri</li> <li>• Makine kılavuzları</li> <li>• Palet makaraları</li> <li>• Küçük dişliler</li> </ul>	<p>Darbe direncinin önemli olduğu dökümler</p>

## 2.2.5 Küresel Grafitli Dökme Demirlere Uygulanan Isıl İşlemler

Küresel grafitli dökme demirlerde istenen özellikler matris yapıya bağlı olarak değişir ve öncelikle ferrit, perlit miktarlarının farklı olması ile bütün normlaştırılmış türler üretilirler. Ferritik ve perlitik matris dokularının elde edilmesi katkı elementleri ile veya ısıl işleme sağlanır. KGDD'ler ısıl işleme son derece uygun olduğundan, özellikleri çok geniş bir aralıkta değişecek şekilde üretilebilirler.

Matris yapıdaki karbon miktarı, alaşım ilavesi, dökümhane işlemlerinin kontrolü veya ısıtma işlemler ile matris yapı, tamamen ferritik, perlitik-ferritik, tamamen perlitik, martenzitik, beynitik veya tamamen ostenitik olabilmektedir[3,12].

Isıl işlem; gerilim gidermek, döküm halindeki karbürleri parçalamak, matris yapısını değiştirmek, yüzey sertleşmesini sağlamak ve temper gevrekliğini minimuma indirmek için uygulanır. Şekil 2.8'te KGDD'lere uygulanan ısıtma işlemler için gerekli izotermal dönüşüm diyagramı görülmektedir [3,12].



Şekil 2.8 Isıl işlemler için gerekli izotermal dönüşüm diyagramı [3].

### 2.2.5.1 Gerilim Giderme Isıl İşlemi

Bu işlem daha çok yüksek sıcaklıklarda boyut hassasiyeti istendiğinde uygulanır. Boyut ve şekline bağlı olarak parçada oluşan iç gerilmeleri maksimum oranda gidermek için parça 538°C-677°C sıcaklıklarında, kesit kalınlığının her 25

mm'si için 1 saat olacak şekilde tutulur ve 300°C'ye kadar 55°C/saat hız ile daha sonrada havada olmak üzere soğutulur [3,12].

### 2.2.5.2 Yumuşatma Isıl İşlemi

Bu işlemin başlıca iki amacı vardır. Bunlardan biri mevcut olan karbürleri parçalamak, diğeri ise ferritik bir matris oluşturmaktır.

*Tam tavlama*, karbürlerin parçalanması 900°C'de 2 saat beklemekle gerçekleşebilir. Kalın kesitli parçalar kesit kalınlığına uygun olarak bekletilir. Daha sonra parça 690°C'ye soğutulup bu sıcaklıkta 5 saat süre ile bekletilir ve oda sıcaklığında soğutulur [3,12].

*Kritik sıcaklık altında tavlama*, dökülen parçaların karbürsüz ve tamamen ferritik yapıda olabilmesi için kritik dönüşüm sıcaklığının (A1) 55°C altında yaklaşık 5 saat tutmak ve parça kalınlığını da dikkate alarak beklettikten sonra 595°C'ye kadar yavaş soğutulup sonra havada soğutulur [3,12].

### 2.2.5.3 Normalizasyon İşlemi

Yapıyı ostenit haline getirmek için gerekli sıcaklık, karbürler mevcut ise 900°C olarak, değilse A1 sıcaklığının 30°C üstünde seçilir. Bu sıcaklıkta bekletme süresi 1 saat + kalınlığın her 25 mm'si için 1 saat şeklinde olmaktadır. Soğutma genellikle sakin havada yapılır. Normalizasyon işleminden sonra matris yapı perlitik olur. Normalizasyon daha iyi sonuç verebilmesi için % 1.5'e kadar Cu ve % 0.075 Sn alaşım elementleri olarak katılırsa matris yapı tamamen perlitik olur. Cu elementi sertlik ve mukavemet değerini yükseltir [3,12].

#### **2.2.5.4 Su Verme ve Temperleme**

Üst kritik sıcaklığın 50°C üzerinde ostenitleştirilir. Parça ferritleştirmede olduğu gibi et kalınlığına bağlı olarak bu sıcaklıkta bırakılır ve sıcaklığı azami 95°C olan yağda soğutulur. Su vermeyi takip eden işlem temperlemedir. Seçilen temperleme sıcaklığına (430°C–650°C) bağlı olarak değişen sertlik değeri elde edilir[3,12].

#### **2.2.5.5 Yüzey Sertleştirme**

KGDD parçaların dış yüzeylerinde belli kalınlıkta sert bir tabakanın olması istendiğinde bu ısıl işlem uygulanır. Parçanın özü süneklik özelliğini korur. İndüksiyon veya alevle parça yüzeyi ostenitleştirme sıcaklığına hızlı bir şekilde tavllanır ve sonra hızlı bir şekilde genellikle suda soğutulur. Ferritik KGDD'ler perlitik KGDD'lere nazaran yüzey sertleştirme işlemine daha az uygundur. Pratik olarak elde edilen maksimum sertlik 55–60 HRC arasındadır [3,12].

#### **2.2.5.6 Ostemperleme Isıl İşlemi**

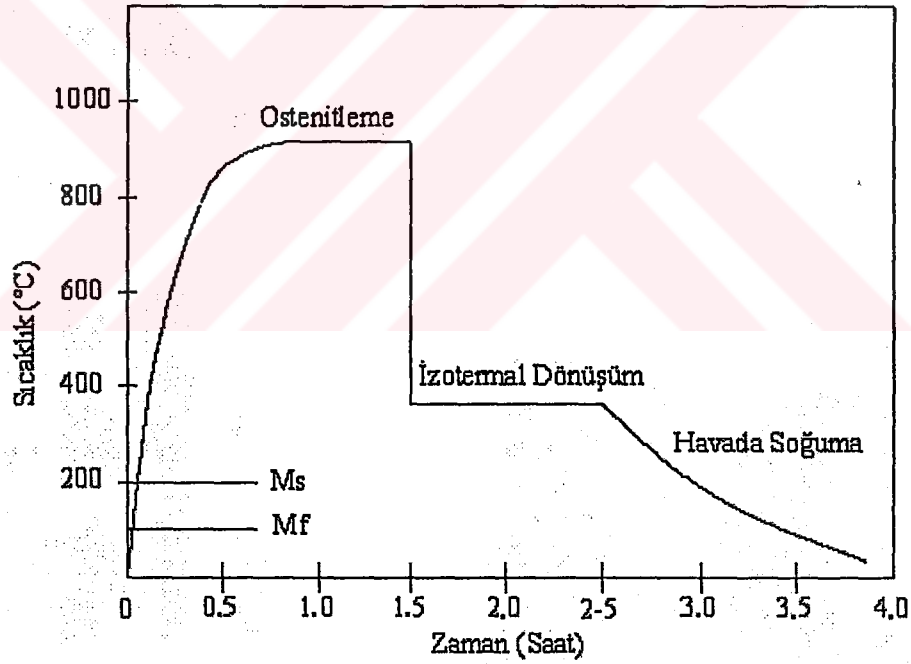
Ostemperleme ısıl işlemi iki kademeli izotermal (sabit sıcaklıkta) bir ısıl işlemdir. Ostemperlenecek malzeme öncelikle 850°C–950°C sıcaklıklar arasında ostenitleme işlemine tabi tutulur. Ardından izotermal bekleme sıcaklık aralığında (235°C–400°C) su verilerek bu sıcaklıkta beynit dönüşümü tamamlayıncaya kadar bekletilir. Daha sonra malzemeler havada soğutularak ısıl işlem tamamlanır. Ostemperleme sırasında, malzemelerin yüzey dekarbürizasyonunu önlemek için, ostenitleme aşamasında ve izotermal bekleme aşamasında atmosfer kontrollü fırınlar, yüksek sıcaklıklı tuz banyoları veya akışkan yataklı fırınlar kullanılabilir. Ostemperleme ısıl işlemi gelecek kısımda ayrıntılı bir şekilde işlenmiştir [3,12].



## 2.3 Ostemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirler

### 2.3.1 Ostemperleme Isıl İşlemi

Ostemperleme, ostenitleme ve ostemperleme kademelerini oluşturan izotermal bir ısıl işlemdir. Şekil 2.9'dan da görüldüğü gibi malzeme ostenitleme sıcaklığına (850°C-950°C) ısıtılır, daha sonra tuz ve yağ banyosunda (genelde tuz banyosu) hızla ostemperleme sıcaklığına (235°C-400°C) soğutulur, beynit dönüşümü oluşana kadar sabit sıcaklıkta bir süre (0.5-4 saat) tutulur ve son olarak malzeme banyodan çıkartılarak havada oda sıcaklığına kadar soğutulur. Şekil 2.10'da küresel grafitli dökme demir için bir izotermal dönüşüm (IT) diyagramı gösterilmektedir [12-14].

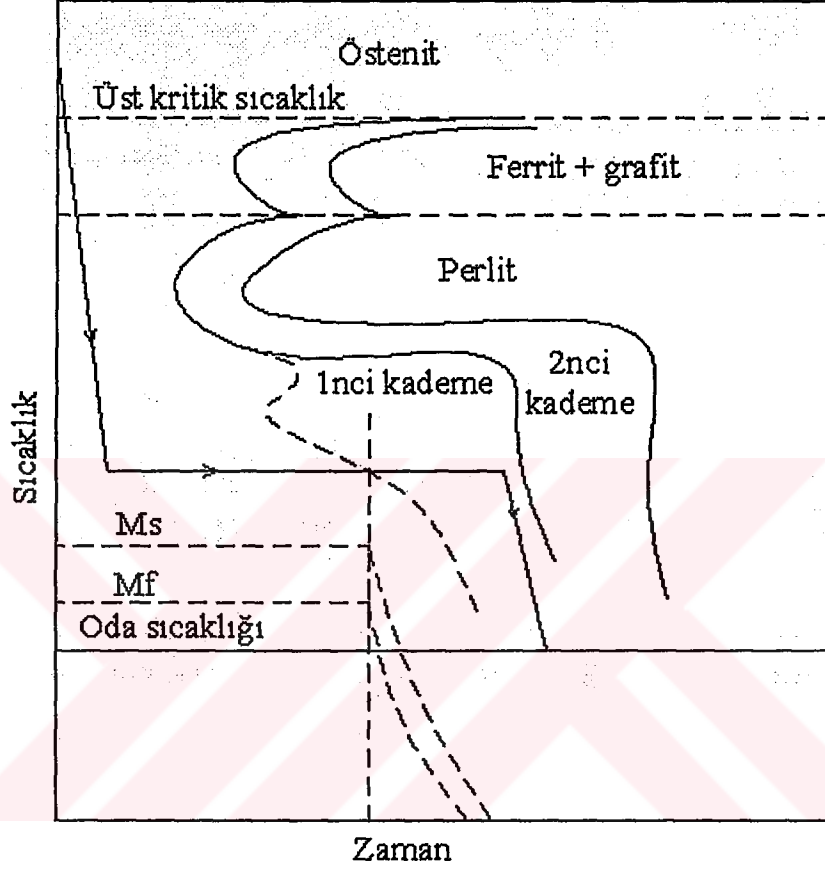


Şekil 2.9 Tipik ostemperleme ısıl işlem şeması [12-14].

Ostemperleme sıcaklık aralığındaki dönüşüm, ara yüzey ve tane sınırlarında beynitik ferritin çekirdeklenmesi ile başlayarak ostenite doğru ilerler. Aynı zamanda karbon, büyüyen ferrit levhalarından ostenite atılır. KGDD'de çeliğin tersine yüksek silisyum miktarı ostenitte sementit oluşumunu önler. Bu yüzden Şekil 2.11'de de

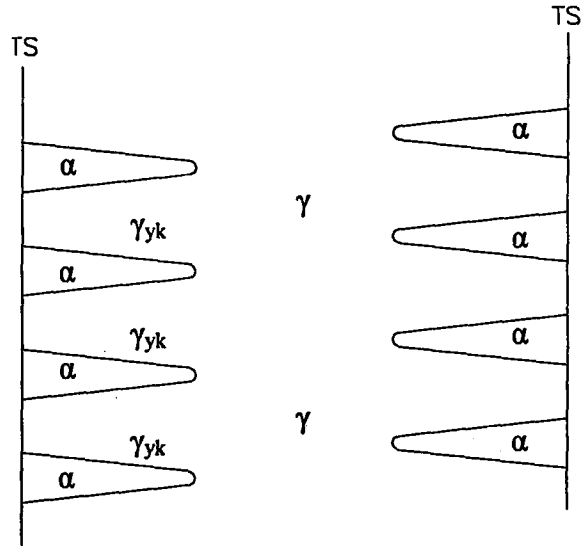


görüldüğü gibi beynitik dönüşümün ilerlemesi ile osferrit yapı içerisindeki yüksek karbonlu ostenitin karbon içeriği devamlı artar ve ostenit karbonca zenginleşerek, beynitik ferrit levhalarının büyümesini engeller ve kararlı hale gelir [12-14].



Şekil 2.10 Küresel grafitli dökme demirin izotermal dönüşüm (IT) diyagramı[4].

Ostenitin karbon içeriği % 2'ye kadar çıkarılır. Ostenit bu yüksek karbon içeriği ile  $-120^{\circ}\text{C}$  gibi düşük sıcaklıklarda bile kararlı olabilir. Ancak bu yüksek karbonlu ostenit her zaman kararlı değildir. Ayrıca yüksek ostemperleme sıcaklıklarında karbür tanecikleri ostenit fazında çökerek ostenit fazını, ferrit + karbür fazına dönüştürmektedir. Bu yüzden beynitik reaksiyon devam ederken yüksek karbonlu ostenit, karbon reaksiyonunu sürdürür ve sonuçta ostemperleme sıcaklığına bağlı olarak 2 çeşit mikro yapı oluşur [15].



Şekil 2.11 Beynitik ferrit ( $\alpha$ ) levhalarının orjinal ostenit ( $\gamma$ ) ve yüksek karbonlu ostenit ( $\gamma_{yk}$ ) içinde tane sınırından (TS) büyümesinin şematik gösterilişi [3,15].

Düşük ostenperleme sıcaklığında ( $330^{\circ}\text{C}$ 'nin altında) ferritik iğnelerin büyüme hızı yüksek ve aynı zamanda karbon difüzyon hızı düşüktür. Bu nedenle beynitik ferritteki yüksek karbon içeriği başlangıçta, distorsiyona uğramış tetragonal bir kristal yapı meydana getirir. Ostemperleme işleminin ilk kademesinde karbon ferritten atılır ve ferrit iğneleri içinde  $\epsilon$ -karbür ( $\text{Fe}_{2,4}\text{C}$ ) olarak çöker. Bu genellikle *beynitik karbür* olarak adlandırılır [12,15].

Beynitik karbürden yüksek karbonlu ostenite az bir karbon atılması ile dönüşüm sürekli devam eder. 0.5–3 saat ostemperleme işleminden ve oda sıcaklığında soğumadan sonra yapıda sadece az miktarda yüksek karbonlu ostenit kalır. *Alt beynit* olarak tanınan bu yapı beynitik ferrit ve yaklaşık % 10 yüksek karbonlu ostenit ihtiva etmektedir [16,17].

Yüksek ostemperleme sıcaklığında ( $330^{\circ}\text{C}$ 'nin üstünde) farklı dönüşüm mekanizması sonucu üst beynit olarak tanınan mikro yapı oluşur. Karbon difüzyonu çok hızlıdır. Bu yüzden karbonun büyük bir miktarı, büyüyen beynitin ferrit levhalarının dışına doğru difüzyona uğrar ve büyüyen ferrit levhaları arasındaki osteniti zenginleştirir. Ostenit karbonca zenginleşirken ferritin büyümesi engellenir

ve ostenit kararlı hale gelir. Sonuçta nispeten kaba ferrit levhaları ve % 40'dan fazla yüksek karbonlu ostenit içeren bu yapı, *üst beynit* olarak adlandırılır [16,17].

Genel olarak KGDD'lerde beynitik dönüşüm 2 aşamalı reaksiyon olarak tanımlanır [17,18].

*1nci kademe*, ostenit, beynitik ferrit ve karbonca zengin ostenite ayrışır.

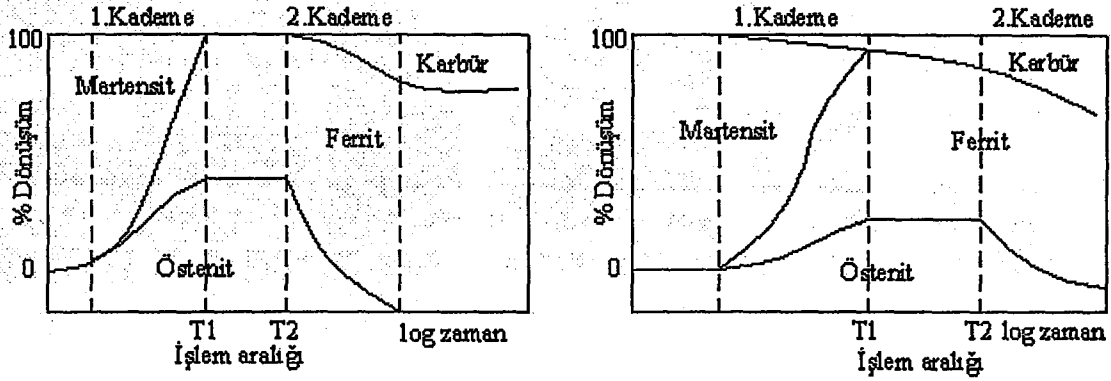
*2nci kademe*, karbonca zengin ostenit, ferrite ve karbüre ayrışır.

1nci kademe reaksiyonda yapı tamamen ferrit ve karbonca zengin ostenitten oluşmaktadır. Yüksek karbonlu ostenit miktarının yüksek olduğu ve bu yüzden yüksek tokluk özelliği gösteren birinci kademe reaksiyonu, *tokluk reaksiyonu* olarak da tanınır ve ostemperleme işlemi sonucu oluşan yapı tam ostemperlenmiş KGDD yapısıdır. Bu reaksiyonda dikkat edilmesi gereken en önemli husus uygun ostemperleme süresinin seçimidir. Yani ostemperleme süresi ostenitin oda sıcaklığına soğuması sırasında martenzite dönüşmeyecek kadar uzun ve karbüre dönüşmeyecek kadar kısa olmalıdır [17,18].

2nci kademe reaksiyonunda ostemperleme süresinin uzaması ile karbonca zengin ostenit parçalanarak, ferrit ve karbür oluşturulur. Böylece yapı ferrit + karbür ve az miktarda da karbonca zenginleşmemiş karasız ostenitten oluşmaktadır. Genel olarak karbür oluşum reaksiyonu sonucunda OKGDD'lerdeki tokluk ve mukavemet özellikleri, ferrit + karbürden oluşan normal KGDD ile benzerlik göstermektedir. 2nci kademe reaksiyonda karbür oluşması nedeni ile matris sertliği artar fakat süneklik ve darbe direnci önemli ölçüde azalır. Bu yüzden 2nci reaksiyon süneklik ve tokluğu azaltmasından dolayı *gevreklik reaksiyonu* olarak da adlandırılır ve istenmeyen bir durum teşkil eder [17,18].

Üst beynit dönüşümü ile alt beynit dönüşümü arasında 1nci ve 2nci kademe reaksiyonları bakımından bir benzerlik söz konusudur. Fakat Şekil 2.12'den de görüldüğü gibi 1nci kademe reaksiyonda üst beynitte hiç karbür oluşmaz iken alt beynitte ferrit dilimleri arasında karbürler gözlenmiştir. Şekil 2.12'den de görüldüğü gibi optimum mekanik özellikler elde etmek için T1-T2 gibi uygun bir *işlem (proses)*

aralığında çalışmakta fayda vardır. Bu işlem aralığı 1nci reaksiyonun bittiği (T1) ve 2nci reaksiyonun başladığı (T2) aralıktır [17].



Şekil 2.12 Üst ve alt beyните ait 1nci ve 2nci kademe reaksiyonları [16].

### 2.3.2 Uygun İşlem (Proses) Aralığı ve Mikro Yapıyı Etkileyen Faktörler

OKGDD'lerde mikro yapıyı kontrol edebilmek ve istenen mekanik özellikleri elde edebilmek için 1nci kademe reaksiyonunu çok iyi kontrol etmek gerekir. Bu kademenin kontrolü uygun ostemperleme sıcaklığı ve süresinin seçimiyle mümkün olmaktadır.

Ostemperleme kısa sürede gerçekleştiği zaman ostenit, düşük karbon içeriği yüzünden henüz oda sıcaklığına gelmeden kısmen martenzite dönüşür ve yüksek karbonlu ostenit miktarında azalma meydana gelir. Ostemperleme süresinin çok uzun olması sonucunda ise karbonca zengin ostenit ferrit ve karbüre ayrışır. Her iki durumda da malzemenin süneklik ve tokluğuna zarar verilir. Bu yüzden maksimum ve nispeten iyi sertlik elde etmek için uygun bir proses aralığı seçilmelidir. Proses aralığını ise malzemenin kimyasal bileşimi, ostenitleme sıcaklık ve süresi, ostemperleme sıcaklık ve süresi etkilemektedir. Bu faktörler aşağıda detaylı olarak ele alınmıştır.

### 2.3.2.1 Alaşım Elementlerinin Mikro Yapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi

En kısa ısıl işlem ve optimum özelliklere sahip OKGDD üretmek için, uygun metal bileşimin seçimi ve kontrolü gereklidir. Bu nedenle 3 önemli noktaya dikkat edilmelidir [18].

1. Dökme demirdeki alaşım miktarı yapıyı perlite dönüştürmeyecek kadar yeterli olmalıdır. Fakat beynitik dönüşüm için gerekli ostemperleme süresini artırmamalıdır [18].
2. Yapı, hücreler arası karbür ve fosforlar içermemelidir [18].
3. Farklı alaşım elementlerinin segregasyon etkileri minimuma indirilmelidir. Döküm sırasında dikkatli bir şekilde kontrol edilmesi gereken alaşım elementlerinin etkileri aşağıda incelenmiştir [18].

KGDD'de genellikle % 3.6 olan *karbon* oranının % 6.4'e doğru artması sonucu, grafitin hacim oranı artmakta ve bunun sonucunda çekme ve akma mukavemetleri düşmektedir. Sertlik ve % uzama değerleri karbon miktarındaki artışla çok az bir değişim göstermektedir [18].

*Silisyum* öncelikle grafit kürelerinin etrafında toplanır ve karbon çözünürlüğünü azaltarak reaksiyon hızını yükseltir. Karbür çökmesine engel olan Si, yüksek karbonlu ostenit miktarını artırır. Si içeriğinin artması su verme ve ostemperleme işlemi sırasında ferritin ve perlitin oluşmasına ve dolayısıyla çekme özelliklerinin düşmesine neden olmaktadır. Diğer alaşım elementlerinin ilavesi ile yüksek silisyumlu malzemelerde sertliği yükseltmek mümkündür [18].

*Mangan*, KGDD'lerin katılaşması sırasında hücreler arası bölgelere çökerek bu bölgelerde karbon çözünürlüğünü artırır ve osteniti kararlı hale getirir. Aynı zamanda ostenit içindeki karbon difüzyonunu azaltarak ostemperleme işleminde beynitik dönüşümünü yavaşlatılır.

Sonuçta hücreler arası bölgelere ostenit dönüşümü gecikir ve ostemperleme sıcaklığından soğuma esnasında yüksek karbonlu ostenitin büyük bir bölümü martenzite dönüşerek malzemenin sertliğini artırır. Böylece OKGDD'lerin yorulma direnci ve kırılma tokluğunu büyük ölçüde düşürür. Genel olarak Mn miktarındaki artış OKGDD'lerde süneklik, yorulma direncini ve kırılma tokluğunun düşmesine neden olmaktadır. Bu yüzden Mn miktarı maksimum % 0.3 olmalıdır [18,19].

300°C–400°C arasında ostemperleme sıcaklıklarında % 1.5 a kadar *bakır* ilavesi, OKGDD'lerin çekme mukavemet ve sertliğinin çok az etkiler. 350°C ve altındaki sıcaklıklarda süneklik bakır artışı ile sürekli artar. Fakat yüksek ostemperleme sıcaklıklarında Cu miktarının malzeme özelliklerine herhangi bir etkisi yoktur. OKGDD'ler de bakırın yüksek karbonlu ostenit miktarına etkisi üzerine herhangi bir çalışma olmamıştır. Cu ilavesi alt beynitte karbon oluşumunu engellemek suretiyle 350°C ve altında yapılan ostemperleme sıcaklıklarında OKGDD'lerin sünekliğini artırır [18,19].

300°C–400°C arasındaki ostemperleme sıcaklıklarındaki % 1'e kadar *nikel* ilavesi OKGDD'lerin çekme mukavemet, sertlik ve sünelik özelliklerine önemli etkisi yoktur. Ancak nikel miktarının % 1'den % 4'e kadar artması sonucu özellikle 350°C altında yapılan ostemperleme işleminde OKGDD'lerin çekme mukavemetini azaltır [18,19].

Bütün ostemperleme sıcaklıklarında nikel içeriği % 1'in üzerine çıktığında malzemenin sertliğinde azalma görülmüştür. Diğer bir çalışmada nikelin aynı bakırda olduğu gibi alt beynitte de karbür oluşumunu geciktirerek sünekliğin artmasına neden olduğu görülmüştür. Ancak bu miktar % 2'yi aştığı zaman ostemperleme işleminden sonra havada soğuma sırasında martenzit oluşumuna sebebiyet vererek, süneklik özelliğinin düşmesine neden olur [18,19].

Nikel ostemperleme reaksiyonunu kontrol ederek istenen beynitik ferrit dönüşümünü geciktirir. Yani ostemperleme süresini artırır. En önemlisi tokluğu azaltmaksızın istenen nihai mikro yapı ve özelliklerini elde etmek için ostemperleme sıcaklığında daha uzun tutma süresine müsaade ederek yüksek karbonlu osteniti

kararlı kılar. Ni ve Mo birlikte kullanıldığında malzemenin sertleşebilirliği artar [18,19].

*Molibden* miktarının artması ile OKGDD'lerin çekme mukavemeti ve sertliği artarken, özellikle % 0.2 aşması halinde % uzamasında önemli ölçüde azalma meydana gelir. Mo hücreler arası bölgelerde segregasyona uğrayarak, karbür oluşumuna ve dolayısıyla bölgesel olarak martenzit oluşumuna neden olur. Molibdenin OKGDD'ler üzerindeki davranışı aynı manganın davranışına benzemesine rağmen sertleşebilme özelliği çok yüksektir ve beynitik dönüşüm süresini arttırarak, gerekli ostemperleme süresini bir hayli arttırır [18,19].

*Krom ve fosfor* ötektik tane sınırlarına çökelerek, bu bölgelerde karbür, fosfor ve karbür–fosfor kompleksleri oluşturarak malzemenin mekanik özelliklerine zarar verirler. Bu yüzden kötü işlenebilirliğe ve düşük sünekliğe yol açtıkları için OKGDD'lerde istenmezler veya maksimum % 0.05'e kadar müsaade edilir [18,19].

### **2.3.2.2 Ostenitleme Sıcaklığı ve Süresinin Mikro Yapıya Etkileri**

Ostenitleme sıcaklık ve süresi, ostenit karbon içeriğini belirlemede ve OKGDD'lerin mikro yapı ve mekanik özelliklerinin tayininde çok önemli bir etkidir. Ostenitleme sıcaklığı genellikle 815°C–925°C arasındadır. Ostenitleme sıcaklığı, ostenit matrisindeki karbon içeriğini belirlemede en önemli faktördür.

Fe-C denge diyagramından da (Şekil 2.1) anlaşılacağı gibi yüksek ostenitleme sıcaklığında, ostenit içinde karbon çözünürlüğü artarak, ostenitten, beynitik ferrite ve yüksek karbonlu ostenite doğru itici güç azalır. Sonuçta birinci kademe reaksiyonunun yavaşlamasına ve kalıntı ostenit miktarının artmasına neden olur. Ancak kalıntı ostenitin kararlılığı azdır. Tablo 2.5'den de görüldüğü gibi ostenitleme sıcaklığının 850°C'den 950°C'ye çıkması sonucu kalıntı ostenit miktarı da % 30.5'den % 47.5'e yükselmekte ve martenzit içeriği artmaktadır [18,19].



Tablo 2.5 OKGDD’de ostenitleme sıcaklığına göre mikro yapı özellikleri [19].

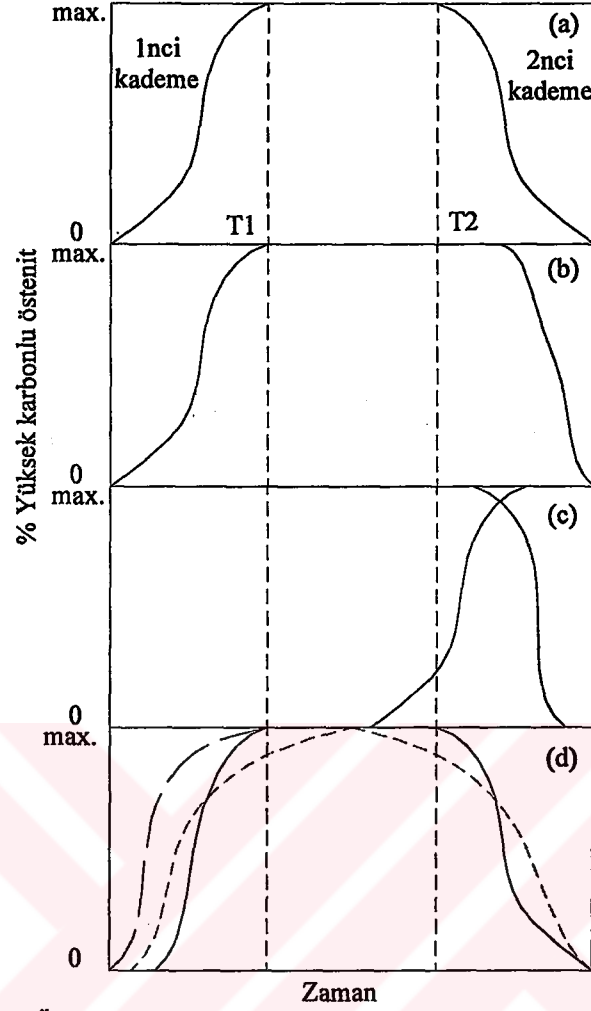
Ostenitleme koşulları	Ostemperleme koşulları	Kalıntı ostenit miktarı %	Martenzit miktarı %	Grafit miktarı %	Ferrit miktarı %
850°C/3 saat	350°C/4 saat	30.5	0	10.5	59.0
900°C/2 saat	350°C/4 saat	38.5	0.1	10.5	50.9
950°C/2 saat	350°C/4 saat	47.5	2.6	10.5	39.4

Karbon çözünürlüğü aynı zamanda alaşım elementlerinden de etkilenmektedir. Bu elementlerin başında Si gelmekte ve karbon çözünürlüğünü azaltmaktadır. Ostenitteki karbon çözünürlüğünü Si ve ostenitleme sıcaklığına bağlı olarak aşağıdaki bağıntıyla formüle etmek mümkündür [19].

$$C = T/420 - 0.17(\% Si) - 0.95 \quad (2.2)$$

Ostenitleme sıcaklığının artması, aynı çeliklerde olduğu gibi OKGDD’lerde de ostenit tane büyümesine ve dolayısıyla sertleşebilirliğin artmasına neden olur. Aynı zamanda yüksek ostenitleme sıcaklığında (950°C), oda sıcaklığına soğuması sırasında ostenit tanelerinin bir kısmında martenzit oluşumunun arttığı gözlenmiştir [18;19].

Ostenitleme sıcaklığının düşürülmesi 1nci kademe reaksiyonu için itici gücü artırır ancak 2nci aşama reaksiyonu üzerinde çok küçük bir etkisi vardır. Sonuçta işlem aralığı daha da genişler. Bu yüzden segregasyon bölgelerinde, 2nci kademe reaksiyonunun yavaşlatılması ile daha yüksek ostenitleme sıcaklıklarında kapanmış olan işlem aralığı, ostenitleme sıcaklığının düşürülmesi ile yeniden açılır. Üstelik, ostenitleme sıcaklığının düşürülmesi ile işlem aralığına daha kısa ostemperleme süreleri sonunda ulaşılır ve ostemperlemeden sonra elde edilen mikro yapı daha kararlıdır ve daha az martenzit ihtiva eder. Şekil 2.13’te yüksek karbonlu ostenit oranının ostemperleme süresine bağlı olarak değişimi gösterilmiştir [19]. Ostenitleme sıcaklığı ve süresi arttıkça sertlik artar. Daha yüksek ostenitleme süresinin ostenit oluşumunu hızlandırdığı, ostenit tanelerinin büyümesine ve ostemperleme sürecinde daha uzun beynitik ferrit tabakçıkları ve daha kaba bir mikro yapının oluşmasına neden olacağı yönünde bulgular vardır [18,19].



- (a) Östemperleme sürecinde oluşan normal bir işlem aralığı,  
 (b) Alaşım elementlerin segregasyon etkisiyle genişlemiş bir işlem aralığı,  
 (c) Alaşım elementlerinin segregasyon etkisiyle kapanmış bir işlem aralığı  
 (d) Farklı etkilere işlem aralığının değişimi

Şekil 2.13 Yüksek karbonlu ostenitin ostemperleme süresince değişimi [19].

Ostenitleme sıcaklığı, KGDD malzemeyi tamamen ostenitlemek için gerekli süreyi etkilemesi yönünden önemli bir faktördür. Bir dökümün ostenitlenmesi için gerekli bu ostenitleme süresi, karbonun difüzyon hızını etkileyen faktörlere (ostenitleme sıcaklığı, başlangıç matris mikro yapısı, silisyum içeriği ve küre sayısı) bağlıdır. Mikro yapının perlitik ya da ferritik olması ve mikro yapıda bulunan küre sayısı, hem ostenitleme süresine hem de ostemperleme süresine etki eder. Perlitik bir matriste ostenitin çekirdeklenmesi ve büyümesi ferritik bir matrise göre daha kolaydır. Dolayısıyla perlitik bir matris ostenitleme süresini kısaltır. Silisyum miktarındaki artış ostenitleme süresini kısaltır. Küre sayısındaki artış da ostenitleme

süresini kısaltır. Ancak, küre sayısındaki artışın etkisi perlitik matrisin etkisi kadar güçlü değildir. Yüksek küre sayısı, ostemperleme sürecinde daha fazla çekirdekleşme merkezinin oluşmasına ve sonuçta segregasyon bölgelerinin daralmasına yol açar [18,19].

Özet olarak ostenitleme sıcaklığı yükseldikçe, ostenit içindeki karbon çözünürlüğü artar ancak reaksiyon hızı tüm ostemperleme süresi boyunca düşer. Ostemperleme sıcaklığının azaltılması ise tüm ostemperleme sıcaklıklarında dönüşüm hızını yükseltir [18,19].

### **2.3.2.3 Ostemperleme Sıcaklığı ve Süresinin Mikro Yapıya Etkileri**

Ostemperleme sıcaklığı ve süresi beynit morfolojisinin yanı sıra, martenzitteki karbon içeriğini ve yüksek karbonlu ostenit miktarını etkilemektedir.

Ostemperleme sıcaklık aralığında (235°C-400°C) dönüşüm, ara yüzey ve tane sınırlarında beynitik ferritin çekirdekleşmesi ile başlar ve beynitik reaksiyon ostemperleme sıcaklığına bağlı olarak üst beynit ve alt beynit olarak tanınan iki tür mikro yapı elde edilir [18,19].

Yüksek ostemperleme sıcaklıklarında (330°C'nin üzerinde) karbon difüzyonu hızlanırken ferrit iğnelerinin hızı yavaşlar ve ferritten ostenite atılan karbon miktarı artar, bu ise yapıda yüksek karbonlu ostenit miktarında artış (yaklaşık % 40) meydana getirir [18,19].

Düşük ostemperleme sıcaklıklarında ise (330°C'nin altında) karbonun difüzyon hızı az olduğu için hızla büyüyen ferritten ostenite atılan karbon miktarı azdır ve bu da yüksek karbonlu ostenit miktarının azalmasına (yaklaşık % 10) neden olur [18].

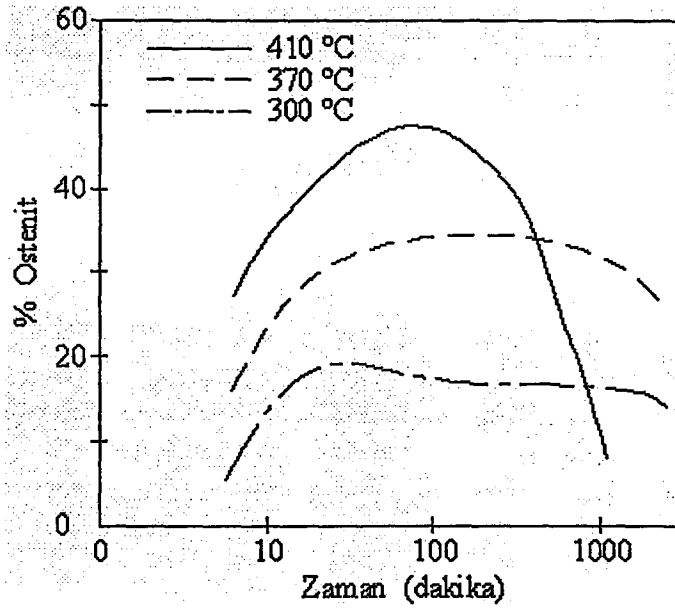
İnci kademe reaksiyonda, alt beynitte yüksek karbonlu ostenitin yanı sıra yapıda sementit de bulunmakta ve bu tokluğu önemli derecede azaltmaktadır. Ancak üst beynitte sementitin bulunmaması tokluğu artırır [18,19].

Ostemperleme süresi de OKGDD'lerin mikro yapısını etkileyen faktörlerden biridir. Kısa süreli ostemperleme de ostenitin düşük karbon içeriği yüzünden, henüz oda sıcaklığına gelmeden mikro yapıda kısmen martenzit oluşur ve yüksek karbonlu ostenit miktarında azalma meydana gelir. Bu yüzden yapının tokluk özelliği iyi sayılmaz. Ostemperleme süresi biraz daha uzatılırsa ostenitin karbon içeriği artar ve martenzit oluşmadan yapıda çok miktarda yüksek karbonlu ostenit meydana gelir.

Ostemperleme süresinin çok fazla uzatılması durumunda mikro yapıda sementit oluşarak, malzemenin mekanik özelliklerini kötü yönde etkiler [18,19].

Yüksek karbonlu ostenit miktarı malzemenin nihai mekanik özellikleri üzerinde çok büyük etkisi vardır. Şekil 2.14'den de görülebileceği gibi yüksek karbonlu ostenit miktarı sıcaklığın artmasıyla artmaktadır. İzotermal dönüşümü 2 aşamalı bir proses olarak değerlendirmek mümkündür. Kısa süreli ostemperleme işleminde ( $\leq 1$  saat) sürenin artmasıyla yüksek karbonlu ostenit miktarında da yükselme gözlenmektedir.

Dönüşüm süresinin çok daha artması yüksek karbonlu ostenitin azalmasına neden olmaktadır. Bu azalma genellikle ostemperleme sıcaklığına da bağlıdır. Şekil 2.14'ten de görüldüğü gibi 300°C sıcaklıkta ostenit miktarı, ostemperleme süresinin artmasıyla hemen hemen sabit kalmaktadır. Buna karşın yüksek ostemperleme sıcaklıklarında (370°C-400°C) yüksek karbonlu ostenit miktarının azalması belirgin bir şekilde görülmektedir [18,19].



Şekil 2.14 OKGDD'de yüksek karbonlu ostenitin ostemperleme zamanı ile değişimi[19].

### 2.3.3 OKGDD'lerin Sınıflandırılması

OKGDD'lerle ilgili ilk iki standart ASTM tarafından 1990 Mart'ında ASTM 897 ve ASTM 897M şeklinde onaylanmıştır. "M" harfi metrik versiyonu tanımlamaktadır ve içerdiği 5 OKGDD sınıfı, minimum çekme ve akma mukavemeti, maksimum % uzama, çentiksiz darbe enerjisi ve tipik Brinel Sertlik değerlerine göre sınıflandırılmıştır. Tablo 2.6'da bu standartlar gösterilmektedir[13].

Tablo 2.6 OKGDD sınıflarının ASTM A 897M'ye göre mekanik özellikleri[13].

	850/550/10	1050/700/7	1200/850/4	1400/1100/1	230/185/-
Çekme mukavemeti MPa	850	1050	1200	1400	1600
Akma mukavemeti MPa	550	700	850	1100	1300
Uzama, 50 mm'de %	10	7	4	1	-( <sup>1</sup> )
Darbe enerjisi, J ( <sup>2</sup> )	100	80	60	35	-( <sup>1</sup> )
Tipik sertlik BHN, ( <sup>3</sup> )	269-321	302-363	341-444	388-477	444-555

(<sup>1</sup>): Standart değildir.

(<sup>2</sup>): Standart değildir.  $22 \pm 4^\circ\text{C}$  sıcaklıklardaki Charpy deneyi sonucu

(<sup>3</sup>): Zorunlu olmayıp sadece bilgi için verilmiştir.

### 2.3.4 OKGDD'lerin Kullanım Alanları ve Üstünlükleri

Ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demir kullanımında dönüm noktası 1976 yılında General Motors firmasının 1977 model Pontiac'lar için ayna-mahruti üretiminde, maliyete önemli ölçüde ekonomi sağlayacağı gerekçesiyle, dövme çelik malzemeler yerine OKGDD malzemeler uygulanacağını belirten çalışmalarıyla olmuştur [4,19].

OKGDD'ler, mukavemet, yorulma özellikleri ve aşınma direncinin bir kombinasyonunu sunarak, ağırlıklı olarak otomotiv dişlileri için büyük bir ilgi uyandırmaktadır. Bu tarz uygulamalarda, OKGDD kullanımı devamlı artmaktadır. Dişli üretiminde malzemelerin yorulma özellikleri de önemli tasarım kriterleridir[19].

OKGDD'lerin eğme-yorulma dayanımı hem tümüyle hem de sadece yüzeyi nitrasyon ile sertleştirilmiş çeliklerden daha üstün, ancak yüzeyi karbürlenerek serleştirilmiş çeliklerden daha alt konumda bulunmaktadır. Bir diğer nokta ise, olağanüstü eğme-yorulma dayanımı gerektiren dişli uygulamaları haricinde, uygun şekilde bilyalanmış ve haddelenmiş OKGDD'lerin, yüzeyi sertleştirilmiş çelikler ile ve hem de çok daha az bir üretim maliyeti ile aynı performansı gösterebileceğinin anlaşılmasıdır [19].

Dövme, kalıp ve diğer metal ürünlerine göre her geçen gün daha ekonomik bir alternatif olması nedeniyle, dökme demirler için yeni bir pazar oluşmaya başlamıştır. Örneğin, kamyon yaylarında temas halindeki bir aşınma malzemesi olarak kullanıldığında, tasarımda hem maliyet tasarrufu sağlanmış, hem de metal döküm prosesinden ve malzemenin doğasından gelen faydaları ortaya koyan bir gelişme sağlanmıştır. Demiryolu taşıtlarında bağlantı elemanı olarak kullanıldığında ise, aşınma direncinin normal dökme demirlere nazaran 6.5 kat arttığı gözlenmiştir. Benzer örnekleri çoğaltmak mümkündür [18,19].

Kısaca bazı uygulama alanları şöyle belirtilebilir. Dişliler, aşınmaya dirençli parçalar, yüksek yorulma ve darbe mukavemeti gerektiren uygulamalar, otomotiv ve

tren krank milleri, iş makinelerinin kepçe ve paletleri, zincir yuvaları, madencilikte kullanılan zincirler, kar sapanı pabuçları, soğutma kompresörleri, kardan kavramaları ve buldozerle kullanılan parçalar [19].

Daha önce, otomotiv dişlilerinde OKGDD kullanımının devamlı arttığı belirtilmişti. Bu noktada, dişli yapımında kullanılan OKGDD parçaların bazı teknik ve ticari avantajları vardır. Bu avantajlar şöyle belirtilebilir;

#### *Teknik Avantajlar;*

- KGDD, dövme çelikten % 10 daha hafiftir.
- Yapıdaki grafitin sönüm kapasitesini % 40 arttırması nedeniyle KGDD dişliler çeliklerden daha sessiz çalışmaktadır.
- KGDD'in çelikten daha az çentik duyarlılığı vardır. Bu yüzden yüzey işlemlerinin çelik kadar hassas yapılmasına gerek yoktur.
- OKGDD'lerin yorulma ömrü, püskürtmeyle sertleştirme yoluyla arttırılabilir. Hatta dişlilerin çalışma sırasında da yüzeyi sertleşebilir.
- 300 BHN sertliğindeki OKGDD'lerin aşınma direncinin 500 BHN sertliğindeki dövme çeliğe eşit olduğu görülmüştür.
- OKGDD'lerin elastisite modülü çeliğinkinin yaklaşık % 70-80'i kadardır.
- Mükemmel işlenebilirliğe sahip olduğundan, dövme çelikten daha kaliteli yüzeyler elde edilebilir[15-19].

#### *Ticari avantajları*

- Hammadde olarak dökme demir çelikten daha ucuzdur.
- Belirli dişliler, kullanılacakları şekilde dökülebilirler.
- Isıl işlem görmeden önce dahi KGDD'in işlenebilirliği, tavllanmış çelikten oldukça iyidir. Bu nedenle, pahalı işleme takımlarının kullanımı daha az olmakta ve KGDD dişlilerinin üretiminde çelik dişlilere göre % 50'ye varan oranda enerji tasarrufu yapılmaktadır [15-19].



## 2.4 Yorulma

Hareketli parçaların, içten ve dıştan yanmalı motorların gelişimi ile birlikte yaygın olarak kullanılması ve tekrarlı sabit ve değişken yüklere maruz kalması sonucu kalıcı hasarlara uğradığı bir gerçektir. Malzemelerin yorulma kırılmasına uğrama limitini artırmak için değişik deney ve çalışmalar yapılmaktadır. Yorulma hasarını önlemek veya yorulma ömrünü artırmak için uygulanmakta olan değişik yöntemler mevcuttur. Bu yöntemlerden bazıları malzemenin içyapısında değişiklik meydana getirecek normalizasyon, yüzey sertleştirme, komple sertleştirme ve ostemperleme gibi ısıl işlemlerdir. Diğer yöntemler ise malzeme yüzeyinde kalıcı deformasyon gerilmesi oluşturacak olan bilyalı dövme ve yüzey ezme (rolling) işlemleridir. Bu yöntemlerde esas, tekrarlı yüklemeye maruz kalan makine elemanlarında kalıcı gerilmeler meydana getirmektir [19].

Kırılmanın görüldüğü parçaların görevlerini belirli bir süre yerine getirdiği düşünülerek, tekrarlı olarak uygulanan yüklere karşı malzemenin dayanım gücünün azaldığı ve bunun sonucu olarak da yorulduğu fikri ilk defa 1840 ile 1850'li yıllarda ortaya atılmıştır. Yorulma ile ilgili ilk sistematik çalışmalar Almanya'da 1850-1860 yılları arasında Agust Woehler tarafından yapılmıştır. Demir yolu vagonlarının aksları üzerinde yapılan bu sistematik çalışmalarda Woehler, kendi geliştirdiği yorulma deneyi cihazını kullanmıştır. Metal malzemeler üzerinde yapılan deneylerde, uygulanan yüklerin büyüklüğü üzerinde durulmuştur. Deney sonuçlarından yararlanılarak yorulma olayında uygulanan maksimum gerilmeden ziyade gerilme aralığının önemli olduğu sonucuna varılmıştır. İlk defa Woehler tarafından çizilen gerilme-çevrim sayısı (S-N) diyagramları kullanılarak gerilme aralığı limiti altındaki gerilme değerlerinde numunelerin kırılmadığı gösterilmiştir. 1850 ve 1865 yılları arasında Hodgkinson ve Fairbairn tarafından kiriş sistemleri üzerinde tekrarlı eğme deneyleri yapılmıştır. Statik yükleme durumunda 120 KN altında kırılma meydana gelirken, tekrarlı yükleme halinde 30 KN'luk yük kırılmaya yeterli olmuştur. 1870 ve 1890'lı yıllarda yapılan Woehler'in klasik çalışmaları genişletilerek değişik araştırmacılar tarafından sürdürülmüştür. Ortalama gerilmenin yorulma ömrü üzerine etkisi ilk defa Bach tarafından araştırılmıştır. 1900'lü yıllarda yorulma mekanizmasının anlaşılmasında optik mikroskop kullanılmıştır. Mikro

çatlakların meydana gelmesinde lokalize kayma doğrultuları ve kayma bantlarının önemli olduğu gözlenmiştir [19].

#### 2.4.1 Yorulmaya Etki Eden Faktörler

Yorulma kelimesi genel olarak malzemelerin statik gerilme ve uzamalar altındaki davranışlarından farklı olarak, değişken gerilme veya uzamaların söz konusu olduğu durumlarda gösterdiği davranışlarını belirtmek üzere kullanılmaktadır. Yorulma, olayı bazı nokta veya noktadaki tekrarlı gerilme veya uzama şartlarına maruz malzemelerde görülen, yeterli bir tekrar sayısından sonra çatlakların büyümesine veya tamamen kırılmasına sebep olan lokalize sürekli gelişen kalıcı yapı değişikliği olayıdır [20]. Burada önemli olan dört faktör vardır.

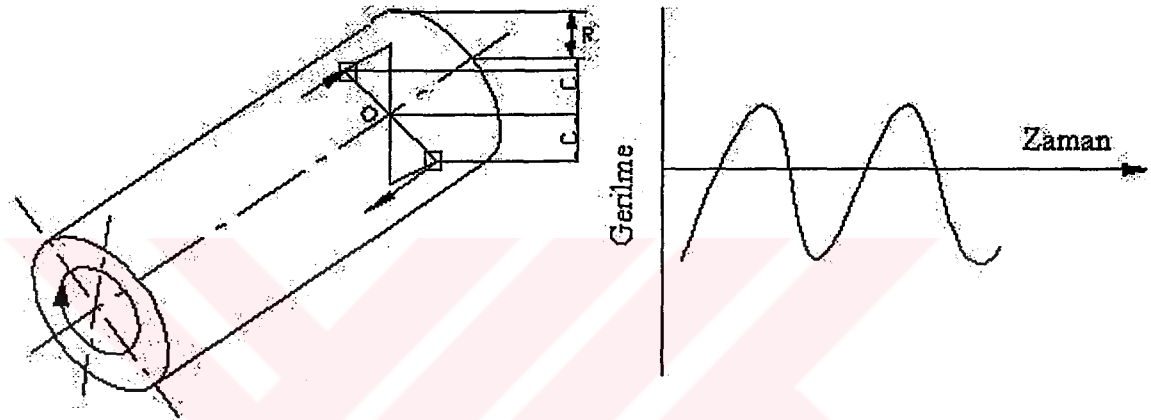
- Süreklilik
- Lokalize olması
- Çatlakların büyümesi
- Kırılma

Bu olay, uygulamada makinelere ve dolayısıyla makine parçalarına genellikle büyüklüğü ve yönü düzenli veya düzensiz olarak zamanla değişen kuvvetler, gerilmeler ile eğme ve burma momentleri etki etmektedirler. Bu tür zorlama etkisine maruz bir makine elemanı kendi akma sınırı altındaki bir gerilmede beklenmedik bir tarzda kırılabilir. Bu tür kırılmalara yorulma kırılması denir [2,19-22].

Belirli bir devir sayısında dönen ve aynı zamanda eğilmeye zorlanan bir shaftın en dış kısmında bir elemanı incelemeye alalım. Şekil 2.15’de dönen bir shaftta gerilmenin değişimi görülmektedir. A konumundaki elemanı,

$$\sigma_{sg} = \frac{M \times C}{I} \quad (2.1)$$

denklemleri ile verilen büyüklükte bir eğilme gerilmesine maruz kalmaktadır. Bu durumda  $M$  ve  $I$  sabit olup ince eleman üzerinde etkili olan eğilme gerilmesi, nötr eksen ve elemanlar arasındaki  $C$  değeri ile orantılı olarak değişmektedir. Şaft dönmeye devam ettikçe  $O$  ile  $R$  arasında değerler almaktadır. Eleman üzerinde etkili olan gerilme  $C = R$  olduğunda en büyük değeri almakta,  $C = 0$  ise gerilme sıfır değerine eşit olmaktadır. Buna göre incelenen şaft tekrarlı değişen gerilmelere maruz kalmaktadır.



Şekil 2.15 Dönen bir şaftta gerilme-zaman değişimi.

Yorulma bütün malzemelerde gevrek türde kırılma meydana getirir. Statik şartlar altında gerçekleştirilen çekme deneyinde, büyük ölçüde plastik şekil değiştirerek ve büzülerek (kesiti daralarak) kopan bir metal test numunesi, tekrarlı zorlanmalar (dinamik zorlanmalar) altında, belirgin bir plastik şekil değiştirmeksizin çatlak ve bu çatlak zamanla yayılır, numune içinde hızla ilerler, sonuç olarak test numunesi aniden kırılır [21,22].

Yorulma kırılmasının gerçekleştiği yüzey incelendiğinde; yorulma kırılmasına uğramış çeliklerin kırık yüzeyleri hemen tanınabilir. Yorulma kırılması gösteren kırık yüzeyin belirli bir bölgesi, yinelenen yük uygulaması sonucu düzgünleşmiştir; geri kalan bölgelerin pürüzlü görünümünden ayırt edilebilir duruma gelmiştir. Bu düzgün görünümlü bölgeler yakından incelendiğinde küçük dalgalar ve düzenli çizgiler şeklindedir. Pürüzlü bölgeler yorulma kırılmasının gevrek olduğunu

anlatmaktadır. Yorulma sırasında açılan yüzey, düzgün görünümlü bölgedir. Gerilimin tekrarlanması sonucunda ani kırılma meydana gelir ve çelik kopar. Bu son kopma, çoğunlukla, sünek kırılma özelliği gösterir [21,22].

Yorulma gösteren bölgenin diğer bölgeye oranı, uygulanan yükün uygulama hızına ve çelik parçanın biçimine göre değişir. Dönen millerin yorulma kırılmasına uğrayan yüzeyleri genellikle 2/3 oranında düzgün bölge içerirler [21,22].

#### **2.4.1.1 Parça Büyüklüğü**

Genellikle çelik parçanın büyüklüğü arttıkça yorulma dayanımı da düşer. Çünkü çelik parçanın yüzey alanı arttığından yüzey kusurlarının bulunma olasılığı artmaktadır [21,22].

#### **2.4.1.2 Yüzey Etmeni**

Bu etmenden söz edilirken yalnızca yüzey durumu olarak değil, aynı zamanda, tasarım etmeni gibi de düşünülmelidir. Çeliklerin görülen yorulma kırılmasının bir çoğu yüzey düzgünlüklerinden başlamaktadır. Bu nedenle, yorulma özelliği yüzeydeki çentik, girinti, çıkıntı, keskin köşe vb gibi tasarımdan kaynaklanan kusurlara karşı çok duyarlıdır. Yüzey ne denli düzgün olursa yorulma dayanımı o denli yüksek olur. Parlatılmış yüzeyler pürüzlülere göre yorulma kırılmalarına karşı daha yüksek yorulma dayanımı gösterirler [19,20-22].

Yüzeylerdeki çentik ve keskin köşelerin yorulma özelliklerini olumsuz yönde etkilemesinin nedeni, bunların yüksek çekme gerilimi yoğunluklu bölgeler oluşturmasıdır. Yorulma kırılmalarının çoğunun bu tür yerlerden başlaması hep bu nedendir. Cıvatalar, dişliler v.b. çelik parçalarda diş açılması zorunludur. Bunlarda diş tasarımı, yorulma dayanımı ve parçanın ömrü açısından son derece önemlidir. Keskin köşelerden her zaman kaçınılmalıdır [19,20-22].

Bu bakımdan yüzeyin kimyasal bileşimini ve iç yapısını değiştirecek yorulma dayanımını düşüren her durumdan kaçınılması gerekir. Örneğin, çeliklerin yüzeyinde oluşan karbonsuzlaşma, yorulma dayanımını olumsuz yönde etkileyen çok önemli etmenlerden biridir. Buna karşın yüzeyde basma gerilimini yaratabilen her etmen yorulma dayanımını artırır. Gerek karbonlama ve özellikle de nitrüleme, bu nedenle çeliklerin yorulma dayanımını artırır. Tasarım gereği yüzeyinde çentik bulunması zorunlu çelik parçaların nitrülenmeleri gerekir [19,20-22].

Yüzey İşlemleri :Yorulma kırılmasının açıkça yüzeyden başladığı bilinmektedir. Bu yüzden yüzey temizliği çok önemlidir. Yüzey işlemleri bilyalı dövme, yüzey ezme (rolling) ve sementasyon gibi işlemlerin yorulma mukavemetini arttırdığı deneylerle ispatlanmıştır [19,20-22].

#### **2.4.1.3 Mikro Yapı**

Özellikle çift fazlı çeliklerin mikro yapısının mekanik ve yorulma özellikleri üzerine etkileri daha önceki konularda verilmiş olup bu kısımda genel ifadeler kullanılacaktır. Genellikle çeliklerin çekme dayanımlarını etkileyen etmenler yorulma dayanımlarını da etkiler. Örneğin, tavllanmış çeliklerde, tane büyüklüğü azaldıkça nasıl çekme dayanımı artarsa, benzer biçimde, yorulma dayanımı da artar [19,21,22].

Ötektoid bileşimli sade karbon çeliğinde iç yapı değişimleri yorulma özelliklerinde en belirgin farkı, yaratır. Kaba perlitli iç yapı, küreleştirilmiş perlitli iç yapıya oranla daha düşük yorulma dayanımı gösterir. Bunun temel nedeni perlit içindeki sementit katmanlarının yarattığı çentik etkisidir [19,21,22].

#### **2.4.1.4 Metalürjik Faktörler**

Isıl işlemler, haddeleme ve ekstrüzyon işlemleri sonucunda malzemenin mikro yapısının değişimi (tane boyu, şekli, bileşimi) yorulma dayanımını etkiler.

Kimyasal bileşimin yorulma mukavemetine etkisi, ısıl işlem ve mikro yapının etkisinden azdır. Genellikle bütün ısıl işlemler yorulma mukavemetine etki ederler[22].

#### **2.4.1.5 Sıcaklık**

Yorulma dayanımı sıcaklık düştükçe artar. Fakat, oda sıcaklıklarının altında, çeliklerin yorulma olgusundaki çentik duyarlılığı sıcaklık düştükçe artar. Oda sıcaklığı üzerindeki sıcaklıklarda yorulma, yüksek sıcaklık yorulması adını alır. Bu sıcaklıklarda sıcaklık arttıkça genellikle yorulma dayanımı düşer. Sıcaklık 400°C üzerine ulaştığında yorulma yerine sürünme devreye girer. Yorulma kırılması “tane içi kırılması” türündendir. Sürünme kırılması ise “taneler arası kırılma” yada tane sınırı kırılması türündendir [19,21,22].

Oda sıcaklıklarında, tane boyutu küçüldükçe yorulma dayanımı artar. Sıcaklık yükseldikçe küçük taneli çelikler ile iri taneli çeliklerin yorulma dayanımları arasındaki fark azalır.

Yüksek sıcaklıklarda yorulmaya yol açan gerilmelerin mekanik yük uygulamalarından gelmeleri gerekmez. Değişen ısı koşulları da sürekli ve çevrimsel bir değişim içinde çeliğe etki yaparsa bu durumda da çelikte yorulma doğabilir. Bu tür yorulmaya, ısıl etkilerden doğduğu için, ısıl yorulma adı verilir [19,21,22].

#### **2.4.1.6 Gerilme birikmesi**

Kullanılan elemanda gerilme birikmesi varsa, yorulma kırılması bakımından tehlike artar. İçinde çatlak, köpük bulunan parçalarla, kesit değiştiren ve üzerinde çentik olan parçalara dikkat edilmelidir [19,21,22].

#### **2.4.1.7 Gerilme Gradyanı**

Gerilme gradyanı parça kesitinde gerilmenin genel olarak değişimidir. Örneğin eğilme ve burulma zorlamalarında elastik şekil değişimi bölgesinde doğrusal olarak azalarak tarafsız ekseninde sıfır değerine ulaşır. Çapları farklı olan iki parçanın yüzeyindeki gerilme aynı ise, çapı büyük olan parçada çok daha büyük bir hacim yüksek gerilme altında kalır. Yüksek düzeyde zorlanan malzeme hacminin artması ile malzeme kusurlarının bulunma olasılığı da artacağından, büyük çaplı parçalarda eğilme veya burulma yorulma dayanımları küçük çaplılara göre daha düşüktür. Çekme veya basma zorlamalarında ise gerilme gradyanı etmeni bakımından belirgin bir boyut etkisi yoktur [19,21,22].

#### **2.4.1.8 Artık Gerilmeler**

Elastik sınır dışında (elastik sınırı aşmış) yüklenmiş ve boşaltılmış elemanlarda veya soğuk şekillendirilmiş parçaların içinde bir takım gerilmeler kalmaktadır. Bu gerilmelere artık gerilmeler denir. İçinde artık gerilme bulunan elemanların yorulma dayanımı doğal olarak düşer [19,21,22].

#### **2.4.1.9 Frekans**

Woehler tarafından yapılan deneylerde kuvvetin tekrar sayısı dakikada 60 devir kadardı. Daha sonra Reynolds tarafından dakikada 2500 devir için deneyler yapılmış, arkasından Hopkinson 7000 devir/dakika'lık deneyler yaparak, yorulma dayanımlarında % 10 bir artış olduğunu göstermiştir [43]. Bugün çok daha yüksek tekrar sayılarında deneyler yapılarak, yorulma sınırlarındaki artmalar öğrenilmektedir [19, 21, 22].

Düşük frekanslarda zamanın uzamasıyla korozyon etkisi kuvvetlenmediği sürece yüksek frekanslarda da sönmüleme nedeniyle deney parçası çok fazla ısınmadığı sürece, frekans yorulma dayanımına önemli bir etki yapmaz. Çok düşük



frekanslarda ise yorulma dayanımının arttığı görülür [19, 21, 22].

#### **2.4.1.10 Korozyon**

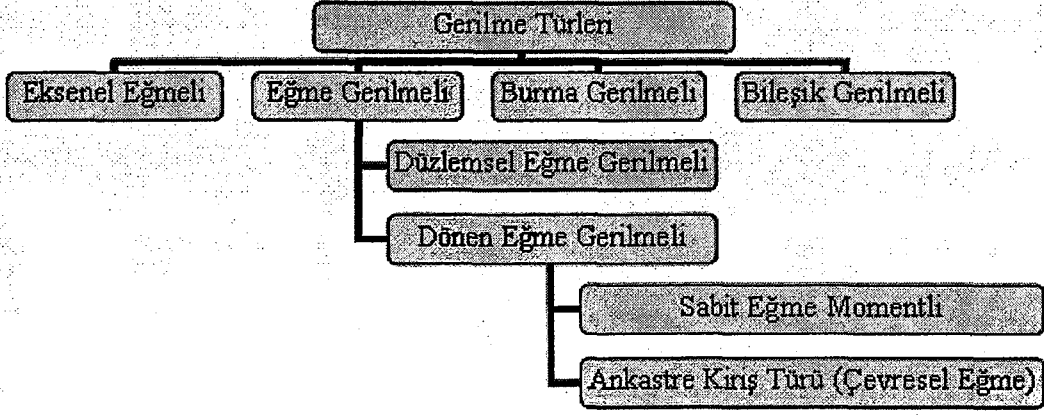
Eleman bir kuvvet tekrarına zorlanırsa ve aynı zamanda oksitlenmeyi kolaylaştıran bir ortamda bulunursa, yorulma limitlerinde bir düşme olur. Bu azalan sınırlara korozyon yorulması sınırları denir. Genelde; gemi pervanelerinin milleri, gemi yağ makinelerinin soğutma suyu piston kolları, tribün kanatları, petrol kuyularında piston kolları korozyon ile birlikte yorulmaya zorlanırlar [21, 22].

Metal yüzeyi su ile temasa girer, özellikle deniz suyu korozif ortamın yaratıcısıdır. Korozyonun sonucu olarak yüzeyde ince bir kaplama kalır. Eğer ince kaplama suda çözünmez ise, korozyon sınırlı kalır ve daha ileri bir korozyona karşı korur, aksi ise paslanmadır [21, 22].

Korozyonun sonucu metalde pitting başlar. Önce yüzeyde gözle görülür bir biçimde başlar, sonra derinleştikçe derinleşir ve tekrarlı yük altında gerilme yığılmasına yol açarak kopmayı başlatır. Aşınmış metaller, diğer aşınmamış metallere, daha düşük yorulma mukavemetine sahiptirler. Yorulma mukavemeti, korozyonun derecesine ve aynı zamanda malzemenin korozyona sebep bileşenlerine (Yağmur suyu, deniz suyu, asit vs.) bağlıdır. Hava korozyonunun yorulma ömründe % 5 ile % 10 arasında bir azaltma yaptığı görülmüştür. Aşındırıcı korozyonun da aynı şekilde yorulma ömrünü azalttığı tespit edilmiştir [21, 22].

#### **2.4.3 Yorulma Deneyleri**

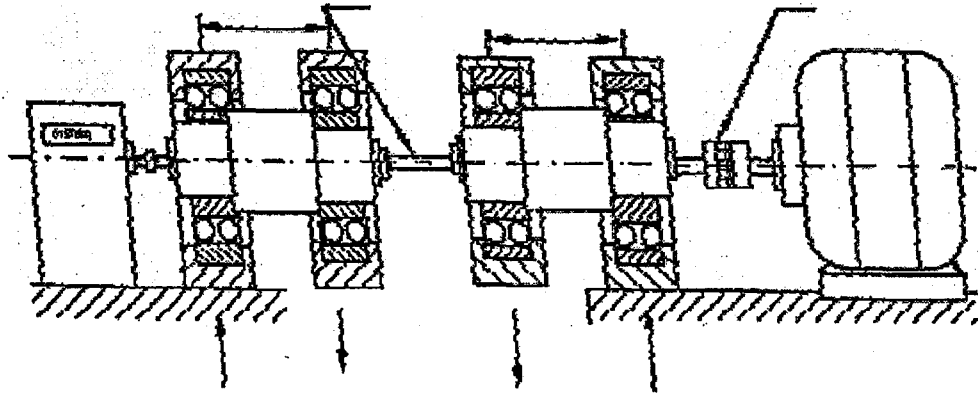
Deneylerde kullanılan gerilme türü, yorulma deneyine de adını vermektedir. Şekil 2.16'de yorulma deneyine konu olan gerilme türleri gösterilmektedir.



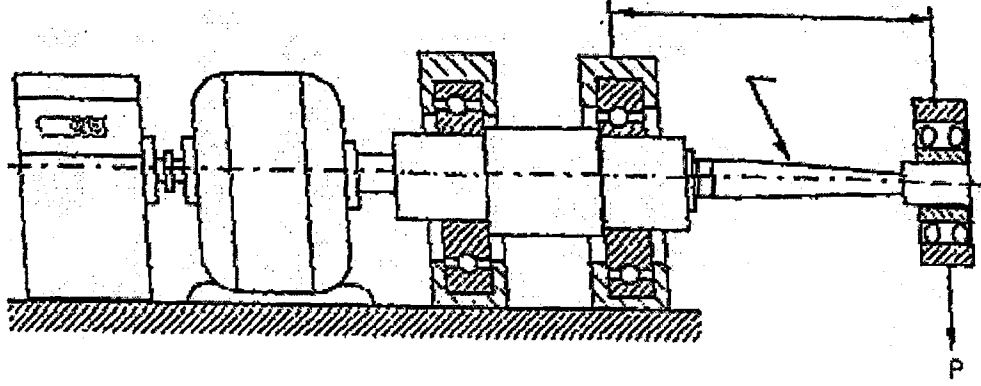
Şekil 2.16 Yorulma deney türleri [19].

Bu yüksek lisans tez çalışmasında OKGDD'lerin dönen eğme momentli yorulma dayanım testleri yapılmıştır. Dönen eğme gerilmeli yorulma deneyinde numune devamlı dönmekte ve nötr bir eksene göre tekrarlanan eğme gerilmesine maruz bırakılmaktadır [19].

Bu tür yorulma gerilmesine örnek olarak hareket halindeki taşıtların akslarında meydana gelen gerilmeler gösterilebilir. Şekil 2.17 ve Şekil 2.18'de sırası ile sabit eğme momentli ve ankastre kiriş türü yorulma deney cihazları gösterilmiştir[19].



Şekil 2.17 Sabit eğme momentli yorulma cihazı [19].



Şekil 2.18 Ankastre kiriş türtü yorulma cihazı [19].

#### 2.4.4 Yorulma Deney Numunesi ve Deney Sonuçları

Numune parçasının planlanması, incelenmesi yapılacak bütün değişkenlere ve deney programı koşullarına yeterli olmalıdır [20]

Malzeme deneyleri için, deney parçası basit şekilde hazırlanmış olabilir. Fakat bir bütünü oluşturan elemanların yorulma deneyinde, deney parçasının planlanması, yük dağılımına ve gerçek koşullara olanaklar ölçüsünde yakın olmalıdır [20].

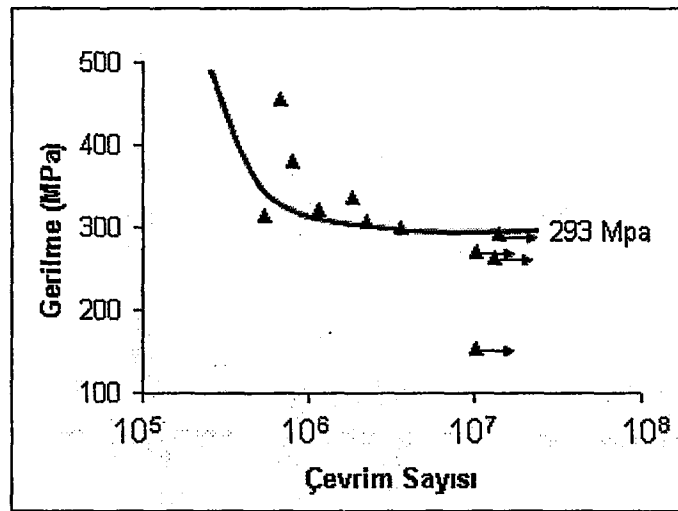
Yorulma kopmaları genellikle metalin yüzeyinde başlar. Sonuç olarak deney parçasının veya bir konstrüksiyondaki mekanik elemanların yüzey durumlarının yorulma dayanımına büyük etkisi vardır. Yorulma dayanımı tayinleri yapılacak deney parçalarının, birden çok olarak hazırlanması metodunda yorulma dayanımı tayini ile ilgili özellikler dikkate alınmalıdır [20].

Deney parçalarının hazırlanmasında uygulanan, işleme ve parlatma tekniğinden dolayı istenmeyerek meydana gelecek gerilme konsantrasyonu, yüzey kusurları, kalıcı yüzeysel gerilmeler ve çok ısınma gibi diğer etkenler en az olacak şekilde planlanmalıdır [20]

Hazırlanan deney parçasında, istenen bir gerilme konsantrasyonu varsa (örneğin, bir çentik dolayısı ile yüzeyde süreksizlik bir kesitte değişme veya delik) yukarıda belirtilen yüzey işlemlerinden dolayı meydana gelecek gerilme konsantrasyonu için de tedbir alınmalıdır [20].

Deney parçası makineye ek olarak önemli derecede ek gerilmeler getirmeyecek biçimde (titreşim, eksen kaçıklığı gibi) bağlanmalıdır. Tüm deney parçaları için yük uygulama koşulları aynı olmalıdır. Makine uygun periyotta dönme yaptıktan sonra darbesiz bir şekilde yüklenmelidir. Deneyin sona ermesi için önceden belirlenen periyot sayısı, genellikle deneyi yapılan malzemeye bağlı olup, çelikler için bu süre  $10^7$  devir olarak alınabilir [20].

Yorulma deneyinin sonuçları genellikle bir grafik halinde verilir. Deney esnasında uygulanan gerilme değeri (S) düşey eksen ve bu gerilme altında kırılıncaya kadar geçen süre içindeki çevrim sayısı (N) yatay eksen olmak üzere bir grafik çizilir. Meydana getirilen bu grafiğe S-N eğrisi veya Woehler diyagramı denilir. Her iki eksen verilerin logaritması alınarak tam logaritmik skala veya sadece çevrim sayısı eksenine logaritmik değerler alınarak yarı logaritmik skala kullanılabilir Şekil 2.19'da dönen eğmeli yorulma deneyi uygulanmış OKGDD'in S-N eğrisi gösterilmiştir [20].



Şekil 2.19 Döner eğmeli yorulma deneyi uygulanmış numune için S-N eğrisi [20].

### 3. KONUYLA İLGİLİ DAHA ÖNCE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin (OKGDD) yorulma dayanımı hakkında yapılan çalışmalar sınırlıdır. Yorulma olayının ve OKGDD'lerin geçmişinin yeni olması, OKGDD'lerin çok değişik kompozisyon ve farklı ostemperleme koşullarında üretilebilmeleri yüzünden bu konuda daha fazla çalışma yapılmasını gerekli kılmaktadır. Aşağıda literatürde OKGDD'lerin yorulma davranışı üzerine yapılmış çalışmalardan bazıları aktarılmaya çalışılmıştır.

Lin, C. K. ve arkadaşları yaptıkları geniş kapsamlı bir çalışmada OKGDD numunelerinin yorulma dayanımını değişik parametreler açısından incelemiştir. Bu parametreler kimyasal bileşim, küre sayısı, küreselleşme yüzdesi, ostenitleme süresi ve ostemperleme sıcaklık ve süreleridir. Kimyasal bileşimleri % C 3.58-3.62, % Si 2.27-2.48, % Mn 0.12-0.34, % P 0.25-0.48, % S 0.008-0.010, % Mg 0.037-0.047, % Cu 0.44-0.50, % Ni 0.43-0.46 ve % Mo 0.19 aralıklarında olan 4 değişik kompozisyona sahip KGDD numunelerini önce 900°C'de 90 ve 120 dakika sürelerde ostenitlendikten sonra beş farklı sıcaklıkta (270°C, 300°C, 325°C, 350°C, 375°C) 2 ve 3 saat süreler boyunca ostemperlemiştir. Isıl işleminden sonra numunelerin yüzeyleri parlatılmıştır. Yorulma deneyleri dakikada 2400 devir yapan dönen eğmeli bir yorulma cihazında yapılmıştır. Deneyler sonucunda yorulma dayanımı ile çekme dayanımı arasında bir ilişki olmadığı, ostemperlenmiş numunelerin yorulma dayanımlarının 180-290 MPa arasında değiştiği, en yüksek yorulma dayanımına maksimum tokluk ve osferrit mikro yapıdaki maksimum yüksek karbonlu osteniti bünyesinde bulunduran 900°C'de 90 dakika ostenitlendikten sonra 360°C'de 2 saat ostemperlenmiş numunenin sahip olduğu ve yorulma dayanımının artan küre sayısı ve küreselleşme yüzdesiyle orantılı olarak arttığı tespit edilmiştir. Geniş grafit tanelerinin, inklüzyonların ve yüzeyde veya yüzeye yakın yerlerdeki mikro çekinti boşluklarının tipik yorulma çatlaklarının kaynakları olabileceği belirtilmiştir [23].

Lin, C. K. ve Wei, J. Y. yaptıkları geniş kapsamlı bir çalışmada kimyasal bileşimleri % C 3.56-3.59, % Si 2.51-2.52, % Mn 0.18-0.22, % P 0.30-0.32, % S 0.012-0.013, % Mg 0.039-0.044, % Cu 0.60-0.68 olan iki ayrı grup KGDD numunelerinin bir bölümünü 900°C de 1.5 saat ostenitlendikten sonra optimum çekme dayanımını elde etmek için 300°C'de 3 saat ve diğer bölümü optimum darbe dayanımını elde etmek için 360°C'de 2 saat ostemperlemişlerdir. Isıl işlemde sonra numuneler taşlanmış ve parlatılmıştır. Yorulma deneyleri dakikada 2400 devir yapabilen bir dönen eğmeli yorulma cihazında gerçekleştirilmiştir. Yorulma sınırı olarak  $10^7$  çevrim kabul edilmiştir. Deneyler sonucunda numunelerin yorulma dayanımlarının 195-410 MPa arasında değişiklik gösterdiği tespit edilmiştir. En yüksek yorulma dayanımı 360°C'de 2 saat ostemperlenen numunede elde edilmiştir. Bunun nedeni olarak yüksek tokluk miktarı ve osferrit yapıdaki yüksek karbonlu ostenit miktarının fazla olmasına bağlamışlardır. Yorulma deneyleri sırasında osferrit yapıdaki yüksek karbonlu ostenitin martenzite dönüşmesi yorulma çatlaklarının ucunda çatlak ilerlemesini engelleyen bir plastik bölge oluşturduğu ve bu plastik bölgenin zamanla çatlak ucunun kapanmasına da katkı sağlayabileceği yorumu yapılmıştır. Ayrıca Yorulma dayanımının sertlikle veya çekme dayanımı ile direk bir bağıntısının olmadığı, darbe dayanımıyla doğrudan ilgili olduğu belirtilmiştir [24].

Lin, C. K. ve Fu, C. S. yaptıkları çalışmada kimyasal bileşimi % C 3.5, % Si 2.6, % Mn 0.2, % P 0.3, % S 0.012, % Mg 0.04, % Cu 0.65 olan döküm bloğunun değişik kesitlerinden alınan numuneleri ostemperlemişler ve kısa çevrimli ( $10^5$ ) yorulma deneylerine tabii tutmuşlardır. Numuneler 900°C de 1.5 saat ostenitlendikten sonra optimum çekme dayanımını elde etmek için 300°C'de 3 saat ve optimum darbe dayanımını elde etmek için 360°C'de 2 saat ostemperlenmişlerdir. Deneyler sonucunda numunelerin çekme dayanımları ve tokluklarıyla yorulma dayanımları arasında basit bir bağıntı bulunamamıştır. Diğer çalışmalarda da olduğu gibi maksimum tokluğun elde edildiği osferrit yapıdaki yüksek karbonlu ostenit miktarının en yüksek olduğu durumda en iyi yorulma dayanımı elde edilmiştir. Bunun nedeni olarak ta osferrit yapıdaki yüksek karbonlu ostenit miktarının yorulma deneyleri sırasında martenzite dönüşerek yorulma çatlaklarının ilerlemesine bir engel oluşturmasını göstermişlerdir [25].



Lin, C. K. ve Lee, W. J. yaptıkları çalışmada kimyasal bileşimleri % C 3.56-3.59, % Si 2.51-2.52, % Mn 0.18-0.22, % P 0.30-0.32, % S 0.012-0.013, % Mg 0.039-0.044, % Cu 0.60-0.68 olan OKGDD numunelerinin yorulma dayanımlarını, kimyasal bileşim, mekanik özellikler, çentik hassasiyeti ve yorulma deney türü parametreleri (çevresel eğmeli ve eksenel yüklemeli) açısından incelemişlerdir. Numuneler 900°C de 1.5 saat ostenitlendikten sonra optimum çekme dayanımını elde etmek için 300°C'de 3 saat ve optimum darbe dayanımını elde etmek için 360°C'de 2 saat ostemperlenmişlerdir. Numuneler ısı işleminden sonra taşlanmış ve parlatılmıştır. Numuneler standartlara uygun çentik açılmıştır. İki farklı kompozisyona sahip OKGDD numuneleri kullanılmıştır. Dönen eğmeli ve eksenel yüklemeli olmak üzere iki farklı yorumla deneyi yapılmıştır. Dönen eğmeli yorulma deneyi dakikada 2400 devir yapabilen bir makinede gerçekleştirilmiştir. Yorulma sınırı olarak  $10^7$  çevrim esas alınmıştır. Deneyler sonucunda yorulma dayanımlarının 156-400 MPa arasında değiştiği tespit edilmiştir. En yüksek yorulma dayanımının diğer benzer çalışmalarda olduğu gibi maksimum tokluk ve osferrit yapıdaki maksimum yüksek karbonlu ostenitin mevcut olduğu 360°C'de 2 saat ostemperlenen numunelerde gerçekleştiği tespit edilmiştir. Dönen eğmeli yorulma dayanımı eksenel eğmeli yorulma dayanımına göre aynı numunelerde biraz daha fazla çıkmıştır. Bunun nedeni olarak eksenel eğmeli yorulma türünde gerilmenin tek yönlü olmasının (çevresel eğilmelide numunenin her tarafı bir çekme bir basma gerilmesine maruz kalır ve anma gerilmesi tüm kesitte aynı büyüklükte dağılır) yorulma çatlağının çevresel eğilmeli yorulma çatlağından daha hızlı başlayıp ilerleyebilmesi olarak gösterilmiştir. 300°C'de ostemperlenen numunelerin 360°C'deki numunelere göre daha sert olmasından (300°C'de alt beynit yapıda süneklik az kırılabilirlik fazla iken 360°C'deki üst beynit yapıda süneklik ve tokluk daha fazladır) dolayı çentiğe karşı daha hassas davrandıklarını belirtmişlerdir [26].

Marrow, T. J. ve Çetinel, H. yaptıkları değişik bir çalışmada kimyasal bileşimi % C 3.6, % Si 2.5, % Mn 0.6, % Mo 0.15, % Cu 0.3 olan OKGDD numunelerinde osferrit yapıdaki yüksek karbonlu ostenit büyüklüğünün, tane sınırlarının ve osferrit içerisindeki pozisyonunun (çatlak ilerlemesine paralel mi açılı mı?) kısa ve uzun yorulma çatlak ilerlemelerine nasıl tesir ettiğini araştırmışlardır. Numuneler 870°C'de ostenitlendikten sonra 375°C'de 2 saat süreyle



ostemperlenmişlerdir. Ayrıca ikinci bir numune grubu, önce 1050°C'de ostenitlenip havada soğutulmuş, sonra tekrar 870°C'de ostenitlendikten (daha büyük ostenit tane boyu elde etmek için) sonra 375°C'de 2 saat süreyle ostemperlenmişlerdir. Yorulma deneyleri dört noktadan eğmeli bir yorulma cihazında gerçekleştirilmiştir. İki çeşit yorulma deneyi gerçekleştirilmiştir. 10x10x100 mm uzunluğundaki numuneler 360 MPa gerilme altında 1.500.000 çevrimde (kısa çatlak) ve 300 MPa gerilme altında  $10^7$  çevrimde (uzun çatlak) test edilmiştir. Deneyler sonucunda OKGDD'lerde yorulma çatlaklarının küre ile matris ara yüzeyinde (grafitin düşük dayanımı yüzünden) başladığı, osferrit yapıdaki yüksek karbonlu ostenit tane sınırlarının yorulma çatlaklarına karşı bir bariyer görevi gördüğü, osferrit yapıdaki yüksek karbonlu ostenit tane büyüklüğünün artmasıyla (1050°C/870°C/375°C) yorulma çatlağının daha kolay başladığını, bunun da yorulma dayanımını azalttığı, kısa yorulma çatlak çekirdekçiklerinin ferrit plakaları ile paralel ilerleme eğiliminde oldukları bu nedenle yüksek açılı karbonca zengin ostenit taneleri ile karşılaştıklarında ilerleyemedikleri ve son olarak uzun süreli yorulma deneylerinde kaba yapılı karbonca zengin ostenit tanelerinde (1050°C/870°C/375°C) daha küçük karbonca zengin ostenit tanelerine (870°C/375°C) nazaran daha büyük yorulma çatlak çekirdekçikleri bulunduğu yorumları yapılmıştır [27].

Faubert, G. P. ve arkadaşları % C 3.53-3.69, % Si 1.94-2.08, % Mn 0.19-0.54, % P 0.17, % S 0.010, % Cr 0.3-0.6, % Cu 0.77-17 ve % Ni 1.31-1.59 aralıklarında olan beş farklı kompozisyona sahip döküm KGDD bloklarının değişik bölgelerinden aldıkları numuneleri 871°C'de 2 saat ostenitlendikten sonra 352°C'de 4 saat süreyle ostemperlemişlerdir. Isıl işlemde sonra numuneler taşlanmış ve parlatılmıştır. Daha sonra döküm bloğun değişik bölgelerinden elde edilen numunelerin yorulma dayanımlarını Mn içeriği ve buldukları yer açısından incelemişlerdir. Yorulma deneyleri dakikada 9000 devir yapabilen bir dönen eğmeli yorulma makinesinde gerçekleştirilmiştir. Yorulma sınırı olarak 100 milyon çevrim kabul edilmiştir. OKGDD numunelerinin yorulma dayanımları 240-270 MPa arasında değişiklik göstermiştir ve döküm numuneye (perlitik matrisli) göre % 40-50 oranında bir artış kaydedilmiştir. Katılma bölgelerine göre ise döküm bloğun en üstünden alınan numunelerin en altından alınan numunelere oranla az da olsa daha iyi yorulma dayanımı sergiledikleri görülmüştür. Bunun nedeni olarak ta

alttaki ve üstteki bölgelerin bölgesel katılma hızlarının değişik olması olarak göstermişlerdir. Bu katılma sürelerindeki farklılıkların küre sayısında, küresellik oranında ve karbür sınırlarında kalıcı değişiklikler yaptığı yorumunu yapmışlardır. Ayrıca KGDD numunelerinin ostemperleme ısıl işlem sonucu elde ettikleri yüksek tokluk osferrit yapıdaki yüksek karbonlu ostenit miktarının da yorulma dayanımını döküm numuneye göre artırdığını belirtmişlerdir. Zaten ostemperleme sıcaklığı göz önüne alındığında en yüksek tokluğun elde edildiği sıcaklığa (360°C'de 2 saat) çok yakın bir sıcaklık seçilmiştir [28].

Jen, K. P. ve arkadaşları kimyasal bileşimi % C 3.24, % Si 2.75, % Mn 0.29, % P 0.005, % S 0.009, % Mg 0.04, % Cu 0.49, % Ni 0.05 ve % Mo 0.01 olan KGDD numunelerini sertlik, süneklik, çekme ve akma dayanımlarının yorulma dayanımları ile ilişkisini araştırmışlardır. Numuneler 900°C'de 90 dakika ostenitlendikten sonra 260°C, 300°C, 358°C ve 400°C'de 90 dakika süreyle ostemperlenmiştir. Yorulma deneyleri dakikada 2400 devir yapabilen tek yönlü eğmeli yorulma cihazında gerçekleştirilmiştir. Yorulma sınırı olarak  $10^7$  çevrim esas alınmıştır. Numunelerin yorulma dayanımları 360-490 MPa arasında gerçekleşmiştir. En yüksek yorulma dayanımı 358°C'de ostemperlenen numunede 490 MPa olarak gerçekleşmiştir. Deneyler sonucunda OKGDD'lerin yorulma dayanımlarının çekme dayanımları ile doğrusal bir ilişkisi yokken sertlikleri ve ostemperleme sıcaklık ve süreleri ile direkt ilgili olduğu belirtilmiştir. Sertlik arttıkça yorulma dayanımlarında bir azalma meydana gelmiştir. Diğer çalışmalarda olduğu gibi ostemperleme sıcaklığı 358°C'de en yüksek yorulma dayanımı elde edilmiştir [29].

Kim, J. H. ve arkadaşları kimyasal bileşimi % C 3.75, % Si 3, % Mn 0.15, % P 0.03, % S 0.015 ve % Mg 0.04 olan alaşımsız KGDD numunelerinden ısıl işlemlerle iki farklı mikro yapı elde ederek yorulma çatlağının bu farklı mikro yapılarda nasıl ilerlediklerini karşılaştırmışlardır. Sorbit adını verdikleri birinci mikro yapıyı elde etmek için numuneler 900°C'de 1 saat ostenitlendikten sonra suda soğutulmuş ve tekrar 600°C'de 1 saat bekletildikten sonra fırında soğutulmuştur. Osferrit mikro yapıyı elde etmek için ise numuneler 900°C'de 1 saat ostenitlendikten sonra 380°C'de tuz banyosunda 2 saat bekletilmiş ve ardından havada soğutulmaya bırakılmıştır. Isıl işlemde sonra numuneler taşlanmış, zımparalanmış ve

parlatılmıştır. Yorulma deneyleri dakikada 3500 devir yapabilen dönen eğmeli bir yorulma cihazında gerçekleştirilmiştir. Yorulma sınırı olarak  $10^7$  çevrim esas alınmıştır. Deneyler sonucunda döküm numunenin yorulma dayanımı sorbit yapıda 240 MPa ve ostenitlenmiş numunede 265 MPa olarak gerçekleşmiştir. Ostenitlenmiş numunenin daha yüksek yorulma dayanımı göstermesinin sebebi olarak osferrit yapıdaki karbonca zengin ostenit tabakalarının küçük yorulma çatlaklarının büyük yorulma çatlaklarına dönüşmesini engellemesine ve grafit etrafında bulunan ferrit tabakalarının sorbitten daha fazla plastik deformasyon enerjisi tutabilme kapasitesine sahip olmasına bağlamışlardır [30].

Bartosiewicz, L. ve arkadaşları kimyasal bileşimi % C 3.55, % Si 2.35, % Mn 0.37, % P 0.021, % S 0.001, % Mg 0.33, % Cu 0.48, % Ni 1.55, % Cr 0.05, % V 0.03, % Ti 0.02 ve % Mo 0.30 olan farklı ostenitleme sıcaklıklarının yorulma dayanımı üzerine etkilerini araştırmışlardır. Bütün numuneler  $870^{\circ}\text{C}$ 'de 2 saat ostenitlendikten sonra  $288^{\circ}\text{C}$ 'de 3.5 saat,  $330^{\circ}\text{C}$ 'de 2.5 saat,  $400^{\circ}\text{C}$ 'de 3 saat süreyle ostenitlenmişlerdir. Isıl işlemden sonra numuneler parlatılmıştır. Numunelere çentik açılmıştır.  $10^7$  çevrim esas alınmıştır. Numunelerin yorulma dayanımları 230 ile 417 MPa arasında değişiklik göstermektedir. En yüksek yorulma dayanımı  $400^{\circ}\text{C}$ 'de görülmüştür. Bunun nedeni olarak osferrit yapıdaki yüksek karbonlu ostenit miktarının bu sıcaklıkta fazla olmasına ve bu osferrit yapıdaki yüksek karbonlu ostenit tane boylarının diğer sıcaklıklara göre daha küçük olmasına bağlamışlardır. OKGDD'lerdeki yorulma çatlaklarının ferrit ve ostenit ara yüzeyinde de başlayabileceği ve ilerlerken karşısına çıkan grafit küreleri ile birleşme eğiliminde olduğu yorumu yapılmıştır. Ayrıca OKGDD'lerin çekme dayanımı ile yorulma dayanımı arasında basit bir bağlantı olmadığı, en yüksek yorulma dayanımına osferrit yapıdaki maksimum yüksek karbonlu ostenitin bulunduğu ve bu ostenit tanelerinin en küçük olduğu durumlarda elde edildiği (küçük tane boyu çatlak için daha fazla çevrim gerektirir) yorumları da yapılmıştır. Aslında bu çalışmada  $870^{\circ}\text{C}$ 'de 2 saat ostenitlendikten sonra  $370^{\circ}\text{C}$ 'de 2 saat ostenitlenen bir numune daha vardır fakat bu numunenin yorulma testleri bitmemiş olduğu için sonuçları verilememiştir. Diğer çalışmalar göz önüne alındığında en yüksek yorulma dayanımının bu sıcaklıkta çıkması beklenebilir. Çünkü  $370^{\circ}\text{C}$  hemen hemen bütün çalışmalarda bir standart gibi kabul edilen, osferrit yapıdaki yüksek karbonlu ostenitin maksimum elde

edildiği 360°C'ye diğer ostemperleme sıcaklıklarından (400°C ve 300°C) daha yakındır [31].

Bahmani, M. ve Eliot, R. yaptıkları bir araştırmada kimyasal bileşimi % 3.5 C, % 2.6 Si, % 0.96 Ni, % 0.27 Mo ve % 0.25 Mn olan küresel grafitli dökme demir (KGDD) numunelerini 870°C, 900°C ve 950°C'de ostenitlendikten sonra her ostenitleme süresi için 370°C'de 30, 90, 120 ve 240 dakika sürelerle ostemperleyerek ostenitleme sıcaklığının yorulma dayanımı üzerine etkisini (değişik ostemperleme sürelerinde) araştırmışlardır. Ayrıca KGDD numunelerini 900°C ostenitlendikten sonra 315°C, 350°C ve 400°C'de 90 dakika süreyle ostemperleme sıcaklığının yorulma dayanımı üzerine etkilerini araştırmışlardır. Numuneler ısıtılma sonrası taşlanmış, zımparalanmış ve parlatılmıştır. Daha sonra numuneler yorulma deneyine tabii tutulmuşlardır.  $10^7$  çevrim esas alınmıştır. Deneyler sonucunda numunelerin yorulma dayanımları 260-420 MPa arasında gerçekleşmiştir. Ostenitleme sıcaklığı düştükçe (370°C'de ostemperleme) yorulma dayanımının arttığı belirtilmiştir. Bunun nedeni de düşük ostenitleme sıcaklığının osferrit mikro yapıdaki karbonca zenginleşemeyen kararsız ostenit miktarını azaltmasına bağlamışlardır. Düşük ostenitleme sıcaklıklarında ostenitin karbon içeriği az olacağından yüksek ostemperleme sıcaklıklarında ostenitleme esnasındaki ostenitin karbon içeriği az olduğundan dönüşmemiş ostenit miktarı daha da azalacaktır. Karbon miktarının hemen hepsi yüksek karbonlu ostenit içerisine difuz edecektir. Bilindiği gibi düşük karbonlu kararsız ostenit mikro yapıda martenzite dönüşerek (yaklaşık % 3) yorulma dayanımını düşürmektedir. Ostemperleme sıcaklığı açısından diğer çalışmalarda olduğu gibi en yüksek yorulma dayanımı, osferrit mikro yapıdaki yüksek karbonlu ostenitin maksimum olduğu ostemperleme koşullarında elde edilmiştir [32].

Krishnaraj, D. ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada kimyasal bileşimi % C 3.60, % Si 1.82, % Mn 0.39, % P 0.04, % S 0.02 ve % Mg 0.048 olan KGDD numunelerini değişik ısıtılma işlemlere tabii tutarak farklı mikro yapılar elde etmişler ve bu mikro yapıların yorulma dayanımını kıyaslamışlardır. Ferritleme (ferritik matris için) ısıtılma işleminde numuneler 960°C'de 2 saat bekletildikten sonra 690°C'ye soğutulmuş ve bu sıcaklıkta 8 saat tutulduktan sonra fırında oda sıcaklığına soğutulmuştur. Normalizasyon (perlitik matris için) işleminde numuneler 960°C'de 2

saat bekletildikten sonra havada soğumaya bırakılmıştır. Temperleme (martenzitik matris için) işleminde numuneler 960°C'de 2 saat bekletilmiş daha sonra yağda soğutulmuş ve son olarak ta 550°C'de 2 saat temperlenerek havada soğumaya bırakılmıştır. Ostemperleme (beynitik matris için) işleminde ise numuneler 960°C'de 1 saat bekletildikten sonra 350°C'de 1 saat tuz banyosunda tutulmuş daha sonra havada soğumaya bırakılmıştır. Numuneler dönen eğmeli yorulma deneyine tabii tutarak karşılaştırmışlardır. Yorulma sınırı olarak  $10^7$  çevrim kabul edilmiştir. Sonuç olarak en yüksek yorulma dayanımını 510 MPa olarak beynitik matrisli OKGDD numunelerinin gösterdiği tespit edilmiştir. Ferritik yapının en fazla yorulma oranına (çekme dayanımı/yorulma dayanımı = 0.49) sahip olmasına rağmen tekrarlı yüklere uygun olmadığı için yorulma dayanımının düşük olduğu, perlitik ve martenzitik yapılarının nispeten sert oldukları için daha iyi yorulma dayanımı sergiledikleri fakat osferrit (beynitik) yapının bu mikro yapılar içerisinde en iyi yorulma dayanımına sahip olduğunu bunun da nedeninin diğer çalışmalarda olduğu gibi yüksek tokluk değeri ve osferrit yapıdaki yüksek karbonlu ostenit miktarının fazla olması olarak belirtilmiştir [33].

Stokes, B. ve Reed, P. A. S. yaptıkları bir çalışmada kimyasal bileşimi % C 3.60, % Si 1.82, % Mn 0.39, % P 0.04, % S 0.02 ve % Mg 0.048 olan değişik ostemperleme koşullarının OKGDD numunelerinin mekanik özellikleri üzerine etkilerini araştırmışlardır. Numuneler 900°C'de 2 saat ostenitlendikten sonra 390°C'de 2 saat ve 800°C'de 2 saat ostenitlendikten sonra 260°C'de 2 saat ve 390°C'de 2 saat süreyle ostemperlenmişlerdir. Numuneler ısı işleminden sonra zımparalanmış ve parlatılmıştır. Deneylerde 10x10x70 mm ölçülerindeki numuneler kullanılmıştır. Yorulma sınırı olarak  $10^5$  çevrim kabul edilmiştir. Deneyler sonucunda 800°C'de ostenitlenen numunelerde düşük silisyum oranlarından dolayı artan segregasyonun sonucu kırılğan ikincil sementitlerin oluştuğu ve bunların gerilme altında çatlayarak yorulma çatlağının daha erken başlamasına neden olduğu dolayısıyla yorulma dayanımını düşürdüğü yorumu yapılmıştır. Çatlakların grafit ile matris ara yüzeyinde başladığı ve birbirleriyle birleşme eğiliminde olduğu belirtilmiştir. Ayrıca 900°C'de ostenitlenen numunenin osferrit yapıdaki yüksek karbonlu ostenit miktarının fazla olmasının yorulma dayanımını artırdığı osferrit



yapının grafitlerden kaynaklanan çatlakların ilerlemesini zorlaştırıcı etki yaptığı belirtilmiştir [34].

Hayrynen, K. L. ve arkadaşları yaptıkları bir araştırmada kimyasal bileşimleri % C 3.48-3.57, % Si 2.21-2.53, % Mn 0.019-0.033, % S 0.006-0.011, % Mo 0.003-0.028, % Cu 0.019-0.047 ve % Ni 0.044-0.059 arasında olan ferritik matrisli KGDD numunelerini 927°C'de 2 saat ostenitlendikten sonra 316°C, 371°C ve 410°C'de 15 dakika süreyle ostemperlemişlerdir. Daha sonra numuneleri dönen eğmeli yorulma deneyine tabii tutmuşlardır. Yorulma sınırı olarak  $10^8$  çevrim esas alınmıştır. Deneysel sonuçlarda ostemperleme işlemi ile döküm numuneye göre sadece % 10'luk bir yorulma dayanımı artışı olduğu rapor edilmiştir. 3 değişik sıcaklıkta ostemperlenen numunelerin yorulma dayanımları birbirine çok yakın çıkmıştır (350 ile 375 MPa arası). Bunun nedeni olarak ta ostemperleme süresinin kısa olmasından dolayı 1nci kademe reaksiyonun henüz başlarında olduğu için gerekli dönüşümlerin ( $\gamma \rightarrow \alpha + \gamma_c$ ) oluşmadığı bunda yorulma sonuçlarını etkilediği yorumu yapılmıştır. Normalde optimum özellikler için en az 2 saat ostemperlemenin yapılması gerektiği belirtilmiştir[35].

Shanmugam, P. ve arkadaşları yaptıkları bir araştırmada kimyasal bileşimi % C 3.75, % Si 2.29, % Mn 0.374, % P 0.34, % S 0.014, % Mg 0.04, % Ni 1.5 ve % Mo 0.3 içeren alaşımlı KGDD numuneleri 900°C ve 1050°C'de 1 saat ostenitlendikten sonra 280°C ve 400°C'de 15, 30, 60 ve 90 dakika süreyle ostemperlenmişlerdir. Numuneler ısı işlem sonrası taşlanmış, zımparalanmış ve parlatılmıştır. Daha sonra numuneler çift noktadan dönen eğmeli yorulma deneyine tabii tutulmuşlardır. Dakikada 1400 devir yapabilen bir yorulma cihazında  $10^6$  çevrim esas alınmıştır. 900°C ostenitlemeden sonra, düşük ostemperleme sıcaklıklarında osferrit yapıda yaklaşık % 10, yüksek ostemperleme sıcaklıklarında ise osferrit yapıda % 40 yüksek karbonlu ostenit elde edilmektedir. Deneysel sonuçlarda ostenitleme sıcaklığının yükselmesi ile (1050°C) osferrit yapıdaki yüksek karbonlu ostenit miktarı düşük ostemperleme sıcaklıklarında (280°C) yüksek ostemperleme sıcaklıklarından (400°C) daha fazla olmuştur (~% 51). Bunun sebebini artan ostenitleme sıcaklığı ile birlikte matrisin karbon içeriğinin artmasına ve yüksek karbon içeriğinin düşük sıcaklıklarda bile kolayca difüzyon ederek daha uzun

beynitik tabakalarını meydana getirebilmesine bağlamışlardır. Yüksek sıcaklıklarda (1050°C) ostenitlenen numuneler düşük sıcaklıklarda (280°C) bile yüksek miktarda (~% 51) osferrit yapıdaki yüksek karbonlu ostenit ihtiva etmelerine rağmen önceki ostenit (ısıl işlemde önceki) tane boyu büyüdüğünden ve hücre sınırlarında karbon segregasyonuna neden olduğundan düşük sıcaklıklarda ostenitlenen ve yüksek miktarda osferrit yapıdaki yüksek karbonlu ostenit ihtiva eden numunelerden daha az yorulma dayanımı gösterir. Bu nedenle en iyi yorulma dayanımını, osferrit yapıdaki yüksek karbonlu osteniti içeren ve bu ostenit tane boyutları küçük olan ve hücre sınırlarında segregasyon oluşmamış numunelerin gösterdiğini belirtmişlerdir. Numunelerin çekme dayanımlarının düşerken yorulma dayanımlarının arttığını rapor etmişlerdir. Yüksek sıcaklıkta ostenitleme yapıldıktan sonra (1050°C) yüksek ostemperleme sıcaklıklarında (400°C) 2nci kademe reaksiyonun çok çabuk başladığı (30 dakika) bununda karbüre neden olduğu dolayısıyla yorulma dayanımının düştüğünü belirtmişlerdir [36].

Luo, J. ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada Ti içeren OKGDD'lerin yorulma dayanımlarını ölçmüşlerdir. Ostemperleme işlemi 890°C'de 2 saat ostenitlendikten sonra 370°C'de 2.5 saat süreyle gerçekleştirilmiştir. Numuneler yorulma deneyine tabii tutulmuşlardır. Deneyler sonucunda OKGDD'lerde Ti oranının artmasıyla yorulma dayanımının azaldığı görülmüştür. Bunun nedenini Ti içeriğinin grafit küre sayısını düşürmesine bağlamışlardır [37].



## 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 4.1 Kullanılan Malzeme ve Özellikleri

Deneylerde, 900°C’de 110 dakika ostenitlenip 230°C’de 1 saat, 330°C’de 0.5, 1 ve 2 saat ve 430°C’de 1 saat sürelerle ostemperlenen, kimyasal bileşimi % C 3.9, % Si 2.104, % Mn 0.063, % P 0.25, % S 0.011, % Ni 0.018, % Al 0.008, % Cu 0.007, % Mg 0.22 olan alaşımsız küresel grafitli dökme demir (KGDD) numuneleri kullanılmıştır. Ostenitleme ısıl işlemi için en fazla 1000°C sıcaklığa kadar ısınabilen, ostemperleme ısıl işlemi içinse en fazla 600°C sıcaklığa kadar ısınabilen mazotla çalışan ISTAŞ marka tuz banyoları kullanılmıştır[5].

Tablo 4.1 Malzemenin kimyasal bileşimi [5].

Element	Fe	C	Si	Mn	P	S	Ni	Al	Cu	Mg
%	93.736	3.905	2.104	0.063	0.025	0.011	0.018	0.008	0.007	0.022

Tablo 4.2 Numunelerin ostemperleme sıcaklık, süre ve mekanik özellikleri [5].

No	Ostenitleme Sıcaklığı ve Süresi	Yorulma Numune Sayısı	Ostemperleme Sıcaklığı	Ostemperleme Süresi	Darbe (J)	Çekme (MPa)	Sertlik (HB)
1	900°C’de 110 dakika	12	Isıl İşlemsiz	-	12.3	460	188
2		12	230°C	1 saat	7.75	1080	404
3		12	330°C	0.5 saat	13	963	274
4		12		1 saat	11.30	960	284
5		12		2 saat	10.40	969	281
6		12	430°C	1 saat	4.53	819	274

### 4.2 Yapılan Deneyler

Deneyisel çalışmalar, mikro yapı deneyleri, yorulma deneyleri ve kırılma yüzeyleri deneyleri olmak üzere üç ayrı bölümde gerçekleştirilmiştir.

#### 4.2.1 Mikro Yapı Deneyleri

Yorulma deneylerinde kullanılan 6 grup OKGDD numunelerinden (ısıt işlemsiz, 230°C'de 60 dakika, 330°C'de 30, 60 ve 120 dakika ve 430°C'de 60 dakika) alınan 5x5x20 mm boyutlarındaki parçalar aşağıdaki işlem sıraları takip edilerek mikro yapı incelemeleri yapılmıştır.

Numuneler ilk önce Taksan BRH 20 düzlem yüzey taşlama tezgahında taşlanarak parlatılmış ve polyester malzeme içerisine gömülmüştür. Daha sonra % 5'lik nital çözeltisine sürme yöntemi ile yaklaşık 3-5 saniye dağlanmıştır. Taşlama işleminde tane büyüklüğü 46 olan 250x20x76 mm boyutlarında silindirik taş kullanılmıştır. Daha sonra Olympous marka 50-100-200-400-750-1000X büyütme yapabilen optik mikroskop altında numunelerin mikro yapıları incelenerek 50X, 100X, 400X büyütme fotoğrafları çekilmiştir. Fotoğraflar banyo işleminin ardından düz yataklı bir tarayıcı ile taranmıştır. Bilgisayarda görüntü analiz programı kullanılarak mikro yapının siyah-beyaz görüntüleri elde edilmiştir. Mikro yapı görüntüleri Şekil 4.(1-6)'da gösterilmiştir.

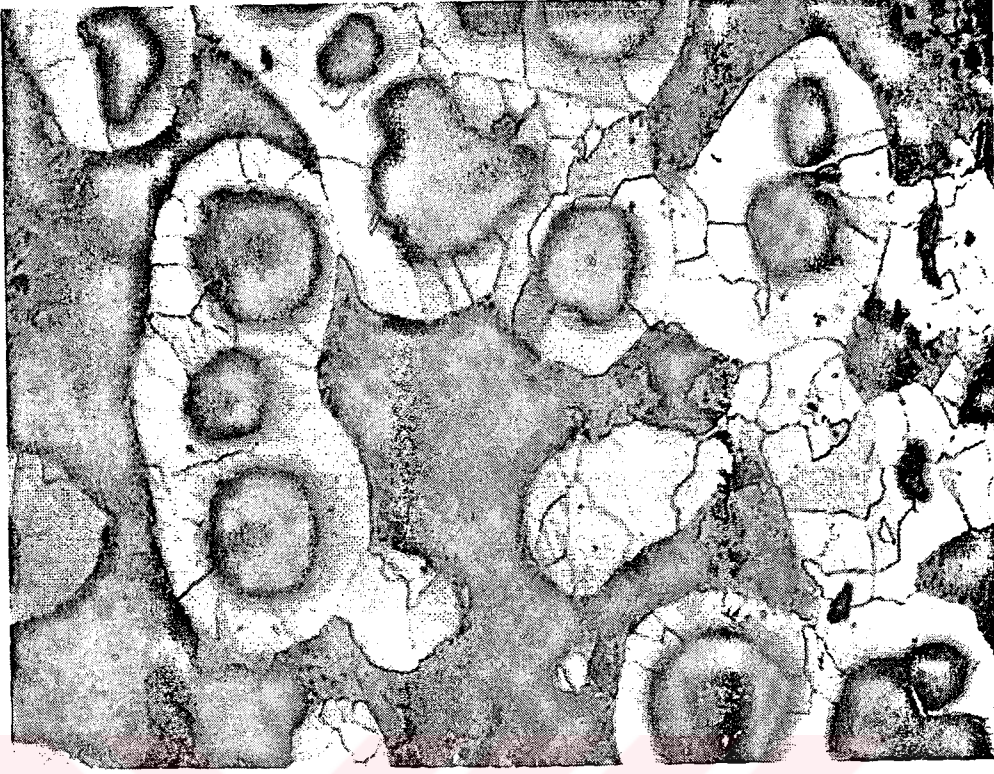
Mikro yapı fotoğrafları incelendiğinde ostemperleme sıcaklık ve sürelerinin numuneler üzerindeki etkileri görülebilmektedir. Şekil 4.1'e bakıldığında 230°C'de 1 saat ostemperlenen numunede osferrit mikro yapının oluşmadığı görülmektedir. Bu beklenen bir sonuçtur. Çünkü düşük ostemperleme sıcaklıklarında karbonun ferrit plakalarından yüksek karbonlu ostenite difüzyon hızı düşük olduğu için 1nci kademe reaksiyonunda ferrit ve yüksek karbonlu ostenite dönüşemeyen kararsız haldeki ostenit martenzite dönüşmektedir ki bu mikro yapının sert ve kırılğan olması anlamına gelmektedir. Tablo 4.2'ye bakıldığında 230°C'de 1 saat ostemperlenen numunenin en yüksek sertlik değerine sahip olması bunu doğrulamaktadır

Şekil 4.3-5'e bakıldığında 330°C'de 30, 60 ve 120 dakika sürelerle ostemperlenen numunelerin mikro yapıları karşılaştırıldığında ostemperleme süresinin bu mikro yapılar üzerine etkileri rahatlıkla görülebilmektedir. Şöyle ki 330°C'de 30 dakika ostemperlenen numunede ostemperleme süresinin yetersizliğinden 1nci kademe reaksiyonunun henüz bitmemiş olması bu yüzden de

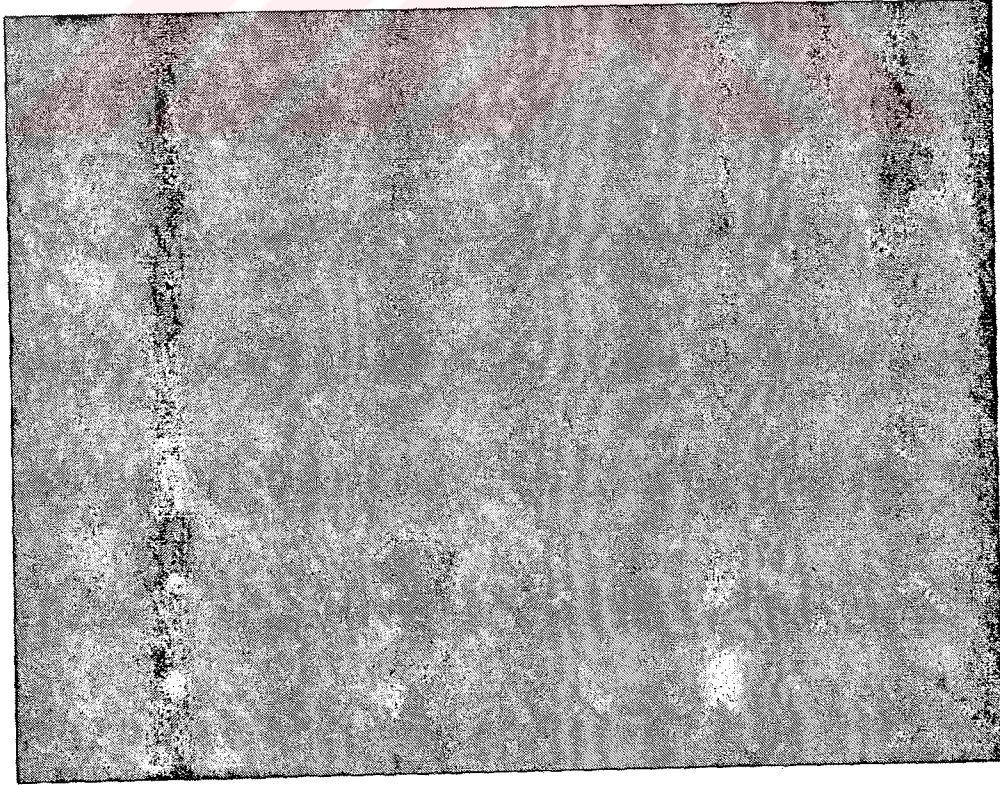
1nci kademe reaksiyonunda beynitik ferrit ve yüksek karbonlu ostenite ayrışamayan ostenitin kararsız olduğu için martenzite dönmüş olması muhtemeldir. Şekil 4.3'te ferrit plakalarının ince ve uzun olması bunun bir sonucudur. Ferrit plakaları tam olarak gelişmemiştir. 330°C'de 60 dakika ostemperlenen numunede osferrit mikro yapı net olarak görülmektedir. Ferrit plakaları 30 dakika ostemperlenen numuneye göre daha kaba bir yapı göstermektedir (Şekil4.4). 60 dakikalık bir ostemperleme süresinin uygun işlem aralığı için yeterli bir süre olduğu düşünülebilir. 330°C'de 120 dakika ostemperlenen numunede ise 2nci kademe reaksiyonu başlamış olabileceğinden mikro yapıdaki ferrit plakalarının sayısında bir artış görülmektedir (Şekil 4.5). Bilindiği gibi 2nci kademe reaksiyonunda yüksek karbonlu ostenit ferrit ve karbüre ayrışmaktadır.

430°C'de 1 saat ostemperlenen numunenin mikro yapısında osferrit yapı görülememektedir. Ostemperleme sıcaklığının yüksek olmasından dolayı yüksek karbonlu ostenit içindeki karbonlar kararlı hale gelmek için karbür oluşturur. Şekil 4.6'da bu mikro yapı rahatlıkla görülebilmektedir.



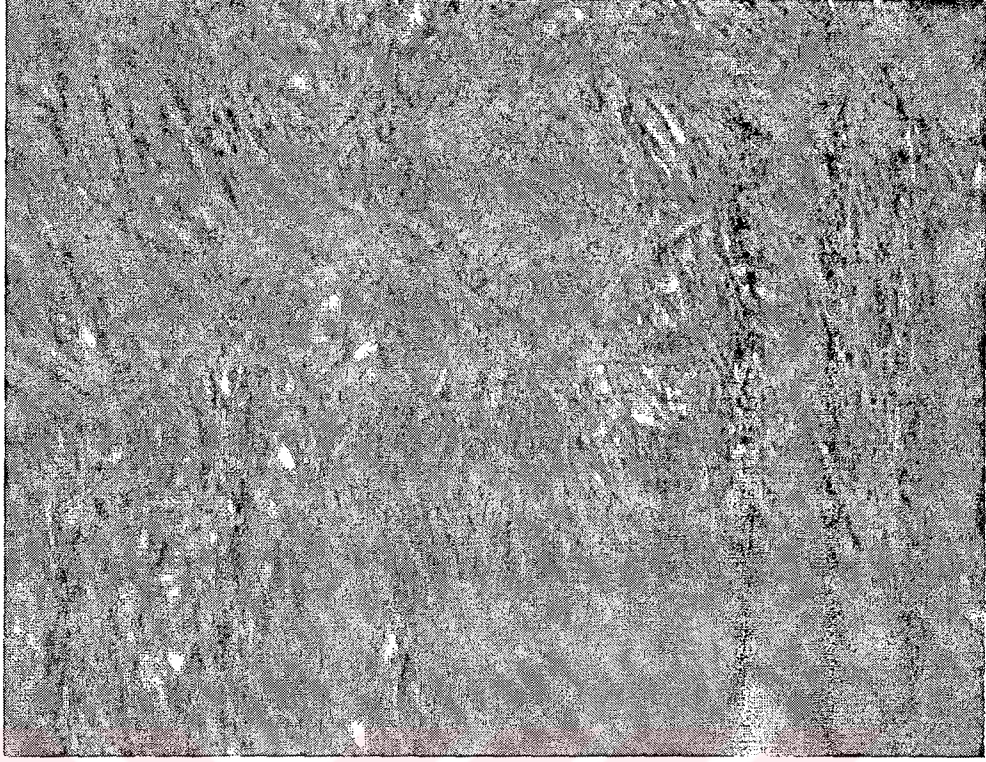


Şekil 4.1 Isıl işlemsiz numunenin 100X mikro yapı görüntüsü.

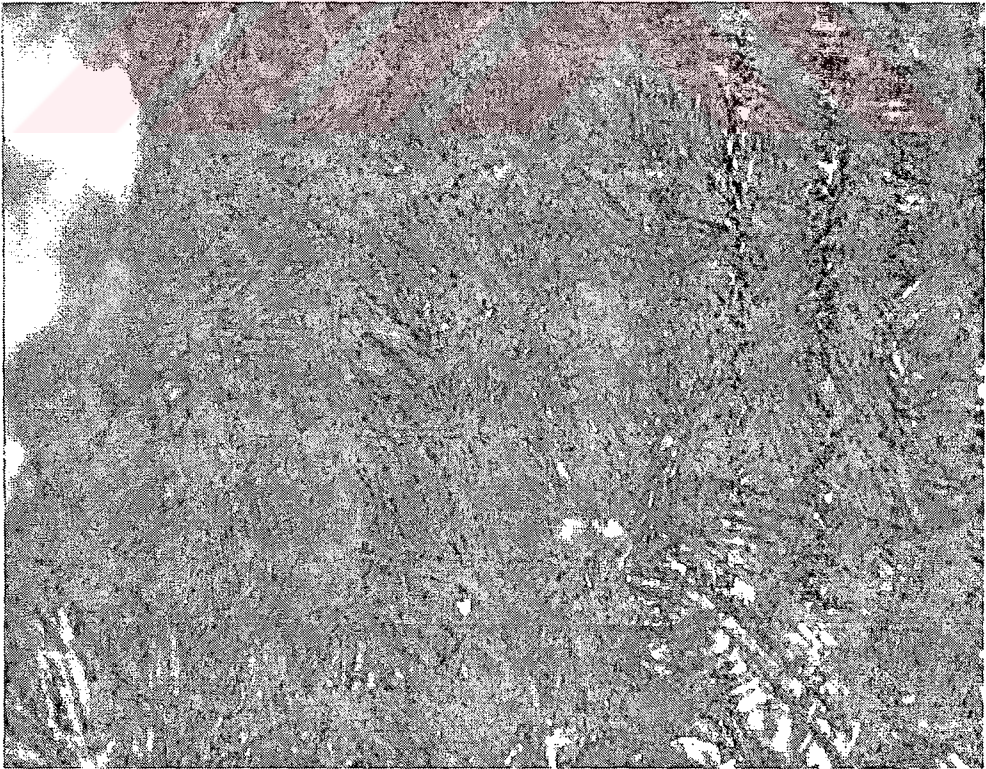


Şekil 4.2 230°C'de 1 saat ostemperlenen numunenin 400X mikro yapı görüntüsü.



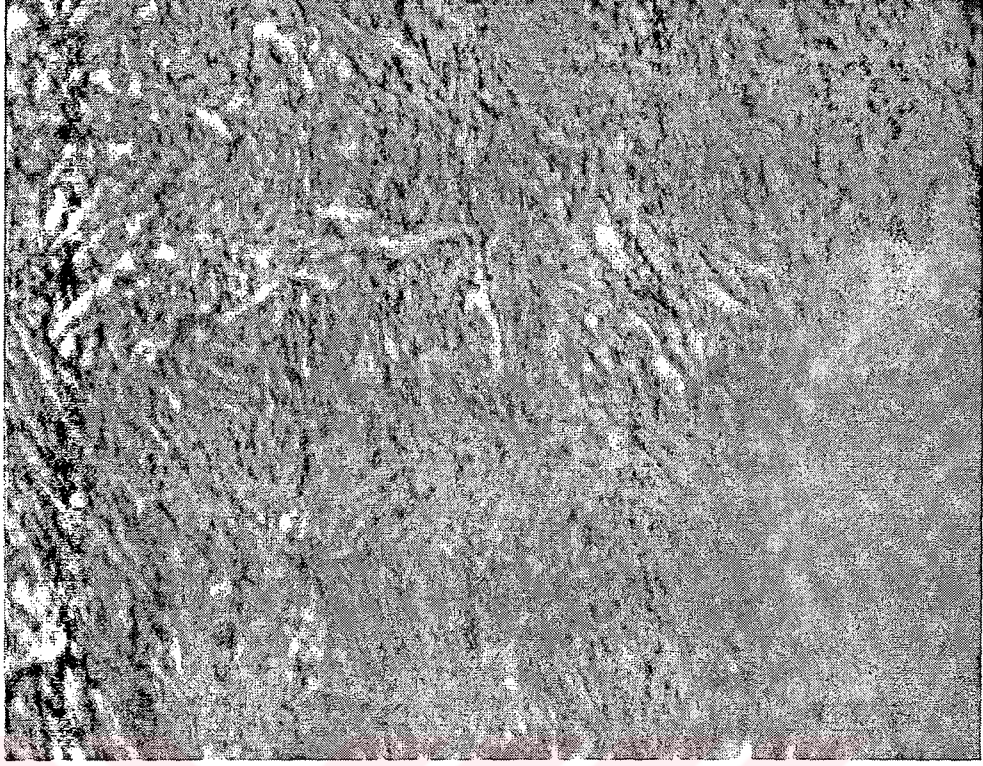


Şekil 4.3 330°C'de 0.5 saat ostenperlenen numunenin 400X mikro yapı görüntüsü.

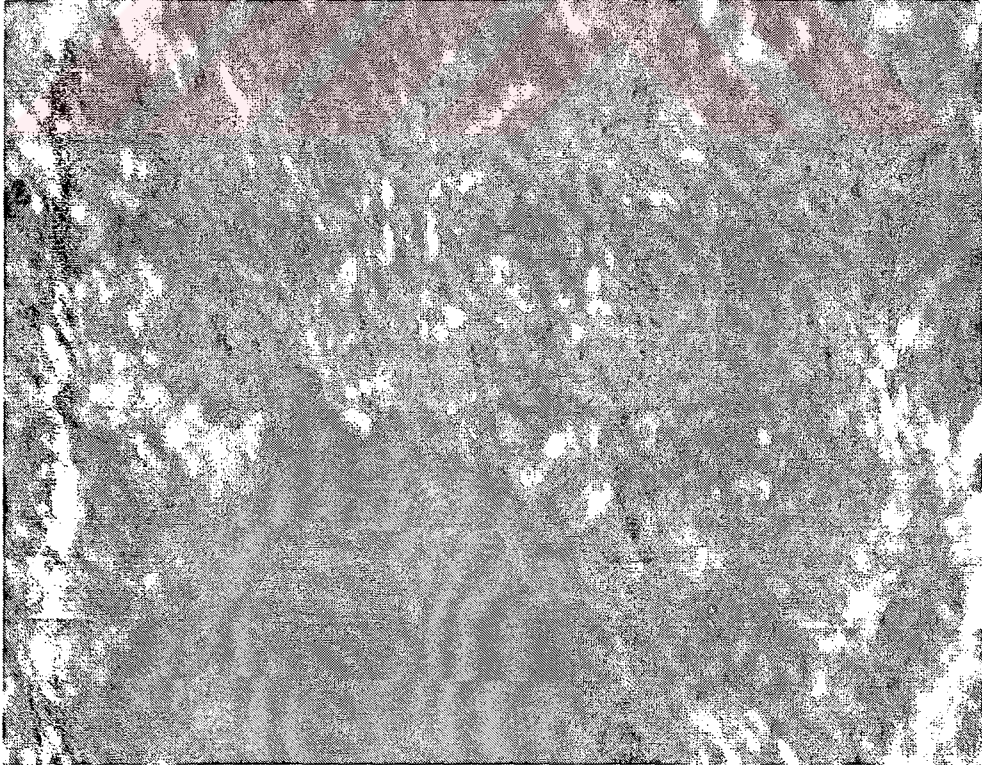


Şekil 4.4 330°C'de 1 saat ostenperlenen numunenin 400X mikro yapı görüntüsü.





Şekil 4.5 330°C'de 2 saat ostemperlendiği numunenin 400X mikro yapı görüntüsü.



Şekil 4.6 430°C'de 1 saat ostemperlendiği numunenin 400X mikro yapı görüntüsü.



## 4.2.2 Yorulma Deneyleri

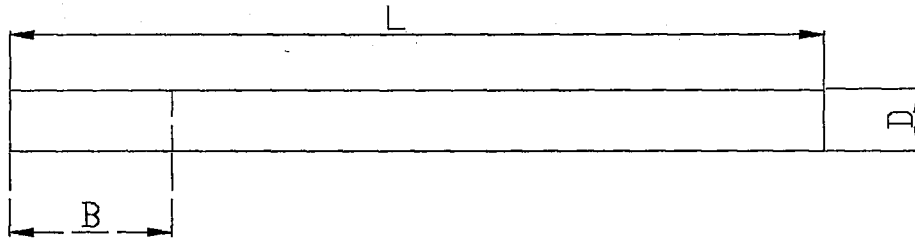
OKGDD'lerin yorulma deneyleri 2 grupta gerçekleştirilmiştir. 1nci grup deneylerde ostemperleme sıcaklığının OKGDD'lerin yorulma dayanımı üzerine etkileri ve ısıl işlemsiz KGDD numunesiyle karşılaştırılması, 2nci grup deneylerde ise 330°C'de üç farklı sürede (30, 60 ve 120 dakika) ostemperlenen numunelerin yorulma deneyleri gerçekleştirilerek ostemperleme süresinin OKGDD'lerin yorulma dayanımı üzerine etkileri ve ısıl işlemsiz KGDD numunesi ile karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir. OKGDD'lerin yorulma dayanımı dahil bütün mekanik özelliklerinin belirlenmesinde osferrit denilen mikro yapının çok önemli bir rolü olduğu bilinmektedir. Bu osferrit mikro yapı ise ostemperleme ısıl işlemi ile elde edilmektedir. Ostemperleme ısıl işleminin en önemli iki parametresi ostemperleme sıcaklığı ve süresidir. Bu yüzden özellikle bu iki parametre üzerine yoğunlaşmıştır.

### 4.2.2.1 Yorulma Deneylerinde Kullanılan Numune ve Ölçüleri

Yorulma deneyi için Şekil 4.7'de görülen ve ölçüleri Tablo 4.3'de verilen yorulma numuneleri kullanılmıştır. Deney numunelerinin boyu, bağlama uzunluğu, çapı sabit tutulmuştur.

Tablo 4.3 Yorulma numunesinin ölçüleri.

D = Çap (mm)	B = Bağlama yeri uzunluğu (mm)	L = Toplam numune uzunluğu (mm)
8	20	100

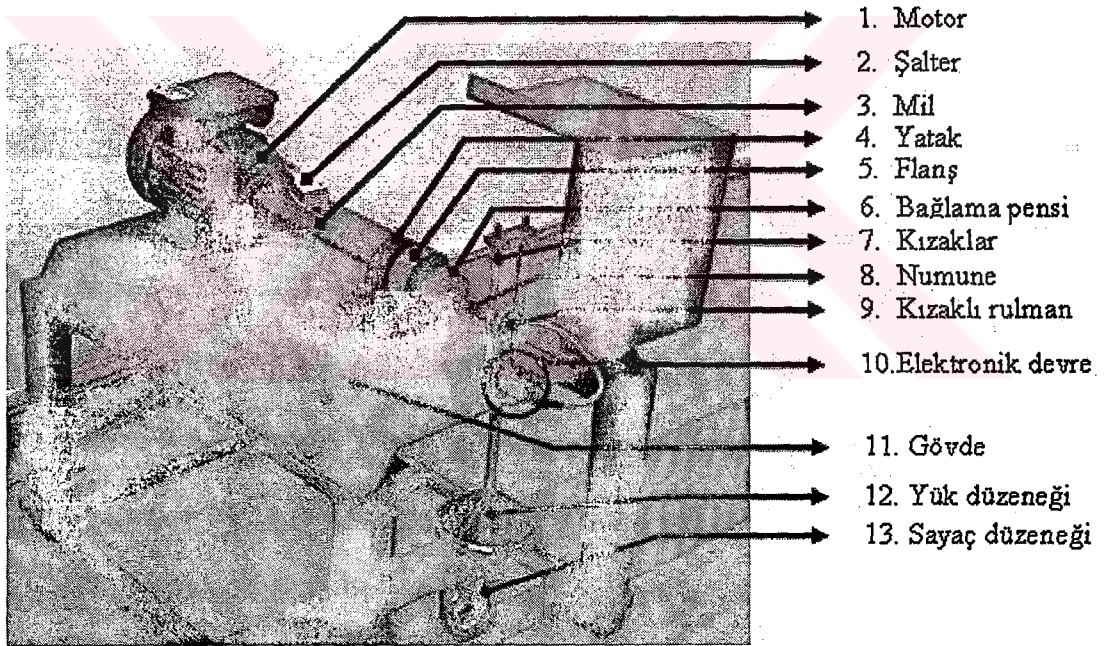


Şekil 4.7 Yorulma Numunesi.



#### 4.2.2.2 Deneylerde Kullanılan Cihazın Özellikleri ve Çalışma Prensibi

Yorulma deneyleri “Ankastre kiriş” türü yorulma deney cihazında gerçekleştirilmiştir. Daha önce Bölüm 2.4.3’de bahsedildiği gibi ankastre kiriş türü yorulma deneyinde numune bir ucundan bir motor tarafından döndürülen yataklı bir mile aparatlar yardımıyla takılarak rijit bir şekilde dönmesi sağlanırken, diğer ucundan da gene yardımcı aparatlar yardımıyla eğme gerilmesi uygulanarak numunenin uygulanan bu gerilmeye karşı kırıldığı veya kırılmadığı çevrim sayısı gerekli düzeneklerle ölçülmektedir. Ankastre kiriş türü yorulma deneylerini gerçekleştirmek için resmi ve parçaları Şekil 4.8’de gösterilen yorulma cihazı tasarlanmış ve imal edilmiştir.



Şekil 4.8 Yorulma deney cihazının resmi ve parçaları.

Dakikada 2950 devir yapan bir cihazın gövdesine (11) sıkı bir şekilde bağlanan elektrik motoruna (1) yataklı (4) bir mil (3) monte edildikten sonra numunenin (8) titreşim yapmadan dönmesi için milin diğer ucuna flanş (5) ve bağlama pensi (6) monte edilmiştir. Dönen numuneye gerilme uygulayabilmek için gövdeye iki tane kızak (7) monte edilmiş ve bu kızaklarda aşağı yukarı hareket

edebilen bir kızaklı rulman (9) düzeneği (8 mm'lik iç çapa sahip bir rulman silindirik bir polyamitin içerisine monte edildikten sonra polyamite kızak kanalları açılmış ve yükün takılacağı kanca monte edilmiştir) yapılmıştır. Numune kırıldığı zaman yükün takılı olduğu kızaklı rulman aşağı doğru düşerek zaman sayacının (13) ve şalterin (2) açılıp kapanmasını kontrol eden elektronik devreye (10) bağlı iki sensörü harekete geçirir. Bu sensörlerin iki görevi vardır. Bunlar deney numunesi kırıldığında zaman sayacını (13) ve yorulma deney cihazını durdurmaktadır.

Deney numunesi kırıldığı anda yorulma cihazının kaç devir yaptığını hesaplamak için cihaz çalıştırdıktan sonra ağırlığın (12) numuneye uygulandığı zaman ile numunenin kırıldığı andaki zaman arasındaki fark (dakika cinsinden) cihazın devir sayısı ile (2950 dev/dak) çarpılır.

$$\text{Devir sayısı} = (t_2 - t_1) \times 2950 \quad (4.1)$$

Burada;

$t_2$  = Numunenin koptuğu zaman

$t_1$  = Ağırlığın numuneye uygulandığı zamandır.

Yorulma deneyleri uzun sürebildiğinden (bu çalışmada  $10^7$  yorulma sınırı çevrim değerine ulaşabilmek için yaklaşık 56 saat gerekmektedir) cihaz çalışırken elektrik kesintilerinin olmaması gerekmektedir. Bunu önlemek için deneyler elektrik jeneratörünün mevcut olduğu bir yerde gerçekleştirilmiştir. Buna rağmen jeneratörün devreye girmediği durumları tespit etmek için zaman sayacına adaptör bağlanarak (elektrik gelmediğinde zaman sayacı durmaktadır) cihazın numune kırılmasından değil de elektrik kesintilerinden dolayı durduğu durumlar tespit edilerek bu durumdaki numuneler değiştirilmiş ve tekrar deneye devam edilmiştir. Kısaca zaman sayacı iki durumda durmaktadır. Bunlar numune kırıldığında elektronik devre tarafından ve elektrik kesintisi olduğu durumlardır.

### 4.2.2.3 Uygulanan Gerilmenin Hesabı

Yorulma deneylerinde numunelere eğme gerilmesi uygulanmıştır. İstenen gerilme değerlerini elde etmek için numuneye uygulanması gereken moment;

$$M = \frac{\sigma \cdot \pi \cdot d^3}{32} \quad (4.2)$$

eşitliği ile hesaplanmıştır. Burada;

M : Eğme momenti (Nm),

$\sigma$  : Eğme gerilmesi (MPa),

d : Numune çapı (m) olarak alınmıştır.

Hesaplanan değerlere göre yorulma ömrü sınır değeri  $10^7$  baz alınarak yükleme yapılmıştır (TS 1487 UDK669.14) [20]. Yapılan yüklemeler sonucu uygulanan tekrarlı gerilme hesabı ;

$$\sigma_{\max} = \sigma_g = \frac{Me_{\max}}{\omega} \quad (4.3)$$

$$\omega_{\text{daire}} = \frac{I}{c} = \frac{\pi d^4}{64 / d/2} = \frac{\pi d^3}{32} \quad (4.4)$$

$$\sigma = \frac{32Fl}{\pi d^3} \quad (4.5)$$

elde edilmiştir Burada;

$\sigma$  : Gerilme (MPa)

$\omega$  : Dayanım Momenti

d : Parça çapı (m)

$M_e$  : Eğilme Momenti

$F$  : Uygulanan Yük (N)

$l$  : Parça boyunu (m) ifade etmektedir.

#### 4.2.2.4 Cihazın Deneye Hazırlanması ve Deney Parametreleri

OKGDD'lerin yorulma özellikleri ısıtma şartları, küresellik, küre sayısı ve şekli vb. birçok parametre tarafından etkilenmektedir. Yorulma cihazının deneye hazırlanması ve deney parametreleri maddeler halinde sıralanmıştır.

1. Cihazın şalterinin kapalı olup olmadığı kontrol edilmiştir. Açıkta kapatılmıştır.
2. Deney numunesinin bir ucu Şekil 4.1'de gösterilen B mesafesi kadar sıkma pensinin içerisine sokulup sıkılırken diğer ucu kızaklı rulmana takılmıştır. Kızaklı rulmana henüz yük takılmamıştır.
3. Şalter açılarak cihaz çalıştırılmış düzgün çalışıp çalışmadığı kontrol edilmiştir. Yük henüz takılmamıştır.
4. Hesaplanan yük değeri (bir sonraki alt başlık olan 4.2.2.4'te detaylı olarak açıklanmıştır) cihaz çalışırken uygulanacağından yükün numunede ani bir gerilme meydana getirmemesi için önce yükün altından el ile tutularak numuneye gerilme uygulaması engellenmiş, sonra yükün kancası kızaklı rulmanın kancasına takılmış ve en sonunda el yavaş bir şekilde yükten çekilmiştir.
5. Yük takıldıktan sonra zaman sayacı ayarlanmıştır.
6. Numune grubu ve numarası, uygulanan yükün ağırlığı ve zaman bilgileri tabloya kayıt edilmiştir.
7. Daha sonra deney cihazı sık sık kontrol edilerek numunenin kırılıp kırılmadığı kontrol edilmiştir.

8. Numunenin kırılmış olduğu durumlarda kırılan iki parça kırılma yüzeyleri birbirine temas etmeyecek şekilde bantlanarak (yüzeylerin birbirine teması kırılma yüzeylerinin sonradan incelenmesini zorlaştıracığı için) havası alınmış poşetlere konmuş (kırılma yüzeylerinin paslanmasını engellemek için) ve numunenin kırılma zamanı ve bu zamana bağlı olarak kırılma çevrim sayısı tabloya kaydedilmiştir.
9. Yeni numune takılırken bir önceki numune kırılmış ise uygulanan yük azaltılmış bir önceki numune  $10^7$  çevrim yapıp kırılmamışsa uygulanan yük artırılmıştır. Deneyler bu şekilde sürdürülerek o deney grubunun  $10^7$  çevrimde kırılmadan kalabildiği en yüksek gerilme değeri bulunmaya çalışılmıştır.  $10^7$  çevrimde kırılmadan uygulanabilen en yüksek gerilme değeri ile bu değere en yakın kırılan numunelere uygulanan gerilme değeri arasındaki fark 5-10 MPa'a düşünceye kadar (5-10 MPa'lık fark yeterli görülmüştür) deneylere devam edilmiştir.
10. Bütün deneyler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.
11. Bütün numuneler deneyden önce ve sonra havası alınmış poşetlerde muhafaza edilerek paslanmaları engellenmiştir.
12. Bütün deneylerde kullanılan numunelerin boyları, çapları ve bağlanma yerleri aynıdır ve Tablo 4.3 ve Şekil 4.1'de gösterildiği gibidir.
13. Hiçbir numuneye taşlama, parlatma, zımparalama, bilye ile dövme gibi yüzey işlemleri uygulanmamıştır.
14. Bütün deneylerde yorulma cihazının çevrim frekansı sabit olup dakikada 2950 devirdir.
15. Yorulma deney türünün özelliğinden dolayı gerilme oranı  $R(\sigma_{\min} / \sigma_{\max}) = -1$ 'dir. (Tam değişken gerilme ve alternatif gecikme)

16. Her grup deney numunesinin yorulma dayanımını tespit etmek için 12 adet numune kullanılmıştır. Genelde 10 adet kullanılır. En az 6 adet olmalıdır [20].

Çalışmada yukarıdaki parametrelerden 12, 13, 14 ve 15 sabit (yalnız 15nci parametre gerilme genliği değiştirilmiştir) tutulmuştur. Bunun dışında ısıl işlem koşullarından ostemperleme sıcaklık ve süresi değiştirilmiştir. Yalnız ostemperleme işleminde ostenitleme sıcaklık ve süresi tüm numunelerde 900°C'de 110 dakika olarak sabit tutulmuştur. Deneylerde numunelerin ostemperleme sıcaklık ve süreleri ile yorulma dayanımı ilişkileri araştırılmıştır.

#### 4.2.2.5 Woehler Eğrilerinin Çıkarılması

Yorulma cihazının özelliğinden gerilme oranı  $R = (\sigma_{\min} / \sigma_{\max}) = -1$  ve dolayısıyla gerilme cinsi (tam değişken) sabit tutulmaktadır.  $10^7$  çevrim sonunda kırılmadan dayanan numuneler için yorulma ömrü sonsuz kabul edilmiştir. Her grup numunelerin yorulma davranışları S-N eğrisi yaklaşımıyla (Gerilme genliği-Çevrim sayısı) incelenmiştir. Gerilme-çevrim sayısı eğrileri (Woehler eğrileri) TS 1487 UDK669.14 (metallerin yorulma deneyi genel prensipleri) standartlarına uygun olarak logaritmik ölçekle çıkarılmıştır [20].

#### 4.2.2.6 Birinci Grup Deneyler (Ostemperleme Sıcaklığı Yorulma Dayanımı İlişkisi)

İnci grup deneylerde 230°C, 330°C ve 430°C sıcaklıklarında 1 saat gibi sabit bir süreyle ostemperlenen (900°C'de 110 dakika ostenitlenmiş) numunelerle ısıl işlemsiz numunelerin yorulma deneyleri gerçekleştirilerek ostemperleme sıcaklığının OKGDD'lerin yorulma dayanımı üzerine etkileri ve aynı zamanda ısıl işlemsiz duruma göre meydana gelen artışların seviyeleri incelenmiştir.

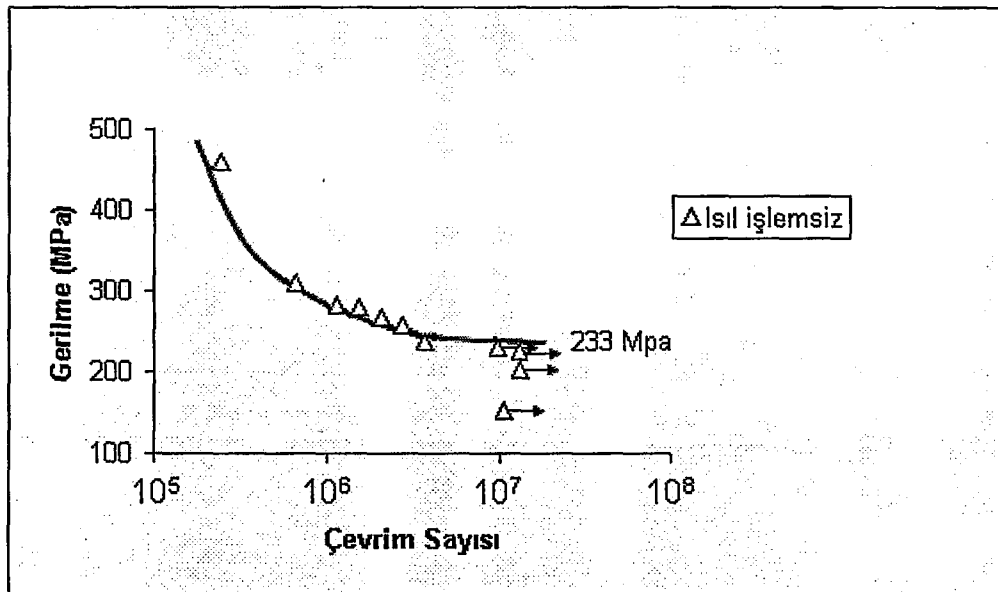
Deneyler sonucunda ısıl işlemsiz numunelerden elde edilen S-N değerleri Tablo 4.4'de, Woehler eğrileri Şekil 4.9'da, 230°C'de 60 dakika ostemperlenen



numunelerden elde edilen S-N değerleri Tablo 4.5’de, Woehler eğrileri Şekil 4.10’da, 330°C’de 60 dakika ostemperlenen numunelerden elde edilen S-N değerleri Tablo 4.6’da, Woehler eğrileri Şekil 4.11’de ve 430°C’de 60 dakika ostemperlenen numunelerden elde edilen S-N değerleri Tablo 4.7’de, Woehler eğrileri Şekil 4.12’de verilmiştir.

Tablo 4.4 Isıl işlemsiz numunelerin S-N değerleri.

Numune	Sıra No	Çevrim Sayısı (N)	Gerilme Genliği (S) (MPa)
Isıl işlemsiz	1	226.000	458
	2	526.000	384
	3	649.000	306
	4	1.172.750	287
	5	1.500.000	278
	6	2.186.000	264
	7	2.571.000	255
	8	3.692.000	240
	9	(kırılmadı) 10.100.000	233
	10	(kırılmadı) 13.566.000	225
	11	(kırılmadı) 13.266.000	203
	12	(kırılmadı) 10.866.000	153

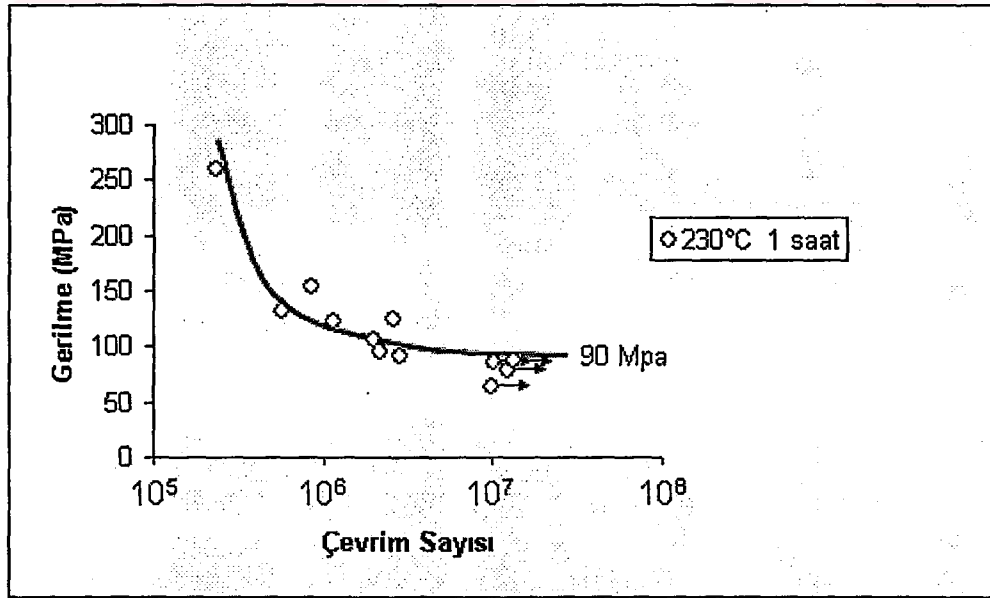


Şekil 4.9 Isıl işlemsiz numunelerin Woehler diyagramı.



Tablo 4.5 230°C’de 60 dakika ostemperlenn numunelerin S-N değerleri.

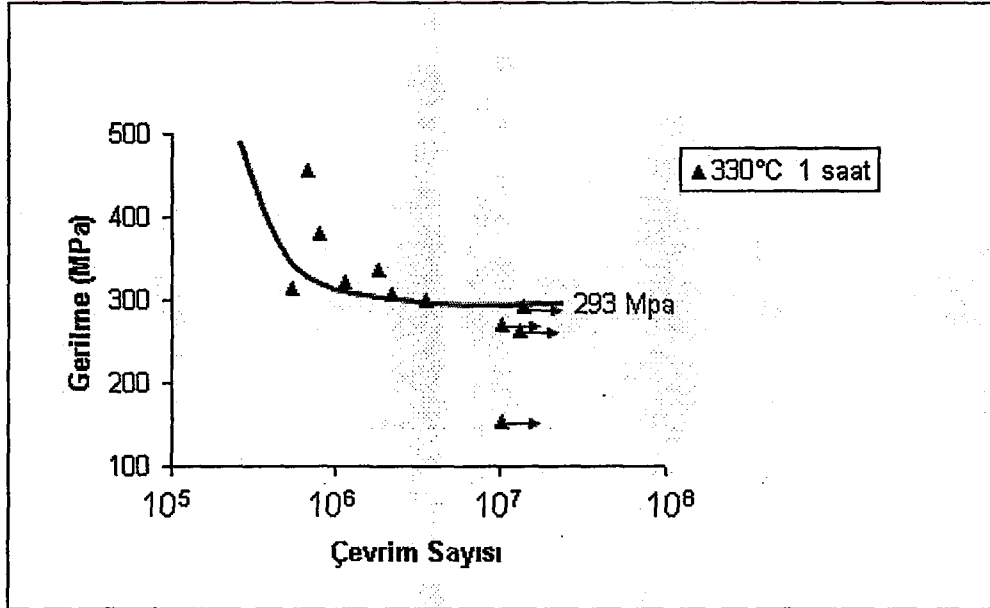
Numune	Sıra No	Çevrim Sayısı (N)	Gerilme Genliği (S) (MPa)
230°C 1 saat	1	234.250	263
	2	885.000	153
	3	560.500	137
	4	2.530.000	128
	5	1.130.000	123
	6	2.039.250	107
	7	2.083.500	99
	8	2.839.250	98
	9	(kırılmadı) 10.266.000	90
	10	(kırılmadı) 13.266.000	90
	11	(kırılmadı) 12.266.000	83
	12	(kırılmadı) 10.000.000	68



Şekil 4.10 230°C’de 60 dakika ostemperlenn numunelerin Woehler diyagramı.

Tablo 4.6 330°C’de 60 dakika ostemperlenn numunelerin S-N değerleri.

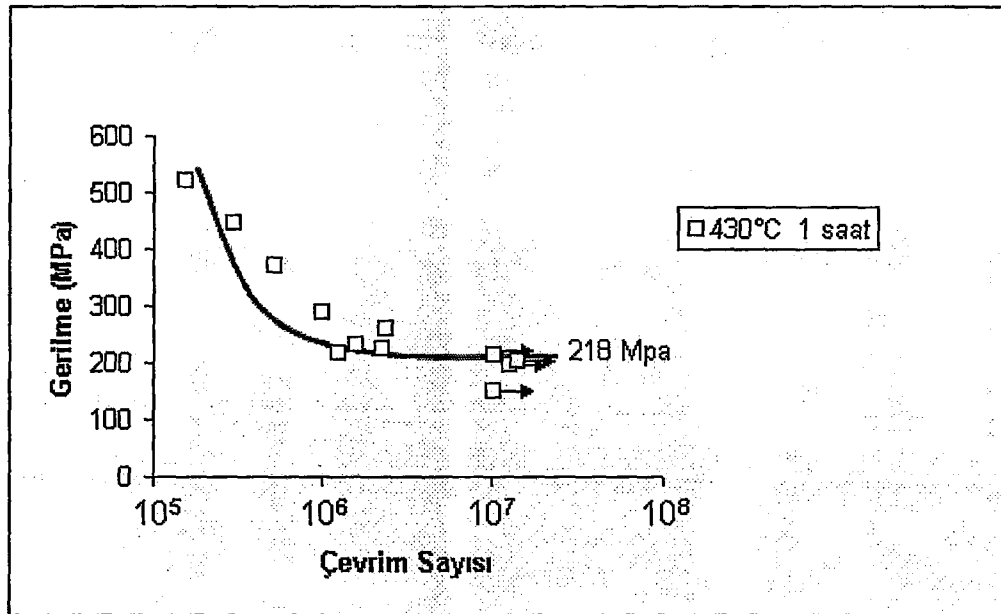
Numune	Sıra No	Çevrim Sayısı (N)	Gerilme Genliği (S) (MPa)
330°C 60 dakika	1	315.000	525
	2	687.000	456
	3	809.750	381
	4	1.866.000	338
	5	1.136.400	323
	6	536.400	315
	7	2.266.000	308
	8	3.566.000	300
	9	(kırılmadı) 13.866.000	293
	10	(kırılmadı) 10.266.000	270
	11	(kırılmadı) 13.266.000	263
	12	(kırılmadı) 10.156.000	153



Şekil 4.11 330°C’de 60 dakika ostemperlenn numunelerin Woehler diyagramı.

Tablo 4.7 430°C'de 60 dakika ostemperlendi numunelerin S-N değerleri.

Numune	Sıra No	Çevrim Sayısı (N)	Gerilme Genliği (S) (MPa)
430°C 1 saat	1	155.000	525
	2	287.000	450
	3	535.000	375
	4	972.000	293
	5	2.362.000	263
	6	1.563.250	240
	7	2.266.000	233
	8	1.266.000	225
	9	(kırılmadı) 10.266.000	218
	10	(kırılmadı) 13.866.000	210
	11	(kırılmadı) 12.266.000	203
	12	(kırılmadı) 10.266.000	153



Şekil 4.12 430°C'de 60 dakika ostemperlendi numunelerin Woehler diyagramı.

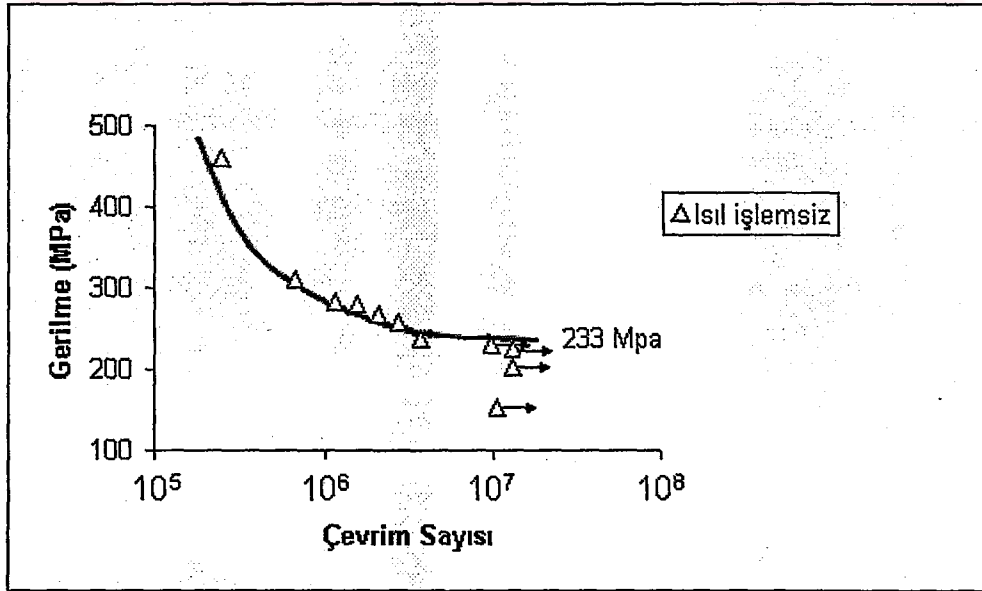
#### **4.2.2.7 İkinci Grup Deneyler (Ostemperleme Süresi Yorulma Dayanımı İlişkisi)**

2nci grup yorulma deneylerinde 330°C gibi sabit bir ostemperleme sıcaklığında 30 dakika, 60 dakika (1nci grupta gerçekleştirilmişti) ve 120 dakika sürelerle ostemperlenen (900°C'de 110 dakika ostenitlenmiş) numunelerin yorulma deneyleri gerçekleştirilerek ostemperleme süresinin OKGDD'lerin yorulma dayanımı üzerine etkileri ve aynı zamanda ısıl işlemsiz duruma göre meydana gelen artışların seviyeleri incelenmiştir.

Deneyler sonucunda ısıl işlemsiz numunelerden elde edilen (1nci aşamada gerçekleştirilmişti) S-N değerleri Tablo 4.8'de, Woehler eğrileri Şekil 4.13'te, 330°C'de 30 dakika ostemperlenen numunelerden elde edilen S-N değerleri Tablo 4.9'da, Woehler eğrileri Şekil 4.14'te, 330°C'de 60 dakika ostemperlenen numunelerden elde edilen (1nci aşamada gerçekleştirilmişti) S-N değerleri Tablo 4.10'da, Woehler eğrileri Şekil 4.15'te ve 330°C'de 120 dakika ostemperlenen numunelerden elde edilen S-N değerleri Tablo 4.11'de, Woehler eğrileri Şekil 4.16'da verilmiştir.

Tablo 4.8 Isıl işlemsiz numunelerin S-N değerleri.

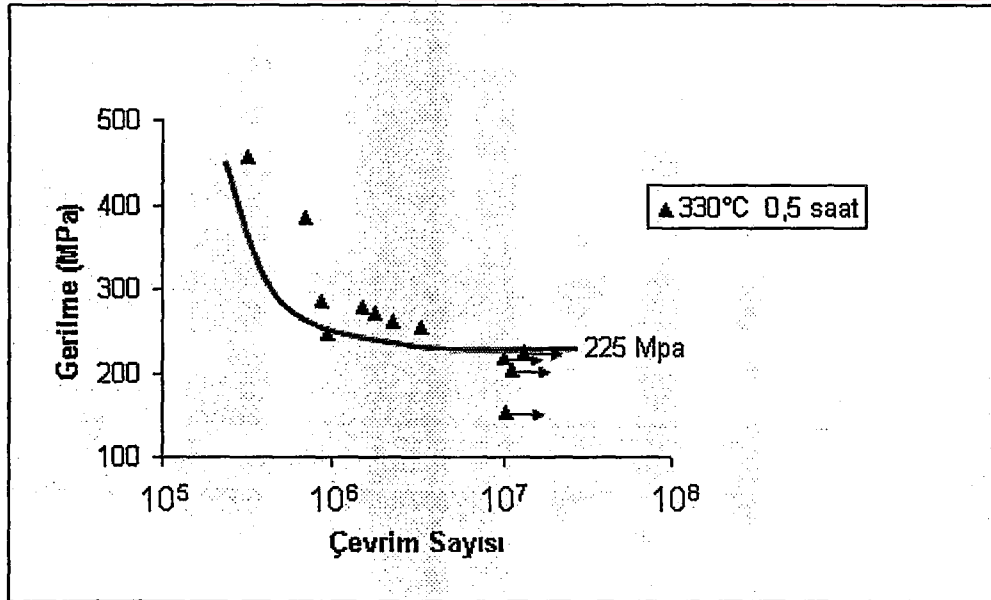
Numune	Sıra No	Çevrim Sayısı (N)	Gerilme Genliği (S) (MPa)
Isıl işlemsiz	1	226.000	458
	2	526.000	384
	3	649.000	306
	4	1.172.750	287
	5	1.500.000	278
	6	2.186.000	264
	7	2.571.000	255
	8	3.692.000	240
	9	(kırılmadı) 10.100.000	233
	10	(kırılmadı) 13.566.000	225
	11	(kırılmadı) 13.266.000	203
	12	(kırılmadı) 10.866.000	153



Şekil 4.13 Isıl işlemsiz numunelerin Woehler diyagramı.

Tablo 4.9 330°C'de 30 dakika ostemperlenn numunelerin S-N değerleri.

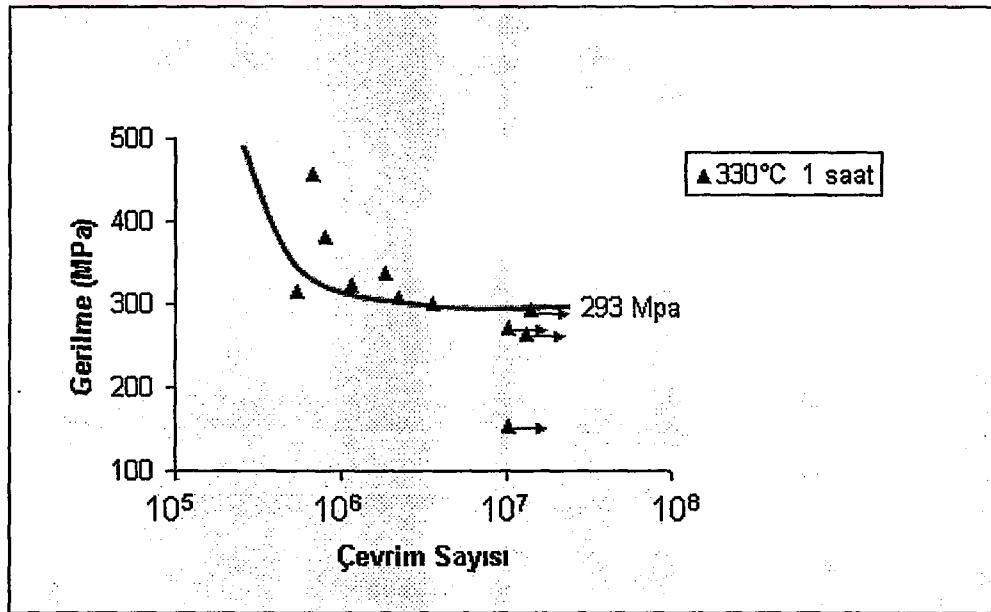
Numune	Sıra No	Çevrim Sayısı (N)	Gerilme Genliği (S) (MPa)
330°C 30 dakika	1	315.000	458
	2	687.000	384
	3	868.400	287
	4	1.503.500	278
	5	1.768.250	270
	6	2.266.000	263
	7	3.266.000	255
	8	939.750	248
	9	(kırılmadı) 13.266.000	225
	10	(kırılmadı) 10.166.000	218
	11	(kırılmadı) 11.266.000	203
	12	(kırılmadı) 10.266.000	153



Şekil 4.14 330°C'de 30 dakika ostemperlenn numunelerin Woehler diyagramı.

Tablo 4.10 330°C'de 60 dakika ostemperlenn numunelerin S-N değerleri.

Numune	Sıra No	Çevrim Sayısı (N)	Gerilme Genliği (S) (MPa)
330°C 60 dakika	1	315.000	525
	2	687.000	456
	3	809.750	381
	4	1.866.000	338
	5	1.136.400	323
	6	536.400	315
	7	2.266.000	308
	8	3.566.000	300
	9	(kırılmadı) 13.866.000	293
	10	(kırılmadı) 10.266.000	270
	11	(kırılmadı) 13.266.000	263
	12	(kırılmadı) 10.156.000	153

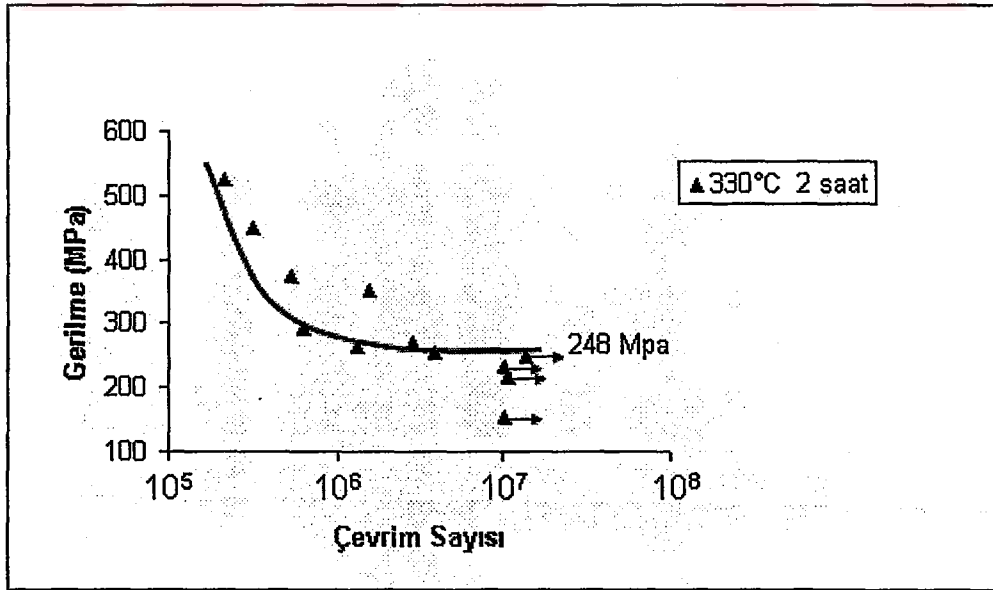


Şekil 4.15 330°C'de 60 dakika ostemperlenn numunelerin Woehler diyagramı.



Tablo 4.11 330°C’de 120 dakika ostemperlennn numunelerin S-N değerleri.

Numune	Sıra No	Çevrim Sayısı (N)	Gerilme Genliği (S) (MPa)
330°C 120 dakika	1	215.000	525
	2	317.000	450
	3	535.000	375
	4	1.563.250	353
	5	625.000	293
	6	2.863.250	270
	7	1.325.000	263
	8	3.863.250	255
	9	(kırılmadı) 13.866.000	248
	10	(kırılmadı) 10.100.000	233
	11	(kırılmadı) 10.766.000	218
	12	(kırılmadı) 10.266.000	153

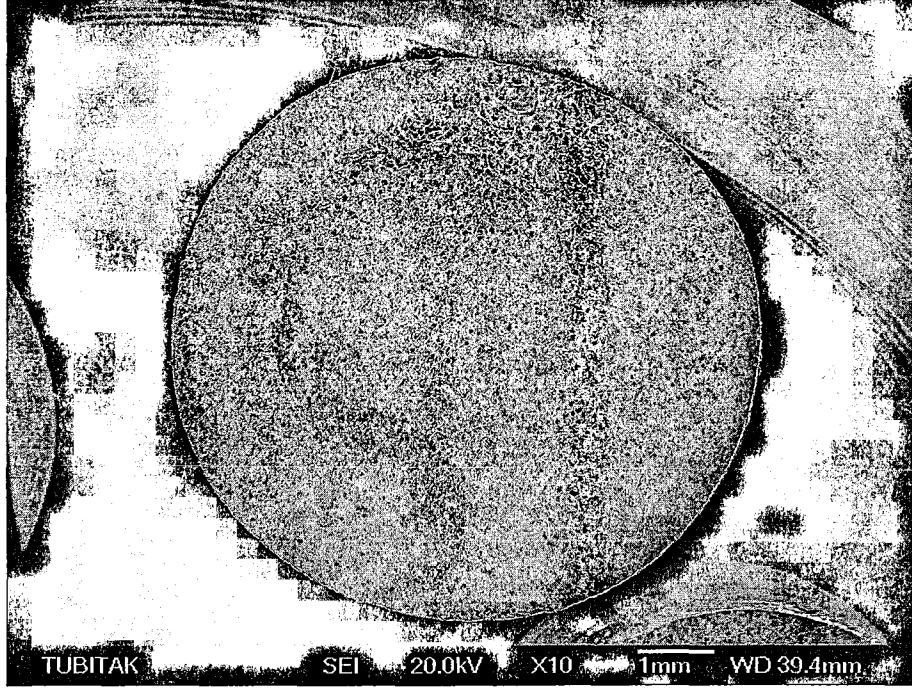


Şekil 4.16 330°C’de 120 dakika ostemperlennn numunelerin Woehler diyagramı.

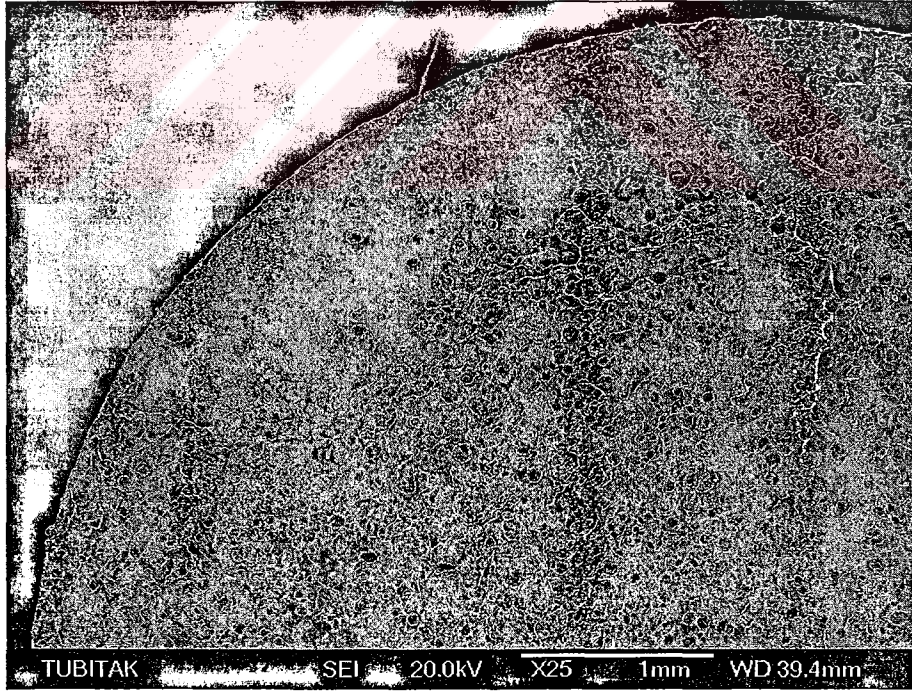
### 4.2.3 Kırılma Yüzeyi İnceleme Deneyleri

Yorulma deneylerinde kullanılan OKGDD numunelerinin (ısıtıl işlemsiz, 230°C, 330°C ve 430°C'de 60 dakika ostemperlenen) yorulma deneyleri sonrası kırılmış olanlarından her grup için 1'er adet numune seçilerek yorulma kırılması kırık yüzeyleri taramalı elektron mikroskobunda (SEM) incelenmiştir. İncelemeler Tübitak Marmara Araştırma Merkezinde yapılmıştır. Kırılan numunelerin kırık yüzeyleri 10X, 25X, 50X, 100X ve 500X oranlarında büyütülerek SEM fotoğrafları çekilmiştir. Kırılma yüzeylerinin resimleri Şekil 4.(17-22)'de verilmiştir.

SEM fotoğrafları incelendiğinde tüm numunelerin kırık yüzeylerinde oluşan yorulma çatlaklarının küre matris ara yüzeyinde başladığı görülmektedir. Özellikle küredeki girinti ve çıkıntılar veya kürede meydana gelen bozulmalar mikro yapıda bir çentik gibi davranmakta ve yorulma çatlağını başlatmaktadır. Bu yorulma çatlaklarının ferrit plakalarını kesip içinden geçmek yerine ona paralel ilerleme eğiliminde oldukları, yüksek karbonlu ostenit tanelerinin yorulma çatlağının ilermesine bir engel teşkil ettiği, konu ile ilgili yapılan bazı çalışmalarda belirtilmiştir [27, 29, 33].

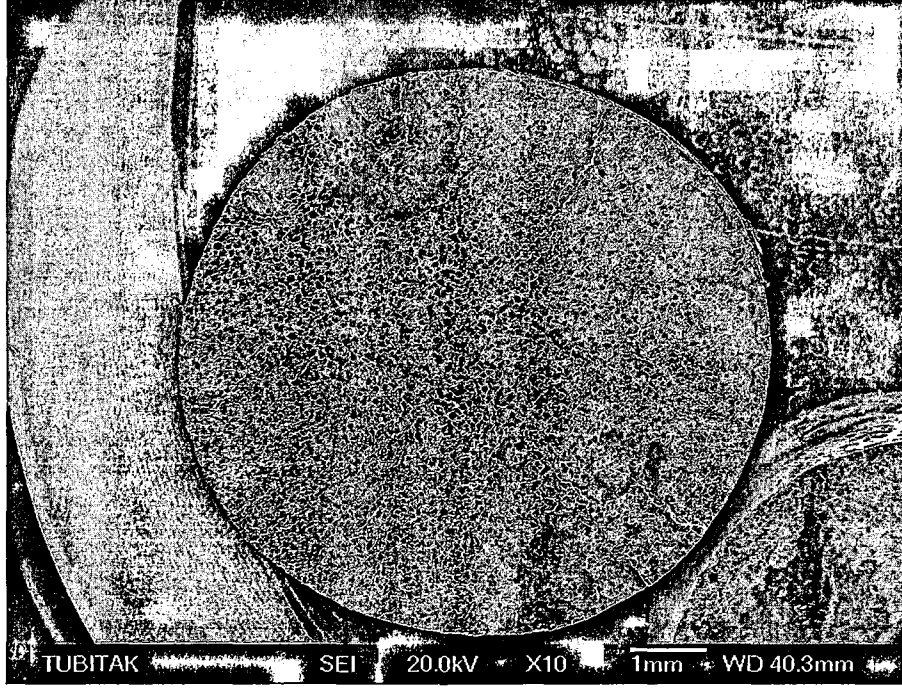


Şekil 4.17 230°C'de 1 saat ostemperlenen numunenin kırık yüzeyinin 10X görüntüsü.

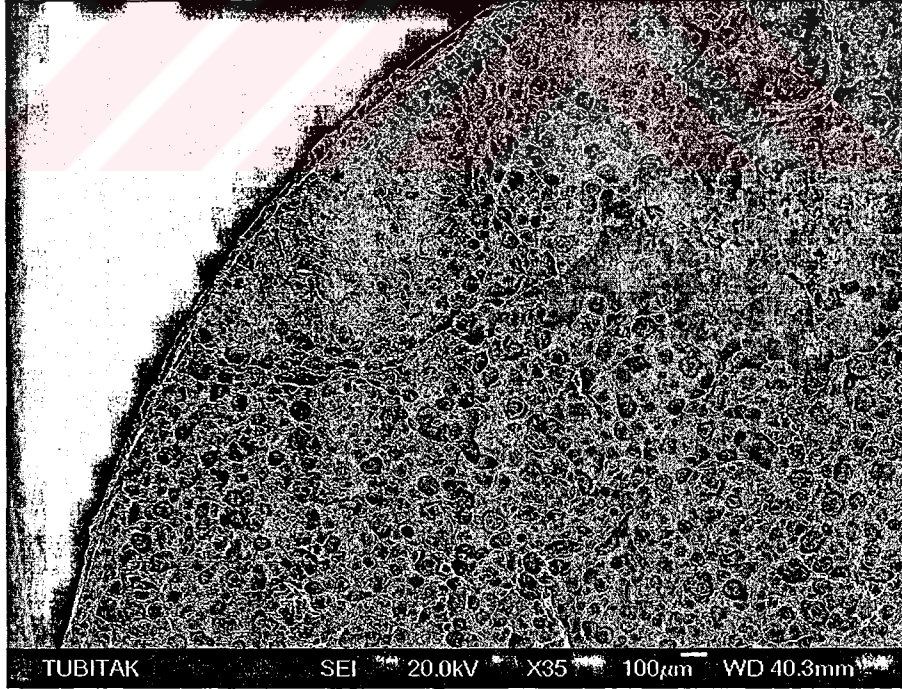


Şekil 4.18 230°C'de 1 saat ostemperlenen numunenin kırık yüzeyinin 25X görüntüsü.



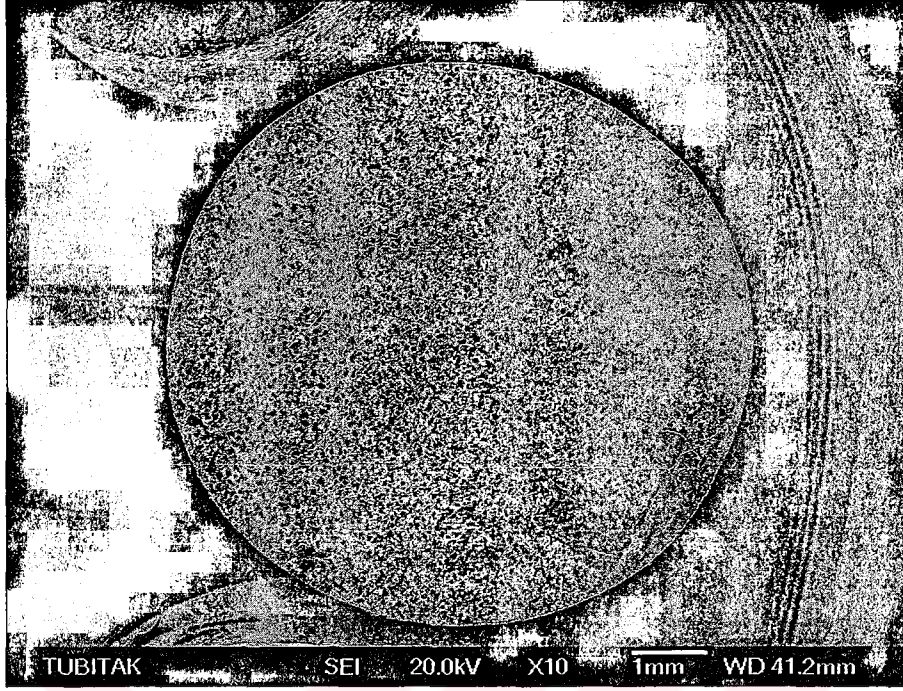


Şekil 4.19 330°C'de 1 saat ostemperlenen numunenin kırık yüzeyinin 10X görüntüsü.

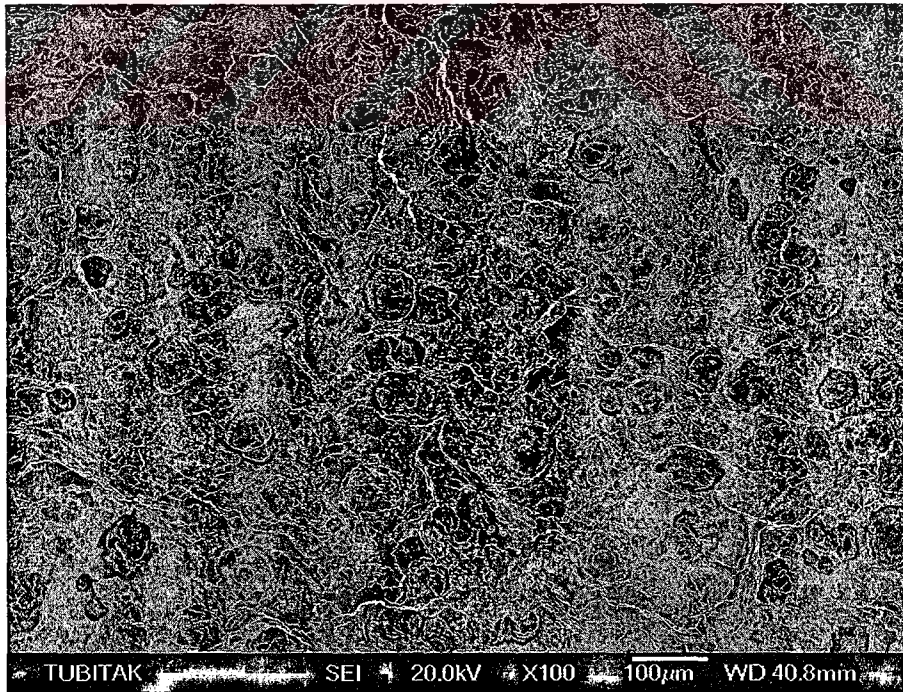


Şekil 4.20 330°C'de 1 saat ostemperlenen numunenin kırık yüzeyinin 35X görüntüsü.





Şekil 4.21 430°C'de 1 saat ostemperlenen numunenin kırık yüzeyinin 10X görüntüsü.



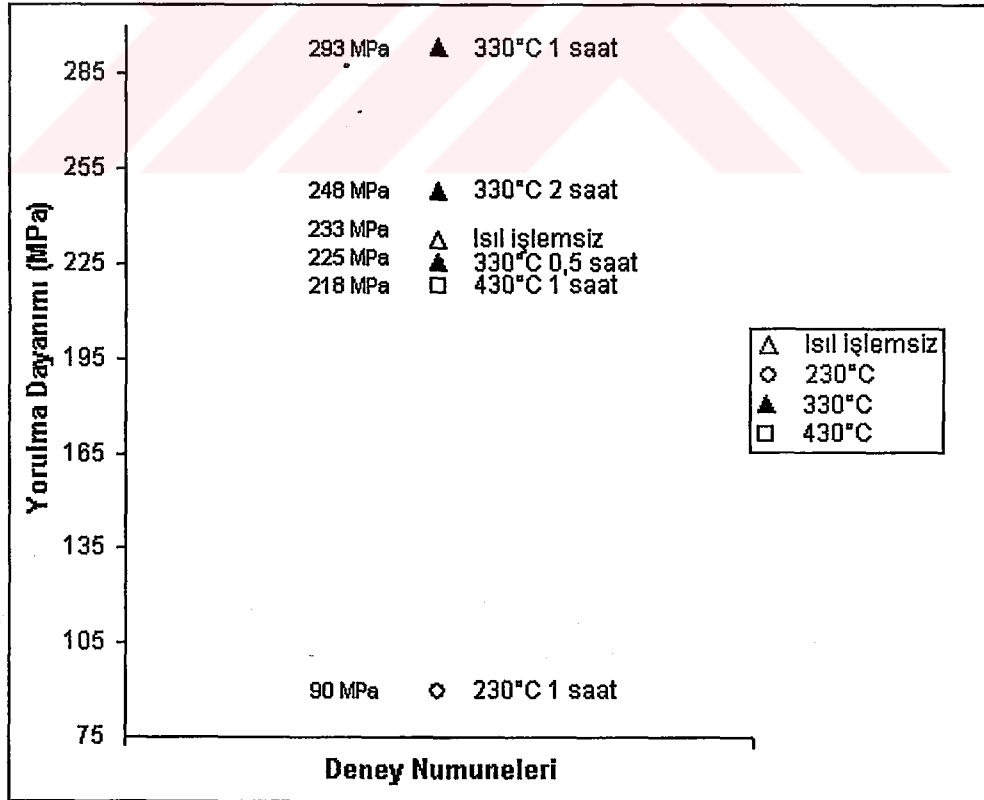
Şekil 4.22 430°C'de 1 saat ostemperlenen numunenin kırık yüzeyinin 100X görüntüsü.

### 4.3 Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Deneyler sonucunda her grup numene için elde edilen yorulma dayanımları Tablo 4.12’de, bu değerleri gösteren grafik ise şekil 4.23’te verilmiştir.

Tablo 4.12 Bütün KGDD gruplarının yorulma dayanımları..

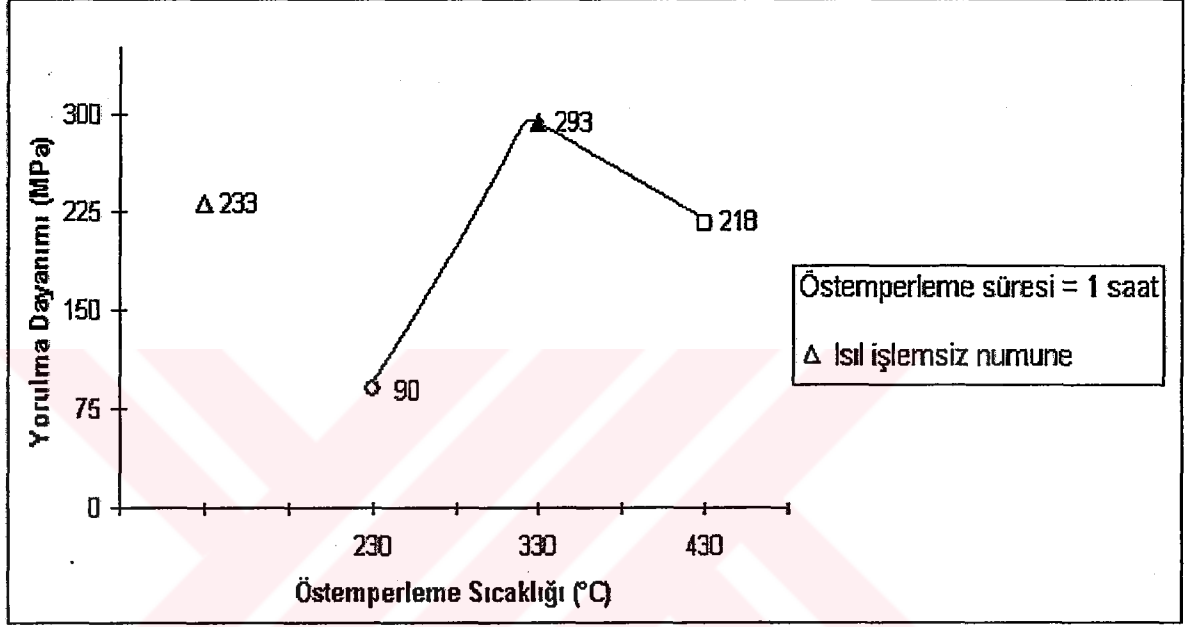
Sıra No	Numune Grubu	Yorulma Dayanımı (MPa)
1	Isıl İşlemsiz	233
2	230°C’de 1 saat	90
3	330°C’de 0.5 saat	225
4	330°C’de 1 saat	293
5	330°C’de 2 saat	248
6	430°C’de 1 saat	218



Şekil 4.23 Bütün KGDD gruplarının yorulma dayanımları.

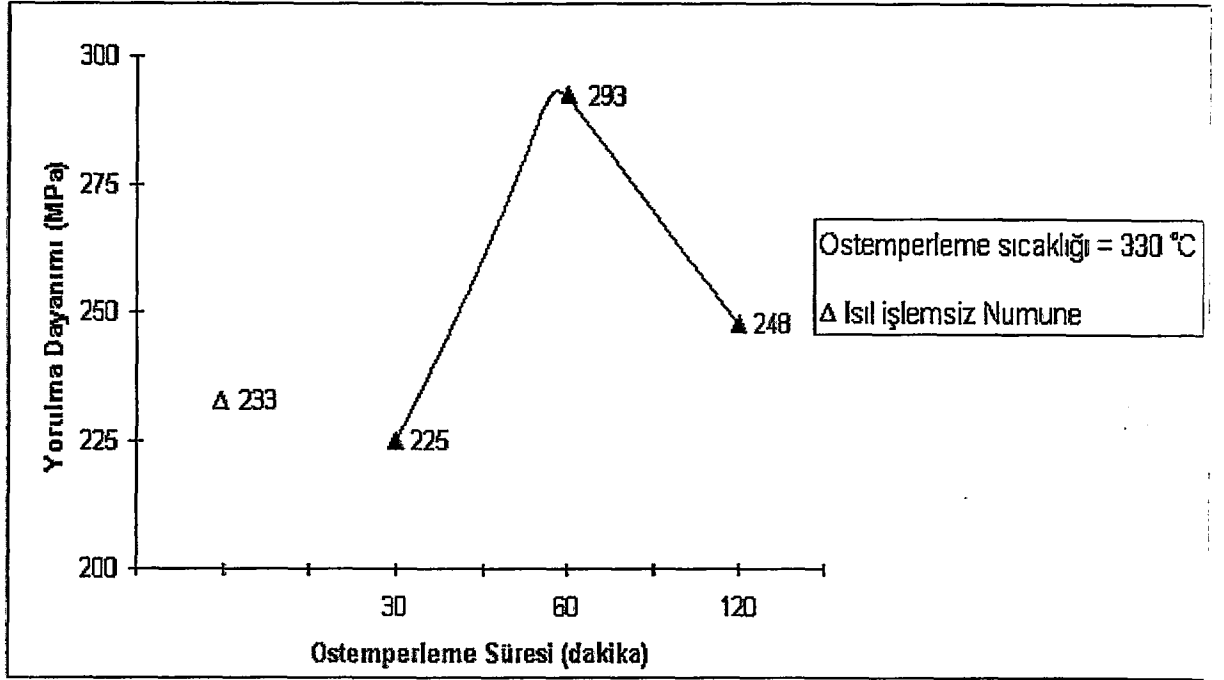


1nci grup yorulma deneylerinden elde edilen sonuçlar doğrultusunda 230°C, 330°C ve 430°C’de 1 saat sabit gibi sabit bir sürede ostemperlenen OKGDD’lerin yorulma dayanımlarının ostemperleme sıcaklığı ile nasıl değiştiğini ve ısılsiz numuneye göre karşılaştırılmalarını gösteren grafik Şekil 4.24’te verilmiştir..



Şekil 4. 24 Ostemperleme sıcaklığının KGDD’nin yorulma dayanımına etkisi (Ostemperleme süresi 1 saat).

2nci grup yorulma deneylerinden elde edilen sonuçlar doğrultusunda 330°C’de 30, 60 ve 120 dakika sürelerle ostemperlenen OKGDD’lerin yorulma dayanımlarının ostemperleme süresindeki artış ile nasıl değiştiğini ve ısılsiz numuneye göre karşılaştırılmalarını gösteren grafik Şekil 4.25’te verilmiştir.



Şekil 4.25 Ostemperleme süresinin OKGDD'nin yorulma dayanımına etkisi (Ostemperleme sıcaklığı 330°C).

#### 4.4 Tartışma

##### 4.4.1 Ostemperleme Sıcaklığının Yorulma Dayanımına Etkisi (Grup 1)

Şekil 4.24'teki grafik incelendiğinde ostemperleme sıcaklığı 230°C'den 330°C'ye yükseldiğinde yorulma dayanımı artarken, sıcaklık 330°C'den 430°C'ye yükseldiğinde yorulma dayanımı azalmaktadır. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde alaşımlı OKGDD'lerin ostemperleme sıcaklığı 360°C olduğunda yorulma dayanımı en yüksek değerine ulaşmaktadır [23-26, 28, 30-32]. 360°C'den yüksek sıcaklıklarda ise azalma görülmektedir [23-26, 28, 30-32]. Bizim çalışmamızda kullandığımız OKGDD'ler alaşımsız olmasına rağmen ostemperleme sıcaklığının değişimine karşı davranışı alaşımlı OKGDD'lerin davranışına benzer çıkmıştır. Bu durumun beklenen bir sonuç olduğu söylenebilir. Çünkü OKGDD'lere alaşım elementlerinin eklenmesinin temel nedeni uygun işlem aralığının geniş tutulabilmesini sağlamaktır ki bu da ostemperleme süresi ile ilgilidir (Grup 2'de ayrıntılı olarak ele alınmıştır) [18,19].

OKGDD'lerin yorulma dayanımının ostemperleme sıcaklığının değişimiyle artması veya azalmasında osferrit mikro yapı içerisindeki karbonca zengin ostenit miktarının hayati önemi vardır. Çünkü karbonca zengin ostenit taneleri yorulma çatlaklarının ilerlemesini önleyici bir etki yapmaktadır. Dolayısıyla osferrit mikro yapı içerisinde ne kadar çok karbonca zengin ostenit bulunursa yorulma çatlakları o kadar engelle karşılaşacaktır ve bu da yorulma dayanımının artmasına neden olacaktır. Burada önemle üzerinde durulması gereken bir nokta da yüksek karbonlu ostenit tanesinin % karbon içeriğidir. Yüksek karbonlu ostenit içerisindeki % karbon miktarı ostenit taneciğinin yorulma çatlaklarına karşı dayanımı da artmaktadır [18,19].

230°C gibi düşük ostemperleme sıcaklıklarda karbonun ferrit plakalarından osferrit içerisindeki yüksek karbonlu ostenite difüzyon hızı düşüktür ve bu yüzden ferrit ve yüksek karbonlu ostenit tanecikleri oluşmamakta veya çok az oluşmaktadır. Örneğin yüksek karbonlu ostenit miktarı % 10'u aşamamaktadır. 330°C-370°C gibi yüksek ostemperleme sıcaklıklarda karbonun ferrit plakalarından osferrit içerisindeki yüksek karbonlu ostenite difüzyon hızı yüksektir ve bu yüzden yüksek sıcaklıklarda yüksek karbonlu ostenit miktarı % 40'ları bile aşabilir. Diğer taraftan ostemperleme sıcaklığı 430°C gibi daha da yüksek sıcaklıklara ulaştığında karbonun difüzyon hızının yüksek olmasından dolayı yüksek karbonlu ostenit taneciklerinin sayısı fazla olmakta fakat bu taneciklerin % karbon içeriği az olduğu için yorulma çatlaklarına karşı daha az dayanıklı olmaktadır. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda 2nci kademe reaksiyonun başlaması daha erken olmakta ve yüksek karbonlu ostenit fazı ferrit + karbür fazına dönüşmektedir ki bu mikro yapının sert ve kırılğan olması anlamına gelir. Dolayısıyla yorulma dayanımında azalma meydana gelir. (Şekil 2.14) [15,18,19].

230°C'de 1 saat ostemperlenen numunenin yorulma dayanımı 90 MPa gibi çok düşük bir değer çıkmıştır. Isıl işlemsiz numuneye göre yaklaşık % 50'lik bir azalma meydana gelmiştir. Bu sonuç literatürdeki çalışmalara paralellik göstermektedir [23-26, 28, 30-32, 36]. 230°C'nin ostemperleme sıcaklığı için çok düşük bir sıcaklık olduğu söylenebilir. Bazı araştırmacılar ostemperleme sıcaklık aralığının 235°C-400°C olması gerektiğini vurgulamışlardır [12,13,18,19]. Zaten düşük sıcaklıklarda (330°C'nin altında) yapılan ostemperleme işleminde elde edilen

mikro yapı alt beynit olarak bilinir ve yaklaşık olarak % 10 yüksek karbonlu ostenit içerir. Ayrıca beynitik dönüşümün 1nci kademesinde üst beynite göre karbür içerdiği için 2nci kademe reaksiyonu gerçekleşmemiş olsa bile matris yapıda karbürler bulunur (Şekil 2.12). 1nci kademe reaksiyonunda ferrit ve yüksek karbonlu ostenite dönüşemeyen ostenit kararsız haldedir ve numune oda sıcaklığına geldiğinde bu kararsız ostenit (ferrit ve yüksek karbonlu ostenite dönüşemeyen) mikro yapıda martenzite dönüşerek matrisin sert ve kırılğan olmasına neden olur ki bu da yorulma dayanımını düşürür. Tablo 4.2'ye bakıldığında sertlik değeri en fazla olan numunenin 230°C'de 1 saat ostemperlenen numune olduğu görülecektir ki bunun uygun olduğu söylenebilir. Literatür çalışmalarına bakıldığında düşük sıcaklıklarda ostemperlenen OKGDD'lerin yorulma dayanımları da düşük çıkmıştır [23-26, 28, 30-32, 36]. Çünkü matris yapıda ki yüksek karbonlu ostenit miktarının azlığı yorulma çatlaklarının daha çabuk ve kolay ilerlemesine neden olurken mikro yapıdaki martenzitler çentik etkisi yaparak yorulma çatlaklarının başlamasına neden olmaktadır. Dolayısıyla 230°C'de 1 saat ostemperlenen numunenin düşük yorulma dayanımının en düşük çıkmasının uygun olduğu söylenebilir.

330°C'de 1 saat ostemperlenen numunenin yorulma dayanımı 293 MPa olarak gerçekleşmiştir. Bu değer yorulma dayanımları içerisinde en yüksek değerdir (Şekil 4.31). Döküm numuneye göre yaklaşık olarak % 25'lik bir artış sağlanmıştır. Literatürdeki çalışmalarda alaşımlı OKGDD'lerden elde edilen en yüksek yorulma dayanımı, en fazla darbe dayanımının ve en çok miktarda yüksek karbonlu ostenit miktarının (yaklaşık % 40) elde edildiği sıcaklık olan 360°C'de 2 saat ostemperlenen numunelerde gerçekleştiği bildirilmiştir.[23-26, 28, 30-32]. Bizim çalışmamızda kullandığımız OKGDD numuneleri alaşımsız olduğu için, 360°C'de 2 saat ostemperleme koşuluna en yakın numunenin 330°C'de 1 saatlik ostemperlenen numune olduğu söylenebilir. Çünkü alaşım elementleri uygun işlem aralığının daha uzun olmasını sağlamaktadır [18,19]. Literatürdeki OKGDD'lerin alaşımlı olmasından dolayı 360°C'de 2-2.5 saatlik bir sürenin uygun işlem aralığı için yeterli olduğu söylenebilir. Diğer taraftan bizim çalışmamızda kullandığımız OKGDD'ler alaşımsız olduğu için uygun işlem aralığının daha dar olduğu ve 1-1.5 saat gibi daha kısa sürelerde ulaşıldığı söylenebilir (Şekil 2.13). Bu nedenle 330°C'de 1 saat

ostemperlenen numunenin uygun işlem aralığında olduğu yorumu yapılabilir ve en yüksek yorulma dayanımına sahip olmasının uygun olduğu söylenebilir.

430°C'de 1 saat ostemperlenen numunenin yorulma dayanımı 218 MPa olarak döküm numuneden 15 MPa düşük çıkmıştır. Yüksek ostemperleme sıcaklıklarında (370°C-400°C'de) yüksek karbonlu ostenit miktarı belirgin bir şekilde düşmektedir (Şekil 2.14) [18,19]. Bunun temel nedeni 2nci kademe reaksiyonun daha erken başlaması ve yüksek karbonlu ostenit fazının ferrit + karbür fazına dönüşmeye başlamasıdır. Bu nedenle mikro yapı daha sert ve kırılgan olurken darbe dayanımı düşmektedir. Dolayısıyla yorulma dayanımında azalma meydana gelmektedir. Tablo 4.2'ye bakıldığında 430°C'de 1 saat ostemperlenen numunenin 4.5 J gibi en düşük darbe dayanımına sahip olduğu görülecektir. Yorulma dayanımının çekme veya sertlikle direkt bağlantılı olmadığı, darbe dayanımı ile doğrudan bağlantılı olduğu bir çok araştırmada belirtilmiştir [23-28]. Dolayısıyla 430°C'de 1 saat ostemperlenen numunenin düşük yorulma dayanımı göstermesinin normal olduğu söylenebilir.

#### 4.4.2 Ostemperleme Süresinin Yorulma Dayanımına Etkisi (Grup 2)

Şekil 4.25'teki grafik incelendiğinde ostemperleme süresi 30 dakikadan 60 dakikaya yükselirken yorulma dayanımı artmakta iken süre 60 dakikadan 120 dakikaya yükselirken yorulma dayanımı azalmaktadır. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde alaşımli OKGDD'lerden elde edilen en yüksek yorulma dayanımı 360°C'de 120 dakika süre ile ostemperleme olduğu belirtilmiştir [23-26, 28, 30-32]. Bunun nedeni alaşım elementlerinin OKGDD'lerin uygun işlem aralığını 2-2.5 saate kadar uzatabilmeleridir [18,19]. Bizim çalışmamızda kullandığımız OKGDD'ler alaşımatsız olduğu için uygun işlem aralığının 1-1.5 saat gibi daha kısa olması gerektiği söylenebilir. Bu nedenle 330°C'de 1 saat ostemperlenen numunenin 330°C'de 1 ve 2 saat ostemperlenen numuneden daha fazla yorulma dayanımı göstermesinin uygun olduğu söylenebilir. Çünkü alaşımatsız OKGDD numuneleri için 2 saatlik bir ostemperleme süresi uygun işlem aralığının aşılması ve 2nci kademe reaksiyonun başlaması anlamına gelir ki bu da mikro yapıda sertliğe ve kırılganlığa

neden olan karbürlerin oluşması demektir. 30 dakikalık bir ostemperleme süresinin ise uygun işlem aralığı için yeterli olmadığı söylenebilir (Şekil 2.12).





#### 4. SONUÇLAR

1. Yorulma deneyleri sonucunda en yüksek yorulma dayanımı 330°C'de 1 saat östemperlenen numunede 293 MPa, en düşük yorulma dayanımı 230°C'de 1 saat ostemperlenen numunede 90 MPa olarak gerçekleşmiştir.. Yorulma dayanımındaki artış oranı % 25, düşüş oranı % 50 olarak gerçekleşmiştir.

2. Ostemperleme sıcaklığı 230°C'den 330°C'ye yükselirken yorulma dayanımı artmış, 330°C'den 430°C'ye yükselirken azalmıştır.

3. 330°C ostemperleme sıcaklığında ostemperleme süresi 30 dakikadan 60 dakikaya yükselirken yorulma dayanımı artmış, 60 dakikadan 120 dakikaya yükselirken azalmıştır. Deneylerde kullanılan alaşımsız OKGDD numuneleri için uygun işlem aralığının 1 saatten fazla 2 saatten az olduğu tespit edilmiştir.

4. OKGDD'lerin yorulma dayanımının çekme ve sertlik değerleri ile doğrudan ilişkisi olmadığı, darbe tokluğu ile direkt ilişkisi olduğu tespit edilmiştir.

---

5. OKGDD'lerin östemperleme sıcaklıkları için 230°C'nin çok düşük 430°C'nin yüksek olduğu belirlenmiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] Tahery, A. S., "Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin aşınma özellikleri", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Malzeme Bilimi Programı, İstanbul, (1995).
- [2] Baydoğan, M., "GGG-60 sınıfı küresel grafitli dökme demirlerde östemperleme ısıl işleminin çekme, yorulma ve aşınma özelliklerine etkisi", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (1996).
- [3] Askeland, D. R., The science and engineering of materials, ed. Erdoğan M., cilt 1, Nobel yayın dağıtım, Ankara, (1998), p. 332-346.
- [4] Kökden, M. U., "GGG-50 ve GGG-80 sınıfı küresel grafitli dökme demirlerin abrasif aşınma davranışına östemperleme işleminin etkisi", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (1998).
- [5] Gencel, Mit, S., "Küresel grafitli dökme demirlerde ısıl işlem koşullarının mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Balıkesir, (2001).
- [6] Ferizoğlu, M. T., "Küresel grafitli dökme demir (KGDD) dökümlerde görülen başlıca hatalar", Ankara Sincan Küçük İşletmeleri Geliştirme Merkez Müdürlüğü, Ankara, (1991).
- [7] Ferizoğlu, M. T., "Küresel grafitli dökme demirlerde magnezyum işlemi", Ankara Sincan Küçük İşletmeleri Geliştirme Merkez Müdürlüğü, Ankara, (1992).
- [8] Ferizoğlu, M. T., "Dökme demirlerde aşılama ve aşılایıcılar", KOSGEB, Ankara, (1988).
- [9] Ferizoğlu, M. T., "Küresel grafitli dökme demirlerde kaliteye etki eden bazı parametreler", Ankara Sincan Küçük İşletmeleri Geliştirme Merkez Müdürlüğü, Ankara, (1991).
- [10] Türk Standardı, "Dökümler – Küresel grafitli dökme demirler", TS 526 EN 1563, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, (2000), 1-13.

[11] Birgi, S., "Alaşımız küresel grafitli dökme demirlerde termal çevrimli östenitlemenin ve kumlamanın östemperleme sonucu yorulma ömrüne etkisi", Yüksek Lisans Tezi, Osman Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Eskişehir, (1999).

[12] Çögen, O., "Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin yorulma mukavemeti", Yüksek Lisans Tezi, Osman Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Eskişehir, (1996).

[13] Sorelmetal, Rio Tinto iron & titanium inc., "Ductile iron data for design engineers, Section V, Austempered ductile iron", Montreal, Quebec, Canada

[14] Ferizoğlu, M. T., Öztürk Ş., "Beynitik Küresel dökme demir üzerine bir çalışma", Ankara Sincan Küçük İşletmeleri Geliştirme Merkez Müdürlüğü, Ankara, (1988).

[15] Chang, L. C., "Carbon content of austenite in austempered ductile iron", *Scripta Materialia*, Vol. 39, No.1, (1998), 35-38.

[16] Trudel, A., Gagne, M., "Effect of composition and heat treatment parameters on the characteristics of austempered ductile iron", *Canadian Metallurgical Quarterly*, Vol. 36, No.5,(1997), 289-298.

[17] Thomson, R. C., James, J. S., Putman, D. C., "Modelling microstructural evolution and mechanical properties of austempered ductile iron", *Materials and Science Technology*, Vol. 16, (2000).

[18] Lin, B. Y., Chen, E. T., Lei, T. S., "The effect of alloy elements on the microstructure and properties of austempered ductile iron", *Scripta Metallurgica et Materialia*, Vol. 32, No.9, (1995), 1363-1367.

[19] Değer, M., "Perlitik-ferritik ve perlitik küresel grafitli dökme demirlerin yorulma dayanımı üzerine mikro yapı ve yüzey işlemlerinin etkisi", Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Ana Bilim Dalı, Konya, (1995).

[20] Türk Standardı, "Metallerin Yorulma deneyi genel prensipleri", TS 1487, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, (1974), 1-17.

[21] Karagöz, Y., "Metal malzemelerde mekanik yorulma", *Kalıp Malzeme & Yan sanayi Teknolojisi*, Sayı 5, (2000).

[22] Karagöz, M., Akagündüz B., "Yorulma olayı ve otomat çeliğinde yorulmanın deneysel olarak incelenmesi", Kara Harp Okulu Öğt.Bşk.lığı Tek. Bil. Böl. Bşk.

- [23] Lin, C. K., Lai, P. K., Shih, T. S., "Influence of microstructure on fatigue properties of austempered ductile irons-I. High cycle fatigue", *Int. J. Fatigue*, Vol. 18, No. 5, (1996), 297-307.
- [24] Lin, C. K., Wei, J. Y., "High-cycle fatigue of austempered ductile irons in various, sized Y-block castings", *Materials Transactions*, Vol. 38, No. 8, (1997), 682-691.
- [25] Lin, C. K., Wei, J. Y., "Low-cycle fatigue of austempered ductile irons in various, sized Y-block castings", *Materials Transactions*, Vol. 38, No. 8, (1997), 692-700.
- [26] Lin, C. K., Lee, W. J., "Effects of highly stressed volume on fatigue strength of austempered ductile irons", *Int. J. Fatigue*, Vol. 20, No. 4, (1998), 301-307.
- [27] Marrow, T. J., Çetinel, H., "Short fatigue cracks in austempered ductile cast iron (ADI)", *2000 Blackwell science Ltd. Fatigue fract engng mater struct* 23, (2000), 425-434.
- [28] Faubert, G. P., Moore, D. J., Rundman, K. B., "Heavy-section ADI: Fatigue Properties in the As-cast and austempered conditions", *AFS Transactions*, , (1991).
- [29] Jen, K. P., Wu, J., Kim, S., "Study of fracture and fatigue behavior of austempered ductile iron", *AFS Transactions*, , (1992), cilt 92.
- [30] Kim, J. H., Kim, M. G., "Influence of microstructure on fatigue limit of high strength ductile irons", *Key engineering Materials Vols.*, 183-187, (2000), 933-938.
- [31] Bartosiewicz, L., Krause, A. R., Alberts, F. A., Singh, I., Putatunda, S. K., "Influence of microstructure on high cycle fatigue behavior of austempered ductile cast iron", *Materials Characterization*, Vol. 30, (1993), 221-234.
- [32] Bahmani, M., Elliot, R., Varahram, N., "The relationship between fatigue strength and microstructure in an austempered Cu-Ni-Mn-Mo alloyed ductile iron", *Journal of Materials Science* 32, (1997), 5383-5388.
- [33] Krishnaraj, D., Rao, K. V., Seshan, S., "Influence of matrix structure on fatigue behavior of ductile iron", *AFS Transactions*, , (1989), cilt 97.
- [34] Stokes, B., Reed, P. A. S., "Fatigue analysis of austempered ductile iron suitable for automotive camshaft applications", *Materials Research Group, School of Engineering Science, University of Southampton*,.

[35] Hayrynen, K. L., Moore, D. J., Rundman, K. B., "Tensile and fatigue properties of relatively pure ADI", *AFS Transactions*.

[36] Shanmugam, P., Rao, P. P., Udupa, K. R., Venkataraman, N., "Effect of microstructure on the fatigue strength of an austempered ductile iron", *Journal of Materials Science* 29, (1994), 4933-4940.

[37] Luo, J., Harding, R. A., Bowen, P., "Evaluation of the the fatigue Behavior of ductile irons with various matrix microstructures", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 33A, (2002), 3719.

